



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ-ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΓΙΑ ΤΟΝ ΤΟΜΕΑ ΤΩΝ
ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΤΟΥ

Πελοπίδα Ι. Σίσκου

Αθήνα, Ιούλιος 2015



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ-ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΓΙΑ ΤΟΝ ΤΟΜΕΑ ΤΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΤΟΥ

Πελοπίδα Ι. Σίσκου

Συμβουλευτική Επιτροπή: Π. Κάπρος, Καθηγητής ΕΜΠ (επιβλέπων)
Κ. Βουρνάς, Καθηγητής ΕΜΠ
Σ. Καβατζά, Λέκτορας ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την επταμελή εξεταστική επιτροπή την: 6 / 7 / 2015

.....
Π. Κάπρος,
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Κ. Βουρνάς,
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Σ. Καβατζά,
Λέκτορας ΕΜΠ

.....
Γ. Κορρές,
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Ε. Σαμπράκος,
Καθηγητής ΠΑ.ΠΕΙ

.....
Α. Κλαδάς,
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Σ. Παπαθανασίου,
Αν. Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούλιος 2015

.....
Πελοπίδας Ι. Σίσκος

Διδάκτωρ Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Πελοπίδας Ι. Σίσκος, 2015

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Η έγκριση της διδακτορικής διατριβής από την Ανωτάτη Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Ε.Μ.Πολυτεχνείου δεν υποδηλώνει αποδοχή των γνώμων του συγγραφέα. (Ν. 5343/1932, Άρθρο 202).

Στην Οικογένειά μου

Πρόλογος

Η διδακτορική διατριβή εκπονήθηκε στη Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου, στο εργαστήριο Ενέργειας-Οικονομίας-Περιβάλλοντος (E3MLab), το διάστημα Νοέμβριος 2008 – Ιούλιος 2015.

Φτάνοντας στο τέλος αυτής της διαδρομής, που δεν είναι παρά η αρχή της επόμενης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους ανθρώπους που συνέβαλλαν με ποικίλους τρόπους στην πραγματοποίησή της.

Η διατριβή πραγματοποιήθηκε υπό την επίβλεψη, τη συνεχή παρακολούθηση και καθοδήγηση του Καθηγητή κ. Π. Κάπρου, στον οποίο θα ήθελα να εκφράσω τις πιο θερμές μου ευχαριστίες. Η συνεργασία με τον κ. Κάπρο αποτέλεσε μεγάλη εμπειρία και του χρωστώ τον τρόπο σκέψης και εργασίας, τόσο σε ακαδημαϊκό όσο και σε επαγγελματικό επίπεδο, που μου εμφύσησε. Θα ήθελα, επίσης, να ευχαριστήσω τον Καθηγητή Κ. Βουρνά και τη λέκτορα Σ. Καβατζά που αποτέλεσαν μέλη της τριμελούς συμβουλευτικής επιτροπής.

Θα ήθελα, ακόμα, να ευχαριστήσω θερμά τον Καθηγητή Γ. Κορρέ, τον Καθηγητή Ε. Σαμπράκο, τον Καθηγητή Α. Κλαδά και τον Αν. Καθηγητή Σ. Παπαθανασίου για την τιμή που μου έκαναν να είναι μέλη της εφταμελούς επιτροπής εξέτασης της διατριβής μου.

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμότερες ευχαριστίες μου σε όλα τα μέλη του εργαστηρίου οι οποίοι συνέβαλλαν με τον τρόπο τους στην επίτευξη αυτού του αποτελέσματος. Ιδιαίτερες ευχαριστίες θα ήθελα να δώσω στους Ν. Τασιό, Α. De Vita, Κ. Ντελκή, Ν. Κουβαριτάκη, Α. Παρούσσο, Π. Καρκατσούλη, Κ. Φραγκιαδάκη, Σ. Τσάνη, Π. Φράγκο, Ι. Χαραλαμπίδη, Δ. Παπαδόπουλο, Ξ. Χανιώτη, Α. Πετρόπουλο, Μ. Ζαμπάρα, Μ. Κανναβού καθώς και τη γραμματέα Μ. Παπαιωάννου για τις συμβουλές, τις συζητήσεις και την άψογη συνεργασία.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους δικούς μου ανθρώπους των οποίων η υποστήριξη όλα αυτά τα χρόνια ήταν αμέριστη. Θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου που με υποστήριξε ηθικά όλα αυτά τα χρόνια και με βοήθησε καθοριστικά να φτάσω στην ολοκλήρωση αυτού του κεφαλαίου της ζωής μου και τους αφιερώνω τη διατριβή. Κλείνοντας θα ήθελα να ευχαριστήσω τη Νατάσα που με στήριξε από την αρχή μέχρι το τέλος και για την κατανόησή της όλο αυτόν τον καιρό.

Αθήνα, Ιούλιος 2015,

Πελοπίδας Ι. Σίσκος

Περίληψη

Το αντικείμενο της παρούσας διατριβής αφορά την ανάπτυξη και εφαρμογή ενός πρωτότυπου ολοκληρωμένου ενεργειακού - οικονομικού μοντέλου για τον τομέα των Ευρωπαϊκών επιβατικών και εμπορευματικών μεταφορών. Η ανάπτυξη του προτεινόμενου μοντέλου, με την ονομασία PRIMES-TREMOVE, έχει ως σκοπό τη μελέτη συγκεκριμένων πολιτικών και το σχεδιασμό σεναρίων με στόχο τη διερεύνηση των επιπτώσεών τους στα πλαίσια της απανθρακοποίησης του συστήματος των μεταφορών μέχρι το 2050 και της αντιμετώπισης της κλιματικής αλλαγής.

Το μοντέλο που αναπτύχθηκε στη διατριβή θεμελιώνεται στην μικροοικονομική θεωρία σύμφωνα με την οποία αναπαρίστανται οι αποφάσεις των καταναλωτών/παραγωγών ως αποτέλεσμα ατομικής βελτιστοποίησης της χρησιμότητας ή του κόστους υπό τεχνικούς και οικονομικούς περιορισμούς. Οι ατομικές αποφάσεις επιδρούν στο σύστημα και στις αγορές και επηρεάζουν τις τιμές/κόστη, καθώς και το κόστος του χρόνου (λόγω συμφορήσεων) μεταφορών, και στη συνέχεια οι ατομικές αποφάσεις αναθεωρούνται με βάση την ανάδραση αυτή. Οι αποφάσεις αφορούν στην επιλογή μεταφορικού μέσου, μεταφορικού εξοπλισμού (επένδυση) και στην επιλογή είδους καυσίμου από κάθε καταναλωτή/παραγωγό. Οι αποφάσεις είναι δυναμικές μέσα στο χρόνο και επηρεάζονται από την μεταφορική υποδομή και την υποδομή τροφοδοσίας καυσίμου (ή φόρτισης μπαταριών) καθώς και από την εξέλιξη της τεχνολογίας. Η τελευταία επηρεάζεται επίσης από τον αναμενόμενο όγκο των μελλοντικών πωλήσεων, δεδομένου ότι οι νέες τεχνολογίες που είναι ακόμα ακριβές αναμένεται να μειώνουν το κόστος τους ανάλογα με τον όγκο πωλήσεων χάρις σε καινοτομίες και βιομηχανικές οικονομίες κλίμακας. Η δυναμική εξέλιξη επηρεάζεται από ενεργειακές και μεταφορικές πολιτικές, όπως οι φόροι, η διαθεσιμότητα νέων καυσίμων, τα όρια εκπομπών για νέα οχήματα, οι τυχόν προδιαγραφές ενεργειακής απόδοσης τεχνολογιών και η κατασκευή νέων υποδομών.

Το μαθηματικό πρόβλημα που επιλύει το μοντέλο εντάσσεται στο γενικό πρόβλημα εύρεσης ισορροπίας μεταξύ ανεξάρτητων πολλαπλών προβλημάτων βελτιστοποίησης τα οποία αλληλοεπιδρούν μέσω συνθηκών ισορροπίας και συνολικών περιορισμών σε επίπεδο συστήματος που αφορούν σε πόρους και εκπομπές. Για την επίλυσή του, τα ατομικά προβλήματα βελτιστοποίησης μετατρέπονται σε προβλήματα μη γραμμικής συμπληρωματικότητας και ενώνονται μεταξύ τους περιλαμβάνοντας και τους συνολικούς περιορισμούς και συνθήκες ισορροπίας. Το μοντέλο επιλύεται δυναμικά στο χρόνο. Το μοντέλο καταστρώθηκε σε περιβάλλον GAMS και επιλύεται σε Η/Υ χρησιμοποιώντας παράλληλη επεξεργασία με βάση αλγόριθμους μη γραμμικού

προγραμματισμού. Στο πλαίσιο της διατριβής αναπτύχθηκε επίσης και η βάση δεδομένων του μοντέλου σε πλήρη κλίμακα καθώς και τυποποιήθηκε η μορφή των αριθμητικών εκθέσεων που παράγονται από το μοντέλο.

Οι κύριες εφαρμογές του προτεινόμενου μοντέλου επιχειρούν να δώσουν απαντήσεις σε ερωτήματα ενεργειακής πολιτικής αναφορικά με τη βαθιά μείωση των εκπομπών CO₂ στον ορίζοντα του 2050 και κυρίως τη συνεισφορά της ηλεκτρικής ενέργειας στο στόχο αυτό. Οι κύριοι άξονες που επηρεάζουν το βαθμό διεύθυνσης της ηλεκτρικής ενέργειας στις οδικές μεταφορές είναι κυρίως ο τεχνολογικός και ο πολιτικός. Οι εφαρμογές και τα σενάρια ενεργειακής πολιτικής που εξετάζονται με το μοντέλο PRIMES-TREMOVE βασίζονται σε συνδυασμούς των παραπάνω αξόνων με σκοπό την άντληση συμπερασμάτων. Οι πολιτικές αξιολογούνται με βάση τις επιπτώσεις τους στο συνολικό κόστος, τις συνολικές εκπομπές CO₂, τη ζήτηση ενέργειας και τις επιπτώσεις στην Ευρωπαϊκή αγορά.

Σχετικά με τις εφαρμογές στο πλαίσιο της διατριβής, έμφαση δόθηκε στην επίδραση τυχόν έλλειψης της απαραίτητης διαθέσιμης υποδομής ανεφοδιασμού για τα εναλλακτικά καύσιμα όπως η ηλεκτρική ενέργεια καθώς και το άγχος αυτονομίας των καταναλωτών που είναι δυνατό να επηρεάσουν τη διεύθυνση της ηλεκτρικής ενέργειας στο σύστημα των επιβατικών μεταφορών. Η εισαγωγή κλάσεων ταξιδιών αυξάνει περαιτέρω τη διακριτική ικανότητα του μοντέλου που έχει σκοπό να προσομοιώσει ορθότερα την ετερογένεια που επικρατεί στον τομέα των επιβατικών μεταφορών με την ύπαρξη των εκατομμυρίων μετακινουμένων. Εξετάστηκαν επίσης διαφορετικά σενάρια σχετικά με την αποτελεσματικότητα της φόρτισης μπαταριών από τη σκοπιά του ηλεκτρικού συστήματος και την ανάδραση στις μεταφορές από τις τιμές της ηλεκτρικής αγοράς οι οποίες εξαρτώνται από τη μορφή φορτίου που προκύπτει από τη διαχείριση της φόρτισης. Για το σκοπό αυτό το μοντέλο μεταφορών επιλύθηκε σε αλληλεπίδραση με το μοντέλο ηλεκτρικού συστήματος του PRIMES.

Το κύριο πλεονέκτημα του μοντέλου έναντι της βιβλιογραφίας, εκτός του βαθμού λεπτομέρειας, έγκειται στην ολοκληρωμένη μοντελοποίηση της ισορροπίας μεταξύ των ατομικών βελτιστοποιήσεων και στην ανάδραση με τις υποδομές και την τεχνολογική εξέλιξη. Αυτές οι ιδιότητες του μοντέλου οδήγησαν την Ευρωπαϊκή Επιτροπή στην επιλογή του για την εκπόνηση των μελετών που υποστήριξαν πρόσφατες μεγάλες πρωτοβουλίες πολιτικής της ΕΕ στον τομέα των μεταφορών (π.χ. Λευκή Βίβλος των Μεταφορών).

Λέξεις-κλειδιά: ενεργειακή οικονομία, οικονομική των μεταφορών, ενεργειακή πολιτική, μικροοικονομική, μαθηματική βελτιστοποίηση, βιώσιμες μεταφορές, ηλεκτρική ενέργεια στις μεταφορές, κλιματική αλλαγή

Πίνακας περιεχομένων

1	ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ	21
1.1	Μεταφορές και αιεφόρος ανάπτυξη.....	21
1.2	Σκοπός της διατριβής.....	24
1.3	Πρωτοτυπία- Συνεισφορά διατριβής.....	26
1.3.1	Συνεισφορά στο μεθοδολογικό πλαίσιο: Μοντελοποίηση	26
1.3.2	Συνεισφορά στη επιστήμη της ενεργειακής οικονομικής ανάλυσης: Πρωτότυπες εφαρμογές	29
1.4	Δομή της διατριβής.....	30
2	Η ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΤΟΜΕΑ ΤΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ ΣΤΑ ΠΛΑΙΣΙΑ ΤΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ: ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΤΩΝ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΚΩΝ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΕΩΝ.....	33
2.1	Η σημασία της μοντελοποίησης του τομέα των μεταφορών.....	33
2.1.1	Συνοπτική περιγραφή του συστήματος των μεταφορών	35
2.2	Σύντομο ιστορικό στη μοντελοποίηση της ζήτησης για μεταφορές.....	36
2.3	Η σημασία του τομέα των μεταφορών στα πλαίσια της ενεργειακής οικονομικής ανάλυσης.....	40
2.3.1	Εισαγωγή στην έννοια της ενεργειακής οικονομικής ανάλυσης	40
2.3.2	Τυπική κατηγοριοποίηση μοντέλων ενεργειακής οικονομικής ανάλυσης.....	42
2.4	Προσομοίωση στοιχείων συμπεριφοράς του καταναλωτή για τις μεταφορές σε μοντέλα ενεργειακής οικονομικής ανάλυσης	47
2.4.1	Μέτρα πολιτικής που επηρεάζουν τη συμπεριφορά και τις προτιμήσεις του καταναλωτή.....	48
2.4.2	Μεθοδολογία προσομοίωσης της αλλαγής συμπεριφοράς του καταναλωτή και εφαρμογές σε μοντέλα της βιβλιογραφίας.....	50
2.5	Αναφορά σε πλήρους κλίμακας μοντέλα με αναπαράσταση του τομέα των μεταφορών	53
2.5.1	Μοντέλα μεταφορών δικτύου	54
2.5.2	Ολοκληρωμένα μοντέλα εκτίμησης με αναπαράσταση των μεταφορών.....	57
2.5.3	Αυτόνομα- εξειδικευμένα μοντέλα μεταφορών	60
2.5.4	Bottom-Up μοντέλα με αναπαράσταση του τομέα των μεταφορών.....	63
2.5.5	Οικονομετρικά μοντέλα.....	64
3	ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ ΤΗΣ ΑΓΟΡΑΣ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΩΝ ΚΑΥΣΙΜΩΝ ΣΤΑ ΠΛΑΙΣΙΑ ΕΝΟΣ ΑΙΕΦΟΡΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ.....	67
3.1	Εισαγωγή	67
3.2	Ανάπτυξη υποδομών εναλλακτικών καυσίμων	69

3.2.1	Εμπλεκόμενοι φορείς στη διείδυση εναλλακτικών καυσίμων	69
3.3	Οι οικονομικές προοπτικές της βιομηχανίας υποδομών εναλλακτικών καυσίμων	72
3.3.1	Προτεινόμενα ρυθμιστικά καθεστάτα	72
3.3.2	Εκτιμήσεις του μέσου κόστους υποδομής εναλλακτικών καυσίμων	78
3.4	Ο ρόλος του κράτους: πολιτικές και συντονισμός αγοράς	82
3.5	Συμπεράσματα κεφαλαίου	85
4	ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΟΥ ΟΙΚΟΝΟΜΟΤΕΧΝΙΚΟΥ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ PRIMES-TREMOVE	87
4.1	Βασικές αρχές του μοντέλου PRIMES-TREMOVE.....	87
4.2	Το υπομοντέλο της ζήτησης μεταφορικών υπηρεσιών.....	89
4.2.1	Επιβατικές μετακινήσεις του αντιπροσωπευτικού νοικοκυριού	90
4.2.2	Μετακινήσεις επιχειρήσεων	97
4.2.3	Προβλήματα βελτιστοποίησης καταναλωτή και επιχείρησης.....	100
4.3	Το υπομοντέλο προσφοράς μεταφορικών υπηρεσιών.....	104
4.3.1	Το πρόβλημα των παραγωγών	105
4.3.2	Αλληλεπιδράσεις με τους κατασκευαστές οχημάτων	109
4.3.3	Βελτιστοποίηση προβλήματος των παραγωγών.....	111
4.3.4	Κόστη αντικειμενικής συνάρτησης	113
4.4	Συνθήκες ισορροπίας.....	115
4.4.1	Γενικευμένες τιμές μεταφορών.....	115
4.4.2	Κόστος του χρόνου και συμφόρηση	117
4.5	Μετασχηματισμός προβλημάτων σε μορφή μεικτής συμπληρωματικότητας.....	120
4.5.1	Η έννοια της συμπληρωματικότητας	120
4.5.2	Τυποποίηση του μοντέλου ως πρόβλημα μεικτής συμπληρωματικότητας	121
4.6	Το υπομοντέλο διαχείρισης στόλου και επιλογής νέου εξοπλισμού	123
4.6.1	Διαχείριση στόλου οχημάτων	123
4.6.2	Μοντέλο επιλογής νέου εξοπλισμού	125
4.6.3	Προσαρμογή του μοντέλου επιλογής νέων τύπων οχημάτων.....	128
4.6.4	Εμπειρική εκτίμηση του μοντέλου επιλογής νέων τεχνολογιών	131
4.7	Δομή και κριτήρια επιλογής νέου εξοπλισμού	134
4.7.1	Δένδρα απόφασης τεχνολογίας και καυσίμου νέων οχημάτων	135
4.7.2	Άξονες κριτηρίων επιλογής νέου εξοπλισμού.....	135
4.7.3	Πραγματικά κόστη.....	137
4.7.4	«Κρυφά» κόστη	138
4.7.5	Εισαγωγή ετερογενών κλάσεων αποφασιζόντων	144
4.7.6	Υπολογισμός ειδικής κατανάλωσης ενέργειας	146
4.8	Μοντελοποίηση πολιτικών προώθησης διείδυσης της ηλεκτρικής ενέργειας στις μεταφορές.....	148
4.8.1	Μορφές πολιτικών μέτρων προώθησης αειφόρων επιλογών στις μεταφορές	148
4.8.2	Μέτρα προς τους καταναλωτές	151
5	ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΤΗΣ ΠΟΛΙΤΙΚΗΣ ΡΥΘΜΙΣΗΣ ΤΩΝ ΕΚΠΟΜΠΩΝ CO₂ ΤΩΝ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΩΝ ΣΤΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΤΟΥ ΕΞΗΛΕΚΤΡΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΕΥΡΩΠΑΪΚΗΣ ΑΓΟΡΑΣ	161
5.1	Εισαγωγή	161
5.2	Σκοπός παρόντος κεφαλαίου	163
5.2.1	Η δυναμική των ηλεκτρικών αυτοκινήτων στα πλαίσια της βιομηχανίας	164

5.3	Το σενάριο αναφοράς	166
5.3.1	Αποτελέσματα σεναρίου αναφοράς	168
5.4	Μοντελοποίηση της πολιτικής ρύθμισης των εκπομπών CO ₂ των νέων οχημάτων (EC 443/2009).....	172
5.4.1	Ενδογενής δυνατότητα εξοικονόμησης καυσίμου	176
5.5	Αποτελέσματα σεναρίων «Mild» και «Ambitious»	178
5.5.1	Κατασκευή σεναρίων- Υποθέσεις.....	178
5.5.2	Δομή της Ευρωπαϊκής αγοράς αυτοκινήτων.....	179
5.5.3	Συνολικές εκπομπές CO ₂ και κατανάλωση ενέργειας	182
5.6	Επιπτώσεις της πολιτικής στην αγορά και στους καταναλωτές	185
5.6.1	Επιπτώσεις στη διάρθρωση της αγοράς.....	185
5.6.2	Ο ρόλος των ηλεκτρικών αυτοκινήτων στην κατηγοριοποίηση της αγοράς.....	187
5.6.3	Επιπτώσεις στην επιλογή μέσου μεταφοράς	189
5.7	Αξιολόγηση του κόστους της πολιτικής.....	190
5.8	Περαιτέρω διερεύνηση	193
5.9	Συμπεράσματα κεφαλαίου	196
6	ΣΕΝΑΡΙΑ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΤΩΝ ΕΥΡΩΠΑΪΚΩΝ ΕΠΙΒΑΤΙΚΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ.....	199
6.1	Εισαγωγή	199
6.2	Το σενάριο αναφοράς	201
6.2.1	Υποθέσεις σεναρίου αναφοράς.....	201
6.2.2	Αποτελέσματα σεναρίου αναφοράς	202
6.2.3	Ανάλυση ευαισθησίας σεναρίου αναφοράς στις τιμές πετρελαίου.....	204
6.3	Ορισμός σεναρίων εξηλεκτρισμού των οδικών μεταφορών με χρονικό ορίζοντα το 2050	
6.3.1	Η έννοια της ελάχιστης αποδοτικής κλίμακας παραγωγής: υποθέσεις τεχνικής προόδου μπαταριών και κυψελών καυσίμου.....	205
6.3.2	Εξηλεκτρισμός των μεταφορών: «Battery Only» σενάριο.....	211
6.3.3	Υποθέσεις μέτρων πολιτικής: Περιορισμός εκπομπών CO ₂ έναντι κατανάλωσης καυσίμου	213
6.3.4	Εξηλεκτρισμός των μεταφορών: «Parallel Technology» σενάριο.....	215
6.4	Αποτελέσματα σεναρίων εξηλεκτρισμού	217
6.4.1	Διάρθρωση στόλου οχημάτων	217
6.4.2	Τελική κατανάλωση και συνολικές εκπομπές CO ₂	223
6.4.3	Σύγκριση κόστους σεναρίων.....	226
6.5	Συζήτηση και περαιτέρω διερεύνηση	231
6.6	Συμπεράσματα κεφαλαίου	238
7	ΣΗΜΑΣΙΑ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΥΠΟΔΟΜΗΣ ΔΙΑΘΕΣΗΣ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΩΝ ΚΑΥΣΙΜΩΝ ΚΑΙ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΜΕ ΤΟ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ	241
7.1	Εισαγωγή	241
7.2	Επίδραση της ύπαρξης υποδομής.....	242
7.2.1	Ανάλυση Κόστους- Οφέλους	242
7.2.2	Υποθέσεις κόστους.....	243
7.2.3	Αποτίμηση οφέλους ανάπτυξης υποδομής.....	248
7.3	Αλληλεπίδραση με το ενεργειακό σύστημα	251

7.3.1	Εκπομπές CO ₂ στο σύνολο της αλυσίδας Well-To-Wheel	251
7.3.2	Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στην ΕΕ	252
7.3.3	WTW εκπομπές CO ₂	256
7.3.4	Επιδράσεις της φόρτισης των ηλεκτρικών αυτοκινήτων.....	257
7.4	Συμπεράσματα κεφαλαίου	273
8	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ	275
8.1	Συμπεράσματα	278
8.1.1	Ο ρόλος του συντονισμού της αγοράς και των εμπλεκόμενων φορέων στη διείσδυση εναλλακτικών μορφών ενέργειας.....	278
8.1.2	Ο ρόλος των τεχνολογικών ορίων στις εκπομπές CO ₂ οχημάτων στη διείσδυση των ηλεκτρικών αυτοκινήτων	279
8.1.3	Σύγκριση τεχνολογικών ορίων εκπομπών CO ₂ με άλλα μέτρα πολιτικής	280
8.1.4	Επιπτώσεις στην αγορά λόγω αυξημένης διείσδυσης εναλλακτικών οχημάτων	281
8.1.5	Σημασία ανάπτυξης υποδομής διάθεσης εναλλακτικών μορφών ενέργειας	282
8.1.6	Αλληλεπιδράσεις του συστήματος μεταφορών με το σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.....	283
8.2	Σύνοψη και μελλοντικές προοπτικές	284

Κατάλογος σχημάτων

Σχήμα 1-1: Συνολικές και ειδικές εκπομπές CO ₂ επιβατικών μέσων μεταφοράς για την ΕΕ28 το 2010 (Πηγή: EUROSTAT).....	22
Σχήμα 1-2: Συνολικές και ειδικές εκπομπές CO ₂ εμπορευματικών μέσων μεταφοράς για την ΕΕ28 το 2010 (Πηγή: EUROSTAT).....	23
Σχήμα 2-1: Μέσος χρόνος ταξιδιού ανά κάτοικο. Πηγή: Schafer and Victor, (2000).....	52
Σχήμα 3-1: Εμπλεκόμενοι φορείς στη διείσδυση των εναλλακτικών καυσίμων στις μεταφορές.....	68
Σχήμα 3-2: Μέσο εκτιμώμενο κόστος σε €/ MWh για σταθμό φόρτισης Επιπέδου III υπό μεταβαλλόμενη ζήτηση και επιτόκιο.....	81
Σχήμα 4-1: Σχηματική αναπαράσταση της λειτουργίας του μοντέλου PRIMES-TREMOVE.....	88
Σχήμα 4-2: Πρωτογενές δένδρο απόφασης επιβατικών μετακινήσεων.....	92
Σχήμα 4-3: Δευτερογενές δένδρο απόφασης επιβατικών μετακινήσεων σε αστικό περιβάλλον.....	94
Σχήμα 4-4: Δευτερογενές δένδρο απόφασης επιβατικών μετακινήσεων σε υπεραστικό περιβάλλον.....	95
Σχήμα 4-5: Πρωτογενές δένδρο απόφασης μετακινήσεων σχετικών με επιχειρήσεις.....	98
Σχήμα 4-6: Δευτερογενές δένδρο απόφασης υπεραστικών μεταφορών εμπορευμάτων.....	99
Σχήμα 4-7: Δευτερογενές δένδρο απόφασης αστικών μεταφορών εμπορευμάτων.....	100
Σχήμα 4-8: Αλληλεπίδραση των υπομοντέλων προσφοράς και ζήτησης.....	105
Σχήμα 4-9: Τυπικό σχήμα καμπύλης μακροχρόνιου μέσου κόστους (LRAC) βιομηχανικού προϊόντος.....	110
Σχήμα 4-10: Ισορροπία μεταξύ προσφοράς και ζήτησης μέσω των γενικευμένων τιμών μεταφοράς.....	116
Σχήμα 4-11: Συμπεριφορά των μοντέλων Logit και Weibull για διάφορες τιμές του παράγοντα υποκατάστασης.....	127
Σχήμα 4-12: Επίδραση του παράγοντα υποκατάστασης στα μερίδια νέων πωλήσεων.....	128
Σχήμα 4-13: Κατανομή ελαστικότητας των νέων πωλήσεων αυτοκινήτων ως προς την τιμή αγοράς (Πηγή: EPA, 2012).....	131

Σχήμα 4-14: Δένδρο απόφασης τεχνολογίας και καυσίμου για αγορά νέου αυτοκινήτου.....	135
Σχήμα 4-15: Σχηματική αναπαράσταση των αξόνων κριτηρίων επιλογής τύπων οχημάτων..	136
Σχήμα 4-16: Ποιοτική απεικόνιση της επίδρασης του «κρυφού» κόστους στη διαδικασία απόφασης των καταναλωτών.....	139
Σχήμα 4-17: Κρυφό κόστος του εύρους αυτονομίας των ηλεκτρικών αυτοκινήτων συναρτήσει του εύρους αυτονομίας και μήκους ταξιδιού.....	142
Σχήμα 4-18: Επίδραση του εύρους αυτονομίας του ηλεκτρικού αυτοκινήτου με μπαταρία στα μερίδια επί των νέων πωλήσεων αυτοκινήτων.....	144
Σχήμα 4-19: Αντιπροσωπευτικό παράδειγμα ιστογράμματος συχνοτήτων για μετακίνηση σε εθνικό οδικό δίκτυο.....	145
Σχήμα 4-20: Κυβερνητικές επιδοτήσεις προς τους καταναλωτές για αγορά ηλεκτρικών αυτοκινήτων (Πηγή: Amsterdam Roundtables Foundation και McKinsey, 2014).....	152
Σχήμα 4-21: Επίδραση της επιδότησης τιμής του ηλεκτρικού αυτοκινήτου στο ποσοστό νέων πωλήσεων.....	154
Σχήμα 4-22: Σχηματική απεικόνιση δεδομένων εισόδου και της εξόδου του μοντέλου κατά τη φάση προσαρμογής στο έτος βάσης.....	157
Σχήμα 4-23 Δένδρο απόφασης τεχνολογίας και καυσίμου για αγορά νέου φορτηγού βαρέως τύπου	160
Σχήμα 5-1: Πωλήσεις ηλεκτρικών αυτοκινήτων ανά χώρα της Ευρώπης κατά την περίοδο 2011-2013 (Πηγή: Amsterdam Roundtables Foundation και McKinsey, 2014).....	165
Σχήμα 5-2: Στόχοι μείωσης των ειδικών εκπομπών CO ₂ ανά κατασκευαστή αυτοκινήτων το 2020 (Πηγή: European Commission).....	166
Σχήμα 5-3: Εξέλιξη του στόλου των αυτοκινήτων στην Ευρωπαϊκή αγορά στο σενάριο αναφοράς	172
Σχήμα 5-4: Σχηματική αναπαράσταση της ενσωμάτωσης πολιτικής ρύθμισης των μέσων εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα των νέων οχημάτων	176
Σχήμα 5-5: Καμπύλη κόστους- εξοικονόμησης ενέργειας για ένα μεσαίο αυτοκίνητο βενζίνης	178
Σχήμα 5-6: Διάρθρωση του στόλου των αυτοκινήτων στα δύο εναλλακτικά σενάρια πολιτικής	181
Σχήμα 5-7: Εκπομπές CO ₂ των αυτοκινήτων στην ΕΕ 27 στο σενάριο αναφοράς και στα εναλλακτικά σενάρια πολιτικής	183
Σχήμα 5-8: Δείκτης ενεργειακής απόδοσης των αυτοκινήτων της ΕΕ 27 στο σενάριο αναφοράς και στα εναλλακτικά σενάρια πολιτικής	184
Σχήμα 5-9: Κατανάλωση ενέργειας των αυτοκινήτων της ΕΕ 27 ανά καύσιμο στα δύο σενάρια πολιτικής	185
Σχήμα 5-10: Ποσοστό δραστηριότητας (%) αυτοκινήτων μικρής κατηγορίας στο σύνολο της δραστηριότητας στην ΕΕ 27 στο σενάριο αναφοράς και στα εναλλακτικά σενάρια πολιτικής	187

Σχήμα 5-11: Ποσοστό διείσδυσης των ηλεκτρικών αυτοκινήτων με μπαταρία ανά κατηγορία μεγέθους στο «Ambitious» σενάριο.....	188
Σχήμα 5-12: Ποσοστιαία μεταβολή της δραστηριότητας των σιδηροδρομικών μεταφορών και των οδικών μέσων μαζικής μεταφοράς στα εναλλακτικά σενάρια σε σχέση με το σενάριο αναφοράς.....	190
Σχήμα 5-13: Επιμερισμός του κόστους σε δαπάνες κεφαλαίου και καυσίμου στα επιμέρους σενάρια.....	192
Σχήμα 6-1: Στόλος των αυτοκινήτων για την ΕΕ 27 στο σενάριο αναφοράς.....	204
Σχήμα 6-2: Βιβλιογραφική επισκόπηση κόστους μπαταρίας Li-ion για ηλεκτρικά αυτοκίνητα. (Πηγή: Nykvist και Nilsson, 2015).....	206
Σχήμα 6-3: Μέσο κόστος συστήματος κυψέλης καυσίμου υδρογόνου ως συνάρτηση του όγκου παραγωγής (Πηγή: National Research Council, 2013).....	208
Σχήμα 6-4: Μέτρα πολιτικής τεχνολογικών ορίων σε συγκεκριμένες αγορές.....	214
Σχήμα 6-5: Τελική κατανάλωση ενέργειας στην ΕΕ 27 στα εναλλακτικά σενάρια πολιτικής και στο σενάριο αναφοράς.....	224
Σχήμα 6-6: Εκπομπές CO ₂ των αυτοκινήτων στην ΕΕ 27 στα εναλλακτικά σενάρια και στο σενάριο αναφοράς.....	226
Σχήμα 6-7: Μέσο κόστος αποφυγής εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (EUR/ton CO ₂).....	230
Σχήμα 7-1: Καμπύλες εκμάθησης μείωσης κόστους σημείων φόρτισης συναρτήσει της σωρευτικής παραγωγής τους.....	245
Σχήμα 7-2: Ενεργειακό μείγμα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στην ΕΕ το 2010 (EUROSTAT).....	253
Σχήμα 7-3: Ειδικές εκπομπές αερίων θερμοκηπίου στην ηλεκτροπαραγωγή (EE27).....	255
Σχήμα 7-4: WTW εκπομπές CO ₂ (σε gCO ₂ /χλμ.) ανά τύπο αυτοκινήτου για το 2015 και το 2050 στο σενάριο απανθρακοποίησης.....	256
Σχήμα 7-5: Συνολικές WTW εκπομπές CO ₂ των επιβατικών αυτοκινήτων σε τρεις χαρακτηριστικές περιπτώσεις.....	257
Σχήμα 7-6: Ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας στο σύνολο του ενεργειακού συστήματος στο σενάριο Απανθρακοποίησης.....	259
Σχήμα 7-7: Τυπικό ιστόγραμμα επιστροφής εργαζομένων/ άμεσης έναρξης φόρτισης ανά ώρα ημέρας για το Ηνωμένο Βασίλειο (Πηγή: Cipcigan, 2011).....	263
Σχήμα 7-8: Επίδραση ανεξέλεγκτης φόρτισης ηλεκτρικών αυτοκινήτων σε τυπική ημερήσια καμπύλη φορτίου ηλεκτρικής ενέργειας.....	264
Σχήμα 7-9: Πιθανότητα φόρτισης ως συνάρτηση του χρόνου μεταξύ άφιξης και φόρτισης για σταθερές τιμές ηλεκτρικής ενέργειας.....	268
Σχήμα 7-10: Πιθανότητα φόρτισης ως συνάρτηση του χρόνου μεταξύ άφιξης και φόρτισης για συνδυασμούς τιμών των παραμέτρων $\gamma\omega$ και ν	269

Σχήμα 7-11: Πιθανότητα φόρτισης ως συνάρτηση του χρόνου μεταξύ άφιξης και φόρτισης για συνδυασμούς τιμών των παραμέτρων $\gamma\omega, \nu$ και ποινής $p\epsilon\eta h, t$	271
Σχήμα 7-12: Ευελιξία και έλεγχος φόρτισης ηλεκτρικών αυτοκινήτων σε τυπική ημερήσια καμπύλη φορτίου ηλεκτρικής ενέργειας	273

Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 2-1: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των μεθοδολογιών της βιβλιογραφίας	47
Πίνακας 3-1: Εμπλεκόμενοι φορείς και βασικοί άξονες συντονισμού στις προοπτικές αγορές των εναλλακτικών καυσίμων	71
Πίνακας 3-2: Εκτιμώμενο μέσο κόστος υποδομών διάθεσης καυσίμων	79
Πίνακας 3-3: Μορφές παρεμβατισμού στη βιομηχανία διάθεσης και διανομής καυσίμων, τη βιομηχανία κατασκευής εξοπλισμού και τους καταναλωτές	83
Πίνακας 4-1: Δείκτες και βασικές μεταβλητές και παράμετροι του μοντέλου	101
Πίνακας 4-2: Τεχνοοικονομικές υποθέσεις για την προσαρμογή του μοντέλου επιλογής νέων αυτοκινήτων	129
Πίνακας 4-3: Ελαστικότητες τιμής με βάση το μοντέλο επιλογής νέων αυτοκινήτων για ένα εύρος παραμέτρων	130
Πίνακας 4-4: Υποθέσεις τιμών καυσίμου για την ανάλυση ευαισθησίας του μοντέλου επιλογής νέων αυτοκινήτων	132
Πίνακας 4-5: Ελαστικότητα τιμής καυσίμου των νέων πωλήσεων αυτοκινήτων ντίζελ (ίσες ετήσιες αποστάσεις)	133
Πίνακας 4-6: Ελαστικότητα τιμής καυσίμου των νέων πωλήσεων αυτοκινήτων ντίζελ (διαφορετικές ετήσιες αποστάσεις)	134
Πίνακας 4-7: Τεχνοοικονομικές υποθέσεις για συμβατικό και ηλεκτρικό αυτοκίνητο	143
Πίνακας 4-8: Ποσοστό εξοικονόμησης ενέργειας για υβριδικό αυτοκίνητο	147
Πίνακας 4-9: Τεχνοοικονομικά χαρακτηριστικά ηλεκτρικού και συμβατικού αυτοκινήτου βενζίνης	153
Πίνακας 4-10: Λίστα τύπων και τεχνολογιών οχημάτων του μοντέλου PRIMES-TREMOVE....	158
Πίνακας 5-1: Σύνοψη αποτελεσμάτων σεναρίου αναφοράς για την ΕΕ 27	169
Πίνακας 5-2: Ειδικές εκπομπές CO ₂ ανά τεχνολογία αυτοκινήτου	174
Πίνακας 5-3: Υποθέσεις των CO ₂ standards για τις νέες πωλήσεις αυτοκινήτων στα εναλλακτικά σενάρια	179
Πίνακας 5-4: Μεταβολές στις συνολικές δαπάνες και στο κόστος καυσίμου και κεφαλαίου μεταξύ του σεναρίου αναφοράς και των εναλλακτικών σεναρίων πολιτικής	193

Πίνακας 6-1: Κύριοι δείκτες του τομέα των μεταφορών για την ΕΕ27 στο σενάριο αναφοράς	203
Πίνακας 6-2: Βιβλιογραφική έρευνα ρυθμών μάθησης για τις μπαταρίες και τις κυψέλες καυσίμου υδρογόνου	210
Πίνακας 6-3: Υποθέσεις τεχνολογικών ορίων CO ₂ και ενεργειακής απόδοσης του σεναρίου «battery only»	214
Πίνακας 6-4: Υποθέσεις για την εξέλιξη του κόστους της κυψέλης υδρογόνου στο σενάριο «parallel technology».....	216
Πίνακας 6-5: Υποθέσεις τεχνολογικών ορίων CO ₂ και ενεργειακής απόδοσης του σεναρίου «parallel technology».....	217
Πίνακας 6-6: Δομή του στόλου των επιβατικών αυτοκινήτων στο σενάριο «Battery only» με πολιτική CO ₂ και EE standards.....	218
Πίνακας 6-7: Μερίδια εναλλακτικών τεχνολογιών επί των νέων πωλήσεων αυτοκινήτων στο σενάριο «Battery only» με πολιτική CO ₂ και EE standards	219
Πίνακας 6-8: Δομή του στόλου των επιβατικών αυτοκινήτων στο σενάριο «Parallel Technology» με πολιτική CO ₂ και EE standards.....	221
Πίνακας 6-9: Μερίδια εναλλακτικών τεχνολογιών επί των νέων πωλήσεων αυτοκινήτων στο σενάριο «Parallel Technology» με πολιτική CO ₂ και EE standards.....	222
Πίνακας 6-10: Παράγοντες ποιότητας (€/ km) στο σενάριο “Parallel Technology” με πολιτική CO ₂ και EE standards	223
Πίνακας 6-11: Τελική κατανάλωση ενέργειας των επιβατικών αυτοκινήτων στην ΕΕ 27 ανά ενεργειακή μορφή στα επιμέρους σενάρια.....	225
Πίνακας 6-12: Συγκριτικό πλεονέκτημα τεχνολογιών αυτοκινήτων υπό διαφορετικά ρυθμιστικά πλαίσια.....	234
Πίνακας 7-1: Παράγοντες καμπύλης εκμάθησης- μείωσης μοναδιαίου κόστους σημείων φόρτισης.....	245
Πίνακας 7-2: Υποθέσεις ανάπτυξης/ κάλυψης υποδομής και κόστους σταθμών φόρτισης ηλεκτρικής ενέργειας.....	246
Πίνακας 7-3: Υποθέσεις ανάπτυξης/ κάλυψης υποδομής και κόστους σταθμών διάθεσης υδρογόνου.....	248
Πίνακας 7-4: Αποτελέσματα ανάλυσης κόστους- οφέλους για την περίοδο 2015-2050.....	250
Πίνακας 7-5: Συντελεστές εκπομπών αερίου του θερμοκηπίου ανά είδος καυσίμου παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (US EPA).....	252
Πίνακας 7-6: Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ανά τύπο καυσίμου για την ΕΕ για το σενάριο Αναφοράς και το σενάριο Απανθρακοποίησης	254
Πίνακας 7-7: Προϋποθέσεις φόρτισης για ηλεκτρικά αυτοκίνητα και υβριδικά με καλώδιο ...	260
Πίνακας 7-8: Υποθέσεις ποιότητας φόρτισης που περιλαμβάνονται στην γενικευμένη τιμή ηλεκτρικής ενέργειας.....	270

Κεφάλαιο 1

1 Διατύπωση Ερευνητικού Προβλήματος

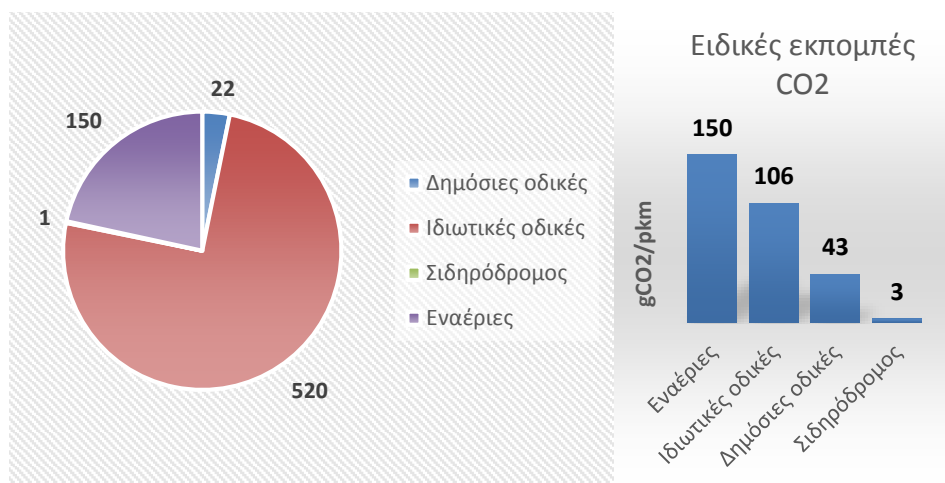
1.1 Μεταφορές και αειφόρος ανάπτυξη

Το πρωτόκολλο του Κιότο αποτελεί μια διεθνή συνθήκη που έθεσε δεσμευτικές υποχρεώσεις στα ανεπτυγμένα κράτη να μειώσουν τις εκπομπές αερίων θερμοκηπίου για την αντιμετώπιση του φαινομένου της κλιματικής αλλαγής και του φαινομένου του θερμοκηπίου. Σήμερα, η προβληματική αυτή εξακολουθεί να βρίσκεται σε περίοπτη θέση στην περιβαλλοντολογική ατζέντα της διεθνούς επιστημονικής κοινότητας. Οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής ενδέχεται να είναι πολύ σημαντικές για την ανθρωπότητα και τον πλανήτη ως αποτέλεσμα της αύξησης των ακραίων καιρικών φαινομένων, των μεταβολών του οικοσυστήματος και της αύξησης της στάθμης της θάλασσας.

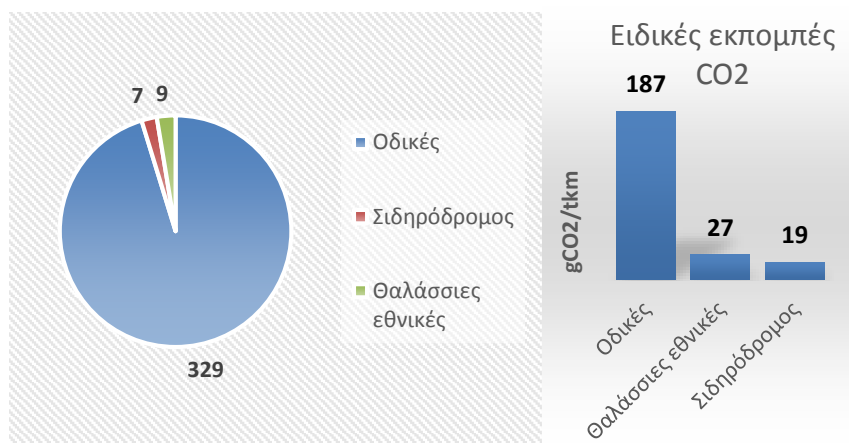
Η επιστημονική κοινότητα αποδίδει την ευθύνη της πρόκλησης του φαινομένου του θερμοκηπίου σε ανθρωπογενείς δραστηριότητες (National Research Council, 2010, IPCC, 2007) που σχετίζονται με την αύξηση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και συγκεκριμένα του διοξειδίου του άνθρακα CO₂. Με δεδομένη την ολοένα και αυξανόμενη κατανάλωση ενέργειας λόγω της οικονομικής ανάπτυξης, οι παγκόσμιες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα αναμένεται να αυξηθούν στο μέλλον. Ένα σημαντικό μέρος των εκπομπών αυτών οφείλεται στον τομέα των μεταφορών που περιλαμβάνει τις μετακινήσεις ανθρώπων και εμπορευμάτων. Συγκεκριμένα, οι εκπομπές CO₂ των μεταφορών αναπαριστούν το 23% των παγκόσμιων εκπομπών CO₂ που εκπέμπονται κατά την καύση των καυσίμων (ITF, 2010). Επιπλέον, λόγω της αδράνειας του συστήματος του κλίματος ακόμα και αν η συγκέντρωση των αερίων του θερμοκηπίου παρέμενε αμετάβλητη στα επίπεδα του 2000, η μέση θερμοκρασία θα συνέχιζε να αυξάνει (0.2°C για τις επόμενες δύο δεκαετίες (IPCC, 2007)).

Διεθνείς οργανισμοί όπως ο UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change) έχουν υιοθετήσει και προτείνει πολιτικές που αποσκοπούν στη μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα έτσι ώστε η αύξηση της μέσης θερμοκρασίας να

παραμένει στο όριο των 2°C σε σχέση με τα προ-βιομηχανικά επίπεδα (UNFCCC, 2011). Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή (ΕΕ) υιοθέτησε, μέσω της οδηγίας Europe 2020 Strategy (European Commission, 2010), τους στόχους που τέθηκαν για μείωση των εκπομπών αερίων διοξειδίου του άνθρακα και έθεσε αρχικά το στόχο για μείωση των εκπομπών CO₂ κατά 20% το 2020 σε σχέση με το 1990. Το 2011, η ΕΕ πρότεινε, μέσω του οδικού χάρτη «A roadmap for moving to a competitive low carbon economy in 2050», το φιλόδοξο μακροχρόνιο στόχο για μείωση των εκπομπών αερίων διοξειδίου του άνθρακα κατά 80-95% το 2050 σε σχέση με τα επίπεδα του 1990 (European Commission, 2011). Οι στόχοι αυτοί είναι συμβατοί με τις θέσεις που αναπτύχθηκαν στις συνθήκες της Κοπεγχάγης και του Κανκούν. Σύμφωνα με τον παραπάνω οδικό χάρτη ο τομέας των μεταφορών θα πρέπει να πετύχει μείωση των εκπομπών CO₂ κατά 60% το 2050 σε σχέση με τα επίπεδα του 1990. Αυτός ο στόχος αποτέλεσε το επίκεντρο της συζήτησης της Λευκής Βίβλου για τις μεταφορές (White Paper on Transport, European Commission; 2011) που εκδόθηκε το 2011 από την ΕΕ. Η Λευκή Βίβλος παρουσίασε τρία σενάρια απανθρακοποίησης του τομέα των μεταφορών με χρονικό ορίζοντα το 2050 σύμφωνα με τα οποία αναγνωρίστηκε η σημαντική συμβολή της ηλεκτρικής ενέργειας ως μία εναλλακτική επιλογή για την επίτευξη του μακροχρόνιου στόχου του 2050.



Σχήμα 1-1: Συνολικές και ειδικές εκπομπές CO₂ επιβατικών μέσων μεταφοράς για την ΕΕ28 το 2010 (Πηγή: EUROSTAT)



Σχήμα 1-2: Συνολικές και ειδικές εκπομπές CO₂ εμπορευματικών μέσων μεταφοράς για την ΕΕ28 το 2010 (Πηγή: EUROSTAT)

Από την πρώτη κρίση του πετρελαίου τη δεκαετία του '70 και παρά την τεχνολογική πρόοδο και την αύξηση της αποδοτικότητας των μεταφορικών οχημάτων, το σύστημα των μεταφορών δεν έχει αλλάξει δραστικά, καθώς εξακολουθεί να στηρίζεται στην κατανάλωση ορυκτών καυσίμων. Σύμφωνα με το σενάριο αναφοράς της Λευκής Βίβλου για τις Μεταφορές, οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα του τομέα των μεταφορών αναμένεται να αυξηθούν περίπου κατά 30% το 2050 σε σχέση με τα επίπεδα του 1990 αν συνεχιστούν στο μέλλον οι σημερινές τάσεις. Είναι φανερό ότι οι μακροχρόνιοι στόχοι που έθεσε η ΕΕ είναι πολύ φιλόδοξοι και θα πρέπει να συμβούν δραστηκές συστημικές αλλαγές που θα συνοδεύονται και από ριζικές μεταβολές στις προτιμήσεις των μετακινούμενων. Ωστόσο, οι μεταφορές είναι πολύ βασικές για τη διατήρηση της οικονομικής ανάπτυξης των χωρών, τη δημιουργία θέσεων εργασίας, καθώς και για την κοινωνία και την ποιότητα ζωής των ανθρώπων. Για το λόγο αυτό οι φιλόδοξοι μακροχρόνιοι στόχοι για δραστική μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα από τις μεταφορές θα πρέπει να πλαισιώνουν το γενικότερο στόχο της επίτευξης ενός αειφόρου (sustainable) συστήματος μεταφορών. Η έννοια του αειφόρου συστήματος κατά τον Brundland ορίζεται ως: «Αειφόρος ανάπτυξη είναι η ανάπτυξη που ικανοποιεί τις ανάγκες της παρούσας γενιάς δίχως να θέτει συμβιβασμούς στην ικανότητα των επόμενων γενιών να ικανοποιήσουν τις δικές τους ανάγκες»

Προκειμένου να ανταποκριθεί ο τομέας των μεταφορών στους φιλόδοξους στόχους της απανθρακοποίησης που έθεσε η ΕΕ πρέπει να συμβούν ριζικές αλλαγές. Πράγματι, ο τομέας των μεταφορών αποτελεί τον πιο αδρανή τομέα όσον αφορά τις ριζικές μεταβολές στα πλαίσια της κλιματικής αλλαγής, καθώς τα εμπλεκόμενα μέρη είναι πολλαπλά και έχουν και διαφορετικούς στόχους. Οι εμπλεκόμενοι φορείς στον τομέα των μεταφορών μπορούν να διακριθούν στις επιχειρήσεις που πραγματοποιούν εμπορευματική δραστηριότητα, σε όλους τους μετακινούμενους, στη βιομηχανία κατασκευαστών εξοπλισμού μεταφορών (π.χ. αυτοκίνητα), υποδομών και διάθεσης καυσίμων και σε φορείς με δυνατότητα παρέμβασης μέσω πολιτικών και ρυθμίσεων (π.χ. το κράτος, φορείς χάραξης πολιτικής, η ΕΕ). Είναι φανερή η πολυπλοκότητα και η

ετερογένεια που χαρακτηρίζει το μείγμα των αποφασιζόντων του συστήματος των μεταφορών σε σύγκριση με άλλους κλάδους, όπως η βιομηχανία και η ηλεκτροπαραγωγή. Στις τελευταίες, οι αποφασίζοντες είναι οι ίδιες οι εταιρείες που εμπλέκονται στη δραστηριότητα του κλάδου. Αυτό έρχεται σε αντίθεση με τον τομέα των μεταφορών όπου το σύνολο της δραστηριότητας του κλάδου αποτελεί το άθροισμα των μεμονωμένων αποφάσεων εκατομμυρίων μετακινουμένων με διαφορετικά, ασφαλώς, χαρακτηριστικά. Οι ανομοιογένειες που υπάρχουν είναι πολύ σημαντικές και μπορεί να διακρίνονται με βάση μακροοικονομικά κριτήρια, κριτήρια συμπεριφοράς που αφορούν τις επιλογές για αγορά κεφαλαιουχικού εξοπλισμού, είδος ταξιδιού (ταξίδια επαγγελματικά ή ταξίδια αναψυχής) και μέσου μεταφοράς.

Η προσπάθεια πρέπει να είναι συντονισμένη μεταξύ πολλών διαφορετικών παραγόντων με διαφορετικούς στόχους. Οι αλλαγές που πρέπει να συμβούν έχουν να κάνουν με την υιοθέτηση πιο ενεργειακά αποδοτικών οχημάτων σε όλα τα μέσα μεταφοράς καθώς και με τη διείσδυση εναλλακτικών τεχνολογιών με μειωμένες εκπομπές CO₂. Επιπλέον, είναι σημαντική η ανάπτυξη δικτύου παραγωγής και διανομής νέων εναλλακτικών καυσίμων όπως τα βιοκαύσιμα, το φυσικό αέριο, η ηλεκτρική ενέργεια και το υδρογόνο. Ο καθοριστικός παράγοντας για τη διείσδυση νέων καυσίμων είναι η κατασκευή των απαραίτητων υποδομών που απαιτούν επενδύσεις υψηλής έντασης κεφαλαίου. Οι τελευταίες εμπεριέχουν σημαντικό βαθμό αβεβαιότητας στους επενδυτές λόγω του υψηλού κεφαλαίου που θα πρέπει να επενδύσουν. Εξάλλου, η στροφή προς πιο αποδοτικά μέσα μεταφοράς όπως ο σιδηρόδρομος, καθώς και η βελτίωση των διασυνδέσεων των μέσων μεταφοράς μπορούν να οδηγήσουν σε σημαντική μείωση των εκπομπών CO₂.

Τα μοντέλα ενεργειακής οικονομικής ανάλυσης θεωρούνται ως τα βασικά εργαλεία για την αξιολόγηση μέσο-μακροπρόθεσμων πολιτικών που αποσκοπούν στη μείωση των εκπομπών CO₂ του ενεργειακού συστήματος και κατ' επέκταση του τομέα των μεταφορών. Ο κύριος προσανατολισμός τέτοιου είδους μοντέλων είναι να μελετήσουν τις μελλοντικές επιπτώσεις του ενεργειακού συστήματος και τις εξελίξεις στον τομέα της ενέργειας, να σχεδιάσουν τον ενεργειακό σχεδιασμό και να αξιολογήσουν το κόστος που θα απαιτηθεί για τη δραστική μείωση των εκπομπών αερίων διοξειδίου του άνθρακα. Η αρτιότητα της ανάλυσης εξαρτάται από το βαθμό της λεπτομέρειας που εμπεριέχεται καθώς και της ταυτόχρονης αναπαράστασης των αλληλεπιδράσεων των εμπλεκόμενων πλευρών του τομέα των μεταφορών σε ένα μοντέλο ενεργειακής οικονομίας. Η αυστηρή θεμελίωση του μοντέλου στις αρχές της μικροοικονομικής θεωρίας προϋποθέτει ότι οι οικονομικές αποφάσεις των εμπλεκόμενων πλευρών που εμπεριέχονται στο μοντέλο σέβονται τις βασικές αρχές της οικονομικής θεωρίας.

1.2 Σκοπός της διατριβής

Ο σκοπός της παρούσας διατριβής είναι η ανάπτυξη και η εφαρμογή ενός πρωτότυπου ολοκληρωμένου ενεργειακού-οικονομικού μοντέλου, με την ονομασία

PRIMES-TREMOVE, που προσομοιώνει με ρεαλισμό τον τομέα των επιβατικών και εμπορευματικών μεταφορών. Η ανάπτυξη του προτεινόμενου μοντέλου έχει ως σκοπό τη μελέτη συγκεκριμένων πολιτικών και το σχεδιασμό σεναρίων με στόχο τη διερεύνηση των επιπτώσεων τους στα πλαίσια της απανθρακοποίησης του συστήματος των μεταφορών μέχρι το 2050 στα πλαίσια της αντιμετώπισης της κλιματικής αλλαγής. Οι επιμέρους κλάδοι του τομέα των μεταφορών αναπαρίστανται εξ' ολοκλήρου, ενώ δίνεται ιδιαίτερη έμφαση και λεπτομέρεια στις οδικές μεταφορές. Το προτεινόμενο μοντέλο περιλαμβάνει τις οδικές, τις σιδηροδρομικές, τις εναέριες και τις θαλάσσιες μεταφορές για κάθε χώρα της Ευρωπαϊκής Ένωσης ξεχωριστά. Το μοντέλο PRIMES-TREMOVE έχει σχεδιαστεί ώστε να είναι εναρμονισμένο με τις προβλέψεις του μοντέλου PRIMES (Capros et al. 2012) που καλύπτει το σύνολο του ενεργειακού συστήματος.

Το θεωρητικό υπόβαθρο του μοντέλου βασίζεται στις αρχές της μικροοικονομικής θεωρίας και εξετάζει τον κλάδο των μεταφορών ως ένα μεμονωμένο σύστημα εντός του ευρύτερου ενεργειακού συστήματος. Η μεθοδολογική προσέγγιση που ακολουθείται βασίζεται στο θεωρητικό πλαίσιο της μερικής ισορροπίας (partial equilibrium) όπου αναλύονται οι αλληλεπιδράσεις εντός του υπό εξέταση συστήματος χωρίς να λαμβάνονται υπόψη αλληλεπιδράσεις με την ευρύτερη οικονομία (πλαίσιο γενικής ισορροπίας: general equilibrium). Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου της μερικής ισορροπίας είναι ότι επιτρέπεται η λεπτομερής αναπαράσταση του υπό εξέταση συστήματος, ο σαφής προσδιορισμός των παραγόντων και των αποφασιζόντων, η κατάστρωση συγκεκριμένων προβλημάτων βελτιστοποίησης για κάθε αποφασίζοντα και η ενσωμάτωση τεχνολογικών-μηχανικών στοιχείων και μέτρων πολιτικής. Μια διαφορετική προσέγγιση είναι εκείνη της γενικής ισορροπίας όπου αναλύονται και μελετώνται οι συμπεριφορές των οικονομικών παραγόντων όλου του οικονομικού συστήματος. Το βασικό μειονέκτημα αυτής της μεθοδολογίας, έγκειται στο γεγονός ότι ο τομέας της ενέργειας και των μεταφορών προσεγγίζονται ως επιπλέον παράγοντες παραγωγής στα πλαίσια της οικονομίας. Το γεγονός αυτό έχει ως συνέπεια την έλλειψη υψηλού βαθμού λεπτομέρειας κατά τη μοντελοποίηση του τομέα των μεταφορών και των επιμέρους κλάδων.

Τα υπάρχοντα μοντέλα ενεργειακής οικονομίας που μοντελοποιούν τον τομέα των μεταφορών και έχουν χρησιμοποιηθεί μέχρι σήμερα για την Ευρώπη για την ανάλυση των επιπτώσεων της εφαρμογής συγκεκριμένων πολιτικών υπόκεινται σε ορισμένους σημαντικούς περιορισμούς. Ορισμένα μοντέλα δεν περιέχουν ούτε λεπτομερή αναπαράσταση τεχνολογικών στοιχείων ούτε πλούσιο σύνολο εναλλακτικών τεχνολογιών και καυσίμων για τα διάφορα μέσα μεταφοράς. Στα πλαίσια της μακροχρόνιας ενεργειακής ανάλυσης, η απουσία τεχνολογικών επιλογών, όπως τα ηλεκτρικά οχήματα ή τα οχήματα που κινούνται με κυψέλες υδρογόνου, αποτελεί μειονέκτημα καθώς αυτές οι τεχνολογίες μπορεί να συνεισφέρουν σε υψηλό βαθμό στην απανθρακοποίηση του συστήματος των μεταφορών σε μακροχρόνιο ορίζοντα.

Η τεχνολογική λεπτομέρεια όσον αφορά τα ηλεκτρικά οχήματα που εκφράζεται κυρίως μέσω της χωρητικότητας της μπαταρίας και κατ' επέκταση μέσω της ηλεκτρικής αυτονομίας των οχημάτων, είναι ιδιαίτερα σημαντική τόσο από πλευράς κόστους όσο και από πλευράς αποδοχής του καταναλωτή. Πράγματι, η ηλεκτρική αυτονομία αποτελεί ένα κρίσιμο παράγοντα αποδοχής των ηλεκτρικών αυτοκινήτων από τους καταναλωτές. Επιπλέον, ο περιορισμένος χρονικός ορίζοντας πρόβλεψης (μέχρι το 2030), που έχουν ορισμένα μοντέλα, τα καθιστά ακατάλληλα για τη διενέργεια μακροπρόθεσμων ενεργειακών αναλύσεων. Άλλωστε, τα περισσότερα μοντέλα αδυνατούν να προσομοιώσουν τόσο τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των παραγόντων του συστήματος των μεταφορών όσο και τη σαφή διασύνδεση των αποφάσεων των παραγόντων με συγκεκριμένες πολιτικές και μη οικονομικούς παράγοντες.

Η πολυπλοκότητα που διέπει τον τομέα των μεταφορών, ο μεγάλος αριθμός των αποφασιζόντων σε συνδυασμό με ένα πλήθος πολιτικών που στοχεύουν σε διαφορετικούς αποφασίζοντες συνιστούν ανασταλτικούς παράγοντες για τη σαφή απεικόνιση των αλληλεπιδράσεων τους και τη μοντελοποίηση των επιμέρους προβλημάτων βελτιστοποίησης. Επιπλέον, η μοντελοποίηση της συμπεριφοράς των παραγόντων του συστήματος των μεταφορών δε λαμβάνει ξεκάθαρα υπόψη τους μη οικονομικούς παράγοντες που είναι δυνατό να επηρεάσουν το αποτέλεσμα. Πιο συγκεκριμένα, η διασύνδεση της απόφασης των καταναλωτών μόνο με οικονομικούς παράγοντες απέχει συχνά από την πραγματικότητα όπου συνήθως υπεισέρχονται «κρυφοί» μη οικονομικοί παράγοντες. Τέτοιοι παράγοντες εμπεριέχουν «κρυφά» κόστη ή αποτελούν εμπόδια για την είσοδο στην αγορά συγκεκριμένων τεχνολογιών. Τέτοιοι παράγοντες είναι η απουσία της απαραίτητης υποδομής ανεφοδιασμού συγκεκριμένων καυσίμων, όπως το φυσικό αέριο, το υδρογόνο και φυσικά τα σημεία φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων. Αν βέβαια, η μοντελοποίηση της απόφασης του καταναλωτή για αγορά καινούριου οχήματος λάβει υπόψη μόνο τα οικονομικά στοιχεία, τότε δεν ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα καθώς δε θα έχει συμπεριλάβει την ύπαρξη ή όχι της απαραίτητης υποδομής ανεφοδιασμού.

1.3 Πρωτοτυπία- Συνεισφορά διατριβής

Η συγκεκριμένη παράγραφος παρουσιάζει την πρωτοτυπία και τη συνεισφορά της διατριβής στην επιστήμη. Οι πρωτοτυπίες διακρίνονται τόσο με βάση το μεθοδολογικό πλαίσιο που εφαρμόζεται όσο και αναφορικά με τα ερωτήματα ενεργειακής πολιτικής που απαντώνται μέσω της εφαρμογής του μοντέλου.

1.3.1 Συνεισφορά στο μεθοδολογικό πλαίσιο: Μοντελοποίηση

Το μοντέλο PRIMES-TREMOVE φέρει σημαντικά στοιχεία πρωτοτυπίας σε σχέση με άλλες προσεγγίσεις στη βιβλιογραφία, η επισκόπηση των οποίων πραγματοποιείται στο Κεφάλαιο 2.

Τα κύρια σημεία πρωτοτυπίας και συνεισφοράς στη βιβλιογραφία αναφορικά με το *μεθοδολογικό πλαίσιο* συνοψίζονται ως εξής:

- Μοντελοποίηση των αποφάσεων των επιμέρους αποφασιζόντων σχετικών με τον κλάδο των μεταφορών (καταναλωτές, επιχειρήσεις, κατασκευαστές οχημάτων, επενδυτές σε υποδομές) ως επιμέρους προβλήματα βελτιστοποίησης. Οι αποφάσεις των διαφορετικών αποφασιζόντων βασίζονται σε οικονομικά προβλήματα που θεμελιώνονται στην οικονομική θεωρία, αλληλεπιδρούν μεταξύ τους και επιλύονται ως ένα σύστημα ισοτικών και ανισοτικών περιορισμών με την εφαρμογή της μεθόδου της μεικτής συμπληρωματικότητας.
- Διασύνδεση των αποφάσεων των αποφασιζόντων τόσο με οικονομικούς (όπως συμβαίνει στα μοντέλα της βιβλιογραφίας) όσο και με μη οικονομικούς παράγοντες. Με αυτόν τον τρόπο, προσομοιώνονται με μεγαλύτερο ρεαλισμό οι αποφάσεις των καταναλωτών διότι, στην πραγματικότητα, δε βασίζονται αποκλειστικά σε καθαρά οικονομικές αιτίες. Η έλλειψη της απαραίτητης διαθέσιμης υποδομής ανεφοδιασμού για τα εναλλακτικά καύσιμα όπως η ηλεκτρική ενέργεια και το υδρογόνο καθώς και η μειωμένη αυτονομία των ηλεκτρικών οχημάτων αποτελούν παράγοντες που είναι δυνατό να εμποδίσουν την είσοδο αυτών των τεχνολογιών στην αγορά.
- Μοντελοποίηση των μη οικονομικών παραγόντων (έλλειψη υποδομής διάθεσης καυσίμου και άγχος αυτονομίας) ως «κρυφά» κόστη που ουσιαστικά εκφράζουν τα εμπόδια της αγοράς για τη διάδοση των εναλλακτικών τεχνολογιών οχημάτων. Τα «κρυφά» κόστη εμπεριέχονται στις αντικειμενικές συναρτήσεις των μη γραμμικών προβλημάτων βελτιστοποίησης καθώς και στα μοντέλα επιλογής νέου εξοπλισμού που βασίζονται στις αρχές της θεωρίας διακριτής επιλογής. Γενικότερα, οι μη οικονομικοί παράγοντες δεν αποτελούν πραγματικές δαπάνες, αλλά οδηγούν σε απώλειες στη χρησιμότητα των καταναλωτών και επιπλέον κόστους για τις επιχειρήσεις. Με αυτόν τον τρόπο επηρεάζονται τόσο οι αποφάσεις για μετακίνηση όσο και για την επιλογή νέου εξοπλισμού.
- Εισαγωγή κλάσεων αποφασιζόντων με διαφορετικά χαρακτηριστικά για τη ρεαλιστικότερη προσομοίωση των επιπτώσεων των μη οικονομικών παραγόντων, που σχετίζονται με την ελλιπή αυτονομία των ηλεκτρικών οχημάτων και την έλλειψη ικανού αριθμού σταθμών ανεφοδιασμού σε συγκεκριμένες γεωγραφικές περιοχές. Σε αντίθεση με τη βιβλιογραφία όπου εφαρμόζεται η μεθοδολογία του αντιπροσωπευτικού καταναλωτή, στην παρούσα διατριβή πραγματοποιείται μοντελοποίηση διαφορετικών κλάσεων αποφασιζόντων με ετερογενή χαρακτηριστικά αναφορικά με τις αποφάσεις για την απόσταση του ταξιδιού που πραγματοποιούν. Η εισαγωγή της ετερογένειας διασφαλίζει ότι οι αποφασίζοντες δε θα παρουσιάσουν μια μέση συμπεριφορά.

Συνεπώς, θεωρήθηκε ότι κάθε είδος ταξιδιού θα χαρακτηρίζεται από ένα ιστόγραμμα συχνοτήτων όσον αφορά την απόσταση του. Πράγματι, οι ετερογενείς αποφασίζοντες, συγκρίνουν την αυτονομία των ηλεκτρικών οχημάτων καθώς και τη διαθεσιμότητα σταθμών ανεφοδιασμού για όλες τις κατηγορίες ταξιδιών με βάση τη χιλιομετρική απόσταση του ταξιδιού που επιθυμούν να διανύσουν.

- Βελτίωση της προσομοίωσης της συμπεριφοράς των καταναλωτών και των επιχειρήσεων αναφορικά με τις αποφάσεις για μετακίνηση σε σχέση με άλλα μοντέλα της βιβλιογραφίας. Κατά συνέπεια, η ετήσια χιλιομετρική απόσταση για κάθε τύπο οχήματος καθώς και η διανομή της απόστασης αυτής στα επιμέρους ταξίδια ανά σκοπό, περιοχή, στιγμή και απόσταση είναι ενδογενής μεταβλητή. Η εισαγωγή επιπλέον μεταβλητών απόφασης, παρ' ότι αύξησε την πολυπλοκότητα του μοντέλου, προτιμήθηκε από την υιοθέτηση της υπόθεσης σταθερών χιλιομετρικών αποστάσεων για τα οχήματα όπως ακολουθείται σε άλλα μοντέλα της βιβλιογραφίας. Οι μεταβλητές αυτές έχουν εισαχθεί στα προβλήματα βελτιστοποίησης του καταναλωτή και της επιχείρησης και αλληλεπιδρούν με τους οικονομικούς παράγοντες και τα «κρυφά» κόστη.
- Αναπαράσταση ενός συνόλου πιθανών μέτρων πολιτικής, για τη δυνατότητα κατάστροφησης σεναρίων ενεργειακής πολιτικής με σκοπό τη διείσδυση της ηλεκτρικής ενέργειας και του υδρογόνου στις μεταφορές. Το πιο σημαντικό μέτρο πολιτικής αφορά τον καθορισμό τεχνολογικών στόχων και ορίων, όπως ο κανονισμός 443/2009 για τον περιορισμό των ειδικών εκπομπών CO₂ των επιβατικών οχημάτων ανά κατασκευαστή ή πρότυπα που θέτουν περιορισμούς στη μέση ειδική κατανάλωση των οχημάτων. Αυτού του είδους τα ρυθμιστικά μέτρα στους κατασκευαστές οχημάτων έχουν ενσωματωθεί με τη μορφή περιορισμών στο πρόβλημα βελτιστοποίησης των παραγωγών. Η μοντελοποίηση των παραπάνω τεχνολογικών ορίων εφαρμόζεται για πρώτη φορά με ξεκάθαρο τρόπο στη βιβλιογραφία.
- Ενσωμάτωση πλήθους τεχνολογικών λεπτομερειών σχετικών με τις διάφορες τεχνολογίες οχημάτων καθώς και εναλλακτικών καυσίμων, γεγονός που καθιστά το μοντέλο ικανό να διερευνήσει διάφορους εναλλακτικούς δρόμους προς ένα βιώσιμο σύστημα μεταφορών. Ιδιαίτερη έμφαση έχει δοθεί στα ηλεκτρικά αυτοκίνητα που διακρίνονται σε ηλεκτρικά οχήματα με μπαταρία (Battery Electric Vehicle), υβριδικά με καλώδιο (Plug-in Hybrid), ηλεκτρικό όχημα με επέκταση αυτονομίας (range extender), οχήματα με κυψέλη υδρογόνου (hydrogen fuel cell). Οι παραπάνω τύποι οχημάτων διακρίνονται σε τρεις επιπλέον κατηγορίες, με βάση την ηλεκτρική τους αυτονομία, η οποία εξαρτάται από τη χωρητικότητα της μπαταρίας, με στόχο την αλληλεπίδραση με τις διάφορες κλάσεις καταναλωτών και τα «κρυφά» κόστη.

1.3.2 Συνεισφορά στη επιστήμη της ενεργειακής οικονομικής ανάλυσης: Πρωτότυπες εφαρμογές

Η συνεισφορά της παρούσας διατριβής έγκειται επιπλέον στη διερεύνηση συγκεκριμένων ερωτημάτων ενεργειακής πολιτικής και οικονομικής ανάλυσης. Η διερεύνηση πραγματοποιείται με τη χρήση και εφαρμογή του μοντέλου σε πραγματικά προβλήματα που αντιμετωπίζουν οι φορείς χάραξης πολιτικής. Πιο συγκεκριμένα, πραγματοποιείται:

- Διερεύνηση μεσοπρόθεσμων και μακροπρόθεσμων στόχων για τα επίπεδα της πολιτικής ρύθμισης των ειδικών εκπομπών των νέων επιβατικών αυτοκινήτων, όπως καθορίζει ο κανονισμός 443/2009. Η μεθοδολογία εφαρμογής της συγκεκριμένης πολιτικής, που αποτελεί πρωτότυπη προσέγγιση στη βιβλιογραφία, επιτρέπει την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με τις επιπτώσεις των τεχνολογικών ορίων CO₂ στον εξηλεκτρισμό των μεταφορών και το βαθμό διείσδυσης των ηλεκτρικών αυτοκινήτων στην αγορά. Η πρωτοτυπία της συγκεκριμένης εφαρμογής έγκειται στο γεγονός ότι πραγματοποιείται για πρώτη φορά η διεξαγωγή ανάλυσης που συσχετίζει τα τεχνολογικά όρια CO₂ με το βαθμό διείσδυσης των ηλεκτρικών οχημάτων στην Ευρωπαϊκή αγορά. Η συγκεκριμένη εφαρμογή παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 5 της διατριβής.
- Διερεύνηση του ρόλου της ηλεκτρικής ενέργειας και του υδρογόνου στις επιβατικές μεταφορές με στόχο τη δραστική μείωση των εκπομπών CO₂ του τομέα των Ευρωπαϊκών μεταφορών στο χρονικό ορίζοντα 2050. Το πλαίσιο της ανάλυσης βασίζεται σε πρωτότυπες υποθέσεις και μεθοδολογικό πλαίσιο που υποθέτει επιτυχή συντονισμό των εμπλεκόμενων φορέων σχετικών με τη διείσδυση εναλλακτικών μορφών ενέργειας στον τομέα των μεταφορών. Οι εμπλεκόμενοι φορείς είναι οι κατασκευαστές οχημάτων, οι επενδυτές σε υποδομή διανομής και διάθεσης ηλεκτρικής ενέργειας και υδρογόνου, οι φορείς χάραξης πολιτικής και οι ίδιοι οι καταναλωτές. Το σύστημα των αποφασιζόντων αναλύεται στο Κεφάλαιο 3.
- Κατάστρωση πολλαπλών σεναρίων ενεργειακής πολιτικής όπου εξετάζεται η διείσδυση των ηλεκτρικών αυτοκινήτων και των αυτοκινήτων με κυψέλη καυσίμου υδρογόνου ως συνάρτηση: (1) της τεχνολογικής προόδου και (2) του μέτρου πολιτικής που υιοθετείται. Η τεχνολογική πρόοδος απεικονίζεται κυρίως στο κόστος των μπαταριών και των κυψελών καυσίμου υδρογόνου και στο εύρος αυτονομίας τους. Επιπλέον, πραγματοποιείται ανάλυση υπό το πρίσμα της εφαρμογής και σύγκρισης εναλλακτικών μέτρων πολιτικής που ρυθμίζουν είτε τις εκπομπές CO₂ είτε την ενεργειακή απόδοση των αυτοκινήτων. Η συγκεκριμένη εφαρμογή είναι πρωτότυπη και συνεισφέρει στους φορείς χάραξης πολιτικής καθώς απαντά στο ερώτημα «πώς επιδρούν διαφορετικού τύπου προδιαγραφές στους κατασκευαστές οχημάτων και στην ανάπτυξη της τεχνολογίας». Η συγκεκριμένη εφαρμογή παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 6 της διατριβής.
- Διερεύνηση και αξιολόγηση της σημασίας της ανάπτυξης υποδομής διανομής και διάθεσης ηλεκτρικής ενέργειας και υδρογόνου (καθώς και φυσικού αερίου και βιοκαυσίμων) στο πλαίσιο του στόχου της δραστικής μείωσης των εκπομπών CO₂ μέχρι

το 2050. Η συγκεκριμένη ανάλυση εξετάζει τις επιπτώσεις τυχόν ανεπαρκούς συντονισμού μεταξύ των εμπλεκόμενων φορέων σχετικών με τη διεύθυνση εναλλακτικών μορφών ενέργειας στον τομέα των μεταφορών, γεγονός που αντανακλάται σε ανεπαρκή ανάπτυξη των απαιτούμενων υποδομών. Η ανάλυση που πραγματοποιείται ποσοτικοποιεί τις αρνητικές επιπτώσεις που συνεπάγονται πολύ υψηλότερες δαπάνες για τη μείωση των εκπομπών. Η πρωτοτυπία της συγκεκριμένης εφαρμογής έγκειται στο γεγονός ότι ποσοτικοποιεί και αναδεικνύει τα επιπρόσθετα κόστη λόγω του ανεπαρκούς συντονισμού των αποφασιζόντων. Η συγκεκριμένη εφαρμογή παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 7 της διατριβής.

- Διερεύνηση και ποσοτικοποίηση των εκπομπών CO₂ στο σύνολο της ενεργειακής αλυσίδας που περιλαμβάνει και το στάδιο της ηλεκτροπαραγωγής. Η παρούσα ανάλυση πραγματοποιείται στα πλαίσια της προσπάθειας για δραστική μείωση των εκπομπών CO₂ στο σύνολο του ενεργειακού συστήματος. Συγχρόνως, εξετάζεται η σημασία της χρήσης έξυπνων συσκευών φόρτισης που θα αποτρέψουν τη φόρτιση των ηλεκτρικών αυτοκινήτων με ανεξέλεγκτο τρόπο, γεγονός που οδηγεί σε ομαλοποίηση της καμπύλης φορτίου ηλεκτρικής ενέργειας και συγκράτηση του κόστους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Η πρωτοτυπία της συγκεκριμένης ανάλυσης έγκειται στο μεθοδολογικό πλαίσιο που ακολουθείται, όπου πραγματοποιείται διασύνδεση του μοντέλου PRIMES-TREMOVE με το μοντέλο PRIMES, που έχει αναπτυχθεί στο Εργαστήριο Ενέργειας-Οικονομίας-Περιβάλλοντος της ΣΗΜΜΥ και εξετάζει το σύνολο του ενεργειακού συστήματος και του τομέα της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Η συγκεκριμένη εφαρμογή παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 7 της διατριβής.

1.4 Δομή της διατριβής

Η δομή της παρούσας διδακτορικής διατριβής περιλαμβάνει τα εξής επτά κεφάλαια.

Το πρώτο κεφάλαιο της διατριβής παρουσιάζει το επιστημονικό αντικείμενο και το σκοπό της διατριβής. Επίσης, παρουσιάζει τα πρωτότυπα στοιχεία και τη συνεισφορά της διατριβής μέσω της ανάπτυξης ενός πρωτότυπου ενεργειακού οικονομικού μοντέλου και των πεδίων εφαρμογής του.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται μια εισαγωγή στη σημασία της μοντελοποίησης του κλάδου των μεταφορών και μια επισκόπηση στις μεθόδους μοντελοποίησης της ζήτησης των μεταφορών. Στη συνέχεια, πραγματοποιείται μια παρουσίαση των κριτηρίων ταξινόμησης των μεθόδων μοντελοποίησης των μεταφορών στα πλαίσια της ενεργειακής οικονομικής ανάλυσης. Επιπλέον, γίνεται μια επισκόπηση σε υπάρχοντα μοντέλα υψηλής κλίμακας τα οποία εξετάζουν το γεωγραφικό χώρο της Ευρώπης στον τομέα των μεταφορών.

Το τρίτο κεφάλαιο περιγράφει το σύστημα της αγοράς των εναλλακτικών καυσίμων για τον τομέα των μεταφορών συμπεριλαμβανομένης της ηλεκτρικής ενέργειας. Επιπρόσθετα, δίνεται μια περιγραφή των επιμέρους εμπλεκόμενων φορέων οι οποίοι σχετίζονται με την ανάπτυξη της απαραίτητης υποδομής που θα επιτρέψει τη

μαζική διείσδυση των εναλλακτικών καυσίμων και της ηλεκτρικής ενέργειας στην Ευρωπαϊκή αγορά. Τέλος, το κεφάλαιο περιγράφει τους μηχανισμούς και τα μέτρα της αγοράς που θα οδηγήσουν στο συντονισμό των επιμέρους φορέων για την ανάπτυξη της απαραίτητης υποδομής που αποτελεί απαραίτητη συνθήκη για τη διείσδυση της ηλεκτρικής ενέργειας στο Ευρωπαϊκό σύστημα μεταφορών.

Το τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζει τη δομή του μοντέλου ενεργειακής οικονομικής ανάλυσης, PRIMES-TREMOVE, για τον τομέα των μεταφορών, η κατασκευή του οποίου αποτελεί το βασικό αντικείμενο της διατριβής. Η κατασκευή του μοντέλου βασίζεται στις αρχές της μικροοικονομικής θεωρίας και επιλύει το πρόβλημα εύρεσης της ισορροπίας της αγοράς μεταξύ των φορέων ζήτησης και προσφοράς υπηρεσιών μεταφοράς. Η δομή του μοντέλου είναι αρθρωτή, όπου τα επιμέρους στοιχεία αποτελούν προβλήματα βελτιστοποίησης. Επίσης, το παρόν κεφάλαιο παρουσιάζει τα βασικά είδη πολιτικών που είναι ικανά να οδηγήσουν σε δραστική αλλαγή τον τομέα των μεταφορών και να οδηγήσουν στην αγορά νέες μορφές ενέργειας όπως η ηλεκτρική. Το κεφάλαιο παρουσιάζει τον τρόπο μοντελοποίησης και ενσωμάτωσης των διάφορων μέτρων πολιτικής στο μοντέλο PRIMES-TREMOVE. Τα συγκεκριμένα μέτρα πολιτικής αποτελούν το βασικό μηχανισμό για την κατάστρωση των εναλλακτικών σεναρίων διείσδυσης της ηλεκτρικής ενέργειας στις οδικές μεταφορές.

Το πέμπτο κεφάλαιο εξετάζει τις επιπτώσεις της πολιτικής εκείνης, που θέτει τεχνολογικά όρια στους κατασκευαστές των αυτοκινήτων για τις ειδικές εκπομπές CO₂ των νέων αυτοκινήτων. Το κεφάλαιο πραγματεύεται τρία σενάρια που υποθέτουν σταδιακή μείωση των ορίων των ειδικών εκπομπών CO₂ για τους κατασκευαστές μέχρι το 2050. Η συγκεκριμένη ανάλυση ευαισθησίας έχει σκοπό να μετρήσει τις επιπτώσεις της συγκεκριμένης πολιτικής στο βαθμό διείσδυσης των ηλεκτρικών αυτοκινήτων με μπαταρία και των υβριδικών με καλώδιο, τη συνολική κατανάλωση ενέργειας καθώς και τις επιπτώσεις στην αγορά.

Το έκτο κεφάλαιο εξετάζει εναλλακτικά σενάρια στα οποία το σύστημα μεταφορών της Ευρώπης επιχειρεί δραστική μείωση των εκπομπών CO₂ στο χρονικό ορίζοντα 2050. Ο σκοπός του κεφαλαίου αυτού είναι να εξετάσει τη συνεισφορά της ηλεκτρικής ενέργειας στις οδικές μεταφορές στα πλαίσια της μείωσης των εκπομπών CO₂ των μεταφορών το 2050 κατά 60% σε σχέση με τα επίπεδα του 1990. Οι βασικές τεχνολογίες οχημάτων που διαδραματίζουν βασικό ρόλο στα συγκεκριμένα σενάρια είναι τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα και τα οχήματα εξοπλισμένα με κυψέλη υδρογόνου. Επιπλέον, τα υπό εξέταση σενάρια εξετάζονται υπό το πρίσμα εφαρμογής δύο εναλλακτικών πολιτικών που θέτουν τεχνολογικά όρια είτε στις ειδικές εκπομπές CO₂ είτε στην ενεργειακή απόδοση των νέων αυτοκινήτων.

Στο έβδομο κεφάλαιο εξετάζεται η περίπτωση της ανεπαρκούς ανάπτυξης της διαθέσιμης υποδομής φόρτισης και οι επιπτώσεις στους καταναλωτές από την εφαρμογή εναλλακτικών μέτρων πολιτικής. Μέσω της διασύνδεσης με το μοντέλο PRIMES, που έχει αναπτυχθεί στο Εργαστήριο Ενέργειας-Οικονομίας-Περιβάλλοντος

και εξετάζει το σύνολο του ενεργειακού συστήματος, αναλύονται οι εκπομπές CO₂ στο σύνολο της ενεργειακής αλυσίδας που περιλαμβάνει και το στάδιο της ηλεκτροπαραγωγής. Συγχρόνως, εξετάζεται η σημασία της χρήσης έξυπνων συσκευών φόρτισης που θα αποτρέψουν τη φόρτιση των ηλεκτρικών αυτοκινήτων με ανεξέλεγκτο τρόπο. Η ανεξέλεγκτη φόρτιση των ηλεκτρικών αυτοκινήτων μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση του φορτίου αιχμής και του κόστους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Το όγδοο κεφάλαιο περιλαμβάνει γενικά συμπεράσματα σχετικών με τα σενάρια πολιτικής που εξετάστηκαν και του μεθοδολογικού πλαισίου. Τέλος, η διατριβή προτείνει συγκεκριμένες προοπτικές περαιτέρω έρευνας στο μέλλον.

Κεφάλαιο 2

2 Η μοντελοποίηση του τομέα των μεταφορών στα πλαίσια της ενεργειακής οικονομικής ανάλυσης: Επισκόπηση των μεθοδολογικών προσεγγίσεων

Ο σκοπός του παρόντος κεφαλαίου είναι να παρουσιάσει τη βιβλιογραφική έρευνα αναφορικά με τρόπους μοντελοποίησης του τομέα των μεταφορών στα πλαίσια της ενεργειακής οικονομικής ανάλυσης. Αρχικά, παρουσιάζεται η σημασία της μοντελοποίησης των μεταφορών και γίνεται μια σύνοψη των μεθόδων της βιβλιογραφίας. Επιπλέον, γίνεται αναφορά σε μοντέλα υψηλής κλίμακας (επιπέδου κρατών) ενεργειακής οικονομικής ανάλυσης με ικανή αναπαράσταση του τομέα των μεταφορών.

2.1 Η σημασία της μοντελοποίησης του τομέα των μεταφορών

Οι μεταφορές διαδραματίζουν πολύ σημαντικό ρόλο στην οικονομική δραστηριότητα των κρατών και κατέχουν σημαντικό ποσοστό επί του ακαθάριστού εγχώριου προϊόντος (ΑΕΠ). Είναι γενικά αποδεκτό ότι η αύξηση της ζήτησης για μεταφορές είναι συνδεδεμένη με την οικονομική ανάπτυξη. Επιπλέον, οι μεταφορές είναι άρρηκτα συνδεδεμένες με το εσωτερικό και το διεθνές εμπόριο (Quinet και Vickerman, 2005). Το εσωτερικό εμπόριο εξαρτάται ως επί το πλείστο από τις επίγειες μεταφορές με τη χρήση φορτηγών και σιδηροδρόμων ενώ το διεθνές εμπόριο εξαρτάται επιπλέον και από τις θαλάσσιες μεταφορές.

Η χρήση κατάλληλων μοντέλων αποτελεί ένα πολύ ουσιαστικό εργαλείο για την ανάλυση και υποστήριξη αποφάσεων σε πολλούς επιστημονικούς τομείς. Με την

κατασκευή μοντέλων ουσιαστικά απλοποιείται ο πραγματικός κόσμος και εκφράζονται με μαθηματικές σχέσεις οι αιτίες και τα αποτελέσματα. Πιο συγκεκριμένα, η εστίαση στους καθοριστικούς παράγοντες που επηρεάζουν τις αποφάσεις καθώς και η χρήση αξιόπιστων δεδομένων, μπορούν να προσδώσουν μια ικανοποιητική ερμηνεία των παρατηρημένων φαινομένων και να οδηγήσουν σε ορθές προβλέψεις.

Η κατασκευή ενός μοντέλου μεταφορών δεν είναι μονοσήμαντη αλλά θα πρέπει κυρίως να καθοριστεί ο λόγος για τον οποίο κατασκευάζεται και οι σκοποί που θα εξυπηρετήσει. Συνεπώς, πρέπει να αποφασιστεί το πλαίσιο της ανάλυσης και να καθοριστούν οι αποφασίζοντες. Το μοντέλο προσομοιώνει την διαδικασία απόφασης ενός αποφασίζοντα που μπορεί να είναι για παράδειγμα ο διαχειριστής των δημόσιων σιδηροδρομικών μεταφορών ή ένας ιδιώτης που θα αποφασίσει πώς θα μετακινηθεί από το σπίτι στην εργασία του. Το παραπάνω αποτελεί και τη μεγαλύτερη δυσκολία στην πρόβλεψη της ζήτησης για ενέργεια στον κλάδο των μεταφορών, καθώς εμπλέκονται εκατομμύρια μετακινούμενοι. Οι ανομοιογένειες που υπάρχουν είναι πολύ σημαντικές και μπορεί να διακρίνονται με βάση μακροοικονομικά κριτήρια, κριτήρια συμπεριφοράς όσον αφορά τις επιλογές για αγορά κεφαλαιουχικού εξοπλισμού, επιλογές για ταξίδια (ταξίδια επαγγελματικά ή ταξίδια αναψυχής) και επιλογής μέσου μεταφοράς. Σε κάθε περίπτωση είναι απαραίτητο να έχουν καθοριστεί οι αιτίες που οδηγούν σε κάθε αποτέλεσμα καθώς και ο σκοπός της κατασκευής του και οι χρήστες που μπορεί να είναι είτε ακαδημαϊκό προσωπικό είτε φορείς χάραξης πολιτικής.

Το ενδιαφέρον της παρούσας διατριβής, στρέφεται στις αποφάσεις που παίρνονται από ιδιώτες για την επιλογή των επιβατικών μετακινήσεών τους καθώς και από εταιρείες που αποφασίζουν τον τρόπο μετακίνησης των εμπορευμάτων τους. Από τη δεκαετία του 1960 και έπειτα έχει βελτιωθεί η κατανόηση της συμπεριφοράς των διαφόρων πρακτόρων (*agents*) και έχει επιχειρηθεί η προσομοίωση αυτής κυρίως από την οικονομική επιστήμη. Η χρήση καθαρά τεχνικών και μηχανικών στοιχείων (*engineering*) στη διαδικασία της μοντελοποίησης δεν είναι αυτοσκοπός αλλά μπορεί να βελτιώσει τη διακριτική ικανότητα ενός μοντέλου.

Η μελέτη της πραγματικότητας εγείρει ερωτήματα όσον αφορά τους λόγους για τους οποίους οι άνθρωποι επιλέγουν να ταξιδέψουν, το μέσο που θα χρησιμοποιήσουν καθώς και τις περιοχές που θα πραγματοποιήσουν τα ταξίδια τους. Παρόμοια ερωτήματα τίθενται και για την περίπτωση των εταιρειών που σκοπεύουν να μετακινήσουν τα προϊόντα τους και επιλέγουν τον τρόπο μετακίνησης. Οι παραπάνω αποφάσεις δε βασίζονται μόνο σε οικονομικούς λόγους αλλά βασίζονται και σε επιπλέον ποιοτικά στοιχεία.

Τα τελευταία χρόνια, με την ευαισθητοποίηση γύρω από το θέμα της κλιματικής αλλαγής στην οποία ο τομέας των μεταφορών συμβάλλει σημαντικά με τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, αναζητούνται τρόποι για τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου από τις μεταφορές. Η υιοθέτηση συγκεκριμένων μέτρων πολιτικών αποσκοπεί στο να οδηγήσουν σε μείωση των εκπομπών CO₂ του συστήματος των μεταφορών. Η μοντελοποίηση των πολιτικών αυτών έχουν ως σκοπό το σχεδιασμό

σεναρίων μείωσης των μελλοντικών εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου. Τα μέτρα πολιτικής και οι στόχοι μείωσης των εκπομπών CO₂ επηρεάζουν τη ζήτηση για μεταφορές, ενδέχεται να διαφοροποιήσουν τον τρόπο και τόπο μετακίνησης ατόμων και φορτίων, να οδηγήσουν σε κατασκευές υποδομών και αλλαγές στην τεχνολογία των οχημάτων που προσφέρεται από τις κατασκευάστριες εταιρείες.

2.1.1 Συνοπτική περιγραφή του συστήματος των μεταφορών

Η ανάλυση του συστήματος των μεταφορών περιλαμβάνει τις αλληλεπιδράσεις τριών σημαντικών στοιχείων, τα οποία είναι τα εξής (Fessard, 1977) :

- Σύστημα δραστηριοτήτων (πρότυπο/ πατρών των κοινωνικών και οικονομικών δραστηριοτήτων)
- Σύστημα μεταφορών
- Πατρών των ροών μέσα στο σύστημα των μεταφορών

Αν τα παραπάνω στοιχεία θεωρηθούν σαν ένα κλειστό σύστημα, τότε τα στοιχεία είναι δυνατό να αλληλεπιδρούν κατά τους εξής ακόλουθους τρόπους:

1. Το πρότυπο των ροών μέσα στο σύστημα των μεταφορών καθορίζεται από κοινού από το ίδιο το σύστημα των μεταφορών (προσφορά) και από το σύστημα δραστηριοτήτων (ζήτηση) σαν αποτέλεσμα της ισορροπίας τους.
2. Το πρότυπο των ροών είναι δυνατό να οδηγήσει σε μεταβολές του συστήματος δραστηριοτήτων, μεταβάλλοντας τις κοινωνικές και οικονομικές δραστηριότητες.
3. Παρομοίως, το σύστημα μεταφορών είναι δυνατό να «αντιδράσει» στις ενδεχόμενες μεταβολές των ροών

Οι παραπάνω αλληλεπιδράσεις μπορούν να μελετηθούν και να αναλυθούν με τη χρήση ενδεδειγμένων μοντέλων και αναλυτικών εργαλείων. Για παράδειγμα, η αντίδραση του συστήματος μεταφορών σε μεταβολές των ροών απαιτεί τη χρήση μεθόδου που θα λαμβάνει υπόψη τις κινητήριες παραμέτρους που θα οδηγούν σε βέλτιστη απόκριση του συστήματος. Συγχρόνως, το εργαλείο θα πρέπει να μπορεί να εντοπίσει το σημείο ισορροπίας μεταξύ των επιμέρους στοιχείων (οικονομικής δραστηριότητας και συστήματος μεταφορών). Ένα τέτοιο εργαλείο είναι ένα μοντέλο μεταφορών με αναπαράσταση πολλαπλών μέσων μεταφοράς με χαρακτηριστικά γεωγραφικού χαρακτήρα.

Η μελέτη των αλληλεπιδράσεων στο σύστημα δραστηριοτήτων είναι πιο δύσκολη, λόγω της πολυπλοκότητας του συστήματος και των πολλαπλών σχέσεων μεταξύ των αιτιών και των αποτελεσμάτων. Το σύστημα των μεταφορών αποτελεί μέρος του συστήματος των οικονομικών δραστηριοτήτων και είναι φανερό ότι τυχόν μεταβολές του συστήματος μεταφορών μπορούν να προκαλέσουν ανακατανομή της οικονομικής δραστηριότητας, εισοδήματος και εργασίας.

2.2 Σύντομο ιστορικό στη μοντελοποίηση της ζήτησης για μεταφορές

2.2.1.1 Μοντέλα βαρύτητας

Τα πρώτα μοντέλα ζήτησης για μεταφορές χρησιμοποιούσαν απλές συναρτησιακές σχέσεις και ήταν τύπου μοντέλων βαρύτητας (gravity model). Τα μοντέλα βαρύτητας αποτελούν περιληπτικά (aggregate) μοντέλα που εξετάζουν τις ροές μεταφοράς μεταξύ γεωγραφικών ζωνών με βάση το σχετικό μέγεθος τους. Ο αριθμός των ταξιδιών που υπολογίζεται σε κάθε ζώνη είναι ανάλογος του πληθυσμού της ζώνης, και αντιστρόφως ανάλογος της σχετικής απόστασης των ζωνών (βλ. Rodrigue, 2013). Τα μοντέλα βαρύτητας είναι στατικά μοντέλα που στερούνται της πολυπλοκότητας των δυναμικών και πιο σύγχρονων μοντέλων.

Η εμπορευματική δραστηριότητα και πιο συγκεκριμένα η ροή αγαθών και το εμπόριο μεταξύ δύο περιοχών (ή χωρών) εξαρτάται από το ΑΕΠ των δύο εξεταζόμενων περιοχών, τον πληθυσμό καθώς επίσης και από την απόσταση κατά τους Tavasszy, Davydenko και Ruijgrok (2009). Οι προαναφερθείσες μεταβλητές είναι εκείνες που καθορίζουν το διεθνές εμπόριο και κατ' επέκταση τις ροές αγαθών μεταξύ των εξεταζόμενων περιοχών σε μοντέλα βαρύτητας (gravity models).

Κατά τον Hausman (2004), τα μοντέλα βαρύτητας πρέπει να επεκταθούν για να συμπεριλάβουν και κάποιους παράγοντες που είναι δυνατό να επηρεάσουν το διεθνές εμπόριο μεταξύ περιοχών. Πιο συγκεκριμένα, οι παράγοντες αυτοί μπορεί να εξετάσουν το γεωγραφικό κομμάτι λαμβάνοντας υπόψη τις αποστάσεις μεταξύ των κόμβων παραλαβής εμπορευμάτων από το εξωτερικό (π.χ. λιμάνια), τη σχετική τους απόσταση από τα κέντρα κατανάλωσης και κατ' επέκταση το χρόνο διαμετακόμισης τους. Επίσης, μπορεί να σχετίζονται και με παράγοντες ρίσκου όπως η καθυστέρηση σε τελωνειακούς σταθμούς και οι καθυστερήσεις για λόγους γραφειοκρατίας.

2.2.1.2 Μοντέλα τεσσάρων σταδίων

Με το πέρασμα του χρόνου τα περιληπτικά μοντέλα βαρύτητας εγκαταλείφθηκαν και χάρη στις μεταγενέστερες εξελίξεις στις μεθόδους μοντελοποίησης, έδωσαν τη θέση τους στα πιο αναλυτικά μοντέλα ταξιδιών (trip based model). Τα μοντέλα αυτά χρησιμοποιούν πιο αναλυτικά δεδομένα και μοντελοποιούν την απόφαση πραγματοποίησης ταξιδιού σε επίπεδο νοικοκυριού ή επιχειρήσεων λαμβάνοντας υπόψη τις επιπτώσεις δημογραφικών και μακροοικονομικών χαρακτηριστικών. Τα περισσότερα μοντέλα αυτού του τύπου διακρίνουν την απόφαση σε τέσσερα βήματα, γεγονός που είχε ως αποτέλεσμα τα μοντέλα αυτού του τύπου να ονομαστούν μοντέλα 4 σταδίων (four stage models), (βλ. Manheim, 1979, Hensher και Button, 2008, Bates και Dasgupta, 1990).

Το μοντέλο των τεσσάρων βημάτων/σταδίων έχει χρησιμοποιηθεί εκτενώς στη μοντελοποίηση της ζήτησης για μεταφορές και αποτελεί σημαντική ιστορική βάση. Πιο συγκεκριμένα, το μοντέλο αποτελείται από τα εξής τέσσερα βήματα:

- Γένεση/παραγωγή ταξιδιών (trip generation)
- Διανομή των ταξιδιών (trip distribution)
- Επιλογή μέσου μεταφοράς (modal split)
- Επιλογή διαδρομής (assignment)

Το κάθε στάδιο χρησιμεύει για να απαντήσει κάποια λογικά ερωτήματα, όπως: «Πόσα ταξίδια θα πραγματοποιηθούν;», «που θα γίνουν;», «με ποιο μέσο θα πραγματοποιηθούν;», «ποια διαδρομή θα ακολουθηθεί;»

Συνοπτικά, το στάδιο της παραγωγής ταξιδιών καθορίζει τη βαρύτητα που έχουν τα καθημερινά ταξίδια στο επίπεδο του νοικοκυριού και αυτό εν συνεχεία, τον καθορισμό του αριθμού των ταξιδιών που αναλογεί σε κάθε νοικοκυριό κάθε γεωγραφικής ζώνης. Οι υπολογισμοί περιλαμβάνουν ταξίδια με αφετηρία την οικία ή αφετηρία κάποιο άλλο σημείο. Στη συνέχεια, τα ταξίδια που υπολογίστηκαν στο πρώτο βήμα κατανέμονται ανά είδος (στάδιο διανομής ταξιδιών). Τα ταξίδια διακρίνονται με βάση το σκοπό (εργασία, εκπαίδευση, προσωπικός χρόνος), την αφετηρία και τον προορισμό. Το επόμενο στάδιο αφορά την επιλογή της χρήσης μέσου μεταφοράς για την πραγματοποίηση των παραπάνω υπολογιζόμενων ταξιδιών (στάδιο επιλογής μέσου μεταφοράς). Τέλος, αφού είναι γνωστός ο αριθμός των ταξιδιών, ο σκοπός, η αφετηρία και ο προορισμός του κάθε ταξιδιού καθώς και η χρήση μεταφορικού μέσου, στο τέταρτο βήμα γίνεται η ανάθεση των ταξιδιών στο υπάρχον δίκτυο υποδομών (στάδιο επιλογής διαδρομής).

Αρχικά, τα μοντέλα τεσσάρων σταδίων είχαν δεχτεί κριτική όσον αφορά την ακολουθία των βημάτων και το γεγονός ότι δεν υπήρχε ανατροφοδότηση μεταξύ των υπο-μοντέλων σε κάθε στάδιο. Η απάντηση στην κριτική ήταν η βελτίωση της σχέσης μεταξύ των υπο-μοντέλων και η εισαγωγή επαναληπτικής διαδικασίας μεταξύ των βημάτων. Επιπλέον, το γεγονός ότι ο καθορισμός των ταξιδιών με αφετηρία την οικία ή όχι υπολογίζεται ανεξάρτητα το ένα από το άλλο, θέτει αμφιβολίες όσον αφορά την ορθή μοντελοποίηση της συμπεριφοράς του αποφασίζοντος νοικοκυριού (Gordon et al., 1988 και Lockwood και Demetsky, 1994). Επίσης, κατ' αυτόν τον τρόπο δε λαμβάνονται υπόψη διαδρομές που δεν έχουν αφετηρία το σπίτι αλλά μπορεί να πραγματοποιούνται σε ενδιάμεση διαδρομή με αφετηρία το σπίτι (π.χ. διαδρομή από το σπίτι στην εργασία με ενδιάμεσες στάσεις για αγορά φαγητού).

2.2.1.3 Μοντέλα πρόβλεψης βασιζόμενα στη δραστηριότητα

Οι περιορισμοί που έθετε το μοντέλο των τεσσάρων σταδίων σε συνδυασμό με την ανεπαρκή μοντελοποίηση της συμπεριφοράς των ταξιδιωτών, οδήγησε στην αλλαγή φιλοσοφίας όσον αφορά τη μεθοδολογία πρόβλεψης της ζήτησης για μεταφορές. Οι αρχές της μεθοδολογίας υπολογισμού της ζήτησης στα πλαίσια μιας ευρύτερης δραστηριότητας τέθηκαν από τους Hagerstrand (1970), Chapin (1971) και Cullen και Godson (1975). Οι Bhat και Koppelman (2003) κάνουν μια αναλυτική αναφορά στις διαφορές μεταξύ των δύο μεθόδων.

Η νέα φιλοσοφία υιοθετεί μια νέα αρτιότερη μεθοδολογία που αντικαθιστά την προηγούμενη συμβατική. Η νέα μεθοδολογία οδήγησε στη μελέτη των ποικίλων ταξιδιών που πραγματοποιούνται σε καθημερινή βάση από τους ταξιδιώτες σαν αποτέλεσμα του διαφορετικού τους τρόπου ζωής καθώς και της συμμετοχής τους σε διάφορες δραστηριότητες (βλ. Jones et al., 1990, Axhausen και Garling, 1992). Η φιλοσοφία του νέου μοντέλου θέτει την ανάλυση της συμπεριφοράς του ταξιδιού σε δεύτερη μοίρα σε σχέση με τη θεμελιώδη κατανόηση της συμπεριφοράς στα πλαίσια μιας ευρύτερης δραστηριότητας. Μοντέλα αυτής της φιλοσοφίας είναι το BB System (Bowman, 2000) που εφαρμόζει οικονομετρικές μεθόδους ή το ALBATROSS (Arentze και Timmermans, 2004).

2.2.1.4 Χωρικά υπολογιζόμενα μοντέλα γενικής ισορροπίας

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζεται συνοπτικά η μεθοδολογία που συνδυάζει τις αρχές της μοντελοποίησης των μεταφορών ως δίκτυο (network) στα πλαίσια της εξέτασης της ευρύτερης οικονομίας (SCGE- Spatial Computable General Equilibrium). Αυτού του είδους τα μοντέλα ονομάζονται χωρικά υπολογιζόμενα μοντέλα γενικής ισορροπίας. Ο σκοπός των μοντέλων αυτών είναι να εισάγει γεωγραφικά στοιχεία στη μοντελοποίηση και να εκφράσει τις ροές επιβατών και αγαθών ανά περιοχή στα πλαίσια των βασικών αρχών της μακροοικονομικής θεωρίας.

2.2.1.5 Μοντέλα μεταφορών εμπορευμάτων

Οι Tavasszy et al., (2009) αναφέρονται στο γενικό πλαίσιο μοντελοποίησης του τομέα των εμπορευματικών μεταφορών που ακολουθεί τη μέθοδο των τεσσάρων σταδίων. Το παραπάνω μεθοδολογικό πλαίσιο έχει χρησιμοποιηθεί για δεκαετίες τόσο για τις επιβατικές όσο και για τις εμπορευματικές μεταφορές. Όσον αφορά τις εμπορευματικές μεταφορές, έχουν γίνει προσπάθειες βελτίωσης του μεθοδολογικού πλαισίου, εισάγοντας στοιχεία όπως η διακριτή περιγραφή των εμπορικών και οικονομικών διασυνδέσεων μεταξύ κόμβων και η συνεπής και λεπτομερέστερη αντιμετώπιση του θέματος της επιλογής μεταφορικών μέσων και διαδρομών (Tavasszy, 2006). Παρακάτω, γίνεται συνοπτική αναφορά στις επεκτάσεις που έχουν πραγματοποιηθεί στο βασικό μοντέλο των τεσσάρων σταδίων στα πλαίσια της μοντελοποίησης των εμπορευματικών μεταφορών.

2.2.1.6 Απεικόνιση εμπορικών-οικονομικών διασυνδέσεων

Τα μοντέλα που εξετάζουν τις εμπορικές και οικονομικές διασυνδέσεις μεταξύ χωρών ή περιοχών έχουν ως σκοπό έρευνας τον υπολογισμό των όγκων παραγωγής και κατανάλωσης ορισμένων προϊόντων. Στη συνέχεια, τα αποτελέσματα αυτών των μοντέλων τροφοδοτούν τα μοντέλα υπολογισμού του εμπορίου και διανομής προϊόντων και εν τέλει καθορίζουν τις ροές προϊόντων και αγαθών μεταξύ περιοχών.

Τα χωρικά υπολογιζόμενα μοντέλα γενικής ισορροπίας αποτελούν, κατά τον Tavasszy (2006), το απαραίτητο εργαλείο για εκτίμηση εμπορευματικών δεικτών σχετιζόμενων με την ευρύτερη οικονομία. Ο Bröcker (1998) πρότεινε τη χρήση

χωρικών υπολογιζόμενων μοντέλων γενικής ισορροπίας για ανάλυση στοιχείων μεταξύ περιοχών όπως η παραγωγή και το εμπόριο αγαθών και η ανάλυση δεικτών σχετικών με την οικονομία. Επίσης, η μέθοδος που πρότεινε περιορίζει τις άγνωστες παραμέτρους και τις απαιτήσεις σε ανάγκες μεγάλου όγκου βάσεων δεδομένων. Πριν την ανάπτυξη των SCGE μοντέλων, η μελέτη των εμπορευματικών ροών γινόταν με τη χρήση μοντέλων βαρύτητας. Πιο συγκεκριμένα, ο Chisholm (1973) μελέτησε την περίπτωση της Μεγάλης Βρετανίας την οποία διέκρινε σε 78 ζώνες (κόμβους) και με τη βοήθεια ενός μοντέλου βαρύτητας πραγματοποίησε προβλέψεις για την εξέλιξη του εμπορίου μεταξύ των ζωνών λαμβάνοντας υπόψη μεταβλητές όπως ο πληθυσμός σε κάθε ζώνη.

2.2.1.7 Απεικόνιση της εφοδιαστικής αλυσίδας logistics

Τα παραπάνω μοντέλα εμπορευματικών μεταφορών που προσομοιώνουν τις ροές φορτίων μεταξύ ζωνών δεν είναι ικανά να αποδώσουν σε ικανοποιητική βάση τις πραγματικές διαδρομές που ακολουθούν οι προαναφερθείσες ροές. Στα μοντέλα αυτά έχουν πραγματοποιηθεί κάποιες επεκτάσεις ώστε να είναι δυνατή η μοντελοποίηση των ροών μεταξύ ζωνών, λαμβάνοντας υπόψη και ενδιάμεσες μεταφορτώσεις (intermediary transshipments) καθώς και σημεία αποθήκευσης (stock points). Η έξοδος των μοντέλων αυτών είναι σε μορφή πινάκων προέλευσης-προορισμού (O/D matrix) ενώ μπορούν να παράγουν και πληροφορία σχετική με το μέσο μεταφοράς καθώς και τον τύπο οχήματος που χρησιμοποιήθηκε για τη μεταφορά σε συνδυασμό με την τοποθεσία του τόπου αποθήκευσης και του μεγέθους του φορτίου. Οι Pattanamekar et al (2009) συνέθεσαν αλυσίδες μετακινήσεων (chains of movements) ξεκινώντας από μεμονωμένες παρατηρήσεις μετακινήσεων μορφής προέλευσης-προορισμού (διαθέσιμες από στατιστικές υπηρεσίες). Με αυτό τον τρόπο παρήγαγαν πίνακες εμπορίου μεταξύ περιοχών παραγωγής και περιοχών κατανάλωσης.

Ο Fisher (2005) περιγράφει ένα μοντέλο που περιλαμβάνει τη μοντελοποίηση της εφοδιαστικής αλυσίδας στην περιοχή του Los Angeles. Το μοντέλο SMILES (1990) εξετάζει τις εμπορευματικές μεταφορές στην Ολλανδία λαμβάνοντας υπόψη τις βασικές αρχές της εφοδιαστικής. Το μοντέλο βασίζεται στην κλασική αναπαράσταση των εμπορευματικών μεταφορών των τεσσάρων σταδίων ενώ περιλαμβάνει επιπλέον το στάδιο της εφοδιαστικής αλυσίδας και τις ροές μεταξύ των κέντρων διαμετακόμισης των φορτίων. Το μοντέλο GOODTRIP (Boerkamps, 1999) υπολογίζει το όγκο των αγαθών ανά κατηγορία σε κάθε χωρική ζώνη με βάση τη ζήτηση των αγαθών από τους καταναλωτές. Οι ροές των αγαθών αναπαρίστανται στις δεδομένες υποδομές, προσομοιώνοντας διαδρομές των μέσων μεταφοράς και υπολογίζοντας τους συντελεστές φορτίου (load factors). Το μοντέλο SLAM (Spatial Logistics Appended Module) αξιολογεί τις επιπτώσεις των αλλαγών σε επίπεδο Ευρώπης λαμβάνοντας υπόψη χωρικές πληροφορίες. Το μοντέλο εξετάζει μεταβολές στη διάρθρωση του δικτύου διανομής όπως τον αριθμό και την τοποθεσία των ενδιάμεσων σταθμών αποθήκευσης. Το μοντέλο SLAM αποτέλεσε τη βάση για τη μετέπειτα δημιουργία

μοντέλων όπως το SCENES (που αναφέρεται στη συνέχεια) με δυνατότητα χωρικής/γεωγραφικής αναπαράστασης σε εθνικό επίπεδο.

Το μοντέλο EUNET 2.0 Jin (2005) συνδυάζει τις αρχές των χωρικά υπολογιζόμενων μοντέλων γενικής ισορροπίας και των μοντέλων δικτύου (network) για εμπορευματικές ροές στο γεωγραφικό χώρο του Ηνωμένου βασιλείου. Το μοντέλο πραγματοποιεί προβλέψεις για τα επίπεδα της ζήτησης για μεταφορές αγαθών ως συνάρτηση οικονομικών δεικτών και της εφοδιαστικής αλυσίδας των εμπορευματικών μεταφορών. Η Nagurney (2002) παρουσίασε μια μεθοδολογία που συνδυάζει στο ίδιο δίκτυο τρία διαφορετικά επίπεδα όπου παρουσιάζονται διακριτές λογιστικές, πληροφοριακές και οικονομικές ροές. Στο ίδιο δίκτυο οι πληροφορίες που εντοπίζονται σε κάθε επίπεδο αλληλεπιδρούν δυναμικά μεταξύ τους και αυτό αντανακλάται στον υπολογισμό των τιμών.

Κατά τους Liedtke et al., (2009), η παραπάνω μεθοδολογία αναφορικά με τη μοντελοποίηση με διαστρωμάτωση (τέσσερα βήματα) ενέχει τον κίνδυνο της αναντιστοιχίας μεταξύ της συμπεριφοράς των εκάστοτε υπο-μοντέλων με αποτέλεσμα την προβληματική συμπεριφορά του ευρύτερου μοντέλου. Η δυσλειτουργία της συμπεριφοράς των υπο-μοντέλων είναι δυνατό να αντιμετωπισθεί εφόσον εξασφαλιστεί η συνέπεια μεταξύ των βημάτων των επιμέρους σταδίων (Tavasszy et al., 2009). Η συνέπεια εμπεριέχεται στις έννοιες του κόστους και των όγκων που διακινούνται. Όσον αφορά τα κόστη, είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθούν τα γενικευμένα κόστη που περιλαμβάνουν και το κόστος του χρόνου. Για τους όγκους που διακινούνται, θα πρέπει να υπάρχουν συνθήκες ισορροπίας μεταξύ των στρώσεων/βημάτων των υπο-μοντέλων που θα εξασφαλίζουν την ισότητα των ροών.

2.3 Η σημασία του τομέα των μεταφορών στα πλαίσια της ενεργειακής οικονομικής ανάλυσης

Τα τελευταία χρόνια έχει δοθεί μεγάλη προσοχή στην αντιμετώπιση του φαινομένου του θερμοκηπίου και της κλιματικής αλλαγής και στην εύρεση τρόπων δραστηκής μείωσης των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Ο τομέας των μεταφορών φέρει ένα σημαντικό μερίδιο ευθύνης εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα στο σύνολο των εκπομπών του ενεργειακού συστήματος. Τα μοντέλα ενεργειακής οικονομίας υψηλής κλίμακας, που μελετούν ολόκληρες περιοχές ή χώρες, έχουν ως σκοπό τη διερεύνηση των διασυνδέσεων του ενεργειακού συστήματος με ολόκληρη την οικονομία, με τον τομέα των μεταφορών να αποτελεί ένα σημαντικό κομμάτι του ενεργειακού συστήματος καθώς και της οικονομίας των χωρών.

2.3.1 Εισαγωγή στην έννοια της ενεργειακής οικονομικής ανάλυσης

Η ενεργειακή οικονομική ανάλυση επικεντρώνεται στη διασύνδεση του ενεργειακού συστήματος με όλη την οικονομία, εξετάζει θέματα όπως ο ενεργειακός σχεδιασμός και επιχειρεί να δώσει απαντήσεις σε θέματα ενέργειας, οικονομίας και

περιβάλλοντος. Ο κύριος προσανατολισμός της ενεργειακής ανάλυσης είναι η μελέτη των μελλοντικών επιπτώσεων και εξελίξεων της ενέργειας. Ο όρος που χρησιμοποιείται για να περιγράψει τη μελέτη των μελλοντικών επιπτώσεων είναι «προέκταση» (projection) που έρχεται σε αντιπαράθεση με την κλασική έννοια του όρου της «πρόβλεψη» (forecasting). Ο όρος της προέκτασης αφορά τη διερεύνηση πιθανών μελλοντικών καταστάσεων-προεκτάσεων του υπό μελέτη συστήματος και ενδέχεται να είναι είτε σκοπευτική είτε διερευνητική. Η πρώτη συνήθως απαντά σε ερωτήματα του τύπου: «ποια θα ήταν η εξέλιξη αν...;», ενώ η δεύτερη σε ερωτήματα του τύπου: «με ποια μέσα είναι δυνατό να επιτευχθεί ο στόχος μείωσης εκπομπών των αερίων του διοξειδίου του άνθρακα κατά x% το 2050;».

Τα μεθοδολογικά εργαλεία που χρησιμοποιούνται στην ενεργειακή οικονομική ανάλυση είναι τα μοντέλα ενεργειακής οικονομίας. Ο όρος μοντέλο αναφέρεται συνήθως σε ένα μαθηματικό σύστημα σχέσεων που περιγράφει κάποιο συγκεκριμένο ενεργειακό πρόβλημα/ κλάδο και αποτελεί μια απλούστευση της απεικόνισης της πραγματικότητας. Ένα μοντέλο ενεργειακής οικονομίας συνήθως εξετάζει το υπό μελέτη αντικείμενο σαν ένα κλειστό σύστημα με σαφή απεικόνιση των αλληλεπιδράσεων με το περιβάλλον του (systems analysis). Το σύστημα ενδέχεται να διααιρεθεί σε υποσυστήματα όπου θα πρέπει να εντοπισθούν οι αλληλεπιδράσεις των υποσυστημάτων μεταξύ τους. Η χρήση των μοντέλων ενεργειακής οικονομίας περιλαμβάνει τη μελέτη των επιπτώσεων μέτρων πολιτικής ή προγραμμάτων που αποσκοπούν σε συγκεκριμένους περιβαλλοντολογικούς στόχους. Οι επιπτώσεις διακρίνονται σε κοινωνικές, περιβαλλοντολογικές, μακροοικονομικές, ανάλογα τη φύση του μοντέλου και του συστήματος που εξετάζει. Τα κύρια θέματα που εστιάζουν τα μοντέλα ενεργειακής οικονομίας είναι η ζήτηση της ενέργειας και η εύρεση τρόπων κάλυψης αυτής.

Η χρήση των μοντέλων ενεργειακής οικονομίας αφορά κυρίως την κατασκευή σεναρίων όπου γίνονται υποθέσεις για αλλαγές στην οικονομία, στις τεχνολογίες, στην πρόσβαση στα αποθέματα ενέργειας και άλλους παράγοντες που μπορεί να επηρεάσουν τα μελλοντικά επίπεδα κατανάλωσης ενέργειας και εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα. Η ανάλυση των παραπάνω επιπτώσεων πραγματοποιείται μέσω της σύγκρισης μεταξύ διαφορετικών σεναρίων. Η συνηθέστερη πρακτική είναι η κατασκευή ενός σεναρίου αναφοράς (Reference scenario ή Business-as-usual scenario) στο οποίο υιοθετούνται μια σειρά πολιτικών και παραδοχών. Στη συνέχεια, πραγματοποιούνται υποθέσεις για την υιοθέτηση συγκεκριμένων πολιτικών και καταστρώνονται τα εναλλακτικά σενάρια. Η ποσοτικοποίηση των εναλλακτικών σεναρίων γίνεται επίσης με τη χρήση ειδικού μοντέλου. Η σύγκριση μεταξύ των επιμέρους σεναρίων οδηγεί στην αξιολόγηση συγκεκριμένων μεταβλητών όπως οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, το κόστος του ενεργειακού συστήματος, το μείγμα τεχνολογιών, κ.α.

Τα σενάρια που αναπτύσσονται από τα μοντέλα ενεργειακής οικονομίας δεν έχουν σκοπό να προβλέψουν το μέλλον του ενεργειακού συστήματος και του τομέα των μεταφορών. Η κατάστρωση των σεναρίων έχει ως σκοπό την προβολή και την

απεικόνιση μιας μέσο-μακροχρόνιας κατάστασης του ενεργειακού συστήματος ως αποτέλεσμα εφαρμογής πολιτικών και άλλων υποθέσεων. Τα μοντέλα ενεργειακής οικονομίας έρχονται σε αντιπαράθεση με τα οικονομετρικά μοντέλα καθώς τα τελευταία παρέχουν κυρίως βραχυχρόνιες προβλέψεις βασιζόμενες σε στατιστικές παρατηρήσεις. Το κυριότερο μειονέκτημα της μεθόδου προβλέψεων είναι ότι δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μέσο-μακροχρόνιες προβλέψεις σε αντίθεση με τα μοντέλα ενεργειακής οικονομίας. Επιπλέον, η μέθοδος προβλέψεων βασίζεται σε τάσεις που έχουν παρατηρηθεί στο παρελθόν, συνεπώς είναι απίθανη η πρόβλεψη τάσεων που διαφοροποιούνται δραστικά από τις παρατηρήσεις του παρελθόντος. Το τελευταίο αποτελεί σημαντικό μειονέκτημα της μεθόδου δεδομένης της σημασίας για δραστική μείωση των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα και της απεξάρτησης του τομέα των μεταφορών από τα ορυκτά καύσιμα.

Στη βιβλιογραφία υπάρχει ένας σημαντικός αριθμός μοντέλων ενεργειακής οικονομίας. Οι διαφορές που εντοπίζονται μεταξύ των μοντέλων αποδίδονται στη λεπτομέρεια της αναπαράστασης των διαφόρων τεχνολογιών, στο βαθμό ενσωμάτωσης διαφόρων οικονομικών διαδικασιών (economic processes), το χρονικό ορίζοντα, τη γεωγραφικό χώρο και άλλους παράγοντες. Είναι σύνηθες στη βιβλιογραφία τα μοντέλα ενεργειακής οικονομίας να διαχωρίζονται σε μοντέλα με λεπτομερή αναπαράσταση των τεχνολογιών και των τεχνοοικονομικών στοιχείων (προσέγγιση bottom-up) είτε σε μακροοικονομικά (προσέγγιση top-down). Συνοπτικά, τα bottom-up μοντέλα ενώ περιέχουν μεγάλη λεπτομέρεια στην αναπαράσταση των τεχνολογιών, υπολείπονται στην αναπαράσταση των αλληλεπιδράσεων με την ευρύτερη οικονομία. Τα μακροοικονομικά top-down μοντέλα περιλαμβάνουν τις συνήθεις μακροοικονομικές μεταβλητές που περιγράφουν τις οικονομικές διαδικασίες, όπου η ενέργεια προσεγγίζεται ως ένας επιπλέον παράγοντας παραγωγής, δίχως μεγάλη λεπτομέρεια. Ο συνδυασμός των δύο παραπάνω προσεγγίσεων χαρακτηρίζει τα υβριδικά μοντέλα οικονομικά-μηχανικά (economic-engineering). Τα κύρια χαρακτηριστικά των παραπάνω μεθοδολογικών προσεγγίσεων περιγράφονται στη συνέχεια (Beeck, 1999).

2.3.2 Τυπική κατηγοριοποίηση μοντέλων ενεργειακής οικονομικής ανάλυσης

Μια επιμέρους κατηγοριοποίηση των μοντέλων ενεργειακής οικονομικής ανάλυσης αφορά στο είδος του υπό μελέτη συστήματος. Στην περίπτωση που εξετάζεται ένας κλάδος συγκεκριμένα δίχως να λαμβάνονται ξεκάθαρα υπόψη οι αλληλεπιδράσεις με την ευρύτερη οικονομία, το μοντέλο ονομάζεται μοντέλο μερικής ισορροπίας. Διαφορετικά, όταν υπάρχει πλήρης αλληλεπίδραση με όλη την οικονομία, το μοντέλο χαρακτηρίζεται ως γενικής ισορροπίας (με την προϋπόθεση να διαθέτει κάποια αναπαράσταση του κλάδου της ενέργειας).

Ένας επιπλέον άξονας διάκρισης των μοντέλων ενεργειακής οικονομίας αφορά τον τρόπο οργάνωσης και επίλυσης του μοντέλου. Το μοντέλο μπορεί να πραγματοποιεί

βελτιστοποίηση μιας αντικειμενικής συνάρτησης (συνήθως ελαχιστοποίηση κόστους) ή να επιλύει την ισορροπία μιας αγοράς (market equilibrium). Τα μοντέλα γενικής ισορροπίας προσομοιώνουν τη συμπεριφορά των πρακτόρων/ αποφασιζόντων (economic agents) με βάση τις αρχές της μικροοικονομίας. Τα μοντέλα αυτά επιλύουν ολόκληρη την οικονομία και υπολογίζουν την ισορροπία όλων των κλάδων της οικονομίας. Εκτός από τα μοντέλα γενικής ισορροπίας, υπάρχουν μοντέλα μερικής ισορροπίας που λύνουν την ισορροπία της αγοράς όπως το PRIMES και το NEMS. Σε αυτή την περίπτωση, το υπό εξέταση σύστημα είναι διαιρεμένο σε υποσυστήματα ζήτησης και προσφοράς ενέργειας όπου το μοντέλο υπολογίζει την τιμή ισορροπίας για κάθε σύστημα ξεχωριστά.

Τα μοντέλα που πραγματοποιούν βελτιστοποίηση είναι συνήθως μοντέλα μερικής ισορροπίας που εξετάζουν ένα συγκεκριμένο κλάδο, με λεπτομερή τεχνολογική αναπαράσταση και με μακροχρόνιο ορίζοντα (συνήθως 30-50 χρόνια) που σκοπό έχουν να ελαχιστοποιήσουν το συνολικό κόστος του υπό εξέταση ενεργειακού συστήματος. Τα μοντέλα αυτά περιέχουν λεπτομερή ανάλυση του κόστους που απαιτείται για κεφαλαιουχικές δαπάνες καθώς και για τα μεταβλητά κόστη. Ωστόσο, υπάρχουν στη βιβλιογραφία μοντέλα που η ζήτηση δεν αντιδρά στην προσφορά που αποτελεί προϊόν βελτιστοποίησης. Πιο πρόσφατα μοντέλα αυτού του είδους έχουν επιχειρήσει να καλύψουν το κενό αυτό ενσωματώνοντας μηχανισμούς αλληλεπίδρασης μεταξύ της ζήτησης και της προσφοράς.

2.3.2.1 Μεθοδολογία Bottom-up

Τα μοντέλα bottom-up συνήθως είναι μοντέλα βελτιστοποίησης, μερικής ισορροπίας όπου οι μακροοικονομικές υποθέσεις παραμένουν εξωγενείς. Τα μοντέλα αυτής της μεθοδολογίας αφορούν κυρίως τους τομείς της ζήτησης ενέργειας (π.χ. μεταφορές, βιομηχανία) και περιλαμβάνουν πολύ λεπτομερή αναπαράσταση των τεχνολογιών. Συνήθως, η αναπαράσταση της ζήτησης μοντελοποιείται ως δένδρο απόφασης με τις εναλλακτικές επιλογές ανά επίπεδο.

Σε αντίθεση με τη μεθοδολογία top-down, εδώ οι εναλλακτικές τεχνολογικές επιλογές αποτυπώνονται κατά μία έννοια μηχανική (engineering) με ξεκάθαρα και λεπτομερή τεχνοοικονομικά χαρακτηριστικά. Το γεγονός αυτό επιτρέπει, για παράδειγμα, τη μελέτη πιθανής αποσύνδεσης μεταξύ της οικονομικής ανάπτυξης και ζήτησης για ενέργεια σε κάποιο κλάδο του ενεργειακού συστήματος. Στα μοντέλα bottom-up συνήθως η ζήτηση για υπηρεσίες που καταναλώνουν ενέργεια (π.χ. δραστηριότητα επίγειων εμπορευματικών μεταφορών) είναι εξωγενής ή προέρχεται από άλλα πιο ειδικά μοντέλα. Για τη δεδομένη ζήτηση, τα μοντέλα bottom-up πραγματοποιούν βελτιστοποίηση (π.χ. ελαχιστοποίηση συνολικού κόστους όλης της περιόδου πρόβλεψης). Το κύριο μειονέκτημα της μεθοδολογίας με εξωγενή ζήτηση είναι ότι η ζήτηση δεν ανταποκρίνεται στις μεταβολές των τιμών των προϊόντων, γεγονός που δεν ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα. Άλλα μοντέλα όπως η έκδοση «elastic demand» του μοντέλου MARKAL συνδέει την τελική ζήτηση με μεταβλητές

όπως το εισόδημα, τιμές. Με αυτόν τον τρόπο κατασκευάζεται μια καμπύλη ζήτησης που αντιδρά στο μοντέλο προσφοράς.

Κατά την επίλυση των μοντέλων bottom-up παράγεται ένα πλήρες ενεργειακό ισοζύγιο για κάθε χρονική περίοδο. Το πιο σημαντικό στοιχείο των αποτελεσμάτων είναι η αξιολόγηση των στοιχείων κόστους (π.χ. επενδύσεις σε κεφαλαιουχικό εξοπλισμό, μεταβλητά κόστη). Τα κόστη αυτά είναι δυνατό να σχετιστούν με τη δυνατότητα μείωσης των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (σε περιπτώσεις σεναρίων με συγκεκριμένους στόχους μείωσης των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα). Επιπλέον, η χρήση των bottom-up μοντέλων αναγνωρίζει τη βέλτιστη διαδρομή από άποψη ελαχιστοποίησης κόστους όσον αφορά την επίτευξη κάποιου περιβαλλοντολογικού στόχου και υπολογίζει τη χρήση ενέργειας και εκπομπές αερίων θερμοκηπίου για κάθε συγκεκριμένη τεχνολογία. Τέλος, παρέχει ένα πλαίσιο για αξιολόγηση των εναλλακτικών τεχνολογιών και πολιτικών σε σχέση με οριοθετημένους στόχους.

Τα bottom-up μοντέλα παρουσιάζουν σοβαρές δυσκολίες στην προσομοίωση της συμπεριφοράς του καταναλωτή, ειδικά στην περίπτωση των μεταφορών. Οι δυσκολίες έγκεινται στο γεγονός ότι τα μοντέλα αυτά δεν έχουν σαφή μικροοικονομική βάση που διέπει τη συμπεριφορά του καταναλωτή.

Λόγω του ότι τα μοντέλα αυτά πραγματοποιούν βελτιστοποίηση, η βέλτιστη λύση θα οριζόταν εκείνη που θα ικανοποιούσε τη ζήτηση για μεταφορές με το φθηνότερο μέσο μεταφοράς. Επειδή, μια τέτοια λύση δεν είναι ρεαλιστική, τα μοντέλα bottom-up προσπαθούν να ικανοποιήσουν μια εξωγενή συνήθως ζήτηση για μεταφορές στο επίπεδο του μέσου μεταφοράς (π.χ. αυτοκίνητα). Η βελτιστοποίηση έγκειται τότε στο να υπολογιστεί το βέλτιστο μείγμα τεχνολογιών (π.χ. τεχνολογία diesel, ηλεκτρική) για κάθε μέσο μεταφοράς.

2.3.2.2 Μεθοδολογία Top-down

Η μέθοδος top-down έρχεται σε αντίθεση με τη μέθοδο bottom-up καθώς εξετάζει το σύστημα από διαφορετική σκοπιά. Τα top-down μοντέλα εξετάζουν τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ του τομέα της ενέργειας και άλλων κλάδων της οικονομίας όσον αφορά την εφαρμογή πολιτικών για την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής. Τέτοια μοντέλα είναι τα υπολογιζόμενα μοντέλα γενικής ισορροπίας (Computable general equilibrium-CGE) ή μοντέλα που βασίζεται στις αρχές της οικονομετρικής ανάλυσης. Τα CGE μοντέλα εξετάζουν την ισορροπία της οικονομίας σαν αποτέλεσμα της ισορροπίας όλων των εξεταζόμενων κλάδων. Σε αντίθεση με τα μοντέλα bottom-up μερικής ισορροπίας, τα μοντέλα top-down είναι δυνατό να αναπαραστήσουν τις επιπτώσεις ενός «shock» σε ένα κλάδο της οικονομίας (π.χ. επιβολή ειδικού φόρου στα καύσιμα των επιβατικών μεταφορών) σε όλους τους υπόλοιπους μέσω των πινάκων εισόδου/εξόδου (input/ output tables).

Στα CGE μοντέλα κάθε κλάδος αναπαρίσταται μέσω συναρτήσεων παραγωγής ή χρησιμότητας. Η συνολική παραγωγή ή κατανάλωση κάθε κλάδου εξαρτάται από τις

εισόδους (π.χ. κεφάλαιο, εργασία, ενέργεια, κλπ.). Οι δυνατότητες υποκατάστασης μεταξύ των στοιχείων εισόδου εξαρτάται από τις ελαστικότητες. Στην περίπτωση των νοικοκυριών, οι ελαστικότητες υποκατάστασης προσομοιώνουν την προτίμηση για υποκατάσταση ενός αγαθού ή υπηρεσίας με κάποια άλλη σε περίπτωση μεταβολής των σχετικών τιμών των αγαθών. Τα CGE μοντέλα συνήθως διαφέρουν στο βαθμό αναπαράστασης της οικονομίας και του ενεργειακού συστήματος, στη διάρθρωση των κλάδων, και στις υποθέσεις για τις ελαστικότητες υποκατάστασης των συναρτήσεων παραγωγής και χρησιμότητας.

Το γεγονός ότι αυτού του είδους τα μοντέλα καλύπτουν μεγάλο εύρος, έχει ως συνέπεια την όχι τόσο λεπτομερή αναπαράσταση του τομέα των μεταφορών (Rutherford και Nieuwkoop, 2011). Το κύριο μειονέκτημά τους είναι ότι οι μεταβολές της ζήτησης οδηγούνται μόνο μέσω μεταβολών στις τιμές. Για παράδειγμα, σε μια μείωση των τιμών των οδικών μέσων μαζικής μεταφοράς οι προβλέψεις των μοντέλων θα οδηγούσαν σε μια αύξηση των μετακινήσεων με λεωφορεία έναντι των ιδιωτικών μέσων. Στην πραγματικότητα αυτό μπορεί να μη συνέβαινε, αλλά να υπήρχε αύξηση των μετακινήσεων μέσω αεροπλάνων είτε τρένων λόγω της μεγαλύτερης ταχύτητάς τους και της ταχύτερης άφιξης στον προορισμό. Σε αυτήν την περίπτωση, υπάρχει το στοιχείο του κόστους του χρόνου που δε λαμβάνεται υπόψη.

Τα τελευταία χρόνια, έχει υπάρξει προσπάθεια για την επαρκέστερη κάλυψη του τομέα των μεταφορών στα πλαίσια των μοντέλων γενικής ισορροπίας. Για παράδειγμα, ο Berg (2006) επέκτεινε το μοντέλο EMEC για την ακριβέστερη προσομοίωση της συμπεριφοράς των νοικοκυριών της Σουηδίας, ενώ οι Paltsev et al., (2004) επέκτειναν το μοντέλο GTAP. Οι εμπορευματικές μεταφορές ενσωματώνονται στα CGE μοντέλα μέσω συναρτήσεων παραγωγής όπου οι εισοδοί είναι το κεφάλαιο, η εργασία και η ενέργεια (πετρέλαιο), τα μερίδια των οποίων καθορίζονται από τις σχετικές τιμές. Στα νοικοκυριά, οι επιβατικές μεταφορές πραγματοποιούνται είτε με ίδια μέσα μεταφοράς (μέσω επένδυσης σε κεφαλαιουχικό εξοπλισμό) είτε με χρήση μέσων μαζικής μεταφοράς (καθορισμός εισιτηρίου). Η αγορά κεφαλαιουχικού εξοπλισμού (ιδιωτικό όχημα) συνδέεται με τον κλάδο της βιομηχανίας αφού η κατασκευή αυτού του εξοπλισμού είναι το αποτέλεσμα της παραγωγής του κλάδου της βιομηχανίας.

Τα top-down οικονομικά μοντέλα χρησιμοποιούν στατιστικά δεδομένα όπως τιμές, καταναλώσεις, δραστηριότητα για να προβλέψουν τη ζήτηση. Η μέθοδος αυτή μειονεκτεί όσον αφορά το γεγονός ότι χρησιμοποιεί εκτιμημένες συναρτησιακές σχέσεις για να συνδέσει τη ζήτηση ενέργειας με οικονομικούς δείκτες όπως το ΑΕΠ ή το κατά κεφαλή εισόδημα. Οι συντελεστές των συναρτήσεων υπολογίζονται από στατιστικά δεδομένα.

2.3.2.3 Υβριδικά μοντέλα

Τα υβριδικά μοντέλα συνδυάζουν τα επιμέρους πλεονεκτήματα των μεθόδων bottom-up και top-down, δηλαδή τη θεωρητική θεμελίωση στην οικονομική θεωρία και την τεχνολογική λεπτομέρεια. Στο παρελθόν, η πιο κοινή πρακτική ήταν η διασύνδεση

ενός μακροοικονομικού μοντέλου με ένα μοντέλο bottom-up με την απαραίτητη τεχνολογική λεπτομέρεια. Ένα τέτοιο μακροοικονομικό μοντέλο είναι το MACRO με διασυνδέσεις με bottom-up μοντέλα όπως το ETA (Manne και Richels, 1992), το MARKAL (Manne και Wene, 1992), και το MESSAGE (Messner και Schratzenholzer, 2000). Μοντέλα όπως το IMACLIM-R REMIND περιλαμβάνουν αναπαράσταση της γενικής ισορροπίας (Crassous et al., 2006, Luderer et al., 2010), ενώ μοντέλα όπως το GCAM (Kim, 2010) και το CIMS (Bataille και Jaccard, 2004) χρειάζονται εξωγενείς υποθέσεις για την πρόβλεψη του ΑΕΠ ανά κλάδο αφού δεν περιέχουν λεπτομερή αναπαράσταση της οικονομίας. Άλλες διαφορές των παραπάνω μοντέλων έγκεινται στη γεωγραφική κάλυψη: ορισμένα μοντέλα καλύπτουν ολόκληρο τον κόσμο (GCAM) και άλλα μεμονωμένες χώρες (CIMS).

Η αναπαράσταση του τομέα των μεταφορών στα υβριδικά μοντέλα είναι γενικά πιο εξελιγμένη σε σχέση με τα bottom-up και top-down μοντέλα. Η ζήτηση για μεταφορές υπολογίζεται με χρήση ελαστικότητας και όλα τα υβριδικά μοντέλα με την εξαίρεση των μοντέλων της οικογένειας MARCAL περιλαμβάνουν ενδογενείς δυνατότητες υποκατάστασης σε επίπεδο μέσων μεταφοράς (modal shifts). Το μοντέλο CIMS βασίζει την επιλογή μέσου για ταξίδια στη θεωρία διακριτής επιλογής (discrete choice theory). Επιπλέον, το μοντέλο IMACLIM-R λαμβάνει υπόψη στη ζήτηση για μεταφορές και τις εξωγενείς επενδύσεις για υποδομές μεταφορών (υποδομές δικτύου μεταφορών). Ο Πίνακας 2-1 παρουσιάζει συνοπτικά τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των τριών μεθοδολογικών προσεγγίσεων.

Πίνακας 2-1: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των μεθοδολογιών της βιβλιογραφίας

	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Bottom-up	<ul style="list-style-type: none"> • Λεπτομερής αναπαράσταση τεχνολογιών με πραγματικά δεδομένα • Σαφείς σχέσεις μηχανικής (π.χ. βαθμός απόδοσης-ειδική κατανάλωση) 	<ul style="list-style-type: none"> • Δε θεμελιώνονται πάντα στις αρχές της οικονομικής θεωρίας • Έλλιπής απεικόνιση των επιπτώσεων στη ζήτηση λόγω μεταβολών των τιμών • Έλλειψη αλληλεπιδράσεων με ολόκληρη την οικονομία
Top-Down	<ul style="list-style-type: none"> • Αναπαράσταση των αλληλεπιδράσεων στα πλαίσια ολόκληρης της οικονομίας • Θεμελίωση στην οικονομική θεωρία (αφορά μοντέλα γενικής ισορροπίας) 	<ul style="list-style-type: none"> • Έλλιπής αναπαράσταση των τεχνολογιών και τεχνοοικονομικών στοιχείων • Περιορισμός σε βραχυχρόνιες προβλέψεις (αφορά top-down οικονομετρικά μοντέλα)
Hybrid	<ul style="list-style-type: none"> • Διαρθρωμένο στη βάση της μικροοικονομική θεωρίας • Αναπαράσταση τεχνοοικονομικών στοιχείων σε συγκεκριμένα στάδια • Ιδανικό για μέσο-μακροπρόθεσμες αναλύσεις και προσομοίωση δομικών αλλαγών 	<ul style="list-style-type: none"> • Έλλειψη αλληλεπιδράσεων με ολόκληρη την οικονομία • Απαιτείται πλήθος ποικίλων δεδομένων • Έλλειψη στατιστικού υπόβαθρου (προσαρμογή σε μια χρονιά βάσης)

2.4 Προσομοίωση στοιχείων συμπεριφοράς του καταναλωτή για τις μεταφορές σε μοντέλα ενεργειακής οικονομικής ανάλυσης

Η παρούσα ενότητα περιγράφει τα βασικά στοιχεία της προσομοίωσης στοιχείων συμπεριφοράς του καταναλωτή σε μοντέλα ενεργειακής οικονομικής ανάλυσης με επαρκή αναπαράσταση του τομέα των μεταφορών. Ο κλάδος των μεταφορών είναι πολύ σημαντικός όσον αφορά τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα και τις απαιτήσεις σε ενέργεια, γεγονός που εντείνει την ανησυχία για τις επιπτώσεις του κλάδου στην κλιματική αλλαγή. Προκειμένου να περιοριστούν οι παγκόσμιες εκπομπές αερίων διοξειδίου του άνθρακα είναι κρίσιμη η εύρεση λύσεων που θα οδηγούν στη μείωση εκπομπών του τομέα των μεταφορών. Η εισαγωγή νέων καθαρών τεχνολογιών στις μεταφορές μπορεί να οδηγήσει σε αυτή τη μείωση, γεγονός που αποτελεί το γενικό συμπέρασμα σε ένα πλήθος μελετών της βιβλιογραφίας. Ο κοινός παρονομαστής είναι ότι οι δυνατότητες μείωσης των εκπομπών εξαρτάται από το βαθμό τεχνολογικής προόδου των νέων αυτών τεχνολογιών.

Εκτός από τις θετικές επιπτώσεις που ενδέχεται να έχει η εισαγωγή νέων τεχνολογιών στην αγορά των μεταφορών, πολύ σημαντική είναι και η αλλαγή στη συμπεριφορά των χιλιάδων καταναλωτών όσον αφορά τις ταξιδιωτικές τους συνήθειες. Τέτοιο παράδειγμα είναι η στροφή προς λιγότερο ενεργοβόρα μέσα μεταφοράς όπως ο σιδηρόδρομος, το μετρό και τα οδικά μέσα μεταφοράς καθώς και ο

περιορισμός της ολοένα και αυξανόμενης τάσης για ταξίδια. Η μεγαλύτερη πρόκληση έγκειται στο να πραγματοποιηθούν δραστικές αλλαγές σε σχέση με τις μακροχρόνιες παρατηρημένες τάσεις του παρελθόντος και να περιορισθεί όσο είναι εφικτό η χρήση ιδιωτικού μέσου. Η πρόκληση είναι μεγαλύτερη ιδιαίτερα στις ανεπτυγμένες οικονομίες όπου τα κατά κεφαλή εισοδήματα είναι υψηλά, οι ελαστικότητες όσον αφορά το μέσο κόστος μεταφοράς είναι χαμηλές και υπάρχουν οι οδικές υποδομές (σημ. οδικό δίκτυο).

Επομένως, για να επιτευχθεί η «πράσινη» βιώσιμη ανάπτυξη των μεταφορών χρειάζεται να συνδυαστεί η είσοδος νέων τεχνολογιών μαζί με αλλαγές στη συμπεριφορά των καταναλωτών όσον αφορά τις προτιμήσεις τους σε μετακίνηση.

2.4.1 Μέτρα πολιτικής που επηρεάζουν τη συμπεριφορά και τις προτιμήσεις του καταναλωτή

Στην ενότητα αυτή περιγράφονται συγκεκριμένα μέτρα πολιτικής που έχουν σα σκοπό να επηρεάσουν τις αποφάσεις των καταναλωτών και να οδηγήσουν σε βιώσιμες λύσεις τον τομέα των μεταφορών. Τα παρακάτω μέτρα αποσκοπούν κυρίως στο να επηρεάσουν τη συμπεριφορά και τις προτιμήσεις του καταναλωτή και να τις διαφοροποιήσουν σε σχέση με τις μακροχρόνιες τάσεις που έχουν παρατηρηθεί.

2.4.1.1 Εσωτερικοποίηση του εξωτερικού κόστους

Οι επιβατικές και εμπορευματικές μεταφορές ως γνωστό επιφέρουν ορισμένες αρνητικές συνέπειες τόσο στο περιβάλλον όσο και στην κοινωνία. Οι περιβαλλοντολογικές συνέπειες αφορούν τη μόλυνση του αέρα από τους ρύπους (οξειδία του αζώτου, μικροσωματίδια, μονοξείδιο του άνθρακα, κ.α.) καθώς και την κλιματική αλλαγή. Οι συνέπειες στην κοινωνία και στους υπόλοιπους χρήστες του οδικού δικτύου οφείλονται στα ατυχήματα (θανατηφόρα ή μη), στο θόρυβο καθώς και στο φαινόμενο της συμφόρησης (congestion). Αυτές οι αρνητικές επιπτώσεις (external costs or negative externalities) συνήθως δεν επιβαρύνουν αυτούς που τις προκαλούν, συνεπώς δε λαμβάνονται υπόψη κατά τη διαδικασία λήψης απόφασης για μετακίνηση. Για αυτό το λόγο ονομάζονται εξωτερικά κόστη.

Ο όρος εσωτερικοποίηση αναφέρεται στο να λαμβάνονται υπόψη οι αρνητικές επιπτώσεις στη διαδικασία απόφασης του χρήστη που τις προκαλεί. Σύμφωνα, με τη θεωρία της κοινωνικής ευημερίας (welfare theory), η εσωτερικοποίηση του εξωτερικού κόστους μπορεί να οδηγήσει στη μείωση των αρνητικών επιπτώσεων και να αποδώσει δικαιοσύνη μεταξύ των χρηστών. Ο τρόπος που μπορεί να γίνει αυτή η εσωτερικοποίηση είναι είτε μέσω ρύθμισης (command and control measure) είτε άμεσα μέσω μηχανισμών αγοράς όπως φορολογία (ειδικός φόρος στα καύσιμα) και διόδια σε δρόμους. Η τελευταία περίπτωση ήδη συμβαίνει σε κάποιες μητροπόλεις όπως στο Λονδίνο, στη Στοκχόλμη και στο Μιλάνο όπου εφαρμόζονται διόδια για τη διέλευση των αυτοκινήτων σε ορισμένες περιοχές. Ο σκοπός του μέτρου είναι η μείωση των ιδιωτικών οχημάτων στις περιοχές αυτές και στην αύξηση της χρήσης μέσων μαζικής μεταφοράς.

2.4.1.2 Κατασκευή νέων υποδομών

Οι επενδύσεις σε υποδομές δικτύου (π.χ. κατασκευή σιδηροδρομικού δικτύου) είναι δυνατό να έχουν θετικές επιπτώσεις όσον αφορά την επέκταση μέσων μεταφοράς πιο φιλικά στο περιβάλλον σε αντίθεση με τα αυτοκίνητα. Τέτοιου είδους υποδομές αντιμετωπίζουν αρκετές δυσκολίες όσον αφορά την πραγματοποίησή τους καθώς απαιτούν την εκταμίευση μεγάλων κεφαλαίων. Επιπλέον, σημαντικό ρόλο διαδραματίζει η περιοχή στην υποψήφια περιοχή για να πραγματοποιηθεί η υποδομή. Σε μη αστικές περιοχές με μικρό πληθυσμό, υπάρχει ο κίνδυνος της υποχρησιμοποίησης της υποδομής, γεγονός που θα οδηγήσει σε οικονομική ζημιά την επένδυση. Για παράδειγμα, αν υπάρχει οδικό δίκτυο σε μια περιοχή με χαμηλό πληθυσμό, η ιδέα για επένδυση στην κατασκευή σιδηροδρομικού δικτύου ενδέχεται να μην πραγματοποιηθεί λόγω του υψηλού κινδύνου της επένδυσης. Το γεγονός αυτό έχει την αρνητική επίπτωση ότι για ένα μακροχρόνιο διάστημα (σημ. όσο η διάρκεια ζωής του ήδη υπάρχοντος οδικού δικτύου) δε θα υπάρχει η δυνατότητα για κατασκευή άλλης υποδομής (lock-in).

Συνεπώς, η στροφή προς πιο φιλικά μέσα προς το περιβάλλον απαιτεί και τη δημιουργία νέων υποδομών. Τέτοιο φιλόδοξο σχέδιο αποτελεί και η πολιτική: «TEN-T Connecting Europe» που έχει σκοπό να διασυνδέσει την ηπειρωτική Ευρώπη και τα κράτη-μέλη της Ευρώπης. Η διεύρυνση του σιδηροδρομικού δικτύου αποτελεί σημαντικό μέρος της πολιτικής αυτής που θα περιορίσει τη συμφόρηση στις διασυνοριακές μεταφορές τόσο προϊόντων όσο και επιβατών. Παρ' όλα αυτά, οικονομετρικές μελέτες αναφέρουν ότι σε περίπτωση απουσίας επιπλέον μέτρων πολιτικής, μόνο δραστικές αλλαγές στο χάρτη των υποδομών θα μπορέσουν να οδηγήσουν σε μείωση των ιδιωτικών μεταφορών (Pickrell, 1999).

2.4.1.3 Μεταβολές στον τρόπο ζωής και εργασίας

Ο περιορισμός της αυξανόμενης τάσης για ταξίδια θεωρείται μια λύση που θα μπορούσε να οδηγήσει υπό προϋποθέσεις σε ένα βιώσιμο μέλλον των μεταφορών. Τα ταξίδια μπορούν να διακριθούν σε ταξίδια εργασίας και σε ταξίδια αναψυχής που πραγματοποιούνται στον ελεύθερο χρόνο. Τα πρώτα είναι απαραίτητα για τη διαβίωση και την εξασφάλιση εισοδήματος ενώ τα δεύτερα για ικανοποίηση προσωπικών αναγκών και πολυτελειών (π.χ. ταξίδια για ψώνια). Τα ταξίδια εργασίας που αντιστοιχούν σε κάθε άνθρωπο είναι περίπου ένα ταξίδι την ημέρα και ο αριθμός αυτός είναι σχετικά κοινός για όλους τους ανθρώπους στον κόσμο. Τα ταξίδια που πραγματοποιούνται στον ελεύθερο χρόνο διαφέρουν ανά περιοχή και κατοίκους με βάση κυρίως το κατά κεφαλή εισόδημα. Οι αποκλίσεις μεταξύ περιοχών του κόσμου είναι εντυπωσιακές, ενώ ο μικρότερος αριθμός ταξιδιών ανά άνθρωπο ανά ημέρα παρατηρείται σε περιοχές με χαμηλή οικονομική ανάπτυξη.

Η πιο σημαντική αλλαγή στον τρόπο εργασίας είναι η υποκατάσταση του φυσικού ταξιδιού προς την εργασία με τη χρήση ηλεκτρονικών μέσων τηλεπικοινωνίας. Το 2008 στις ΗΠΑ περίπου το 17% του εργατικού δυναμικού εργάστηκε από το σπίτι για τουλάχιστον μια μέρα την εβδομάδα (τήλε-εργασία). Παρ' όλα αυτά, ο Weltevreden

(2007) αναφέρει ότι θα πρέπει να υπάρξουν μέτρα πολιτικής που θα αντανακλώνται στο μέσο κόστος του ταξιδιού (price signals) ώστε τα τηλεπικοινωνιακά μέσα να μπορέσουν να υποκαταστήσουν σε μεγαλύτερο βαθμό το ταξίδι προς την εργασία. Επιπλέον, όσον αφορά τα ταξίδια ελεύθερου χρόνου και συγκεκριμένα εκείνα που σχετίζονται με ψώνια, στατιστικά στοιχεία δείχνουν μια βαθμιαία αύξηση των αγορών μέσω Internet (από 30% το 2003 σε 48% το 2009) και αντίστοιχα μείωση των αγορών από φυσικά μαγαζιά (U.S. Census Bureau, 2011). Το στοιχείο αυτό δείχνει τη δυνατότητα που έχουν τα μέσα τηλεπικοινωνίας να υποκαταστήσουν τα ταξίδια για ψώνια. Τα τελευταία συνεπάγονται δαπάνη χρόνου και είναι επόμενο ο καταναλωτής να προτιμήσει να δαπανήσει τον ελεύθερο χρόνο του σε άλλη δραστηριότητα.

2.4.2 Μεθοδολογία προσομοίωσης της αλλαγής συμπεριφοράς του καταναλωτή και εφαρμογές σε μοντέλα της βιβλιογραφίας

Στην παρούσα ενότητα, γίνεται μια αναφορά στα στοιχεία που απαιτούνται από τα μοντέλα ενεργειακής οικονομίας με αναπαράσταση των μεταφορών ώστε να μπορούν να προσομοιώσουν μέτρα που αποσκοπούν στο να επηρεάσουν τη συμπεριφορά των ταξιδιωτών.

Το πιο βασικό στοιχείο για τη μοντελοποίηση της αλλαγής της συμπεριφοράς του καταναλωτή σε μοντέλα ενεργειακής οικονομικής ανάλυσης είναι ότι η ζήτηση για μεταφορές πρέπει να είναι ελαστική και να ανταποκρίνεται σε μεταβολές των τιμών. Οι τιμές μπορεί να ανταναικλούν τα εξωτερικά κόστη που αναφέρθηκαν παραπάνω. Επιπλέον, είναι σημαντικό το μοντέλο να μπορεί να υπολογίσει ενδογενώς την απόφαση του καταναλωτή στο επίπεδο επιλογής μέσου μεταφοράς μέσω της αλληλεπίδρασης των σχετικών τιμών, της ύπαρξης υποδομής δικτύου και της ταχύτητας του κάθε μέσου. Είναι φανερό ότι σημαντικό στοιχείο είναι και η μοντελοποίηση της απόφασης του καταναλωτή να μην πραγματοποιήσει ταξίδι αλλά να επιλέξει χρήση τηλεπικοινωνιακών μέσων. Εξάλλου, είναι σημαντική και η γεωγραφική διακριτοποίηση (π.χ. σε αστικό ή υπεραστικό περιβάλλον) έτσι ώστε να υπάρχει διακριτή εφαρμογή πολιτικών σε κάθε περιοχή καθώς και να λαμβάνονται υπόψη για κάθε περιοχή υποθέσεις για ανάπτυξη υποδομών συγκοινωνίας.

2.4.2.1 Ελαστική ζήτηση, ενδογενής υπολογισμός μέσου μεταφοράς και επιλογή μη ταξιδιού

Τα υβριδικά μοντέλα ενεργειακής οικονομίας με αναπαράσταση του τομέα των μεταφορών περιλαμβάνουν ελαστική ζήτηση για μεταφορές. Η ζήτηση διαφέρει ανά μοντέλο και είναι είτε σταθερής ελαστικότητας υποκατάστασης (constant elasticity of substitution) είτε ελαστικότητας τιμής (price elasticity). Στο μοντέλο CIMS υπάρχει ελαστικότητα ζήτησης για κάθε μέσο μεταφοράς ενώ στο GCAM η ελαστικότητα ζήτησης αφορά τη γενική ζήτηση για επιβατικές και εμπορευματικές μεταφορές. Στα μοντέλα TREMOVE, EUCARS, TRENEN χρησιμοποιούνται συναρτήσεις ζήτησης με σταθερή ελαστικότητα υποκατάστασης. Γενικό συμπέρασμα των δύο μεθοδολογιών

είναι ότι τυχόν αύξηση των του μέσου κόστους για μεταφορές οδηγεί σε μείωση της ζήτησης για μεταφορές. Στο επόμενο στάδιο, δηλαδή στο στάδιο του υπολογισμού της ζήτησης ανά μεταφορικό μέσο όπου η απόφαση ακολουθεί ένα δένδρο απόφαση δύο είναι οι συνηθέστερες μέθοδοι. Η πρώτη αφορά τη χρήση συναρτήσεων CES και η δεύτερη χρήση μοντέλων επιλογής καταναλωτή βασισμένα στη θεωρία διακριτής επιλογής (consumer choice models based on discrete choice modelling).

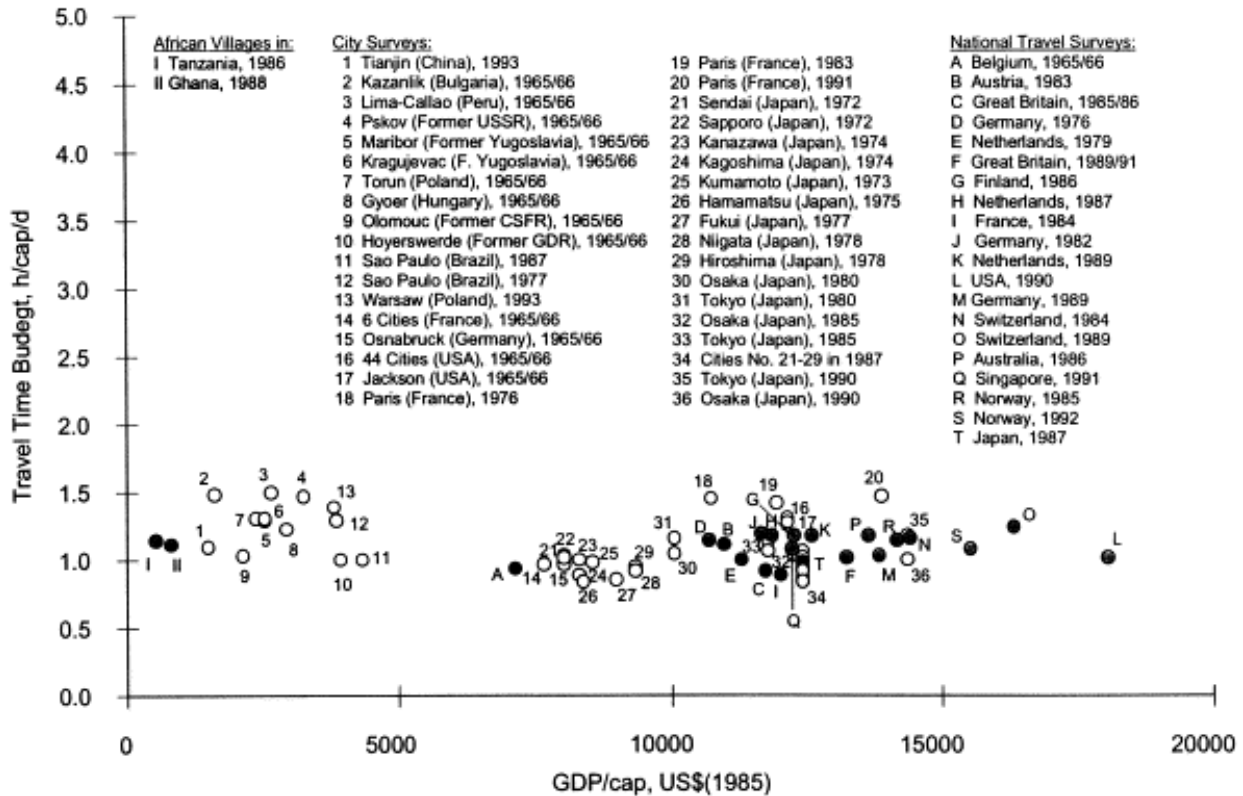
Τα μοντέλα TREMOVE και TRENEN χρησιμοποιούν CES συναρτήσεις όπου λαμβάνεται υπόψη το γενικευμένο κόστος μεταφοράς ανά μέσο μεταφοράς. Το γενικευμένο κόστος αντανακλά πέρα από τις πραγματικές δαπάνες για μεταφορά και το κόστος του χρόνου. Σε επόμενη παράγραφο θα γίνει εκτενέστερη αναφορά στην έννοια του κόστους του χρόνου και της σημασίας του στις ανάγκες της μοντελοποίησης. Χρήση CES συναρτήσεων γίνεται και στα μοντέλα IMACLIM-R και REMIND χωρίς να λαμβάνεται υπόψη το γενικευμένο κόστος. Στο μοντέλο CIMS γίνεται χρήση μοντέλου multinomial logit που βασίζεται στη θεωρία της διακριτής επιλογής και έχει εκτιμηθεί σε στατιστικό δείγμα προτιμήσεων. Τα μοντέλα TREMOVE, IMACLIM-R, REMIND περιλαμβάνουν την επιλογή του να μην ταξιδέψει καθόλου ο αποφασίζων, γεγονός που επιτρέπει την υποκατάσταση της χρήσης μεταφορικού μέσου με χρήση μέσων τηλεπικοινωνιών.

Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου των CES συναρτήσεων σε σχέση με τα μοντέλα διακριτής επιλογής είναι η σχετικά απλή μορφή τους που επιτρέπει τη λεπτομερή αναπαράσταση πολύπλοκων δένδρων αποφάσεων. Τα μοντέλα διακριτής επιλογής απαιτούν μεγαλύτερη βάση δεδομένων όσον αφορά τις εκτιμήσεις των επιμέρους παραμέτρων. Η απλότητα των CES συναρτήσεων έχει το μειονέκτημα ότι συχνά οι σταθερές ελαστικότητες υποκατάστασης βασίζονται σε κρίσεις ειδικών (expert judgment) όταν απουσιάζουν στατιστικά δεδομένα. Τέτοια είναι η περίπτωση της ελαστικότητας υποκατάστασης μεταξύ τήλε-εργασίας και φυσικού ταξιδιού προς τον προορισμό εργασίας.

2.4.2.2 Το κόστος του χρόνου, συμμόρφωση και ο ρόλος των συγκοινωνιακών υποδομών

Η έννοια του χρόνου είναι πολύ σημαντική στη μοντελοποίηση των μεταφορών καθώς στατιστικές έχουν αποδείξει ότι ο μέσος χρόνος ταξιδιού ανά άνθρωπο ανά ημέρα είναι πρακτικά σταθερός ανεξαρτήτως εισοδήματος, περιοχής και χρόνου. Ο χρόνος έχει εκτιμηθεί να είναι μεταξύ 1-1.5 ώρα/ημέρα (Zahavi και Talvitie, 1980, Schaefer, 2000, Mokhtarian και Solomon, 2001). Το Σχήμα 2-1 επιδεικνύει ότι πράγματι ο χρόνος αυτός παραμένει σχετικά σταθερός ανεξαρτήτως γεωγραφικής περιοχής, κατά κεφαλή εισοδήματος και απόστασης ταξιδιού. Από το παραπάνω είναι φανερό ότι η απόφαση για μεταφορά δεν υπόκειται μόνο σε οικονομικούς περιορισμούς αλλά και σε χρονικούς περιορισμούς. Οι Schaefer και Victor (2000) πραγματοποίησαν μακροχρόνιες προβλέψεις της επιβατικής δραστηριότητας λαμβάνοντας υπόψη τον επιπλέον περιορισμό του μέσου ημερήσιου χρόνου ταξιδιού. Οι ίδιοι αναφέρουν ότι μπορεί ο όγκος της επιβατικής δραστηριότητας ανά κάτοικο να αυξάνεται, όμως

αντισταθμίζεται από την υποκατάσταση των αργών μεταφορικών μέσων με γρηγορότερα (π.χ. αεροπλάνα). Συνεπώς, τα μεταφορικά μέσα με υψηλή μέση ταχύτητα ταξιδιού όπως τα αεροπλάνα και τα επιβατικά τρένα υψηλής ταχύτητας επιτρέπουν την πραγματοποίηση ταξιδιών μεγαλύτερης εμβέλειας απ' ό τι επιτρέπουν τα ιδιωτικά αυτοκίνητα.



Σχήμα 2-1: Μέσος χρόνος ταξιδιού ανά κάτοικο. Πηγή: Schafer and Victor, (2000)

Σε αυτό το σημείο θα αναφερθώ στην έννοια του κόστους του χρόνου και στο γενικευμένο κόστος που λαμβάνεται υπόψη στην απόφαση επιλογής του μέσου μεταφοράς. Το γενικευμένο κόστος αντανακλά πέρα από τις πραγματικές δαπάνες για μεταφορά και το κόστος του χρόνου. Το κόστος του χρόνου COT υποδηλώνει το ποσό που είναι πρόθυμος να δαπανήσει ο ταξιδιώτης ώστε να μειώσει το χρόνο ταξιδιού και να φτάσει νωρίτερα στον προορισμό του. Είναι δηλαδή ένα μέγεθος που δηλώνει τον οριακό ρυθμό υποκατάστασης μεταξύ χρόνου και κόστους και ορίζεται ως το γινόμενο του μέσου χρόνου ταξιδιού ανά μεταφορικό μέσο TT επί της αξίας του χρόνου VOT :

$$COT = VOT \cdot TT$$

Ο μέσος χρόνος ταξιδιού ορίζεται ως το αντίστροφο μέγεθος της μέσης ταχύτητας του μεταφορικού μέσου. Ο όρος VOT έχει μονάδες (€/ώρα) και ορίζει την αξία του χρόνου που δαπανήθηκε για μεταφορά. Η αξία αυτή αντανακλά αυτό περιλαμβάνει το κόστος του προσωπικού (μη πληρωτέου) χρόνου που δαπανήθηκε για μεταφορά προς ένα προορισμό. Στην περίπτωση που το ταξίδι αφορά εργασία, τότε το

κόστος του χρόνου περιλαμβάνει επιπλέον και το κόστος στην επιχείρηση λόγω του χαμένου χρόνου του εργαζομένου. Η αξία του χρόνου διαφοροποιείται με βάση το κατά κεφαλή εισόδημα, το σκοπό του ταξιδιού (π.χ. εργασία έναντι αναψυχής), το μέσο μεταφοράς (π.χ. ιδιωτικό όχημα έναντι λεωφορείου) και το είδος δρόμου. Στη βιβλιογραφία έρευνες συνδέουν την αξία του χρόνου που αντιλαμβάνεται ο άνθρωπος κατά τη διαδρομή στον προορισμό εργασίας του με το ημερήσιο ωριαίο μισθό. Οι Small (1992) και Miller (1989) συμπεραίνουν ότι η αξία του χρόνου αντιστοιχεί περίπου στο 50-60% του ακαθάριστης ημερήσιας αποζημίωσης. Οι ίδιοι αναφέρουν ότι το ποσοστό αυτό μπορεί να αλλάξει δραματικά ανάλογα με την εκβιομηχάνιση της περιοχής (20%-100% του μισθού). Οι Calfee και Winston (1998) εκτιμούν την αξία του χρόνου των ταξιδιωτών με αυτοκίνητο περίπου στο 20% του μισθού έπειτα από στατιστική έρευνα και χρήση της μεθόδου δηλωμένης προτίμησης (stated preference approach).

Οι επιπτώσεις της συμφόρησης (congestion) αντανακλώνται στο μέσο χρόνο ταξιδιού. Σε περιπτώσεις υψηλής συμφόρησης στο οδικό δίκτυο, οι ταχύτητες που αναπτύσσουν τα αυτοκίνητα είναι χαμηλές και αυξάνουν κατ' επέκταση το χρόνο ταξιδιού. Το γεγονός αυτό οδηγεί στην αύξηση του κόστους του χρόνου και κατ' επέκταση στο γενικευμένο κόστος. Η αύξηση του τελευταίου τελικά οδηγεί σε υποκατάσταση του μέσου μεταφοράς με άλλο ανταγωνιστικό. Ο βαθμός υποκατάστασης εξαρτάται από τη μεταβολή των σχετικών τιμών των δύο μέσων και της ελαστικότητας υποκατάστασης.

Επιπλέον, ο λόγος που λαμβάνεται υπόψη το κόστος του χρόνου στην απόφαση επιλογής μεταφορικού μέσου έχει να κάνει και με τον κορεσμό του δικτύου συγκοινωνιών κάθε μέσου. Σε πιο λεπτομερή μοντέλα ενεργειακής οικονομίας η αναπαράσταση του τομέα των εμπορευματικών και επιβατικών μεταφορών διακρίνεται σε γεωγραφικό επίπεδο που ορίζεται από το είδος της συγκοινωνιακής υποδομής. Χαρακτηριστικό παράδειγμα, είναι οι υπεραστικές διαδρομές σε αυτοκινητοδρόμους καθώς και οι αστικές λεωφόροι. Η επιπλέον γεωγραφική πληροφορία αυξάνει την πολυπλοκότητα της επίλυσης ενός μοντέλου αλλά έχει ως πλεονέκτημα τη δυνατότητα προσομοίωσης και απεικόνισης των επενδύσεων σε έργα συγκοινωνιακών υποδομών ανά συγκεκριμένη περιοχή. Το IMACLIM-R μοντέλο περιλαμβάνει τη δυνατότητα επέκτασης των ήδη υπάρχοντων υποδομών (οδικών, σιδηροδρομικών και εναέριων). Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιούνται καμπύλες που συνδέουν τη μέση ταχύτητα του συγκεκριμένου μέσου με το βαθμό χρησιμοποίησης του συγκεκριμένου συγκοινωνιακού δικτύου. Συνεπώς, οι επενδύσεις στην επέκταση του δικτύου έχουν ως συνέπεια τη μείωση του βαθμού χρησιμοποίησης της υποδομής και της μείωσης του χρόνου ταξιδιού σαν αποτέλεσμα της μείωσης της συμφόρησης.

2.5 Αναφορά σε πλήρους κλίμακας μοντέλα με αναπαράσταση του τομέα των μεταφορών

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται μοντέλα ενεργειακής οικονομικής ανάλυσης πλήρους κλίμακας, τόσο σε επίπεδο κρατών όσο και σε επίπεδο ολόκληρων

περιοχών του κόσμου, με αναπαράσταση του τομέα των μεταφορών. Η διάκριση των μοντέλων γίνεται με βάση τη φύση και τη λειτουργία τους και γίνεται αναφορά στις μεθόδους που χρησιμοποιούν. Επιπλέον, παρουσιάζονται τρία σημαντικά μοντέλα μεταφορών δικτύου (network transport models) που χρησιμοποιήθηκαν για να παράγουν προβλέψεις για την εμπορευματική και επιβατική δραστηριότητα της Ευρώπης.

2.5.1 Μοντέλα μεταφορών δικτύου

Η παρούσα ενότητα περιγράφει τα βασικά μοντέλα μεταφορών δικτύου (Network Transport models) που εξετάζουν το σύστημα μεταφορών της Ευρώπης.

2.5.1.1 STREAMS

Το μοντέλο STREAMS αναπτύχθηκε στα πλαίσια ερευνητικού προγράμματος που χρηματοδοτήθηκε από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή κατά τη χρονική περίοδο (1996-1999) (Marcial Echenique & Partners Ltd, 2000). Ο σκοπός της κατασκευής του μοντέλου ήταν η πρόβλεψη της ζήτησης για υπηρεσίες μεταφορών ανά την Ευρώπη καθώς και η εκχώρηση αυτής της ζήτησης σε ένα σύνολο διασυνδέσεων (network) που αναπαριστούν το οδικό/ σιδηροδρομικό δίκτυο ανά χώρα της Ευρώπης. Το μοντέλο χρησιμοποιήθηκε για την ανάπτυξη ενός σεναρίου αναφοράς που προέβλεπε τη ζήτηση για επιβατικές και εμπορευματικές μεταφορές τη χρονιά 2020. Η χρονιά βάσης του μοντέλου ήταν το 1994.

Το μοντέλο αποτελείται από δύο επιμέρους υπο-μοντέλα που αλληλοεπιδρούν μεταξύ τους: ένα μοντέλο ζήτησης και ένα μοντέλο ανάθεσης της ζήτησης στα διάφορα δίκτυα υποδομών ανά χώρα. Το μοντέλο ζήτησης καθορίζει τη ζήτηση για μεταφορές τόσο των επιβατών όσο και των εμπορευμάτων. Το μοντέλο λαμβάνει υπόψη οικονομικά, κοινωνικά και δημογραφικά χαρακτηριστικά και παράγει πίνακες ζήτησης μεταφορών. Επιπλέον, εισάγει την έννοια της απώλειας χρησιμότητας (disutility) για συγκεκριμένες περιπτώσεις όπου τυχόν επιπλέον κόστη σχετικά με τις μεταφορές έχουν ως αποτέλεσμα μειωμένη ζήτηση για μεταφορές. Το μοντέλο, που αναθέτει τη ζήτηση στο δίκτυο των μεταφορών, φέρει χωρική/γεωγραφική διακριτοποίηση επιπέδου NUTS2 η οποία περιλαμβάνει περίπου 200 εσωτερικές ζώνες.

Ο σκοπός της κατασκευής του μοντέλου είναι η στρατηγική μελέτη των μεταφορών και για αυτό το λόγο η χρήση του μοντέλου συνίσταται για μελέτες κυρίως σε ευρωπαϊκό επίπεδο και όχι τόσο σε επίπεδο χωρών-μελών της Ε.Ε. Παρ' όλα αυτά είναι δυνατή η ενσωμάτωση υποθέσεων σχετικών με αναπτυξιακά έργα υποδομών (π.χ. αυτοκινητόδρομοι) ή υποθέσεων σχετικά με κόστη σε επίπεδο χωρών. Οι παραπάνω υποθέσεις μπορούν να επιφέρουν μεταβολές στα επιμέρους μερίδια των διαφόρων μέσων μεταφοράς (λ.χ. στροφή προς τη χρήση σιδηροδρόμου λόγω της αύξησης του κόστους των διοδίων).

Η κατασκευή του μοντέλου αποτέλεσε μια πλατφόρμα για μέσο-μακροπρόθεσμες προβλέψεις της ζήτησης για επιβατικές και εμπορευματικές μεταφορές. Το μοντέλο STREAMS αποτέλεσε τη βάση πάνω στην οποία αναπτύχθηκε το μοντέλο SCENES στο οποίο θα αναφερθούμε στη συνέχεια.

2.5.1.2 SCENES

Το μοντέλο SCENES (Marcial Echenique & partners Ltd, 2002) αναπτύχθηκε στα πλαίσια προγράμματος που χρηματοδοτήθηκε από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή (1998-2002) και είχε σα σκοπό τη δημιουργία μίας βάσης δεδομένων με μεταβλητές που θα χρησιμοποιηθούν για την πρόβλεψη της ζήτησης για επιβατικές και εμπορευματικές μεταφορές. Επιπλέον, το μοντέλο θα χρησιμοποιούνταν για τη δημιουργία προβλέψεων για κοινωνικοοικονομικούς δείκτες, τη μελέτη των αλληλεπιδράσεων μεταξύ της ζήτησης για μεταφορές και την προσφορά υπηρεσιών μεταφορών και την ανάλυση των επιπτώσεων ρυθμιστικών ενεργειών. Η εκτενής βάση δεδομένων δημιουργήθηκε σε επίπεδο ζωνών για να καλύψει τις ανάγκες για συνεπή δεδομένα για λόγους μοντελοποίησης.

Ο βασικός σχεδιασμός και η λειτουργία του μοντέλου πρόβλεψης της ζήτησης διατηρεί τη φιλοσοφία που αναπτύχθηκε στο μοντέλο STREAMS ενώ η βάση δεδομένων επεκτάθηκε ώστε να καλύπτει επιπλέον και χώρες της Ανατολικής Ευρώπης. Η ζήτηση για επιβατικές μεταφορές αναλύεται σε 20 πληθυσμιακές ομάδες και σε 10 είδη ταξιδιών. Η ζήτηση για εμπορευματικές μεταφορές υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψη διασυνδέσεις ζωνών επιχειρώντας να αναπαραστήσουν τις ροές αγαθών. Για το λόγο αυτό έχουν αναπαρασταθεί 24 κλάδοι της οικονομίας. Τα μοντέλα ζήτησης επιβατικών και εμπορευματικών μεταφορών αλληλεπιδρούν μεταξύ τους στο υπο-μοντέλο ανάθεσης της ζήτησης στο οδικό δίκτυο. Στο παρόν υπομοντέλο λαμβάνονται υπόψη τα κόστη καθώς και ο χρόνος ταξιδιού και καλύπτει τις οδικές, σιδηροδρομικές, αεροπορικές, θαλάσσιες και τις εσωτερικές πλωτές μεταφορές. Επίσης, υπάρχει σαφέστερη αντιμετώπιση των μεταφορών εντός των ζωνών έτσι ώστε να γίνεται λεπτομερέστερη μοντελοποίηση των ταξιδιών βραχείας απόστασης. Στα πλαίσια του προγράμματος, κατασκευάστηκαν σενάρια ζήτησης για μεταφορές με χρονικό ορίζοντα το 2020 και έπειτα.

2.5.1.3 TRANS-TOOLS

Το μοντέλο TRANSTOOLS είναι ένα ευρωπαϊκό μοντέλο μεταφορών που καλύπτει τις επιβατικές καθώς και τις εμπορευματικές μεταφορές σε μορφή δικτύου (network). Το μοντέλο αναπτύχθηκε (2004) κατά τη διάρκεια προγραμμάτων που χρηματοδοτήθηκαν από το ερευνητικό κέντρο IPTS (Institute for Prospective Technological Studies) της Ευρωπαϊκής επιτροπής και της Γενικής Διεύθυνσης Ενέργειας και Μεταφορών (DG TREN). Η κατασκευή του μοντέλου βασίζεται σε βασικές ιδέες και αρχές που αναπτύχθηκαν νωρίτερα σε άλλα μοντέλα (βλ. μοντέλο SCENES), περιέχει και επιπλέον εργαλεία για την καλύτερη προσομοίωση και εφαρμογή πολιτικών της Ε.Ε ενώ παρουσιάζει και προτάσεις για αντιμετώπιση προβλημάτων των

ήδη υπάρχοντων μοντέλων. Πιο συγκεκριμένα, η προσέγγιση που ακολουθήθηκε στο μοντέλο SCENES όσον αφορά την προσομοίωση των επιβατικών μεταφορών καθώς και η αλληλεπίδραση μεταξύ τοπικών και μακρινών ταξιδιών αποτέλεσε τη βάση του μοντέλου TRANS-TOOLS. Ο σκοπός της κατασκευής του μοντέλου ήταν η ανάπτυξη ενός μεθοδολογικού εργαλείου με «ανοικτή» αρχιτεκτονική του οποίου η χρήση θα ήταν ελεύθερη από την κοινότητα των προγραμματιστών και άλλων ενδιαφερομένων πλευρών.

Το μοντέλο TRANS-TOOLS είχε ως σκοπό να βελτιώσει ορισμένα μειονεκτήματα των ήδη υπάρχοντων μοντέλων για τη σαφέστερη αναπαράσταση του τομέα των μεταφορών και την εκτίμηση επιπτώσεων πολιτικών. Πιο συγκεκριμένα, τα κυριότερα μειονεκτήματα εντοπίζονται στην έλλειψη της ορθής αναπαράστασης των διασυνδέσεων των μέσων καθώς και των εμπορευματικών διασυνδέσεων, την έλλειψη σαφών συσχετισμών των μοντέλων δικτύου με μακροοικονομικούς δείκτες και την ανεπαρκή ή ξεπερασμένη προσομοίωση των ροών (κοντινά, μακρινά και επιβατικά/εμπορευματικά ταξίδια).

Η χρησιμοποίηση του μοντέλου είναι για λόγους ανάλυσης των επιπτώσεων της συμφόρησης του οδικού δικτύου, της τιμολόγησης της χρήσης του οδικού δικτύου (π.χ. διόδια) καθώς και της κατασκευής νέων υποδομών στις μεταφορές των επιβατών και των εμπορευμάτων. Το μοντέλο εκτιμάει τα κόστη λόγω χρήσης των υποδομών, τα κόστη που σχετίζονται με τη μεταφορική δραστηριότητα (μεταβλητά κόστη) καθώς και κόστη που εγείρονται λόγω εφαρμογής πολιτικής και προσομοιώνει τις επιδράσεις τους στη ζήτηση για μεταφορική δραστηριότητα. Η τελευταία αναλύεται τόσο σε επίπεδο επιβατικής όσο και εμπορευματικής δραστηριότητας και ανά τύπο μεταφορικού μέσου.

Σύμφωνα με την τελευταία έκδοση του μοντέλου (v2) που τροποποιήθηκε στα πλαίσια του προγράμματος TEN connect , ο γεωγραφικός χώρος της Ευρώπης έχει διακριτοποιηθεί σε ένα σύστημα ζωνών που αποκαλούνται NUTS 3 (Nomenclature of Territorial Units for Statistics). Τα μεταφορικά μέσα που συμπεριλαμβάνονται στην ανάλυση είναι τα εξής:

- Επιβατικά αυτοκίνητα
- Δημόσιες επιβατικές μεταφορές
- Σιδηροδρομικές μεταφορές
- Αεροπορικές μεταφορές

Έχει γίνει διακριτοποίηση επίσης και στο σκοπό των ταξιδιών που πραγματοποιούνται και αναλύονται στα εξής:

- Οικία-Εργασία
- Οικία-Μη εργασία
- Οικία- Διακοπές

Η ανάγκη για διάκριση του σκοπού των ταξιδιών έχει να κάνει με το γεγονός ότι σε κάθε είδος ταξιδιού ο χρήστης/οδηγός αποδίδει διαφορετικό χρηματικό αντίτιμο

στη μονάδα του χρόνου που καταναλώνει για μεταφορά. Είναι η έννοια της αξίας του χρόνου (Value of Time) που σύμφωνα με τη βιβλιογραφία για μεταφορές που σχετίζονται με εργασία είναι υψηλότερη σε σχέση με ταξίδια αναψυχής. Τα ταξίδια και οι διαδρομές έχει υποτεθεί ότι πραγματοποιούνται τόσο εντός κάθε ζώνης NUTS3 καθώς και μεταξύ προσκείμενων ζωνών. Οι ζώνες διασυνδέονται μεταξύ τους με οδικό δίκτυο του οποίου τα χαρακτηριστικά (π.χ. χωρητικότητα) ανταποκρίνονται σε πραγματικά στοιχεία. Τόσο οι επιβατικές όσο και οι εμπορευματικές οδικές μεταφορές χρησιμοποιούν το ίδιο οδικό δίκτυο, ενώ όσον αφορά τις σιδηροδρομικές μεταφορές, εξυπηρετούνται από ειδικό δίκτυο μεταφορών. Οι αεροπορικές μεταφορές εξυπηρετούνται μέσω των διασυνδέσεων μεταξύ των αεροδρομίων των ευρωπαϊκών χωρών.

Το μοντέλο έχει ρυθμιστεί ώστε να αναπαράγει τα στατιστικά στοιχεία του έτους βάσης που είναι το 2005. Τα αποτελέσματα του μοντέλου που παριστάνονται γραφικά σα ροές μεταξύ των ζωνών NUTS3 είναι δυνατό να παρουσιαστούν γραφικά μέσω της χρήσης του εργαλείου ARCGIS. Οι παράμετροι που οδηγούν-επηρεάζουν τις προβλέψεις του μοντέλου σε σχέση με το έτος βάσης (2005) είναι:

- Διαφοροποίηση του πληθυσμού
- Διαφοροποίηση του δείκτη αυτοκινήτων ανά κάτοικο
- Εφαρμογή πολιτικών και επενδύσεις σε υποδομές
- Αλλαγές στο εισόδημα των νοικοκυριών

Όσον αφορά τις επιβατικές μεταφορές, το μοντέλο αρχικά τις διακρίνει σε κοντινές και μακρινές και έπειτα ανάλογα με το σκοπό και το είδος που χρησιμοποιείται (όπως αναφέρθηκε παραπάνω). Η επιλογή κάποιου συγκεκριμένου είδους μεταφοράς ακολουθεί τη δομή δέντρου απόφασης και βασίζεται σε μια συνάρτηση χρησιμότητας, ενώ για το έτος βάσης γίνεται προσαρμογή σε δεδομένα από έρευνες και ερωτηματολόγια καθώς και εκτιμήσεις.

2.5.2 Ολοκληρωμένα μοντέλα εκτίμησης με αναπαράσταση των μεταφορών

Η παρούσα ενότητα περιλαμβάνει μια επισκόπηση των μοντέλων ολοκληρωμένης εκτίμησης (Integrated assessment models) που περιλαμβάνουν επαρκή αναπαράσταση του τομέα των μεταφορών.

2.5.2.1 ASTRA, ASTRA-EC

Το μοντέλο ASTRA-EC (Fermi, 2012) είναι ένα μοντέλο προσομοίωσης σε Ευρωπαϊκό επίπεδο για στρατηγική αξιολόγηση (strategic assessment) πολιτικών που σχετίζονται με τις μεταφορές. Το μοντέλο ASTRA-EC είναι μια συνέχεια του μοντέλου ASTRA (ASsessment of TRAnsport Strategies) (Krail, 2009) (Schade, 2005), ακολουθεί την μεθοδολογία δυναμικού συστήματος (system dynamics methodology) για την οποία θα αναφερθούμε παρακάτω και βασίζεται σε μια εμπειρία άνω των δέκα χρόνων.

Η μεθοδολογία δυναμικού συστήματος κατά τον Fermi (2012) δεν επαφίεται μόνο στην ανάλυση συγκεκριμένων επιστημονικών πεδίων αλλά αποτελεί μια ευρύτερη μεθοδολογία που εφαρμόζεται στη μελέτη διαφόρων «συστημάτων». Τα υπό μελέτη συστήματα θα πρέπει να υπακούν σε ορισμένες ιδιότητες και υποθέσεις σχετικές με τη διασύνδεση μεταξύ του αιτίου και του αιτιατού. Οι διασυνδέσεις αυτές είναι δυνατό να στηρίζονται είτε στη θεωρία ή σε εμπειρικά δεδομένα, παρατηρήσεις και απαντήσεις σε ερωτηματολόγια και αναπαρίστανται ως μαθηματικές εξισώσεις. Ο σκοπός ενός μοντέλου που βασίζεται στη μεθοδολογία δυναμικού συστήματος δεν είναι ο υπολογισμός ορισμένων άγνωστων μεταβλητών αλλά η απεικόνιση των μεταβολών όλων σχεδόν των μεταβλητών του μοντέλου σαν αποτέλεσμα της δυναμικής τους συμπεριφοράς μέσα στο χρόνο αλλά και της αλληλεπίδρασής των μεταξύ τους. Η μέθοδος έχει δεχθεί κριτική για το γεγονός ότι βασίζεται υπερβολικά σε ανεπίσημες, υποκειμενικές διαδικασίες επικύρωσης (Nordhaus, 1973, Zellner, 1980). Απεναντίας, οι (Forrester, 1974 και 1980, Barlas, 1996) επιχειρούν να προσδώσουν περισσότερη εμπιστοσύνη στη μέθοδο με την παράθεση μεθοδολογίας και πειραμάτων που θα πιστοποιεί και θα επικυρώνει τη συμπεριφορά των μοντέλων που βασίζονται στη μεθοδολογία δυναμικού συστήματος.

Η χρησιμότητα του μοντέλου ASTRA-EC έγκειται στην ολοκληρωμένη αξιολόγηση (integrated assessment) πολιτικών και στρατηγικών στον τομέα των μεταφορών υπό το πρίσμα μιας περιβαλλοντικής, τεχνολογικής και οικονομικής σκοπιάς. Για τους παραπάνω λόγους το μοντέλο είναι διαρθρωμένο σε μορφή υπο-μοντέλων που εξετάζουν συγκεκριμένους τομείς όπως την οικονομία, τη ζήτηση για μεταφορές και τη διάρθρωση του στόλου των οχημάτων. Υπάρχει η δυνατότητα ανάλυσης των κοινωνικών επιπτώσεων των πολιτικών που εφαρμόζονται σε διάφορες κοινωνικές ομάδες με βάση το εισόδημα, την ηλικία, το φύλο και το είδος του νοικοκυριού. Η γενική οικονομία επίσης λαμβάνεται υπόψη μέσω των πινάκων εισροών-εκροών, της εργασίας, των επενδύσεων και του διεθνούς εμπορίου. Η αλληλεπίδραση των υπο-μοντέλων έχει ως αποτέλεσμα η οποιαδήποτε αλλαγή σε έναν τομέα να επιφέρει αλλαγές σε κάποιον άλλο τομέα (feedback loop).

Τα ιστορικά δεδομένα του μοντέλου προσαρμόζονται στο έτος βάσης που είναι το 1995, ενώ οι προβλέψεις πραγματοποιούνται με ορίζοντα το 2050. Επιπλέον, έχει γίνει διακριτοποίηση των ευρωπαϊκών χωρών σε ζώνες NUTS (κατ' αναλογία με το TRANS-TOOLS) δίνοντας έτσι τη δυνατότητα διασύνδεσης του μοντέλου με άλλα μοντέλα που μελετούν τον τομέα των μεταφορών σε πανευρωπαϊκό επίπεδο.

Πιο συγκεκριμένα, η ζήτηση για μεταφορές διακρίνεται σε επιβατική και εμπορευματική και υπολογίζεται σε διακριτά στάδια. Πρώτα, υπολογίζεται ο αριθμός των ταξιδιών που πραγματοποιούνται σε επίπεδο ζωνών NUTS-II με βάση μακροοικονομικά στοιχεία όπως πληθυσμός, εργασία, ηλικία και εισόδημα. Στη συνέχεια τα ταξίδια αναλύονται με βάση την απόστασή τους (τοπικά, κοντινά, εθνικά, διεθνή). Η διακριτοποίηση αυτή πραγματοποιείται με χρήση ελαστικότητας, που μεταβάλλονται μέσα στο χρόνο, κυρίως ως προς το γενικευμένο κόστος μεταφοράς. Έπειτα τα ταξίδια διακρίνονται με βάση το μέσο μεταφοράς. Η επιλογή κάθε μέσου

μεταφοράς υπολογίζεται με χρήση ελαστικότητων ως προς το κόστος και το χρόνο, ενώ υπάρχει η δυνατότητα χρησιμοποίησης και άλλων ελαστικότητων ως προς άλλων αιτίων που επηρεάζουν την επιλογή του μέσου μεταφοράς όπως ο δείκτης: αυτοκίνητα ανά κάτοικο. Η χρήση ελαστικότητων και όχι μιας συνάρτησης που θα επιτρέψει τη διακριτή επιλογή έγινε, για λόγους ελέγχου του μοντέλου και για λόγους ευκολίας προσαρμογής του μοντέλου στα στατιστικά στοιχεία που έχουν παρατηρηθεί.

2.5.2.2 IMACLIM-R

Το μοντέλο IMACLIM-R (Impact Assessment of CLIMate policies-Recursive version) αναπτύχθηκε στο CIRED και είναι ένα μοντέλο γενικής ισορροπίας που περιλαμβάνει 10 κλάδους της οικονομίας μεταξύ των οποίων τις επίγειες, τις θαλάσσιες και τις εναέριες μεταφορές. Το μοντέλο πραγματοποιεί μεγιστοποίηση της χρησιμότητας του καταναλωτή που υπόκειται σε περιορισμό εισοδήματος και χρόνου. Το μοντέλο προσομοιώνει υπολογισμούς της μέσης ταχύτητας ανά μεταφορικό μέσο και καθορίζεται από το διαθέσιμο δίκτυο υποδομών. Σε περιπτώσεις κορεσμού του δικτύου συγκοινωνιών, η μέση ταχύτητα του μεταφορικού μέσου που χρησιμοποιεί τη συγκεκριμένη υποδομή μειώνεται. Στην αντίθετη περίπτωση που γίνονται επενδύσεις επέκτασης των υποδομών οδηγούν σε αύξηση της ταχύτητας του μέσου και συνεπώς αύξηση της μεταφορικής δραστηριότητας. Η ζήτηση για εμπορευματικές δραστηριότητες (οδικές και σιδηροδρομικές) είναι ανάλογη της οικονομικής ανάπτυξης.

2.5.2.3 CIMS

Το μοντέλο ενεργειακής οικονομίας CIMS αναπτύχθηκε στο πανεπιστήμιο Simon Fraser και εξετάζει την οικονομία του Καναδά. Περιλαμβάνει υπομοντέλα υπολογισμού ζήτησης για ενέργεια, προσφοράς καθώς και ένα υπομοντέλο μακροοικονομικό. Το μοντέλο περιλαμβάνει αναπαράσταση των επιβατικών και εμπορευματικών μεταφορών. Αρχικά, το μοντέλο δέχεται εξωγενώς προβλέψεις για την επιβατική και εμπορευματική δραστηριότητα και τα επιμέρους υπομοντέλα καθορίζουν την εξέλιξη του απαραίτητου κεφαλαιουχικού εξοπλισμού υπολογίζοντας νέες επενδύσεις και την απόσυρση παλαιού εξοπλισμού με βάση την ελαχιστοποίηση του κόστους. Το μοντέλο επιλογής οχημάτων και καυσίμων είναι της μορφής multinomial logit model βασισμένο σε πραγματικά δεδομένα από έρευνα δηλωμένης προτίμησης (stated preference survey data). Η ζήτηση για εμπορευματικές μεταφορές συνδέεται με μια οικονομετρικά εκτιμημένη ελαστικότητα με την προστιθέμενη αξία (value added) του κλάδου της βιομηχανίας. Το υπομοντέλο προσφοράς στη συνέχεια υπολογίζει αντιπροσωπευτικές τιμές για τις μεταφορές και ξεκινάει μια επαναληπτική διαδικασία μέχρι να επιτευχθεί σύγκλιση μεταξύ προσφοράς και ζήτησης. Το μακροοικονομικό υπομοντέλο υπολογίζει την επίδραση των τιμών ενέργειας στη δομή της οικονομίας και στο διεθνές εμπόριο.

2.5.3 Αυτόνομα- εξειδικευμένα μοντέλα μεταφορών

2.5.3.1 TRENEN

Το μοντέλο TRENEN αναπτύχθηκε στα πλαίσια του ευρωπαϊκού προγράμματος TRENEN II STRAN που είχε σκοπό την ανάπτυξη στρατηγικών μοντέλων για την αξιολόγηση της μεταρρύθμισης των τιμών για μεταφορές σε επίπεδο Ευρωπαϊκής Ένωσης. Η φύση του μοντέλου έγκειται στην ανάλυση δύο τύπων προβλημάτων. Το πρώτο πρόβλημα αφορά τη σύγκριση μεταξύ των υπάρχουσών τιμών και των βέλτιστων τιμών για τα μέσα μεταφοράς καθώς και τη σύγκρισή τους με το οριακό κοινωνικό κόστος (*marginal social cost*). Το δεύτερο πρόβλημα εμφανίζεται αφού εντοπιστούν οι διαφορές των παραπάνω τιμών και εξετάζει τους τρόπους, τα μέσα και τις πολιτικές για να εξομαλυνθούν οι διαφορές των τιμών από τις βέλτιστες. Ενδεικτικά μέσα μπορεί να είναι η αύξηση των ειδικών φόρων σε συγκεκριμένα καύσιμα ή η πληρωμή για χρήση συγκεκριμένων δρόμων και ζωνών (π.χ. διόδια για είσοδο στο μητροπολιτικό κέντρο μεγάλων πόλεων) καθώς και η τιμολόγηση της στάθμευσης. Τα παραπάνω ερωτήματα συνδυάζουν πολλά χαρακτηριστικά όπως τη συμπεριφορά των χρηστών μέσων μεταφοράς, τη χωρητικότητα των υποδομών και αλληλεπιδράσεις μεταξύ των μέσων μεταφοράς (π.χ. ιδιωτικό μέσο και δημόσιο μέσο μεταφοράς).

Το μοντέλο αποτελείται από δύο υπό-μοντέλα που εξετάζουν τις αστικές (*Urban*) και τις υπεραστικές (*Interregional*) μεταφορές αντίστοιχα χρησιμοποιώντας παρόμοια μεθοδολογία. Το κάθε υπομοντέλο αναπαριστά το πρόβλημα των μεταφορών σαν ένα σύνολο προβλημάτων εύρεσης της ισορροπίας της αγοράς. Το μοντέλο αναγνωρίζει ένα σύνολο υπο-προβλημάτων αγορών που διαφοροποιούνται όσον αφορά τη χρήση του μέσου μεταφοράς (π.χ. μικρό αυτοκίνητο βενζίνης ή ντίζελ), τη χρονική στιγμή της μεταφοράς (ώρα αιχμής ή όχι). Το μοντέλο TRENEN αναπαριστά 20 και 30 τέτοιες αγορές μεταφορών για το αστικό και το υπεραστικό υπομοντέλο. Η τιμή ισορροπίας αναπαρίσταται ως το γενικευμένο κόστος μεταφοράς (περιλαμβάνει το κόστος των πόρων, φόρους και το κόστος του χρόνου). Με τη χρήση του γενικευμένου κόστους για την εύρεση του σημείου ισορροπίας των αγορών είναι εφικτό να μελετηθούν οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των μέσων μεταφορών σαν αποτέλεσμα μεταβολών των κοστών χρήσης, της ταχύτητας του μέσου ή της ποιότητας της υπηρεσίας.

Η σύγκριση μεταξύ των πραγματικών τιμών που «βλέπουν» οι καταναλωτές σε σχέση με τις βέλτιστες που αντανακλούν τα οριακά εξωτερικά κόστη δείχνει ότι θα έπρεπε οι φόροι να ρυθμιστούν κατά τέτοιο τρόπο ώστε οι νέες τιμές να καλύπτουν και τα εξωτερικά κόστη. Η χρήση του μοντέλου είναι απαραίτητη καθώς το πρόβλημα της εύρεσης των βέλτιστων τιμών δεν είναι μια λογιστική εργασία. Αυτό έγκειται στο γεγονός ότι όλα τα μέσα μεταφοράς αλληλεπιδρούν μεταξύ τους και το εξωτερικό κόστος της κυκλοφοριακής συμφόρησης (*congestion*) εξαρτάται από τη δραστηριότητα όλων των μέσων. Συνεπώς, ο φόρος που θα προκύψει για να καλύπτει το οριακό εξωτερικό κόστος της συμφόρησης θα προκύψει από την ισορροπία όλων μέσων μεταφορών (που υπενθυμίζουμε ότι αναπαρίστανται σαν αγορές). Στο μοντέλο

TRENEN οι φόροι που συλλέγονται για την αντανάκλαση των εξωτερικών κοστών θεωρείται ότι επιστρέφονται πίσω στα νοικοκυριά.

Τα δύο υπομοντέλα (αστικών και υπεραστικών μεταφορών) ενώ μοιράζονται την ίδια φιλοσοφία, εστιάζουν σε διαφορετικά μέσα μεταφοράς. Το αστικό μοντέλο περιλαμβάνει επιπλέον και τη χρήση ηπιότερων μέσων μεταφοράς όπως περπάτημα και ποδηλασία, διακρίνει τους ταξιδιώτες σε κατοίκους (inhabitants) και σε αυτούς που πραγματοποιούν διαδρομή για την εργασία τους (commuters), ενώ περιλαμβάνει επίσης κόστη στάθμευσης και διόδια διέλευσης σε κεντρικές αστικές ζώνες (cordon tolling). Το υπεραστικό υπομοντέλο δίνει έμφαση περισσότερο στις εμπορευματικές μεταφορές και μπορεί να λάβει υπόψη του και τις διεθνείς μεταφορές σε περιπτώσεις γειτνίασης χωρών. Το αστικό υπομοντέλο περιλαμβάνει 6 χαρακτηριστικές αστικές περιπτώσεις ενώ το υπεραστικό υπομοντέλο 3. Η γεωγραφική αναπαράσταση των ζωνών είναι τυπική και απλή σε σχέση με τα χωρικά μοντέλα δικτύου (network transport models) που συζητήσαμε παραπάνω, καθώς κάθε ζώνη που εξετάζεται θεωρείται ομογενής έτσι ώστε η υποδομή δικτύου να αναπαρίσταται σα μια σχέση ταχύτητας-ροής. Η συμπεριφορά των ταξιδιωτών προσομοιώνεται μέσω συνάρτησης χρησιμότητας ενώ οι τύποι ιδιωτικών οχημάτων που καλύπτει είναι δύο (βενζίνη και ντίζελ).

Η χρησιμότητα του μοντέλου έγκειται στην κατασκευή ενός σημείου ισορροπίας αναφοράς στο οποίο θα γίνονται οποιεσδήποτε συγκρίσεις τυχόν μεταβολών των φόρων ή των τιμών. Πιο συγκεκριμένα, το μοντέλο ρυθμίστηκε έτσι ώστε να προσομοιώνει στατιστικά στοιχεία του παρελθόντος (παρατηρημένες τιμές μεταφορών και όγκος μεταφορικής δραστηριότητας). Στη συνέχεια, εξετάστηκαν σενάρια μεταβολής των τιμών που να συμπεριλαμβάνουν διόδια στους αυτοκινητοδρόμους, κόστη στάθμευσης καθώς και κανονισμούς όσον αφορά τις εκπομπές ρύπων των οχημάτων.

Τα πλεονεκτήματα που πρότεινε το μοντέλο TRENEN αφορούν την ίδια του τη φύση που επιτρέπει την ανάλυση διαφόρων μέσων μεταφοράς, την αλληλεπίδραση επιβατικών και εμπορευματικών μεταφορών μέσω της συμφόρησης (congestion), την αναπαράσταση των εξωτερικών κοστών και τον υπολογισμό του κοινωνικού οφέλους σε κάθε περίπτωση ισορροπίας των αγορών. Επιπλέον, λόγω της χρήσης εξισώσεων σε ανηγμένη μορφή δεν είναι απαραίτητη η ύπαρξη μεγάλου όγκου δεδομένων για τη χρήση του μοντέλου.

2.5.3.2 EUCARS

Το μοντέλο EUCARS 3 (Denis και Koorman, 1998) αναπτύχθηκε κατά τη διάρκεια του προγράμματος Auto-Oil 1 Programme που αφορούσε μελέτες για τον περιορισμό των εκπομπών αερίων διοξειδίου του άνθρακα των επιβατικών μεταφορών. Το μοντέλο EUCARS 3 είναι ένα μοντέλο μερικής ισορροπίας που εξετάζει αποκλειστικά τις επιβατικές μεταφορές μέσω ιδιωτικών και δημοσίων μέσων μεταφοράς ανά πενταετία από το 1995 έως το 2015 για 12 κράτη μέλη της Ευρωπαϊκής

Ένωσης. Η φιλοσοφία του μοντέλου είναι παρεμφερής με του μοντέλου TRENEN αλλά περιέχει μεγαλύτερο βαθμό πληροφορίας

Το μοντέλο προσομοιώνει τις επιβατικές μεταφορές σαν ένα σύστημα αγορών όπου ο υπολογισμός της ζήτησης βασίζεται στις αρχές της οικονομικής θεωρίας. Συγκεκριμένα, ο αντιπροσωπευτικός καταναλωτής μεγιστοποιεί τη χρησιμότητά του υπό περιορισμό εισοδήματος και επιλέγει τη χρήση ιδιωτικού μέσου ή μέσου μαζικής μεταφοράς. Η συνάρτηση είναι της μορφής σταθερής ελαστικότητας υποκατάστασης. Ο τομέας των ιδιωτικών μεταφορών είναι αρκετά λεπτομερής και γίνεται διακριτοποίηση των αυτοκινήτων με βάση το μέγεθός τους. Επίσης, χρησιμοποιούνται συναρτήσεις που συνδέουν την πιθανότητα της απόσυρσης του αυτοκινήτου με βάση την ηλικία του. Το μοντέλο δέχεται εξωγενείς υποθέσεις για το ΑΕΠ, τις τιμές καυσίμων και την επέκταση των υποδομών. Το μοντέλο περιέχει κάποια γεωγραφική διακριτοποίηση και περιλαμβάνει καμπύλες συμφόρησης ανά περιοχή που λαμβάνουν υπόψη τις υποθέσεις για επέκταση του οδικού δικτύου. Η ισορροπία μεταξύ προσφοράς και ζήτησης εξασφαλίζεται μέσω των γενικευμένων τιμών της μεταφοράς που περιλαμβάνουν και το κόστος του χρόνου.

2.5.3.3 TREMOVE

Το μοντέλο TREMOVE εξετάζει κυρίως τις επιπτώσεις διάφορων πολιτικών, που εφαρμόζονται στον τομέα των μεταφορών, σε επίπεδο εκπομπών του τομέα των μεταφορών. Επιπλέον, το μοντέλο εκτιμά τη ζήτηση για μεταφορές, αλλαγή στη χρήση μέσων μεταφοράς (modal shifts), το στόλο των οχημάτων καθώς και τις μεταβολές του κοινωνικού πλεονάσματος σαν αποτέλεσμα πολιτικών επιπλέον τιμολόγησης για του χρήστες του οδικού δικτύου, εφαρμογής κανονισμών για εκπομπές ρύπων από τα οχήματα κ.α. Η τελευταία έκδοση του μοντέλου καλύπτει τόσο τις επιβατικές και τις εμπορευματικές μεταφορές για 31 χώρες της Ευρώπης για την περίοδο 1995-2030. Η πρώτη έκδοση του μοντέλου αναπτύχθηκε το 1997-1998.

Ο σκοπός του μοντέλου είναι η αξιολόγηση πολιτικών σχετικών με το περιβάλλον για τις χώρες της Ευρώπης και όλα τα μέσα μεταφορών. Όσον αφορά τα μέσα μεταφοράς, το μοντέλο έχει επαρκή λεπτομέρεια για να προσομοιώσει επιπτώσεις πολιτικών σε συγκεκριμένα μέσα. Το μοντέλο μπορεί να προσομοιώσει μεταβολές στον όγκο των επιβατικών και εμπορευματικών μεταφορών, στην επιλογή μέσου μεταφοράς και τύπου οχήματος για μετακίνηση (με βάση το μέγεθος και την τεχνολογία) σε σχέση με ένα σενάριο βάσης. Το μοντέλο καλύπτει τις επίγειες και τις θαλάσσιες μεταφορές.

Το μοντέλο TREMOVE αποτελείται από τρία διασυνδεδεμένα υπομοντέλα:

- το υπομοντέλο υπολογισμού της ζήτησης
- το υπομοντέλο υπολογισμού του κεφαλαιουχικού εξοπλισμού (στόλος οχημάτων)
- το υπομοντέλο υπολογισμού κατανάλωσης ενέργειας και εκπομπών ρυπαντών

Πιο συγκεκριμένα, το υπομοντέλο υπολογισμού της ζήτησης βασίζεται στη φιλοσοφία του μοντέλου TRENEN που παρουσιάσαμε προηγουμένως και αναπαριστά το πρόβλημα των μεταφορών σαν ένα σύνολο προβλημάτων εύρεσης του σημείου ισορροπίας αγορών. Το μοντέλο συμπεριλαμβάνει 388 διαφορετικές τέτοιες αγορές που αντανακλούν τη διαδικασία απόφασης τόσο ενός αντιπροσωπευτικού καταναλωτή όσο και μιας αντιπροσωπευτικής εταιρείας. Η απόφαση περιλαμβάνει την επιλογή μέσου μεταφοράς, περιοχής μετακίνησης (αστική, υπεραστική) και χρονική (ώρα αιχμής ή όχι) και καθορίζεται από την τιμή ισορροπίας που αντανακλά το γενικευμένο κόστος (σταθερά και μεταβλητά κόστη καθώς και το κόστος του χρόνου). Η ισορροπία των εκάστοτε αγορών δεν υπολογίζεται μονοδιάστατα, αφού οι γενικευμένες τιμές περιέχουν και το κόστος του χρόνου που επηρεάζεται από τη συμφόρηση που προκαλείται από την αλληλεπίδραση των μέσων μεταφοράς, αλλά απαιτείται η χρήση μοντέλου για την επίλυση των παράλληλων αυτών προβλημάτων βελτιστοποίησης. Το πρόβλημα που αναπαριστά είναι αυτό της βελτιστοποίησης της συνάρτησης χρησιμότητας υπό περιορισμό εισοδήματος.

Το υπομοντέλο υπολογισμού του κεφαλαιουχικού εξοπλισμού καθορίζει πώς οι μεταβολές στη ζήτηση για μεταφορές επηρεάζουν τη δομή του στόλου των οχημάτων με βάση την ηλικία και τον τύπο τεχνολογίας αυτού. Η αναπαράσταση των διαφόρων τύπων οχημάτων είναι αρκετά πιο πλούσια σε σχέση με την απλή αναπαράσταση που ακολουθήθηκε στο μοντέλο TRENEN. Στο παρόν υπομοντέλο είναι δυνατό να συμπεριληφθούν πολιτικές σχετικές με επιπλέον τιμολόγηση της χρήσης του οδικού δικτύου, πρότυπα περιορισμού εκπομπών ρύπων, μεταβολές στον ειδικό φόρο των καυσίμων, επιδοτήσεις για την αγορά εναλλακτικών οχημάτων (π.χ. φυσικού αερίου ή ηλεκτρικά). Το υπομοντέλο υπολογισμού ζήτησης ενέργειας υπολογίζει τις ανάγκες για καύσιμα του στόλου των οχημάτων σε συνάρτηση της ηλικίας του στόλου, των τύπων οχημάτων και των συνθηκών οδήγησης χρησιμοποιώντας τη μεθοδολογία COPERT.

Το μοντέλο TREMOVE για τη δημιουργία ενός σεναρίου αναφοράς χρησιμοποιεί σαν εισαγωγικά δεδομένα προβλέψεις για τη δραστηριότητα των επιβατικών και εμπορευματικών μεταφορών (σε επιβατο-χιλιόμετρα και τονο-χιλιόμετρα αντίστοιχα) από το μοντέλο μεταφορών SCENES (που περιγράψαμε παραπάνω). Το μοντέλο TREMOVE προσαρμόζεται ώστε να προσομοιώνει τις προβλέψεις του μοντέλου SCENES, ενώ για τα χρόνια που έχουν παρατηρηθεί στοιχεία όπως ο όγκος των μεταφορών, το μοντέλο TREMOVE τις αναπαριστά προσαρμόζοντας άλλα στοιχεία με βάση αυτές (calibration).

2.5.4 Bottom-Up μοντέλα με αναπαράσταση του τομέα των μεταφορών

2.5.4.1 MARKAL

Το μοντέλο TIMES (Integrated MARKAL-EFOM System) είναι ένα δυναμικό bottom-up μοντέλο ενεργειακής οικονομίας που εξετάζει τον κλάδο της ενέργειας για διάφορες περιοχές του κόσμου (Loulou et al., 2005). Το μοντέλο αποτελεί συνέχεια του μοντέλου MARKAL με κάποιες επιπλέον προεκτάσεις. Η αρχική έκδοση του μοντέλου

MARKAL πραγματοποιούσε βελτιστοποίηση που αποσκοπούσε στην ελαχιστοποίηση του κόστους ενώ η ζήτηση παρέμενε σταθερή. Το μοντέλο TIMES πραγματοποιεί μεγιστοποίηση του διαχρονικού κοινωνικού πλεονάσματος ενώ η ζήτηση είναι ελαστικά διασυνδεδεμένη με την τιμή προσφοράς. Το κύριο χαρακτηριστικό του μοντέλου είναι η λεπτομερής αναπαράσταση των τεχνολογιών με τεχνοοικονομικά δεδομένα.

Η δραστηριότητα των επιβατικών και εμπορευματικών μεταφορών στο σενάριο βάσης είναι εξωγενής με βάση μακροοικονομικά στοιχεία. Όταν το μοντέλο εκτελεί ένα σενάριο, η δραστηριότητα υπολογίζεται εκ νέου με βάση τις τιμές που προέρχονται από το κομμάτι της προσφοράς. Η ζητούμενη δραστηριότητα καλύπτεται από ένα συνδυασμό τεχνολογιών και τύπων οχημάτων.

2.5.5 Οικονομετρικά μοντέλα

2.5.5.1 Μοντέλο μεταφορών του IEA

Το μοντέλο των μεταφορών που έχει αναπτύξει το International Environmental Agency (IEA) είναι ένα οικονομετρικό μοντέλο που προβλέπει την ανάπτυξη της δραστηριότητας των επιβατικών και εμπορευματικών μεταφορών μέχρι το 2050 για τις χώρες του ΟΟΣΑ και άλλες χώρες εκτός ΟΟΣΑ (Wohlgemuth, 1997, Birol, 1993).

Οι προβλέψεις του μοντέλου ακολουθούν μια μεθοδολογία δύο βημάτων. Αρχικά, πραγματοποιούνται προβλέψεις για τη δραστηριότητα του τομέα των μεταφορών (σε οχηματο-χιλιόμετρα) για κάθε μεταφορικό μέσο εφαρμόζοντας οικονομετρικές σχέσεις με βάση κάποιες ελαστικότητες ως προς συγκεκριμένους καθοριστικούς παράγοντες. Οι παράγοντες που σχετίζονται με την ανάπτυξη δραστηριότητας των μεταφορών διακρίνονται σε οικονομικούς, δημογραφικούς και γεωγραφικούς. Οι οικονομικοί παράγοντες αφορούν το εισόδημα των νοικοκυριών, το ακαθάριστο εγχώριο προϊόν και το κόστος ταξιδιού που ανταναικλάται κυρίως μέσω των τιμών των καυσίμων. Οι δημογραφικοί παράγοντες περιλαμβάνουν τις διασυνδέσεις του μεγέθους και της διάρθρωσης των νοικοκυριών και την κατανομή της ηλικίας του πληθυσμού. Οι γεωγραφικοί παράγοντες σχετίζονται με τη γεωγραφική κατανομή του πληθυσμού, την πυκνότητα αυτού και τις αποστάσεις μεταξύ των προορισμών. Οι αλληλεπιδράσεις των παραπάνω παραγόντων επίσης επηρεάζουν τις προβλέψεις. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι ότι ενώ οι μεταφορές εμπορευμάτων τείνουν να αυξάνονται με την αύξηση του ΑΕΠ, εν τούτοις χώρες με ορεινές περιοχές δεν ευνοούν την ανάπτυξη σιδηροδρομικού δικτύου (Bennathan, 1992).

Στη συνέχεια, με βάση τις προβλέψεις για τη δραστηριότητα κάθε μέσου υπολογίζεται η ζήτηση για ενέργεια με βάση την ειδική κατανάλωση του κάθε μέσου (ενδεικτικά, θεωρείται ως το πηλίκο της ενέργειας που απαιτείται για την πραγματοποίηση μιας μονάδας δραστηριότητας). Πιο ειδικά, η τελική ζήτηση για ενέργεια για τα επιβατικά αυτοκίνητα εξαρτάται και από το βαθμό ανανέωσης των οχημάτων (stock turnover). Η μέθοδος αυτή έχει το πλεονέκτημα ότι μπορεί να

εισαχθούν εξωγενώς στο μοντέλο υποθέσεις σχετικές με τη βελτίωση της απόδοσης των οχημάτων και κατ' επέκταση μείωσης της ειδικής τους κατανάλωσης. Παρά το γεγονός ότι το μοντέλο της IEA δεν είναι τόσο αναλυτικό όσο άλλα μοντέλα μεταφορών, εν τούτοις η προσέγγιση που έχει ακολουθηθεί δημιουργεί προβλήματα εύρεσης δεδομένων καλής ποιότητας για πολλές χώρες.

2.5.5.2 POLES

Το μοντέλο POLES (JRC IPTS, 2010) είναι ένα οικονομετρικό μοντέλο μερικής ισορροπίας με μακροπρόθεσμο ορίζοντα (2050) που καλύπτει 47 περιοχές του κόσμου. Η πρόβλεψη της δραστηριότητας των επιβατικών και εμπορευματικών μεταφορών εξαρτάται από τις εξωγενείς υποθέσεις για το ΑΕΠ και τον πληθυσμό. Στη συνέχεια υπολογίζεται η τελική ζήτηση για ενέργεια με βάση την παραπάνω δραστηριότητα και λαμβάνοντας υπόψη τάσεις της τεχνολογίας καθώς και τις ελαστικότητες τιμής των καυσίμων. Οι τιμές των καυσίμων υπολογίζονται ενδογενώς μέσω επαναληπτικών μεθόδων της αλληλεπίδρασης της ζήτησης και του υπομοντέλου προσφοράς ενέργειας. Το μοντέλο περιέχει διάφορες τεχνολογίες οχημάτων για τις ιδιωτικές μεταφορές (π.χ. συμβατικές, υβριδικές, ηλεκτρικές, κυψελών υδρογόνου). Τα ποσοστά διείσδυσης κάθε τεχνολογίας εξαρτώνται από τα σχετικά τους κόστη καθώς και από παράγοντες ωριμότητας (maturity factors) που εφαρμόζονται στις νέες τεχνολογίες και επιβραδύνουν ή επιταχύνουν τη διείσυσή τους. Οι εμπορευματικές μεταφορές είναι συνδεδεμένες με το ΑΕΠ λαμβάνοντας υπόψη τάσεις κορεσμού συγκεκριμένες ανά περιοχή (saturation effects).

Κεφάλαιο 3

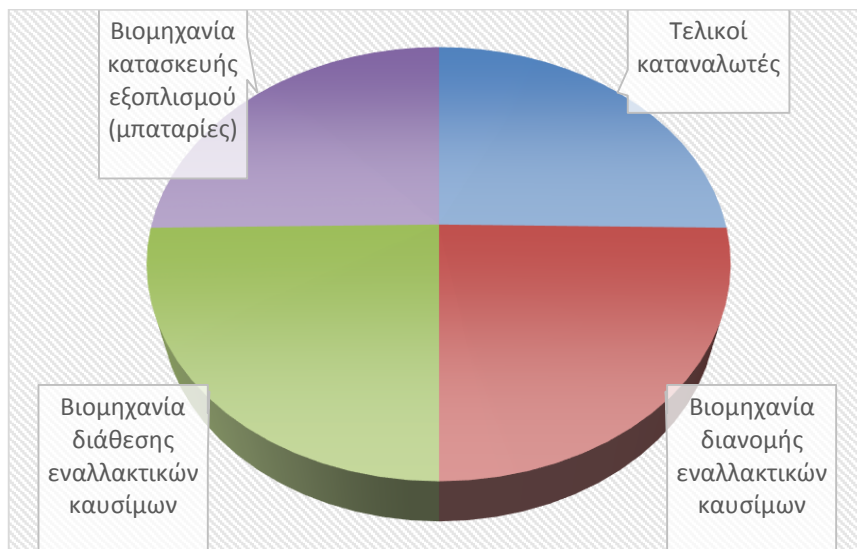
3 Προοπτικές της αγοράς εναλλακτικών καυσίμων στα πλαίσια ενός αειφόρου συστήματος μεταφορών

3.1 Εισαγωγή

Ο τομέας των μεταφορών είναι υπεύθυνος για το 27% των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (GHG) που οφείλονται σε ενεργειακές χρήσεις. Πιο συγκεκριμένα, οι οδικές μεταφορές επιβατών ευθύνονται για περισσότερο από το ήμισυ των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου των συνολικών εκπομπών που προέρχονται από τις μεταφορές (Hill et al., 2012). Για το λόγο αυτό, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή (EC) έχει λάβει μέτρα που αποσκοπούν στη μείωση των εκπομπών CO₂ στον κλάδο των μεταφορών (EC, 2011). Η εφαρμογή κανονισμών και ρυθμίσεων, όπως η υποχρέωση των κρατών μελών να προσαρμόσουν το ενεργειακό μείγμα στις μεταφορές έτσι ώστε το 10% της ενέργειας να προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας το 2020, είναι πιθανό να οδηγήσει σε αύξηση της χρήσης των βιοκαυσίμων και της ηλεκτρικής ενέργειας (Daly και Gallachóir, 2010). Είναι εξάλλου ευρέως αποδεκτό ότι η μαζική διείσδυση των εναλλακτικών καυσίμων αποτελεί προϋπόθεση για τη δραστική μείωση των εκπομπών CO₂ στον τομέα των μεταφορών, σύμφωνα με σχετικές μελέτες ενεργειακής πολιτικής (Capros et al., 2012; Skinner et al., 2010; Anandarajah et al., 2013; Pasaoglu et al., 2012). Συγκεκριμένα, η ηλεκτρική ενέργεια, τα βιοκαύσιμα και το υδρογόνο θεωρούνται ως τα βασικά εναλλακτικά καύσιμα για τη στροφή προς ένα αειφόρο σύστημα μεταφορών με χαμηλές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου.

Ο τομέας των μεταφορών χαρακτηρίζεται από πολύπλοκες διαδικασίες λήψης αποφάσεων με τη συμμετοχή διαφορετικών φορέων/ αποφασιζόντων με συγκεκριμένο ρόλο ο καθένας στη λήψη αποφάσεων (Macharis et al., 2010). Εξάλλου, οι Pohekar και Ramachandran (2004) και οι Turcksin et al. (2011) τονίζουν τη σημασία της αναγνώρισης του ρόλου των επιμέρους εμπλεκόμενων φορέων. Το κεφάλαιο αυτό δίνει έμφαση στους διαφορετικούς φορείς λήψης αποφάσεων οι οποίοι παίζουν

κρίσιμο ρόλο στη διείσδυση των εναλλακτικών καυσίμων στην αγορά. Πράγματι, οι φορείς αυτοί αποτελούνται από τη βιομηχανία υποδομής διάθεσης και διανομής εναλλακτικών μορφών ενέργειας, τη βιομηχανία κατασκευής εξοπλισμού μεταφορών, τους καταναλωτές και κρατικούς φορείς (Ο συντονισμός των διαφορετικών, αλλά συναρμόδιων φορέων αποτελεί βασικό κριτήριο για μια επιτυχή υιοθέτηση εναλλακτικών καυσίμων στον τομέα των μεταφορών).



Σχήμα 3-1: Εμπλεκόμενοι φορείς στη διείσδυση των εναλλακτικών καυσίμων στις μεταφορές

Τα εμπόδια στην αγορά των νέων τεχνολογιών και καυσίμων διακρίνονται σε οικονομικά, τεχνολογικά και θεσμικά, σύμφωνα με τους Reddy και Painuly (2004), Tseng et al. (2005). Το κύριο εμπόδιο για την επένδυση στην ανάπτυξη των υποδομών για εναλλακτικά καύσιμα αποτελεί το υψηλό κόστος. Σύμφωνα με την ομάδα εμπειρογνομόνων της Ευρώπης για τα μελλοντικά καύσιμα των μεταφορών (European Expert Group on Future Transport Fuels, 2011), το κόστος του κεφαλαίου για την κατασκευή ενός σταθμού ανεφοδιασμού υδρογόνου εκτιμάται από 0,6 έως 1,6 εκατομμύρια €, το οποίο είναι από 4 έως 10 φορές υψηλότερο από το αντίστοιχο για ένα σταθμό πώλησης βενζίνης. Στην περίπτωση της ηλεκτρικής ενέργειας και του υδρογόνου υπάρχει το επιπλέον εμπόδιο του υψηλού κόστους κεφαλαίου των ηλεκτρικών οχημάτων μπαταρίας (BEVs) και των οχημάτων με κυψέλη καυσίμου υδρογόνου (FCEVs) (Perdiguer, 2012, Karplus et al., 2010). Η ανάλυση των Steenberghen και Lopez (2008) παρουσιάζει την κατάσταση των διαφόρων εναλλακτικών καυσίμων στον τομέα των οδικών μεταφορών στην Ευρώπη. Ωστόσο η ανάλυση τους δεν περιλαμβάνει την ηλεκτρική ενέργεια. Σύμφωνα με τους Clark et al., (2005) και Ahman (2006), η υιοθέτηση κανονισμών και τεχνολογικών ορίων μπορεί να αποτελέσει τον κινητήριο μοχλό για την ανάπτυξη των εναλλακτικών καυσίμων.

Υπάρχει σχετικά μικρή πληροφόρηση στη βιβλιογραφία αναφορικά με τα κόστη επενδύσεων που σχετίζονται με τις υποδομές. Οι Schroeder και Traber (2012) παρουσιάζουν τα οικονομικά στοιχεία των σταθμών ταχείας φόρτισης για ηλεκτρικά αυτοκίνητα, ενώ οι Melaina (2003) και Weinert et al. (2007) εξετάζουν τις περιπτώσεις των σταθμών υδρογόνου. Το παρόν κεφάλαιο παρέχει αξιολόγηση του μέσου εκτιμώμενου κόστους για τις επενδυτικές δαπάνες των βιοκαυσίμων, της ηλεκτρικής ενέργειας και του υδρογόνου. Οι βασικές υποθέσεις αφορούν στο ύψος της επένδυσης, το ποσοστό χρησιμοποίησης της υποδομής και το προεξοφλητικό επιτόκιο της επένδυσης. Σύμφωνα με τους Gross et al. (2010) η χρήση του μέσου εκτιμώμενου κόστους αποτελεί ένα ευέλικτο εργαλείο που αναδεικνύει τη βιωσιμότητα της επένδυσης και εξετάζει εάν υπάρχει ανάγκη για χρηματοδοτική υποστήριξη από κρατικούς μηχανισμούς.

Στη συνέχεια του κεφαλαίου, η παράγραφος 3.2 προσδιορίζει τους φορείς λήψης αποφάσεων που σχετίζονται με την αγορά εναλλακτικών καυσίμων και περιλαμβάνουν τις επιχειρήσεις, τους ιδιώτες και το κράτος. Η παράγραφος 3.3 επικεντρώνεται στις ανάγκες ανάπτυξης υποδομών για παροχή εναλλακτικών καυσίμων στους καταναλωτές, ενώ παρέχει και συνοπτική παρουσίαση των επενδυτικών δαπανών για την κατασκευή υποδομών για αντλίες παροχής βιοκαυσίμων, ενός σταθμού ανεφοδιασμού υδρογόνου και ενός σημείου ταχείας φόρτισης ηλεκτρικής ενέργειας. Τέλος, η παράγραφος 3.4 παρουσιάζει το ρόλο του κράτους στον συντονισμό των εμπλεκόμενων φορέων και τις μορφές κρατικής παρέμβασης για έναν επιτυχή συντονισμό.

3.2 Ανάπτυξη υποδομών εναλλακτικών καυσίμων

3.2.1 Εμπλεκόμενοι φορείς στη διείσδυση εναλλακτικών καυσίμων

Η ανάπτυξη των υποδομών για εναλλακτικά καθαρά καύσιμα είναι βασικής σημασίας όσον αφορά την είσοδο των τελευταίων στο ενεργειακό μείγμα του τομέα των μεταφορών. Η μαζική ανάπτυξη των υποδομών και η υψηλή διείσδυση των εναλλακτικών καυσίμων αποτελεί, κατά τον Struben (2006), το πρόβλημα της «κότας-αυγού» (chicken-egg). Η επιτυχής ανάπτυξη των υποδομών για βιοκαύσιμα, ηλεκτρική ενέργεια και υδρογόνο είναι πολύπλοκη διαδικασία καθώς αυτή εξαρτάται από έναν αριθμό διακριτών αλλά διασυνδεδεμένων αγορών, όπου εμπλέκονται διαφορετικοί φορείς και αποφασίζοντες.

Απαραίτητο στοιχείο για την επιτυχή ανάπτυξη αυτών των υποδομών αποτελεί ο συντονισμός των διακριτών αγορών, που είναι οι εξής:

- *Βιομηχανία υποδομών καυσίμου*: Η συγκεκριμένη βιομηχανία είναι αναγκαίο να επενδύσει σημαντικό κεφάλαιο (που εξαρτάται από το είδος της υποδομής και του καυσίμου) για την κατασκευή σταθμών ανεφοδιασμού καθώς και σημείων

φόρτισης για ηλεκτροκίνητα οχήματα. Η συγκεκριμένη βιομηχανία συμπεριλαμβάνει και υποδομές διανομής ενέργειας. Η τελευταία αφορά κυρίως την περίπτωση του υδρογόνου και των βιοκαυσίμων, για τα οποία θα πρέπει να εξασφαλιστεί η μεταφοράς από το σημείο παραγωγής στο σημείο κατανάλωσης (σταθμός ανεφοδιασμού). Προφανώς, η βιομηχανία υποδομών καυσίμου θα πρέπει να έχει στηθεί πριν ή τουλάχιστον συγχρόνως με την ανάπτυξη της ζήτησης για τέτοιου είδους καύσιμα.

- *Βιομηχανία κατασκευής οχημάτων:* Η συγκεκριμένη βιομηχανία πρέπει να πετύχει σημαντικές βελτιώσεις στα τεχνοοικονομικά χαρακτηριστικά των οχημάτων που μπορούν να κινηθούν με εναλλακτικά καύσιμα. Τέτοιου είδους βελτιώσεις αποσκοπούν στο να εισαχθούν στην αγορά εναλλακτικά οχήματα σε προσιτή τιμή. Πιο συγκεκριμένα, η βιομηχανία αφορά στην κατασκευή ηλεκτρικών οχημάτων και οχημάτων με κυψέλη υδρογόνου, τα οποία αυτή τη στιγμή δεν είναι προσιτά στους καταναλωτές. Η βιομηχανία κατασκευής οχημάτων θα πρέπει να επενδύσει μαζικά σε νέες γραμμές παραγωγής και σε R&D για να επιτύχει μείωση του κόστους των μπαταριών και των κυψελών υδρογόνου. Γι' αυτό το λόγο, θα πρέπει να υπάρχουν προοπτικές και βλέψεις για μαζική ανταπόκριση των καταναλωτών στις νέες αυτές τεχνολογίες οχημάτων (Cowan and Hulten, 1996, Sovacool and Hirsh, 2009).
- *Μεμονωμένοι καταναλωτές:* Οι καταναλωτές είναι αυτοί που αποφασίζουν τελικά τι είδους τεχνολογία οχήματος θα επιλέξουν και κυρίως αν θα υποκαταστήσουν τη χρήση συμβατικών καυσίμων με εναλλακτικά βιώσιμα καύσιμα. Οι καταναλωτές πρέπει να είναι ενήμεροι για τα νέα καύσιμα και τις θετικές επιπτώσεις που θα επιφέρουν. Επιπλέον, θα πρέπει να υπάρχει η διαβεβαίωση για την ύπαρξη της αναγκαίας υποδομής που θα επιτρέψει στους καταναλωτές να χρησιμοποιήσουν ελεύθερα τα οχήματα τους, που θα κινούνται με τα νέα καύσιμα, χωρίς περιορισμούς. Η αβεβαιότητα που διέπει τη μελλοντική αγορά των βιώσιμων καυσίμων καθώς και η δυσκολία των καταναλωτών στην αλλαγή τύπου τεχνολογίας μπορεί περιορίσει τη διείσδυση των εναλλακτικών οχημάτων.

Η πρόβλεψη και οι θετικές προσδοκίες για την επίτευξη του στόχου της μαζικής εισόδου των βιώσιμων καυσίμων στην αγορά αποτελούν τις προαπαιτούμενες συνθήκες για το συντονισμό των προαναφερθέντων αγορών. Ο ρόλος του κράτους και της Ευρωπαϊκής Επιτροπής (για το επίπεδο της Ευρώπης) είναι βασικός για τη διασφάλιση του απαραίτητου εναρμονισμού των παραπάνω διασυνδεδεμένων αγορών. Ο Πίνακας 3-1 παρουσιάζει τους κύριους άξονες συντονισμού που θα πρέπει να διασφαλιστούν από το κράτος, την Ε.Ε. ή άλλους φορείς πολιτικής.

Πίνακας 3-1: Εμπλεκόμενοι φορείς και βασικοί άξονες συντονισμού στις προοπτικές αγορές των εναλλακτικών καυσίμων

Αποφασίζοντες	Άξονες συντονισμού
Βιομηχανία διάθεσης και διανομής καυσίμου	<ul style="list-style-type: none"> • Υψηλός επενδυτικός κίνδυνος λόγω του ύψους της επένδυσης και της μη αναστρεψιμότητας της επένδυσης. • Υψηλός βαθμός εξάρτησης από τις εξελίξεις της βιομηχανίας ανάπτυξης εξοπλισμού και τις προσδοκίες για τη μελλοντική αγορά.
Βιομηχανία ανάπτυξης εξοπλισμού	<ul style="list-style-type: none"> • Η αυτοκινητοβιομηχανία και η βιομηχανία μπαταριών θα χρειαστεί να πραγματοποιήσει μαζικές επενδύσεις σε νέες γραμμές παραγωγής, αν εξαναγκαστεί από καθεστώς πολιτικής ρύθμισης ή προσδοκά υψηλή ζήτηση. • Τα προϊόντα θα σέβονται τους περιβαλλοντολογικούς περιορισμούς και τα τεχνολογικά όρια (π.χ. όρια στις ειδικές εκπομπές CO₂ των νέων πωλήσεων).
Καταναλωτές	<ul style="list-style-type: none"> • Η αβεβαιότητα που διέπει τις αποφάσεις των καταναλωτών σχετικά με την υιοθέτηση νέων τεχνολογιών συχνά οδηγεί σε μη λογικές αποφάσεις (π.χ. δυσχέρεια στη στροφή προς εναλλακτικές προηγμένες τεχνολογικές επιλογές) • Η δυσκολία πρόσβασης σε κεφάλαιο συνιστά επιβαρυντικό παράγοντα για τεχνολογικές επιλογές υψηλής εντάσεως κεφαλαίου.
Κράτος - Φορείς πολιτικής	<ul style="list-style-type: none"> • Οι παρεμβάσεις υπό τη μορφή πολιτικών μέτρων, ρυθμίσεων και κινήτρων στοχεύουν στη διόρθωση ανωμαλιών των αγορών, το συντονισμό των εμπλεκόμενων φορέων και τη μείωση του κοινωνικού κόστους.

3.2.1.1 Αβεβαιότητα των τελικών καταναλωτών

Οι καταναλωτές κατά τη διαδικασία λήψης απόφασης για την αγορά νέου αυτοκινήτου λαμβάνουν υπόψη όχι μόνο τις πραγματικές δαπάνες που σχετίζονται με την αγορά και τη χρήση του νέου οχήματος (π.χ. τιμή αγοράς, το εκτιμώμενο κόστος των καυσίμων, φορολογία) αλλά και άλλους παράγοντες (Turrentine και Kurani, 2007, Byrne και Polonsky, 2001). Η μεγάλη πλειοψηφία των καταναλωτών παρουσιάζει συνήθως συμπεριφορά αποφυγής κινδύνου (risk aversion) όσον αφορά στην

υιοθέτηση νέων τεχνολογιών, όταν αυτές βρίσκονται στα πρώιμα στάδια ένταξής τους στην αγορά. Υπάρχει, ωστόσο, ένα συγκεκριμένο ποσοστό καταναλωτών, οι «early adopters» που χαιρετίζουν τις νέες καθαρές και φιλικές προς το περιβάλλον τεχνολογίες (Gjoen και Hard, 2002). Σύμφωνα με τον Brown (1992), η αποδοχή ενός καινοτόμου προϊόντος από τους καταναλωτές εξαρτάται από τη μαθησιακή τους διαδικασία και την εξοικείωση τους με αυτό. Η περαιτέρω διείσδυση ενός καινοτόμου προϊόντος στην αγορά είναι πιο εύκολη όταν έχει ήδη υιοθετηθεί από μια κρίσιμη μάζα καταναλωτών (Baueret et al, 2005, Moreau et al, 2001). Τέλος, η εφαρμογή «ήπιων» πολιτικών μπορεί να επιφέρει την αλλαγή της συμπεριφοράς των καταναλωτών και την αλλαγή της προτίμησης τους προς πιο βιώσιμες λύσεις στις μεταφορές (Santos et al., 2010).

Εκτός από τον σκεπτικισμό των καταναλωτών, όσον αφορά την αποδοχή των νέων τεχνολογιών οχημάτων και το κόστος, μια σειρά από ανασταλτικοί παράγοντες μπορεί να αποτρέψουν την είσοδο στην αγορά των εναλλακτικών τεχνολογιών οχημάτων. Αυτοί οι παράγοντες συνδέονται με το εύρος αυτονομίας που προσφέρει η κάθε τεχνολογία (Chan, 2007, Tate et al, 2008) καθώς και την ικανή κάλυψη με σημεία ανεφοδιασμού και φόρτισης για τη χρήση του οχήματος (Lin και Greene, 2012, Meyer και Winebrake, 2009, Mercuri et al, 2002, Joffe et al, 2004). Ο όρος «άγχος αυτονομίας» (range anxiety) είναι συνυφασμένος με τους χρήστες των ηλεκτρικών οχημάτων, ο οποίος, σύμφωνα με τους Tate et al. (2008), δηλώνει την ανησυχία του οδηγού για την εύρεση σημείου φόρτισης για το ηλεκτρικό αυτοκίνητο πριν την αποφόρτιση της μπαταρίας. Η παραπάνω ανησυχία οφείλεται στο γεγονός ότι τα ηλεκτρικά οχήματα έχουν μικρό εύρος αυτονομίας, της τάξης των 150-200 χιλιομέτρων μεταξύ δύο διαδοχικών φορτίσεων. Το συγκεκριμένο εύρος είναι δυνατό να ικανοποιήσει την πλειοψηφία των καθημερινών αστικών μετακινήσεων με προορισμό το χώρο εργασίας. Σύμφωνα με τους Neubauer και Wood (2014) οι αρνητικές επιπτώσεις του εύρους αυτονομίας μπορεί να είναι σημαντικές, μειώνονται όμως με την παρουσία των διαθέσιμων σημείων φόρτισης.

3.3 Οι οικονομικές προοπτικές της βιομηχανίας υποδομών εναλλακτικών καυσίμων

3.3.1 Προτεινόμενα ρυθμιστικά καθεστώτα

Η παρούσα παράγραφος παρουσιάζει τις προοπτικές της βιομηχανίας υποδομών εναλλακτικών καυσίμων, όπως η ηλεκτρική ενέργεια, τα βιοκαύσιμα και το υδρογόνο και εστιάζει στα κυριότερα εμπόδια που απαγορεύουν τη μαζική διάδοση τους. Επίσης, παρουσιάζει συνοπτικά τα κατάλληλα ρυθμιστικά πλαίσια που έχουν σκοπό να επιτρέψουν την ανάπτυξη των υποδομών αυτών για κάθε εναλλακτικό καύσιμο.

3.3.1.1 Ηλεκτρική ενέργεια

Ο εξηλεκτρισμός των οδικών μεταφορών απαιτεί την ύπαρξη κατάλληλης και επαρκούς γεωγραφικά υποδομής σε σημεία φόρτισης. Ένα καλά ανεπτυγμένο δίκτυο σημείων φόρτισης πρέπει να καθιερωθεί έτσι ώστε να παρέχει τη δυνατότητα στους κατόχους ηλεκτρικών οχημάτων να φορτίζουν εύκολα το όχημα τους. Το μειονέκτημα των ηλεκτρικών οχημάτων με χαμηλή αυτονομία και παράλληλα το «άγχος αυτονομίας» που διακατέχει τους κατόχους τους, αναδεικνύει ως βασική προϋπόθεση την εγκατάσταση ενός πυκνού δικτύου, με ικανή γεωγραφική κάλυψη σε σημεία φόρτισης. Τα σημεία φόρτισης, ωστόσο, διαφέρουν μεταξύ τους τόσο στο χρόνο φόρτισης όσο και στο κόστος εγκατάστασής τους. Η διάκριση των σημείων φόρτισης γίνονται ως εξής (Morrow et al., 2008):

- Επίπεδο I: Αργή φόρτιση, οικιακής κυρίως χρήσης που παρέχει πλήρη φόρτιση σε περίπου 8 ώρες.
- Επίπεδο II: Ημι-ταχεία φόρτιση, προς εγκατάσταση σε χώρους στάθμευσης, χώρους πολυκαταστημάτων με παροχή πλήρους φόρτισης σε περίπου 3-4 ώρες.
- Επίπεδο III: Ταχεία φόρτιση με DC σύνδεση, με δυνατότητα πλήρους φόρτισης σε περίπου 20 λεπτά της ώρας.

Τα αργά σημεία φόρτισης Επιπέδου I έχουν σχεδιαστεί για να εξοπλίσουν τους οικιακούς χώρους των κατόχων ηλεκτρικών αυτοκινήτων και είναι σε θέση να προσφέρουν πλήρη φόρτιση κατά τη διάρκεια της νύχτας. Είναι ιδανικά για τους χρήστες που χρησιμοποιούν το ηλεκτρικό όχημα για την εργασία τους, καθώς η αυτονομία του αυτοκινήτου επαρκεί για την καθημερινή μετακίνησή τους. Τα σημεία φόρτισης Επιπέδου II μπορούν να φορτίσουν το όχημα σε περίπου 3-4 ώρες και είναι ιδανικά για μετάβαση σε χώρους στάθμευσης στην εργασία ή σε χώρους πολυκαταστημάτων. Ακόμα και αν ο χρήστης δεν παραμείνει για 3-4 ώρες στο χώρο, αλλά για μικρότερο χρονικό διάστημα, η φόρτιση του οχήματος θα έχει φτάσει σε ικανοποιητικό επίπεδο και θα του αυξήσει την αυτονομία του οχήματος. Τέλος, τα σημεία ταχείας φόρτισης μπορούν να πραγματοποιήσουν φόρτιση του οχήματος σε χρόνους σχεδόν συγκρίσιμους με τον ανεφοδιασμό σε σταθμό βενζίνης (Aggeler et al., 2010). Ωστόσο, τα σημεία φόρτισης Επιπέδου III απαιτούν μεγαλύτερο κεφάλαιο για να εγκατασταθούν.

Τα παραπάνω σημεία φόρτισης αντιπροσωπεύουν ξεχωριστές αγορές, με διαφορετικά χαρακτηριστικά μεταξύ τους και διαφορετικούς εμπλεκόμενους φορείς. Οι Roman et al. (2011) παρουσιάζουν με λεπτομέρεια τους εμπλεκόμενους φορείς στη βιομηχανία υποδομών σημείων φόρτισης, ενώ οι Kley et al. (2011) ορίζουν μια ολιστική προσέγγιση στην ανάπτυξη επιχειρησιακών προτύπων για τις μεταφορές με τη χρήση ηλεκτρικών οχημάτων. Ακόμα και στην αρχική φάση διείσδυσης ηλεκτρικών οχημάτων στην αγορά, το μέγεθος της επένδυσης που απαιτείται στις ιδιαίτερα κατοικημένες περιοχές είναι μεγάλο και σχεδόν αδιαίρετο. Συνεπώς, σε ένα ορισμένο βαθμό η επένδυση σε υποδομές φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων ενέχει στοιχεία αβεβαιότητας

και το ρίσκο της μη αναστρεψιμότητας της επένδυσης. Αυτά τα χαρακτηριστικά είναι ακόμα πιο εμφανή στην περίπτωση υψηλού βαθμού διείσδυσης των ηλεκτρικών οχημάτων στην αγορά, όπου υπάρχει η αναγκαιότητα να καλυφθούν με υποδομές φόρτισης και περιοχές που αναπόφευκτα θα είναι λιγότερο κατοικήσιμες και συνεπώς η απόδοση της επένδυσης δεν είναι εγγυημένη. Όσον αφορά στη διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας στα σημεία φόρτισης, δεν απαιτούνται υψηλές επενδύσεις, αφού η υποδομή είναι ήδη εκτεταμένη. Ωστόσο, η ενίσχυση του δικτύου είναι επιβεβλημένη όταν η ζήτηση για ηλεκτρική ενέργεια από τα ηλεκτρικά οχήματα αυξηθεί μαζικά (Clement et al., 2009).

3.3.1.2 Ρυθμιστικά καθεστώτα για υποδομές φόρτισης

Ο εξηλεκτρισμός του τομέα των μεταφορών σε μεγάλη κλίμακα θα απαιτήσει τη δημιουργία υποδομών σημείων φόρτισης, τόσο στα μεγάλα μητροπολιτικά κέντρα όσο και σε περιοχές λιγότερο κατοικήσιμες και κατ' επέκταση λιγότερο κερδοφόρες. Ωστόσο, η δημόσια παρέμβαση με τη μορφή υιοθέτησης ρυθμιστικών καθεστώτων είναι απαραίτητη για την ανάπτυξη των κατάλληλων υποδομών για τις περιοχές που αναφέρθηκαν παραπάνω.

Δίχως τη δημόσια παρέμβαση για την ανάπτυξη υποδομών, το πιθανότερο ενδεχόμενο είναι οι ιδιωτικές επιχειρήσεις να επενδύσουν σε υποδομές στα πιο προσοδοφόρα τμήματα των μητροπολιτικών περιοχών. Ο υψηλότερος βαθμός αβεβαιότητας που χαρακτηρίζει τις επενδύσεις σε λιγότερο κατοικημένες περιοχές είναι πιθανό να αποθαρρύνει τους επίδοξους επενδυτές. Το γεγονός αυτό μπορεί να επιφέρει εμπόδια και καθυστερήσεις στην ταχεία εισχώρηση των ηλεκτρικών αυτοκινήτων στην αγορά καθώς θα αποτελεί ανασταλτικό παράγοντα για τους αγοραστές. Επιπλέον, ένα καθεστώς απελευθερωμένης αγοράς ίσως να μην αποδειχθεί το πιο κατάλληλο, αφού θα πρέπει να επιτευχθεί εναρμονισμός και με άλλους εμπλεκόμενους φορείς όπως οι ιδιοκτήτες και οι διαχειριστές των δικτύων μεταφοράς. Επίσης, θα χρειαστούν δημόσιες παρεμβάσεις με τη μορφή εκχώρησης δικαιωμάτων χρήσης και παραχωρήσεων (concessions), έτσι ώστε να μειωθεί το ρίσκο της επένδυσης από τους επενδυτές. Για τις λιγότερο κατοικημένες περιοχές που παρουσιάζουν υψηλότερους κινδύνους, οι ρυθμιστικές προσεγγίσεις από τον δημόσιο τομέα πρέπει να είναι πιο σύνθετες προκειμένου να εξασφαλιστεί η έγκαιρη και επαρκής ανάπτυξη των υποδομών φόρτισης. Πιο συγκεκριμένα, η ρυθμιστική πολιτική θα πρέπει να εποπτεύσει ή και να επιβάλλει τα σχέδια επένδυσης και το βαθμό κάλυψης ή να ρυθμίσει την τιμολόγηση της χρήσης της υποδομής από τους καταναλωτές από την οποία θα ανακτήσουν οι επενδυτές το αρχικό τους κεφάλαιο και την απόδοσή τους.

Υπάρχουν παραδείγματα τέτοιου είδους ρυθμιστικών προσεγγίσεων σε άλλα παρόμοια προβλήματα υποδομών στο παρελθόν, όπως το φυσικό αέριο (Carrington et al., 2002) και οι τηλεπικοινωνίες (Valletti and Cave, 1998). Σε μερικά κράτη της Ευρώπης η χορήγηση άδειας ανάπτυξης δικτύων διανομής φυσικού αερίου τέθηκε σε διαγωνισμό. Η χορήγηση της άδειας συνοδεύθηκε από σχέδιο υποχρέωσης κάλυψης συγκεκριμένων γεωγραφικών περιοχών, ενώ επίσης τα επίπεδα τιμολόγησης

εποπτεύθηκαν ή και ρυθμίστηκαν. Ένα άλλο παράδειγμα είναι αυτό της κινητής τηλεφωνίας, όπου οι άδειες χορηγήθηκαν σε μερικά εμπλεκόμενα μέρη στα οποία επιτράπηκε να αποκτήσουν ορισμένο μερίδιο της αγοράς, τουλάχιστον στα πρώτα στάδια ανάπτυξης. Επιπλέον, δεν επιβλήθηκαν υποχρεώσεις επένδυσης αλλά οι προοπτικές αγοράς αποδείχθηκαν επαρκείς για τους ιδιωτικούς φορείς για να αναπτύξουν με ταχείς ρυθμούς την απαραίτητη υποδομή και να προσφέρουν σχεδόν καθολική γεωγραφική κάλυψη.

3.3.1.3 Βιοκαύσιμα

Τα βιοκαύσιμα μπορούν να πωληθούν στους καταναλωτές τόσο σε αναμειγμένη μορφή με τα συμβατικά καύσιμα, όπως το πετρέλαιο και η βενζίνη, όσο και σε καθαρή μορφή. Στην πρώτη περίπτωση, το βιοντίζελ και η αιθανόλη αναμειγνύονται σε συγκεκριμένες ποσότητες με πετρέλαιο και με βενζίνη αντίστοιχα. Για παράδειγμα, τα καύσιμα E10 και E85 αναπαριστούν καύσιμα, όπου το 10 και το 85 αντίστοιχα φανερώνουν την κατ' όγκο περιεκτικότητα σε αιθανόλη. Τα B7 και B20 αναπαριστούν καύσιμα που περιλαμβάνουν βιοντίζελ σε 7% και 20% περιεκτικότητα κατ' όγκο αντίστοιχα. Τα βιοκαύσιμα είναι δυνατό να παρέχονται σε καθαρή μορφή χωρίς ανάμειξη με πετρελαιοειδή με κύριο παράδειγμα το καύσιμο B100 (100% βιοντίζελ) (Agarwal, 2007).

Η επένδυση σε σταθμούς βιοκαυσίμων αποτελεί εκείνη την επένδυση που έχει το μικρότερο ρίσκο σε σχέση με την ηλεκτρική ενέργεια ή το υδρογόνο, καθώς απαιτεί το μικρότερο ποσό επένδυσης, τουλάχιστον σε επίπεδο σταθμών ανεφοδιασμού. Τα βιοκαύσιμα αναμένεται να πωλούνται σε ξεχωριστές αντλίες σε ήδη υπάρχοντες σταθμούς πώλησης βενζίνης και ντίζελ, που έχει ως συνέπεια ότι το κεφαλαιουχικό κόστος της επένδυσης περιλαμβάνει μόνο τις αντλίες και το χώρο αποθήκευσης του καυσίμου. Βεβαίως, απαιτείται περαιτέρω επένδυση για τη δημιουργία εγκαταστάσεων για την ανάμειξη των βιοκαυσίμων με τα συμβατικά καύσιμα και τη μεταφορά τους στους σταθμούς ανεφοδιασμού (Eksioğlu et al., 2009). Ωστόσο, τα καύσιμα με υψηλό ποσοστό ανάμειξης σε βιοκαύσιμα έχουν το μειονέκτημα ότι δεν είναι απόλυτα συμβατά με όλους τους τύπους οχημάτων λόγω τεχνικών ασυμβατοτήτων (Turcksin et al., 2011, Velde et al., 2009), γεγονός που απαιτεί τεχνικές παρεμβάσεις στα οχήματα από τις κατασκευάστριες εταιρείες. Η περίπτωση αυτή αφορά κυρίως τα οχήματα που καταναλίσκουν βενζίνη, όπου για την καύση του καυσίμου E85 απαιτούνται ειδικά οχήματα (flex fuel vehicles). Συνεπώς, ο συντονισμός μεταξύ της βιομηχανίας κατασκευής υποδομών βιοκαυσίμων, των κατασκευαστριών εταιρειών οχημάτων και των καταναλωτών είναι σημαντικός για να εξασφαλίσει θετικές προοπτικές εισόδου των βιοκαυσίμων στην αγορά της Ευρώπης. Παρακάτω, παρουσιάζονται δύο υπάρχουσες χαρακτηριστικές περιπτώσεις, ενός επιτυχημένου και ενός αποτυχημένου συντονισμού της αγοράς που αφορούν την επιτυχημένη είσοδο των βιοκαυσίμων στις αγορές της Σουηδίας και της Γερμανίας.

Στη Γερμανία κατατέθηκε ένας νόμος το 2011 που έθετε ρυθμιστικά μέτρα για την προώθηση της διείσδυσης του καυσίμου E10. Ο συγκεκριμένος νόμος εξανάγκαζε

τη βιομηχανία καυσίμων να παρέχει στους καταναλωτές συγκεκριμένες ποσότητες του καυσίμου E10. Η αδυναμία της βιομηχανίας καυσίμων να υπακούσει στο νόμο αυτό θα επέφερε οικονομικές κυρώσεις. Αρχικά, η βιομηχανία αποκρίθηκε θετικά στο νέο νόμο και ένας σημαντικός αριθμός σταθμών ανεφοδιασμού εξοπλίστηκε με επιπλέον αντλίες που πουλούσαν το νέο καύσιμο. Επιπλέον, ορισμένοι κατασκευαστές εξέδωσαν λίστα με τα μοντέλα αυτοκινήτων που ήταν συμβατά με το νέο καύσιμο. Ωστόσο, οι καταναλωτές δεν ενημερώθηκαν σωστά για το αν το όχημά τους ήταν συμβατό με το καύσιμο E10, γεγονός που αύξησε την αβεβαιότητα και την καχυποψία τους απέναντι σε αυτό. Η αποτυχία να ενημερωθούν σωστά οι καταναλωτές για το νέο καύσιμο και η έλλειψη σωστού συντονισμού μεταξύ καταναλωτών, βιομηχανίας καυσίμων, κατασκευαστών οχημάτων και κράτους οδήγησε τελικά στην απόρριψη του E10 από τη μεγάλη πλειοψηφία των καταναλωτών. Οι τελευταίοι έπαψαν να χρησιμοποιούν το E10 καύσιμο και επέστρεψαν στη χρήση της κοινής βενζίνης. Αυτό το γεγονός οδήγησε σε σημαντικές οικονομικές απώλειες των εταιρειών που επένδυσαν στην κατασκευή αντλιών για το νέο καύσιμο καθώς και της βιομηχανίας καυσίμων που είχε προβεί σε αλλαγές στην αλυσίδα εφοδιασμού καυσίμων.

Στην αντίπερα όχθη, η Σουηδία εισήγαγε επιτυχώς το καύσιμο E85 στο ενεργειακό μείγμα του κλάδου των μεταφορών. Η κυβέρνηση εισήγαγε το 2006 ένα νόμο (rump law) που υποχρέωνε όλα τα πρατήρια καυσίμων που πωλούν περισσότερο από 3000 κυβικά μέτρα καυσίμου το χρόνο να παρέχουν επιπλέον ένα είδος ανανεώσιμου καυσίμου. Η πλειοψηφία των πρατηρίων καυσίμων επένδυσε σε επιπλέον αντλίες βιοκαυσίμου E85. Το τελευταίο προτιμήθηκε αντί άλλων ανανεώσιμων καυσίμων όπως το βιοαέριο, καθώς το τελευταίο απαιτούσε πρόσθετες επενδύσεις που αφορούσαν τη διανομή του (π.χ. αγωγούς μεταφοράς). Η κυβέρνηση, προκειμένου να υποστηρίξει τις επενδύσεις της βιομηχανίας υποδομών, έδωσε κίνητρα στους καταναλωτές για να αγοράσουν τα ειδικά αυτοκίνητα (flex fuel) που κινούνται με το E85, έτσι ώστε να αυξήσει τη ζήτηση για το καύσιμο αυτό. Η περίπτωση της Σουηδίας αντιπροσωπεύει μια περίπτωση επιτυχίας, όπου η κυβέρνηση συνεργάστηκε επιτυχώς με τη βιομηχανία καυσίμων και πέτυχε την αυξανόμενη χρήση του συγκεκριμένου βιοκαυσίμου χωρίς να οδηγήσει σε οικονομικές απώλειες των ιδιωτικών επενδυτών.

3.3.1.4 Υδρογόνο

Η περίπτωση του υδρογόνου απαιτεί, όπως και η περίπτωση της ηλεκτρικής ενέργειας, σημαντική προσπάθεια για να διεισδύσει στην αγορά των μεταφορών. Ωστόσο, η ανάπτυξη της υποδομής διανομής και ανεφοδιασμού υδρογόνου χαρακτηρίζεται από υψηλότερο βαθμό δυσκολίας έναντι των υπολοίπων εναλλακτικών καυσίμων. Πράγματι, η διανομή και ο ανεφοδιασμός υδρογόνου πρέπει να αναπτυχθούν παράλληλα και να εναρμονιστούν με σκοπό την παράδοση του υδρογόνου στους καταναλωτές. Το δίκτυο διανομής περιλαμβάνει την τοποθέτηση αγωγών μεταφοράς ή τη χρησιμοποίηση φορτηγών μεταφοράς. Ωστόσο, το δίκτυο λιανικής πώλησης υδρογόνου συνιστά την απαραίτητη υποδομή που θα παρέχει το υδρογόνο στους καταναλωτές η οποία απαιτεί το μεγαλύτερο τμήμα της επένδυσης. Ο

συντονισμός αυτών των δύο βιομηχανιών είναι η απαραίτητη προϋπόθεση για τη διείσδυση του υδρογόνου, η οποία δεν είναι από μόνη της αρκετή. Θα πρέπει τέλος η αυτοκινητοβιομηχανία να παράσχει στους καταναλωτές σε προσιτές τιμές συγκεκριμένα αυτοκίνητα εξοπλισμένα με κυψέλες υδρογόνου που θα μπορούν να χρησιμοποιήσουν το υδρογόνο ως καύσιμο.

Σήμερα, το κεφαλαιουχικό κόστος για την αγορά ενός οχήματος εξοπλισμένου με κυψέλες υδρογόνου είναι απαγορευτικά υψηλό για τους καταναλωτές (Offer et al., 2010). Δεν είναι βέβαιο αν η αυτοκινητοβιομηχανία και η τεχνολογία κυψελών καυσίμου θα είναι σε θέση να οδηγηθούν σε σημαντική μείωση του κόστους. Στη βιβλιογραφία υπάρχουν αντιφατικές προβλέψεις για το μέλλον της τεχνολογίας αυτής (Romm, 2006). Επιπλέον, η ανάπτυξη υποδομής διανομής και παραγωγής υδρογόνου δεν μπορεί να προηγηθεί της αναπτυξης της αυτοκινητοβιομηχανίας. Η τελευταία θα πρέπει να επιδείξει σημαντική μείωση στο κόστος κεφαλαίου της τεχνολογίας κυψελών καυσίμου, προτού αποφασίσουν οι ιδιωτικοί επενδυτές και οι δημόσιες αρχές να διαθέσουν κεφάλαια για την εγκατάσταση υποδομών διανομής και παραγωγής υδρογόνου.

3.3.1.5 Ρυθμιστικά καθεστώτα για υποδομές διάθεσης υδρογόνου

Η περίπτωση του υδρογόνου απαιτεί την ανάπτυξη ενός εκτενούς δικτύου διανομής που θα αποτελείται από αγωγούς υψηλής, μέσης και χαμηλής πίεσης καθώς και από ένα σύστημα οδικών μεταφορών με φορτηγά από τα κεντρικά σημεία παραγωγής του προς τον τελικό καταναλωτή (Tzimas et al., 2007). Η ανάπτυξη του δικτύου διανομής υδρογόνου χαρακτηρίζεται από τα οικονομικά ενός φυσικού μονοπωλίου. Κατ' επέκταση, η είσοδος δύο ή και παραπάνω «παικτών» στην αγορά είναι πιθανό να επιφέρει οικονομικές απώλειες και στους δύο (Birgisson and Lavarco, 2004). Η εμπλοκή των επενδυτών σε τέτοιου είδους επένδυση εμπεριέχει υψηλό ρίσκο, καθώς η φύση της επένδυσης είναι μη αναστρέψιμη. Ένα σύνθετο ρυθμιστικό καθεστώς με κανονισμούς πρέπει να αναπτυχθεί από τις δημόσιες αρχές προκειμένου να ελεγχθεί ο διαχειριστής του φυσικού μονοπωλίου.

Το σύστημα υποδομής για τη διάθεση του υδρογόνου στην τελική κατανάλωση θα πρέπει να αναπτυχθεί παράλληλα με το σύστημα διανομής. Για το συγκεκριμένο σύστημα, όπου εμπλέκονται πολλοί μεμονωμένοι «μικροί» επενδυτές, μια λιγότερο παρεμβατική προσέγγιση ενδέχεται να είναι πιο κατάλληλη. Μια υποστήριξη από τις δημόσιες αρχές με τη μορφή κινήτρων, επιδοτήσεων και ευκολιών χρηματοδότησης είναι πιθανό να είναι απαραίτητη, κυρίως σε αρχικά στάδια της ανάπτυξης της υποδομής, με στόχο να μειωθεί το ρίσκο της επένδυσης. Η απόφαση για την ανάπτυξη του απαιτούμενου δικτύου διανομής και διάθεσης υδρογόνου πρέπει να παρθεί τόσο σε εθνικό όσο και σε Ευρωπαϊκό επίπεδο.

3.3.2 Εκτιμήσεις του μέσου κόστους υποδομής εναλλακτικών καυσίμων

Τα βασικά στοιχεία σχετικά με την εκτίμηση των οικονομικών των υποδομών αποτελούν η χρηματοδότηση τους, τα ρυθμιστικά καθεστώτα και η τιμολογιακή πολιτική της παρεχόμενης υπηρεσίας. Συνήθως, στα αρχικά στάδια της επένδυσης, ο διαχειριστής δεν έχει τη δυνατότητα να τιμολογεί τις υπηρεσίες που παρέχει με βάση τον αριθμό των χρηστών της υπηρεσίας του. Στο αρχικό στάδιο της επένδυσης, είναι πιθανό ο αριθμός των χρηστών να είναι μικρός και η επένδυση να υπολειτουργεί. Συνεπώς, η τιμολόγηση βάσει του αριθμού χρηστών της υπηρεσίας θα ήταν δυσανάλογα υψηλή και θα αποθάρρυνε μελλοντικούς χρήστες. Μια τιμολογιακή πολιτική με βάση το μέσο εκτιμώμενο κόστος (levelised costs) για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα είναι πιθανότερο να προσελκύσει χρήστες, ιδιαίτερα στα αρχικά στάδια της επένδυσης. Το μέσο εκτιμώμενο κόστος μπορεί να αποτελέσει ένα χρήσιμο μέτρο για τη σύγκριση εναλλακτικών επιλογών για υποδομές υψηλού κεφαλαίου όπως οι υποδομές (Fane et al., 2007). Το μέσο εκτιμώμενο κόστος μπορεί να αναπαραστήσει και το ύψος της τιμολόγησης που θα πρέπει να εφαρμόσει ο διαχειριστής της επένδυσης έτσι ώστε ο επενδυτής να ανακτήσει το αρχικό του κεφάλαιο μέχρι το τέλος της οικονομικής ζωής της επένδυσης. Πράγματι, το μέσο εκτιμώμενο κόστος υπολογίζεται με βάση την παρακάτω σχέση (Konstantin, 2009):

$$\text{Μέσο εκτιμώμενο κόστος} = \frac{I_0 + \sum_{t=1}^T \gamma^t \cdot AC_t}{\sum_{t=1}^T \gamma^t \cdot Q_t} \quad (3-1)$$

$$\gamma = 1/(1 + \delta)$$

όπου I_0 είναι το ύψος της επένδυσης, ο όρος AC_t αναφέρεται στις ετήσιες δαπάνες λειτουργίας της επένδυσης, ενώ ο όρος Q_t ορίζει τον όγκο των πωλήσεων σε ετήσια βάση. Ο παράγοντας γ αποτελεί τον όρο αναγωγής των παραπάνω μεγεθών σε παρούσα αξία λαμβάνοντας υπόψη το επιτόκιο αναγωγής δ του επενδυτή.

Παρακάτω, επιχειρείται μια συγκριτική ανάλυση του κόστους επένδυσης, υποδομής, διάθεσης και του μέσου εκτιμώμενου κόστους για βιοκαύσιμα, υδρογόνο και ηλεκτρική ενέργεια. Στη σύγκριση, λαμβάνονται υπόψη και οι ήδη υπάρχοντες σταθμοί διάθεσης βενζίνης και πετρελαίου που συνιστούν μια ώριμη υποδομή. Οι υπολογισμοί για το μέσο εκτιμώμενο κόστος της υποδομής εμπεριέχουν υψηλή αβεβαιότητα κυρίως όσον αφορά τις υποθέσεις για το βαθμό χρησιμοποίησης της υποδομής που θα καθορίσει και τη ζήτηση για τις προσφερόμενες υπηρεσίες και το επιτόκιο αναγωγής. Στους παρακάτω υπολογισμούς έγινε η υπόθεση ότι όλες οι επενδύσεις λειτουργούν στο βέλτιστο σημείο λειτουργίας τους. Ο Πίνακας 3-2 περιλαμβάνει το κόστος επένδυσης, το εκτιμώμενο ετήσιο κόστος χρήσης και το εκτιμώμενο μέσο κόστος της επένδυσης, με την υπόθεση ότι όλοι οι επενδυτές εφαρμόζουν το ίδιο επιτόκιο αναγωγής (9%). Ασφαλώς, το μέσο κόστος της επένδυσης θα ήταν διαφορετικό αν

εφαρμοζόταν διαφορετικό επιτόκιο αναγωγής, όπου ένα υψηλότερο επιτόκιο θα οδηγούσε σε μια αύξηση του μέσου κόστους επένδυσης.

Πίνακας 3-2: Εκτιμώμενο μέσο κόστος υποδομών διάθεσης καυσίμων

	Σταθμός βενζίνης/ ντίζελ	Ζεύγος αντλιών βιοκαυσίμου	Σταθμός ταχείας φόρτισης Level III	Σταθμός υδρογόνου
Κόστος επένδυσης (Euro)	150.000	45.000	45.000	1.000.000
Ετήσιο μεταβλητό κόστος (Euro)	36.000	5.000	3.800	40.000
Επιτόκιο αναγωγής	9%	9%	9%	9%
Οικονομική ζωή επένδυσης	15	15	13	15
Ζήτηση	127 γεμίσματα/ ημέρα	100 γεμίσματα/ ημέρα	42 φορτίσεις/ ημέρα	200 γεμίσματα/ ημέρα
Εκτιμώμενο μέσο κόστος ¹	0,059	0,01	21	0,346

1: Το εκτιμώμενο μέσο κόστος μετράται σε Euro/lit για σταθμούς βενζίνης και βιοκαυσίμων, σε Euro/kg για το υδρογόνο και σε Euro/MWh για την ηλεκτρική ενέργεια

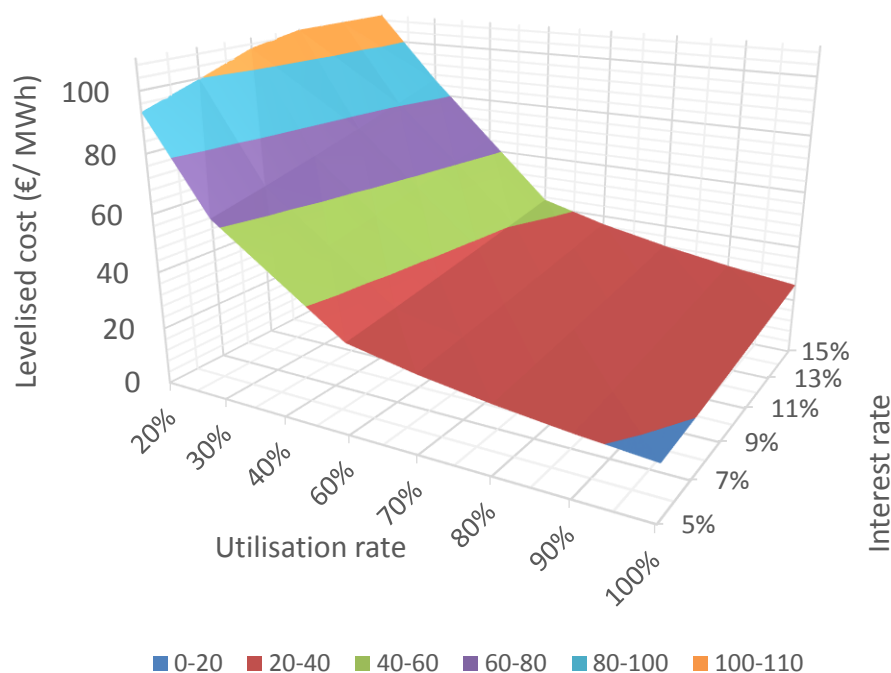
3.3.2.1 Σταθμός ανεφοδιασμού βενζίνης/ ντίζελ

Οι σταθμοί βενζίνης και ντίζελ αποτελούν σήμερα το πιο συνηθισμένο μέσο διάθεσης καυσίμων για μεταφορές. Είναι προφανές ότι ακόμα και στην περίπτωση αυτών των σταθμών η κερδοφορία δεν είναι η ίδια για όλους τους σταθμούς, αφού αυτή εξαρτάται σε σημαντικό βαθμό από την τοποθεσία. Όσον αφορά στο κόστος επένδυσης τέτοιου είδους σταθμών, κάποιες αραιές εκτιμήσεις κάνουν λόγο για κεφαλαιουχικό κόστος της τάξης των 150.000 €. Για τα ετήσια μεταβλητά κόστη της επένδυσης υπάρχει η εκτίμηση ότι αυτή είναι της τάξης των 30.000-40.000 €, ενώ η οικονομική ζωή της επένδυσης είναι 15 χρόνια. Επιπλέον, γίνεται η υπόθεση ότι εξυπηρετούνται καθημερινά περίπου 130 οχήματα με ένα μέσο ανεφοδιασμό της τάξης των 20-25 λίτρων καυσίμου ανά όχημα. Με βάση αυτή τη ζήτηση, το μέσο εκτιμώμενο κόστος ανέρχεται στα 5,9 λεπτά του €/lit. Συνεπώς, για το σταθμό ανεφοδιασμού του παραδείγματος, ο επενδυτής θα πρέπει να συμπεριλάβει στην τιμή πώλησης των καυσίμων και το επιπλέον κόστος των 5.9 λεπτών του €/lit που θα του εξασφαλίζει την απόδοση της επένδυσης του. Αυτή η επιπλέον ταρίφα αντιπροσωπεύει ένα μικρό τμήμα (3-4%) του συνολικού κόστους πώλησης της βενζίνης, που ανέρχεται περίπου στα 1,6 €/lit.

3.3.2.2 Σημείο φόρτισης ηλεκτρικής ενέργειας τύπου Level III

Το παράδειγμα που ακολουθεί αναφέρεται σε σταθμό φόρτισης τύπου III που παρέχει ταχεία φόρτιση. Η επιλογή του συγκεκριμένου τύπου σταθμού φόρτισης γίνεται επειδή αποτελεί τον ακριβότερο τύπο σταθμού φόρτισης και είναι μια υπηρεσία που παρέχεται από κάποιον διαχειριστή προς τους τελικούς καταναλωτές. Αυτού του τύπου η υπηρεσία έρχεται σε αντίθεση με άλλα είδη σταθμών φόρτισης όπως εκείνοι του οικιακού τύπου που ο πάροχος είναι ο ίδιος ο καταναλωτής. Το κεφαλαιουχικό κόστος επένδυσης σε ένα σταθμό ταχείας φόρτισης ανέρχεται σε περίπου 45.000 €, ενώ γίνεται η υπόθεση ότι το μέσο ετήσιο κόστος συντήρησης είναι περίπου το 10% της επένδυσης (περίπου 4.000€). Οι υποθέσεις αυτές εναρμονίζονται με τις υποθέσεις των Schroeder and Traber (2012). Η οικονομική ζωή της επένδυσης θεωρείται ότι είναι 13 χρόνια και είναι μέσα στο εύρος που προτείνουν οι Philip and Wiederer (2010). Για τις ανάγκες του παραδείγματος, θεωρείται ότι ο σταθμός φόρτισης χρησιμοποιείται κατά βέλτιστο τρόπο και παρέχει περίπου 40 φορτίσεις ανά ημέρα (με μέσο χρόνο φόρτισης 20 λεπτά). Η παρεχόμενη ενέργεια ανά φόρτιση είναι περίπου 30 kWh (όση και η χωρητικότητα της μπαταρίας των ηλεκτρικών αυτοκινήτων κατά μέσο όρο). Το μέσο εκτιμώμενο κόστος που προκύπτει είναι περίπου 21 €/MWh. Αυτή είναι η τιμή που θα πρέπει να πληρώσουν οι καταναλωτές για τις προσφερόμενες υπηρεσίες ενός σταθμού ταχείας φόρτισης, πλέον της τιμής της ηλεκτρικής ενέργειας. Το μέσο εκτιμώμενο κόστος αποτελεί ένα σημαντικό τμήμα της τελικής τιμής (10-15% της τιμής της ηλεκτρικής ενέργειας) λόγω του υψηλού κόστους επένδυσης.

Υπάρχει ασφαλώς μεγάλη αβεβαιότητα όσον αφορά τους παραπάνω υπολογισμούς, γεγονός που πηγάζει από την αβεβαιότητα της ζήτησης για τις προσφερόμενες υπηρεσίες. Ακόμη, πραγματοποιήθηκαν επιπλέον υπολογισμοί για την εκτίμηση του μέσου εκτιμώμενου κόστους της συγκεκριμένης υποδομής, υποθέτοντας συνδυαστικά διαφορετικό επιτόκιο αναγωγής και διαφορετικό βαθμό χρησιμοποίησης. Η χρήση της υποδομής κατά 100% αντιστοιχεί σε περίπου 40 φορτίσεις. Το εύρος του επιτοκίου αναγωγής που ορίστηκε για την επένδυση κυμαίνεται μεταξύ 5% και 15%. Σύμφωνα με το Σχήμα 3-2, ένας βαθμός χρησιμοποίησης της τάξης του 50%-80% αναμένεται να αποδώσει ένα μέσο εκτιμώμενο κόστος της τάξης των 20-40 €/MWh. Συνεπώς, η ταρίφα για τη χρήση της υποδομής για το χρήστη θα κυμαίνεται μεταξύ 0,6 και 1,2 €/φόρτιση, πλέον του κόστους αγοράς της ηλεκτρικής ενέργειας.



Σχήμα 3-2: Μέσο εκτιμώμενο κόστος σε €/MWh για σταθμό φόρτισης Επιπέδου III υπό μεταβαλλόμενη ζήτηση και επιτόκιο.

3.3.2.3 Σταθμός ανεφοδιασμού υδρογόνου

Το κόστος επένδυσης για σταθμό ανεφοδιασμού υδρογόνου είναι το υψηλότερο απ' όλους τους άλλους τύπους καυσίμων και κυμαίνεται μεταξύ 0,6 και 1,6 εκατομμύρια €, σύμφωνα με το Expert Group on Future Transport Fuels (2011). Για το παρόν παράδειγμα, γίνεται η υπόθεση ότι το ύψος της επένδυσης είναι 1 εκατομμύριο € ενώ τα λειτουργικά κόστη ανέρχονται σε περίπου 40.000€. Η μέγιστη διανεμητική ικανότητα του σταθμού είναι περίπου 1.000 κιλά υδρογόνου ημερησίως που μπορεί να εξυπηρετήσει περίπου 200 αυτοκίνητα με χωρητικότητα δεξαμενής καυσίμου 5 κιλά υδρογόνου. Η οικονομική διάρκεια ζωής του σταθμού θεωρείται ότι είναι 15 χρόνια και έρχεται σε συμφωνία με τη μελέτη των Weinert et al. (2007). Λαμβάνοντας υπόψη τις παραπάνω υποθέσεις, το μέσο εκτιμώμενο κόστος της επένδυσης υπολογίζεται στα 0,35 €/kg υδρογόνου.

Για τον υπολογισμό του μεριδίου του παραπάνω μέσου εκτιμώμενου κόστους στο σύνολο της τιμής πώλησης του υδρογόνου, η τελική τιμή του υδρογόνου προ φόρων είναι της τάξης των 5 €/kg υδρογόνου, σύμφωνα με τη μελέτη της McKinsey (2011). Συνεπώς, το μέσο εκτιμώμενο κόστος της επένδυσης αποτελεί το 6,5% της τελικής τιμής υδρογόνου. Πραγματοποιώντας μια ανάλυση ευαισθησίας στους υπολογισμούς, παρόμοια με αυτή για το σημείο φόρτισης ηλεκτρικής ενέργειας, αν μεταβληθεί το επιτόκιο αναγωγής από 9% σε 15%, τότε το μέσο εκτιμώμενο κόστος της επένδυσης θα αυξηθεί σε 0,44 €/kg υδρογόνου και θα αποτελεί το 8,2% της τελικής τιμής του καυσίμου. Όπως και στην περίπτωση της ηλεκτρικής ενέργειας, το υψηλό

κόστος επένδυσης και η αβεβαιότητα της ζήτησης του υδρογόνου αποτελούν κρίσιμους παράγοντες που θα κρίνουν αν η επένδυση θα είναι επιτυχημένη ή όχι.

3.3.2.4 Σταθμός ανεφοδιασμού με βιοκαύσιμα

Η περίπτωση της υποδομής των βιοκαυσίμων χαρακτηρίζεται από σχετικά μικρό κεφαλαιουχικό κόστος σε σύγκριση με την περίπτωση του υδρογόνου. Στο παράδειγμα της παρούσας ενότητας, το κεφαλαιουχικό κόστος για την κατασκευή δύο αντλιών παροχής βιοκαυσίμων σε έναν ήδη υπάρχοντα σταθμό διάθεσης συμβατικών καυσίμων είναι περίπου 45.000€. Το κόστος είναι αρκετά μικρό σε σχέση με άλλες εναλλακτικές μορφές ενέργειας επειδή τα βιοκαύσιμα είναι δυνατό να διατεθούν σε ήδη υπάρχοντες σταθμούς. Συνεπώς το επιπλέον κόστος είναι μόνο εκείνο των αντλιών και της δεξαμενής αποθήκευσης τους. Για το ετήσιο κόστος συντήρησης γίνεται η υπόθεση ότι αυτό είναι της τάξης των 5.000€, ενώ η επένδυση χαρακτηρίζεται από μια οικονομική ζωή της τάξης των 15 ετών. Το εκτιμώμενο μέσο κόστος για το συγκεκριμένο παράδειγμα υπολογίζεται στα 0,01€/ λίτρο για βέλτιστη λειτουργία του σταθμού. Είναι προφανές ότι το επιπλέον κόστος που θα καλούνται να πληρώσουν οι καταναλωτές για την επένδυση είναι πολύ μικρό, ιδίως αν συγκριθεί με την τελική τιμή του προϊόντος που περιλαμβάνει κάθε είδους φόρο (ειδικός φόρος κατανάλωσης, ΦΠΑ).

3.4 Ο ρόλος του κράτους: πολιτικές και συντονισμός αγοράς

Η ανάπτυξη και η είσοδος των εναλλακτικών καυσίμων στην αγορά των μεταφορών θα αποτελέσει μια ουσιαστική συμβολή ως προς την επίτευξη της αειφορίας του τομέα των μεταφορών και τη χρήση καθαρών καυσίμων. Τα κοινωνικά πλεονεκτήματα ενός βιώσιμου τομέα των μεταφορών είναι πολλαπλά, με σημαντικότερο αυτό της μείωσης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης και της συγκέντρωσης των αερίων του θερμοκηπίου. Σύμφωνα με όσα εκτέθηκαν στις προηγούμενες παραγράφους, ο συντονισμός των εμπλεκόμενων φορέων θα αποτελέσει τη βάση για την επιτυχημένη είσοδο των εναλλακτικών καυσίμων στην αγορά των μεταφορών.

Ο συντονισμός των εμπλεκόμενων φορέων περιλαμβάνει δημόσιες παρεμβάσεις, από σχέδια επιδοτήσεων και χρηματοδοτικές ευκολίες μέχρι ρυθμιστικά μέτρα για τις αγορές, όπως εκχωρήσεις δικαιωμάτων και ρυθμιζόμενα μονοπώλια που επιχειρούν να μειώσουν το επενδυτικό ρίσκο σε επενδύσεις μεγάλου κεφαλαίου. Ο βαθμός της δημόσιας παρέμβασης ενδέχεται να διαφέρει ανά περίπτωση και είναι πιθανό να έχει επιπτώσεις στις αγορές (Velde, 1999). Στην περίπτωση που η δημόσια παρέμβαση είναι περιορισμένη, υπάρχει ο κίνδυνος να μην υπάρξουν τα κατάλληλα κίνητρα για τη δημιουργία μιας αγοράς που σε διαφορετική περίπτωση θα είχε τις προοπτικές να αναπτυχθεί. Στην αντίθετη περίπτωση (έντονη κρατική παρέμβαση) τούτο θα μπορούσε να επιφέρει υπερβολικούς περιορισμούς και μη αποδοτική λειτουργία της αγοράς. Ο Πίνακας 3-3 παρουσιάζει συνοπτικά τις κύριες μορφές δημόσιας παρέμβασης.

Πίνακας 3-3: Μορφές παρεμβατισμού στη βιομηχανία διάθεσης και διανομής καυσίμων, τη βιομηχανία κατασκευής εξοπλισμού και τους καταναλωτές.

Βιομηχανία διάθεσης και διανομής καυσίμου	Βιομηχανία κατασκευής εξοπλισμού	Καταναλωτές
<ul style="list-style-type: none"> • Άμεση χρηματοδοτική υποστήριξη (χορήγηση δανείων, κρατικές εγγυήσεις) • Χορήγηση δικαιωμάτων αποκλειστικότητας και υπογραφή συμβάσεων παραχώρησης • Ρυθμιστικά μέτρα χρήσης και τιμολόγησης 	<ul style="list-style-type: none"> • Περιβαλλοντολογικές και τεχνολογικές ρυθμίσεις στις πωλήσεις νέου εξοπλισμού (όρια EURO, όρια εκπομπών CO₂) • Στοχευμένη στήριξη R&D με σκοπό τη μείωση του κόστους τεχνολογιών υψηλής εντάσεως κεφαλαίου 	<ul style="list-style-type: none"> • Οικονομικά κίνητρα μέσω επιδοτήσεων ή φοροαπαλλαγών στη χρήση καυσίμου • Επιδοτήσεις για αγορά εναλλακτικών τεχνολογιών οχημάτων (ηλεκτρικά αυτοκίνητα) • Παροχή πληροφοριών και καμπάνιες για τα οφέλη της χρήσης εναλλακτικών καυσίμων

Η παροχή κινήτρων προς τους καταναλωτές με στόχο τη μεταστροφή των τελευταίων προς πιο καθαρές μορφές ενέργειας στις μεταφορές μπορεί να αποτελέσει μια σημαντική πρωτοβουλία για την προώθηση εναλλακτικών καυσίμων στην αγορά των μεταφορών. Τέτοιου είδους κίνητρα αποτελούν οι επιδοτήσεις στην τιμή του καυσίμου, μέσω απαλλαγής από τον ειδικό φόρο κατανάλωσης, που σκοπεύουν να μειώσουν την τιμή του καυσίμου που καλείται να πληρώσει ο καταναλωτής. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η περίπτωση του υγροποιημένου πετρελαϊκού αερίου (LPG) στην Ελλάδα, όπου η απουσία φορολόγησης και τα σημαντικά οικονομικά οφέλη κατά τη χρήση του οδήγησαν ένα τμήμα των οδηγών στη χρήση του.

Η επιδότηση της αγοράς ενός οχήματος που χρησιμοποιεί εναλλακτικά καύσιμα αφορά κυρίως την περίπτωση των ηλεκτρικών οχημάτων, όπου το επιπλέον κόστος λόγω της μπαταρίας αυξάνει σημαντικά το κόστος σε σχέση με τα συμβατικά οχήματα. Ο σκοπός της επιδότησης είναι να καταστήσουν τις τεχνολογίες μεγάλου κεφαλαίου πιο ελκυστικές στους καταναλωτές. Ήδη, ορισμένες χώρες της ΕΕ όπως η Γαλλία επιδοτούν την αγορά των ηλεκτρικών αυτοκινήτων κατά ένα ποσό (2.000-5.000 €) με σκοπό να αυξήσουν το κίνητρο των καταναλωτών για την αγορά τέτοιου είδους οχημάτων. Η ενημέρωση των καταναλωτών όσον αφορά στα οφέλη της χρήσης εναλλακτικών μορφών ενέργειας για τις μεταφορικές τους ανάγκες αποτελεί ένα επιπλέον σημαντικό στοιχείο. Οι καταναλωτές πρέπει να ενημερώνονται για τα πλεονεκτήματα της χρήσης εναλλακτικών καυσίμων, όπως είναι η μείωση των εκπομπών αερίου του θερμοκηπίου για την καταπολέμηση του φαινομένου της κλιματικής αλλαγής, η μείωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης καθώς και τα οικονομικά οφέλη λόγω της εξοικονόμησης καυσίμου.

Οι παρεμβάσεις προς την πλευρά των κατασκευαστών οχημάτων με τη μορφή ρυθμιστικών πολιτικών είναι απαραίτητες για να εξασφαλιστεί η είσοδος στην αγορά

οχημάτων που θα μπορούν να κινηθούν με εναλλακτικές μορφές ενέργειας. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν τα ευρωπαϊκά πρότυπα που θέτουν νέα όρια στις εκπομπές αέριων ρυπαντών σε αυτοκίνητα, φορτηγά καθώς και σε πλοία. Αυτά τα όρια (EURO Standards) υπαγορεύουν ότι τα νέα οχήματα που βγαίνουν στην παραγωγή δεν επιτρέπεται να εκπέμπουν ατμοσφαιρικούς ρυπαντές παραπάνω από ένα συγκεκριμένο όριο. Ένα επιπλέον χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η δημιουργία τεχνολογικών ορίων από την ΕΕ (οδηγία 443/2009) όσον αφορά τις εκπομπές των αυτοκινήτων σε αέρια διοξειδίου του άνθρακα. Το μέτρο αυτό εξαναγκάζει τους κατασκευαστές αυτοκινήτων να πωλούν αυτοκίνητα των οποίων ο μέσος όρος δεν ξεπερνά συγκεκριμένα όρια (95 gCO₂/km για το 2020). Αυτό το μέτρο μπορεί να αποτελέσει ένα πολύ σημαντικό μέσο για την προώθηση των ηλεκτρικών οχημάτων και των οχημάτων με κυψέλες υδρογόνου στο μέλλον, όπως θα παρουσιαστεί στη συνέχεια της διατριβής (Κεφάλαια 6 και 5). Η στήριξη μέσω χρηματοδότησης για R&D είναι δυνατό να βοηθήσει την αυτοκινητοβιομηχανία να παράγει σε υψηλή κλίμακα προηγμένους τύπους οχημάτων οι οποίοι τη στιγμή αυτή δεν είναι οικονομικά ανταγωνιστικοί. Τέλος, μέσω της έρευνας είναι ενδεχομένως δυνατή η μείωση του κόστους συγκεκριμένων εξαρτημάτων που καθιστούν αυτές τις ανεπτυγμένες τεχνολογίες οικονομικά μη ανταγωνιστικές (π.χ. μπαταρίες, κυψέλες υδρογόνου).

Οι επενδύσεις για την κατασκευή υποδομών για παραγωγή, μεταφορά και διάθεση εναλλακτικών καυσίμων για τις μεταφορές χαρακτηρίζονται ως υψηλού ρίσκου λόγω του ύψους της επένδυσης που απαιτούν και της αβέβαιης ζήτησης. Κατά συνέπεια, υπάρχει ο κίνδυνος της απώλειας των κεφαλαίων της αρχικής επένδυσης (sunk costs) σε περίπτωση αποτυχίας. Σε αυτές τις περιπτώσεις, η δημόσια παρέμβαση κρίνεται αναγκαία για την άρση συγκεκριμένων εμποδίων, αν και εφόσον δικαιολογείται από τα οικονομικά και τα κοινωνικά οφέλη που θα αποφέρει. Όταν εμπλέκονται και κοινωνικά οφέλη, ο δημόσιος τομέας αναλαμβάνει συνήθως να μοιραστεί το ρίσκο με τους ιδιωτικούς επενδυτές παρέχοντας χρηματοοικονομική υποστήριξη. Αυτή η υποστήριξη συνήθως παίρνει τη μορφή ευνοϊκών προγραμμάτων ανεύρεσης χρηματοδότησης, εγγυήσεων, σταθερών χαμηλών επιτοκίων καθώς και άμεσης επιδότησης. Η τελευταία συνήθως πραγματοποιείται όταν το έργο που χρηματοδοτείται θα επιφέρει αποδεδειγμένα κοινωνικά οφέλη (π.χ. κατασκευή μιας γέφυρας που θα επιτρέψει τη σύνδεση απομακρυσμένων περιοχών και θα μειώσει τους χρόνους μετακινήσεων προς όφελος των μετακινουμένων).

Η υπογραφή συμφώνων δημοσίου-ιδιωτών (PPP) αποτελούν κοινοπραξίες όπου τα συμβαλλόμενα μέρη μοιράζονται το κεφάλαιο της επένδυσης. Αυτό μεταφέρει αναπόφευκτα μέρος του ρίσκου της επένδυσης στον δημόσιο τομέα και τους δημόσιους πόρους. Επιπλέον, το μέτρο των εκχωρήσεων εφαρμόζεται συνήθως σε εταιρείες που ελέγχονται από το δημόσιο και είναι ιδιωτικού δικαίου. Αυτό το μέτρο παρέχει το δικαίωμα της κατασκευής και χρήσης της υποδομής για ένα προσυμφωνημένο χρονικό διάστημα, με την υποχρέωση η ιδιωτική εταιρεία να παρέχει συγκεκριμένες υπηρεσίες. Αναφορικά με την κατασκευή υποδομών διάθεσης καυσίμου, ορισμένες περιοχές παρουσιάζουν υψηλότερη κερδοφορία από κάποιες άλλες λόγω υψηλότερης

πληθυσμιακής συγκέντρωσης (π.χ. κέντρα μητροπόλεων) και κατ' επέκταση υψηλότερης ζήτησης. Σε αυτήν την περίπτωση, οι ιδιωτικοί επενδυτές είναι πιθανότερο να εμπλακούν καθώς το ρίσκο είναι σημαντικά μικρότερο από περιοχές με μικρότερη ζήτηση και μεγαλύτερο ρίσκο απόδοσης. Παράλληλα, το κράτος μέσω ρυθμιστικών παρεμβάσεων είναι δυνατό να απαιτήσει από τον διαχειριστή μιας υποδομής να παρέχει υπηρεσίες και σε τμήματα ή περιοχές με μειωμένη ζήτηση. Τέτοιες είναι οι περιπτώσεις σχετικά απομονωμένων περιοχών με σχετικά μικρή κίνηση οχημάτων.

3.5 Συμπεράσματα κεφαλαίου

Η δραστική μείωση των συνολικών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου καθώς και η επίτευξη της αειφορίας του τομέα των μεταφορών αποτελεί σίγουρα μια πρόκληση. Η υποκατάσταση των συμβατικών ορυκτών καυσίμων με εναλλακτικά καύσιμα, όπως η ηλεκτρική ενέργεια, τα βιοκαύσιμα και το υδρογόνο μπορεί να συμβάλει στην ικανοποίηση αυτού του φιλόδοξου στόχου. Ωστόσο, αυτή η αναδιάρθρωση του συστήματος των μεταφορών συνεπάγεται περίπλοκες διαδικασίες λήψης αποφάσεων με διαφορετικούς εμπλεκόμενους φορείς. Ο σκοπός του παρόντος κεφαλαίου είναι να παρουσιάσει την εικόνα των προοπτικών της αγοράς εναλλακτικών καυσίμων καθώς και των επιμέρους φραγμών ενδεχόμενης εμπορικής επιτυχίας. Επιπλέον, παρουσιάζονται οι κύριοι εμπλεκόμενοι φορείς που συμμετέχουν στη λήψη αποφάσεων στα πλαίσια της εναλλακτικής αγοράς καυσίμων, όπως η βιομηχανία υποδομών και καυσίμων, η κατασκευαστική βιομηχανία, οι καταναλωτές, οι φορείς χάραξης πολιτικής και το κράτος.

Η αναγνώριση των εμπλεκόμενων φορέων στις αποφάσεις σχετικές με τη διείσδυση εναλλακτικών μορφών ενέργειας, όπως η ηλεκτρική ενέργεια, στο σύστημα των επιβατικών μεταφορών αποτελεί ένα ιδιαίτερα σημαντικό στοιχείο στα πλαίσια της ενεργειακής οικονομικής ανάλυσης. Συνεπώς, η διαδικασία σχεδίασης και διασύνδεσης συγκεκριμένων πολιτικών μέτρων με τους επιμέρους αποφασίζοντες με απώτερο σκοπό την επίτευξη της αειφορίας των μεταφορών καθίσταται πιο σαφής. Η δομή του ενεργειακού μοντέλου, PRIMES-TREMOVE, που παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 4 βασίζεται στην παραπάνω θεώρηση.

Το κύριο εμπόδιο εμπορικής επιτυχίας των εναλλακτικών καυσίμων και της ηλεκτρικής ενέργειας αποτελεί η έλλειψη της απαιτούμενης εγκατεστημένης υποδομής. Η βιομηχανία κατασκευής υποδομών διάθεσης εναλλακτικών καυσίμων διακατέχεται από μεγάλη αβεβαιότητα, καθώς χρειάζεται να εκταμιευτούν σημαντικά κεφάλαια, ανάλογα με τον τύπο του καυσίμου, για την οικοδόμηση ενός ανεπτυγμένου δικτύου λιανικής πώληση εναλλακτικών καυσίμων ή σημεία φόρτισης για την ηλεκτρική ενέργεια. Οι επενδύσεις για τη διανομή των εναλλακτικών μορφών ενέργειας στα σημεία διάθεσης αποτελούν και αυτές μέρος της συνολικής δαπάνης που απαιτείται. Ωστόσο, το τμήμα αυτής της επένδυσης για την περίπτωση της ηλεκτρικής ενέργειας είναι μικρότερο σε σχέση με τα άλλα εναλλακτικά καύσιμα, αφού η υποδομή προϋπάρχει.

Η ανάπτυξη των υποδομών διανομής και διάθεσης εναλλακτικών καυσίμων θα πρέπει να πραγματοποιηθεί σε παράλληλο χρόνο με την ανάπτυξη της ζήτησης των συγκεκριμένων καυσίμων. Ωστόσο, η τελευταία εξαρτάται από τις προτιμήσεις των μετακινούμενων καθώς και από τη βιομηχανία κατασκευής εξοπλισμού όπως η αυτοκινητοβιομηχανία. Η κατασκευαστική βιομηχανία θα πρέπει να επιτύχει σημαντική μείωση του κόστους των εναλλακτικών τεχνολογιών που κινούνται με καθαρή ενέργεια, όπως η ηλεκτρική και το υδρογόνο. Η επίτευξη οικονομικών κλίμακος θα καταστήσει τις προηγμένες τεχνολογίες λιγότερο ακριβές και θα επιτρέψει την περαιτέρω προώθηση τους στην αγορά. Παράλληλα, οι καταναλωτές θα πρέπει να ενημερώνονται για τις προοπτικές χρήσης των νέων καυσίμων, τα οφέλη τους και να είναι βέβαιοι για την επάρκεια κάλυψης σε σημεία φόρτισης και ανεφοδιασμού.

Η σύγκριση του κόστους επένδυσης των διαφόρων εναλλακτικών καυσίμων του κλάδου των υποδομών αποδεικνύει ότι τα βιοκαύσιμα αποτελούν την επένδυση με το λιγότερο ρίσκο, καθώς το αρχικό ύψος της επένδυσης μπορεί εύκολα να ανακτηθεί. Στην αντίπερα όχθη, οι επενδύσεις σε σταθμούς ανεφοδιασμού υδρογόνου απαιτούν την υψηλότερη επένδυση κεφαλαίου από όλες τις άλλες εναλλακτικές λύσεις. Συγκεκριμένα, αυτές χαρακτηρίζονται ως υψηλού κινδύνου επενδύσεις λόγω του μη αναστρέψιμου χαρακτήρα τους καθώς και της επιπρόσθετης αβεβαιότητας που προκύπτει από το υψηλό κόστος των τεχνολογιών οχημάτων με κυψέλη υδρογόνου. Η περίπτωση της ηλεκτρικής ενέργειας είναι πιο σύνθετη, καθώς απαιτεί την ανάπτυξη ενός καλά αναπτυγμένου δικτύου σημείων φόρτισης που εξυπηρετήσει τους χρήστες των ηλεκτρικών οχημάτων. Το χαμηλό εύρος αυτονομίας των ηλεκτρικών οχημάτων πρέπει να αντιμετωπιστεί με μια πυκνή κάλυψη σημείων φόρτισης, τόσο σε μητροπολιτικές όσο και πιο αραιοκατοικημένες αστικές περιοχές. Ο κρίσιμος παράγοντας που θα διασφαλίσει ότι το αρχικό κεφάλαιο μπορεί να ανακτηθεί αποτελεί το μελλοντικό ποσοστό χρησιμοποίησης της επένδυσης. Συνεπώς, μια επένδυση σε αστικό πυκνοκατοικημένο περιβάλλον χαρακτηρίζεται από χαμηλότερο κίνδυνο.

Ο δημόσιος παρεμβατισμός θα πρέπει να λάβει διάφορες μορφές για κάθε εμπλεκόμενο φορέα, προκειμένου να εξασφαλιστεί ο συντονισμός της αγοράς και η επιτυχημένη διείσδυση των εναλλακτικών καυσίμων και τεχνολογιών. Η αποτυχία συντονισμού των επιμέρους φορέων είναι δυνατό να οδηγήσει στην αποτυχία της προώθησης εναλλακτικών καθαρών καυσίμων στον τομέα των μεταφορών. Η μορφή του δημόσιου παρεμβατισμού μπορεί επίσης να λάβει τη μορφή κινήτρων για τους καταναλωτές ή ρυθμιστικού καθεστώτος για τις επιμέρους βιομηχανίες. Τέλος, η παροχή οικονομικών κινήτρων και οι επιδοτήσεις είναι ικανές να δώσουν προώθηση στις πωλήσεις εναλλακτικών τεχνολογιών οχημάτων.

Κεφάλαιο 4

4 Ανάπτυξη του οικονομοτεχνικού ενεργειακού μοντέλου PRIMES-TREMOVE

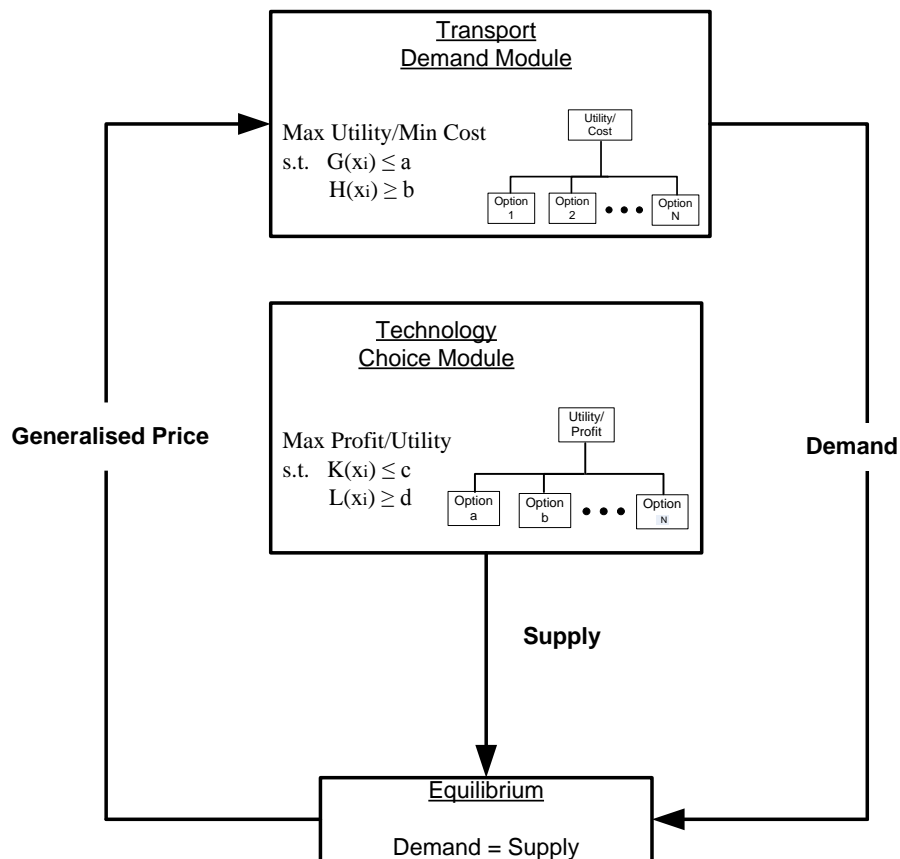
Ο σκοπός της παρούσας ενότητας είναι η αναλυτική περιγραφή του μοντέλου PRIMES-TREMOVE που κατασκευάστηκε στα πλαίσια της διατριβής.

4.1 Βασικές αρχές του μοντέλου PRIMES-TREMOVE

Το μοντέλο PRIMES-TREMOVE επιλύει το πρόβλημα της ισορροπίας των διαφόρων αγορών όπου αντιπροσωπευτικός καταναλωτής και η αντιπροσωπευτική εταιρεία ζητούν μεταφορικές υπηρεσίες για κάθε μεταφορικό μέσο, σκοπό και περιοχή ταξιδιού. Η ζήτηση των μεταφορικών υπηρεσιών καλύπτεται από τον ίδιο τον καταναλωτή (στην περίπτωση ιδιωτικού μέσου) και από έναν πάροχο μεταφορικών υπηρεσιών (π.χ. διαχειριστής εταιρείας φορτηγών ή λεωφορείων). Η εύρεση της ισορροπίας μεταξύ της ζήτησης για μεταφορές και της προσφοράς καθορίζεται με βάση τις τιμές που επηρεάζουν τόσο την προσφορά όσο και τη ζήτηση. Οι τιμές αφορούν τις γενικευμένες τιμές για μεταφορές και αντανακλούν εκτός των σταθερών και μεταβλητών κοστών και το κόστος του χρόνου. Η σχηματική αναπαράσταση του μοντέλου απεικονίζεται στο Σχήμα 4-1.

Το μαθηματικό πρόβλημα που επιλύει το μοντέλο είναι ένα πρόβλημα ισορροπίας με περιορισμούς ισότητας (EPEC: equilibrium problem with equilibrium constraints) που λύνεται ταυτόχρονα για τους επιμέρους οικονομικούς πράκτορες του μοντέλου (economic agents). Μαθηματικά το μοντέλο επιλύεται ως ένα μη γραμμικό μικτής συμπληρωματικότητας πρόβλημα (mixed complementarity problem: MCP). Τα επιμέρους προβλήματα βελτιστοποίησης των οικονομικών πρακτόρων (μεγιστοποίηση χρησιμότητας του καταναλωτή, μεγιστοποίηση της παραγωγής των εταιριών, ελαχιστοποίηση κόστους των εταιρειών παροχής μεταφορικών υπηρεσιών,

κτλ.) που αποτελούν προβλήματα μη γραμμικού προγραμματισμού μετασχηματίζονται σε ένα σύστημα μη γραμμικών εξισώσεων. Η χρήση της συμπληρωματικότητας κατά τη μοντελοποίηση γενικεύει τα μη γραμμικά προβλήματα βελτιστοποίησης σε σύστημα εξισώσεων μέσω των συνθηκών Karush-Kuhn-Tucker conditions (KKT).



Σχήμα 4-1: Σχηματική αναπαράσταση της λειτουργίας του μοντέλου PRICES-TREMOVE

Το μοντέλο αποτελείται από δύο κυρίως υπομοντέλα: τα υπομοντέλα της ζήτησης και της προσφοράς. Συνοπτικά, το υπομοντέλο της ζήτησης προσομοιώνει την απόφαση για μετακίνηση με βάση μακροοικονομικά στοιχεία και διανέμει την επιβατική δραστηριότητα στα διάφορα μέσα μεταφοράς, είδη ταξιδιού και περιοχές. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται τόσο για τις επιβατικές όσο και για τις εμπορευματικές μεταφορές. Στην περίπτωση των επιβατικών μεταφορών προκύπτει από την επίλυση του προβλήματος της μεγιστοποίησης της χρησιμότητας ενός αντιπροσωπευτικού καταναλωτή με περιορισμό εισοδήματος, ενώ στην περίπτωση

των εμπορευματικών μεταφορών από την επίλυση του προβλήματος μεγιστοποίησης των επιπέδων παραγωγής υπό τον περιορισμό δαπανών.

Το υπομοντέλο της προσφοράς υπολογίζει το μείγμα των οχημάτων και των τεχνολογιών για κάθε μεταφορικό μέσο, τη χρήση και τη λειτουργία κάθε τύπου οχήματος για κάθε είδος ταξιδιού και τελικά το ισοζύγιο ενέργειας έτσι ώστε να καλυφθεί η ζήτηση πραγματοποιώντας ελαχιστοποίηση κόστους. Στην περίπτωση της εταιρείας που προσφέρει μεταφορικές υπηρεσίες, το υπομοντέλο της προσφοράς υπολογίζει και τη σχετική τιμολόγηση της υπηρεσίας την οποία καλείται να πληρώσει ο μετακινούμενος. Το μείγμα των διαφόρων τεχνολογιών και τύπων οχημάτων της αγοράς βασίζεται σε αποφάσεις που λαμβάνουν υπόψη ως επί τω πλείστο τόσο το κεφαλαιουχικό όσο και το μεταβλητό κόστος. Η επιλογή του μείγματος είναι το αποτέλεσμα της απόφασης μέσω ενός πλήθους διακριτών εναλλακτικών προτάσεων και βασίζεται στη θεωρία διακριτής επιλογής.

Τα υπομοντέλα της ζήτησης και της προσφοράς είναι δυναμικά μέσα στο χρόνο καθώς λαμβάνουν υπόψη τους τις αποφάσεις που έχουν ληφθεί σε προηγούμενες χρονικές περιόδους (π.χ. επενδύσεις σε αυτοκίνητα). Το υπομοντέλο της προσφοράς επιπλέον κρατάει ιστορικό των γενιών του κεφαλαιουχικού εξοπλισμού που αποκτάται κάθε χρονική περίοδο.

4.2 Το υπομοντέλο της ζήτησης μεταφορικών υπηρεσιών

Ο ρόλος του υπομοντέλου της ζήτησης είναι να προσομοιώσει και να αναπαραστήσει με όσο πιο ρεαλιστικό τρόπο την πραγματικότητα. Το υπομοντέλο της ζήτησης βασίζεται σε ορισμένες βασικές παραδοχές που πηγάζουν από την οικονομική θεωρία (αρχές μικροοικονομικής θεωρίας) και σχετίζονται με τη συμπεριφορά του καταναλωτή και της επιχείρησης. Η βασική παραδοχή είναι ότι οι εκατομμύρια μετακινούμενοι και οι χιλιάδες επιχειρήσεις μοντελοποιούνται σαν ένας μέσος μετακινούμενος (καταναλωτής) και μια μέση επιχείρηση. Γίνεται λοιπόν η υπόθεση ότι οι αποφάσεις λαμβάνονται από ένα μέσο καταναλωτή και μια μέση επιχείρηση. Το υπομοντέλο της ζήτησης, λοιπόν, προσομοιώνει την διαδικασία απόφασης των αντιπροσωπευτικών πρακτόρων (agents) όσον αφορά τη μετακίνησή τους ή όχι καθώς και την περιοχή και το μέσο μετακίνησης. Οι αποφάσεις εξαρτώνται από τις σχετικές τιμές των επιλογών, τις σχέσεις υποκατάστασης μεταξύ των μέσων μεταφοράς καθώς και από το χρόνο ταξιδιού.

Οι μετακινήσεις διακρίνονται σε δύο κυρίως επιμέρους κατηγορίες:

- τις επιβατικές ιδιωτικές μετακινήσεις
- τις μετακινήσεις αγαθών-εμπορευμάτων και τα ταξίδια εργασίας (business trips)

Οι επιβατικές ιδιωτικές μετακινήσεις πραγματοποιούνται από τους καταναλωτές στα πλαίσια της μεγιστοποίησης της χρησιμότητάς τους. Στο σημείο αυτό γίνεται η υπόθεση ότι ο καταναλωτής μέσω της πραγματοποίησης ταξιδιού και

ανάλογα το μέσο μεταφοράς αυξάνει τη χρησιμότητά του. Οι μετακινήσεις των αγαθών και των εμπορευμάτων από τις εταιρείες καθώς και τα επαγγελματικά ταξίδια των εργαζομένων υποκινούνται από την οικονομική δραστηριότητα και επιχειρούν την ελαχιστοποίηση κόστους. Οι αποφάσεις του αντιπροσωπευτικού καταναλωτή και της αντιπροσωπευτικής επιχείρησης είναι διαρθρωμένες σε μορφή δένδρων αποφάσεων. Η δομή των δένδρων αποφάσεων ακολουθεί τη δομή που πρότεινε το μοντέλο REMOVE. Παρακάτω, γίνεται η παρουσίαση των δένδρων απόφασης για τις επιβατικές μεταφορές και τις μεταφορές σχετικές με τις επιχειρήσεις.

4.2.1 Επιβατικές μετακινήσεις του αντιπροσωπευτικού νοικοκυριού

Η μοντελοποίηση των επιβατικών μετακινήσεων βασίζεται στη μικροοικονομική θεωρία και πιο συγκεκριμένα στο κεφάλαιο της συμπεριφοράς του καταναλωτή. Στο υπομοντέλο της ζήτησης γίνεται η παραδοχή ότι οι επιβατικές μετακινήσεις πραγματοποιούνται από έναν αντιπροσωπευτικό καταναλωτή που επιδιώκει τη μεγιστοποίηση της χρησιμότητάς του U υποκείμενος σε εισοδηματικό περιορισμό R . Επίσης, γίνεται η παραδοχή ότι η χρησιμότητα του καταναλωτή πηγάζει από τη μετακίνησή του καθώς και από την κατανάλωση αγαθών και αγορά υπηρεσιών που δε σχετίζονται απαραίτητα με τις μεταφορές. Συνεπώς, οι δαπάνες για μετακινήσεις και για υπηρεσίες που δε σχετίζονται με τις μεταφορές είναι υποκατάστατα όταν οι σχετικές τιμές τους μεταβάλλονται. Η διανομή του εισοδήματος για μετακινήσεις είναι αποτέλεσμα βελτιστοποίησης του υπομοντέλου της ζήτησης. Η αριθμητική τιμή του εισοδηματικού περιορισμού είναι εξωγενής και συνδέεται με μακροοικονομικές υποθέσεις όπως το ΑΕΠ και το κατά κεφαλή εισόδημα.

Η συνάρτηση χρησιμότητας έχει κατασκευαστεί υπό μορφή δένδρου απόφασης όπου οι επιλογές σε κάθε επίπεδο διέπονται από σχέσεις υποκατάστασης. Η βασική υπόθεση της συνάρτησης χρησιμότητας είναι ότι γίνεται χρήση σταθερών ελαστικότητας υποκατάστασης μεταξύ των επιλογών. Τέτοιου τύπου συναρτήσεις χρησιμότητας ονομάζονται συναρτήσεις σταθερής ελαστικότητας υποκατάστασης (Constant Elasticity of Substitution functions – CES). Η ελαστικότητα υποκατάστασης μεταξύ των επιλογών παριστάνεται ως $\sigma = \frac{1}{1-\rho}$

Η χρήση συναρτήσεων χρησιμότητας τύπου CES, λόγω της σχετικά απλής μορφής τους, επιτρέπει την κατασκευή πολύπλοκων δένδρων απόφασης δίχως να επιβαρύνει σε υψηλό βαθμό τον υπολογιστικό χρόνο επίλυσης του μοντέλου. Ο βαθμός υποκατάστασης μεταξύ των διαφορετικών επιλογών του δένδρου απόφασης εξαρτάται από την τιμή που λαμβάνει η ελαστικότητα των συναρτήσεων CES. Διαφορετικές τιμές ελαστικότητας οδηγούν σε διαφορετικές σχέσεις υποκατάστασης μεταξύ εναλλακτικών επιλογών. Το πλεονέκτημα της χρήσης συναρτήσεων CES και της υιοθέτησης πολύπλοκων δένδρων απόφασης έγκειται στο γεγονός ότι οι αποφάσεις των αποφασιζόντων χαρακτηρίζονται από αδράνεια (λόγω των πολλών επιπέδων) και των εναλλακτικών επιλογών. Το χαρακτηριστικό της αδράνειας επιβεβαιώνεται στην

πραγματικότητα και οφείλεται στην τεράστια ετερογένεια του μείγματος των εκατομμυρίων αποφασίζόντων.

Το μειονέκτημα των συναρτήσεων CES έγκειται, ωστόσο, στην υπόθεση ότι οι ελαστικότητες υποκατάστασης παραμένουν σταθερές μέσα στο χρόνο, δίχως να αλλάζουν δυναμικά. Αναμφίβολα, η χρήση σταθερών τιμών ελαστικότητας μειώνει δραστικά τις ανάγκες εύρεσης τεραστίου όγκου δεδομένων, ωστόσο δεν επιτρέπει ριζικές μεταβολές στις συμπεριφορές των αποφασίζόντων. Ωστόσο, οι σχέσεις υποκατάστασης είναι δυνατό να επηρεαστούν μέσα στο χρόνο υποθέτοντας μεταβολές στις παραμέτρους μεριδίων αξίας (value share parameters), παρακάμπτοντας εν μέρει το μειονέκτημα των σταθερών ελαστικότητας.

4.2.1.1 Διάρθρωση δένδρου απόφασης επιβατικών μετακινήσεων

Η διάρθρωση του δένδρου απόφασης της χρησιμότητας του αντιπροσωπευτικού καταναλωτή είναι σύνθετη και σε πολλά επίπεδα. Το Σχήμα 4-2 απεικονίζει το πρωτογενές δένδρο απόφασης το οποίο στη συνέχεια διασυνδέεται με δευτερογενή δένδρα απόφασης. Η αρχική διάκριση έγκειται στην υποκατάσταση μεταξύ εργασίας και κατανάλωσης. Σύμφωνα με την οικονομική θεωρία η εργασία προσφέρει επιπλέον εισόδημα που συνεπάγεται υψηλότερη κατανάλωση και κατ' επέκταση υψηλότερη χρησιμότητα. Αυτό συνεπάγεται ότι η επιπλέον εργασία προσφέρει έμμεσα μεγαλύτερη χρησιμότητα, εις βάρος του ελεύθερου χρόνου. Συνεπώς, η απόφαση διακρίνεται στη χρησιμότητα που λαμβάνει μέσω επιπλέον εισοδήματος λόγω εργασίας είτε λόγω κατανάλωσης στον ελεύθερο χρόνο. Λόγω της φύσης του μοντέλου (μοντέλο μερικής ισορροπίας και όχι γενικής ισορροπίας) η μοντελοποίηση της αγοράς εργασίας είναι εκτός της σκοπιάς του μοντέλου. Γίνεται η υπόθεση ότι ο αντιπροσωπευτικός καταναλωτής προσφέρει σταθερή ποσότητα εργασίας (Leontief). Συνεπώς, η συνάρτηση χρησιμότητας δίνεται από την παρακάτω σχέση, ενώ η ελαστικότητα $\sigma_U = 0.1$.

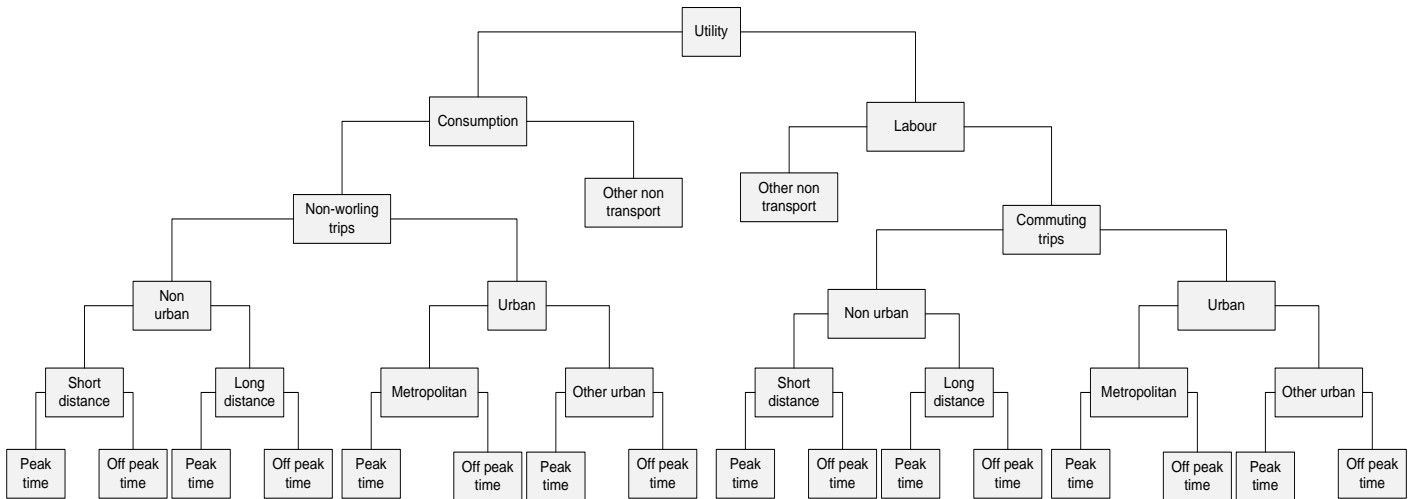
$$U = \bar{U} \left[\theta_{cn} \left(\frac{Cn}{\bar{Cn}} \right)^{\rho_U} + (1 - \theta_{cn}) \left(\frac{Lb}{\bar{Lb}} \right)^{\rho_U} \right]^{\frac{1}{\rho_U}} \quad (4-1)$$

Στο επόμενο επίπεδο, αφού ο αντιπροσωπευτικός καταναλωτής επιλέξει την εργασία, γίνεται η διάκριση σε μετακινήσεις προς τον τόπο εργασίας **Com** (commuting trips) και άλλες δραστηριότητες σχετικές με εργασία **ONI**. Οι τελευταίες έχουν να κάνουν κυρίως με την τηλεργασία που είναι δυνατό να υποκαταστήσει τη μετακίνηση προς τον τόπο εργασίας. Αυτή η δυνατότητα υποκατάστασης είναι αρκετά σημαντική όσον αφορά την προσομοίωση της συμπεριφοράς του καταναλωτή. Κατ' αυτόν τον τρόπο είναι δυνατή η διεξαγωγή σεναρίων όπου υποτίθενται δομικές αλλαγές στη συμπεριφορά των καταναλωτών και της υιοθέτησης πιο βιώσιμων συμπεριφορών με σκοπό τη μείωση περιττών μετακινήσεων που θα έχει απώτερο σκοπό τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου.

$$Lb = \bar{Lb} \left[\theta_{COM} \left(\frac{COM}{\bar{COM}} \right)^{\rho_{Lb}} + (1 - \theta_{COM}) \left(\frac{ONL}{\bar{ONL}} \right)^{\rho_{Lb}} \right]^{\frac{1}{\rho_{Lb}}} \quad (4-2)$$

Στο επίπεδο της κατανάλωσης στον ελεύθερο χρόνο η απόφαση διακρίνεται σε μετακινήσεις που δε σχετίζονται με εργασία **NW** και πραγματοποιούνται στον ελεύθερο χρόνο του καταναλωτή και στην κατανάλωση άλλων αγαθών που δε σχετίζονται με τις μεταφορές **ONc**.

$$Cn = \bar{Cn} \left[\theta_{NW} \left(\frac{NW}{\bar{NW}} \right)^{\rho_{Cn}} + (1 - \theta_{NW}) \left(\frac{ONc}{\bar{ONc}} \right)^{\rho_{Cn}} \right]^{\frac{1}{\rho_{Cn}}} \quad (4-3)$$



Σχήμα 4-2: Πρωτογενές δένδρο απόφασης επιβατικών μετακινήσεων

Στη συνέχεια, η διακριτοποίηση της απόφασης έγκειται στη γεωγραφική ζώνη που θα πραγματοποιηθούν οι μετακινήσεις. Αρχικά, οι μετακινήσεις διακρίνονται σε αστικές **U_β** και υπεραστικές **NU_β**.

$$COM = \bar{COM} \left[\theta_{COM}^{NU} \left(\frac{NU_{COM}}{\bar{NU}_{COM}} \right)^{\rho_{COM}} + (1 - \theta_{COM}^{NU}) \left(\frac{Un_{COM}}{\bar{Un}_{COM}} \right)^{\rho_{COM}} \right]^{\frac{1}{\rho_{COM}}} \quad (4-4)$$

$$NW = \bar{NW} \left[\theta_{NW}^{NU} \left(\frac{NU_{NW}}{\bar{NU}_{NW}} \right)^{\rho_{NW}} + (1 - \theta_{NW}^{NU}) \left(\frac{Un_{NW}}{\bar{Un}_{NW}} \right)^{\rho_{NW}} \right]^{\frac{1}{\rho_{NW}}} \quad (4-5)$$

Οι αστικές μετακινήσεις Un_{β} διακρίνονται σε μετακινήσεις στα γεωγραφικά όρια των μεγάλων μητροπόλεων ME_{β} για κάθε χώρα της Ευρώπης και στα γεωγραφικά όρια άλλων αστικών περιοχών OU_{β} της κάθε χώρας. Ο δείκτης $\beta = \{Com, NW\}$, υποδηλώνει το σκοπό του ταξιδιού και ορίζεται από τα ανώτερα επίπεδα του δένδρου απόφασης. Ο όρος μητρόπολη αναφέρεται στην πολυπληθέστερη πόλη της κάθε χώρας ενώ γίνεται η υπόθεση ότι αντιστοιχεί μία μητρόπολη σε κάθε χώρα. Οι άλλες αστικές περιοχές αντιστοιχούν σε πόλεις που υπερβαίνουν ένα συγκεκριμένο πληθυσμό (συνήθως μεγαλύτερο από 100,000).

$$Un_{\beta} = \overline{Un}_{\beta} \left[\theta_{\beta}^{ME} \left(\frac{ME_{\beta}}{\overline{ME}_{\beta}} \right)^{\rho_{U_{\beta}}} + (1 - \theta_{\beta}^{ME}) \left(\frac{OU_{\beta}}{\overline{OU}_{\beta}} \right)^{\rho_{U_{\beta}}} \right]^{\frac{1}{\rho_{U_{\beta}}}} \quad (4-6)$$

Επιπλέον, οι υπεραστικές μετακινήσεις NU_{β} διακρίνονται σε μεγάλης Lod_{β} (>500 χλμ.) και μικρής απόστασης Shd_{β} (<500 χλμ.). Η διάκριση αυτή γίνεται για να αποδοθεί όσο το δυνατό ρεαλιστικότερα η δυνατότητα υποκατάστασης μεταξύ συγκεκριμένων μέσων μεταφοράς ανά απόσταση. Για παράδειγμα, στις μεγάλες αποστάσεις αποκτά νόημα η ζήτηση για μεταφορές μέσω αεροπλάνου ή επιβατικού τραίνου, ενώ στις μικρότερες αποστάσεις μεγαλύτερη σημασία έχει η ζήτηση για μεταφορά μέσω ιδιωτικού οχήματος και τραίνου. Πιο γενικά:

$$NU_{\beta} = \overline{NU}_{\beta} \left[\theta_{\beta}^{Shd} \left(\frac{Shd_{\beta}}{\overline{Shd}_{\beta}} \right)^{\rho_{NU_{\beta}}} + (1 - \theta_{\beta}^{Shd}) \left(\frac{Lod_{\beta}}{\overline{Lod}_{\beta}} \right)^{\rho_{NU_{\beta}}} \right]^{\frac{1}{\rho_{NU_{\beta}}}} \quad (4-7)$$

Στο επόμενο επίπεδο του δένδρου απόφασης, η μετακίνηση διακρίνεται με βάση τη χρονική στιγμή κατά την οποία πραγματοποιείται. Πράγματι, η διάκριση γίνεται σε περιόδους συμφόρησης (με πυκνή κυκλοφορία) και σε περιόδους μη συμφόρησης. Η περίοδος συμφόρησης είναι περίπου 4 ώρες της ημέρας που αντιστοιχεί στο χρονικό διάστημα της μετακίνησης προς και από την εργασία. Η διάκριση αυτή γίνεται για να αποδοθεί πληρέστερα η έννοια της συμφόρησης και η δυνατότητα απεικόνισης της μεταστροφής των μετακινούμενων από τη χρήση ιδιωτικών μέσων προς μέσα μαζικής μεταφοράς.

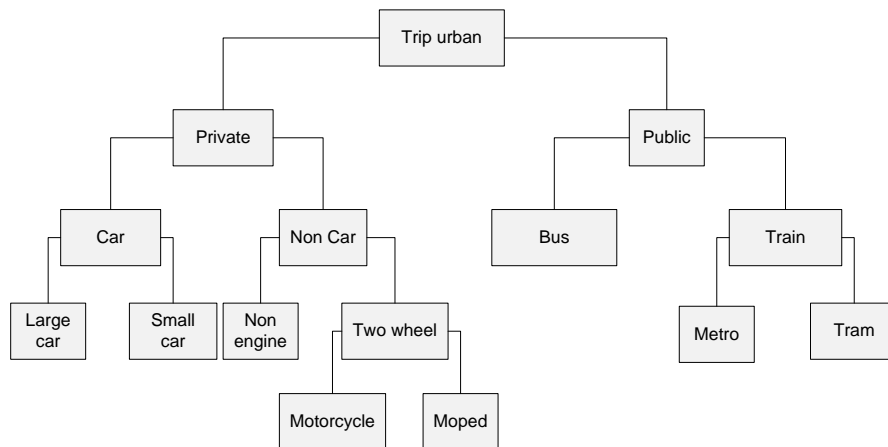
$$Shd_{\beta} = \overline{Shd}_{\beta} \left[\theta_{\beta,Shd}^{PK} \left(\frac{PK_{\beta,Shd}}{\overline{PK}_{\beta,Shd}} \right)^{\rho_{Shd_{\beta}}} + (1 - \theta_{\beta,Shd}^{PK}) \left(\frac{OP_{\beta,Shd}}{\overline{OP}_{\beta,Shd}} \right)^{\rho_{Shd_{\beta}}} \right]^{\frac{1}{\rho_{Shd_{\beta}}}} \quad (4-8)$$

$$Lod_{\beta} = \overline{Lod}_{\beta} \left[\theta_{\beta,Lod}^{PK} \left(\frac{PK_{\beta,Lod}}{\overline{PK}_{\beta,Lod}} \right)^{\rho_{Lod_{\beta}}} + (1 - \theta_{\beta,Lod}^{PK}) \left(\frac{OP_{\beta,Lod}}{\overline{OP}_{\beta,Lod}} \right)^{\rho_{Lod_{\beta}}} \right]^{\frac{1}{\rho_{Lod_{\beta}}}} \quad (4-9)$$

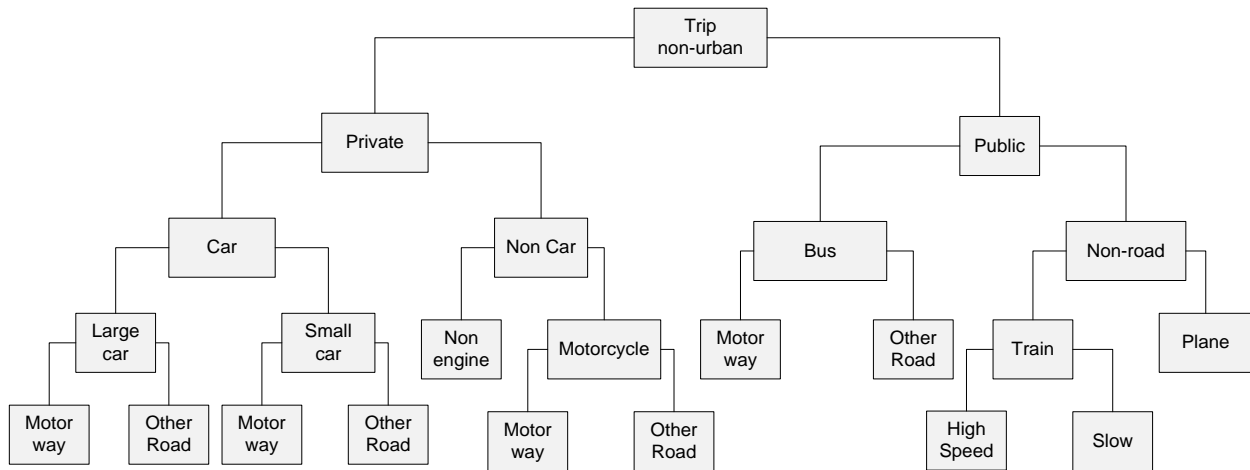
$$ME_{\beta} = \overline{ME}_{\beta} \left[\theta_{\beta,ME}^{PK} \left(\frac{PK_{\beta,ME}}{PK_{\beta,ME}} \right)^{\rho_{ME_{\beta}}} + (1 - \theta_{\beta,ME}^{PK}) \left(\frac{OP_{\beta,ME}}{OP_{\beta,ME}} \right)^{\rho_{ME_{\beta}}} \right]^{\frac{1}{\rho_{ME_{\beta}}}} \quad (4-10)$$

$$OU_{\beta} = \overline{OU}_{\beta} \left[\theta_{\beta,OU}^{PK} \left(\frac{PK_{\beta,OU}}{PK_{\beta,OU}} \right)^{\rho_{OU_{\beta}}} + (1 - \theta_{\beta,OU}^{PK}) \left(\frac{OP_{\beta,OU}}{OP_{\beta,OU}} \right)^{\rho_{OU_{\beta}}} \right]^{\frac{1}{\rho_{OU_{\beta}}}} \quad (4-11)$$

Το πρωτογενές δένδρο απόφασης διασυνδέεται στη συνέχεια με δύο δευτερογενή δένδρα απόφασης που καθορίζουν το μέσο μεταφοράς. Πράγματι, σε κάθε κόμβο του κατώτατου επιπέδου του πρωτογενούς δένδρου απόφασης αντιστοιχεί ένα επιπλέον δευτερογενές δένδρο απόφασης. Πράγματι, οι κόμβοι του πρωτογενούς δένδρου απόφασης που σχετίζονται με την απόφαση μετακίνησης σε αστικό περιβάλλον αντιστοιχούν στο δευτερογενές δένδρο απόφασης μετακίνησης σε αστικό περιβάλλον (Σχήμα 4-3). Όμοια, οι κόμβοι του πρωτογενούς δένδρου απόφασης που σχετίζονται με μετακίνηση σε υπεραστικό περιβάλλον αντιστοιχούν στο δευτερογενές δένδρο απόφασης υπεραστικών μετακινήσεων (Σχήμα 4-4).



Σχήμα 4-3: Δευτερογενές δένδρο απόφασης επιβατικών μετακινήσεων σε αστικό περιβάλλον



Σχήμα 4-4: Δευτερογενές δένδρο απόφασης επιβατικών μετακινήσεων σε υπεραστικό περιβάλλον

Το δευτερογενές δένδρο απόφασης αστικών μετακινήσεων TU (Σχήμα 4-3) αρχικά πραγματοποιεί τη διάκριση μεταξύ της χρήσης ιδιωτικού οχήματος PVT και μέσου μαζικής μετακίνησης PB . Εφόσον ληφθεί η απόφαση για χρήση ιδιωτικού μέσου, ο μετακινούμενος αποφασίζει αν θα μετακινηθεί με αυτοκίνητο C ή άλλο μέσο NC . Τα αυτοκίνητα διακρίνονται με βάση το μέγεθός τους: σε μικρά CS (που αντιστοιχούν στις κατηγορίες A – city car και B – supermini) και σε μεγάλα CL (λοιπές κατηγορίες καθώς και τα βανάκια – light duty vans). Τα άλλα μέσα είναι είτε τα δίκυκλα PW που διακρίνονται σε μοτοσυκλέτες MOC και μοτοποδήλατα MOP είτε σε μέσα μη μηχανοκίνητα NE (π.χ. ποδήλατα). Τα δημόσια μέσα μεταφοράς διακρίνονται σε λεωφορεία BU και σε τρένα TRN . Τα τελευταία αντιστοιχούν σε μετρό MTR είτε σε τραμ TM όπου είναι διαθέσιμα.

Το δευτερογενές δένδρο απόφασης υπεραστικών μετακινήσεων TNU (Σχήμα 4-4) ακολουθεί παρόμοια διάρθρωση με αυτό των αστικών μετακινήσεων. Τα ιδιωτικά οχήματα (αυτοκίνητα και μοτοσυκλέτες) διακρίνονται επιπλέον και με βάση το είδος του δρόμου όπου μετακινούνται ($CSM, CSO, CLM, CLO, MCM, MCO$), όπου η κατάληξη M υποδηλώνει αυτοκινητόδρομο ενώ η κατάληξη O υποδηλώνει όλους τους υπόλοιπους υπεραστικούς δρόμους του οδικού δικτύου. Επιπλέον, τα μη οδικά μέσα μαζικής μετακίνησης διαχωρίζονται σε τρένα, σε αεροπλάνα AIR . Τα τρένα επιπλέον, διακρίνονται σε τρένα συμβατικά SLW και σε τρένα υψηλής ταχύτητας HSP που αναπτύσσουν ταχύτητες μεγαλύτερες των 200-250 χλμ.

Ο δείκτης $\psi = \{Shd, Lod, ME, OU\}$ υποδηλώνει τη γεωγραφική περιοχή ταξιδιού. Τα αστικά ταξίδια ορίζονται $\forall \psi \in \{ME, OU\}$, ενώ τα υπεραστικά ταξίδια $\forall \psi \in \{Shd, Lod\}$.

$$TU_{\beta,\psi} = \overline{TU_{\beta,\psi}} \left[\theta_{\beta,\psi}^{PVT} \left(\frac{PVT_{\beta,\psi}}{PVT_{\beta,\psi}} \right)^{\rho_{TU_{\beta,\psi}}} + (1 - \theta_{\beta,\psi}^{PVT}) \left(\frac{PB_{\beta,\psi}}{PB_{\beta,\psi}} \right)^{\rho_{TU_{\beta,\psi}}} \right]^{\frac{1}{\rho_{TU_{\beta,\psi}}}} \quad (4-12)$$

$$TNU_{\beta,\psi} = \overline{TNU}_{\beta,\psi} \left[\theta_{\beta,\psi}^{PVT} \left(\frac{PVT_{\beta,\psi}}{\overline{PVT}_{\beta,\psi}} \right)^{\rho_{TNU_{\beta,\psi}}} + (1 - \theta_{\beta,\psi}^{PVT}) \left(\frac{PB_{\beta,\psi}}{\overline{PB}_{\beta,\psi}} \right)^{\rho_{TNU_{\beta,\psi}}} \right]^{\frac{1}{\rho_{TNU_{\beta,\psi}}}} \quad (4-13)$$

Εξισώσεις ιδιωτικού μέσου μεταφοράς

$$PVT_{\beta,\psi} = \overline{PVT}_{\beta,\psi} \left[\theta_{\beta,\psi}^C \left(\frac{C_{\beta,\psi}}{\overline{C}_{\beta,\psi}} \right)^{\rho_{PVT_{\beta,\psi}}} + (1 - \theta_{\beta,\psi}^C) \left(\frac{NC_{\beta,\psi}}{\overline{NC}_{\beta,\psi}} \right)^{\rho_{PVT_{\beta,\psi}}} \right]^{\frac{1}{\rho_{PVT_{\beta,\psi}}}} \quad (4-14)$$

$$C_{\beta,\psi} = \overline{C}_{\beta,\psi} \left[\theta_{\beta,\psi}^{CL} \left(\frac{CL_{\beta,\psi}}{\overline{CL}_{\beta,\psi}} \right)^{\rho_{C_{\beta,\psi}}} + (1 - \theta_{\beta,\psi}^{CL}) \left(\frac{CS_{\beta,\psi}}{\overline{CS}_{\beta,\psi}} \right)^{\rho_{C_{\beta,\psi}}} \right]^{\frac{1}{\rho_{C_{\beta,\psi}}}} \quad (4-15)$$

$$CL_{\beta,\psi \in \{Shd,Lod\}} = \overline{CL}_{\beta,\psi} \left[\theta_{\beta,\psi}^{CLM} \left(\frac{CLM_{\beta,\psi}}{\overline{CLM}_{\beta,\psi}} \right)^{\rho_{CL_{\beta,\psi}}} + (1 - \theta_{\beta,\psi}^{CLM}) \left(\frac{CLO_{\beta,\psi}}{\overline{CLO}_{\beta,\psi}} \right)^{\rho_{CL_{\beta,\psi}}} \right]^{\frac{1}{\rho_{CL_{\beta,\psi}}}} \quad (4-16)$$

$$CS_{\beta,\psi \in \{Shd,Lod\}} = \overline{CS}_{\beta,\psi} \left[\theta_{\beta,\psi}^{CSM} \left(\frac{CSM_{\beta,\psi}}{\overline{CSM}_{\beta,\psi}} \right)^{\rho_{CS_{\beta,\psi}}} + (1 - \theta_{\beta,\psi}^{CSM}) \left(\frac{CSO_{\beta,\psi}}{\overline{CSO}_{\beta,\psi}} \right)^{\rho_{CS_{\beta,\psi}}} \right]^{\frac{1}{\rho_{CS_{\beta,\psi}}}} \quad (4-17)$$

$$NC_{\beta,\psi} = \overline{NC}_{\beta,\psi} \left[\theta_{\beta,\psi}^{NE} \left(\frac{NE_{\beta,\psi}}{\overline{NE}_{\beta,\psi}} \right)^{\rho_{NC_{\beta,\psi}}} + (1 - \theta_{\beta,\psi}^{NE}) \left(\frac{PW_{\beta,\psi}}{\overline{PW}_{\beta,\psi}} \right)^{\rho_{NC_{\beta,\psi}}} \right]^{\frac{1}{\rho_{NC_{\beta,\psi}}}} \quad (4-18)$$

$$PW_{\beta,\psi} = \overline{PW}_{\beta,\psi} \left[\theta_{\beta,\psi}^{MOC} \left(\frac{MOC_{\beta,\psi}}{\overline{MOC}_{\beta,\psi}} \right)^{\rho_{PW_{\beta,\psi}}} + (1 - \theta_{\beta,\psi}^{MOC}) \left(\frac{MOP_{\beta,\psi}}{\overline{MOP}_{\beta,\psi}} \right)^{\rho_{PW_{\beta,\psi}}} \right]^{\frac{1}{\rho_{PW_{\beta,\psi}}}} \quad (4-19)$$

$$MOC_{\beta,\psi \in \{Shd,Lod\}} = \overline{MOC}_{\beta,\psi} \left[\theta_{\beta,\psi}^{MCM} \left(\frac{MCM_{\beta,\psi}}{\overline{MCM}_{\beta,\psi}} \right)^{\rho_{MOC_{\beta,\psi}}} + (1 - \theta_{\beta,\psi}^{MCM}) \left(\frac{MCO_{\beta,\psi}}{\overline{MCO}_{\beta,\psi}} \right)^{\rho_{MOC_{\beta,\psi}}} \right]^{\frac{1}{\rho_{MOC_{\beta,\psi}}}} \quad (4-20)$$

Εξισώσεις μέσων μαζικής μεταφοράς

$$PB_{\beta,\psi \in \{ME,OU\}} = \overline{PB}_{\beta,\psi} \left[\theta_{\beta,\psi}^{BU} \left(\frac{BU_{\beta,\psi}}{\overline{BU}_{\beta,\psi}} \right)^{\rho_{PB\beta,\psi}} + (1 - \theta_{\beta,\psi}^{BU}) \left(\frac{TRN_{\beta,\psi}}{\overline{TRN}_{\beta,\psi}} \right)^{\rho_{PB\beta,\psi}} \right]^{\frac{1}{\rho_{PB\beta,\psi}}} \quad (4-21)$$

$$PB_{\beta,\psi \in \{Shd,Lod\}} = \overline{PB}_{\beta,\psi} \left[\theta_{\beta,\psi}^{BU} \left(\frac{BU_{\beta,\psi}}{\overline{BU}_{\beta,\psi}} \right)^{\rho_{PB\beta,\psi}} + (1 - \theta_{\beta,\psi}^{BU}) \left(\frac{NRD_{\beta,\psi}}{\overline{NRD}_{\beta,\psi}} \right)^{\rho_{PB\beta,\psi}} \right]^{\frac{1}{\rho_{PB\beta,\psi}}} \quad (4-22)$$

$$NRD_{\beta,\psi \in \{Shd,Lod\}} = \overline{NRD}_{\beta,\psi} \left[\theta_{\beta,\psi}^{AIR} \left(\frac{AIR_{\beta,\psi}}{\overline{AIR}_{\beta,\psi}} \right)^{\rho_{NRB\beta,\psi}} + (1 - \theta_{\beta,\psi}^{AIR}) \left(\frac{NRD_{\beta,\psi}}{\overline{NRD}_{\beta,\psi}} \right)^{\rho_{NRB\beta,\psi}} \right]^{\frac{1}{\rho_{NRB\beta,\psi}}} \quad (4-23)$$

$$BU_{\beta,\psi \in \{Shd,Lod\}} = \overline{BU}_{\beta,\psi} \left[\theta_{\beta,\psi}^{BUM} \left(\frac{BUM_{\beta,\psi}}{\overline{BUM}_{\beta,\psi}} \right)^{\rho_{BU\beta,\psi}} + (1 - \theta_{\beta,\psi}^{BUM}) \left(\frac{BUO_{\beta,\psi}}{\overline{BUO}_{\beta,\psi}} \right)^{\rho_{BU\beta,\psi}} \right]^{\frac{1}{\rho_{BU\beta,\psi}}} \quad (4-24)$$

$$TRN_{\beta,\psi \in \{ME,OU\}} = \overline{TRN}_{\beta,\psi} \left[\theta_{\beta,\psi}^{TM} \left(\frac{TM_{\beta,\psi}}{\overline{TM}_{\beta,\psi}} \right)^{\rho_{TRN\beta,\psi}} + (1 - \theta_{\beta,\psi}^{TM}) \left(\frac{MTR_{\beta,\psi}}{\overline{MTR}_{\beta,\psi}} \right)^{\rho_{TRN\beta,\psi}} \right]^{\frac{1}{\rho_{TRN\beta,\psi}}} \quad (4-25)$$

$$TRN_{\beta,\psi \in \{Shd,Lod\}} = \overline{TRN}_{\beta,\psi} \left[\theta_{\beta,\psi}^{HSP} \left(\frac{HSP_{\beta,\psi}}{\overline{HSP}_{\beta,\psi}} \right)^{\rho_{TRN\beta,\psi}} + (1 - \theta_{\beta,\psi}^{HSP}) \left(\frac{SLW_{\beta,\psi}}{\overline{SLW}_{\beta,\psi}} \right)^{\rho_{TRN\beta,\psi}} \right]^{\frac{1}{\rho_{TRN\beta,\psi}}} \quad (4-26)$$

4.2.2 Μετακινήσεις επιχειρήσεων

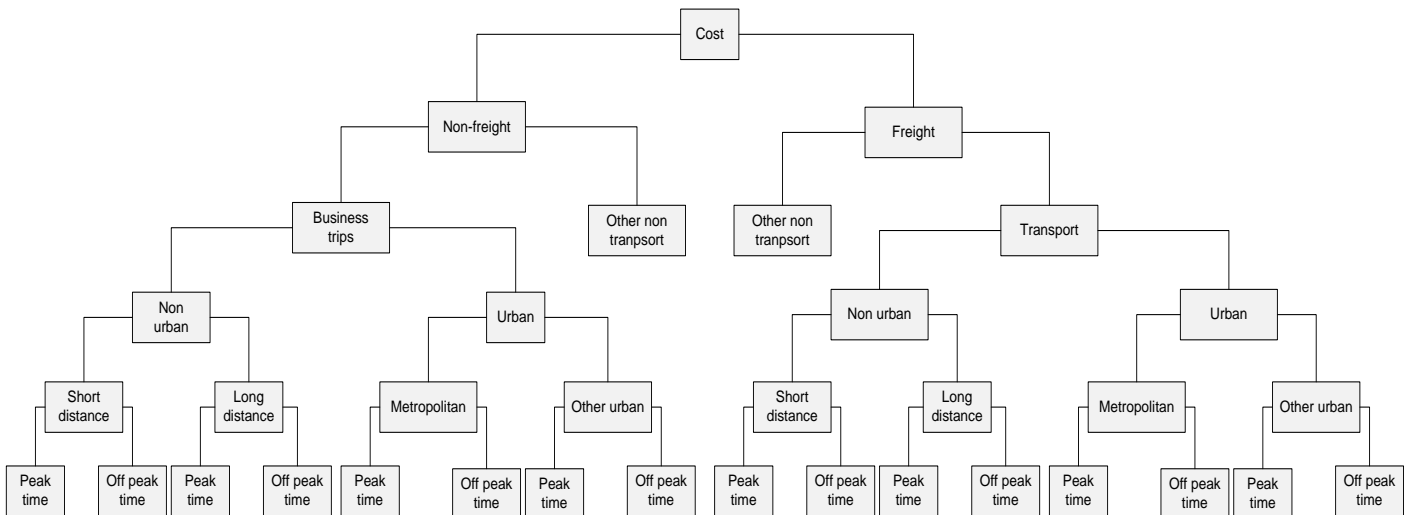
Οι μετακινήσεις εμπορευμάτων των επιχειρήσεων καθώς και των εργαζομένων αποτελούν μέρος της παραγωγικής διαδικασίας των επιχειρήσεων. Στο υπομοντέλο της ζήτησης γίνεται χρήση συνάρτησης παραγωγής σταθερής ελαστικότητας υποκατάστασης για να απεικονίσει τις αποφάσεις για μεταφορά εμπορευμάτων με βάση το μεταφορικό μέσο, τις μετακινήσεις των εργαζομένων για λόγους εργασίας και άλλων εισόδων. Το παραπάνω μείγμα προκύπτει σαν αποτέλεσμα βελτιστοποίησης με

σκοπό τη μεγιστοποίηση των επιπέδων παραγωγής υπό τον περιορισμό οι συνολικές δαπάνες να μην ξεπεράσουν ένα συνολικό κόστος (δυσικό πρόβλημα επιχείρησης).

4.2.2.1 Διάρθρωση δένδρου απόφασης μετακινήσεων σχετικών με επιχειρήσεις

Η συνάρτηση παραγωγής Q αναπαρίσταται υπό μορφή δένδρου απόφασης με πολλά επίπεδα αποφάσεων, παρόμοια με τη διαμόρφωση του δένδρου χρησιμότητας του καταναλωτή. Αρχικά, η απόφαση διακρίνεται σε μετακινήσεις εμπορευμάτων Fr και εργαζομένων NF . Σε επίπεδο εργαζομένων γίνεται η διάκριση σε επαγγελματικά ταξίδια και σε μια ευρύτερη κατηγορία που δε σχετίζεται με μετακινήσεις (π.χ. περισσότερη χρήση μέσων τηλεπικοινωνιών όπως το Skype για μείωση των ταξιδιών). Στο επίπεδο των εμπορευμάτων, ομοίως η απόφαση διακρίνεται στη μεταφορά τους ή όχι. Η απόφαση αυτή είναι σχετική με την τακτική της επιχείρησης είτε να αποθηκεύει μεγάλο στοκ και να πραγματοποιεί μεγάλες αποστολές των προϊόντων της ανά μακρά χρονικά διαστήματα είτε να αποθηκεύει μικρό στοκ και με πολλές μικρές αποστολές των προϊόντων της (Σχήμα 4-5).

$$Q = \bar{Q} \left[\theta_{NF} \left(\frac{NF}{\bar{NF}} \right)^{\rho_Q} + (1 - \theta_{NF}) \left(\frac{Fr}{\bar{Fr}} \right)^{\rho_Q} \right]^{\frac{1}{\rho_Q}} \quad (4-27)$$



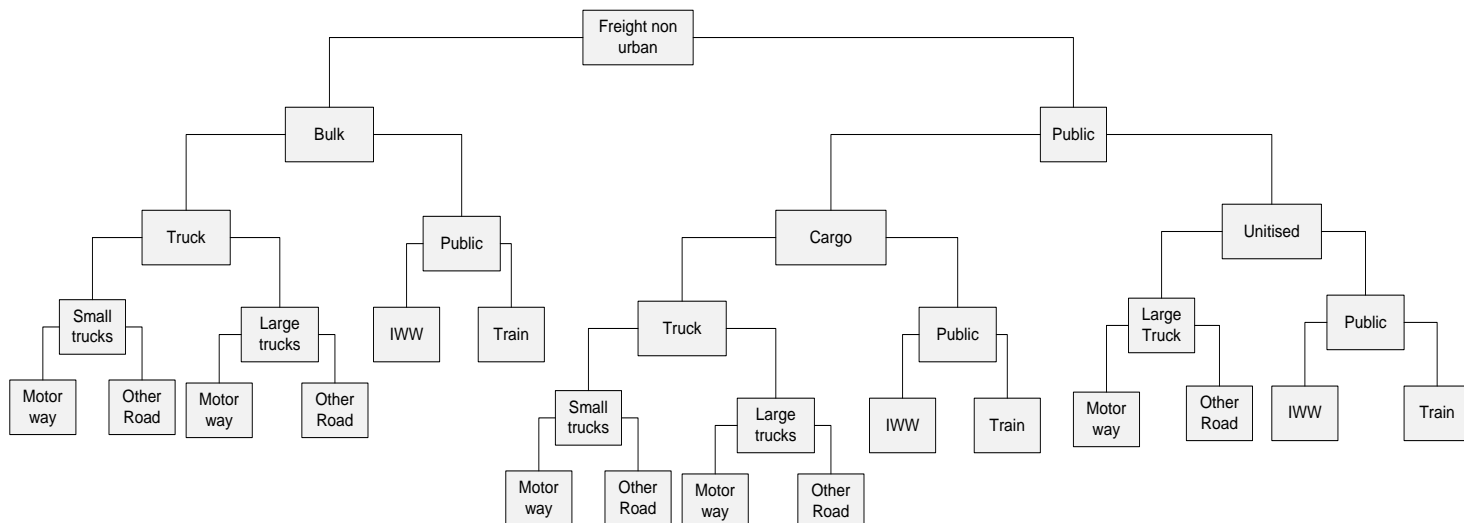
Σχήμα 4-5: Πρωτογενές δένδρο απόφασης μετακινήσεων σχετικών με επιχειρήσεις

Τα επιβατικά επαγγελματικά ταξίδια ακολουθούν την ίδια διακριτοποίηση με τα επιβατικά ταξίδια των νοικοκυριών. Ομοίως, διαχωρίζονται σε αστικά και υπεραστικά ταξίδια που απεικονίζονται στα δευτερογενή δένδρα απόφασης αστικών και υπεραστικών επαγγελματικών μετακινήσεων. Η διάρθρωση των δένδρων αυτών

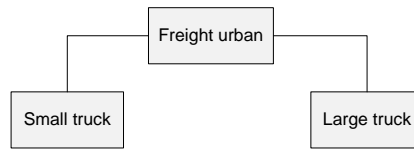
είναι όμοια με αυτά των επιβατικών μετακινήσεων. Βέβαια, οι ελαστικότητες που χαρακτηρίζουν την υποκατάσταση μεταξύ των επιλογών είναι διαφορετικές αφού ο σκοπός των μετακινήσεων αυτών είναι διαφορετικός (επαγγελματικός σκοπός).

Οι μεταφορές εμπορευμάτων διακρίνονται με βάση το είδος του φορτίου σε bulk, unitised, general cargo. Αυτά τα τρία είδη φορτίου στη συνέχεια διαχωρίζονται με βάση το μέσο μεταφοράς ή και το δίκτυο μεταφοράς. Το δίκτυο μεταφοράς είναι είτε οδικό, είτε σιδηροδρομικό είτε θαλάσσιο (κανάλια και εθνικές θαλάσσιες μεταφορές).

Το υπεραστικό δίκτυο μεταφορών εμπορευμάτων περιλαμβάνει τις μεταφορές εμπορευμάτων μέσω φορτηγών σε εθνικά οδικά δίκτυα καθώς και σε άλλα υπεραστικά οδικά δίκτυα (Σχήμα 4-6). Επίσης, συμπεριλαμβάνονται μεταφορές εμπορευμάτων μέσω σιδηροδρόμου καθώς και δια θαλάσσης μέσω καναλιών. Οι οδικές μεταφορές εμπορευμάτων διακρίνονται επιπλέον με βάση την κατηγορία του φορτηγού. Τα φορτηγά αρχικά διακρίνονται σε μικρά και μεγάλα με βάση το μέγεθός τους και τη μάζα του φορτίου που μεταφέρουν. Στη συνέχεια αυτές οι δύο κατηγορίες διακρίνονται επιπλέον σε ελαφρά φορτηγά (< 3.5 τόνων μεικτού βάρους) και σε τέσσερις κατηγορίες βαρέων φορτηγών (3.5 - 7.5 τόνων, 7.5-16 τόνων, 16-32 τόνων, >32 τόνων μεικτού βάρους). Το δευτερογενές δένδρο απόφασης αστικών μεταφορών εμπορευμάτων είναι λιγότερο σύνθετο και γίνεται η υπόθεση ότι περιλαμβάνει μόνο οδικές μεταφορές. Οι τελευταίες διακρίνονται με βάση το είδος του φορτηγού (Σχήμα 4-7).



Σχήμα 4-6: Δευτερογενές δένδρο απόφασης υπεραστικών μεταφορών εμπορευμάτων



Σχήμα 4-7: Δευτερογενές δένδρο απόφασης αστικών μεταφορών εμπορευμάτων

4.2.3 Προβλήματα βελτιστοποίησης καταναλωτή και επιχείρησης

4.2.3.1 Συνθήκες Kuhn-Tucker

Η μεθοδολογία επίλυσης των προβλημάτων βελτιστοποίησης που περιγράφονται στην παρούσα διατριβή προϋποθέτει την κατασκευή της συνάρτησης Lagrange και την εύρεση των βέλτιστων λύσεων μέσω της χρήσης των συνθηκών Kuhn-Tucker.

Έστω η συνάρτηση $f(x_1, \dots, x_n)$ που θέλουμε να μεγιστοποιήσουμε υπό τους περιορισμούς:

$$g^i(x_1, \dots, x_n) \geq 0 \quad i = 1, \dots, m$$

$$x_1, \dots, x_n \geq 0$$

Ο πρώτος περιορισμός θέτει τις σχέσεις μεταξύ των μεταβλητών, ενώ ο δεύτερος περιορισμός προϋποθέτει ότι οι μεταβλητές δεν μπορούν να λάβουν αρνητικές τιμές. Για την εύρεση της βέλτιστης λύσης του προβλήματος καταστρώνεται η συνάρτηση Lagrange ως εξής:

$$F(x_1, \dots, x_n, \lambda_1, \dots, \lambda_m) = f(x_1, \dots, x_n) + \sum_{i=1}^m \lambda_i g^i(x_1, \dots, x_n)$$

Οι συνθήκες Kuhn-Tucker έχουν ως εξής:

$$\frac{\partial F}{\partial x_j} = \frac{\partial f}{\partial x_j} + \sum_{i=1}^m \lambda_i \frac{\partial g^i}{\partial x_j} \leq 0 \quad j = 1, \dots, n$$

$$\frac{\partial F}{\partial \lambda_i} = g^i \geq 0 \quad i = 1, \dots, m$$

$$x_j \geq 0 \quad j = 1, \dots, n$$

$$\lambda_i \geq 0 \quad i = 1, \dots, m$$

$$\frac{\partial F}{\partial x_j} x_j = 0 \quad j = 1, \dots, n$$

$$\lambda_i g^i = 0 \quad i = 1, \dots, m$$

Πίνακας 4-1: Δείκτες και βασικές μεταβλητές και παράμετροι του μοντέλου

Δείκτες:	
i	Μεταφορικό μέσο
k	Τύπος τεχνολογίας/καυσίμου
β	Σκοπός μετακίνησης
ψ	Περιοχή-Ωρα μετακίνησης
a	Ηλικία εξοπλισμού
t	Χρονική περίοδος
Μεταβλητές:	
$NS_{i,k}$	Επενδύσεις σε νέο εξοπλισμό (οχήματα)
$M_{i,k,\beta,\psi}$	Ετήσια διανυθείσα απόσταση
$vc_{i,k,\beta,\psi}$	Ενδογενή μεταβλητά κόστη αντικειμενικής
$pc_{i,k,\beta,\psi}$	Ενδογενή «κρυφά» κόστη αντικειμενικής
$I_{i,k}$	Ενδογενές κόστος επένδυσης εξοπλισμού
$X_{i,\beta,\psi}$	Ζήτηση για επιβατική μεταφορική δραστηριότητα (επιβατο-χλμ.)
$Y_{i,\beta,\psi}$	Ζήτηση για εμπορευματική μεταφορική δραστηριότητα (τονο-χλμ.)
$vcost_{i,k}$	Τιμή πώλησης νέου εξοπλισμού
$fcl_{i,k,\beta,\psi}$	Κόστος καυσίμου
$sf_{i,k,\psi}$	Ενδογενής ειδική κατανάλωση
$ct_{i,\beta,\psi}$	Κόστος χρόνου
$pec_{i,\beta,\psi}$	Τιμή μεταφορικής υπηρεσίας
$p_{i,\beta,\psi}$	Γενικευμένη τιμή μεταφοράς
$tvt_{i,\psi}$	Χρόνος ταξιδιού
$vkmi_{i,\psi}$	Ζήτηση για μεταφορικές υπηρεσίες (οχηματο-χλμ.)
$U_{i,\psi}$	Μέση ταχύτητα μετακίνησης
$share_{i,k,t}$	Μερίδιο επιλογής νέων τεχνολογιών/τύπων εξοπλισμού
τ_i	Δυική τιμή περιβαλλοντολογικού περιορισμού κατασκευαστών
$\nu_{i,k}$	Δυική τιμή περιορισμού ανώτατης χιλιομετρικής απόστασης
$cnal$	Δυική τιμή περιορισμού συνολικών εκπομπών CO ₂
$\delta\pi_{i,\beta,\psi}$	Δυική τιμή κάλυψης περιορισμού επιβατικής δραστηριότητας
$\delta\varphi_{i,\beta,\psi}$	Δυική τιμή κάλυψης περιορισμού εμπορευματικής δραστηριότητας
μ	Δυική τιμή περιορισμού δαπάνης επιχείρησης
λ	Δυική τιμή εισοδηματικού περιορισμού καταναλωτών
Παράμετροι:	
$S_{i,k}$	Εξοπλισμός από προηγούμενη χρονική περίοδο
$fc_{i,k}$	Σταθερά κόστη αντικειμενικής
$\gamma_{i,k}$	Τοκοχρεολύσιο
$\delta_{i,k}$	Επιτόκιο αναγωγής
n_i	Οικονομική διάρκεια επένδυσης
$\overline{M}_{o_{i,k}}$	Ανώτατο όριο χιλιομετρικής απόστασης
$en\upsilon l_{i,k}$	Τεχνολογικά χαρακτηριστικά νέου εξοπλισμού
$En\upsilon R_l$	Τεχνολογικό όριο στους κατασκευαστές εξοπλισμού
$\overline{vcost}_{i,k}$	Τιμή πώλησης δίχως εφαρμογή τεχνολογικών ορίων
fp	Τιμή καυσίμου
em_k	Ειδικές εκπομπές ανά τύπο οχήματος

$vt_{i,\beta,\psi}$	Αξία του χρόνου
$of_{i,\beta,\psi}$	Βαθμός πληρότητας οχήματος
$TotCO_2$	Περιορισμός συνολικών εκπομπών CO ₂
R	Περιορισμός εισοδήματος καταναλωτών
C_0	Περιορισμός δαπάνης επιχείρησης
$sp_{i,a}$	Πιθανότητα επιβίωσης εξοπλισμού διαχρονικά

4.2.3.2 Πρόβλημα καταναλωτή

Ο αντιπροσωπευτικός καταναλωτής επιθυμεί να μεγιστοποιήσει τη συνάρτηση χρησιμότητάς του U η οποία εξαρτάται από τις ποσότητες μετακίνησης και την κατανάλωση άλλων αγαθών. Η συνάρτηση χρησιμότητας ορίζεται από την εξίσωση (4-1) η οποία αναλύεται περαιτέρω στις εξισώσεις (4-2) - (4-26). Ας θεωρήσουμε το διάνυσμα $X_{i,\beta,\psi}$ που περιλαμβάνει τους όγκους της μεταφορικής δραστηριότητας των τελευταίων κόμβων του δένδρου απόφασης του προβλήματος του καταναλωτή και που ορίζεται για κάθε επιβατικό μεταφορικό μέσο $i \in \{HSP, SLW, TM, MTR, BU, AIR, MOC, MOP, NE, CS, CL\}$, για σκοπό β και περιοχή και ώρα μετακίνησης ψ . Επιπλέον, ο καταναλωτής υπόκειται σε περιορισμό εισοδήματος R . Έστω, επίσης, $p_{i,\beta,\psi}$ οι γενικευμένες τιμές των μεταφορικών υπηρεσιών ανά μεταφορικό μέσο. Τότε το πρόβλημα του καταναλωτή ορίζεται ως εξής:

$$Max U = \mathbf{u}(X_{i,\beta,\psi}) \quad (4-28)$$

s.t.

$$R - \sum_{i,\beta,\psi} p_{i,\beta,\psi} \cdot X_{i,\beta,\psi} \geq 0 \quad (4-29)$$

$$X_{i,\beta,\psi} \geq 0$$

Για την επίλυση του προβλήματος του αντιπροσωπευτικού καταναλωτή ορίζεται η ακόλουθη συνάρτηση Lagrange \mathcal{L} , όπου η μεταβλητή λ είναι ο πολλαπλασιαστής Lagrange για τον εισοδηματικό περιορισμό:

$$\mathcal{L} = \mathbf{u}(X_{i,\beta,\psi}) + \lambda \left(R - \sum_{i,\beta,\psi} p_{i,\beta,\psi} \cdot X_{i,\beta,\psi} \right) \quad (4-30)$$

Οι συνθήκες KKT έχουν ως εξής:

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial X_{i,\beta,\psi}} \leq 0 \quad \perp \quad X_{i,\beta,\psi} \geq 0 \quad (4-31)$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \lambda} \geq 0 \quad \perp \quad \lambda \geq 0 \quad (4-32)$$

Το σύμβολο \perp υποδεικνύει τη συμπληρωματικότητα μεταξύ του όρου $\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial X_{l,\beta,\psi}}$ και του $X_{l,\beta,\psi}$. Στην περίπτωση που η πρώτη εξίσωση (4-31) ικανοποιείται σαν ισότητα, τότε η μεταβλητή $X_{l,\beta,\psi}$ λαμβάνει μόνο θετικές τιμές. Αντίθετα, αν $\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial X_{l,\beta,\psi}} < 0$, τότε η μεταβλητή $X_{l,\beta,\psi} = 0$. Το ίδιο ισχύει και για τον εισοδηματικό περιορισμό (4-32), όπου ο πολλαπλασιαστής Lagrange λαμβάνει θετικές τιμές μόνο αν ο περιορισμός εισοδήματος ικανοποιείται σαν ισότητα. Πιο αναλυτικά:

Η παράγωγος $\frac{\partial u}{\partial X_{l,\beta,\psi}}$ υπολογίζεται αναλυτικά από την παραγωγή όλων των εξισώσεων (4-1) - (4-26) ως προς τις επιμέρους ποσότητες κατανάλωσης από τις οποίες εξαρτώνται ανά επίπεδο του δένδρου απόφασης.

4.2.3.3 Πρόβλημα επιχείρησης

Η αντιπροσωπευτική επιχείρηση επιθυμεί την ελαχιστοποίηση του κόστους R της υπό τον περιορισμό να παράγει συγκεκριμένη ποσότητα παραγωγής. Το δυικό πρόβλημα του προβλήματος της βελτιστοποίησης της επιχείρησης, σύμφωνα με τις αρχές της μικροοικονομικής θεωρίας αποσκοπεί στη μεγιστοποίηση της ποσότητας παραγωγής υπό τον περιορισμό οι συνολικές δαπάνες να μην ξεπεράσουν ένα συγκεκριμένο ποσό C_0 . Έστω Q η συνάρτηση παραγωγής και $Y_{l,\beta,\psi}$ είναι οι συντελεστές παραγωγής που στο συγκεκριμένο πρόβλημα αντιστοιχούν στο όγκους δραστηριότητας των μέσων μεταφοράς εμπορευμάτων και των μετακινήσεων των εργαζομένων. Οι μοναδιαίες δαπάνες των συντελεστών παραγωγής ορίζονται ως $p_{l,\beta,\psi}$. Το δυικό πρόβλημα της επιχείρησης είναι το εξής:

$$Max Q = q(Y_{l,\beta,\psi}) \tag{4-33}$$

s.t.

$$C_0 - \sum_{l,\beta,\psi} p_{l,\beta,\psi} \cdot Y_{l,\beta,\psi} \geq 0 \tag{4-34}$$

$$Y_{l,\beta,\psi} \geq 0$$

Για την επίλυση του προβλήματος της αντιπροσωπευτικής επιχείρησης ορίζεται η ακόλουθη συνάρτηση Lagrange \mathcal{F} , όπου η μεταβλητή μ είναι ο πολλαπλασιαστής Lagrange για τον περιορισμό δαπανών:

$$\mathcal{F} = q(Y_{l,\beta,\psi}) + \mu \left(C_0 - \sum_{l,\beta,\psi} p_{l,\beta,\psi} \cdot Y_{l,\beta,\psi} \right) \tag{4-35}$$

Οι συνθήκες KKT έχουν ως εξής:

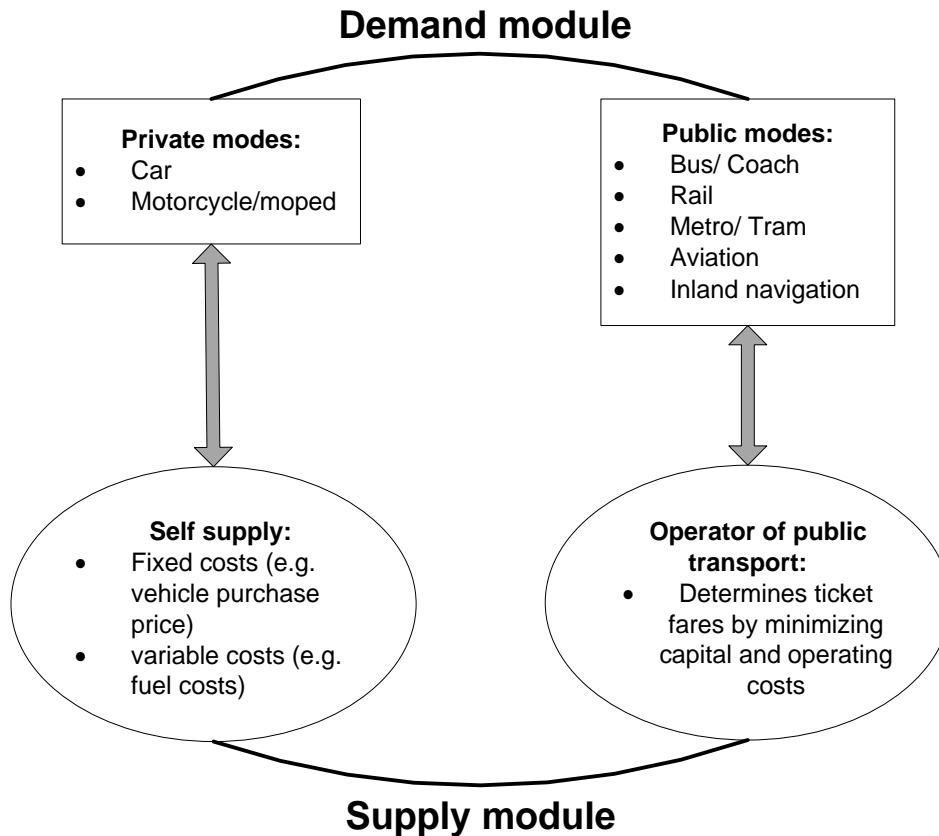
$$\frac{\partial \mathcal{F}}{\partial Y_{i,\beta,\psi}} \leq 0 \quad \perp \quad Y_{i,\beta,\psi} \geq 0 \quad (4-36)$$

$$\frac{\partial \mathcal{F}}{\partial \mu} \geq 0 \quad \perp \quad \mu \geq 0 \quad (4-37)$$

Ομοίως με το πρόβλημα του καταναλωτή, η παράγωγος $\frac{\partial q}{\partial Y_{i,\beta,\psi}}$ υπολογίζεται αναλυτικά από την παραγωγή όλων των εξισώσεων για όλα τα επίπεδα του δένδρου απόφασης της επιχείρησης.

4.3 Το υπομοντέλο προσφοράς μεταφορικών υπηρεσιών

Το υπομοντέλο προσφοράς καθορίζει το μείγμα των τύπων οχημάτων και των τεχνολογιών για κάθε μέσο μεταφοράς καθώς και το βαθμό χρήσης όλων των τύπων οχήματος έτσι ώστε να καλύπτεται η ζήτηση που προκύπτει από το υπομοντέλο της ζήτησης. Η απόφαση λαμβάνεται με οικονομικά κριτήρια έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθεί το συνολικό κόστος. Το υπομοντέλο προσφοράς επιλύει το πρόβλημα της ελαχιστοποίησης κόστους (από τη μικροοικονομική θεωρία) υπό το βασικό περιορισμό της κάλυψης της ζήτησης και άλλους περιορισμούς (π.χ. περιβαλλοντολογικούς, κλπ.). Μετά την επίλυση του προβλήματος της βελτιστοποίησης και με βάση τη λύση που προκύπτει, καθορίζεται η τιμολόγηση της χρήσης κάθε μεταφορικού μέσου η οποία επηρεάζει το υπομοντέλο της ζήτησης. Δηλαδή, η αλληλεπίδραση των υπομοντέλων της προσφοράς και της ζήτησης καθορίζεται με βάση τις τιμές που προκύπτουν από την επίλυση του υπομοντέλου της προσφοράς.



Σχήμα 4-8: Αλληλεπίδραση των υπομοντέλων προσφοράς και ζήτησης

Η χρήση των μέσων μεταφοράς γίνεται με σκοπό να καλυφτεί η ζήτηση που προκύπτει από το υπομοντέλο της ζήτησης. Υπενθυμίζεται ότι η ζήτηση διαχωρίζεται με βάση στοιχεία γεωγραφικά (περιοχή μετακίνησης), το σκοπό, την ώρα ταξιδιού. Τα στοιχεία αυτά λαμβάνονται υπόψη στο υπομοντέλο της προσφοράς και κατ' επέκταση στην τιμολόγηση η οποία διαφέρει ανά είδος ταξιδιού.

Οι βασικές μεταβλητές του υπομοντέλου της ζήτησης είναι ο συνολικός αριθμός των επενδύσεων σε νέα οχήματα που απαιτούνται κάθε χρονική περίοδο για την κάλυψη της ζήτησης, το μείγμα των τεχνολογιών που απαρτίζει τις νέες επενδύσεις καθώς και ο ρυθμός χρησιμοποίησης όλων των ειδών των οχημάτων. Οι επιλογές σε συγκεκριμένα είδη τεχνολογιών και καυσίμων για κάθε χρονική περίοδο κληρονομούνται και σε επόμενες χρονικές περιόδους. Το υπομοντέλο της προσφοράς ακολουθεί τη μέθοδο καταγραφής των διαφόρων γενιών τεχνολογιών με βάση τα χαρακτηριστικά τους (κόστος, κατανάλωση).

4.3.1 Το πρόβλημα των παραγωγών

Στο υπομοντέλο προσφοράς, θεωρούνται δύο αντιπροσωπευτικοί παραγωγοί π που αποσκοπούν στην ελαχιστοποίηση των δαπανών τους. Ο πρώτος

αντιπροσωπευτικός παραγωγός είναι ο ίδιος ο αντιπροσωπευτικός καταναλωτής που αποφασίζει πώς θα καλύψει τη ζήτησή του για μεταφορά. Ο δεύτερος αντιπροσωπευτικός παραγωγός είναι μια μεταφορική εταιρεία που παρέχει μεταφορικές υπηρεσίες τόσο προς τον καταναλωτή (μέσα μαζικής μεταφοράς) όσο και προς την εταιρεία (μέσα εμπορευματικών μεταφορών). Οι αντιπροσωπευτικοί παραγωγοί επιλέγουν τη βέλτιστη χρησιμοποίηση του διαθέσιμου στόλου οχημάτων, καθορίζοντας τις απαραίτητες επενδύσεις σε νέο κεφαλαιουχικό εξοπλισμό $NS_{i,k}$ ανά μεταφορικό μέσο i και τεχνολογία k και την ετήσια διανυθείσα απόσταση $M_{i,k,\beta,\psi}$ ανά μεταφορικό μέσο, τεχνολογία, σκοπό β και περιοχή-ώρα μετακίνησης ψ . Η ιδιαιτερότητα του συγκεκριμένου προβλήματος έγκειται στο γεγονός ότι ο παραγωγός είναι σε θέση να αξιοποιήσει το ήδη διαθέσιμο στόλο οχημάτων $s_{i,k}$ που υπολογίζεται δυναμικά συναρτήσει του συνολικού στόλου κατά την προηγούμενη χρονική περίοδο.

Ο κάθε αντιπροσωπευτικός παραγωγός θεωρεί τη συνάρτηση παραγωγής $Z_{\pi}(M_{i,k,\beta,\psi}, NS_{i,k})$ που προσδιορίζει την παραγωγή των μεταφορικών υπηρεσιών για κάθε μεταφορικό μέσο. Η συνάρτηση παραγωγής έχει μηδενική έξοδο για μηδενική είσοδο.

$$Z_{\pi} = \sum_{i,k,\beta,\psi} M_{i,k,\beta,\psi} \cdot s_{i,k} + \sum_{i,k,\beta,\psi} M_{i,k,\beta,\psi} \cdot NS_{i,k} \quad (4-38)$$

Η συνάρτηση παραγωγής Z_{π} χαρακτηρίζεται από κυρτές καμπύλες ισοπαραγωγής.

Απόδειξη. Έστω δεδομένο επίπεδο παραγωγής Z_{π}^0 θετικά ορισμένο. Επιλύοντας της συνάρτηση παραγωγής ως προς το συντελεστή εισόδου $M_{i,k,\beta,\psi}$ προκύπτει:

$$M_{i,k,\beta,\psi} = \frac{Z_{\pi}^0 - \sum_{(kk,\beta\beta,\psi\psi) \neq (k,\beta,\psi)} (M_{i,kk,\beta\beta,\psi\psi} (s_{i,kk} + NS_{i,kk}))}{s_{i,k} + NS_{i,k}} \quad (4-39)$$

όπου $kk, \beta\beta, \psi\psi$ αναπαριστούν ταυτόσημη γραφή των δεικτών k, β, ψ αντίστοιχα. Έστω η συνάρτηση FF_{π} :

$$FF_{\pi} = Z_{\pi}^0 - \sum_{(kk,\beta\beta,\psi\psi) \neq (k,\beta,\psi)} (M_{i,kk,\beta\beta,\psi\psi} (s_{i,kk} + NS_{i,kk})) > 0$$

Συνεπώς, η καμπύλη ισοπαραγωγής (4-38) γράφεται:

$$M_{i,k,\beta,\psi} = \frac{FF_{\pi}}{s_{i,k} + NS_{i,k}}$$

Η πρώτη παράγωγος της καμπύλης ισοπαραγωγής υπολογίζεται ως εξής:

$$\frac{\partial M_{i,k,\beta,\psi}}{\partial NS_{i,k}} = \frac{\frac{\partial FF_{\pi}}{\partial NS_{i,k}} \cdot (s_{i,k} + NS_{i,k}) - FF_{\pi}}{(s_{i,k} + NS_{i,k})^2} \Leftrightarrow \quad (4-40)$$

$$\frac{\partial M_{i,k,\beta,\psi}}{\partial NS_{i,k}} = \frac{-\sum_{(\beta\beta,\psi\psi)\neq(\beta,\psi)} (M_{i,k,\beta\beta,\psi\psi}(s_{i,k} + NS_{i,k})) - FF_{\pi}}{(s_{i,k} + NS_{i,k})^2} \Leftrightarrow$$

$$\frac{\partial M_{i,k,\beta,\psi}}{\partial NS_{i,k}} = -\left(\frac{\sum_{(\beta\beta,\psi\psi)\neq(\beta,\psi)} (M_{i,k,\beta\beta,\psi\psi}(s_{i,k} + NS_{i,k})) + FF_{\pi}}{(s_{i,k} + NS_{i,k})^2} \right) < 0$$

διότι $\sum_{(\beta\beta,\psi\psi)\neq(\beta,\psi)} (M_{i,k,\beta\beta,\psi\psi}(s_{i,k} + NS_{i,k})) > 0$ και $FF_{\pi} > 0$.

Έστω συνάρτηση $G_{i,k}$:

$$G_{i,k} = - \sum_{(\beta\beta,\psi\psi)\neq(\beta,\psi)} (M_{i,k,\beta\beta,\psi\psi}(s_{i,k} + NS_{i,k})) - FF_{\pi} < 0 \quad (4-41)$$

Η δεύτερη παράγωγος της συνάρτησης παραγωγής υπολογίζεται ως εξής:

$$\frac{\partial^2 M_{i,k,\beta,\psi}}{\partial NS_{i,k}^2} = \frac{\frac{\partial G_{i,k}}{\partial NS_{i,k}} \cdot (s_{i,k} + NS_{i,k})^2 - 2G_{i,k}(s_{i,k} + NS_{i,k})}{(s_{i,k} + NS_{i,k})^4} \quad (4-42)$$

Ο όρος $\frac{\partial G_{i,k}}{\partial NS_{i,k}}$ υπολογίζεται ως εξής:

$$\begin{aligned} \frac{\partial G_{i,k}}{\partial NS_{i,k}} &= - \sum_{(\beta\beta,\psi\psi)\neq(\beta,\psi)} M_{i,k,\beta\beta,\psi\psi} - \frac{\partial FF_{\pi}}{\partial NS_{i,k}} = \\ &- \sum_{(\beta\beta,\psi\psi)\neq(\beta,\psi)} M_{i,k,\beta\beta,\psi\psi} + \sum_{(\beta\beta,\psi\psi)\neq(\beta,\psi)} M_{i,k,\beta\beta,\psi\psi} = 0 \end{aligned}$$

Άρα η εξίσωση (4-42) γράφεται:

$$\frac{\partial^2 M_{i,k,\beta,\psi}}{\partial NS_{i,k}^2} = \frac{-2G_{i,k}(s_{i,k} + NS_{i,k})}{(s_{i,k} + NS_{i,k})^4} > 0$$

διότι $-2G_{i,k}(s_{i,k} + NS_{i,k}) > 0$ λόγω της εξίσωσης (4-41) ■

Το πρόβλημα που αντιμετωπίζουν οι αντιπροσωπευτικοί παραγωγοί είναι η ελαχιστοποίηση της συνάρτησης κόστους C_π . Η συνάρτηση κόστους περιλαμβάνει τόσο τα μεταβλητά όσο και τα σταθερά κόστη του παραγωγού. Οι όροι του κόστους της αντικειμενικής συνάρτησης περιγράφονται στην παράγραφο 4.3.4.

$$\begin{aligned} \text{Min: } C_\pi = & \sum_{i,k,\beta,\psi} (vc_{i,k,\beta,\psi} + pc_{i,k,\beta,\psi}) \cdot M_{i,k,\beta,\psi} \cdot (s_{i,k} + NS_{i,k}) \\ & + \sum_{i,k} f_{C_{i,k}}(s_{i,k} + NS_{i,k}) + \sum_{i,k} I_{i,k} \gamma_{i,k}(s_{i,k} \eta_{i,k} + NS_{i,k}) \end{aligned} \quad (4-43)$$

Οι μεταβλητές $M_{i,k,\beta,\psi}$, $NS_{i,k}$ θα πρέπει να είναι μη αρνητικές

$$M_{i,k,\beta,\psi}, NS_{i,k} \geq 0$$

4.3.1.1 Περιορισμοί ικανοποίησης της ζήτησης

Ο παραγωγός που προσφέρει τις μεταφορικές υπηρεσίες πρέπει να ικανοποιήσει τον περιορισμό της ζήτησης για μεταφορικές υπηρεσίες τόσο της επιχείρησης $Y_{i,\beta,\psi}$ όσο και του καταναλωτή $X_{i,\beta,\psi}$ όπως προκύπτει από τη βελτιστοποίηση του υπομοντέλου ζήτησης και ορίζουν οι εξισώσεις (4-31), (4-32), (4-36), (4-37). Η παροχή των μεταφορικών υπηρεσιών από τους παραγωγούς γίνεται με τη χρήση του διαθέσιμου στόλου οχημάτων τεχνολογίας k . Έστω $\xi(i,k)$ το υποσύνολο των μεταφορικών μέσων i και τεχνολογιών k για τη ζήτηση μεταφορικών υπηρεσιών από τους καταναλωτές και $\varphi(i,k)$ το αντίστοιχο υποσύνολο για τα διαθέσιμα μεταφορικά μέσα και τεχνολογίες για την κάλυψη της ζήτησης της επιχείρησης. Αυτό σημαίνει ότι ο παραγωγός μπορεί να χρησιμοποιήσει περισσότερο κάποιες τεχνολογίες οχημάτων σε συγκεκριμένα ταξίδια (π.χ. ηλεκτρικά αυτοκίνητα σε αστικό περιβάλλον). Οι περιορισμοί γράφονται:

$$X_{i,\beta,\psi} - \sum_{k \in \xi(i,k)} M_{i,k,\beta,\psi} \cdot s_{i,k} - \sum_{k \in \xi(i,k)} M_{i,k,\beta,\psi} \cdot NS_{i,k} \leq 0 \quad \forall i, \beta, \psi \quad (4-44)$$

$$Y_{i,\beta,\psi} - \sum_{k \in \varphi(i,k)} M_{i,k,\beta,\psi} \cdot s_{i,k} - \sum_{k \in \varphi(i,k)} M_{i,k,\beta,\psi} \cdot NS_{i,k} \leq 0 \quad \forall i, \beta, \psi \quad (4-45)$$

Επιπλέον, εισάγεται ένας τεχνικός περιορισμός που θεωρεί ότι η ετήσια διανυθείσα απόσταση, που είναι το άθροισμα των αποστάσεων του μεταφορικού μέσου ανά περιοχή, σκοπό και ώρα ταξιδιού δεν μπορεί να ξεπεράσει ένα συγκεκριμένο αριθμό χιλιομετρικής απόστασης $\overline{MO}_{i,k}$. Συνεπώς,

$$\sum_{\beta,\psi} M_{i,k,\beta,\psi} - \overline{MO}_{i,k} \leq 0 \quad \forall i, k \quad (4-46)$$

4.3.2 Αλληλεπιδράσεις με τους κατασκευαστές οχημάτων

4.3.2.1 Τεχνολογικοί περιορισμοί και τιμολόγηση νέων οχημάτων

Το μοντέλο είναι δυνατό να δεχθεί και τεχνολογικούς περιορισμούς οι οποίοι υπαγορεύουν ότι οι νέες πωλήσεις αυτοκινήτων δε θα ξεπερνούν κατά μέσο όρο ένα συγκεκριμένο αριθμό ειδικών εκπομπών αερίου του θερμοκηπίου ή μια τιμή ενεργειακής απόδοσης.

Ο συγκεκριμένος περιορισμός στην πραγματικότητα εφαρμόζεται στους κατασκευαστές των οχημάτων οι οποίοι καλούνται να προσαρμόσουν τις τιμές και τα αυτοκίνητα διαθέσιμα προς πώληση στην Ευρωπαϊκή αγορά έτσι ώστε να εναρμονιστούν με τις οδηγίες. Η μορφή που λαμβάνει ο περιορισμός ακολουθεί την παρακάτω μορφή όπου $EnvR_i$ η τιμή της ρύθμισης (ή τεχνολογικό όριο) και $envl_{i,k}$ είναι το ειδικό χαρακτηριστικό ανά τύπο οχήματος. Συνεπώς, ο μέσος όρος των νέων πωλήσεων δε θα πρέπει να ξεπερνάει το συγκεκριμένο τεχνολογικό όριο. Έστω τ_i η δυική μεταβλητή του περιβαλλοντολογικού περιορισμού

$$\sum_k NS_{i,k} \cdot envl_{i,k} - EnvR_i \cdot \sum_k NS_{i,k} \leq 0 \quad (4-47)$$

Ο κατασκευαστής οχημάτων προσαρμόζει την τιμολογιακή πολιτική του έτσι ώστε το μείγμα των νέων πωλήσεων του να σέβεται τα τεχνολογικά όρια των ρυθμιστικών μέτρων. Συνεπώς, έστω $vcost_{i,k}$ η τιμή πώλησης του κάθε οχήματος, η οποία προσαρμόζεται δυναμικά στην περίπτωση που το συγκεκριμένο όχημα υπερβαίνει τα θεσπισμένα τεχνολογικά όρια. Ο όρος $\overline{vcost}_{i,k}$ αποτελεί την τιμή που θα έθετε ο κατασκευαστής στην περίπτωση απουσίας περιορισμού. Η μεταβλητή τ_i ορίζεται ως η δυική μεταβλητή του περιβαλλοντολογικού περιορισμού και αποκτάει έννοια (θετικά ορισμένη τιμή) όταν ο περιορισμός (4-47) είναι ισοτικός.

$$vcost_{i,k} = \overline{vcost}_{i,k} \cdot (1 + \tau_i \cdot (envl_{i,k} - EnvR_i)) \quad \forall i, k: envl_{i,k} > EnvR_i \quad (4-48)$$

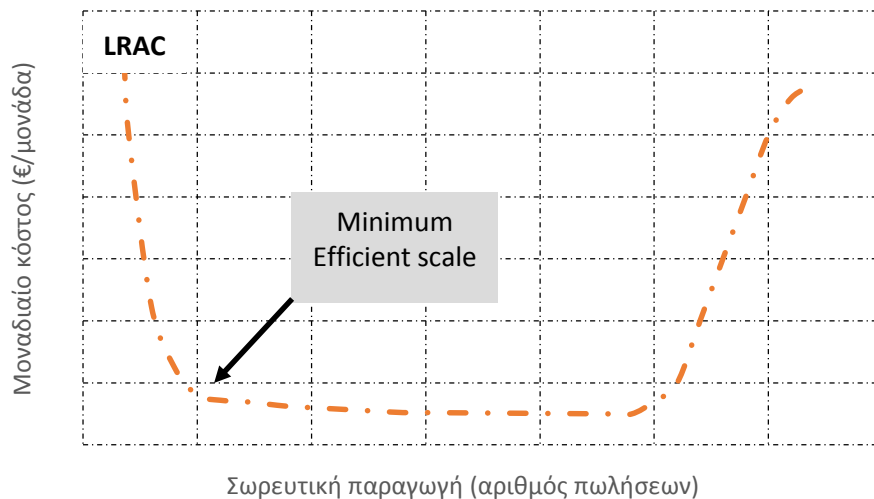
4.3.2.2 Μηχανισμός προσομοίωσης κεφαλαιουχικού κόστους εναλλακτικών τεχνολογιών

Οι κατασκευαστές οχημάτων είναι δυνατό να παρέχουν στην αγορά εναλλακτικές καθαρές τεχνολογίες οχημάτων οι οποίες μέχρι σήμερα δεν έχουν καταφέρει να διεισδύσουν σε σημαντικό βαθμό. Οι τεχνολογίες αυτές περιλαμβάνουν κυρίως τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα (όλων των τύπων) καθώς και τα αυτοκίνητα που είναι εξοπλισμένα με κυψέλη καυσίμου υδρογόνου. Το κυριότερο εμπόδιο των συγκεκριμένων τεχνολογιών για την περαιτέρω διείσδυσή τους στην αγορά αποτελεί το υψηλό κόστος μπαταρίας και κυψέλης καυσίμου.

Κατά τη μοντελοποίηση, οι κατασκευαστές οχημάτων πέρα από την τιμολόγηση και την προώθηση στην αγορά συμβατικών αυτοκινήτων που υπακούν σε

συγκεκριμένα μέτρα πολιτικής, γίνεται η παραδοχή ότι εισάγουν στην αγορά εναλλακτικές ανεπτυγμένες τεχνολογίες των οποίων το κόστος εξαρτάται ενδογενώς από το βαθμό σωρευτικών πωλήσεων και άλλων εξωγενών παραγόντων. Το μέσο κόστος παραγωγής μπαταριών ή κυψελών καυσίμου αποτελεί συνάρτηση του συνολικού αριθμού πωλήσεων των κατασκευαστών. Όπως περιγράφεται στην παράγραφο 6.3.1 και παρουσιάζεται στο Σχήμα 4-9, η μαζική παραγωγή ηλεκτρικών αυτοκινήτων αναμένεται να επιφέρει σημαντικά φαινόμενα οικονομίας κλίμακας.

Το σημείο της καμπύλης που ορίζει την ελάχιστη αποδοτική κλίμακα (Minimum Efficient Scale- MES) προσδιορίζει την ελάχιστη ποσότητα παραγωγής η οποία ελαχιστοποιεί το μακροχρόνιο μέσο κόστος. Το συγκεκριμένο σημείο παραγωγής υποδηλώνει ότι η βιομηχανική παραγωγή έχει εξαντλήσει τα οφέλη των οικονομιών κλίμακας όπου επιτυγχάνει το χαμηλότερο μέσο κόστος ανά μονάδα παραγωγής. Η επίτευξη του σημείου που ορίζει την ελάχιστη αποδοτική κλίμακα για τις μπαταρίες και τις κυψέλες καυσίμου υδρογόνου εξαρτάται κυρίως από τον όγκο πωλήσεων και τον επιτυχή συντονισμό της αγοράς με τους φορείς χάραξης πολιτικής και τη βιομηχανία ανάπτυξης σχετικής υποδομής διανομής και διάθεσης καυσίμου και ηλεκτρικής ενέργειας (όπως περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 3 της διατριβής). Ο ρυθμός μείωσης του μέσου κόστους πριν την προσέγγιση του σημείου MES έχει εκτιμηθεί από μελέτες της βιβλιογραφίας, τεχνικές μελέτες ή βιομηχανική πληροφόρηση. Εκτιμήσεις του ρυθμού για την τεχνική πρόοδο των μπαταριών και των κυψελών καυσίμου υδρογόνου παρουσιάζονται στην παράγραφο 6.3.1.1.



Σχήμα 4-9: Τυπικό σχήμα καμπύλης μακροχρόνιου μέσου κόστους (LRAC) βιομηχανικού προϊόντος.

Συνεπώς, οι κατασκευαστές αυτοκινήτων ανάλογα με τις υποθέσεις κάθε σεναρίου και τον όγκο πωλήσεων ηλεκτρικών αυτοκινήτων καθορίζουν δυναμικά και με τρόπο ενδογενή τις τιμές πώλησης ηλεκτρικών αυτοκινήτων και αυτοκινήτων με κυψέλη καυσίμου υδρογόνου. Ωστόσο, λόγω της φύσης του μοντέλου που εξετάζει

μόνο την Ευρωπαϊκή αγορά, υπάρχει μεγάλη αβεβαιότητα αναφορικά με τις πωλήσεις εναλλακτικών αυτοκινήτων στην παγκόσμια αγορά, γεγονός που επηρεάζει το μέσο κόστος παραγωγής. Για το σκοπό αυτό γίνονται εξωγενείς υποθέσεις για το βαθμό διεύθυνσης των ηλεκτρικών αυτοκινήτων στην παγκόσμια αγορά.

Φυσικά, οι νέες πωλήσεις ανά τύπο οχήματος εξαρτώνται από την τιμή κάθε εναλλακτικής επιλογής που έχει ο κάθε παραγωγός του προβλήματος. Το μείγμα των νέων πωλήσεων βασίζεται στη θεωρία διακριτής επιλογής και εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά $chr_{i,k}$ κάθε επιλογής, με κυριότερο αυτών την τιμή απόκτησης. Έστω φ η συνάρτηση διακριτής επιλογής η οποία παρουσιάζεται και αναλύεται στην εξίσωση (4-99). Τότε τα μερίδια επιλογής **Shveh**_{*i,k*} ανά τεχνολογία δίνονται ως (4-49).

$$Shveh_{i,k} = \varphi(vcost_{i,k}, chr_{i,k}) \quad (4-49)$$

Τα μερίδια των νέων τεχνολογιών συνδέονται με τη μεταβλητή απόφασης $NS_{i,k}$ που δίνει το σύνολο των νέων αυτοκινήτων ανά τεχνολογία. Οι δύο μεταβλητές συνδέονται με βάση την παρακάτω σχέση όπου **NewReg**_{*i*} συμβολίζει τις συνολικές νέες επενδύσεις σε αυτοκίνητα για κάθε είδος μεταφορικού μέσου.

$$NS_{i,k} = Shveh_{i,k} \cdot NewReg_i \quad (4-50)$$

4.3.2.3 Περιορισμός εκπομπών CO₂ στο σύστημα των μεταφορών

Πλέον των τεχνολογικών περιορισμών στους κατασκευαστές οχημάτων για την προώθηση στην αγορά ολοένα και φιλικότερων οχημάτων, εισάγεται στο μοντέλο περιορισμός για τις συνολικές εκπομπές CO₂ που προέρχονται από όλα τα είδη μεταφοράς. Έστω **emf**_{*i,k,β,ψ*} ο συντελεστής ειδικών εκπομπών σε g CO₂ /km. Κατά συνέπεια οι συνολικές εκπομπές CO₂ δε θα πρέπει να ξεπερνούν ένα ανώτατο όριο ίσο με **TotCO2**.

$$\sum_{i,\beta,\psi,k} [(s_{i,k} + NS_{i,k}) \cdot M_{i,k,\beta,\psi} \cdot emf_{i,k,\beta,\psi}] \leq \overline{TotCO2} \quad (4-51)$$

Ο συντελεστής εκπομπών εξαρτάται από το είδος του μεταφορικού μέσου, καθώς και το καύσιμο και την τεχνολογία του τύπου οχήματος. Συνεπώς, η γραφή του περιορισμού επιτρέπει τόσο υποκαταστάσεις μεταξύ μέσων μεταφοράς καθώς και μεταξύ τεχνολογιών και καυσίμων (π.χ. βενζίνη σε ηλεκτρικό όχημα).

4.3.3 Βελτιστοποίηση προβλήματος των παραγωγών

Το πρόβλημα του αντιπροσωπευτικού παραγωγού ορίζεται από τις εξισώσεις: (4-43) - (4-49). Για την επίλυση του προβλήματος του παραγωγού ορίζεται η ακόλουθη συνάρτηση Lagrange \mathcal{C} , όπου οι μεταβλητές $\delta\pi_{i,\beta,\psi}$, $\delta\varphi_{i,\beta,\psi}$, $\nu_{i,k}$, τ_i , $cmf_{i,k}$ και

$cval_t$ είναι οι πολλαπλασιαστές Lagrange των περιορισμών (4-44), (4-45), (4-46), (4-47), (4-48) και (4-52) αντίστοιχα:

$$\begin{aligned}
\mathcal{C} = & \sum_{i,k,\beta,\psi} (vc_{i,k,\beta,\psi} + pc_{i,k,\beta,\psi}) \cdot M_{i,k,\beta,\psi} \cdot (s_{i,k} + NS_{i,k}) \\
& + \sum_{i,k} fc_{i,k} (s_{i,k} + NS_{i,k}) + \sum_{i,k} I_{i,k} \gamma_{i,k} (s_{i,k} \eta_{i,k} + NS_{i,k}) \\
& + \sum_{i,\beta,\psi} \left[\delta\pi_{i,\beta,\psi} \left(X_{i,\beta,\psi} - \sum_{k \in \xi(i,k)} M_{i,k,\beta,\psi} \cdot s_{i,k} - \sum_{k \in \xi(i,k)} M_{i,k,\beta,\psi} \cdot NS_{i,k} \right) \right] \\
& + \sum_{i,\beta,\psi} \left[\delta\varphi_{i,\beta,\psi} \left(Y_{i,\beta,\psi} - \sum_{k \in \varphi(i,k)} M_{i,k,\beta,\psi} \cdot s_{i,k} - \sum_{k \in \varphi(i,k)} M_{i,k,\beta,\psi} \cdot NS_{i,k} \right) \right] \quad (4-52) \\
& + \sum_{i,k} \left[v_{i,k} \left(\sum_{\beta,\psi} M_{i,k,\beta,\psi} - \overline{Mo}_{i,k} \right) \right] \\
& + \sum_i \tau_i \left[\sum_k NS_{i,k} \cdot envl_{i,k} - EnvR_i \cdot \sum_k NS_{i,k} \right] \\
& + cval \left(\sum_{i,\beta,\psi,k} [(s_{i,k} + NS_{i,k}) \cdot M_{i,k,\beta,\psi} \cdot emf_{i,k,\beta,\psi}] - \overline{TotCO2} \right)
\end{aligned}$$

Οι συνθήκες KKT του παρόντος προβλήματος έχουν ως εξής:

$$\frac{\partial \mathcal{C}}{\partial M_{i,k,\beta,\psi}} \geq 0 \quad \perp \quad M_{i,k,\beta,\psi} \geq 0 \quad (4-53)$$

$$\frac{\partial \mathcal{C}}{\partial NS_{i,k}} \geq 0 \quad \perp \quad NS_{i,k} \geq 0 \quad (4-54)$$

$$\frac{\partial \mathcal{C}}{\partial \delta\pi_{i,\beta,\psi}} \leq 0 \quad \perp \quad \delta\pi_{i,\beta,\psi} \geq 0 \quad (4-55)$$

$$\frac{\partial \mathcal{C}}{\partial \delta\varphi_{i,\beta,\psi}} \leq 0 \quad \perp \quad \delta\varphi_{i,\beta,\psi} \geq 0 \quad (4-56)$$

$$\frac{\partial \mathcal{C}}{\partial v_{i,k}} \leq 0 \quad \perp \quad v_{i,k} \geq 0 \quad (4-57)$$

$$\frac{\partial \mathcal{C}}{\partial \tau_i} \leq 0 \quad \perp \quad \tau_i \geq 0 \quad (4-58)$$

$$M_{i,k,\beta,\psi} \geq 0 \quad (4-59)$$

$$\frac{\partial \mathcal{C}}{\partial cval} \leq 0 \quad \perp \quad cval \geq 0 \quad (4-60)$$

$$NS_{i,k} \geq 0 \quad (4-61)$$

Η αναλυτική γραφή των παραγώγων των συνθηκών KKT παρουσιάζονται στην παράγραφο 4.5.2 όπου παρουσιάζεται ο μετασχηματισμός του προβλήματος σε πρόβλημα μεικτής συμπληρωματικότητας.

4.3.4 Κόστη αντικειμενικής συνάρτησης

4.3.4.1 Σταθερά κόστη αντικειμενικής συνάρτησης

Τα σταθερά κόστη που λαμβάνονται υπόψη στη βελτιστοποίηση του προβλήματος προσφοράς αναφέρονται στις δαπάνες απόκτησης νέου κεφαλαιουχικού εξοπλισμού, στις δαπάνες αποπληρωμής του ήδη διαθέσιμου εξοπλισμού που δεν έχει ακόμα αποπληρωθεί καθώς και σε ετήσια πάγια έξοδα. Τα σταθερά κόστη μετρούνται σε €/ όχημα.

Αναφορικά με τις δαπάνες απόκτησης ή αποπληρωμής κεφαλαιουχικού εξοπλισμού, ο όρος $I_{i,k}$ υποδηλώνει το ύψος της επένδυσης (ή κόστος αγοράς) ανά τύπο μεταφορικού μέσου και συγκεκριμένου τεχνολογικού χαρακτηριστικού. Ο παράγοντας $\gamma_{i,k}$ υποδηλώνει το συντελεστή ανάκτησης κεφαλαίου ή το τοκοχρεολύσιο για τη μετατροπή του κόστους αγοράς σε ετήσιες ισοδύναμες ράντες διάρκειας n ετών. Ο παράγοντας του τοκοχρεολυσίου είναι δυνατό να διαφοροποιηθεί ανά τύπο μεταφορικού μέσου και τεχνολογική διάσταση.

$$\gamma_{i,k} = \frac{\delta_{i,k}(1 + \delta_{i,k})^{n_i}}{(1 + \delta_{i,k})^{n_i} - 1} \quad (4-62)$$

Ο παράγοντας $\eta_{i,k}$ υποδηλώνει εάν ο παραγωγός εξακολουθεί να πληρώνει την ετήσια ράντα για την αποπληρωμή του κεφαλαιουχικού εξοπλισμού. Εξ' ορισμού, ο παραγωγός οφείλει να πληρώσει την ετήσια ράντα πληρωμής για τις νέες επενδύσεις σε κεφαλαιουχικό εξοπλισμό $NS_{i,k}$.

Ο παραπάνω παράγοντας εφαρμόζεται μόνο κατά την περίπτωση του ήδη υπάρχοντος κεφαλαιουχικού εξοπλισμού. Ας θεωρηθεί ότι ο δείκτης tt αναφέρεται στη χρονιά απόκτησης του συγκεκριμένου κεφαλαιουχικού εξοπλισμού. Επιπλέον, η διαφορά $|tt - t|$ είναι ισοδύναμη με την ηλικία του εξοπλισμού αυτού. Συνεπώς, αν η ηλικία του εξοπλισμού είναι μικρότερη της οικονομικής ζωής του εξοπλισμού κατά την οποία θεωρείται ότι γίνεται η αποπληρωμή του κεφαλαίου, τότε η τιμή του παράγοντα

$\eta_{i,k} = 1$. Στην αντίθετη περίπτωση, όπου ο παραγωγός έχει αποπληρώσει το κεφαλαιουχικό κόστος της επένδυσης, η τιμή του παράγοντα $\eta_{i,k} = 0$.

$$\eta_{i,k} = \begin{cases} 0 & |tt_{i,k} - t| > n_i \\ 1 & |tt_{i,k} - t| \leq n_i \end{cases} \quad (4-63)$$

Πέρα από τις δαπάνες για αγορά κεφαλαιουχικού εξοπλισμού, ο παραγωγός καλείται να πληρώσει επιπλέον ετήσια πάγια έξοδα $fc_{i,k}$ που περιλαμβάνουν το ετήσιο κόστος συντήρησης $mn_{i,k}$, ετήσιες ασφαλιστικές εισφορές $in_{i,k}$, φόρο ιδιοκτησίας $ow_{i,k}$ καθώς και οποιοδήποτε άλλο φόρο $ot_{i,k}$.

$$fc_{i,k} = mn_{i,k} + in_{i,k} + ow_{i,k} + ot_{i,k} \quad (4-64)$$

Τα πάγια έξοδα διαφέρουν ανά είδος μεταφορικού μέσου, ενώ είναι δυνατό να διαφέρουν και ανά είδος τεχνολογίας καθώς και με βάση την ηλικία του εξοπλισμού. Η βάση δεδομένων TRACCS (EMISIA et al., 2013) παρέχει πληροφορίες για τα παραπάνω πάγια έξοδα για κάθε τύπο μεταφορικού μέσου και τεχνολογίας. Οι τιμές αυτών των παραμέτρων κόστους είναι δυνατό να μεταβληθούν στα πλαίσια κατασκευής ενεργειακών σεναρίων.

4.3.4.2 Μεταβλητά κόστη αντικειμενικής συνάρτησης

Ο πρώτος όρος της αντικειμενικής συνάρτησης αναφέρεται στα μεταβλητά πραγματικά κόστη που καλείται να πληρώσει ο παραγωγός $vc_{i,k,\beta,\psi}$ καθώς και στα τεχνητά «κρυφά» κόστη $pc_{i,k,\beta,\psi}$. Τα μεταβλητά κόστη μετρούνται σε €/χλμ.

Όσον αφορά τα πραγματικά μεταβλητά κόστη που καλείται να πληρώσει ο παραγωγός, διακρίνονται σε κόστος καυσίμου $fc_{i,k,\beta,\psi}$, σε κόστος χρήσης του δικτύου μεταφορών $tl_{i,k,\beta,\psi}$ (μέσω πληρωμών διοδίων χρήσης αυτοκινητοδρόμου) και σε φόρο συμφόρησης $cg_{i,k,\beta,\psi}$ που έχουν εφαρμόσει σε συγκεκριμένες πόλεις της Ευρώπης όπως στις μητροπολιτικές ζώνες του Λονδίνου, της Στοκχόλμης και του Μιλάνου. Επιπλέον, το μεταβλητό κόστος είναι δυνατό να συμπεριλάβει φόρο για το κόστος του άνθρακα (carbon tax) $ct_{i,k,\beta,\psi}$ καθώς και φορολόγηση που σχετίζεται με την εσωτερικοποίηση του εξωτερικού κόστους, $ex_{i,k,\beta,\psi}$, όπως η περιβαλλοντολογική μόλυνση, ο θόρυβος και τα δυστυχήματα.

$$vc_{i,k,\beta,\psi} = fc_{i,k,\beta,\psi} + tl_{i,k,\beta,\psi} + cg_{i,k,\beta,\psi} + ct_{i,k,\beta,\psi} + ex_{i,k,\beta,\psi} \quad (4-65)$$

Πιο συγκεκριμένα, το κόστος καυσίμου $fc_{i,k,\beta,\psi}$ ορίζεται ως το γινόμενο της τιμής του καυσίμου fp , που μετράται €/λίτρο, επί την ειδική κατανάλωση $sf_{i,k,\psi}$ που μετράται σε λίτρα καυσίμου/χλμ. Η ειδική κατανάλωση υπολογίζεται ενδογενώς ως

συνάρτηση της μέσης ταχύτητας μετακίνησης κάθε μέσου μεταφοράς και της τεχνολογικής εξέλιξης.

$$fc_{i,k,\psi} = fp \cdot sf_{i,k,\psi} \quad (4-66)$$

Εξάλλου, ο φόρος για το κόστος του άνθρακα $ct_{i,k,j}$ υπολογίζεται ως το γινόμενο της τιμής του άνθρακα cp (carbon price σε €/ τόνο CO₂) επί του δείκτη εκπομπών CO₂ του καυσίμου που χρησιμοποιείται em_k (σε τόνο CO₂/ λίτρο καυσίμου) επί της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου $sf_{i,k,\psi}$. Η τιμή που προκύπτει για τη δαπάνη του φόρου του άνθρακα μετράται σε €/ χλμ. Η συγκεκριμένη δαπάνη υπολογίζεται ως συνάρτηση της ειδικής κατανάλωσης και γι' αυτό το λόγο χαρακτηρίζεται ως μεταβλητό κόστος. Στην πραγματικότητα, η εφαρμογή ενός φόρου για το κόστος του άνθρακα υπεισέρχεται στην τιμή του καυσίμου και ενσωματώνεται στον ειδικό φόρο κατανάλωσης, γεγονός που επικυρώνει την απόφαση να αποτελέσει μεταβλητό κόστος κατά τη μοντελοποίηση.

$$ct_{i,k,\psi} = cp \cdot em_k \cdot sf_{i,k,\psi} \quad (4-67)$$

Τα τεχνητά «κρυφά» κόστη $pc_{i,k,\beta,\psi}$ δε συνιστούν πραγματικές πληρωμές, αλλά αναπαριστούν μη γραμμικές συναρτήσεις που έχουν ως σκοπό να συμπεριλάβουν μη οικονομικούς παράγοντες που ενδέχεται να επηρεάσουν τις αποφάσεις των αποφασιζόντων. Οι μη οικονομικοί παράγοντες έχουν συμπεριληφθεί στην απόφαση για να αποδώσουν πιο ρεαλιστικά την πραγματικότητα όπου οι αποφάσεις που λαμβάνονται καθημερινά δε βασίζονται μόνο σε οικονομικούς λόγους (παράγραφος 4.7.4). Κατά τη μοντελοποίηση, οι συγκεκριμένοι παράγοντες έχουν συνδεθεί με την έννοια του κόστους.

4.4 Συνθήκες ισορροπίας

4.4.1 Γενικευμένες τιμές μεταφορών

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, το υπομοντέλο προσφοράς λαμβάνει την απόφαση για τη διάρθρωση του στόλου των οχημάτων και το μείγμα καυσίμου για κάθε μεταφορικό μέσο. Η απόφαση αυτή περιλαμβάνει συγκεκριμένες δαπάνες τόσο για την αγορά κεφαλαιουχικού εξοπλισμού όσο και μεταβλητά κόστη (π.χ. κόστη καυσίμου).

Στην περίπτωση του χρήστη ιδιωτικού μέσου η τιμή μεταφοράς αφορά στο μέσο κόστος της χρήσης του ιδιωτικού τους οχήματος όπως αυτοκίνητο ή μοτοσυκλέτα. Στην περίπτωση του χρήστη που επιθυμεί να αγοράσει τις μεταφορικές υπηρεσίες ενός δημοσίου μέσου μεταφοράς, η μέση τιμή μεταφοράς αντιστοιχεί στην τιμή του εισιτηρίου. Η τελευταία υπολογίζεται με την προϋπόθεση ότι ο πάροχος της υπηρεσίας επανακτά τόσο το κεφάλαιο όσο και το μεταβλητό κόστος της υπηρεσίας

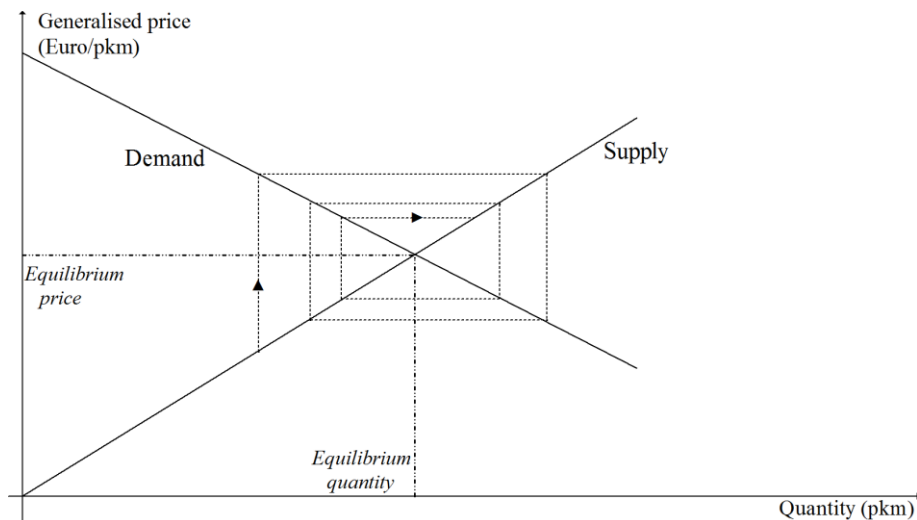
που προσφέρει. Ωστόσο τα τεχνητά «κρυφά» κόστη $pc_{i,k,\beta,\psi}$ δε συμπεριλαμβάνονται στη φάση της τιμολόγησης της προσφερόμενης μεταφορικής υπηρεσίας, αλλά μόνο στην αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος του υπομοντέλου της προσφοράς. Τα στοιχεία που περιέχει ο υπολογισμός της τιμής μεταφοράς είναι τα εξής:

- Αγορά κεφαλαιουχικού εξοπλισμού
- Σταθερά ετήσια κόστη όπως συντήρηση και ασφάλιση οχημάτων
- Μεταβλητά κόστη όπως κόστος καυσίμου, διόδια
- Κόστος του χρόνου $ct_{i,\beta,\psi}$

Έστω $pec_{i,\beta,\psi}$ ο όρος της τιμής μεταφορικής υπηρεσίας που αντανακλά τα πραγματικά κόστη. Επειδή οι τιμές των μεταφορικών υπηρεσιών περιλαμβάνουν και το κόστος του χρόνου ονομάζονται γενικευμένες τιμές μεταφοράς $p_{i,\beta,\psi}$ (Calthrop et al., 2000). Οι γενικευμένες τιμές μεταφοράς αποτελούν τη συνθήκη ισορροπίας μεταξύ των υπομοντέλων προσφοράς και ζήτησης καθώς υπεισέρχονται στις εξισώσεις (4-74)(4-75)(4-77)(4-78) και υπολογίζονται από την παρακάτω σχέση

$$p_{i,\beta,\psi} = pec_{i,\beta,\psi} + ct_{i,\beta,\psi} \quad (4-68)$$

Οι γενικευμένες τιμές μεταφοράς στη συνέχεια διοχετεύονται στο υπομοντέλο της ζήτησης όπου και επηρεάζουν τη ζήτηση για μεταφορικές υπηρεσίες ανά μεταφορικό μέσο και τύπο ταξιδιού. Η μεταβολή των σχετικών τιμών μεταφοράς σε συνδυασμό με τους περιορισμούς (εισοδήματος για τον καταναλωτή και παραγωγής για την επιχείρηση) καθορίζουν τις νέες τιμές ζήτησης που θα τροφοδοτήσουν το υπομοντέλο προσφοράς. Αυτή η επαναληπτική διαδικασία αλληλεπίδρασης των υπομοντέλων της ζήτησης και της προσφοράς μέσω των γενικευμένων τιμών μεταφοράς εξασφαλίζει την εύρεση του σημείου ισορροπίας (Σχήμα 4-10).



Σχήμα 4-10: Ισορροπία μεταξύ προσφοράς και ζήτησης μέσω των γενικευμένων τιμών μεταφοράς

4.4.2 Κόστος του χρόνου και συμφύρηση

Στην παρούσα ενότητα γίνεται αναφορά στη λειτουργία του μηχανισμού των γενικευμένων τιμών μεταφοράς και στην επεξήγηση της έννοιας του κόστους του χρόνου στην ανάγκη για μετακίνηση.

Θεωρώντας ότι η απόφαση για μετακίνηση των καταναλωτών μπορεί να αναπαρασταθεί σα μια αγορά που ισορροπεί, τότε η τιμή μεταφοράς αποτελεί και η τιμή ισορροπίας. Η τιμή ισορροπίας περιλαμβάνει όπως περιγράψαμε παραπάνω τα πραγματικά κόστη της μετακίνησης και επιπλέον το κόστος του χρόνου. Θεωρώντας το παράδειγμα μετακίνησης ενός οδηγού μεταξύ δύο σημείων που συνδέονται με μια συγκεκριμένη οδική αρτηρία. Αν εξετάσουμε την περίπτωση κατά την οποία δεν υπάρχουν άλλοι μετακινούμενοι στην οδική αρτηρία, τότε ο οδηγός αναπτύσσει μια συγκεκριμένη ταχύτητα (ταχύτητα ελεύθερης ροής) και διανύει την απόσταση σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Στην περίπτωση που προστίθενται επιπλέον χρήστες στο οδικό δίκτυο είναι εύλογο ότι η ταχύτητα ταξιδιού θα μειωθεί και κατά συνέπεια ο χρόνος ταξιδιού θα αυξηθεί. Εξάλλου, η γενικευμένη τιμή μεταφοράς που αντιλαμβάνεται ο οδηγός θα αυξηθεί λόγω του κόστους του χρόνου, γεγονός που θα οδηγήσει σε μείωση της κυκλοφορίας στη συγκεκριμένη οδική αρτηρία.

Ο χρόνος είναι αποτελεί ένα πολύ σημαντικό παράγοντα όσον αφορά τη μετακίνηση των ανθρώπων και των εμπορευμάτων. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, ο μέσος χρόνος μετακίνησης ανά κάτοικο έχει εκτιμηθεί ότι κυμαίνεται περίπου μεταξύ 1 και 1.5 ώρας (Zahavi and Talvitie, 1980; Mokhtarian and Salomon, 2001). Ο συγκεκριμένος μέσος χρόνος ταξιδιού παραμένει σχετικά σταθερός ανεξαρτήτως περιοχής, εισοδήματος και απόστασης. Είναι φανερό ότι οι μετακινούμενοι υπόκεινται όχι μόνο σε περιορισμό εισοδήματος όσο και σε περιορισμό συνολικού χρόνου ταξιδιού.

Η ενσωμάτωση του κόστους του χρόνου στις γενικευμένες τιμές μεταφοράς αποσκοπεί στο να διασυνδέσει την επιλογή του καταναλωτή και της επιχείρησης για χρήση μεταφορικού μέσου με το χρόνο ταξιδιού και το βαθμό συμφύρησης του δικτύου μεταφοράς. Ο βαθμός συμφύρησης (congestion) αυξάνει το χρόνο ταξιδιού και κατά συνέπεια οδηγεί σε αύξηση των γενικευμένων τιμών μεταφοράς. Η αύξηση της τελευταίας οδηγεί με τη σειρά της σε μείωση της ζήτησης για μεταφορά για το συγκεκριμένο μέσο μεταφοράς και την αύξηση της ζήτησης για άλλα υποκατάστατα μέσα μεταφοράς με μικρότερο χρόνο ταξιδιού (ή αντιστρόφως μέσα μεταφοράς με υψηλότερη ταχύτητα).

Το κόστος του χρόνου $ct_{i,\beta,\psi}$ μετριέται σε €/χλμ. υπολογίζεται ως το γινόμενο μεταξύ της αξίας του χρόνου $vt_{i,\beta,\psi}$ (€/ώρα) επί το χρόνο ταξιδιού $tt_{i,\beta,\psi}$ (ώρα/ χλμ). Το κόστος του χρόνου διαφέρει ανά μεταφορικό μέσο, περιοχή ταξιδιού και σκοπό μετακίνησης.

$$ct_{i,\beta,\psi} = tt_{i,\beta,\psi} \cdot vt_{i,\beta,\psi} \quad (4-69)$$

Ο χρόνος ταξιδιού είναι μια μεταβλητή που υπολογίζεται ως ο αντίστροφος της μέσης ταχύτητας ταξιδιού (χλμ./ώρα). Συνεπώς, όσο μειώνεται η μέση ταχύτητα του ταξιδιού, αυξάνει ο χρόνος ταξιδιού. Στις κατηγορίες ταξιδιών που περιλαμβάνει το μοντέλο γίνεται διάκριση και όσον αφορά τη χρονική στιγμή πραγματοποίησης του ταξιδιού (ώρα αιχμής ή όχι). Στις περιόδους αιχμής που αντιστοιχούν σε περίπου 4-6 ώρες την ημέρα γίνεται η υπόθεση ότι οι μέσες ταχύτητες των οδικών μέσων μεταφοράς είναι μικρότερες από εκείνες σε ώρες εκτός αιχμής. Κατά συνέπεια το κόστος του χρόνου που αντιλαμβάνεται ο αποφασίζων είναι μεγαλύτερο σε ώρα αιχμής (με την προϋπόθεση ότι ο σκοπός ταξιδιού είναι ο ίδιος που προϋποθέτει την ίδια αξία του χρόνου για το συγκεκριμένο ταξίδι).

Είναι προφανές ότι ο χρόνος του ταξιδιού είναι ένα πολύ σημαντικό μέγεθος (εφόσον λαμβάνεται υπόψη και στην τιμολόγηση μέσω των γενικευμένων τιμών μεταφοράς). Ο χρόνος ταξιδιού εξαρτάται από αρκετούς άλλους παράγοντες όπως η ύπαρξη οδικών υποδομών (π.χ. δρόμων, γεφυρών, κ.α.), ο βαθμός πληρότητας των αυτοκινήτων (occupancy rate) και ο βαθμός αξιοποίησης του διαθέσιμου χώρου των φορτηγών καθώς και άλλες πολιτικές που μπορεί να επιφέρουν μετριασμό της κυκλοφορίας. Οι τελευταίες μπορεί να είναι κάποια μέτρα φορολόγησης (π.χ. αύξηση ειδικού φόρου κατανάλωσης) που μπορεί να οδηγήσουν σε μερίδα των οδηγών σε λιγότερη χρήση του ιδιωτικού οχήματος και κατά συνέπεια λιγότερη συμφόρηση στους δρόμους. Ο χρόνος ταξιδιού ορίζεται για κάθε μεταφορικό μέσο i και περιοχή και ώρα ταξιδιού ψ και δίνεται από την παρακάτω συνάρτηση συμφόρησης:

$$tvt_{i,\psi} = \overline{tvt_{i,\psi}} \cdot \left(\frac{\sum_{ii} vkm_{ii,\psi}}{\sum_{ii} \overline{vkm_{ii,\psi}}} \right)^{g_a} \cdot \left(\frac{INV_{\psi}}{\overline{INV_{\psi}}} \right)^{-g_i} \quad (4-70)$$

Η παραπάνω σχέση συνδέει το χρόνο ταξιδιού $tvt_{i,\psi}$ με τη ζήτηση σε οχηματο-χιλιόμετρα $vkm_{ii,\psi}$. Η ζήτηση για οχηματο-χιλιόμετρα προκύπτει από την αλληλεπίδραση των υπομοντέλων προσφοράς και ζήτησης. Η εξίσωση (4-70) συνδέει τη ζήτηση για μεταφορές τόσο των επιβατών όσο και των εμπορευμάτων. Κατά συνέπεια, η απόφαση του αντιπροσωπευτικού καταναλωτή και της αντιπροσωπευτικής εταιρείας αλληλεπιδρούν στη φάση του υπολογισμού της μέσης ταχύτητας ταξιδιού. Έστω $of_{i,\beta,\psi}$ ο βαθμός πληρότητας των οχημάτων (επιβάτες ανά όχημα ή τόνοι ανά όχημα). Η ζήτηση για οχηματο-χιλιόμετρα δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$vkm_{i,\psi} = \sum_{\beta, k \in \xi(i,k)} M_{i,k,\beta,\psi} \cdot (s_{i,k} + Ns_{i,k}) / of_{i,\beta,\psi} \quad (4-71)$$

Η συνάρτηση συμφόρησης εξαρτάται από τη συνολική ζήτηση για οχηματο-χιλιόμετρα σε κάθε τμήμα του οδικού δικτύου. Πράγματι, το γεγονός αυτό επιτρέπει τη διασύνδεση της ζήτησης για επιβατικές και εμπορευματικές μεταφορές. Τόσο τα ιδιωτικά οχήματα επιβατικής χρήσης όσο και τα φορτηγά για εμπορευματικές

μεταφορές χρησιμοποιούν το ίδιο οδικό δίκτυο με συνέπεια το φαινόμενο της συμφόρησης να είναι κοινό και για τα δύο. Η παράμετρος INV_j αναπαριστά προβλεπόμενες επενδύσεις σε κατασκευή υποδομών για συγκεκριμένα δίκτυα και αποτελεί εξωγενή υπόθεση. Οι αντίστοιχες παράμετροι και μεταβλητές με την άνω μπάρα παριστάνουν τιμές αναφοράς για τη χρονιά βάσης. Τέλος, οι παράμετροι g_a, g_i παριστάνουν ελαστικότητες ως προς τη ζήτηση για οχηματο-χιλιόμετρα και ως προς τις επενδύσεις για υποδομές αντίστοιχα.

Η μέση ταχύτητα διαφέρει ανά περιοχή ταξιδιού, ανά μεταφορικό μέσο καθώς και ανά χρονική στιγμή μετακίνησης. Αυτό συνεπάγεται και διαφορετικό χρόνο ταξιδιού ανά περίπτωση. Πράγματι, η μέση ταχύτητα ταξιδιού ορίζεται ως το αντίστροφο του μέσου χρόνου ταξιδιού:

$$U_{i,\psi} = \frac{1}{\text{tvt}_{i,\psi}} \quad (4-72)$$

4.4.2.1 Τιμολόγηση μεταφορικών υπηρεσιών των παραγωγών

Οι γενικευμένες τιμές μεταφοράς αποτελούν τη διασύνδεση των υπομοντέλων της προσφοράς και της ζήτησης. Όπως αναφέρθηκε ήδη, η εύρεση του σημείου ισορροπίας των τελευταίων εξαρτάται από τις γενικευμένες τιμές μεταφοράς. Η ιδιαιτερότητα του υπομοντέλου της προσφοράς έγκειται στο γεγονός ότι πραγματοποιείται διάκριση ως προς το ποιος είναι ο πάροχος της προσφερόμενης υπηρεσίας.

Ο πάροχος μπορεί να είναι είτε ο ίδιος ο μετακινούμενος είτε μια εταιρεία που παρέχει μεταφορικές υπηρεσίες μέσω της χρήσης εισιτηρίου. Οι διαφορές στις δύο περιπτώσεις είναι σημαντικές. Στην πρώτη περίπτωση, ο ίδιος ο μετακινούμενος που εξασφαλίζει για τον εαυτό του τη μετακίνηση με ιδιωτικό μέσο, αντιμετωπίζει κεφαλαιουχικά και μεταβλητά κόστη (συνολικό κόστος C). Τα κεφαλαιουχικά κόστη αφορούν τα κόστη που σχετίζονται με την αγορά ιδιωτικού εξοπλισμού μετακίνησης (π.χ. αυτοκίνητο, μηχανή, κ.λ.π.) ενώ τα μεταβλητά κόστη περιλαμβάνουν ως επί το πλείστον τα κόστη κίνησης. Συνεπάγεται ότι ο μετακινούμενος πληρώνει για τα κεφαλαιουχικά κόστη ανεξάρτητα αν μετακινείται ή όχι. Ο υπολογισμός των γενικευμένων τιμών μεταφοράς για τον μετακινούμενο που προσφέρει υπηρεσίες στον εαυτό του υπολογίζεται με βάση το μέσο κόστος:

$$pec_{i,\beta,\psi} = C / \sum_{k \in \xi(i,k)} M_{i,k,\beta,\psi} \cdot (s_{i,k} + NS_{i,k}) \quad (4-73)$$

Στην περίπτωση που ο πάροχος είναι μια εταιρεία παροχής υπηρεσιών μεταφορών, τότε ο μετακινούμενος καλείται να πληρώσει μόνο μεταβλητά κόστη τα οποία αντιστοιχούν στην αγορά εισιτηρίου για τη μετακίνησή του. Η εταιρεία που παρέχει τις υπηρεσίες μεταφοράς έχει επενδύσει στην αγορά του στόλου των οχημάτων που θα προσφέρουν τις μεταφορικές υπηρεσίες. Συνεπώς, η εταιρεία

καλείται να πληρώσει κόστη σταθερά για αποπληρωμή της αγοράς του κεφαλαιουχικού της εξοπλισμού και μεταβλητά κόστη λόγω της χρήσης των οχημάτων της. Ο στόχος της εταιρείας είναι η ανάκτηση του κεφαλαίου αγοράς του κεφαλαιουχικού εξοπλισμού καθώς των μεταβλητών δαπανών. Αυτό είναι εφικτό μέσω της διαμόρφωσης καταλλήλων τιμών εισιτηρίων $rec_{i,\beta,\psi}$. Η τιμολόγηση των μεταφορικών υπηρεσιών διαφοροποιείται ανά αγορά και ακολουθεί τιμολόγηση κατά Ramsey-Boiteux.

4.5 Μετασχηματισμός προβλημάτων σε μορφή μεικτής συμπληρωματικότητας

4.5.1 Η έννοια της συμπληρωματικότητας

Τα επιμέρους προβλήματα βελτιστοποίησης των οικονομικών πρακτόρων (μεγιστοποίηση χρησιμότητας του καταναλωτή, μεγιστοποίηση της παραγωγής των εταιριών, ελαχιστοποίηση κόστους των εταιριών παροχής μεταφορικών υπηρεσιών, κτλ.) που αποτελούν προβλήματα μη γραμμικού προγραμματισμού μετασχηματίζονται σε ένα σύστημα μη γραμμικών εξισώσεων. Μαθηματικά το μοντέλο επιλύεται ως ένα μη γραμμικό πρόβλημα μικτής συμπληρωματικότητας (mixed complementarity problem: MCP), που περιλαμβάνει τόσο ισοτικούς όσο και ανισοτικούς περιορισμούς. Το μοντέλο είναι γραμμένο σε περιβάλλον GAMS όπου επιλύεται με τη χρήση του αλγορίθμου "PATH" (Dirkse and Ferris, 1995).

Η χρήση της συμπληρωματικότητας κατά τη μοντελοποίηση γενικεύει τα διάφορα επιμέρους μη γραμμικά προβλήματα βελτιστοποίησης σε ένα σύστημα ισοτικών και ανισοτικών σχέσεων μέσω των συνθηκών Karush-Kuhn-Tucker conditions (KKT). Η συμπληρωματικότητα χρησιμοποιείται σε προβλήματα αγορών όπως του φυσικού αερίου (Gabriel et al., 2005), του άνθρακα (Haftendorn et al., 2012) και του ηλεκτρισμού (Capros et al., 2012).

Η γενική μορφή του προβλήματος μεικτής συμπληρωματικότητας είναι η εξής (Ferris and Munson, 2010): Δεδομένης συνάρτησης $F : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$, να βρεθεί $z \in \mathbb{R}^n$ έτσι ώστε να ισχύει

$$F(z) = 0$$

Στη γενική μορφή του προβλήματος μεικτής συμπληρωματικότητας τα όρια της μεταβλητής απόφασης είναι αυτά που καθορίζουν τις σχέσεις που ικανοποιεί η συνάρτηση F (Ferris Munson, 1998). Πράγματι, έστω το κάτω όριο $l \in \{\mathbb{R} \cup \{-\infty\}\}^n$ και το άνω όριο $u \in \{\mathbb{R} \cup \{\infty\}\}^n$. Σε αυτήν την περίπτωση το πρόβλημα γενικεύεται ως:

$$F(z) = 0 \text{ και } l \leq z \leq u$$

$$F(z) > 0 \text{ και } l = z$$

$$F(z) < 0 \text{ και } z = u$$

Οι παραπάνω ισοτικές και ανισοτικές σχέσεις υποδηλώνουν ότι η μεταβλητή z θα αγγίξει τα όρια στα οποία είναι ορισμένη είτε η συνάρτηση $F(z)$ θα μηδενιστεί.

Στην περίπτωση που το κάτω όριο είναι $l = 0$, τότε θα ισχύει $0 \leq z \perp F(z) \geq 0$. Το σύμβολο \perp υποδηλώνει ότι η μία από τις δύο ανισότητες ικανοποιείται ως ισότητα. Δηλαδή, ισχύει ή $0 = z$ και $F(z) > 0$ ή $0 > z$ και $F(z) = 0$.

4.5.2 Τυποποίηση του μοντέλου ως πρόβλημα μεικτής συμπληρωματικότητας

Τα επιμέρους προβλήματα βελτιστοποίησης που παρουσιάζονται στο παρόν κεφάλαιο είναι δυνατό να μετασχηματιστούν σε ένα ενιαίο πρόβλημα μεικτής συμπληρωματικότητας (MCP) το οποίο αποτελεί ένα σύστημα ανισοτικών και ισοτικών περιορισμών. Πράγματι, με βάση τις σχέσεις (4-31), (4-32), (4-36), (4-37), (4-53)-(4-61) λαμβάνοντας τις παραγώγους προκύπτουν οι εξής σχέσεις:

$$\lambda \cdot \left(\frac{\partial p_{i,\beta,\psi}}{\partial X_{i,\beta,\psi}} \cdot X_{i,\beta,\psi} + p_{i,\beta,\psi} \right) \geq \frac{\partial u(X_{i,\beta,\psi})}{\partial X_{i,\beta,\psi}} \perp X_{i,\beta,\psi} \geq 0 \quad (4-74)$$

$$R - \sum_{i,\beta,\psi} p_{i,\beta,\psi} \cdot X_{i,\beta,\psi} \geq 0 \perp \lambda \geq 0 \quad (4-75)$$

$$X_{i,\beta,\psi} \geq 0 \quad (4-76)$$

$$\mu \cdot \left(\frac{\partial p_{i,\beta,\psi}}{\partial Y_{i,\beta,\psi}} \cdot Y_{i,\beta,\psi} + p_{i,\beta,\psi} \right) \geq \frac{\partial q(Y_{i,\beta,\psi})}{\partial Y_{i,\beta,\psi}} \perp Y_{i,\beta,\psi} \geq 0 \quad (4-77)$$

$$C_0 - \sum_{i,\beta,\psi} p_{i,\beta,\psi} \cdot Y_{i,\beta,\psi} \geq 0 \perp \mu \geq 0 \quad (4-78)$$

$$Y_{i,\beta,\psi} \geq 0 \quad (4-79)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial C_\pi}{\partial M_{i,k,\beta,\psi}} - \delta\pi_{i,\beta,\psi} \cdot \left(s_{i,k} + NS_{i,k} + \frac{\partial NS_{i,k}}{\partial M_{i,k,\beta,\psi}} M_{i,k,\beta,\psi} \right) \\ & - \delta\varphi_{i,\beta,\psi} \cdot \left(s_{i,k} + NS_{i,k} + \frac{\partial NS_{i,k}}{\partial M_{i,k,\beta,\psi}} M_{i,k,\beta,\psi} \right) + v_{i,k} + \end{aligned} \quad (4-80)$$

$$\begin{aligned} & cval \cdot emf_{i,k,\beta,\psi} \cdot \left(s_{i,k} + NS_{i,k} + \frac{\partial NS_{i,k}}{\partial M_{i,k,\beta,\psi}} M_{i,k,\beta,\psi} \right) \geq 0 \\ & \perp M_{i,k,\beta,\psi} \geq 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial C_{\pi}}{\partial NS_{i,k}} - \delta\pi_{i,\beta,\psi} \cdot \left(\sum_{\beta,\psi} M_{i,k,\beta,\psi} + \frac{\partial M_{i,k,\beta,\psi}}{\partial NS_{i,k}} NS_{i,k} \right) \\ & - \delta\varphi_{i,\beta,\psi} \cdot \left(\sum_{\beta,\psi} M_{i,k,\beta,\psi} + \frac{\partial M_{i,k,\beta,\psi}}{\partial NS_{i,k}} NS_{i,k} \right) \end{aligned} \quad (4-81)$$

$$\begin{aligned} & + cval \cdot \sum_{\beta,\psi} \left(emf_{i,k,\beta,\psi} \cdot \left(M_{i,k,\beta,\psi} + \frac{\partial M_{i,k,\beta,\psi}}{\partial NS_{i,k}} NS_{i,k} \right) \right) \\ & + \tau_i \cdot \left(\sum_k envl_{i,k} - EnvR_i \right) \geq 0 \quad \perp \quad NS_{i,k} \geq 0 \end{aligned}$$

$$X_{i,\beta,\psi} - \sum_{k \in \xi(i,k)} M_{i,k,\beta,\psi} \cdot s_{i,k} - \sum_{k \in \xi(i,k)} M_{i,k,\beta,\psi} \cdot NS_{i,k} \leq 0 \quad \perp \quad \delta\pi_{i,\beta,\psi} \geq 0 \quad (4-82)$$

$$Y_{i,\beta,\psi} - \sum_{k \in \varphi(i,k)} M_{i,k,\beta,\psi} \cdot s_{i,k} - \sum_{k \in \varphi(i,k)} M_{i,k,\beta,\psi} \cdot NS_{i,k} \leq 0 \quad \perp \quad \delta\varphi_{i,\beta,\psi} \geq 0 \quad (4-83)$$

$$\sum_{\beta,\psi} M_{i,k,\beta,\psi} - \overline{MO}_{i,k} \leq 0 \quad \perp \quad v_{i,k} \geq 0 \quad (4-84)$$

$$\sum_k NS_{i,k} \cdot envl_{i,k} - EnvR_i \cdot \sum_k NS_{i,k} \leq 0 \quad \perp \quad \tau_i \geq 0 \quad (4-85)$$

$$vcost_{i,k} - \overline{vcost}_{i,k} \cdot \left(1 + \tau_i \cdot (envl_{i,k} - EnvR_i) \right) = 0 \quad (4-86)$$

$$\left(\sum_{i,\beta,\psi,k} [(s_{i,k} + NS_{i,k}) \cdot M_{i,k,\beta,\psi} \cdot emf_{i,k,\beta,\psi}] - \overline{TotCO2} \right) \leq 0 \quad \perp \quad cval \geq 0 \quad (4-87)$$

$$Shveh_{i,k} = \mathcal{G}(vcost_{i,k}, chr_{i,k}) \quad (4-88)$$

$$NS_{i,k} = Shveh_{i,k} \cdot NewReg_i \quad (4-89)$$

$$M_{i,k,\beta,\psi}, NS_{i,k} \geq 0 \quad (4-90)$$

Το σύστημα των περιορισμών ισοτήτων και ανισοτήτων (4-74) - (4-90) και (4-68) - (4-71) αποτελεί το μαθηματικό μετασχηματισμό των επιμέρους προβλημάτων βελτιστοποίησης σε ένα πρόβλημα μεικτής συμπληρωματικότητας (MCP).

Στην περίπτωση που ο περιβαλλοντολογικός περιορισμός (4-85) ικανοποιείται σαν ισότητα σημαίνει ότι ο κατασκευαστής οχημάτων έχει αναγκαστεί να αλλάξει την τιμολόγηση των οχημάτων. Η τιμολόγηση πλέον αντανακλά και το κόστος της μη παραβίασης του περιορισμού και εξαρτάται από την τιμή της δυικής μεταβλητής τ_i .

Ενδιαφέρουσα είναι η περίπτωση κατά την οποία οι περιβαλλοντολογικοί περιορισμοί του μοντέλου δεν εφαρμόζονται ως ισότητες συγχρόνως. Δηλαδή, μπορεί για τους κατασκευαστές να ισχύει σαν ισότητα ενώ για το σύνολο του τομέα των μεταφορών οι συνολικές εκπομπές CO₂ να ικανοποιούν τον περιορισμό συνολικών εκπομπών (4-87). Η δυική τιμή του περιορισμού συνολικών εκπομπών CO₂ εκφράζει την τιμή του άνθρακα (carbon price).

Επιπλέον, η δυική τιμή $\nu_{i,k}$ του περιορισμού (4-84) προσδιορίζει την οριακή αξία χρήσης ενός ήδη υπάρχοντος αυτοκινήτου για πραγματοποίηση μεταφορικής δραστηριότητας. Στην περίπτωση που ο περιορισμός ικανοποιείται ανισοτικά δηλ. $\nu_{i,k} = 0$, σημαίνει ότι η χρήση του ήδη υπάρχοντος αυτοκινήτου παύει να είναι συμφέρουσα και συμφέρει η αγορά ενός νέου πιο οικονομικού αυτοκινήτου με χαμηλότερο κόστος μετακίνησης, όπως προσδιορίζεται από τον περιορισμό (4-80).

4.6 Το υπομοντέλο διαχείρισης στόλου και επιλογής νέου εξοπλισμού

4.6.1 Διαχείριση στόλου οχημάτων

Κάθε χρονική περίοδο, ένας στόλος οχημάτων $s_{i,a,k,t}$ είναι διαθέσιμος για την εξυπηρέτηση της ζήτησης για μετακινήσεις για κάθε μεταφορικό μέσο. Ο διαθέσιμος στόλος οχημάτων χαρακτηρίζεται από τεχνολογικά στοιχεία (τύπος καυσίμου, ειδική κατανάλωση, κόστος επένδυσης) αλλά και την ηλικία του a . Το τελευταίο στοιχείο είναι βασικό καθώς όσο αυξάνει η ηλικία ενός οχήματος, τόσο αυξάνει η πιθανότητα της απόσυρσής του για την αγορά νέου. Η εξέλιξη του στόλου των οχημάτων είναι δυναμική μέσα στο χρόνο καθώς η κάθε χρονική περίοδος που εξετάζεται εξαρτάται από την προηγούμενη. Ο στόλος των οχημάτων $s_{i,a,k,t}$ τη χρονική περίοδο t για το μέσο μεταφοράς i , τεχνολογίας k και ηλικίας a δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$s_{i,a,k,t} = sp_{i,a} \cdot s_{i,a,k,t-1} \quad (4-91)$$

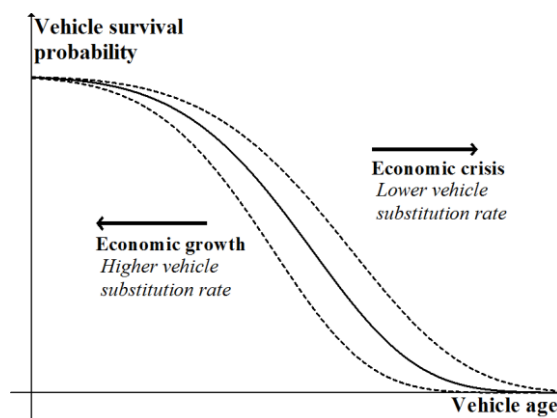
Ο όρος $sp_{i,a}$ χαρακτηρίζει την πιθανότητα να μην αποσυρθεί ένα όχημα ηλικίας a ενός συγκεκριμένου μέσου μεταφοράς i αποδίδεται με βάση την παρακάτω συνάρτηση:

$$sp_{i,a} = \exp \left[- \left(\frac{a + F_i}{T_i} \right)^{F_i} \right] \quad (4-92)$$

όπου F_i και T_i είναι εξωγενείς παράμετροι που καθορίζουν την καμπυλότητα της συνάρτησης επιβίωσης και το χαρακτηριστικό χρόνο ζωής κάθε μέσου μεταφοράς αντίστοιχα. Προφανώς, οι παράμετροι διαφέρουν σημαντικά από μεταφορικό μέσο καθώς και ανά χώρα με βάση στατιστικά στοιχεία (LAT et al, 2008) καθώς και μακροοικονομικά στοιχεία όπως το κατά κεφαλή εισόδημα.

Επίσης, οι παράμετροι F_i και T_i μεταβάλλονται ενδογενώς κατά την επίλυση του μοντέλου και είναι συνδεδεμένες με στοιχεία της οικονομίας όπως το ΑΕΠ. Ο σκοπός του στοιχείου αυτού είναι να προσομοιώσει με μεγαλύτερο ρεαλισμό τη συμπεριφορά των καταναλωτών σε περιόδους οικονομικής ύφεσης ή οικονομικής ανάπτυξης. Πράγματι, σε περιόδους ύφεσης, οι επενδύσεις σε νέες αγορές οχημάτων μειώνονται ενώ αυξάνεται ο χρόνος ζωής των οχημάτων καθώς οι καταναλωτές επιλέγουν να τα κρατήσουν περισσότερο. Η υπόθεση αυτή επιβεβαιώνεται από τους Zachariadis and Kouvaritakis (2003) που αναφέρουν ότι ο ρυθμός απόσυρσης των οχημάτων εξαρτάται από τις εθνικές ιδιαιτερότητες και την εξέλιξη του ΑΕΠ. Σχηματικά, η πιθανότητα επιβίωσης ενός οχήματος σε συνάρτηση της ηλικίας του καθώς των μακροοικονομικών δεικτών όπως η εξέλιξη της οικονομίας απεικονίζεται στο Σχ. 1.

Σχ. 1: Πιθανότητα επιβίωσης οχήματος ως συνάρτηση της ηλικίας του και μακροοικονομικών δεικτών



Η διασύνδεση της πιθανότητας επιβίωσης των οχημάτων με την κατάσταση της οικονομίας είναι σημαντική γιατί λαμβάνει σημαντικά στοιχεία της συμπεριφοράς του καταναλωτή υπόψη της. Τέτοια στοιχεία είναι η αβεβαιότητα ως προς το μέλλον και η αντίληψη του ρίσκου και του κινδύνου που αποτρέπει την επένδυση κεφαλαίων σε περιόδους ύφεσης. Η επίπτωση της αύξησης της πιθανότητας της επιβίωσης των οχημάτων σε περιόδους οικονομικής ύφεσης είναι η μείωση των νέων επενδύσεων. Το τελευταίο φέρει επιπτώσεις σε ενεργειακό επίπεδο που έγκειται στο γεγονός ότι ο στόλος των οχημάτων παραμένει παλαιότερης τεχνολογίας και κατά συνέπεια πιο ενεργοβόρος.

4.6.2 Μοντέλο επιλογής νέου εξοπλισμού

Η επιλογή νέων τύπων αυτοκινήτου μεταξύ των εναλλακτικών επιλογών έχει μοντελοποιηθεί με βάση τη θεωρία διακριτής επιλογής. Η θεωρία διακριτής επιλογής χρησιμοποιείται ευρέως στη μοντελοποίηση προβλημάτων επιλογής ενός αντιπροσωπευτικού καταναλωτή (Ortuzar, 1994) μεταξύ διαφόρων εναλλακτικών επιλογών που δεν είναι απαραίτητως υποκαταστάσιμες (Train 2003). Με βάση τη θεωρία αυτή, τα μοντέλα τύπου Random Utility χρησιμοποιούνται ευρέως στη βιβλιογραφία για να προσομοιώσουν τις πωλήσεις αγαθών και προϊόντων.

Σύμφωνα με τα μοντέλα αυτά, κάθε επιλογή αποτελεί ένα μοναδικό διακριτό συμβάν (π.χ. ένας συγκεκριμένος αποφασίζων κατά την απόφαση του τι αυτοκίνητο θα επιλέξει, αποφασίζει την αγορά ενός συγκεκριμένου αυτοκινήτου (1) ενώ δεν επιλέγει κανένα άλλο (0)). Επιπλέον, η επιλογή ενός συγκεκριμένου αυτοκινήτου σχετίζεται με το βαθμό που προσελκύει τον αποφασίζοντα η συγκεκριμένη επιλογή ή αλλιώς η χρησιμότητα που του προσφέρει. Η τελευταία διαφέρει ανά αποφασίζοντα και αποτελεί τυχαία μεταβλητή. Τέλος, γίνεται η υπόθεση ότι ο καταναλωτής επιλέγει την επιλογή που του προσφέρει τη μεγαλύτερη χρησιμότητα ή την επιλογή με το μικρότερο κόστος που του αποδίδει ωστόσο την ίδια χρησιμότητα (δυσικό πρόβλημα). Η προηγούμενη θεώρηση συνεπάγεται ότι ο αποφασίζων πραγματοποιεί λογικές επιλογές που είναι σύμφωνες με την οικονομική θεωρία.

Έστω $V_{\omega,k}$ η χρησιμότητα που λαμβάνει ο αποφασίζων ω από κάθε εναλλακτική επιλογή k . Η χρησιμότητα που λαμβάνει ο αποφασίζων από κάθε εναλλακτική επιλογή διακρίνεται στο τμήμα που εξαρτάται από μεταβλητές τις οποίες ο μοντελοποιός παρατηρεί $z_{\omega,k}$ και στο τμήμα μη παρατηρημένων χαρακτηριστικών $\varepsilon_{\omega,k}$. Η γραμμική μορφή της χρησιμότητας του αποφασίζοντος γράφεται ως εξής:

$$V_{\omega,k} = \gamma \cdot z_{\omega,k} + \varepsilon_{\omega,k} \quad (4-93)$$

όπου η παράμετρος γ υποδηλώνει ένα διάνυσμα συντελεστών για κάθε παρατηρημένη μεταβλητή.

Η μεταβλητή $z_{\omega,k}$ αποτελεί ένα διάνυσμα παρατηρημένων μεταβλητών σχετικών με την εναλλακτική επιλογή k το οποίο εξαρτάται από το σύνολο των παρατηρημένων χαρακτηριστικών $chr_{\omega,k}$ της συγκεκριμένης επιλογής (όπως π.χ. το κόστος απόκτησης). Επίσης, η μεταβλητή $z_{\omega,k}$ εξαρτάται και από τα παρατηρημένα χαρακτηριστικά του αποφασίζοντος s_{ω} . Συνεπώς, μπορεί να γραφεί ως:

$$z_{\omega,k} = z(chr_{\omega,k}, s_{\omega}) \quad (4-94)$$

Σύμφωνα με τη θεωρία, η πιθανότητα ο αποφασίζων να επιλέξει την εναλλακτική επιλογή k έναντι μιας άλλης εναλλακτικής k' από το ίδιο σύνολο επιλογών είναι:

$$P(k|z_{\omega,k}) = Pr(\gamma z_{\omega,k} + \varepsilon_{\omega,k}) > Pr(\gamma z_{\omega,kk} + \varepsilon_{\omega,kk}) \quad (4-95)$$

Διάφορα μοντέλα θεμελιώνονται στη βιβλιογραφία, ανάλογα με την κατανομή που ακολουθεί η μεταβλητή $\varepsilon_{\omega,kk}$. Στην περίπτωση που η μεταβλητή $\varepsilon_{\omega,kk}$ ακολουθεί κατανομή ακραίων τιμών (generalised extreme value distribution), με αθροιστική συνάρτηση κατανομής $CDF(x) = \exp[-\exp(-x)]$, τότε σύμφωνα με τους Williams (1977) και McFadden (1978), η πιθανότητα της Εξ. (4-95) υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση που είναι γνωστή ως το μοντέλο logit:

$$P(k|z_{\omega,k}) = \frac{\exp(\gamma \cdot z_{\omega,k})}{\sum_{kk} \exp(\gamma \cdot z_{\omega,kk})} \quad (4-96)$$

Στην παραπάνω έκφραση ο όρος $z_{\omega,k} < 0$ γιατί θεωρείται ότι υποδηλώνει το γενικευμένο κόστος της μεταφορικής υπηρεσίας που προσφέρει η κάθε εναλλακτική, ενώ η παράμετρος $\gamma > 0$. Όσο μειώνεται το κόστος της κάθε εναλλακτικής επιλογής, τόσο αυξάνει η πιθανότητα να επιλεγεί από τον αποφασίζοντα σύμφωνα με τις αρχές της οικονομικής θεωρίας.

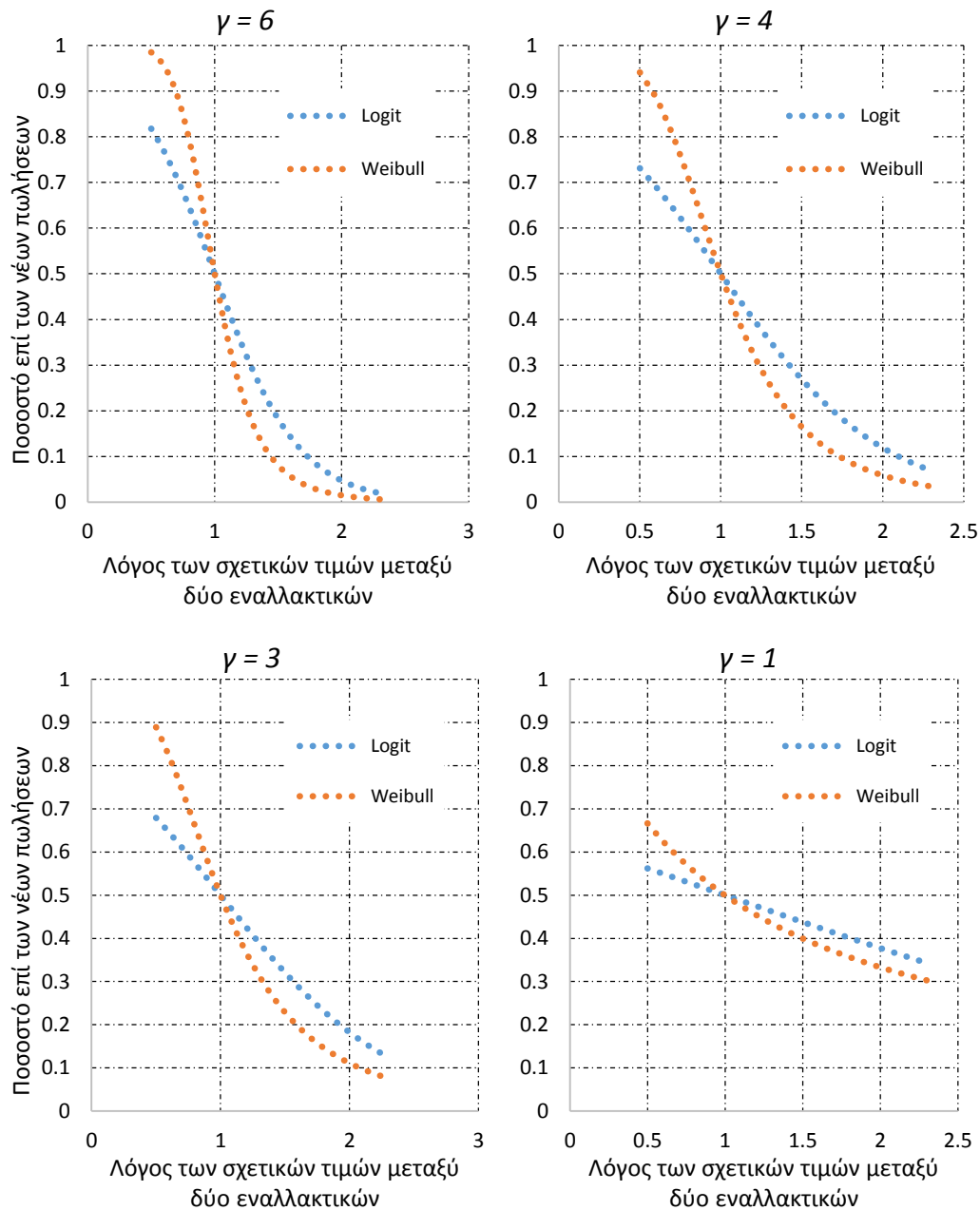
Αν στην εξίσωση (4-96) η μεταβλητή $z_{\omega,k}$ αντικατασταθεί με το λογάριθμο του δείκτη κόστους $Cwb_{\omega,k} > 0$:

$$-z_{\omega,k} = \ln(Cwb_{\omega,k}) \quad (4-97)$$

τότε προκύπτει κατανομή της τυχαίας μεταβλητής κατά Weibull σύμφωνα με τους Castillo et al. (2008), Fosgerau και Bierlaire, (2009) και Mattsson et al., (2014). Η εξίσωση (4-96) γράφεται:

$$P(k|z_{\omega,k}) = \frac{\exp[-\gamma \cdot \ln(Cwb_{\omega,k})]}{\sum_{kk} \exp[-\gamma \cdot \ln(Cwb_{\omega,kk})]} = \frac{Cwb_{\omega,k}^{-\gamma}}{\sum_{kk} Cwb_{\omega,kk}^{-\gamma}} \quad (4-98)$$

Σύμφωνα με τους Fosgerau και Bierlaire (2009), και οι δύο συναρτησιακές μορφές θεμελιώνονται στη θεωρίας διακριτής επιλογής ενώ η επιλογή της μιας έναντι της άλλης αποτελεί απόφαση του αναλυτή και γίνεται συνήθως εμπειρικά. Το πλεονέκτημα της χρήσης της συνάρτησης Weibull έναντι της συνάρτησης Logit έγκειται στο γεγονός ότι η πρώτη συγκλίνει γρηγορότερα προς τις ακραίες τιμές, γεγονός που δίνει τη δυνατότητα στις ακραίες τιμές να έχουν μεγαλύτερη συχνότητα εμφάνισης (Σχήμα 4-11).



Σχήμα 4-11: Συμπεριφορά των μοντέλων Logit και Weibull για διάφορες τιμές του παράγοντα υποκατάστασης

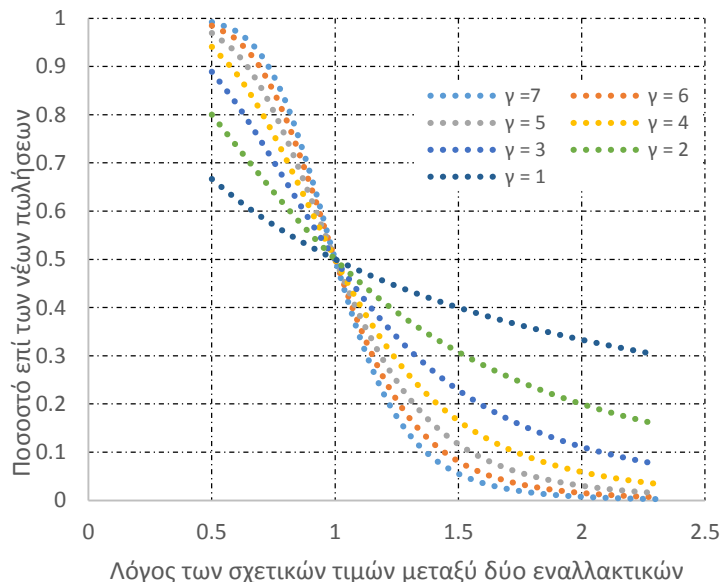
Για τις ανάγκες της μοντελοποίησης της παρούσας διατριβής χρησιμοποιείται η κατανομή κατά Weibull. Η συχνότητα της επιλογής (ή αλλιώς η πιθανότητα) μεταξύ των εναλλακτικών επιλογών εκφράζεται ως το μερίδιο *share* της συγκεκριμένης επιλογής στο σύνολο των νέων πωλήσεων αυτοκινήτων. Οι μεταβλητές απόφασης που επηρεάζουν την κατανομή των νέων πωλήσεων αυτοκινήτων είναι οι δείκτες κόστους ανά επιλογή $Cwb_{i,k,t}$. Ο δείκτης i εκφράζει το μεταφορικό μέσο ενώ ο δείκτης k εκφράζει την εναλλακτική επιλογή και t είναι η χρονική περίοδος.

$$share_{i,k,t} = \frac{w_{i,k,t} \cdot Cwb_{i,k,t}^{-\gamma}}{\sum_{i,kk} w_{i,kk,t} \cdot Cwb_{i,kk,t}^{-\gamma}} \quad (4-99)$$

Ο δείκτης κόστους $Cwb_{i,k,t}$ μετράται σε Ευρώ/χλμ. και περιλαμβάνει τα σταθερά, τα μεταβλητά και άλλα κρυφά κόστη (όπως το άγχος αυτονομίας για τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα, την έλλειψη διαθεσιμότητας υποδομής ανεφοδιασμού καυσίμου). Ο όρος γ απεικονίζει ουσιαστικά το ρυθμό υποκατάστασης μεταξύ των εναλλακτικών επιλογών με βάση το σχετικό λόγο των δεικτών κόστους μεταξύ των επιλογών. Από το σημείο αυτό ο συγκεκριμένος όρος θα αποκαλείται ως παράγοντας υποκατάστασης του μοντέλου επιλογής νέων οχημάτων. Οι όροι $w_{i,k,t}$ αντανακλούν τη σχετική ωριμότητα κάθε επιλογής σε σχέση με τις ανταγωνιστικές επιλογές και εξαρτάται από την αποδοχή της τεχνολογίας από την αγορά και την ετοιμότητα των καταναλωτών να την υιοθετήσουν. Τα σχετικά βάρη $w_{i,k,t}$ εξαρτώνται επίσης από το βαθμό τεχνολογικής προόδου και εμπορικής ωριμότητας και είναι δυνατό να μεταβάλλονται οι τιμές τους σε συγκεκριμένα σενάρια ενεργειακής πολιτικής.

4.6.3 Προσαρμογή του μοντέλου επιλογής νέων τύπων οχημάτων

Η παρούσα παράγραφος περιγράφει την προσαρμογή του μοντέλου επιλογής νέων τύπων οχημάτων και την εμπειρική εκτίμηση του παράγοντα υποκατάστασης μεταξύ των εναλλακτικών επιλογών γ . Γίνεται η υπόθεση της επιλογής μεταξύ δύο εναλλακτικών επιλογών αυτοκινήτων έτσι ώστε να αναλυθεί η συμπεριφορά του μοντέλου για διάφορες μεταβολές της τιμής αγοράς των αυτοκινήτων.



Σχήμα 4-12: Επίδραση του παράγοντα υποκατάστασης στα μερίδια νέων πωλήσεων

Πίνακας 4-2: Τεχνοοικονομικές υποθέσεις για την προσαρμογή του μοντέλου επιλογής νέων αυτοκινήτων

Τεχνοοικονομικές υποθέσεις	Μεσαίο αυτοκίνητο βενζίνης	Μεσαίο αυτοκίνητο ντίζελ
Κόστος αγοράς	21500	24500
Ετήσια ράντα πληρωμής	4699	5355
Επιτόκιο	17.5%	17.5%
Οικονομική ζωή επένδυσης (έτη)	10	10
Κόστος καυσίμου (Ευρώ)	1800	975
Ειδική κατανάλωση (λίτρα/ 100 χλμ.)	8	5
Τιμή καυσίμου (Ευρώ/ λίτρο)	1.5	1.3
Ετήσια διανυθείσα απόσταση (χλμ.)	15000	15000
Μέσο κόστος (Ευρώ/ χλμ.)	0.433	0.422

Τα χαρακτηριστικά των δύο εναλλακτικών αυτοκινήτων που αποτελούν τη βάση για την περαιτέρω ανάλυση της συμπεριφοράς του μοντέλου της επιλογής νέων τύπων αυτοκινήτων (Πίνακας 4-3). Αρχικά, γίνεται η παραδοχή ότι η μέση ετήσια διανυθείσα απόσταση των αυτοκινήτων είναι 15000 χλμ.. Η απόσταση αυτή επηρεάζει τόσο το συνολικό ετήσιο κόστος καυσίμου όσο και το μέσο κόστος. Ο υπολογισμός του μέσου κόστους για τις ανάγκες της ανάλυσης και της προσαρμογής της συμπεριφοράς του μοντέλου γίνεται ως εξής:

$$Cwb^*_{i,k,t} = \frac{I_{i,k} \cdot \gamma_{i,k}}{Mlg_{i,k,t}} + fc_{i,k} \quad (4-100)$$

Όπου ο όρος $Cwb^*_{i,k,t}$ υποδηλώνει το μέσο κόστος (Ευρώ/χλμ) που εισάγεται στο μοντέλο επιλογής στη φάση προσαρμογής, ενώ οι όροι $I_{i,k} \cdot \gamma_{i,k}$ και $fc_{i,k}$ υποδηλώνουν το ετήσιο ποσό αποπληρωμής κεφαλαιουχικού εξοπλισμού (Ευρώ) και το κόστος καυσίμου (Ευρώ/χλμ.). Ο όρος $Mlg_{i,k,t}$ ορίζει την ετήσια διανυθείσα απόσταση (χιλιόμετρα).

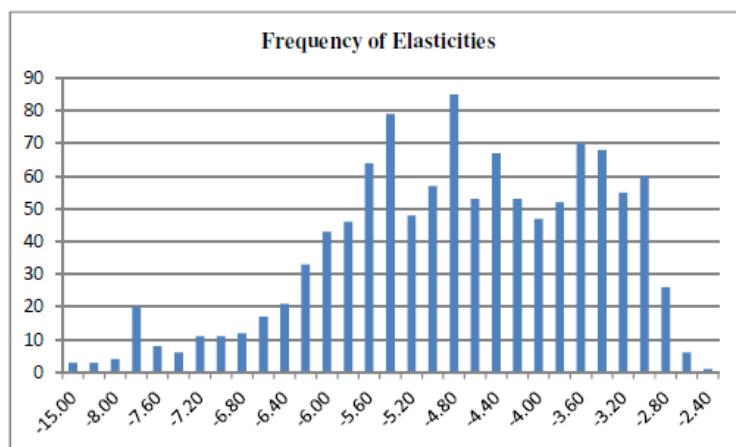
Πίνακας 4-3: Ελαστικότητες τιμής με βάση το μοντέλο επιλογής νέων αυτοκινήτων για ένα εύρος παραμέτρων

Μέση ετήσια διανυθείσα απόσταση: 10000 χλμ.							
Μεταβολή τιμής αγοράς	$\gamma = -7$	$\gamma = -6$	$\gamma = -5$	$\gamma = -4$	$\gamma = -3$	$\gamma = -2$	$\gamma = -1$
Δκόστος (€)= 500	-4.78	-4.00	-3.22	-2.45	-1.71	-1.04	-0.46
Δκόστος (€)= 1000	-4.50	-3.81	-3.09	-2.37	-1.67	-1.02	-0.45
Δκόστος (€)= 1500	-4.24	-3.62	-2.97	-2.30	-1.64	-1.01	-0.45
Δκόστος (€)= 2000	-4.00	-3.45	-2.86	-2.23	-1.60	-0.99	-0.45
Μέση ετήσια διανυθείσα απόσταση: 12000 χλμ.							
	$\gamma = -7$	$\gamma = -6$	$\gamma = -5$	$\gamma = -4$	$\gamma = -3$	$\gamma = -2$	$\gamma = -1$
Δκόστος (€)= 500	-4.06	-3.37	-2.69	-2.05	-1.45	-0.90	-0.42
Δκόστος (€)= 1000	-3.88	-3.24	-2.61	-2.00	-1.42	-0.89	-0.41
Δκόστος (€)= 1500	-3.71	-3.12	-2.54	-1.96	-1.40	-0.88	-0.41
Δκόστος (€)= 2000	-3.54	-3.01	-2.46	-1.91	-1.38	-0.87	-0.40
Μέση ετήσια διανυθείσα απόσταση: 13000 χλμ.							
	$\gamma = -7$	$\gamma = -6$	$\gamma = -5$	$\gamma = -4$	$\gamma = -3$	$\gamma = -2$	$\gamma = -1$
Δκόστος (€)= 500	-3.63	-3.01	-2.42	-1.86	-1.33	-0.84	-0.40
Δκόστος (€)= 1000	-3.50	-2.92	-2.36	-1.82	-1.31	-0.83	-0.39
Δκόστος (€)= 1500	-3.37	-2.84	-2.31	-1.79	-1.29	-0.82	-0.39
Δκόστος (€)= 2000	-3.24	-2.75	-2.25	-1.75	-1.27	-0.81	-0.39
Μέση ετήσια διανυθείσα απόσταση: 15000 χλμ.							
	$\gamma = -7$	$\gamma = -6$	$\gamma = -5$	$\gamma = -4$	$\gamma = -3$	$\gamma = -2$	$\gamma = -1$
Δκόστος (€)= 500	-2.72	-2.31	-1.90	-1.51	-1.12	-0.74	-0.36
Δκόστος (€)= 1000	-2.68	-2.28	-1.88	-1.49	-1.11	-0.73	-0.36
Δκόστος (€)= 1500	-2.63	-2.24	-1.86	-1.47	-1.09	-0.72	-0.36
Δκόστος (€)= 2000	-2.58	-2.20	-1.83	-1.46	-1.08	-0.72	-0.35
Μέση ετήσια διανυθείσα απόσταση: 16000 χλμ.							
	$\gamma = -7$	$\gamma = -6$	$\gamma = -5$	$\gamma = -4$	$\gamma = -3$	$\gamma = -2$	$\gamma = -1$
Δκόστος (€)= 500	-2.30	-3.37	-2.69	-2.05	-1.45	-0.90	-0.42
Δκόστος (€)= 1000	-2.28	-3.24	-2.61	-2.00	-1.42	-0.89	-0.41
Δκόστος (€)= 1500	-2.26	-3.12	-2.54	-1.96	-1.40	-0.88	-0.41
Δκόστος (€)= 2000	-2.24	-3.01	-2.46	-1.91	-1.38	-0.87	-0.40
Μέση ετήσια διανυθείσα απόσταση: 17000 χλμ.							
	$\gamma = -7$	$\gamma = -6$	$\gamma = -5$	$\gamma = -4$	$\gamma = -3$	$\gamma = -2$	$\gamma = -1$
Δκόστος (€)= 500	-1.92	-1.70	-1.47	-1.22	-0.94	-0.65	-0.34
Δκόστος (€)= 1000	-1.92	-1.70	-1.46	-1.21	-0.94	-0.64	-0.33
Δκόστος (€)= 1500	-1.92	-1.70	-1.46	-1.20	-0.93	-0.64	-0.33
Δκόστος (€)= 2000	-1.92	-1.69	-1.45	-1.20	-0.92	-0.64	-0.33

4.6.4 Εμπειρική εκτίμηση του μοντέλου επιλογής νέων τεχνολογιών

Οι τιμές των ελαστικοτήτων ως προς την ίδια τιμή αγοράς του αυτοκινήτου που προκύπτουν με την τιμή του παράγοντα $\gamma = -7$, κυμαίνονται μεταξύ των τιμών -4.78 και -1.92 . Σύμφωνα με τους υπολογισμούς, όσο μικρότερη είναι η ετήσια διανυθείσα απόσταση που πραγματοποιεί το αυτοκίνητο βενζίνης, τόσο μεγαλύτερη είναι η απόλυτη τιμή της ελαστικότητας τιμής. Υπενθυμίζεται ότι η ετήσια απόσταση του ανταγωνιστικού αυτοκινήτου ντίζελ θεωρείται ότι παραμένει σταθερή στα 15000 χλμ. Οι ελαστικότητες τιμής που προκύπτουν για $\gamma = -7$ και μέση ετήσια διανυθείσα απόσταση του αυτοκινήτου βενζίνης 10000 χλμ. και 12000 χλμ. είναι -4.78 και -4.50 αντίστοιχα για μεταβολή κόστους κατά 500 ευρώ. Οι περιπτώσεις που η μέση διανυθείσα απόσταση του αυτοκινήτου βενζίνης είναι ίση ή και μεγαλύτερη από του αυτοκινήτου ντίζελ οδηγεί σε μείωση της απόλυτου τιμής των ελαστικοτήτων. Ωστόσο, το ενδεχόμενο αυτό δεν είναι τόσο σύνηθες στην πραγματικότητα αφού οι χρήστες των αυτοκινήτων ντίζελ, σύμφωνα με στατιστικές μετακινήσεων για την Ευρώπη όπως των TRACCS (EMISIA et al., 2013) και FLEETS (LAT et al., 2008) χρησιμοποιούν περισσότερο το αυτοκίνητό τους σε σχέση με τους κατόχους βενζίνης.

Με βάση τα αποτελέσματα της μεθοδολογίας, προκύπτει ότι η τιμή του παράγοντα υποκατάστασης $\gamma = -7$ οδηγεί σε ελαστικότητες που βρίσκονται εντός ορίων της βιβλιογραφίας (EPA, 2012, EFTEC, 2008, Berry et al., 1995). Ο παρακάτω πίνακας παρουσιάζει τις ελαστικότητες των μεριδίων στην αγορά ως προς την τιμή αγοράς για ένα μεγάλο ετερόκλητο πλήθος αυτοκινήτων για την περίπτωση της Αμερικής (EPA, 2012). Με βάση την ίδια μελέτη, οι υψηλές τιμές ελαστικοτήτων οφείλονται σε μεμονωμένα δείγματα αυτοκινήτων με υπέρογκο ποσό απόκτησης (>200000 \$).



Σχήμα 4-13: Κατανομή ελαστικοτήτων των νέων πωλήσεων αυτοκινήτων ως προς την τιμή αγοράς (Πηγή: EPA, 2012)

4.6.4.1 Ανάλυση ευαισθησίας ως προς τις μεταβολές των τιμών καυσίμου

Υπολογίζεται η ελαστικότητα μεταβολής του μεριδίου των πωλήσεων των αυτοκινήτων βενζίνης ως προς τη μεταβολή των τιμών καυσίμου. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά των αυτοκινήτων παραμένουν αμετάβλητα με τις τιμές που παρουσιάζει ο Πίνακας 4-2.

Πίνακας 4-4: Υποθέσεις τιμών καυσίμου για την ανάλυση ευαισθησίας του μοντέλου επιλογής νέων αυτοκινήτων

	Βάση	Περ. 1	Περ. 2	Περ. 3	
Βενζίνη	Τιμή προ φόρων (Ευρώ/ λίτρο)	0.40	0.45	0.65	0.55
	Ειδικός φόρος (Ευρώ/ λίτρο)	0.77	0.77	0.77	0.77
	ΦΠΑ	23%	23%	23%	23%
	Τελική τιμή (Ευρώ/ λίτρο)	1.44	1.50	1.75	1.62
	Μεταβολή (Ευρώ/ λίτρο)		0.06	0.31	0.18
Ντίζελ	Τιμή προ φόρων (Ευρώ/ λίτρο)	0.40	0.45	0.65	0.55
	Ειδικός φόρος (Ευρώ/ λίτρο)	0.45	0.45	0.45	0.45
	ΦΠΑ	23%	23%	23%	23%
	Τελική τιμή (Ευρώ/ λίτρο)	1.05	1.11	1.35	1.23

Για το σκοπό της ανάλυσης ευαισθησίας, οι τιμές καυσίμων μεταβάλλονται όπως ορίζει ο Πίνακας 4-4. Οι τιμές προ φόρων θεωρούνται ότι μεταβάλλονται ισόποσα, ενώ ο ειδικός φόρος καθώς και ο φόρος προστιθέμενης αξίας (ΦΠΑ) θεωρούνται ότι παραμένουν σταθερά. Η ανάλυση ευαισθησίας του μοντέλου επιλογής νέων οχημάτων που πραγματοποιείται λαμβάνει υπόψη και το κριτήριο της ετήσιας διανυθείσας απόστασης των οχημάτων.

Αρχικά, γίνεται η παραδοχή ότι η μέση απόσταση που διανύουν τα αυτοκίνητα ντίζελ και βενζίνης είναι ίση. Το εύρος της διανυθείσας απόστασης για τις ανάγκες της ανάλυσης ευαισθησίας θεωρείται ότι κυμαίνεται μεταξύ 10000 χλμ. και 23000 χλμ. ετησίως.

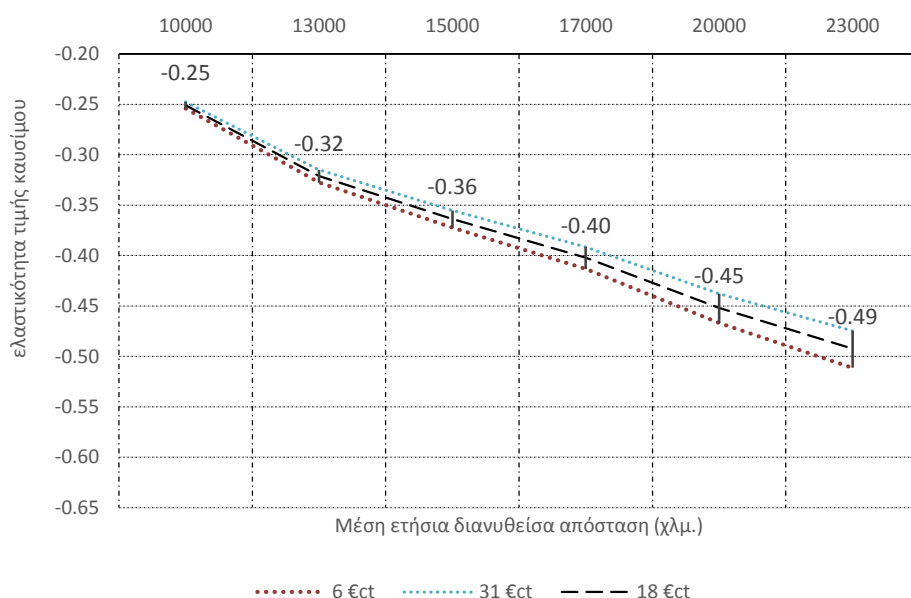
Η ανάλυση ευαισθησίας δείχνει ότι η ενδεχόμενη αύξηση των τιμών καυσίμων οδηγεί σε μείωση του ποσοστού των αυτοκινήτων βενζίνης στο σύνολο των πωλήσεων. Αυτό εξακριβώνεται από το γεγονός ότι οι ελαστικότητες του μεριδίου των αυτοκινήτων βενζίνης στο σύνολο των πωλήσεων ως προς τη μεταβολή της τιμής των καυσίμων είναι αρνητικές. Επιπλέον, το εύρος της ελαστικότητας του μεριδίου των αυτοκινήτων βενζίνης στο σύνολο των πωλήσεων είναι σχετικά μικρό για μεταβολές των τιμών που κυμαίνονται μεταξύ 5 €ct και 30 €ct. Το παραπάνω εύρος αυξάνει όσο αυξάνει η μέση ετήσια διανυθείσα απόσταση που έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της συμμετοχής του κόστους καυσίμου στο συνολικό κόστος.

Η ανάλυση ευαισθησίας του μοντέλου επιλογής νέων αυτοκινήτων που εξετάζει τις προοπτικές αγορές των δύο συγκεκριμένων τύπων αυτοκινήτων, δείχνει ότι η απόλυτη τιμή της ελαστικότητας του μεριδίου των πωλήσεων αυτοκινήτων βενζίνης αυξάνεται όσο η χιλιομετρική ετήσια απόσταση αυξάνεται (Πίνακας 4-5). Συνεπώς, όσο

μεγαλύτερες είναι οι αποστάσεις που πραγματοποιούν οι μετακινούμενοι με το αυτοκίνητό τους, τόσο αυξάνεται η πιθανότητα να στραφούν σε αυτοκίνητο ντίζελ έναντι βενζίνης σε ενδεχόμενη αύξηση των τιμών.

Τα παραπάνω αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας του μοντέλου για το συγκεκριμένο παράδειγμα εναρμονίζονται με τη συμπεριφορά των καταναλωτών στην πραγματικότητα. Πράγματι, το αυτοκίνητο ντίζελ κοστίζει ακριβότερα σε σχέση με το αυτοκίνητο βενζίνης, ωστόσο είναι σημαντικά πιο οικονομικό στη χρήση γεγονός που οδηγεί σε εξοικονόμηση δαπανών σε καύσιμο. Κατά συνέπεια, μια ενδεχόμενη αύξηση των τιμών καυσίμου θα οδηγήσει σε μείωση των νέων πωλήσεων αυτοκινήτων βενζίνης. Όπως φάνηκε από τα αποτελέσματα της ανάλυσης, η ποσοστιαία μείωση των πωλήσεων αυτοκινήτων βενζίνης αποτελεί συνάρτηση της απόστασης που διανύει ο μετακινούμενος.

Πίνακας 4-5: Ελαστικότητα τιμής καυσίμου των νέων πωλήσεων αυτοκινήτων ντίζελ (ίσες ετήσιες αποστάσεις)

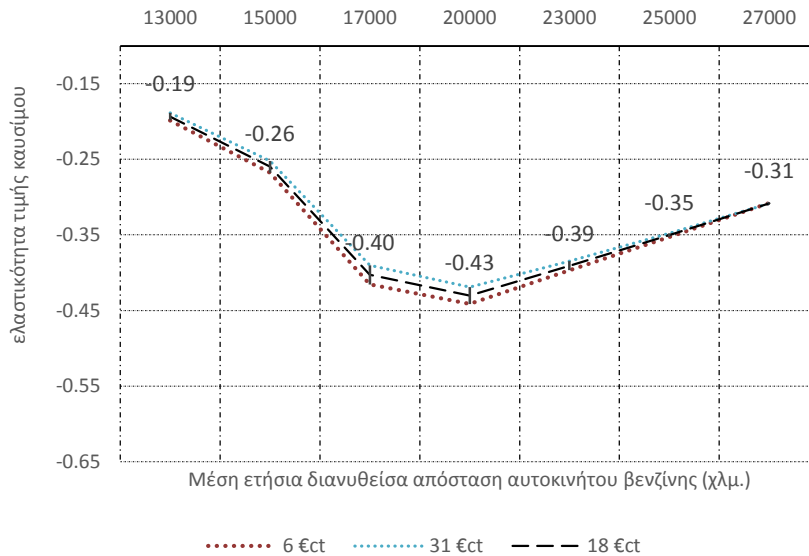


Εναλλακτικά, εξετάζεται η περίπτωση που η μέση ετήσια διανυθείσα απόσταση των δύο τύπων αυτοκινήτων δεν μεταβάλλεται πανομοιότυπα όπως στην προηγούμενη περίπτωση. Η παρούσα ανάλυση ευαισθησίας θεωρεί ότι η μέση ετήσια απόσταση που διανύει το αυτοκίνητο ντίζελ είναι 20000 χλμ. και παραμένει σταθερή. Ωστόσο, η μέση απόσταση του αυτοκινήτου βενζίνης θεωρείται ότι λαμβάνει τιμές μεταξύ 13000 χλμ. και 27000 χλμ. Οι μεταβολές των τιμών καυσίμων θεωρούνται ότι κυμαίνονται όπως ορίζει ο Πίνακας 4-4.

Τα αποτελέσματα της παρούσας ανάλυσης ευαισθησίας επιβεβαιώνουν εκ νέου ότι η αύξηση των τιμών οδηγεί σε μείωση των νέων πωλήσεων των αυτοκινήτων βενζίνης έναντι των ντίζελ. Το συγκεκριμένο συμπέρασμα επιβεβαιώνεται σε όλο το εύρος των αποστάσεων που θεωρείται ότι διανύει το αυτοκίνητο βενζίνης. Ωστόσο, η

συμπεριφορά του μοντέλου παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για το εύρος αποστάσεων του αυτοκινήτου βενζίνης που είναι μεγαλύτερο από του ντίζελ. Εξάγεται το συμπέρασμα ότι αυξανόμενης της απόστασης που διανύει το αυτοκίνητο βενζίνης, οδηγεί σε μείωση της απόλυτης τιμής της ελαστικότητας των νέων πωλήσεων αυτοκινήτων βενζίνης στην αγορά (Πίνακας 4-6).

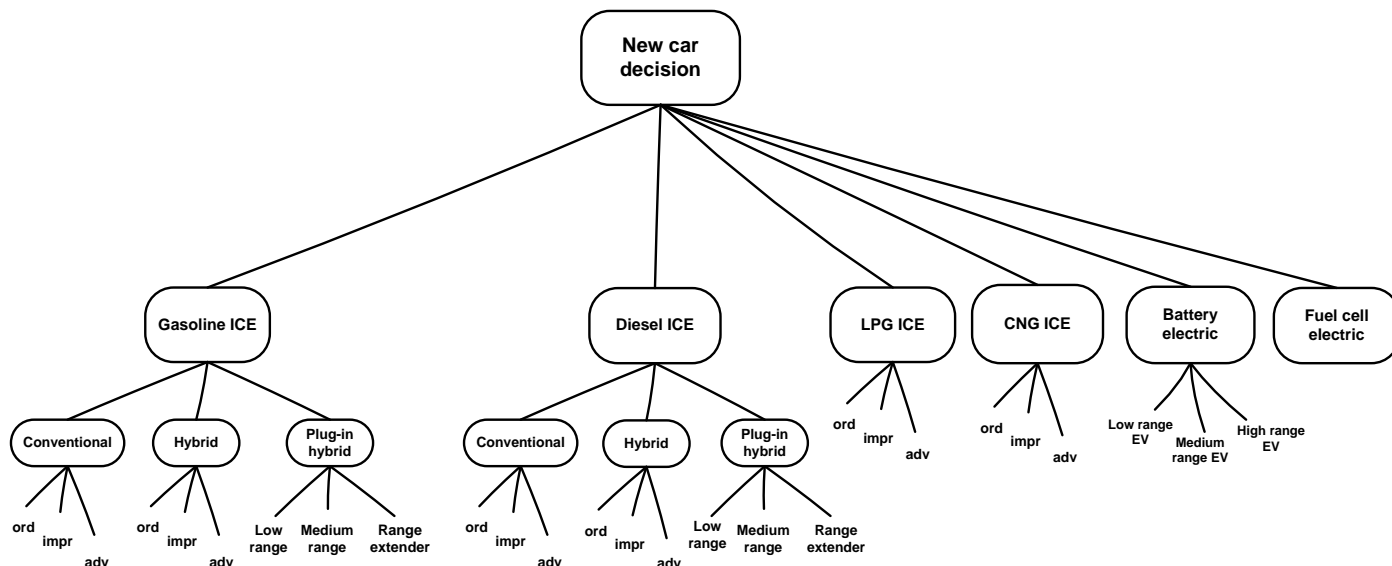
Πίνακας 4-6: Ελαστικότητα τιμής καυσίμου των νέων πωλήσεων αυτοκινήτων ντίζελ (διαφορετικές ετήσιες αποστάσεις)



4.7 Δομή και κριτήρια επιλογής νέου εξοπλισμού

Η επιλογή του είδους των τεχνολογιών των νέων επενδύσεων αποτελεί μια πολύ σημαντική λειτουργία του μοντέλου. Στο στάδιο αυτό, ο καταναλωτής και ο πάροχος υπηρεσιών μεταφορών επιλέγουν σε τι είδους τύπο οχήματος θα επενδύσουν.

4.7.1 Δένδρα απόφασης τεχνολογίας και καυσίμου νέων οχημάτων

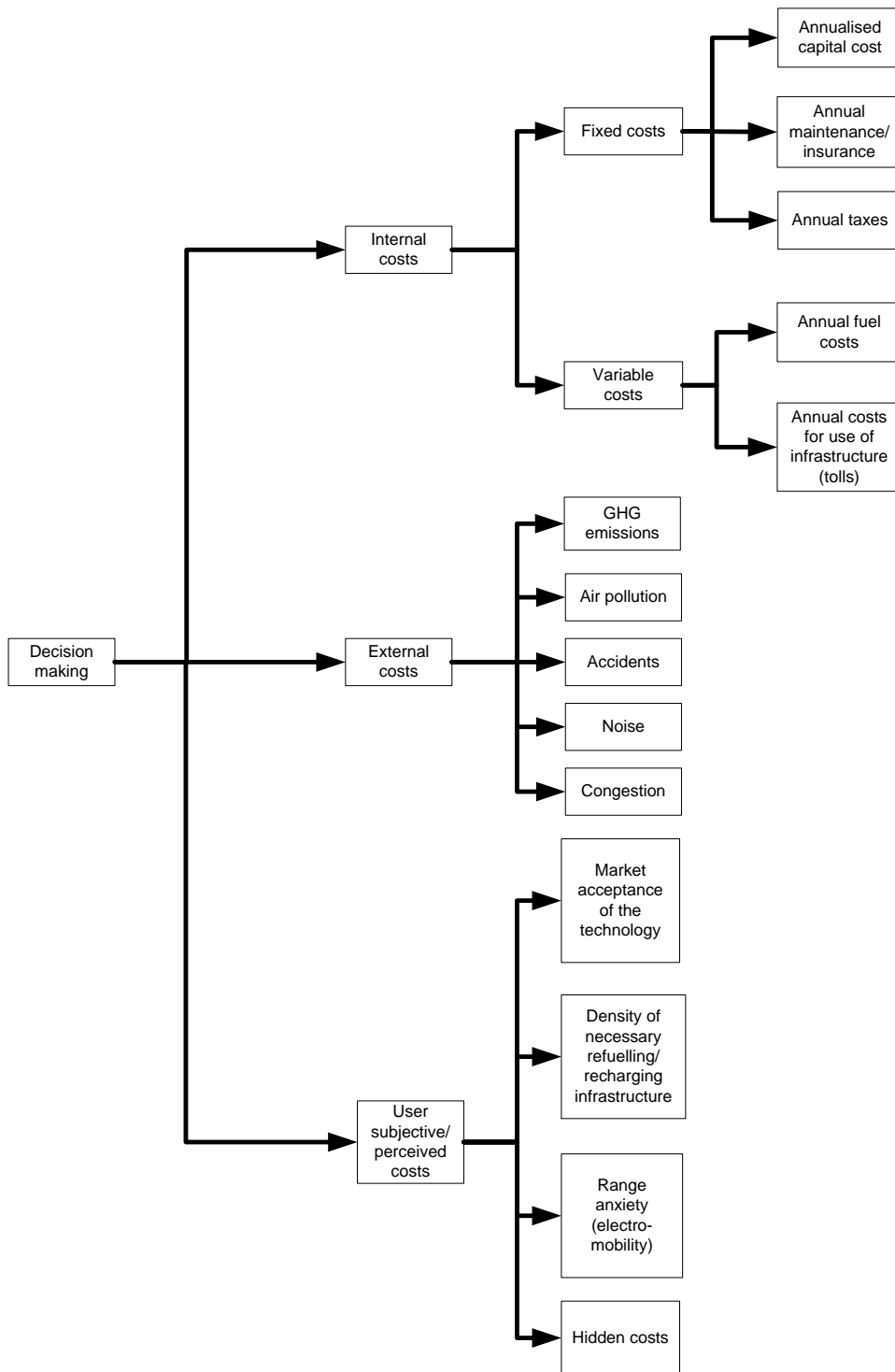


Σχήμα 4-14: Δένδρο απόφασης τεχνολογίας και καυσίμου για αγορά νέου αυτοκινήτου

4.7.2 Άξονες κριτηρίων επιλογής νέου εξοπλισμού

Οι παράγοντες που επηρεάζουν την απόφαση του κάθε αποφασίζοντα είναι αρκετοί και διακρίνονται τόσο σε οικονομικούς όσο και σε μη οικονομικούς. Οι μη οικονομικοί παράγοντες έχουν συμπεριληφθεί στην απόφαση για να αποδώσουν πιο ρεαλιστικά την πραγματικότητα όπου οι αποφάσεις που λαμβάνονται καθημερινά δε βασίζονται μόνο σε οικονομικούς λόγους. Οι μη οικονομικοί παράγοντες αφορούν την αντίληψη του αποφασίζοντος και έχουν μοντελοποιηθεί σαν κόστη.

Συνεπώς, η λήψη της απόφασης χαρακτηρίζεται από τρεις άξονες κριτηρίων (Σχήμα 4-15). Ο πρώτος άξονας λαμβάνει υπόψη το κόστος και όλες τις οικονομικές δαπάνες σχετικές για κάθε εναλλακτική επιλογή. Τα κόστη αυτά χαρακτηρίζονται και εσωτερικά κόστη γιατί αποτελούν πραγματικές πληρωμές. Ο δεύτερος άξονας περιλαμβάνει τα εξωτερικά κόστη της κάθε εναλλακτικής επιλογής. Τα εξωτερικά κόστη περιλαμβάνουν τις επιπτώσεις της χρήσης κάθε εναλλακτικής επιλογής στο υπόλοιπο κοινωνικό σύνολο ή στους χρήστες των υποδομών. Οι επιπτώσεις αυτές δε συνιστούν κόστος για αυτούς που τις προκαλούν παρά μόνο στην περίπτωση που εσωτερικοποιηθούν. Ο τρίτος άξονας κριτηρίων περιλαμβάνει τα στοιχεία εκείνα που δε σχετίζονται με κόστος αλλά είναι δυνατό να επηρεάσουν τη συμπεριφορά του καταναλωτή εις βάρος μιας εναλλακτικής επιλογής: τα «κρυφά» κόστη.



Σχήμα 4-15: Σχηματική αναπαράσταση των αξόνων κριτηρίων επιλογής τύπων οχημάτων

Ο δείκτης του κόστους $Cwb_{i,k,t}$ για κάθε εναλλακτική επιλογή οχήματος και τεχνολογίας που εισέρχεται στο μοντέλο επιλογής νέων τεχνολογιών δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$Cwb_{i,k,t} = \frac{fc_{i,k} + I_{i,k} \cdot \gamma_{i,k}}{Mlg_{i,k,t}} + vcW_{i,k} + \frac{pc_{i,k}}{Mlg_{i,k,t}} \quad (4-101)$$

4.7.3 Πραγματικά κόστη

Ο πρώτος άξονας περιλαμβάνει όλα τα κόστη που σχετίζονται τόσο με την απόκτηση ενός συγκεκριμένου οχήματος όσο και με τη χρήση του. Τα κόστη αυτά διακρίνονται σε μεταβλητά και σταθερά κόστη. Ο όρος $fc_{i,k}$ αντιστοιχεί στα ετήσια πάγια έξοδα (κόστος συντήρησης, ασφαλιστικές εισφορές, φόρος ιδιοκτησίας) ενώ ο όρος $I_{i,k} \cdot \gamma_{i,k}$ υποδηλώνει την ετήσια δαπάνη αποπληρωμής του κεφαλαίου αγοράς του αυτοκινήτου. Ο όρος $Mlg_{i,k,t}$ ορίζει την ετήσια διανυθείσα χιλιομετρική απόσταση ανά τεχνολογική επιλογή.

Το επιτόκιο αναγωγής υποδηλώνει και το κόστος ευκαιρίας του κεφαλαίου και διαφέρει ανά αποφασίζοντα. Το επιτόκιο αναγωγής λαμβάνει υψηλότερες τιμές για τον καταναλωτή σε σχέση με τις επιχειρήσεις γεγονός που υποδηλώνει και τη μεγαλύτερη δυσκολία δανεισμού και εύρεσης κεφαλαίου. Επιπλέον, για κάποιες συγκεκριμένες τεχνολογίες που δεν έχουν ακόμα ωριμάσει στην αγορά όπως τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα ή τα οχήματα με κυψέλες καυσίμου υδρογόνου εισέρχεται και ένας παράγοντας ρίσκου (risk premium) που προστίθεται στο επιτόκιο αναγωγής.

Το μεταβλητό κόστος $vcW_{i,k,j}$ που εισάγεται στη συνάρτηση κόστους $Cwb_{i,k,t}$ διαφοροποιείται από το μεταβλητό κόστος που εισάγεται στην αντικειμενική συνάρτηση. Στην απόφαση επιλογής νέου τύπου εξοπλισμού δε λαμβάνεται υπόψη το κόστος χρήσης του οδικού δικτύου καθώς θεωρείται ότι δεν αποτελεί κριτήριο επιλογής κατά τη διαδικασία λήψης της απόφασης. Αντιθέτως, ο φόρος συμμόρφωσης αποτελεί κριτήριο καθώς υπάρχει διαφοροποίηση με βάση το είδος του αυτοκινήτου (π.χ. τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα εξαιρούνται από το φόρο ή πληρώνουν μικρό μέρος αυτού).

$$vcW_{i,k} = \sum_{\psi} (fc_{i,k,\psi} + cg_{i,k,\psi} + ct_{i,k,\psi} + ex_{i,k,\psi}) \quad (4-102)$$

Τα κεφαλαιουχικά κόστη αποτελούν εξωγενείς υποθέσεις και μπορεί να διαφέρουν από σενάριο σε σενάριο. Όσον αφορά τις τεχνολογίες ηλεκτρικών οχημάτων, οι υπολογισμοί του κεφαλαιουχικού κόστους πραγματοποιούνται με βάση οικονομοτεχνικά στοιχεία και υποθέσεις όσον αφορά την εξέλιξη του κόστους των μπαταριών. Η εξέλιξη αυτή ακολουθεί καμπύλες εκμάθησης που βασίζονται σε υποθέσεις για τις μελλοντικές πωλήσεις τέτοιου είδους οχημάτων καθώς και σε πολιτικές υποστήριξης της ανάπτυξης των τεχνολογιών αυτών. Τα υπόλοιπα

εσωτερικά κόστη πλην του κόστους καυσίμου βασίζονται σε εξωγενείς υποθέσεις και διαφέρουν ανά χώρα και σενάριο. Ένα παράδειγμα αποτελεί η κατασκευή σεναρίου όπου αποφασίζεται η εφαρμογή πολιτικής όπου τα οχήματα βενζίνης μεγάλου κυβισμού θα πληρώνουν επιπλέον φόρο κτήσης.

Το κόστος καυσίμου εξαρτάται από τις εξωγενείς υποθέσεις για την εξέλιξη των τιμών των καυσίμων και την ειδική κατανάλωση των οχημάτων που υπολογίζεται ενδογενώς στο μοντέλο. Ο ετήσιος υπολογισμός του κόστους καυσίμου λαμβάνει υπόψη όλες τις διαδρομές που διανύει το όχημα που διακρίνονται με βάση τη γεωγραφική περιοχή και τη χρονική στιγμή του ταξιδιού. Η ειδική κατανάλωση σε κάθε είδος ταξιδιού διαφοροποιείται όπως θα περιγραφεί στη συνέχεια λόγω των συνθηκών του κάθε ταξιδιού και της συμφόρησης του δικτύου.

Τα εξωτερικά κόστη λαμβάνονται στη διαδικασία απόφασης εφόσον γίνεται η υπόθεση ότι θα εσωτερικοποιηθούν, ότι δηλαδή θα πρέπει να πληρωθούν από τους χρήστες. Τα εξωτερικά κόστη που λαμβάνονται υπόψη αναφέρονται στο κόστος συμφόρησης, ατυχημάτων, θορύβου και περιβαλλοντολογικής ρύπανσης. Στα εξωτερικά κόστη αποδίδονται αριθμητικές τιμές από συγκεκριμένες τεχνικές μελέτες.

4.7.4 «Κρυφά» κόστη

Τα τεχνητά κόστη $pc_{i,k}$ δε συνιστούν πραγματικές πληρωμές, αλλά αναπαριστούν μη γραμμικές συναρτήσεις που έχουν ως σκοπό να συμπεριλάβουν μη οικονομικούς παράγοντες που ενδέχεται να επηρεάσουν τις αποφάσεις των αποφασισζόντων.

4.7.4.1 Μηχανισμός μοντελοποίησης του «κρυφού» κόστους

Η συμπεριφορά του καταναλωτή όσον αφορά τις μετακινήσεις του στην πραγματικότητα δεν εξαρτάται μόνο από οικονομικούς παράγοντες αλλά και από άλλους μη οικονομικούς παράγοντες. Κατά τους Turrentine and Kurani (2007), τέτοιοι παράγοντες επηρεάζουν την απόφαση των καταναλωτών για τον τύπο και τεχνολογία του οχήματος που θα αγοράσουν. Στο μοντέλο έχει γίνει η προσομοίωση συγκεκριμένων παραγόντων έτσι ώστε να αποδώσουν με μεγαλύτερο ρεαλισμό τις αποφάσεις των καταναλωτών. Οι παράγοντες αυτοί έχουν ενσωματωθεί στις αποφάσεις με τη μορφή κόστους. Αυτά τα κόστη είναι τεχνητά που δε συνιστούν πραγματικές πληρωμές αλλά όμως επηρεάζουν την τελική απόφαση του καταναλωτή. Τέτοιοι παράγοντες είναι η αποδοχή συγκεκριμένων τεχνολογιών από τους καταναλωτές, η διαθέσιμη υποδομή για ανεφοδιασμό σε εναλλακτικά καθαρά καύσιμα όπως η ηλεκτρική ενέργεια και το υδρογόνο, καθώς και η αυτονομία των αυτοκινήτων.

Το Σχήμα 4-16 παρουσιάζει ποιοτικά την επίδραση του «κρυφού» κόστους στην τελική απόφαση του καταναλωτή για αγορά ηλεκτρικού αυτοκινήτου. Έστω ότι η καμπύλη προσφοράς των κατασκευαστών αυτοκινήτων και η καμπύλη ζήτησης των καταναλωτών για ηλεκτρικά αυτοκίνητα τέμνονται στο σημείο (q_0, p_0) . Το σημείο

συντήρησή τους και τις εν γένει επιδόσεις τους. Σε επόμενα στάδια όταν πλέον έχει εισαχθεί ικανή ποσότητα οχημάτων συγκεκριμένης τεχνολογίας, οι υπόλοιποι καταναλωτές λόγω μιμητισμού καθώς και λόγω κάμψης των αμφιβολιών είναι ευκολότερο να υιοθετήσουν αυτήν την τεχνολογία. Αυτά τα δύο στάδια έχουν ενσωματωθεί στο μοντέλο με τη χρήση κατάλληλων παραγόντων οι οποίοι επηρεάζουν τους καταναλωτές στο στάδιο της απόφασής του για την επιλογή νέου οχήματος.

Αυτοί οι αριθμητικοί παράγοντες αποτελούν σεναριακό δεδομένο και είναι δυνατό να επηρεάσουν το ρυθμό εισαγωγής εναλλακτικών τεχνολογιών στην αγορά εφόσον υπάρξουν υποθέσεις συγκεκριμένων πολιτικών. Κατά τον Santos και άλλους (2010), η εφαρμογή ελαφρών πολιτικών (soft policies) μπορεί να οδηγήσει σε αλλαγές στη συμπεριφορά των καταναλωτών και στις προτιμήσεις τους απέναντι σε βιώσιμες λύσεις στον τομέα των μεταφορών. Επίσης, η Anable και άλλοι (2010) παρουσίασαν αποτελέσματα σεναρίων με τη χρήση του UKTCM μοντέλου τα “Lifestyle scenarios” που προσοιώνουν την αύξηση της προτίμησης των καταναλωτών απέναντι στα ηλεκτρικά αυτοκίνητα.

4.7.4.3 Επίδραση «άγχους αυτονομίας» και υποδομής ανεφοδιασμού στη διείσδυση των ηλεκτρικών αυτοκινήτων

Αναφορικά με τη διείσδυση των εναλλακτικών καθαρών τεχνολογιών στην αγορά, η βιβλιογραφία εντοπίζει έναν αριθμό εμποδίων για την είσοδό τους στην αγορά όπως το εύρος αυτονομίας (Chan, 2007 και Tate et al., 2008) και η ελλιπής διαθεσιμότητα σε υποδομές σταθμών ανεφοδιασμού (Lin and Greene, 2012, Meyer και Winebrake, 2009, Mercuri et al., 2002, Joffe et al., 2004), πλέον του κόστους αγοράς (Perdiguero, 2012 και Karplus et al., 2010).

Ο όρος «άγχος αυτονομίας» (range anxiety) υποδηλώνει την ανησυχία του οδηγού σχετικά με την έλλειψη της δυνατότητάς να φορτίσει το όχημά του πριν εξαντληθεί η μπαταρία (Tate et al., 2008). Κατά τη μοντελοποίηση, λαμβάνονται εξωγενείς υποθέσεις αναφορικά με την ανάπτυξη της υποδομής για τα εναλλακτικά καύσιμα συμπεριλαμβανομένης της ηλεκτρικής ενέργειας και του υδρογόνου. Η ανάπτυξη των υποδομών είναι δυνατό να εξελίσσεται με διαφορετικούς για κάθε διαφορετικό σενάριο.

Στην περίπτωση που η αυτονομία του αυτοκινήτου είναι χαμηλότερη από την απόσταση του επιθυμητού ταξιδιού, ο αποφασίζων θεωρείται ότι επηρεάζεται από τα «κρυφά κόστη» $pc_{i,k}$ για το συγκεκριμένο ταξίδι. Τα τελευταία υπεισέρχονται στις αντικειμενικές συναρτήσεις των επιμέρους προβλημάτων βελτιστοποίησης του υπομοντέλου προσφοράς και επηρεάζουν τόσο τη διανομή της ετήσιας διανυθείσας απόστασης όσο και το μείγμα των νέων πωλήσεων αυτοκινήτων.

Ο αλγόριθμος επίλυσης των προβλημάτων βελτιστοποίησης, που επιζητούν την ελαχιστοποίηση του κόστους, επιχειρεί την ελαχιστοποίηση αυτού του «κρυφού κόστους». Συνεπώς, κατά τη μοντελοποίηση, οι αποφασίζοντες επιλέγουν τη χρήση των ηλεκτρικών αυτοκινήτων σε ταξίδια αστικά όπου δεν υπάρχει πρόβλημα

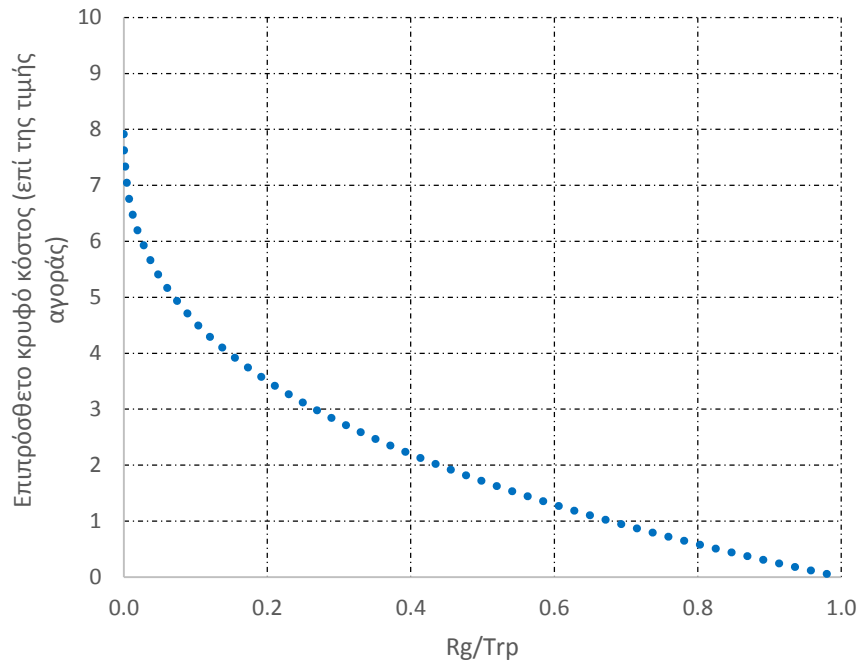
αυτονομίας. Αντίθετα, η επιβατική δραστηριότητα στο εθνικό οδικό δίκτυο καλύπτεται με άλλες τεχνολογικές επιλογές οχημάτων.

Στην περίπτωση που το εύρος αυτονομίας του αυτοκινήτου δεν του επιτρέπει να ολοκληρώσει το ταξίδι, δηλαδή το μήκος της διαδρομής είναι μεγαλύτερο από την ηλεκτρική αυτονομία του αυτοκινήτου, τότε ο καταναλωτής βλέπει ένα επιπλέον κόστος. Το κόστος αυτό εκφράζει το μακροχρόνιο οριακό κόστος που περιλαμβάνει και το κόστος αγοράς νέου αυτοκινήτου που θα του επιτρέψει να εκτελέσει το δρομολόγιο που δεν μπορεί με το ηλεκτρικό αυτοκίνητο. Το κρυφό κόστος ουσιαστικά αποτελεί συνάρτηση του ύψους της επένδυσης για αγοράς νέου αυτοκινήτου όπου η μεταβλητή $I_{i,k} \cdot \gamma_{i,k}$ εκφράζει την ετήσια τοκοχρεωλυτική ράντα για αποπληρωμή του νέου αυτοκινήτου. Το κρυφό κόστος $pc_{i,k,\psi}$ που χαρακτηρίζει την τεχνολογική επιλογή k στο ταξίδι ψ τότε γράφεται ως εξής και παρουσιάζεται στο Σχήμα 4-17:

$$pc_{i,k,\psi} = fx\left(\frac{Rg}{Trp}\right)_{i,k,\psi} \cdot I_{i,k} \cdot \gamma_{i,k} \quad , \quad \left(\frac{Rg}{Trp}\right)_{i,k,\psi} < 1 \quad (4-103)$$

Η συνάρτηση που προσομοιώνει τον παράγοντα ποινής στην περίπτωση που το εύρος αυτονομίας του αυτοκινήτου Rg δεν επαρκεί για να πραγματοποιήσει την απόσταση του επιθυμητού ταξιδιού Trp δίνεται από την Εξίσωση (4-104). Όπως φαίνεται από την παρακάτω σχέση, ο παράγοντας ποινής είναι μηδενικός για τα ταξίδια που το εύρος του αυτοκινήτου επαρκεί για την πραγματοποίησή τους.

$$fx\left(\frac{Rg}{Trp}\right)_{i,k,\psi} = \begin{cases} \alpha e^{\left(\beta\left(\frac{Rg}{Trp}\right)^c\right)} - \delta, & \frac{Rg}{Trp} < 1 \\ 0 & \frac{Rg}{Trp} \geq 1 \end{cases} \quad (4-104)$$



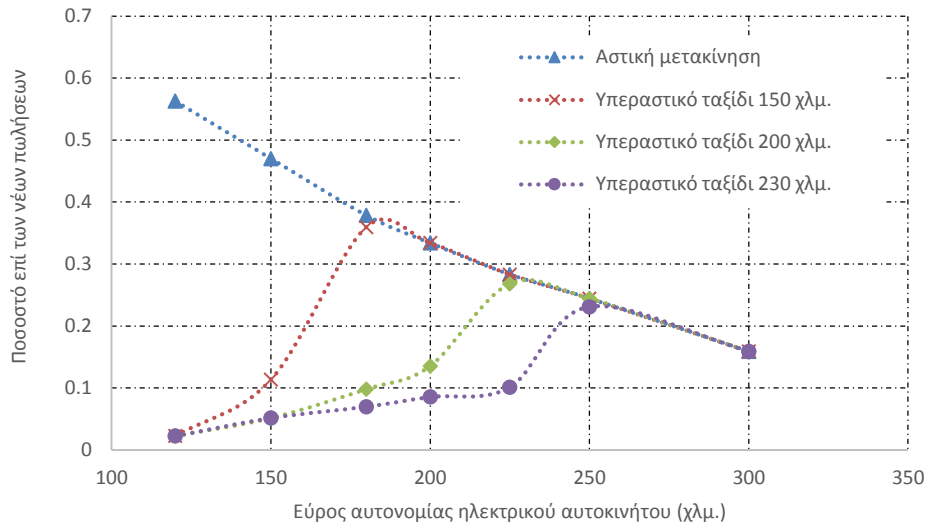
Σχήμα 4-17: Κρυφό κόστος του εύρους αυτονομίας των ηλεκτρικών αυτοκινήτων συναρτήσει του εύρους αυτονομίας και μήκους ταξιδιού

Όπως είναι φανερό η χαμηλή αυτονομία των ηλεκτρικών αυτοκινήτων δεν τους επιτρέπει να εκτελέσουν συγκεκριμένα μακρινά δρομολόγια που εκτείνονται στο εθνικό οδικό δίκτυο κυρίως. Το κρυφό κόστος που υπολογίζεται από την Εξίσωση (4-103) οδηγεί σε αύξηση του κόστους που αντικρίζει ο καταναλωτής κατά την απόφαση για αγορά νέου αυτοκινήτου και κατά τη μετακίνησή του. Η επίδραση του κρυφού κόστους του άγχους αυτονομίας κατά την επιλογή νέου αυτοκινήτου παρουσιάζεται στη συνέχεια. Ο Πίνακας 4-7 παρουσιάζει τις βασικές τεχνοοικονομικές υποθέσεις για ένα συμβατικό αυτοκίνητο βενζίνης και ένα ηλεκτρικό αυτοκίνητο. Η εφαρμογή της βασικής σχέσης (4-99) για την επιλογή νέων τύπων αυτοκινήτων με τη χρήση των τεχνοοικονομικών υποθέσεων παρουσιάζεται στο Σχήμα 4-18.

Πίνακας 4-7: Τεχνοοικονομικές υποθέσεις για συμβατικό και ηλεκτρικό αυτοκίνητο

Τεχνοοικονομικές υποθέσεις								
Αυτοκίνητο βενζίνης	Κόστος αγοράς	15000						
	Ετήσια ράντα πληρωμής	3279						
	Επιτόκιο	17.5%						
	Οικονομική ζωή επένδυσης (έτη)	10						
	Κόστος καυσίμου (Ευρώ)	1350						
	Ειδική κατανάλωση (λίτρα/ 100 χλμ.)	6						
	Ετήσια διανυθείσα απόσταση (χλμ.)	15000						
	Τιμή καυσίμου (Ευρώ/ λίτρο)	1.5						
	Μέσο κόστος (Ευρώ/ χλμ.)	0.309						
Ηλεκτρικό αυτοκίνητο	Μοναδιαίο κόστος μπαταρίας (Ευρώ/ kWh)	220	220	220	220	220	220	220
	Εύρος αυτονομίας (χλμ.)	120	150	180	200	225	250	300
	Συνολικό κόστος μπαταρίας	5280	6435	7642	8316	9157	9900	11880
	Κόστος αγοράς	18780	19935	21142	21816	22657	23400	25380
	Ετήσια ράντα πληρωμής	4105	4357	4621	4768	4952	5115	5547
	Επιτόκιο	17.5%	17.5%	17.5%	17.5%	17.5%	17.5%	17.5%
	Οικονομική ζωή επένδυσης (έτη)	10	10	10	10	10	10	10
	Κόστος καυσίμου (Ευρώ)	360	360	360	360	360	360	360
	Ειδική κατανάλωση (kWh/χλμ.)	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
	Ετήσια διανυθείσα απόσταση (χλμ.)	15000	15000	15000	15000	15000	15000	15000
Τιμή ηλεκτρικής ενέργειας (Euro/ kWh)	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	
Μέσο κόστος (Ευρώ/ χλμ.)	0.298	0.314	0.332	0.342	0.354	0.365	0.394	

Το Σχήμα 4-18 παρουσιάζει την αρνητική επίδραση του κρυφού κόστους στις προσδοκώμενες πωλήσεις νέων ηλεκτρικών αυτοκινήτων. Πράγματι, στα αστικά ταξίδια, το εύρος αυτονομίας του ηλεκτρικού αυτοκινήτου δεν αποτελεί ανασταλτικό παράγοντα αγοράς. Ωστόσο, όσο μεγαλώνει το μήκος ταξιδιού, έχει αρνητικές επιδράσεις στην αντίληψη του καταναλωτή γεγονός που μειώνει την πιθανότητα επιλογής του συγκεκριμένου τύπου αυτοκινήτου.

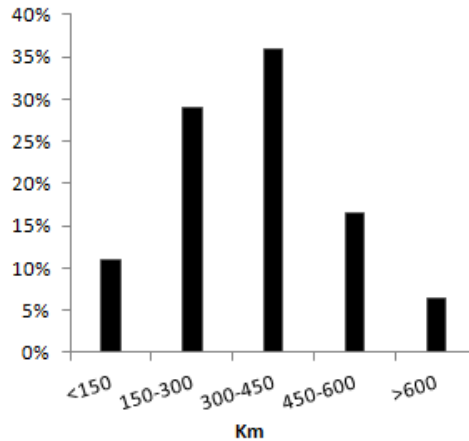


Σχήμα 4-18: Επίδραση του εύρους αυτονομίας του ηλεκτρικού αυτοκινήτου με μπαταρία στα μερίδια επί των νέων πωλήσεων αυτοκινήτων

4.7.5 Εισαγωγή ετερογενών κλάσεων αποφασιζόντων

Η ύπαρξη εκατομμυρίων μετακινουμένων συνιστά ιδιαίτερα σημαντική ετερογένεια λόγω των διαφορετικών συμπεριφορών των αποφασιζόντων αναφορικά με τον τομέα των μεταφορών. Η ετερογένεια συνήθως αποτελεί προϊόν διαφορετικών επιπέδων πληροφoρίας κατά τη διαδικασία λήψης της απόφασης (Alvarez and Franklin 1994). Η ετερογένεια που επικρατεί στον κλάδο των μεταφορών αφορά κυρίως την απόσταση μετακίνησης σε κάθε ταξίδι. Όπως αναφέρθηκε στην παρούσα ενότητα, ο αποφασίζων λαμβάνει υπόψη στη διαδικασία επιλογής νέου αυτοκινήτου και την περιοχή ταξιδιού που αναμένεται να ταξιδέψει ψ . Για τη ρεαλιστικότερη απεικόνιση της ετερογένειας, πραγματοποιείται μοντελοποίηση ετερογενών αποφασιζόντων που διαφοροποιούνται ανάλογα με το μήκος της διαδρομής ω που θα πραγματοποιήσουν σε κάθε ταξίδι ψ . Τα τυπικά μήκη διαδρομών που χαρακτηρίζουν κάθε ταξίδι συνιστούν κλάσεις που έχουν ως σκοπό τη βελτίωση της μοντελοποίησης και προσομοίωσης των πραγματικών επιπτώσεων των περιορισμών του εύρους αυτονομίας συγκεκριμένων τεχνολογιών οχημάτων και της έλλειψης επαρκούς υποδομής εναλλακτικών καυσίμων.

Οι κατηγορίες ταξιδιών που προσομοιώνονται στο μοντέλο θεωρούνται ότι ακολουθούν μια κατανομή συχνοτήτων αναφορικά με την απόσταση της διαδρομής. Το Σχήμα 4-19 παρουσιάζει ένα αντιπροσωπευτικό παράδειγμα ιστογράμματος συχνοτήτων κατά τη μετακίνηση σε εθνικό οδικό δίκτυο. Το ιστόγραμμα συχνοτήτων κατασκευάζεται με τη βοήθεια στατιστικών στοιχείων όπως οι ταξιδιωτικές συνήθειες των μετακινουμένων του Ηνωμένου Βασιλείου (Department for Transport, 2009) ή των ΗΠΑ (ORNL, 2011), καθώς και από τη βάση δεδομένων του μοντέλου TRANS-TOOLS σε επίπεδο επίπεδο NUTS 2 και NUTS 3 ζωνών ανά χώρα.



Σχήμα 4-19: Αντιπροσωπευτικό παράδειγμα ιστογράμματος συχνοτήτων για μετακίνηση σε εθνικό οδικό δίκτυο

Κατά τη μοντελοποίηση, οι αποφασίζοντες συγκρίνουν το φάσμα του εύρους αυτονομίας κάθε τεχνολογικής επιλογής και τη διαθεσιμότητα υποδομών σταθμών ανεφοδιασμού για όλες τις κατηγορίες ταξιδιών για την κλάση ταξιδιού που επιθυμούν να πραγματοποιήσουν. Στις περιπτώσεις που η αυτονομία του αυτοκινήτου δεν επαρκεί ή δεν υπάρχει διαθέσιμη υποδομή, υπεισέρχονται παράγοντες ποινής υπό τη μορφή κόστους που αποθαρρύνουν τη χρήση του συγκεκριμένου οχήματος στη συγκεκριμένη διαδρομή από τον αποφασίζοντα. Συνεπώς, ένας τύπος οχήματος ή καυσίμου μπορεί να μη γίνει ανταγωνιστικός λόγω των παραπάνω αναντιστοιχιών, σε σύγκριση με άλλες επιλογές που δεν παρουσιάζουν τέτοιους περιορισμούς.

Πράγματι, οι εξισώσεις (4-103) και (4-104) που υπολογίζουν το κρυφό κόστος πουο «βλέπει» ο αποφασίζων αποκτούν μια επιπλέον διάσταση που λαμβάνει υπόψη το μήκος της διαδρομής $Trp_{i,k,\psi,\omega}$ του κάθε ταξιδιού. Συνεπώς, το κρυφό κόστος των ετερογενών αποφασιζόντων pc_b γράφεται ως εξής:

$$pc_b_{i,k,\psi,\omega} = fx\left(\frac{Rg}{Trp}\right)_{i,k,\psi,\omega} \cdot I_{i,k} \cdot \gamma_{i,k} \quad , \quad \left(\frac{Rg}{Trp}\right)_{i,k,\psi,\omega} < 1 \quad (4-105)$$

Το ιστόγραμμα συχνοτήτων των αποφασιζόντων για κάθε ταξίδι συνιστά μια διακριτή πιθανοτική κατανομή. Έστω $prob_{\psi,\omega} \in (0,1)$ η πιθανότητα πραγματοποίησης συγκεκριμένου μήκους διαδρομής σε κάθε είδος ταξιδιού και $\sum_{\omega} prob_{\psi,\omega} = 1$ Κατά συνέπεια το αναμενόμενο κρυφό κόστος των ετερογενών αποφασιζόντων υπολογίζεται ως το γινόμενο της πιθανότητας πραγματοποίησης συγκεκριμένου μήκους διαδρομής επί του κρυφού κόστους ανά αποφασίζοντα. Συνεπώς:

$$pc_{i,k,\psi} = \sum_{\omega} (prob_{\psi,\omega} \cdot pc_{b_{i,k,\psi,\omega}}) \quad (4-106)$$

4.7.6 Υπολογισμός ειδικής κατανάλωσης ενέργειας

Ένα σημαντικό στοιχείο του μοντέλου αφορά το στάδιο του υπολογισμού της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου των οχημάτων. Η ειδική κατανάλωση καυσίμου είναι ένα σημαντικό χαρακτηριστικό στοιχείο κάθε είδους τεχνολογίας και αποτελεί ένα κριτήριο που επηρεάζει τη συμπεριφορά των καταναλωτών και των επιχειρήσεων.

Ο υπολογισμός της ειδικής κατανάλωσης εξαρτάται από αρκετούς παράγοντες. Αρχικά, εξαρτάται από τεχνολογικούς παράγοντες όπως τον τύπο του οχήματος, το είδος καυσίμου, το μέγεθος του οχήματος και τις επιμέρους τεχνολογίες εξοικονόμησης με τις οποίες είναι εξοπλισμένο. Πέρα από τους τεχνολογικούς παράγοντες, εισέρχονται και πιο ειδικοί παράγοντες που αφορούν τον τρόπο οδήγησης, τις συνθήκες, τον τόπο και την ώρα μετακίνησης. Αυτοί οι ειδικοί παράγοντες αντανακλούν τις ιδιαιτερότητες οδήγησης των οδηγών κάθε χώρας, τις συνθήκες μετακίνησής τους καθώς και τις περιοχές που μετακινούνται. Ασφαλώς, η οδήγηση του ίδιου ακριβώς οχήματος σε ένα μητροπολιτικό περιβάλλον σε ώρα αιχμής διαφέρει από την οδήγηση το υπεραστικό εθνικό οδικό δίκτυο. Αυτές οι διαφορές οδηγούν σε σημαντικές διαφοροποιήσεις στην ειδική κατανάλωση καυσίμου του οχήματος.

Για να αποδοθούν με μεγαλύτερη ακρίβεια οι διαφορές των συνθηκών οδήγησης στον υπολογισμό της ειδικής κατανάλωσης κρίθηκε σκόπιμο να εισαχθούν στο μοντέλο συναρτησιακές σχέσεις που συνδέουν την ειδική κατανάλωση με την ταχύτητα. Με αυτό τον τρόπο θα είναι δυνατός ο υπολογισμός της ειδικής κατανάλωσης για τα διαφορετικά είδη ταξιδιών που απεικονίζονται στο υπομοντέλο της ζήτησης. Τέτοιες συναρτησιακές σχέσεις παρέχονται από τη μεθοδολογία COPERT IV που αναπτύχθηκε από τους Ntziachristos και Samaras (2000). Πράγματι, η μεθοδολογία COPERT επιτρέπει τον υπολογισμό της ειδικής κατανάλωσης για τα όλα τα οδικά μέσα μεταφοράς ανά τύπο οχήματος, καυσίμου και τεχνολογία. Το επίπεδο διακριτοποίησης της μεθόδου COPERT αντιστοιχεί στη διακριτοποίηση της βάσης δεδομένων οχημάτων FLEETS. Η πολυωνυμική συνάρτηση που συνδέει την ειδική κατανάλωση με τη μέση ταχύτητα του οχήματος $U_{i,\psi}$ ανά περιοχή που κινείται δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$sf_{c_{i,k,\psi}} = a_{i,k,\psi} + \beta_{i,k,\psi} \cdot U_{i,\psi} + \varepsilon_{i,k,\psi} \cdot U_{i,\psi}^2 + \zeta_{i,k,\psi} \cdot U_{i,\psi}^{\theta_{i,k,\psi}} \quad (4-107)$$

Οι παράμετροι $a, \beta, \varepsilon, \zeta, \theta$ είναι τεχνικές παράμετροι που προέρχονται από τη βάση δεδομένων και μεθοδολογία COPERT και είναι χαρακτηριστικοί για κάθε τύπο και τεχνολογία μεταφορικού μέσου και εξαρτώνται από την περιοχή οδήγησης. Ο

υπολογισμός της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου είναι μια εξαρτημένη μεταβλητή του μοντέλου καθώς εξαρτάται από τη μέση ταχύτητα που είναι μεταβλητή. Η μέση ταχύτητα ορίζεται από την εξίσωση (4-72) και υποδηλώνει το βαθμό συμφόρησης. Μικρότερες μέσες ταχύτητες στις αστικές μετακινήσεις συνεπάγονται υψηλότερες ειδικές καταναλώσεις.

Η ειδική κατανάλωση των οχημάτων υβριδικής τεχνολογίας εξαρτάται από την περιοχή μετακίνησης καθώς και από τις συνθήκες που επικρατούν. Έστω το υποσύνολο $hvc(k)$ που περιλαμβάνει τις υβριδικές τεχνολογίες. Πράγματι, τα οχήματα που είναι εξοπλισμένα με πλήρες σύστημα υβριδικής τεχνολογίας είναι δυνατό να προσφέρουν σημαντική εξοικονόμηση καυσίμου. Ο βαθμός εξοικονόμησης εξαρτάται από το βαθμό χρησιμοποίησης του υβριδικού συστήματος. Το τελευταίο χρησιμοποιείται σε μεγαλύτερο βαθμό στην οδήγηση σε αστικό περιβάλλον όπου οι χαμηλές ταχύτητες και οι περισσότερες στάσεις του οχήματος επιτυγχάνουν τη μεγαλύτερη εξοικονόμηση. Αντιθέτως, η μετακίνηση σε υπεραστικό περιβάλλον και ιδιαιτέρως σε εθνικό οδικό δίκτυο, έχει μικρότερα οφέλη καθώς το υβριδικό σύστημα χρησιμοποιείται σε μικρότερο βαθμό λόγω του μικρότερου αριθμού στάσεων. Η ειδική κατανάλωση των οχημάτων υβριδικής τεχνολογίας που έχουν ενσωματωθεί στο μοντέλο θεωρείται ότι υπολογίζεται με βάση την παρακάτω σχέση:

$$sf c_{i,k,\psi} = \left(1 - redhybr_{i,k,j} \right) \cdot \left(a_{i,k,\psi} + \beta_{i,k,\psi} \cdot U_{i,\psi} + \varepsilon_{i,k,\psi} \cdot U_{i,\psi}^2 + \zeta_{i,k,\psi} \cdot U_{i,\psi}^{\theta_{i,k,\psi}} \right) \quad \forall k hvc \quad (4-108)$$

Η πολυωνυμική σχέση προέρχεται από τη μεθοδολογία COPERT και αφορά την ειδική κατανάλωση του αντίστοιχου συμβατικού οχήματος (δηλαδή εκείνου που δεν έχει ενσωματωμένο υβριδικό σύστημα). Ο όρος $redhybr$ αφορά στο ποσοστό εξοικονόμησης του υβριδικού οχήματος που εξαρτάται από την περιοχή και τη στιγμή της μετακίνησης. Ο Πίνακας 4-8 παρουσιάζει τις τιμές που έχουν υποτεθεί για τον όρο αυτό.

Πίνακας 4-8: Ποσοστό εξοικονόμησης ενέργειας για υβριδικό αυτοκίνητο

	Αστικό - αιχμή	Αστικό - εκτός αιχμής	Υπεραστικό - αιχμή	Υπεραστικό - εκτός αιχμής	Εθνική οδός - αιχμή	Εθνική οδός - εκτός αιχμής
Υβριδικό βενζίνης	0,35	0,25	0,18	0,15	0,13	0,1
Υβριδικό diesel	0,25	0,2	0,15	0,13	0,11	0,09

4.8 Μοντελοποίηση πολιτικών προώθησης διείσδυσης της ηλεκτρικής ενέργειας στις μεταφορές

Το μοντέλο PRIMES-TREMOVE είναι δυνατό να λάβει υπόψη ένα σημαντικό αριθμό πολιτικών και μέτρων που αποσκοπούν στο να οδηγήσουν το σύστημα των μεταφορών σε ένα μέλλον βιώσιμο. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι πολιτικές που θέτουν συγκεκριμένους περιβαλλοντολογικούς στόχους (π.χ. συγκεκριμένος αριθμός εκπομπών αερίων διοξειδίου του άνθρακα. Σε αυτήν την περίπτωση το μοντέλο επιχειρεί να καθορίσει τους παράγοντες εκείνους που ενδογενώς θα οδηγήσουν σε κατάλληλες διαμορφώσεις το σύστημα μεταφορών έτσι ώστε να επιτευχθεί ο στόχος. Πράγματι, η διαμόρφωση του συστήματος μεταφορών και η ενδεχόμενη είσοδος εναλλακτικών και καθαρών τεχνολογιών και καυσίμων δεν αποτελεί εξωγενές δεδομένο ούτε είναι προκαθορισμένη αλλά καθορίζεται από τεχνοοικονομικά δεδομένα και άλλες υποθέσεις που μπορούν να επηρεάσουν την απόφαση των αποφασίζοντων του μοντέλου. Τέτοιου είδους πολιτικές αποτελούν σεναριακά δεδομένα και διαφέρουν από σενάριο σε σενάριο. Το μοντέλο είναι δυνατό να χειριστεί ταυτοχρόνως περισσότερους από έναν στόχο.

4.8.1 Μορφές πολιτικών μέτρων προώθησης αιεφόρων επιλογών στις μεταφορές

Συνοπτικά τα μέτρα πολιτικές που αναπαρίστανται στο μοντέλο μπορούν να διακριθούν σε ήπια (soft), οικονομικά, ρυθμιστικά και σχετικών με υποδομές.

4.8.1.1 Συντηρητικά μέτρα

Τα συντηρητικά μέτρα περιλαμβάνουν μέτρα συντονισμού και συνεργασίες μεταξύ του δημόσιου και του ιδιωτικού τομέα με σκοπό τη διάχυση γνώσης και ορθότερης- αποδοτικότερης χρήσης των πόρων, καμπάνιες ενημέρωσης των καταναλωτών, πιστοποίηση υπηρεσιών και χρήση ετικετών (labeling). Τέτοιου είδους μέτρα αντανακλώνται σα παράγοντες που βελτιώνουν την αντίληψη των καταναλωτών όσον αφορά συγκεκριμένες πιο ανεπτυγμένες καθαρές τεχνολογίες. Με αυτόν τον τρόπο είναι δυνατό να πραγματοποιηθεί ταχύτερη είσοδος στην αγορά αυτών των τεχνολογιών που μπορεί να είναι πιο αποδοτικές (λιγότερες εκπομπές CO₂) αλλά είναι υψηλότερης έντασης κεφαλαίου. Σε διαφορετική περίπτωση, σε απουσία αυτών των πολιτικών, αυτές οι τεχνολογίες δε θα είχαν τον ίδιο βαθμό διείσδυσης. Η εξάλειψη αυτής της αβεβαιότητας του καταναλωτή απέναντι σε καινοτόμα αλλά μη δοκιμασμένα προϊόντα πραγματοποιείται μέσω της απαλοιφής παραμέτρων ρίσκου στη διαδικασία λήψης αποφάσεων που περιλαμβάνουν τη διάθεση κεφαλαίου για αγορά νέου οχήματος. Αυτοί οι παράμετροι ρίσκου ενσωματώνονται στο εκάστοτε επιτόκιο αναγωγής του αποφασίζοντος καταναλωτή για τις επιμέρους τεχνολογίες.

4.8.1.2 Οικονομικά μέτρα

Τα οικονομικά μέτρα έχουν σκοπό να επηρεάσουν τις αποφάσεις των αποφασίζοντων του μοντέλου παρέχοντας οικονομικά ερεθίσματα. Τα τελευταία μεταφέρονται στους αποφασίζοντες μέσω μεταβολών των σχετικών τιμών ή του κόστους. Η μορφή των οικονομικών μέτρων είναι συνήθως μέσω πολιτικών επιδότησης, φορολόγησης καυσίμων, οχημάτων εκπομπών, όπως και εσωτερικοποίηση του εξωτερικού κόστους. Πολιτικές επιδότησης αφορούν τόσο οχήματα όσο και καύσιμα. Στην πρώτη περίπτωση, πολλές χώρες της Ευρώπης έχουν επιδοτούν την αγορά ηλεκτρικών αυτοκινήτων (π.χ. στη Γαλλία δινόταν επιδότηση 5000 ευρώ). Η επιδότηση των καυσίμων γίνεται συνήθως μέσω της απουσίας φορολόγησής τους. Πιο συγκεκριμένα, σε ορισμένα καύσιμα που επιθυμείται η αύξηση του μεριδίου τους στο ενεργειακό μείγμα, οι χώρες δεν τους επιβάλλουν ειδικό φόρο κατανάλωσης. Χαρακτηριστική περίπτωση είναι αυτή του υγραερίου (LPG) και του φυσικού αερίου (CNG). Φορολόγηση ανά είδος και τεχνολογία οχήματος είναι επίσης δυνατή στο μοντέλο και μπορεί να πραγματοποιηθεί με βάση πλήθος κριτηρίων. Τέτοια μπορεί να είναι η ηλικία (δεδομένου ότι όσο παλαιότερο τόσο πιο ενεργοβόρο), το μέγεθος του οχήματος (όσο μεγαλύτερο σε μέγεθος συνεπάγεται ότι ανήκει σε κατηγορία πολυτελών οχημάτων) καθώς και με βάση τις ειδικές εκπομπές CO₂ (συνήθης μονάδα μέτρησης gCO₂/km). Επίσης, είναι δυνατό να συμβεί και το αντίστροφο όπου τα πιο καθαρά οχήματα μπορεί να εξαιρούνται από κάθε είδους φορολόγηση. Τέτοιο παράδειγμα είναι η Ελλάδα όπου τα οχήματα που εγγράφονται και έχουν ειδικές εκπομπές CO₂ λιγότερο από 100 gCO₂/km εξαιρούνται από τα τέλη κυκλοφορίας.

Επίσης, πολιτικές όπως το σύστημα εμπορίας των δικαιωμάτων εκπομπής αερίων θερμοκηπίου (ETS) που έχει θεσπίσει η Ευρωπαϊκή Ένωση επιφέρουν επιπτώσεις στον τομέα των μεταφορών. Οι εναέριες μεταφορές ανήκουν στους τομείς ETS. Χάρη στη διασύνδεση του PRIMES-TREMOVE με το μοντέλο PRIMES είναι δυνατή η αλληλεπίδρασή τους όσον αφορά τον υπολογισμό των εκπομπών CO₂ συμπεριλαμβανομένου και της τιμής ETS. Η τελευταία έχει μοντελοποιηθεί ξεκάθαρα στο PRIMES-TREMOVE ως ένα επιπλέον κόστος που μετακυλίνεται στους καταναλωτές. Άλλα μέτρα που αποσκοπούν στην υποστήριξη της έρευνας (R&D) για την ανάπτυξη νέων τεχνολογιών οχημάτων και νέων καυσίμων αντανακλώνται στις εξωγενείς υποθέσεις κάθε σεναρίου σχετικές με τα τεχνοοικονομικά χαρακτηριστικά κάθε τεχνολογίας. Τέλος, τα οικονομικά μέτρα μπορεί να αποσκοπούν στο να αλλάξουν τη συμπεριφορά του καταναλωτή όσον αφορά τις αποφάσεις του για μετακινήσεις (σε επίπεδο επιλογής μέσου μεταφοράς). Τέτοια μέτρα περιλαμβάνουν τη μείωση, για παράδειγμα, του μεταβλητού κόστους των μέσω μαζικής μεταφοράς (μέσω επιδότησης του εισιτηρίου από το κράτος) με σκοπό τη στροφή μερίδας μετακινούμενων από ιδιωτικά μέσα μεταφοράς.

4.8.1.3 Μέτρα ρυθμιστικά

Τα ρυθμιστικά μέτρα αφορούν συνήθως ρυθμιστικές διατάξεις από όργανα θέσπισης πολιτικής που έχουν στόχο τη διαμόρφωση ειδικών περιβαλλοντολογικών και τεχνολογικών στόχων. Τέτοιους περιβαλλοντολογικούς στόχους έχει θέσει η Ευρωπαϊκή Επιτροπή για τις ειδικές εκπομπές CO₂ των νέων αυτοκινήτων και ελαφρών φορτηγών μέσω των ρυθμίσεων 443/2009 και 510/2011. Πιο συγκεκριμένα, οι πολιτικές αυτές επιβάλλουν συγκεκριμένα όρια που πρέπει να ακολουθήσουν οι αυτοκινητοβιομηχανίες, σε διαφορετική περίπτωση οι τελευταίες καλούνται να πληρώσουν πρόστιμα. Αυτοί οι περιβαλλοντολογικοί στόχοι για τις εκπομπές CO₂ ανήκουν στο ευρύτερο πλαίσιο των προσπαθειών της ΕΕ για μείωση των εκπομπών CO₂ στην Ευρώπη με τον απώτερο στόχο της αντιμετώπισης του φαινομένου της κλιματικής αλλαγής. Αυτές οι ρυθμίσεις έχουν ενσωματωθεί στο μοντέλο ως μαθηματικοί περιορισμοί, ενώ υπάρχει και η δυνατότητα (σε σενάριο) να επιβληθούν και πιο αυστηροί στόχοι σε σχέση με αυτούς που βρίσκονται σε ισχύ σήμερα. Επιπλέον, το μοντέλο είναι δυνατό να απεικονίσει και μέτρα σχετικά με την ενεργειακή απόδοση των νέων οχημάτων που εγγράφονται ανά κατασκευαστή. Η ενεργειακή απόδοση στις μεταφορές αντανακλάται μέσω της ειδικής τους κατανάλωσης. Αυτού του είδους τα ρυθμιστικά μέτρα επιδρούν στην απόφαση του καταναλωτή στο επίπεδο της επιλογής του τύπου και της τεχνολογίας του νέου οχήματος που θα επιλέξει. Τέλος, το μοντέλο απεικονίζει και τα τεχνολογικά/ περιβαλλοντολογικά μέτρα ρύθμισης των αέριων ρύπων. Τέτοια μέτρα είναι τα EURO Standards που θέτουν συγκεκριμένα όρια για τους επιβλαβείς ρυπαντές όπως τα NO_x, PM CO κ.α. Χάρη στη δυνατότητα του μοντέλου να «διατηρεί» στη μνήμη του τις γενιές των οχημάτων ανά τεχνολογία, τύπο, ηλικία είναι δυνατό να υπολογίζει στο τέλος και τις συνολικές εκπομπές των αέριων ρυπαντών.

4.8.1.4 Μέτρα υποστήριξης κατασκευής υποδομών

Οι υποδομές που ανήκουν στο σύστημα των μεταφορών και έχουν αντίκτυπο στους σκοπούς της ενεργειακής οικονομικής ανάλυσης είναι: οι υποδομές δικτύου και οι υποδομές για την παροχή καυσίμου. Οι υποδομές δικτύου περιλαμβάνουν τόσο το οδικό δίκτυο όσο και το σιδηροδρομικό, τα αεροδρόμια και τις θαλάσσιες μεταφορές. Αυτού του είδους οι υποδομές δεν αντιπροσωπεύονται ρητά στο μοντέλο αλλά είναι δυνατό να αντανακλώνται σε μορφή κόστους που να επηρεάζει τις αποφάσεις των αντιπροσωπευτικών πρακτόρων του μοντέλου. Πράγματι, αν σε κάποιο σενάριο γίνει η υπόθεση επέκτασης των σιδηροδρομικών υποδομών, αυτό θα έχει ως συνέπεια μια αύξηση της δραστηριότητας των σιδηροδρόμων και αντίστοιχα μια μείωση της δραστηριότητας από άλλα ανταγωνιστικά μέσα. Επιπλέον, η δημιουργία οδικών υποδομών έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της κίνησης (μέσω της συνάρτησης συμφόρησης), της αύξησης της ταχύτητας ταξιδιού και τη μείωση του χρόνου ταξιδιού.

Οι υποδομές σχετικές με την παροχή και διάθεση καυσίμου στους καταναλωτές ενέργειας του κλάδου των μεταφορών αποτελούν τη ραχοκοκαλιά της δυνατότητας των μετακινήσεων. Η απουσία σχετικών υποδομών όσον αφορά την παροχή ενός συγκεκριμένου καυσίμου αυτόματα καθιστά απαγορευτική τη χρήση του. Η

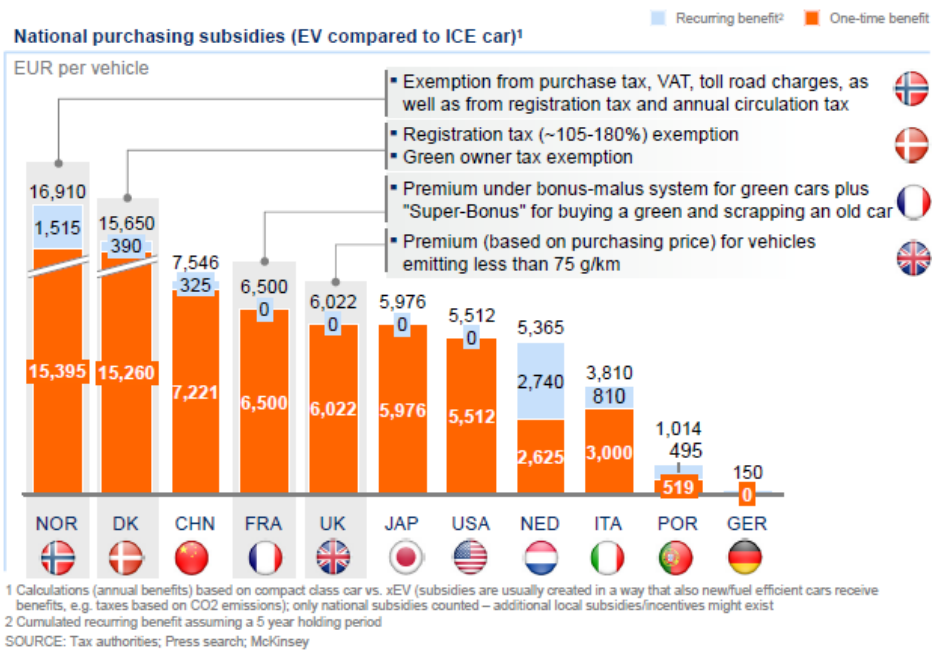
Ευρωπαϊκή Ένωση επιχειρεί τα τελευταία χρόνια στο να αλλάξει το χάρτη των υποδομών παροχής καυσίμου και να συμπεριλάβει επιπλέον καύσιμα. Πιο συγκεκριμένα, πραγματοποιείται προσπάθεια ώστε να επιβληθούν μέτρα δημιουργίας υποδομών για εναλλακτικά καύσιμα όπως η ηλεκτρική ενέργεια, το υδρογόνο, το φυσικό αέριο κ.α. Σε συγκεκριμένα σενάρια γίνονται υποθέσεις πολιτικής εξάπλωσης συγκεκριμένων υποδομών για ορισμένα καύσιμα σε ορισμένες γεωγραφικές ζώνες. Το μοντέλο διακρίνει 4 συγκεκριμένες τυπικές γεωγραφικές περιοχές (μητρόπολη, άλλα αστικά κέντρα, εθνικές οδοί, άλλα υπεραστικοί δρόμοι). Συνεπώς, η ύπαρξη συγκεκριμένων υποδομών ή μη επηρεάζει την απόφαση των καταναλωτών με βάση τη γεωγραφική κάλυψη και την περιοχή ταξιδιού. Η μη ύπαρξη υποδομής εισάγει κόστη μη γραμμικής μορφής που επηρεάζουν αρνητικά τη χρήση των συγκεκριμένων καυσίμων και την επιλογή οχημάτων που χρησιμοποιούν αυτό το καύσιμο.

4.8.2 Μέτρα προς τους καταναλωτές

4.8.2.1 Επιδότηση τιμής αγορά ηλεκτρικών αυτοκινήτων

Η επιδότηση τιμής αγοράς των ηλεκτρικών αυτοκινήτων αποτελεί ένα σύνηθες μέτρο πολιτικής που αποσκοπεί στο να καταστήσει μια επιλογή με υψηλό αρχικό επίπεδο επένδυσης προσιτή στον αποφασίζοντα.

Πράγματι, το ύψος της επιδότησης είναι δυνατό να επηρεάσει θετικά τους καταναλωτές αναφορικά με την υιοθέτηση εναλλακτικών τεχνολογικών επιλογών που σε διαφορετική περίπτωση θα απέρριπτε. Η εφαρμογή της επιδότησης πραγματοποιείται στο επίπεδο της τιμής αγοράς του εναλλακτικού οχήματος, συνεπώς ο καταναλωτής θεωρείται ότι αντικρίζει μια χαμηλότερη τιμή (τόσο όσο το ύψος της επιδότησης). Τα τελευταία χρόνια, αρκετές Ευρωπαϊκές κυβερνήσεις δεσμεύουν χρηματικούς πόρους για την υποστήριξη της διείσδυσης εναλλακτικών καθαρών τεχνολογιών οχημάτων στον εθνικό στόλο αυτοκινήτων. Αυτά τα μέτρα που λαμβάνουν συνήθως τη μορφή επιδότησης τιμής παρουσιάζονται στο Σχήμα 4-20.



Σχήμα 4-20: Κυβερνητικές επιδοτήσεις προς τους καταναλωτές για αγορά ηλεκτρικών αυτοκινήτων (Πηγή: Amsterdam Roundtables Foundation και McKinsey, 2014)

Τα παραπάνω υποστηρικτικά μέτρα λαμβάνονται υπόψη στη μοντελοποίηση μέσω μηχανισμού διαφοροποίησης της τιμής απόκτησης του αυτοκινήτου που αντιλαμβάνεται ο καταναλωτής. Παρακάτω, παρουσιάζεται ο βαθμός της επίδρασης της τιμής επιδότησης στο ύψος των νέων πωλήσεων των ηλεκτρικών αυτοκινήτων έναντι ενός συμβατικού αυτοκινήτου βενζίνης, Ο Πίνακας 4-9 παρουσιάζει τα τεχνοοικονομικά χαρακτηριστικά για τα δύο υπό εξέταση αυτοκίνητα.

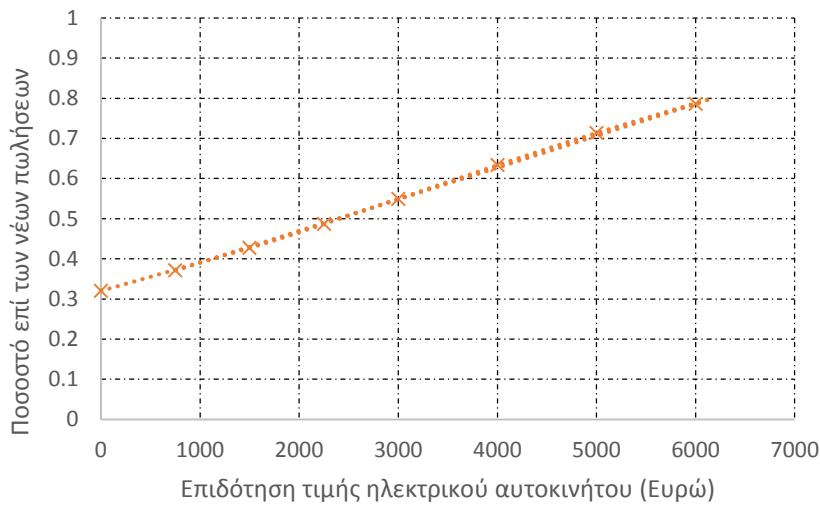
Πίνακας 4-9: Τεχνοοικονομικά χαρακτηριστικά ηλεκτρικού και συμβατικού αυτοκινήτου βενζίνης

Αυτοκίνητο βενζίνης	Κόστος αγοράς	15000
	Ετήσια ράντα πληρωμής	3279
	Επιτόκιο	17.5%
	Οικονομική ζωή επένδυσης (έτη)	10
	Κόστος καυσίμου (Ευρώ)	1350
	Ειδική κατανάλωση (λίτρα/ 100 χλμ.)	6
	Ετήσια διανυθείσα απόσταση (χλμ.)	15000
	Τιμή καυσίμου (Ευρώ/ λίτρο)	1.5
	Μέσο κόστος (Ευρώ/ χλμ.)	0.309
Ηλεκτρικό αυτοκίνητο	Μοναδιαίο κόστος μπαταρίας (Ευρώ/ kWh)	220
	Εύρος αυτονομίας (χλμ.)	200
	Συνολικό κόστος μπαταρίας	8316
	Κόστος αγοράς	21816
	Ετήσια ράντα πληρωμής	4768
	Επιτόκιο	17.5%
	Οικονομική ζωή επένδυσης (έτη)	10
	Κόστος καυσίμου (Ευρώ)	360
	Ειδική κατανάλωση (kWh/χλμ.)	0.2
	Ετήσια διανυθείσα απόσταση (χλμ.)	15000
	Τιμή ηλεκτρικής ενέργειας (Euro/ kWh)	0.12
	Μέσο κόστος (Ευρώ/ χλμ.)	0.342

Ο υπολογισμός του μέσου κόστους για τις ανάγκες της ανάλυσης και της προσαρμογής της συμπεριφοράς του μοντέλου πραγματοποιείται με τη χρήση της Εξ. (4-100) που έχει τροποποιηθεί ώστε να λαμβάνει υπόψη το ύψος της επιδότησης $sbd_{i,k}$. Υπενθυμίζεται ότι $I_{i,k}$ ορίζεται ως το ύψος της επένδυσης (ή κόστος αυτοκινήτου προ επιδότησης).

$$Cwb^*_{i,k,t} = \frac{(I_{i,k} - sbd_{i,k}) \cdot \gamma_{i,k}}{Mlg_{i,k,t}} + fc_{i,k} \quad (4-109)$$

Τα αποτελέσματα της επίδρασης της επιδότησης στις νέες πωλήσεις των ηλεκτρικών αυτοκινήτων παρουσιάζονται στο Σχήμα 4-21. Για μηδενική επιδότηση, το ποσοστό νέων πωλήσεων ηλεκτρικών αυτοκινήτων, σύμφωνα με το μοντέλο επιλογής νέου εξοπλισμού, φτάνει το 30%. Επιδότηση τιμής της τάξης των 3000 Ευρώ, ωθεί το ποσοστό νέων πωλήσεων στο 55% καθώς πλέον το μέσο κόστος που αντιλαμβάνεται ο αποφασίζων είναι χαμηλότερο για το ηλεκτρικό αυτοκίνητο έναντι του αυτοκινήτου βενζίνης.



Σχήμα 4-21: Επίδραση της επιδότησης τιμής του ηλεκτρικού αυτοκινήτου στο ποσοστό νέων πωλήσεων

4.8.2.2 Απόσυρση παλαιού στόλου αυτοκινήτων

Ο ρυθμός διείσδυσης των νέων καθαρών τεχνολογιών στο στόλο της Ευρωπαϊκής αγοράς εξαρτάται κατά ένα μέρος από το μερίδιό τους στο σύνολο των νέων πωλήσεων. Ωστόσο, στην περίπτωση που ο αριθμός νέων πωλήσεων είναι σχετικά χαμηλός σε σχέση με το σύνολο του στόλου της αγοράς, συνεπάγεται ότι ο ρυθμός ανανέωσης είναι χαμηλός. Αυτό το γεγονός ενδέχεται να καθυστερήσει το ρυθμό διείσδυσης των ηλεκτρικών αυτοκινήτων στην αγορά.

Για την αντιμετώπιση του φαινομένου του αργού ρυθμού ανανέωσης του συνόλου του Ευρωπαϊκού στόλου, υπάρχει η δυνατότητα εφαρμογής πολιτικής απόσυρσης παλαιών αυτοκινήτων πέραν κάποιας ηλικίας. Η πολιτική της απόσυρσης μπορεί να εφαρμοστεί με δύο τρόπους:

1. Εξαναγκαστική απόσυρση παλαιών αυτοκινήτων
2. Παροχή κινήτρων στους καταναλωτές για οικειοθελή απόσυρση

Το πρώτο μέτρο αποτελεί συνήθως νομοθεσία που εξαναγκάζει όλους τους κατόχους να αποσύρουν το παλαιό αυτοκίνητό τους. Το δεύτερο μέτρο συνιστά κίνητρο προς τους καταναλωτές δίχως να τους εξαναγκάζει να αποσύρουν το αυτοκίνητό τους. Η παροχή κινήτρου συνήθως είναι ένα χρηματικό αντίτιμο που αφαιρείται από την τιμή του νέου αυτοκινήτου που θα αγοράσει ο καταναλωτής.

Η μοντελοποίηση του μέτρου της απόσυρσης έγκειται στην τροποποίηση του παράγοντα $sr_{i,a}$ που χαρακτηρίζει την πιθανότητα να μην αποσυρθεί ένα όχημα ηλικίας a ενός συγκεκριμένου μέσου μεταφοράς i . Στην περίπτωση που εφαρμόζεται εξαναγκαστική απόσυρση παλαιών αυτοκινήτων πέραν μιας ηλικίας α_π , τότε η πιθανότητα να μην αποσυρθεί το όχημα υπολογίζεται ως εξής:

$$sp_{i,a} = \begin{cases} 0 & \alpha \geq \alpha_{\pi} \\ \exp \left[- \left(\frac{a + F_i}{T_i} \right)^{F_i} \right] & \alpha < \alpha_{\pi} \end{cases} \quad (4-110)$$

4.8.2.3 Τα εξωτερικά κόστη και η ενσωμάτωσή τους στην τιμολόγηση

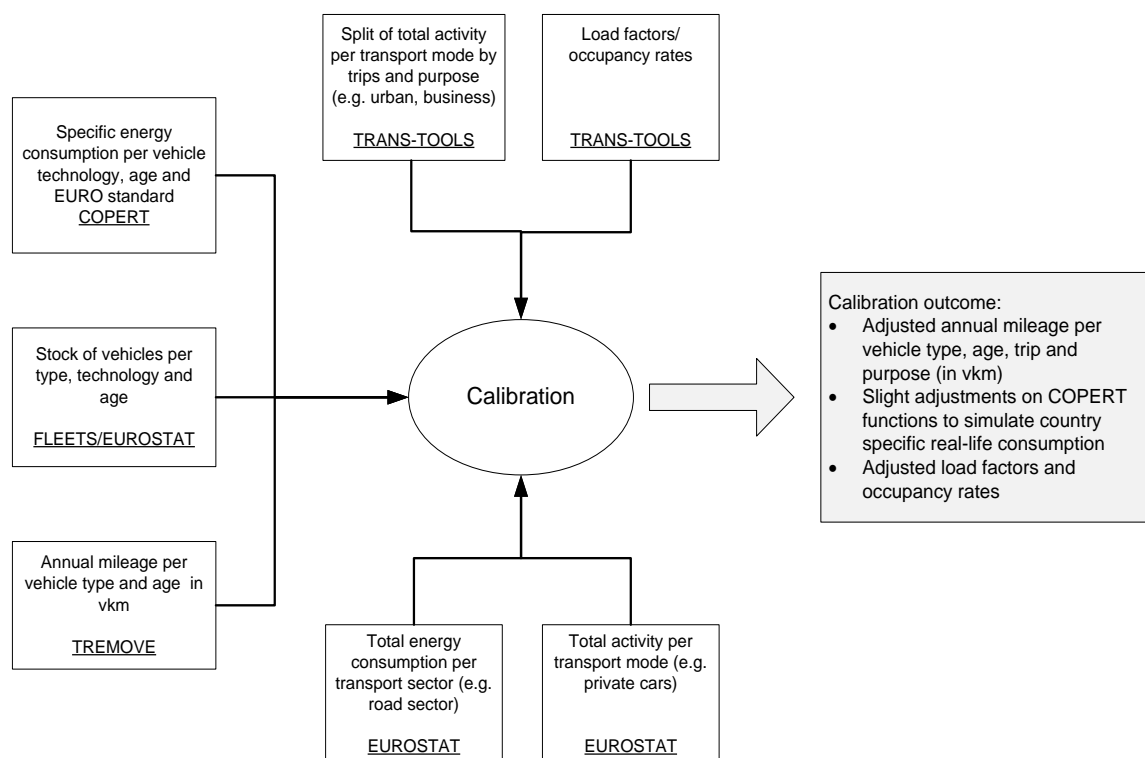
Ο όρος εξωτερικό κόστος αναφέρεται στις αρνητικές επιπτώσεις που προκαλεί η διενέργεια μιας πράξης ενός υπαίτιου (π.χ. ένα άτομο, μια ομάδα, ένας οργανισμός) σε κάποιο τρίτο πράκτορα. Ο όρος εξωτερικό κόστος μπορεί να συναντηθεί και ως αρνητική εξωτερικότητα (negative externality). Οι αρνητικές συνέπειες που προκαλούνται από τον υπαίτιο στον τρίτο πράκτορα δεν μπορούν να σταματήσουν παρά μόνο από τον πρώτο. Ο υπαίτιος που μπορεί να είναι μια επιχείρηση που εξετάζει τα δικά της συμφέροντα δεν πρόκειται να σταματήσει αυτές τις ενέργειες παρά μόνο αν υποχρεωθεί μέσω ρύθμισης. Σε αυτήν την περίπτωση, οι αρνητικές συνέπειες που προκαλεί και λαμβάνουν τη μορφή κόστους, ενσωματώνονται στη διαδικασία απόφασής της. Αυτή η ενσωμάτωση των αρνητικών επιπτώσεων στη διαδικασία απόφασης του υπαιτίου, ονομάζεται εσωτερικοποίηση του εξωτερικού κόστους. Τα εξωτερικά κόστη που εμπλέκονται στον τομέα των μεταφορών αφορούν τη συμφόρηση, την ατμοσφαιρική ρύπανση, τα ατυχήματα και το θόρυβο.

Η συμφόρηση που προκαλείται κυρίως στο οδικό δίκτυο θεωρείται ως ένα από τα σημαντικότερα εξωτερικά κόστη των μεταφορών. Το εξωτερικό κόστος της συμφόρησης αναφέρεται στο χρόνο που δαπανά ο χρήστης του οδικού δικτύου όταν δεν μπορεί να κινηθεί με το όχημά του με ταχύτητα ελεύθερης ροής (free flow speed που αναφέρεται σε περιπτώσεις χαμηλού βαθμού χρησιμοποίησης του οδικού δικτύου), αλλά είναι αναγκασμένος να κινείται με χαμηλότερη ταχύτητα. Η χαμηλότερη ταχύτητα συνεπάγεται μεγαλύτερο χρόνο ταξιδιού, που έχει ως συνέπεια την αύξηση του κόστους του χρόνου που αντιλαμβάνεται ο χρήστης. Το οριακό κόστος που προκαλείται λόγω συμφόρησης σε όλους τους χρήστες του οδικού δικτύου είναι αυτό που οφείλεται αν εισέλθει ένας επιπλέον χρήστης στο οδικό δίκτυο με το όχημά του. Για να εσωτερικοποιηθεί το εξωτερικό κόστος που προκαλείται λόγω συμφόρησης, θα πρέπει όλοι οι χρήστες να πληρώνουν επιπλέον το οριακό κόστος που αναφέρθηκε προηγουμένως. Χαρακτηριστικό παράδειγμα εσωτερικοποίησης του εξωτερικού κόστους λόγω συμφόρησης αποτελεί η πόλη του Λονδίνου, όπου για να εισέλθουν διερχόμενα ιδιωτικά οχήματα σε μια ορισμένη μητροπολιτική ζώνη είναι υποχρεωμένα να πληρώσουν διόδια. Η βέλτιστη τιμή των διοδίων είναι ίση με το οριακό κόστος της συμφόρησης.

Παράρτημα Κεφαλαίου 4

Προσαρμογή των τεχνικοοικονομικών δεδομένων στο έτος βάσης

Το μοντέλο έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε να είναι προσαρμοσμένο στα ιστορικά δεδομένα για τις χρονιές 2005 και 2010. Η κυριότερη βάση δεδομένων για το μοντέλο αποτελεί η EUROSTAT. Ιστορικά δεδομένα για τις επιβατικές και εμπορευματικές μεταφορές για κάθε μεταφορικό μέσο προέρχονται από το “EU transport in figures 2012” EUROSTAT statistical pocketbook. Η συνολική κατανάλωση ενέργειας δίνεται από τα ενεργειακά ισοζύγια της EUROSTAT κατά κλάδο (οδικές, σιδηροδρομικές, αεροπορικές και θαλάσσιες μεταφορές). Τα δεδομένα για τον εθνικό στόλο οχημάτων των επίγειων μεταφορών προέρχονται από τη βάση δεδομένων FLEETS database (LAT et al., 2008), κατηγοριοποιημένα ανά μέγεθος και μεικτό βάρος οχήματος. Το σύνολό τους ελέγχεται και επικυρώνεται από τις διαθέσιμες πληροφορίες της EUROSTAT. Δεδομένα για τις επιβατικές και εμπορευματικές σιδηροδρομικές μεταφορές προέρχονται από τη βάση δεδομένων EXTREMIS. Οι υποθέσεις αναφορικά με το κόστος αγοράς/ επένδυσης των οχημάτων προέρχεται από το τεχνικό κείμενο “Car prices within the European Union”. Δεδομένα αναφορικά με τη φορολόγηση των καυσίμων (ειδικός φόρος και ΦΠΑ) προέρχονται από τους πίνακες της DG TAXUD.



Σχήμα 4-22: Σχηματική απεικόνιση δεδομένων εισόδου και της εξόδου του μοντέλου κατά τη φάση προσαρμογής στο έτος βάσης

Για την προσαρμογή του μοντέλου στα έτη βάσης, πραγματοποιείται προσαρμογή συγκεκριμένων παραμέτρων μοντελοποίησης έτσι ώστε το μοντέλο να αναπαράγει πλήρως τους όγκους επιβατικής δραστηριότητας και την κατανάλωση ενέργειας ανά κλάδο και καύσιμο. Η συνολική δραστηριότητα ανά μεταφορικό μέσο κατανέμεται στα διάφορα είδη ταξιδιών ανά σκοπό, ώρα και περιοχή με βάση πληροφορίες που προέρχονται από το μοντέλο TRANS-TOOLS που είναι ένα λεπτομερές μοντέλο δικτύου μεταφορών.

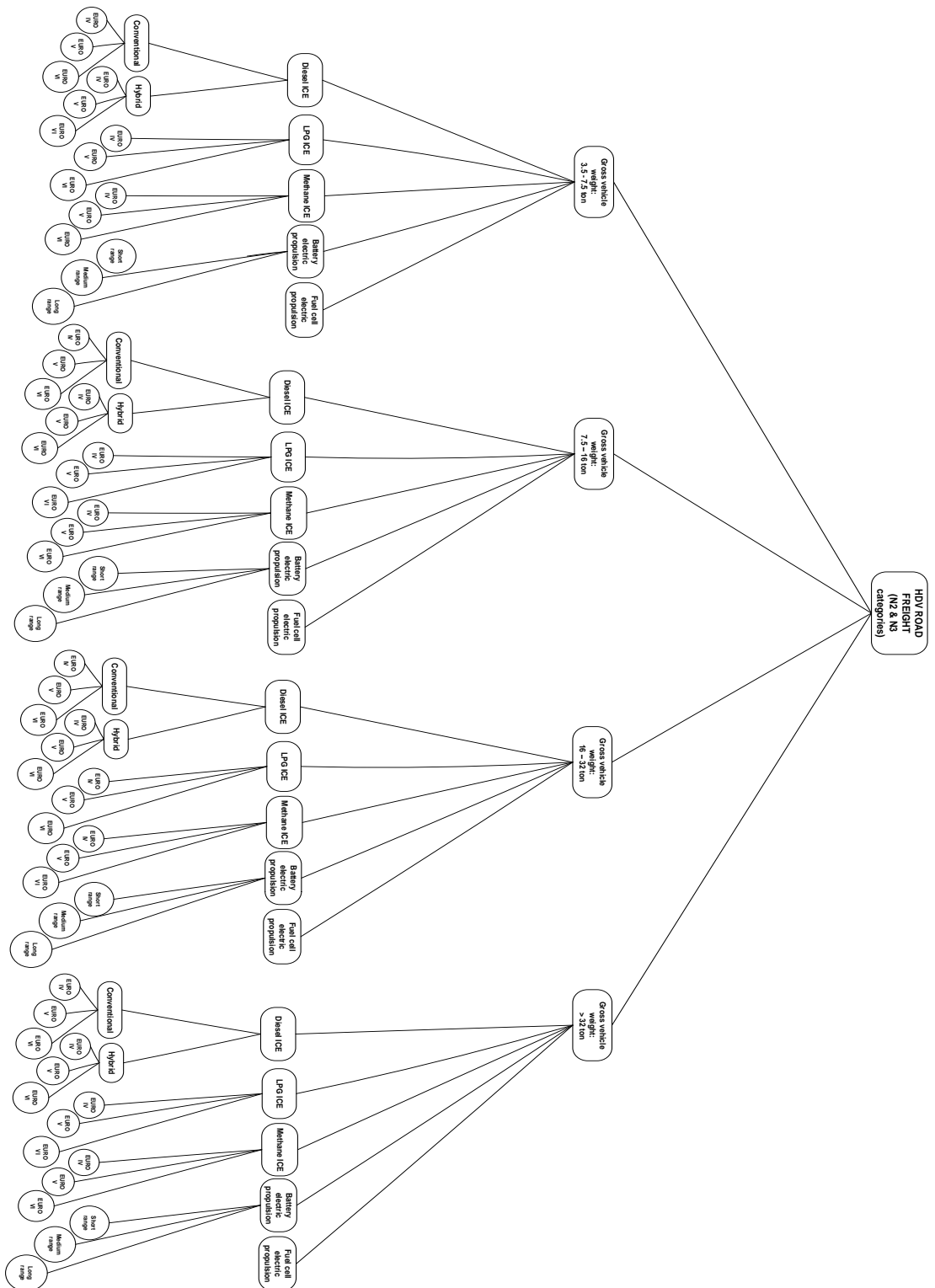
Κατά τη φάση της προσαρμογής, εισάγονται αρχικές τιμές αναφορικά με το σύνολο της ετήσιας δραστηριότητας των διαφόρων τύπων και τεχνολογιών οχημάτων, το δείκτη πληρότητας των επιβατικών αυτοκινήτων (occupancy rate) που μετράται σε επιβάτες ανά μετακίνηση και το δείκτη φόρτου των μέσων μεταφοράς εμπορευμάτων (load factor). Οι αρχικές τιμές προέρχονται από τις βάσεις δεδομένων των μοντέλων TRANS-TOOLS και TREMOVE καθώς και από τη βάση δεδομένων FLEETS. Η ειδική κατανάλωση ανά τύπο μέσου μεταφοράς και τεχνολογίας υπολογίζεται με βάση τη μεθοδολογία COPERT. Οι παραπάνω παράγοντες προσαρμόζονται με την εφαρμογή μοντελοποίησης τύπου goal programming. Τα αποτελέσματα της προσαρμογής ελέγχονται από μελέτες, ενώ γίνεται η χρήση άνω και κάτω ορίων για να αποδοθούν διαφορές ανά τύπο ταξιδιού και για να εξαχθούν ρεαλιστικές τιμές.

Πίνακας 4-10: Λίστα τύπων και τεχνολογιών οχημάτων του μοντέλου PRIMES-TREMOVE

Μεταφορικό μέσο	Τύπος οχήματος	Τεχνολογία οχήματος
Small cars (<1.4 l)	Gasoline	Pre ECE, ECE, Conventional, Euro I-V
	Bio-ethanol	Bio-ethanol blend, E85 FFV
	Hybrid Gasoline	Euro IV-VI
	Plug-in hybrid Gasoline	Plug-in hybrid technology
	Diesel	Euro IV-VI
	Bio-diesel	Blended Bio-diesel
	Synthetic fuels	Synthetic fuels
	Hybrid Diesel	Euro IV-VI
	Plug-in hybrid Diesel	Plug-in hybrid technology
	Battery electric	Battery electric technology
	Hydrogen	Hydrogen fuel cell
Medium Cars (1.4 - 2.0 l)	Gasoline	Pre ECE, ECE, Conventional, Euro I-V
	Bio-ethanol	Blended Bio-ethanol, E85 ethanol car
	Hybrid Gasoline	Euro III-V
	Plug-in hybrid Gasoline	Plug-in hybrid technology
	Diesel	Pre ECE, ECE, Conventional, Euro I-V
	Bio-diesel	Blended Bio-diesel
	Synthetic fuels	Synthetic fuels
	Hybrid Diesel	Euro III-V
	Plug-in hybrid Diesel	Plug-in hybrid technology
	Battery electric	Battery electric technology
	LPG	Conventional, Euro I-V
CNG	Euro II-V	
Hydrogen	Hydrogen fuel cell	
Large Cars (>2.0 l)	Gasoline	Pre ECE, ECE, Conventional, Euro I-V
	Bio-ethanol	Blended Bio-ethanol, E85 ethanol car
	Hybrid Gasoline	Euro III-V
	Plug-in hybrid Gasoline	Plug-in hybrid technology
	Diesel	Pre ECE, ECE, Conventional, Euro I-V
	Bio-diesel	Blended Bio-diesel
	Synthetic fuels	Synthetic fuels
	Hybrid Diesel	Euro III-V
	Plug-in hybrid Diesel	Plug-in hybrid technology
	Battery electric	Battery electric technology
	LPG	Conventional, Euro I-V
CNG	Euro II-V	
Hydrogen	Hydrogen fuel cell	
Motorcycles	2-stroke technology, Gasoline, biofuels	Conventional
	Capacity 50-250 cc	4-stroke technology using gasoline/biofuels
	Capacity 250-750 cc	or electric motors

	Capacity 750cc	
Mopeds	Moped Conventional, Gasoline, biofuels	Conventional, Euro I-V
	Electric mopeds	Pure electric technology
Light Duty Vehicles (<3.5 ton)	Gasoline	Conventional, Euro I-V
	Hybrid Gasoline	LDV gasoline hybrid technology
	Plug-in hybrid Gasoline	Plug-in hybrid technology
	Diesel	Conventional, Euro I-V
	Hybrid Diesel	LDV diesel hybrid technology
	Biofuels	Biofuels
	LPG	LPG
	CNG	CNG
	Synthetic fuels	Synthetic fuels
	Plug-in hybrid Diesel	Plug-in hybrid technology
	Battery electric	Battery electric technology
	Hydrogen	Hydrogen fuel cell
Heavy Duty Trucks (> 3.5 ton)	Capacity 3.5-7.5 ton, Conventional	
	Capacity 7.5-16 ton, Conventional	Diesel trucks, Methane trucks (LNG), LPG trucks
	Capacity 16-32 ton, Conventional	
	Capacity >32 ton, Conventional	
	Capacity 3.5-7.5 ton, Hybrid	Truck diesel hybrid technology , biofuels, synthetic fuels
	Capacity 7.5-16 ton, Hybrid	
	Capacity 16-32 ton, Hybrid	Electric trucks, Hydrogen fuel cell trucks
	Capacity >32 ton, Hybrid	
Busses-Coaches	Diesel	Conventional, Euro I-V
	CNG	CNG thermal
	LPG	LPG
	Busses only Hybrid Diesel	Hybrid Diesel technology
	Battery electric	Battery electric technology
	Biodiesel	Biodiesel technology
	Synthetic fuels	Synthetic fuels
	Hydrogen	Hydrogen fuel cell
Metro	Metro Type	Metro Technology
Tram	Tram Type	Tram Technology
Passenger Train	Locomotive	Locomotive diesel
		Locomotive electric
	Railcar	Railcar diesel
		Railcar electric
	High speed train type	High speed train technology
Freight Train	Locomotive	Locomotive diesel
		Locomotive electric
	Railcar	Railcar diesel
		Railcar electric

Σχήμα 4-23 Δένδρο απόφασης τεχνολογίας και καυσίμου για αγορά νέου φορτηγού βαρέως τύπου



Κεφάλαιο 5

5 Επιδράσεις της πολιτικής ρύθμισης των εκπομπών CO₂ των αυτοκινήτων στο πλαίσιο του εξηλεκτρισμού της Ευρωπαϊκής αγοράς

5.1 Εισαγωγή

Τον Μάρτιο του 2011, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή δημοσίευσε τη Λευκή Βίβλος για τις μεταφορές υπό την ονομασία «White Paper on Transport: Roadmap to a single European transport Area- Towards a competitive and resource efficient transport system» (EC, 2011), όπου έθεσε τον φιλόδοξο στόχο της μείωσης των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου στον τομέα των μεταφορών της ΕΕ, κατά 60% το 2050 σε σύγκριση με τα επίπεδα του 1990. Αυτός ο μακροπρόθεσμος στόχος συνεπάγεται ότι, ο τομέας των επιβατικών οδικών μεταφορών θα πρέπει να επιτύχει σημαντική μείωση των εκπομπών CO₂ δεδομένου ότι είναι υπεύθυνος για περισσότερο από το ήμισυ των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου που οφείλονται στις μεταφορές (Hill et al., 2012).

Το 2009, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή ενέκρινε τον κανονισμό 443/2009 (EC, 2009) που θέτει όρια στις εκπομπές CO₂ στο μέσο όρο των πωλήσεων νέων επιβατικών αυτοκινήτων ανά κατασκευαστή. Ο στόχος της συγκεκριμένης πολιτικής είναι να εισάγει στην αγορά τεχνολογίες οχημάτων με χαμηλές εκπομπές CO₂ και να επιτύχει τη μείωση των μέσων εκπομπών CO₂ του στόλου οχημάτων της ΕΕ. Οι στόχοι που έχουν τεθεί για το 2015 και το 2020 είναι 130 και 95 gCO₂/km αντίστοιχα.

Σύμφωνα με τον οργανισμό European Environment Agency (AEA, 2014), οι κατασκευαστές αυτοκινήτων εισάγουν ολοένα και πιο αποδοτικά οχήματα που εκπέμπουν λιγότερες εκπομπές CO₂ από το 2009, έτσι ώστε να πετύχουν το στόχο των

130 gCO₂/km για το 2015. Σύμφωνα με τον οργανισμό AEA, οι μέσες εκπομπές CO₂ από τα νέα επιβατικά αυτοκίνητα που εγγράφονται στον Ευρωπαϊκό στόλο έχουν μειωθεί από τα 145,7 gCO₂/km το 2009 στα 132,2 gCO₂/km το 2012, παρουσιάζοντας ετησίως μείωση 3,2% και είναι πιθανό ότι ο στόχος των 130 gCO₂/km το 2015 θα επιτευχθεί νωρίτερα. Ωστόσο, για την επίτευξη του στόχου για το 2020, απαιτείται ένα ρυθμός μείωσης του μέσου όρου των ειδικών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα ανά κατασκευαστή, της τάξης των 4% κατά τη διάρκεια της περιόδου 2012-2020. Σύμφωνα με τη μελέτη της ICCT (2014) μια σειρά από επιμέρους μοντέλα αυτοκινήτων που διατίθενται στο εμπόριο πληρούν ήδη σήμερα το στόχο για το 2020. Πράγματι, τα οχήματα που πληρούν το στόχο των 95 gCO₂/km είναι τα ηλεκτρικά οχήματα μπαταρίας (BEVs), τα υβριδικά με καλώδιο (PHEVs) και τα υβριδικά. Τα BEVs που λειτουργούν αποκλειστικά με ηλεκτρική ενέργεια είναι οχήματα με μηδενικές εκπομπές CO₂, τουλάχιστον στο επίπεδο της εξάτμισης, ενώ τα PHEVs δεν είναι οχήματα μηδενικών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα, δεδομένου ότι μπορούν να λειτουργήσουν είτε με ηλεκτρικό κινητήρα είτε με χρήση ορυκτών καυσίμων στους θερμικούς κινητήρες τους.

Σύμφωνα με τους Greene και Plotkin (2011), οι πολιτικές που θέτουν όρια στις ειδικές εκπομπές CO₂ ή στην ειδική κατανάλωση των νέων οχημάτων των κατασκευαστών είναι δυνατό να επιτύχουν αποδοτικές μειώσεις των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Ωστόσο η εισαγωγή πολιτικών που θα θέτουν πιο φιλόδοξους στόχους για τις μέσες εκπομπές CO₂ των νέων οχημάτων είναι απαραίτητες για την επίτευξη των μεσοπρόθεσμων και μακροπρόθεσμων περιβαλλοντολογικών στόχων που έθεσε η ΕΕ για το σύστημα των μεταφορών (CARS 21, 2012). Πράγματι, η ΕΕ θα προτείνει νέους στόχους μέσα στο 2015 όσον αφορά τη μείωση των ειδικών εκπομπών CO₂ για το 2025 (EC, 2012).

Η υπηρεσία Environmental Protection Agency (EPA, 2012) στις ΗΠΑ έχει ήδη προτείνει τη δημιουργία ορίων, όσον αφορά στην ειδική κατανάλωση των νέων ελαφρών οχημάτων για το 2025, ίσων με 54,5 mpg, που ισοδυναμούν δηλαδή με 101 gCO₂/km. Οι Gibson και Hill (2012) διερευνούν πιθανούς στόχους για την Ευρώπη για το 2025 όσον αφορά στις ειδικές εκπομπές CO₂ για τους κατασκευαστές οχημάτων. Οι στόχοι που εξετάζουν για το 2025 είναι τα 75, 70 και 60 gCO₂/km. Στην ανάλυσή τους, ερευνούν το πως μπορούν να καλυφθούν οι στόχοι αυτοί και αξιολογούν το ρόλο και τη συμβολή των ηλεκτρικών οχημάτων. Ωστόσο, η διείσδυση των εναλλακτικών οχημάτων που ικανοποιούν τους υπό εξέταση στόχους δεν είναι ένα αποτέλεσμα βελτιστοποίησης. Επιπλέον, σύμφωνα με τον Leonhard (2011), ο στόχος των 70 gCO₂/km για το 2025 μπορεί να καλυφθεί με την εισαγωγή πολύ αποδοτικών diesel οχημάτων εξοπλισμένων με υβριδικό κινητήρα εσωτερικής καύσης (ICE). Ο Plotkin (2009) τονίζει τη σημασία του ορθού συγχρονισμού θέσπισης περιβαλλοντολογικών πολιτικών καθώς και την ικανότητα των κατασκευαστών αυτοκινήτων να διαθέσουν εγκαίρως τα οχήματα που συμμορφώνονται με τις συγκεκριμένες πολιτικές.

Τέλος, η εξέλιξη των τεχνολογικών ορίων σχετικών με τη μείωση των ειδικών εκπομπών CO₂ των οχημάτων αποτελεί μακροπρόθεσμα σημαντικό τμήμα της

διαδικασίας θέσπισης της πολιτικής. Πράγματι, η διαδικασία επιλογής των τεχνολογικών ορίων δημιουργεί ταυτόχρονα και περιβαλλοντικούς περιορισμούς. Από τη σκοπιά της κλιματικής αλλαγής, η επίτευξη ενός μακροχρόνιου περιβαλλοντικού στόχου (π.χ. για το 2050) δεν είναι συχνά αρκετό. Η μείωση της συγκέντρωσης των εκπομπών CO₂ αποτελεί το αντικείμενο της κλιματικής αλλαγής. Συνεπώς, η μείωση των συσσωρευμένων εκπομπών CO₂ αποτελεί μακροπρόθεσμα ένα εξίσου σημαντικό στόχο με την επίτευξη ενός συγκεκριμένου ποσοστού μείωσης των εκπομπών CO₂ (π.χ. έως 60% για το 2050).

5.2 Σκοπός παρόντος κεφαλαίου

Ο σκοπός του παρόντος κεφαλαίου είναι να διερευνήσει με ποσοτικό τρόπο μεσοπρόθεσμους και μακροπρόθεσμους στόχους για τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα για τα επιβατικά αυτοκίνητα στην ΕΕ. Η διερεύνηση των παραπάνω στόχων αποτελεί μια ανάλυση ευαισθησίας (πολλαπλά σενάρια) στους ήδη υπάρχοντες θεσμοθετημένους στόχους της ΕΕ. Η ανάλυση ευαισθησίας που πραγματοποιείται θέτει ως στόχο τη εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με τις επιπτώσεις των τεχνολογικών ορίων CO₂ στον εξηλεκτρισμό των μεταφορών και τη διείσδυση των ηλεκτρικών αυτοκινήτων στην αγορά. Η ποσοτικοποίηση των σεναρίων είναι εφικτή με τη χρήση του μοντέλου PRIMES-TREMOVE που αναπτύχθηκε και θεμελιώθηκε στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής (Κεφάλαιο 4).

Τα σενάρια ενεργειακής πολιτικής που παρουσιάζονται στο κεφάλαιο αυτό επικεντρώνονται στη χρονική περίοδο 2025-2030 και στο μακροπρόθεσμο ορίζοντα 2050. Η πρωτοτυπία έγκειται στο γεγονός ότι πραγματοποιείται για πρώτη φορά η διεξαγωγή ανάλυσης ευαισθησίας που συσχετίζει τα τεχνολογικά όρια CO₂ με το βαθμό διείσδυσης των ηλεκτρικών οχημάτων στην Ευρωπαϊκή αγορά. Τα όρια CO₂ έχουν εισαχθεί ως περιορισμοί στο υπομοντέλο προσφοράς του PRIMES-TREMOVE και λειτουργούν ως μοχλοί που επηρεάζουν τη μελλοντική διάρθρωση του Ευρωπαϊκού στόλου οχημάτων. Αντίθετα, η ανάλυση των Gibson και Hill (2012) που επικεντρώνεται στο μεσοπρόθεσμο ορίζοντα (2025) δεν αποτελεί αποτέλεσμα βελτιστοποίησης αλλά υπολογισμών σε υπολογιστικά φύλλα (spreadsheet calculations). Ακόμη, η ανάπτυξη ενεργειακών σεναρίων επιτρέπει την άντληση συμπερασμάτων πολιτικής για τους υπεύθυνους χάραξης πολιτικής για τη μακροπρόθεσμη μείωση των εκπομπών CO₂ στον τομέα των επιβατικών μεταφορών. Η χρήση του εξειδικευμένου ενεργειακού μοντέλου για τον τομέα των μεταφορών PRIMES-TREMOVE, επιτρέπει επιπλέον την ποσοτικοποίηση των επιπτώσεων στο συνολικό κόστος του συστήματος που εξετάζεται. Ο άξονας του κόστους αποτελεί αναπόσπαστο στοιχείο μιας ενεργειακής μελέτης και φέρει ειδικό βάρος κατά τη θεσμοθέτηση πολιτικών.

Το παρόν κεφάλαιο παρουσιάζει τρία σενάρια ενεργειακής πολιτικής για τον τομέα των μεταφορών μέχρι το 2050, τα οποία εφαρμόζουν ολοένα και αυστηρότερα όρια για τις ειδικές εκπομπές CO₂ των νέων οχημάτων των κατασκευαστών. Αρχικά, παρουσιάζεται ένα σενάριο αναφοράς «Reference Scenario» (1) που υποθέτει ότι ο

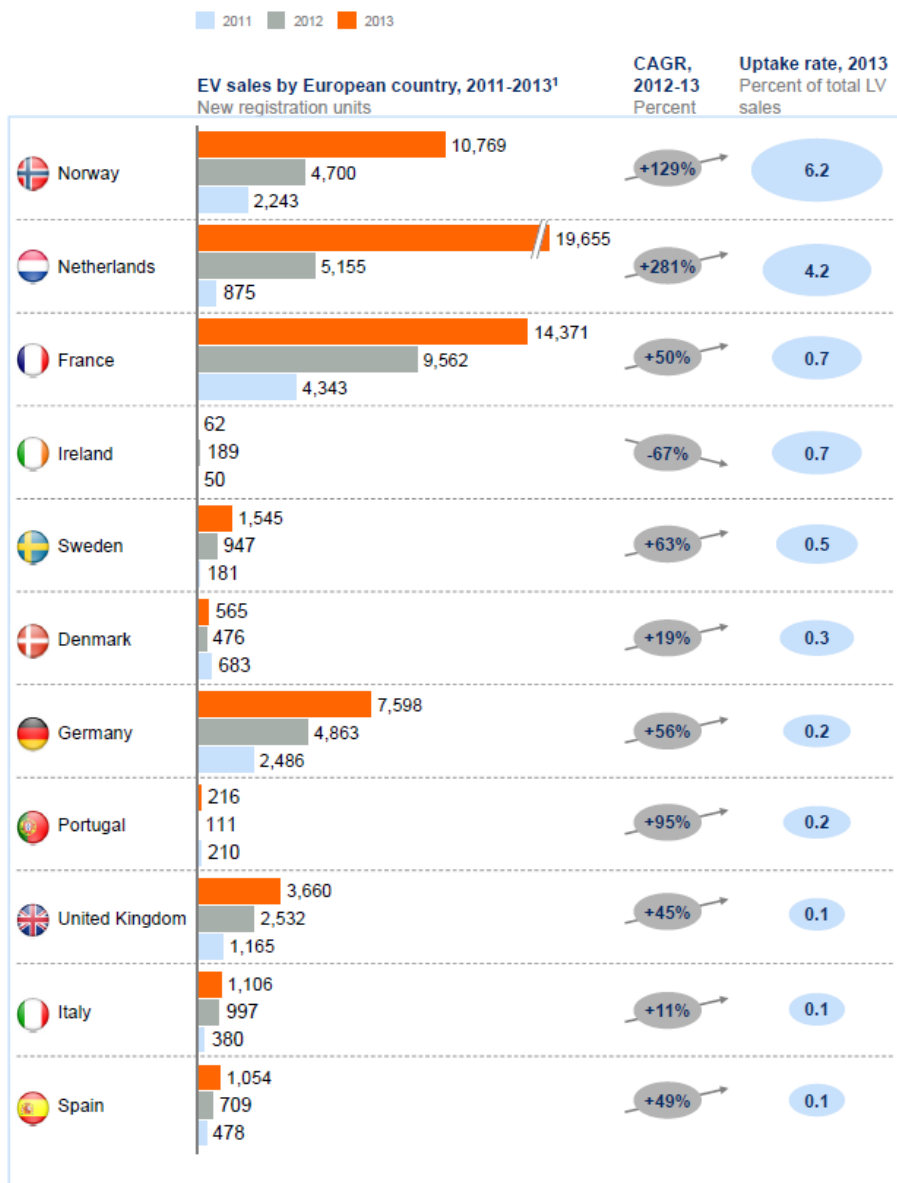
στόχος των 95 gCO₂/km που έχει θεσμοθετηθεί για το 2020 θα παραμείνει ακέραιος μέχρι το 2050. Το ήπιο σενάριο «Mild» (2) υιοθετεί την εφαρμογή πιο αυστηρών ορίων για τις ειδικές εκπομπές CO₂ των αυτοκινήτων από το 2025 και έπειτα. Το αισιόδοξο σενάριο «Ambitious» (3) υιοθετεί την εφαρμογή πιο αισιόδοξων στόχων από τα προηγούμενα σενάρια. Πιο συγκεκριμένα, το σενάριο «Ambitious» εφαρμόζει τους στόχους που υιοθετούνται στο σενάριο «Mild» κατά 10 χρόνια νωρίτερα. Το σκεπτικό είναι να εξαχθούν συμπεράσματα όσον αφορά στον αντίκτυπο της καθυστερημένης εφαρμογής των στόχων πολιτικής στις σωρευτικές εκπομπές CO₂ κατά τη διάρκεια της χρονικής περιόδου 2020-2050. Οι επιπτώσεις της διαφοροποιημένης εφαρμογής της συγκεκριμένης πολιτικής εξετάζονται σε διαφορετικούς χρονικούς ορίζοντες, δηλαδή σε μεσοπρόθεσμο και μακροπρόθεσμο ορίζοντα. Τα συμπεράσματα που εξάγονται αφορούν τη μελλοντική διάρθρωση του στόλου των οχημάτων της Ευρωπαϊκής αγοράς, τις συνολικές εκπομπές CO₂, την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας καθώς και τη συνολική ζήτηση ενέργειας και το κόστος του συστήματος. Επιπλέον, διερευνάται η ορθότητα της εν λόγω πολιτικής και οι απαραίτητες συνθήκες για την αποτελεσματική εφαρμογή της στον τομέα των μεταφορών της ΕΕ.

5.2.1 Η δυναμική των ηλεκτρικών αυτοκινήτων στα πλαίσια της βιομηχανίας

Τα τελευταία δύο χρόνια, η Ευρώπη εισέρχεται στην αρχική φάση διείσδυσης των ηλεκτρικών αυτοκινήτων, παρουσιάζοντας πωλήσεις που ξεπερνούν το όριο του 1% των συνολικών πωλήσεων σε ορισμένες χώρες. Παρ' όλο που ο όγκος πωλήσεων ηλεκτρικών αυτοκινήτων είναι ακόμα χαμηλός, διαφαίνεται μια δυναμική που ενδέχεται να οδηγήσει σε ακόμα υψηλότερες πωλήσεις στο άμεσο μέλλον.

Πράγματι, έπειτα από δεκαετίες που οι αυτοκινητοβιομηχανίες παράγουν συμβατικά αυτοκίνητα με μηχανή εσωτερικής καύσης, η βιομηχανία έχει αρχίσει να διαφοροποιεί το χαρτοφυλάκιο παραγωγής αυτοκινήτων. Σήμερα παρουσιάζονται ολοένα και περισσότερες ενδείξεις αναφορικά με τη στρόφη προς ένα χαρτοφυλάκιο αυτοκινήτων που κινούνται με ηλεκτρική ενέργεια. Πράγματι, το Σχήμα 5-1 παρουσιάζει τις πωλήσεις των ηλεκτρικών αυτοκινήτων ανά χώρα της Ευρώπης όπου ο όγκος των πωλήσεων των ηλεκτρικών αυτοκινήτων αυξάνεται κατά την τριετία 2011-2013.

Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή υποστηρίζει την περαιτέρω διείσδυση των εναλλακτικών τεχνολογιών οχημάτων και καυσίμων μέσω της υιοθέτησης πολιτικών και ρυθμιστικών μέτρων. Η πολιτική ρύθμισης των ειδικών εκπομπών CO₂ 443/2009 εξαναγκάζει τους κατασκευαστές να προωθήσουν ολοένα και πιο αποδοτικά/καθαρά αυτοκίνητα στην αγορά. Επιπλέον, η ΕΕ έχει υιοθετήσει την οδηγία αναφορικά με τη διείσδυση των εναλλακτικών καυσίμων που θέτει συγκεκριμένους στόχους για τη διείσδυση της απαραίτητης υποδομής διάθεσης και διανομής εναλλακτικών καυσίμων.



1 Data for 2013 partly estimated based on monthly data availability through 2013 (depending on country September, October or November)
SOURCE: IHS Automotive Driven by Polk, Association Avere, Autovereniging RAI, ACEA, Elbil.no, Gronnbil, Agentschap NL, SMMT

Σχήμα 5-1: Πωλήσεις ηλεκτρικών αυτοκινήτων ανά χώρα της Ευρώπης κατά την περίοδο 2011-2013 (Πηγή: Amsterdam Roundtables Foundation και McKinsey, 2014)

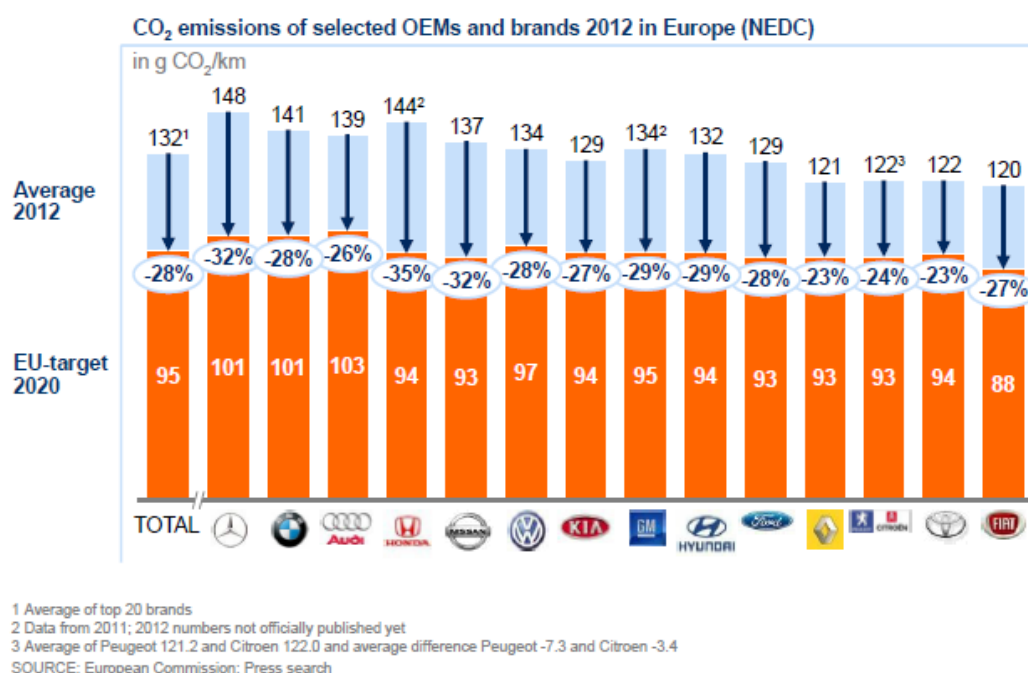
Πιο συγκεκριμένα, ορισμένοι κατασκευαστές παρουσιάζουν σημαντική άνοδο στις πωλήσεις ηλεκτρικών αυτοκινήτων. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η Nissan και το ηλεκτρικό αυτοκίνητο Leaf του οποίου οι πωλήσεις σε παγκόσμιο επίπεδο έφτασαν τις 100,000 μονάδες. Αντίστοιχα, η Tesla έχει πετύχει σωρευτικές πωλήσεις του μοντέλου Model S της τάξης των 25,000 μονάδων.

Η πολιτική ρύθμισης των ειδικών εκπομπών CO₂ 443/2009 επιβάλλει στους κατασκευαστές αυτοκινήτων ο μέσος όρος των ειδικών εκπομπών των πωλήσεων

νέων αυτοκινήτων να μην ξεπερνάει τα 95 gCO₂/km. Η παραπάνω οδηγία εξαναγκάζει τους κατασκευαστές αυτοκινήτων σε δραστική μείωση των εκπομπών αερίου του θερμοκηπίου του στόλου των οχημάτων σε σχέση με τα επίπεδα του 2010 όπως παρουσιάζονται στο Σχήμα 5-2. Πράγματι, το χάσμα των εκπομπών CO₂ του στόλου του 2012 σε σχέση με το στόχο του 2020 αγγίζει κατά μέσο όρο το 28%. Η επίτευξη του στόχου αυτού συνεπάγεται την ανάγκη διείσδυσης της τεχνολογίας των ηλεκτρικών αυτοκινήτων.

Major OEMs need to cut fleet emissions by ~30% by 2020 to meet EU emissions target

EUROPEAN UNION



Σχήμα 5-2: Στόχοι μείωσης των ειδικών εκπομπών CO₂ ανά κατασκευαστή αυτοκινήτων το 2020 (Πηγή: European Commission)

5.3 Το σενάριο αναφοράς

Το σενάριο αναφοράς ουσιαστικά αποτελεί ένα σενάριο βάσης το οποίο θεωρείται το σημείο αναφοράς για να αντληθούν συμπεράσματα σχετικά με τις επιπτώσεις της εφαρμογής μιας συγκεκριμένης πολιτικής. Συνεπώς, η χρησιμότητα της ποσοτικοποίησης του σεναρίου αναφοράς έγκειται στο γεγονός ότι αποτελεί σημείο σύγκρισης για τα υπόλοιπα σενάρια που ποσοτικοποιούνται. Το σενάριο αναφοράς αποτελεί μια προέκταση των ήδη υπάρχοντων πολιτικών και μέτρων για τον τομέα των μεταφορών μέχρι το 2050.

Το σενάριο αναφοράς περιγράφει το μέλλον του τομέα των μεταφορών (μέχρι το 2050) και μετρά τις επιπτώσεις μιας σειράς πολιτικών που έχουν υιοθετηθεί μέχρι το Νοέμβριο του 2011. Βασίζεται στις τρέχουσες τάσεις και τις κύριες

μακροοικονομικές παραδοχές σχετικά με τον πληθυσμό και την οικονομική ανάπτυξη όπως προβλέφθηκαν στη μελέτη «Economic Policy Committee» (2009) και χρησιμοποιήθηκαν στο σενάριο αναφοράς του Οδικού Χάρτη «Energy Roadmap 2050» (EC, 2011b). Ο ρυθμός αύξησης του ΑΕΠ στην ΕΕ είναι περίπου 1,7% ετησίως κατά μέσο όρο μεταξύ 2010 και 2050. Οι διεθνείς τιμές του πετρελαίου ακολουθούν την πρόβλεψη του σεναρίου αναφοράς του Οδικού Χάρτη «Energy Roadmap», σύμφωνα με τον οποίο αυτές αναμένεται να αυξηθούν και να φτάσουν τα 106 \$/ βαρέλι και 127 \$ / βαρέλι το 2030 και το 2050 αντίστοιχα.

Η χρονιά βάσης για το σενάριο αναφοράς είναι το έτος 2005 και τα δεδομένα βασίζονται στη βάση δεδομένων της EUROSTAT. Κατά συνέπεια, το μοντέλο PRIMES-TREMOVE αναπαράγει πλήρως τα δεδομένα για τον όγκο των εμπορευματικών και επιβατικών μετακινήσεων ανά μεταφορικό μέσο που είναι διαθέσιμα από το «Statistical pocketbook 2011-Transport» της EUROSTAT. Το μοντέλο έχει επίσης προσαρμοστεί στο να αναπαράγει τα ενεργειακά ισοζύγια για τις οδικές, σιδηροδρομικές, αεροπορικές και εθνικές θαλάσσιες μεταφορές που παρέχονται από την EUROSTAT.

Σχετικά με το διαθέσιμο στόλο των οδικών οχημάτων ανά μεταφορικό μέσο για κάθε χώρα τα δεδομένα προέρχονται από τη βάση δεδομένων FLEETS (LAT et al., 2008). Η βάση δεδομένων FLEETS περιέχει σημαντικό βαθμό λεπτομέρειας καθώς διακρίνει τα διάφορα είδη οχημάτων σε επιμέρους κατηγορίες με βάση το μεικτό βάρος τους (στην περίπτωση των βαρέων φορτηγών) και το μέγεθός τους (στην περίπτωση των ιδιωτικών αυτοκινήτων). Τα δεδομένα της βάσης δεδομένων FLEETS επιβεβαιώνονται από τη EUROSTAT η οποία παρέχει το συνολικό όγκο των οδικών οχημάτων για κάθε χώρα της Ευρώπης. Στοιχεία σχετικά με το κόστος αγοράς των οχημάτων προέρχονται από τη μελέτη «Car prices within the European Union» (EC, 2010) που παρέχει τις τιμές κτήσης διαφόρων τύπων αυτοκινήτων (π.χ. supermini, medium sedan, luxury car) για όλες τις χώρες της Ευρώπης. Οι τιμές των καυσίμων που καλούνται να πληρώσουν οι καταναλωτές εξαρτώνται από την πρόβλεψη για την εξέλιξη των διεθνών τιμών πετρελαίου στο μακροπρόθεσμο ορίζοντα. Επιπλέον, οι ειδικοί φόροι κατανάλωσης προέρχονται από τους πίνακες ειδικών φόρων κατανάλωσης της υπηρεσίας DG TAXUD. Στα πλαίσια του σεναρίου αναφοράς, οι ειδικοί φόροι κατανάλωσης θεωρούνται ότι παραμένουν αμετάβλητοι μέχρι το 2050 στα επίπεδα του 2010.

Το σενάριο αναφοράς υιοθετεί τον κανονισμό 443/2009 που θέτει τεχνολογικά όρια όσον αφορά τις ειδικές εκπομπές CO₂ των νέων οχημάτων των κατασκευαστών. Τα όρια αυτά παραμένουν στην τιμή των 95 gCO₂/km από το 2020 μέχρι το 2050. Το σενάριο αναφοράς περιλαμβάνει επιπλέον όρια εκπομπών EURO V και EURO VI των αέριων ρυπαντών για τα επιβατικά αυτοκίνητα και τα ελαφρά εμπορικά οχήματα. Επιπλέον, υιοθετείται ο κανονισμός που υπαγορεύει ότι οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας θα αποτελέσουν το 10% της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας των μεταφορών για το έτος 2020. Το σενάριο αναφοράς υποθέτει ότι ο παραπάνω κανονισμός θα επιτευχθεί κυρίως με τη διείσδυση βιοκαυσίμων στο ενεργειακό μείγμα

καθώς και με την εισαγωγή ηλεκτρικών οχημάτων. Όσον αφορά τη φορολόγηση, τόσο της κτήσης όσο και της χρήσης των οχημάτων, γίνεται η υπόθεση ότι θα παραμείνει στα επίπεδα του 2010.

Η υπόθεση της εξέλιξης του κόστους των μπαταριών, που αποτελούν το βασικό συστατικό της υψηλότερης δαπάνης για την απόκτηση ενός ηλεκτρικού οχήματος, θεωρείται εξωγενής στο μοντέλο. Πράγματι, το κατώτατο όριο του κόστους της μπαταρίας ανέρχεται στα 315 €/kWh που επιτυγχάνεται κατά την περίοδο 2030-2050. Αυτό συνεπάγεται ότι το πρόσθετο κόστος κεφαλαίου για ένα BEV με αυτονομία 150 km είναι περίπου 7000 € υπό την παραδοχή ότι η χωρητικότητα της μπαταρίας ανέρχεται στις 23 kWh. Είναι φανερό ότι η συγκεκριμένη υπόθεση για την εξέλιξη της μπαταρίας θέτει σημαντικό εμπόδιο στους καταναλωτές όσον αφορά την εμπορική επιτυχία και διείσδυση των ηλεκτρικών αυτοκινήτων στην αγορά. Ωστόσο, το πρόσθετο κόστος για ένα υβριδικό με καλώδιο PHEV που είναι δυνατό να έχει εύρος ηλεκτρικής αυτονομίας 60 χιλιόμετρα ανέρχεται σε περίπου 3000 €.

5.3.1 Αποτελέσματα σεναρίου αναφοράς

Τα αποτελέσματα του σεναρίου αναφοράς που αφορούν τα επιβατικά αυτοκίνητα επικεντρώνονται στην επιβατική δραστηριότητα που μετράται σε επιβατο-χιλιόμετρα (pkm), στην κατανάλωση ενέργειας ανά είδος καυσίμου και στις εκπομπές CO₂ (Πίνακας 5-1). Σύμφωνα με το σενάριο αναφοράς, η δραστηριότητα των αυτοκινήτων προβλέπεται να παρουσιάζει αυξητικό ρυθμό για όλη τη χρονική περίοδο μεταξύ 2010-2050. Ο ρυθμός αύξησης της δραστηριότητας των επιβατικών αυτοκινήτων κατά την περίοδο 2010-2020 είναι υψηλός και αγγίζει τα επίπεδα του 1,3% ετησίως. Ο ρυθμός ανάπτυξης, ωστόσο, μειώνεται σε μεσοπρόθεσμη και μακροπρόθεσμη βάση (0,5% ετησίως μεταξύ 2030 και 2050) παρουσιάζοντας σημάδια κορεσμού.

Τα αυτοκίνητα που είναι εξοπλισμένα με κινητήρα συμβατικής τεχνολογίας (κινητήρας εσωτερικής καύσης) ντίζελ και βενζίνης αποτελούν το κυρίαρχο συστατικό του μείγματος της αγοράς των αυτοκινήτων στην ΕΕ, καθ' όλη τη διάρκεια της περιόδου πρόβλεψης. Συγκεκριμένα, η δραστηριότητα των ντιζελοκινήτων αυτοκινήτων αυξάνει τη χρονική περίοδο 2010-2020, ως αποτέλεσμα της αυξημένης διείσδυσης των μικρών αυτοκινήτων ντίζελ. Τα τελευταία αυξάνουν σημαντικά το μερίδιο αγοράς τους, κυρίως λόγω των χαμηλών ειδικών εκπομπών CO₂ που έχουν, γεγονός που επιτρέπει στους κατασκευαστές οχημάτων να συμμορφωθούν με το στόχο των 95 gCO₂/km για το 2020. Επιπλέον, η υβριδική τεχνολογία αναμένεται να πραγματοποιήσει σημαντική διείσδυση στην αγορά των αυτοκινήτων. Πράγματι, τα υβριδικά αυτοκίνητα ντίζελ και βενζίνης παρουσιάζουν μια εναλλακτική επιλογή από την πλευρά των κατασκευαστών για τη συμμόρφωσή τους στον κανονισμό 443/2009.

Πίνακας 5-1: Σύνοψη αποτελεσμάτων σεναρίου αναφοράς για την ΕΕ 27

<i>Activity in billion pkm</i>	2010	2020	2030	2040	2050	Average annual growth (%)		
						2010-2020	2020-2030	2030-2050
Diesel Conventional	1621	1956	1511	1175	1088	1.9%	-2.5%	-1.6%
Diesel Hybrid		183	649	899	993	50.9%	13.5%	2.1%
Diesel plug-in hybrid		25	100	231	261		14.9%	4.9%
Gasoline Conventional	2671	2476	2020	1660	1522	-0.8%	-2.0%	-1.4%
Gasoline Hybrid		206	783	1127	1273	56.6%	14.3%	2.5%
Gasoline plug-in hybrid		17	82	246	282		16.9%	6.4%
LPG/ CNG/ Flex fuel	144	181	204	218	227	2.3%	1.2%	0.5%
Battery Electric		7	48	159	282		22.0%	9.3%
Total cars	4441	5050	5398	5715	5929	1.3%	0.7%	0.5%
Energy consumption (in Million toe)								
Gasoline	93	74	66	62	59	-2.2%	-1.1%	-0.6%
Diesel	63	59	50	44	41	-0.8%	-1.7%	-0.9%
LPG\CNG	6	7	7	7	7	1.8%	0.0%	-0.4%
Biofuels	6	14	15	15	15	8.3%	1.3%	-0.3%
Electricity	0	0	1	3	4		17.0%	7.1%
Total	169	154	140	132	126	-0.9%	-1.0%	-0.5%
Total (in million tons CO₂)	477	413	362	332	314	-1.4%	-1.3%	-1.1%
CO₂ emissions per unit of activity (in g CO₂ /pkm)	107.5	81.7	67.1	58.1	53.0	-2.7%	-2.0%	-1.2%
CO₂ emissions per unit of energy (in ton CO₂ /toe)	2.8	2.7	2.6	2.5	2.5	-0.6%	-0.3%	-0.2%

Όσον αφορά στην κατανάλωση ενέργειας, σύμφωνα με τα αποτελέσματα του μοντέλου, η ζήτηση για βενζίνη και ντίζελ μειώνεται καθ' όλη την περίοδο πρόβλεψης. Η μείωση της ζήτησης για τα συγκεκριμένα ορυκτά καύσιμα οφείλεται στη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των συμβατικών τεχνολογιών, τη διεύδυση των αυτοκινήτων ντίζελ που έχουν μικρότερη ειδική κατανάλωση από τα αντίστοιχα συμβατικά βενζίνης, τη διεύδυση των υβριδικών αυτοκινήτων και σε ένα μικρότερο ποσοστό στην είσοδο στην αγορά των ηλεκτρικών αυτοκινήτων. Η μεγαλύτερη μείωση της κατανάλωσης πετρελαϊκών προϊόντων επιτυγχάνεται μέσα στην περίοδο 2010-

2030 που συμπίπτει με την περίοδο εφαρμογής του κανονισμού 443/2009. Πράγματι, η εφαρμογή του συγκεκριμένου κανονισμού οδηγεί στην αγορά ολοένα και πιο αποδοτικών αυτοκινήτων, γεγονός που μειώνει την ενεργειακή ένταση του Ευρωπαϊκού στόλου των αυτοκινήτων. Ο ρυθμός μείωσης της κατανάλωσης της βενζίνης και του ντίζελ προβλέπεται να είναι λιγότερο απότομος κατά τη χρονική περίοδο μετά το 2030, σε σχέση με την προηγούμενη περίοδο (2010-2030).

Επιπλέον, η κατανάλωση των βιοκαυσίμων στα επιβατικά αυτοκίνητα υπερδιπλασιάζεται μεταξύ 2010 και 2020, ως αποτέλεσμα της υποχρέωσης των Ευρωπαϊκών κρατών να συμμορφωθούν με το στόχο του 10% των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στις μεταφορές (RES-T). Η κατανάλωση των βιοκαυσίμων σταθεροποιείται στην ΕΕ μετά το 2020 καθώς θεωρείται ότι δεν εφαρμόζεται καμία περαιτέρω πολιτική κατά το συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Όσον αφορά στην κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας, αυτή παραμένει σε χαμηλά επίπεδα μέχρι το τέλος της υπό εξέταση χρονικής περιόδου, καθώς τόσο τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα με μπαταρία όσο και τα υβριδικά με καλώδιο δεν αναμένεται να πραγματοποιήσουν σημαντική διείσδυση στο στόλο των οχημάτων.

Οι συνολικές εκπομπές CO₂ των επιβατικών αυτοκινήτων στην Ευρώπη παρουσιάζουν μείωση της τάξης του 24% το 2030 και του 34% το 2050, σε σύγκριση με τα επίπεδα του 2010. Ειδικότερα, αν υπολογιστεί ο συντελεστής μέσων ειδικών εκπομπών που μετράται σε gCO₂/rkm (rkm: επιβατο-χιλιόμετρο), παρατηρείται μια σημαντική μείωση των ειδικών εκπομπών ανά μονάδα δραστηριότητας. Ισχύει:

$$\begin{aligned} \text{Συντελ. μέσων ειδικών εκπομπών} & \left[\frac{\text{gCO}_2}{\text{rkm}} \right] \\ & = \frac{\text{Σύνολο Εκπομπών CO}_2}{\text{Σύνολο Επιβατικής δραστηριότητας}} \end{aligned} \quad (5-1)$$

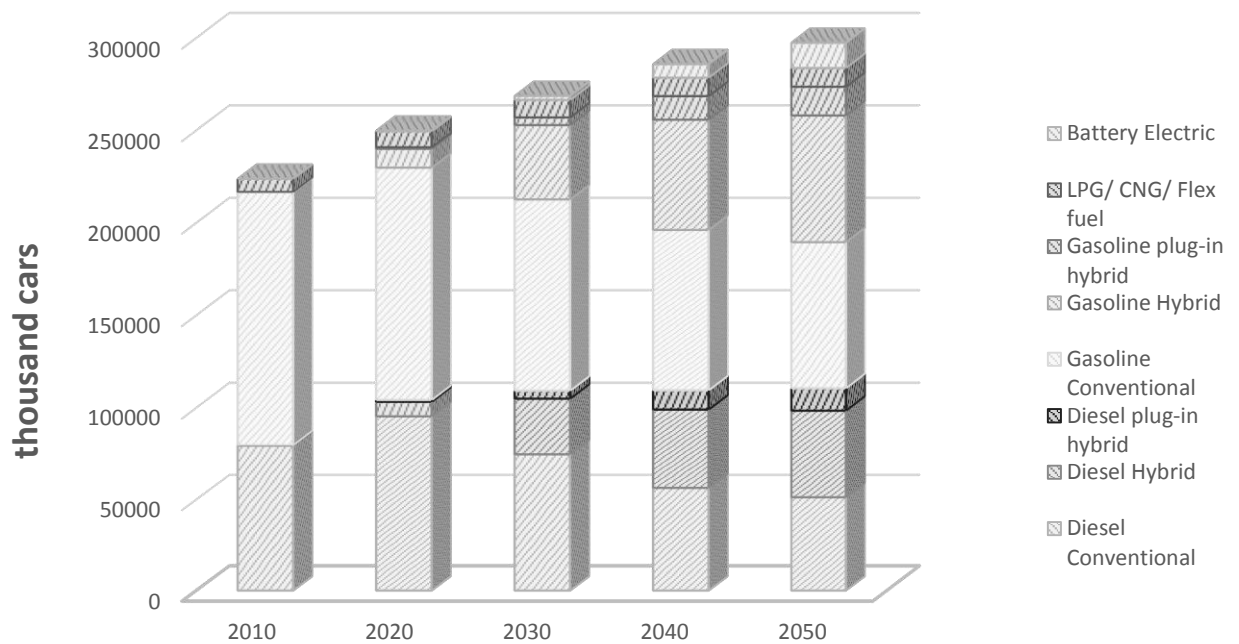
Ο παραπάνω συντελεστής μειώνεται από 108 gCO₂/rkm το 2010 σε περίπου 82 gCO₂/rkm το 2020 και 53 gCO₂/rkm το 2050. Το μεγαλύτερο ποσοστό μείωσης παρατηρείται κυρίως στον βραχυπρόθεσμο ορίζοντα (2010-2020), γεγονός που οφείλεται στην απότομη εισαγωγή στην αγορά αυτοκινήτων που εκπέμπουν ολοένα και λιγότερο στην προσπάθεια των κατασκευαστών να συμμορφωθούν με τον κανονισμό 443/2009. Σημαντική συμβολή φέρουν και τα βιοκαύσιμα, καθώς κατά σύμβαση θεωρούνται ότι έχουν μηδενικό συντελεστή εκπομπής CO₂ κατά την καύση τους στον κινητήρα εσωτερικής καύσης. Η συνεχιζόμενη μείωση του μέσου όρου των ειδικών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα ανά μονάδα δραστηριότητας για τα επόμενα χρόνια, οφείλεται στη συνεχιζόμενη αντικατάσταση του παλαιότερου στόλου οχημάτων από πιο αποδοτικές τεχνολογίες, την αύξηση του μεριδίου του ντίζελ σε σχέση με τη βενζίνη και την αυξημένη διείσδυση των υβριδικών τεχνολογιών και λιγότερο στην εισαγωγή των ηλεκτρικών οχημάτων.

Το 2010, τα βενζινοκίνητα αυτοκίνητα αποτελούν την πλειονότητα των επιβατικών αυτοκινήτων στην Ευρώπη, με το μερίδιό τους να αγγίζει το 60% του

συνολικού στόλου των αυτοκινήτων της Ευρώπης (Σχήμα 5-3). Όσον αφορά στις βραχυχρόνιες προβλέψεις, παρατηρείται μια στροφή του στόλου των οχημάτων προς το ντίζελ, όπου τα ντιζελοκίνητα αυτοκίνητα αυξάνουν τον όγκο και το μερίδιο τους από 36% το 2010 σε 41% το 2020. Πράγματι, η στροφή προς το ντίζελ ευνοείται από τη ραγδαία αύξηση των μικρών πετρελαιοκίνητων αυτοκινήτων (που αντιστοιχούν στα τμήματα της αγοράς Segment A: mini και Segment B: supermini), σε βάρος των ανταγωνιστικών αυτοκινήτων βενζίνης, λόγω της μικρότερης κατανάλωσής τους. Επιπλέον, τα μικρά αυτοκίνητα ντίζελ σέβονται τον Κανονισμό 443/2009, λόγω των χαμηλών ειδικών εκπομπών CO₂. Πέραν της αύξησης των ντιζελοκίνητων αυτοκινήτων, παρατηρείται και μια υψηλής κλίμακας εισαγωγή των υβριδικών τεχνολογιών το 2020 σε σύγκριση με τα επίπεδα του 2010. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του μοντέλου, τα υβριδικά αυτοκίνητα ντίζελ και βενζίνης ανέρχονται σε περίπου 18 εκατομμύρια μονάδες το 2020. Τα αυτοκίνητα που κινούνται με υγροποιημένο πετρελαϊκό αέριο (LPG) και συμπιεσμένο φυσικό αέριο (CNG) καθώς και τα οχήματα ευέλικτου καυσίμου παρουσιάζουν μια μικρή αύξηση σε όγκο, αλλά εξακολουθούν να αποτελούν εξειδικευμένες αγορές μέχρι το 2020.

Το μερίδιο των υβριδικών τεχνολογιών συνεχίζει να αυξάνεται καθ' όλη την περίοδο πρόβλεψης, μετά το 2020, με την αντικατάσταση των παλαιότερων συμβατικών κινητήρων οχημάτων. Η επερχόμενη υβριδοποίηση του στόλου των αυτοκινήτων της Ευρώπης οδηγείται ουσιαστικά από τις προσπάθειες των κατασκευαστών των αυτοκινήτων να συμμορφωθούν με το στόχο του 95 gCO₂/km, ακόμη και μετά το 2020. Εξάλλου, τα ηλεκτρικά οχήματα, όπως τα υβριδικά με καλώδιο PHEVs και τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα με μπαταρία BEVs, αντιπροσωπεύουν μια εξειδικευμένη αγορά μέχρι το 2030, λόγω των εμποδίων της αγοράς, όπως το υψηλό κόστος απόκτησης (υψηλό κόστος της μπαταρίας) και η περιορισμένη ανάπτυξη της απαιτούμενης υποδομής σταθμών φόρτισης. Ωστόσο, τα εμπόδια της αγοράς αρχίζουν να υποχωρούν τη χρονική περίοδο μετά το 2030, γεγονός που οφείλεται κυρίως στη βελτίωση των τεχνοοικονομικών χαρακτηριστικών των μπαταριών και την ανάπτυξη της αναγκαίας υποδομής σταθμών φόρτισης. Η μείωση των εμποδίων αγοράς αντικατοπτρίζεται στην αύξηση των πωλήσεων των PHEVs και BEVs. Πράγματι, ο όγκος των συνολικών ηλεκτρικών αυτοκινήτων ανέρχεται σε περίπου 41 εκατομμύρια μονάδες το 2050 που αντιπροσωπεύουν το 14% του συνόλου του στόλου.

Είναι φανερό ότι η αγορά του αυτοκινήτου διέρχεται μια μεταβατική φάση μετά το 2030. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του μοντέλου, παρατηρείται ένα μείγμα από ετερογενείς τεχνολογίες, συμπεριλαμβανομένων των συμβατικών, υβριδικών και ηλεκτρικών κινητήρων. Πράγματι, η μακροπρόθεσμη κατάσταση της αγοράς φανερώνει τη δυναμική των ηλεκτρικών αυτοκινήτων, που όμως μετριάζεται από τα εμπόδια της αγοράς και της έλλειψης πολιτικών ενίσχυσης τους. Η ποσοτικοποίηση των σεναρίων, στη συνέχεια του παρόντος κεφαλαίου, αναδεικνύει το ρόλο της πολιτικής ρύθμισης των ορίων CO₂ στους κατασκευαστές οχημάτων, για την αξιοποίηση της δυναμικής των ηλεκτρικών αυτοκινήτων και την αύξηση του μεριδίου τους στην αγορά.



Σχήμα 5-3: Εξέλιξη του στόλου των αυτοκινήτων στην Ευρωπαϊκή αγορά στο σενάριο αναφοράς

5.4 Μοντελοποίηση της πολιτικής ρύθμισης των εκπομπών CO₂ των νέων οχημάτων (EC 443/2009)

Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή ψήφισε το 2009 και το 2011 τις ρυθμίσεις 443/2009 και 510/2011 που θέτουν συγκεκριμένα όρια εκπομπών αερίων θερμοκηπίου στο μέσο αριθμό πωλήσεων αυτοκινήτων και ελαφρών επαγγελματικών οχημάτων των κατασκευαστών. Πιο συγκεκριμένα, η ρύθμιση 443/2009 αναφέρει ότι το 2020 οι μέσες εκπομπές CO₂ των νέων πωλήσεων αυτοκινήτων ανά κατασκευαστή δεν πρέπει να ξεπερνούν το όριο των 95 gCO₂/km. Ο σκοπός αυτής της πολιτικής αποσκοπεί στο να οδηγήσει στην εισαγωγή στην Ευρωπαϊκή αγορά αυτοκινήτων με όλο και λιγότερες εκπομπές CO₂. Για παράδειγμα, τέτοια οχήματα είναι εκείνα που είναι εξοπλισμένα με πλήρες υβριδικό σύστημα (full hybrid vehicles) καθώς και οχήματα πιο ανεπτυγμένης τεχνολογίας όπως τα ηλεκτρικά και τα υβριδικά με καλώδιο.

Οι μέσες εκπομπές ανά κατασκευαστή εξαρτώνται από τον αριθμό των πωλήσεων και από τις ειδικές εκπομπές CO₂ ανά όχημα. Η μέτρηση των εκπομπών CO₂ ανά όχημα καθώς και η ειδική του κατανάλωση καυσίμου είναι συνυφασμένες και υπολογίζονται με βάση συγκεκριμένους κύκλους μετρήσεων όπως ο NEDC (New European Driving Cycle). Συνεπώς, σε κάθε όχημα πριν κυκλοφορήσει στην αγορά εκτελούνται μετρήσεις που υπολογίζουν χαρακτηριστικές τιμές για τις ειδικές

εκπομπές CO₂ και την ειδική κατανάλωση. Αυτές οι χαρακτηριστικές τιμές προσμετρώνται στον υπολογισμό των μέσων εκπομπών CO₂ ανά κατασκευαστή.

Τέτοιου είδους πολιτικές όπως οι 443/2009 και 510/2011 που θέτουν συγκεκριμένους στόχους αποτελούν σημαντικά εργαλεία στα χέρια ανθρώπων που χαράζουν πολιτικές προς τη βιωσιμότητα του τομέα των μεταφορών. Αυτές οι πολιτικές έχουν ενσωματωθεί στο μοντέλο PRIMES-TREMOVE σαν ξεκάθαρα μέτρα με σκοπό τη διερεύνηση των επιπτώσεών τους στο στόλο οχημάτων της Ευρώπης σε μέσο-μακροπρόθεσμο ορίζοντα. Ο ξεκάθαρος τρόπος μοντελοποίησης τους αποτελεί καινοτομία του μοντέλου PRIMES-TREMOVE σε αντίθεση με άλλα μοντέλα μεταφορών που οι πολιτικές αυτές δεν ενσωματώνονται ή ενσωματώνονται με αφαιρετικό τρόπο.

Οι παραπάνω πολιτικές έχουν ενσωματωθεί στο υπομοντέλο της προσφοράς και πιο συγκεκριμένα στο τμήμα της επιλογής των τύπων και τεχνολογιών οχημάτων. Το υπομοντέλο της προσφοράς δεν προσομοιώνει τους κατασκευαστές των αυτοκινήτων αλλά περιλαμβάνει ένα αναλυτικό σύνολο διαφόρων τύπων οχημάτων και τεχνολογιών με συγκεκριμένα τεchnοοικονομικά χαρακτηριστικά που είναι διαθέσιμα προς επιλογή από τον καταναλωτή. Γίνεται, δηλαδή, η παραδοχή ότι ο καταναλωτής αποφασίζει για την επιλογή του οχήματός του από έναν τυπικό κατασκευαστή. Συνεπώς, οι μέσες εκπομπές CO₂ των νέων οχημάτων που επιλέγονται δεν πρέπει να ξεπερνούν κάποιο συγκεκριμένο όριο. Η μοντελοποίηση των πολιτικών αυτών έχει λάβει τη μορφή μαθηματικού περιορισμού που αλληλεπιδρά με τη διαδικασία διακριτής επιλογής. Κάθε τύπος και τεχνολογία οχήματος χαρακτηρίζεται από συγκεκριμένα τεχνολογικά χαρακτηριστικά όπως ειδικές εκπομπές CO₂, ειδική κατανάλωση καυσίμου και κεφαλαιουχικό κόστος. Αυτά τα τεχνολογικά χαρακτηριστικά αφορούν σε συνθήκες κύκλου μετρήσεων (NEDC) και διαφέρουν από τη συμπεριφορά που μπορεί να επιδείξει το όχημα σε πραγματικές συνθήκες κυκλοφορίας. Τα ηλεκτρικά οχήματα καθώς και τα οχήματα με κυψέλες υδρογόνου έχουν μηδενικές εκπομπές CO₂. Οι ειδικές εκπομπές CO₂ στα υβριδικά οχήματα με καλώδιο που είναι εξοπλισμένα τόσο με συμβατικό κινητήρα εσωτερικής καύσης όσο και με ηλεκτροκινητήρα εξαρτώνται από το μέγεθος της μπαταρίας. Το τελευταίο καθορίζει την αυτονομία του οχήματος με χρήση μόνο του ηλεκτροκινητήρα κατά την οποία δεν εκπέμπονται εκπομπές CO₂.

Πίνακας 5-2: Ειδικές εκπομπές CO₂ ανά τεχνολογία αυτοκινήτου

Τύπος τεχνολογίας αυτοκινήτου	Ειδικές εκπομπές (gCO ₂ /km)
Large Gasoline	162
Medium Gasoline	131
Small Gasoline	105
Large Diesel	149
Medium Diesel	112
Small Diesel	94
Medium CNG	104
Medium LPG	121
Medium Flex Fuel	114
Large Flex Fuel	140
Large Gasoline Hybrid	107
Medium Gasoline Hybrid	92
Small Gasoline Hybrid	77
Large Diesel Hybrid	116
Medium Diesel Hybrid	93
Small Diesel Hybrid	77
Small Gasoline PHEV: Low range	63
Small Gasoline PHEV: High range	37
Small Diesel PHEV: Low range	57
Small Diesel PHEV: High range	33
Large Gasoline PHEV: Low range	73
Large Gasoline PHEV: High range	40
Large Diesel PHEV: Low range	67
Large Diesel PHEV: High range	37
Medium Gasoline PHEV: Low range	66
Medium Gasoline PHEV: High range	46
Medium Diesel PHEV: Low range	56
Medium Diesel PHEV: High range	39
Battery Electric	0
Hydrogen Fuel cell	0

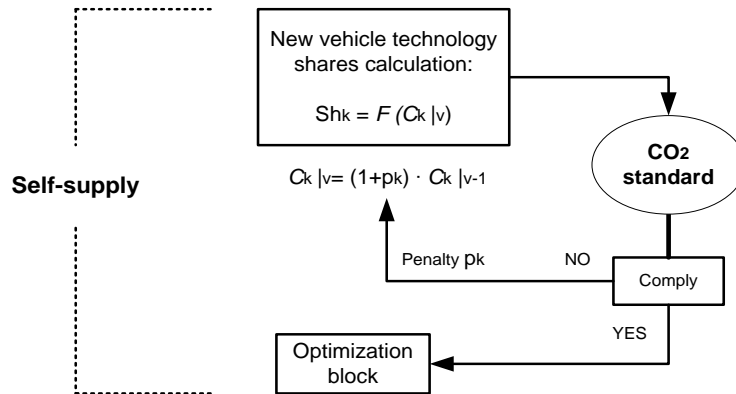
Όπως παρουσιάστηκε και στην εξίσωση (4-99) τα μερίδια των διαφορετικών τύπων και τεχνολογιών αυτοκινήτων αναπαρίστανται από την μεταβλητή $share_{k,t}$. Το μερίδιο κάθε διαφορετικής τεχνολογίας εξαρτάται από ένα δείκτη κόστους $Cwb_{k,t}$ που είναι χαρακτηριστικός για την κάθε εναλλακτική επιλογή. Μόλις υπολογιστούν τα μερίδια, τότε ο παρακάτω περιορισμός εκπομπών CO₂ θα πρέπει να ισχύει:

$$\sum_k share_{k,t} \cdot CO_2label_{k,t} \leq CO_2standard_t \quad (5-2)$$

Η παράμετρος $CO_2standard$ αναπαριστά το όριο των μέσων ειδικών εκπομπών CO_2 των νέων πωλήσεων αυτοκινήτων. Αυτή η παράμετρος αποτελεί εξωγενή υπόθεση στα πλαίσια εφαρμογής συγκεκριμένης πολιτικής και ενδέχεται να αλλάζει από σενάριο σε σενάριο. Η τιμή αυτού του ορίου βάσει της ρύθμισης 443/2009 είναι 130 gCO₂/km 95 gCO₂/km για το 2015 και το 2020 αντίστοιχα. Η παράμετρος $CO_2label_{k,t}$ αναπαριστά τις ειδικές εκπομπές CO_2 που αποτελούν ίδιο χαρακτηριστικό για κάθε τύπο και τεχνολογία αυτοκινήτου. Η τιμή των ειδικών εκπομπών CO_2 βασίζεται στον πιστοποιημένο κύκλο μετρήσεων NEDC (New European Driving Cycle) και μετριέται σε gCO₂/km. Ο όρος στην αριστερή πλευρά της ανισότητας αναπαριστά τη μέση τιμή των ειδικών εκπομπών που προκύπτει ενδογενώς. Στην περίπτωση που ο περιορισμός δεν ισχύει, τότε εισάγεται ένας όρος ποινής $pn_{k,t}$ για κάθε τύπο και τεχνολογία οχήματος της οποίας οι ειδικές εκπομπές CO_2 ξεπερνάνε το όριο που έχει τεθεί. Ο όρος ποινής εφαρμόζεται στο δείκτη κόστους $Cwb_{k,t}$ κάθε τεχνολογίας ως εξής:

$$Cwb_{k,t}^v = (1 + pn_{k,t}^v) \cdot Cwb_{k,t}^{v-1} \quad (5-3)$$

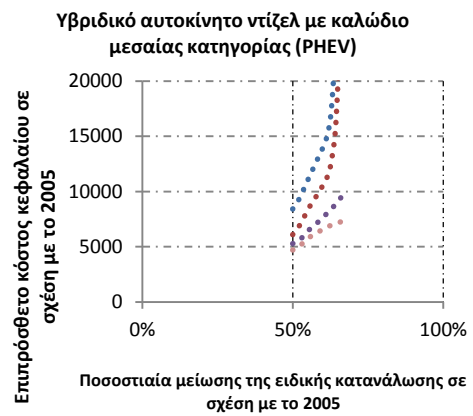
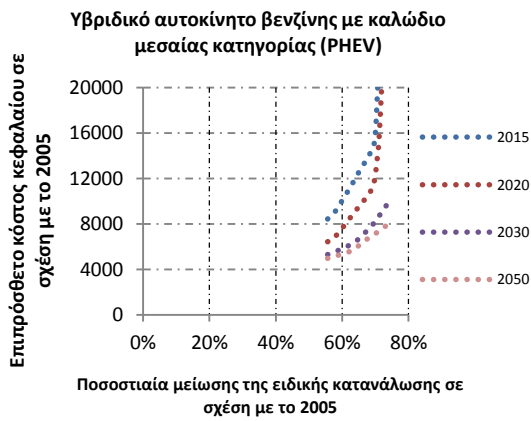
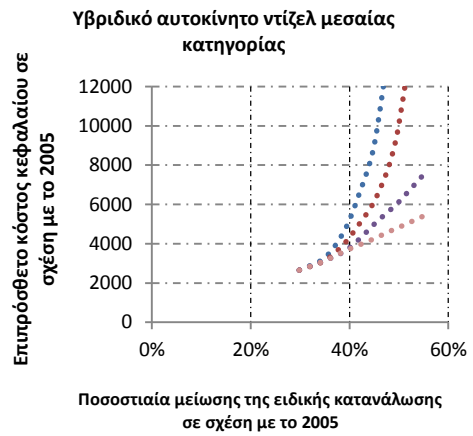
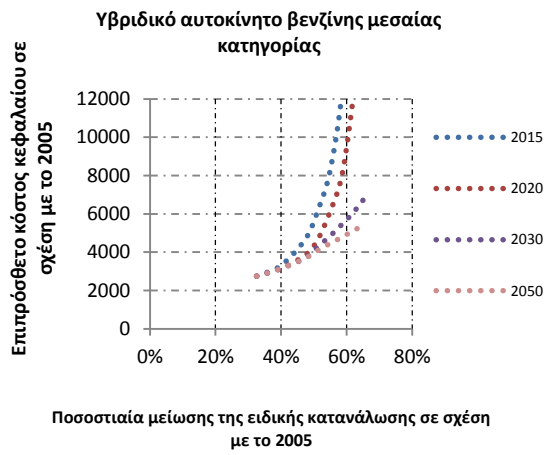
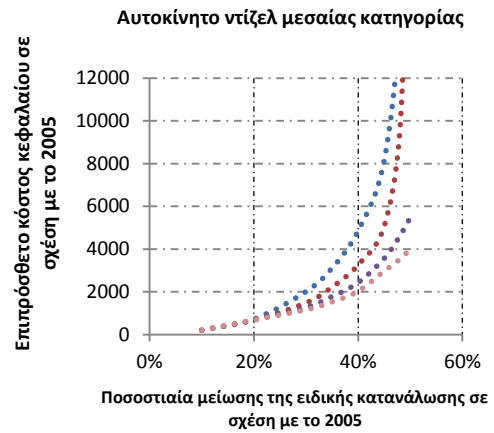
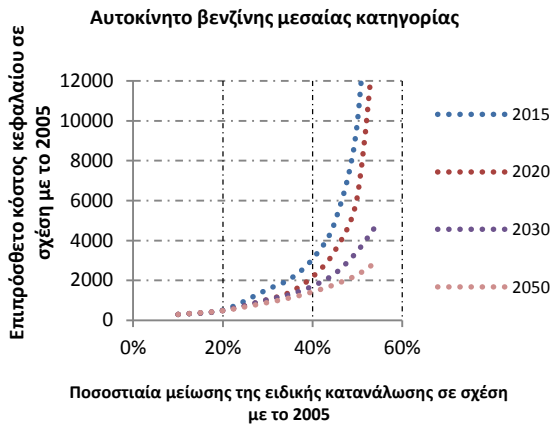
Συνεπώς, ο δείκτης κόστους αναπροσαρμόζεται με βάση τον όρο ποινής και στη συνέχεια τα μερίδια των διαφορετικών τύπων και τεχνολογιών οχημάτων υπολογίζονται ξανά με βάση την εξίσωση (4-99). Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να ικανοποιηθεί ο περιορισμός ενώ ο δείκτης v αναπαριστά τον απαιτούμενο αριθμό επαναλήψεων.

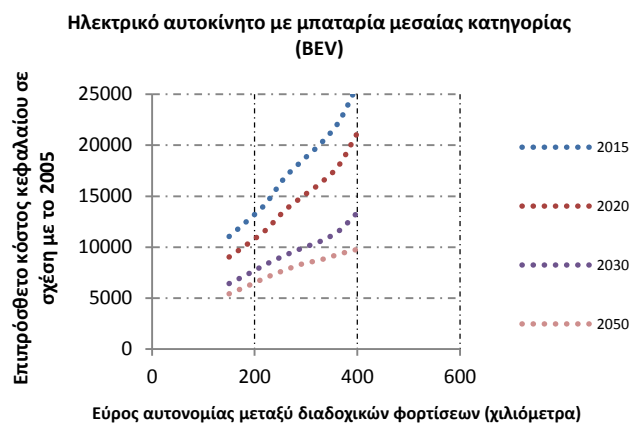


Σχήμα 5-4: Σχηματική αναπαράσταση της ενσωμάτωσης πολιτικής ρύθμισης των μέσων εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα των νέων οχημάτων

5.4.1 Ενδογενής δυνατότητα εξοικονόμησης καυσίμου

Ένας σημαντικό στοιχείο του μοντέλου όσον αφορά την απεικόνιση της ειδικής κατανάλωσης είναι η ενσωμάτωση στοιχείων που αφορούν τις δυνατότητες εξοικονόμησης καυσίμου για κάθε τύπο οχήματος. Η ενσωμάτωση πραγματοποιήθηκε με τη χρήση καμπυλών εξοικονόμησης-κόστους. Οι καμπύλες αυτές αφορούν τη δυνατότητα εξοικονόμησης καυσίμου στο μέλλον και είναι ουσιαστικά ένας γεωμετρικός τόπος που συνδέει το ποσοστό εξοικονόμησης με το κόστος. Πιο συγκεκριμένα, το Σχήμα 5-5 παρουσιάζει την καμπύλη εξοικονόμησης καυσίμου και το επιπρόσθετο κόστος για διάφορους τύπους αυτοκινήτων σε σχέση με το τυπικό αυτοκίνητο του 2005. Ο οριζόντιος άξονας απεικονίζει το ποσοστό εξοικονόμησης σε σχέση με το αντίστοιχο όχημα της χρονιάς βάσης (2005). Ο κατακόρυφος άξονας απεικονίζει το επιπλέον κόστος που καλείται να πληρώσει ο χρήστης λόγω της εξοικονόμησης που προσφέρει το όχημα. Εξάλλου, οι καμπύλες φέρουν και την επιπλέον διάσταση του χρόνου όπου γίνεται η παραδοχή ότι σε μακροχρόνιο ορίζοντα η εξοικονόμηση θα επιτευχθεί με χαμηλότερο κόστος. Η παραδοχή αυτή βασίζεται στην υπόθεση ότι οι κατασκευάστριες εταιρείες επιτυγχάνουν μείωση του κόστους σε μακροχρόνιο ορίζοντα σαν αποτέλεσμα της διαδικασίας εκμάθησης μέσω πράξης (learning by doing) και οικονομιών κλίμακος.





Σχήμα 5-5: Καμπύλη κόστους- εξοικονόμησης ενέργειας για ένα μεσαίο αυτοκίνητο βενζίνης

Η κατασκευή των καμπυλών αυτών βασίστηκε σε bottom-up τεχνολογικές πληροφορίες όπου κάθε συγκεκριμένο κατασκευαστικό στοιχείο επιφέρει συγκεκριμένη εξοικονόμηση για ένα συγκεκριμένο κόστος. Τέτοια στοιχεία αφορούν είτε τη μηχανή του οχήματος, τη μετάδοση κίνησης, τη χρήση start-stop καθώς και θέματα αεροδυναμικής και παρέχονται από μηχανολογικές ή εργαστηριακές μελέτες. Για τα αυτοκίνητα οι μελέτες προέρχονται από το ινστιτούτο TNO (TNO et al., 2011), για τα βαρέα οχήματα από μελέτες των (Hill, et al., 2011; Schrotten et al., 2012).

Στη διαδικασία επιλογής νέου οχήματος, ο αντιπροσωπευτικός καταναλωτής επιλέγει με οικονομικό τρόπο το βαθμό εξοικονόμησης του νέου οχήματος που θα αγοράσει. Τα οικονομικά κριτήρια περιλαμβάνουν το κεφαλαιουχικό κόστος και τα μεταβλητά κόστη. Στην πραγματικότητα, η επιλογή εξαρτάται από το πόσο διαθέσιμος είναι ο καταναλωτής να επενδύσει μεγαλύτερο ποσό για ένα όχημα που θα του εξοικονομήσει μελλοντικά δαπάνες για καύσιμα. Σημαντικοί παράγοντες που επηρεάζουν την επιλογή είναι το επιτόκιο αναγωγής και οι τιμές καυσίμου.

5.5 Αποτελέσματα σεναρίων «Mild» και «Ambitious»

5.5.1 Κατασκευή σεναρίων- Υποθέσεις

Το μοντέλο είναι σε θέση να διαχειριστεί εξωγενείς σεναριακές υποθέσεις σχετικά με την εξέλιξη των ορίων στις ειδικές εκπομπές CO₂ των νέων αυτοκινήτων. Το παρόν κεφάλαιο εξετάζει δύο σενάρια πολιτικής, όπου υιοθετούνται διαφορετικοί στόχοι για τις ειδικές εκπομπές CO₂ στο μεσοπρόθεσμο και μακροπρόθεσμο ορίζοντα, οι οποίοι εξελίσσονται με διαφορετικό ρυθμό μέσα στο χρόνο. Τα δύο σενάρια υποθέτουν την ύπαρξη πιο αισιόδοξων στόχων σε σχέση με το σενάριο αναφοράς «Reference». Ουσιαστικά, οι στόχοι που υιοθετούνται στα δύο σενάρια αποτελούν μια ανάλυση ευαισθησίας στο σταθερό στόχο που έχει υποτεθεί για το σενάριο αναφοράς.

Το πιο αισιόδοξο σενάριο «Ambitious» υποθέτει πιο αισιόδοξους στόχους σε σχέση με το ήπιο σενάριο «Mild» (Πίνακας 5-3). Η λογική της κατασκευής των συγκεκριμένων σεναρίων έγκειται στο γεγονός ότι οι στόχοι που υιοθετούνται στο λιγότερο αισιόδοξο σενάριο «Mild» χαρακτηρίζονται από μια χρονική υστέρηση δέκα ετών. Πράγματι, η χρονική υστέρηση υποτίθεται ότι εμφανίζεται στο μακροχρόνιο ορίζοντα, μετά τη λήξη του 2030. Τα όρια για τις εκπομπές CO₂ των νέων αυτοκινήτων μειώνονται στα 70 και 50 gCO₂/km για το 2040 και 2050 αντίστοιχα στο σενάριο «Mild». Το πιο αισιόδοξο σενάριο «Ambitious» υποθέτει ότι τα όρια μειώνονται στα 70, 50 και 40 gCO₂/km για το 2030, 2040 και 2050 αντίστοιχα. Όλες οι υπόλοιπες υποθέσεις παραμένουν σταθερές μεταξύ των τριών σεναρίων έτσι ώστε να απομονωθούν οι επιδράσεις της πολιτικής των ορίων CO₂ στη διείσδυση των ηλεκτρικών αυτοκινήτων στην Ευρωπαϊκή αγορά.

Πίνακας 5-3: Υποθέσεις των CO₂ standards για τις νέες πωλήσεις αυτοκινήτων στα εναλλακτικά σενάρια

	2025	2030	2040	2050
Mild	92	85	70	50
Ambitious	82	70	50	40

5.5.2 Δομή της Ευρωπαϊκής αγοράς αυτοκινήτων

Η παρούσα ενότητα παρουσιάζει την εξέλιξη και τη δομή του στόλου των αυτοκινήτων στην ΕΕ στα δύο σενάρια πολιτικής που εξετάζονται. Ο κύριος στόχος είναι να αναδειχθεί ο βαθμός της επίδρασης της πολιτικής στον εξηλεκτρισμό των οδικών μεταφορών. Για την καλύτερη αξιολόγηση των επιπτώσεων των εναλλακτικών στόχων που έχουν υιοθετηθεί στο «Ambitious» και «Mild» σενάριο, η ανάλυση των αποτελεσμάτων του μοντέλου διακρίνεται σε δύο φάσεις: στο μεσοπρόθεσμο (2025-2030) και στο μακροπρόθεσμο (2050) χρονικό ορίζοντα.

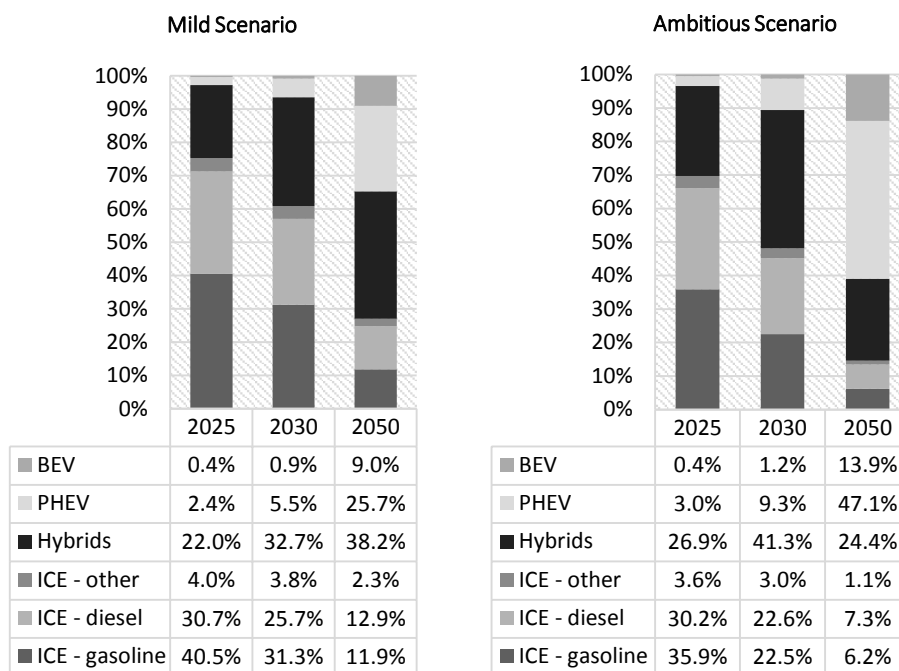
5.5.2.1 Μεσοπρόθεσμος ορίζοντας

Η υιοθέτηση πιο αισιόδοξων στόχων για τα όρια εκπομπών CO₂ για το 2025 και το 2030 σε σύγκριση με το σενάριο αναφοράς αποτελεί τον κινητήριο μοχλό για τα υψηλότερα ποσοστά διείσδυσης των υβριδικών τεχνολογιών. Στο σύνολο της Ευρωπαϊκής αγοράς, οι υβριδικές τεχνολογίες αντιπροσωπεύουν το 22% και το 32,7% του συνόλου των αυτοκινήτων για τη χρονική περίοδο 2025 και 2030 αντίστοιχα στο ήπιο σενάριο «Mild» (Σχήμα 5-6). Τα πιο αυστηρά όρια που έχουν υποτεθεί στο αισιόδοξο σενάριο «Ambitious» έχουν ως αποτέλεσμα την αυξημένη διείσδυση των υβριδικών αυτοκινήτων. Πράγματι, τα ποσοστά των αυτοκινήτων που είναι εξοπλισμένα με υβριδικό σύστημα κίνησης ανέρχονται σε περίπου 26,9% και 41,3% του συνόλου του Ευρωπαϊκού στόλου αυτοκινήτων για το 2025 και 2030 αντίστοιχα.

Η υιοθέτηση πιο αυστηρών ορίων εκπομπών CO₂ για το 2025 και το 2030 στα δύο υπό εξέταση σενάρια σε σχέση με το σενάριο αναφοράς έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της διείσδυσης των ηλεκτρικών αυτοκινήτων. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του μοντέλου, το σύνολο των ηλεκτρικών αυτοκινήτων με μπαταρία και των υβριδικών με καλώδιο τείνουν να αυξήσουν σημαντικά το μερίδιο αγοράς τους στο μεσοπρόθεσμο ορίζοντα. Στο σύνολο της Ευρωπαϊκής αγοράς, το σύνολο των ηλεκτρικών αυτοκινήτων αποτελεί το 10,5% του συνολικού στόλου για το 2030 στο αισιόδοξο σενάριο «Ambitious». Ωστόσο, ο ρυθμός και ο βαθμός διείσδυσης διαφέρει μεταξύ των υβριδικών με καλώδιο και των ηλεκτρικών με μπαταρία καθώς τα πρώτα αποτελούν το 9,3% του συνόλου, ενώ τα δεύτερα το 1,2% του συνολικού στόλου για το 2030.

Είναι φανερό ότι ο στόχος των 70 gCO₂/km για το 2030 στο φιλόδοξο σενάριο «Ambitious» οδηγεί σε αυξημένη διείσδυση προηγμένων εναλλακτικών κινητήρων και ειδικά των υβριδικών με καλώδιο. Τα τελευταία κατακτούν μεγαλύτερο μερίδιο της αγοράς λόγω του γεγονότος ότι δεν είναι τόσο υψηλής εντάσεως κεφαλαίου όπως τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα με μπαταρία. Τα υβριδικά αυτοκίνητα με καλώδιο είναι εξοπλισμένα με χαμηλής χωρητικότητας μπαταρία που κυμαίνεται μεταξύ 6-9 kWh. Αυτό είναι δυνατό να επιτρέψει αυτονομία της τάξης των 40-70 χιλιομέτρων ανά πλήρη φόρτιση. Η παραπάνω χωρητικότητα της μπαταρίας των υβριδικών με καλώδιο επιφέρει ένα επιπλέον κεφαλαιουχικό κόστος της τάξης των 2000-3000 €. Είναι προφανές, σύμφωνα με τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης, ότι τα υβριδικά με καλώδιο αποτελούν τη βέλτιστη τεχνολογική επιλογή, από την άποψη ελαχιστοποίησης του κόστους, τουλάχιστον όσον αφορά τα όρια εκπομπών της τάξης των 70 gCO₂/km. Όσον αφορά στα ηλεκτρικά αυτοκίνητα με μπαταρία, αυτά αποτελούν επενδύσεις υψηλής εντάσεως κεφαλαίου, αφού είναι εξοπλισμένα με πολλαπλάσιο αριθμό συστοιχιών μπαταριών σε σχέση με τα υβριδικά με καλώδιο.

Η υιοθέτηση των πιο αυστηρών τεχνολογικών ορίων για τις εκπομπές CO₂ των αυτοκινήτων στα δύο υπό εξέταση σενάρια έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της διείσδυσης των ηλεκτρικών αυτοκινήτων στο μεσοπρόθεσμο ορίζοντα. Εξάλλου, τα αυξημένα ποσοστά των προηγμένων τεχνολογιών στο μείγμα του Ευρωπαϊκού στόλου έχουν ως αποτέλεσμα τη μείωση των μεριδίων αγοράς των συμβατικών τεχνολογιών αυτοκινήτων που είναι εξοπλισμένα με συμβατικούς θερμικούς κινητήρες. Πράγματι, το μερίδιο αγοράς των αυτοκινήτων βενζίνης και ντίζελ αντιστοιχεί στο 57% του συνόλου της αγοράς το 2030 στο ήπιο σενάριο. Οι επιπτώσεις είναι μεγαλύτερες στο φιλόδοξο σενάριο «Ambitious», όπου το αντίστοιχο μερίδιο συρρικνώνεται στο 45% του συνόλου του Ευρωπαϊκού στόλου το 2030. Άλλες συμβατικές τεχνολογίες, όπως τα αυτοκίνητα υγραερίου ή φυσικού αερίου επηρεάζονται αρνητικά από τα πιο αυστηρά όρια εκπομπών CO₂, γεγονός που οδηγεί σε επιπλέον μείωση του μεριδίου τους στο σύνολο του Ευρωπαϊκού στόλου.



Σχήμα 5-6: Διάρθρωση του στόλου των αυτοκινήτων στα δύο εναλλακτικά σενάρια πολιτικής

5.5.2.2 Μακροπρόθεσμος ορίζοντας

Η αποτελεσματική εφαρμογή των πιο αυστηρών στόχων για τις ειδικές εκπομπές CO₂ στα δύο σενάρια πολιτικής σε σχέση με το σενάριο αναφοράς αποτελούν τους κύριους παράγοντες για τις σημαντικές μεταβολές που συντελούνται στη διάρθρωση του στόλου των αυτοκινήτων στην Ευρώπη στο μακροπρόθεσμο ορίζοντα. Τα υβριδικά αυτοκίνητα αποτελούν την κυρίαρχη τεχνολογία στο ήπιο σενάριο «Mild», ωστόσο η εικόνα αυτή μεταβάλλεται στο αισιόδοξο σενάριο «Ambitious». Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του μοντέλου, τα πιο αυστηρά τεχνολογικά όρια εκπομπών CO₂, που έχουν υποτεθεί στο αισιόδοξο σενάριο «Ambitious», αποτελούν πλέον εμπόδιο στην αγορά για τα υβριδικά αυτοκίνητα καθώς η πολιτική εξαναγκάζει την είσοδο τεχνολογιών με ακόμα μικρότερες ειδικές εκπομπές CO₂.

Οι προηγμένες τεχνολογίες, όπως τα υβριδικά με καλώδιο αποκτούν σημαντικό μερίδιο της αγοράς, όπου πλέον αντιπροσωπεύουν το 25,7% του συνόλου των αυτοκινήτων για το 2050 στο ήπιο σενάριο «Mild». Το αντίστοιχο μερίδιο στην αγορά των ηλεκτρικών αυτοκινήτων με μπαταρία την ίδια χρονική περίοδο ανέρχεται στο 9% του συνόλου. Η εφαρμογή πιο αυστηρών ορίων CO₂ για τα αυτοκίνητα μετά το 2030 έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του ρυθμού διείσδυσης των ηλεκτρικών αυτοκινήτων με μπαταρία σε σχέση με τα υβριδικά με καλώδιο. Πράγματι, η αναλογία των PHEVs έναντι των BEVs μειώθηκε από περίπου 9:1 το 2030, σε 2,5:1 το 2050. Εξάλλου, το μερίδιο των συμβατικών οχημάτων έχει συρρικνωθεί στο ένα τέταρτο περίπου του συνόλου της αγοράς το 2050 στο ήπιο σενάριο «Mild».

Οι πιο αισιόδοξες παραδοχές σχετικά με την εξέλιξη των στόχων των ειδικών εκπομπών CO₂ στο αισιόδοξο σενάριο «Ambitious», σε σχέση με το ήπιο σενάριο «Mild», διαμορφώνουν θετικά την Ευρωπαϊκή αγορά αυτοκινήτων. Πράγματι, η εφαρμογή των πιο αισιόδοξων στόχων κατά μια δεκαετία ταχύτερα έχει σαφή θετική επίδραση στη διείσδυση των ηλεκτρικών αυτοκινήτων και πιο συγκεκριμένα των υβριδικών με καλώδιο. Τα τελευταία εισέρχονται στην αγορά με πολύ ταχύτερο ρυθμό από ό, τι στο ήπιο σενάριο «Mild» και κυριαρχούν στην αγορά του αυτοκινήτου το 2050.

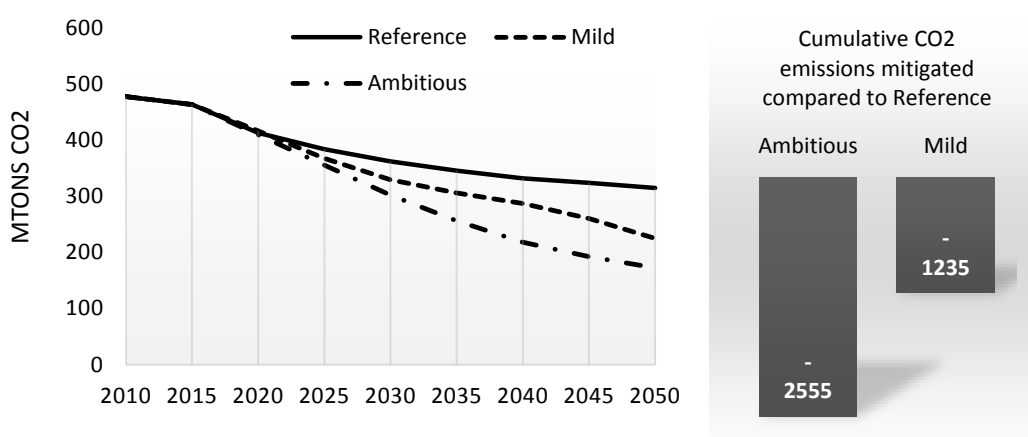
Με βάση το μοντέλο, τα όρια των ειδικών εκπομπών CO₂ για τα αυτοκίνητα της τάξης των 40-50 gCO₂/km είναι ικανά να ωθήσουν τη σημαντική διείσδυση προηγμένων τεχνολογιών όπως τα υβριδικά με καλώδιο και τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα με μπαταρία. Ωστόσο, η αναλογία διείσδυσης μεταξύ των PHEVs και BEVs διαφέρει σημαντικά καθώς τα πρώτα συγκεντρώνουν μεγαλύτερο ποσοστό της αγοράς. Τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα με μπαταρία, πέρα από το γεγονός ότι αποτελούν υψηλής εντάσεως κεφαλαίου επενδύσεις, φέρουν και περιορισμούς στην αυτονομία και στη ζήτηση για υπεραστικά ταξίδια μακράς απόστασης. Κατά τον Smith (2010), απαιτείται μια επανάσταση στην αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας έτσι ώστε η ηλεκτρική ενέργεια να αποτελέσει ένα πραγματικό υποκατάστατο της βενζίνης για τα υπεραστικά ταξίδια.

5.5.3 Συνολικές εκπομπές CO₂ και κατανάλωση ενέργειας

Οι μεταβολές στη διάρθρωση του στόλου των αυτοκινήτων της Ευρωπαϊκής αγοράς στο μεσοπρόθεσμο και μακροπρόθεσμο χρονικό ορίζοντα αντικατοπτρίζονται στις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα καθώς και στο μείγμα ενεργειακής κατανάλωσης των επιβατικών αυτοκινήτων. Η ανάλυση ευαισθησίας που πραγματοποιείται με την ποσοτικοποίηση των δύο σεναρίων, ως προς την ένταση της εφαρμογής των ορίων στις ειδικές εκπομπές CO₂, επιφέρει σημαντικές επιπτώσεις στο σύνολο των εκπομπών CO₂ στην Ευρώπη. Πιο συγκεκριμένα, το αισιόδοξο σενάριο «Ambitious» επιτυγχάνει σημαντική μείωση των εκπομπών CO₂ κατά 45,2% σε σχέση με το σενάριο αναφοράς το 2050. Η αντίστοιχη μείωση για το ήπιο σενάριο «Mild» είναι 28,6% για την ίδια χρονική περίοδο. Ιδιαίτερα σημαντική μπορεί να χαρακτηριστεί και η μείωση των εκπομπών CO₂ το 2050 σε σχέση με το έτος βάσης 2010, όπου στο αισιόδοξο σενάριο «Ambitious» είναι 64%.

Η εφαρμογή των εναλλακτικών στόχων για τις ειδικές εκπομπές CO₂ των αυτοκινήτων στα δύο σενάρια πολιτικής έχει σημαντικό αντίκτυπο στις σωρευτικές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου για το σύστημα των μεταφορών μέχρι το 2050. Με βάση την ανάλυση ευαισθησίας που πραγματοποιήθηκε, παρατηρείται σημαντική μείωση των σωρευτικών εκπομπών CO₂, γεγονός που αποδίδεται στην ένταση της πολιτικής για τις ειδικές εκπομπές CO₂ των αυτοκινήτων. Πιο συγκεκριμένα, η προοδευτική αύξηση της έντασης της πολιτικής, που εφαρμόζεται στο φιλόδοξο σενάριο «Ambitious» σε σχέση με το ήπιο σενάριο «Mild» συνεπάγεται μεγαλύτερη μείωση των εκπομπών CO₂ σε όλη τη διάρκεια της περιόδου πρόβλεψης. Πράγματι,

σύμφωνα με τους υπολογισμούς του μοντέλου, η σωρευτική μείωση των εκπομπών CO₂ κατά την περίοδο 2010-2050 στο φιλόδοξο σενάριο είναι περισσότερο από διπλάσια σε σχέση με το ήπιο σενάριο. Η σωρευτική μείωση στο φιλόδοξο σενάριο «Ambitious» αγγίζει τους 2555 Mtons σε σχέση με το σενάριο αναφοράς, έναντι της αντίστοιχης μείωσης κατά 1235 Mtons CO₂ στο ήπιο σενάριο «Mild» (Σχήμα 5-7). Η μεγαλύτερη σωρευτική μείωση πραγματοποιείται κατά την περίοδο μετά το 2030, οπότε και εφαρμόζονται ολοένα και πιο αυστηρά όρια και στα δύο σενάρια σε σχέση με το σενάριο αναφοράς.

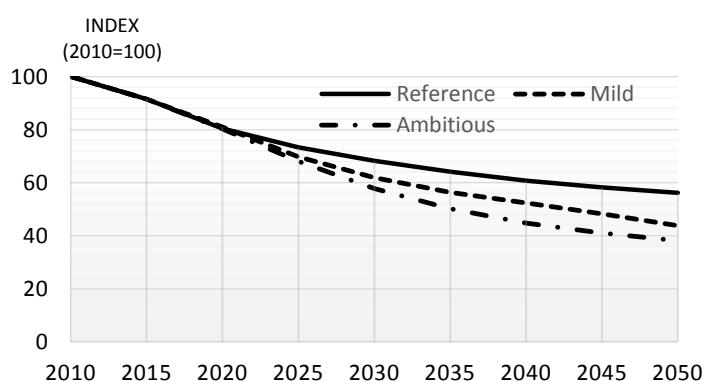


Σχήμα 5-7: Εκπομπές CO₂ των αυτοκινήτων στην ΕΕ 27 στο σενάριο αναφοράς και στα εναλλακτικά σενάρια πολιτικής

Οι σημαντικές μεταβολές που παρατηρούνται στο σύνολο των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου στα επιμέρους σενάρια «Mild» και «Ambitious» οφείλονται στις μεταβολές που προκύπτουν στο ενεργειακό μείγμα των αυτοκινήτων της Ευρώπης. Η εφαρμογή των πιο εντατικών στόχων για τις ειδικές εκπομπές CO₂ στο φιλόδοξο σενάριο «Ambitious» οδηγεί σε δραστικές μακροπρόθεσμες αλλαγές στη σύνθεση του ενεργειακού μείγματος του Ευρωπαϊκού στόλου των αυτοκινήτων, λόγω της υψηλής διείσδυσης πιο προηγμένων τεχνολογιών, όπως τα PHEVs και BEVs. Αυτές οι προηγμένες τεχνολογίες οχημάτων, εκτός από το να εκπέμπουν πολύ χαμηλές έως μηδενικές (για τα BEVs) ποσότητες διοξειδίου του άνθρακα, χαρακτηρίζονται και από σημαντικά χαμηλή ειδική κατανάλωση ενέργειας. Χάρη στους ηλεκτρικούς κινητήρες που τα οχήματα είναι εξοπλισμένα, η ειδική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας είναι περίπου 2-3 φορές χαμηλότερη από εκείνη των αντίστοιχων συμβατικών αυτοκινήτων.

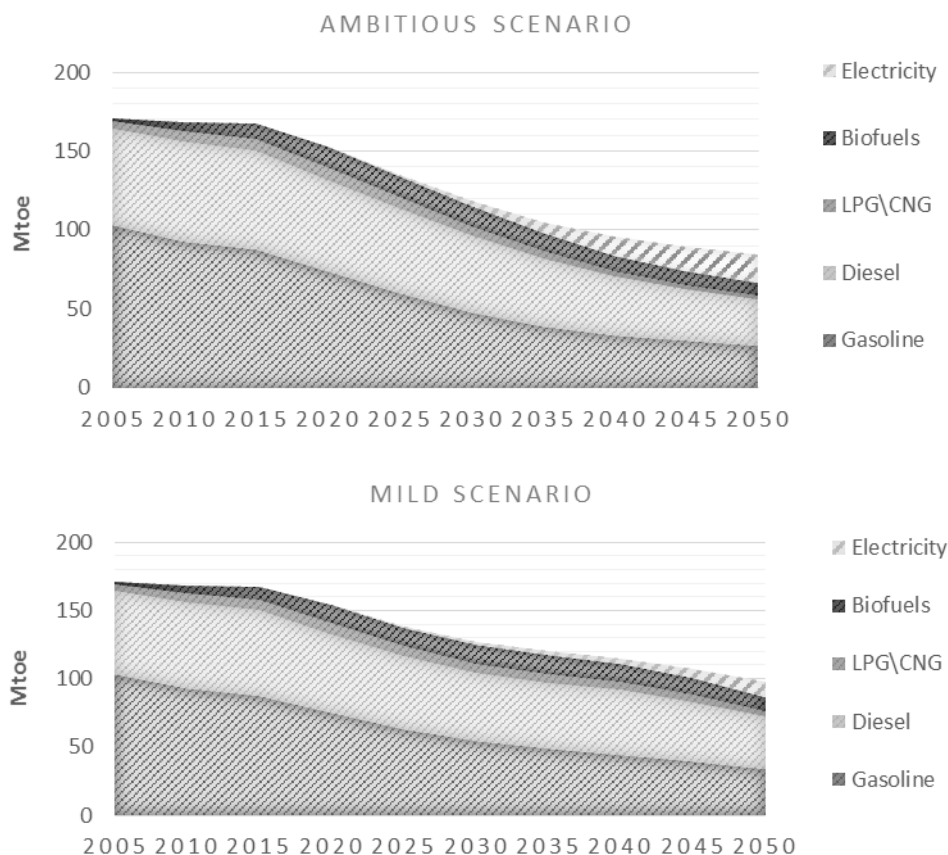
Ως εκ τούτου, η στροφή προς τα οχήματα προηγμένης τεχνολογίας συνεπάγεται ένα έμμεσο όφελος όσον αφορά στη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης του συνολικού στόλου των αυτοκινήτων της Ευρώπης. Χάρη στην τελευταία, παρατηρείται μια σημαντική μείωση της συνολικής ζήτησης τελικής ενέργειας στις οδικές ιδιωτικές μεταφορές.

Η συνολική πτώση της ζήτησης για τελική ενέργεια στον κλάδο των αυτοκινήτων τονίζεται ιδιαίτερα κατά τη σύγκριση του δείκτη ενεργειακής απόδοσης για το σύνολο των αυτοκινήτων τόσο στο σενάριο αναφοράς όσο και στα δύο σενάρια πολιτικής (Σχήμα 5-8). Ο δείκτης ενεργειακής απόδοσης παρουσιάζει βελτίωση της μέσης ειδικής κατανάλωσης καυσίμου του συνολικού στόλου των επιβατικών αυτοκινήτων της Ευρωπαϊκής αγοράς. Από τα αποτελέσματα του μοντέλου, επιβεβαιώνεται ότι η αύξηση της έντασης του μέτρου πολιτικής για τα όρια CO₂ των αυτοκινήτων οδηγεί σε μείωση της συνολικής ενέργειας, λόγω της περαιτέρω διεύθυνσης της ηλεκτρικής ενέργειας που υποκαθιστά τα ορυκτά καύσιμα. Σε σύγκριση με το σενάριο αναφοράς, η αύξηση της αποδοτικότητας του στόλου των οχημάτων εκτιμάται σε 22% και 32% στο ήπιο σενάριο «Mild» και το φιλόδοξο σενάριο «Ambitious» αντίστοιχα το 2050.



Σχήμα 5-8: Δείκτης ενεργειακής απόδοσης των αυτοκινήτων της ΕΕ 27 στο σενάριο αναφοράς και στα εναλλακτικά σενάρια πολιτικής

Η στροφή προς εναλλακτικά καύσιμα, όπως η ηλεκτρική ενέργεια καθώς και η διεύθυνση εναλλακτικών προηγμένων τεχνολογιών επιτρέπει μια σημαντική αύξηση της ενεργειακής αποδοτικότητας στα δύο σενάρια σε σχέση με το σενάριο αναφοράς. Η σταδιακή υποκατάσταση των πετρελαϊκών προϊόντων από ηλεκτρική ενέργεια έχει ως αποτέλεσμα τη σημαντική μείωση της συνολικής ζήτησης για ενέργεια το 2050 (-28% και -44% για το ντίζελ και τη βενζίνη στο ήπιο και στο φιλόδοξο σενάριο αντίστοιχα). Εξάλλου, η ηλεκτρική ενέργεια αυξάνει δραστικά το μερίδιο της στο ενεργειακό μείγμα της αγοράς αυτοκινήτων όπου αποτελεί το 11% και το 21% της συνολικής κατανάλωσης στο ήπιο και στο φιλόδοξο σενάριο αντίστοιχα κατά το 2050 (Σχήμα 5-9). Επιπλέον, η αύξηση της διεύθυνσης των προηγμένων τεχνολογιών αυτοκινήτων επιφέρει αρνητικές επιπτώσεις στην εμπορεία των αυτοκινήτων LPG και CNG. Η υιοθέτηση πιο αυστηρών ορίων για τις ειδικές εκπομπές CO₂ των αυτοκινήτων έχει ως αποτέλεσμα την υποκατάσταση των αυτοκινήτων LPG και CNG από τα PHEVs και BEVs.



Σχήμα 5-9: Κατανάλωση ενέργειας των αυτοκινήτων της ΕΕ 27 ανά καύσιμο στα δύο σενάρια πολιτικής

5.6 Επιπτώσεις της πολιτικής στην αγορά και στους καταναλωτές

Η παρούσα ενότητα παρουσιάζει τις επιπτώσεις που επιφέρει η εισαγωγή πιο αυστηρών ορίων για τις εκπομπές CO₂ των αυτοκινήτων στην αγορά. Πιο συγκεκριμένα, αναλύονται οι επιπτώσεις της αυξημένης διείσδυσης των ηλεκτρικών αυτοκινήτων στη σύνθεση της αγοράς κατά μέγεθος και τμήμα. Τέλος, παρουσιάζονται οι επιπτώσεις στις επιλογές των καταναλωτών για το είδος μεταφορικού μέσου που θα επιλέξουν στο πλαίσιο του σεναρίου αναφοράς.

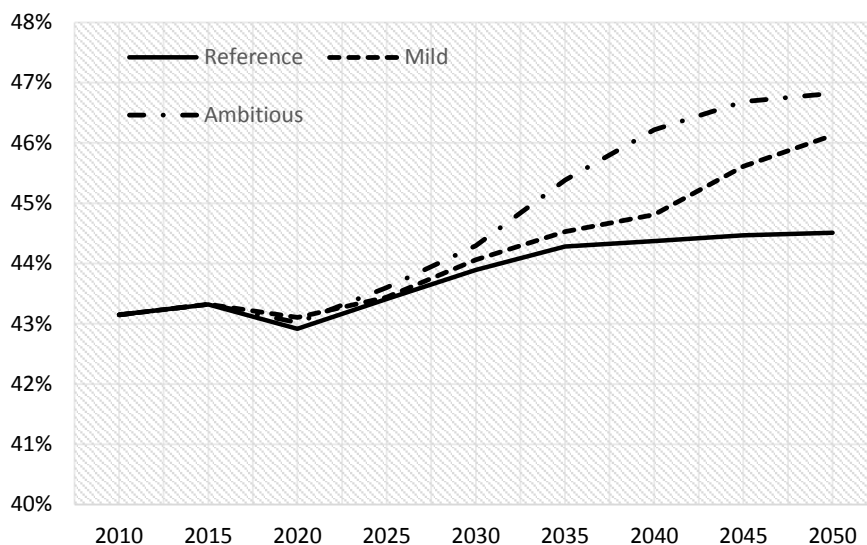
5.6.1 Επιπτώσεις στη διάρθρωση της αγοράς

Η υιοθέτηση εναλλακτικών ορίων για τις ειδικές εκπομπές CO₂ των αυτοκινήτων στο ήπιο και το φιλόδοξο σενάριο έχει ορισμένες επιπτώσεις στη σύνθεση του στόλου των αυτοκινήτων της Ευρωπαϊκής αγοράς. Η παρούσα ενότητα συγκρίνει τις μεταβολές που συμβαίνουν στα δύο εναλλακτικά σενάρια σε σχέση με το σενάριο αναφοράς.

Η διάκριση των αυτοκινήτων σε τρεις ευρείες κατηγορίες, με βάση το μέγεθος του οχήματος στο μοντέλο PRIMES-TREMOVE, επιτρέπει την εξαγωγή συμπερασμάτων για τις δυνατότητες υποκατάστασής τους. Οι τελευταίες βασίζονται κυρίως σε οικονομικούς λόγους που σχετίζονται με τις τιμές των αυτοκινήτων ανά μέγεθος. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του μοντέλου, η εφαρμογή αυστηρών μακροπρόθεσμων πολιτικών CO₂ για τα νέα αυτοκίνητα αναγκάζει την εισαγωγή πιο προηγμένων τεχνολογιών στην αγορά. Ωστόσο, οι προηγμένες τεχνολογίες οχημάτων, όπως τα PHEVs και BEVs είναι μεγαλύτερης έντασης κεφαλαίου από τις αντίστοιχες συμβατικές τεχνολογίες, γεγονός που απαιτεί μεγαλύτερη εκταμίευση κεφαλαίου από τους καταναλωτές.

Ένα σημαντικό εύρημα από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης των σεναρίων έγκειται στο γεγονός ότι παρατηρείται στροφή της αγοράς προς μικρότερου μεγέθους αυτοκίνητα. Το φαινόμενο αυτό είναι ισχυρότερο στην περίπτωση του φιλόδοξου σεναρίου «Ambitious», λόγω της εφαρμογής πιο αυστηρότερων μέτρων πολιτικής. Το συγκεκριμένο αποτέλεσμα οφείλεται στο γεγονός ότι οι καταναλωτές εξαναγκάζονται να στραφούν σε αυτοκίνητα μικρότερου μεγέθους καθώς αυτά κοστίζουν φθηνότερα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η αγορά των αυτοκινήτων είναι ακριβότερη λόγω των ηλεκτρικών αυτοκινήτων και των υβριδικών με καλώδιο που προσφέρονται από τους κατασκευαστές, έτσι ώστε αυτά να υπακούσουν στην πολιτική των ορίων CO₂. Με αυτόν τον τρόπο οι καταναλωτές επιχειρούν να αντισταθμίσουν το αρχικά υψηλότερο κόστος των νέων τεχνολογιών.

Η στροφή προς αυτοκίνητα μικρότερου μεγέθους απεικονίζεται στο Σχήμα 5-10 που παρουσιάζει την εξέλιξη του μεριδίου της δραστηριότητας των μικρών αυτοκινήτων στο ήπιο, το φιλόδοξο και το σενάριο αναφοράς. Όπως φαίνεται στο Σχήμα, η δραστηριότητα των μικρών αυτοκινήτων στο φιλόδοξο σενάριο «Ambitious» παρουσιάζει αυξητική τάση σε σχέση με τα άλλα δύο σενάρια, κυρίως κατά τη χρονική περίοδο μετά τη λήξη του 2030. Πράγματι, η δραστηριότητα των μικρών αυτοκινήτων αυξάνεται κατά περίπου 0,9% και 2,4% σε σύγκριση με το ήπιο και τα σενάρια αναφοράς, αντίστοιχα, το 2050.



Σχήμα 5-10: Ποσοστό δραστηριότητας (%) αυτοκινήτων μικρής κατηγορίας στο σύνολο της δραστηριότητας στην ΕΕ 27 στο σενάριο αναφοράς και στα εναλλακτικά σενάρια πολιτικής

5.6.2 Ο ρόλος των ηλεκτρικών αυτοκινήτων στην κατηγοριοποίηση της αγοράς

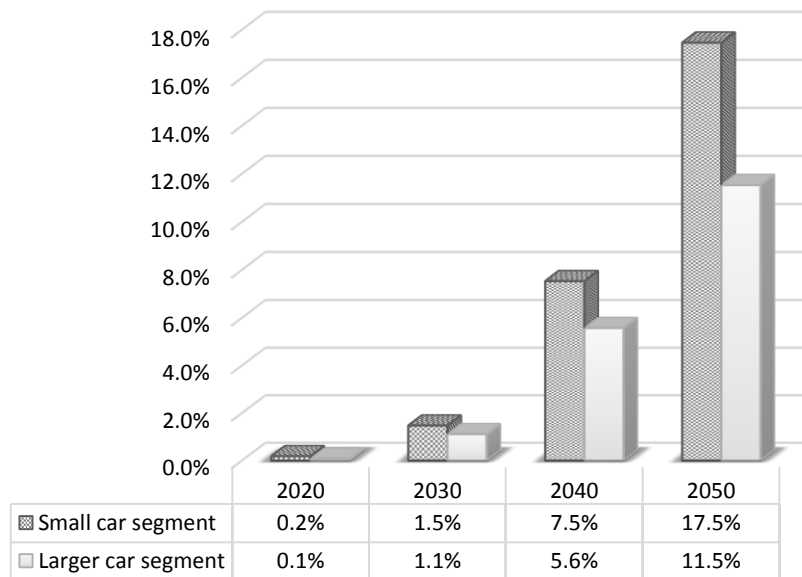
Ένα ακόμη αποτέλεσμα της ανάλυσης ευαισθησίας της πολιτικής ρύθμισης των ορίων στις εκπομπές CO₂ για τα νέα αυτοκίνητα αποτελεί ο διαφορετικός ρυθμός διείσδυσης των ηλεκτρικών αυτοκινήτων στην αγορά. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του μοντέλου, ο ρυθμός διείσδυσης είναι διαφορετικός ανά τμήμα της αγοράς (π.χ. μέγεθος αυτοκινήτου). Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται και στα δύο σενάρια έναντι του σεναρίου αναφοράς με τις μεγαλύτερες επιπτώσεις να παρατηρούνται στο φιλόδοξο σενάριο «Ambitious».

Εξετάζοντας το φιλόδοξο σενάριο, όπου το παραπάνω φαινόμενο είναι εντονότερο και τα αυτοκίνητα προηγμένης τεχνολογίας είναι περισσότερα, η μεγαλύτερη διείσδυση των ηλεκτρικών αυτοκινήτων με μπαταρία παρατηρείται στην κατηγορία των μικρών αυτοκινήτων (Σχήμα 5-11). Οι λόγοι που εξηγούν αυτή τη συμπεριφορά του μοντέλου είναι κυρίως οικονομικής φύσεως. Πράγματι, τα μικρά ηλεκτρικά αυτοκίνητα είναι εφοδιασμένα με συστοιχίες μπαταριών μικρότερης χωρητικότητας, σε σχέση με τα μεγαλύτερα ηλεκτρικά αυτοκίνητα, που ωστόσο είναι ικανές να παρέχουν μια αυτονομία της τάξης των 150 χιλιομέτρων. Τα μεγαλύτερα ηλεκτρικά αυτοκίνητα τα οποία είναι εξοπλισμένα με μεγαλύτερες συστοιχίες μπαταριών και παρέχουν μεγαλύτερη αυτονομία έχουν το σημαντικό μειονέκτημα ότι απαιτούν σημαντικά μεγαλύτερο κεφάλαιο λόγω της μεγάλης μπαταρίας.

Πράγματι, η αυτονομία των ηλεκτρικών αυτοκινήτων της τάξης των 150 χιλιομέτρων μεταξύ διαδοχικών φορτίσεων μπορεί να είναι μικρότερη από εκείνη που παρέχουν τα πιο μεγάλα ηλεκτρικά αυτοκίνητα, ωστόσο αυτή είναι ικανή να

ικανοποιήσει τη μεγάλη πλειοψηφία της αγοράς των μετακινούμενων σε αστικό περιβάλλον. Τα μικρά αυτοκίνητα κινούνται περισσότερο σε αστικό περιβάλλον και χρησιμοποιούνται κυρίως για τις καθημερινές μετακινήσεις από το χώρο οικίας στο χώρο εργασίας. Είναι προφανές ότι οι καταναλωτές είναι διατεθειμένοι να πληρώσουν το επιπλέον κόστος της μπαταρίας για να επιλέξουν ένα μικρό ηλεκτρικό αυτοκίνητο δίχως να τους επηρεάζει σημαντικά η χαμηλή αυτονομία των 150 km.

Εναλλακτικά, το μεγαλύτερο εύρος αυτονομίας που παρέχουν τα μεγάλα ηλεκτρικά αυτοκίνητα είναι δυνατό να τους επιτρέψει μεγαλύτερη αυτονομία, αλλά αυτό συνεπάγεται αυξημένη δαπάνη κτήσης. Παρά ταύτα, η μεγαλύτερη αυτονομία που παρέχουν τα μεγάλα ηλεκτρικά αυτοκίνητα δεν είναι ικανή να ανταγωνιστεί την αυτονομία άλλων τύπων οχημάτων, όπως τα υβριδικά με καλώδια που έχουν 2-3 φορές μεγαλύτερο εύρος κίνησης. Συνεπώς, η αγορά που δραστηριοποιείται σε μεγάλα υπεραστικά ταξίδια είναι πιθανό να προτιμήσει εναλλακτικές λύσεις όπως άλλους τύπους τεχνολογιών ακόμα και άλλα μέσα μεταφοράς. Τα τελευταία μπορεί να είναι είτε τρένα (κυρίως τρένα υψηλής ταχύτητας) είτε αεροπλάνα.



Σχήμα 5-11: Ποσοστό διείσδυσης των ηλεκτρικών αυτοκινήτων με μπαταρία ανά κατηγορία μεγέθους στο «Ambitious» σενάριο

Επισημαίνεται ότι η αύξηση της διείσδυσης των ηλεκτρικών αυτοκινήτων στο τμήμα της αγοράς των μικρών αυτοκινήτων και των αστικών μετακινήσεων επιφέρει σημαντικές μειώσεις στο μέσο λειτουργικό κόστος της συγκεκριμένης αγοράς. Πράγματι, τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα με μπαταρία αποτελούν την πιο ενεργειακά αποδοτική τεχνολογία, γεγονός που συνεπάγεται σημαντικά λιγότερες δαπάνες για αγορά καυσίμου. Οι μικρότερες δαπάνες καυσίμου οδηγούν σε αύξηση της

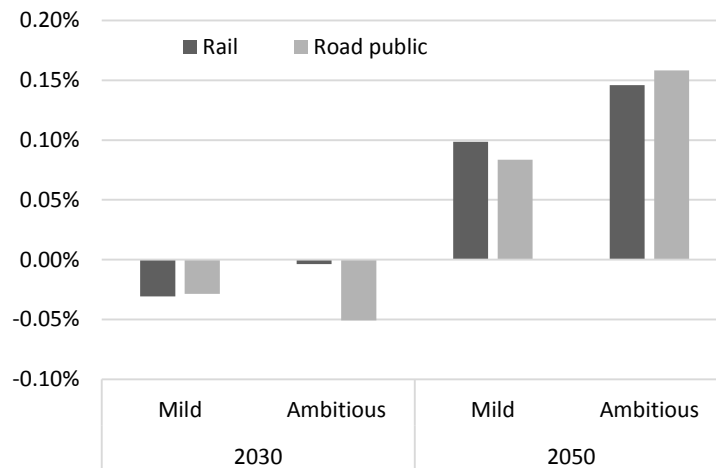
δραστηριότητας των αυτοκινήτων του συγκεκριμένου τμήματος της αγοράς (rebound effect).

5.6.3 Επιπτώσεις στην επιλογή μέσου μεταφοράς

Στην παράγραφο αυτή περιγράφονται οι μεταβολές που προκύπτουν στις επιλογές των καταναλωτών όσον αφορά το είδος του μεταφορικού μέσου που χρησιμοποιούν στα δύο σενάρια σε σχέση με το σενάριο αναφοράς. Οι μεταβολές αυτές οφείλονται κυρίως σε οικονομικούς λόγους, λόγω της μεταβολής των τιμών των ανταγωνιστικών μέσων μεταφοράς.

Η εφαρμογή πιο εντατικών τεχνολογικών ορίων οδηγεί στη διείσδυση πιο προηγμένων τεχνολογιών αυτοκινήτων, που όμως είναι πιο ακριβές σε σχέση με τις υπάρχουσες συμβατικές τεχνολογίες. Η αυξημένη διείσδυση των ηλεκτρικών αυτοκινήτων BEVs και PHEVs έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του μέσου κόστους μετακίνησης των καταναλωτών. Το μέσο κόστος περιλαμβάνει τόσο το ετήσιο κόστος κεφαλαίου όσο και τα μεταβλητά κόστη όπως το κόστος καυσίμου. Η αύξηση του μέσου κόστους μετακίνησης των αυτοκινήτων έχει ως συνέπεια τη στροφή τμήματος των καταναλωτών προς τα μέσα μαζικής μεταφοράς όπως τα λεωφορεία και οι σιδηροδρομικές μεταφορές.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του μοντέλου, οι μεταβολές στις επιλογές μετακίνησης είναι σχεδόν αμελητέες στα δύο σενάρια πολιτικής, σε σχέση με το σενάριο αναφοράς του 2030 (Σχήμα 5-12). Οι μακροπρόθεσμες επιπτώσεις εξακολουθούν να είναι σχετικά χαμηλές, ωστόσο δεν είναι αμελητέες. Πράγματι, στο πιο φιλόδοξο σενάριο «Ambitious», η στροφή των καταναλωτών προς τα δημόσια μέσα μεταφοράς είναι μεγαλύτερη. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι στο συγκεκριμένο σενάριο το μέσο κόστος μετακίνησης είναι υψηλότερο, αφού η διείσδυση των ηλεκτρικών οχημάτων είναι μεγαλύτερη. Το γεγονός ότι πραγματοποιούνται εσωτερικές ανακατατάξεις στον κλάδο του αυτοκινήτου, με τη στροφή προς τα μικρότερα αυτοκίνητα, έχει ως επακόλουθο τη σχετική μείωση του μέσου κόστους μετακίνησης με αυτοκίνητο. Το γεγονός αυτό τείνει να αντισταθμίσει την αύξηση του κόστους που οφείλεται στη διείσδυση των ηλεκτρικών αυτοκινήτων.



Σχήμα 5-12: Ποσοστιαία μεταβολή της δραστηριότητας των σιδηροδρομικών μεταφορών και των οδικών μέσων μαζικής μεταφοράς στα εναλλακτικά σενάρια σε σχέση με το σενάριο αναφοράς

5.7 Αξιολόγηση του κόστους της πολιτικής

Η αξιολόγηση του κόστους είναι ιδιαίτερα σημαντικός παράγοντας για την αξιολόγηση και την άντληση συμπερασμάτων από την εφαρμογή μιας πολιτικής. Η χρήση του ενεργειακού οικονομικού μοντέλου PRIMES-TREMOVE για τις μεταφορές επιτρέπει τον υπολογισμό του κόστους του συστήματος. Εδώ παρουσιάζεται μια σύγκριση του κόστους του συστήματος των ιδιωτικών μεταφορών με αυτοκίνητο για την αγορά της Ευρώπης που προκύπτει από τα επιμέρους σενάρια, σε σχέση πάντα με το σενάριο αναφοράς. Η ανάλυση εστιάζει στις δαπάνες που σχετίζονται με την αγορά του εξοπλισμού για μετακινήσεις καθώς και στο κόστος καυσίμου των καταναλωτών.

Η ανάλυση των δαπανών πραγματοποιείται σε ετήσια βάση για την εξαγωγή συμπερασμάτων από την εφαρμογή της πολιτικής ρύθμισης των ειδικών εκπομπών CO₂ των αυτοκινήτων τόσο στο ήπιο όσο και στο φιλόδοξο σενάριο. Για την αξιολόγηση του κόστους θα πρέπει οι δαπάνες που σχετίζονται με την αγορά του εξοπλισμού να μετατραπούν σε ετήσιες ισοδύναμες δαπάνες που αντιπροσωπεύουν την αποπληρωμή του κόστους επένδυσης σε ετήσιες ισόποσες τοκοχρεολυτικές δόσεις. Η μετατροπή πραγματοποιείται με βάση τις παρακάτω σχέσεις:

$$Ann. Payment = I \cdot Ann. fac \quad (5-4)$$

$$Ann. fac = \frac{R \cdot (1 + R)^n}{(1 + R)^n - 1} \quad (5-5)$$

Όπου το I αναφέρεται στο ύψος της επένδυσης που καλείται να πληρώσει ο καταναλωτής. Ο όρος $Ann. Payment$ αναφέρεται στην ετήσια ισοδύναμη δαπάνη για την επένδυση έπειτα από την εφαρμογή του τοκοχρεολυσίου $Ann. fac$

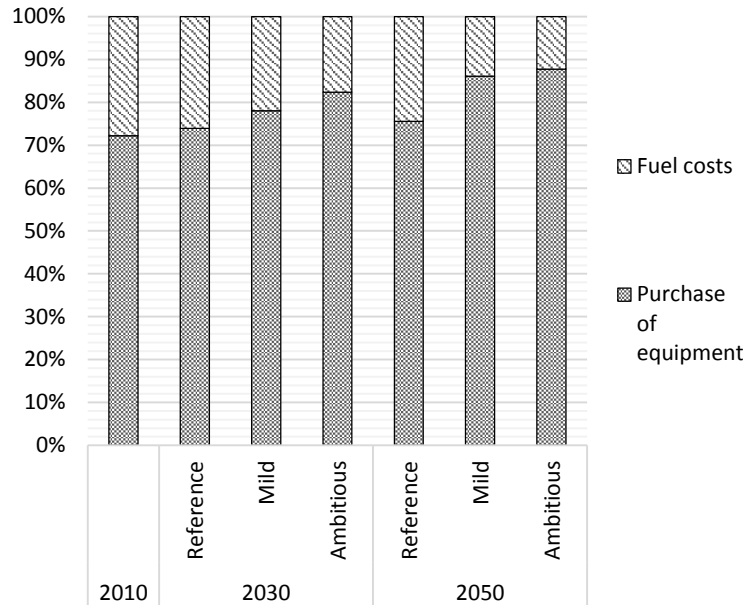
Η μετατροπή του κόστους των επενδύσεων σε ετήσια βάση επιτρέπει τη συγκρισιμότητα αυτού του κόστους με τις ετήσιες δαπάνες για αγορά καυσίμου. Το προεξοφλητικό επιτόκιο R που χρησιμοποιείται είναι 17,5%, ενώ η οικονομική ζωή του αυτοκινήτου n υποτίθεται ότι είναι 10 χρόνια (ισοδύναμο με το χρονικό διάστημα αποπληρωμής της επένδυσης). Το προεξοφλητικό επιτόκιο και η οικονομική ζωή των αυτοκινήτων παραμένουν αμετάβλητα για όλα τα σενάρια.

Το κόστος των καυσίμων αντιπροσωπεύει τις ετήσιες δαπάνες για καύσιμα και περιλαμβάνουν επιπλέον τον ειδικό φόρο κατανάλωσης καθώς και το φόρο προστιθέμενης αξίας. Οι παραπάνω φόροι διαφέρουν ανά Ευρωπαϊκή χώρα, προέρχονται από τους πίνακες της Γενικής Διεύθυνσης DG TAXUD και έχει θεωρηθεί ότι για τα χρόνια πρόβλεψης παραμένουν στα επίπεδα του 2010. Σύμφωνα με τους υπολογισμούς του μοντέλου, οι δαπάνες για καύσιμα για το 2010 αποτελούν το 27% του συνόλου της δαπάνης, όπου το κόστος κεφαλαίου αποτελεί τη μερίδα του λέοντος (Σχήμα 5-13). Το μέρος του κόστους του καυσίμου στο σύνολο του κόστους διατηρείται σχετικά αμετάβλητο για το σενάριο αναφοράς καθ' όλη τη διάρκεια της πρόβλεψης.

Ωστόσο, η εφαρμογή της πολιτικής εντατικών ορίων για τις ειδικές εκπομπές CO₂ των αυτοκινήτων στο ήπιο και το φιλόδοξο σενάριο διαφοροποιεί αρχικά τη δομή του κόστους έναντι του σεναρίου αναφοράς. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του μοντέλου, παρατηρείται μια σημαντική ενίσχυση του μεριδίου των κεφαλαιουχικών δαπανών σε σχέση με τα κόστη για αγορά καυσίμου, σε μακροπρόθεσμο ορίζοντα. Το συμπέρασμα είναι πιο έντονο στο φιλόδοξο σενάριο «Ambitious», όπου το κόστος του καυσίμου αντιπροσωπεύει το 17,6% και το 12,3% των δαπανών για το 2030 και το 2050 αντίστοιχα. Το αντίστοιχο μερίδιο στο ήπιο σενάριο είναι 21,9% και 13,9%, το 2030 και το 2050 αντίστοιχα.

Πράγματι, η σταδιακή διείσδυση των ηλεκτρικών οχημάτων, είτε BEVs είτε PHEVs, έχει ως αποτέλεσμα τις αυξημένες δαπάνες των καταναλωτών για αγορά αυτοκινήτου σε σχέση με το σενάριο αναφοράς. Ωστόσο, η πτώση του μεριδίου του κόστους καυσίμου στο σύνολο των δαπανών οφείλεται και στο γεγονός ότι τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα που αντικαθιστούν τα συμβατικά προσφέρουν σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας. Συνεπώς, οι χαμηλές ενεργειακές απαιτήσεις των ηλεκτρικών

αυτοκινήτων για ηλεκτρική ενέργεια προσφέρουν σημαντική εξοικονόμηση στις ετήσιες δαπάνες των καταναλωτών για αγορά καυσίμου.



Σχήμα 5-13: Επιμερισμός του κόστους σε δαπάνες κεφαλαίου και καυσίμου στα επιμέρους σενάρια

Ένα επιπλέον συμπέρασμα που προκύπτει κατά την αξιολόγηση του κόστους των δύο σεναρίων είναι το γεγονός ότι και τα δύο σενάρια είναι πιο δαπανηρά έναντι του σεναρίου αναφοράς. Οι συνολικές δαπάνες στα δύο σενάρια είναι αυξημένες στα δύο σενάρια τόσο για μεμονωμένες χρονιές όσο και για όλη την περίοδο 2010-2050 (Πίνακας 5-4). Η εντατική εφαρμογή των ορίων της πολιτικής για τις ειδικές εκπομπές CO₂ των αυτοκινήτων, που οδηγεί στη σταδιακή αύξηση της διείσδυσης των ηλεκτρικών αυτοκινήτων, έχει ως συνέπεια την αύξηση του συνολικού κόστους του συστήματος. Το ήπιο σενάριο «Mild» είναι σωρευτικά πιο ακριβό κατά 261 δις € σε σχέση με το σενάριο αναφοράς. Αντίστοιχα, το συνολικό κόστος στο φιλόδοξο σενάριο «Ambitious» έχει αυξηθεί κατά 802 δις € κατά τη χρονική περίοδο 2010-2050.

Οι πιο αισιόδοξοι στόχοι για τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα των επιβατικών αυτοκινήτων συνεπάγεται αύξηση του κόστους του συστήματος που απορρέει από το υψηλότερο κόστος αγοράς των ηλεκτρικών αυτοκινήτων. Παρά ταύτα, η διείσδυση των ηλεκτρικών αυτοκινήτων αποφέρει σημαντικές εξοικονομήσεις στις δαπάνες για καύσιμα, που όμως δεν είναι αρκετές για να αντισταθμίσουν το υψηλό αρχικό κόστος αγοράς.

Πίνακας 5-4: Μεταβολές στις συνολικές δαπάνες και στο κόστος καυσίμου και κεφαλαίου μεταξύ του σεναρίου αναφοράς και των εναλλακτικών σεναρίων πολιτικής

Cumulative over 2010-2050			
Billion €'10	Total additional costs	Capital costs	Fuel costs
Mild	261	2,515	- 2,253
Ambitious	802	4,023	- 3,221

5.8 Περαιτέρω διερεύνηση

Η υιοθέτηση αποδοτικών πολιτικών για το χρονικό ορίζοντα 2050 συνεπάγεται αρκετές δυσκολίες, διότι η διαδικασία οφείλει να βασιστεί σε πληθώρα αβεβαιοτήτων (McCollum και Yang, 2009). Η εφαρμογή αισιόδοξων μακροπρόθεσμων ορίων για τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα στους κατασκευαστές αυτοκινήτων, στο μακροπρόθεσμο ορίζοντα, είναι δυνατό να οδηγήσει σε ένα αειφόρο μέλλον για τον τομέα των ιδιωτικών μεταφορών στην Ευρώπη. Η πολιτική της ρύθμισης των ειδικών εκπομπών CO₂ των αυτοκινήτων είναι ένα ισχυρό πολιτικό μέτρο στα χέρια των φορέων που χαράσσουν πολιτική. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του παρόντος κεφαλαίου, η πολιτική αυτή είναι δυνατό να αποτελέσει τον κινητήριο μοχλό για την ευρύτερη διείδυση των προηγμένων οχημάτων, όπως τα PHEVs και BEVs.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, τα όρια για τις εκπομπές CO₂ της τάξης των 50-60 gCO₂/km αποτελούν ικανή συνθήκη για να επιφέρουν την υιοθέτηση προηγμένων τεχνολογιών οχημάτων. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης με τη χρήση του μοντέλου είναι συμβατά με τη μελέτη των Gibson και Hill (2012), οι οποίοι αναφέρουν ότι ο στόχος των 60 gCO₂/km θα προκαλέσει σημαντική αύξηση στο ρυθμό διείδυσης των ηλεκτρικών αυτοκινήτων.

Ωστόσο, προκύπτουν τα εξής ερωτήματα ενεργειακής πολιτικής όσον αφορά στην αποδοτικότητα της πολιτικής των ορίων για τις εκπομπές CO₂ των αυτοκινήτων: (1) Είναι η παραπάνω πολιτική ικανή από μόνη της να οδηγήσει σε μαζική διείδυση της ηλεκτρικής ενέργειας στην Ευρωπαϊκή αγορά των αυτοκινήτων; (2) Υπάρχουν άλλες αναγκαίες προϋποθέσεις που πρέπει να εξεταστούν πριν από την θέσπιση τόσο αισιόδοξων στόχων για το μακροπρόθεσμο ορίζοντα σε σχέση με το στόχο του 2020 που είναι 95 gCO₂/km;. Άλλωστε, δεν είναι γνωστό πως θα αντιδράσει η αυτοκινητοβιομηχανία και οι κυβερνήσεις κατά την ανακοίνωση πολύ αυστηρών τεχνολογικών ορίων. Τούτο αποκτά ιδιαίτερη βαρύτητα, ιδίως αν ληφθεί υπόψη ότι η Γερμανική κυβέρνηση έχει ήδη επιμένει στην καθυστέρηση της πλήρους εφαρμογής του στόχου την περίοδο 2020-2024.

Οι εξελίξεις προς ένα βιώσιμο και λιγότερο ανθρακικό αποτύπωμα σύστημα επιβατικών αυτοκινήτων απαιτεί διαρθρωτικές αλλαγές στο ίδιο το σύστημα μεταφορών καθώς και στις μεταφορικές συνήθειες των μετακινουμένων (Donaghy et al., 2004). Πράγματι, διαφορετικοί παράγοντες με διαφορετικές προσδοκίες εμπλέκονται στη διαμόρφωση της αγοράς για τη διείσδυση των ηλεκτρικών αυτοκινήτων και της ηλεκτρικής ενέργειας στο σύστημα των μεταφορών, όπως η αυτοκινητοβιομηχανία, η βιομηχανία κατασκευής υποδομών φόρτισης, φορείς χάραξης πολιτικής και οι μεμονωμένοι καταναλωτές. Ωστόσο, τα τεχνολογικά όρια για τις εκπομπές CO₂ συνιστούν ένα αναγκαίο εργαλείο πολιτικής που θα διευκολύνει την ευρύτερη υιοθέτηση των ηλεκτρικών οχημάτων υπό την προϋπόθεση ενός επιτυχημένου συντονισμού μεταξύ των παραπάνω εμπλεκόμενων φορέων.

Οι καταναλωτές παρουσιάζονται συνήθως διστακτικοί απέναντι στις νέες τεχνολογίες, ιδίως όταν αυτές βρίσκονται στα πρώιμα στάδια της εισαγωγής τους στην αγορά. Η υιοθέτηση πολιτικών και η εφαρμογή ήπιων μέτρων που αποσκοπούν στην αλλαγή της συμπεριφοράς των καταναλωτών είναι δυνατό να υποκινήσει τους καταναλωτές να αγοράσουν φιλικά προς το περιβάλλον αυτοκίνητα (Charman, 2007, Kromer et al., 2010) και να αλλάξουν την προτίμησή τους προς την κατεύθυνση πιο βιώσιμων λύσεων στις μεταφορές (Santos et al., 2010). Οι Yang et al. (2009) αναφέρουν ότι, απαιτείται μια συντονισμένη προσπάθεια για να αλλάξουν συμπεριφορά οι καταναλωτές στις μετακινήσεις τους όπως και στις προτιμήσεις τους όσον αφορά το είδος της τεχνολογίας και του καυσίμου που θα χρησιμοποιήσουν για τις μεταφορικές τους ανάγκες. Σύμφωνα με τους Bristow et al. (2008), η σημαντική αλλαγή της συμπεριφοράς των καταναλωτών αποτελεί απαραίτητη συνθήκη για την επίτευξη των μακροπρόθεσμων στόχων σε ότι αφορά τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου.

Η επιτυχής διείσδυση των ηλεκτρικών οχημάτων στην αγορά προϋποθέτει, παράλληλα, ότι ορισμένα τεχνικά εμπόδια πρέπει να αρθούν. Το πιο βασικό εμπόδιο για τους καταναλωτές αποτελεί το υψηλό κεφαλαιουχικό κόστος αγοράς των ηλεκτρικών αυτοκινήτων. Για την άρση του συγκεκριμένου εμποδίου, η αυτοκινητοβιομηχανία θα πρέπει να επιτύχει τη μαζική παραγωγή αυτών των τεχνολογιών σε προσιτό κόστος για τους αγοραστές. Οπότε, μια στοχευμένη παροχή στήριξης R&D προς την αυτοκινητοβιομηχανία και τη βιομηχανία κατασκευής μπαταριών είναι απαραίτητη για να μειωθεί το κόστος των μπαταριών.

Εκτός από το υψηλό κόστος κεφαλαίου των ηλεκτρικών οχημάτων (Perdiguero, 2012 και Karplus et al., 2010), η χαμηλή αυτονομία των ηλεκτρικών αυτοκινήτων με μπαταρία αποτελεί ένα επιπλέον σημαντικό εμπόδιο για την είσοδο των BEVs στην αγορά (Chan, 2007 and Tate et al., 2008). Η τεχνολογική υπόθεση όσον αφορά στην εξέλιξη του κόστους της μπαταρίας μέσα στα χρόνια πρόβλεψης (χαμηλότερη τιμή τα 315 €/kWh το 2050) είναι σχετικά συντηρητική σε σχέση με άλλες μελέτες που παρουσιάζουν σενάρια απεξάρτησης των μεταφορών από τον άνθρακα (IEA, 2012). Ωστόσο, ο σκοπός της ανάλυσης ευαισθησίας που παρουσιάζεται σε αυτό το κεφάλαιο έχει ως στόχο να απομονώσει τις επιπτώσεις της αλλαγής της πολιτικής

ρύθμισης των εκπομπών CO₂ των αυτοκινήτων. Συνεπώς, για να διατηρηθεί η αξιοπιστία της ανάλυσης ευαισθησίας, όλες οι τεχνολογικές υποθέσεις κρατούνται σταθερές στα σενάρια πολιτικής που εξετάζονται σε σχέση με το σενάριο αναφοράς.

Τα ποσοστά διείσδυσης στην αγορά των υβριδικών με καλώδιο έναντι των ηλεκτρικών με μπαταρία βρίσκονται εντός του εύρους 10:1 με 1:1 που αναφέρουν οι Gibson and Hill (2012). Η σχετική αναλογία εξαρτάται σε ένα μεγάλο βαθμό από τις σχετικές τιμές του κόστους αγοράς των δύο τύπων αυτοκινήτων. Κατά συνέπεια, το υψηλό κόστος μπαταρίας συνεπάγεται ότι το μερίδιο των ηλεκτρικών αυτοκινήτων με μπαταρία θα μειώνεται σε σχέση με αυτό των υβριδικών με καλώδιο. Επιπλέον, η έλλειψη του περιορισμού αυτονομίας των υβριδικών με καλώδιο τα καθιστά πιο ανταγωνιστικά έναντι των ηλεκτρικών με μπαταρία που έχουν σημαντικά μικρότερο εύρος αυτονομίας.

Η απουσία της απαιτούμενης υποδομής επαναφόρτισης των μπαταριών αποτελεί ένα επιπλέον σημαντικό εμπόδιο στην είσοδο στην αγορά των ηλεκτρικών αυτοκινήτων (Lin και Greene, 2012, Meyer και Winebrake, 2009, Mercuri et al., 2002, Joffe et al., 2004). Η ανάπτυξη των υποδομών φόρτισης ή ανεφοδιασμού των εναλλακτικών καυσίμων σε μεγάλη κλίμακα αποτελεί το γνωστό «chicken-egg» πρόβλημα κατά τον Struben (2006). Ο κλάδος των υποδομών θα πρέπει να επενδύσει σημαντικά κεφάλαια στην οικοδόμηση ενός καλά αναπτυγμένου δικτύου σημείων φόρτισης που θα επιτρέψει στους καταναλωτές την ελεύθερη και απρόσκοπτη μετακίνησή τους. Παράλληλα, και οι επενδυτές στον κλάδο των υποδομών χρειάζονται διαβεβαιώσεις ότι η επένδυσή τους θα αξιοποιηθεί και θα υπάρχει ζήτηση για να μπορέσουν να ανακτήσουν το κόστος της επένδυσής τους. Είναι φανερό ότι η επαρκής κάλυψη με σημεία φόρτισης όχι μόνο στον τόπο κατοικίας των αγοραστών ηλεκτρικών αυτοκινήτων αλλά και σε δημόσιους χώρους με σταθμούς ταχείας φόρτισης, θα συμβάλει στην άρση του συγκεκριμένου εμποδίου. Η παροχή ενός ικανού αριθμού σημείων φόρτισης θα προσδώσει στους μετακινούμενους την αίσθηση της ελευθερίας μετακίνησης που έχουν συνηθίσει από τη χρήση των συμβατικών αυτοκινήτων, με αυτονομία της τάξης των 600-800 χιλιομέτρων. Μια ορθή και συντονισμένη στρατηγική αγοράς που συνεπάγεται οικονομική στήριξη από το δημόσιο τομέα είναι δυνατό να συμβάλει στην αντιμετώπιση του συγκεκριμένου εμποδίου (βλ. Κεφάλαιο 3).

Ο αποτελεσματικός συντονισμός των παραπάνω διακριτών αλλά αλληλένδετων αγορών καθώς και το χρονοδιάγραμμα της εφαρμογής των στόχων της πολιτικής για τις ειδικές εκπομπές CO₂ είναι σημαντικές προϋποθέσεις για την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής. Πράγματι, η εφαρμογή εντατικότερων ορίων στο φιλόδοξο σενάριο «Ambitious» έχει ως αποτέλεσμα μεγαλύτερη μείωση των σωρευτικών εκπομπών CO₂ κατά τη χρονική περίοδο 2010-2050. Ο ρυθμός μείωσης των εκπομπών CO₂ στο «Ambitious» σενάριο προσεγγίζει περισσότερο τα σενάρια απανθρακοποίησης που παρουσιάζονται στη Λευκή Βίβλο για τις μεταφορές (White Paper on Transport, EC, 2011). Κατά συνέπεια, οι υπεύθυνοι χάραξης πολιτικής για την επίτευξη του στόχου της αειφορίας του τομέα των μεταφορών θα πρέπει να λαμβάνουν υπόψη και τις οικονομικές δαπάνες που επιβαρύνουν την κοινωνία και τους χρήστες. Σύμφωνα με τον Haines et al. (2010) πρέπει να καθοριστεί ποιος πληρώνει τα έξοδα των πολιτικών. Οι υψηλότερες δαπάνες για την αγορά εξοπλισμού προηγμένης τεχνολογίας μεταφοράς βαρύνουν τους χρήστες τους, ενώ δεν είναι σαφές ποιος θα πληρώσει για τη μαζική ανάπτυξη της υποδομής σταθμών φόρτισης.

5.9 Συμπεράσματα κεφαλαίου

Στο παρόν κεφάλαιο πραγματοποιήθηκε μια ανάλυση ευαισθησίας, ως προς τις επιπτώσεις στην Ευρωπαϊκή αγορά, της εφαρμογής εναλλακτικών μεσοπρόθεσμων και μακροπρόθεσμων τεχνολογικών ορίων στις ειδικές εκπομπές CO₂ των αυτοκινήτων. Η ανάλυση ευαισθησίας πραγματοποιήθηκε με το μοντέλο PRIMES-TREMOVE που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της παρούσας διατριβής (Κεφάλαιο 4).

Η ανάλυση των αποτελεσμάτων δείχνει ότι ο στόχος των 95 gCO₂/km μέχρι το 2020 θα συμβάλει στην περαιτέρω μείωση των εκπομπών CO₂ των επιβατικών αυτοκινήτων στην Ευρώπη το 2020. Ωστόσο, η απουσία περαιτέρω μείωσης του συγκεκριμένου ορίου στο σενάριο αναφοράς, οδηγεί σε μια αργή μείωση των συνολικών εκπομπών CO₂ μέχρι το 2050, κυρίως λόγω της αντικατάστασης του στόλου των οχημάτων με νεότερες τεχνολογίες και την αυτόνομη πρόοδο των προηγμένων τεχνολογιών.

Η αποτελεσματική εφαρμογή πιο εντατικών τεχνολογικών ορίων για τις ειδικές εκπομπές CO₂ των επιβατικών αυτοκινήτων μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική αναδιάρθρωση του στόλου των οχημάτων στην Ευρώπη και σημαντική μείωση των συνολικών εκπομπών CO₂ μέχρι το 2050. Σύμφωνα με τα ευρήματα του μοντέλου, τα τεχνολογικά όρια της τάξης των 70 gCO₂/km είναι ικανά να προκαλέσουν δυναμική είσοδο στην αγορά των PHEVs. Τα ηλεκτρικά με μπαταρία, για το ίδιο επίπεδο στόχων, αναμένεται να διεισδύσουν σε μικρότερο βαθμό λόγω του υψηλότερου κόστους και της μικρότερης αυτονομίας. Βεβαίως, ο βαθμός διείσδυσης των οχημάτων προηγμένης τεχνολογίας εξαρτάται επίσης από τις βελτιώσεις στις υπάρχουσες συμβατικές τεχνολογίες πετρελαίου και βενζίνης με σκοπό τη μείωση των ειδικών εκπομπών CO₂.

Στο μακροπρόθεσμο ορίζοντα, τα τεχνολογικά όρια της τάξης των 40- 50 gCO₂/km αναμένεται να ικανοποιηθούν κυρίως με τη μαζική διείσδυση των προηγμένων τεχνολογιών PHEVs και BEVs. Η είσοδος των τελευταίων θα επιφέρει σημαντική μείωση των συνολικών εκπομπών CO₂ καθώς και απεξάρτηση των επιβατικών μεταφορών από τα πετρελαϊκά προϊόντα.

Ένα επιπλέον εύρημα είναι οι αξιοσημείωτες μεταβολές της δομής του κόστους, όπου παρατηρείται μια σημαντική στροφή από τα κόστη καυσίμου στα πάγια κόστη που περιλαμβάνουν την αγορά του κεφαλαιουχικού εξοπλισμού. Επιπλέον, η διείσδυση των ηλεκτρικών αυτοκινήτων και στα δύο σενάρια πολιτικής που εξετάστηκαν εδώ οδηγεί σε αύξηση του κόστους του συστήματος σε σύγκριση με το σενάριο αναφοράς. Το φιλόδοξο σενάριο «Ambitious» είναι σημαντικά πιο δαπανηρό σε σχέση με το ήπιο σενάριο «Mild», ωστόσο αυτό προσεγγίζει σε καλύτερο βαθμό τα σενάρια απανθρακοποίησης της Λευκής Βίβλου (White Paper on Transport, EC, 2011).

Τα τεχνολογικά όρια των ειδικών εκπομπών CO₂ των επιβατικών αυτοκινήτων μπορεί να αποτελέσουν ένα ισχυρό ρυθμιστικό μέτρο πολιτικής που μπορεί δυνητικά να οδηγήσει σε δυναμική διείσδυση της ηλεκτρικής ενέργειας στις μεταφορές, υπό συγκεκριμένες προϋποθέσεις. Η επιτυχημένη εφαρμογή του συγκεκριμένου μέτρου θέτει ως αναγκαία συνθήκη το συντονισμό των επιμέρους εμπλεκόμενων φορέων, όπως περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 3. Στην παρούσα ανάλυση ευαισθησίας θεωρήθηκε ως δεδομένη η επιτυχημένη εφαρμογή του συγκεκριμένου μέτρου. Απεναντίας, η αξιολόγηση του συγκεκριμένου μέτρου πολιτικής υπό την υπόθεση ελλιπούς συντονισμού της αγοράς αποτελεί αντικείμενο περαιτέρω μελλοντικής έρευνας.

Κεφάλαιο 6

6 Σενάρια διείσδυσης της ηλεκτρικής ενέργειας στο σύστημα των Ευρωπαϊκών επιβατικών μεταφορών

6.1 Εισαγωγή

Το παρόν κεφάλαιο περιγράφει τα εναλλακτικά σενάρια ενεργειακής πολιτικής που ποσοτικοποιούνται με τη χρήση του μοντέλου PRIMES-TREMOVE που περιγράφηκε στο κεφάλαιο 4. Τα σενάρια που παρουσιάζονται στο παρόν κεφάλαιο εστιάζουν κυρίως στη διείσδυση της ηλεκτρικής ενέργειας στις οδικές μεταφορές στα πλαίσια της προσπάθειας βαθιάς μείωσης των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου μέχρι το 2050. Τα σενάρια «απανθρακοποίησης» των μεταφορών βασίζονται στο κεντρικό σενάριο της ανάλυσης της Λευκής Βίβλου, που υιοθετήθηκε το 2011 και που βασίστηκε στα αποτελέσματα του μοντέλου PRIMES-TREMOVE. Ο σκοπός της ανάπτυξης των εναλλακτικών σεναρίων που παρουσιάζονται στο παρόν κεφάλαιο αφορά την ανάλυση και την ποσοτικοποίηση της συνεισφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας στο ενεργειακό μείγμα των οδικών μεταφορών όσον αφορά το μακροπρόθεσμο στόχο της απανθρακοποίησης του τομέα των μεταφορών το 2050.

Η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει υιοθετήσει τον κανονισμό 443/2009 με τον οποίο αποσκοπεί να οδηγήσει στην αγορά μεγαλύτερο ποσοστό καθαρών αυτοκινήτων με χαμηλές εκπομπές CO₂. Ο στόχος για το 2020 είναι 95 gCO₂/km γεγονός που ήδη έχει οδηγήσει στην αγορά μοντέλα αυτοκινήτων όπως ηλεκτρικά αυτοκίνητα, υβριδικά με καλώδιο και αυτοκίνητα με κυψέλη καυσίμου υδρογόνου, στην προσπάθεια των κατασκευαστών αυτοκινήτων να υπακούσουν στον στόχο. Σύμφωνα με το κεντρικό σενάριο της Λευκής Βίβλου, τα τεχνολογικά όρια ενδέχεται να χρειαστεί να λάβουν

τιμές της τάξης των 20-30 gCO₂/km στο μακροπρόθεσμο ορίζοντα έτσι ώστε να επιτευχθεί ο στόχος της μείωσης των εκπομπών CO₂ κατά 60% το 2050 σε σχέση με το 1990.

Εναλλακτικά στην πολιτική ρύθμισης των ειδικών εκπομπών CO₂ των αυτοκινήτων, η πολιτική ρύθμισης της ενεργειακής απόδοσης (EE standards) των νέων αυτοκινήτων έχει αναγνωριστεί ως μια πολιτική που μπορεί να συμβάλει προς την κατεύθυνση της μακροπρόθεσμης μείωσης των συνολικών εκπομπών CO₂ των αυτοκινήτων (Kamrman et al., 2008, Smokers et al., 2010). Ανάλογο μέτρο πολιτικής έχει ήδη εφαρμοστεί στις ΗΠΑ όπου η Υπηρεσία Περιβαλλοντικής Προστασίας (EPA, 2012) και η Εθνική Υπηρεσίας Οδικής Ασφάλειας Διοίκησης (NHTSA), έχουν καθιερώσει τεχνολογικά όρια για τις ειδικές εκπομπές CO₂ και την ενεργειακή απόδοση για τα ελαφρά οχήματα για το 2025, αντίστοιχα. Η εφαρμογή τεχνολογικών ορίων CO₂ ή EE μπορεί να οδηγήσει σε οικονομικά αποδοτικές μειώσεις των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου σύμφωνα με τους Greene και Plotkin (2011). Άλλες μελέτες έχουν διερευνήσει πιθανούς στόχους εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα για το 2025 και πέρα (Gibson και Hill, 2012 και Leonhard, 2011) ενώ άλλοι συζητούν θέματα χρονισμού (Plotkin, 2009) ή δυνητικές αρνητικές επιπτώσεις (Greene, 2007, Matiaske et al., 2012). Η αποτελεσματική εφαρμογή των πολιτικών που στοχεύουν την αλλαγή της συμπεριφοράς ταξιδιού μπορεί να υποκινήσουν τους καταναλωτές να αγοράζουν φιλικά προς το περιβάλλον αυτοκίνητα (Charman, 2007, Kromer et al., 2010) παρά το υψηλότερο κόστος αγοράς τους (Karplus et al., 2010). Οι Yang et al. (2009) καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι απαιτείται μια συντονισμένη προσπάθεια για να επιτευχθεί η μεταβολή προς καύσιμα και τεχνολογίες με χαμηλές εκπομπές CO₂.

Η Ευρωπαϊκή Ένωση αναμένεται να επανεξετάσει (EC, 2012) τους μεσοπρόθεσμους στόχους για την εφαρμογή πιο αυστηρών ρυθμίσεων των ειδικών εκπομπών CO₂ των αυτοκινήτων δεδομένου του φιλόδοξου στόχου της βαθιάς μείωσης των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου μέχρι το 2050 και του μεγάλου χρονικού διαστήματος που απαιτείται για να κατασκευαστούν οι απαραίτητες υποδομές για τα εναλλακτικά καύσιμα και την ηλεκτρική ενέργεια. Συνεπώς, οι τιμές των τεχνολογικών ορίων αποτελούν ένα ιδιαίτερα σημαντικό εργαλείο ενεργειακής πολιτικής για τον τομέα των μεταφορών.

Η συνεισφορά του παρόντος κεφαλαίου έγκειται στο γεγονός ότι επιχειρεί να εκτιμήσει τις επιπτώσεις της υιοθέτησης τεχνολογικών ορίων που ρυθμίζουν εναλλακτικά είτε τις ειδικές εκπομπές CO₂ ή την ενεργειακή απόδοση στην Ευρωπαϊκή αγορά. Η αξιολόγηση των παραπάνω πολιτικών πραγματοποιείται στο πλαίσιο μιας γενικότερης προσπάθειας δραστηκής μείωσης των εκπομπών CO₂ του τομέα των μεταφορών και του ενεργειακού συστήματος μέχρι το 2050. Επίσης, γίνεται η υπόθεση ότι τα τεχνολογικά όρια για τα αυτοκίνητα είναι γνωστά με βεβαιότητα από τους κατασκευαστές αυτοκινήτων και ότι γίνονται ολόένα και πιο αυστηρά μέχρι το τέλος του χρονικού ορίζοντα της ανάλυσης. Η μοντελοποίηση των τεχνολογικών ορίων αποσκοπεί στο να επιδράσει στη διαμόρφωση του στόλου των αυτοκινήτων επηρεάζοντας τη συμπεριφορά των καταναλωτών σχετικά με την επιλογή αγοράς νέων

αυτοκινήτων. Η παραπάνω απόφαση των καταναλωτών επηρεάζεται, επιπλέον, από τη διαθεσιμότητα της απαραίτητης υποδομής διάθεσης καυσίμου και σταθμών επαναφόρτισης.

Τα σενάρια που ποσοτικοποιούνται με τη χρήση του μοντέλου PRIMES-TREMOVE έχουν ως στόχο να οδηγήσουν στην εξαγωγή συμπερασμάτων ενεργειακής πολιτικής αναφορικά με τη διείσδυση της ηλεκτρικής ενέργειας και του υδρογόνου στις οδικές μεταφορές. Η ανάλυση γίνεται στο πλαίσιο της ευρύτερης προσπάθειας μείωσης των εκπομπών CO₂ του ενεργειακού συστήματος, ωστόσο λαμβάνονται διαφορετικές τεχνολογικές υποθέσεις και γίνεται η εφαρμογή εναλλακτικών μέτρων πολιτικής. Το μοντέλο PRIMES-TREMOVE συσχετίζει διάφορους συνδυασμούς καυσίμων και τεχνολογιών με συγκεκριμένους κινητήριους μοχλούς όπως την τεχνολογική επιτυχία νέων τύπων οχημάτων (π.χ. ηλεκτρικών), την ανάπτυξη της απαιτούμενης υποδομής διάθεσης εναλλακτικών καυσίμων (π.χ. υδρογόνο, ηλεκτρική ενέργεια, φυσικό αέριο) καθώς και τη διαθεσιμότητα νέων καυσίμων μέσω της παραγωγής τους σε υψηλή κλίμακα. Αυτοί οι κινητήριοι μοχλοί εξετάζονται υπό το πρίσμα μέτρων πολιτικής που έχουν ως στόχο να ρυθμίσουν τους κατασκευαστές οχημάτων με βάση είτε τις ειδικές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα είτε την αποδοτικότητα των οχημάτων. Η αξιολόγηση των σεναρίων πραγματοποιείται μέσω της σύγκρισης των εναλλακτικών σεναρίων με ένα βασικό σενάριο αναφοράς.

6.2 Το σενάριο αναφοράς

Το σενάριο αναφοράς «Reference» αποτελεί μια προβολή στο μέλλον των πολιτικών που έχουν υιοθετηθεί μέχρι το Μάρτιο του 2010, χωρίς να λαμβάνει υπόψη νέες μελλοντικές πολιτικές. Το σενάριο αυτό βασίζεται στο σενάριο αναφοράς της Λευκής Βίβλου (White Paper) για τις μεταφορές. Ο σκοπός του σεναρίου αναφοράς είναι να παρέχει μια προβολή του τομέα των μεταφορών στο μέλλον δίχως να συμπεριλάβει πολιτικές και ρυθμίσεις που αφορούν το χρονικό ορίζοντα μετά το 2020. Το σενάριο αναφοράς αποτελεί το σενάριο εκείνο που χρησιμεύει ως σημείο σύγκρισης για την αξιολόγηση των πολιτικών των εναλλακτικών σεναρίων.

6.2.1 Υποθέσεις σεναρίου αναφοράς

Οι υποθέσεις αναφορικά με την ανάπτυξη της οικονομίας και οι δημογραφικές παραδοχές στηρίζονται στις προβλέψεις της έκθεσης «2009 Ageing report» από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή και την Επιτροπή Οικονομικής Πολιτικής (Economic Policy Committee, 2009). Ο ρυθμός αύξησης του ΑΕΠ στην ΕΕ των 27 είναι περίπου 1,6% ετησίως κατά μέσο όρο μεταξύ 2020 και 2050. Οι υποθέσεις για την εξέλιξη των τιμών του πετρελαίου είναι εξωγενείς στο μοντέλο και θεωρούνται ότι θα κυμανθούν σε υψηλά επίπεδα σύμφωνα με τις προβλέψεις της μελέτης World Energy Outlook (IEA, 2013). Πιο συγκεκριμένα, οι τιμές του πετρελαίου αναμένονται να αυξηθούν μέχρι και 106 και 127 \$/ βαρέλι το 2030 και το 2050 αντίστοιχα. Αυτές οι υποθέσεις

αντιστοιχούν στις απόψεις που επικρατούσαν κατά τη χρονική περίοδο 2012/13 στην Ευρωπαϊκή Επιτροπή. Πρόσφατα, οι διεθνείς τιμές του πετρελαίου μειώθηκαν σημαντικά (π.χ. 50 \$/ βαρέλι το 2015), το οποίο σημαίνει ότι οι τιμές των καυσίμων είναι περίπου 25% χαμηλότερες από τις υποθέσεις του σεναρίου αναφοράς. Ωστόσο, η διείσδυση των εναλλακτικών καυσίμων και της ηλεκτρικής ενέργειας στα σενάρια πολιτικής που εξετάζονται στο παρόν κεφάλαιο αναμένονται να καθοδηγηθούν, ως επί το πλείστο, από τα τεχνολογικά όρια (CO₂ ή E.E.), ανεξάρτητα από τις τιμές του πετρελαίου. Παρ' όλ' αυτά, πραγματοποιείται μια ανάλυση ευαισθησίας στις τιμές καυσίμου έτσι ώστε να αναγνωριστεί η επίδρασή τους στο σενάριο αναφοράς.

Το σενάριο αναφοράς υιοθετεί τον κανονισμό 443/2009 αναφορικά με τα όρια των ειδικών εκπομπών πωλήσεων νέων αυτοκινήτων που είναι 115 gCO₂/km έως το 2020 και 95 gCO₂/km από το 2025. Επιπλέον, το σενάριο αναφοράς περιλαμβάνει την πολιτική που θέτει ως στόχο οι ανανεώσιμες πηγές να αποτελούν το 10% της συνολικής ενέργειας του τομέα των μεταφορών για το 2020. Τα δεδομένα σχετικά με το κόστος αγορά των αυτοκινήτων αντλούνται από την έκθεση «Car prices within the European Union» (EC, 2010), ενώ ο ειδικός φόρος κατανάλωσης βασίζεται στους πίνακες της Γενικής Διεύθυνσης TAXUD. Επιπλέον, θεωρείται ότι όλοι οι φόροι, μαζί με το ΦΠΑ, τα έξοδα ασφάλισης και συντήρησης παραμένουν σταθερά στα επίπεδα του 2010. Το κόστος κεφαλαίου των προηγμένων τεχνολογιών όπως των υβριδικών με καλώδιο, ηλεκτρικών με μπαταρία και κυψελών καυσίμου υδρογόνου αναμένεται να παραμείνει σε υψηλά επίπεδα μέχρι το 2050. Το σενάριο αναφοράς υποθέτει μια περιορισμένη ανάπτυξη των υποδομών επαναφόρτισης για τα ηλεκτρικά οχήματα και καμία περαιτέρω ανάπτυξη των σταθμών υδρογόνου, εκτός από εξειδικευμένες αγορές. Τα δεδομένα σχετικά με το στόλο οχημάτων για τις οδικές μεταφορές συμμορφώνονται με τη βάση δεδομένων FLEETS (LAT et al., 2008) και τη EUROSTAT.

6.2.2 Αποτελέσματα σεναρίου αναφοράς

Η συνολική δραστηριότητα των επιβατικών αυτοκινήτων, που μετράται σε επιβατο-χιλιόμετρα, προβλέπεται να αυξηθεί ακολουθώντας τις τάσεις του παρελθόντος. Ωστόσο η αύξηση αυτή αναμένεται να επιβραδυνθεί ιδιαίτερα μετά το 2020, λόγω φαινομένων κορεσμού (Πίνακας 6-1). Το σενάριο αναφοράς έχει προσαρμοστεί στο εξωγενές βασικό σενάριο της Λευκής Βίβλου για τις μεταφορές, που προϋποθέτει σημαντική αύξηση της δραστηριότητας των οδικών μεταφορών κατά τη διάρκεια του 2010-2020 (1,3% ετησίως κατά μέσο όρο), στο πλαίσιο της ανάκαμψης από την οικονομική κρίση και την υψηλότερη από τον μέσο όρο ανάπτυξη των νέων κρατών μελών της Ευρώπης. Ωστόσο, πρόσφατες στατιστικές δείχνουν ότι ο ρυθμός ανάπτυξης της δραστηριότητας των μεταφορών και της οικονομικής ανάπτυξης είναι χαμηλότερος από το σενάριο αναφοράς. Τα αυτοκίνητα βενζίνης και ντίζελ εξακολουθούν να αποτελούν τις κυρίαρχες τεχνολογίες στην αγορά αυτοκινήτου της Ευρώπης μέχρι το τέλος της υπό εξέταση περιόδου. Τα αυτοκίνητα υβριδικής τεχνολογίας επιτυγχάνουν να διεισδύσουν στην αγορά λόγω του κανονισμού των 95

gCO₂/km και λόγω της υπόθεσης ότι η συγκεκριμένη τεχνολογία αναμένεται να πετύχει εμπορική ωριμότητα και μείωση του κόστους.

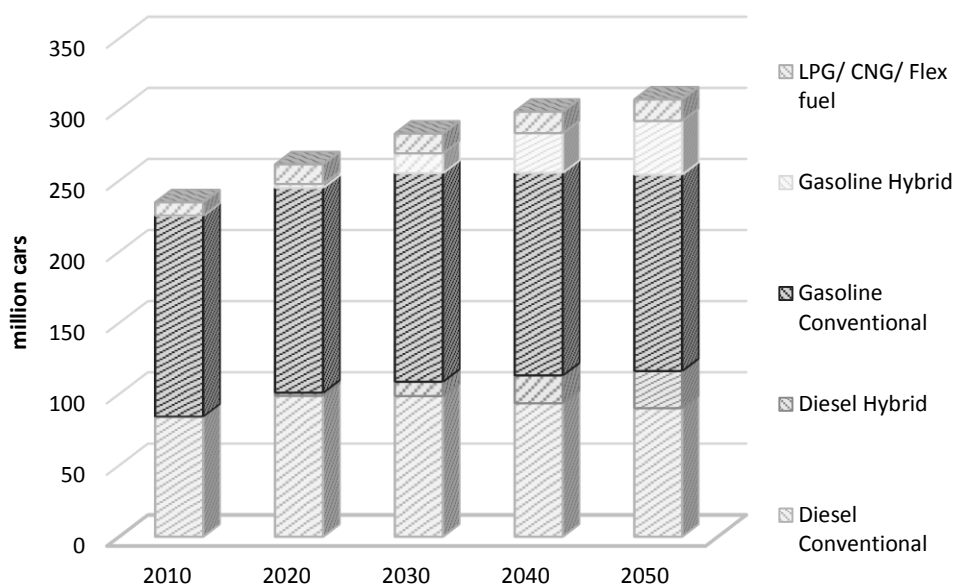
Πίνακας 6-1: Κύριοι δείκτες του τομέα των μεταφορών για την ΕΕ27 στο σενάριο αναφοράς

<i>Δραστηριότητα (δισεκατομμύρια χιλιόμετρα)</i>	<i>επιβατο-</i>	Μέση ετήσια μεταβολή (%)							
		2010	2020	2030	2040	2050	2010-2020	2020-2030	2030-2050
Diesel Conventional		1620	1926	1936	1877	1833	1.7%	0.0%	-0.3%
Diesel Hybrid		3	47	211	397	528	32.0%	16.3%	4.7%
Gasoline Conventional		2695	2833	2869	2815	2745	0.5%	0.1%	-0.2%
Gasoline Hybrid		2	49	244	468	630	35.9%	17.4%	4.9%
LPG/ CNG/ Flex fuel		152	221	240	264	266	3.8%	0.8%	0.5%
<i>Total for cars</i>		4472	5077	5500	5821	6003	1.3%	0.8%	0.4%
<i>Energy consumption (in Million toe)</i>									
Gasoline		94	84	79	76	74	-1.1%	-0.5%	-0.3%
Diesel		64	59	53	50	48	-0.7%	-1.1%	-0.5%
LPG\CNG		6	9	9	9	8	3.3%	-0.2%	-0.3%
Biofuels		6	15	17	18	18	8.9%	1.9%	0.0%
<i>Total for cars</i>		170	166	159	153	148	-0.2%	-0.5%	-0.3%
<i>CO₂ emissions</i>									
Total (in million tons CO ₂)		481	445	413	396	382	-0.8%	-0.7%	-0.4%
CO ₂ emissions per unit of energy (in tonCO ₂ /toe)		2.8	2.7	2.6	2.6	2.6	-0.6%	-0.3%	0.0%

Το σενάριο αναφοράς προβλέπει σημαντική πρόοδο της ενεργειακής απόδοσης των συμβατικών κινητήρων εσωτερικής καύσης, χάρη στην εφαρμογή του κανονισμού 443/2009 που ωθεί στην αγορά ολοένα και πιο αποδοτικά και με χαμηλότερες εκπομπές CO₂ αυτοκίνητα. Συνεπώς, η τελική κατανάλωση ενέργειας από τα επιβατικά αυτοκίνητα παρουσιάζει μια σταθερή μείωση μέχρι το 2050, τόσο για τη βενζίνη όσο και για το ντίζελ. Παρ' όλο που η δραστηριότητα των αυτοκινήτων αυξάνει σταθερά μέχρι το 2050, η εξοικονόμηση ενέργειας που επιτυγχάνεται με την είσοδο ολοένα πιο αποδοτικών αυτοκινήτων έχει μεγαλύτερη επίπτωση στη συνολική κατανάλωση ενέργειας. Η σύνθεση του στόλου των οχημάτων για την Ευρώπη παρουσιάζεται στο Σχήμα 6-1, όπου δεν παρουσιάζονται σημαντικές μεταβολές σε σχέση με τα σημερινά επίπεδα.

Η τεχνολογική πρόοδος των αυτοκινήτων και κατ' επέκταση η εξοικονόμηση ενέργειας που επιτυγχάνουν σε συνδυασμό με την είσοδο των βιοκαυσίμων στην αγορά καυσίμου οδηγούν σε μείωση των εκπομπών CO₂ κατά 14% και 21% το 2030 και το 2050 αντίστοιχα, σε σχέση με το 2010. Παρ' όλ' αυτά, το σενάριο αναφοράς δεν πληροί τους φιλόδοξους στόχους της μείωσης των εκπομπών αερίου του θερμοκηπίου που ορίζονται στη Λευκή Βίβλο για τις μεταφορές. Τα επίπεδα εκπομπών CO₂ είναι

σημαντικά υψηλότερα από τους στόχους της Λευκής Βίβλου γεγονός που οδηγεί στο συμπέρασμα ότι απαιτείται η εφαρμογή περαιτέρω πολιτικών για την περίοδο μετά το 2020 για την επίτευξη σημαντικής μείωσης των εκπομπών σε μακροπρόθεσμη βάση.



Σχήμα 6-1: Στόλος των αυτοκινήτων για την ΕΕ 27 στο σενάριο αναφοράς

6.2.3 Ανάλυση ευαισθησίας σεναρίου αναφοράς στις τιμές πετρελαίου

Οι υποθέσεις του σεναρίου αναφοράς σχετικά με την εξέλιξη των διεθνών τιμών πετρελαίου είναι σχετικά απαισιόδοξες σε σχέση με τη σημαντική μείωσή τους που παρατηρήθηκε κατά το 2015. Η παρούσα παράγραφος παρουσιάζει μια ανάλυση ευαισθησίας όσον αφορά την εξέλιξη των τιμών πετρελαίου στο σενάριο αναφοράς. Πράγματι, η παρούσα ανάλυση ευαισθησίας υποθέτει ότι η τιμή του πετρελαίου παραμένει συμπίεσμένη μέχρι το 2030 λαμβάνοντας τιμές περί τα 80 και 100 \$/ βαρέλι για το 2020 και το 2030 αντίστοιχα.

Οι μειωμένες τιμές πετρελαίου έχουν ως αποτέλεσμα μειωμένες τιμές βενζίνης και ντίζελ για τους καταναλωτές γεγονός που οδηγεί σε αύξηση της επιβατικής δραστηριότητας για όλη τη χρονική περίοδο μέχρι το 2050 σε σχέση με το σενάριο αναφοράς. Η παραπάνω αύξηση της δραστηριότητας, ωστόσο, είναι οριακή δεδομένου ότι η μείωση των τιμών πετρελαίου δε γίνεται ιδιαίτερα αντιληπτή από τους καταναλωτές λόγω της υψηλής φορολόγησης των καυσίμων στην Ευρώπη. Πράγματι, το σύνολο των φόρων επί της τελικής τιμής της βενζίνης ανέρχεται σε περίπου 65%.

Η βραχυχρόνια ελαστικότητα τιμής για την τελική κατανάλωση ενέργειας των επιβατικών αυτοκινήτων υπολογίζεται ότι είναι -0.06. Η μακροχρόνια ελαστικότητα τιμής υπολογίζεται ότι είναι -0.11. Οι παραπάνω τιμές ελαστικότητας τιμής βρίσκονται

εντός των ορίων που εκτιμούν οι Park και Zhao (2010), Hughes et al., (2008) και Small και Van Dender (2007). Ιδιαίτερα σημαντικό αποτελεί το γεγονός, ότι η απόλυτη τιμή της ελαστικότητας τιμής έχει μειωθεί σημαντικά (μείωση κατά τάξη μεγέθους) κατά την τελευταία δεκαετία σύμφωνα με τους Lin and Prince (2013). Το φαινόμενο αυτό αποδεικνύει ότι οι καταναλωτές ανταποκρίνονται ολοένα και λιγότερο σε μεταβολές των τιμών πετρελαϊκών προϊόντων.

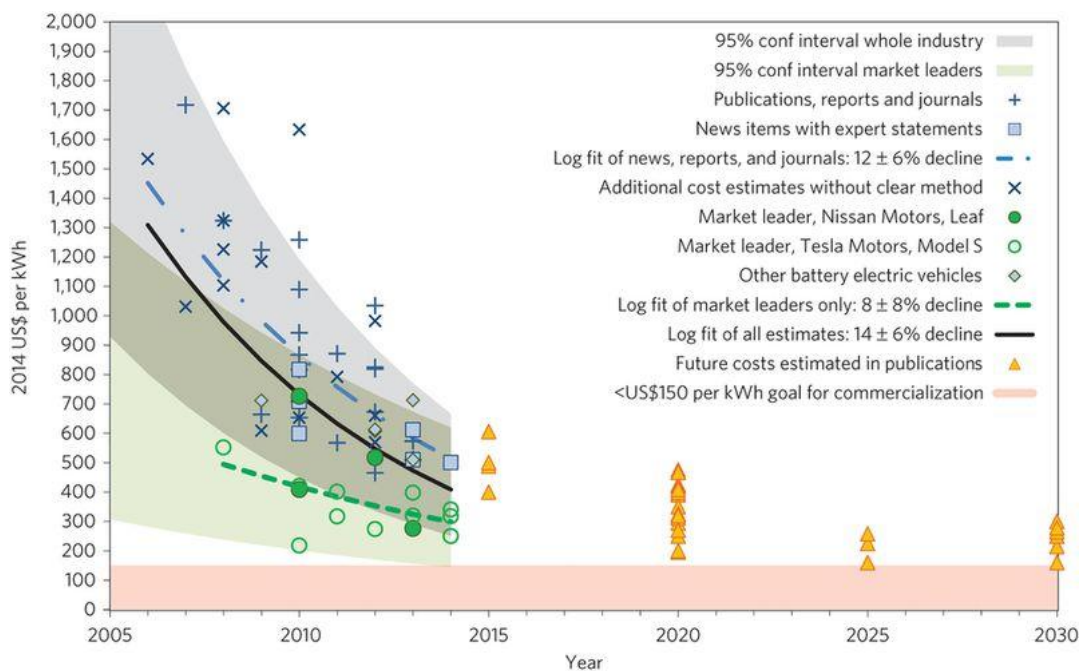
6.3 Ορισμός σεναρίων εξηλεκτρισμού των οδικών μεταφορών με χρονικό ορίζοντα το 2050

Η λογική της επιλογής της ποσοτικοποίησης σεναρίων σε ένα πλαίσιο εξηλεκτρισμού των οδικών μεταφορών έγκειται στο γεγονός ότι η ηλεκτρική ενέργεια αποτελεί μια μορφή ενέργειας που μπορεί να παραχθεί από διάφορες μορφές πρωτογενούς ενέργειας. Αν επιπλέον γίνει η υπόθεση ότι ο τομέας της ηλεκτροπαραγωγής μακροπρόθεσμα μειώσει δραστικά το ανθρακικό του αποτύπωμα, τότε η μαζική εισροή της ηλεκτρικής ενέργειας στις οδικές μεταφορές θα οδηγήσει σε σημαντική μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα όχι μόνο σε επίπεδο τελικής χρήσης αλλά και στο επίπεδο του ενεργειακού συστήματος. Στην αντίθετη περίπτωση όπου η ηλεκτρική ενέργεια θα εξακολουθούσε να παράγεται με μέσα που φέρουν σημαντικό ανθρακικό αποτύπωμα (π.χ. λιγνίτης), τότε η εισαγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στις μεταφορές θα μείωνε τις τελικές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα αλλά θα τις αύξανε στο επίπεδο της ηλεκτροπαραγωγής. Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από «καθαρά» μέσα παραγωγής με μειωμένο ανθρακικό αποτύπωμα θα είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί απευθείας από τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα ή τα υβριδικά αυτοκίνητα με καλώδιο. Επιπλέον, η ηλεκτρική ενέργεια θα μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την παραγωγή του απαραίτητου υδρογόνου για την κίνηση των οχημάτων με κυψέλες υδρογόνου.

6.3.1 Η έννοια της ελάχιστης αποδοτικής κλίμακας παραγωγής: υποθέσεις τεχνικής προόδου μπαταριών και κυψελών καυσίμου

Στα πλαίσια της περίπτωσης του εξηλεκτρισμού, γίνεται η υπόθεση ότι οι τεχνολογίες που σχετίζονται με τη χρήση της ηλεκτρικής ενέργειας (ηλεκτρικά οχήματα και οχήματα υδρογόνου) θα φτάσουν σε επίπεδα ωριμότητας και θα επιτύχουν σημαντικές βελτιώσεις όπως δραστική μείωση του υψηλού κεφαλαιουχικού τους κόστους και βελτίωση των επιδόσεών τους όπως η αυτονομία. Η σημαντική μείωση του κεφαλαιουχικού κόστους δε θα καταστήσει αυτές τις τεχνολογίες πιο φτηνές σε σχέση με τις σύγχρονες συμβατικές. Ωστόσο, κινητήριιοι μοχλοί όπως τα μέτρα πολιτικής, η φορολόγηση, τα ρυθμιστικά μέτρα, οι διαθέσιμες υποδομές θα είναι δυνατό να παρακινήσουν τους καταναλωτές προς την αγορά αυτών των τεχνολογιών έναντι των συμβατικών.

Πιο συγκεκριμένα, σύμφωνα με εκτιμήσεις της βιομηχανίας, το κόστος της μπαταρίας των ηλεκτρικών αυτοκινήτων έχει μειωθεί κατά 14% ετησίως κατά τη χρονική περίοδο 2007-2014, από 1100 \$/kWh σε περίπου 450 \$/kWh σύμφωνα με τους Nykvist και Nilsson (2015). Η σημαντική μείωση του μέσου κόστους μπαταρίας κατά τα τελευταία χρόνια οφείλεται στη σημαντική αύξηση του αριθμού πωλήσεων ηλεκτρικών αυτοκινήτων κατά το ίδιο χρονικό διάστημα γεγονός που έχει επιφέρει οικονομίες κλίμακας. Το Σχήμα 6-2 παρουσιάζει την επισκόπηση του μέσου κόστους μπαταρίας για ηλεκτρικά αυτοκίνητα που πραγματοποίησαν οι Nykvist και Nilsson (2015).



Σχήμα 6-2: Βιβλιογραφική επισκόπηση κόστους μπαταρίας Li-ion για ηλεκτρικά αυτοκίνητα. (Πηγή: Nykvist και Nilsson, 2015)

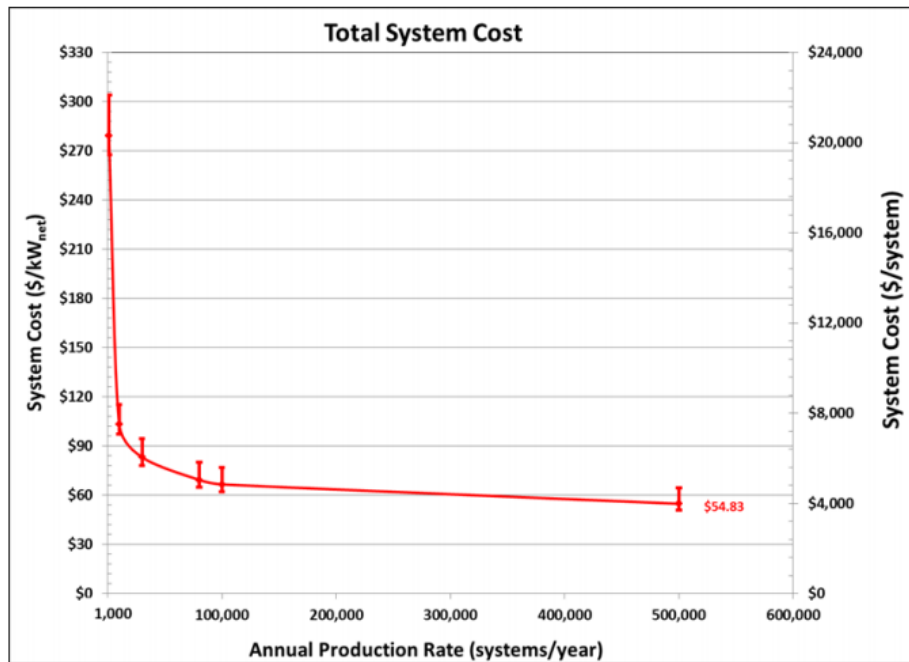
Από τη σκοπιά της οικονομικής θεωρίας, η βιομηχανία κατασκευής ηλεκτρικών αυτοκινήτων θα πρέπει να επιλέξει εκείνη την κλίμακα παραγωγής που αντανάκλα το σημείο της ελάχιστης αποδοτικής κλίμακας παραγωγής (Minimum Efficient Scale). Δηλαδή, αφορά το σημείο κατά το οποίο ο όγκος παραγωγής ελαχιστοποιεί το μακροχρόνιο μέσο κόστος. Γραφικά, το σημείο της ελάχιστης αποδοτικής κλίμακας παραγωγής παρουσιάζεται στην παράγραφο 4.3.2.2.

Τυπικά, το σημείο της ελάχιστης αποδοτικής κλίμακας αποτελεί κεντρική ιδέα στην οικονομική θεωρία με αρκετές εφαρμογές σε εργοστάσια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, στον αγροτικό τομέα, στις αεροπορικές μεταφορές (Christensen και Greene, 1976, Dhrymes και Kurz, 1964, Fuss και Gupta, 1981, Szpiro και Cette, 1994). Το σημείο της ελάχιστης αποδοτικής κλίμακας παραγωγής προσδιορίζει το επίπεδο παραγωγής των κατασκευαστών οχημάτων στο οποίο οι οικονομίες κλίμακας έχουν αξιοποιηθεί πλήρως (Kaselimi et al., 2011). Κατά τη μοντελοποίηση και κατάστρωση

των σεναρίων που παρουσιάζονται στην παρούσα ενότητα γίνεται η υπόθεση ότι οι κατασκευαστές ηλεκτρικών οχημάτων επιτυγχάνουν παραγωγή στο σημείο της ελάχιστης αποδοτικής κλίμακας κατά το οποίο το μέσο κόστος των συγκεκριμένων αυτοκινήτων ελαχιστοποιείται. Ασφαλώς, η συγκεκριμένη παραδοχή εξαρτάται από τον αναμενόμενο όγκο πωλήσεων (ενδογενές αποτέλεσμα του μοντέλου) και σε εξωγενή υπόθεση αναφορικά με τις πωλήσεις εναλλακτικών αυτοκινήτων σε παγκόσμιο επίπεδο. Οι τελευταίες στα πλαίσια των σεναρίων θεωρούνται ότι ακολουθούν τις πωλήσεις στην Ευρώπη, που σημαίνει ότι η διείσδυση των ηλεκτρικών αυτοκινήτων μέχρι το 2050 αυξάνεται δραστικά σε παγκόσμιο επίπεδο.

Η συνηθέστερη πρακτική σε άλλα μοντέλα της βιβλιογραφίας αναφορικά με την οικονομική μοντελοποίηση του κόστους των μπαταριών για τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα και τα υβριδικά με καλώδιο, είναι το γεγονός ότι οι μπαταρίες μοντελοποιούνται δίχως διακριτοποίηση. Συνεπώς, δεν υπάρχει διακριτοποίηση στο μοναδιαίο κόστος της μπαταρίας ανά τύπο οχήματος. Στην πραγματικότητα, η τεχνολογία του Li-ion περιλαμβάνει επιπλέον εναλλακτικές επιλογές όπως (π.χ. LiMn2O4, LiFePO4, κ.α.) σύμφωνα με τους Sakti et al. (2015). Οι τελευταίοι αναφέρουν ότι τα υβριδικά με καλώδιο απαιτούν συστοιχίες μπαταρίας με υψηλό λόγο ισχύος προς ενέργεια (power-to-energy ratio), δεδομένου ότι διαθέτουν μικρότερη χωρητικότητα μπαταρίας από τα καθαρά ηλεκτρικά αυτοκίνητα. Επιπλέον, παρατηρείται συσχέτιση μεταξύ του εύρους αυτονομίας του ηλεκτροκίνητου αυτοκινήτου και του κόστους μπαταρίας. Οι Sakti et al. (2015) και το National Research Council (2013) συμπεραίνουν ότι το κόστος μπαταρίας ενός υβριδικού αυτοκινήτου με καλώδιο θα είναι υψηλότερο κατά 50-60 \$/kWh το 2015. Ωστόσο, η διαφορά αυτή αναμένεται να μειωθεί στο μεσοπρόθεσμο ορίζοντα. Για το λόγο αυτό, η μοντελοποίηση θεωρεί ότι το κόστος μπαταρίας διαφέρει για τα BEV και τα PHEVs ανάλογα με το χρονικό ορίζοντα και το ηλεκτρικό εύρος αυτονομίας του αυτοκινήτου.

Σχετικά με τις προβλέψεις για τη μείωση του κόστους των μπαταριών και των κυψελών υδρογόνου, διάφορες μελέτες δείχνουν ένα εύρος στο οποίο αναμένεται να κυμανθούν. Ωστόσο, υπάρχει μεγάλος βαθμός αβεβαιότητας όσον αφορά την εξέλιξη αυτού του κόστους που αναμένεται να καθορίσει και τις τάσεις της αγοράς. Οι θετικές προσμονές από την πλευρά των κατασκευαστών οχημάτων για αύξηση του μεριδίου των ηλεκτρικών οχημάτων και των οχημάτων με κυψέλες υδρογόνου σε συνδυασμό με μέτρα πολιτικής που θα τους εξωθούν στην παραγωγή όλο και πιο καθαρών οχημάτων είναι πιθανό να οδηγήσει σε χρηματοδότηση για έρευνες με σκοπό τη μείωση του κόστους των μπαταριών και των κυψελών υδρογόνου και τελικά τη μαζική παραγωγή τους.



Σχήμα 6-3: Μέσο κόστος συστήματος κυψέλης καυσίμου υδρογόνου ως συνάρτηση του όγκου παραγωγής (Πηγή: National Research Council, 2013).

Τα εναλλακτικά σενάρια πολιτικής που ποσοτικοποιούνται με τη χρήση του μοντέλου PRIMES-TREMOVE έχουν σχεδιαστεί ως μέρος μιας ευρύτερης στρατηγικής προς ένα ενεργειακό σύστημα χαμηλών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου στην ΕΕ, σύμφωνα με τους στόχους που υιοθετήθηκαν από τον οδικούς χάρτες της ΕΕ (EC, 2011b). Η στρατηγική της δραστηκής μείωσης των εκπομπών CO₂ θεωρείται ότι πραγματοποιείται σε παγκόσμιο επίπεδο γεγονός που αναμένεται να οδηγήσει σε σημαντική μείωση της ζήτησης πετρελαίου και κατ' επέκταση μείωση της τιμής αυτού στο μακροπρόθεσμο χρονικό ορίζοντα σε σχέση με το σενάριο αναφοράς. Πιο συγκεκριμένα, γίνεται η υπόθεση ότι οι διεθνείς τιμές των καυσίμων αρχίζουν να αποκλίνουν από το σενάριο αναφοράς ήδη από το 2020, ενώ το 2050 μειώνονται κατά 50% σε σχέση με το σενάριο αναφοράς.

Η κατασκευή των σεναρίων ενεργειακής πολιτικής θεωρείται ότι πραγματοποιείται υπό από ένα πολιτικό πλαίσιο θετικών προσδοκιών αναφορικά με την προσπάθεια απεξάρτησης του τομέα των μεταφορών από τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. Οι θετικές προσδοκίες αναμένεται να έχουν θετικές επιπτώσεις στην επιτάχυνση των βιομηχανικών επενδύσεων που θα επιτρέψουν την επίτευξη ισχυρότερης τεχνολογικής προόδου και μείωσης του κόστους για εναλλακτικούς τύπους τεχνολογιών αυτοκινήτων.

Ο βαθμός επίτευξης τεχνολογικής προόδου ποικίλλει ανάλογα με το είδος της τεχνολογίας και με το είδος του σεναρίου το οποίο εξαρτάται από τις προσδοκίες για μελλοντική διείσδυση συγκεκριμένων τεχνολογιών καθώς και την εφαρμογή ρυθμιστικών μέτρων όπως τα όρια πολιτικής για τις εκπομπές CO₂ ή την ενεργειακή

απόδοση των αυτοκινήτων. Η υιοθέτηση μέτρων πολιτικής που βαθμιαία λαμβάνουν πιο αυστηρές τιμές βελτιώνει την προβλεψιμότητα των διαφόρων εμπλεκόμενων φορέων της αγοράς. Το γεγονός αυτό παρέχει κάποιο βαθμό βεβαιότητας αναφορικά με τις τεχνολογίες που στο μέλλον θα έχουν πιθανότητες να συμμορφώνονται με τα αυστηρότερα τεχνολογικά όρια και ως εκ τούτου αναμένεται να επιτρέψει στους παράγοντες της αγοράς να επικεντρώσουν τις βιομηχανικές επενδύσεις και την έρευνα σε συγκεκριμένες τεχνολογίες. Υποθέτοντας ότι τα κονδύλια για έρευνα και ανάπτυξη καθώς και για επενδύσεις είναι περιορισμένα, οι παράγοντες της αγοράς θα πρέπει να διαφοροποιήσουν τα χαρτοφυλάκιά τους σε διάφορες τεχνολογίες, στην περίπτωση που πολλαπλές τεχνολογίες συμμορφώνονται με αυστηρά μελλοντικά τεχνολογικά όρια. Η διαφοροποίηση του χαρτοφυλακίου φέρνει πλεονεκτήματα αναφορικά με την αντιστάθμιση του επενδυτικού κινδύνου και της τεχνολογικής αβεβαιότητας. Ωστόσο, το βασικό μειονέκτημα έγκειται στην αποδυνάμωση των πόρων που διατίθενται για την εξέλιξη μελλοντικών τεχνολογιών, ακριβώς λόγω του διαφοροποιημένου χαρτοφυλακίου. Στην περίπτωση που υιοθετούνται ιδιαίτερα αυστηρά τεχνολογικά όρια, αναμένεται να μειωθεί ο αριθμός των διαφορετικών τεχνολογιών που συμμορφώνονται με αυτά. Σε αυτή την περίπτωση, ο κίνδυνος των επενδυτών είναι υψηλότερος, αλλά η συγκέντρωση των πόρων είναι μεγαλύτερη, αυξάνοντας έτσι την πιθανότητα της επιτυχίας όσον αφορά την πρόοδο της τεχνολογίας και της δυνατότητας επίτευξης εμπορικής ωριμότητας.

6.3.1.1 Μοντελοποίηση των τεχνολογικών υποθέσεων και του σημείου της ελάχιστης αποδοτικής κλίμακας

Οι παραπάνω υποθέσεις αποτελούν τη θεμελίωση του σχεδιασμού των εναλλακτικών σεναρίων πολιτικής και των υποθέσεων για την τεχνολογική πρόοδο και τη δυναμική για την εμπορική ωριμότητα των εναλλακτικών τεχνολογιών σε μεταβαλλόμενα σεναριακά πλαίσια και υποθέσεις πολιτικής όπου η φύση και η αυστηρότητα των τεχνολογικών ορίων ποικίλλει.

Για την ποσοτικοποίηση του εν λόγω μηχανισμού γίνεται η χρήση δυνητικών δεδομένων από τη βιβλιογραφία αναφορικά με την τεχνολογική πρόοδο (learning effect) και την εμπορική ωριμότητα (scale effects due to mass production). Ακολουθώντας, ανάλογα με τις σεναριακές υποθέσεις σχετικά με το είδος της πολιτικής (CO₂ ή EE) που υιοθετείται, πραγματοποιούνται υποθέσεις σχετικά με τα εφικτά επίπεδα τεχνολογικής προόδου συγκριμένων τύπων τεχνολογιών με βάση τα παραπάνω δεδομένα της βιβλιογραφίας και το αν συμμορφώνονται με τα θεσπισμένα τεχνολογικά όρια. Η εμπορική ωριμότητα αναμένεται να επηρεάσει θετικά την απόφαση των καταναλωτών στο στάδιο της αγοράς νέων αυτοκινήτων και να μειώσει τα «κρυφά» κόστη που σχετίζονται με την τεχνολογική αβεβαιότητα. Συνεπώς, η σχετική πρόοδος κάθε τεχνολογίας προβάλλεται στο μέλλον ταυτόχρονα με τις δυναμικές προβλέψεις για τη διεξόδυση της συγκεκριμένης τεχνολογίας στην αγορά. Η παραπάνω τεχνική μοντελοποίησης εξασφαλίζει ότι οι δύο μηχανισμοί είναι συνεπείς μεταξύ τους σχετικά με το συγχρονισμό μέσα στο χρόνο και τα όρια του όγκου των πωλήσεων στην αγορά

που θα επιτρέψουν την επιτάχυνση της τεχνικής προόδου. Με άλλα λόγια, το μοντέλο επιτρέπει την απεικόνιση της δυναμικής της τεχνολογικής προόδου με ενδογενή τρόπο (learning) και της εμπορικής ωριμότητας (κλίμακα) ταυτόχρονα με τις ενδογενείς προβλέψεις των μεριδίων στην αγορά των τεχνολογιών αυτών, ανάλογα με τη φύση του σεναρίου.

Κατά τη μοντελοποίηση των σεναρίων, πραγματοποιήθηκε η υπόθεση ότι τα τεχνολογικά όρια καθώς και το πλαίσιο ευρύτερης πολιτικής και προσπάθειας για δραστική μείωση των αερίων του θερμοκηπίου θα επιτρέψει την αποτελεσματική εξέλιξη κατά μήκος των απότομων καμπυλών μάθησης της μιας ή και των δύο τεχνολογιών. Οι καμπύλες εκμάθησης εξαρτώνται κυρίως στις προσδοκίες της μελλοντικής μαζικής παραγωγής των τεχνολογιών. Στη μοντελοποίηση υποτέθηκε ρυθμός μάθησης (learning rate) περίπου 0,10 για τις μπαταρίες και 0,20 για τις κυψέλες καυσίμου, τα οποία βρίσκονται εντός του εύρους που προτείνεται στην βιβλιογραφία (Πίνακας 6-2).

Πίνακας 6-2: Βιβλιογραφική έρευνα ρυθμών μάθησης για τις μπαταρίες και τις κυψέλες καυσίμου υδρογόνου

Study	Electric Cars	Study	Fuel Cells
IEA, 2008	Batteries: 0.200	Rivera-Tinoco et al., 2010	0.170-0.190
IEA, 2012	Batteries: 0.150	Staffell and Green, 2009, 2012	0.150-0.200
IEA, 2013	Batteries: 0.095	Gül et al., 2009	0.150
Nagelhout and Ros, 2009	Lithium-ion batteries: 0.170	Tsuchiya and Kobayashi, 2004	0.200
Mayer et al., 2012	Lithium-ion batteries: between 0.140 and 0.080	James et al., 2010	0.153
Thiel et al., 2010	Batteries: between 0.100 and 0.150	McDowall, 2012	0.200
Gül et al., 2009	Batteries: between 0.070 and 0.150	Schoots et al., 2008 and 2010	0.180-0.210
Weiss et al., 2012	Lithium-ion batteries: 0.075		
Kloess, M. and R. Haas, 2009	Plug-in cars: between 0.070 and 0.230		
McKinsey, 2010	Batteries: between 0.070 and 0.100		
Mock et al., 2009	Battery: 0.120		
Krzyzanowski et al., 2008	Electric vehicles: 0.100		
Zubaryeva et al., 2012	BEV/PHEV: between 0.090 and 0.117		

Πράγματι, η δομή του σεναρίου βασίζεται στην υπόθεση ότι η ηλεκτρική ενέργεια θα διαδραματίσει ένα σημαντικό ρόλο στο μακροπρόθεσμο μέλλον των οδικών μεταφορών και αυτό που εξετάζεται είναι τα μελλοντικά μερίδια στην αγορά των ηλεκτρικών οχημάτων και οχημάτων υδρογόνου. Αυτές οι δύο τεχνολογίες

εξετάζονται ξεχωριστά καθώς αποτελούν δύο εντελώς διαφορετικές αγορές τόσο σε επίπεδο οχημάτων όσο και σε επίπεδο παραγωγής και διάθεσης καυσίμων. Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται σενάρια εξηλεκτρισμού του τομέα των μεταφορών στα οποία γίνεται η υπόθεση ότι θα επιτευχθούν σημαντικές βελτιώσεις στα τεχνοοικονομικά χαρακτηριστικά των μπαταριών και των κυψελών υδρογόνου. Πιο συγκεκριμένα, θα παρουσιαστούν δύο εναλλακτικές περιπτώσεις:

- «Battery Only»: Επιτυχής βελτίωση των τεχνοοικονομικών χαρακτηριστικών των μπαταριών σε κόστος και σε επιδόσεις.
- «Parallel Technology»: Παράλληλη βελτίωση των τεχνοοικονομικών χαρακτηριστικών των μπαταριών και των κυψελών υδρογόνου σε κόστος και επιδόσεις.

6.3.2 Εξηλεκτρισμός των μεταφορών: «Battery Only» σενάριο

6.3.2.1 Τεχνολογικές υποθέσεις σεναρίου

Στο σενάριο αυτό που υποθέτει αισιόδοξες προβλέψεις για τα ηλεκτρικά οχήματα που κινούνται με χρήση μπαταρίας, γίνεται η υπόθεση ότι το κόστος μπαταρίας αγγίζει τα 140 €/kWh το 2050. Οι υποθέσεις για την εξέλιξη του κόστους των μπαταριών βρίσκεται εντός των στόχων που έχουν τεθεί από τη βιομηχανία και έχουν αναφερθεί σε άλλες μελέτες. Πράγματι, οι υποθέσεις είναι πιο συντηρητικές σε σχέση με άλλες μελέτες που ισχυρίζονται ότι το κόστος μπαταρίας μπορεί να αγγίξει τα 163 €/kWh ήδη από το 2020.

Παράλληλα, η ειδική κατανάλωση των ηλεκτρικών αυτοκινήτων θεωρείται ότι βελτιώνεται και κυμαίνεται μεταξύ 0,1 – 0,15 kWh/km το 2050 και εξαρτάται από το μέγεθος του αυτοκινήτου (σημ. μεγαλύτερη μάζα συνεπάγεται μεγαλύτερη κατανάλωση). Οι υποθέσεις αυτές επίσης συγκλίνουν με άλλες μελέτες της βιβλιογραφίας (Safarianova, 2011 και Offer et al., 2011). Η ειδική κατανάλωση για άλλου είδους οχήματα όπως τα ηλεκτρικά φορτηγά και λεωφορεία θεωρείται ότι βελτιώνεται με βραδύτερο ρυθμό και κυμαίνεται μεταξύ 0,38 – 1,27 kWh/km για ηλεκτρικά φορτηγά μικρού μεγέθους (3.5 – 7.5 τόνοι) και βαριά φορτηγά (> 32 τόνοι) αντίστοιχα.

Μια επιπλέον βασική υπόθεση του σεναρίου του εξηλεκτρισμού αποτελεί και η αυτονομία των ηλεκτρικών οχημάτων. Όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο, η αυτονομία των οχημάτων έχει μοντελοποιηθεί σαν ένας παράγοντας που επηρεάζει τις αποφάσεις των καταναλωτών τόσο για τις μετακινήσεις τους όσο και για την επιλογή του νέου οχήματος που προτίθενται να αγοράσουν. Συνεπώς, παράλληλα με τις αισιόδοξες υποθέσεις για την εξέλιξη του κόστους της μπαταρίας, θεωρείται ότι η αυτονομία των ηλεκτρικών οχημάτων αυξάνει και αγγίζει τα 500 km ανάλογα το μέγεθος του αυτοκινήτου και της χωρητικότητας της μπαταρίας με την οποία είναι εφοδιασμένο. Η μεγαλύτερη αυτονομία των ηλεκτρικών αυτοκινήτων τα καθιστά

ικανά για πιο μεγάλα ταξίδια εκτός αστικών κέντρων γεγονός που βελτιώνει την αποδοχή τους από τους καταναλωτές.

Η επιλογή ενός οχήματος όπως έχει περιγραφεί στην παράγραφο 0 εξαρτάται από τη δυνατότητα που δίνει στους καταναλωτές να το χρησιμοποιήσουν σε ένα πλήθος διαφορετικών ταξιδιών ανάλογα τη χιλιομετρική απόσταση και τη γεωγραφική περιοχή. Για το κάθε διαφορετικό είδος ταξιδιού έχει υποθεθεί ένα ιστόγραμμα συχνοτήτων και χιλιομετρικών αποστάσεων. Ο καταναλωτής κατά τη διαδικασία επιλογής του νέου αυτοκινήτου εξετάζει αν η αυτονομία της κάθε εναλλακτικής επιλογής επιτρέπει να πραγματοποιήσει το συγκεκριμένο ταξίδι. Στην περίπτωση που αυτό δεν είναι δυνατό, θεωρείται ότι ο καταναλωτής χάνει χρησιμότητα αν επιλέξει τη συγκεκριμένη επιλογή γεγονός που αντικατοπτρίζεται μέσω της επιβολής χρηματικής ποινής για αυτήν την επιλογή. Η επιβολή αυτής της ποινής αυτομάτως αυξάνει το κόστος αυτής της επιλογής με αποτέλεσμα να μειωθεί η πιθανότητα επιλογής της από τον καταναλωτή κατά το στάδιο της επιλογής νέου αυτοκινήτου.

Στην περίπτωση των ηλεκτρικών φορτηγών, οι βελτιώσεις των τεχνικών χαρακτηριστικών των μπαταριών δεν επαρκούν για να τα καταστήσουν ανταγωνιστικά απέναντι στις συμβατικές τεχνολογίες. Η διαπίστωση αυτή προκύπτει λόγω του υψηλού επιπλέον κόστους που απαιτείται για να εφοδιαστούν τα φορτηγά με σύστημα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας και λόγω της μικρής αυτονομίας που είναι σημαντικά μικρότερη από αυτή των συμβατικών (περίπου 2-3 φορές μικρότερη αυτονομία από φορτηγό ντίζελ. Πράγματι, μια αυτονομία της τάξης των 300-500 km για ένα φορτηγό που πρέπει να διανύσει μεγάλες αποστάσεις με μικρές στάσεις δεν επαρκεί. Τέτοιου είδους αυτονομία επαρκεί μόνο για βαρέως τύπου οχήματα που κινούνται σε αστικά περιβάλλοντα (π.χ. λεωφορεία).

Στο σενάριο «battery only» της περίπτωσης του εξηλεκτρισμού, γίνεται η υπόθεση ότι υπάρχουν βελτιώσεις όσον αφορά τα τεχνικά χαρακτηριστικά των κυψελών υδρογόνου σε σχέση με τα σημερινά επίπεδα. Το μοναδιαίο κόστος του κεφαλαίου της κυψέλης υδρογόνου θεωρείται ότι μειώνεται κατά 5.8% ετησίως μεταξύ του 2010 και 2050. Το μοναδιαίο κόστος αγγίζει τα 190 €/kW το 2050 γεγονός που συνεπάγεται ότι το επιπλέον κόστος ενός αυτοκινήτου υδρογόνου θα κοστίζει μεταξύ 9000 και 15000 € επιπλέον ενός συμβατικού αυτοκινήτου ντίζελ. Παρ' όλη τη σημαντική βελτίωση που θεωρήθηκε, το κόστος της κυψέλης υδρογόνου εξακολουθεί να παραμένει αρκετά υψηλό σε σύγκριση με τις ανταγωνιστικές τεχνολογίες.

6.3.2.2 Υποθέσεις για την ανάπτυξη υποδομής διάθεσης εναλλακτικών καυσίμων

Στα πλαίσια του σεναρίου «battery only» της περίπτωσης του εξηλεκτρισμού, γίνεται η υπόθεση ότι μέχρι το 2050 θα είναι διαθέσιμη στο σύνολό της η απαραίτητη υποδομή σημείων φόρτισης. Ήδη από το χρονικό ορίζοντα του 2030 ένα σημαντικό μέρος της απαραίτητης υποδομής αναμένεται να έχει αναπτυχθεί κυρίως σε αστικές περιοχές. Η ύπαρξη της απαραίτητης υποδομής ανεφοδιασμού των οχημάτων με εναλλακτικά καύσιμα αποτελεί μια απαραίτητη προϋπόθεση για την ανάπτυξη της

αγοράς αυτών των καυσίμων. Αυτές οι υποθέσεις είναι πολύ σημαντικές για την κατασκευή του σεναρίου καθώς η ύπαρξη της απαραίτητης υποδομής αποτελεί ένα σημαντικό κριτήριο επιλογής συγκεκριμένων τεχνολογιών οχημάτων από τους καταναλωτές.

Για κάθε ηλεκτρικό αυτοκίνητο γίνεται η υπόθεση ότι αντιστοιχούν τουλάχιστον δύο σημεία φόρτισης Level I, ένα στον οικιακό χώρο και ένα σε σημείο σε περιοχή κοντά στο χώρο εργασίας. Όσον αφορά τα σημεία φόρτισης μέσου χρόνου και ταχείας φόρτισης (Level II και Level III αντίστοιχα), γίνεται η υπόθεση ότι θα υπάρξει ένα ανεπτυγμένο δίκτυο κυρίως σε περιοχές με υψηλή κυκλοφορία σε δημόσιους χώρους. Η αναλογία των σημείων φόρτισης Level II και III ως προς τον αριθμό των ηλεκτρικών αυτοκινήτων αναμένεται να είναι της τάξης του 1: 10 που θα είναι ικανή να καλύψει τις ανάγκες των μετακινουμένων.

Για βαρύτερα ηλεκτρικά οχήματα όπως τα ηλεκτρικά φορτηγά και τα ηλεκτρικά λεωφορεία γίνεται η υπόθεση ότι θα αναπτυχθούν ειδικά σημεία φόρτισης. Η ζήτηση για ηλεκτρική ενέργεια από ηλεκτρικά λεωφορεία και μικρά ηλεκτρικά φορτηγά συγκεκριμένων χρήσεων (εταιρικός στόλος) αναμένεται να καλυφθεί από σημεία φόρτισης σε συγκεκριμένα σημεία στις πόλεις ή από σταθμούς ανταλλαγής μπαταριών (battery swapping stations). Όσον αφορά την υποδομή σε μη αστικές περιοχές, δεν αναμένονται σημαντικές εξελίξεις παρά μόνο η εγκατάσταση συγκεκριμένων σημείων ταχείας φόρτισης για τα ηλεκτρικά λεωφορεία υπεραστικών διαδρομών και ηλεκτρικών φορτηγών για μεσαίες αποστάσεις.

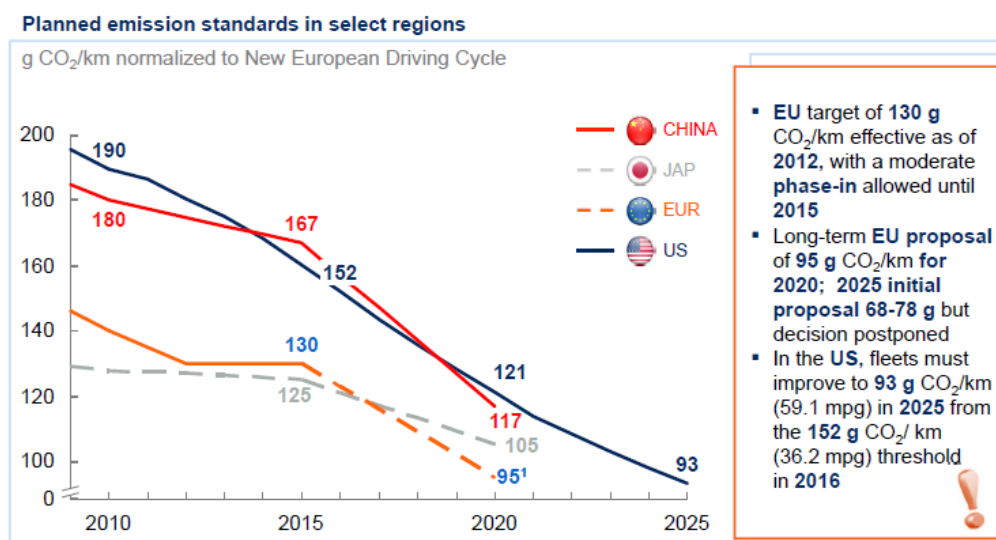
6.3.3 Υποθέσεις μέτρων πολιτικής: Περιορισμός εκπομπών CO₂ έναντι κατανάλωσης καυσίμου

Τα σενάρια εξηλεκτρισμού εξετάζονται επίσης υπό το πρίσμα δύο εναλλακτικών μέτρων πολιτικής. Πράγματι, δύο εναλλακτικά μέτρα πολιτικής εφαρμόζονται σε κάθε εναλλακτική περίπτωση. Τα μέτρα πολιτικής αποσκοπούν στο να εφαρμόσουν ρυθμιστικά μέτρα στους κατασκευαστές οχημάτων αναφορικά με τις ειδικές εκπομπές και την ενεργειακή απόδοση του στόλου των οχημάτων. Ο σκοπός αυτής της ανάλυσης είναι να εξεταστούν οι επιπτώσεις στους κατασκευαστές οχημάτων της εφαρμογής μιας εναλλακτικής πολιτικής.

Η σύγκριση των δύο εναλλακτικών πολιτικών που θέτουν τεχνολογικά όρια είτε σε επίπεδο ειδικών εκπομπών αερίου του θερμοκηπίου είτε στην ειδική κατανάλωση αποκτά ιδιαίτερο νόημα αφού αυτές οι δύο πολιτικές εφαρμόζονται εναλλακτικά σε επιμέρους αγορές του πλανήτη. Συγκεκριμένα, οι ΗΠΑ εφαρμόζουν τεχνολογικά όρια που αποσκοπούν στη ρύθμιση της ειδικής κατανάλωσης των νέων πωλήσεων αυτοκινήτων (Σχήμα 6-4). Αντίθετα, η Ευρώπη, η Ιαπωνία και η Κίνα έχουν υιοθετήσει τεχνολογικά όρια με βάση τις ειδικές εκπομπές αερίου του θερμοκηπίου.

Κατά συνέπεια, η σύγκριση μεταξύ των δύο εναλλακτικών πολιτικών είναι ιδιαίτερα σημαντική δεδομένου ότι οι επιπτώσεις του μέτρου ενδέχεται να επιφέρουν

σημαντικές μεταβολές στη μελλοντική διάρθρωση του στόλου των οχημάτων. Επιπλέον, η σύγκριση απαντάει στο ερώτημα: «Ποια πολιτική είναι καταλληλότερη να εφαρμοστεί για την Ευρώπη αναφορικά με τα μέτρα ρύθμισης στους κατασκευαστές οχημάτων;».



Σχήμα 6-4: Μέτρα πολιτικής τεχνολογικών ορίων σε συγκεκριμένες αγορές

Τα όρια της εφαρμογής της συγκεκριμένης πολιτικής επιλέχθηκαν έπειτα από αρκετές δοκιμές και τρεξίματα του μοντέλου έτσι ώστε ο ρυθμός μείωσης των εκπομπών αερίων διοξειδίου του άνθρακα να είναι παρεμφερής με αυτόν του σεναρίου όπου εφαρμόστηκε η πολιτική CO₂ standards. Έπειτα από κάθε τρέξιμο γινόταν σύγκριση των εκπομπών αερίων διοξειδίου του άνθρακα και γινόταν η κατάλληλη προσαρμογή των ορίων της ενεργειακής αποδοτικότητας. Ο λόγος που ακολουθήθηκε αυτή η διαδικασία είναι για να εξασφαλιστεί η συγκρισιμότητα μεταξύ των δύο σεναρίων και να μπορούν να εξαχθούν συμπεράσματα όσον αφορά το κόστος, την τελική κατανάλωση και τις εκπομπές αερίων CO₂. Η μονάδα μέτρησης αυτών των ορίων είναι τα ισοδύναμα λίτρα βενζίνης ανά 100 χιλιόμετρα. Ο Πίνακας 6-3 παρουσιάζει το επίπεδο των ορίων αυτών των μέτρων πολιτικής για το 2020, 2030, 2040 και 2050.

Πίνακας 6-3: Υποθέσεις τεχνολογικών ορίων CO₂ και ενεργειακής απόδοσης του σεναρίου «battery only»

	2020	2030	2040	2050
CO ₂ standards (gCO ₂ /km)	95	83	23	20
EE standards (l/100km)	6	3.8	2.2	1.7

6.3.4 Εξηλεκτρισμός των μεταφορών: «Parallel Technology» σενάριο

Το παρόν σενάριο υποθέτει ότι πέρα από τη δραστική βελτίωση στα τεχνοοικονομικά χαρακτηριστικά και τις επιδόσεις των μπαταριών, θα επέλθει και μια σημαντική μείωση στο κόστος της τεχνολογίας κυψελών υδρογόνου. Το σενάριο «parallel technology» βασίζεται στη δομή του σεναρίου «battery only» όσον αφορά το σκέλος των υποθέσεων για τα ηλεκτρικά οχήματα αλλά εφαρμόζει επιπλέον υποθέσεις που καθιστούν ακόμα πιο ανταγωνιστική την τεχνολογία του υδρογόνου.

6.3.4.1 Τεχνολογικές υποθέσεις σεναρίου

Το σενάριο αυτό υποθέτει πολύ αισιόδοξες υποθέσεις όσον αφορά τη τεχνολογική ανάπτυξη των κυψελών υδρογόνου, γεγονός που συνεπάγεται πολύ σημαντικές μειώσεις στο κεφαλαιουχικό κόστος αυτών των τεχνολογιών. Οι υποθέσεις για την εξέλιξη του κόστους των κυψελών υδρογόνου για το συγκεκριμένο σενάριο ακολουθούν τις προβλέψεις της μελέτης που πραγματοποιήθηκε από την McKinsey (2010) η οποία υποθέτει ότι το κόστος είναι δυνατό να μειωθεί στα 43 €/kW ήδη από το 2020, όταν το 2010 το κόστος ανερχόταν σε περίπου 500 €/kW. Σύμφωνα με την ίδια μελέτη αυτή η δραστική μείωση του κόστους θα προέλθει από μηχανικές βελτιώσεις, χρήση διαφορετικών υλικών, περιορισμό της χρήσης σπάνιων υλικών όπως η πλατίνα καθώς και βελτιώσεις στην παραγωγική διαδικασία.

Ο Πίνακας 6-4 παρουσιάζει τις υποθέσεις αναφορικά με την εξέλιξη του μοναδιαίου κόστους της κυψέλης υδρογόνου, το οποίο μειώνεται 21% ετησίως κατά τη δεκαετία 2011-2020. Μετά το 2020, η επιπλέον μείωση του κόστους πραγματοποιείται με βραδύτερο ρυθμό μέχρι το τέλος του ορίζοντα πρόβλεψης του μοντέλου. Οι αισιόδοξες υποθέσεις του συγκεκριμένου σεναρίου στηρίζονται και από άλλες πηγές της βιβλιογραφίας όπου αναφέρεται ότι το κόστος της κυψέλης υδρογόνου είναι δυνατό να μειωθεί δραστικά σε ένα βραχυπρόθεσμο ή μεσοπρόθεσμο χρονικό ορίζοντα. Σύμφωνα με τους Offer et al. (2011) το κόστος θα μπορούσε να μειωθεί στα 35 €/kW το 2030, ενώ σύμφωνα με τη Safarianova (2011), το αντίστοιχο κόστος το 2015 θα μπορούσε να φτάσει τα 60 €/kW. Με βάση τις υποθέσεις αυτού του σεναρίου ένα αυτοκίνητο υδρογόνου που το 2010 κοστίζει επιπλέον ενός συμβατικού κατά 60000 €, θα κοστίζει 7000 €¹ επιπλέον το 2020 και 4500 € το 2050. Συνεπώς, ήδη από το 2020 τα αυτοκίνητα με κυψέλη υδρογόνου γίνονται αρκετά ανταγωνιστικά σε σχέση με τα συμβατικά όσον αφορά την τιμή αγοράς.

¹ Για τους υπολογισμούς υποτίθεται αυτοκίνητο εφοδιασμένο με κυψέλη υδρογόνου ισχύος 75 kW. Το κόστος της κυψέλης και του συστήματος είναι της τάξης των 500 €/kW το 2010 και μειώνεται στα 88 €/kW το 2020 (43 €/kW το κόστος της κυψέλης και 45 €/kW το κόστος των περιφερειακών εξαρτημάτων).

Πίνακας 6-4: Υποθέσεις για την εξέλιξη του κόστους της κυψέλης υδρογόνου στο σενάριο «parallel technology»

(Euro/kW)	2010	2020	2030	2040	2050
Fuel cell stack and system costs	800	88	73	60	50

Η ειδική κατανάλωση ενέργειας των αυτοκινήτων με κυψέλη υδρογόνου θεωρείται ότι κυμαίνεται μεταξύ 0,7 και 0.9 kg H₂/100km σε μακροπρόθεσμο χρονικό ορίζοντα και εξαρτάται από το μέγεθος του αυτοκινήτου. Η ισοδύναμη κατανάλωση σε λίτρα βενζίνης ανά 100 χιλιόμετρα προκύπτει λίγο λιγότερο από 3. Οι υποθέσεις αυτές επιβεβαιώνονται από διάφορες βιβλιογραφικές πηγές (Safarianova, 2011, Offer et al., 2011 και Sekanina, 2006).

Στο «parallel technology» σενάριο γίνεται η υπόθεση ότι η τεχνολογία των κυψελών υδρογόνου είναι δυνατό να υιοθετηθεί και σε άλλα μέσα μεταφοράς όπως τα ελαφρά επαγγελματικά οχήματα και τα φορτηγά βαρέως τύπου. Όσον αφορά τα τελευταία, η τεχνολογία των κυψελών υδρογόνου είναι η μόνη ανταγωνιστική τεχνολογία στην ήδη υπάρχουσα τεχνολογία της μηχανής εσωτερικής καύσης.

6.3.4.2 Υποθέσεις για την ανάπτυξη υποδομής διάθεσης εναλλακτικών καυσίμων

Στο πλαίσιο του σεναρίου «parallel technology» γίνεται η υπόθεση ότι η απαραίτητη υποδομή παραγωγής, μεταφοράς και διάθεσης του υδρογόνου θα είναι διαθέσιμη στους τελικούς χρήστες μέχρι το 2050 και σε μεγάλο βαθμό ήδη από το 2030. Όπως έχει ήδη αναφερθεί η παρουσία της συγκεκριμένης υποδομής είναι αναγκαία συνθήκη για την αποδοχή της συγκεκριμένης τεχνολογίας και του συγκεκριμένου καυσίμου από τους καταναλωτές. Η απουσία της συγκεκριμένης υποδομής όπως και στην περίπτωση της ηλεκτρικής ενέργειας είναι δυνατό να εμποδίσει τη μαζική διάχυση αυτών των τεχνολογιών ακόμα κι αν έχει επιτευχθεί σημαντική μείωση του κόστους τους.

Η υποδομή διανομής και διάθεσης υδρογόνου θεωρείται ότι αναπτύσσεται παράλληλα με την απαραίτητη υποδομή σταθμών φόρτισης για τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα. Η τελευταία αναπτύσσεται στον ίδιο βαθμό με το σενάριο «battery only». Η παραγωγή υδρογόνου θεωρείται ότι πραγματοποιείται με τη χρήση της μεθόδου της ηλεκτρόλυσης. Πράγματι, η απαραίτητη ποσότητα υδρογόνου που ζητείται από τους τελικούς καταναλωτές παράγεται από ηλεκτρική ενέργεια η οποία θεωρείται ότι προέρχεται από ένα μείγμα ηλεκτροπαραγωγής χαμηλό σε εκπομπές αερίων CO₂. Υπενθυμίζεται στο σημείο αυτό ότι τα συγκεκριμένα σενάρια εξηλεκτρισμού των μεταφορών πραγματοποιούνται υπό το πρίσμα της ολικής απανθρακοποίησης τους ενεργειακού συστήματος. Συνεπώς, από την αλληλεπίδραση των μοντέλων PRIMES-TREMOVE και PRIMES, για το συγκεκριμένο σενάριο απανθρακοποίησης, η ηλεκτρική ενέργεια μετά το 2040 παράγεται με σχεδόν μηδαμινές εκπομπές CO₂.

Όσον αφορά την τιμολόγηση του υδρογόνου, αυτή είναι σημαντικά υψηλότερη της τιμής της ηλεκτρικής ενέργειας καθώς περιλαμβάνει το κεφαλαιουχικό κόστος της μονάδα ηλεκτρόλυσης, το μεταβλητό κόστος του καυσίμου εισόδου (ηλεκτρική ενέργεια) και το κόστος μεταφοράς του παραγόμενου προϊόντος στα σημεία διάθεσής του μέσω φορτηγών και αγωγών υψηλής και μέσης πίεσης.

6.3.4.3 Υποθέσεις μέτρων πολιτικής

Όπως και στην περίπτωση του σεναρίου «battery only» εξετάζονται δύο εναλλακτικά μέτρα πολιτικής προς τους κατασκευαστές οχημάτων. Όπως είναι γνωστό, τα μέτρα αυτά αποσκοπούν στο να θέσουν όρια είτε όσον αφορά το μέσο όρο των εκπομπών σε αέρια διοξειδίου του άνθρακα είτε την ενεργειακή απόδοση των νέων πωλήσεων οχημάτων.

Πράγματι, οι τιμές των ορίων που εισάγονται στο μοντέλο για την ποσοτικοποίηση των δύο περιπτώσεων δε διαφέρουν σημαντικά από τις τιμές που χρησιμοποιήθηκαν στην περίπτωση του σεναρίου «battery only» (Πίνακας 6-5).

Πίνακας 6-5: Υποθέσεις τεχνολογικών ορίων CO₂ και ενεργειακής απόδοσης του σεναρίου «parallel technology»

	2020	2030	2040	2050
CO ₂ standards (gCO ₂ /km)	95	78	23	20
EE standards (l/100km)	6	4	2.2	1.8

6.4 Αποτελέσματα σεναρίων εξηλεκτρισμού

6.4.1 Διάρθρωση στόλου οχημάτων

Οι αισιόδοξες τεχνολογικές υποθέσεις του σεναρίου σε συνδυασμό με τη σημαντική ανάπτυξη της υποδομής σταθμών φόρτισης ηλεκτρικής ενέργειας και την εφαρμογή μέτρων πολιτικής που αποσκοπούν στην εισαγωγή στην αγορά οχημάτων με χαμηλές εκπομπές αερίων διοξειδίου του άνθρακα αποτελούν τους κινητήριους μοχλούς που αλλάζουν την εικόνα των επίγειων επιβατικών μεταφορών.

Η εφαρμογή πολιτικής επιφέρει μεταβολές στην πλευρά της προσφοράς των κατασκευαστών που είναι υποχρεωμένοι να παράγουν τύπους και τεχνολογίες οχημάτων με χαμηλές εκπομπές CO₂ ή με πολύ μικρή ειδική κατανάλωση (εναλλακτική περίπτωση εφαρμογής EE standards). Το γεγονός ότι οι υποθέσεις του σεναρίου θεωρούν ότι τα όρια των μέτρων πολιτικής γίνονται όλο και πιο αυστηρά μέσα στα χρόνια, οδηγεί σε δραστικές εξελίξεις στη δομή του στόλου των οχημάτων της Ευρώπης στο μέλλον. Η αποδοτικότητα της πολιτικής ευνοείται και από τις σημαντικές βελτιώσεις στις επιδόσεις των εναλλακτικών οχημάτων που παρέχονται από τις κατασκευάστριες εταιρείες. Πράγματι, η μεγαλύτερη αυτονομία επιτρέπει τη

μεγαλύτερη αποδοχή των ηλεκτρικών οχημάτων από τους καταναλωτές και μειώνει τη φοβία τους (range anxiety).

6.4.1.1 Αποτελέσματα σεναρίου «battery only»

Η δραστική μείωση του κόστους των μπαταριών και το γεγονός ότι τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα και τα υβριδικά με καλώδιο καθίστανται σχεδόν ανταγωνιστικά με τα συμβατικά όσον αφορά το επιπλέον κεφαλαιουχικό κόστος που απαιτείται για την απόκτησή τους, οδηγεί σε μια διαφοροποιημένη εικόνα του στόλου των αυτοκινήτων της Ευρώπης κυρίως μετά το 2030. Πράγματι, ο Πίνακας 6-6, που δείχνει τον όγκο του στόλου των αυτοκινήτων και των ελαφρών επαγγελματικών οχημάτων, αναδεικνύει ότι στο μεσοπρόθεσμο διάστημα τα υβριδικά οχήματα πραγματοποιούν σημαντική είσοδο στην αγορά κυρίως λόγω των ορίων που έχουν τεθεί (της τάξης των 80 gCO₂/km). Αυτό το επίπεδο του ορίου δεν είναι ικανό να επιφέρει μαζική είσοδο ηλεκτροκινούμενων οχημάτων. Ωστόσο, οι κατασκευαστές υπακούουν στα επίπεδα του ορίου αυτού με τις πωλήσεις υβριδικών οχημάτων. Σε μακροπρόθεσμο ορίζοντα, η εικόνα διαφοροποιείται σημαντικά όπου τα ηλεκτρικά οχήματα μονοπωλούν την αγορά και αποτελούν σχεδόν το ήμισυ του συνόλου του στόλου. Σημαντικό τμήμα του στόλου αποτελούν και τα υβριδικά οχήματα με καλώδιο καθώς αυτά δε φέρουν κανένα περιορισμό αυτονομίας και καλύπτουν τις ανάγκες της μερίδας πληθυσμού που έχει ανάγκες για μεγαλύτερου μήκους ταξίδια.

Πίνακας 6-6: Δομή του στόλου των επιβατικών αυτοκινήτων στο σενάριο «Battery only» με πολιτική CO₂ και EE standards

	CO ₂ STANDARDS			EE STANDARDS		
	2020	2030	2050	2020	2030	2050
Conventional	77%	43%	5%	78%	43%	2%
Hybrid	10%	22%	7%	9%	23%	11%
PHEV	7%	18%	26%	6%	18%	36%
BEV	0%	9%	48%	0%	9%	48%
FCEV	0%	1%	11%	0%	1%	2%
LPG/ CNG/ Flex fuel	6%	7%	2%	6%	6%	1%

Τα οχήματα που κινούνται με υδρογόνο βλέπουν το μερίδιό τους στην αγορά να αυξάνει κυρίως προς το 2050 αλλά το σημαντικά μεγαλύτερο κόστος κεφαλαίου που απαιτούν σε σχέση με τις άλλες ανταγωνιστικές τεχνολογίες δεν τους επιτρέπει μεγαλύτερη διείσδυση. Τα τμήματα της αγοράς που καλύπτουν είναι κυρίως αυτά που απαιτούν μεγαλύτερες χιλιομετρικές αποστάσεις και που δύσκολα καλύπτονται από τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα με μπαταρία. Οχήματα που κινούνται με εναλλακτικά καύσιμα όπως φυσικό αέριο και LPG κερδίζουν ένα μικρό αλλά όχι αμελητέο ποσοστό της αγοράς στο μεσοπρόθεσμο ορίζοντα καθώς ευνοούνται από το μέτρο πολιτικής που θέτει όρια με βάση τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα. Πράγματι, το φυσικό αέριο και το LPG αποτελούν καύσιμα με μικρότερη ανθρακική ένταση (carbon intensity) από

τη βενζίνη ή το ντίζελ. Ωστόσο, το γεγονός ότι τα όρια της πολιτικής μειώνονται δραστικά μετά το 2030 συμπιέζει σημαντικά το μερίδιό τους στην αγορά για χάρη των ηλεκτροκινούμενων οχημάτων.

Ο Πίνακας 6-7 παρουσιάζει τις πωλήσεις νέων οχημάτων και δείχνει ότι το 2020 τα υβριδικά αποκτούν σημαντικό μερίδιο των πωλήσεων, ενώ τα υβριδικά με καλώδιο, τα οχήματα που κινούνται με φυσικό αέριο και LPG διεισδύουν στην αγορά σε μικρότερο ποσοστό. Τα ηλεκτρικά οχήματα με μπαταρία αποκτούν το 15% της αγοράς των νέων πωλήσεων το 2030. Το ποσοστό αυτό ουσιαστικά προετοιμάζει την αγορά για την κυριαρχία των ηλεκτρικών αυτοκινήτων την επόμενη εικοσαετία (2030-2050), όπου το 2050 αποτελούν το 47% των νέων πωλήσεων. Αν συνυπολογιστεί και ο όγκος πωλήσεων των υβριδικών οχημάτων με καλώδιο, τότε το ποσοστό τους αυξάνει στο σχεδόν 73% των νέων πωλήσεων, γεγονός που συμπιέζει τα ποσοστά πωλήσεων όλων των άλλων τεχνολογιών και που οδηγεί σχεδόν εκτός αγοράς τα συμβατικού τύπου οχήματα βενζίνης και ντίζελ.

Πίνακας 6-7: Μερίδια εναλλακτικών τεχνολογιών επί των νέων πωλήσεων αυτοκινήτων στο σενάριο «Battery only» με πολιτική CO₂ και EE standards

	CO ₂ STANDARDS			EE STANDARDS		
	2020	2030	2050	2020	2030	2050
Conventional	59%	36%	5%	62%	35%	2%
Hybrid	20%	22%	7%	19%	23%	8%
PHEV	15%	18%	26%	14%	19%	34%
BEV	0%	15%	47%	0%	15%	52%
FCEV	0%	1%	13%	0%	1%	3%
LPG/ CNG/ Flex fuel	5%	8%	2%	5%	6%	1%

Πράγματι, αυτό που προκύπτει από τα αποτελέσματα του μοντέλου έπειτα από τη σύγκλιση που επιτεύχθηκε όσον αφορά τις προβλέψεις των εκπομπών CO₂, είναι ότι διαφοροποιείται σημαντικά το μερίδιο των οχημάτων με κυψέλες υδρογόνου στο σύνολο των αυτοκινήτων και των ελαφρών επαγγελματικών οχημάτων. Τα οχήματα υδρογόνου παρ' όλο που είναι και αυτά οχήματα με μηδενικές εκπομπές CO₂ στο επίπεδο της εξάτμισης, υπολείπονται όσον αφορά την ενεργειακή απόδοσή τους σε σχέση με ανταγωνιστικές τεχνολογίες όπως τα ηλεκτρικά ή τα υβριδικά με καλώδιο. Το γεγονός αυτό έχει σα συνέπεια σε μακροπρόθεσμο ορίζοντα με πιο αυστηρά όρια ενεργειακής απόδοσης των οχημάτων, τα οχήματα υδρογόνου να μη συμμορφώνονται. Η αδυναμία των συγκεκριμένων οχημάτων να συμμορφωθούν με τα αυτά τα όρια της πολιτικής, έχει αρνητικό αντίκτυπο στις πωλήσεις τους καθώς τη θέση τους παίρνουν τα ηλεκτρικά οχήματα που έχουν καλύτερη ενεργειακή απόδοση.

Με βάση τα αποτελέσματα του μοντέλου για τη συγκεκριμένη ανάλυση ευαισθησίας του σεναρίου του εξηλεκτρισμού, το μερίδιο των ηλεκτρικών οχημάτων με μπαταρία στην αγορά αγγίζει το 50% το 2050, τα υβριδικά με καλώδιο το 38% και τα συμβατικά το 12.4%. Συνεπώς, τα ηλεκτρικά οχήματα στο σύνολό τους αποτελούν το 88% της αγοράς του 2050. Αυτό το αποτέλεσμα έρχεται σε αντίθεση με την περίπτωση

που εξετάστηκε προηγουμένων όπου εφαρμόστηκε πολιτική που τέθηκαν όρια στις ειδικές εκπομπές CO₂ των οχημάτων. Το ποσοστό των αυτοκινήτων υδρογόνου όταν εφαρμόζονται τεχνολογικά όρια ενεργειακής απόδοσης δεν ξεπερνά το 3% το 2050.

Είναι προφανές ότι η επιλογή συγκεκριμένης πολιτικής έχει σημαντικό αντίκτυπο στην τεχνολογία που θα κυριαρχήσει σε μακροπρόθεσμο ορίζοντα. Σε μεσοπρόθεσμο ορίζοντα, η εναλλαγή πολιτικής (από τις εκπομπές CO₂ στην ενεργειακή απόδοση) έχει αντίκτυπο και στις συμβατικές τεχνολογίες που καταναλώνουν εναλλακτικό καύσιμο όπως LPG και μεθάνιο. Στην περίπτωση όπου εφαρμόζονται όρια στην ενεργειακή απόδοση των οχημάτων, τα οχήματα που κινούνται με LPG και μεθάνιο βλέπουν το ποσοστό τους να μειώνεται καθώς η αποδοτικότητά τους υπολείπεται αυτής των συμβατικών ντίζελ και βενζίνης.

Συμπερασματικά, διατηρώντας τις ίδιες υποθέσεις όσον αφορά τα τεχνοοικονομικά χαρακτηριστικά των νέων τεχνολογιών και την ανάπτυξη της απαραίτητης υποδομής, η διείσδυση των ηλεκτρικών οχημάτων και των οχημάτων με κυψέλη υδρογόνου είναι δυνατό να διαφοροποιηθεί ανάλογα με το είδος της πολιτικής που θα εφαρμοστεί στους κατασκευαστές.

Η εφαρμογή πολιτικής που θέτει όρια στην ενεργειακή απόδοση των οχημάτων ευνοεί την τεχνολογία των ηλεκτρικών οχημάτων που είναι εφοδιασμένα με μπαταρία (κατ' επέκταση και τα υβριδικά με καλώδιο καθώς συμπεριφέρονται κατά ένα μεγάλο ποσοστό σαν αμιγώς ηλεκτρικά) εις βάρος όλων των άλλων τεχνολογιών που είναι γνωστές σήμερα. Στην αντίθετη περίπτωση όπου εφαρμόζεται πολιτική με βάση τις ειδικές εκπομπές CO₂ των οχημάτων, παρατηρείται μεγαλύτερη ποικιλία στις τεχνολογίες που μπορούν να διεισδύσουν στην αγορά. Συνεπώς, αυτή η πολιτική είναι περισσότερο τεχνολογικά ουδέτερη σε σχέση με την πολιτικής εφαρμογής ορίων ενεργειακής απόδοσης.

6.4.1.2 Αποτελέσματα σεναρίου «Parallel Technology»

Όπως παρατηρήθηκε και στο σενάριο «battery only», οι κινητήριιοι μοχλοί για τις δραστικές αλλαγές που παρατηρούνται στην αγορά των μεταφορών είναι ο συνδυασμός της εφαρμογής αυστηρής πολιτικής στους κατασκευαστές και η τεχνολογική πρόοδος νέων εναλλακτικών τεχνολογιών οχημάτων. Η διαφορά των δύο τύπων σεναρίων έγκειται στο γεγονός ότι στο παρόν σενάριο γίνεται η υπόθεση ότι θα συμβεί παράλληλη δραματική βελτίωση τόσο των ηλεκτρικών οχημάτων όσο και των οχημάτων εφοδιασμένων με κυψέλη υδρογόνου. Αυτές οι βελτιώσεις αφορούν τόσο το οικονομικό σκέλος των τεχνολογιών αυτών όσο και το σκέλος των επιδόσεων.

Οι δραστικές μεταβολές στην αγορά των μεταφορών παρατηρούνται κυρίως στο τμήμα της αγοράς των αυτοκινήτων και των ελαφρών επαγγελματικών οχημάτων. Πράγματι, οι αισιόδοξες υποθέσεις για την εξέλιξη του κόστους της κυψέλης υδρογόνου ήδη στο μεσοπρόθεσμο ορίζοντα αποτυπώνονται σε σημαντικές μεταβολές στο τεχνολογικό μείγμα του στόλου των αυτοκινήτων στην Ευρώπη. Ήδη μέχρι το 2030

υπό το καθεστώς πολιτικής ορίου CO₂ στις νέες πωλήσεις ο όγκος των οχημάτων υδρογόνου αγγίζει περίπου τα 40 εκατομμύρια.

Το τοπίο μεταβάλλεται ριζικά μετά το 2030 όπου τα οχήματα υδρογόνου κατακλύζουν την αγορά λόγω της περαιτέρω ανάπτυξης της διαθέσιμης υποδομής σταθμών ανεφοδιασμού υδρογόνου, της επιπλέον μείωσης του κεφαλαιουχικού κόστους των οχημάτων αυτών και της εφαρμογής αυστηρής πολιτικής στους κατασκευαστές. Παράλληλα, παρατηρείται και σημαντική διείσδυση των ηλεκτρικών οχημάτων και των υβριδικών με καλώδιο. Η εφαρμογή αυστηρής πολιτικής όσον αφορά τις εκπομπές αερίων διοξειδίου του άνθρακα οδηγεί όπως φαίνεται στην αγορά δύο εναλλακτικούς τύπους οχημάτων: τα ηλεκτρικά και τα οχήματα με κυψέλες υδρογόνου (Πίνακας 6-8).

Πίνακας 6-8: Δομή του στόλου των επιβατικών αυτοκινήτων στο σενάριο «Parallel Technology» με πολιτική CO₂ και EE standards

	CO ₂ STANDARDS			EE STANDARDS		
	2020	2030	2050	2020	2030	2050
Conventional	77%	38%	7%	78%	39%	2%
Hybrid	10%	20%	7%	9%	19%	10%
PHEV	7%	15%	17%	6%	15%	32%
BEV	0%	7%	28%	0%	7%	42%
FCEV	0%	13%	38%	0%	13%	13%
LPG/ CNG/ Flex fuel	6%	7%	3%	6%	6%	1%

Αναφορικά με τις πωλήσεις νέων αυτοκινήτων (Πίνακας 6-9), οι πωλήσεις νέων οχημάτων υδρογόνου το 2050 αγγίζει τα 54 εκατομμύρια. Απεναντίας, στο σενάριο «battery only» ο ίδιος αριθμός δεν ξεπερνούσε τα 18 εκατομμύρια. Η σημαντική αύξηση των πωλήσεων των οχημάτων υδρογόνου στο σενάριο «Parallel Technology» οδηγεί σε συμπίεση των πωλήσεων των ηλεκτρικών οχημάτων και υβριδικών με καλώδιο. Πράγματι, στο παρόν σενάριο οι νέες πωλήσεις τους αγγίζουν περίπου τα 64 εκατομμύρια από τα 101 εκατομμύρια του σεναρίου «battery only». Στο μεσοπρόθεσμο ορίζοντα, σύμφωνα με τα αποτελέσματα του σεναρίου, οι νέες πωλήσεις των οχημάτων υδρογόνου πλησιάζουν το 17% γεγονός που αναδεικνύει τη δυναμική τους στην αγορά και που δικαιολογείται από την κυριαρχία τους στην αγορά μέχρι το 2050. Παράλληλα, τα ηλεκτρικά οχήματα και τα υβριδικά με καλώδιο αγγίζουν αθροιστικά το 17.6% των νέων πωλήσεων το 2030.

Πίνακας 6-9: Μερίδια εναλλακτικών τεχνολογιών επί των νέων πωλήσεων αυτοκινήτων στο σενάριο «Parallel Technology» με πολιτική CO₂ και EE standards

	CO ₂ STANDARDS			EE STANDARDS		
	2020	2030	2050	2020	2030	2050
Conventional	59%	30%	6%	61%	31%	3%
Hybrid	20%	18%	8%	19%	18%	7%
PHEV	15%	15%	17%	14%	15%	30%
BEV	0%	12%	28%	0%	12%	49%
FCEV	1%	17%	38%	1%	17%	10%
LPG/ CNG/ Flex fuel	5%	7%	3%	5%	6%	1%

Παρ' όλο που οι υποθέσεις για την εξέλιξη του κόστους της τεχνολογίας κυψέλης υδρογόνου είναι αισιόδοξες, ωστόσο το επιπλέον κόστος των οχημάτων υδρογόνου είναι υψηλότερο από το αντίστοιχο κόστος ενός ηλεκτρικού οχήματος σε σχέση με τα σημερινά συμβατικά οχήματα. Επιπλέον, δεδομένου ότι το κόστος του υδρογόνου είναι υψηλότερο από αυτό της ηλεκτρικής ενέργειας εφόσον έχει γίνει η υπόθεση ότι το υδρογόνο παράγεται με πρώτη ύλη την ηλεκτρική ενέργεια και λόγω του χαμηλότερου βαθμού απόδοσής των οχημάτων υδρογόνου, συνεπάγεται ότι το μεταβλητό κόστος του οχήματος υδρογόνου είναι υψηλότερο από αυτό ενός ηλεκτρικού οχήματος.

Η εφαρμογή αυστηρής πολιτικής στα όρια των εκπομπών CO₂ των οχημάτων στο μακροχρόνιο ορίζοντα συνεπάγεται ότι μόνο η τεχνολογία της μπαταρίας και της κυψέλης υδρογόνου είναι δυνατό να συμμορφωθεί με αυτήν. Συνεπώς, οι καταναλωτές κατά την επιλογή νέου οχήματος καλούνται να επιλέξουν μεταξύ των δύο τεχνολογιών. Η μικρότερη αυτονομία των ηλεκτρικών οχημάτων σε σύγκριση με τα οχήματα υδρογόνου (που επηρεάζει αρνητικά την απόφαση των καταναλωτών) είναι ένας αντισταθμιστικός παράγοντας που οδηγεί τα οχήματα υδρογόνου στο να κατακτήσουν τη μερίδα του λέοντος στον όγκο της αγοράς παρά το υψηλότερο μέσο κόστος τους.

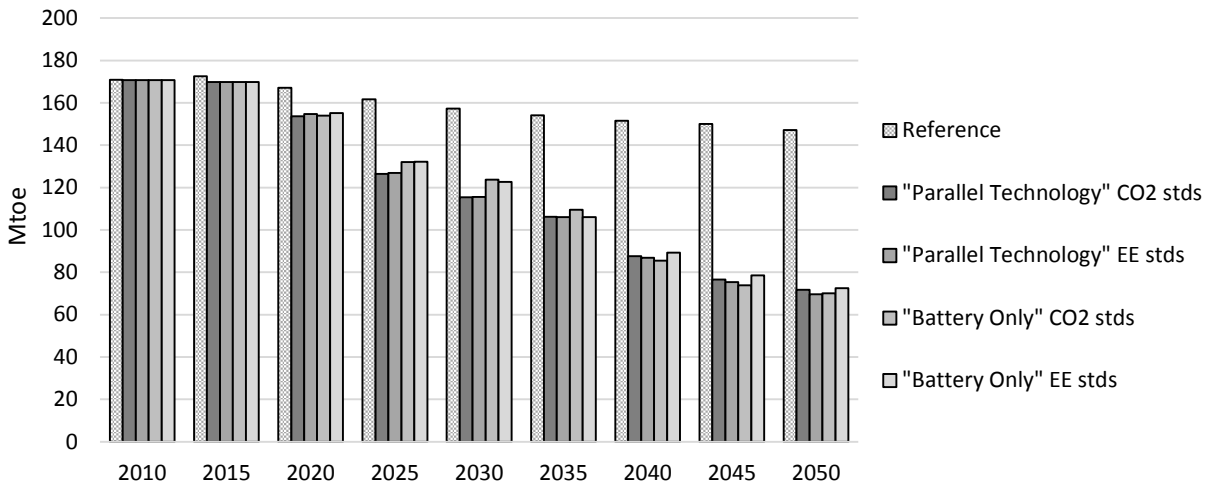
Η δομή του στόλου των αυτοκινήτων σε όλα τα σενάρια εξηλεκτρισμού επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από την εφαρμογή των πολύ αυστηρών μέτρων πολιτικής. Το μοντέλο καθορίζει τα μερίδια των νέων τεχνολογιών στο σύνολο των νέων πωλήσεων αυτοκινήτων υπό τον περιορισμό των εφαρμοζόμενων πολιτικών. Το μοντέλο υπολογίζει ενδογενώς παράγοντες ποινής οι οποίοι υπεισέρχονται στο δείκτη κόστους κάθε τεχνολογίας. Οι παραπάνω παράγοντες ποινής εκφράζονται σε μονάδες €/ km και διαφέρουν με βάση το είδος της πολιτικής που εφαρμόζεται. Ο Πίνακας 6-10 παρουσιάζει τις τιμές αυτές για τη χρονιά 2050 για το σενάριο «Parallel Technology». Ενδιαφέρον παρουσιάζει η τιμή του παράγοντα ποινής για τα αυτοκίνητα με κυψέλη υδρογόνου στο σενάριο εφαρμογής πολιτικής EE standards. Πράγματι, σε αυτήν την περίπτωση ο παράγοντας ποινής είναι οριακά υψηλότερος απ' ότι των υβριδικών με καλώδιο. Ωστόσο, στην περίπτωση εφαρμογής πολιτικής CO₂ standards, ο παράγοντας ποινής είναι μηδενικός όπως και των ηλεκτρικών με μπαταρία.

Πίνακας 6-10: Παράγοντες ποινής (€/ km) στο σενάριο “*Parallel Technology*” με πολιτική CO₂ και EE standards

	CO ₂ STANDARDS	EE STANDARDS
Gasoline	0.43	0.79
Gasoline Hybrid	0.28	0.51
Diesel	0.34	0.58
Diesel Hybrid	0.28	0.48
LPG	0.35	0.87
CNG	0.40	0.74
Short electric range Plug-in Hybrid	0.18	0.41
Medium electric range Plug-in Hybrid	0.15	0.38
Long electric range Plug-in Hybrid	0.11	0.35
BEV	0	0
FCEV	0	0.47

6.4.2 Τελική κατανάλωση και συνολικές εκπομπές CO₂

Σε όλα τα σενάρια εξηλεκτρισμού παρατηρείται μια σημαντική διαφοροποίηση στην τελική ζήτηση για ενέργεια στον κλάδο των αυτοκινήτων σε σχέση με το σενάριο Reference. Πράγματι, η συνολική κατανάλωση ενέργειας μειώνεται κατά 24% και 52% το 2030 και το 2050 αντίστοιχα σε σχέση με το Reference σενάριο (Σχήμα 6-5). Η επιλογή πολιτικής CO₂ ή ενεργειακής απόδοσης για τα νέα αυτοκίνητα δεν επιφέρει σημαντική διαφοροποίηση όσον αφορά τα επίπεδα της συνολικής ζήτησης ενέργειας στο μακροχρόνιο ορίζοντα. Αυτή η δραστική μείωση της τελικής ενέργειας οφείλεται στη μεγάλη διείσδυση των ηλεκτροκινούμενων οχημάτων στην αγορά που είναι αρκετά πιο αποδοτικά σε σύγκριση με τα οχήματα εφοδιασμένα με κινητήρα εσωτερικής καύσης.



Σχήμα 6-5: Τελική κατανάλωση ενέργειας στην ΕΕ 27 στα εναλλακτικά σενάρια πολιτικής και στο σενάριο αναφοράς

Τα υγρά καύσιμα που σήμερα αποτελούν τη μερίδα του λέοντος στο ενεργειακό μίγμα της τελικής κατανάλωσης των αυτοκινήτων βλέπουν το μερίδιό τους να μειώνεται σημαντικά κυρίως προς το τέλος του χρονικού ορίζοντα του μοντέλου. Πράγματι, το μερίδιο αυτό μειώνεται από 97% το 2010 στο 50% περίπου το 2050. Αυτό οφείλεται κυρίως στην αύξηση της ζήτησης για ηλεκτρική ενέργεια κυρίως από το 2030 και έπειτα χάρη στην ολοένα και αυξανόμενη διείσδυση των ηλεκτρικών οχημάτων και των υβριδικών οχημάτων με καλώδιο. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του μοντέλου η ζήτηση για ηλεκτρική ενέργεια κορυφώνεται το 2050 όπου και αποτελεί το 30% της τελικής ζήτησης για ενέργεια στον κλάδο των αυτοκινήτων. Επίσης, εναλλακτικά καύσιμα όπως το φυσικό αέριο και το LPG σημειώνουν σημαντική αύξηση το 2020 και 2030 σε σχέση με τα επίπεδα του 2005. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του μοντέλου το μερίδιο αυξάνει στο 15% το 2030 και στη συνέχεια μειώνεται στο 9.5% το 2050. Αυτή η μείωση οφείλεται στο γεγονός ότι οι συμβατικές τεχνολογίες εσωτερικής καύσης μειώνονται δραστικά μετά το 2030 σαν αποτέλεσμα κυρίως της πολιτικής που θέτει όρια στις εκπομπές CO₂ των οχημάτων και στη γενικότερη προσπάθεια για μείωση των εκπομπών αερίων διοξειδίου του άνθρακα στον κλάδο των μεταφορών.

Τα πετρελαϊκά προϊόντα ενώ αποτελούν σήμερα το κύριο είδος καυσίμου του τομέα των μεταφορών, βλέπουν το μερίδιό τους να μειώνεται δραστικά με τη σημαντική διαφοροποίηση του στόλου των οχημάτων κυρίως μετά το 2030. Πράγματι, το μερίδιό τους μειώνεται στο 39% το 2050 (24 Mtoe σε ενέργεια) από το 87% το 2005. Παρ' όλο που το μερίδιό τους εξακολουθεί να είναι σημαντικό το 2050, ο στόλος των οχημάτων που κινείται με πετρελαϊκά προϊόντα εκείνη τη χρονική περίοδο είναι σημαντικά μικρότερος σε σχέση με τα ηλεκτρικά οχήματα καθώς τα τελευταία παρουσιάζουν αρκετά μεγαλύτερη ενεργειακή αποδοτικότητα. Επιπλέον, τα βιοκαύσιμα αποτελούν ένα επιπλέον εναλλακτικό καύσιμο με μηδενικές εκπομπές

αερίων διοξειδίου του άνθρακα στο επίπεδο της εξάτμισης. Πράγματι, στα πλαίσια της γενικότερης προσπάθειας για μείωση των εκπομπών CO₂, η κατανάλωση βιοκαυσίμων αυξάνει δραστικά σε όλη την περίοδο πρόβλεψης.

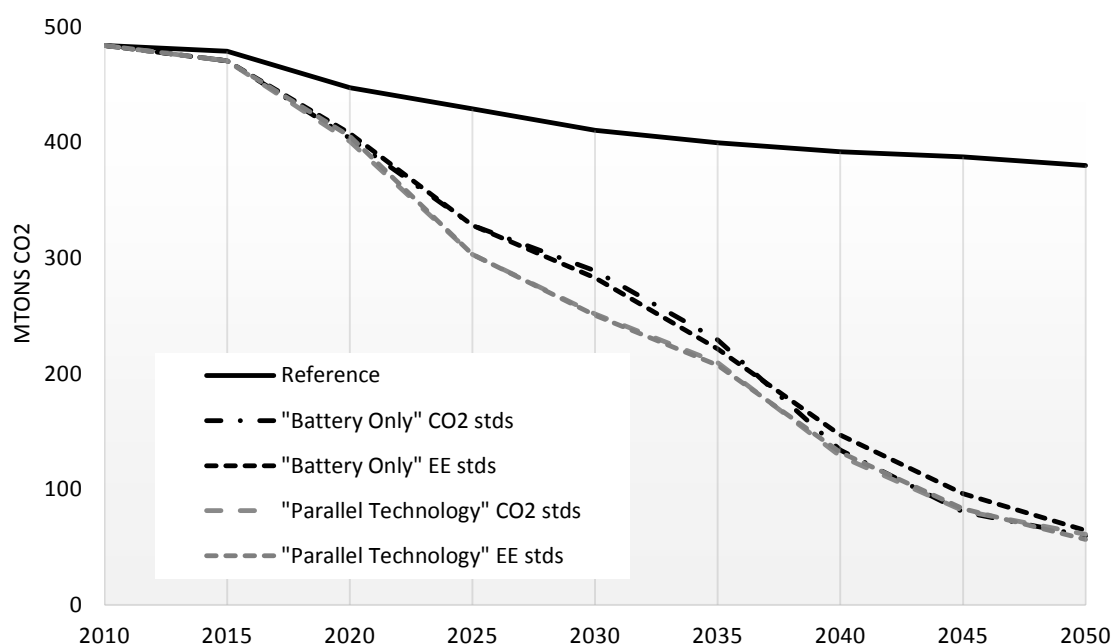
Η ανεξαρτησία του Ευρωπαϊκού συστήματος μεταφορών από τα πετρελαικά προϊόντα αποτελεί ιδιαίτερα σημαντικό επίτευγμα και είναι ένα πολύ σημαντικό πλεονέκτημα που της βαθιάς μείωσης των εκπομπών CO₂. Οι μηχανές εσωτερικής καύσης διατηρούν ένα μικρό ποσοστό της αγοράς το 2050 γεγονός που οφείλεται στην άνεση που προσφέρουν για πολύ μακρινά ταξίδια σε περιοχές με χαμηλή πυκνότητα σε διαθέσιμους σταθμούς φόρτισης ηλεκτρικών αυτοκινήτων. Το ένα τρίτο της ενέργειας που καταναλώνουν βασίζεται σε αναμεμιγμένα βιοκαύσιμα που θεωρούνται ότι παράγονται μέσω της διαδικασίας Fischer-Tropsch. Η κατανάλωση υδρογόνου αυξάνει σταδιακά μέχρι το 2050 στα σενάρια που υποθέτουν την εφαρμογή ρύθμισης εκπομπών CO₂ (Πίνακας 6-11). Η μέγιστη διείσδυση του υδρογόνου παρατηρείται στο σενάριο "Parallel Technology".

Πίνακας 6-11: Τελική κατανάλωση ενέργειας των επιβατικών αυτοκινήτων στην ΕΕ 27 ανά ενεργειακή μορφή στα επιμέρους σενάρια

<i>Mtoe</i>		Πετρελ αϊκά	Αέρια	Βιοκαύ σιμα	Υδρογόνο	Ηλεκτρική ενέργεια	Σύνολ ο
2010		156.4	6.1	6.1	-	-	168.6
	Reference	133.1	7.3	13.6	-	0.2	154.2
	"Parallel Technology" CO ₂ stds	124.6	12.8	14.5	0.2	1.5	153.6
2020	"Parallel Technology" EE stds	126.0	12.8	14.2	0.2	1.4	154.7
	"Battery Only" CO ₂ stds	125.5	12.8	14.1	0.0	1.6	153.9
	"Battery only" EE stds	126.9	12.9	13.9	0.0	1.5	155.1
	Reference	116.1	7.2	15.5	-	1.1	140.0
	"Parallel Technology" CO ₂ stds	72.3	15.1	13.4	8.3	6.4	115.4
2030	"Parallel Technology" EE stds	71.9	15.0	14.0	8.3	6.3	115.5
	"Battery Only" CO ₂ stds	83.2	17.1	15.4	0.6	7.6	123.8
	"Battery only" EE stds	82.0	16.2	16.1	0.6	7.8	122.6
	Reference	106.2	7.0	15.3	-	3.2	131.8
	"Parallel Technology" CO ₂ stds	34.9	10.0	10.8	17.9	14.1	87.6
2040	"Parallel Technology" EE stds	38.7	6.9	12.1	9.9	19.3	86.9
	"Battery Only" CO ₂ stds	37.5	9.0	11.3	4.1	23.6	85.5
	"Battery only" EE stds	46.3	3.9	14.9	1.4	22.8	89.3
	Reference	100.7	6.7	14.6	-	4.4	126.3
	"Parallel Technology" CO ₂ stds	16.4	4.9	8.1	22.7	19.6	71.7
2050	"Parallel Technology" EE stds	19.1	0.0	8.8	6.6	35.2	69.6
	"Battery Only" CO ₂ stds	17.1	3.6	8.3	7.5	33.5	70.1
	"Battery only" EE stds	21.8	0.0	10.9	1.1	38.7	72.4

Όλα τα σενάρια που ποσοτικοποιούνται στο συγκεκριμένο κεφάλαιο, με την εξαίρεση του σεναρίου αναφοράς, επιτυγχάνουν παρόμοια μείωση των εκπομπών αερίου του θερμοκηπίου μέχρι το 2050. Οι κινητήριιοι μοχλοί για τη συγκεκριμένη μείωση των εκπομπών CO₂ αποτελούν τα τεχνολογικά όρια των ειδικών εκπομπών CO₂

και της ειδικής κατανάλωσης των αυτοκινήτων καθώς και η συνεπακόλουθη τεχνολογική εξέλιξη των προηγμένων τεχνολογιών. Πράγματι, οι εκπομπές CO₂ των αυτοκινήτων μειώνονται κατά 84% το 2050 σε σχέση με το σενάριο Αναφοράς και περίπου 88% σε σχέση με τα επίπεδα του 2010 (Σχήμα 6-6)



Σχήμα 6-6: Εκπομπές CO₂ των αυτοκινήτων στην ΕΕ 27 στα εναλλακτικά σενάρια και στο σενάριο αναφοράς

6.4.3 Σύγκριση κόστους σεναρίων

Σε γενικές γραμμές, τα εναλλακτικά σενάρια που αξιολογούνται συνεπάγονται υψηλότερο κόστος κεφαλαίου και χαμηλότερο μεταβλητό κόστος για τις μεταφορές μέσω επιβατικών αυτοκινήτων από ό, τι το σενάριο αναφοράς. Το κόστος κεφαλαίου αντιστοιχεί στη κόστος της αγοράς των αυτοκινήτων ενώ τα μεταβλητά κόστη αντιστοιχούν στο κόστος λειτουργίας του αυτοκινήτου. Το συνολικό ετήσιο κόστος μπορεί να υπολογιστεί αφού μετατραπεί το κόστος αγοράς των αυτοκινήτων σε ετήσιο κόστος κεφαλαίου. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιείται ένα επιτόκιο προεξόφλησης το οποίο αντανάκλα το κόστος ευκαιρίας των ίδιων κεφαλαίων των καταναλωτών. Το προεξοφλητικό επιτόκιο που χρησιμοποιείται δεν είναι ταυτόσημο με τα επιτόκια δανεισμού των τραπεζών γενικά για την αγορά του αυτοκινήτου, που βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στις διαθέσιμες αποταμιεύσεις των καταναλωτών. Έτσι, η τιμή του προεξοφλητικού επιτοκίου ουσιαστικά αντικατοπτρίζει το κόστος ευκαιρίας των αποταμιεύσεων των καταναλωτών και έχουν ένα υποκειμενικό χαρακτήρα, καθώς

γίνεται η σύγκριση μεταξύ δύο διαφορετικών τύπων αυτοκινήτων με σημαντικές διαφορές στο κόστος απόκτησης αλλά και με διαφορές στο κόστος μετακίνησης.

Έρευνες που δημοσιεύθηκαν στην βιβλιογραφία εκτιμούν ότι αυτό το υποκειμενικό επιτόκιο προεξόφλησης σε τέτοιες αποφάσεις που συνεπάγονται σημαντική εκταμίευση ιδίων κεφαλαίων από τους καταναλωτές, μπορεί να είναι πολύ υψηλό. Στατιστικές αναλύσεις ερωτηματολογίων αναδεικνύουν ισχυρή αντίστροφη συσχέτιση μεταξύ των υποκειμενικών επιτοκίων αναγωγής και του εισοδήματος. Κατά συνέπεια, καταναλωτές με χαμηλό εισόδημα έχουν χαμηλότερες αποταμιεύσεις και πιο δύσκολη πρόσβαση σε ταμειακές ροές σε σχέση με καταναλωτές με υψηλά εισοδήματα. Το εύρος τιμών των επιτοκίων αυτών κυμαίνεται μεταξύ 8% και 22% (Train, 1985, Dreyfus και Viscusi, 1995, Andersson, 2005). Το υποκειμενικό επιτόκιο προεξόφλησης είναι δυνατό να περιλαμβάνει μια επιπλέον προσαύξηση (risk premium) που εκφράζει παράγοντες κινδύνου και ρίσκου που αφορούν κυρίως νέες τεχνολογίες όπως τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα που δεν έχουν δοκιμαστεί επαρκώς στην αγορά όπως τα συμβατικά αυτοκίνητα. Για τη μετατροπή του κόστους κεφαλαίου σε ισοδύναμη ετήσια δαπάνη θεωρήθηκε ότι η τιμή του υποκειμενικού προεξοφλητικού επιτοκίου είναι ίση με 17,5% που είναι εντός του εύρους των τιμών που χρησιμοποιούνται από Brand et al. (2012) καθώς και από τους Enzler et al. (2014).

Συνεπώς, το ετήσιο ισοδύναμο συνολικό κόστος δεν αντιπροσωπεύει επακριβώς πραγματικές πληρωμές αλλά παρουσιάζει το συνολικό κόστος όπως το αντιλαμβάνεται ο μέσος καταναλωτής. Κατ' αυτόν τον τρόπο οι υπολογιζόμενες δαπάνες απεικονίζουν τη δυσκολία της μετατροπής από ένα σύστημα έντασης μεταβλητού κόστους σε ένα σύστημα έντασης κεφαλαίου (Paltshen και Capros, 2013). Όλα τα εναλλακτικά σενάρια συνεπάγονται υψηλότερο σωρευτικό ολικό ετήσιο ισοδύναμο κόστος σε σύγκριση με το σενάριο αναφοράς. Τα εναλλακτικά σενάρια επιφέρουν μια μέση αύξηση του ετήσιου κόστους κεφαλαίου ανά έτος περίπου 46 δισεκατομμύρια ευρώ σε σχέση με το σενάριο αναφοράς μέχρι το 2030 και μια μέση εξοικονόμηση 27 δισεκατομμύρια ευρώ σε μεταβλητό κόστος ανά έτος σε σχέση με την αναφορά. Το συνολικό καθαρό επιπλέον ετήσιο κόστος προκύπτει περίπου 19 δισεκατομμύρια ευρώ ανά έτος σε σχέση με το σενάριο αναφοράς. Κατά την περίοδο 2030-2050, τα εναλλακτικά σενάρια επιφέρουν μια αύξηση του ετήσιου κόστους κεφαλαίου 193 δισεκατομμύρια ευρώ ετησίως και μια εξοικονόμηση 160 δισεκατομμύρια ευρώ ετησίως σε μεταβλητό κόστος. Το συνολικό καθαρό επιπλέον ετήσιο κόστος που προκύπτει είναι 33 δισεκατομμύρια ευρώ επιπλέον του σεναρίου αναφοράς.

Η σύγκριση του κόστους μεταξύ των εναλλακτικών σεναρίων δείχνει ότι υπάρχουν μικρές διαφορές στο συνολικό ετήσιο ισοδύναμο κόστος μέχρι το 2030. Οι διαφορές μεταξύ των σεναρίων αυξάνονται δραστικά μετά το 2030 και μέχρι το 2050. Τα σενάρια όπου έχει εφαρμοστεί πολιτική με όρια CO₂ είναι σημαντικά πιο δαπανηρά απ' ό,τι τα σενάρια που υποθέτουν τεχνολογικά όρια ΕΕ. Πράγματι, οι διαφορές στο σωρευτικό κόστος κυμαίνονται μεταξύ 50 και 100% μέχρι το 2050. Το σενάριο «battery only» είναι πιο δαπανηρό απ' ό,τι το «parallel technology» κατά 13% όταν έχουν

υποτεθεί και στα δύο σενάρια τεχνολογικά όρια CO₂. Στην περίπτωση που εφαρμόζονται τεχνολογικά όρια ΕΕ, συμβαίνει το αντίστροφο, με το σενάριο «parallel technology» να είναι ακριβότερο κατά 17% σε σχέση με το «battery only» σενάριο.

Δύο παράγοντες εξηγούν τις διαφορές κόστους μεταξύ των εναλλακτικών σεναρίων: η δομή του στόλου των αυτοκινήτων που εξαρτάται από την επιλογή της συγκεκριμένης πολιτικής και ο βαθμός προσέγγισης της πλήρους αξιοποίησης της δυνατότητας μείωσης του κόστους των νέων τεχνολογιών. Τα όρια εκπομπών CO₂ ευνοούν μακροπρόθεσμα τα ηλεκτρικά οχήματα με μπαταρία και τα οχήματα με κυψέλες καυσίμου υδρογόνου εις βάρος των υβριδικών αυτοκινήτων. Τα αυτοκίνητα με κυψέλη καυσίμου υδρογόνου διατηρούν ένα ορισμένο μερίδιο αγοράς, ιδιαίτερα στο τμήμα της εκείνο που απαιτούνται μακρινά ταξίδια. Ωστόσο, οι τεχνολογίες αυτές στο σενάριο «battery only» είναι σημαντικά πιο ακριβές στο κόστος κτήσης σε σχέση με άλλες τεχνολογίες οι οποίες όμως είναι λιγότερο συμβατές με τα αυστηρά πρότυπα εκπομπών CO₂.

Στην εναλλακτική περίπτωση που εφαρμόζονται όρια ΕΕ, παρατηρείται μια σημαντική προώθηση των ηλεκτρικών οχημάτων με μπαταρία καθώς και των υβριδικών οχημάτων με καλώδιο έναντι των οχημάτων με κυψέλη καυσίμου υδρογόνου. Τα υβριδικά οχήματα με καλώδιο αποτελούν μια εναλλακτική τεχνολογία που είναι σημαντικά φτηνότερη από αυτή της κυψέλης καυσίμου υδρογόνου και που επίσης μπορεί να καλύψει ταξίδια μεγάλων αποστάσεων. Επιπλέον, τα όρια ΕΕ που ευνοούν μόνο την τεχνολογία της μπαταρίας επιτρέπουν υψηλότερη συγκέντρωση του R&D και των βιομηχανικών επενδυτικών πόρων στον κλάδο των μπαταριών. Στην περίπτωση που εφαρμόζεται πολιτική με όρια CO₂, οι επενδυτικοί πόροι είναι πιο διαφοροποιημένοι μεταξύ των διαφορετικών τεχνολογιών των μπαταριών και κυψελών καυσίμου υδρογόνου. Αυτή η διαφοροποιημένη εφαρμογή του R&D σε διάφορες τεχνολογίες συνεπάγεται υψηλότερες μειώσεις στο τελικό κόστος των μπαταριών στην περίπτωση που εφαρμοστούν όρια ΕΕ σε σχέση με την εφαρμογή ορίων στις εκπομπές CO₂. Ως εκ τούτου, και για τους δύο λόγους, η εφαρμογή πολιτικής CO₂ ενδέχεται να είναι πιο δαπανηρή απ' ό,τι η πολιτική ΕΕ από τη σκοπιά του καταναλωτή στο πλαίσιο των σεναρίων της παρούσας διατριβής.

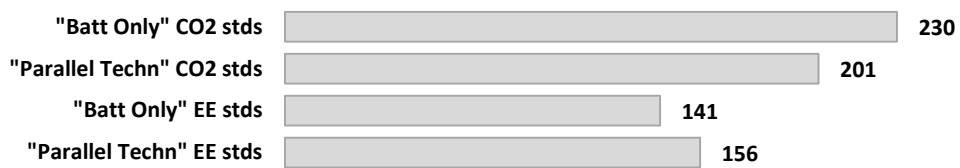
Υποθέτοντας ότι επιτυγχάνεται η μείωση του κόστους τόσο των μπαταριών όσο και των κυψελών καυσίμου υδρογόνου, αυτό συνεπάγεται χαμηλότερο συνολικό κόστος σε σχέση με την περίπτωση όπου επιτυγχάνεται μείωση μόνο των μπαταριών. Αυτό επιβεβαιώθηκε κατά τη σύγκριση του συνολικού κόστους μεταξύ των σεναρίων "battery only" και "parallel technology", υπό την παραδοχή ορίων εκπομπών CO₂. Ωστόσο, όταν εφαρμόζονται τα όρια ΕΕ, το σενάριο "battery only" είναι λιγότερο δαπανηρό από ό,τι το "parallel technology" σενάριο, παρά το γεγονός ότι στο δεύτερο σενάριο το κόστος της τεχνολογίας της κυψέλης καυσίμου υδρογόνου έχει μειωθεί δραστικά. Όπως φάνηκε από τα αποτελέσματα του σεναρίου "parallel technology" με υπόθεση ορίων ΕΕ, τα οχήματα υδρογόνου τελικά κατακτούν ένα περιορισμένο μερίδιο της αγοράς και συνεπώς έχουν μικρή επίπτωση στο συνολικό κόστος. Ωστόσο, τα όρια ΕΕ προωθούν συγκεκριμένα τις μπαταρίες και κατά συνέπεια η υπόθεση ότι οι

μπαταρίες κυριαρχούν στο σενάριο "battery only", συνεπάγεται ότι οι μπαταρίες επιτυγχάνουν το χαμηλότερο δυνατό κόστος μεταξύ όλων των εναλλακτικών σεναρίων. Φυσικά τα σενάρια που ποσοτικοποιήθηκαν προσομοιώνουν την πρόοδο της τεχνολογίας με ένα ντετερμινιστικό τρόπο και τείνουν να αγνοήσουν κόστη που προκύπτουν στην πραγματικότητα για σκοπούς αντιστάθμισης κινδύνου και για τη διατήρηση του R&D και της βιομηχανικής δραστηριότητας σε περισσότερες από μία τεχνολογίες όσο η κυριαρχία της μία από τις τεχνολογίες δεν είναι ακόμη επαρκώς εξασφαλισμένη. Συνεπώς, η πραγματοποίηση ενός σεναρίου "battery only" σε συνδυασμό με την υπόθεση ορίων ΕΕ που θα επιτρέψει τη συγκέντρωση όλων των πόρων προς την ανάπτυξη μιας συγκεκριμένης τεχνολογίας και την επίτευξη της μεγαλύτερης δυνατής προόδου, προϋποθέτει τέλεια πρόβλεψη και προνοητικότητα από τους εμπλεκόμενους φορείς.

Ο υπολογισμός των σωρευμένων ετήσιων δαπανών στα παραπάνω σενάρια έχει υποθέσει ένα πολύ μικρό επιτόκιο αναγωγής. Αυτό το επιτόκιο αναγωγής για τα συσσωρευμένα κόστη είναι διαφορετικό από το υποκειμενικό προεξοφλητικό επιτόκιο που χρησιμοποιήθηκε για τη μετατροπή του κόστους κεφαλαίου των τεχνολογιών σε ετήσιες ισοδύναμες πληρωμές. Προκειμένου να υπολογιστεί το μέσο κόστος ανά τόνο εκπομπών CO₂ που αποφεύχθηκε σε κάθε σενάριο πολιτικής σε σχέση με το σενάριο αναφοράς, γίνεται συσσώρευση του ετήσιου συνολικού κόστους (το οποίο είναι το άθροισμα του ετήσιου ισοδύναμου κόστους κεφαλαίου και του ετήσιου μεταβλητού κόστους) χρησιμοποιώντας ένα μη-μηδενικό προεξοφλητικό επιτόκιο που μπορεί να ερμηνευθεί ως κοινωνικό προεξοφλητικό επιτόκιο. Η επιλογή του προεξοφλητικού επιτοκίου είναι σημαντική για τη σύγκριση εναλλακτικών επιλογών που μπορούν να επιφέρουν δραστική μείωση των εκπομπών CO₂ στα πλαίσια της αντιμετώπισης της κλιματικής αλλαγής, έχουν μακροχρόνιο ορίζοντα εφαρμογής και διαφορετικό προφίλ ετήσιου κόστους μέσα στο χρόνο (Beckerman and Herburn, 2007). Οι υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση ενός κοινωνικού προεξοφλητικού επιτοκίου δ ίσο με 3%. Ως εκ τούτου:

$$\text{Μέσο κόστος ανά μονάδα εκπομπών CO}_2 \text{ που αποφεύχθηκε} = \frac{\sum_{t=1}^T \gamma^t \cdot \Delta C_t}{\sum_{t=1}^T \gamma^t \cdot \Delta CO_{2t}} \quad (6-1)$$

Όπου $\gamma = 1/(1 + \delta)$ και ΔC και ΔCO_2 αντιπροσωπεύουν τις μεταβολές του ετήσιου κόστους και των εκπομπών CO₂ που αποφεύχθηκαν σε σχέση με το σενάριο αναφοράς για κάθε χρονική περίοδο t . Το μέσο κόστος ανά μονάδα εκπομπών CO₂ που αποφεύχθηκε κυμαίνεται μεταξύ 141 and 230 EUR/ton CO₂ (Σχήμα 6-7).



Σχήμα 6-7: Μέσο κόστος αποφυγής εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (EUR/ton CO₂)

6.5 Συζήτηση και περαιτέρω διερεύνηση

Οι φιλόδοξοι στόχοι που έχουν τεθεί από την ΕΕ για τη δραστική μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα στον τομέα των μεταφορών έως το 2050 απαιτεί άμεση δράση από τους φορείς χάραξης πολιτικής. Η ΕΕ έχει ήδη εγκρίνει το στόχο των 95 gCO₂/km για τους κατασκευαστές αυτοκινήτων για το 2020, ο οποίος είναι δυνατό να επιτευχθεί με την πώληση των ήδη υπάρχουσών τεχνολογιών όπως τα υβριδικά και τα οχήματα ντίζελ. Ωστόσο, για να αυξηθεί η αγορά των υβριδικών οχημάτων, θα πρέπει να επεκταθεί σε ένα ευρύτερο αγοραστικό κοινό που δε θα περιλαμβάνει μόνο τους πρώιμους καταναλωτές (early adopters) σύμφωνα με τους Ozaki και Sevastyanova (2011).

Σύμφωνα με τα σενάρια που αναλύονται στην παρούσα διατριβή, τα υιοθετημένα τεχνολογικά όρια που έχουν υποτεθεί οδηγούν την ανάπτυξη της τεχνολογίας και την εμπορικής ωριμότητά τους, τα οποία δίνουν τη δυνατότητα και αποτελούν ευνοϊκούς όρους για την επίτευξη φιλόδοξων μακροπρόθεσμων στόχων μείωσης των εκπομπών CO₂. Ως εκ τούτου, οι πολιτικές αυτές που θέτουν τεχνολογικά όρια είτε στις ειδικές εκπομπές CO₂ είτε στην ειδική κατανάλωση ενέργειας για τα αυτοκίνητα θα πρέπει να είναι ολοένα και πιο αυστηρά και να κινηθούν σε αρκετά πιο χαμηλά επίπεδα στο μακροχρόνιο ορίζοντα. Αυτές οι αυστηρές μακροχρόνιες προδιαγραφές και τα τεχνολογικά όρια δεν μπορούν να καλυφθούν με τις υπάρχουσες τεχνολογίες (Gerard και Lave, 2005) και συνεπώς θα υποκινήσουν βαθιά τεχνολογική μεταστροφή του στόλου των αυτοκινήτων. Η τελευταία αναμένεται να επιφέρει σημαντική μείωση των εκπομπών CO₂ και περιορισμό του κοινωνικού κόστους που σχετίζεται με τα εξωτερικά κόστη (Funk και Rabl, 1999).

Η αποτελεσματικότητα των τεχνολογικών ορίων όσον αφορά το βαθύ τεχνολογικό μακροπρόθεσμο μετασχηματισμό του στόλου των οχημάτων εξαρτάται ασφαλώς από το αν οι κατασκευαστές αυτοκινήτων θα διαθέσουν σημαντικούς πόρους για την επίτευξη σημαντικών οικονομικών κλίμακας και την απαραίτητη μείωση του κόστους των εναλλακτικών οχημάτων όπως τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα. Η διάθεση σημαντικών κεφαλαιουχικών πόρων ασφαλώς εξαρτάται από την προσημονία των ολοένα και αυστηρότερων τεχνολογικών ορίων. Οι δυνατότητες της τεχνολογικής προόδου σε απάντηση των αυστηρότερων τεχνολογικών ορίων καθώς και οι επιπτώσεις της ρυθμιστικής αβεβαιότητας αναμένεται να επιφέρουν επιπτώσεις στην κοινωνική ευημερία των μετακινουμένων. Πράγματι, υπάρχουν διαφορετικές απόψεις στη βιβλιογραφία όσον αφορά το γεγονός εάν τα πρότυπα αποτελούν την καλύτερη στρατηγική. Όπως αναφέρθηκε στην ενότητα της παρουσίασης των αποτελεσμάτων τα αυστηρά τεχνολογικά όρια «επιλέγουν» νικήτριες τεχνολογίες ανάμεσα στις διάφορες διαθέσιμες εναλλακτικές τεχνολογίες. Κατά συνέπεια, στην περίπτωση που τα αυστηρά όρια οδηγήσουν σε λιγότερο αποδοτικές επιλογές ή σε τεχνολογίες που δεν έχουν καταφέρει την επίτευξη οικονομικών κλίμακας μπορεί να επιφέρει αρνητικές επιπτώσεις στους καταναλωτές. Το γεγονός αυτό θα οφείλεται στην εξαναγκαστική είσοδο στην αγορά ακριβότερων τεχνολογιών που θα έχουν αργήσει να πετύχουν

τεχνολογική ωριμότητα και θα απαιτήσουν σημαντικές δαπάνες από τους καταναλωτές έτσι ώστε να μπορούν να συνεχίσουν να μετακινούνται με ιδιωτικά μέσα μεταφοράς.

Στρατηγικές που βασίζονται στην τιμολόγηση όπως η τιμολόγηση του άνθρακα (μέσω επιβολής φόρου ή εμπορεύσιμων αδειών) παρέχουν μια πιο γενικευμένη υποστήριξη για R&D των νέων τεχνολογιών, Ωστόσο, τέτοιες πολιτικές μπορεί να είναι πιο αποτελεσματικές θεωρώντας ότι ο ιδιωτικός τομέας είναι καταλληλότερος για την ανάπτυξη εκείνων των τεχνολογιών που έχουν πραγματική δυνατότητα εξέλιξης για μαζική είσοδο στην αγορά. Η εναλλακτική άποψη είναι ότι το κύριο πρόβλημα όσον αφορά την ενεργειακή καινοτομία έγκειται στην «κοιλιάδα του θανάτου» (valley of death), δηλαδή το χάσμα μεταξύ της έρευνας και της εμπορικής ανάπτυξης που διογκώνεται όταν εξακολουθούν να υφίστανται εμπόδια στην αγορά. Για να γεφυρωθεί το χάσμα της «κοιλιάδας του θανάτου», πρέπει να διοχετευθούν οικονομικοί πόροι με επικεντρωμένο τρόπο σε στοχευμένες τεχνολογίες που θα είναι δυνατό μόνο εάν βελτιωθεί η προβλεψιμότητα των φορέων της αγοράς και των κατασκευαστών οχημάτων. Υπό αυτό το πρίσμα, η αναγκαία προβλεψιμότητα των μελλοντικών στόχων μπορεί να επιτευχθεί μέσω της υιοθέτησης μακροπρόθεσμων τεχνολογικών ορίων (με ορίζοντα 10 χρόνων) που θα βελτιώνουν τις πιθανότητες των κατασκευαστών να επιτύχουν οικονομίες κλίμακας.

Τα σενάρια που σχεδιάστηκαν στα πλαίσια της παρούσας διατριβής επιβεβαιώνουν τους παραπάνω ισχυρισμούς. Πράγματι, εντοπίστηκαν τα οριακά επίπεδα των τεχνολογικών ορίων που είναι δυνατό να επιφέρουν τη μεταστροφή του στόλου προς ένα μείγμα με υψηλά ποσοστά ηλεκτρικών οχημάτων και οχημάτων με κυψέλες καυσίμου υδρογόνου. Αυτή η δυναμική διαδικασία κατά την οποία οι κατασκευαστές οχημάτων αναμένουν τα μελλοντικά αυστηρότερα τεχνολογικά όρια ενδέχεται να οδηγήσει σε μεγαλύτερη και πιο στοχευμένη αξιοποίηση των οικονομικών πόρων όσον αφορά την τεχνολογική ωριμότητα των νέων τύπων αυτοκινήτων που θα είναι οικονομικά προσιτά στους καταναλωτές. Σύμφωνα με τα σεναριακά αποτελέσματα και οι δύο τύποι ορίων μπορούν να υποστηρίξουν τη μετάβαση σε ένα βιώσιμο σύστημα μεταφορών με χαμηλές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα χάρη στην πρόοδο της τεχνολογίας. Ωστόσο, η επιτυχημένη εισαγωγή των νέων τεχνολογιών εξαρτάται από την προϋπόθεση του επιτυχημένου συντονισμού της αγοράς της αυτοκινητοβιομηχανίας με τη βιομηχανία καυσίμων και τον κλάδο κατασκευής υποδομών ανεφοδιασμού και φόρτισης. Οι καταναλωτές αναμένοντας την ισχυρή πρόοδο της τεχνολογίας και την έγκαιρη ανάπτυξη των υποδομών φόρτισης και ανεφοδιασμού αναμένεται να αποδεχτούν ολοένα και ευκολότερα νέες τεχνολογίες που σήμερα χαρακτηρίζονται από χαμηλή αποδοχή σύμφωνα με τον Ziegler (2012).

Τα όρια εκπομπών CO₂ αποτελούν ένα είδος πολιτικής που αντιμετωπίζει με ουδετερότητα τα διαφορετικά εναλλακτικά καύσιμα και ευνοεί τις τεχνολογίες εκείνες που χρησιμοποιούν φορείς ενέργειας με χαμηλές άμεσες εκπομπές CO₂ σε επίπεδο TTW, όπως τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα με μπαταρία και τα οχήματα με κυψέλη καυσίμου, που λειτουργούν με ηλεκτρική ενέργεια και υδρογόνο, αντίστοιχα. Η σταδιακή εφαρμογή

αυστηρότερων ορίων εκπομπών CO₂ εξαναγκάζει τα συμβατικά οχήματα που είναι εξοπλισμένα με κινητήρα εσωτερικής καύσης σε σταδιακή έξοδο από την αγορά και αντίστοιχα αυξάνει το μερίδιο αγοράς των προηγμένων τεχνολογιών οχημάτων, συμπεριλαμβανομένων των υβριδικών με καλώδιο, των ηλεκτρικών με μπαταρία και των οχημάτων υδρογόνου.

Στον βραχυπρόθεσμο ορίζοντα, τα υβριδικά με καλώδιο εισέρχονται στην αγορά σε υψηλότερη κλίμακα σε σχέση με άλλες προηγμένες τεχνολογίες, γεγονός που επιβεβαιώνεται από τους Plotz et al. (2014), οι οποίοι αναφέρουν ότι η πρώιμη είσοδος αυτής της τεχνολογίας στην αγορά ενδέχεται να είναι περισσότερο συμφέρουσα τόσο για τους καταναλωτές όσο και για τους κατασκευαστές, τουλάχιστον στην περίπτωση της Γερμανίας. Όταν η αυστηρότητα των κριτηρίων εκπομπών CO₂ ξεπερνάει ένα συγκεκριμένο όριο τιμών (περίπου 40-50 gCO₂/km), είναι αρκετό για να επιφέρει μια σημαντική ανάπτυξη και είσοδο στην αγορά προηγμένων τεχνολογιών οχημάτων (Πίνακας 6-12). Το συμπέρασμα αυτό με βάση τα αποτελέσματα του μοντέλου είναι σύμφωνο με τη μελέτη των Gibson και Hill (2012) η οποία αναφέρει ότι ο στόχος των 60 gCO₂/km θα πρέπει να ικανοποιείται κυρίως με προηγμένες τεχνολογίες οχημάτων, όπως τα ηλεκτρικά οχήματα. Οι συμβατικές τεχνολογίες που κάνουν χρήση βιοκαυσίμων μπορούν επίσης να πληρούν πολύ αυστηρά όρια εκπομπών CO₂. Το μοντέλο έχει τη δυνατότητα να ενσωματώνει και αυτήν την περίπτωση, ωστόσο η εμπορική επιτυχία των βιοκαυσίμων στο μέλλον εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την αβέβαιη ανάπτυξη της γεωργίας προς μαζική και φθηνή λιγνοκυτταρινούχα πρώτη ύλη, καθώς και από την εμπορική ωριμότητα των βιο-διυλιστηρίων με βάση τη διεργασία Fischer-Tropsch ή άλλες παρεμφερείς διαδικασίες.

Η πολιτική που θέτει όρια στην ενεργειακή απόδοση των οχημάτων αποδεικνύεται ότι είναι υπέρ των τεχνολογιών που έχουν υψηλή ενεργειακή απόδοση (ή εναλλακτικά χαμηλή ειδική κατανάλωση ενέργειας). Ένα σημαντικό εύρημα από την ποσοτικοποίηση των σεναρίων έγκειται στο γεγονός ότι τα αυστηρά πρότυπα ενεργειακής απόδοσης ευνοούν αποδοτικές τεχνολογίες, όπως τα ηλεκτρικά οχήματα με μπαταρία ή τα υβριδικά με καλώδιο, αλλά μπορεί να παρεμποδίσουν την ευρεία διείσδυση των οχημάτων υδρογόνου στο μακροπρόθεσμο ορίζοντα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα ηλεκτρικά οχήματα καθώς και τα υβριδικά με καλώδιο (ιδιαίτερα εκείνα με υψηλή χωρητικότητα μπαταρίας και κατά συνέπεια μεγαλύτερη ηλεκτρική αυτονομία έναντι του θερμικού κινητήρα) έχουν σαφώς μικρότερη ειδική κατανάλωση καυσίμου σε σχέση με την τεχνολογία της κυψέλης καυσίμου υδρογόνου. Τα υβριδικά με καλώδια παρ' όλο που είναι επιπλέον εξοπλισμένα με κινητήρα εσωτερικής καύσης, είναι δυνατό να έχουν εφάμιλλη ειδική κατανάλωση με τα οχήματα κυψέλης υδρογόνου χάρη στη χρήση του ηλεκτρικού κινητήρα που εξασφαλίζουν σημαντικά χαμηλότερη ειδική κατανάλωση καυσίμου. Επιπλέον, τα αυστηρά όρια ενεργειακής απόδοσης, όπως και τα όρια εκπομπών CO₂, είναι δυνατό να μειώσουν δραστικά το μερίδιο των συμβατικών τεχνολογιών στην αγορά, ακόμα κι αν αυτά χρησιμοποιούν βιοκαύσιμα. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των σεναρίων, η εφαρμογή ορίων ενεργειακής απόδοσης σε επίπεδα κάτω του 2,4 l/100km ενδέχεται να σταματήσει τη μαζική

διείσδυση των οχημάτων υδρογόνου και των συμβατικών οχημάτων με θερμικούς κινητήρες, ακόμα και αν οι κυψέλες καυσίμου πετύχουν σημαντική μείωση του κεφαλαιουχικού τους κόστους, γεγονός που δε συμβαίνει στην περίπτωση που έχουν τεθεί όρια εκπομπών CO₂ (Πίνακας 6-12).

Πίνακας 6-12: Συγκριτικό πλεονέκτημα τεχνολογιών αυτοκινήτων υπό διαφορετικά ρυθμιστικά πλαίσια

	Range limitation	Less stringent CO ₂ standards (> 50gCO ₂ /km)	Stringent CO ₂ standards (20-50gCO ₂ /km)	Less stringent EE standards (>2.4 l/100km)	Stringent EE standards (<2.4 l/100km)
BEV	Limited but depending on infrastructure	++	+++	++	+++
FCEV	Unlimited but depending on infrastructure	++	+++	++	+
PHEV¹	High-range	++	++	++	++
	Mid-range	++	+	++	+
	Low-range	+	-	++	-
Hybrid ICE	No range limit	+	-	+	-
ICE with mineral oil	No range limit	-	-	-	-
ICE with pure biofuels	No range limit	++	+++	-	-
ICE with CNG and LPG	No range limit	+	-	-	-

Το πλήθος των “+” και “-” υποδεικνύει το συγκριτικό πλεονέκτημα ή μειονέκτημα μεταξύ των εναλλακτικών τεχνολογιών/ καυσίμων
¹ High range: εύρος ηλεκτρικής αυτονομίας 60-80 χλμ. Mid-range: εύρος ηλεκτρικής αυτονομίας 40-60 χλμ. Low-range: εύρος ηλεκτρικής αυτονομίας 30 χλμ.

Η επιλογή ορίων ενεργειακής απόδοσης σε επίπεδα κάτω από ένα κατώτατο όριο παύει να τα καθιστά πλέον ουδέτερα καθώς είναι φανερό, με βάση τα αποτελέσματα των σεναρίων, ότι «επιλέγουν» τη νικήτρια τεχνολογία και το καύσιμο που θα επικρατήσει. Αντιθέτως, τα όρια εκπομπών CO₂ επιτρέπουν ένα πιο διαφοροποιημένο μείγμα τεχνολογιών και καυσίμων.

Η εφαρμογή συμπληρωματικών πολιτικών είναι πιθανό να αυξήσουν την αποτελεσματικότητα της πολιτικής των ορίων εκπομπών CO₂ και ενεργειακής αποδοτικότητας για τους κατασκευαστές αυτοκινήτων, στο πλαίσιο της συνολικής προσπάθειας για μείωση των εκπομπών CO₂ στον τομέα των μεταφορών. Η προώθηση προγραμμάτων απόσυρσης προς τους καταναλωτές για τα παλιά αυτοκίνητα πέραν κάποιας ηλικίας και η παροχή κινήτρων για την αγορά νέων οχημάτων θεωρούνται ότι

μπορούν να οδηγήσουν σε ταχύτερη ανανέωση του στόλου των οχημάτων και κατά συνέπεια σε αυξημένη διείσδυση των εναλλακτικών οχημάτων. Εξάλλου, η εσωτερίκευση του εξωτερικού κόστους της ατμοσφαιρικής ρύπανσης που είναι δυνατό να αντικατοπτριστεί ως μια αύξηση της τιμής των ορυκτών καυσίμων, είναι πιθανό να ωθήσει τους καταναλωτές να στραφούν σε πιο αποδοτικές τεχνολογίες ή προς εναλλακτικά αυτοκίνητα.

Η εφαρμογή ενός φόρου επί του άνθρακα, που θεωρείται ως μια μορφή Pigovian φόρου, είναι μια εναλλακτική πολιτική επιλογή η οποία έχει ως στόχο να αλλάξει τη συμπεριφορά των καταναλωτών όσον αφορά την ατμοσφαιρική ρύπανση και τις εκπομπές που σχετίζονται με την κλιματική αλλαγή. Πράγματι, ένας φόρος διοξειδίου του άνθρακα είναι πιθανό να υποκινήσει τους καταναλωτές προς τεχνολογικές επιλογές που φέρουν μικρότερο ανθρακικό αποτύπωμα. Ωστόσο, λαμβάνοντας υπόψη τα υψηλά επίπεδα των ειδικών φόρων κατανάλωσης της βενζίνης και ντίζελ στην ΕΕ, ο φόρος επί του άνθρακα θα πρέπει να αυξηθεί σε υψηλά επίπεδα για να επιφέρει παρόμοια μείωση των εκπομπών CO₂, με τις πολιτικές ορίων εκπομπών CO₂ ή της ενεργειακής αποδοτικότητας. Η θέσπιση πολύ υψηλής φορολογίας του άνθρακα μπορεί να οδηγήσει σε ρυθμιστική αβεβαιότητα και να θέσει υπό αμφισβήτηση την εφαρμογή της πολιτικής. Αντιθέτως, τα τεχνολογικά όρια θεωρούνται περισσότερο πολιτικά εφικτά, δεδομένου ότι είναι πιθανόν να συναντούν μόνο την αντίσταση των κατασκευαστών αυτοκινήτων και όχι τη δημόσια κατακραυγή όπως στην περίπτωση του φόρου διοξειδίου του άνθρακα (Koujianou Goldberg, 1996).

Και οι δύο πολιτικές τεχνολογικών ορίων που εξετάζονται αποτελούν αποτελεσματικά μέτρα πολιτικής όσον αφορά την υπερπήδηση εμποδίων που εμποδίζουν την πρόοδο της τεχνολογίας και την εισαγωγή νέων τεχνολογιών στην αγορά. Τα τεχνολογικά όρια έχουν σκοπό να βοηθήσουν στη μείωση της αβεβαιότητας και ως εκ τούτου να αυξήσουν την προβλεψιμότητα των κατασκευαστών αυτοκινήτων, γεγονός που θα τους επιτρέψει να αναλάβουν τις σημαντικές επενδύσεις που είναι απαραίτητες για την επίτευξη της τεχνολογικής προόδου. Υπό αυτήν την έννοια, τα τεχνολογικά όρια μπορούν να παρέχουν θετικές εξωτερικότητες (positive externalities) που θα προέρχονται από την πρόοδο της τεχνολογίας και την εισαγωγή της στην αγορά. Πράγματι, η υιοθέτηση αυστηρότερων τεχνολογικών ορίων, όπως προσδιορίζονται από την ανάλυση που παρουσιάζεται στην παρούσα ενότητα, μπορεί να υποκινήσει βαθιές αλλαγές της τεχνολογίας του στόλου των αυτοκινήτων.

Ωστόσο, οι νέες τεχνολογίες εξαρτώνται από δίκτυα υποδομών, όπως το δίκτυο σταθμών φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων καθώς και το δίκτυο διανομής υδρογόνου που πρέπει να αναπτυχθούν. Αντιθέτως, οι υπάρχουσες συμβατικές τεχνολογίες οχημάτων βασίζονται σε ένα αποκεντρωμένο και καλά ανεπτυγμένο δίκτυο υποδομών ανεφοδιασμού. Οι ιδιώτες που εμπλέκονται στην ανάπτυξη υποδομών ανεφοδιασμού και διανομής εναλλακτικών καυσίμων έχουν διαφορετικές προσδοκίες από τους κατασκευαστές αυτοκινήτων, αλλά και από τους προμηθευτές ενέργειας. Δεδομένου ότι η κατασκευή δικτύων χαρακτηρίζεται ως επένδυση υψηλής εντάσεως κεφαλαίου, οι επενδυτικές αποφάσεις απαιτούν προβλεψιμότητα της

μελλοντικής ανάπτυξης της αγοράς για την εξασφάλιση υψηλού βαθμού χρήσης των υποδομών που θα επιτρέψουν επιτρέπουν την ανάκτηση του αρχικού κεφαλαίου. Οι πολιτικές που θέτουν τεχνολογικά όρια στις εκπομπές CO₂ ή στην ενεργειακή αποδοτικότητα των αυτοκινήτων έχουν το πλεονέκτημα της βελτίωσης της προβλεψιμότητας τόσο για τους επενδυτές στην κατασκευή των υποδομών όσο και στους κατασκευαστές οχημάτων. Ο καλύτερος συντονισμός των εμπλεκόμενων φορέων θα εξασφαλίσει τον έγκαιρο και χαμηλότερου κόστους μετασχηματισμό του συστήματος των μεταφορών προς ένα βιώσιμο σύστημα.

Η επιλογή μεταξύ των τεχνολογικών ορίων αναφορικά με τις ειδικές εκπομπές CO₂ ή την ενεργειακή απόδοση αποτελεί ένα ερώτημα ενεργειακής πολιτικής που χαρακτηρίζεται από μεγάλη αβεβαιότητα κυρίως από την ετοιμότητα και την τεχνολογική ωριμότητα ή όχι των νέων τεχνολογιών. Τα τεχνολογικά όρια ενεργειακής απόδοσης φέρουν το μειονέκτημα ότι δεν είναι τεχνολογικά ουδέτερα, γεγονός που σημαίνει ότι ευνοούν ιδιαίτερα τις τεχνολογίες που βασίζονται σε μπαταρία αντί των κυψελών καυσίμου υδρογόνου. Η επιλογή τεχνολογικών ορίων ενεργειακής απόδοσης θα στείλει ένα σαφές μήνυμα προς την αυτοκινητοβιομηχανία να επικεντρωθεί στην παραγωγή ηλεκτρικών αυτοκινήτων αντί αυτοκινήτων υδρογόνου. Απεναντίας, τα όρια εκπομπών CO₂ επιτρέπουν ένα πιο διαφοροποιημένο ενεργειακό μείγμα που περιλαμβάνει και τους δύο τύπους τεχνολογιών. Υπό αυτό το πρίσμα, αποτελούν μια πιο ασφαλή πολιτική, σε αντίθεση με τα όρια ενεργειακής απόδοσης που βασίζονται σε μια μόνο τεχνολογία.

Η μεταστροφή του στόλου των αυτοκινήτων προς τις προηγμένες τεχνολογίες εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την επίτευξη σημαντικής μείωσης του κόστους των μπαταριών ή των κυψελών καυσίμου. Αναμφίβολα, και οι δύο τύποι τεχνολογίας χαρακτηρίζονται από ένα υψηλό ανεκμετάλλευτο δυναμικό, ωστόσο ορισμένες σημαντικές αβεβαιότητες εξακολουθούν να υφίστανται. Το κόστος της μπαταρίας μειώνεται με ταχύ ρυθμό, ιδιαίτερα τα τελευταία τέσσερα χρόνια μειώθηκε κατά το ήμισυ (1,000 \$/ kWh το 2008 σε 500-600 \$/kWh το 2012). Πέρα από τις μπαταρίες, η έρευνα εστιάζει στην περαιτέρω βελτίωση των αυτοκινήτων όπως μείωση του βάρους τους, γεγονός που θα προσδώσει μεγαλύτερο εύρος αυτονομίας. Αναφορικά με τα αυτοκίνητα υδρογόνου, σημαντικές έρευνες έχουν πραγματοποιηθεί τα τελευταία 20 χρόνια δίχως να σημειωθεί σημαντική πρόοδος. Αρκετές μελέτες ισχυρίζονται ότι είναι εφικτές απότομες καμπύλες εκμάθησης (McKinsey, 2010), παρ' όλ' αυτά η συγκεκριμένη τεχνολογία φαίνεται να χάνει το προβάδισμα έναντι των μπαταριών.

Αναφορικά με το κόστος συστήματος, τα σενάρια πολιτικής παρουσιάζουν μια ισχυρή στροφή προς τις κεφαλαιουχικές δαπάνες (CAPEX) έναντι των δαπανών που αντιστοιχούν στο κόστος καυσίμου. Το παραπάνω φαινόμενο οφείλεται στο γεγονός ότι το κεφαλαιουχικό κόστος των προηγμένων τεχνολογιών αυτοκινήτων είναι σημαντικά αυξημένο σε σχέση με τις σημερινές τεχνολογίες, ωστόσο προσφέρουν σημαντική εξοικονόμηση στην κατανάλωση ενέργειας που μειώνει τις δαπάνες για αγορά καυσίμου. Η στροφή προς υψηλότερες κεφαλαιουχικές δαπάνες, συνεπάγεται ότι οι καταναλωτές θα πρέπει να αποκτήσουν μεγαλύτερη πρόσβαση στη

χρηματοδότηση του κεφαλαίου. Στην πραγματικότητα, λόγω της μεγάλης ετερογένειας των καταναλωτών όσον αφορά το κατά κεφαλή εισόδημα, οι υψηλότερες ανάγκες για χρηματοδότηση θέτουν επιπλέον εμπόδια στις τάξεις των καταναλωτών με χαμηλό εισόδημα. Η παρούσα ανάλυση δε μελετάει τις συνέπειες του φαινομένου αυτού καθώς θεωρεί ότι οι αποφάσεις λαμβάνονται από έναν αντιπροσωπευτικό καταναλωτή. Στην πραγματικότητα, η εφαρμογή μέτρων πολιτικής και δράσεων του ιδιωτικού τομέα θα πρέπει να είναι σε θέση να αντιμετωπίσουν αυτό το φαινόμενο.

Τα αποτελέσματα της αξιολόγησης των σεναρίων φανερώνουν ότι τα τεχνολογικά όρια των εκπομπών CO₂ αποδεικνύονται πιο δαπανηρή επιλογή πολιτικής σε σχέση με τα όρια ενεργειακής απόδοσης. Ο υπολογισμός προκύπτει αξιολογώντας το επιπρόσθετο κόστος του συστήματος ανά μονάδα εκπομπών CO₂ που εξοικονομείται σε σχέση με το σενάριο αναφοράς. Τα αυστηρά τεχνολογικά όρια ενεργειακής απόδοσης οδηγούν σε μια μακροπρόθεσμη διάρθρωση του στόλου σχεδόν βασισμένη, εξ' ολοκλήρου, σε τεχνολογίες με μπαταρία, ενώ τα τεχνολογικά όρια εκπομπών CO₂ επιτρέπουν στα αυτοκίνητα υδρογόνου, τα οποία είναι πιο ακριβά, να διατηρήσουν ένα ορισμένο μερίδιο αγοράς. Σε αυτό το πλαίσιο, ο ρυθμός της τεχνολογικής μάθησης θεωρείται ότι είναι ισχυρότερος κάτω από τεχνολογικά όρια ενεργειακής απόδοσης καθώς πραγματοποιείται μεγαλύτερη συγκέντρωση πόρων R&D και βιομηχανικών επενδύσεων στον κλάδο των μπαταριών και όχι σε παράλληλες τεχνολογίες που θα διαφοροποιούσε την κατανομή των διαθέσιμων πόρων.

Η πιθανότητα επίτευξης τεχνολογικής και εμπορικής ωριμότητας των προηγμένων τεχνολογιών διαδραματίζει κρίσιμο ρόλο σχετικά με τη δραστική αναδιάρθρωση της Ευρωπαϊκής αγοράς αυτοκινήτων. Ωστόσο, υπάρχει μεγάλη αβεβαιότητα σχετικά με την αιτιότητα μεταξύ του όγκου των πόρων που διατίθενται για τη βιομηχανική ανάπτυξη και την επιτυχία της τεχνολογικής προόδου. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, υπάρχει θετική συσχέτιση μεταξύ του όγκου των πόρων και την πιθανότητα της καινοτομίας (αυτή είναι η βασική αρχή της ενδογενούς ανάπτυξης μέσω της καινοτομίας σύμφωνα με τον Acemoglu, 2009, και βασίζεται στις κλασικές προσεγγίσεις των Romer, 1994, Aghion, 1997, και Barro, 2004).

Αλλά είναι επίσης γενικά παραδεκτό ότι το κεφάλαιο που σχετίζεται με την καινοτομία παρουσιάζει φθίνουσες αποδόσεις κλίμακας (Hall και Hayashi, 1989, Griliches 2007). Αυτό σημαίνει ότι το μέγεθος των επιπτώσεων των κεφαλαίων σχετικών με την καινοτομία θα πρέπει να αξιολογηθεί εμπειρικά, κάτι που είναι δύσκολο και αβέβαιο σύμφωνα με την ευρεία οικονομετρική βιβλιογραφία. Παρ' όλ' αυτά, υπάρχει μεγαλύτερη βεβαιότητα, σύμφωνα με τη βιβλιογραφία (Wessner, 2005, Avato και Coony, 2007) ότι η γεφύρωση της «κοιλιάδας του θανάτου» εξαρτάται από τον όγκο των πόρων που διατίθενται για την τεχνολογική ανάπτυξη και την ωριμότητα της αγοράς.

Κατά συνέπεια, το κρίσιμο ζήτημα και για τις δύο τεχνολογίες αποτελεί η γεφύρωση του χάσματος της «κοιλιάδας του θανάτου», καθώς η δυναμική της τεχνικής προόδου (κυρίως για την περίπτωση των μπαταριών) βασίζεται περισσότερο στη

μαζική παραγωγή σε βιομηχανική κλίμακα και λιγότερο σε νέα ή πρόσθετη καινοτομία. Αυτή η παρατήρηση υποστηρίζει τις αισιόδοξες υποθέσεις των σεναρίων, που παρουσιάζονται στο παρόν κεφάλαιο, αναφορικά με την πιθανότητα επίτευξης σημαντικών μειώσεων του κόστους για αυτές τις δύο τεχνολογίες αυτοκινήτων.

Ωστόσο, η αβεβαιότητα όσον αφορά το μέγεθος της αιτιότητας μεταξύ των επικεντρωμένων διαθέσιμων πόρων για έρευνα και την πιθανότητα επίτευξης ωριμότητας εξακολουθεί να υφίσταται. Αυτό αφορά περισσότερο την υπόθεση ότι τα τεχνολογικά όρια ενεργειακής απόδοσης, που ευνοούν μόνο μια τεχνολογία, θα συνεπάγονται ισχυρότερη πρόοδο στην τεχνολογία αυτή (μπαταρία) σε σχέση με την εναλλακτική πολιτική. Ως εκ τούτου, τα αποτελέσματα των σεναρίων για τις συνέπειες στο σχετικό κόστος των δύο εναλλακτικών πολιτικών επιδέχονται περαιτέρω συζήτηση, καθώς στην πραγματικότητα οι δαπάνες είναι πιθανό να είναι υψηλότερες λόγω αβεβαιοτήτων σε αντίθεση με την υπόθεση των θετικών προσδοκιών κατά τη μοντελοποίηση.

6.6 Συμπεράσματα κεφαλαίου

Η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει θεσμοθετήσει τεχνολογικά όρια για τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα για τις νέες πωλήσεις αυτοκινήτων των κατασκευαστών, με στόχο να μειώσει τις συνολικές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου από αυτό τον κλάδο. Τα τεχνολογικά όρια ενεργειακής απόδοσης θεωρούνται ως μια εναλλακτική επιλογή πολιτικής ρύθμισης. Η σημασία του παρόντος κεφαλαίου έγκειται στο γεγονός ότι αξιολογεί τις παραπάνω υποψήφιες πολιτικές με γνώμονα το κόστος, την κατανάλωση ενέργειας, τις εκπομπές αερίων θερμοκηπίου και το κόστος μέχρι το 2050. Η ανάλυση πραγματοποιείται με βάση τη σύγκριση εναλλακτικών σεναρίων ενεργειακής πολιτικής που ποσοτικοποιούνται με το μοντέλο που αναπτύχθηκε στην παρούσα διατριβή PRIMES-TREMOVE. Τα σενάρια πολιτικής υποθέτουν εναλλακτικές τιμές εφαρμογής των δύο πολιτικών και συγκρίνονται με ένα σενάριο αναφοράς στο οποίο εφαρμόζεται σταθερή πολιτική για τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου μέχρι το 2050. Τα σενάρια πολιτικής αναλύονται στο πλαίσιο απεξάρτησης του ενεργειακού συστήματος από τις εκπομπές CO₂. Κατά συνέπεια, γίνεται η υπόθεση ότι οι προηγμένες τεχνολογίες θα πετύχουν σημαντικές βελτιώσεις στα τεχνοοικονομικά χαρακτηριστικά τους.

Η εφαρμογή των πολιτικών θέσπισης τεχνολογικών ορίων είναι εφικτό να οδηγήσει προς τη μετάβαση σε ένα αειφόρο σύστημα μεταφορών με χαμηλές εκπομπές CO₂. Επιπλέον, επιβεβαιώθηκε ότι η επιτυχημένη είσοδος των ηλεκτρικών αυτοκινήτων και των οχημάτων υδρογόνου εξαρτάται σε σημαντικό βαθμό από την τεχνική πρόοδο των τεχνολογιών. Συγκεκριμένα, στην περίπτωση αποτυχίας της τεχνολογικής πρόόδου των κυψελών υδρογόνου, η μελλοντική διάρθρωση του στόλου των αυτοκινήτων της Ευρώπης αναμένεται να κυριαρχηθεί από ηλεκτρικά αυτοκίνητα. Σε διαφορετική περίπτωση, η επίτευξη σημαντικής μείωσης του κόστους των αυτοκινήτων υδρογόνου είναι δυνατό να αποτελέσει τον κινητήριο μοχλό για την είσοδό τους στην αγορά.

Η υιοθέτηση αυστηρών τεχνολογικών ορίων θα επιφέρει σημαντική διαφοροποίηση στη δομή του κόστους του συστήματος των μεταφορών που καλούνται να πληρώσουν οι καταναλωτές. Οι τελευταίοι θα πρέπει να πληρώσουν σημαντικά υψηλότερες δαπάνες κεφαλαίου για την αγορά εξοπλισμού μεταφορών, ωστόσο θα επωφεληθούν από τα σημαντικά χαμηλότερα κόστη λειτουργίας. Τα τεχνολογικά όρια για τις εκπομπές CO₂ αποτελούν μια πιο δαπανηρή πολιτική επιλογή σε σχέση με την πολιτική των ορίων ενεργειακής απόδοσης.

Η επιλογή μεταξύ των δύο υποψήφιων μέτρων αποτελεί πολιτική απόφαση που περιλαμβάνει μεγάλη αβεβαιότητα όσον αφορά την ετοιμότητα και την τεχνολογική ωριμότητα των νέων προηγμένων τεχνολογιών. Η επιλογή των τεχνολογικών ορίων ενεργειακής απόδοσης, που ευνοούν την τεχνολογία της μπαταρίας θα στείλει ισχυρά μηνύματα προς τη βιομηχανία να επικεντρωθεί στη μαζική κατασκευή ηλεκτρικών αυτοκινήτων με σκοπό την επίτευξη οικονομικών κλίμακος και τη μείωση του κόστους.

Η επιλογή τεχνολογικών ορίων με βάση τις εκπομπές CO₂ θα επιτρέψει ένα διαφοροποιημένο φάσμα πιθανών τεχνολογικών επιλογών συμπεριλαμβανομένων των μπαταριών και των κυψελών καυσίμου υδρογόνου. Αυτό σημαίνει ότι η μελλοντική αγορά του στόλου των οχημάτων της Ευρώπης είναι πιθανό να περιλαμβάνει διαφορετικές τεχνολογικές επιλογές, γεγονός που θα συνεπάγεται παράλληλες αλυσίδες παραγωγής και έρευνας που ίσως να μην επιτρέψει την πλήρη επίτευξη ωριμότητας. Ωστόσο, αναφορικά με το στόχο της δραστηρικής μείωσης των εκπομπών CO₂, τα τεχνολογικά όρια στις εκπομπές CO₂, παρ' όλο που είναι πιο δαπανηρά, αποτελούν μια πιο «ασφαλή» επιλογή πολιτικής καθώς δεν επικεντρώνονται στην επιτυχία μίας μόνο τεχνολογικής επιλογής.

Τα σενάρια που παρουσιάζονται στο παρόν κεφάλαιο ακολουθούν μια ντετερμινιστική προσέγγιση όσον αφορά την πρόβλεψη των μελλοντικών τεχνολογικών εξελίξεων και την επίτευξη τεχνολογικής ωριμότητας των εναλλακτικών τύπων αυτοκινήτων. Στην πραγματικότητα τέτοια πρόβλεψη εμπεριέχει υψηλό βαθμό αβεβαιότητας. Η διαχείριση αυτής της αβεβαιότητας είναι εφικτή με τη διαφοροποίηση των επενδύσεων και των πόρων χρηματοδότησης, γεγονός που συνεπάγεται υψηλότερες δαπάνες σε σχέση με ένα ιδεατό μέλλον τέλειας πρόβλεψης. Το παραπάνω επιβεβαιώνει ότι τα τεχνολογικά όρια CO₂ είναι δυνατό να αντισταθμίσουν τον κίνδυνο έναντι ενός υψηλότερου κόστους. Ωστόσο, αυτό σημαίνει ότι ίσως το κόστος που θα προκύψει να είναι μεγαλύτερο από αυτό που υπολογίζεται κατά τη μοντελοποίηση.

Ένα ιδιαίτερα σημαντικό εύρημα αποτελεί ότι οι τεχνολογικές εξελίξεις και οι αλλαγές στη δομή του στόλου των αυτοκινήτων δεν επηρεάζονται μέχρι το 2030. Ως εκ τούτου είναι ασφαλέστερο να συνεχιστεί η πολιτική ρύθμισης των εκπομπών CO₂ μέχρι αυτή τη χρονική περίοδο και να επαναπροσδιοριστεί εκ νέου μετά το 2030 που θα έχει μειωθεί η τεχνολογική αβεβαιότητα ως ένα βαθμό.

Κεφάλαιο 7

7 Σημασία ανάπτυξης υποδομής διάθεσης εναλλακτικών καυσίμων και αλληλεπιδράσεις με το ενεργειακό σύστημα

7.1 Εισαγωγή

Το παρόν κεφάλαιο πραγματοποιεί διερεύνηση και αξιολόγηση της σημασίας της ανάπτυξης υποδομής διανομής και διάθεσης ηλεκτρικής ενέργειας και υδρογόνου στο πλαίσιο του στόχου της δραστηκής μείωσης των εκπομπών CO₂ μέχρι το 2050. Η συγκεκριμένη ανάλυση εξετάζει τις επιπτώσεις τυχόν ανεπαρκούς συντονισμού μεταξύ των εμπλεκόμενων φορέων σχετικών με τη διείσδυση εναλλακτικών μορφών ενέργειας στον τομέα των μεταφορών, γεγονός που αντανακλάται σε ανεπαρκή ανάπτυξη των απαιτούμενων υποδομών. Η ανάλυση που πραγματοποιείται ποσοτικοποιεί τις αρνητικές επιπτώσεις που συνεπάγονται πολύ υψηλότερες δαπάνες για τη μείωση των εκπομπών. Η πρωτοτυπία της συγκεκριμένης εφαρμογής έγκειται στο γεγονός ότι ποσοτικοποιεί και αναδεικνύει τα επιπρόσθετα κόστη λόγω του ανεπαρκούς συντονισμού των αποφασιζόντων.

Επιπλέον, το παρόν κεφάλαιο εξετάζει τις αλληλεπιδράσεις του τομέα των μεταφορών με το υπόλοιπο ενεργειακό σύστημα αναφορικά με την ποσοτικοποίηση των εκπομπών CO₂ στο σύνολο της ενεργειακής αλυσίδας που περιλαμβάνει και το στάδιο της ηλεκτροπαραγωγής. Η παρούσα ανάλυση πραγματοποιείται στα πλαίσια της προσπάθειας για δραστηκή μείωση των εκπομπών CO₂ στο σύνολο του ενεργειακού

συστήματος. Συγχρόνως, εξετάζεται η σημασία της χρήσης έξυπνων συσκευών φόρτισης που θα αποτρέψουν τη φόρτιση των ηλεκτρικών αυτοκινήτων με ανεξέλεγκτο τρόπο, γεγονός που οδηγεί σε ομαλοποίηση της καμπύλης φορτίου ηλεκτρικής ενέργειας και συγκράτηση του κόστους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Η πρωτοτυπία της συγκεκριμένης ανάλυσης έγκειται στο μεθοδολογικό πλαίσιο που ακολουθείται, όπου πραγματοποιείται διασύνδεση του μοντέλου PRIMES-TREMOVE με το μοντέλο PRIMES, που έχει αναπτυχθεί στο Εργαστήριο Ενέργειας-Οικονομίας-Περιβάλλοντος της ΣΗΜΜΥ και εξετάζει το σύνολο του ενεργειακού συστήματος και του τομέα της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

7.2 Επίδραση της ύπαρξης υποδομής

Η παρούσα παράγραφος αποσκοπεί στο να ποσοτικοποιήσει τις θετικές επιπτώσεις της ανάπτυξης υποδομής διάθεσης και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας και υδρογόνου στο πλαίσιο της βαθιάς μείωσης των εκπομπών αερίου του θερμοκηπίου. Η ανάλυση πραγματοποιείται στα πλαίσια των σεναρίων «battery only» και «parallel technology» που καταστρώνονται στο παρόν κεφάλαιο.

7.2.1 Ανάλυση Κόστους- Οφέλους

Η μεθοδολογία προϋποθέτει αρχικά την *επιτυχημένη κατασκευή* και ανάπτυξη των απαραίτητων υποδομών στα δύο σενάρια που εξετάζονται στην παρούσα ενότητα ("battery only" και "parallel technology"). Η ανάπτυξη της υποδομής θεωρείται ότι δεν αποτελεί εμπόδιο στην αγορά και δεν επηρεάζει αρνητικά τις αποφάσεις των παραγόντων. Γίνεται επιπλέον η υπόθεση ότι η υποδομή αναπτύσσεται τμηματικά και σε στάδια σύμφωνα με τους ρυθμούς διείσδυσης των ηλεκτρικών αυτοκινήτων και αυτοκινήτων κυψελών καυσίμου υδρογόνου.

Στη συνέχεια, καταστρώνονται δύο σενάρια που θεωρούν ότι η κατασκευή της υποδομής *δεν είναι επιτυχής* λόγω ανεπαρκούς συντονισμού της. Τα δύο εναλλακτικά σενάρια που βασίζονται στις βασικές θεωρήσεις των "battery only" και "parallel technology" σεναρίων αποτυγχάνουν να πετύχουν σημαντική διείσδυση των υποδομών στο χρονικό ορίζοντα του 2050. Το γεγονός αυτό έχει ως συνέπεια την ανεπαρκή διείσδυση των εναλλακτικών καυσίμων στο ενεργειακό μείγμα των μεταφορών στο χρονικό ορίζοντα του 2050. Κατά συνέπεια, οι εκπομπές CO₂ στα δύο σενάρια αποτυχίας να μην επιτυγχάνουν μείωση της τάξης του -60% το 2050 σε σχέση με το 1990.

Για το σκοπό αυτό, εισάγεται ένας «εικονικός» φόρος στα σενάρια αποτυχίας που οδηγεί σε δραστική μείωση της επιβατικής και εμπορευματικής δραστηριότητας, γεγονός που συνεπάγεται χαμηλότερη κατανάλωση ορυκτών καυσίμων, προκειμένου να επιτευχθεί ο στόχος της μείωσης των εκπομπών κατά 60% το 2050 σε σχέση με τα επίπεδα του 1990. Ο σκοπός της εισαγωγής του «εικονικού» φόρου έγκειται στο να αποδώσει την απόκλιση του συστήματος των μεταφορών από τη βέλτιστη κατάσταση

ελαχίστου κόστους. Ο «εικονικός» φόρος συνιστά άμεσες αρνητικές επιδράσεις στους καταναλωτές, γεγονός που επιφέρει αρνητικές επιπτώσεις στην κοινωνική ευημερία (welfare losses or disutility). Η αποφυγή του κόστους αυτού που προέρχεται από την επιβολή του «εικονικού» φόρου, χάρη στην ανάπτυξη της υποδομής συνιστά την ποσοτικοποίηση του οφέλους.

Τα τέσσερα σενάρια (δύο επιτυχίες-δύο αποτυχίες ανάπτυξης υποδομής) επιτυγχάνουν παρόμοια μείωση των εκπομπών αερίου του θερμοκηπίου έτσι ώστε να είναι συγκρίσιμα και να αποκτά νόημα η ανάλυση του κόστους-οφέλους. Για κάθε επιλογή πολιτικής, οι κύριες δαπάνες που υπολογίζονται είναι το κόστος κατασκευής της υποδομής διάθεσης και διανομής εναλλακτικού καυσίμου. Τα κύρια πλεονεκτήματα που θεωρούνται είναι το επιπρόσθετο κόστος του εικονικού φόρου που αποφεύγεται από τους καταναλωτές χάρη στην ευρεία χρήση των εναλλακτικών καυσίμων λόγω της ύπαρξης της απαραίτητης υποδομής.

Εφαρμόζοντας τη μέθοδο της ανάλυσης Κόστους-Οφέλους (Cost- Benefit Analysis, CBA), πραγματοποιείται η σύγκριση μεταξύ των παραπάνω στοιχείων κόστους και των πλεονεκτημάτων που αναμένονται λόγω της κατασκευής της υποδομής. Η αξιολόγηση των δεικτών CBA, προϋποθέτει τον υπολογισμό του συνολικού κόστους και των σχετικών πλεονεκτημάτων. Η ποσοτικοποίηση πραγματοποιείται με τη χρήση του μοντέλου PRIMES-TREMOVE.

7.2.2 Υποθέσεις κόστους

Η παρούσα ενότητα παρουσιάζει τις υποθέσεις για το κόστος της υποδομής διάθεσης υδρογόνου και σημείων φόρτισης ηλεκτρικής ενέργειας. Οι παρακάτω παράγραφοι παρουσιάζουν τις υποθέσεις για τα μοναδιαία κόστη ανά τύπο υποδομής καυσίμου για τις δύο περιπτώσεις (της επιτυχούς και ανεπιτυχούς ανάπτυξης). Επιπλέον, χάρη στην ανεπτυγμένη διείσδυση της υποδομής στην περίπτωση της επιτυχούς ανάπτυξης των υποδομών, επιτυγχάνονται οικονομίες κλίμακας που συνεπάγονται μειωμένα κεφαλαιουχικά κόστη ανά μονάδα υποδομής σε διαφορετικά χρονικά πλαίσια.

7.2.2.1 Καμπύλες τεχνικής προόδου κόστους υποδομής

Για τον υπολογισμό της επίδρασης των οικονομιών κλίμακας, πραγματοποιείται η εισαγωγή του μοντέλου καμπυλών εκμάθησης. Το τυπικό μοντέλο καμπυλών εκμάθησης συνδέει την ερμηνευτική μεταβλητή που δείχνει την εμπειρία χρησιμοποιώντας ένα αθροιστικό μέτρο της παραγωγής ή χρήσης. Η μεταβολή του κόστους παραγωγής ενός προϊόντος παρέχει ένα μέτρο της μάθησης και της τεχνολογικής βελτίωσης και αντιπροσωπεύει την εξαρτημένη μεταβλητή. Στην περίπτωση υψηλής παραγωγής προϊόντων, η επίτευξη του μοναδιαίου κόστους μπορεί να είναι τέτοια έτσι ώστε να επιτευχθεί η ελάχιστη αποδοτική κλίμακα που είναι δυνατό να οδηγήσει σε οικονομίες κλίμακας.

Στη βιβλιογραφία συναντάται μια ποικιλία λειτουργικών μορφών που περιγράφει τη σχέση μεταξύ συνολικής παραγωγής και του κόστους (Yelle, 1979, Mattsson, 1997, Ibenholt, 2001, Kouvaritakis et al., 2000). Η συνάρτηση μορφής log-linear είναι η πιο κοινή και ευρέως εφαρμοσμένη λόγω της απλότητάς της και της ιδιότητάς της να προσαρμόζεται σε παρατηρήσεις (Nemet, 2006). Έστω U_{cc} το μοναδιαίο κόστος παραγωγής ενός σημείου φόρτισης ηλεκτρικής ενέργειας και Q_{uc} η σωρευμένη ποσότητα παραγωγής σημείων φόρτισης. Η παράμετρος a_{uc} είναι μια σταθερά που υποδηλώνει την τιμή του μοναδιαίου κόστους στην αρχή της παραγωγικής διαδικασίας. Ο παράγοντας l_{uc} είναι γνωστός ως ο βαθμός εκμάθησης.

$$U_{cc}(Q_{uc}) = a_{uc} Q_{uc}^{l_{uc}} \quad (7-1)$$

Στην περίπτωση που διπλασιάζεται η παραγωγή Q_{uc}^* τότε το κόστος γράφεται:

$$U_{cc}^*(Q_{uc}^*) = a_{uc} Q_{uc}^{*l_{uc}} \quad (7-2)$$

$$\text{όπου } Q_{uc}^* = 2Q_{uc}$$

Τότε με αντικατάσταση, ισχύει:

$$U_{cc}^*(Q_{uc}^*) = a_{uc} (2Q_{uc})^{l_{uc}} \Leftrightarrow \quad (7-3)$$

$$U_{cc}^*(Q_{uc}^*) = 2^{l_{uc}} a_{uc} Q_{uc}^{l_{uc}} = 2^{l_{uc}} U_{cc}(Q_{uc}) \Leftrightarrow$$

$$\frac{U_{cc}^*(Q_{uc}^*)}{U_{cc}(Q_{uc})} = 2^{l_{uc}} \quad (7-4)$$

Η εξίσωση (7-4) ορίζει το βαθμό τεχνικής προόδου (μείωσης του κόστους) σε κάθε διπλασιασμό της παραγωγής προϊόντων. Κατά τη προσαρμογή της καμπύλης εκμάθησης, γίνεται η υπόθεση ότι στα αρχικά στάδια της παραγωγής των σταθμών φόρτισης θα πρέπει το κόστος να αντιστοιχεί σε δεδομένες τιμές που προκύπτουν από τεχνικές μελέτες. Πράγματι, για $Q_{uc} = 1$, θα πρέπει να ισχύει:

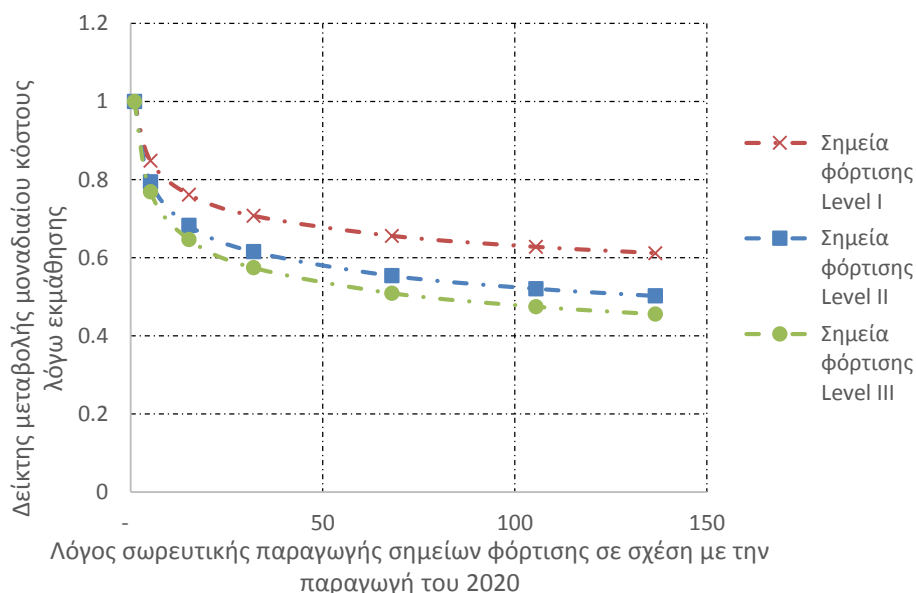
$$U_{cc}(1) = a_{uc} \quad (7-5)$$

Συνεπώς, από την εξίσωση (7-5) προκύπτουν οι τιμές για τη σταθερά a_{uc} (Πίνακας 7-1). Οι τιμές για τον παράγοντα l_{uc} που υποδηλώνει το βαθμό εκμάθησης λαμβάνονται από ανάλογες τιμές για ενεργειακές τεχνολογίες από τη βιβλιογραφία (McDonald και Schrattenholzer, 2001).

Πίνακας 7-1: Παράγοντες καμπύλης εκμάθησης- μείωσης μοναδιαίου κόστους σημείων φόρτισης

	a_{uc}	l_{uc}
Σημεία φόρτισης Level I	1000	-0.10
Σημεία φόρτισης Level II	4833	-0.14
Σημεία φόρτισης Level III	45000	-0.16

Οι καμπύλες εκμάθησης για τα επιμέρους σημεία φόρτισης δεδομένων των τιμών των παραγόντων που παρουσιάζει ο Πίνακας 7-1, παρουσιάζονται στο Σχήμα 7-1.



Σχήμα 7-1: Καμπύλες εκμάθησης μείωσης κόστους σημείων φόρτισης συναρτήσει της σωρευτικής παραγωγής τους

7.2.2.2 Σημεία φόρτισης ηλεκτρικής ενέργειας

Η ελάχιστη (μειωμένη) κάλυψη των υποδομών σημείων φόρτισης ηλεκτρικής ενέργειας μόνο στις μητροπολιτικές και τις αστικές περιοχές, αναμένεται να οδηγήσει σε μικρό ποσοστό διείσδυσης ηλεκτρικών οχημάτων. Στην περίπτωση αυτή, το κόστος κεφαλαίου ανά επιπλέον μονάδα παραμένει περίπου το ίδιο σε όλα τα στάδια, ενώ μια μέση μείωση του κόστους κεφαλαίου για όλους τους τύπους των σημείων φόρτισης παρατηρείται κυρίως από το 2030 και μετά. Η μικρή μείωση δείχνει ότι οι οικονομίες κλίμακας δεν αξιοποιούνται πλήρως στο πλαίσιο αυτού του σεναρίου.

Ωστόσο, η περίπτωση επαρκούς κάλυψης και ανάπτυξης των υποδομών με τις σχετικές αυξημένες πυκνότητες θεωρείται ότι οδηγεί σε αύξηση του μεριδίου των οχημάτων που κινούνται με ηλεκτρική ενέργεια. Γεγονός που έχει ως αποτέλεσμα σημαντικές μειώσεις που επιτυγχάνονται μετά το 2025-2030 κυρίως για τα γρήγορα

σημεία φόρτισης, δεδομένου ότι το μέσο κόστος, σε σύγκριση με την περίπτωση ανεπαρκούς κάλυψης, επιμερίζεται σε περισσότερους χρήστες.

Ο Πίνακας 7-2 παρουσιάζει τις βασικές υποθέσεις για τα δύο σενάρια της επιτυχούς και ανεπιτυχούς ανάπτυξης της υποδομής σημείων φόρτισης ηλεκτρικής ενέργειας για τους χρήστες των ηλεκτρικών αυτοκινήτων. Το μοναδιαίο κόστος παραγωγής για κάθε τύπο σημείου φόρτισης εξαρτάται δυναμικά από τη σωρευμένη παραγωγή που προκύπτει από τα σενάρια που ποσοτικοποιούνται με το μοντέλο PRIMES-TREMOVE.

Πίνακας 7-2: Υποθέσεις ανάπτυξης/ κάλυψης υποδομής και κόστους σταθμών φόρτισης ηλεκτρικής ενέργειας

<i>Μειωμένη ανάπτυξη υποδομής</i>	2011-2020	2021-2030	2031-2050
Ηλεκτρική ενέργεια σε μητροπολιτικά κέντρα			
	Πυκνότητα (Σημεία φόρτισης/ όχημα)		
	2020	2030	2050
Σημεία φόρτισης Level II	0.12	0.15	0.25
Σημεία φόρτισης Level III	0.01	0.01	0.02
	Κεφαλαιουχικό κόστος σημείου φόρτισης (Euro)		
	2020	2030	2050
Σημεία φόρτισης Level I	1000	938	833
Σημεία φόρτισης Level II	4833	4254	3603
Σημεία φόρτισης Level III	45000	38364	31734
<i>Πλήρης ανάπτυξη υποδομής</i>	2011-2020	2021-2030	2031-2050
Πλήρης διαθεσιμότητα			
	Πυκνότητα (Σημεία φόρτισης/ όχημα)		
	2020	2030	2050
Σημεία φόρτισης Level II	0.23	0.30	0.40
Σημεία φόρτισης Level III	0.02	0.03	0.03
	Κεφαλαιουχικό κόστος σημείου φόρτισης (Euro)		
	2020	2030	2050
Σημεία φόρτισης Level I	1000	760	601
Σημεία φόρτισης Level II	4833	3302	2428
Σημεία φόρτισης Level III	45000	29122	20491

7.2.2.3 Σταθμοί ανεφοδιασμού υδρογόνου

Η ανάπτυξη υποδομής διάθεσης υδρογόνου χαρακτηρίζεται ως υψηλής εντάσεως κεφαλαίου επένδυση και ως εκ τούτου έχει μεγάλο σταθερό κόστος. Οι οικονομίες κλίμακας στον κλάδο αυτό μπορεί να επιτευχθούν μόνο όταν αρχίσουν να κατασκευάζονται πολλές τέτοιες μονάδες. Αυτό σημαίνει, ότι θα πρέπει να επιτευχθούν μαζικές επενδύσεις σε υποδομές προκειμένου το κόστος ανά μονάδα να μειωθεί στο χαμηλότερο δυνατό επίπεδο. Σε αυτά τα επίπεδα επενδύσεων, αυτό θα σημαίνει ότι οι οικονομίες κλίμακας έχουν πλήρως αξιοποιηθεί.

Η μοντελοποίηση υποθέτει διαφορετικά μεγέθη σταθμών ανεφοδιασμού υδρογόνου ακολουθώντας τα τεχνικά χαρακτηριστικά που παρουσιάζονται στη μελέτη της McKinsey (2011). Συνεπώς, γίνεται η υπόθεση ότι ο μικρός σταθμός υδρογόνου περιλαμβάνει δύο αντλίες (διανομείς), ο μεσαίο σταθμός τέσσερις αντλίες και ο μεγάλος σταθμός από δέκα αντλίες. Φυσικά, το κόστος του σταθμού αυξάνει όσο αυξάνει το μέγεθός τους (κυρίως από το σύστημα του συμπιεστή). Ωστόσο, το μεγαλύτερο μέγεθος των σταθμών συνεπάγεται ότι το μέσο κόστος ανά αντλία μειώνεται γεγονός που δείχνει ότι επιτυγχάνονται οικονομίες κλίμακας.

Στα πρώιμα στάδια της αγοράς, κατά την περίοδο 2020-2025, υποτίθεται ότι κατασκευάζονται μόνο μικροί σταθμοί, καθώς οι επενδυτές θα είναι πρόθυμοι να επενδύσουν στο χαμηλότερο δυνατό κόστος επένδυσης κεφαλαίων, μέχρι να δημιουργηθεί επαρκής ζήτηση για διάθεση υδρογόνου. Στην περίπτωση της ελάχιστης κάλυψης των υποδομών, οι πρόσθετοι σταθμοί που χτίζονται δεν επαρκούν για την επίτευξη οικονομιών κλίμακας. Το γεγονός αυτό έχει ως συνέπεια, το κόστος κεφαλαίου ανά σταθμό να παραμένει σταθερό μέσα στα χρόνια. Το σενάριο χαμηλής ανάπτυξης υποδομής υδρογόνου υποθέτει τη σχετική ανάπτυξη μεσαίων και μεγάλων σταθμών υδρογόνου κατά τη χρονική περίοδο 2030-2050, γεγονός που έχει θετική επίδραση στη διείσδυση των αυτοκινήτων με κυψέλη καυσίμου υδρογόνου. Ο αριθμός των μικρών σταθμών ανεφοδιασμού αναμένεται να μειωθεί μετά το 2030 λόγω του προσανατολισμού των επενδυτών σε μεγαλύτερους σταθμούς που προσφέρουν υψηλότερο βαθμό εξυπηρέτησης.

Η περίπτωση της επαρκούς κάλυψης υποδομής διάθεσης υδρογόνου τουλάχιστο μέχρι το 2020-2025 χαρακτηρίζεται από την κατασκευή μικρών σταθμών διάθεσης υδρογόνου. Ωστόσο, από το 2030 παρατηρείται μια αυξημένη ανάπτυξη υποδομών σταθμών όλων των μεγεθών (σε σχέση με το σενάριο ανεπαρκούς ανάπτυξης), γεγονός που επιφέρει σχετικές μειώσεις στο κόστος κατασκευής των μεσαίων και μεγάλων σταθμών. Η μείωση του μέσου κόστους είναι περίπου 5-8% για μεσαίους σταθμούς και 6-10% για τους μεγάλους σταθμούς.

Ο Πίνακας 7-3 παρουσιάζει τις βασικές υποθέσεις για τα δύο σενάρια της επιτυχούς και ανεπιτυχούς ανάπτυξης της υποδομής διάθεσης υδρογόνου για τους χρήστες των αυτοκινήτων που είναι εξοπλισμένα με κυψέλη καυσίμου υδρογόνου.

Πίνακας 7-3: Υποθέσεις ανάπτυξης/ κάλυψης υποδομής και κόστους σταθμών διάθεσης υδρογόνου

<i>Μειωμένη ανάπτυξη υποδομής</i>	2011-2020	2021-2030	2031-2050
Υδρογόνο (χαμηλή διαθεσιμότητα σε όλες τις περιοχές)			
	Σύνολο σταθμών ανεφοδιασμού H₂		
	2020	2030	2050
Μικρός	1272	20152	15880
Μεσαίος	0	2371	6108
Μεγάλος	0	1185	2443
	Κεφαλαιουχικό κόστος σταθμού ανεφοδιασμού H₂ (Euro)		
	2020	2030	2050
Μικρός	800,000	800,000	800,000
Μεσαίος	1,200,000	1,200,000	1,200,000
Μεγάλος	2,500,000	2,500,000	2,500,000

<i>Πλήρης ανάπτυξη υποδομής</i>	2011-2020	2021-2030	2031-2050
Διαθεσιμότητα			
	Σύνολο σταθμών ανεφοδιασμού H₂		
	2020	2030	2050
Μικρός σταθμός	2765	55230	56222
Μεσαίος σταθμός	0	6498	21624
Μεγάλος σταθμός	0	3249	8649
	Κεφαλαιουχικό κόστος σταθμού ανεφοδιασμού H₂ (Euro)		
	2020	2030	2050
Μικρός σταθμός	800,000	800,000	800,000
Μεσαίος σταθμός	1,140,000	1,080,000	984,000
Μεγάλος σταθμός	2,250,000	2,000,000	1,875,000

Σημ. Μικρός σταθμός: 2 αντλίες, Μεσαίος σταθμός: 4 αντλίες, Μεγάλος σταθμός: 10 αντλίες

7.2.3 Αποτίμηση οφέλους ανάπτυξης υποδομής

Για τον υπολογισμό του δείκτη της ανάλυσης κόστους- οφέλους είναι απαραίτητο να είναι γνωστό το κόστος που συνεπάγεται η ανάπτυξη της υποδομής. Ο υπολογισμός τους κόστους χρησιμοποιεί ως είσοδο τις τιμές μοναδιαίου κόστους που παρουσιάζει ο Πίνακας 7-2 και ο Πίνακας 7-3 για την περίπτωση του ηλεκτρισμού και του υδρογόνου αντίστοιχα. Για τους σκοπούς της παρούσας ανάλυσης γίνεται η υπόθεση ότι το βέλτιστο μέγεθος της υποδομής για κάθε τύπο καυσίμου είναι γνωστό, ενώ πραγματοποιούνται εύλογες υποθέσεις για το μοναδιαίο κόστος κάθε τύπου υποδομής και τις δυνητικές οικονομίες κλίμακας με βάση τεχνικές μελέτες. Το ύψος των επενδύσεων σε έργα υποδομής για κάθε τύπο εναλλακτικού καυσίμου θα πρέπει να επιστραφεί μέσω τιμολογίων για τη χρήση της υποδομής ή μέσω περιθωρίων κέρδους από τις πωλήσεις καυσίμων, οι οποίες βαρύνουν τους καταναλωτές που χρησιμοποιούν την υποδομή.

Το επόμενο στάδιο αφορά τον υπολογισμό του οφέλους που συνεπάγεται η ανάπτυξη της υποδομής διάθεσης και διανομής καυσίμου. Τα οφέλη αφορούν κυρίως

τα κόστη που αποφεύγουν να πληρώσουν οι μετακινούμενοι χάρη στην ύπαρξη της υποδομής που επιτρέπει τη χρήση εναλλακτικών καθαρών καυσίμων. Ασφαλώς, γίνεται η υπόθεση ότι ο στόχος της βαθιάς μείωσης των εκπομπών αερίου του θερμοκηπίου εξακολουθεί να υφίσταται. Συνεπώς, η έλλειψη της ανάπτυξης της υποδομής οδηγεί στην εισαγωγή ενός εικονικού φόρου με σκοπό τη μείωση της μεταφορικής δραστηριότητας ως το μοναδικό μέσο για τη βαθιά μείωση των εκπομπών αερίου του θερμοκηπίου. Η εισαγωγή του φόρου αυτού έρχεται να αντισταθμίσει την απουσία της υποδομής που θα επέτρεπε τη μαζική εισαγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας και του υδρογόνου. Συνεπώς, τα οφέλη της ανάπτυξης της υποδομής περιλαμβάνουν την αποφυγή του φόρου αυτού και της μείωσης της ευημερίας των καταναλωτών λόγω της επιβολής του φόρου. Τα οφέλη ποσοτικοποιούνται με την κατάστρωση εναλλακτικών σεναρίων με βάση τα σενάρια «battery only» και «parallel technology» όπου γίνεται η υπόθεση της απουσίας της υποδομής και της ύπαρξης του φόρου.

Ο υπολογισμός του κόστους καθώς και η αποτίμηση του οφέλους από την ανάπτυξη της απαραίτητης υποδομής γίνεται με τη χρήση του μοντέλου. Οι υπολογισμοί αντανακλούν την παρούσα αξία του σωρευτικού κόστους για την περίοδο 2015-2050, χρησιμοποιώντας ένα κοινωνικό επιτόκιο αναγωγής ίσο με 4%. Ο Πίνακας 7-4 παρουσιάζει την εκτίμηση του κόστους και του οφέλους που υπολογίζεται για τα επιμέρους σενάρια «battery only» και «parallel technology», τα οποία διακρίνονται σε σενάρια επιτυχημένης και αποτυχημένης ανάπτυξης της υποδομής. Ο δείκτης για την ανάλυση κόστους- οφέλους υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση όπου ο όρος $\Delta O\varphi$ περιλαμβάνει τα οφέλη που προσφέρει η ανάπτυξη της υποδομής και ο όρος ΔI το επιπλέον κόστος που απαιτείται για την ανάπτυξη της υποδομής. Συνεπώς:

$$CBA = \frac{\Delta O\varphi}{\Delta I} \quad (7-6)$$

Το κόστος ΔI αφορά την παρούσα αξία του συνολικού κόστους που απαιτείται για την ανάπτυξη της υποδομής INV_t , ενώ το όφελος $\Delta O\varphi$ αφορά την παρούσα αξία του οφέλους λόγω της αποφυγής της φορολόγησης Tax_t . Τα δύο στοιχεία του κόστους υπολογίζονται από τις παρακάτω σχέσεις, όπου r_{sc} αφορά το κοινωνικό επιτόκιο αναγωγής και είναι ίσο με 4%:

$$\Delta O\varphi = \sum_{t=1}^T \frac{Tax_t}{(1 + r_{sc})^t} \quad (7-7)$$

$$\Delta I = \sum_{t=1}^T \frac{INV_t}{(1 + r_{sc})^t}$$

Είναι φανερό ότι η ύπαρξη και η πλήρης ανάπτυξη της υποδομής στα σενάρια της επιτυχούς ανάπτυξης της υποδομής συνεπάγεται υψηλότερο κόστος επένδυσης σε σχέση με την περίπτωση που η ανάπτυξη της υποδομής δεν επιτευχθεί. Η παρούσα αξία

της επένδυσης για υποδομές στα σενάρια «battery only» και «parallel technology» ανέρχεται σε €441bn και €583bn αντίστοιχα, που συνεπάγεται ένα επιπλέον κόστος της τάξης των €288bn και €394bn αντίστοιχα σε σχέση με τα σενάρια της ελάχιστης ανάπτυξης υποδομής (Πίνακας 7-4). Ωστόσο, το επιπλέον κόστος των σεναρίων αποτυχίας, λόγω του εικονικού φόρου που πληρώνουν οι καταναλωτές, ανέρχεται σε €1592bn και €2387bn στα σενάρια «battery only» και «parallel technology» αντίστοιχα. Το επιπλέον κόστος των σεναρίων αποτυχίας δεν περιλαμβάνει την απώλεια κοινωνικής ευημερίας λόγω της μειωμένης δυνατότητας των καταναλωτών για μετακινήσεις. Το κόστος αυτό σύμφωνα με υπολογισμούς του μοντέλου είναι δυνατό να αυξηθεί το κόστος κατά 2-3 φορές.

Πράγματι, οι τιμές του δείκτη οφέλους- κόστους, που παρουσιάζει ο Πίνακας 7-4, αναφέρονται στην περίπτωση όπου υπάρχει το μέγιστο διάστημα μεταξύ της ύπαρξης ή όχι της απαραίτητης υποδομής εναλλακτικών καυσίμων. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της ανάλυσης, τα οφέλη της ανάπτυξης της υποδομής για το σκοπό της βαθιάς μείωσης των εκπομπών αερίου του θερμοκηπίου στις μεταφορές είναι πολλαπλάσια του κόστους που απαιτείται για την ανάπτυξή της.

Πίνακας 7-4: Αποτελέσματα ανάλυσης κόστους- οφέλους για την περίοδο 2015-2050

<i>Billion EURO'2010</i>	Battery only		Parallel technology	
	Πλήρης ανάπτυξη υποδομής	Ελάχιστη ανάπτυξη υποδομής	Πλήρης ανάπτυξη υποδομής	Ελάχιστη ανάπτυξη υποδομής
Παρούσα αξία σωρευμένης επένδυσης σε υποδομές				
Σύνολο επένδυσης	441	153	583	189
Σημεία φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων και ενίσχυσης δικτύου	396.6	138.3	296.4	104.0
Διανομή και διάθεση υδρογόνου	28.7	9.2	272.2	80.1
Υποδομές άλλων εναλλακτικών καυσίμων (LNG, LPG, βιοκαύσιμα)	15.4	5.6	14.5	5.2
Παρούσα αξία σωρευμένου οφέλους (χάρη στην ύπαρξη της υποδομής)- bn€'10				
Κόστος υποδομής που αποφεύγεται (ΔΙ)		288		394
Επιπρόσθετο κόστος λόγω απουσίας υποδομής (ΔΟΦ)	-	1.592	-	2.387
Όφελος/ Κόστος (CBA)		5.5		6.1

7.3 Αλληλεπίδραση με το ενεργειακό σύστημα

7.3.1 Εκπομπές CO₂ στο σύνολο της αλυσίδας Well-To-Wheel

Στα πλαίσια της ενεργειακής ανάλυσης, ιδιαίτερη σημασία αποτελεί η εξέταση των εκπομπών αερίου του θερμοκηπίου στο σύνολο της ενεργειακής αλυσίδας που διευρύνει το πεδίο ανάλυσης πέρα από το σύστημα των μεταφορών. Το σύνολο της ενεργειακής αλυσίδας περιλαμβάνει τις εκπομπές αερίου του θερμοκηπίου υπό την ονομασία Well-To-Wheel (WTW). Αυτές περιλαμβάνουν τις εκπομπές σε επίπεδο Well-To-Tank EF_k^{WTT} και σε επίπεδο Tank-To-Wheel EF_k^{TTW} . Το δεύτερο επίπεδο περιλαμβάνει το σύστημα των μεταφορών και τις εκπομπές που προέρχονται κατά την καύση του καυσίμου (στο επίπεδο του τελικού καταναλωτή).

$$EF_k^{WTW} = EF_k^{TTW} + EF_k^{WTT} \quad (7-8)$$

Πιο συγκεκριμένα, οι εκπομπές EF_k^{TTW} αναφορικά με το στάδιο TTW το οποίο εξετάζει το επίπεδο των εκπομπών αερίου του θερμοκηπίου στο στάδιο της τελικής χρήσης (σύστημα της εξάτμισης: tailpipe emissions), υπολογίζονται ως το γινόμενο της ειδικής κατανάλωσης sf_c (toe/ χλμ) επί του συντελεστή εκπομπής του καυσίμου το οποίο καταναλώνεται από το αυτοκίνητο ef_k (gCO₂/ toe):

$$EF_k^{TTW} = sf_c \cdot ef_k \quad (7-9)$$

Οι εκπομπές στο επίπεδο Well-To-Tank EF_k^{WTT} περιλαμβάνουν τις εκπομπές αερίου του θερμοκηπίου στο στάδιο παραγωγής του καυσίμου πριν τη χρήση του στις μεταφορές. Οι εκπομπές EF_k^{WTT} υπολογίζονται διαφορετικά στην περίπτωση που το καύσιμο είναι πετρελαϊκό προϊόν ή ηλεκτρική ενέργεια. Όπως φαίνεται στις παρακάτω σχέσεις οι εκπομπές στο συγκεκριμένο στάδιο εξαρτώνται από τις εκπομπές του διυλιστηρίου για την παραγωγή τελικού πετρελαϊκού προϊόντος $ef_{\delta\omega\lambda}$ και του ενεργειακού μείγματος της χώρας κατά τη διαδικασία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας $ef_{\eta\lambda\mu\alpha\rho\gamma}$.

$$EF_{\text{πετρλ}}^{WTT} = sf c_k \cdot ef_{\delta\iota\lambda} \quad (7-10)$$

$$EF_{\text{ηλεκ}}^{WTT} = sf c_k \cdot ef_{\eta\lambda\text{παργ}} \quad (7-11)$$

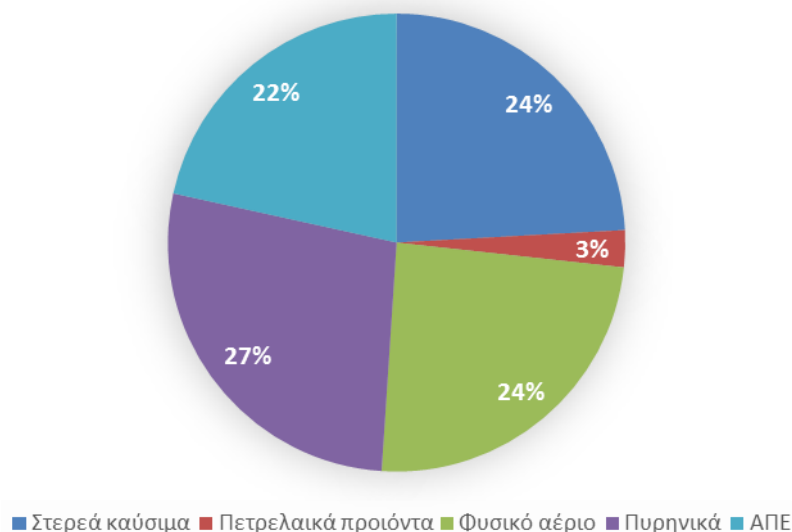
7.3.2 Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στην ΕΕ

Για την εξέταση των συνολικών εκπομπών αερίου του θερμοκηπίου στα πλαίσια της ανάλυσης Well-To-Wheel (WTW), πρέπει να προσδιοριστούν οι εκπομπές CO₂ που οφείλονται κατά τη διαδικασία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Οι εκπομπές αερίου του θερμοκηπίου εξαρτώνται από το ενεργειακό μείγμα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Ο Πίνακας 7-5 παρουσιάζει τους συντελεστές εκπομπής αερίου του θερμοκηπίου ανά είδος καυσίμου. Οι θερμικοί σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιούν στερεά καύσιμα φέρουν τους υψηλότερους συντελεστές εκπομπής. Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από πυρηνική ενέργεια καθώς και από ανανεώσιμες μορφές ενέργειας χαρακτηρίζεται από μηδενικές εκπομπές CO₂.

Πίνακας 7-5: Συντελεστές εκπομπών αερίου του θερμοκηπίου ανά είδος καυσίμου παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (US EPA)

Είδος καυσίμου	Συντελεστής εκπομπής (ton CO ₂ / toe)
Στερεά	4.3-4.8
Πετρελαιοειδή	3.1-3.4
Φυσικό αέριο	2.3

Το ενεργειακό μείγμα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας για την ΕΕ κατά το έτος 2010 παρουσιάζεται στο Σχήμα 7-2. Σύμφωνα με το σχήμα, η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται σχεδόν εξίσου από πυρηνικούς σταθμούς, θερμικούς σταθμούς στερεών καυσίμων και φυσικού αερίου καθώς και από ανανεώσιμες μορφές ενέργειας.



Σχήμα 7-2: Ενεργειακό μείγμα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στην ΕΕ το 2010 (EUROSTAT)

Συνεπώς, οι ειδικές εκπομπές αερίου του θερμοκηπίου κατά τη διαδικασία της ηλεκτροπαραγωγής υπολογίζονται ως ο σταθμισμένος μέσος του συντελεστή εκπομπής ΣE_{ν} κάθε διαδικασίας ν επί του μεριδίου κάθε διαδικασίας στο ενεργειακό μείγμα ηλεκτροπαραγωγής $\mu\rho\eta\lambda_{\nu}$.

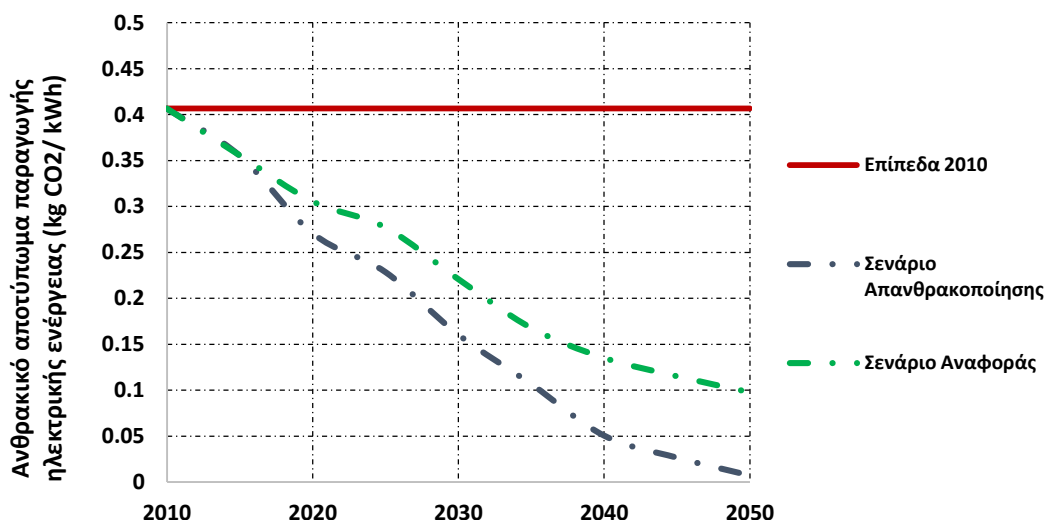
$$ef_{\eta\lambda\mu\alpha\rho\gamma} = \sum_{\kappa} \Sigma E_{\kappa} \cdot \mu\rho\eta\lambda_{\kappa} \quad (7-12)$$

Για την αξιολόγηση των συνολικών εκπομπών αερίου του θερμοκηπίου στο σενάριο «battery only» καταστρώνονται δύο σενάρια με το μοντέλο PRIMES που εξετάζει το σύνολο του ενεργειακού συστήματος. Το πρώτο σενάριο αποτελεί ένα σενάριο που υιοθετεί πολιτικές για περαιτέρω διείσδυση ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές μορφές ενέργειας, με την ονομασία «σενάριο αναφοράς». Το δεύτερο σενάριο υιοθετεί ισχυρές πολιτικές μείωσης των εκπομπών αερίου του θερμοκηπίου σε ποσοστό μεγαλύτερο του 80% το 2050 σε σχέση με τα επίπεδα του 1990 μέσω της διείσδυσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και της εγκατάστασης μονάδων συγκράτησης και αποθήκευσης εκπομπών CO₂ σε θερμικούς σταθμούς κατά την ηλεκτροπαραγωγή. Ο Πίνακας 7-6 παρουσιάζει το μείγμα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας για τα δύο παραπάνω σενάρια όπως έχουν καταστρωθεί με τη χρήση του μοντέλου PRIMES.

Πίνακας 7-6: Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ανά τύπο καυσίμου για την ΕΕ για το σενάριο Αναφοράς και το σενάριο Απανθρακοποίησης

	Στερεά καύσιμα	Πετρελαϊκά προϊόντα	Φυσικό αέριο	Πυρηνικά	ΑΠΕ	% παραγωγής από μονάδες με CCS
2010	24.1%	2.6%	24.3%	27.4%	21.6%	0
Σενάριο Αναφοράς	19.7%	0.8%	20.9%	21.8%	36.9%	0.2
2020						
Σενάριο Απανθρακοποίησης	19.0%	0.8%	20.9%	21.8%	37.5%	0.2
Σενάριο Αναφοράς	12.2%	0.6%	20.3%	21.6%	45.4%	0.5
2030						
Σενάριο Απανθρακοποίησης	10.8%	0.5%	16.1%	22.3%	50.3%	0.8
Σενάριο Αναφοράς	7.0%	0.5%	20.0%	22.2%	50.3%	3.4
2040						
Σενάριο Απανθρακοποίησης	8.3%	0.3%	14.6%	24.1%	52.7%	8.4
Σενάριο Αναφοράς	7.0%	0.5%	18.5%	21.1%	52.9%	6.9
2050						
Σενάριο Απανθρακοποίησης	8.8%	0.1%	12.6%	21.8%	56.6%	14.8

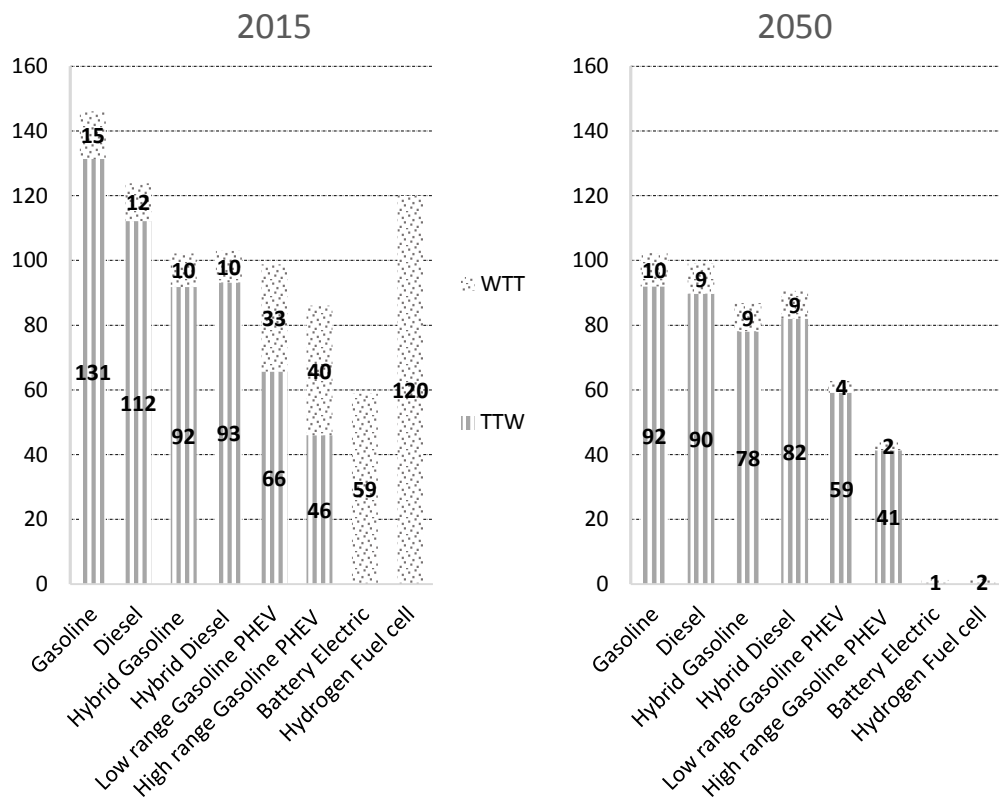
Λαμβάνοντας υπόψη το ενεργειακό μείγμα κατά το 2010 και τα επόμενα χρόνια έως το 2050 για τα δύο σενάρια, καθώς και τους συντελεστές εκπομπής που παρουσιάζει ο Πίνακας 7-5, υπολογίζονται οι ειδικές εκπομπές αερίου του θερμοκηπίου κατά τη διαδικασία της ηλεκτροπαραγωγής $ef_{\eta\lambda\pi\alpha\rho\gamma}$. Το Σχήμα 7-3 παρουσιάζει την εξέλιξη των ειδικών εκπομπών για την ΕΕ από το 2010 έως το 2050 για τα δύο σενάρια που εξετάζονται. Πράγματι, οι ειδικές εκπομπές για το 2010 ανέρχονται σε περίπου 0,4 kg CO₂ / kWh, ενώ ουσιαστικά μηδενίζονται στο σενάριο «απανθρακοποίησης» κατά το 2050.



Σχήμα 7-3: Ειδικές εκπομπές αερίων θερμοκηπίου στην ηλεκτροπαραγωγή (EE27)

Κατά συνέπεια οι ειδικές εκπομπές ανά αυτοκίνητο EF_k^{WTW} στο σύνολο της ενεργειακής αλυσίδας υπολογίζονται από την Εξίσωση (7-8) και μετρώνται σε gCO_2/km . Το Σχήμα 7-4 παρουσιάζει τις ειδικές εκπομπές ανά τύπο αυτοκινήτου για το 2015 και το 2050 στο σενάριο απανθρακοποίησης για την ΕΕ.

Τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα με μπαταρία παρ'όλο που έχουν μηδενικές εκπομπές στο επίπεδο της εξάτμισης (tailpipe), φέρουν σημαντικές εκπομπές στο στάδιο παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας. Πράγματι, οι ειδικές εκπομπές για τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα με μπαταρία αγγίζουν τα $60 gCO_2/km$, που ωστόσο τα καθιστούν ως την τεχνολογική επιλογή με τις χαμηλότερες εκπομπές CO_2 . Τα συμβατικά αυτοκίνητα εσωτερικής καύσης που καίνε πετρέλαιο και βενζίνη χαρακτηρίζονται από χαμηλές εκπομπές WTT λόγω του υψηλού βαθμού απόδοσης του διυλιστηρίου και της χαμηλής ιδιοκατανάλωσής του. Τα αυτοκίνητα υδρογόνου χαρακτηρίζονται από τις υψηλότερες εκπομπές CO_2 λόγω της υπόθεσης ότι σήμερα η συνηθέστερη μέθοδος παραγωγής υδρογόνου αποτελεί η αναμόρφωση του φυσικού αερίου μέσω θερμικών διεργασιών (steam-methane reforming). Η συγκεκριμένη μέθοδος χρησιμοποιείται για το 95% της παραγωγής υδρογόνου στις ΗΠΑ σύμφωνα με το National Renewable Energy Laboratory και τους Holladay et al. (2009). Η συγκεκριμένη μέθοδος μπορεί να οδηγήσει σε εκπομπές που ξεπερνούν τα $10 kg CO_2 / kg$ παραγωγής υδρογόνου.



Σχήμα 7-4: WTW εκπομπές CO₂ (σε gCO₂/χλμ.) ανά τύπο αυτοκινήτου για το 2015 και το 2050 στο σενάριο απανθρακοποίησης

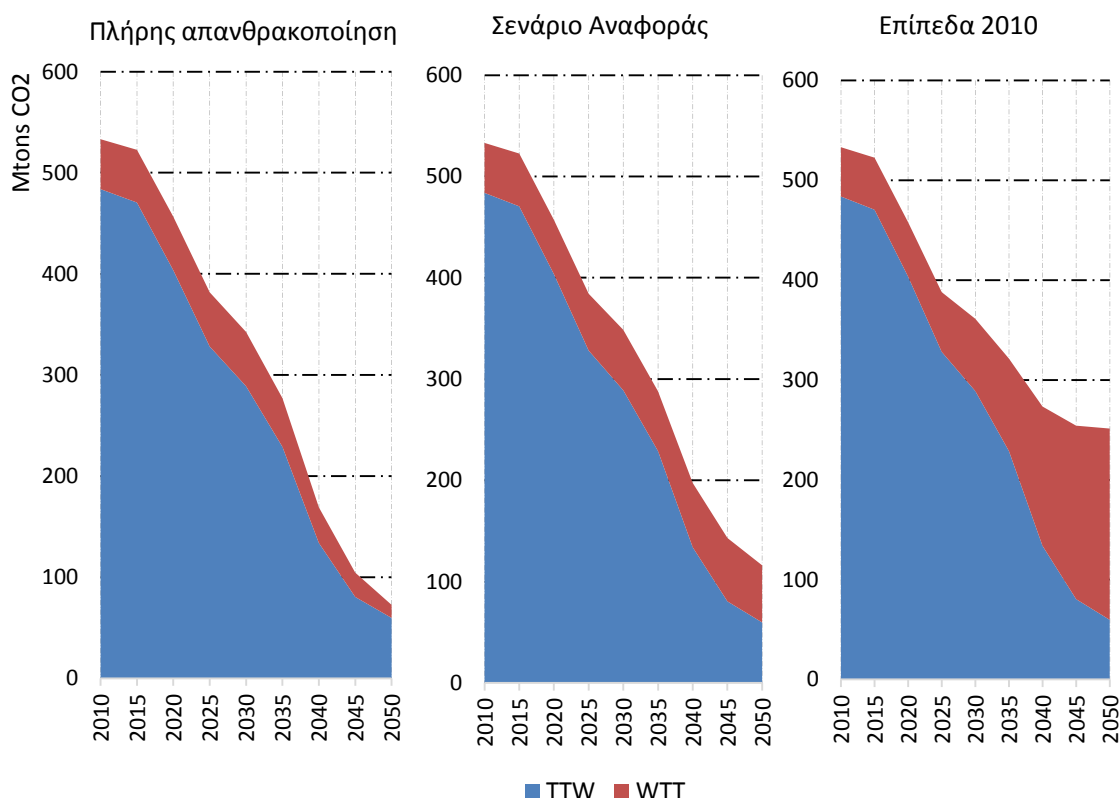
Οι θετικές επιπτώσεις της καθαρής παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες μορφές ενέργειας καθώς και η εγκατάσταση μονάδων συγκράτησης και αποθήκευσης εκπομπών αερίου του θερμοκηπίου σε θερμικούς σταθμούς οδηγεί σε ραγδαία μείωση των ειδικών εκπομπών κατά την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στο μακροχρόνιο ορίζοντα του 2050 για το σενάριο «απανθρακοποίησης». Επίσης, οι εκπομπές κατά την παραγωγή υδρογόνου έχουν μειωθεί σε σχεδόν μηδενικά επίπεδα καθώς γίνεται η υπόθεση ότι η παραγωγή υδρογόνου προέρχεται μέσω της διεργασίας της ηλεκτρόλυσης όπου γίνεται η χρήση της καθαρής ηλεκτρικής ενέργειας.

7.3.3 WTW εκπομπές CO₂

Οι ειδικές εκπομπές αερίου του θερμοκηπίου που υπολογίζονται για κάθε είδος αυτοκινήτου και μορφής ενέργειας επιτρέπουν τον υπολογισμό των συνολικών εκπομπών CO₂ για όλα τα αυτοκίνητα στο σενάριο «battery only».

Οι υπολογισμοί για τις συνολικές εκπομπές WTW πραγματοποιούνται στο πλαίσιο τόσο του σεναρίου αναφοράς όσο και του σεναρίου απανθρακοποίησης. Το

δεύτερο σενάριο επιτυγχάνει βαθύτερη μείωση των εκπομπών CO₂ κατά τη διαδικασία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Οι συνολικές εκπομπές αερίου του θερμοκηπίου παρουσιάζονται στο Σχήμα 7-5 όπου γίνεται η διάκριση σε επίπεδο WTT και TTW. Οι εκπομπές TTW είναι ίδιες για όλες τις περιπτώσεις αφού αναφέρονται στο ίδιο σενάριο («battery only»). Οι εκπομπές WTT αλλάζουν λόγω της διαφορετικής δομής του ενεργειακού μείγματος για την ΕΕ στα δύο σενάρια. Επιπλέον, παρουσιάζονται και οι εκπομπές CO₂ στην περίπτωση που το ενεργειακό μείγμα της ΕΕ παρέμεινε σταθερό στα επίπεδα παραγωγής του 2010. Η τελευταία περίπτωση καταδεικνύει ότι η χρήση της ηλεκτρικής ενέργειας δεν είναι βιώσιμη αν η ηλεκτρική ενέργεια δεν προέρχεται από καθαρές πηγές όπως οι ανανεώσιμες μορφές ενέργειας.



Σχήμα 7-5: Συνολικές WTT εκπομπές CO₂ των επιβατικών αυτοκινήτων σε τρεις χαρακτηριστικές περιπτώσεις

7.3.4 Επιδράσεις της φόρτισης των ηλεκτρικών αυτοκινήτων

7.3.4.1 Ηλεκτρικά αυτοκίνητα και βέλτιστη φόρτιση

Το ερώτημα που εξετάζεται στην παρούσα παράγραφο αφορά τη χρονική στιγμή κατά την οποία οι καταναλωτές θα επιλέξουν να φορτίσουν το ηλεκτρικό τους αυτοκίνητο. Υπάρχει γενικότερα η προσδοκία ότι το δίκτυο δε θα επηρεαστεί σε μεγάλο βαθμό από τη χρήση των ηλεκτρικών οχημάτων είτε επειδή η φόρτιση θα πραγματοποιηθεί σε ώρες εκτός αιχμής είτε επειδή ο αριθμός των οχημάτων θα αυξηθεί

με βραδύ ρυθμό που θα επιτρέψει τον επαρκή προγραμματισμό για επενδύσεις στην ενδυνάμωση του δικτύου. Ωστόσο, οι θετικές προσδοκίες δε λαμβάνουν υπόψη ότι οι τελικοί καταναλωτές θα έχουν τον έλεγχο της φόρτισης των αυτοκινήτων τους και θα επιλέγουν οι ίδιοι τη χρονική στιγμή φόρτισης (Grahm et al., 2014, Schwanitz, 2013, Hadley, 2007).

Η βέλτιστη χρονική στιγμή φόρτισης των αυτοκινήτων για τους παραγωγούς ηλεκτρικής ενέργειας είναι ως επί το πλείστον τη νύχτα που η ζήτηση για ηλεκτρική ενέργεια είναι χαμηλή και η τιμή πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας καθορίζεται από τους σταθμούς με χαμηλό κόστος λειτουργίας. Σε αυτήν την περίπτωση, η κάλυψη της επιπρόσθετης ζήτησης για ηλεκτρική ενέργεια από τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα αναμένεται να προέλθει από αυτούς τους σταθμούς.

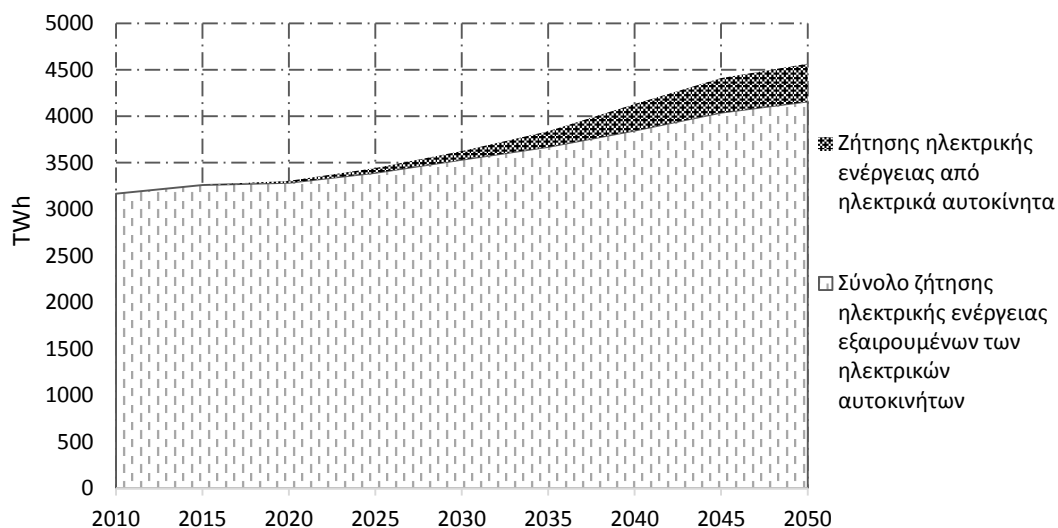
Ωστόσο, από την πλευρά των καταναλωτών, η επιθυμητή χρονική στιγμή φόρτισης είναι εκείνη κατά την οποία έχουν άμεση πρόσβαση σε σημείο φόρτισης. Κατά συνέπεια, οι καταναλωτές κατά την επιστροφή στο σπίτι τους από την εργασία θα προτιμήσουν να συνδέσουν απ' ευθείας το αυτοκίνητό τους στο σημείο φόρτισης. Εξάλλου, οι καταναλωτές επιθυμούν να έχουν την επιλογή (option) χρήσης του αυτοκινήτου αφότου αυτό φορτίσει μετά την επιστροφή τους από την εργασία. Ωστόσο, αυτή η προτίμηση είναι δυνατό να αλλάξει αν υπάρξει σοβαρό κίνητρο (ή αντίκίνητρο). Εξάλλου, η ύπαρξη «έξυπνων» συσκευών διαχείρισης της σύνδεσης των ηλεκτρικών αυτοκινήτων με το δίκτυο θα επιτρέψει πιο αποδοτική απόκριση της ευελιξίας φόρτισης των ηλεκτρικών αυτοκινήτων σε μεταβολές των τιμών.

Οι Kintner-Meyer et al. (2007) και Scott et al. (2007) μελετούν τις επιπτώσεις της περαιτέρω διείσδυσης ηλεκτρικών αυτοκινήτων στο ηλεκτρικό δίκτυο και τις διαθέσιμες μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε διάφορες περιοχές των ΗΠΑ. Οι Denholm και Short (2006) μελετούν την περίπτωση στην οποία οι χρήστες των ηλεκτρικών αυτοκινήτων επιτρέπουν τον έλεγχο της φόρτισης των οχημάτων τους στις ηλεκτρικές εταιρείες. Οι τελευταίες αναθέτουν τη φόρτιση σε περιόδους της ημέρας χαμηλής ζήτησης και καλύπτουν την επιπλέον ζήτηση με μονάδες χαμηλού μεταβλητού κόστους και κατ' επέκταση χαμηλής τιμής ηλεκτρικής ενέργειας. Επίσης, συζητούν την περίπτωση της χρήσης των μπαταριών των ηλεκτρικών αυτοκινήτων για λόγους αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας πέραν της εξομάλυνσης της καμπύλης φορτίου Bauer et al. (2010). Οι Schulze και Riveros (2010), Camus et al. (2009) εξετάζουν εναλλακτικά σενάρια ανεξέλεγκτης φόρτισης ηλεκτρικών αυτοκινήτων με καλώδιο στο ηλεκτρικό σύστημα της Πορτογαλίας.

7.3.4.2 Υποθέσεις φόρτισης και διείσδυσης ηλεκτρικών αυτοκινήτων

Για την αξιολόγηση του τρόπου φόρτισης των ηλεκτρικών αυτοκινήτων είναι απαραίτητη η χρήση ενός σεναρίου υψηλής διείσδυσης ηλεκτρικής ενέργειας από τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα. Για το λόγο αυτό γίνεται χρήση του σεναρίου «Battery Only» στο οποίο παρατηρείται η μέγιστη διείσδυση ηλεκτρικών αυτοκινήτων στην αγορά και παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 6. Πράγματι, το συγκεκριμένο σενάριο παρουσιάζει την υψηλότερη ζήτηση για ηλεκτρική ενέργεια από τις οδικές μεταφορές στο χρονικό

ορίζοντα του 2050. Το Σχήμα 7-6 παρουσιάζει τη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας στο σύνολο του ενεργειακού συστήματος όπως προκύπτει από την ποσοτικοποίηση με το μοντέλο PRIMES και την επιπρόσθετη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας από τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα που προκύπτει από το σενάριο «Battery Only».



Σχήμα 7-6: Ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας στο σύνολο του ενεργειακού συστήματος στο σενάριο Απανθρακοποίησης.

Δύο σενάρια καταστρώνονται αναφορικά με τον τρόπο φόρτισης των ηλεκτρικών αυτοκινήτων: (1) Ανεξέλεγκτη φόρτιση και (2) Ελεγχόμενη φόρτιση. Αρχικά, το σενάριο της ανεξέλεγκτης φόρτισης προϋποθέτει ότι οι καταναλωτές συνδέουν το ηλεκτρικό τους αυτοκίνητο στο δίκτυο τη στιγμή που επιστρέφουν από την εργασία. Αντιθέτως, το σενάριο της ελεγχόμενης φόρτισης υποθέτει ότι η φόρτιση πραγματοποιείται κατά τις πρωινές ώρες της ημέρας, καθώς οι καταναλωτές παρουσιάζουν ευελιξία στη φόρτιση των αυτοκινήτων τους.

Ο Πίνακας 7-7 παρουσιάζει τις προϋποθέσεις φόρτισης τόσο για τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα όσο και για τα υβριδικά με καλώδιο. Δεδομένης της ηλεκτρικής αυτονομίας κάθε τύπου οχήματος, πραγματοποιούνται υποθέσεις για τη χωρητικότητα της μπαταρίας (λαμβάνοντας υπόψη ένα βαθμό απόδοσης που είναι της τάξης των 0,2 kWh/χλμ.). Επιπλέον, αν θεωρηθεί κύκλωμα 16 A, τότε προκύπτει ότι η ισχύς φόρτισης είναι περίπου 3,7 kW, για τάση ηλεκτρικού ρεύματος 230 V. Ασφαλώς κυκλώματα με υψηλότερη ένταση ηλεκτρικού ρεύματος θα επιτρέψουν υψηλότερη πρόσδοση ισχύος και κατ' επέκταση θα μειώσουν τον απαιτούμενο χρόνο φόρτισης. Σύμφωνα με τη μελέτη των VDE (2010), σύνδεση ισχύος 3,7 kW είναι επαρκής για υβριδικά αυτοκίνητα με καλώδιο.

Ο χρόνος φόρτισης ενός υβριδικού αυτοκινήτου με καλώδιο κυμαίνεται μεταξύ 1 - 3 ωρών, ενώ για τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα ο χρόνος φόρτισης κυμαίνεται μεταξύ 3 -

8.5 ώρες (Πίνακας 7-7). Η φόρτιση των παραπάνω τύπων αυτοκινήτων διαρκεί από το 20%-100% της κατάσταση φόρτισης (State of Charge- SOC) σύμφωνα με τον Duvall (2006). Επίσης, λαμβάνονται υπόψη απώλειες ενέργειας 10-15%, γεγονός που συνεπάγεται ότι η τελική παρεχόμενη ενέργεια από το δίκτυο είναι αυξημένη κατά 10-15% σε σχέση με τη χωρητικότητα της μπαταρίας. Εξάλλου, γίνεται η υπόθεση ότι τα καθαρά ηλεκτρικά αυτοκίνητα, που έχουν σαφώς μεγαλύτερη χωρητικότητα από τα υβριδικά με καλώδιο, δε χρειάζονται πάντοτε πλήρη φόρτιση δεδομένου ότι η ημερήσια χρήση τους από τη μεγάλη πλειοψηφία των καταναλωτών είναι σημαντικά μικρότερη από το εύρος της ηλεκτρικής αυτονομίας τους. Ωστόσο, η παραπάνω υπόθεση δεν καλύπτει πλήρως όλο το εύρος των χρηστών δεδομένου της μεγάλης ετερογένειας που επικρατεί.

Πίνακας 7-7: Προϋποθέσεις φόρτισης για ηλεκτρικά αυτοκίνητα και υβριδικά με καλώδιο

	Ηλεκτρική αυτονομία (χλμ)	Χωρητικότητα μπαταρίας (kWh)	Διάρκεια φόρτισης (ώρες)
Υβριδικά με καλώδιο	20	3	0.8
	40	6	1.5
	80	13	3.0
Ηλεκτρικό με μπαταρία	100	14	3.4
	160	23	5.4
	250	36	8.5

230 V/16A

7.3.4.3 Διαχρονικό μοντέλο βέλτιστης ανάπτυξης και λειτουργίας ηλεκτρικού συστήματος δίχως ευελιξία φόρτισης (ανεξέλεγκτη φόρτιση)

Η παρούσα παράγραφος παρουσιάζει την τυπική γραφή ενός μοντέλου βέλτιστης ανάπτυξης και λειτουργίας ηλεκτρικού συστήματος. Το τυπικό αυτό ηλεκτρικό μοντέλο δεν περιλαμβάνει ευελιξία φόρτισης, την οποία περιλαμβάνει το προσαυξημένο μοντέλο που παρουσιάζεται σε επόμενη παράγραφο.

Οι μεταβλητές απόφασης του συγκεκριμένου μοντέλου είναι οι επενδύσεις $I_{i,tt}$ για κατασκευή σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας i και η λειτουργία των σταθμών $G_{i,tt,h,t}$ (σε μονάδες ισχύος). Οι όροι $FC_{i,tt}$ και $VC_{i,tt,t}$ υποδηλώνουν το κεφαλαιουχικό και το μεταβλητό κόστος αντίστοιχα που υπεισέρχεται στην αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος. Ο δείκτης t υποδηλώνει τη χρονική στιγμή που εξετάζεται ενώ ο δείκτης tt δείχνει τη χρονιά κατασκευής του σταθμού.

$$Min Cost = \sum_t \frac{1}{(1 + \delta)^t} \left[\sum_{tt \leq t} \sum_i (FC_{i,tt} \cdot I_{i,tt} \cdot s_{i,tt,t}) + \sum_{h,tt \leq t} \sum_i (VC_{i,tt,t} \cdot G_{i,tt,h,t} \cdot hr_{h,t}) \right] \quad (7-13)$$

Το πρόβλημα βελτιστοποίησης της ανάπτυξη και λειτουργίας του ηλεκτρικού συστήματος υπόκειται σε περιορισμό διαθέσιμης ισχύος. Δηλαδή θα ισχύει:

$$G_{i,tt,h,t} \leq I_{i,tt} \cdot s_{i,tt,t} \cdot avail_{i,tt,h,t} \quad (7-14)$$

Όπου ο όρος $avail_{i,tt,h,t}$ χαρακτηρίζει αν ο σταθμός είναι διαθέσιμος για παροχή ισχύος τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή h για να καλυφθεί η ζήτηση. Προφανώς, ο όρος αυτός διαφέρει ανάλογα με τη φύση της μονάδας και του ενεργειακού - πρωτογενούς πόρου που αυτή χρησιμοποιεί. Η παράμετρος $s_{i,tt,t}$ υποδηλώνει αν μια μονάδα βρίσκεται σε λειτουργία ή όχι.

Επιπλέον, το μοντέλο υπόκειται σε περιορισμό ικανοποίησης της ζήτησης $Dm_{h,t}$ για κάθε χρονική στιγμή h της καμπύλης διάρκειας φορτίου. Συνεπώς, θα ισχύει:

$$\sum_{tt \leq t, i} G_{i,tt,h,t} \geq Dm_{h,t} \quad (7-15)$$

Ο δείκτης του ποσοστού εφεδρείας (ρ_t), που δείχνει τη διαφορά μεταξύ της διαθέσιμης ισχύος και της ζήτησης αιχμής, αποτελεί ένα δείκτη επάρκειας και αξιοπιστίας του ηλεκτρικού συστήματος. Κατά συνέπεια, στη ζήτηση αιχμής θα πρέπει το διαθέσιμο δυναμικό ισχύος να επαρκεί για την κάλυψη της ζήτησης προσαυξημένης κατά ένα ποσοστό ίσο με το ποσοστό εφεδρείας. Ο παραπάνω περιορισμός γράφεται ως εξής:

$$\sum_{tt \leq t, i} I_{i,tt} \cdot s_{i,tt,t} \cdot avail_{i,tt,h,t} \geq Dm_{αιχμή,t} \cdot (1 + \rho_t) \quad (7-16)$$

Τέλος, ο περιορισμός διαθεσιμότητας καυσίμου ή πόρου όπως το νερό συνεπάγεται ότι συγκεκριμένοι σταθμοί μπορούν να χρησιμοποιηθούν μέχρις ότου εξαντληθεί το καύσιμο ή η διαθεσιμότητα πόρου. Ο περιορισμός γράφεται:

$$\sum_{tt \leq t} \sum_h \frac{G_{i,tt,h,t}}{\eta_{i,tt}} \cdot hr_{h,t} \leq Fsup_{i,t} \quad (7-17)$$

όπου $\eta_{i,tt}$ είναι ο βαθμός απόδοσης του σταθμού, $hr_{h,t}$ είναι η χρονική διάρκεια κάθε ζώνης φορτίου και $Fsup_{i,t}$ είναι η μέγιστη διαθεσιμότητα καυσίμου ή πόρου σε μονάδες ενέργειας.

Το παρόν πρόβλημα υποθέτει ότι η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας είναι μεταβλητή του μοντέλου που εξαρτάται από την τιμή ηλεκτρικής ενέργειας $p_{h,t}$ που προκύπτει ως δυική τιμή του περιορισμού κάλυψης της ζήτησης. Σε αυτήν την περίπτωση, γίνεται η υπόθεση ότι η αγορά λειτουργεί υπό καθεστώς τέλει ανταγωνισμού, γεγονός που συνεπάγεται τιμολόγηση της ηλεκτρικής ενέργειας στο οριακό κόστος.

Το παρόν μοντέλο, που εξετάζει την περίπτωση της ανεξέλεγκτης φόρτισης, δεν πραγματοποιεί διακριτοποίηση μεταξύ της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας $Dm_{h,t}$ από τους κατόχους ηλεκτρικών αυτοκινήτων και τους λοιπούς καταναλωτές ηλεκτρικής ενέργειας. Συνεπώς γίνεται η υπόθεση ότι όλοι οι καταναλωτές αντιδρούν στην ίδια τιμή ηλεκτρικής ενέργειας που είναι ίση με $p_{h,t}$:

$$Dm_{h,t} = \mathcal{D}(p_{h,t}) \quad (7-18)$$

Οι συνθήκες KKT του παραπάνω προβλήματος βελτιστοποίησης έχουν ως εξής:

$$\frac{1}{(1+\delta)^t} \cdot VC_{i,tt,t} \cdot hr_{h,t} + v_{i,tt,h,t} + w_{i,t} \geq p_{h,t} \quad \perp \quad G_{i,tt,h,t} \geq 0 \quad (7-19)$$

$$\sum_t \frac{1}{(1+\delta)^t} FC_{i,tt} s_{i,tt,t} \geq \sum_t \sum_h (v_{i,tt,h,t} + m_{h,t}) s_{i,tt,t} avail_{i,tt,h,t} \quad \perp \quad I_{i,tt} \geq 0 \quad (7-20)$$

$$\sum_{tt \leq t,i} G_{i,tt,h,t} \geq Dm_{h,t} \quad \perp \quad p_{h,t} \geq 0 \quad (7-21)$$

$$G_{i,tt,h,t} \leq I_{i,tt} \cdot s_{i,tt,t} \cdot avail_{i,tt,h,t} \quad \perp \quad v_{i,tt,h,t} \geq 0 \quad (7-22)$$

$$\sum_{tt \leq t,i} I_{i,tt} \cdot s_{i,tt,t} \cdot avail_{i,tt,h,t} \geq Dm_{αιχμή,t} \cdot (1 + \rho_t) \quad \perp \quad m_{h,t} \geq 0 \quad (7-23)$$

$$\sum_{tt \leq t} \sum_h \frac{G_{i,tt,h,t}}{\eta_{i,tt}} \cdot hr_{h,t} \leq Fsup_{i,t} \quad \perp \quad w_{i,t} \geq 0 \quad (7-24)$$

$$Dm_{h,t} = \mathcal{D}(p_{h,t}) \quad \perp \quad Dm_{h,t} \text{ free} \quad (7-25)$$

Το παραπάνω μοντέλο είναι η απλοποιημένη μαθηματική γραφή ενός σύνθετου μοντέλου ηλεκτρικής αγοράς όπως το PRIMES και αποτελεί ένα πρόβλημα μεικτής συμπληρωματικότητας (MCP). Η γραφή του μοντέλου ως πρόβλημα μεικτής συμπληρωματικότητας είναι απαραίτητη δεδομένου ότι η ζήτηση για ηλεκτρική ενέργεια είναι ενδογενής μεταβλητή που εξαρτάται από τη δυική τιμή του περιορισμού κάλυψης της ζήτησης.

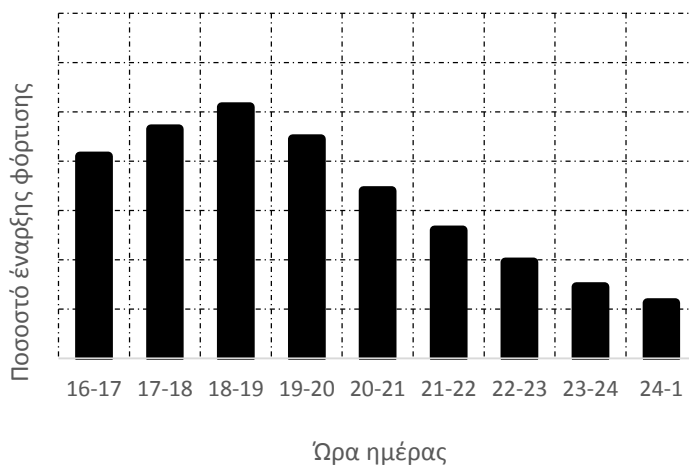
Το μοντέλο αυτό προσομοιώνει την περίπτωση της ανεξέλεγκτης φόρτισης αφού οι καταναλωτές δεν έχουν κίνητρα να μεταβάλλουν την προτίμηση της άμεσης

φόρτισης κατά την επιστροφή τους από την εργασία. Η οριακή τιμή του συστήματος που προκύπτει για κάθε χρονική στιγμή της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας θεωρείται ότι δεν είναι ικανή να αλλάξει την προτίμηση των καταναλωτών για τη στιγμή που θα φορτίσουν το αυτοκίνητό τους.

7.3.4.4 Περίπτωση 1: Ανεξέλεγκτη φόρτιση

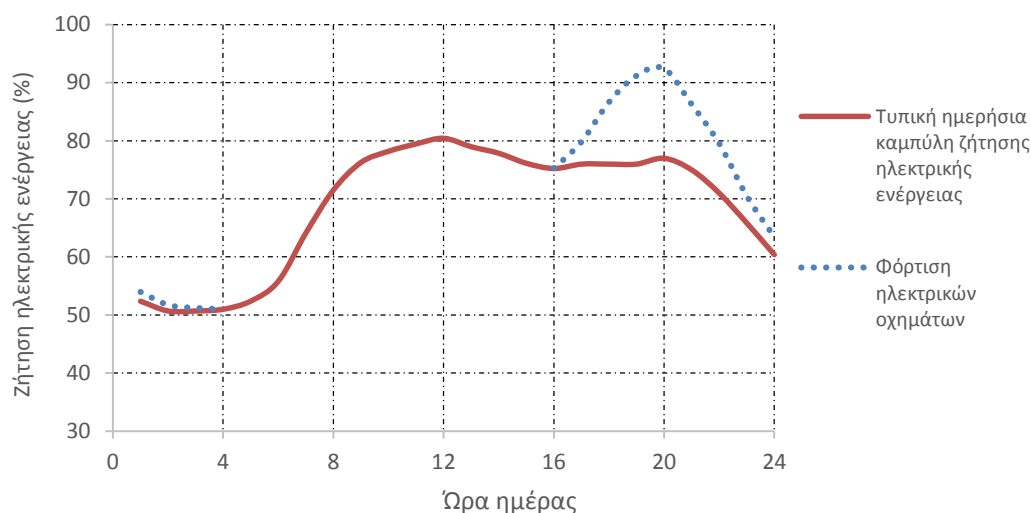
Στην περίπτωση της ανεξέλεγκτης φόρτισης, η μπαταρία του ηλεκτρικού αυτοκινήτου ξεκινάει να φορτίζεται αμέσως μετά την άφιξη του αυτοκινήτου στο σπίτι έπειτα από την επιστροφή από το χώρο εργασίας. Συνεπώς, μόλις το αυτοκίνητο συνδεθεί στο δίκτυο, η μπαταρία ξεκινάει να φορτίζει με ισχύ περίπου $P_c = 3,7 \text{ kW}$ έως ότου η κατάσταση φόρτισης (State-Of-Charge: SOC) να αγγίξει το 100%. Η παροχή ισχύος αντιστοιχεί σε τάση οικιακή 230 V με 16A ασφάλεια. Επιπλέον, η παρούσα περίπτωση υποθέτει ότι δεν υπάρχει κάποια έξυπνη συσκευή που να ελέγχει πώς ή πότε ξεκινάει η φόρτιση καθώς και ότι δεν υπάρχουν κίνητρα ευελιξίας.

Στο παρόν πρόβλημα εξετάζεται μόνο η περίπτωση φόρτισης των ηλεκτρικών αυτοκινήτων και υβριδικών με καλώδιο σε οικιακό χώρο μετά την επιστροφή από την εργασία. Επιπλέον, λαμβάνονται υπόψη από τη βιβλιογραφία οι χρονικές περίοδοι της ημέρας όπου οι μετακινούμενοι επιστρέφουν από την εργασία, έτσι ώστε να γίνει η εκτίμηση των αντιστοιχών προφίλ φόρτισης (Σχήμα 7-7). Η παρούσα περίπτωση μπορεί να θεωρηθεί ως ένα οριακό σενάριο (worst case scenario).



Σχήμα 7-7: Τυπικό ιστόγραμμα επιστροφής εργαζομένων/ άμεσης έναρξης φόρτισης ανά ώρα ημέρας για το Ηνωμένο Βασίλειο (Πηγή: Cipcigan, 2011)

Το Σχήμα 7-8 παρουσιάζει το προφίλ φόρτισης των ηλεκτρικών αυτοκινήτων στην περίπτωση της ανεξέλεγκτης φόρτισης σε μια τυπική ημερήσια καμπύλη φορτίου ηλεκτρικής ενέργειας. Το προφίλ βασίζεται στο ιστόγραμμα συχνοτήτων επιστροφής των εργαζομένων στην οικία τους μετά την εργασία (Σχήμα 7-7). Όπως φαίνεται στο Σχήμα 7-8.



Σχήμα 7-8: Επίδραση ανεξέλεγκτης φόρτισης ηλεκτρικών αυτοκινήτων σε τυπική ημερήσια καμπύλη φορτίου ηλεκτρικής ενέργειας

7.3.4.5 Διαχρονικό μοντέλο βέλτιστης ανάπτυξης και λειτουργίας ηλεκτρικού συστήματος με ευελιξία φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων

Το προηγούμενο τυπικό μοντέλο βέλτιστης ανάπτυξης και λειτουργίας του ηλεκτρικού συστήματος επεκτείνεται έτσι ώστε να αναλυθεί η συμπεριφορά και να ερευνηθούν οι επιδράσεις της εισαγωγής και φόρτισης των ηλεκτρικών αυτοκινήτων στο ηλεκτρικό δίκτυο. Επιπλέον, πραγματοποιείται προσομοίωση της συμπεριφοράς απόκρισης των καταναλωτών σε εναλλακτικές τιμολογιακές πολιτικές και κίνητρα. Στα πλαίσια της παρούσας ανάλυσης λαμβάνεται υπόψη μόνο η φόρτιση σε οικιακούς χώρους (δηλαδή κατά την επιστροφή από την εργασία).

Το επαυξημένο μοντέλο ενσωματώνει απόκριση των κατόχων των ηλεκτρικών οχημάτων σε μεταβολές τιμής ηλεκτρικής ενέργειας ανά χρονική στιγμή της ημέρας. Η μεθοδολογία προσομοίωσης του επιπρόσθετου φορτίου λόγω της φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων ακολουθεί τη μεθοδολογία του Grahn (2013). Η περίπτωση της ελεγχόμενης φόρτισης αποσκοπεί στο να εντοπίσει το βέλτιστο χρονικά σημείο με χαμηλού κόστους παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας έτσι ώστε να αντιστοιχήσει τη φόρτιση του αυτοκινήτου σε περιόδους χαμηλής ζήτησης. Η χρήση κατάλληλων-έξυπνων συσκευών είναι δυνατό να επιτρέψει την αλληλεπίδραση αυτοκινήτου-δικτύου σε πραγματικό χρόνο.

Έστω $D_{h,t}^V$ η ζήτηση για ηλεκτρική ενέργεια από τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα για κάθε χρονική περίοδο h . Προφανώς, το φορτίο $D_{h,t}^V$ εξαρτάται από την ισχύ φόρτισης η οποία είναι ίση με $P_c = 3,7$ kW και τον αριθμό των αυτοκινήτων που φορτίζονται κάθε συγκεκριμένη χρονική στιγμή.

Η συνολική ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας $Dm_{h,t}$, αντίθετα από την περίπτωση του μοντέλου που δε λαμβάνει υπόψη ευελιξία φόρτισης, επιμερίζεται σε δύο όρους: ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας από ηλεκτρικά αυτοκίνητα $D_{h,t}^V$ και από λοιπούς καταναλωτές $D_{h,t}^{noV}$.

$$Dm_{h,t} = D_{h,t}^V + D_{h,t}^{noV} \quad (7-26)$$

Η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας από τους λοιπούς καταναλωτές έστω ότι εξακολουθεί να αποτελεί συνάρτηση της τιμής ηλεκτρικής ενέργειας όπως και στο αρχικό μοντέλο της ανεξέλεγκτης φόρτισης:

$$D_{h,t}^{noV} = \mathcal{D}(p_{h,t}) \quad (7-27)$$

Λόγω της μεγάλης ετερογένειας που επικρατεί καθώς οι αποφασίζοντες φέρουν διάφορα επιμέρους χαρακτηριστικά όπως εισόδημα, ώρα και χρόνος επιστροφής από την εργασία, πραγματοποιείται επιμερισμός των κατόχων ηλεκτρικών αυτοκινήτων σε ω κλάσεις που θα διαφοροποιούν την απόκρισή τους σε τυχόν μεταβολές τιμών ηλεκτρικής ενέργειας.

Η ευελιξία φόρτισης των ηλεκτρικών αυτοκινήτων, ανά κλάση καταναλωτών ω , εξαρτάται κατά ένα ποσοστό από την τιμή του ηλεκτρισμού ανά χρονική περίοδο h . Το γεγονός αυτό συνεπάγεται ότι ένα μικρό ποσοστό καταναλωτών θα αναβάλλει τη φόρτιση σε εκείνες τις χρονικές στιγμές της ημέρας όπου η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας είναι χαμηλή. Συνεπώς, υπάρχει ένα κατώφλι τιμής KT_t^ω πέρα από το οποίο κάθε μερίδα καταναλωτών είναι διατεθειμένη να αναβάλλει τη φόρτιση. Το κατώφλι αυτό διαφοροποιείται ανά κλάση καταναλωτών, προσδιορίζεται ως η προθυμία ευελιξίας φόρτισης και είναι ανεξάρτητο της χρονικής στιγμής. Προφανώς, το κατώφλι τιμής συσχετίζεται θετικά με το μέσο κατά κεφαλή εισόδημα κάθε κλάσης καταναλωτών. Ο Grahn (2013) προτείνει τη μοντελοποίηση του κατωφλιού τιμής ως συνάρτηση της μέσης ημερήσιας τιμής ηλεκτρικής ενέργειας \bar{p}_t προσαρμοσμένη κατά τον παράγοντα δ_ω ανά κλάση καταναλωτή.

$$KT_t^\omega = \bar{p}_t + \delta_\omega \cdot \bar{p}_t \quad (7-28)$$

Δεδομένης της τιμής ηλεκτρικής ενέργειας $p_{h,t}$, πραγματοποιείται η υπόθεση ότι ο διαχειριστής του συστήματος επιβάλλει επιπρόσθετη χρέωση $pen_{h,t}$ για κάθε χρονική περίοδο h στους ιδιοκτήτες ηλεκτρικών αυτοκινήτων. Η επιπρόσθετη χρέωση ορίζεται ως ένα μέτρο πολιτικής (αντί-κίνητρο) έτσι ώστε να αυξήσει την ευελιξία φόρτισης των ηλεκτρικών αυτοκινήτων και να μεταφέρει φορτίο από χρονικές περιόδους υψηλής ζήτησης σε χρονικές περιόδους με χαμηλή ζήτηση (off-peak). Τότε προκύπτει η γενικευμένη τιμή ηλεκτρικής ενέργειας που καλούνται να πληρώσουν οι κάτοχοι των ηλεκτρικών αυτοκινήτων ανά χρονική στιγμή h .

$$p_{h,t}^G = p_{h,t} + pen_{h,t} \quad (7-29)$$

Η απόκριση και η ευελιξία των καταναλωτών είναι δυνατό να μοντελοποιηθεί με τρεις (3) τρόπους που παρουσιάζονται παρακάτω. Προφανώς, ο βαθμός ευελιξίας και απόκρισης εξαρτάται από τη γενικευμένη τιμή ηλεκτρισμού, το κατώφλι τιμής και την κλάση των καταναλωτών.

(1) Αρχικά θεωρείται ότι οι καταναλωτές θα αποφασίσουν να φορτίσουν το ηλεκτρικό τους αυτοκίνητο τη χρονική στιγμή h αν η γενικευμένη τιμή του ηλεκτρισμού είναι μικρότερη του κατώφλιου τιμής. Στην περίπτωση που η γενικευμένη τιμή ηλεκτρισμού ξεπερνάει το κατώφλι τιμής, τότε οι καταναλωτές δε θα φορτίσουν τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή αλλά στην επόμενη χρονική στιγμή που η γενικευμένη τιμή ηλεκτρισμού δε θα ξεπεράσει το κατώφλι τιμής. Το φορτίο που προκύπτει κατά τη φόρτιση για κάθε αυτοκίνητο ανά κλάση αποφασίζοντα $Dcar_{\omega,h,t}^V$ θα είναι:

$$Dcar_{\omega,h,t}^V = \begin{cases} Pc, & p_{h,t}^G \leq KT_t^\omega \\ 0 & p_{h,t}^G > KT_t^\omega \end{cases} \quad (7-30)$$

(2) Η ευελιξία φόρτισης και απόκρισης στις γενικευμένες τιμές ηλεκτρικής ενέργειας είναι δυνατό να προσομοιωθεί με χρήση μοντέλων της θεωρίας διακριτής επιλογής. Η ετερογένεια που επικρατεί μπορεί επιπρόσθετα να προσομοιωθεί στα μοντέλα της θεωρίας διακριτής επιλογής. Η χρήση μοντέλων της θεωρίας διακριτής επιλογής με προσομοίωση της ετερογένειας προϋποθέτει τη διάκριση των καταναλωτών σε κλάσεις ω για τις οποίες γίνεται η θεώρηση ότι οι κλάσεις αντιδρούν με διαφορετικό τρόπο στην γενικευμένη τιμή ηλεκτρισμού. Το συνηθέστερο μοντέλο όπως περιγράφηκε στην παράγραφο 4.6.2 είναι το logit ή το μοντέλο Weibull. Στην περίπτωση που γίνει εφαρμογή του μοντέλου Weibull, εισάγεται ένας δείκτης κόστους που εξαρτάται από τη γενικευμένη τιμή του ηλεκτρισμού και υποδηλώνει απώλεια χρησιμότητας.

Επιπλέον, γίνεται η παραδοχή ότι η παράμετρος γ_ω αποκτά επιπλέον διάσταση της κλάσης των καταναλωτών, συνεπώς μπορεί να αλλάζει η τιμή της ανά κλάση. Η υπόθεση της διαφοροποιημένης τιμής ανά κλάση καταναλωτή επιτρέπει την προσομοίωση διαφορετικής συμπεριφοράς ανά κλάση. Κατά συνέπεια, η απόκριση των καταναλωτών είναι ανελαστική όσο $\gamma_\omega \rightarrow 1$ και πλήρως ελαστική όσο $\gamma_\omega \gg 1$. Σε αυτήν τη περίπτωση, η αύξηση του κατά κεφαλήν εισοδήματος οδηγεί σε μείωση της τιμής της παραμέτρου. Συνεπώς, η πιθανότητα φόρτισης για συγκεκριμένη χρονική στιγμή h υπολογίζεται ως εξής:

$$Dcar_{\omega,h,t}^V = \frac{wp_{\omega,h,t} \cdot p_{h,t}^{G-\gamma_\omega}}{\sum_{hh} [wp_{\omega,h,t} \cdot p_{hh,t}^{G-\gamma_\omega}]} \cdot Pc \quad (7-31)$$

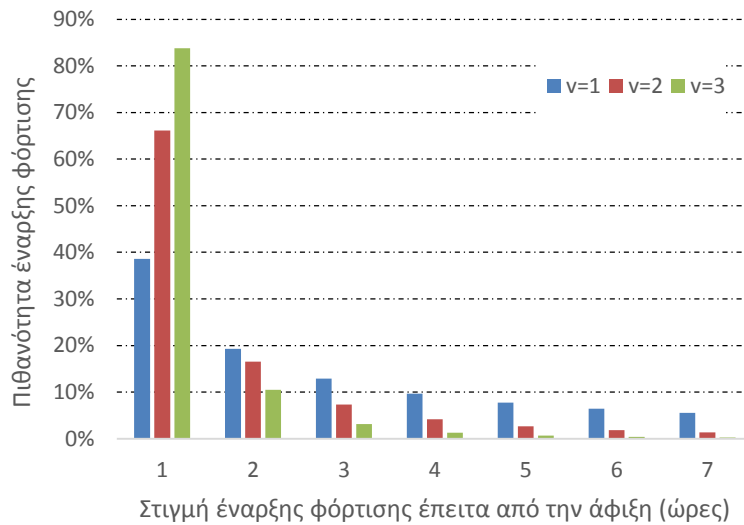
Η σχέση που προσομοιώνει την απόκριση των καταναλωτών σε σχέση με τη γενικευμένη τιμή ηλεκτρισμού ισχύει για εκείνες τις χρονικές στιγμές h κατά τις οποίες ο καταναλωτής έχει φτάσει στην οικία του h_{arr} πριν μπορέσει να ξεκινήσει τη φόρτιση, δηλαδή $h \geq h_{arr}$.

Η παράμετρος $wp_{\omega,h,t}$ υποδηλώνει την προτίμηση φόρτισης κάθε κλάσης καταναλωτή για κάθε χρονική στιγμή h . Η συγκεκριμένη παράμετρος ερμηνεύεται ως η χρησιμότητα που λαμβάνει ο καταναλωτής αν ξεκινήσει τη φόρτιση του αυτοκινήτου του αμέσως μόλις φτάσει στο σπίτι του. Η χρησιμότητα που λαμβάνει αιτιολογείται από το γεγονός ότι ο καταναλωτής θα έχει την επιλογή-ελευθερία (option) χρήσης του αυτοκινήτου του αμέσως μετά τη φόρτισή του (αν διαρκεί 1-3 ώρες). Στην αντίθετη περίπτωση, αν δεν έχει φορτίσει ακόμα το αυτοκίνητο, ο καταναλωτής χάνει την ελευθερία μετακίνησης γεγονός που έχει αρνητικό αντίκτυπο στη χρησιμότητά του. Η παράμετρος μπορεί να οριστεί ως συνάρτηση της κάθε χρονικής στιγμής h και του χρόνου άφιξης h_{arr} . Προτείνεται η χρήση της παρακάτω γνησίως φθίνουσας συνάρτησης για τον υπολογισμό της παραμέτρου $wp_{\omega,h,t}$:

$$wp_{\omega,h,t} = \begin{cases} \frac{1}{(h - h_{arr})^{v_{\omega}}}, & h > h_{arr} \\ 0 & h \leq h_{arr} \end{cases} \quad (7-32)$$

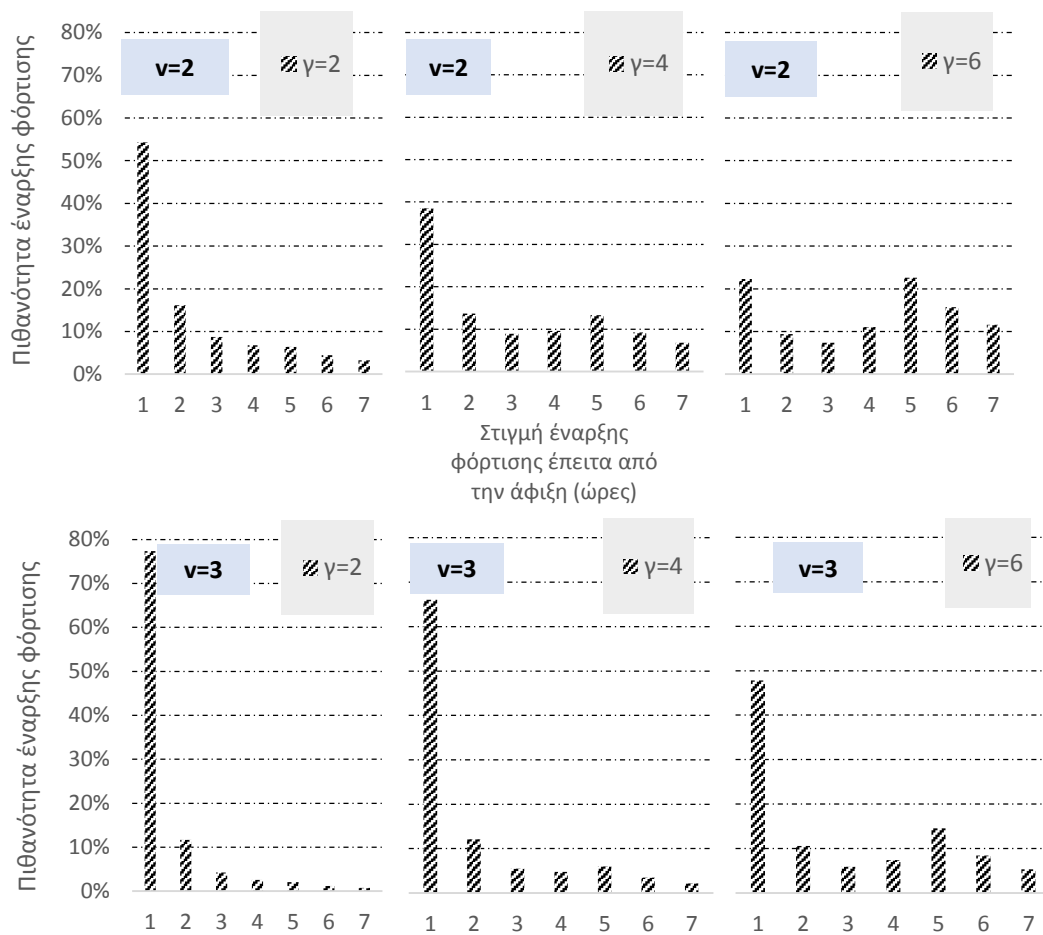
Ο εκθέτης v_{ω} υποδηλώνει το βαθμό επίδρασης της καθυστέρησης φόρτισης στη χρησιμότητα κάθε καταναλωτή, δηλαδή της παραμέτρου $wp_{\omega,h,t}$. Είναι φανερό ότι η τιμή του εκθέτη μπορεί να διαφοροποιείται ανά κλάση καταναλωτή. Για $v_{\omega} > 1$ η απώλεια χρησιμότητας αυξάνει με μεγαλύτερο ρυθμό όσο καθυστερεί η φόρτιση.

Η προσαρμογή του μοντέλου προϋποθέτει αρχικά την υπόθεση ότι η γενικευμένη τιμή που εισέρχεται στο μοντέλο της εξίσωσης (7-31) είναι σταθερή για όλες τις χρονικές στιγμές. Κατά συνέπεια, η τιμή της πιθανότητας φόρτισης ανά χρονική στιγμή $Dcar_{\omega,h,t}^V$ εξαρτάται μόνο από την παράμετρο $wp_{\omega,h,t}$ και είναι ανεξάρτητη του εκθέτη v_{ω} . Ο συνδυασμός των εξισώσεων (7-31) και (7-32) για σταθερές γενικευμένες τιμές απεικονίζεται στο Σχήμα 7-9. Για τιμή $v = 3$, παρουσιάζεται έντονη μη γραμμικότητα που υποδηλώνει ότι η πιθανότητα φόρτισης αυξάνει δραστικά όσο μειώνεται το διάστημα μεταξύ της φόρτισης και του χρόνου άφιξης. Κατά συνέπεια, οποιαδήποτε καθυστέρηση μειώνει τη χρησιμότητα.



Σχήμα 7-9: Πιθανότητα φόρτισης ως συνάρτηση του χρόνου μεταξύ άφιξης και φόρτισης για σταθερές τιμές ηλεκτρικής ενέργειας

Η συμπεριφορά του μοντέλου ελέγχεται για διάφορες τιμές που μπορεί να λάβουν οι παράμετροι γ_ω , ν και η γενικευμένη τιμή ηλεκτρικής ενέργειας $p_{h,t}^G$. Αρχικά, παρουσιάζεται η επίδραση του συνδυασμού των τιμών των εκθετών γ_ω και ν για τη ίδια τιμή $p_{h,t}^G$. Η ποινή που περιλαμβάνεται στην τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας $pen_{h,t}$ θεωρείται ότι λαμβάνει μέγιστη τιμή την πρώτη ώρα ίση με 50 €/MWh και μηδενίζεται σταδιακά την τέταρτη ώρα. Είναι φανερό από το Σχήμα 7-10 ότι η μερίδα των καταναλωτών που ανταποκρίνεται ελάχιστα (ανελαστική) στις τιμές ηλεκτρικής ενέργειας φέρει το συνδυασμό $\nu = 3, \gamma_\omega = 2$. Αντιθέτως, η κλάση καταναλωτών με την ισχυρότερη απόκριση στις τιμές χαρακτηρίζεται από το συνδυασμό $\nu = 2, \gamma_\omega = 6$.



Σχήμα 7-10: Πιθανότητα φόρτισης ως συνάρτηση του χρόνου μεταξύ άφιξης και φόρτισης για συνδυασμούς τιμών των παραμέτρων γ_ω και v .

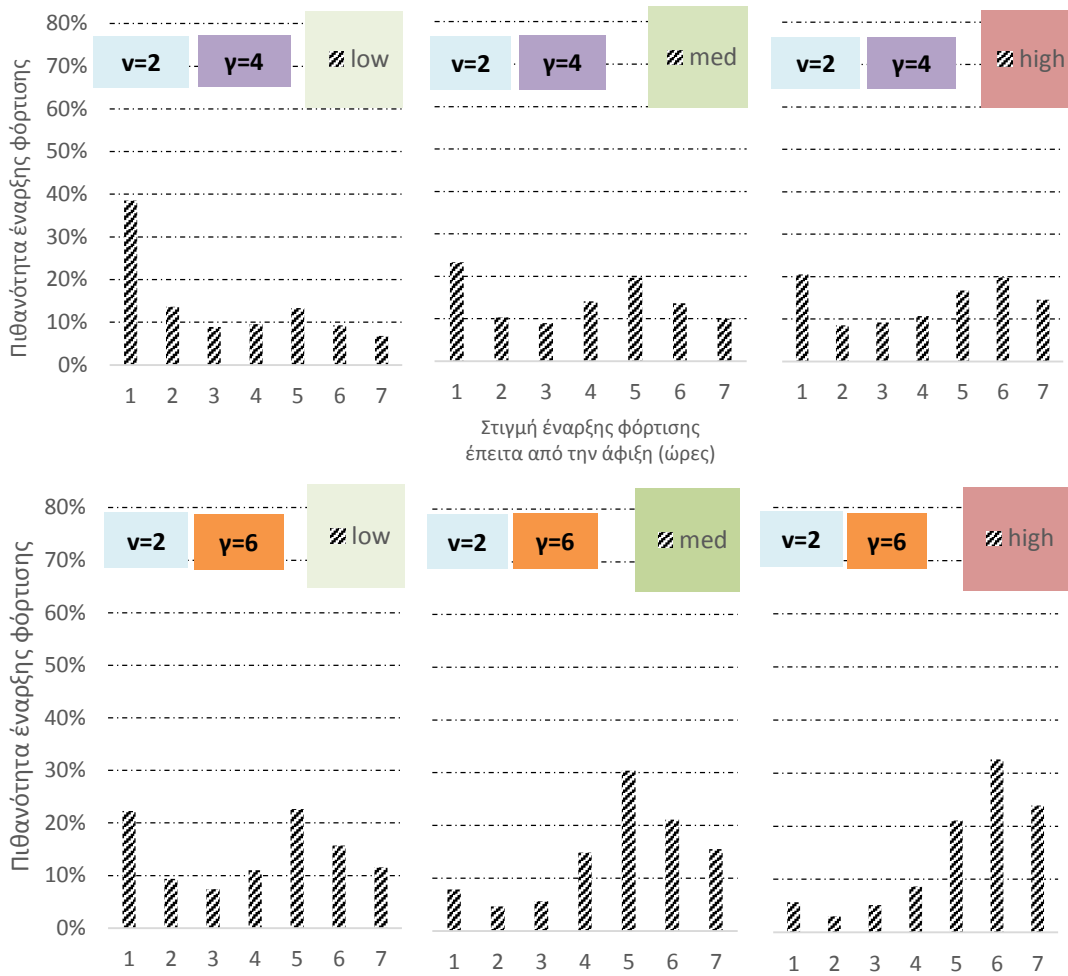
Επιπλέον, πραγματοποιείται ανάλυση αναφορικά με τη συμπεριφορά του μοντέλου για διαφορετικές υποθέσεις για τις τιμές των ποινών φόρτισης $pen_{h,t}$ που περιλαμβάνονται στις γενικευμένες τιμές ηλεκτρικής ενέργειας $p_{h,t}^G$. Ο Πίνακας 7-8 παρουσιάζει τις τιμές των ποινών φόρτισης για τρία επίπεδα έντασης (Low, Med, High). Υψηλότερες τιμές λαμβάνονται στις πρώτες ώρες που επιστρέφει ο χρήστης στην οικία του έπειτα από την εργασία, καθώς εκείνο το χρονικό διάστημα χαρακτηρίζεται τυπικά από υψηλή ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας από τους υπόλοιπους καταναλωτές (πλέον των ηλεκτρικών οχημάτων).

Πίνακας 7-8: Υποθέσεις ποινής φόρτισης που περιλαμβάνονται στην γενικευμένη τιμή ηλεκτρικής ενέργειας

	Ποινή σε (€/MWh)			
	Low	Med	High	
$h - h_{arr}$ (ώρες)	1	50	70	85
	2	40	60	70
	3	30	38	45
	4	15	20	25
	5	0	0	10

Στο μοντέλο απόκρισης εισάγονται οι ποινές φόρτισης, ενώ γίνεται η υπόθεση ότι η τιμή του εκθέτη $\nu = 2$. Επιπλέον, εξετάζονται δύο κλάσεις καταναλωτών που ορίζονται για $\gamma_{\omega} = 4$ και $\gamma_{\omega} = 6$. Είναι φανερό ότι για $\gamma_{\omega} = 6$ παρουσιάζεται μεγαλύτερη ευελιξία φόρτισης (Σχήμα 7-11).

Προκύπτει ότι τιμές ποινής της τάξης των 60-80 €/MWh οδηγούν σε μετατόπιση του φορτίου από τις πρώτες ώρες άφιξης σε επόμενες που δεν αντιστοιχούν σε φορτίο αιχμής. Ας θεωρηθεί το παράδειγμα του χρήστη που είναι διατεθειμένος να πληρώσει την ποινή φόρτισης, για να φορτίσει αμέσως μόλις επιστρέψει από την εργασία του δίχως να θυσιάσει την επιλογή του να έχει διαθέσιμο το αυτοκίνητό του. Αν ο συγκεκριμένος πραγματοποιεί 15000 χλμ. ετησίως, τότε το συνολικό ποσό ποινής που του αντιστοιχεί ανέρχεται σε περίπου 130 ευρώ ετησίως, που είναι σημαντικά χαμηλότερο από το κόστος καυσίμου που θα πλήρωνε αν εξακολουθούσε να χρησιμοποιεί συμβατικό αυτοκίνητο βενζίνης ή ντίζελ. Είναι φανερό ότι η τιμή της ποινής θα πρέπει να προσεγγίζει ή και να ξεπερνάει την οριακή τιμή συστήματος έτσι ώστε να πραγματοποιηθεί ουσιαστική μετατόπιση φορτίου από τις αιχμές σε ζώνες χαμηλού φορτίου.



Σχήμα 7-11: Πιθανότητα φόρτισης ως συνάρτηση του χρόνου μεταξύ άφιξης και φόρτισης για συνδυασμούς τιμών των παραμέτρων γ_ω , v και ποιινής $pen_{h,t}$.

Η ζήτηση για φόρτιση ανά χρονική στιγμή h υπολογίζεται είτε από τη σχέση (7-30) ή (7-31). Συνεπώς, η συνολική ζήτηση για ηλεκτρική ενέργεια από όλα τα αυτοκίνητα υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση λαμβάνοντας υπόψη τις κλάσεις καταναλωτών που φορτίζουν το αυτοκίνητό τους κάθε χρονική περίοδο h και το στόλο $EVstock_t^\omega$ που ανήκει σε κάθε μία από αυτές:

$$D_{h,t}^V = \sum_{\omega} D_{car_{\omega,h,t}}^V \cdot EVstock_t^\omega \quad (7-33)$$

(3) Εναλλακτικά, είναι δυνατό να θεωρηθεί συνάρτηση ζήτησης-απόκρισης που να συνδέει την προθυμία ευελιξίας και της γενικευμένης τιμής ηλεκτρικής ενέργειας $p_{h,t}^G$ προσασυζημένη με τον παράγοντα ποιινής ανά χρονική περίοδο. Προφανώς, η συγκεκριμένη συνάρτηση ζήτησης δε λαμβάνει υπόψη τις διαφορετικές κλάσεις καταναλωτών και αποτελεί μια απλουστευτική προσέγγιση της επίλυσης του προβλήματος. Ωστόσο, μεθοδολογικά μπορεί να ακολουθηθεί σε περίπτωση έλλειψης

δεδομένων για την κατηγοριοποίηση των καταναλωτών σε κλάσεις. Η γενικευμένη τιμή ηλεκτρικής ενέργειας υπολογίζεται από την εξίσωση (7-29) Είναι προφανές ότι για υψηλότερες τιμές του παράγοντα ποινής όλο και περισσότεροι καταναλωτές επιλέγουν την αναβολή φόρτισης για χρονικές περιόδους δίχως ποινή.

$$D_{h,t}^V = \mathcal{G}(p_{h,t}^G) \quad (7-34)$$

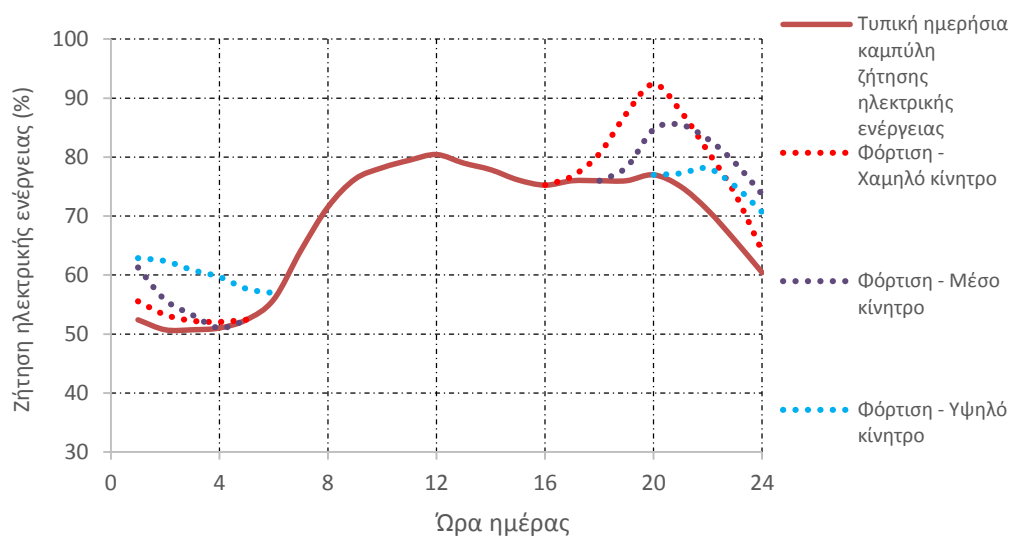
Το μοντέλο βέλτιστης ανάπτυξης και λειτουργίας του ηλεκτρικού συστήματος λαμβάνοντας υπόψη την ευελιξία φόρτισης περιλαμβάνει τις εξισώσεις (7-19)-(7-24) και επιπλέον είτε τις (7-30), (7-33) είτε τις (7-31), (7-33) ή την (7-34).

7.3.4.6 Περίπτωση 2: Ελεγχόμενη φόρτιση

Η συγκεκριμένη περίπτωση εξετάζει τρία σενάρια ελεγχόμενης φόρτισης τα οποία διαβαθμίζονται ανάλογα με το κίνητρο που παρέχεται στους καταναλωτές. Ο σκοπός της συγκεκριμένης περίπτωσης είναι να αξιολογήσει την επίδραση της ελεγχόμενης φόρτισης στην τυπική ημερήσια καμπύλη φορτίου. Ο στόχος της ανάλυσης είναι η μετατόπιση του επιπρόσθετου φορτίου των ηλεκτρικών αυτοκινήτων σε ώρες εκτός αιχμής, όπου παρατηρείται η χαμηλότερη ζήτηση.

Η μέγιστη διείσδυση των ηλεκτρικών αυτοκινήτων παρατηρείται στο μακροχρόνιο χρονικό ορίζοντα, οπότε τα οφέλη της ελεγχόμενης φόρτισης είναι πιο φανερά στην τυπική ημερήσια καμπύλη φορτίου ηλεκτρικής ενέργειας. Η παρακάτω εφαρμογή παρουσιάζει τρία σενάρια ελεγχόμενης φόρτισης στα οποία το φορτίο ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας από τα ηλεκτρικά οχήματα προστίθεται στο φορτίο από τους λοιπούς καταναλωτές. Όπως και στην περίπτωση της ανεξέλεγκτης φόρτισης, το παρόν πρόβλημα εξετάζει την περίπτωση φόρτισης των ηλεκτρικών αυτοκινήτων και υβριδικών με καλώδιο σε οικιακό χώρο μετά την επιστροφή από την εργασία.

Η επίδραση της απόκρισης των καταναλωτών σε τρία διαφορετικά επίπεδα επιπρόσθετης χρέωσης που περιλαμβάνονται στη γενικευμένη τιμή ηλεκτρικής ενέργειας παρουσιάζεται στο Σχήμα 7-12. Ουσιαστικά, η γενικευμένη τιμή ηλεκτρικής ενέργειας επιτρέπει στο διαχειριστή του συστήματος να καθορίσει τη χρονική στιγμή που είναι πιο οικονομική για να εισαχθεί στο δίκτυο το επιπρόσθετο φορτίο. Το κίνητρο ή αντί-κίνητρο που αντανακλάται στη γενικευμένη τιμή ηλεκτρικής ενέργειας που «βλέπει» ο καταναλωτής είναι δυνατό να αλληλοεπιδρά με έξυπνες συσκευές εντός του οχήματος που θα ελέγχουν αν επιθυμεί ο χρήστης τη φόρτιση του ηλεκτρικού οχήματος τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Η αλληλεπίδραση μεταξύ της έξυπνης συσκευής και της τιμής που στέλνει το δίκτυο είναι δυνατό να συμβαίνει σε real-time χρόνο.



Σχήμα 7-12: Ευελιξία και έλεγχος φόρτισης ηλεκτρικών αυτοκινήτων σε τυπική ημερήσια καμπύλη φορτίου ηλεκτρικής ενέργειας

Πράγματι, στην περίπτωση του υψηλού κινήτρου (ή αντί-κινήτρου) μεγάλη μερίδα καταναλωτών μετατοπίζει τη διαδικασία φόρτισης προς τις χρονικές περιόδους της ημέρας κατά τις οποίες η ζήτηση είναι χαμηλή. Συνεπώς, παρατηρείται εξομάλυνση (smoothing) των φορτίων αιχμής και αύξηση των χαμηλών φορτίων (valley filling). Στην ιδανική περίπτωση του υψηλού κινήτρου, παρατηρείται μείωση σε επενδύσεις μονάδων κάλυψης της αιχμής όπως αεριοστροβλικές μονάδες φυσικού αερίου και αύξηση σε επενδύσεις μονάδων κάλυψης φορτίου μέσης και βάσεως.

Πράγματι, αναμένονται να αυξηθούν οι επενδύσεις σε μονάδες βάσης όπως θερμοηλεκτρικοί σταθμοί συνδυασμένου κύκλου που καταναλώνουν φυσικό αέριο ή πυρηνικοί. Από την περίπτωση της ανεξέλεγκτης φόρτισης μέχρι την περίπτωση της ελεγχόμενης φόρτισης (υψηλού κινήτρου) παρατηρείται μια σημαντική διαφοροποίηση του μέσου κόστους καυσίμου καθώς γίνεται χρήση των αποδοτικών μονάδων συνδυασμένου κύκλου φυσικού αερίου που έχουν υψηλότερους βαθμούς απόδοσης από τις αεριοστροβλικές μονάδες αιχμής.

7.4 Συμπεράσματα κεφαλαίου

Το παρόν κεφάλαιο εξέτασε τη σημασία ανάπτυξης των απαραίτητων υποδομών για τη διάθεση και διανομή εναλλακτικών καυσίμων όπως η ηλεκτρική ενέργεια και το υδρογόνο στα πλαίσια της προσπάθειας ριζικού μετασχηματισμού του τομέα των μεταφορών προς την αειφορία. Παράλληλα, εξετάστηκαν και οι αλληλεπιδράσεις με το υπόλοιπο ενεργειακό σύστημα και κυρίως με τον κλάδο της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Για τις ανάγκες της ανάλυσης πραγματοποιήθηκε σύζευξη μεταξύ του μοντέλου PRIMES-TREMOVE και του μοντέλου PRIMES που εξετάζει το υπόλοιπο ενεργειακό σύστημα.

Η αξιολόγηση της σημασίας της ανάπτυξης των απαραίτητων υποδομών ακολούθησε τη μέθοδο της ανάλυσης κόστους-οφέλους όπου πραγματοποιήθηκε σύγκριση μεταξύ σεναρίων επιτυχούς και ανεπιτυχούς ανάπτυξης των υποδομών. Στη δεύτερη περίπτωση υποτέθηκαν υψηλά φορολογικά μέτρα προς τους καταναλωτές έτσι ώστε να επιτευχθεί ο στόχος της μείωσης των εκπομπών CO₂ και να υπάρξει συγκρισιμότητα μεταξύ των σεναρίων για την εξαγωγή συμπερασμάτων. Κατά την ανάλυση προέκυψε ότι τα οφέλη κατασκευής της υποδομής είναι πολλαπλάσια έναντι της περίπτωσης ανεπιτυχούς ανάπτυξής της. Ωστόσο, θα πρέπει να τονιστεί η σημαντικότητα του σωστού συντονισμού της αγοράς όπου οι επενδυτές θα λάβουν εγγυήσεις, θα μειωθεί ο επενδυτικός κίνδυνος και θα υπάρχει ζήτηση για εναλλακτικά καύσιμα.

Επιπλέον, η μαζική διείσδυση των ηλεκτρικών αυτοκινήτων αναμένεται να αυξήσει σημαντικά τη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας στο μέσο-μακροπρόθεσμο ορίζοντα. Ως γνωστό, η ηλεκτρική ενέργεια κατά την κατανάλωσή της στην τελική χρήση (ηλεκτρικά αυτοκίνητα) έχει μηδενικές εκπομπές. Ωστόσο, η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας είναι πιθανό να επιβαρύνει το ενεργειακό σύστημα με επιπρόσθετες εκπομπές αερίου του θερμοκηπίου αν το ενεργειακό μείγμα κατά την παραγωγή της έχει σημαντικό ανθρακικό αποτύπωμα. Μέσω της αλληλεπίδρασης των δύο μοντέλων προκύπτει ότι θα πρέπει να υπάρξει σημαντική μείωση των εκπομπών CO₂ όχι μόνο σε επίπεδο τελικής χρήσης (μεταφορές) αλλά και σε προηγούμενα στάδια της ενεργειακής αλυσίδας (παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας).

Τέλος, εξετάστηκαν οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των καταναλωτών- κατόχων ηλεκτρικών αυτοκινήτων και του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας αναφορικά με τις επιπτώσεις της ανεξέλεγκτης φόρτισης. Η τελευταία αναμένεται να επιβαρύνει το δίκτυο και να οδηγήσει σε αύξηση του φορτίου ζήτησης σε ώρες αιχμής (απογευματινές ώρες) καθώς οι καταναλωτές επιλέγουν τη φόρτιση του αυτοκινήτου τους κατά την επιστροφή στον οικιακό τους χώρο έπειτα από την εργασία. Για την αντιμετώπιση του φαινομένου της ανεξέλεγκτης φόρτισης, θα πρέπει ο διαχειριστής του συστήματος να παρέχει σε πραγματικό χρόνο κίνητρα ή αντί-κίνητρα στους καταναλωτές έτσι ώστε να υπάρχει μετατόπιση φορτίου από τις αιχμές σε χρονικές περιόδους χαμηλής ζήτησης. Η χρήση έξυπνων συσκευών θα επιτρέψει τη βέλτιστη αλληλεπίδραση μεταξύ των χρηστών-αυτοκινήτων και της τιμολογιακής πολιτικής για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας για φόρτιση.

Κεφάλαιο 8

8 Συμπεράσματα - Προοπτικές

Το επιστημονικό αντικείμενο της παρούσας διατριβής αφορά το σχεδιασμό, την κατασκευή και εφαρμογή ενός πρωτότυπου ολοκληρωμένου ενεργειακού- οικονομικού μοντέλου, υπό την ονομασία PRIMES-TREMOVE, για τον τομέα των Ευρωπαϊκών επιβατικών και εμπορευματικών μεταφορών.

Ο σκοπός της κατασκευής του μοντέλου αφορά την εφαρμογή αυτού σε επίκαιρα θέματα ανάλυσης ενεργειακής πολιτικής και ειδικότερα στην ανάλυση του ρόλου της ηλεκτρικής ενέργειας και άλλων εναλλακτικών μορφών ενέργειας στις επιβατικές μεταφορές στα πλαίσια της αντιμετώπισης της κλιματικής αλλαγής. Η εφαρμογή του μοντέλου αποκαλύπτει σημαντικούς μηχανισμούς που χαρακτηρίζουν τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των αποφασιζόντων του τομέα των μεταφορών και μέτρων πολιτικής στα πλαίσια δραστικού μετασχηματισμού του συστήματος των μεταφορών προς την αειφορία.

Το μοντέλο, που θεμελιώνεται στην μικροοικονομική θεωρία, επιλύει το μαθηματικό πρόβλημα εύρεσης ισορροπίας μεταξύ ανεξάρτητων πολλαπλών προβλημάτων βελτιστοποίησης τα οποία αλληλοεπιδρούν μέσω συνθηκών ισορροπίας και συνολικών περιορισμών σε επίπεδο συστήματος που αφορούν σε πόρους και εκπομπές. Για την επίλυσή του, τα ατομικά προβλήματα βελτιστοποίησης μετατρέπονται σε προβλήματα μη γραμμικής συμπληρωματικότητας και ενώνονται μεταξύ τους περιλαμβάνοντας και τους συνολικούς περιορισμούς και συνθήκες ισορροπίας. Το κύριο πλεονέκτημα του μοντέλου έναντι άλλων μεθοδολογιών στη βιβλιογραφία, εκτός του βαθμού λεπτομέρειας, έγκειται στην ολοκληρωμένη μοντελοποίηση της ισορροπίας μεταξύ των ατομικών βελτιστοποιήσεων και στην ανάδραση με τις υποδομές και την τεχνολογική εξέλιξη.

Στις εφαρμογές δόθηκε έμφαση στη διεύθυνση της ηλεκτρικής ενέργειας στις επιβατικές μεταφορές στο πλαίσιο μακροχρόνιας στρατηγικής μείωσης των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα καθώς και στις αλληλεπιδράσεις μεταξύ του τομέα των μεταφορών και του ηλεκτρικού συστήματος και αγοράς. Στο μοντέλο περιλαμβάνονται όλοι οι τομείς των μεταφορών και οι δυνατότητες υποκαταστάσεων μεταξύ τους. Εξάλλου, έμφαση δόθηκε στην επίδραση τυχόν έλλειψης της απαραίτητης διαθέσιμης υποδομής ανεφοδιασμού για τα εναλλακτικά καύσιμα όπως η ηλεκτρική ενέργεια καθώς και το άγχος αυτονομίας των καταναλωτών που είναι δυνατό να επηρεάσουν τη διεύθυνση της ηλεκτρικής ενέργειας στο σύστημα των επιβατικών μεταφορών. Η εισαγωγή κλάσεων ταξιδιών αυξάνει περαιτέρω τη διακριτική ικανότητα του μοντέλου που έχει σκοπό να προσομοιώσει ορθότερα την ετερογένεια που επικρατεί στον τομέα των επιβατικών μεταφορών με την ύπαρξη των εκατομμυρίων μετακινούμενων. Εξετάσθηκαν επίσης διαφορετικά σενάρια σχετικά με την αποτελεσματικότητα της φόρτισης μπαταριών από τη σκοπιά του ηλεκτρικού συστήματος και την ανάδραση στις μεταφορές από τις τιμές της ηλεκτρικής αγοράς οι οποίες εξαρτώνται από τη μορφή φορτίου που προκύπτει από τη διαχείριση της φόρτισης. Για το σκοπό αυτό το μοντέλο μεταφορών επιλύθηκε σε αλληλεπίδραση με το μοντέλο ηλεκτρικού συστήματος του PRIMES.

Η εφαρμογή του μοντέλου σε πραγματικά προβλήματα ενεργειακής πολιτικής που αντιμετωπίζουν οι φορείς χάραξης πολιτικής οδήγησε σε έναν αριθμό πρωτοτυπιών σε σχέση με άλλα μοντέλα της βιβλιογραφίας. Οι πρωτοτυπίες στο μεθοδολογικό πλαίσιο που ακολουθήθηκε αφορούν:

- Το βαθμό λεπτομέρειας της προσομοίωσης των ηλεκτρικών αυτοκινήτων στα πλαίσια της ενεργειακής οικονομικής ανάλυσης. Το μοντέλο εμπεριέχει σε μεγάλο βαθμό ένα πλήθος τεχνολογικών λεπτομερειών σχετικών με τις διάφορες τεχνολογίες οχημάτων καθώς και εναλλακτικών καυσίμων, γεγονός που το καθιστά ικανό να διερευνήσει διάφορους εναλλακτικούς δρόμους προς ένα βιώσιμο σύστημα μεταφορών. Η διάκριση των ηλεκτρικών αυτοκινήτων σε κατηγορίες βάσει την ηλεκτρική τους αυτονομία αποσκοπεί στο να προσομοιώσει το άγχος αυτονομίας των ταξιδιωτών, όταν ταξιδεύουν με ένα ηλεκτρικό όχημα σε υπεραστικά ταξίδια καθώς και να συμπεριλάβει τον αντίκτυπο της έλλειψης της αναγκαίας υποδομής επαναφόρτισης. Η υψηλότερη αυτονομία καθιστά τα ηλεκτρικά οχήματα πιο φιλικά και αποδεκτά στην αγορά καθώς τείνει να απαλείψει το «άγχος της αυτονομίας» των καταναλωτών και τη φοβία ότι δε θα μπορέσουν να ανεφοδιάσουν το όχημα πριν αποφορτιστεί η μπαταρία. Παρ' όλ' αυτά, τα ηλεκτρικά οχήματα με υψηλότερη ηλεκτρική αυτονομία απαιτούν ένα πρόσθετο κόστος κεφαλαίου από τους καταναλωτές ανάλογα με το οριακό κόστος της μπαταρίας.
- Την εξάρτηση των αποφάσεων των καταναλωτών τόσο με οικονομικούς (όπως συμβαίνει στα μοντέλα της βιβλιογραφίας) όσο και με μη οικονομικούς παράγοντες. Με αυτόν τον τρόπο, προσομοιώνονται με μεγαλύτερο ρεαλισμό οι

αποφάσεις των καταναλωτών διότι, στην πραγματικότητα, δε βασίζονται αποκλειστικά σε καθαρά οικονομικές αιτίες. Η έλλειψη της απαραίτητης διαθέσιμης υποδομής ανεφοδιασμού για τα εναλλακτικά καύσιμα όπως η ηλεκτρική ενέργεια και το υδρογόνο καθώς και η μειωμένη αυτονομία των ηλεκτρικών οχημάτων αποτελούν παράγοντες που είναι δυνατό να εμποδίσουν την είσοδο αυτών των τεχνολογιών στην αγορά.

- Τη μοντελοποίηση των αποφάσεων για πραγματοποίηση ταξιδιού ως αποτέλεσμα των επιμέρους αποφάσεων πολλών ετερογενών αποφασίζόντων. Η εισαγωγή της ετερογένειας διασφαλίζει ότι οι αποφασίζοντες δε θα παρουσιάζουν μια μέση συμπεριφορά, αλλά θεωρήθηκε ότι κάθε είδος ταξιδιού θα χαρακτηρίζεται από ένα ιστόγραμμα συχνοτήτων όσον αφορά την απόσταση του. Πράγματι, οι ετερογενείς αποφασίζοντες, συγκρίνουν την αυτονομία των ηλεκτρικών οχημάτων καθώς και τη διαθεσιμότητα σταθμών ανεφοδιασμού για όλες τις κατηγορίες ταξιδιών με βάση τη χιλιομετρική απόσταση του ταξιδιού που επιθυμούν να διανύσουν (που εξαρτάται από το ιστόγραμμα συχνοτήτων). Στην περίπτωση που παρατηρείται αναντιστοιχία μεταξύ της απόστασης της επιθυμητής διαδρομής για κάθε χιλιομετρική κλάση και της αυτονομίας του οχήματος εισάγεται ένα «κρυφό» κόστος. Το τελευταίο έχει ως αποτέλεσμα να καταστήσει τη συγκεκριμένη επιλογή οχήματος λιγότερο ανταγωνιστική σε σχέση με τις υπόλοιπες κατά το στάδιο της επιλογής αυτοκινήτου από τους καταναλωτές.
- Τη μοντελοποίηση της απόφασης κατανομής της ετήσιας χιλιομετρικής απόστασης για κάθε τύπο οχήματος και τη διανομή αυτής στα επιμέρους ταξίδια ανά σκοπό, περιοχή, στιγμή και απόσταση ως μεταβλητή του μοντέλου. Η εισαγωγή επιπλέον μεταβλητών απόφασης, παρ' ότι αύξησε την πολυπλοκότητα του μοντέλου, προτιμήθηκε από την υιοθέτηση της υπόθεσης σταθερών χιλιομετρικών αποστάσεων για τα οχήματα όπως ακολουθείται σε άλλα μοντέλα της βιβλιογραφίας. Οι μεταβλητές αυτές αποτελούν μέρος της αντικειμενικής συνάρτησης κόστους των καταναλωτών και καθορίζονται συγχρόνως κατά την επίλυση των προβλημάτων της μεγιστοποίησης της χρησιμότητας του καταναλωτή και της ελαχιστοποίησης του κόστους.
- Την προσομοίωση ενός συνόλου πιθανών πολιτικών, που επιτρέπουν την αξιολόγησή τους αναφορικά με το μακροχρόνιο στόχο της μείωσης των εκπομπών CO₂ του τομέα των μεταφορών. Το μοντέλο περιλαμβάνει μέτρα πολιτικής που διακρίνονται σε ήπια, οικονομικά και ρυθμιστικά τα οποία είναι δυνατό να ενεργοποιηθούν σε συγκεκριμένα σενάρια πολιτικής. Η ενσωμάτωση των μέτρων συνήθως πραγματοποιείται υπό τη μορφή περιορισμών στα προβλήματα βελτιστοποίησης.

8.1 Συμπεράσματα

Η παρούσα ενότητα παρουσιάζει τα συμπεράσματα που εξάγονται από την παρούσα διδακτορική διατριβή στα πλαίσια της εφαρμογής του μοντέλου PRIMES-TREMOVE.

8.1.1 Ο ρόλος του συντονισμού της αγοράς και των εμπλεκόμενων φορέων στη διεύθυνση εναλλακτικών μορφών ενέργειας

Η δραστική μείωση των συνολικών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου καθώς και η επίτευξη της αειφορίας του τομέα των μεταφορών αποτελεί μια πρόκληση. Η υποκατάσταση των συμβατικών ορυκτών καυσίμων με εναλλακτικά καύσιμα, όπως η ηλεκτρική ενέργεια, το υδρογόνο και τα βιοκαύσιμα μπορεί να συμβάλει στην ικανοποίηση αυτού του φιλόδοξου στόχου. Ωστόσο, αυτή η αναδιάρθρωση του συστήματος των μεταφορών συνεπάγεται περίπλοκες διαδικασίες λήψης αποφάσεων με διαφορετικούς εμπλεκόμενους φορείς, όπως η βιομηχανία υποδομών και καυσίμων, η κατασκευαστική βιομηχανία, οι καταναλωτές, οι φορείς χάραξης πολιτικής και το κράτος.

Η αναγνώριση των εμπλεκόμενων φορέων στις αποφάσεις σχετικές με τη διεύθυνση εναλλακτικών μορφών ενέργειας, όπως η ηλεκτρική ενέργεια, στο σύστημα των επιβατικών μεταφορών αποτελεί ένα ιδιαίτερα σημαντικό κεφάλαιο στα πλαίσια της ενεργειακής οικονομικής ανάλυσης.

Η έλλειψη της απαιτούμενης εγκατεστημένης υποδομής αποτελεί το κύριο εμπόδιο εμπορικής επιτυχίας των εναλλακτικών καυσίμων και της ηλεκτρικής ενέργειας. Η βιομηχανία κατασκευής υποδομών διάθεσης εναλλακτικών καυσίμων διακατέχεται από μεγάλη αβεβαιότητα, καθώς χρειάζεται να εκταμιευτούν σημαντικά κεφάλαια, ανάλογα με τον τύπο του καυσίμου, για την οικοδόμηση ενός ανεπτυγμένου δικτύου πώληση εναλλακτικών καυσίμων και σημείων φόρτισης για την ηλεκτρική ενέργεια. Η ανάπτυξη των υποδομών διανομής και διάθεσης εναλλακτικών καυσίμων θα πρέπει να πραγματοποιηθεί σε παράλληλο χρόνο με την ανάπτυξη της ζήτησης των συγκεκριμένων καυσίμων.

Ωστόσο, η βιομηχανία κατασκευής υποδομών εξαρτάται από τις προτιμήσεις των μετακινούμενων καθώς και από τη βιομηχανία κατασκευής εξοπλισμού όπως η αυτοκινητοβιομηχανία. Η κατασκευαστική βιομηχανία θα πρέπει να επιτύχει σημαντική μείωση του κόστους των εναλλακτικών τεχνολογιών που κινούνται με καθαρή ενέργεια, όπως η ηλεκτρική και το υδρογόνο. Συγκεκριμένα, οι κατασκευαστικές εταιρείες θα πρέπει να επιτύχουν επίπεδα παραγωγής στο σημείο ελάχιστης αποδοτικής κλίμακας. Η επίτευξη οικονομικών κλίμακας θα καταστήσει τις προηγμένες τεχνολογίες λιγότερο ακριβές και θα επιτρέψει την περαιτέρω προώθηση τους στην αγορά. Παράλληλα, οι καταναλωτές θα πρέπει να ενημερώνονται για τις

προοπτικές χρήσης των νέων καυσίμων, τα οφέλη τους και να είναι βέβαιοι για την επάρκεια κάλυψης σε σημεία φόρτισης και ανεφοδιασμού.

Για το συντονισμό των παραπάνω διαφορετικών αποφασιζόντων-εμπλεκόμενων φορέων θα πρέπει να υπάρξει μορφή κρατικού παρεμβατισμού και εμπλοκή των φορέων χάραξης πολιτικής. Ο δημόσιος παρεμβατισμός θα πρέπει να λάβει διάφορες μορφές για κάθε εμπλεκόμενο φορέα, όπως κίνητρα και υιοθέτηση ρυθμιστικών καθεστώτων, προκειμένου να εξασφαλιστεί ο συντονισμός της αγοράς και η επιτυχημένη διείσδυση των εναλλακτικών καυσίμων και τεχνολογιών.

Οι φορείς χάραξης πολιτικής έχουν ως αρμοδιότητα να θέσουν συγκεκριμένους στόχους, να εκδώσουν οδηγίες ή να ορίσουν μέτρα στη βιομηχανία. Η εφαρμογή τεχνολογικών ορίων στους κατασκευαστές οχημάτων αποτελεί από τα πιο σημαντικά μέτρα των φορέων χάραξης πολιτικής. Τέτοια μέτρα αφορά η οδηγία 443/2009 που θέτει περιβαλλοντολογικούς περιορισμούς στην αυτοκινητοβιομηχανία τα οποία εξετάζονται στην παρούσα διατριβή.

8.1.2 Ο ρόλος των τεχνολογικών ορίων στις εκπομπές CO₂ οχημάτων στη διείσδυση των ηλεκτρικών αυτοκινήτων

Ο ρόλος των τεχνολογικών ορίων στις ειδικές εκπομπές αξιολογείται μέσω της κατάστρωσης εναλλακτικών σεναρίων με τη χρήση του μοντέλου PRIMES-TREMOVE. Πιο συγκεκριμένα, καταστρώνονται σενάρια ενεργειακής πολιτικής για τον τομέα των μεταφορών μέχρι το 2050, τα οποία εφαρμόζουν ολοένα και αυστηρότερα όρια για τις ειδικές εκπομπές CO₂ των νέων οχημάτων των κατασκευαστών.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της ανάλυσης, ο στόχος των 95 gCO₂/km (Οδηγία 443/2009) μέχρι το 2020 θα συμβάλει στην περαιτέρω μείωση των εκπομπών CO₂ των επιβατικών αυτοκινήτων στην Ευρώπη το 2020. Ωστόσο, η απουσία περαιτέρω μείωσης του συγκεκριμένου ορίου στο σενάριο αναφοράς, οδηγεί σε μια αργή μείωση των συνολικών εκπομπών CO₂ μέχρι το 2050, κυρίως λόγω της αντικατάστασης του στόλου των οχημάτων με νεότερες τεχνολογίες και την αυτόνομη πρόοδο των προηγμένων τεχνολογιών.

Η αποτελεσματική εφαρμογή πιο εντατικών τεχνολογικών ορίων για τις ειδικές εκπομπές CO₂ των επιβατικών αυτοκινήτων μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική αναδιάρθρωση του στόλου των οχημάτων στην Ευρώπη και σημαντική μείωση των συνολικών εκπομπών CO₂ μέχρι το 2050. Σύμφωνα με τα ευρήματα του μοντέλου, τα τεχνολογικά όρια της τάξης των 70 gCO₂/km είναι ικανά να προκαλέσουν δυναμική είσοδο στην αγορά των PHEVs. Τα ηλεκτρικά με μπαταρία, για το ίδιο επίπεδο στόχων, αναμένεται να διεισδύσουν σε μικρότερο βαθμό λόγω του υψηλότερου κόστους και της μικρότερης αυτονομίας.

Στο μακροπρόθεσμο ορίζοντα, τα τεχνολογικά όρια της τάξης των 40- 50 gCO₂/km αναμένεται να ικανοποιηθούν κυρίως με τη μαζική διείσδυση των προηγμένων τεχνολογιών όπως των ηλεκτρικών με μπαταρία και των υβριδικών με

καλώδιο. Συνεπάγεται από την ανάλυση με τη χρήση του μοντέλου PRIMES-TREMOVE ότι υπάρχει θετική συσχέτιση μεταξύ της έντασης της εφαρμογής του μέτρου και της διεύδυσης των ηλεκτρικών αυτοκινήτων στην αγορά.

8.1.3 Σύγκριση τεχνολογικών ορίων εκπομπών CO₂ με άλλα μέτρα πολιτικής

Αφού εξετάστηκε ο ρόλος των τεχνολογικών ορίων στις ειδικές εκπομπές αερίου του θερμοκηπίου των αυτοκινήτων που ωθούν στην αγορά οι κατασκευαστές, κρίθηκε απαραίτητη η σύγκριση του μέτρου αυτού με άλλα εναλλακτικά.

Αρχικά, πραγματοποιήθηκε σύγκριση μεταξύ των δύο εναλλακτικών πολιτικών που θέτουν τεχνολογικά όρια είτε σε επίπεδο ειδικών εκπομπών αερίου του θερμοκηπίου είτε στην ειδική κατανάλωση. Το κίνητρο για τη σύγκριση των δύο πολιτικών έγκειται στο γεγονός ότι οι δύο πολιτικές εφαρμόζονται εναλλακτικά σε επιμέρους αγορές του πλανήτη. Συγκεκριμένα, οι ΗΠΑ εφαρμόζουν τεχνολογικά όρια που αποσκοπούν στη ρύθμιση της ειδικής κατανάλωσης των νέων πωλήσεων αυτοκινήτων. Αντίθετα, η Ευρώπη, η Ιαπωνία και η Κίνα έχουν υιοθετήσει τεχνολογικά όρια με βάση τις ειδικές εκπομπές αερίου του θερμοκηπίου.

Η σύγκριση μεταξύ των δύο εναλλακτικών πολιτικών είναι ιδιαίτερα σημαντική δεδομένου ότι οι επιπτώσεις του μέτρου ενδέχεται να επιφέρουν σημαντικές μεταβολές στη μελλοντική διάρθρωση του στόλου των οχημάτων και της κατασκευαστικής αλυσίδας της αυτοκινητοβιομηχανίας, δεδομένου ότι απευθύνεται στην παγκόσμια αγορά.

Η αξιολόγηση των δύο εναλλακτικών μέτρων πολιτικής πραγματοποιείται με την κατάστρωση σεναρίων βαθιάς μείωσης εκπομπών αερίου του θερμοκηπίου στον ορίζοντα του 2050. Η κατάστρωση των σεναρίων υιοθετεί εναλλακτικά την εφαρμογή μέτρων ρύθμιση των ειδικών εκπομπών CO₂ (1) και ρύθμιση της ενεργειακής απόδοσης των αυτοκινήτων (2). Η επιλογή τεχνολογικών ορίων με βάση τις εκπομπές CO₂ θα επιτρέψει ένα διαφοροποιημένο φάσμα πιθανών τεχνολογικών επιλογών συμπεριλαμβανομένων των μπαταριών και των κυψελών καυσίμου υδρογόνου καθώς και οι δύο τεχνολογίες έχουν μηδενικές εκπομπές CO₂ στο επίπεδο της τελικής χρήσης. Αντίθετα, η εφαρμογή ορίων στην ενεργειακή απόδοση αποκλείει από την αγορά στο μακροπρόθεσμο ορίζοντα τα αυτοκίνητα με κυψέλη καυσίμου υδρογόνου καθώς υστερούν σημαντικά σε οικονομία καυσίμου σε σχέση με τα ηλεκτρικά με μπαταρία.

Εναλλακτικά, η εφαρμογή ενός φόρου επί του άνθρακα αποτελεί μία εναλλακτική πολιτική επιλογή η οποία έχει ως στόχο να αλλάξει τη συμπεριφορά των καταναλωτών όσον αφορά την ατμοσφαιρική ρύπανση και τις εκπομπές που σχετίζονται με την κλιματική αλλαγή. Ο φόρος διοξειδίου του άνθρακα αποσκοπεί στο να υποκινήσει τους καταναλωτές προς τεχνολογικές επιλογές που φέρουν μικρότερο ανθρακικό αποτύπωμα. Ωστόσο, λαμβάνοντας υπόψη τα υψηλά επίπεδα των ειδικών φόρων κατανάλωσης της βενζίνης και ντίζελ στην ΕΕ, ο φόρος επί του άνθρακα θα

πρέπει να αυξηθεί σε υψηλά επίπεδα για να επιφέρει παρόμοια μείωση των εκπομπών CO₂, με τις πολιτικές ορίων εκπομπών CO₂ ή της ενεργειακής αποδοτικότητας.

8.1.4 Επιπτώσεις στην αγορά λόγω αυξημένης διείσδυσης εναλλακτικών οχημάτων

Η υιοθέτηση αυστηρών τεχνολογικών ορίων θα επιφέρει σημαντική διαφοροποίηση στη δομή του κόστους του συστήματος των μεταφορών που καλούνται να πληρώσουν οι καταναλωτές. Οι τελευταίοι θα πρέπει να πληρώσουν σημαντικά υψηλότερες δαπάνες κεφαλαίου για την αγορά εξοπλισμού μεταφορών, ωστόσο θα επωφεληθούν από τα σημαντικά χαμηλότερα κόστη λειτουργίας. Τα τεχνολογικά όρια για τις εκπομπές CO₂ αποτελούν μια πιο δαπανηρή πολιτική επιλογή σε σχέση με την πολιτική των ορίων ενεργειακής απόδοσης. Το παραπάνω συμπέρασμα προκύπτει ανεξάρτητα της υπόθεσης της τιμής του επιτοκίου αναγωγής που λαμβάνει ο αποφασίζων για αγορά κεφαλαιουχικού εξοπλισμού.

Επιπλέον, η ανάλυση επιβεβαιώνει ότι η επιτυχημένη είσοδος των ηλεκτρικών αυτοκινήτων και των οχημάτων υδρογόνου εξαρτάται σε σημαντικό βαθμό από την τεχνική πρόοδο των τεχνολογιών. Συγκεκριμένα, στην περίπτωση αποτυχίας της τεχνολογικής προόδου των κυψελών υδρογόνου, η μελλοντική διάρθρωση του στόλου των αυτοκινήτων της Ευρώπης αναμένεται να κυριαρχηθεί από ηλεκτρικά αυτοκίνητα.

Επιπλέον, η αυξημένη διείσδυση των ηλεκτρικών αυτοκινήτων λόγω της ολοένα και αυστηρότερης εφαρμογής τεχνολογικών ορίων εκπομπών CO₂ οδηγεί σε αύξηση του κόστους του συστήματος σε σύγκριση με το σενάριο αναφοράς. Το γεγονός αυτό επιφέρει στροφή μερίδας καταναλωτών προς πιο οικονομικούς τρόπους μετακίνησης όπως δημόσια μέσα μεταφοράς. Ωστόσο, οι μικρότερες δαπάνες καυσίμου των κατόχων ηλεκτρικών αυτοκινήτων οδηγούν σε αύξηση της δραστηριότητας τους (rebound effect).

Αναφορικά με τη διείσδυση των ηλεκτρικών αυτοκινήτων ανά τμήμα της αγοράς, προκύπτει ότι τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα με μπαταρία διεισδύουν με μεγαλύτερη ευκολία στην κατηγορία των μικρών αυτοκινήτων πόλης που κινούνται περισσότερο σε αστικό περιβάλλον. Πράγματι, η αυτονομία των ηλεκτρικών αυτοκινήτων της τάξης των 150 χιλιομέτρων μεταξύ διαδοχικών φορτίσεων μπορεί να ικανοποιήσει τη μεγάλη πλειοψηφία της αγοράς των μετακινούμενων σε αστικό περιβάλλον και να διατηρήσει το κόστος του ηλεκτρικού αυτοκινήτου σε ελεγχόμενα επίπεδα. Ωστόσο, δεν ισχύει το ίδιο για όσους επιθυμούν μακρινές μετακινήσεις, λόγω της χαμηλής αυτονομίας και της ύπαρξης ανταγωνιστικών τρόπων μετακίνησης όπως τα τραίνα και τα αεροπλάνα.

8.1.5 Σημασία ανάπτυξης υποδομής διάθεσης εναλλακτικών μορφών ενέργειας

Η σημασία της ανάπτυξης της απαραίτητης υποδομής διανομής και διάθεσης ηλεκτρικής ενέργειας και υδρογόνου στους καταναλωτές κρίνεται ιδιαίτερα σημαντική για την επίτευξη του μακροπρόθεσμου στόχου της δραστηκής μείωσης των εκπομπών αερίου του θερμοκηπίου. Η απουσία της απαραίτητης υποδομής, που αποτελεί αποτέλεσμα του ανεπαρκούς συντονισμού μεταξύ των διαφόρων εμπλεκόμενων φορέων και έλλειψης σαφούς πολιτικής, αναμένεται να αυξήσει σημαντικά το κόστος των καταναλωτών για μετακινήσεις δεδομένου ότι θα πρέπει να πραγματοποιηθεί δραστηκή μείωση των εκπομπών με χρήση μέτρων φορολόγησης.

Στην περίπτωση αυτή, τα σενάρια που καταστρώθηκαν θεωρούν ανεπαρκή ανάπτυξη δικτύου υποδομών φόρτισης ηλεκτρικής ενέργειας. Θεωρώντας ότι ο στόχος της μείωσης των εκπομπών αερίου του θερμοκηπίου πρέπει να επιτευχθεί, εφαρμόζεται εναλλακτικά υψηλή τιμολόγηση της χρήσης των ιδιωτικών μέσων μεταφοράς. Η υπόθεση της μείωσης των εκπομπών CO₂ στις μεταφορές μέσω φορολογίας αποσκοπεί στο να επιτρέψει τη συγκρισιμότητα μεταξύ των δύο εναλλακτικών προσεγγίσεων. Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε βασίζεται στην ανάλυση κόστους-οφέλους κάνοντας χρήση των αναλυτικών αποτελεσμάτων που προκύπτουν από τα σενάρια που επιλύθηκαν με το μοντέλο PRIMES-TREMOVE.

Προκύπτει ότι το κόστος ανάπτυξης της υποδομής διάθεσης ηλεκτρικής ενέργειας και υδρογόνου είναι σημαντικά μικρότερο από το συνολικό κόστος της εφαρμογής οικονομικών μέτρων μείωσης της δραστηριότητας των επιβατικών και των εμπορευμάτων. Επιπλέον, υπάρχουν επιπρόσθετα οφέλη χάρη στην ανάπτυξη της υποδομής δεδομένου ότι δε θα χρειαστεί να μειωθεί η επιβατική και κυρίως η εμπορευματική μεταφορική δραστηριότητα που αποτελεί κινητήριο μοχλό της οικονομικής ανάπτυξης των χωρών.

Συνεπώς, τα αποτελέσματα της ανάλυσης αναδεικνύουν τα οφέλη της ανάπτυξης της υποδομής που αντισταθμίζουν μακράν το ύψος του κόστους της επένδυσης. Από την ανάλυση προκύπτει ότι οι επενδύσεις σε σταθμούς ανεφοδιασμού υδρογόνου απαιτούν την υψηλότερη επένδυση κεφαλαίου από όλες τις άλλες εναλλακτικές λύσεις. Συγκεκριμένα, αυτές χαρακτηρίζονται ως υψηλού κινδύνου επενδύσεις λόγω του μη αναστρέψιμου χαρακτήρα τους καθώς και της επιπρόσθετης αβεβαιότητας που προκύπτει από το υψηλό κόστος των τεχνολογιών οχημάτων με κυψέλη υδρογόνου. Η περίπτωση της ηλεκτρικής ενέργειας είναι πιο σύνθετη, καθώς απαιτεί την ανάπτυξη ενός καλά αναπτυγμένου δικτύου σημείων φόρτισης που εξυπηρετήσει τους χρήστες των ηλεκτρικών οχημάτων. Το χαμηλό εύρος αυτονομίας των ηλεκτρικών οχημάτων πρέπει να αντιμετωπιστεί με μια πυκνή κάλυψη σημείων φόρτισης, τόσο σε μητροπολιτικές όσο και πιο αραιοκατοικημένες αστικές περιοχές.

8.1.6 Αλληλεπιδράσεις του συστήματος μεταφορών με το σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας

Τα πλαίσια της ανάλυσης της παρούσας διατριβής επεκτάθηκαν, πέραν του συστήματος των μεταφορών, στο σύνολο του ενεργειακού συστήματος για την αξιολόγηση των εκπομπών αερίου του θερμοκηπίου. Η διεύρυνση των ορίων της ανάλυσης κρίθηκε απαραίτητη δεδομένης της αναμενόμενης υψηλής διείσδυσης οχημάτων που κινούνται με ηλεκτρική ενέργεια και υδρογόνο. Μέσω της διασύνδεσης με το μοντέλο PRIMES, που έχει αναπτυχθεί στο Εργαστήριο Ενέργειας-Οικονομίας-Περιβάλλοντος και εξετάζει το σύνολο του ενεργειακού συστήματος, αναλύονται οι εκπομπές CO₂ στο σύνολο της ενεργειακής αλυσίδας που περιλαμβάνει και το στάδιο της ηλεκτροπαραγωγής.

Κατά την ανάλυση προέκυψε ότι η μαζική διείσδυση της ηλεκτρικής ενέργειας και του υδρογόνου σε συγκεκριμένα σενάρια προϋποθέτει τη μείωση του ανθρακικού αποτυπώματος της ηλεκτροπαραγωγής και της παραγωγής υδρογόνου. Σε διαφορετική περίπτωση, η ανάλυση έδειξε ότι αν δε μειωθούν οι εκπομπές CO₂ στο στάδιο της ηλεκτροπαραγωγής, η διείσδυση των εναλλακτικών τεχνολογιών δε θα προσφέρει όφελος αφού οι συνολικές εκπομπές (σε όλο το πλαίσιο της συστημικής ανάλυσης) θα παραμείνουν σταθερές. Η παραγωγή υδρογόνου, επίσης, θα πρέπει να παραχθεί μέσω της μεθόδου της ηλεκτρόλυσης που θα κάνει χρήση ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται με σχεδόν μηδενικές εκπομπές CO₂.

Επιπλέον, η μαζική διείσδυση ηλεκτρικών αυτοκινήτων και αυτοκινήτων υδρογόνου αναμένεται να οδηγήσει σε σημαντική αύξηση της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας σε μέσο-μακροπρόθεσμο χρονικό ορίζοντα. Ωστόσο, η φόρτιση των ηλεκτρικών αυτοκινήτων ενδέχεται να επιβαρύνει το ηλεκτρικό δίκτυο αν πραγματοποιηθεί σε χρονικές περιόδους κατά τις οποίες παρουσιάζεται ζήτηση αιχμής. Η ανάλυση της παρούσας διατριβής εξέτασε τις περιπτώσεις φόρτισης κατά τις χρονικές περιόδους επιστροφής των εργαζομένων στην οικία τους από το χώρο εργασίας.

Στην περίπτωση κατά την οποία οι καταναλωτές φορτίζουν άμεσα το αυτοκίνητό τους κατά την επιστροφή από την εργασία οδηγεί σε αύξηση του φορτίου αιχμής (απογευματινές-βραδινές ώρες). Αυτή η περίπτωση συνιστά την περίπτωση της ανεξέλεγκτης φόρτισης κατά την οποία ο καταναλωτής προτιμά να συνδέσει άμεσα για φόρτιση το ηλεκτρικό του αυτοκίνητο αμέσως μετά την άφιξή του στον οικιακό του χώρο. Ωστόσο, η φόρτιση των ηλεκτρικών αυτοκινήτων είναι δυνατό να ελεγχθεί μέσω της χρήσης έξυπνων συσκευών και την εφαρμογή κινήτρων ή αντί-κινήτρων μπορεί να οδηγήσει μερίδα των καταναλωτών στη φόρτιση των αυτοκινήτων κατά τις χρονικές περιόδους που η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας είναι χαμηλή. Η εισαγωγή κινήτρων επιτυγχάνει σημαντική διαφοροποίηση της τιμής ηλεκτρικής ενέργειας που καλούνται να πληρώσουν οι καταναλωτές και, ανάλογα με τις προτιμήσεις τους, επιλέγουν αν θα αναβάλλουν τη φόρτιση για ώρες εκτός αιχμής.

Η αναβολή φόρτισης συνεπάγεται ότι οι καταναλωτές ενδέχεται να μην μπορούν να χρησιμοποιήσουν το ηλεκτρικό τους αυτοκίνητο, έπειτα από την επιστροφή από την εργασία καθώς αυτό μπορεί να έχει αποφορτιστεί. Συνεπώς, το οικονομικό κίνητρο που θα εφαρμόσει ο διαχειριστής του συστήματος αποσκοπεί στο να αντισταθμίσει την απώλεια της επιλογής (option) και της ελευθερίας μετακίνησης των καταναλωτών. Το οικονομικό κίνητρο (ή αντί-κίνητρο) είναι δυνατό να αγγίξει τα 60-90 €/MWh ανάλογα με την προθυμία ευελιξίας ή απώλειας επιλογής μετακίνησης των καταναλωτών. Η μετατόπιση φορτίου από τις ώρες αιχμής σε ώρες χαμηλής ζήτησης επιφέρει θετικές επιπτώσεις στο δίκτυο και στην ηλεκτροπαραγωγή δεδομένου ότι πραγματοποιείται εξομάλυνση της καμπύλης φορτίου (smoothing), αύξηση των χαμηλών φορτίων (valley filling) κατά τη διάρκεια της νύχτας και μείωση του μέσου ετήσιου κόστους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

8.2 Σύνοψη και μελλοντικές προοπτικές

Η επιτυχημένη διείσδυση της ηλεκτρικής ενέργειας και άλλων εναλλακτικών καυσίμων στο ενεργειακό μείγμα των μεταφορών θέτει ως αναγκαία συνθήκη το συντονισμό ενός αριθμού εμπλεκόμενων φορέων όπως η βιομηχανία υποδομών και καυσίμων, η κατασκευαστική βιομηχανία, οι καταναλωτές, οι φορείς χάραξης πολιτικής και το κράτος. Η έλλειψη της απαιτούμενης εγκατεστημένης υποδομής και το υψηλό κόστος αγοράς των εναλλακτικών αυτοκινήτων αποτελούν τα κύρια εμπόδια εμπορικής επιτυχίας των εναλλακτικών καυσίμων και της ηλεκτρικής ενέργειας.

Ο ρόλος του κράτους και των φορέων χάραξης πολιτικής είναι ζωτικός για το συντονισμό των παραπάνω αποφασιζόντων και την υπέρβαση των εμποδίων. Η εφαρμογή κατάλληλων πολιτικών και μέτρων θα οδηγήσει σε μείωση της ανασφάλειας των βιομηχανιών και την εξασφάλιση μεριδίου αγοράς έτσι ώστε να μειωθεί ο επενδυτικός κίνδυνος. Η επίτευξη οικονομικών κλίμακος θα καταστήσει τις προηγμένες τεχνολογίες λιγότερο ακριβές και θα επιτρέψει την περαιτέρω προώθηση τους στην αγορά. Η αποτυχία συντονισμού των επιμέρους φορέων είναι δυνατό να οδηγήσει στην αποτυχία της προώθησης εναλλακτικών καθαρών καυσίμων στον τομέα των μεταφορών.

Τα τεχνολογικά όρια των ειδικών εκπομπών CO₂ των επιβατικών αυτοκινήτων μπορεί να αποτελέσουν ένα ισχυρό ρυθμιστικό μέτρο πολιτικής που μπορεί δυνητικά να οδηγήσει σε δυναμική διείσδυση της ηλεκτρικής ενέργειας στις μεταφορές.

Η επιλογή μεταξύ των μέτρων ρύθμισης των ειδικών εκπομπών CO₂ και ενεργειακής απόδοσης αποτελεί πολιτική απόφαση που περιλαμβάνει μεγάλη αβεβαιότητα όσον αφορά την ετοιμότητα και την τεχνολογική ωριμότητα των νέων προηγμένων τεχνολογιών. Η επιλογή των τεχνολογικών ορίων ενεργειακής απόδοσης, που ευνοούν την τεχνολογία της μπαταρίας θα στείλει ισχυρά μηνύματα προς τη βιομηχανία να επικεντρωθεί στη μαζική κατασκευή ηλεκτρικών αυτοκινήτων με σκοπό την επίτευξη οικονομικών κλίμακος και τη μείωση του κόστους.

Η επιλογή τεχνολογικών ορίων με βάση τις εκπομπές CO₂ θα επιτρέψει ένα διαφοροποιημένο φάσμα πιθανών τεχνολογικών επιλογών συμπεριλαμβανομένων των μπαταριών και των κυψελών καυσίμου υδρογόνου. Αυτό σημαίνει ότι η μελλοντική αγορά του στόλου των οχημάτων της Ευρώπης είναι πιθανό να περιλαμβάνει διαφορετικές τεχνολογικές επιλογές, γεγονός που θα συνεπάγεται παράλληλες αλυσίδες παραγωγής και έρευνας που ίσως να μην επιτρέψει την πλήρη επίτευξη ωριμότητας. Ωστόσο, αναφορικά με το στόχο της δραστηκής μείωσης των εκπομπών CO₂, τα τεχνολογικά όρια στις εκπομπές CO₂, παρ' όλο που είναι πιο δαπανηρά, αποτελούν μια πιο «ασφαλή» επιλογή πολιτικής καθώς δεν επικεντρώνονται στην επιτυχία μίας μόνο τεχνολογικής επιλογής.

Ένα ιδιαίτερα σημαντικό εύρημα αποτελεί ότι οι τεχνολογικές εξελίξεις και οι αλλαγές στη δομή του στόλου των αυτοκινήτων δεν επηρεάζονται μέχρι το 2030. Ως εκ τούτου είναι ασφαλέστερο να συνεχιστεί η πολιτική ρύθμισης των εκπομπών CO₂ μέχρι αυτή τη χρονική περίοδο και να επαναπροσδιοριστεί εκ νέου μετά το 2030 που θα έχει μειωθεί η τεχνολογική αβεβαιότητα ως ένα βαθμό.

Οι φορείς χάραξης πολιτικής θα πρέπει να μειώσουν τον επενδυτικό κίνδυνο των επενδυτών σε υποδομές σταθμών φόρτισης ηλεκτρικής ενέργειας και διάθεσης υδρογόνου. Ο επιτυχής συντονισμός των εμπλεκόμενων φορέων αναμένεται να εξασφαλίσει την επενδυτική επιτυχία τέτοιων έργων υψηλής έντασης κεφαλαίου. Σε αντίθετη περίπτωση, η θέσπιση πολύ υψηλής φορολογίας μπορεί να οδηγήσει σε ρυθμιστική αβεβαιότητα και να θέσει υπό αμφισβήτηση την εφαρμογή της πολιτικής και την επίτευξη του στόχου της βαθιάς μείωσης των εκπομπών CO₂. Εξάλλου, το κόστος εφαρμογής φορολογίας αναμένεται 5-6 φορές υψηλότερο του συνολικού διαχρονικού κόστους υποδομής.

Τέλος, η διείσδυση της ηλεκτρικής ενέργειας και του υδρογόνου στα πλαίσια της βαθιάς απανθρακοποίησης του συστήματος των μεταφορών προϋποθέτει την παράλληλη δραστηκή μείωση των εκπομπών CO₂ στο υπόλοιπο ενεργειακό σύστημα όπως η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας και του υδρογόνου. Σε διαφορετική περίπτωση, οι εκπομπές αερίου του θερμοκηπίου πραγματοποιούνται στο στάδιο της παραγωγής καυσίμου (ηλεκτροπαραγωγή) έναντι του σταδίου της τελικής κατανάλωσης. Παράλληλα, η εφαρμογή κινήτρων στους χρήστες των ηλεκτρικών αυτοκινήτων θα αυξήσει την ευελιξία τους, γεγονός που θα επιφέρει θετικές επιπτώσεις στο δίκτυο όπως φθηνότερη ηλεκτρική ενέργεια.

Η ανάπτυξη του ενεργειακού οικονομικού μοντέλου για τον τομέα των μεταφορών, PRIMES-TREMOVE, στα πλαίσια της παρούσας διατριβής αποτελεί ένα σημαντικό εργαλείο για την αξιολόγηση πολιτικών και ανάλυση των επιπτώσεων του δραστηκού μετασχηματισμού προς ένα αειφόρο σύστημα μεταφορών. Επιπλέον, αναλύθηκαν οι αναδράσεις μεταξύ των αποφασιζόντων και αναγνωρίστηκαν οι προϋποθέσεις για τη μαζική διείσδυση της ηλεκτρικής ενέργειας και άλλων εναλλακτικών καυσίμων στο ενεργειακό μείγμα των μεταφορών. Ωστόσο, πέραν της ηλεκτρικής ενέργειας, η βιομηχανία έχει ξεκινήσει την παραγωγή συνθετικών

καυσίμων (e-diesel, e-gasoline) που κάνει χρήση ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και παραγωγή αερίου σύνθεσης από διοξείδιο του άνθρακα της ατμόσφαιρας ή που κατακρατείται. Το συγκεκριμένο μονοπάτι είναι δυνατό να ανταγωνιστεί μελλοντικά την ηλεκτρική ενέργεια σε χρήση στον τομέα των μεταφορών και αποτελεί σημαντική ερευνητική προοπτική.

Στην παρούσα διατριβή αξιολογήθηκε η σημασία της ευελιξίας φόρτισης των ηλεκτρικών αυτοκινήτων σε χρονικές περιόδους με χαμηλή ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας. Ωστόσο, αντικείμενο μελλοντικής προέκτασης αποτελεί η αξιολόγηση της ανάδρασης μεταξύ των ηλεκτρικών αυτοκινήτων, της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από φωτοβολταϊκά και ανεμογεννήτριες και στατικών μπαταριών. Οι τελευταίες θα αναλάβουν την αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας κατά τις ώρες που υπάρχει περίσσεια ηλεκτρικής ενέργειας και τη διοχέτευση αυτής τις ώρες αιχμής. Ο ρόλος των ηλεκτρικών αυτοκινήτων θα αφορά την εξομάλυνση της ημερήσια καμπύλης ζήτησης φορτίου χάρη στη χρήση έξυπνων συσκευών διαχείρισης της φόρτισης.

Ιδιαίτερο ερευνητικό ενδιαφέρον αποτελεί η προέκταση του μοντέλου έτσι ώστε οι αποφασίζοντες (αντιπροσωπευτικός καταναλωτής και αντιπροσωπευτική εταιρεία) να πάψουν να έχουν μυωπικές αντιδράσεις. Αυτό συνεπάγεται τη διαχρονική επίλυση του μοντέλου κατά την οποία οι αποφασίζοντες προσδοκούν την εξέλιξη σημαντικών μεταβλητών όπως η εξέλιξη των τιμών καυσίμου. Επιπλέον, η εισαγωγή κλάσεων καταναλωτών με βάση το κατά κεφαλή εισόδημα στο μοντέλο επιλογής νέου εξοπλισμού θα προσδώσει μεγαλύτερο ρεαλισμό στην προσομοίωση των αποφάσεων αγοράς κεφαλαιουχικού εξοπλισμού.

Δημοσιεύσεις σε Διεθνή Επιστημονικά περιοδικά

- **Siskos, P.**, Capros, P., De Vita A., 2015. CO₂ and energy efficiency car standards in the EU in the context of a decarbonisation strategy: A model-based policy assessment, Energy Policy 84, 22-34.
- Capros, P., De Vita A., Fragkos P., Kouvaritakis N., Paroussos L., Fragkiadakis K., Tasios N., **Siskos P.**, 2015. The impact of hydrocarbon resources and GDP growth assumptions for the evolution of the EU energy system, Energy Strategy Reviews 6, 64-79.
- **Siskos, P.**, Capros, P., 2015. Restructuring transport sector towards sustainability: infrastructure and market prospects of alternative fuels in EU transportation, International Journal of Decision Support Systems Vol.1, No.2, 210 - 227.
- **Siskos P.**, Houridis S., 2011. Rationalising photovoltaic energy investments with multicriteria decision analysis: a Greek case study. International Journal of Multicriteria Decision Making 1, 205-229

Δημοσιεύσεις σε πρακτικά συνεδρίων μετά από κρίση στο πλήρες κείμενο

- A1. Siskos, P.**, De Vita A., Capros, P., 2014. The role of carbon standards on passenger cars towards the reduction of GHG emissions in EU: A model-based scenario analysis. IEEE International Electric Vehicle Conference 2014, IEEE Xplore Digital Library.

Παρουσιάσεις σε Συνέδρια

- Σ1. Siskos, P.**, De Vita A., Capros, P., 2014 "The role of carbon standards on passenger cars towards the reduction of GHG emissions in EU: A model-based scenario analysis", IEEE International Electric vehicle conference 2014, 17-19 December, Florence, Italy.
- Σ2. Siskos P.**, Capros P., 2014, "PRIMES-TREMOVE: A Transport Sector Model for Long-Term Energy-Economy-Environment Planning for EU", 20th Conference of the International Federation of Operational Research Societies, 13-18 July, Barcelona, Spain.
- Σ3. Siskos P.**, Capros P., 2012, "Modelling of electromobility in EU transportation driven by technology progress and regulation", 23rd Hellenic conference of Greek Association of Operational Research, 12-14 September 2012, Athens, Greece.

Βιβλιογραφία

- Acemoglu, D., 2009. "Endogenous Technological Change". Introduction to Modern Economic Growth. Princeton University Press. pp. 411–533. ISBN 978-0-691-13292-1.
- Agarwal, A. K. 2007. Biofuels (alcohols and biodiesel) applications as fuels for internal combustion engines. Progress in energy and combustion science 3, 233-271.
- Aggeler, D., F. Canales, H. Z., Coccia, A., Butcher, N., Apeldoorn, O. 2010. Ultra-Fast DC-Charge Infrastructures for EV-Mobility and Future Smart Grids. Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT Europe), pp. 1-8. Gothenburg: IEEE.
- Aghion P., and Howitt P. W., 1997. Endogenous Growth Theory. MIT Press, ISBN: 9780262011662
- Ahman, M. 2006. Government policy and the development of electric vehicles in Japan. Energy Policy 34, 433-443.
- Amsterdam Roundtables Foundation, McKinsey, 2014. Evolution: Electric vehicles in Europe: gearing up for a new phase? Amsterdam Roundtables Foundation. Netherlands.
- Anable J, Brand C. 2010. Modelling transport energy demand: A socio-technical approach. Energy Policy, Issue 41 125-138.
- Anandarajah, G., McDowall, W., Ekins, P. 2013. Decarbonising road transport with hydrogen and electricity: long term global technology learning scenarios. International Journal of Hydrogen Energy 8, 3419-3432.
- Andersson Henrik, 2005. The Value of Safety as revealed in the Swedish Car Market: An Application of the Hedonic Pricing Approach. The Journal of Risk and Uncertainty, 30, 3, 211-239.
- Arentze TA, Timmermans H. 2004. Moving Albatross to practice: refinements. EIRASS, Eindhoven University of Technology.
- Avato P. and Coony J., 2007. Accelerating Clean Energy Technology Research, Development, and Deployment. World Bank Publications
- Axhausen, K., Garling, T. 1992. Activity-based approaches to travel analysis: conceptual framework models and research problems. Transport Reviews, 12, 324-341.
- Barlas, Y., 1996. Formal aspects of model validity and validation in system dynamics. System Dynamics Review 12.3, 183-210.
- Barro, R. J., Sala-i-Martin, Xavier S. i M., 2004. Economic Growth. New York: McGraw-Hill. ISBN 0-262-02553-1

- Bataille, C., Jaccard, M. 2004. A hybrid top-down bottom-up model with macro-economic feedbacks. The International Association for Energy Economics. Washington, DC.
- Bates, J., Dasgupta, M. 1990. Review of techniques of travel demand analysis: interim report. Transport and road research laboratory, Crowthorne, contractor report 186.
- Bauer, H., Barnes, S., Reichardt, T., Neumann, M., 2005. Driving consumer acceptance of mobile marketing: A theoretical framework and empirical study. *Journal of Electronic Commerce Research* 6, 181-192.
- Bauer, P., Zhou, Y., Doppler, J., Stembridge, N., 2010. Charging of electric vehicles and impact on the grid. *MECHATRONIKA* 121-127, 13th International Symposium, Teplice.
- Beckerman W., Hepburn C., 2007. Ethics of the discount rate in the Stern review on the economics of climate change. *World Economics* 8, 187-210.
- Beeck, v. 1999. Classification of energy models. Tilburg: Tilburg University.
- Bennathan E, F. J. 1992. What determines demand for freight transport? Washington DC: The World Bank.
- Berg, C. 2006. Household transport demand in a CGE-framework. *Environmental and Resource Economics*, 37, 573-597.
- Berry, S., J. Levinsohn, A. Pakes. 1995. Automobile prices in market equilibrium, *Econometrica* vol. 63, no 4, pp. 841-890.
- Bhat, C., Koppelman, F. S. 2003 (Second edition). Handbook of transportation science.
- Birgisson, G., Lavarco, W. 2004. An effective regulatory regime for transportation of hydrogen. *International Journal of hydrogen energy* 7, 771-780.
- Birol, F., Guerer N., 1993. Modelling the transport sector fuel demand for developing economies. *Energy Policy*, 1163-1172.
- Bowman, J. A. 2000. Activity-based disaggregate travel demand model system with activity schedules. *Transportation research*, 35A, 1-28.
- Brand, C., Tran, M., Anable, J., 2012. The UK transport carbon model: An integrated life cycle approach to explore low carbon futures. *Energy Policy* 41, 107-124.
- Bristow, A. L., Tight, M., Pridmore, A., May, A. D. 2008. Developing pathways to low carbon land-based passenger transport in Great Britain by 2050. *Energy Policy* 9, 3427-3435.
- Bröcker, J. 1998. Operational spatial computable general equilibrium modeling. *The Annals of Regional Science*, 32, 367-387.
- Brown, R., 1992. Managing the "S" Curves of Innovation. *Journal of business and industrial marketing* 7, 41-52.
- Byrne, M. R., Polonsky, M. J. 2001. Impediments to consumer adoption of sustainable transportation: Alternative fuel vehicles. *International Journal of Operations Production Management* 12, 1521-1538.

- Calfee, J., Winston, C. 1998. The value of automobile travel time: implications for congestion policy. *Journal of public economics* 1, 83-102.
- Camus, C., Silva, C. M., Farias, T. L., Esteves, J., 2009. Impact of Plug-in Hybrid Electric Vehicles in the Portuguese electric utility system. *IEEE International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives*, 285-290.
- Capros, P., Tasios, N., De Vita A., Mantzos, L., Paroussos, L. 2012. Transformation of the energy system in the context of the decarbonisation of the EU economy. *Energy Strategy Reviews* 2, 85-96.
- Capros, P., Tasios, N., De Vita A., Mantzos, L., Paroussos, L., 2012. Model-based analysis of decarbonising the EU economy in the time horizon to 2050. *Energy strategy reviews* 1, 76-84.
- Carrington, R., Coelli, T., Groom, E. 2002. International Benchmarking for Monopoly Price Regulation: The Case of Australian Gas Distribution. *Journal of regulatory economics* 2, 191-216.
- CARS 21. 2012. High level group on the Competitiveness and sustainable growth of the automotive industry in the European Union. European Commission.
- Castillo E., Menéndez J. M, Jiménez P., Rivas A, 2008, Closed form expressions for choice probabilities in the Weibull case, *Transportation Research Part B: Methodological* 42, 373-380.
- Chan, C., 2007. The state of the art of electric, hybrid and fuel cell vehicles. *Proceedings of the IEEE* 95, 704-718.
- Chapin F. S. Jr., 1971. Free time activities and the quality of urban life. *Journal of the American Institute of planners*, 411-417.
- Chapman, L. 2007. Transport and climate change: a review. *Journal of Transport Geography* 5, 364-367.
- Chisholm M, O. 1973. Freight flows and spatial aspects of the British economy. New York and London: Cambridge University.
- Christensen, L. R., Greene, W. H., 1976. Economies of scale in US electric power generation. *The Journal of Political Economy*, 655-676.
- Cipcigan L., 2011. Grid Integration of electric vehicles. *IEEE Vehicular Technology Society*.
- Clark, W., Rifkin, J., O'Connor, T., Swisher, J., Lipman, T., Rambach, G. 2005. Hydrogen energy stations: along the roadside to the hydrogen economy. *Utilities Policy* 13, 41-50.
- Clement, K., Haesen, E., Driesen, J. 2009. Coordinated charging of multiple plug-in hybrid electric vehicles in residential distribution grids. *Power Systems Conference and Exposition, PSCE '09* pp. 1-7. Seattle: IEEE.
- Cowan, R., Hulten, S. 1996. Escaping lock-in: The case of the electric vehicle. *Technological Forecasting and Social Change*, 61-79.

- Crassous, R., Hourcade, J.-C., Sassi, O. 2006. Endogenous structural change and climate targets. *Energy journal*.
- Cullen I, Godson V., 1975. Urban networks: the structure of activity patterns. In *Progress in planning* 1-96.
- Daly, H., Ó Gallachóir, B. P., 2010. Private Car Transport and the 10% RES-T target - Quantifying the Contribution of EVs and Biofuels. In: Ghosh, B., Murray, R. eds, *Irish Transport Research Network: Proceedings of the inaugural conference of the Irish Transport Research Network ITRN 2010*. Dublin, Ireland 31 Aug - 1 Sep 2010.
- Denholm P., Short W., 2006. An Evaluation of Utility System Impacts and Benefits of Optimally Dispatched. National Renewable Energy Laboratory, Tech. Rep. NREL/TP-620-40293.
- Denis, C., Koopman, G. J., 1998. EUCARS: A partial equilibrium model of EUropean CAR emissions (version 3.0).
- Dhrymes, P. J., Kurz, M., 1964. Technology and scale in electricity generation. *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, 287-315.
- Donaghy, K., Rudinger, G., Poppelreuter, S. 2004. Societal trends, mobility behaviour and sustainable transport in Europe and North America. *Transport Reviews* 6, 679-690.
- Dreyfus K. Mark and W. Kip Viscusi, 1995. Rates of time Preference and Consumer Valuations of Automobile Safety and Fuel Efficiency. *Journal of Law and Economics*, Vol. 38, No 1, 79-105.
- Duvall, Dr. Mark S., 2006, Plug-in Hybrid Electric Vehicles Technology Challenges, Plug-In Hybrid Discussion Meeting, U.S. Department of Energy, Electric Power Research Institute, May 4-5.
- E3MLab/ NTUA. 2011. PRIMES-TREMOVE transport model v3. Available at: http://www.e3mlab.ntua.gr/e3mlab/PRIMES%20Manual/PRIMES%20TREMOVE_v3.pdf
- EC and Economic Policy Committee. 2009. Ageing Report: Economic and budgetary projections for the EU-27 Member States (2008-2060). European Commission, Luxembourg.
- EC. 2009. Regulation (EC) No 443/2009 of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 setting emission performance standards for new passenger cars as part of the Community's integrated approach to reduce CO₂ emissions from light-duty vehicles
- EC. 2010a. Car prices within the European Union. European Commission, Competition, Brussels
- EC. 2010b. EUROPE 2020: A strategy for smart, sustainable and inclusive growth. European Commission, Brussels.
- EC. 2011a. WHITE PAPER- Roadmap to a Single European Transport Area Towards a competitive and resource efficient transport system. European Commission, Brussels.

- EC. 2011b. Communication from the commission to the council, the European parliament, the European economic and social committee and the committee of regions, Energy Roadmap 2050. European Commission, Brussels.
- EC. 2012. Proposal for a REGULATION OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL amending Regulation (EC) No 443/2009 to define the modalities for reaching the 2020 target to reduce CO₂ emissions from new passenger cars. European Commission, Brussels.
- Eksioglu, S. D., Acharya, A., Leightley, L. E., Arora, S. 2009. Analyzing the design and management of biomass-to-biorefinery supply chain. *Computers and industrial Engineering* 4, 1342-1352.
- EMISIA, INFRAS, IVL, 2013. Transport data collection supporting the quantitative analysis of measures relating to transport and climate change.
- Environmental Protection Agency (EPA), 2012. Consumer vehicle choice model documentation. Prepared for EPA by Oak Ridge National Laboratory, EPA-420-B-12-052, August 2012
- Enzler Heidi B., Diekmann A. and Meyer R., 2014. Subjective discount rates in the general population and their predictive power for energy saving behaviour, *Energy Policy* 65, 524-540.
- EPA. 2012. 2017 and later model year light-duty vehicle greenhouse gas emissions and corporate average fuel economy standards; Final Rule. Department of Transportation.
- European Environment Agency, 2014. Monitoring CO₂ emission from new passenger cars in the EU: summary of data for 2013. Copenhagen: EEA.
- European Expert group on future transport fuels. 2011. Report on Infrastructure for alternative fuels. http://ec.europa.eu/transport/themes/urban/cts/doc/ftf_eg_report_201112.pdf.
- Fane, S., Robinson, J., White, S. 2007. The use of levelised cost in comparing supply and demand side options. *Water supply* 3, 185-192.
- Fermi F., et al. 2012. The design of the ASTRA-EC model. Deliverable D4.1 of ASSIST (Assessing the social and economic impacts of past and future sustainable transport policy in Europe). Germany: Fraunhofer-ISI, Karlsruhe.
- Ferris M. C., Munson T.S., 2010. PATH 4.6 GAMS Corporation 2010
- Ferris M. C., Munson T.S., 1998. Complementarity problems in GAMS and the PATH solver. Report on Computation in Economics, Finance and Engineering: Economic systems. Cambridge, England.
- Fessard, J. 1977. Master of Science thesis: Transportation generalised cost functions for railroads and inland waterways. MIT.
- Forrester, J. W. 1974. The Debate on World Dynamics: A Response to Nordhaus. *Policy Sciences* 5, 169-190.

- Forrester, J. W. 1980. Tests for Building Confidence in System Dynamics Models. System Dynamics, ed. A. A. Legasto, J. W. Forrester and J.M. Lyneis. Amsterdam: North-Holland.
- Fosgerau, M., Bierlaire, M., 2009, Discrete choice models with multiplicative error terms. Transportation Research Part B: Methodological 43, 494-505.
- Fragkos, P., Kouvaritakis, N., Capros, P. 2013. Model-based analysis of the future strategies for the MENA energy system. Energy Strategy Reviews 2, 59-70.
- Funk K., Rabl A., 1999. Electric versus conventional vehicles: social costs and benefits in France. Transportation Research part D: Transport and Environment 4, 397-411.
- Fuss, M. A., Gupta, V. K., 1981. A cost function approach to the estimation of minimum efficient scale, returns to scale, and suboptimal capacity: With an application to Canadian manufacturing. European Economic Review 15, 123-135.
- Gerard, D., Lave, L. B., 2005. Implementing technology-forcing policies: The 1970 Clean Air Act Amendments and the introduction of advanced automotive emissions controls in the United States. Technological forecasting and social change 7, 761-778.
- Gibson, G., Hill, N. 2012. Exploring possible car and van CO2 emission targets for 202 in Europe. London: Ricardo-AEA.
- Gjoen, H., Hard, M. 2002. Cultural politics in action: developing user scripts in relation to the electric vehicle. Science, Technology, Human Values 27, 262-281.
- Gordon P., Kumar A., Richardson, H. W., 1988. Beyond the journey to work. Transportation Research, 21A 6, 419-426.
- Grahn P., 2013. Electric Vehicle Charging Impact on Load Profile. Ph.D. dissertation, Dept. Elec. Eng., Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm, 2013.
- Grahn P., Alvehag K., Soder L., 2014. PHEV utilization model considering type-of-trip and recharging flexibility. Smart Grid, IEEE Transactions 5, 139-148.
- Granovskii M., Dincer I., et al. 2006. Economic and environmental comparison of conventional, hybrid, electric and hydrogen fuel cell vehicles. Journal of power sources 159, 1186-1193.
- Greene D. L., 2012. Rebound 2007: Analysis of U.S. light-duty vehicle travel statistics. Energy Policy 41, 14-28.
- Greene, D. L., Plotkin, S. E. 2011. Reducing greenhouse gas emissions from US transportation. Arlington: Pew Centre on Global climate change.
- Griliches Zvi, 2007. R&D and Productivity: The Econometric Evidence. University of Chicago Press.
- Gross, R., Blyth, W., Heptonstall, P. 2010. Risks, revenues and investment in electricity generation: Why policy needs to look beyond costs. Energy Economics 4, 796-804.
- Gül T., Kypreos S., Turton H., Barreto L., 2009. An energy-economic scenario analysis of alternative fuels for personal transport using the Global Multi-regional MARKAL model (GMM). Energy 34, 1423-1437.

- Hadley, S. W., 2007. Evaluating the impact of plug-in hybrid electric vehicles on regional electricity supplies. IEEE iREP Symposium on Bulk Power System Dynamics and Control-VII. Revitalizing Operational Reliability 1-12.
- Hagerstrand T., 1970. What about people in regional science? Papers and proceedings of the regional science association, 7-24.
- Haines, A., McMichael, A. J., Smith, K. R., Roberts, I., Woodcock, J., Markandya, A., Armstrong B. G., Campbell-Lendrum D., Dangour A. D., Davies M., Bruce N., Tonne C., Wilkinson, P. 2010. Public health benefits of strategies to reduce greenhouse-gas emissions: overview and implications for policy makers. *The Lancet* 9707, 2104-2114.
- Hall, B.H., and Hayashi F., 1989. Research and Development as an Investment. NBER Working Paper No. 2973.
- Hausman, W. L. 2004. Global logistics indicators, supply chain metrics, and bilateral trade patterns. The World Bank, Policy Research Working Paper Series, no 3773.
- Hensher, D. A., Button, K. J., 2008. Handbook of transport modelling (Second edition). Elsevier.
- Hill, N., Brannigan, C., Smokers, R., Schrotten, A., Essen, H. v., Skinner, I. 2012. Developing a better understanding of the secondary impacts and key sensitivities for the decarbonisation of the EU's transport sector by 2050. Harwell. AEA.
- Holladay, Jamie D., et al., 2009. An overview of hydrogen production technologies. *Catalysis Today* 139.4, 244-260.
- Huo H., Yao Z., He K., 2011. Fuel consumption rates of passenger cars in China: Labels versus real-world. *Energy Policy* 39, 7130-7135.
- Ibenholt, K., 2002. Explaining learning curves for wind power. *Energy Policy* 30, 1181-1189.
- ICCT. 2014. Policy Update: EU CO2 emission standards for passenger cars and light-commercial vehicles. International Council on Clean Transportation.
- IEA 2008. Energy Technology Perspectives. International Energy Agency, Paris.
- IEA 2013. Global EV outlook. Understanding the Electric Vehicle Landscape to 2020, International Energy Agency, Paris.
- IEA, 2012. Energy Technology Perspectives, Pathways to a Clean Energy System. International Energy Agency, Paris.
- IPCC. 2007. Climate change 2007: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on climate change. Cambridge and New York: Cambridge University Press.
- ITF. 2010. Reducing transport greenhouse gas emissions: Trends and data. Germany: OECD.

- James, B.D., J.A. Kalinoski, K.N. Baum, 2010. Mass Production Cost Estimation for direct H₂ PEM Fuel Cell Systems for Automotive Applications: 2010 Update. Directed Technologies, Inc., Arlington, Virginia.
- Joffe, D., Hart, D., Bauen, A., 2004. Modelling of hydrogen infrastructure for vehicle refuelling in London. *Journal of power sources* 131, 13-22.
- Jones, P., Koppelman, F., Orfeuil J.P., 1990. Activity analysis: state of the art and future directions. *Developments in dynamic and activity based approaches to travel analysis*, 34-55.
- JRC IPTS. 2010. Prospective Outlook on Long-term Energy Systems: POLES Manual Version 6.1. European Commission.
- Kampman, B., Davidson M. D., Faber J., 2008. Emissions trading and fuel efficiency regulation in road transport. Swedish Environmental Protection Agency.
- Karplus, V. J., Paltsev, S., Reilly, J. M., 2010. Prospects for plug-in hybrid electric vehicles in the United States and Japan: A general equilibrium analysis. *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 44, 620-641.
- Kaselimi, E. N., Notteboom, T. E., Pallis, A. A., Farrell, S., 2011. Minimum Efficient Scale (MES) and preferred scale of container terminals. *Research in Transportation Economics*, 32, 71-80.
- Kim, S. 2010. Overview of GCAM (Global Change Assessment Model). Retrieved from http://aossc.umd.edu/~seminar/data/y10fall/umd_aosc_101104_kim.pdf
- Kintner-Meyer M., Schneider K., Pratt R., 2007. Impacts assessment of plug-in hybrid vehicles on electric utilities and regional U.S. power grids, Part 1: Technical analysis; Pacific Northwest National Laboratory: Richland, WA.
- Kley, F., Lerch, C., Dallinger, D. 2011. New business models for electric cars - A holistic approach. *Energy Policy* 6, 3392-3403.
- Kloess, M., Haas R., 2009. Potentials of hybrids and electric vehicles for the passenger vehicle sector in Austria – a model based analysis. Paper presented at Energy, Policies and Technologies for Sustainable Economies, 7\9 September, Vienna, Austria.
- Konstantin, P. 2009, *Praxisbuch Energiewirtschaft: Energieumwandlung, -transport und -beschaffung im liberalisierten Markt*, Springer, Berlin.
- Koujianou Goldberg P., 1996. The effects of the corporate average fuel efficiency standards. NBER Working paper 5673.
- Kouvaritakis, N., Soria A., Isoard S., 2000. Modelling energy technology dynamics: methodology for adaptive expectations models with learning by doing and learning by searching. *International Journal of Global Energy Issues* 14, 104-115.
- Krail M., 2009. *System-Based Analysis of Income Distribution Impacts on Mobility Behaviour*. Baden-Baden, Germany: NOMOS-Verlag.

- Kromer, M., Bandivadekar, A., Evans, C. 2010. Long-term greenhouse gas emission and petroleum reduction goals: Evolutionary pathways for the light-duty vehicle sector. *Energy* 35, 387-397.
- Krzyzanowski, D., Kypreos S., Barreto L., 2008. Supporting hydrogen based transportation: Case studies with global Markal model. *Computational Management Science* 5, 207\31.
- Kulkarni, A. a. 2001. A micro-simulation of daily activity patterns. 80th Annual Meeting of the Transportation Research Board. Washington, D.C.
- LAT, Envicon, E3MLab, Okopol, KTI, Renault, 2008. European database of vehicle stock for the calculation and forecast of pollutant and greenhouse gases emissions with TREMOVE and COPERT.
- Leonhard, R. 2011. Reducing CO₂ emissions with optimised internal-combustion engines. 60th Automotive Press Briefing in Boxberg.
- Lin, Z., Greene, D. L. 2012. Promoting the Market for Plug-In Hybrid and Battery Electric Vehicles. *Transportation Research Record* 2252, 49-56.
- Lockwood, P., Demetsky M.J., 1994. Nonwork travel- A study of changing behavior. 73rd annual meeting on the transportation research board. Washington DC.
- Loulou, R., Remne, U., Kanudia, A., Lehtila, A., Goldstein, G., 2005. Documentation for the TIMES Model: Part I. ETSAP.
- Luderer, G., Leimbach, M., Bauer, N., Kriegler, E. 2010. Potsdam Institute for Climate Impact Research. Retrieved from Description of the REMIND-R model, Version April 2010: <http://www.pik-potsdam.de/members/luderer/10-04-16-remind-model-description>
- Macharis C., Witte A. D., Turcksin L. 2010. The Multi-Actor Multi-Criteria Analysis (MAMCA) application in the Flemish long-term decision making process on mobility and logistics. *Transport Policy* 5, 303-311.
- Manheim, M. 1979. *Fundamentals of transportation systems analysis*. MIT Press, Cambridge.
- Manne, A., Richels, R. 1992. *Buying Greenhouse Insurance: the Economic Costs of Carbon Dioxide Emission Limits*. Massachusetts: MIT Press.
- Manne, A., Wene, C.-O. 1992. *MARCAL-MACRO: A linked model for energy-economy analysis*. Upton, NY: Brookhaven National Lab.
- Marcial Echenique and Partners Ltd. 2000. *STREAMS: Strategic Transport Research for European Member States - ST 96-AM-105*.
- Marcial Echenique and partners Ltd. 2002. *SCENES European Transport Scenarios ST 97-RS-2277*.
- Matiasko W., Menges R., Spiess M., 2012. Modifying the rebound: It depends! Explaining mobility behaviour on the basis of the German socio-economic panel. *Energy Policy* 41, 29-35.

- Mattsson Lars-Göran, Jörgen W. Weibull, Per Olov Lindberg, 2014, Extreme values, invariance and choice probabilities, *Transportation Research Part B: Methodological*, Volume 59, January, Pages 81-95.
- Mattsson, N., 1997. Internalizing technological development in energy systems models. Thesis for the Degree of Licentiate of Engineering, Energy Systems Technology Division, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden.
- Mayer, T., Kreyenberg, D., Wind, J., Braun, F. 2012. Feasibility study of 2020 target costs for PEM fuel cells and lithium-ion batteries: A two-factor experience curve approach. *International Journal of Hydrogen Energy* 37, 14463-14474.
- McCollum, D., Yang, C. 2009. Achieving deep reductions in US transport greenhouse gas emissions: Scenario analysis and policy implications. *Energy Policy* 12, 5580-5596.
- McDonald, A., Schrattenholzer L. 2001. Learning rates for energy technologies. *Energy Policy* 29, 255-261.
- McDowall W., 2012. Endogenous technology learning for hydrogen and fuel cell technology in UKSHEC II: Literature review, research questions and data. UKSHEC Working Paper No. 8
- McFadden, D. Modelling the choice of residential location. *Transportation Research Record* 672. TRB, National Research Council, Washington DC, 72-77
- McFadden, D., Train, K., 2000. Mixed MNL models for discrete response. *Journal of Applied Econometrics* 15 (5), 447-470.
- McKinsey Company, 2011. A portfolio of power-trains for Europe: a fact-based analysis: The role of battery electric vehicle, plug-in hybrids and fuel cell electric vehicles. McKinsey, Company.
- Melaina, M. W. 2003. Initiating hydrogen infrastructures: preliminary analysis of a sufficient number of initial hydrogen stations in the US. *International Journal of Hydrogen Energy*, 743-755.
- Mercuri, R., Bauen, A., Hart, D., 2002. Options for refuelling hydrogen fuel cell vehicles in Italy. *Journal of power sources* 106, 353-363.
- Messner, S., Schrattenholzer, L. 2000. MESSAGE-MACRO: linking an energy supply model with a macroeconomic module and solving it iteratively. *Energy* 25, 267-282.
- Meyer, P. E., Winebrake, J., 2009. Modeling technology diffusion of complementary goods: The case of hydrogen vehicles and refuelling infrastructure. *Technovation* 29, 77-91.
- Miller, T. 1989. The value of time and the benefit of time saving. Urban Institute working paper.
- Mock P., Hülsebusch D., Ungethüm J., Schmid S.A., 2009. Electric vehicles – A model based assessment of future market prospects and environmental impacts. Paper presented at EVS24, May 13\16, Stavanger, Norway.

- Mock, P., German, J., Bandivadekar, A., Riemersma, I., 2012. Discrepancies between Type-approval and “Real-world” Fuel-consumption and CO2 Values. The International Council on Clean Transportation, Working Paper 2012-2.
- Mokhtarian, P., Salomon, I. 2001. How derived is the demand for travel? Some conceptual and measurement consideration. *Transportation Research A* 8, 695-719.
- Moreau, P., Lehmann, D., Markman, A., 2001. Entrenched Knowledge Structures and Consumer Response to new products. *Journal of Marketing Research* 38, 14-30.
- Morrow, K., Karner, D., Francfort, J. 2008. PPlug-in hybrid electric vehicle charging infrastructure review. Idaho: US Department of Energy.
- Nagelhout D., Ros J.P.M., 2009. Elektrisch autorijden – Evaluatie van transitie op basis van systeemopties. Report 500083010. PBL - Planbureau voor de Leefomgeving, Bilthoven, The Netherlands.
- National Research Council, 2013. Transitions to Alternative vehicles and fuels. The National Academies Press, Washington DC, US.
- National Research Council. 2010. Advancing the Science of climate change. Washington DC: The National Academies Press.
- Nemet, G. F., 2006. Beyond the learning curve: factors influencing cost reductions in photovoltaics. *Energy policy* 34, 3218-3232.
- Neubauer, J., Wood, E. 2014. The impact of range anxiety and home, workplace, and public charging infrastructure on simulated battery electric vehicle lifetime utility. *Journal of power sources* 1, 12-20.
- Nordhaus, W. 1973. World dynamics: Measurement without data. *Economic Journal* 83, 1156-1183.
- Ntziachristos, L., Samaras, Z., 2000. COPERT: Computer programme to calculate emissions from road transport. Unpublished.
- Nykqvist, B., Nilsson, M., 2015. Rapidly falling costs of battery packs for electric vehicles. *Nature Climate Change* 5, 329-332.
- Offer, G., Contestabile, M., Howey, D., Clague, R., Brandon, N., 2011. Techno-economic and behavioural analysis of battery electric, hydrogen fuel cell and hybrid vehicles in a future sustainable road transport system in the UK. *Energy Policy* 39, 1939-1950.
- Offer, G., Howey, D., Contestabile, M., Clague, R., Brandon, N. 2010. Comparative analysis of battery electric, hydrogen fuel cell and hybrid vehicles in a future sustainable road transport system. *Energy Policy* 1, 24-29.
- Ortújar J., Willumsen L.G.. Modelling transport. 2nd edition. 1994.
- Ozaki R., Sevastyanova K., 2011. Going hybrid: An analysis of consumer purchase motivations. *Energy Policy* 39, 2217-2227.
- Paltsev S. and Capros P. 2013. Cost Concepts for Climate Change Mitigation. *Climate Change Economics* 4, Suppl. 1, 26 pages.

- Paltsev, S., Viquier, L., Babiker, M., Reilly, J., Tay, J. 2004. Disaggregating household transport in the MIT-EPPA Model. Technical Note No 5, MIT Joint Program on the science and policy of global change.
- Pasaoglu, G., Honselaar, M., Thiel, C. 2012. Potential vehicle fleet CO₂ reductions and cost implications for various vehicle technology deployment scenarios in Europe. *Energy Policy*, 404-421.
- Perdiguerro, J., 2012. Policy options for the promotion of electric vehicles: a review. Research Institute of Applied Economics, University of Barcelona.
- Philip, R., Wiederer, A. 2010. Policy options for electric vehicle charging infrastructure in C40 cities. Transportation Clinton Climate Initiative.
- Pickrell, D., 1999. Transportation and land use. In J. Gomez-Ibanez, W. Tye, and C. Winston, *Essays in transportation economics and policy, A handbook in honor of John R. Meyer*. Washington DC: The Brookings Institution.
- Plotkin, S. E. 2009. Examining fuel economy and carbon standards for light vehicles. *Energy Policy* 10, 3843-3853.
- Plotz, P., Schneider, U., Globisch, J., Dutschke, E., 2014. Who will buy electric vehicles? Identifying early adopters in Germany. *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 67, 96-109.
- Pohekar, S.D., Ramachandran, M. 2004. Application of multi-criteria decision making to sustainable energy planning- A review. *Renewable and sustainable energy reviews* 4, 365-381.
- Quinet, E., Vickerman, R., 2005. *Principles of transport economics*. Edward Elgar Publishing Limited.
- Reddy, S., Painuly, J., 2004. Diffusion of renewable energy technologies-barriers and stakeholders' perspectives. *Renewable Energy* 29, 1431-1447.
- Rivera-Tinoco R., Schoots K., van der Zwaan B. C. C., 2012. Learning curves for solid oxide fuel cells. *Energy Conversion and Management* 57, 86-96.
- Rodrigue, J.-P. 2013. *The geography of transport systems*. New York.
- Roman, T. G., Momber, I., Abbad, M. R., Miralles, A. S. 2011. Regulatory framework and business models for charging plug-in electric vehicles: Infrastructure, agents and commercial relationships. *Energy Policy* 10, 6360-6375.
- Romer, P. M., 1994. The Origins of Endogenous Growth. *The Journal of Economic Perspectives* 8, 3-22.
- Romm, J. 2006. The car and fuel of the future. *Energy policy* 17, 2609-2614.
- Rutherford, T. F., Nieuwkoop, R. v. 2011. An integrated transport network-computable general equilibrium model for Zurich.
- Safarianova S., Noembrini F., Boulouchos K., Dietrich P., 2011. Techno- economic analysis of low-GHG emission passenger cars. Deliverable D1, TOSCA project.

- Sakti, A., Michalek, J. J., Fuchs, E. R., Whitacre, J. F., 2015. A techno-economic analysis and optimization of Li-ion batteries for light-duty passenger vehicle electrification. *Journal of Power Sources*, 273, 966-980.
- Samaras C., Meisterling K., 2008. Life Cycle Assessment of greenhouse gas emissions from plug-in hybrid vehicles: implications for policy. *Environmental science and technology* 42, 3170-3176.
- Santos, G., Behrendt, H., Teytelboym, A. 2010. Part II: Policy instruments for sustainable road transport. *Research in Transportation Economics* 28, 46-91.
- Schade W., 2005. Strategic Sustainability Analysis: Concept and application for the assessment of European Transport Policy. Baden-Baden, Ger-many: NOMOS-Verlag.
- Schaefer, A., 2000. Regularities in travel demand: An international perspective. *Journal of transportation statistics* 3, 1-31.
- Schaefer, A., Victor, D., 2000. The future of mobility of the world population. *Transportation Research Part A34*), 171-205.
- Schoots K., Ferioli F., Kramer G.J., van der Zwaan B. C. C., 2008. Learning curves for hydrogen production technology: An assessment of observed cost reductions. *International Journal of Hydrogen Energy* 33, 2630-2645.
- Schoots K., Kramer G.J., van der Zwaan B. C. C., 2010. Technology learning for fuel cells: an assessment of past and potential cost reductions. *Energy Policy* 38. 2887-2897.
- Schroeder, A., Traber, T. 2012. The economics of fast charging infrastructure for electric vehicles. *Energy Policy*, 136-144.
- Schulze, M., Riveros, J. Z., 2010. Impact of electrical vehicles on strategic planning of energy infrastructure. *IEEE Power System Technology International Conference (POWERCON)* 1-6.
- Schwanitz, V. J., 2013. Evaluating integrated assessment models of global climate change. *Environmental Model ling and Software* 50, 120-131.
- Scott M. J., Kintner-Meyer M., Elliott D. B., Warwick W. M., 2007. Impacts assessment of plug-in hybrid vehicles on electric utilities and regional US power grids: part 2: economic assessment. Pacific Northwest National Laboratory.
- Skinner I., van Essen H., Smokers R., Hill N. 2010. Towards the decarbonisation of EU's transport sector by 2050. Final report produced under the contract ENV.C.3/SER/2008/0053 between European Commission Directorate-General Environment and AEA Technology.
- Small, K., 1992. Urban transportation economics. Philadelphia, Pennsylvania: Harwood Academic Publishers.
- Smith, W. J. 2010. Can EV (electric vehicles) address Ireland's CO₂ emissions from transport? *Energy* 12, 4514-4521.

- Smokers R., Essen v. H., et al., 2010. Regulation for vehicles and energy carriers. Paper produced as part of contract ENV.C.3/SER/2008/0053 between European Commission Directorate-General Environment and AEA Technology.
- Sovacool, B. K., Hirsh, R. F. 2009. Beyond batteries: An examination of the benefits and barriers to plug-in hybrid electric vehicles PHEVs and a vehicle-to-grid (V2G) transition. *Energy Policy* 3, 1095-1103.
- Staffell I., Green R., 2009. Estimating future prices for stationary fuel cells with empirically derived experience curves. *International Journal of Hydrogen Energy* 34, 5617-5628.
- Steenberghen, T., Lopez, E. 2008. Overcoming barriers to the implementation of alternative fuels for road transport in Europe. *Journal of cleaner production* 16, 577-590.
- Struben, J. 2006. Identifying Challenges for Sustained Adoption of Alternative Fuel Vehicles and Infrastructure. MIT Sloan Research Paper No. 4625-06, Available at SSRN: <http://ssrn.com/abstract=927012> or <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.927012>.
- Supple, D. R. 2007. Managing the transition towards self-sustaining alternative fuel vehicle markets: Policy analysis using a dynamic behavioral spatial model.
- Szpiro, D., Cette, G., 1994. Returns to scale in the French manufacturing industry. *European Economic Review* 38, 1493-1504.
- Tate, E., Harpster, M. O., Savagian, P. J., 2008. The electrification of the Automobile: From conventional hybrid, to plug-in hybrids, to extended-range electric vehicles. SAE International.
- Tavasszy L.A., 2006. Freight Modelling: an overview of international experiences. TRB Conference on Freight Demand Modelling: Tools for Public Sector Decision Making. Washington DC.
- Tavasszy, L., Davydenko, I., Ruijgrok, K. 2009. The Extended Generalized Cost Concept and its application in Freight Transport and General Equilibrium Modeling. Integration of Spatial Computable General Equilibrium and Transport Modelling; Bilateral Joint Seminar under agreement between NWO and JSPS. Tokyo.
- The Economics for the Environment Consultancy (EFTEC). 2008. Demand for cars and their attributes, Final Report, Economics for the Environment Consultancy, Ltd, London, UK.
- Thiel C., Perujo A., Mercier A., 2010. Cost and CO2 aspects of future vehicle options in Europe under new energy policy scenarios. *Energy Policy* 38, 7142-7151.
- TNO; AEA; CE Delft; Ökopol; TML; Ricardo; IHS Global Insight. 2011. Support for the revision of Regulation (EC) No 443/2009 on CO2 emissions from cars. Delft: Behavioural and societal sciences.
- Train Kenneth, 1985. Discount rates in consumers' energy related decisions: a review of the literature", *Energy* 10, 12, 1243-1253

- Train, Kenneth. Discrete choice methods with simulation. 2003.
- Tseng, P., Lee, J., Friley, P. 2005. A hydrogen economy: opportunities and challenges. *Energy* 30, 2703-2720.
- Tsuchiya, H., Kobayashi O., 2004. Mass production cost of PEM fuel cell by learning curve. *International Journal of Hydrogen Energy* 29, 985-990.
- Turcksin, L., Macharis, C., Lebeau, K., Boureima, F., Mierlo, J. V., Bram, S. Pelmans, L. 2011. A multi-actor multicriteria framework to assess the stakeholder support for different biofuel options: The case of Belgium. *Energy Policy* 1, 200-214.
- Turrentine, T.S., Kurani, K.S., 2007. Car buyers and fuel economy. *Energy Policy* 25, 1213-1223.
- Tzimas, E., Castello, P., Peteves, S. 2007. The evolution of size and cost of a hydrogen delivery infrastructure in Europe in the medium and long term. *International Journal of Hydrogen Energy* 10-11, 1369-1380.
- U.S. Census Bureau. 2011. The 2012 Statistical abstract. Retrieved from <http://www.census.gov/compendia/statab/>
- UNFCCC. 2011. Decision 1/CP.16: The Cancun Agreements: Outcome of the work of the Ad Hoc working group on long-term cooperative action under the convention. Conference of the Parties-Sixteenth Session (p. 3). Bonn, Germany: UNFCCC Secretariat.
- Valletti, T. M., Cave, M. 1998. Competition in UK mobile communications. *Telecommunications policy* 2, 109-131.
- VDE, 2010. Elektrofahrzeuge - Bedeutung, Stand der Technik, Handlungsbedarf. Verband der Elektrotechnik, Elektronik, Informationstechnik e.V.
- Velde, D. M. 1999. Organisational forms and entrepreneurship in public transport: classifying organisational forms. *Transport policy* 3, 147-157.
- Velde, L. V., Verbeke, W., Popp, M., Buysse, J. 2009. Perceived importance of fuel characteristics and its match with consumer beliefs about biofuels in Belgium. *Energy Policy* 37, 3183-3193.
- Weinert, J. X., Shaojun, L., Ogden, J. M., Jianxin, M. 2007. Hydrogen refuelling costs in Shanghai. *International Journal of Hydrogen Energy* 16, 4089-4100.
- Weltevreden, J., 2007. Substitution or complementarity? How the Internet changes city centre shopping. *Journal of retailing and consumer services* 14, 192-207.
- Wessner, C. W. 2005. Driving innovations across the valley of death. *Research-Technology Management* 48, 9 -12.
- White-House, 2011. Blueprint for a secure energy future. The White House, Washington.
- Williams, H.C.W.L., 1977. On the formulation of travel demand models and economic evaluation measures of user benefit. *Environment and Planning A* 9, 285-344.

- Wohlgemuth, N., 1997. World transport energy demand modelling: Methodology and elasticities. *Energy Policy*, Volume 25, Issues 14-15, 1109-1119.
- Yang, C., McCollum, D., McCarthy, R., Leighty, W. 2009. Meeting an 80% reduction in greenhouse gas emissions from transportation by 2050: A case study in California. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 3, 147-156.
- Yelle, L. E., 1979. The learning curve: Historical review and comprehensive survey. *Decision Sciences* 10, 302-328.
- Zahavi, Y., Talvitie, A., 1980. Regularities in travel time and money expenditures. *Transportation research record* 750, 13-19.
- Zellner, A. 1980. Comment on Forrester's "Information sources for modeling the national economy". *Journal of the American Statisticak Association* 75, 567-569.
- Ziegler, A., 2012. Individual characteristics and stated preferences for alternative energy sources and propulsion technologies in vehicles: A discrete choice analysis for Germany. *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 46, 1372-1385.
- Zubaryeva A., Thiel C, Barbone E, Mercier A., 2012. Assessing factors for the identification of potential lead markets for electrified vehicles in Europe: expert opinion elicitation. *Technological Forecasting and Social Change* 79, 1622-1637.

PELOPIDAS SISKOS

School of *Electrical and Computer Engineering*, National Technical University of Athens

9, Iroon Politechniou street, Athens, 15773, Greece, Tel: +30 210 772 3641.

Email: pelopis@mail.ntua.gr, pelsiskos@gmail.com

A. EDUCATION

- *PhD in Energy and Transport Economic model based analysis* 2009-2015

School of Electrical and Computer Engineering,
National Technical University of Athens.

- *Engineering Diploma (Bsc and Msc)* 2003-2008

School of Mechanical Engineering,
National Technical University of Athens.

B. RESEARCH

B1. RESEARCH INTERESTS

- Research in the field of energy and transport economics, microeconomics, operations research and industrial economics.
- Applied large scale energy, economy, transport modelling.
- Applied energy policy, economics, energy planning and impact assessment analysis for a sustainable transport system.

B2. SCIENTIFIC PUBLICATIONS AND PAPERS IN REFEREED CONFERENCE PROCEEDINGS

- **Siskos, P.**, Capros, P., De Vita A. CO₂ and energy efficiency car standards in the EU in the context of a decarbonisation strategy: A model-based policy assessment, , Energy Policy 84, 22-34.
- Capros, P., De Vita A., Fragkos P., Kouvaritakis N., Paroussos L., Fragkiadakis K., Tasios N., **Siskos P.** The impact of hydrocarbon resources and GDP growth assumptions for the evolution of the EU energy system, Energy Strategy Reviews 6, 64-79.
- **Siskos, P.**, De Vita A., Capros, P., The role of carbon standards on passenger cars towards the reduction of GHG emissions in EU: A model-based scenario analysis. Accepted for publication for the International Electric Vehicle Conference 2014 proceedings.
- **Siskos, P.**, Capros, P. Restructuring transport sector towards sustainability: infrastructure and market prospects of alternative fuels in EU transportation, International Journal of Decision Support Systems, Vol.1, No.2, 210 - 227.

- **Siskos P.**, Houridis S., 2011. Rationalising photovoltaic energy investments with multicriteria decision analysis: a Greek case study. *International Journal of Multicriteria Decision Making* 1, 205-229.

B3. ORAL PRESENTATIONS AT REFEREED CONFERENCES

- **Siskos P.**, De Vita A., Capros, P., 2014 "The role of carbon standards on passenger cars towards the reduction of GHG emissions in EU: A model-based scenario analysis", IEEE International Electric vehicle conference 2014, 17-19 December, Florence, Italy.
- **Siskos P.**, Capros P., 2014, "PRIMES-TREMOVE: A Transport Sector Model for Long-Term Energy-Economy-Environment Planning for EU", 20th Conference of the International Federation of Operational Research Societies, 13-18 July, Barcelona, Spain.
- **Siskos P.**, Capros P., 2012, "Modelling of electromobility in EU transportation driven by technology progress and regulation", 23rd Hellenic conference of Greek Association of Operational Research, 12-14 September 2012, Athens, Greece.

B4. THESES

- **Siskos P.**, 2015, "An energy economic model for the transport sector", PhD Dissertation, School of Electrical and Computer Engineering, National Technical University of Athens.
- **Siskos P.**, 2008. "Parametric cycle analysis of turbojet and turbofan with afterburner, with educational software (G.U.I.), Diploma Thesis, School of Mechanical Engineering, National Technical University of Athens.

B5. TEACHING ACTIVITIES

Teaching assistant, Economics of electricity markets. School of Electrical and Computer Engineering of National Technical University of Athens.

Taught a section of approximately 30 post-graduate students, as substitute for the supervisor professor.

May-July
2015

Teaching assistant, Energy Economics. School of Electrical and Computer Engineering of National Technical University of Athens.

Taught a section of approximately 50 undergraduate students, as substitute for the supervisor professor.

March-June
2015,
March-June
2014

C. PROFESSIONAL EXPERIENCE

C1. POSITION

- *Researcher at the Energy Economy Environment Modelling Laboratory (E3MLab)*

2008-today

School of Electrical and Computer Engineering,
National Technical University of Athens.

C2. Participation in scientific projects and studies

- "TRANSCENARIO: Regarding the elaboration of long-term transport policy scenarios and variants with the time horizon 2050", for the European Commission, DG MOVE. 2013-2015
- "Specific Contract regarding the elaboration of a Baseline or Reference case with the time horizon 2050", for the European Commission, DG MOVE. 2012-2013
- "Assessment of the implementation of a European alternative fuel strategy and possible supportive proposals", for the European Commission, DG MOVE. 2011-2012
- "Quantitative analysis of CO2 standards in road transport (M1 and N1 vehicle category) with respect to long term decarbonisation target", for the European Commission, DG CLIMA. 2011-2012
- "Study on Clean Transport Systems", for the European Commission, DG MOVE. 2010-2011
- "Study on long-term quantitative assessment of transport policy scenarios", for the European Commission, DG MOVE. 2010-2011

C3. TECHNICAL REPORTS

- Capros P., De Vita A., Tasios N., Papadopoulos D., Siskos P., Apostolaki E., Zampara M., Paroussos L., Fragiadakis K., Kouvaritakis N., et al., 2013, "EU ENERGY, TRANSPORT AND GHG EMISSIONS - TRENDS TO 2050", European Commission, Directorate-General for Energy, Directorate-General for Climate Action and Directorate-General for Mobility and Transport, Publications Office of the European Union, Luxembourg, ISBN: 978-92-79-33728-4.4.
- E3MLab, Exergia, 2012. "Assessment of the implementation of a European alternative fuel strategy and possible supportive proposals", Final report submitted to DG MOVE of European Commission
- E3MLab, Exergia, ECORYS, LAT, 2011. "Study on clean transport systems study", Final report submitted to DG MOVE of European Commission

C4. OTHER PROFESSIONAL ACTIVITIES

- Member of the Experts and Advisory Board Meeting of the FUTRE project. 2014
- Member of the Technical Chamber of Greece 2008

