

# Κεφάλαιο 5. Εξεργειακή Ανάλυση Ελληνικού Συστήματος Μεταφορών

## 5.1. Εισαγωγή

Όπου υπάρχει υπολογισμός ενεργειακών μεγεθών, υπάρχει παράλληλα μεγάλη σύγχυση στα μεγέθη που πρέπει να μετρηθούν και να εκτιμηθούν. Πολύ συχνά η λύση δίνεται με νέες μονάδες μέτρησης όπως η Wh και οι τόνοι ισοδύναμου πετρελαίου (T.I.P.). Παρόλα αυτά δημιουργούνται προβλήματα που έχουν να κάνουν με τη σύγχυση που προκαλείται από τις διαφορετικές μονάδες που μετρούν το ίδιο μέγεθος. Σε ότι αφορά διεργασίες που αφορούν μετατροπές ενέργειας πολλές φορές προκύπτουν έννοιες απόδοσης λανθασμένες, οι οποίες δεν ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα. Ο βασικός λόγος είναι ότι τέτοιες έννοιες δεν έχουν θεμελιώδη σύνδεση με το φυσικό περιβάλλον. Εντούτοις σε πολλές περιπτώσεις, όπως για παράδειγμα στη θέρμανση ενός χώρου, το περιβάλλον παίζει το καθοριστικό ρόλο.

Η σχέση ανάμεσα στις φυσικές πρώτες ύλες και τις κοινωνικές και οικονομικές δομές συχνά παραμελείται από τους επιστήμονες, τους ερευνητές και τους οικονομολόγους. Από την άλλη μεριά όσοι ασχολήθηκαν με τις φυσικές πρώτες ύλες δεν έδειξαν ενδιαφέρον στη σχέση αυτών με την κοινωνία και την οικονομία γενικά. Υπάρχουν εντούτοις και εξαιρέσεις. Μερικοί έλαβαν υπό όψιν φυσικούς αλλά και κοινωνικό-οικονομικούς παράγοντες. Επιπλέον αναλύσεις που αφορούν οικολογικά θέματα έγιναν ιδιαίτερα διαδεδομένες τα τελευταία χρόνια. Πολλά εξαιρετικά ενδιαφέροντα αποτελέσματα έχουν προκύψει από τις έρευνες αυτές.

Το ενδιαφέρον σε τέτοια θέματα είναι σχετικά πρόσφατο. Για τη σωστή επιλογή ανάμεσα σε διαφορετικές εναλλακτικές λύσεις και για μια αειφόρο ανάπτυξη χρειάζεται όλα αυτά να ληφθούν υπό όψιν. Κι αυτό γιατί οι ίδιες οι λειτουργίες της κοινωνίας είναι άμεσα συσχετισμένες με τις μετατροπές ενέργειας και ύλης στη φύση. Η εξέργεια είναι ένας όρος σχετικά πρόσφατος και είναι πιο συχνός στην τεχνική ορολογία. Αντιπροσωπεύει το διαθέσιμο προς εκμετάλλευση ποσό ενέργειας ενός συστήματος από το περιβάλλον, για παράδειγμα το ποσό του έργου που μπορεί να παράγει ένα μηχανικό σύστημα στο περιβάλλον του. Η έννοια της εξέργειας πηγάζει από την έννοια της εντροπίας.

Ο 1<sup>ος</sup> **Θερμοδυναμικός Νόμος** αναφέρεται στην ποσότητα της ενέργειας και στην αρχή ότι η ενέργεια ούτε δημιουργείται ούτε καταστρέφεται. Υπάρχουν μόνο μετατροπές ενέργειας μιας μορφής σε άλλες μορφές και για τις μετατροπές αυτές ισχύουν πάντα οι εξισώσεις ισοζυγίου του πρώτου Θερμοδυναμικού Νόμου. Παρόλα αυτά ο 1<sup>ος</sup> Θερμοδυναμικός Νόμος δεν παρέχει καμία πληροφορία για την ποιότητα του ενεργειακού περιεχομένου του συστήματος και τη δυνατότητα που αυτό κατέχει για την παραγωγή ωφέλιμου μηχανικού έργου.

Ο 2<sup>ος</sup> **Θερμοδυναμικός Νόμος** αναφέρεται στην ποιότητα της ενέργειας και αφορά την υποβάθμιση της ενέργειας κατά τη διάρκεια μιας διεργασίας. Η υποβάθμιση της ποιότητας είναι ισοδύναμη ουσιαστικά με την αύξηση εντροπίας. Ο 2<sup>ος</sup> Θερμοδυναμικός Νόμος βοηθά στη διασάφηση της έννοιας της αποδοτικής λειτουργίας ενός θερμοδυναμικού συστήματος, μέσω των περιορισμών που αυτός επιβάλλει στη λειτουργία του συστήματος αντιμετωπίζοντας τις διάφορες θερμοδυναμικές διεργασίες με έναν περισσότερο θεμελιώδη τρόπο συγκριτικά με τον 1<sup>ο</sup> Θερμοδυναμικό Νόμο. Η έννοια της **διαθεσιμότητας (availability)** ή **εξέργειας (exergy)**, η οποία αποτελεί θερμοδυναμική ιδιότητα του συστήματος, εξαρτάται από την κατάσταση τόσο του ίδιου του συστήματος όσο και του περιβάλλοντος και εκφράζει το μέγιστο ωφέλιμο μηχανικό έργο που μπορεί να παραχθεί καθώς το σύστημα έρχεται σε ισορροπία με το περιβάλλον του μέσω αντιστρέψιμων διεργασιών. Σε αντίθεση με την ενέργεια, η εξέργεια δε διατηρείται κατά τη διάρκεια μιας διεργασίας, αλλά καταστρέφεται λόγω μη-αντιστρεψιμοτήτων, δηλαδή μη-αντιστρέψιμης παραγωγής εντροπίας. *Η εξέργεια είναι το τμήμα της ενέργειας που είναι μετατρέψιμο σε όλες τις άλλες μορφές ενέργειας* [Wall, 2001].

Σημειώνεται πως ο όρος **διαθεσιμότητα (availability)** χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά στις ΗΠΑ από το Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών του M.I.T. κατά τη δεκαετία του 1940. Ο ισοδύναμος όρος της **εξέργειας (exergy)** εισήχθη στην Ευρώπη τη δεκαετία του 1950. Η **εξεργειακή ανάλυση** βασίζεται:

- στην έννοια της εξέργειας η οποία αποδίδει το μέγιστο ωφέλιμο έργο που μπορεί να παραχθεί από ένα σύστημα το οποίο βρίσκεται σε μια συγκεκριμένη κατάσταση με το περιβάλλον,
- στην έννοια του αντιστρεπτού έργου, που είναι το μέγιστο ωφέλιμο έργο το οποίο μπορεί να ληφθεί από ένα σύστημα που υφίσταται μια διεργασία μεταξύ δύο καθορισμένων καταστάσεων,
- στην έννοια της «αναντιστρεπτότητας» (περιγράφεται και ως απώλεια έργου), η οποία παριστάνει το χαμένο δυναμικό έργο κατά τη διάρκεια μιας διεργασίας εξαιτίας της εμφάνισης «αναντιστρεπτοτήτων» (απωλειών) [Tober, 1997;Reistad et al, 1975;Terkovics et al,1988].

Η ποιότητα της ενέργειας εκφράζεται και ως η ποσότητα της αρνητικής εντροπίας ανά μονάδα ενέργειας ενός εξεταζόμενου συστήματος. Οι πιο καθαρές μορφές ενέργειας είναι η μηχανική και η ηλεκτρική για τις οποίες η αρνητική εντροπία είναι 0. Αντίθετα η ενέργεια με τη μορφή θερμότητας έχει τη χαμηλότερη ποιότητα. Η ποιότητα χειροτερεύει με τη θερμοκρασία (εφόσον αυτή είναι υψηλότερη από αυτήν του περιβάλλοντος). Ο Πίνακας 5.1 παρουσιάζει την κατάταξη διαφορετικών μορφών ενέργειας ανάλογα με την ποιότητα τους από την πιο υψηλή στην πιο χαμηλή.

Ποιότητα	Μορφή ενέργειας	Δείκτης ποιότητας
Άριστη	Δυναμική ενέργεια	100
	Κινητική ενέργεια	100
	Ηλεκτρική ενέργεια	100
Εξαιρετική	Πυρηνική ενέργεια	σχεδόν 100
	Ηλιακή ενέργεια	95
	Χημική ενέργεια	95
	Θερμός ατμός	60
	Τηλεθέρμανση	30
Κατώτερη	Απώλειες θερμότητας	5
Άχρηστη	Θερμότητα ως ακτινοβολία Γη	0

Πίνακας 5.1. Κατάταξη διαφορετικών μορφών ενέργειας ανάλογα με την ποιότητα τους.

## 5.2. Γενικές Έννοιες Εξέργειας

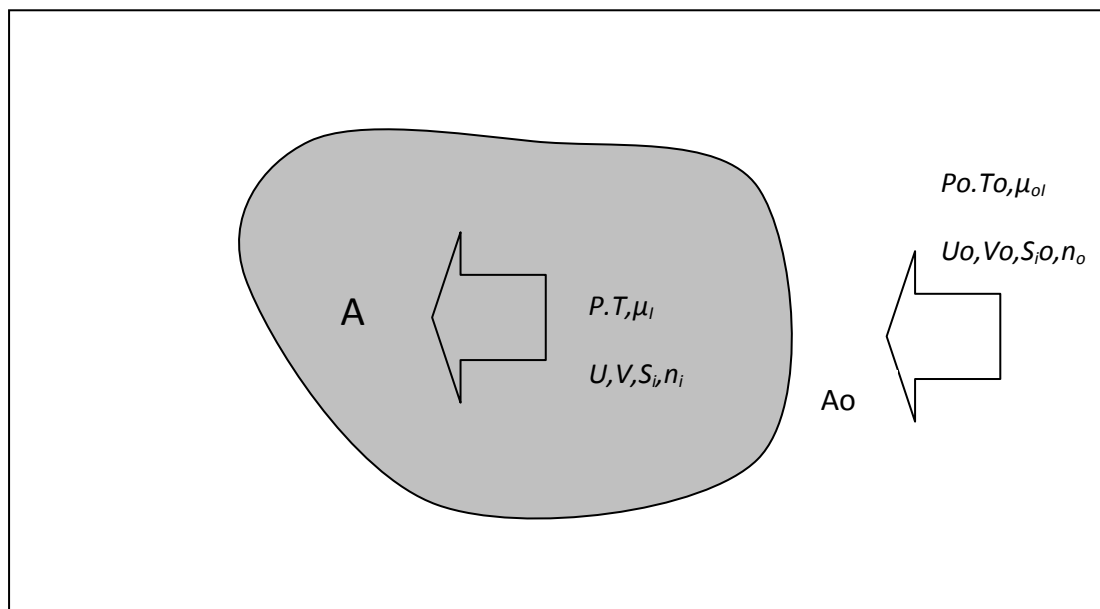
Η **ολική εξέργεια** ενός συστήματος που βρίσκεται σε μία συγκεκριμένη θερμοδυναμική κατάσταση ορίζεται ως το μέγιστο ωφέλιμο μηχανικό έργο που μπορεί να παραχθεί καθώς το σύστημα έρχεται σε θερμική, μηχανική και χημική ισορροπία με το περιβάλλον του μέσω αντιστρέψιμων διεργασιών. Αποτελεί εκτατική θερμοδυναμική ιδιότητα του συστήματος που εξαρτάται τόσο από την κατάσταση του ίδιο του συστήματος όσο και από τις ιδιότητες του περιβάλλοντος. Όταν το σύστημα έρθει σε ισορροπία με το περιβάλλον του, δεν μπορεί να παραχθεί παραπάνω έργο. Για το λόγο αυτό, η κατάσταση του περιβάλλοντος αναφέρεται ως **νεκρή κατάσταση (dead state)**, οριζόμενη από την αντίστοιχη θερμοκρασία  $T_0$ , πίεση  $p_0$  και σύσταση.

Ένα πρότυπο περιβάλλον αναφοράς, το οποίο υιοθετείται σε εξεργειακές αναλύσεις [Moran, 1982] παρουσιάζεται στον Πίνακα 5.2.

$T_o = 298,15 \text{ K}$	$p_o = 1.01325 \text{ bar}$
Συστατικό	Μοριακό κλάσμα
$N_2$	0.7567
$O_2$	0.2035
$H_2O$	0.0303
$CO_2$	0.0003
Άλλο (π.χ. Ar)	0.0092

**Πίνακας 5.2. Ορισμός πρότυπου περιβάλλοντος αναφοράς χρησιμοποιούμενου σε εξεργειακές αναλύσεις**

Οι εξισώσεις μέσω των οποίων ορίζονται οι διάφοροι όροι εξέργειας ενός θερμοδυναμικού συστήματος παρουσιάζονται στη παρούσα παράγραφο. Έστω το **Διάγραμμα 5.2** στο οποίο παρουσιάζεται το σύστημα A και το περιβάλλον A<sub>o</sub>, το οποίο θεωρείται ομογενές και πολύ μεγαλύτερο από το A. Το περιβάλλον A<sub>o</sub> χαρακτηρίζεται από τα εντατικά μεγέθη T<sub>o</sub>, p<sub>o</sub> και μ<sub>o</sub>, (θερμοκρασία, πίεση και χημικό δυναμικό). Οι αντίστοιχες παράμετροι για το A είναι οι T, ρ και μ. Αρχικά, το A είναι επίσης ομογενές. Τα υπόλοιπα μεγέθη για το A είναι τα U, V, S, και η<sub>i</sub> (εσωτερική ενέργεια, όγκος, εντροπία και αριθμός των moles των διαφόρων χημικών στοιχείων) και τα αντίστοιχα για το A<sub>o</sub>, είναι U<sub>o</sub>, V<sub>o</sub>, S<sub>o</sub>, και η<sub>io</sub> και υποτίθεται να είναι επίσης κατά πολύ μεγαλύτερα από του A.



**Διάγραμμα 5.2, Σύστημα και περιβάλλον [ Κορωναίος, 2004]**

$$\text{Ισχύει δηλαδή} \left\{ \begin{array}{l} U \ll U_o \\ V \ll V_o \\ \eta_i \ll \eta_{io} \end{array} \right. \quad (5.2.1)$$

Το συνδυασμένο σύστημα που αποτελείται από το Α και το Α<sub>ο</sub> θεωρείται μονωμένο. Έτσι λαμβάνεται μόνο έργο W από το Α και ισχύει:

$$\begin{aligned}dU+dU_o+dW&=0 \\dV+dV_o&=0 \\dn_i+dn_{i_o}&=0\end{aligned}\quad (5.2.2)$$

Η αλληλεπίδραση μεταξύ του Α και του Α<sub>ο</sub> λαμβάνει χώρα με έναν ελεγχόμενο τρόπο μέσα στο Α. Αφού το Α είναι μικρό, δεν αλλάζουν τα εντατικά μεγέθη του Α<sub>ο</sub>, το οποίο σημαίνει:  $dT_o=0, dp_o=0, d\mu_{i_o}=0$ . Το διαφορικό της εντροπίας του περιβάλλοντος Α<sub>ο</sub> είναι:

$$dS_o = \frac{dU_o + p_o \cdot dV_o - \sum_i \mu_{i_o} \cdot dn_{i_o}}{T_o} = \frac{dU + p_o \cdot dV - \sum_i \mu_{i_o} \cdot dn_i}{T_o} - \frac{dW}{T_o} \quad (5.2.3)$$

Το συνολικό διαφορικό της εντροπίας και για το σύστημα και για το περιβάλλον είναι:

$$dS_{o\lambda} = dS + dS_o = -\frac{1}{T_o} \cdot \left( dU + p_o \cdot dV - T_o \cdot dS - \sum_i \mu_{i_o} \cdot dn_i \right) - \frac{dW}{T_o} \quad (5.2.4)$$

Η τελευταία σχέση διαμορφώνεται ως εξής:

$$dS_{o\lambda} = -\frac{1}{T_o} \cdot (dE + dW) \quad (5.2.5)$$

όπου εισάγεται η εξέργεια E και ισχύει:

$$E = U + p_o \cdot V - T_o \cdot S - \sum_i \mu_{i_o} \cdot n_i \quad (5.2.6)$$

Χρησιμοποιώντας τη σχέση :

$$U = T \cdot S - p \cdot V + \sum_i \mu_i \cdot n_i \quad (5.2.7)$$

στην (5.2.6) τότε προκύπτει:

$$E = S \cdot (T - T_o) - V \cdot (p - p_o) + \sum_i n_i \cdot (\mu_i - \mu_{i_o}) \quad (5.2.8)$$

η οποία δείχνει ότι η εξέργεια μηδενίζεται στην κατάσταση ισορροπίας ( $T = T_o, p = p_o, i = i_o$ ). Αν υποθεθεί ότι το Α μεταβάλλεται προς την ισορροπία με το Α<sub>ο</sub> χωρίς να παράγει έργο ( $dW = 0$ ), τότε η εξέργεια μεταβάλλεται από E προς 0 και η συνολική εντροπία αλλάζει από  $S^{o\lambda}$  προς  $S^{o\lambda}_{is}$  (το ολ. για ολικό και το ισ. για την ισορροπία). Χρησιμοποιώντας την βασική σχέση έκφρασης της εντροπίας, προκύπτει:

$$S_{i\sigma}^{o\lambda} - S^{o\lambda} = -\frac{(-E)}{T_o} \quad (5.2.9)$$

και έτσι:

$$E = T_o \cdot (S_{i\sigma}^{o\lambda} - S^{o\lambda}) \quad (5.2.10)$$

Αν οριστεί η αρνητική εντροπία  $\Sigma$  ως η διαφορά:

$$\Sigma = S_{i\sigma}^{o\lambda} - S^{o\lambda} \quad (5.2.11)$$

τότε προκύπτει ότι

$$E = T_o \cdot \Sigma \geq 0 \quad (5.2.12)$$

Η εξέργεια του Α επομένως είναι Το πολλαπλασιασμένη με την αρνητική εντροπία του Α και του περιβάλλοντος του Αο. Παρατηρεί κανείς ότι στον ορισμό της εξέργειας Ε (5.2.6) μόνο τα εντατικά μεγέθη του Α εμφανίζονται. Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας στην οποία επιτυγχάνεται ισορροπία, η εξέργεια μεταβάλλεται κατά -Ε. Αν η αύξηση της ολικής εντροπίας είναι  $\Delta S^{o\lambda}$ , τότε το έργο που λαμβάνεται είναι W. Η ολοκληρωμένη έκφραση της (5.2.5) είναι:

$$\Delta S^{o\lambda} = \frac{1}{T_o} \cdot (E + W) \quad (5.2.13)$$

ή ομοίως:

$$W = E - T_o \cdot \Delta S^{o\lambda} \quad (5.2.14)$$

Καθώς:

$$\Delta S^{o\lambda} \geq 0 \quad (5.2.15)$$

και με την ισότητα να ισχύει μόνο για αντιστρεπτή διαδικασία, λαμβάνεται:

$$W \leq E \quad (5.2.16)$$

δηλαδή, η εξέργεια Ε είναι το μέγιστο ποσό έργου που μπορεί να αποληφθεί από το Α στη διαδικασία κατά την οποία θα πραγματοποιηθεί η ισορροπία με το περιβάλλον Αο.

### 5.3. Εξεργειακό Περιεχόμενο Υλικών

Εστω ότι η πίεση ρ και η θερμοκρασία Τ είναι σταθερές και ίσες με  $p = p_o$  και  $T = T_o$ . Σύμφωνα με την εξίσωση (4.2.8) προκύπτει:

$$E = \sum_i n_i \cdot (\mu_i - \mu_{i_o}) \quad (5.3.1)$$

Το χημικό δυναμικό  $\mu_i$  για το  $i$  στοιχείο γράφεται ως εξής:

$$\mu_i = \mu_i^o + R \cdot T_o \cdot \ln c_i \quad (5.3.2)$$

όπου  $c_i$  είναι η συγκέντρωση του στοιχείου  $i$  και  $\mu_i^o$  το δυναμικό στην κατάσταση αναφοράς.

Επιπλέον:

$$\mu_{i_o} = \mu_{i_o}^o + R \cdot T_o \cdot \ln c_{i_o} \quad (5.3.3)$$

Από τις δύο τελευταίες σχέσεις, η (4.3.1) γράφεται ως εξής:

$$E = \sum_I n_i \cdot (\mu_i^o - \mu_{i_o}^o) + R \cdot T_o \cdot \sum_i n_i \cdot \ln \left( \frac{c}{c_o} \right) \quad (5.3.4)$$

Η εξέργεια ενός υλικού μπορεί να υπολογιστεί με αυτόν τον τρόπο από το χημικό του δυναμικό και τη συγκέντρωσή του, στην κατάσταση αναφοράς. Αν έχουμε ένα στοιχείο, η (5.3.4) διαμορφώνεται ως εξής:

$$E = n \cdot (\mu^o - \mu_o^o) + R \cdot T \cdot \ln \left( \frac{c}{c_o} \right) \quad (5.3.5)$$

## 5.4. Εξεργειακή Ανάλυση

Στην ενεργειακή ανάλυση, η οποία βασίζεται στον **1<sup>ο</sup> Θερμοδυναμικό Νόμο**, όλες οι μορφές ενέργειας θεωρούνται πως είναι ισοδύναμες. Η απώλεια της ποιότητας της ενέργειας δεν λαμβάνεται υπόψη. Για παράδειγμα, η αλλαγή της ποιότητας της θερμικής ενέργειας καθώς μεταφέρεται από μια υψηλότερη σε μια χαμηλότερη θερμοκρασία δεν μπορεί να εξηγηθεί στην ενεργειακή ανάλυση. Παρουσιάζει την ροή ενέργειας, συνεχόμενη. Στην εξεργειακή ανάλυση, η οποία βασίζεται στον **2<sup>ο</sup> Θερμοδυναμικό Νόμο**, παρουσιάζεται η θερμοδυναμική ατέλεια μιας διαδικασίας, λαμβάνοντας υπόψη όλες τις ποιοτικές απώλειες των υλικών και της ενέργειας.

Η βασική εξεργειακή εξίσωση για ένα kg ουσίας σε ανοιχτά συστήματα, αγνοώντας όρους κινητικής και δυναμικής εξέργειας δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$E_x = (H - H_o) - T_o \cdot (S - S_o) \quad (5.4.1)$$

Στις εξεργειακές αναλύσεις είναι σύνηθες η ολική εξέργεια ενός συστήματος να διαχωρίζεται σε χημική, φυσική και εξέργεια ανάμιξης. Στον υπολογισμό της εξεργειακής ροής, οι όροι της εξέργειας πολλαπλασιάζονται με την ροή

$$\dot{E}_{x_{tot}} = F \cdot [E_{x_{chem}} + E_{x_{phys}} + \Delta_{mix} E_x] \quad (5.4.2)$$

Ο υπολογισμός της χημικής, φυσικής και της εξέργειας ανάμιξης παρουσιάζεται παρακάτω.

## I. Χημική Εξέργεια

Η χημική εξέργεια  $E_{x_{\text{chem}}}$  σε πίεση  $P_0$  μπορεί να υπολογιστεί φέρνοντας το καθαρό συστατικό σε χημική ισορροπία με το περιβάλλον. Για καθαρά συστατικά αναφοράς, που υπάρχουν επίσης στο περιβάλλον, η χημική εξέργεια αποτελείται από την εξέργεια που μπορεί να αποκτηθεί με διάχυση των συστατικών στην συγκέντρωση αναφοράς  $P_{\text{ref}}$ . Σύμφωνα με τον νόμο των ιδανικών αερίων ισχύει:

$$E_{x_{\text{chemref-i}}}^0 = R \cdot T_0 \cdot \left( \ln \frac{P_0}{P_{\text{ref-i}}} \right) \quad (5.4.3)$$

Η εξέργεια αντίδρασης στις συνθήκες αναφοράς ισούται με την σταθερή ενέργεια αλλαγής του Gibbs  $\Delta_r G^0 = \Delta_r H^0 - T_0 \cdot \Delta_r S^0$ :

$$E_{x_{\text{chemref-i}}}^0 = \sum_{j=1}^n \nu_j \cdot E_{x_{\text{chemref-j}}}^0 - \Delta_r G_i^0 \quad (5.4.4)$$

Έτσι ο συνολικός όρος της χημικής εξέργειας διαμορφώνεται:

$$E_{x_{\text{chemref-i}}}^0 = \sum_{j=1}^n \nu_j \cdot E_{x_{\text{chemref-j}}}^0 - \Delta_r G_i^0 \quad (5.4.5)$$

## II. Φυσική Εξέργεια

Ο υπολογισμός της φυσικής εξέργειας συμπληρώνεται από την εξέργεια ανάμιξης. Έτσι οι υπολογισμοί της τροχιάς από  $P, T$  σε  $P_0, T_0$  υπολογίζουν μόνο τις ενθαλπίες και εντροπίες των καθαρών συστατικών της ροής υλικού. Για ένα kg ουσίας, η εξίσωση για το εξεργειακό περιεχόμενο δίνει:

$$E_{x_{\text{phys}}} = \Delta_{\text{actual-o}} \left( L \cdot \left[ \sum_{i=1}^n x_i \cdot H_i^L - T_0 \cdot \sum_{i=1}^n x_i \cdot S_i^L \right] + V \cdot \left[ \sum_{i=1}^n x_i \cdot H_i^V - T_0 \cdot \sum_{i=1}^n x_i \cdot S_i^V \right] \right) \quad (5.4.6)$$

## III. Εξέργεια Ανάμιξης

Η εξέργεια ανάμιξης αντιπροσωπεύει την εξέργεια που χάνεται όταν καθαρές ουσίες αναμιγνύονται. Έτσι η εξέργεια ανάμιξης, η οποία συχνά ενσωματώνεται στην χημική εξέργεια, έχει πάντα αρνητική τιμή. Η εξέργεια ανάμιξης μπορεί να υπολογιστεί με την χρησιμοποίηση αλγορίθμων για την ενθαλπία και την εντροπία της ανάμιξης, που είναι ευρέως διαθέσιμα σε χαρτιά εξομίωσης ροής.

$$E_{x_{\text{mix}}} = \Delta_{\text{mix}} H - T_0 \cdot \Delta_{\text{mix}} S \quad (5.4.7)$$



Για ιδανικά αέρια (με την ενθαλπία ανάμιξης ίση με μηδέν) για παράδειγμα, η εξεργεια ανάμιξης υπολογίζεται σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση:

$$E_{x_{\text{mix}}} = -R \cdot T_o \cdot \sum_{i=1}^n x_i \cdot \ln x_i \quad (5.4.8)$$

## 5.5. Εξεργειακός Βαθμός Απόδοσης

Για την ποιοτική αποτίμηση του βαθμού της θερμοδυναμικής αντιστρεψιμότητας των διεργασιών από τη σκοπιά του 2<sup>ου</sup> Θερμοδυναμικού Νόμου, γίνεται η εισαγωγή του **εξεργειακού βαθμού απόδοσης (exergy efficiency)**. Σε αντίθεση με το συμβατικό βαθμό **ενεργειακής απόδοσης (energy efficiency)**, ο οποίος στηρίζεται σε έννοιες του 1<sup>ου</sup> Θερμοδυναμικού Νόμου και αναγνωρίζει απώλειες ενέργειας και όχι καταστροφές, αφού η ενέργεια διατηρείται, ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης αντιμετωπίζει τους διάφορους όρους ως προς τη δυνατότητα τους για παραγωγή ωφέλιμου μηχανικού έργου, λαμβάνοντας υπόψη του τόσο απώλειες όσο και καταστροφές (μη-αντιστρεψιμότητες) εξέργειας.

**Ενεργειακός βαθμός απόδοσης (η)**, ορίζεται η ενέργεια στο επιθυμητό τελικό αποτέλεσμα διαιρεμένη με την εισροή ενέργειας. Αντίστοιχα ως **εξεργειακός βαθμός απόδοσης (ψ)** ορίζεται η εξεργεια στο επιθυμητό τελικό αποτέλεσμα διαιρεμένη με την εισροή εξέργειας.

Όταν λαμβάνει χώρα μια μετατροπή με έναν μη μηδενικό ρυθμό  $v$  (εξέργεια / μονάδα χρόνου), αυτή πρέπει να συμβαίνει από μια μη μηδενική βαθμίδα  $g$ . Σε τέτοιες εφαρμογές, η παρακάτω γραμμική σχέση περιγράφει την μετατροπή:

$$v = \lambda \cdot g \quad (5.5.2)$$

όπου το  $\lambda$  είναι σταθερό και ανεξάρτητο του  $g$ .

Η παραγωγή εντροπίας ανά μονάδα χρόνου σε μια τέτοια διεργασία είναι:

$$\left( \frac{dS}{dt} \right)_{\min} (v) = \chi_o \cdot v^2 \quad (5.5.3)$$

Η ελάχιστη καταστροφή εξέργειας ανά μονάδα χρόνου είναι:

$$T_o \left( \frac{dS}{dt} \right)_{\min} (v) \quad (5.5.4)$$

με  $T_o$  την περιβαλλοντική θερμοκρασία. Έτσι, το μέγιστο ποσό που μπορεί να αποληφθεί από τα επιθυμητά προϊόντα (εξέργεια / μονάδα χρόνου) είναι:

$$v - T_o \cdot \chi_o \cdot v^2 \quad (5.5.5)$$

Ο μέγιστος εξεργειακός βαθμός απόδοσης μιας μετατροπής που συμβαίνει με ρυθμό  $\nu$  είναι:

$$n_{\max}(\nu) = 1 - \left( \frac{\nu}{\nu_o} \right) \quad (5.5.6)$$

όπου  $\nu_o = \frac{1}{T_o \cdot \chi_o}$ , είναι η χαρακτηριστική ισχύς που συνδέεται με τη διαδικασία μετατροπής.

## 5.6. Μελέτη Περίπτωσης- Ελληνικό Σύστημα Μεταφορών

Όπως παρουσιάστηκε στα προηγούμενα κεφάλαια η έννοια της εξέργειας ενσωματώνει τις αρχές του 1<sup>ου</sup> και 2<sup>ου</sup> Θερμοδυναμικού Νόμου. Κατά αυτόν τον τρόπο, αποτελεί ένα χρήσιμο εργαλείο για μακροχρόνιο ενεργειακό σχεδιασμό και χάραξη ενεργειακής πολιτικής [Schaeffer, 1990]. Κατά τη διάρκεια των περασμένων δεκαετιών η χρήση της έννοιας της εξέργειας έχει σημειώσει σημαντική αύξηση. Η εξεργειακή ανάλυση αποτελεί ένα χρήσιμο εργαλείο στην αξιολόγηση της απόδοσης του ενεργειακού συστήματος μιας χώρας. Κατά τη διάρκεια της τελευταίας δεκαετίας στη διεθνή βιβλιογραφία υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός δημοσιεύσεων που αφορούν την εφαρμογή της εξεργειακής ανάλυσης στο ενεργειακό σύστημα μιας χώρας. Περιλαμβάνει μεταξύ άλλων την εφαρμογή της εξεργειακής ανάλυσης στις χώρες των Η.Π.Α [Reistad, 1975], Καναδά [Lemieux and Rosen 1989; Rosen, 1992; Terkovics, 1988], Ιαπωνίας, Φιλανδίας και Σουηδίας [Wall, 1990, 1991], Ιταλίας [Wall et al., 1994], Τουρκίας [Ozdogan and Arikol, 1995; Rosen and Dincer, 1997], Βραζιλίας [Schaeffer et al., 1992], Ηνωμένου Βασιλείου [Hammond and Stapleton, 2001]. Επιπρόσθετα, η εξεργειακή ανάλυση έχει εφαρμοσθεί στον βιομηχανικό, μεταφορικό, δημόσιο και ιδιωτικό, utility και οικιακό τομέα της Σαουδικής Αραβίας [Dincer et al., 2003, 2004a,b,c] καθώς και στον τομέα των μεταφορών της Κίνας [Ji and Chen, 2006].

Το Σύστημα Μεταφορών της Ελλάδας αποτελείται από τα υποσυστήματα των οδικών (highways), αεροπορικών (civil aviation), σιδηροδρομικών (railways) και θαλάσσιων (waterways) μεταφορών. Η ενεργειακή κατανάλωση στο Σύστημα Μεταφορών της Ελλάδας, κατά τη διάρκεια της τελευταίας δεκαετίας, αυξήθηκε κατά 27%, με ετήσιο ρυθμό ανάπτυξης 2.2%. Το 2001, οι οδικές μεταφορές ήταν υπεύθυνες για το 81% της ενεργειακής κατανάλωσης στον τομέα των μεταφορών, σε σχέση με το 77% που σημειώθηκε το 1991. Η ενεργειακή κατανάλωση στις αεροπορικές μεταφορές μειώθηκε από 22% το 1991 σε 18% το 2001. Τα ποσοστά για τις σιδηροδρομικές μεταφορές παρέμειναν σταθερά (περίπου στο 1%) κατά τη διάρκεια της περιόδου 1991- 2001.

Η υιοθέτηση μιας βιώσιμης πολιτικής στον τομέα των μεταφορών παίζει σημαντικό ρόλο

για το Ελληνικό Σύστημα Μεταφορών. Η Ευρωπαϊκή Ένωση των (τότε) 15, επικύρωσε το Πρωτόκολλο του Κιότο το 2002 και δεσμεύθηκε για συνολική μείωση των αερίων του θερμοκηπίου κατά 8% μέχρι το τέλος της πενταετίας 2008-2012. Ωστόσο, στις 17 Δεκεμβρίου του 2008, το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο ενέκρινε μια πιο αυστηρή δέσμη μέτρων που πρότεινε η Επιτροπή. Η νέα δέσμη μέτρων για τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας και την αλλαγή του κλίματος, θέτει σοβαρούς στόχους για το 2020. Η Οδηγία 20-20-20 αποτελεί την πιο καινοτόμο και ελπιδοφόρο πρόταση-οδηγία για την προστασία του περιβάλλοντος και έχει υιοθετηθεί από τα κράτη-μέλη της Ε.Ε. [Europedia,2011] λίγο πριν τη διάσκεψη της Κοπεγχάγης, δείχνοντας το δρόμο προς τις υπόλοιπες ανεπτυγμένες χώρες του πλανήτη. Μέσα σε αυτό το πλαίσιο, γίνεται αντιληπτή η αναγκαιότητα προώθησης προγραμμάτων βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης στο τομέα των μεταφορών.

Η μελέτη περίπτωσης στοχεύει στην εφαρμογή της εξεργειακής ανάλυσης στο Ελληνικό Σύστημα Μεταφορών για την περίοδο 1980-2003, προκειμένου να διερευνηθεί το καθεστώς χρήσης της ενέργειας καθώς και η ενεργειακή δομή του. Η εξεργειακή και ενεργειακή ανάλυση του Ελληνικού Συστήματος Μεταφορών, βασίζεται σε πραγματικά στοιχεία, τα οποία ελήφθησαν από τη βάση δεδομένων του Υπουργείου Περιβάλλοντος, Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής [[www.ypeka.gr](http://www.ypeka.gr)]. Η ενεργειακή απόδοση (εκφρασμένη ως Κατώτερη Θερμογόνος Δύναμη) και οι εξεργειακοί συντελεστές για επιλεγμένα καύσιμα παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.6.

Καύσιμα	Κατ.Θερμ.Δύναμη (kJ/kg)	Εξεργειακοί συντελεστές
Πετρέλαιο	41,816	1.08
Βενζίνη	43,070	1.06
Diesel	42,652	1.07
Κηροζίνη	43,070	1.07
Μαζούτ	41,816	1.06
LPG	50,179	1.06
Άλλα πετρελαϊκά προϊόντα	42,000	1.06
Άνθρακας	26,344	1.08

Πίνακας 5.6. Δεδομένα χρήσιμα για την εξεργειακή ανάλυση [Kotas, 1985]

## 5.7. Ενεργειακή και Εξεργειακή Ανάλυση

Προκειμένου να εκτιμηθούν οι εξεργειακές ροές ενός οχήματος, η σταθερή ατμόσφαιρα λαμβάνεται ως περιβάλλον αναφοράς [Gaggioli and Petit, 1977]. Η φυσική εξέργεια των καυσίμων που χρησιμοποιούνται στα οχήματα, είναι αμελητέα, συγκριτικά με την χημική εξέργεια, η οποία υπολογίζεται σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση [Kotas, 1985]:

$$\varepsilon = \gamma * LHV \quad (5.7.1)$$

όπου  $\varepsilon$  είναι η ειδική εξέργεια και  $\gamma$  ο εξεργειακός συντελεστής (**exergy factor**). Ο

ενεργειακός βαθμός απόδοσης ( $n$ ) και ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης ( $\psi$ ) για το Ελληνικό σύστημα μεταφορών, υπολογίζονται σύμφωνα με τον ορισμούς της παραγράφου 4.5. Ισχύει ότι:

$$\psi = \frac{n}{\gamma} \quad (5.7.2)$$

Ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης ισοδυναμεί με τον ενεργειακό βαθμό απόδοσης διαιρεμένο με τον εξεργειακό συντελεστή. Σημειώνεται ότι η τιμή της εξέργειας για την ηλεκτρική ενέργεια, η οποία χρησιμοποιείται στον ηλεκτρικό σιδηρόδρομο (σιδηροδρομικές μεταφορές) είναι ίση με την τιμή της ενέργειας. Για αυτόν τον λόγο, ο συντελεστής εξεργειακής απόδοσης είναι ίδιος με τον συντελεστή ενεργειακής απόδοσης. Ο σταθμισμένος μέσος του ολικού εξεργειακού βαθμού απόδοσης υπολογίζεται σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$\Psi_{\text{overall}} = \sum_{i,k} (n_i / \gamma_k) \times Fr_{ik} \quad (5.7.3)$$

όπου  $\Psi_{\text{overall}}$  εκφράζει το σταθμισμένο μέσο του ολικού εξεργειακού βαθμού απόδοσης,  $n_i$  εκφράζει τον ενεργειακό βαθμό απόδοσης του  $i$ -οστού συστήματος μεταφοράς,  $\gamma_k$  είναι ο εξεργειακός συντελεστής της  $k$ -ιστής ενεργειακής εισροής. Τέλος ο όρος  $Fr_{ik}$  εκφράζει το ποσοστό εξέργειας της  $k$  ενεργειακής εισροής, η οποία χρησιμοποιήθηκε από το  $i$ -οστό σύστημα μεταφοράς.

Ο Πίνακας 5.7 παρουσιάζει τις διαφορετικές τιμές μεταξύ του ενεργειακού και εξεργειακού βαθμού απόδοσης για ορισμένες διεργασίες. Από τον Πίνακα 5.7 είναι εμφανές πως ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης είναι μικρότερος από τον ενεργειακό βαθμό απόδοσης. Το παραπάνω οφείλεται στην καταστροφή της εισερχόμενης εξέργειας, η οποία οφείλεται στις αντιστρεψιμότητες. Για αυτό τον λόγο, πολύ συχνά, ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης δίνει μια καλύτερη εικόνα της ποιότητας της ενέργειας που χρησιμοποιείται στο Ελληνικό Σύστημα Μεταφορών συγκριτικά με τον ενεργειακό βαθμό απόδοσης. Με τη βοήθεια του εξεργειακού βαθμού απόδοσης είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί για εκτίμηση της αποτελεσματικότητας ή αλλιώς της ποιότητας με την οποία τα εισερχόμενα ενεργειακά ρεύματα στο Ελληνικό Σύστημα Μεταφορών μεταστοιχειώνονται σε προϊόντα της καύσης, παρέχοντας με αυτόν τον τρόπο ένα θερμοδυναμικό υπόβαθρο για τη σύγκριση της επίδρασης διαφόρων λειτουργικών και σχεδιαστικών παραμέτρων του Ελληνικού Συστήματος Μεταφορών στις διεργασίες που λαμβάνουν χώρα σε όλα τα υποσυστήματα του Συστήματος Μεταφορών.

Διεργασία	Ενεργειακή απόδοση (%)	Εξεργειακή απόδοση (%)
Διύλιση πετρελαίου	~ 90	10
Οικιακή θέρμανση (καύσιμο)	60	9
Χρήση θερμοσίφωνα (καύσιμο)	40	2-3
Αεριοποίηση άνθρακα (υψηλή θερ.)	55	46
Ατμολέβητας	~100	40
Υψικάμιнос	76	46
Ατμολέβητας υψηλής πίεσης	90	50

**Πίνακας 5.7.** Ενεργειακός και εξεργειακός βαθμός απόδοσης για ορισμένες διεργασίες [Gaggioli, 1980; Kenney, 1984; Rosen and Dincer, 1997]

## 5.8. Εφαρμογή Εξεργειακής Ανάλυσης

Η εφαρμογή της μεθοδολογίας, όπως αυτή αναλύθηκε στα προηγούμενα κεφάλαια, στο Σύστημα Μεταφορών της Ελλάδας, παρουσιάζεται σε αυτή τη παράγραφο. Το Σύστημα Μεταφορών της Ελλάδας αποτελείται από τα ακόλουθα υποσυστήματα: οδικές (highways), αεροπορικές (civil aviation), σιδηροδρομικές (railways) και θαλάσσιες (waterways) μεταφορές.

Οι ενεργειακοί και εξεργειακοί βαθμοί απόδοσης για κάθε υποσύστημα μεταφοράς (οδικές- highways, αεροπορικές- civil aviation, σιδηροδρομικές- railways και θαλάσσιες- waterways) υπολογίζονται πολλαπλασιάζοντας την ενέργεια που χρησιμοποιείται στη τελική χρήση κάθε υποσυστήματος μεταφοράς με την αντίστοιχη απόδοση. Ο συνολικός βαθμός εξεργειακής απόδοσης του Ελληνικού Συστήματος Μεταφοράς προκύπτει αθροίζοντας αυτές τις αξίες. Επιπρόσθετα, για κάθε ενεργειακό και εξεργειακό βαθμό απόδοσης, υπολογίζεται ο σταθμισμένος μέσος. Σημειώνεται, πως οι συντελεστές βαρύτητας είναι οι συνολικές ενεργειακές και εξεργειακές εισροές, οι οποίες τροφοδοτούν όλα τα υποσυστήματα του Ελληνικού Συστήματος Μεταφορών.

Ο Πίνακας 5.8.α παρουσιάζει τους ενεργειακούς και εξεργειακούς βαθμούς απόδοσης για τα 4 υποσυστήματα του Ελληνικού Συστήματος Μεταφορών, όπως υπολογίστηκαν για το 2000. Τα δεδομένα που αφορούν τον υπολογισμό του ενεργειακού βαθμού απόδοσης για τα 4 υποσυστήματα του Ελληνικού Συστήματος Μεταφορών, βασίζονται στον Reistad (1975). Τα στοιχεία αυτά αφορούν συσκευές που λειτουργούν στις Η.Π.Α και θεωρούμε ότι είναι αντιπροσωπευτικά και των συσκευών που χρησιμοποιούνται στην Ελλάδα. Δεδομένου ότι τα οχήματα δεν λειτουργούν με πλήρες φορτίο, οι αποδόσεις για τα μερικά φορτία των συσκευών υπολογίζονται ως 22%, 28%, 15% και 28% για τις οδικές, σιδηροδρομικές, θαλάσσιες και αεροπορικές μεταφορές αντίστοιχα. Με βάση τη μεθοδολογία που

παρουσιάζεται παρακάτω και με τα στοιχεία που παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.8.α ο ολικός βαθμός εξεργειακής απόδοσης για το Ελληνικό Σύστημα Μεταφορών για το 2000 υπολογίζεται ως εξής:

$$\begin{aligned} \Psi_{\text{overall}} = & (22\%/1.06) \times 0.4677 + (22\%/1.07) \times 0.2672 + (22\%/1.06) \times 0.0022 \quad (5.8) \\ & + (28\%/1.00) \times 0.0014 + (28\%/1.07) \times 0.0056 \\ & + (15\%/1.08) \times 0.0312 + (15\%/1.07) \times 0.0371 \\ & + (28\%/1.07) \times 0.1876 = 21.23\% \end{aligned}$$

ΕΤΟΣ	ΤΥΠΟΣ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ	ΚΑΥΣΙΜΟ	ΕΝΕΡΓΕΙΑ ( PJ)	ΕΞΕΡΓΕΙΑ (PJ)
		Βενζίνη	144,67	153,35
	Οδικές	Diesel	81,88	87,61
		LPG	0,712	0,75
	Σιδηροδρομικές	Ηλεκτρισμός	0,335	0,335
		Diesel	1,72	1,84
	Θαλάσσιες	Μαζούτ	9,5	10,26
		Diesel	11,39	12,19
	Αεροπορικές	Jet	57,51	61,53
				<b>327,865</b>

Πίνακας 5.8.α. Υπολογισμός ενεργειακού και εξεργειακού βαθμού απόδοσης για το Ελληνικό σύστημα μεταφορών για το 2000

### 5.8.1. Υπολογισμός Εξεργειακού Συντελεστή για το Βιοντίζελ

Ο υπολογισμός του εξεργειακού συντελεστή για το βιοντίζελ, το οποίο παράγεται από ελαιοκράμβη βασίζεται στη βιβλιογραφία [Peiró et al, 2010] όπου με τη διεξαγωγή μιας εκτεταμένης εξεργειακής ανάλυσης (Extended Exergy Analysis- EEA) υπολογίζεται το συνολικό ποσό των εξεργειακών πόρων που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ενός τόνου βιοντίζελ από ελαιοκράμβη στην Καταλονία (Νότια Ευρώπη). Η μέθοδος της εκτεταμένης εξεργειακής ανάλυσης απαιτεί μια εξαιρετικά διεξοδική ανάλυση των ροών μάζας και εξέργειας μέσα στην κοινωνία, η οποία χτίζει το εκτεταμένο εξεργειακό (extended exergy) περιεχόμενο ενός προϊόντος ή μιας υπηρεσίας. Η μεθοδολογία της εκτεταμένης εξεργειακής ανάλυσης περιλαμβάνει τις επιπτώσεις στην εργασία, στο κεφάλαιο και στο περιβάλλον. Έτσι, το εκτεταμένο εξεργειακό κόστος (extended exergy cost) ενός προϊόντος εκφράζεται σε kJ/μονάδα (kg, kJ, κλπ) και αντιπροσωπεύει τη συνολική (από την δημιουργία μέχρι το τέλος ζωής του) εξεργειακή επιβάρυνση που η κοινωνία ανέχεται προκειμένου να παραχθεί το συγκεκριμένο προϊόν (προϊόν ή υπηρεσία).

Στο σύστημα παραγωγής εισάγονται σπόροι, λιπάσματα ζιζανιοκτόνα, φυτοφάρμακα καθώς και η κατανάλωση καυσίμου που απαιτείται για τη λειτουργία των μηχανημάτων και για την μεταφορά. Στο σημείο εξόδου του συστήματος παραγωγής για αυτό το στάδιο εξάγεται ελαιοκράμβη και γεωργικά απόβλητα (άχυρα). Η ελαιοκράμβη εισάγεται στο στάδιο παραγωγής, το οποίο περιλαμβάνει την εξόρυξη, την προεργασία, την μεταφορά και την μετεστεροποίηση. Η παραγωγή ενός τόνου RME απαιτεί 3.20 tons ελαιοκράμβης και παράγει 96kg γλυκερίνης. Η επίδραση της ηλιακής ενέργειας, στο σύστημα παραγωγής υπολογίζεται από το μέσο όρο ηλιοφάνειας στην Καταλονία και τον εκτιμώμενο χρόνο ανάπτυξης του σπόρου ελαιοκράμβης [Pons, 2008, Cardone et al, 2003]. Τα οικονομικά δεδομένα για την παραγωγή του καρπού βασίζονται σε 1000 εργατοώρες ανά χρόνο [Departmentd' Agricultural]. Σύμφωνα με την παραπάνω μεθοδολογία οι εξεργειακές εισροές και εκροές που απαιτούνται για την παραγωγή 1 τόνου βιοντίζελ συνοψίζονται στον **Πίνακα 5.8.1.α.**

<b>Εισροή (GJ)</b>	<b>Εξεργειακή Ροή- Σύστημα Παραγωγής 1 tn biodiesel</b>
Πετρέλαιο	38,15
Υλικά	20,70
Ενέργεια	13,19
<b>Σύνολο</b>	<b>72,04</b>
<b>Εκροή (GJ)</b>	
Βιοντίζελ	37,20
Γλυκερίνη	1,98
Γεωργικά απόβλητα	27,78
Οργανικά απόβλητα	-
Νερό	0,16
<b>ΣΥΝΟΛΟ</b>	<b>67,10</b>

Πίνακας 5.8.1.α Εξεργειακές εκροές και εισροές για την παραγωγή ενός τόνου βιοντίζελ

[Peiró et al, 2010]

Ο Πίνακας 5.8.1.β. συνοψίζει το εκτεταμένο εξεργειακό περιεχόμενο ενός τόνου RME

<b>GJ</b>	<b>RME</b>
<b>Εισροή πόρου</b>	
Πετρέλαιο	38,15
Υλικά	20,70
Ενέργεια	<b>13,19</b>
<b>Externalities</b>	
Εργατικά κόστη	0,39
Κόστος κεφαλαίου	4,39
Περιβαλλοντική αποκατάσταση	0,23
<b>Εκτεταμένη Εξέργεια</b>	<b>77,05</b>

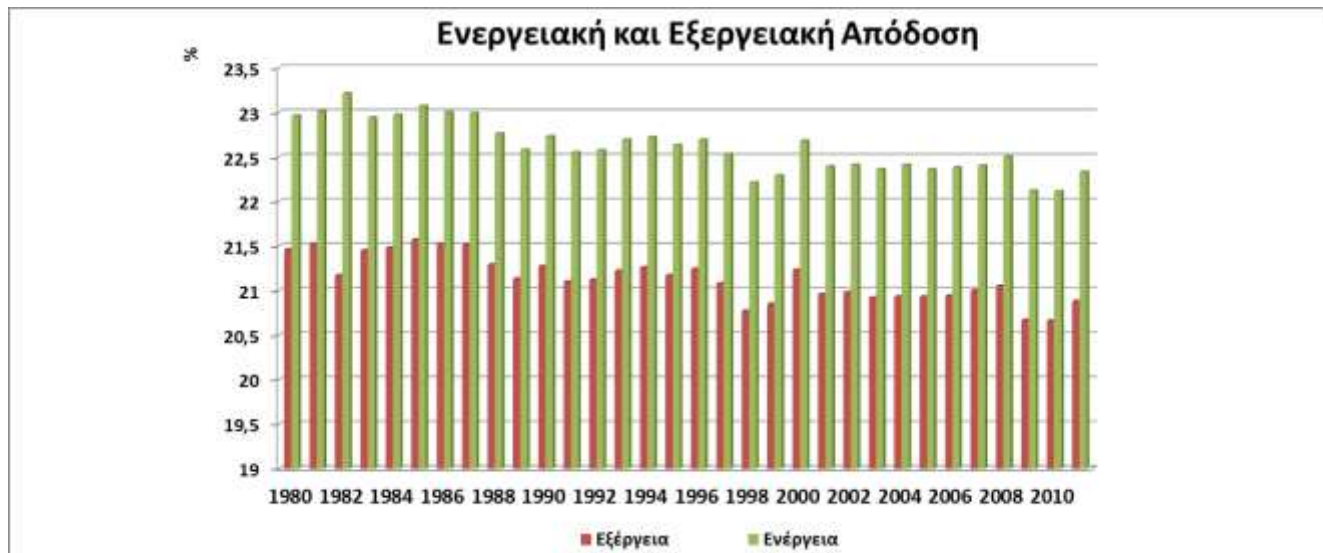
Πίνακας 5.8.1.β Εκτιμώμενη εξέργεια για την παραγωγή ενός τόνου βιοντίζελ από ελαιοκράμβη [Peiró et al, 2010].

Σύμφωνα με τη σχέση 5.7.1 και λαμβάνοντας υπόψη πως η κατώτερη θερμογόνος δύναμη του βιοντίζελ από ελαιοκράμβη είναι 35 MJ/kg [Coniglio et al, 2013], υπολογίζεται ο εξεργειακός συντελεστής για το βιοντίζελ από ελαιοκράμβη σε 2,20. Καθώς το μίγμα βιοντίζελ που χρησιμοποιείται στο δίκτυο οδικών μεταφορών στην Ελλάδα είναι B5 (95% ντίζελ και 5% βιοντίζελ) και λαμβάνοντας υπόψη πως ο εξεργειακός συντελεστής του ντίζελ είναι 1,07 υπολογίζεται ο συντελεστής του μίγματος B5 βιοντίζελ σε 1,13.

## 5.9. Αποτελέσματα Εξεργειακής Ανάλυσης

Ο ολικός ενεργειακός και εξεργειακός βαθμός απόδοσης για το Ελληνικό Σύστημα Μεταφορών, για την περίοδο μεταξύ 1980 και 2011 απεικονίζεται στο **Διάγραμμα 5.8.1**. Σημειώνεται πως τα διαθέσιμα δεδομένα, σύμφωνα με το Υπουργείο Περιβάλλοντος Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής ([www.ypeka.gr](http://www.ypeka.gr)) φθάνουν μέχρι και το 2011. Ο ενεργειακός βαθμός απόδοσης του Ελληνικού Συστήματος Μεταφορών παρουσιάζει μικρή πτωτική τάση από 22,96 % το 1980 σε 22,41% το 2004 και 22,33% το 2011. Ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης του Ελληνικού Συστήματος Μεταφορών παρουσιάζει επίσης μια μικρή πτωτική τάση από 21,46% το 1980 σε 20,93% το 2004 και 20,88% το 2011. Δεδομένου ότι ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης των συσκευών παρέμεινε αμετάβλητος, η μείωση του ολικού ενεργειακού βαθμού απόδοσης θα μπορούσε να αποδοθεί σε γενικότερες μεταβολές της δομής της ενεργειακής κατανάλωσης. Επιπλέον, από τους υπολογισμούς των ενεργειακών και εξεργειακών βαθμών απόδοσης είναι εμφανές πως οι ενεργειακοί βαθμοί απόδοσης είναι μεγαλύτεροι σε σχέση με τους αντίστοιχους εξεργειακούς. Το παραπάνω οφείλεται στο γεγονός πως στον υπολογισμό του εξεργειακού βαθμού απόδοσης λαμβάνονται υπόψη οι απώλειες λόγω αντιστρεψιμοτήτων. Για αυτό το λόγο, ο συνολικός βαθμός απόδοσης του Ελληνικού Συστήματος Μεταφορών απεικονίζεται καλύτερα χρησιμοποιώντας την εξεργειακή ανάλυση.





**Διάγραμμα 5.8.1.** Ολικός ενεργειακός και εξεργειακός βαθμός απόδοσης του Ελληνικού Συστήματος Μεταφορών

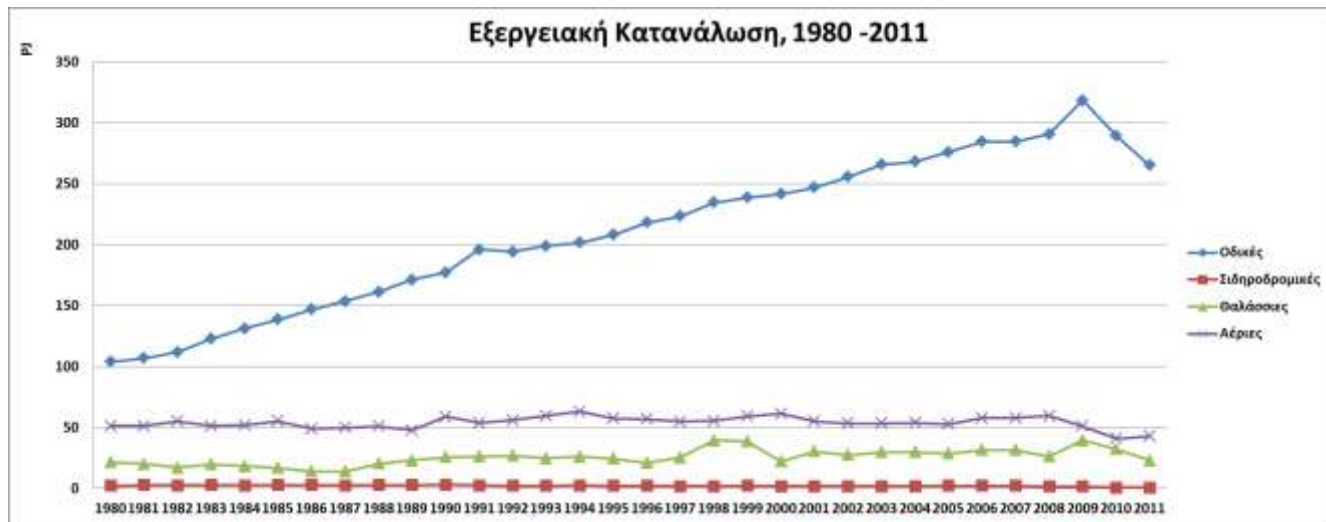
Το **Διάγραμμα 5.8.2** παρουσιάζει τη μεταβολή της ολικής εξεργειακής κατανάλωσης του Ελληνικού Συστήματος Μεταφορών για την χρονική περίοδο 1980 - 2011. Η ολική εξέργεια, η οποία καταναλώθηκε το 2011 ήταν 332,45 PJ, σε σχέση με τα 354,85 PJ τα οποία καταναλώθηκαν το 2004 και με τα 180 PJ, τα οποία καταναλώθηκαν το 1980. Οι ανοδικές τάσεις της εξεργειακής κατανάλωσης, όπως αυτές παρουσιάζονται στο **Διάγραμμα 5.8.2** είναι ενδεικτικές της ανοδικής ζήτησης για μετακίνηση στην Ελλάδα, κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1990. Από την άλλη πλευρά η πτωτική τάση, η οποία παρουσιάζεται από το 2010 και μετά αποδίδεται στην οικονομική κρίση και στην πτώση της ζήτησης για μετακίνηση στην Ελλάδα.

Το σύστημα μεταφορών μιας χώρας παίζει σημαντικό ρόλο στην κοινωνικό-οικονομική ανάπτυξη της, ενώ παράλληλα επηρεάζεται από τόσο άμεσα όσο και έμμεσα από άλλους κοινωνικό-οικονομικούς παράγοντες όπως η δημοσιονομική πολιτική, η δομή της βιομηχανίας, κλπ. Αναλυτικότερα, η αύξηση του ΑΕΠ στην Ελλάδα, κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1990 οδήγησε σε μια αύξηση της ενεργειακής κατανάλωσης στον τομέα των μεταφορών αντικατοπτρίζοντας την αύξηση στην κυκλοφοριακή κίνηση, οδηγώντας σε αύξηση των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου. Επιπλέον, οι διακυμάνσεις των τιμών των καυσίμων επηρέασαν όχι μόνο το κόστος οδήγησης, το οποίο είναι άμεσα συνδεδεμένο με την κατανάλωση καυσίμων, αλλά και όλους τους τομείς της οικονομίας. Είναι φανερό πως όσο ο η ζήτηση για μετακινήσεις αυξάνεται, τόσο περισσότερη ενέργεια απαιτείται και το αντίστροφο.



Διάγραμμα 5.8.2. Συνολική εξεργειακή κατανάλωση του Ελληνικού συστήματος μεταφορών.

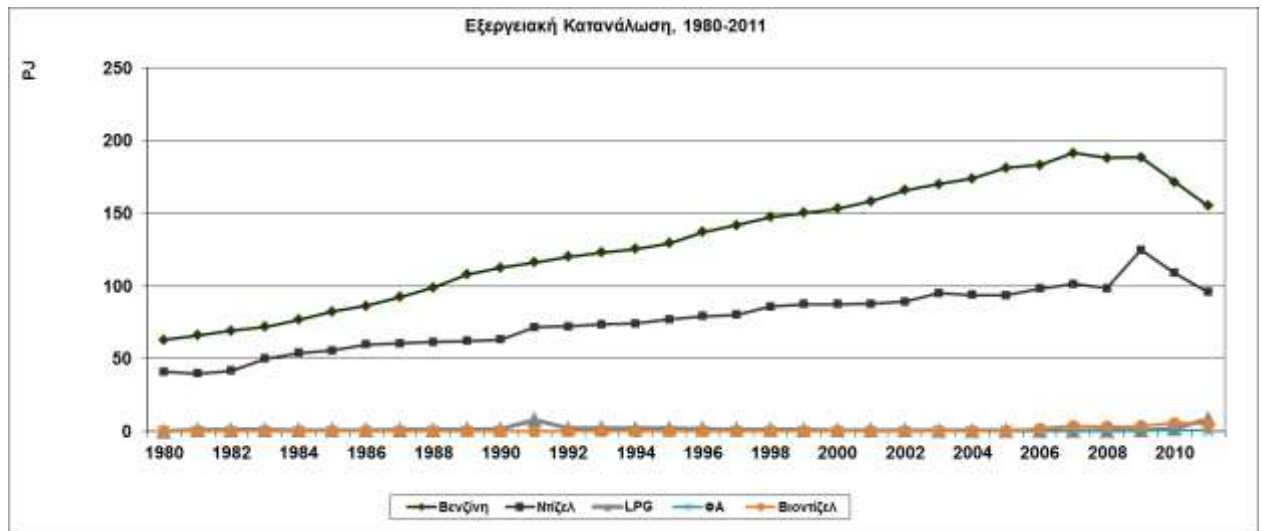
Η εξεργειακή κατανάλωση κάθε υποσυστήματος για την χρονική περίοδο από 1980 μέχρι 2011 παρουσιάζεται στο **Διάγραμμα 5.8.3**. Το 1980, το υποσύστημα των οδικών μεταφορών σημειώνει το μεγαλύτερο ποσοστό εξεργειακής κατανάλωσης με ποσοστό 58%. Τα υποσυστήματα των αεροπορικών, θαλάσσιων και σιδηροδρομικών μεταφορών ακολουθούν με ποσοστά 29%, 12% και 1% αντίστοιχα. Οι ίδιες τάσεις στην κατανάλωση εξέργειας παρατηρούνται και το 2011, όπου οι οδικές μεταφορές εξακολουθούν να σημειώνουν το μεγαλύτερο ποσοστό εξεργειακής κατανάλωσης, το οποίο αγγίζει το 80%. Τα υποσυστήματα των αεροπορικών και θαλάσσιων μεταφορών ακολουθούν με ποσοστά 13% και 7%. Το ποσοστό εξεργειακής κατανάλωσης των σιδηροδρομικών μεταφορών είναι σχεδόν μηδενικό. Είναι φανερό πως η καταναλισκόμενη από το υποσύστημα των οδικών μεταφορών εξέργεια σημείωσε σημαντική αύξηση κατά τη διάρκεια της τελευταίας εικοσαετίας. Η μεταβολή της εξεργειακής κατανάλωσης κατά τη χρονική περίοδο 1980-2011, αντικατοπτρίζει δομικές αλλαγές στη χρήση ενέργειας στο Ελληνικό Σύστημα Μεταφορών, το οποίο επηρεάστηκε από κοινωνικό-οικονομικούς παράγοντες, την υιοθέτηση και εφαρμογή πολιτικών, τις συμπεριφορές κατοίκων καθώς και από τα ίδια τα οχήματα. Η ευελιξία σε συνδυασμό με την ευκολία μετακινήσεων και την οικονομική ανάπτυξη διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στις οδικές μεταφορές. Το **Διάγραμμα 5.8.4** παρουσιάζει αναλυτικά τη διαχρονική μεταβολή της εξεργειακής κατανάλωσης του υποσυστήματος οδικών μεταφορών για την περίοδο 1980-2011.



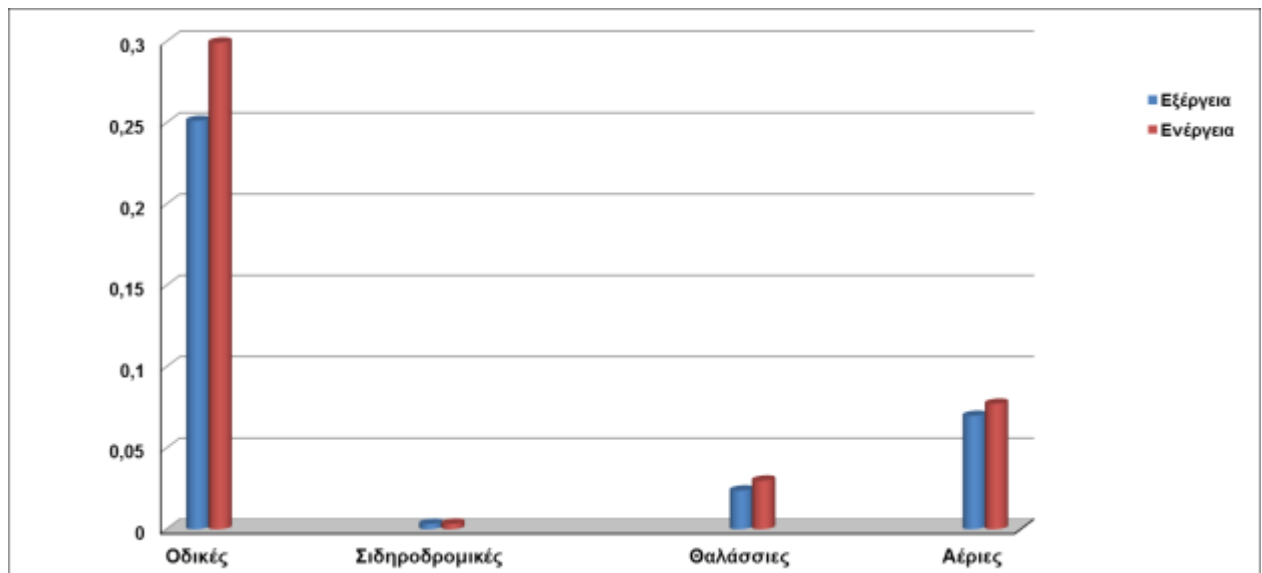
Διάγραμμα 5.8.3. Κατανάλωση εξέργειας για όλα τα υποσυστήματα του Ελληνικού Συστήματος Μεταφορών

Ο μέσος όρος του συνολικού βαθμού ενεργειακής και εξεργειακής απόδοσης όλων των υποσυστημάτων του Ελληνικού Συστήματος Μεταφορών για το χρονικό διάστημα 1980-2011 απεικονίζεται στο **Διάγραμμα 5.8.5**. Το υποσύστημα των οδικών μεταφορών φαίνεται να είναι το λιγότερο αποδοτικό, τόσο ενεργειακά όσο και εξεργειακά. Το παραπάνω μπορεί να οφείλεται στο είδος των καυσίμων και την επίδοση των μεταφορικών οχημάτων. Το φυσικό αέριο, έχει έναν χαμηλό εξεργειακό συντελεστή (1.04) με μεγάλο ενεργειακό και εξεργειακό βαθμό απόδοσης, σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές των καυσίμων που παρουσιάζονται στον **Πίνακα 5.6.**, γεγονός που κάνει περιβαλλοντικά πιο φιλική τη χρήση του. Μετά το 2006 παρατηρείται αύξηση της εξεργειακής κατανάλωσης του υποσυστήματος οδικών μεταφορών, η οποία αποδίδεται στην εισαγωγή του φυσικού αερίου και βιοντίζελ στις οδικές μεταφορές. Τέλος χρειάζεται να διερευνηθεί η χρήση ηλεκτροκίνησης στις οδικές μεταφορές καθώς ο ηλεκτρισμός φαίνεται να έχει το χαμηλότερο εξεργειακό συντελεστή (1.00).

Μέσα σε αυτό το πλαίσιο, η προώθηση και η διείσδυση εναλλακτικών και ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (π.χ. φυσικό αέριο, βιοκαύσιμα, ηλεκτρισμός κλπ) χρειάζεται να ληφθούν υπόψη στην χάραξη πολιτικής που αφορά τον τομέα των μεταφορών. Η στροφή σε καθαρότερα καύσιμα όπως η αμόλυβδη βενζίνη και το diesel χαμηλού θείου, το LPG, όπως και σε εναλλακτικές μορφές ενέργειας αναμένεται να ελαφρύνει τα περιβαλλοντικές επιπτώσεις του Ελληνικού Συστήματος Μεταφορών



Διάγραμμα 5.8.4. Εξεργειακή κατανάλωση του υποσυστήματος οδικών μεταφορών



Διάγραμμα 5.8.5. Μέσος όρος του συνολικού ενεργειακού και εξεργειακού βαθμού απόδοσης του Ελληνικού Συστήματος Μεταφορών για το διάστημα 1980-2011.

## 5.10. Συμπεράσματα

Σε αυτό το κεφάλαιο πραγματοποιήθηκε εξεργειακή ανάλυση του Ελληνικού Συστήματος Μεταφορών, η οποία βασίστηκε σε πραγματικά δεδομένα. Η εξεργειακή ανάλυση έλαβε υπόψη τις ενεργειακές και εξεργειακές εισροές για το χρονικό διάστημα 1980-2011. Διερευνήθηκαν οι μεταβολές των ενεργειακών και εξεργειακών βαθμών απόδοσης των τεσσάρων υποσυστημάτων του Ελληνικού Συστήματος Μεταφορών. Λαμβάνοντας υπόψη την αυξημένη ζήτηση για μετακινήσεις, παρουσιάστηκε σημαντική αύξηση στην κατανάλωση της συνολικής εξέργειας κατά τη διάρκεια της περιόδου 1980-

2009, ενώ από το 2010 ως και το 2011 σημειώνεται μείωση στην κατανάλωση της συνολικής εξέργειας. Επιπρόσθετα, το υποσύστημα των οδικών μεταφορών φαίνεται να είναι το λιγότερο αποδοτικό συγκριτικά με τα υποσυστήματα των σιδηροδρομικών, θαλάσσιων και αεροπορικών μεταφορών.

Οι βασικοί εμπλεκόμενοι στον σχεδιασμό ενός Συστήματος Μεταφορών είναι η κοινωνία, η οικονομία και το περιβάλλον. Είναι πολύ σημαντικό τα συμφέροντα όλων των εμπλεκόμενων ομάδων να ενσωματωθούν στο σχεδιασμό ενός βιώσιμου Συστήματος Μεταφορών. Η έλλειψη μιας ολιστικής προσέγγισης και ευελιξίας στην χάραξη στρατηγικής πολιτικής οδηγεί αναπόφευκτα σε ένα μη βιώσιμο Σύστημα Μεταφορών. Η εξεργειακή ανάλυση αποτελεί ένα χρήσιμο μεθοδολογικό εργαλείο, το οποίο προσφέρει προτάσεις για τη βελτιστοποίηση ενός Συστήματος Μεταφορών, δεδομένου ότι συνδέει το φυσικό και το μηχανικό περιβάλλον με το γύρω περιβάλλον. Για αυτό το λόγο η εξεργειακή ανάλυση μπορεί να αξιοποιηθεί στο σχεδιασμό ενός βιώσιμου Συστήματος Μεταφορών. Η εφαρμογή της εξεργειακής ανάλυσης στο Ελληνικό Σύστημα Μεταφορών αναδεικνύει τις διεργασίες και τα υποσυστήματα του όπου οι δυνατότητες των μεταφορικών μέσων για παραγωγή ωφέλιμου μηχανικού έργου:

- καταστρέφεται λόγω θερμοδυναμικών μη-αντιστρεψιμοτήτων κατά τα διάκρια διαφόρων φαινομένων, όπως για παράδειγμα η καύση, η μετάδοση θερμότητας υπό πεπερασμένη θερμοκρασιακή διαφορά κλπ.
- χάνεται λόγω ανεπιθύμητων μεταφορών εξέργειας, όπως για παράδειγμα η απώλεια θερμικής ενέργειας μέσω της εξαγωγής των καυσαερίων στην ατμόσφαιρα.

Οι παραπάνω καταστροφές εξέργειας αποτελούν πηγές της μη-αποτελεσματικής αξιοποίησης της χημικής ενέργειας των καυσίμων που χρησιμοποιούνται από τα υποσυστήματα του Ελληνικού Συστήματος Μεταφορών για την παραγωγή ωφέλιμου μηχανικού έργου. Γίνεται αντιληπτό πως η μείωση αυτών των καταστροφών της εξέργειας μπορεί να οδηγήσει σε μία περισσότερη αποδοτική λειτουργία του Ελληνικού Συστήματος Μεταφορών. Πέρα λοιπόν, από την ανάδειξη των διεργασιών των υποσυστημάτων που οδηγούν στις παραπάνω καταστροφές εξέργειας, η εξεργειακή ανάλυση συμβάλλει στην ακριβή ποσοτικοποίηση των εξεργειακών απωλειών, στον προσδιορισμό της επίδρασης διαφόρων λειτουργικών και σχεδιαστικών παραμέτρων που αφορούν την απόδοση του Συστήματος Μεταφορών καθώς και στην πρόταση μέτρων για την ελαχιστοποίηση αυτών των καταστροφών εξέργειας και την βελτιστοποίηση του Συστήματος Μεταφορών. Τέλος, η εξεργειακή ανάλυση σε συνδυασμό με το μεθοδολογικό εργαλείο της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής – και της Ανάλυσης Σεναρίων όπως θα παρουσιαστεί και στα παρακάτω κεφάλαια- και λαμβάνοντας υπόψη τις σύγχρονες κοινωνικό-οικονομικές παραμέτρους, συμβάλλει στη

δημιουργία μιας ολοκληρωμένης προσέγγισης για το σχεδιασμό ενός βιώσιμου Ελληνικού Συστήματος Μεταφορών.

### 5.11. Ορολογία Κεφαλαίου 5

<b>g</b>	ειδική συνάρτηση Gibbs	J
<b>G</b>	συνάρτηση Gibbs	J
<b>γ</b>	εξεργειακός συντελεστής	
<b>ε</b>	ειδική εξέργεια	J/kg
<b>E</b>	εξέργεια	J
<b>E<sub>Xphys</sub></b>	φυσική εξέργεια	J
<b>E<sub>Xchem</sub></b>	χημική εξέργεια	J
<b>E<sub>Xmix</sub></b>	εξέργεια ανάμιξης	J
<b>H</b>	ενθαλπία	J/kg
<b>m</b>	μάζα	Kg
<b>n</b>	ενεργειακός βαθμός απόδοσης	
<b>P</b>	πίεση	N/m <sup>2</sup>
<b>Q</b>	θερμότητα	J
<b>R</b>	γενική σταθερά των αερίων	J/kmol K
<b>s</b>	ειδική εντροπία	J/kg K
<b>S</b>	εντροπία	J/K
<b>T</b>	θερμοκρασία	K
<b>U</b>	εσωτερική ενέργεια	J
<b>ψ</b>	εξεργειακός βαθμός απόδοσης	
<b>W</b>	έργο	

### 5.12. Βιβλιογραφία Κεφαλαίου 5

1. «Europedia - Το πακέτο ενέργεια-κλίμα της E.E.», <http://europedia.moussis.eu/discus/discus-1230747802-321327-28435.tkl?lang=gr>
2. CardoneM, MazzonciniM, MeniniS, RoccoV, SenatoreA, SeggianiM, et al.(2003) Brassica Carinata as an alternative oil crop for the production of biodiesel in Italy: agronomic evaluation, fuel production by transesterification and characterisation. Biomass & Bioenergy ;25:623e36.  
compounds (methyl and ethyl esters): Experiments and modeling – Advances and future refinements, Progress in Energy and Combustion Science 39, 340-382, doi: 10.1016/j.peccs.2013.03.002
3. Department d'Agricultura Alimentació i Acció Rural (2008) Programme of utilization costs for agricultural machinery in Catalonia. Generalitat de Catalunya
4. Dincer, I., Hussain, M.M., Al-Zaharnah, I., (2003). Energy and exergy use in the industrial sector of Saudi Arabia, Proceedings of the I MECH E Part A., Journal of Power and Energy 217, 481-492 (12).
5. Dincer, I., Hussain, M.M., Al-Zaharnah, I., (2004a). Energy and exergy utilization in transportation sector of Saudi Arabia, Applied Thermal Engineering 24, 525-538.
6. Dincer, I., Hussain, M.M., Al-Zaharnah, I., (2004b). Energy and exergy use in public and private sector of Saudi Arabia, Elsevier- Journal of Energy Policy, 32, 1615-1624.



7. Dincer, I., Hussain, M.M., Al-Zaharnah, I., (2004c). Energy and exergy use in the utility sector of Saudi Arabia, *Desalination* 169, 245-255.
- Francis Billaud (2013). Combustion chemical kinetics of biodiesel and related
8. Gaggioli, R.A., (1980). Second law analysis for process and energy engineering. Paper presented at the AIChE Winter Meeting, November.
9. Gaggioli, R.A., Petit, P.I., (1977). Use the second law first. *Chemtech* 7, 496-506.
10. Hammond, G.P., Stapleton, A.J. (2001). Exergy analysis of the United Kingdom Energy System, *IMEch –Journal of Power and Energy* 215, 141-162.
11. Ji Xi and Chen, G.Q. (2006). Exergy analysis of energy utilization in the transportation sector in China, *Elsevier-Journal of Energy Policy*, 34, 1709-1719.
12. Kenney, W.F., (1984). *Energy conservation in the process industries*, Academic Press, New York
13. Kotas, T.J., (1985). *The Exergy Method of Thermal Plant Analysis*. London Boston Butterworths, London.
14. L. Talens Peiró, G.VillalbaMéndez, E.Sciubba, X.Gabarrell i Durany (2010). Extended exergy accounting applied to biodiesel production, *Elsevier, Energy* 35(2010)2861- 2869.
15. Lemieux, M.A., and Rosen, M.A. (1989). *Energy and Exergy Analysis of Energy Utilization in Ontario*, Research Report, Ryerson Polytechnic University, Toronto.
16. Lucie Coniglio, Hayet Bennadji, Pierre Alexandre Glaude, Olivier Herbinet,
17. Moran M.J., (1982). *Availability Analysis: A Guide to Efficient Energy Use*, Prentice- Hall, New Jersey.
18. Ozdogan, O. and Arikol, M., (1995). Energy and exergy analyses of selected Turkish Industries, *Energy-The International Journal* 20, 73-80.
19. Pons X, Ninyerola M. (2008) Mapping a topographic global solar radiation model implemented in a GIS and refined with ground data. *International Journal of Climatology*; 28(13):1821e34.
20. Reistad, G.M., (1975). Available energy conversion and utilization in the United States, *Journal of Engineering for Power* 97, p.p. 429-434.
21. Rosen, M.A. and Dincer, I., (1997). Sectoral energy and exergy modeling of Turkey, *ASME-Journal of Energy Resources Technology Resources Technology* 119(3), 200-204.
22. Rosen, M.A., (1992). Evaluation of energy utilization efficiency in Canada using energy and exergy analyses, *Energy- The International Journal* 17, 339-350
23. Schaeffer, R. and Wirtshafter, R.M. (1992). An exergy analysis of the Brazilian economy: from energy production to final energy use, *Energy Vol. 17, No. 9*, pp. 841-855.
24. Schaeffer, R., (1990). *Generalization of the Concept of Exergy at a National Level: A Tool for Energy Planning Using Brazil as a Case Study*, Doctoral Dissertation, University of Pennsylvania, Philadelphia, PA.
25. Terkovics, P.J., Rosen M.A., (1988). *Energy and Exergy Analysis of Canadian Energy Utilization Research Report*, Ryerson Polytechnic University, Toronto.
26. Tober, E., (1997). "Theory of Exergy Analysis", University of Twente, [http://www.thw.wb.utwente.nl/topics/exergy/theory\\_e.htm](http://www.thw.wb.utwente.nl/topics/exergy/theory_e.htm).
27. Wall G., Sciuba E., Vincenzo N. (1994), *Exergy Use in the Italian Society*, *Energy*, Vol 19, 1267- 1274.
28. Wall, G., (1990). Exergy conversion in the Japanese Society, *Energy-The International Journal* 15, 435-444.
29. Wall, G., (1991). Exergy conversions in the Finish, Japanese and Swedish societies, in: *OPUSCULA Exergy Papers*, pp. 1-11, University College of Eskilstuna/Vasteras, Sweden.
30. Wall, G., (2001). On Exergy and Sustainable Development, Part: Conditions and Concepts. *Exergy an International Journal*, Vol. 1, N3.
31. Βάση Δεδομένων Υπουργείου Περιβάλλοντος, Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής: [www.yprka.gr](http://www.yprka.gr)

32. Κορωναίος Χρ., (2004). Σημειώσεις Μαθήματος Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας», Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών. « Περιβάλλον και Ανάπτυξη», Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.