ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΙΙ: ΑΝΑΛΥΣΗ, ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ & ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ & ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

Ο ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ ΣΤΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΣΤΕΡΕΩΝ ΑΠΟΡΡΙΜΜΑΤΩΝ (ΑΣΑ): Η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΜΥΡΩΔΙΑ ΒΑΣΙΛΙΚΗ

Επιβλέπων: Γ. Μαυρωτάς

ΑΘΗΝΑ 2014

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΙΙ: ΑΝΑΛΥΣΗ, ΑΝΑΠΤΥΞΗ, ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ & ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ & ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

Ο ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ ΣΤΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΣΤΕΡΕΩΝ ΑΠΟΡΡΙΜΜΑΤΩΝ (ΑΣΑ): Η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΜΥΡΩΔΙΑ ΒΑΣΙΛΙΚΗ

Επιβλέπων: Γ. Μαυρωτάς

ΑΘΗΝΑ 2014

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο εργαστήριο Βιομηχανικής και Ενεργειακής Οικονομίας της σχολής Χημικών Μηχανικών κατά το ακαδημαϊκό έτος 2012-2013 με θέμα « Ο Μαθηματικός Προγραμματισμός στη διαχείριση Στερεών Απορριμμάτων (ΑΣΑ): Η περίπτωση της Αττικής».

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Επίκουρο καθηγητή της σχολής Χημικών Μηχανικών κ. Γεώργιο Μαυρωτά, για την ανάθεση της εν λόγω εργασίας, την καθοδήγηση, τις πολύτιμες υποδείξεις και συμβουλές του καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η διαχείριση των Αστικών Στερεών Αποβλήτων (ΑΣΑ) αποτελεί ένα σύνθετο πρόβλημα της σύγχρονης εποχής με επιπτώσεις τόσο περιβαλλοντικές όσο και οικονομικές. Επομένως, καθίσταται πρωταρχική ανάγκη η ολοκληρωμένη σχεδίαση ενός συστήματος διαχείρισης ΑΣΑ σε περιφερειακό επίπεδο. Στην παρούσα εργασία αναπτύσσεται ένα τέτοιο σύστημα που καλύπτει ένα εικοσαετή ορίζοντα σε περιφερειακό επίπεδο με τη χρήση Μαθηματικού Προγραμματισμού (ΜΠ).

Το μοντέλο του ΜΠ είναι πολυπεριοδικό και στοχεύει στη δομική, διαστασιολογική και λειτουργική βελτιστοποίηση. Περιγράφει την υπερδομή του συστήματος και μέσω της πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης παρέχεται το σύνολο των κατά Pareto βέλτιστων λύσεων του συστήματος. Η πληροφορία αυτή είναι απαραίτητη για τη λήψη αποφάσεων καθώς καθορίζει τη δομή του συστήματος (διεργασίες), τον σχεδιασμό (χωρητικότητα των μονάδων) και τη λειτουργία (ετήσιες ροές). Με βάση τις μεταβλητές απόφασης που είναι συνεχείς και ακέραιες, το μοντέλο αυτό κατατάσσεται σε μοντέλο Μικτού Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού (ΜΑΓΠ) και το υπολογιστικό εργαλείο που χρησιμοποιήθηκε είναι η GAMS (General Algebraic Modeling System).

Στο παρόν μοντέλο η βελτιστοποίηση γίνεται με βάση δύο αντικειμενικές συναρτήσεις (κριτήρια): την οικονομική που προσδιορίζει την ελαχιστοποίηση της Καθαρής Παρούσας Αξίας (ΚΠΑ) και την περιβαλλοντική που προσδιορίζει την ελαχιστοποίηση των σχετικών ισοδύναμων εκπομπών CO_2. Η εφαρμογή του πραγματοποιήθηκε στην περιοχή της Αττικής, δηλαδή σε μία πόλη περίπου 5.000.000 κατοίκων με ελληνικά χαρακτηριστικά σε ότι αφορά στην ποσότητα και στη σύνθεση των απορριμμάτων.

Οι τεχνολογίες που μελετήθηκαν είναι η υγειονομική ταφή (LDF), η θερμική επεξεργασία (WTE), η βιολογική –μηχανική επεξεργασία (MBT), η βιολογική ξήρανση (BD), η κομποστοποίηση (CMP), η αναερόβια χώνευση (AD) και η ανάκτηση υλικών (MRF). Τα διαφορετικά σενάρια που εξετάστηκαν στην παρούσα εργασία είναι παραλλαγές για τις τιμές των ανακυκλώσιμων, για τις ποσότητες των απορριμμάτων που αντιστοιχούν στην Αττική, για την τιμή και την ποσότητα του παραγόμενου καυσίμου.

Τα συμπεράσματα τα οποία προέκυψαν κατά τη συσχέτιση των επιλογών από οικονομικής και περιβαλλοντικής σκοπιάς μαρτυρούν την πορεία της εν λόγω έρευνας και αποτελούν ερεθίσματα για περαιτέρω μελέτη.

Λέξεις Κλειδιά: Διαχείριση Αστικών Στερεών Αποβλήτων, εκπομπές αεριών θερμοκηπίου, κόστος, βελτιστοποίηση, Μαθηματικός Προγραμματισμός

ABSTRACT

The Municipal Solid Waste (MSW) management is a complex problem of modern society with impact both economic and environmental. Therefore, the need of the design of an integrated solid waste management system at regional level becomes urgent. This paper describes such a system covering a twenty – year horizon at a regional level using Mathematical Programming (MP).

The model of MP is multi periodic and aims at structural, design and operational optimization. It describes the superstructure of the system and through Multi – Objective optimization it provides the set of Pareto optimal solution of the system. This information is essential to the decision – maker as it determines the structure of the system (processes), the design (capacity of units) and the operation (annual flows). Due to the fact that the decision variables are continuous and integer, this model is classified into Mixed Integer Linear Programming (MILP), using the widely known modeling system GAMS (General Algebraic Modeling System).

In this model, the optimization is carried out based on two objective functions: the economic objective function which indicates the minimization of the Net Present Value (NPV) and the environmental objective function which identifies the minimization of the associated CO_2 – equivalent emissions. The implementation took place in Attica, a city of about 5.000.000 residents with Greek characteristics in terms of waste amounts and composition of garbage.

The technologies which are studied are Landfill (LDF), Waste to Energy (WTE), Mechanical & Biological Treatment (MBT), Biodrying (BD), Composting (CMP), Anaerobic Digestion (AD) and Material Recycling Facilities (MRF). The different scenarios being considered in this paper are changes regarding the price of recyclables, the quantities of waste in Attica, the price and the quantity of derived fuel.

The conclusions of this case-study, which were drawn through the correlation of choices in economic and environmental terms, indicate the course of this research and constitute a stepping stone for a further study.

Key words: Municipal Solid Waste Management, emissions CO_2, cost, optimization, Mathematical Programming

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

Κατάλογος Εικόνων xi
Κατάλογος Πινάκων xi
Κατάλογος Διαγραμμάτων xii
1. Εισαγωγή 1
1.1 Σκοπός 1
1.2 Γενικά 1
1.3 Ιστορική Αναδρομή των Συστημάτων Διαχείρισης των ΑΣΑ 3
1.4 Οι Υποχρεώσεις του Ρυπαίνοντος 4
1.5 Σύστημα ΑΣΑ και Μαθηματικός Προγραμματισμός 5
1.6 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση 6
1.7 Δομή Διπλωματικής 7
2 Τεχνικές Επεξεργασίας 9
2.1 Εισαγωγή 9
2.2 Παραγωγή και επεξεργασία στην πηγή 9
2.3 Συλλογή και Μεταφορά 11
2.4 Βιοεπεξεργασία ΑΣΑ 12
2.4.1 Κομποστοποίηση 13
2.4.2 Αναερόβια Επεξεργασία ΑΣΑ 20
2.4.3 Συνδυασμός αερόβιας και αναερόβιας επεξεργασίας 23
2.5 Ανακύκλωση 23
2.5.1 Εγκαταστάσεις ανάκτησης υλικών και ενέργειας 24
2.6 Θερμική επεξεργασία αποβλήτων 26
2.6.1 Αποτέφρωση 27
2.6.2 Πυρόλυση 31
2.6.3 Αεριοποίηση 32
2.7 Βιολογική Ξήρανση 33
2.8 Βιολογική μηχανική επεξεργασία 34
2.9 Υγειονομική ταφή 36
2.9.1 Τεχνική περιγραφή ΧΥΤΑ 36
2.9.2 Στάδια ανάπτυξης ΧΥΤΑ 37
2.9.3 Γήρανση χώρου υγειονομικής ταφής 38
3 Μαθηματικός Προγραμματισμός 41
3.1 Εισαγωγή στον Μαθηματικό προγραμματισμό 41

3.2 Πολυκριτηριακή Λήψη Αποφάσεων 44
3.3 Το πρόβλημα του Πολυκριτηριακού Γραμμικού Προγραμματισμού (ΠΚΓΠ) 45
3.4 Μέθοδοι ΠΚΓΠ 51
3.4.1 Μέθοδοι ΠΚΓΠ με έκφραση προτίμησης πριν από την επίλυση 52
3.4.2 Μέθοδοι ΠΚΓΠ με έκφραση προτίμησης κατά τη διάρκεια της διαδικασίας επίλυσης 53
3.4.3 Μέθοδοι ΠΚΓΠ με έκφραση προτίμησης μετά τη διαδικασία επίλυσης 54
3.5 Πολυκριτηριακός Γραμμικός Προγραμματισμός με ακέραιες μεταβλητές 56
3.6 Η πολυκριτηριακή μέθοδος Augmecon 57
4 Το Μοντέλο 61
4.1 Υπερδομή διαχείρισης Αστικών Στερεών Απορριμμάτων 61
4.2 Κατασκευή Μοντέλου 62
4.2.1 Μεταβλητές Απόφασης 62
4.2.2 Περιορισμοί 63
4.2.3 Παράμετροι 63
4.2.4 Αντικειμενικές Συναρτήσεις 63
4.3 Ανάπτυξη Μοντέλου 63
4.3.1 Συστατικά μοντέλου 63
4.4 Εξισώσεις μοντέλου 66
4.4.1 Ισοζύγια μάζας στους κάδους 66
4.4.2 Ισοζύγια μάζας στις διεργασίες 67
4.4.3 Ισοζύγια μάζας στο χώρο υγειονομικής ταφής 69
4.5 Ισοζύγια ενέργειας 69
4.6 Περιορισμοί δυναμικότητας διεργασίας 70
4.7 Ποσοστά ανακύκλωσης 71
4.8 Εκπομπές 72
4.8.1 Εκπομπές από τις διεργασίες 72
4.8.2 Εκπομπές από τη μεταφορά 74
4.8.3 Εκπομπές από τον χώρο υγειονομικής ταφής 75
4.9 Αντικειμενική συνάρτηση κόστους 78
4.9.1 Ετήσιο κόστος κάδων 78
4.9.2 Ετησιοποιημένο κόστος επένδυσης στη μεταφορά (φορτηγά) 78
4.9.3 Ετήσιο λειτουργικό κόστος μεταφοράς (φορτηγά) 79
4.9.4 Ετησιοποιημένο κόστος επένδυσης των διεργασιών 80

4.9.5 Ετήσιο λειτουργικό κόστος των διεργασιών 82
4.9.6 Ετήσιο εισόδημα από τα ανακυκλώσιμα 82
4.9.7 Ετήσιο εισόδημα από τον παραγόμενο ηλεκτρισμό 82
4.9.8 Καθαρό παρόν κόστος της περιόδου των 20 χρόνων 82
4.10 Η αντικειμενική συνάρτηση των ισοδύναμων εκπομπών CO_2 83
4.10.1 Εκπομπές CO_2 –eq από την ενεργειακή κατανάλωση στις διεργασίες 83
4.10.2 Εκπομπές CO_2 –eq από την διεργασία παραγωγής 83
4.10.3 Εκπομπές CO_2 -eq από την ενεργειακή κατανάλωση στην μεταφορά 83
4.10.4 Εκπομπές CO_2 –eq από τον χώρο υγειονομικής ταφής 84
4.10.5 Ολικές εκπομπές ισοδύναμου CO_2 του συστήματος 84
5 Αποτελέσματα 86
5.1 Στοιχεία Σχεδιασμού 86
5.2 Σενάριο αναφοράς 88
5.3 Διαφορετικές τιμές ανακυκλώσιμων 90
5.4 Παραλλαγή με βάση τις Ποσότητες των Απορριμμάτων που αντιστοιχούν στην Αττική 93
5.5 Παραλλαγή Τιμής Παραγόμενου Καυσίμου 102
6 Συμπεράσματα 105

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1.1 Οδηγοί και εξέλιξη ΑΣΑ....4
Εικόνα 2. 1 Διαχωρισμός στην πηγή [35] 10
Εικόνα 2. 2 Διαχωρισμός στην πηγή [35] 11
Εικόνα 2. 3 Χώρος προσωρινής απόθεσης [35]....12
Εικόνα 2. 4 Μονάδα ανακύκλωσης – κομποστοποίησης Καλαμάτας (γενική άποψη) [35] ...13
Εικόνα 2. 5 Εγκατάσταση Καλαμάτας – κομποστοποίηση [35]....14
Εικόνα 2. 6 Τεχνικές βιοσταθεροποίησης: σύστημα σειραδίων (a), σύστημα αεριζόμενου στατικού σωρού (b), κλειστός βιοαντιδραστήρας (c) [24] 15
Εικόνα 2. 7 Βιοσταθεροποίηση σε στατικούς σωρούς [24]....16
Εικόνα 2. 8 Τύποι κλειστών βιοαντιδραστήρων: βιοαντιδραστήρας κάθετης ομαλής ροής (a), οριζόντιας ομαλής ροής (b), κάθετης δυναμικής ροής (c) και οριζόντιας δυναμικής ροής (d) [24]....17
Εικόνα 2. 9 Αυτοκινούμενος αναστροφέας σειραδίων [35]....19
Εικόνα 2. 10 Εγκατάσταση κομποστοποίησης [35] 20
Εικόνα 2. 11 Εγκατάσταση –σειράδια σε υπόστεγο [35]....20
Εικόνα 2. 12 Μονάδα άντλησης και καύσης βιοαερίου [35]....22
Εικόνα 2. 13 Υποσταθμός συλλογής βιοαερίου [35] 23
Εικόνα 2. 14 Εγκατάσταση Καύσης με Ανάκτηση ενέργειας (Brescia, Ιταλία) [35] 27
Εικόνα 2. 15 Σχηματικό διάγραμμα του θαλάμου καύσης της εγκατάστασης της εικόνας 2.14 (Brescia) [35] 27
Εικόνα 2. 16 Τυπική μονάδα καύσης [35] 30
Εικόνα 2. 17 Ανάπτυξη και συμπλήρωση ΧΥΤΑ: εκσκαφή και προετοιμασία (a), τοποθέτηση στερεών απορριμμάτων (b) και τομή συμπληρωμένης χωματερής (c) [35] 38
Εικόνα 2. 18 Γενική άποψη της εξέλιξης ενός ΧΥΤΑ [35] 39
Εικόνα 4. 1 Γραφική απεικόνιση της υπερδομής του συστήματος διαχείρισης των ΑΣΑ....62

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2. 1 Ενδεικτικό μέσο ενεργειακό περιεχόμενο και υπόλειμμα διαφόρων συστατικών....28
Πίνακας 2. 2 Κατανομή προϊόντων σε σχέση με τη θερμοκρασία πυρόλυσης 32
Πίνακας 4. 1 Τα συστατικά των αποβλήτων που μελετήθηκαν 64
Πίνακας 4. 2 Τεχνολογίες/Διεργασίες 65
Πίνακας 5. 1 Ποσοστιαία σύνθεση ΑΣΑ λεκανοπεδίου Αττικής (Χειμώνας – Άνοιξη 2007-2008) Πηγή: Ερευνητικό Πρόγραμμα «Προσδιορισμός Φυσικοχημικών Παραμέτρων και Ποιοτικής Σύστασης Απορριμάτων Λεκανοπεδίου Αττικής» (Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, 2008) 86
Πίνακας 5. 2 Συνολική χωρητικότητα διεργασιών για τις 4 περιόδους στα σημεία ελάχιστου κόστους, ενδιάμεση λύση και ελάχιστων εκπομπών CO_2 για το σενάριο αναφοράς 89
Πίνακας 5. 3Συνολική χωρητικότητα διεργασιών για τις 4 περιόδους στο σημείο ελάχιστου κόστους για τις διαφορετικές τιμές των ανακυκλώσιμων....91

Πίνακας 5. 4 Συνολική χωρητικότητα διεργασιών για τις 4 περιόδους στην ενδιάμεση λύση για τις διαφορετικές τιμές των ανακυκλώσιμων 92
Πίνακας 5. 5 Συνολική χωρητικότητα διεργασιών για τις 4 περιόδους στο σημείο ελάχιστων ισοδύναμων εκπομπών CO_2 για τις διαφορετικές τιμές των ανακυκλώσιμων 93
Πίνακας 5. 6Συνολική χωρητικότητα διεργασιών για τις 4 περιόδους στα σημεία ελάχιστου κόστους, ενδιάμεσης λύσης και ελάχιστων εκπομπών CO_2 για το σενάριο 2 (υποδιπλασιασμός αρχικής ποσότητας) 95
Πίνακας 5. 7 Συνολική χωρητικότητα διεργασιών για τις 4 περιόδους στα σημεία ελάχιστου κόστους, ενδιάμεσης λύσης και ελάχιστων εκπομπών CO_2 για το σενάριο 3 (αρχικής ποσότητας δια 4) 96
Πίνακας 5. 8 Συνολική χωρητικότητα διεργασιών για τις 4 περιόδους στα σημεία ελάχιστου κόστους, ενδιάμεσης λύσης και ελάχιστων εκπομπών CO_2 για το σενάριο 4 (αρχικής ποσότητας δια 8) 98
Πίνακας 5. 9 Συνολική χωρητικότητα διεργασιών για τις 4 περιόδους στα σημεία ελάχιστου κόστους, ενδιάμεσης λύσης και ελάχιστων εκπομπών CO2 για το σενάριο 5 (αρχικής ποσότητας δια 16) 99
Πίνακας 5. 10 Συνολική χωρητικότητα διεργασιών για τις 4 περιόδους στο σημείο ελάχιστου κόστους-σημείο 1 για τα πέντε διαφορετικά σενάρια 100
Πίνακας 5. 11 Συνολική χωρητικότητα διεργασιών για τις 4 περιόδους στο σημείο ενδιάμεσης λύσης (6° σημείο) για τα πέντε διαφορετικά σενάρια 101
Πίνακας 5. 12 Συνολική χωρητικότητα διεργασιών για τις 4 περιόδους στο σημείο ελάχιστων εκπομπών CO2 – 11° σημείο για τα πέντε διαφορετικά σενάρια 102

Κατάλογος Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 5. 1 Σχέση συσχέτισης του NPC με τις ισοδύναμες εκπομπές CO_2 για το σενάριο αναφοράς 88
Διάγραμμα 5. 2 Σχέση συσχέτισης του NPC με τις ισοδύναμες εκπομπές CO_2 για τις διαφορετικές τιμές των ανακυκλώσιμων 90
Διάγραμμα 5. 3 Σχέση συσχέτισης της ΚΠΑ με τις ισοδύναμες εκπομπές CO_2 για τα 5 διαφορετικά σενάρια ποσοτήτων. 94
Διάγραμμα 5. 4 Σχέση συσχέτισης της ΚΠΑ με τις ισοδύναμες εκπομπές CO_2 για το σενάριο υποδιπλασιασμού των ποσοτήτων 94
Διάγραμμα 5. 5 Σχέση συσχέτισης της ΚΠΑ με τις ισοδύναμες εκπομπές CO_2 για το σενάριο 3 96
Διάγραμμα 5. 6 Σχέση συσχέτισης της ΚΠΑ με τις ισοδύναμες εκπομπές CO_2 για το σενάριο 4 97
Διάγραμμα 5. 7 Σχέση συσχέτισης της ΚΠΑ με τις ισοδύναμες εκπομπές CO_2 για το σενάριο 5 99
Διάγραμμα 5. 8 Σχέση συσχέτισης της ΚΠΑ με τις ισοδύναμες εκπομπές CO_2 για τις διαφορετικές ποσότητες και τιμές του καυσίμου. 103

Κατάλογος Συμβόλων

Δείκτες

i	Συστατικά αποβλήτων, i = 1..I, με max(I) = 34
j	Τύποι κάδων, j = 1..J, με max(J) = 7
p	Διεργασίες, p = 1..P με max(P) = 42
o	Παράγωγα των διεργασιών, o = 1..O, με max(O) = 7
t	Χρονικοί περίοδοι, t = 1..4
e	Εκπομπές (CO_2, CH_4, N_2O, NH_3, PM_{10}, SO_X, NO_X, NMVOC, PCDDs), e=1..9
f	Καύσιμα, f = 1..3

Παράμετροι

$inbin_{j,t}$	Ετήσια εισροή στον κάδο j την περίοδο t
$q_{i,j,t}$	Ετήσια ποσότητα του συστατικού i που καταλήγει στον κάδο j την χρονική περίοδο t
bin_j	Δυαδική παράμετρος που υποδεικνύει αν οι j τύπου κάδοι έχουν επιλεχθεί ή όχι στο συγκεκριμένο σενάριο
$link_{p,j}$	Παράμετρος η οποία παίρνει την τιμή 1 εάν ο j κάδος συνδέεται με την p διεργασία αλλιώς παίρνει την τιμή 0
$cc_{p,i,o}$	Συντελεστής μετατροπής στη διεργασία p για το συστατικό i μέσω της εκροής o
$sh_{i,j,t}$	Ποσοστό του i συστατικού στον j τύπο κάδου κατά την t περίοδο
$elef_{bg}$	Αποδοτικότητα παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από βιοαέριο
$elef_{wte}$	Αποδοτικότητα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από μονάδα WTE
ncv_i	Κατώτερη θερμογόνος δύναμη του i συστατικού
$moist_i$	Υγρασία του i συστατικού

$bdmlos_i$	Παράμετρος που εκφράζει την απώλεια υγρασίας για το i συστατικό στη βιοξήρανση
$capmin_p$	Ελάχιστη διαθέσιμη χωρητικότητα της διεργασίας p
$capmax_p$	Μέγιστη διαθέσιμη χωρητικότητα της διεργασίας p
$lrb_{i,t}$	Νομοθετικό όριο ανακύκλωσης για το i συστατικό την περίοδο p
$tquant_{i,t}$	Συνολική ποσότητα που συλλέχθηκε από το i συστατικό την περίοδο p
$prb_{i,t}$	Στόχος ανακύκλωσης ο οποίος δίνεται από μία συγκεκριμένη πολιτική ανακύκλωσης για το συστατικό i την περίοδο t
$lrbtot_t$	Όριο για το σύνολο των ανακυκλώσιμων την περίοδο t
$spc_{f,p}$	Ειδική κατανάλωση καυσίμου f στη διεργασία p
$ef_{f,e}$	Συντελεστής της e εκπομπής από το f καύσιμο
$efproc_{p,e}$	Συντελεστής της e εκπομπής από την p διεργασία
dmc_i	Περιεκτικότητα σε ξηρά ουσία του i συστατικού
$carbc_i$	Περιεκτικότητα σε άνθρακα του i συστατικού
fc_i	Ποσοστά περιεκτικότητας σε ορυκτό άνθρακα του i συστατικού
$efwte_{i,e}$	Συντελεστής της e εκπομπής από το i συστατικό στη διεργασία WTE
$tref_{e,f}$	Συντελεστής εκπομπών που χρησιμοποιείται στις μεταφορές από το f καύσιμο
$sctrw_{p,f}$	Ειδική κατανάλωση καυσίμου f των φορτηγών που μεταφέρουν απορρίμματα από τους κάδους στη διεργασία p
$sctrwldf_{p,f}$	Ειδική κατανάλωση καυσίμου f των φορτηγών που μεταφέρουν απορρίμματα από τη διεργασία p στο χώρο υγειονομικής ταφής
$sctrwts_{p,f}$	Ειδική κατανάλωση καυσίμου f των φορτηγών από το σταθμό μεταφοράς στη p διεργασία
$sctrwte_{p,f}$	Ειδική κατανάλωση του καυσίμου f των φορτηγών από τη διεργασία BD και MBT στη WTE
db_p	Απόσταση από τους κάδους στη p διεργασία και αντίθετα διαιρούμενη με το βάρος του φορτηγού

$dldf_p$	Απόσταση από την p διεργασία στο χώρο υγειονομικής ταφής και αντίθετα διαιρούμενη με το βάρος του φορτηγού
dts_p	Απόσταση από το σταθμό μεταφοράς στη p διεργασία και αντίθετα διαιρούμενη με το βάρος του φορτηγού
$dwte_p$	Απόσταση από τη BD και MBT στη WTE και αντίθετα διαιρούμενη από το αντίστοιχο φορτίο του φορτηγού
DOC	Διασπώμενος οργανικός άνθρακας υπό αερόβιες συνθήκες
DOCf	Κλάσμα του DOC που αποσυντίθεται υπό αναερόβιες συνθήκες
MCF	Διορθωμένο κλάσμα του μεθανίου
f	Κλάσμα μεθανίου στα Χ.Υ.Τ.Α
k	Ποσοστό της συνεχούς αντίδρασης για την παραγωγή μεθανίου
$tr_{p,i}$	Παράμετρος που καθορίζει ποιο μέρος του συστατικού i θεωρείται επεξεργάσιμο στη διεργασία p
$mthcoef_{i,t}$	Συντελεστής εκπομπών μεθανίου από απόβλητα τύπου i που οδηγούνται στο χώρο υγειονομικής ταφής την περίοδο t
$tmthcoef_{i,t}$	Συντελεστής εκπομπών μεθανίου των επεξεργασμένων αποβλήτων τύπου i που οδηγούνται στο χώρο υγειονομικής ταφής την περίοδο t
$mth20_40coef_{i,t}$	Συντελεστής εκπομπών μεθανίου για την περίοδο των 20 ετών μετά την μελέτη για το απόβλητο τύπου i που οδηγείται στην υγειονομική ταφή σε περίοδο t
$binaicpt_j$	Ετήσιο κόστος της επένδυσης για τον j τύπο κάδου ανά τόνο εισροών
$tcbin_p$	Ετήσιο κόστος δυναμικότητας των μεταφορών από τους κάδους στη διεργασία p ανά τόνο των μεταφερόμενων αποβλήτων
$tcldf_p$	Ετήσιο κόστος δυναμικότητας των μεταφορών από τη διεργασία p στο χώρο υγειονομικής ταφής
$tct_{s,p}$	Ετήσιο κόστος δυναμικότητας των μεταφορών από το σταθμό μεταφοράς στη διεργασία p
$tcwte_{bd}$	Ετήσιο κόστος δυναμικότητας των μεταφορών από τη διεργασία BD στη WTE
$tcwte_{mbt}$	Ετήσιο κόστος δυναμικότητας μεταφοράς από τη διεργασία MBT

	στη WTE
$cpkmbin_p$	Λειτουργικό κόστος ανά km (€/km) για τη μεταφορά απορριμμάτων από τους κάδους στη διεργασία p
$cpkmldf_p$	Λειτουργικό κόστος ανά km (€/km) για τη μεταφορά απορριμμάτων από τη διεργασία p στο χώρο υγειονομικής ταφής
$cpkmts_p$	Λειτουργικό κόστος ανά km (€/km) για τη μεταφορά απορριμμάτων από το σταθμό μεταφοράς στη διεργασία p
$cpkmwte_p$	Λειτουργικό κόστος ανά km (€/km) για τη μεταφορά απορριμμάτων από τη διεργασία p στη WTE
$dpybin_p$	Απόσταση διαδρομής από τους κάδους στη διεργασία p διαιρούμενη με το ειδικό φορτίο του φορτηγού (km/tn)
$dpyldf_p$	Απόσταση διαδρομής από το χώρο υγειονομικής ταφής στη διεργασία p διαιρούμενη με το ειδικό φορτίο του φορτηγού (km/tn)
$dpyts_p$	Απόσταση διαδρομής από το σταθμό μεταφοράς στη διεργασία p διαιρούμενη με το ειδικό φορτίο του φορτηγού (km/tn)
$dpywte_p$	Απόσταση διαδρομής από τη διεργασία p στο WTE διαιρούμενη με το ειδικό φορτίο του φορτηγού (km/tn)
CRF	Συντελεστής ετήσιου ισοδύναμου
r	Προεξοφλητικό επιτόκιο
T	Χρονικός ορίζοντας της επένδυσης
ic_p	Κόστος επένδυσης της i μονάδας του p τύπου
aic_p	Ετήσιο κόστος επένδυσης της μονάδας i του p τύπου
$aicslope_p$	Κλίση της γραμμής που περιγράφει το aicp ως γραμμική συνάρτηση της αποδοτικότητας της διεργασίας p (€/tn)
$aicincpt_p$	Το σημείο τομής της γραμμής που περιγράφει το aicp ως γραμμική συνάρτηση της αποδοτικότητας της διεργασίας p (€)
cap_p^{max}	Μέγιστη χωρητικότητα για τις μονάδες του τύπου p σε tn/year
cap_p^{min}	Ελάχιστη χωρητικότητα για τις μονάδες του τύπου p σε tn/year
aic_p^{max}	Το ετήσιο κόστος της επένδυσης των μονάδων μέγιστης αποδοτικότητας τύπου p
aic_p^{min}	Το ετήσιο κόστος της επένδυσης των μονάδων μέγιστης

	αποδοτικότητας τύπου p
$aocslope_p$	Η κλίση της γραμμής του λειτουργικού κόστους θεωρούμενη ως γραμμική συνάρτηση της αποδοτικότητας της διεργασίας p
$aocincpt_p$	Σημείο τομής της γραμμής του λειτουργικού κόστους θεωρούμενη ως γραμμική συνάρτηση της αποδοτικότητας της διεργασίας p
$pvcost_p$	Μεταβλητό λειτουργικό κόστος της διεργασίας p (€/tn)
$pricerm_i$	Τιμή των ανακυκλώσιμων πρώτων υλών i
$priceout_o$	Τιμή της o εκροής
pricedf	Τιμή του παραγόμενου καυσίμου
pricel	Τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας
flare	Μερίδιο παραγόμενου μεθανίου που καίγεται

Μεταβλητές απόφασης

Συνεχείς μεταβλητές απόφασης

$W_{j,p,t}$	Ετήσια ποσότητα απορριμμάτων που μεταφέρονται από τον κάδο j στη διεργασία p την περίοδο t
$WTS_{p,t}$	Ετήσια ποσότητα απορριμμάτων που μεταφέρονται από το σταθμό μεταφοράς (TS) στη διεργασία p την περίοδο t
$WLDF_{p,ldf1}$	Ετήσια ποσότητα των απορριμμάτων που οδηγούνται από την p διεργασία στο χώρο υγειονομικής ταφής την περίοδο t
$WWTE_{p,t}$	Ετήσια ποσότητα παραγόμενων καυσίμων από την διεργασία p (= BD ή MBT) στη WTE την περίοδο t
$OUTBIN_{j,t}$	Ετήσια ποσότητα στον κάδο j την περίοδο t
$INPROC_{p,t}$	Ετήσια εισροή αποβλήτων στη διεργασία p την περίοδο t
$OUTPROC_{p,o,t}$	Ετήσια εκροή αποβλήτων o τύπου από τη διεργασία p την περίοδο t
$RECPROC_{p,i,t}$	Ετήσια ποσότητα ανακυκλωμένων υλικών i από τη διεργασία p την περίοδο t

$DF_{p,\ wte,i,t}$	Ετήσια ποσότητα υλικού i στα παραγόμενα καύσιμα που οδηγείται στη WTE από τη διεργασία p την περίοδο t
$DF_{p,sell,i,t}$	Ετήσια ποσότητα του i υλικού στο παραγόμενο καύσιμο που πωλείται από τη διεργασία p την περίοδο t
$ELPROD_{p,t}$	Ετήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τη διεργασία p την περίοδο t
$NCVDF_{p,t}$	Ετήσιο ενεργειακό περιεχόμενο του παραγόμενου καυσίμου από τη διεργασία p στη WTE την περίοδο t
$NCVMW_t$	Ετήσιο ενεργειακό περιεχόμενο του ρεύματος από τον κάδο των μικτών αποβλήτων στη WTE την περίοδο t
$CAP_{p,tt}$	Αποδοτικότητα της διεργασίας p την περίοδο t
$FCEMS_{f,e,t}$	Ετήσιες εκπομπές e τύπου από την κατανάλωση καυσίμου στη διεργασία από το καύσιμο την περίοδο t
$PREMS_{e,t}$	Ετήσιες εκπομπές e τύπου από τη διεργασία την περίοδο t
$DFEMS_{p,e,t}$	Ετήσιες εκπομπές e τύπου στη WTE από παραγόμενο καύσιμο από την p διεργασία την περίοδο t
$MWEMS_{e,t}$	Ετήσιες εκπομπές τύπου e στη WTE από το ρεύμα του κάδου μικτών απορριμμάτων την περίοδο t
$WTEEMS_{e,t}$	Ετήσιες εκπομπές τύπου e στη WTE την περίοδο t
$TREMS_{e,t}$	Ετήσιες εκπομπές τύπου e από τη μεταφορά την περίοδο t
$RSLDF_{i,t}$	Ετήσια ποσότητα των ανεπεξέργαστων αποβλήτων του υλικού i που διατίθεται στο χώρο υγειονομικής ταφής την περίοδο t
$TRSLDF_{i,t}$	Ετήσια ποσότητα των επεξεργασμένων αποβλήτων του υλικού i που διατίθεται στο χώρο υγειονομικής ταφής την περίοδο t
$MTHLDF_t$	Ποσότητα του εκπεμπόμενου CH_4 από την υγειονομική ταφή την περίοδο t
$MTH20_40LDF_t$	Ποσότητα του εκπεμπόμενου CH_4 από την υγειονομική ταφή κατά την περίοδο από το 20° χρόνο μέχρι τον 40°
$BNACAPEX_t$	Συνολικό ετήσιο κόστος της επένδυσης των κάδων κατά την περίοδο t
$TRANCAPEX_t$	Συνολικό ετήσιο κόστος αποδοτικότητας του συστήματος μεταφορών την περίοδο t

$TROPEX_t$	Συνολικό ετήσιο κόστος λειτουργίας του συστήματος μεταφορών την περίοδο t
$PRANCAPEX_t$	Συνολικό ετήσιο κόστος χωρητικότητας των εγκατεστημένων διεργασιών κατά την περίοδο t
$TROPEX_t$	Συνολικό ετήσιο κόστος λειτουργίας των διεργασιών κατά την περίοδο t
$RECINC_t$	Συνολικό ετήσιο εισόδημα από ανακυκλωμένα υλικά κατά την περίοδο t
$ELINC_t$	Συνολικό ετήσιο εισόδημα από την πώληση ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο την περίοδο t
$ANNCOST_t$	Συνολικό ετήσιο κόστος του συστήματος την περίοδο t
NPC	Καθαρό παρόν κόστος του συστήματος τα 20 χρόνια της μελέτης
$PRFLCO2EQ_t$	Ετήσιες εκπομπές ισοδύναμου- CO_2 από την κατανάλωση καυσίμου στις διεργασίες την περίοδο t
$PRCO2EQ_t$	Ετήσιες εκπομπές ισοδύναμου – CO_2 από τις διεργασίες την περίοδο t
$TRCO2EQ_t$	Ετήσιες εκπομπές ισοδύναμου – CO_2 από το σύστημα μεταφορών την περίοδο t
$LDFCO2EQ_t$	εκπομπές ισοδύναμου CO_2 από τον χώρο υγειονομικής ταφής την περίοδο t
LDF20_40CO2EQ	Εκπομπές ισοδύναμου- CO_2 από χώρους υγειονομικής ταφής κατά την περίοδο του $20^{ου}$ -$40^{ου}$ έτους
TOTCO2EQ	Συνολικές εκπομπές ισοδύναμου CO_2 από το σύστημα που προκαλείται από δραστηριότητες κατά την περίοδο της μελέτης

Ακέραιες Μεταβλητές

$N_{p,t}$	Αριθμός μονάδων της διεργασίας p εγκατεστημένη την περίοδο t

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

1. Εισαγωγή

1.1 Σκοπός

Σκοπός της εργασίας αυτής είναι η χρήση του Μαθηματικού Προγραμματισμού για τη βελτιστοποίηση του μοντέλου διαχείρισης στερεών αστικών απορριμμάτων (ΑΣΑ) στην περιοχή της Αττικής.

1.2 Γενικά

Η διαχείριση των Αστικών Στερεών Αποβλήτων (ΑΣΑ) αποτελεί ένα από τα πιο σύνθετα προβλήματα της σύγχρονης εποχής. Η κατάλληλη μέθοδος διαχείρισης απορριμμάτων έχει διάφορες πτυχές: πολιτικές, κοινωνικές, περιβαλλοντικές, οικονομικές και τεχνικές. Καθώς οι στόχοι κάθε συστήματος διαχείρισης ΑΣΑ διαφέρουν λίγο από χώρα σε χώρα, οι μέθοδοι που τους επιτυγχάνουν πρέπει να προσαρμόζουν στις συνθήκες κάθε φορά. Αυτοί οι παράγοντες εμπεριέχουν τη διαθεσιμότητα των τεχνικών, οικονομικών και ανθρώπινων πόρων. Δηλαδή δεν υπάρχει μία μοναδική και απόλυτη μέθοδος που μπορεί να επιτύχει τη βελτιστοποίηση του συστήματος διαχείρισης των ΑΣΑ κάτω από οποιεσδήποτε συνθήκες.

Ωστόσο υπάρχουν κοινές ανάγκες που πρέπει να καλυφθούν από όλες τις χώρες οι οποίες αποσκοπούν στη βέλτιστη διαχείριση των απορριμμάτων τους. Αυτές οι ανάγκες εμπεριέχουν ικανοποιητικό επίπεδο γνώσεων στον τομέα των τεχνολογιών για την αξιοποίηση των αποβλήτων, την ποσότητα των απορριμμάτων, τη σύστασή τους, ποιος τα παράγει και τις διεργασίες που απαιτούνται για να επιτευχθεί το τελικό αποτέλεσμα. Επίσης είναι απαραίτητο σε ένα τέτοιο σύστημα να προβλέπεται οποιαδήποτε τυχόν αλλαγή των συνθηκών και οι κατάλληλες μέθοδοι να ενσωματώνονται για την ομαλή λειτουργία του ανεξάρτητα για παράδειγμα με τα φυσικά φαινόμενα ή την ποσότητα των απορριμμάτων. Σε κάθε πόλη είναι πιθανόν να εξισώνεται το επίπεδο του συστήματος διαχείρισης ΑΣΑ με το επίπεδο ζωής των κατοίκων. Υψηλές προσδοκίες για το περιβάλλον σημαίνει ένα κατάλληλα σχεδιασμένο και εφαρμόσιμο σύστημα ΑΣΑ.

Εάν τα απορρίμματα που παράγονται από τους ανθρώπους στην καθημερινότητα δεν διαχειρίζονται κατάλληλα, υπάρχουν σοβαρές συνέπειες συμπεριλαμβανομένου των ανθρώπινων ασθενειών και τραυματισμών, τη μόλυνση του νερού, του αέρα και του εδάφους. Ειδικότερα στις αστικές περιοχές αυτές οι ανεπιθύμητες συνέπειες οδηγούν σε μία ζωή χαμηλής ποιότητας για όλους. Η κατάλληλη διαχείριση των απορριμμάτων που παράγονται από τις ανθρώπινες δραστηριότητες είναι ένας τρόπος να αποφευχθούν ή τουλάχιστον να μειωθούν καταστροφικές συνέπειες τόσο για τον ίδιο τον άνθρωπο όσο και για το περιβάλλον.

Ο κύριος στόχος των στρατηγικών διαχείρισης των στερεών αποβλήτων (MSW) είναι να αντιμετωπίσει προβλήματα υγείας, περιβαλλοντικά, αισθητικά, σε σχέση με τη χρήση της γης, των πόρων, και οικονομικά προβλήματα που συνδέονται με την ακατάλληλη διάθεση των αποβλήτων (Henry et al, 2006, Nemerow, 2009, Wilson, 2007). Τα θέματα αυτά είναι μια συνεχής ανησυχία για τα έθνη, τους δήμους, τις εταιρείες και τους ιδιώτες σε όλο τον κόσμο (Nemerow, 2009), και της διεθνής κοινότητας στο σύνολό της (Wilson, 2007). Στις αναπτυσσόμενες χώρες, τα απόβλητα που παράγονται είναι αφόρητα για τις τοπικές αρχές και τις εθνικές κυβερνήσεις όσο (Tacoli, 2012, Yousif και Scott, 2007). Περιορισμένα αποτελέσματα στη διαιώνιση και την επιδείνωση των ανισοτήτων έχουν ήδη παρατηρηθεί από τους πιο ευάλωτους πληθυσμούς (Konteh 2009, UNDP, 2010). Συστήματα αναλύσεις - μηχανικά μοντέλα, πλατφόρμες ανάλυσης και εργαλεία αξιολόγησης - έχουν εφαρμοστεί για να βοηθήσουν τα συστήματα διαχείρισης των ΑΣΑ στις ανεπτυγμένες χώρες από το 1960 (Chang et al., 2011). Αυτά τα μοντέλα συστημάτων έχουν χρησιμοποιηθεί τόσο ως εργαλεία υποστήριξης αποφάσεων για διαδικασίες σχεδιασμού, καθώς και για την παρακολούθηση και βελτιστοποίηση των υφιστάμενων συστημάτων ΑΣΑ. Ενώ ορισμένα εργαλεία ανάλυσης συστημάτων έχουν χρησιμοποιηθεί στις αναπτυσσόμενες χώρες (π.χ. βλ. Charnpratheep και Garner, 1997, Chang et al, 1997, Chang και Wang, 1996), τα περισσότερα μοντέλα αναπτύχθηκαν στον Καναδά και τις Ηνωμένες Πολιτείες (Chang et al., 2011). Ακόμη και στις ανεπτυγμένες χώρες, πριν από το 2000, πολύ λίγα μοντέλα εκτιμούσαν τις κοινωνικές πτυχές των συστημάτων διαχείρισης ΑΣΑ, γιατί ασχολούνταν αποκλειστικά με την οικονομικό και περιβαλλοντικό τομέα (Morrissey και Browne, 2004). Κανένας δεν σκέφτηκε να συμπεριλάβει όλους τους ενδιαφερόμενους φορείς, από την κυβέρνηση, τη βιομηχανία και τις υπηρεσίες δημόσιου και ιδιωτικού τομέα και κανένας δεν εξέτασε τον πλήρη κύκλο διαχείρισης των αποβλήτων, από την πρόληψη έως την τελική διάθεση (Morrissey και Browne, 2004). Μέχρι σήμερα, μερικά μοντέλα έχουν μια ολιστική προοπτική του συστήματος ΑΣΑ, τα περισσότερα έχουν επικεντρωθεί σε μεμονωμένα προβλήματα στο πλαίσιο του ευρύτερου συστήματος και έχουν μικρή χρησιμότητα για τους φορείς λήψης αποφάσεων (Chang et al, 2011, Shmelev και Powell, 2006).

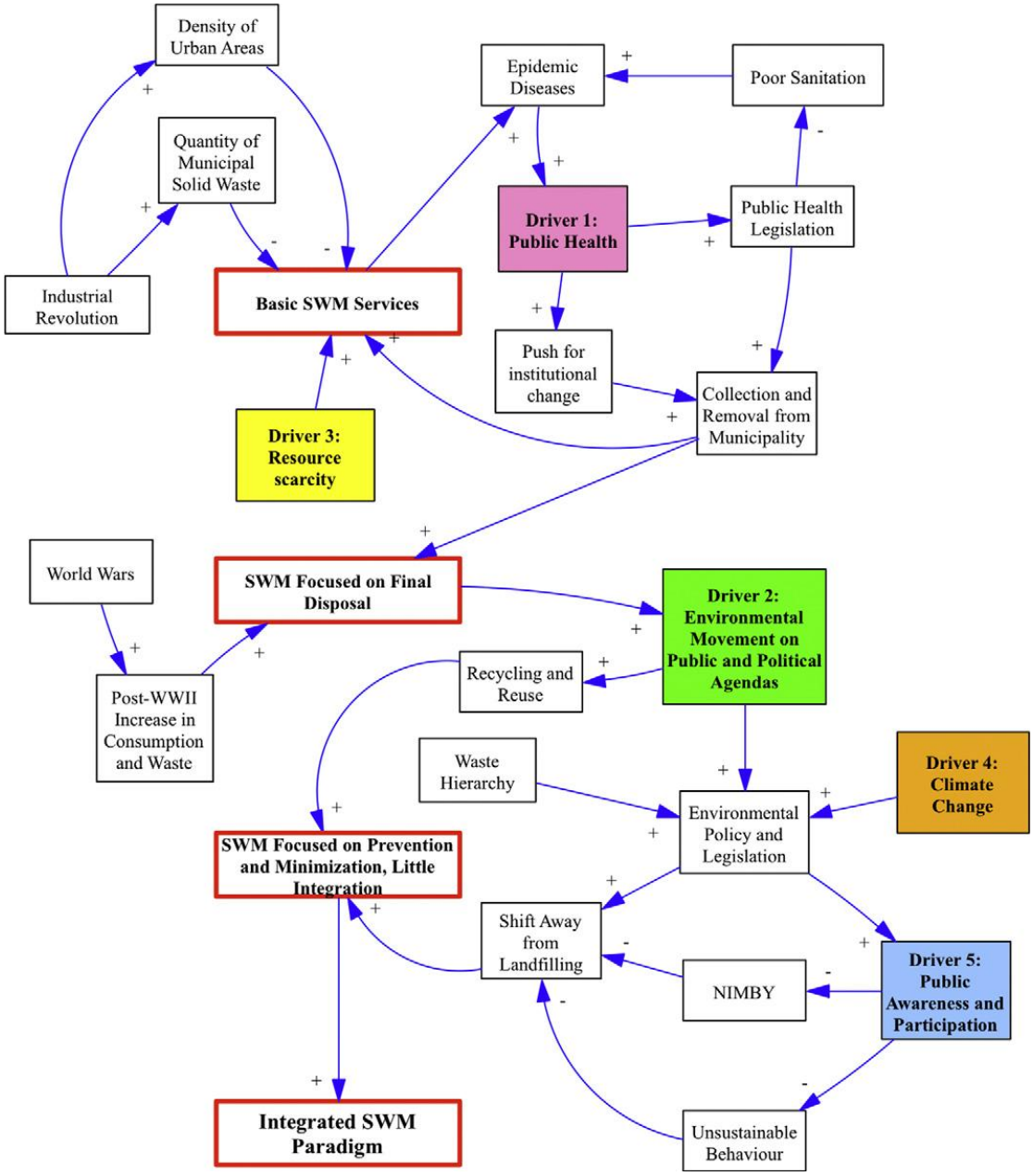
Ενώ σχεδόν όλες οι αναλύσεις των συστημάτων απέτυχαν να καταστρώσουν ένα συστήματα ΑΣΑ ευρείας αποδοχής, έχουν κάνει πιο φανερή την ανάγκη για ολιστικές, ενσωματωμένες μεθοδολογίες οι οποίες αποσκοπούν στη διασύνδεση των κοινωνικο-πολιτιστικών, περιβαλλοντικών, οικονομικών και τεχνικών σφαιρών. Η ανάγκη αυτή είναι ιδιαίτερα έντονη στις αναπτυσσόμενες χώρες, όπου η πολυπλοκότητα των συστημάτων ΑΣΑ είναι συχνά υψηλότερη για αρκετούς λόγους, και ο τομέας των ΑΣΑ είναι κατά κύριο λόγο απασχολημένος με την συλλογή και απομάκρυνση των υπηρεσιών (Wilson, 2007).

1.3 Ιστορική Αναδρομή των Συστημάτων Διαχείρισης των ΑΣΑ

Η ανθρωπότητα άρχισε την μαζική παραγωγή στερεών αποβλήτων από τότε που σχηματίστηκαν οι πρώτες μη νομαδικές κοινότητες γύρω στο 10.000π.Χ. Ιστορικά οι ανησυχίες για τη δημόσια υγεία, την ασφάλεια, τη σπανιότητα των πόρων και για αισθητικούς λόγους έδρασαν σαν καταλύτες για την ανάπτυξη συστημάτων διαχείρισης ΑΣΑ. Οι μικρές κοινότητες έθαβαν τα στερεά απόβλητα ακριβώς έξω από τους οικισμούς τους ή δίπλα σε ποτάμια, όμως, η αύξηση της πυκνότητας του πληθυσμού δεν επέτρεπε τη συνέχιση τέτοιων μεθόδων γιατί δεν εμπόδιζαν την εξάπλωση ούτε των δυσάρεστων οσμών, ούτε των ασθενειών (Seadon, 2006). Όσο αυξανόταν ο πληθυσμός ενός οικισμού τόσο αυξάνονταν και τα απόβλητα με αποτέλεσμα οι κοινότητες εκείνες να ζουν μέσα στα απορρίμματά τους.

Υπήρχαν βέβαια και κάποιες εξαιρέσεις όπως η αρχαία πόλη Mahenjo – Daro στην κοιλάδα του Ινδού ποταμού όπου από το 2000π.Χ. οι άνθρωποι είχαν οργανώσει μία υποτυπώδη διαδικασία για την διαχείριση των ΑΣΑ. Αντίστοιχα οι Έλληνες είχαν απαγορεύσει τη διάθεση των αποβλήτων στους δρόμους και αυτό θεωρήθηκε ως το πρώτο διάταγμα του δυτικού κόσμου που απαγόρευσε τις δημοτικές χωματερές το 500π.Χ (Melosi, 1981). Ενώ, υπήρχαν και πόλεις στην Κίνα το 200π.Χ που επέβαλαν νόμους για τα απόβλητα. Ωστόσο, όπως τόσο εύστοχα περιγράφουν οι Worrell και Vesilind (2012, p.1) «το μεγαλύτερο μέρος, οι άνθρωποι στις πόλεις το έζησαν μεταξύ αποβλήτων και εξαθλίωσης». Κάτι αντίστοιχο γινόταν τόσο στην αρχαία Αθήνα όσο και στη Ρώμη με ένα διάταγμα που απαγόρευε τη διάθεση αποβλήτων στους δρόμους.

Στο Μεσαίωνα θεωρείται πιθανόν μία από τις αιτίες ή τις προϋποθέσεις για την εξάπλωση της πανούκλας που έπληξε την Ευρώπη ήταν η συσσώρευση απορριμμάτων οργανικών αποβλήτων στους δρόμους (Louis, 2004, Tchobanoglous et al., 1977, Worrell and Vesilind, 2012). Στις αποικίες της Αμερικής, ο αστικός πληθυσμός ζούσε σε ανάλογες συνθήκες. Πολλές πρωτοβουλίες είχαν εφαρμοστεί για τον καθαρισμό τον δρόμο αλλά για μικρό χρονικό διάστημα, καθώς οι φτωχοί διαφωνούσαν γιατί ενδιαφερόντουσαν για το φαγητό τους και οι πλούσιου αρνούνταν να καταβάλουν χρήματα για να καθαριστούν οι δρόμοι για τους φτωχούς (Wilson, 2007). Όταν επιτέλους καθιερώθηκε η εφαρμογή των συστημάτων ΑΣΑ, κατευθύνθηκε γύρω από πέντε κύριους παράγοντες: τη δημόσια υγεία, το περιβάλλον, την έλλειψη πόρων και την αξία των αποβλήτων, την αλλαγή του κλίματος καθώς και την ευαισθητοποίηση του κοινού για συμμετοχή. [14] Αυτές οι κινητήριες δυνάμεις και η πρόοδος που υποκίνησαν απεικονίζεται στην Εικόνα 1.1 Οδηγοί και εξέλιξη ΑΣΑ:



Εικόνα 1. 1 Οδηγοί και εξέλιξη ΑΣΑ [14]

1.4 Οι Υποχρεώσεις του Ρυπαίνοντος

Η σωστή διαχείριση των αστικών, στερεών απορριμμάτων ξεκινάει από τον ρυπαίνοντα. Σε σύγκριση με τα βιομηχανικά απόβλητα, τα αστικά από μόνα τους είναι πιο ομογενοποιημένα οπότε η διαχείρισή τους γίνεται σχετικά ευκολότερη. Εντούτοις, έρευνες δείχνουν ότι τα οικιακά απορρίμματα ποικίλουν στη σύστασή τους ανάλογα με την εποχή του χρόνου π.χ. τα απορρίμματα τους καλοκαιρινούς μήνες μπορεί να είναι διαφορετικά από αυτά των χειμερινών. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι τα αστικά απορρίμματα των αναπτυγμένων χωρών είναι εντελώς διαφορετικά σε σύσταση, πυκνότητα και βιοδιάσπαση από αυτά του αναπτυσσόμενου κόσμου. Αυτό το γεγονός μπορεί να έχει σημαντικές συνέπειες στη βιωσιμότητα των

διεργασιών επεξεργασίας οι οποίες λειτουργούν επιτυχώς στον ανεπτυγμένο κόσμο, αν πρόκειται να μεταφερθούν στις αναπτυσσόμενες χώρες.

Επιπλέον, μπορεί να είναι ευκολότερο να προβλέπονται οι αλλαγές στην ποσότητα των απορριμμάτων ως συνέπεια σχεδιασμένων ή προβλέψιμων πληθυσμιακών μετακινήσεων. Αν και η ποσότητά τους επηρεάζεται και από την ανακύκλωση και την αγορά των αγαθών. Ταυτόχρονα, η σύσταση των ΑΣΑ μπορεί να αλλάξει όσο αλλάζουν ο ατομικός πλούτος, οι μέθοδοι συσκευασιών, μέθοδοι θέρμανσης και μαγειρικής κλπ. [13]

1.5 Σύστημα ΑΣΑ και Μαθηματικός Προγραμματισμός

Όλες οι διαθέσιμες τεχνολογίες και διεργασίες του συστήματος διαχείρισης των ΑΣΑ εκφράζονται στο μοντέλο με τις κατάλληλες σχέσεις (ισότητες και ανισότητες). Το μοντέλο αποτελείται από τις μεταβλητές απόφασης, τις παραμέτρους, τους περιορισμούς και τις αντικειμενικές συναρτήσεις. Με τη βελτιστοποίηση του συγκεκριμένου μοντέλου επιτυγχάνεται η εύρεση των βέλτιστων λύσεων για τις μεταβλητές απόφασης με τη χρήση μαθηματικών μεθόδων προγραμματισμού.

Ο Μαθηματικός Προγραμματισμός αποτελεί το ιδανικό εργαλείο για τέτοιες προσεγγίσεις. Η μοντελοποίηση του προβλήματος και η επίλυση του, δηλαδή η εύρεση της βέλτιστης λύσης, δίνει στον αποφασίζοντα τη δυνατότητα μιας σφαιρικής αντιμετώπισης και εξέτασης πολλών σεναρίων. Στη διαχείριση των ΑΣΑ ο μαθηματικός προγραμματισμός έκανε την εμφάνισή του στη δεκαετία του ’70 και έκτοτε έχουν παρουσιαστεί εκατοντάδες εφαρμογές.

Δανειζόμενος κανείς ιδέες από το πεδίο της σύνθεσης διεργασιών στη χημική μηχανική, μπορεί να διατυπώσει το πρόβλημα ως ένα δομικό, σχεδιαστικό, λειτουργικό και πολύ-περιοδικό πρόβλημα αριστοποίησης. Έτσι, επιτυγχάνεται μια ταυτόχρονη βελτιστοποίηση του συστήματος Α.Σ.Α σε δομικό, σχεδιαστικό, λειτουργικό και χρονικό επίπεδο. Δηλαδή, η έξοδος του μοντέλου είναι ποια τεχνολογία επεξεργασίας θα χρησιμοποιηθεί και ποιες διαδρομές θα ακολουθηθούν για το δεδομένο σύστημα διαχείρισης (δομικό επίπεδο), ποια είναι η δυναμικότητα των μονάδων αυτών (σχεδιαστικό επίπεδο) και ποιες είναι οι ροές (ποσότητα) από και προς τις μονάδες (λειτουργικό επίπεδο). Τα παραπάνω γίνονται σε χρονικό ορίζοντα 20 χρόνων, χωρισμένο σε 4 περιόδους, οπότε το μοντέλο προτείνει και τη χρονική περίοδο εισαγωγής μιας μονάδας στο σύστημα διαχείρισης (χρονικό επίπεδο).

Το μοντέλο είναι πολυπεριοδικό που σημαίνει ότι έχει ένα δυναμικό στοιχείο που εξελίσσεται με το χρόνο ακολουθώντας το σενάριο για την ποσότητα των παραγόμενων ΑΣΑ. Τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης αναφέρονται σε κάθε περίοδο του χρόνου και υπάρχουν περιορισμοί μεταξύ περιόδων που προσδιορίζουν ποσοτικά τις σχετικές συνδετικές σχέσεις. Το μοντέλο αναπτύσσεται και επιλύεται με τη χρήση της ευρέως γνωστής γλώσσας μοντελοποίησης GAMS (General, Algebraic Modeling System).[18]

Η σημερινή διαχείριση των στερεών αποβλήτων από τις περιφερειακές και δημοτικές αρχές περιλαμβάνει προβλήματα σχεδιασμού που είναι ριζικά διαφορετικά από αυτά που αντιμετωπιζόντουσαν μέχρι τώρα. Η συνειδητοποίηση των περιβαλλοντικών προβλημάτων έχει αναγκάσει τις κυβερνήσεις, τις τοπικές αρχές και τις επιχειρήσεις διαχείρισης αποβλήτων να αναζητήσουν νέες τεχνικές και οργανωτικές λύσεις για το μέλλον των συστήματα διαχείρισης των απορριμμάτων. Όμως, ενώ η περιβαλλοντική ανησυχία αυξάνεται όλο και περισσότερο αναιρώντας το οικονομικό κριτήριο ως το μοναδικό κριτήριο για τη λήψη αποφάσεων, εντούτοις, τα περιβαλλοντικά οφέλη δεν μπορούν να αποτιμηθούν εύκολα και άμεσα προκειμένου να ενσωματωθούν σε μία αντικειμενική συνάρτηση. Γι' αυτό ένας ολοκληρωμένος σχεδιασμός συστήματος ΑΣΑ απαιτεί την επίτευξη τόσο των οικονομικών στόχων, όσο και των περιβαλλοντικών και κοινωνικών στόχων.[11]

Συνεπώς στα πλαίσια του Μαθηματικού Προγραμματισμού (Mathematical Programming -MP) η βελτιστοποίηση πολλαπλών στόχων γίνεται μέσω Πολυκριτηριακού Μαθηματικού Προγραμματισμού (Multi – Objective Mathematical Programming –MOPM). Η κύρια διαφορά μεταξύ απλής και πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης είναι ότι στην περίπτωση της τελευταίας, συνήθως δεν υπάρχει μία βέλτιστη λύση, αλλά ένα σύνολο εξίσου καλών εναλλακτικών λύσεων, επίσης γνωστών ως Pareto-βέλτιστων λύσεων. Οι Pareto βέλτιστες λύσεις είναι οι εφικτές λύσεις του προβλήματος, που δεν μπορούν να βελτιωθούν κατά τη μία αντικειμενική συνάρτηση χωρίς να μειωθούν οι επιδόσεις τους στην άλλη αντικειμενική συνάρτηση. Ελλείψει οποιασδήποτε άλλης πληροφορίας, καμία από αυτές τις λύσεις δεν μπορεί να ληφθεί ως η καλύτερη. Συνήθως στην απόφαση οι ιθύνοντες είναι απαραίτητοι για να εντοπίσουν την «προτιμώμενη» («βέλτιστη» σύμφωνα με τις υποκειμενικές προτιμήσεις του αποφασίζοντα) λύση.

1.6 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Οι πρώτες προσπάθειες για την εφαρμογή του Μαθηματικού Προγραμματισμού στη διαχείριση των Αστικών Στερεών Αποβλήτων (ΑΣΑ) εμφανίζονται τη δεκαετία του '70 (βλ. Gottinger, 1988, Pires et al 2011). Επί το πλείστον είχαν ασχοληθεί με την τοποθεσία και τα προβλήματα μεταφοράς. Το κριτήριο βελτιστοποίησης ήταν, στις περισσότερες περιπτώσεις, η ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους. Από τα μέσα της δεκαετίας του '90, μεγάλο μέρος της βιβλιογραφία εμφανίζει προβλήματα αβεβαιότητάς των παραμέτρων, ιδιαίτερα στην παραγωγή αποβλήτων, χρησιμοποιώντας ασαφείς και στοχαστικές παραμέτρους (βλ. π.χ. Huang et al, 1995,Cheng et al, 2003, Li et al, 2008, Li et al, 2009, Guo and Huang, 2009, Li et al, 2012). Υπάρχουν, επίσης, μοντέλα και μελέτες περιπτώσεων με τις εφαρμογές του ΜΠ για διάφορες περιοχές σε όλο τον κόσμο, όπως π.χ. στο Μόναχο-Γερμανία (Gottinger, 1988), στο Γκέτεμποργκ- Σουηδία (J.Sundberg, P Gipperth and C.O Wene, 1993), στο Πεκίνο-Κίνα (Xi et al. 2010), στο Foshan- Κίνας (Jing et al, 2009, Su et al. 2010), στη Ρετζίνα-Καναδά (Li και Huang, 2006, Guo and Huang, 2010), στη Θράκη-Ελλάδα (Chatzouridis και Κομίλης, 2012), στο Port Said της Αιγύπτου (Badran και El-Haggar, 2006), στο Alleghany County-ΗΠΑ (Louis και

Shih, 2007). Περιγραφές ειδικού λογισμικού έχουν βρεθεί, επίσης, στη βιβλιογραφία (βλ. π.χ. Abu Najm και El-Fadel, 2004). Από τα πρώτα στάδια έγινε φανερό ότι το κριτήριο του κόστους δεν είναι το μόνο που εμπεριέχεται σε μια ολοκληρωμένη σχεδίαση διαχείρισης ΑΣΑ. Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις μπορεί να μετακινούνται από τους περιορισμούς στις αντικειμενικές συναρτήσεις, αναπτύσσοντας μία πολυ-κριτηριακή προσέγγιση για το πρόβλημα της διαχείρισης των ΑΣΑ. Έργα με βάση μια τέτοια προσέγγιση βρέθηκαν από τους Perlack και Willis (1985), Su et al. (2008), Minciardi et al. (2008) και Galante et al. (2010), Lu et al. (2009) μεταξύ άλλων.

1.7 Δομή Διπλωματικής

Στο δεύτερο κεφάλαιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας πραγματοποιείται περιγραφή των τεχνολογιών και διεργασιών που χρησιμοποιούνται για τη διαχείριση των ΑΣΑ. Στο επόμενο κεφάλαιο παρουσιάζεται το μεθοδολογικό μέρος της εργασίας και αναλύεται η μέθοδος του Πολυκριτηριακού Μαθηματικού Προγραμματισμού που χρησιμοποιείται στη συγκεκριμένη εργασία. Στο τέταρτο κεφάλαιο περιγράφεται η ανάπτυξη του μοντέλου συμπεριλαμβανομένων όλων των παραμέτρων, των εξισώσεων και των μεταβλητών. Στη συνέχεια, στο κεφάλαιο 5 παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα του βασικού μοντέλου και αυτά των παραλλαγών. Τέλος, στο κεφάλαιο 6 αποτυπώνονται τα συμπεράσματα της μεθόδου.

Κεφάλαιο 2

2 Τεχνικές Επεξεργασίας

2.1 Εισαγωγή

Η διαχείριση των αστικών στερεών αποβλήτων συνεπάγεται μετασχηματισμούς των χαρακτηριστικών τους, πριν και μετά την προσωρινή εναπόθεσή τους σε σακούλες ή σε κοινόχρηστους κάδους για αποκομιδή. Κάθε σύστημα διαχείρισης ΑΣΑ είναι ένας συνδυασμός επεξεργασιών, το οποίο αποσκοπεί στην εκμετάλλευση της χωρητικότητας του φυσικού περιβάλλοντος να απορροφήσει απόβλητα χωρίς υπέρβαση των κοινωνικά αποδεκτών ορίων για την ποιότητά του. Με άλλα λόγια, αποσκοπεί στην ελαχιστοποίηση των αρνητικών περιβαλλοντικών επιπτώσεων, οι οποίες συνοδεύουν κάθε επεξεργασία. Καμία από τις μεθόδους διαχείρισης δεν είναι τέλεια και καμία δεν είναι καταστροφική.[28]

Σύμφωνα με τις βασικές αρχές της περιβαλλοντικής πολιτικής και νομοθεσίας, η ολοκληρωμένη διαχείριση των απορριμμάτων και γενικά των αποβλήτων, πρέπει να αναπτύσσεται με βάση τα εξής στάδια (με φθίνουσα σειρά προτεραιότητας):

- Πρόληψη παραγωγής αποβλήτων
- Μείωση παραγόμενης ποσότητας ή/και ρυπαντικού φορτίου
- Ανάκτηση υλικών με σκοπό την ανακύκλωση ή την επαναχρησιμοποίησή τους
- Ανάκτηση ενέργειας
- Αποτελεσματική επεξεργασία των αποβλήτων μετά την εφαρμογή διαδικασιών ανάκτησης
- Υγειονομική ταφή των υπολειμμάτων που προκύπτουν από τις παραπάνω διεργασίες [32]

2.2 Παραγωγή και επεξεργασία στην πηγή

Σύμφωνα με τη νομοθεσία, η παραγωγή αποβλήτων αποτελεί μορφή ρύπανσης και, κατά συνέπεια, ο σχεδιασμός ενός συστήματος ΑΣΑ υποχρεούται να αναφερθεί σε μεθόδους και στόχους μείωσης της παραγωγής τους. Οπότε η πρόληψη και η μείωση είναι δύο έννοιες αλληλένδετες. Η μείωση προϋποθέτει ένα διαφορετικό από το σημερινό πλαίσιο κοινωνικής συμπεριφοράς και ενεργού συμμετοχής των πολιτών. Η Αρχή της Ευθύνης του Παραγωγού είναι μία σύγχρονη θεώρηση που δημιουργεί ελπίδες. Ο παραγωγός του προϊόντος πρέπει να εσωτερικεύει τις δαπάνες που το προϊόν – και κυρίως η συσκευασία του – δημιουργεί μέχρι την τελική και περιβαλλοντικά αποδεκτή διάθεση του προϊόντος και της συσκευασίας του ως απόβλητο. Εκτιμάται ότι, στη χώρα μας, το 20% των ΑΣΑ αντιστοιχεί σε συσκευασίες. Παρακάτω αναφέρονται αναλυτικά τα συστατικά των αποβλήτων που μελετήθηκαν στη συγκεκριμένη εργασία. [29], [31]

Τα συστήματα παραγωγής, επεξεργασίας στην πηγή, και προσωρινής αποθήκευσης σε κάδους παρουσιάζουν διαχειριστικές επικαλύψεις. Πριν τα οικιακά ή τα εμπορικά στερεά απόβλητα μεταφερθούν 'έξω από το κτήριο', είναι δυνατόν να υπόκεινται σε επεξεργασία που επηρεάζει τις επόμενες φάσεις διαχείρισης. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται μετασχηματισμός και μείωση των απορριπτόμενων, αλλά όχι μείωση των παραγόμενων ΑΣΑ. Εν γένει, η ποσότητα παραγόμενων ΑΣΑ δεν ταυτίζεται με την ποσότητα των συλλεγόμενων. Το ποσοστό των παραγόμενων ΑΣΑ που δεν συλλέγεται εκτιμάται ότι είναι κάτω του 10% (στις αστικές περιοχές είναι μικρότερο από τις αγροτικές). Επισημαίνεται ότι οι εκτιμήσεις των ποσοτήτων των ΑΣΑ γίνονται κατά κανόνα με βάση τα απορριπτόμενα και όχι τα παραγόμενα στις πηγές.

Διαχωρισμός στην πηγή ήδη γίνεται ευρέως για τα ογκώδη αντικείμενα και για ορισμένες συσκευασίες. Η πρακτική αυτή εντείνεται καθώς αναπτύσσονται νομοθετικές και οικονομικές πιέσεις, οι οποίες μάλιστα μπορεί να αποσκοπούν μόνο στο διαχωρισμό και την απόσυρση, χωρίς επαναχρησιμοποίηση, ορισμένων συστατικών. [35]

Εικόνα 2. 1 Διαχωρισμός στην πηγή [35]

Εικόνα 2. 2 Διαχωρισμός στην πηγή [35]

2.3 Συλλογή και Μεταφορά

Το σύστημα προσωρινής αποθήκευσης και το σύστημα συλλογής και μεταφοράς είναι δύο υποσυστήματα της διαχείρισης των ΑΣΑ με τα οποία έρχεται κατ' εξοχήν σε επαφή ο πολίτης και δια μέσου των οποίων εν πολλοίς αξιολογεί όλο το σύστημα διαχείρισης.

Το σύστημα προσωρινής αποθήκευσης είναι η πρώτη επαφή του πολίτη με το σύστημα διαχείρισης ΑΣΑ. Τα απόβλητα τοποθετούνται προσωρινά και μέχρι να αποκομιστούν σε πλαστικές ή χάρτινες σακούλες, σε ιδιόκτητους μη τυποποιημένους κάδους, ή σε κοινόχρηστους κάδους. Η μέθοδος προσωρινής αποθήκευσης επηρεάζει τα χαρακτηριστικά των προς διαχείριση (στις επόμενες φάσεις αποβλήτων), την επίδοση των παράλληλων συστημάτων συλλογής και διάθεσης, αλλά και την επίδοση του όλου συστήματος. (κόστος, δημόσια υγεία, κοινωνική αποδοχή κτλ.)

Οι παράγοντες που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη για τη διαμόρφωση του συστήματος προσωρινής αποθήκευσης είναι:

- Επιπτώσεις στα συστατικά υλικά των ΑΣΑ
- Τύποι και μεγέθη των κάδων
    - Το είδος των ΑΣΑ
    - Το σύστημα συλλογής
    - Τη συχνότητα συλλογής
    - Το διαθέσιμο χώρο
- Χωροθέτηση κάδων
- Δημόσια υγεία και αισθητική
- Τύπος και μέγεθος των απορριμματοφόρων οχημάτων

Στο σύστημα συλλογής και μεταφοράς αντιστοιχεί το μεγαλύτερο ποσοστό της δαπάνης διαχείρισης ΑΣΑ. Από οικονομική άποψη, είναι το πλέον σημαντικό υποσύστημα όχι όμως και από πλευράς περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Στόχος του είναι η συλλογή των απορριπτόμενων ΑΣΑ και η μεταφορά τους σε προκαθορισμένους χώρους κατά τρόπο που ισορροπεί τις δαπάνες και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

Εικόνα 2. 3 Χώρος προσωρινής απόθεσης [35]

Οι παραγόμενες ποσότητες σε διάστημα ισοδύναμων ημερών (το διάστημα προσδιορίζεται από τη συχνότητα συλλογής) έχουν άμεση επίπτωση τόσο στην αναγκαία συνολική χωρητικότητα των κάδων όσο και στην αναγκαία συνολική χωρητικότητα του συστήματος συλλογής και μεταφοράς. Για παράδειγμα, αν η εισροή είναι σταθερή, τότε η συσσώρευση αυξάνεται καθώς η εκροή μειώνεται. Αύξηση της συσσώρευσης σημαίνει αύξηση των αναγκαίων κάδων και της αντίστοιχης δαπάνης. [35]

2.4 Βιοεπεξεργασία ΑΣΑ

Η βιολογική επεξεργασία των ΑΣΑ πριν από την τελική τους εδαφική διάθεση αποτελεί μια βασική εναλλακτική επιλογή στο σύστημα διαχείρισης ΑΣΑ και αποσκοπεί στην εκτροπή ή/και στην ανάκτηση κομπόστ και/ή ενέργειας. Διακρίνεται σε αερόβια (κομποστοποίηση), από την οποία προκύπτει το κομπόστ και σε αναερόβια (χώνευση), από την οποία ανακτάται βιοαέριο. Η νομοθεσία φαίνεται να επιβάλλει τη βιοεπεξεργασία, όμως, το πρόβλημα είναι όταν η βιοεπεξεργασία συσχετιστεί με την αξιοποίηση και εκμετάλλευση του προϊόντος (του κομπόστ ή του βιοαερίου). Δεδομένων των σημερινών συνθηκών, η βιοεπεξεργασία δεν είναι μια συμφέρουσα οικονομικά επιλογή. Βέβαια εκτός των οικονομικών, υπάρχουν και κριτήρια βιωσιμότητας. Προϋπόθεση βιολογικής επεξεργασίας είναι ο διαχωρισμός του βιοαποδομήσιμου κλάσματος, ο οποίος γίνεται είτε στην πηγή, οπότε η

εγκατάσταση βιοεπεξεργασίας είναι ¨αυτοδύναμη¨ ή σε εγκαταστάσεις μηχανικού διαχωρισμού (ΕΜΔ) οπότε η βιοεπεξεργασία αποτελεί συνέχεια του μηχανικού διαχωρισμού. [35]

2.4.1 Κομποστοποίηση

Η κομποστοποίηση είναι η ελεγχόμενη (ως προς τον αερισμό, την υγρασία, το λόγο άνθρακα/άζωτο (C/N), το pH και τη θερμοκρασία) βιοξείδωση ετερογενών οργανικών υλικών, όπου ετερογενείς και κυρίως ετερότροφοι μικροοργανισμοί (βακτήρια, μύκητες) βιοαποδομούν οργανικές ενώσεις. Κύρια προϊόντα της κομποστοποίησης είναι το νερό, CO_2, αλλά κυρίως το κομπόστ, το οποίο είναι ένα πλούσιο σε οργανική ουσία υλικό, με υψηλό χουμικό περιεχόμενο. Ανεπιθύμητα 'παραπροϊόντα' είναι οι οσμές, ο θόρυβος, οι σκόνες, παθογόνοι μικροοργανισμοί, πτητική οργανική ύλη, στραγγίσματα κ.α.

Το κομπόστ χρησιμοποιείται (εφόσον πληροί τις προβλεπόμενες από την νομοθεσία ποιοτικές προδιαγραφές) ως εδαφοβελτιωτικό (ιδιαίτερα για αμμώδη, αργιλώδη, όξινα, πορώδη και ασβεστώδη εδάφη) ή ως υπόστρωμα για την καλλιέργεια φυτών. Αν ο στόχος της βιοεπεξεργασίας είναι απλώς η μείωση των ποσοτήτων στο ΧΥΤΑ χωρίς άλλη χρήση για το προϊόν, τότε αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για κάλυψη των ημερήσιων κελιών του ΧΥΤΑ (οπότε η ποιότητά του δεν έχει σημασία). Κατά τη διάρκεια της κομποστοποίησης, έχουμε 'απώλεια' μάζας της τάξης του 50%. [39]

Εικόνα 2. 4 Μονάδα ανακύκλωσης – κομποστοποίησης Καλαμάτας (γενική άποψη) [35]

Εικόνα 2. 5 Εγκατάσταση Καλαμάτας – κομποστοποίηση [35]

2.4.1.1 Τεχνολογίες κομποστοποίησης

Όλες οι γνωστές τεχνολογίες κομποστοποίησης των οργανικών υλικών αποσκοπούν στη δημιουργία του βέλτιστου περιβάλλοντος για την ανάπτυξη των μικροοργανισμών που είναι υπεύθυνοι για την επιτυχή εφαρμογή της μεθόδου, ενώ η κύρια παράμετρος που επηρεάζεται από την τεχνολογία και με βάση την οποία σχεδιάζονται τα συστήματα είναι η διαθεσιμότητα του οξυγόνου.

Η αρχική ταξινόμηση των τεχνολογιών βασίζεται στο γεγονός εάν το προς κομποστοποίηση υλικό τοποθετείται σε κλειστό αντιδραστήρα ή όχι. Στη συνέχεια, τα διάφορα συστήματα ταξινομούνται ανάλογα με το είδος του αντιδραστήρα, το μηχανισμό τροφοδοσίας των υλικών, τη διαστρωμάτωση του υλικού στον αντιδραστήρα και τη μέθοδο παροχής αέρα. Γενικά, οι εναλλακτικές τεχνολογίες/ συστήματα κομποστοποίησης μπορούν να ταξινομηθούν ως εξής: [24]

Ι. Ανοικτά συστήματα

Α. Αναδευόμενα στρώματα (agitated solids bed system)

α. Με φυσικό αερισμό

β. Με δυναμικό αερισμό

Β. Στατικά Στρώματα (static solids bed system)

α. Με φυσικό αερισμό

β. Με δυναμικό αερισμό

ΙΙ. Κλειστά συστήματα (αντιδραστήρες)

Α. Κατακόρυφοι αντιδραστήρες

1. Προωθούμενα και αναδευόμενα στρώματα

α. σε πολλαπλές κλίνες

β. σε πολλαπλά επίπεδα ή ζώνες

Β. Οριζόντιοι και κεκλιμένοι αντιδραστήρες

1. Περιστρεφόμενα στρώματα (περιστροφικά τύμπανα ή κλίνες)

α. Με ροή διασποράς

β. Με εν σειρά τμήματα

γ. Με πλήρη ανάμιξη

2. Αναδευόμενα στρώματα (Αναδευόμενα τμήματα, ανοικτά κανάλια)

α. Κυκλικού σχήματος

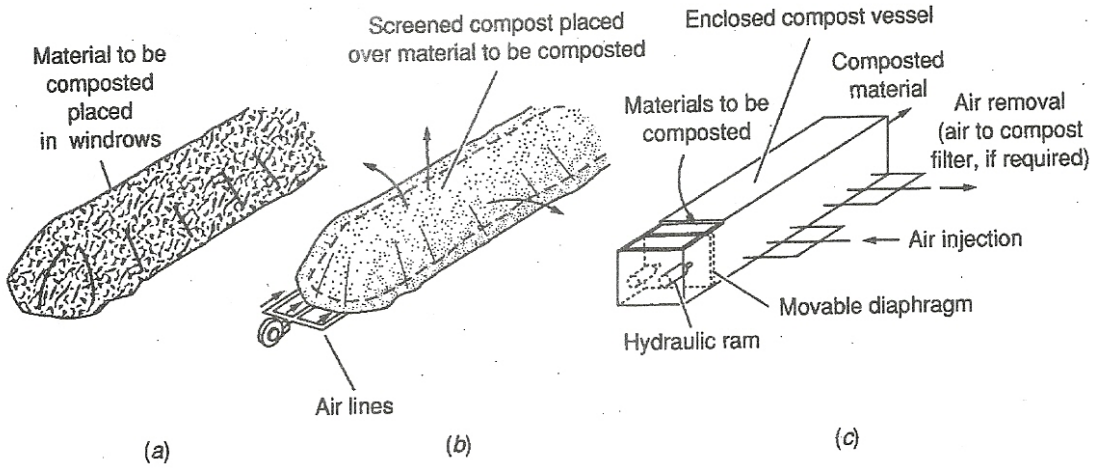
β. Ορθογώνιου σχήματος

3. Στατικά στρώματα (σχήμα τούνελ)

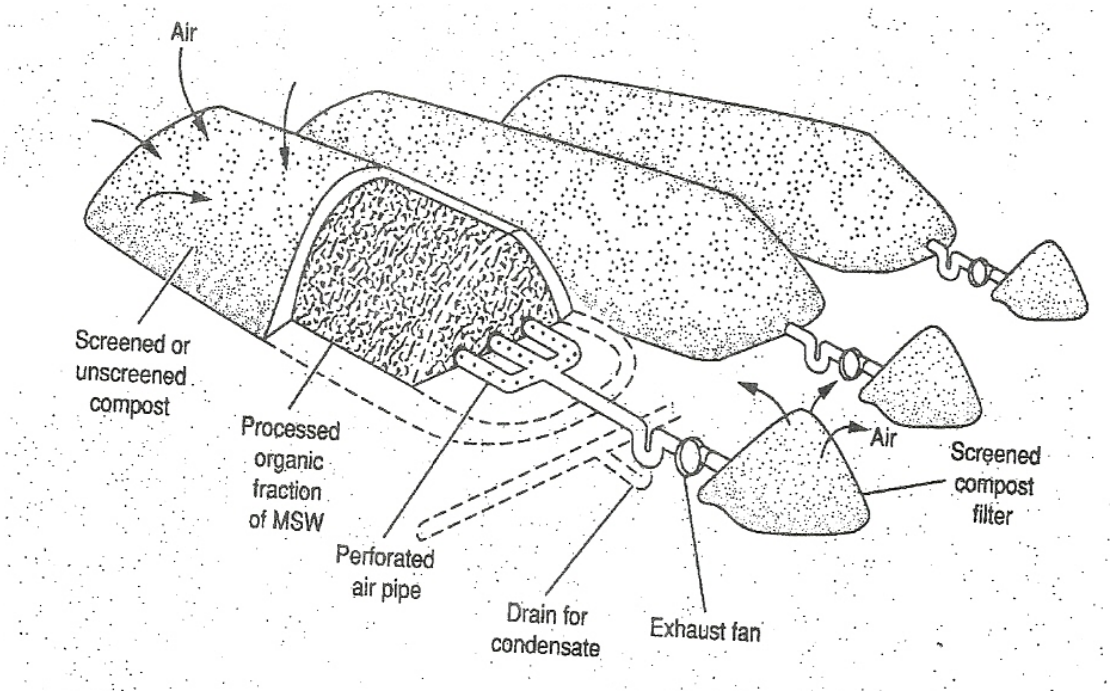
α. Τύπος πλάκας πίεσης

β. Τύπος κυλιόμενου δαπέδου

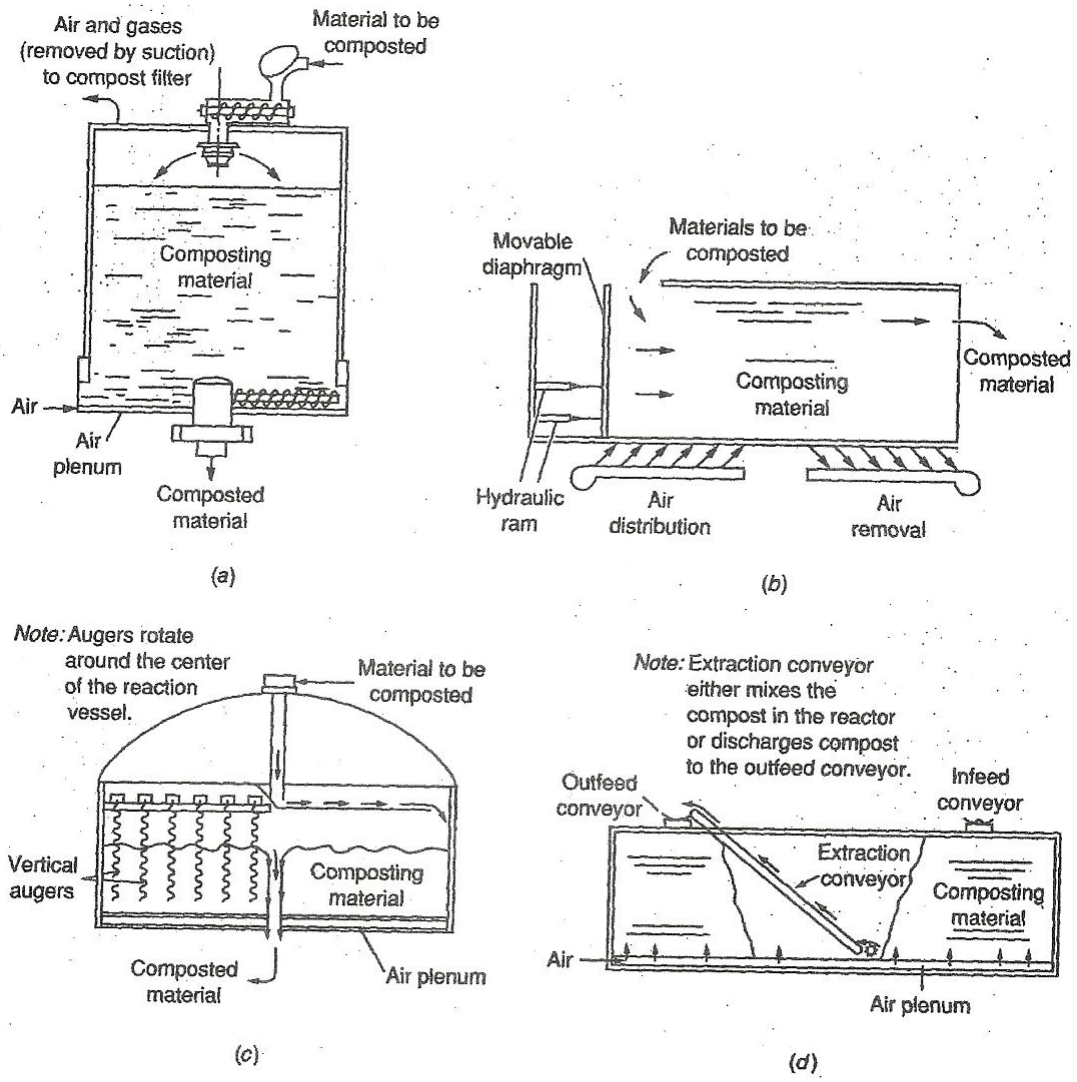
Γ. Αντιδραστήρες ασυνεχούς λειτουργίας



Εικόνα 2. 6 Τεχνικές βιοσταθεροποίησης: σύστημα σειραδίων (a), σύστημα αεριζόμενου στατικού σωρού (b), κλειστός βιοαντιδραστήρας (c) [24]



Εικόνα 2. 7 Βιοσταθεροποίηση σε στατικούς σωρούς [24]



Εικόνα 2. 8 Τύποι κλειστών βιοαντιδραστήρων: βιοαντιδραστήρας κάθετης ομαλής ροής (a), οριζόντιας ομαλής ροής (b), κάθετης δυναμικής ροής (c) και οριζόντιας δυναμικής ροής (d) [24]

Τα στατικά ανοικτά συστήματα επιτυγχάνουν τον αερισμό της μάζας με φυσικό αερισμό ή δυναμική εισαγωγή αέρα από το περιβάλλον, χωρίς ανάδευση του υλικού. Το οργανικό υπόστρωμα συνήθως εμπλουτίζεται με κάποιο διογκωτικό μέσο (π.χ. πριονίδι), ώστε να παρέχεται δομική σταθερότητα, διαμορφώνεται σε σωρό και εγκαθίσταται σύστημα αερισμού εμφύσησης ή απορρόφησης, ή εναλλαγή των δύο.

Στις στατικές συνθήκες, ο αερισμός γίνεται με προδιαγεγραμμένη περιοδική ανάδευση του υποστρώματος, το οποίο έχει τοποθετηθεί σε διάφορους γεωμετρικούς σχηματισμούς ύψους μέχρι 2,5m, σε κανάλια ή ελεύθερα. Ο επιλεγόμενος σχηματισμός εξαρτάται από τις κλιματολογικές συνθήκες, το σύστημα ανάδευσης και τη συχνότητα ανάδευσης. Ένας τυπικός σχηματισμός είναι σειράδια, ελεύθερα ή σε κανάλια, μήκους μέχρι και 100m και πλάτους έως και 5m. Ο αναγκαίος χρόνος παραμονής κυμαίνεται από 3 έως 4 εβδομάδες, ενώ για την ωρίμανση χρειάζονται επιπλέον 4-6 εβδομάδες.

Αντίθετα, τα αναδευόμενα ανοικτά συστήματα βασίζουν την παροχή του απαραίτητου οξυγόνου για τις διεργασίες κυρίως στην τακτική ανάδευση (αναστροφή) του υλικού, ενώ μπορεί να προβλέπεται παροχή αέρα από το περιβάλλον με ιδιαίτερο σύστημα αερισμού. Το οργανικό υλικό τοποθετείται σε σειράδια, που υπόκεινται σε περιοδική ανάδευση από ειδικά μηχανήματα. Η παροχή οξυγόνου λαμβάνει χώρα κατά κύριο λόγο με φυσικό αερισμό που προκαλείται από τον θερμό και ελαφρύ αέρα των σειραδιών, αλλά και από εναλλαγή αέρα κατά την ανάδευση. Στα αναδευόμενα σειράδια με δυναμικό αερισμό, η προσφορά οξυγόνου υποβοηθείται από την εμφύσηση ή απορρόφηση αέρα από ειδικό εξοπλισμό.

Οι κλειστοί αντιδραστήρες εφαρμόζουν μηχανικά συστήματα για την επίτευξη: α) δυναμικού αερισμού, β) ανάδευσης ή γ) αναστροφής του υλικού. Οι κατακόρυφοι αντιδραστήρες ταξινομούνται περαιτέρω σύμφωνα με τις συνθήκες των στρωμάτων του υλικού εντός του αντιδραστήρα. Κάποια συστήματα επιτρέπουν την ανάδευση του υλικού κατά την προώθησή του κατά μήκος του αντιδραστήρα, ενώ σε άλλα συστήματα το υλικό δεν υπόκειται σε ανάδευση κατά την προώθησή του. Οι κατακόρυφοι κλειστοί αντιδραστήρες γενικά προβλέπουν σχετικά μικρούς χρόνους παραμονής του υλικού και δυναμικό αερισμό.

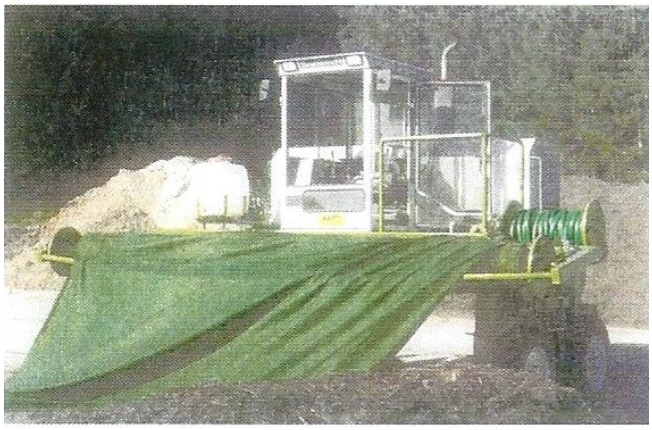
Στα κλειστά και ταχείας βιοαποδόμησης (κλειστούς βιοαντιδραστήρες), αλλά ακριβότερα συστήματα, το υλικό βιοαποδομείται υπό πλήρως ελεγχόμενες συνθήκες, με δυναμικές συνθήκες αερισμού και με συνεχή ανάδευση. Ο χρόνος παραμονής ποικίλει ανάλογα με την τεχνολογία (7 – 14 μέρες), ενώ ακολουθεί η περίοδος ωρίμανσης διάρκειας από 4 έως 12 εβδομάδες. Το τελικό προϊόν είναι καλύτερης ποιότητας από το προϊόν των ανοικτών συστημάτων, πλην όμως η τεχνολογία είναι πιο περίπλοκη.

2.4.1.2 Εξευγενισμός και ωρίμανση του τελικού προϊόντος

Για τη διατήρηση του λόγου C/N στα επιθυμητά όρια με προσθήκη ειδικών υλικών (π.χ. ιλύος από βιολογικούς καθαρισμούς) γίνεται η βιοσταθεροποίηση. Έχει παρατηρηθεί ότι αρχικές χαμηλές τιμές του λόγου C/N (με τιμές μικρότερες από 10) έχουν ως αποτέλεσμα την επιβράδυνση της βιοαποδόμησης και την αύξηση των απωλειών αζώτου (μέσω απαερίωσης αμμωνίας, ειδικά υπό συνθήκες υψηλών τιμών pH και θερμοκρασίας). Αντίθετα, αν οι αρχικές τιμές του λόγου C/N είναι ιδιαίτερα υψηλές (μεγαλύτερες από 35), τότε απαιτούνται πολλοί βιοχημικοί κύκλοι (οι μικροοργανισμοί οξειδώνουν κάθε φορά την περίσσεια του άνθρακα), έως ότου επιτευχθεί ικανοποιητικός λόγος C/N.

Μετά τη βιοσταθεροποίηση ακολουθούν δύο αναγκαία στάδια για την παραγωγή του τελικού προϊόντος: Το στάδιο της ωρίμανσης και το στάδιο του εξευγενισμού. Στη μονάδα ωρίμανσης λαμβάνουν χώρα διεργασίες χουμοποίησης, όπου το υλικό, τοποθετημένο σε σωρούς ή σειράδια ύψους μέχρι 6m, αποκτά ιδιότητες εμφάνισης και οσμής που διευκολύνουν την αποδοχή του για γεωργικές χρήσεις. Στη μονάδα εξευγενισμού, το προϊόν καθαρίζεται με μηχανικούς διαχωριστές από ξένες προσμίξεις (αδρανή, χαρτί, χαλίκια, πλαστικά, κ.α.) καθώς και

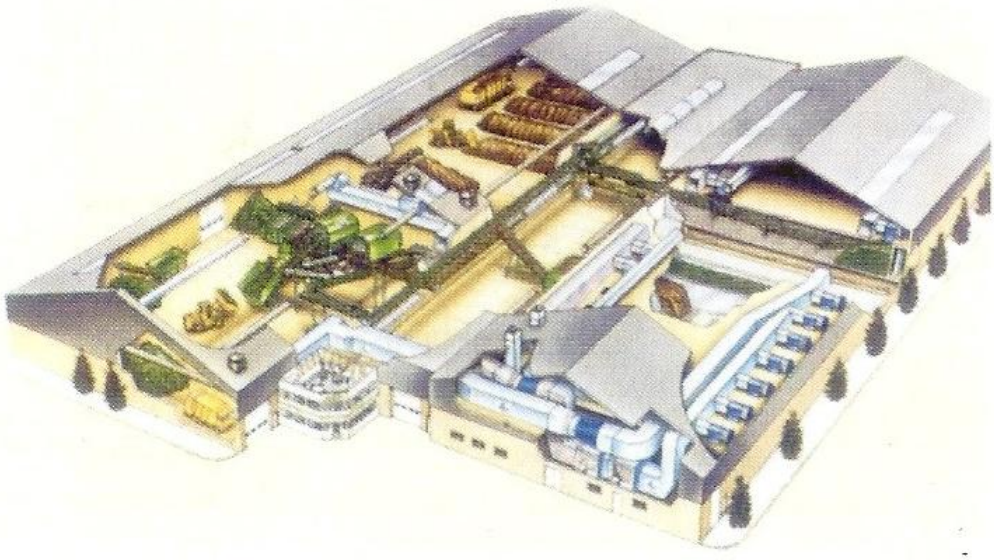
από μη αποδομημένα οργανικά (πλαστικά, λάστιχα, συνθετικές ίνες από υφάσματα, μη επαρκώς τεμαχισμένο χαρτί, κτλ.), η απομάκρυνση των οποίων αποτελεί σημαντικό πρόβλημα. Αν ο στόχος της κομποστοποίησης είναι η μείωση των ποσοτήτων στο ΧΥΤΑ, τότε η ποιότητα του κομπόστ δεν έχει σημασία και ο εξευγενισμός περιττεύει.



Εικόνα 2. 9 Αυτοκινούμενος αναστροφέας σειραδίων [35]

Το κομπόστ μετά τη διαδικασία εξευγενισμού του, οδηγείται για ωρίμανση, όπου παραμένει για επαρκές χρονικό διάστημα (συνήθως ένα μήνα) σε σωρούς. Το χρονικό διάστημα της ωρίμανσης βοηθά στη διάσπαση και των πλέον ανθεκτικών οργανικών υλικών και στην επανεμφάνιση μικροβιακών πληθυσμών που αναπτύσσονται σε χαμηλές θερμοκρασίες και οι οποίοι είναι χρήσιμοι για την περαιτέρω σταθεροποίηση του οργανικού προϊόντος.

Ως φυσική βιολογική διεργασία, η κομποστοποίηση απαιτεί σχετικά μεγάλους χρόνους για σταθεροποίηση και ωρίμανση των ΑΣΑ, με αποτέλεσμα την ανάγκη για μεγάλους χώρους. Προσεγγιστικά εκτιμάται ότι, για ανοιχτά συστήματα σε ‘αυτοδύναμες’ εγκαταστάσεις βιοεπεξεργασίας απαιτούνται τόσα τετραγωνικά μέτρα όσοι οι τόνοι των εισερχομένων τόνων ανά έτος. Για κλειστά συστήματα, ο απαιτούμενος χώρος μπορεί να μειωθεί στο ¼. [11], [19]



Εικόνα 2. 10 Εγκατάσταση κομποστοποίησης [35]

Εικόνα 2. 11 Εγκατάσταση –σειράδια σε υπόστεγο [35]

2.4.2 Αναερόβια Επεξεργασία ΑΣΑ

Η αναερόβια επεξεργασία των ΑΣΑ είναι μια τεχνητά επιταχυνόμενη διεργασία που λαμβάνει χώρα σε κλειστούς αντιδραστήρες. Αν και η μέθοδος είναι γνωστή στο χώρο της επεξεργασίας υγρών λυμάτων, στο χώρο των ΑΣΑ εμφανίζεται μόλις πριν από μία δεκαετία. Η διαδικασία μετατρέπει τα βιοποδομήσιμα απόβλητα σε βιοαέριο που περιέχει μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα. Το βιοαέριο στη

συνέχεια χρησιμοποιείται ως καύσιμο, ενδεχομένως αντικαθιστώντας τα ορυκτά καύσιμα.

Η βιοαποδόμηση αναπτύσσεται σε δύο διακριτά στάδια, το οξυγενές και το μεθανογενές. Κατά το στάδιο της μεθανογένεσης, ο ρυθμός μετατροπής/διάσπασης της οργανικής ύλης είναι ανάλογος με τον ρυθμό παραγωγής βακτηρίων, το καθένα από τα οποία έχει περιορισμένα επίδραση σε συγκεκριμένες μόνο οργανικές ουσίες. Παράλληλα, για αρκετές πολύπλοκες οργανικές ουσίες απαιτείται η συνεργασία και δράση πολλών διαφορετικών βακτηρίων για να επιτευχθεί η αποδόμησή τους και η παραγωγή μεθανίου. Επίσης, μία βασική παράμετρος για την επιτυχή ανάπτυξη της διεργασίας είναι το γεγονός ότι ο ρυθμός αναπαραγωγής των μεθανογενών βακτηρίων είναι μικρότερος από αυτό των οξυγενών. Κατά συνέπεια, εάν για κάποιο λόγο διακοπεί το στάδιο της μεθανογένεσης, τότε είναι αρκετά δύσκολο να ξαναρχίσει.

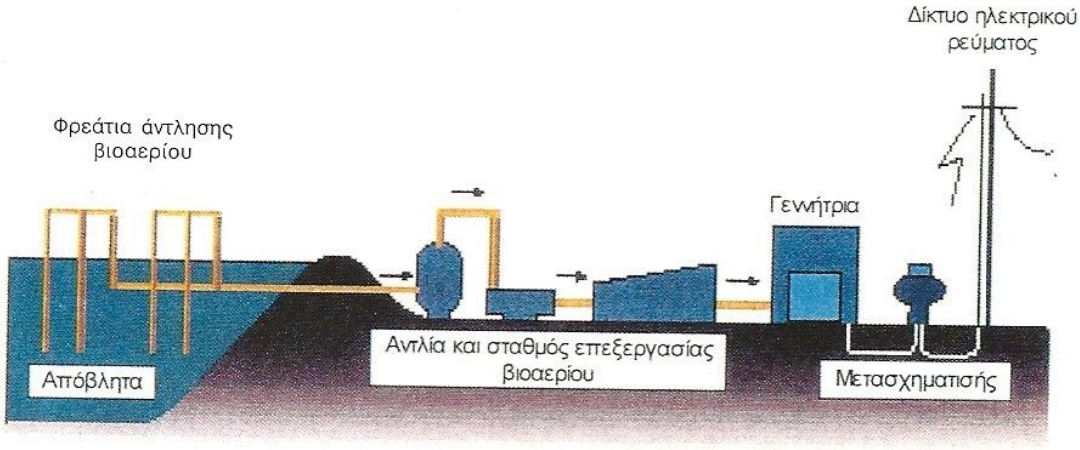
Ως προς τη διαδικασία της μεθόδου, μετά το μηχανικό διαχωρισμό και την ανάκτηση υλικών, το οργανικό κλάσμα των ΑΣΑ εισέρχεται στον αντιδραστήρα (χωνευτή) είτε όπως είναι (ξηρή μέθοδος) ή αναμεμειγμένο με νερό ή με ιλύ από εγκατάσταση βιολογικού καθαρισμού λυμάτων (υγρή μέθοδος). Το ποσοστό στερεών στο μείγμα και η θερμοκρασία και η διάρκεια της διεργασίας ποικίλουν ανάλογα με το σχεδιασμό της μονάδας, τη σύνθεση του υλικού και άλλους παράγοντες (διακυμάνσεις σχετικών τιμών, αντιστοίχως: 25-45% στερεά, 35-55°C, 1-4 εβδομάδες). Τα βασικά προϊόντα είναι βιοαέριο και ιλύς. Το βιοαέριο εκτιμάται σε 100-200m^3 ανά τόνο εισερχόμενου οργανικού κλάσματος ΑΣΑ, αποτελούμενο από μεθάνιο (55-70%), διοξείδιο του άνθρακα (30-45%) και ίχνη άλλων αερίων. Μετά από ελάχιστη επεξεργασία (κυρίως για απομάκρυνση της υγρασίας και του υδρόθειου), το αέριο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο για παραγωγή θερμότητας ή/και ηλεκτρικής ενέργειας. Το 20-40% της παραγόμενης ενέργειας καταναλώνεται κατά τη διεργασία, αφήνοντας 100-200kW ανά τόνο οργανικού κλάσματος για άλλες χρήσεις. Περαιτέρω αναβάθμιση της ποιότητας του βιοαερίου γίνεται με την απομάκρυνση του διοξειδίου του άνθρακα.

Τα κύρια πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι: Ο μικρότερος απαιτούμενος χώρος σε σχέση με την κομποστοποίηση (30-50% μικρότερος από τα ανοιχτά συστήματα κομποστοποίησης), η παραγωγή ενέργειας από το βιοαέριο, η μη δημιουργία στραγγισμάτων, το ότι το βιοαέριο (και κυρίως το μεθάνιο) συλλέγεται σχεδόν στο σύνολό του (συμβολή στον περιορισμό του φαινομένου του θερμοκηπίου) και η δυνατότητα συνδιαχείρισης με την ιλύ από εγκατάσταση βιολογικού καθαρισμού λυμάτων.

Επίσης, η παραγόμενη χωμένη ιλύς μπορεί να μετατραπεί, με αερόβια επεξεργασία, σε κομπόστ. Δεδομένου ότι όσο πιο καθαρή είναι η εισερχόμενη οργανική ύλη τόσο αποτελεσματικότερη είναι η μέθοδος, η αναερόβια βιοεπεξεργασία είναι κατάλληλη για φυτικά υπολείμματα, για ιλύες από βιολογικούς καθαρισμούς (εφόσον έχει απομείνει επαρκής βιοαποδομήσιμη ύλη).

Τα μειονεκτήματα είναι το σχετικά υψηλό κόστος και η (μέχρι σήμερα) περιορισμένη επιβεβαίωση της αξιοπιστίας της τεχνολογίας, δεδομένης και της μεταβλητότητας της σύνθεσης της πρώτης ύλης. Οι συνεχιζόμενες έρευνες και οι εμπειρίες υποδεικνύουν ότι η αναερόβια βιοεπεξεργασία έχει θετική προοπτική. [20],[24],[35], [39]

Εικόνα 2. 12 Μονάδα άντλησης και καύσης βιοαερίου [35]



Εικόνα 2. 13 Υποσταθμός συλλογής βιοαερίου [35]

2.4.3 Συνδυασμός αερόβιας και αναερόβιας επεξεργασίας

Σε αρκετές περιπτώσεις, μετά την εφαρμογή της αναερόβιας χώνευσης, το παραγόμενο στερεό προϊόν υφίσταται αερόβια επεξεργασία. Στόχος είναι, να επιτευχθεί πλήρης σταθεροποίηση του προϊόντος και να αυξηθεί η παρουσία χουμικών συστατικών σε αυτό. Το τελικό προϊόν της συνδυασμένης επεξεργασίας παρουσιάζει σύσταση και χαρακτηριστικά παρόμοια με αυτά που έχει το κομπόστ και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε γεωργικές εφαρμογές (εδαφοβελτιωτικό). Εναλλακτικά, μπορεί να αξιοποιηθεί ως καύσιμο υλικό. [24]

2.5 Ανακύκλωση

Η ανακύκλωση, δηλαδή η διαδικασία με την οποία υλικά, που αλλιώς προορίζονταν για απόρριψη, συλλέγονται, υφίστανται επεξεργασία και αναπαράγονται ή επαναχρησιμοποιούνται. Σε αυτό το σημείο αξίζει να σημειωθεί ότι το σχετικό άρθρο της Κοινής Υπουργικής Απόφασης (ΚΥΑ) γράφει αξιοποίηση και περιλαμβάνει την ανάκτηση και επαναχρησιμοποίηση (ως δευτερογενών) υλικών και ενέργειας, συμπεριλαμβανομένης της κομποστοποίησης του οργανικού κλάσματος με παραγωγή εδαφοβελτιωτικού. Δεν είναι σαφές, από νομική άποψη, αν η ανάκτηση ενέργειας δια μέσου της καύσης αποτελεί ανακύκλωση. Εν γένει, η ανακύκλωση συνεπάγεται διαχωρισμό των ΑΣΑ σε ομοιογενείς κατηγορίες συστατικών τους, ανάκτηση των υλικών και επαναχρησιμοποίησή τους, ενδεχομένως μετά από επεξεργασία.

Δεν είναι όλα τα υλικά των ΑΣΑ εξίσου εύκολο να διαχωριστούν, ούτε η αξιοποίησή τους εξίσου αποτελεσματική. Γι' αυτό, ο στόχος και η σκοπιά της ανάλυσης έχουν καθοριστική σημασία για τη διαμόρφωση και την αξιολόγηση της επίδοσης ενός προγράμματος ανακύκλωσης.

Το κόστος της επανεπεξεργασίας εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το υλικό προς επεξεργασία, τη κλίμακα που χρησιμοποιείται στη διαδικασία, η πολυπλοκότητα της τεχνολογίας επεξεργασίας και την ποιότητα των εισροών. Για τις σημερινές συνθήκες, δεν υπάρχουν οικονομικά οφέλη από την ανακύκλωση πάντα.

Ενδεχομένως, θα μπορούσε να διαμορφωθεί από μια ειδική πηγή αποβλήτων (βιομηχανία, αλυσίδα εστιατορίων, πολυκατάστημα κτλ.) ένα οικονομικά βιώσιμο πρόγραμμα ανάκτησης συγκεκριμένων υλικών. Είναι φανερό ότι η εξασφάλιση ανεκτού βαθμού σταθερότητας στην αγορά των ανακτώμενων υλικών και η ύπαρξη σταθερής ζήτησης με προβλέψιμες διακυμάνσεις των προσφερόμενων τιμών αποτελούν σημαντικές προϋποθέσεις επιτυχίας. [8], [12]

Αναφορικά με το πού και πώς γίνεται ο διαχωρισμός, αναφέρονται σε δύο περιπτώσεις:

1. Διαλογή στην πηγή
2. Διαλογή σε εγκατάσταση ανάκτησης υλικών

2.5.1 Εγκαταστάσεις ανάκτησης υλικών και ενέργειας

Κάθε πρόγραμμα εκτροπής και ανακύκλωσης προϋποθέτει την ύπαρξη κάποιας μορφής εγκατάστασης για την ταξινόμηση και ανάκτηση των υλικών και ενδεχομένως για ανάκτηση ενέργειας. Υπάρχει ποικιλία τύπων και μεγεθών μιας εγκατάστασης ανάκτησης υλικών και/ή ενέργειας. Οι βασικές κατηγοριοποιήσεις σχετίζονται με:

- Το βαθμό στον οποίο τα εισερχόμενα ΑΣΑ είναι διαχωρισμένα (από ‘πλήρη’ διαχωρισμό μέχρι καθόλου)
- Την έκταση της χειροδιαλογής (από πλήρως χειρωνακτικό διαχωρισμό μέχρι ‘σχεδόν πλήρως’ μηχανικό)
- Το αν υπάρχει βιοεπεξεργασία (αερόβια ή αναερόβια) και τον τύπο της
- Το αν υπάρχει θερμική επεξεργασία, με ή χωρίς ανάκτηση ενέργειας.

Έτσι λοιπόν, σε μια μονάδα ανάκτησης υλικών (MRF) μπορεί να είναι ένας ειδικός χώρος διαλογής στον ευρύτερο χώρο ενός σταθμού μεταφόρτωσης αποβλήτων, μία εγκατάσταση υποδοχής ανάμεικτων ΑΣΑ και ανάκτηση υλικών κυρίως με χειροδιαλογή και υποτυπώδη μηχανικό εξοπλισμό ή ένα ειδικά κατασκευασμένο εργοστάσιο μηχανικού διαχωρισμού και ανάκτησης υλικών, με ή χωρίς βιοεπεξεργασία και με ή χωρίς ανάκτηση ενέργειας, το οποίο μπορεί να δέχεται ανάμεικτα ή διαχωρισμένα ΑΣΑ κτλ.

Οι επιθυμητές και ανεπιθύμητες εκροές, ανάλογα με τη μορφή της εγκατάστασης, μπορεί να είναι:

- Διαχωρισμένα σε κατηγορίες υλικά για επαναχρησιμοποίηση (π.χ. χαρτί, πλαστικά, γυαλί, μέταλλα, οργανικά υλικά προς βιοεπεξεργασία, χαρτί και πλαστικά ως καύσιμη ύλη – RDF)
- Συμπιεσμένα δεμάτια αδρανών υλικών για εναπόθεση σε χώρους προσωρινής ή τελικής αποθήκευσης
- Εδαφοβελτιωτικό υλικό (κομπόστ) ή/και θερμική ενέργεια, εφόσον εμπεριέχεται στην εγκατάσταση αντίστοιχη μονάδα παραγωγής τους

- Τα στερεά υπολείμματα των διεργασιών (π.χ. τα μη ανακτώμενα υλικά ή οι στάχτες από καύση) τα οποία μεταφέρονται σε χώρους εδαφικής διάθεσης
- Οι διάφορες οχλήσεις στο κοινωνικό σύνολο (π.χ. θόρυβος και οσμές) οι οποίες ελέγχονται με ειδικά συστήματα
- Τα απόβλητα των διεργασιών: υγρά (συλλέγονται για επεξεργασία), αέρια από καύση ή από βιοεπεξεργασία που ελέγχονται, σκόνη, κ.α.
- Άλλες αρνητικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις, όπως π.χ. από τις εκπομπές ρύπων μετά το στάδιο λειτουργίας, η πιθανή ρύπανση ή μόλυνση από τη χρήση 'προϊόντων' (κομπόστ, RDF, βιοαερίου κτλ.) στη μορφολογία του χώρου, κ.α.

Όπως αναφέρθηκε και στην εισαγωγή της ανακύκλωσης, ο περαιτέρω διαχωρισμός και η επεξεργασία των αποβλήτων που έχουν διαχωριστεί στην πηγή και ο διαχωρισμός των αναμεμειγμένων αποβλήτων εμφανίζεται συνήθως σε εγκαταστάσεις ανάκτησης υλικών (MRF). Η επιτυχής ανάπτυξη και εφαρμογή ενός MRF απαιτεί να δοθεί δέουσα προσοχή στο σχεδιασμό λαμβάνοντας υπόψη τόσο τους τεχνικούς παράγοντες όσο και τους περιβαλλοντικούς. Ο τεχνικός σχεδιασμός και προγραμματισμός των MRF περιλαμβάνει τρία στάδια:

1. την ανάλυση σκοπιμότητας
2. την προκαταρκτική μελέτη
3. την τελική μελέτη.

Η λειτουργία μιας τυπικής μονάδας ανάκτησης υλικών (MRF) χρησιμοποιεί εγχειρίδια επεξεργασίας και/ή ημι-αυτόνομης επεξεργασίας για τη διαλογή των ανακυκλώσιμων υλικών από τα απόβλητα και την προετοιμασία τους σε μορφή κατάλληλη για τη χρησιμοποίηση τους από τους φορείς επανεπεξεργασίας υλικών. Μια μονάδα MRF είναι συνήθως εξοπλισμένη με συστήματα μεταφοράς/μετακίνησης υλικών, κυρίως ιμάντες, μηχανικούς διαχωριστές υλικών με βάσει το μέγεθος, κυρίως με κοσκίνισμα (περιστροφικά ή δονητικά κόσκινα) για την απομάκρυνση σωματιδίων και εξοπλισμός δεματοποίησης. Μερικές μονάδες μπορεί να έχουν στον εξοπλισμό τους και μαγνητικούς διαχωριστές για την ανάκτηση των σιδηρούχων μετάλλων, διαχωριστές επαγωγικών ρευμάτων για την ανάκτηση αλουμινίου και συστήματα ανίχνευσης και διαχωρισμού των πλαστικών με βάσει το είδος του πολυμερούς. Ακόμη πραγματοποιείται χειροδιαλογή για το διαχωρισμό των υλικών σε χαρτί, γυαλιά, πλαστικά, οργανικό κλάσμα και υπολείμματα. Τα συστήματα αυτά μπορούν να διαμορφωθούν με ποικίλους τρόπους, ανάλογα με το βαθμό διαχωρισμού των εισερχομένων ΑΣΑ και με το στόχο της εγκατάστασης.

Στις εγκαταστάσεις αυτές έχουμε πάντοτε χειροδιαλογή, τουλάχιστον για απόσυρση ογκωδών αντικειμένων ώστε να εξασφαλίζεται η ομαλή λειτουργία του μηχανολογικού εξοπλισμού. Επιπλέον, ο διαχωρισμός των πλαστικών κατά είδος, των ανάμεικτων χαρτιών και των γυαλιών κατά χρώμα μπορεί να γίνει μόνο με χειροδιαλογή. Η εξελισσόμενη τεχνολογία τείνει να μειώσει την ανάγκη χειροδιαλογής π.χ. με χρήση φωτοκύτταρων για το διαχωρισμό. Σε κάθε περίπτωση, η

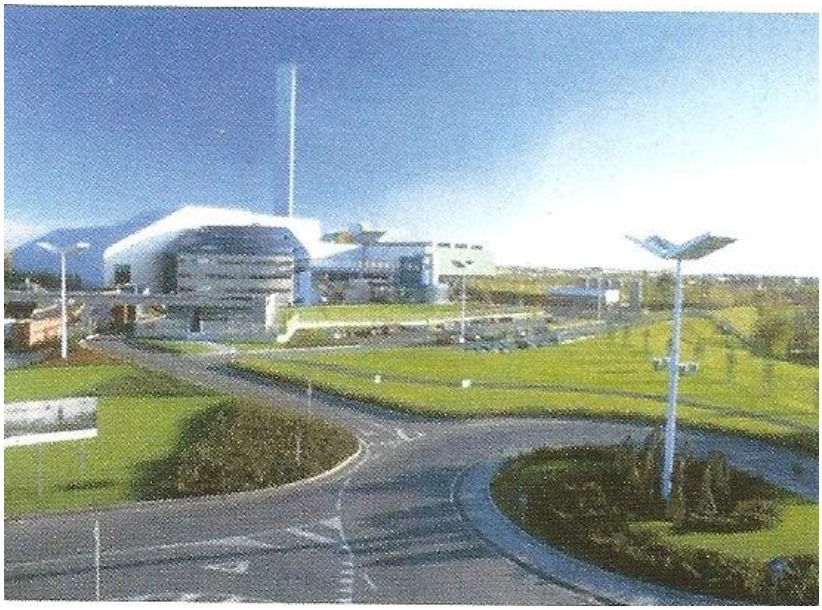
αντιστάθμιση χειρωνακτικής και μηχανικής διαλογής είναι κατ' ουσίαν αντιστάθμιση υψηλού αρχικού κόστους επένδυσης (περίπλοκη τεχνολογία) και υψηλού κόστους λειτουργίας (απλή τεχνολογία εντάσεως εργασίας) –συγκρινόμενα στη βάση της παρούσας αξίας με αναφορά σε όλο το χρονικό ορίζοντα της ανάλυσης. Η απόδοση της χειροδιαλογής εκτιμάται, προσεγγιστικά, σε 0.5 τόνο ανά ώρα ανά άτομο.

Κατά την ίδια λογική, όσο περισσότερες είναι οι εισρέουσες ποσότητες και οι ώρες λειτουργίας του εξοπλισμού ανά περίοδο, τόσο μικρότερη είναι η ανά τόνο επιβάρυνση από το κόστος κεφαλαίου και απόσβεσης. Πλην όμως, υπάρχουν περιορισμοί στις ώρες λειτουργίας που αναφέρονται στην κυκλοφορία των οχημάτων, στο θόρυβο από τα οχήματα και τη λειτουργία, τους χρόνους διακοπών για συντήρηση, καθώς και στις εποχιακές διακυμάνσεις των εισερχόμενων ποσοτήτων αποβλήτων. [16],[24], [35]

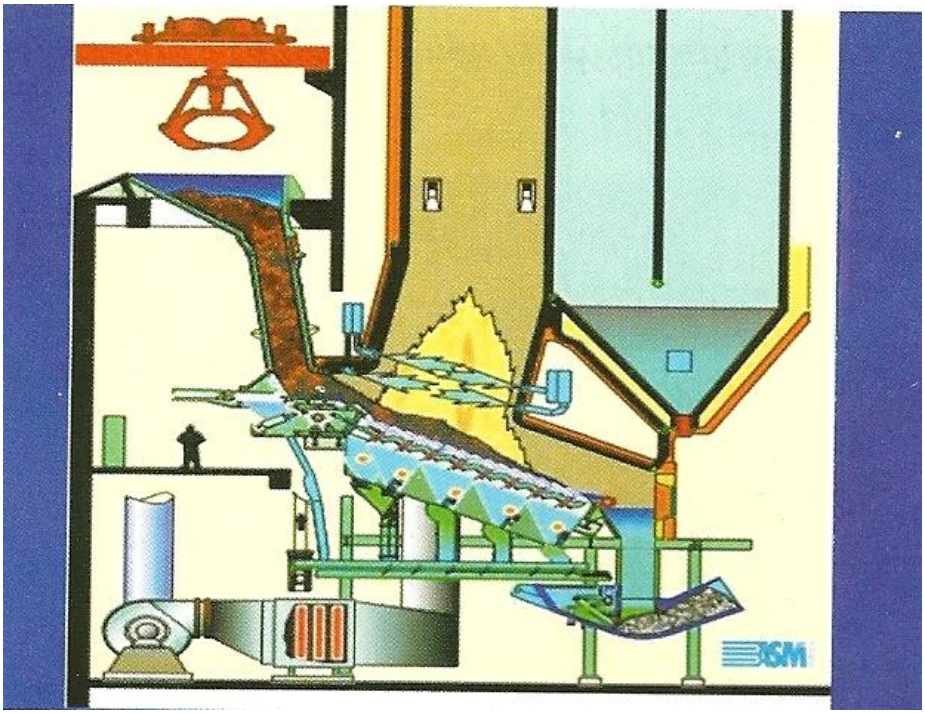
2.6 Θερμική επεξεργασία αποβλήτων

Η θερμική επεξεργασία των ΑΣΑ αποσκοπεί κυρίως στην ελάττωση του όγκου τους και τη μετατροπή τους σε λιγότερο επιβλαβή υλικά, δευτερευόντως δε στην ανάκτηση του ενεργειακού περιεχομένου τους. Κατά την επεξεργασία αυτή, τα ΑΣΑ μετατρέπονται σε στερεά, υγρά και αέρια προϊόντα, ενώ εκλύεται θερμότητα. Ανάλογα με την ποσότητα του παρόντος οξυγόνου, διακρίνονται τα εξής είδη θερμικής επεξεργασίας:

- Αποτέφρωση (καύση): αναπτύσσεται παρουσία είτε στοιχειομετρικής αναλογίας οξυγόνου είτε με περίσσεια οξυγόνου, έτσι ώστε να επιτευχθεί πλήρης οξείδωση του άνθρακα των οργανικών συστατικών προς διοξείδιο του άνθρακα
- Πυρόλυση: αναπτύσσεται απουσία οξυγόνου και λαμβάνει χώρα θερμική διάσπαση των οργανικών στερεών αποβλήτων
- Αεριοποίηση: απαιτεί την τήρηση αυστηρών αναλογιών μεταξύ οργανικού άνθρακα των αποβλήτων και οξυγόνου, έτσι ώστε να επιτευχθεί ατελής καύση των οργανικών υλικών των αποβλήτων και να παραχθεί αέριο αποτελούμενο κυρίως από μονοξείδιο του άνθρακα, υδρογόνο και αέριους υδρογονάνθρακες
- Τεχνική πλάσματος: υπό την επίδραση πολύ υψηλών θερμοκρασιών, το οργανικό κλάσμα των αποβλήτων αεριοποιείται και σχηματίζει αέριο σύνθεσης (μίγμα μονοξειδίου του άνθρακα και υδρογόνου) και απαέρια, ενώ το ανόργανο τμήμα υλοποιείται.



Εικόνα 2. 14 Εγκατάσταση Καύσης με Ανάκτηση ενέργειας (Brescia, Ιταλία) [35]



Εικόνα 2. 15 Σχηματικό διάγραμμα του θαλάμου καύσης της εγκατάστασης της εικόνας 2.14 (Brescia) [35]

2.6.1 Αποτέφρωση

Η καύση αποτελεί μία από τις βασικές μεθόδους επεξεργασίας των στερεών απορριμμάτων. Στην Ιαπωνία και στην Ελβετία αποτελεί την κύρια μέθοδο επεξεργασίας, ενώ φαίνεται να κερδίζει έδαφος και σε άλλες χώρες.

Η καύση αποτελεί μία ελκυστική μέθοδο επεξεργασίας, μιας και μπορεί να μειώσει τον όγκο των απορριμμάτων κατά 85 – 95%, παράγοντας παράλληλα

ενέργεια. Ένα άλλο σημαντικό πλεονέκτημα που έχει, είναι οι χαμηλές απαιτήσεις σε χώρο. Ο έλεγχος της ατμοσφαιρικής ρύπανσης που προκαλεί παραμένει ωστόσο το βασικό πρόβλημα της μεθόδου, παρά την ανάπτυξη της σχετικής τεχνολογίας κατά τα τελευταία χρόνια.

Πολύ σημαντική είναι η σύσταση των ΑΣΑ και ιδιαίτερα η θερμογόνος δύναμή τους. Η κυριότερη πηγή της θερμογόνου δύναμης είναι η κυτταρίνη που απαντάται κυρίως στο χαρτί. Συνήθως η θερμογόνος δύναμη είναι περίπου 2500kcal/kg απορριμμάτων, και είναι άμεση συνάρτηση της υγρασίας των απορριμμάτων. Στη χώρα μας, λόγω της αυξημένης υγρασίας των απορριμμάτων η θερμογόνος δύναμή τους είναι περίπου 1750kcal/kg. Στον Πίνακας 2. 1 δίνεται το υπόλειμμα που αφήνουν και το ενεργειακό περιεχόμενο των διαφόρων συστατικών των απορριμμάτων. [16], [21], [24]

Πίνακας 2. 1 Ενδεικτικό μέσο ενεργειακό περιεχόμενο και υπόλειμμα διαφόρων συστατικών

Συστατικό	Υπολείμματα (%)	Ενεργειακό περιεχόμενο kJ/kg
Υπολείμματα τροφών	5	4650
Χαρτί	6	17000
Χαρτόνι	5	16000
Πλαστικά	10	32000
Υφάσματα	6,5	18000
Ελαστικά	9,9	23000
Υπολείμματα αυλών	4,5	23000
Ξύλο	1,5	6500
Γυαλί	98	150
Λευκοσίδηρος	98	750
Αργίλιο	96	-
Άλλα μέταλλα	98	750
Σκόνη, στάχτη	68	7000

Γενικά, ως καύση ορίζεται η χημική αντίδραση μιας ουσίας με το οξυγόνο, κατά την οποία λαμβάνουν χώρα οι εξής φυσικές και χημικές διεργασίες:

- Η ξήρανση υλικού επιτυγχάνεται σε θερμοκρασία τουλάχιστον 100°C. Η απαιτούμενη για την ξήρανση θερμότητα εξαρτάται από τη σύνθεση των αποβλήτων και την περιεχόμενη σε αυτά υγρασία.
- Η θερμική διάσπαση των οργανικών ενώσεων επιτυγχάνεται σε θερμοκρασίες που κυμαίνονται από 250 - 900°C και κατά την ανάπτυξή της απομακρύνονται τα πτητικά οργανικά.

- Η απαερίωση περιλαμβάνει τη μετατροπή των οργανικών υλικών, κάτω από υψηλές θερμοκρασίες, σε αέριο καύσιμο υλικό. Η διεργασία αναπτύσσεται σε θερμοκρασίες που κυμαίνονται από 800 - 1150°C.
- Η κύρια καύση περιλαμβάνει την πλήρη οξείδωση των αερίων που παράγονται κατά την απαερίωση των αποβλήτων σε διοξείδιο του άνθρακα και νερό. Ανάλογα, με τη σύσταση των αποβλήτων παράγονται και άλλα αέρια προϊόντα όπως οξείδια του θείου και του αζώτου κ.λπ.

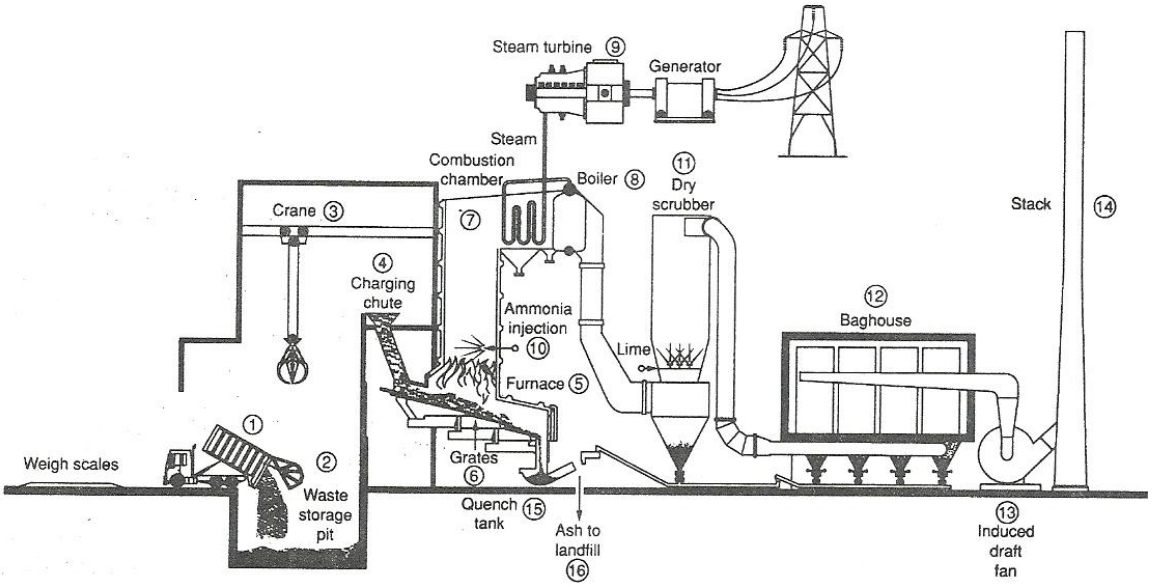
Η ταχύτητα της διαδικασίας της οξείδωσης των οργανικών υλικών επηρεάζεται από την ειδική επιφάνεια των αποβλήτων (την ανηγμένη ανά τόνο ή κυβικό μέτρο επιφάνεια που είναι σε άμεση επαφή με το οξυγόνο) και τη θερμική αγωγιμότητά τους.

Η διεργασία της καύσης αρχίζει με το άδειασμα των απορριμμάτων σε αποθηκευτικό χαντάκι, μεγέθους ικανού για να δεχθεί απορρίμματα δύο περίπου ημερών. Εν συνεχεία ένας γερανός οδηγεί φουρνιές από απορρίμματα στην ατραπό φορτώσεως, η οποία οδηγεί τα απορρίμματα στον κλίβανο. Ο χειριστής του γερανού επιλέγει το μείγμα των απορριμμάτων ούτως ώστε να επιτευχθεί ομοιόμορφη υγρασία στην τροφοδοσία. Ο γερανός επίσης απομακρύνει μεγάλα και μη καύσιμα αντικείμενα.

Ο αέρας παρέχεται από κάτω με την χρήση αεριστήρα ή από πάνω προκειμένου να ρυθμιστούν οι ρυθμοί καύσης και η θερμοκρασία του κλιβάνου. Μια και τα περισσότερα οργανικά απορρίμματα είναι θερμικά ασταθή, αναδύονται διάφορα αέρια τα οποία μαζί με μικρά οργανικά σωματίδια ανέρχονται στον χώρο καύσης και καίγονται σε θερμοκρασία άνω των 900°C.

Η παραγόμενη ενέργεια ανακτάται μέσω εξάτμισης νερού που παράγει ατμό, και μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω γεννήτριας. Σήμερα οι περισσότεροι σταθμοί καύσης απορριμμάτων διαθέτουν σύστημα ανάκτησης ενέργειας, είτε με χρήση της θερμικής ενέργειας για θέρμανση, είτε με παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Τα τελικά προϊόντα της καύσης είναι απαέρια που μετά από επεξεργασία διοχετεύονται στην ατμόσφαιρα, ανόργανη τέφρα, υγρό απόβλητο το οποίο παράγεται κατά τις διαδικασίες σβέσης της τέφρας και ψύξης των αερίων και η θερμότητα που όπως έχει ήδη αναφερθεί μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ατμού ή ηλεκτρικής ενέργειας.[16], [21],[24]



Εικόνα 2. 16 Τυπική μονάδα καύσης [35]

Οι μονάδες αποτέφρωσης χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, τις μονάδες που απαιτούν ελάχιστη προεπεξεργασία των απορριμμάτων – στερεών αποβλήτων (μονάδες τύπου mass-fired) και τις μονάδες που λειτουργούν με προδιαχωρισμένο οργανικό υλικό π.χ. επεξεργασμένο RDF (Refuse Derived Fuel) ως καύσιμο. Διαφοροποιούνται τόσο σε σχέση με τον τύπο του συστήματος καύσης (κινούμενων εσχαρών, ρευστοποιημένης κλίνης) όσο και σε σχέση με το σύστημα ελέγχου της ρύπανσης (υγρή/ξηρή επεξεργασία απαερίων, σακκόφιλτρα κτλ.)

Ο έλεγχος των εκπομπών είναι πολύ κρίσιμο θέμα. Η τεχνολογία τελευταίως έχει παρουσιάσει τρομερές βελτιώσεις στον έλεγχο των εκπομπών. Τέτοιες εκπομπές είναι τα πτητικά οργανικά, τα NO_x, το όξινο αέριο, τα σωματίδια, τα δευτερογενή πτητικά οργανικά και ο υδράργυρος. Τα κύρια στοιχεία των απορριμμάτων πάντως είναι C, O, N και S. Μικρότερες ποσότητες πολλών ακόμη στοιχείων ευρίσκονται στη στάχτη. Υπό ιδανικές συνθήκες τα καυσαέρια θα περιέχουν κυρίως CO_2, H_2O, N_2 και μικρές ποσότητες SO_2. Στην πράξη, πολλές διαφορετικές αντιδράσεις είναι πιθανές, ανάλογα με την ακριβή φύση των απορριμμάτων και τα λειτουργικά χαρακτηριστικά του αντιδραστήρα καύσεως. Οι κύριες αντιδράσεις κατά την καύση είναι οι εξής:

$$C + O_2 \rightarrow CO_2$$

$$2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$$

$$S + O_2 \rightarrow SO_2$$

Προκειμένου για να αποφύγουμε την ημιτελή καύση συνήθως λειτουργούμε με περίσσεια αέρα μέχρι και 100%. Όσο υψηλότερη η περίσσεια του αέρα, τόσο

περισσότερη είναι η ενέργεια που θα αναλωθεί για θέρμανση των αερίων με αποτέλεσμα να επιτυγχάνουμε χαμηλότερη θερμοκρασία καύσης. [2], [38]

2.6.2 Πυρόλυση

Πυρόλυση είναι η θερμική των οργανικών ενώσεων και ειδικότερα η καταστρεπτική αποστακτική διαδικασία που διενεργείται απουσία οξυγόνου και σε θερμοκρασία 250 - 1000°C ανάλογα με τα επιθυμητά προϊόντα. Καλείται συχνά έτσι γιατί είναι μία διαδικασία που χαρακτηρίζεται από έντονα ενδόθερμες αντιδράσεις και κατά συνέπεια απαιτεί τη διαρκή θέρμανση από εξωτερική πηγή θερμότητας, σε αντίθεση με την αποτέφρωση και την αεριοποίηση, οι οποίες χαρακτηρίζονται από έντονα εξώθερμες αντιδράσεις.Με την μέθοδο της πυρόλυσης τα αστικά στερεά απορρίμματα μετατρέπονται σε μία σειρά χρήσιμων προϊόντων στερεής, υγρής και αέριας φάσης. Η μέθοδος αυτή δεν επιβαρύνει το περιβάλλον όταν εφαρμόζεται σωστά.

Τα προϊόντα της πυρόλυσης των ΑΣΑ καταλαμβάνουν όγκο 50% μικρότερο του αρχικού και μετατρέπονται σε ενέργεια που καταναλώνει η ίδια η διαδικασία της πυρόλυσης ή παρέχεται προς διάθεση. Χρησιμοποιείται ευρέως σήμερα ως μία βιομηχανική διεργασία για την παραγωγή κάρβουνου από ξύλο, κοκ και αέριο κοκ από γαιάνθρακα, καθώς και υγρά καύσιμα και πίσσα από βαριά κλάσματα πετρελαίου. Παρά όμως την ευρεία εφαρμογή της στη βιομηχανία, η πυρόλυση δεν έχει πλήρως ξεπεράσει τα πολλαπλά προβλήματα που αντιμετωπίζει, κυρίως εξαιτίας της σημαντικής ανομοιογένειας των ΑΣΑ.

Πριν την εφαρμογή της μεθόδου είναι απαραίτητη η προεπεξεργασία των στερεών αποβλήτων, έτσι ώστε στο θάλαμο της πυρόλυσης να οδηγείται μόνο το οργανικό κλάσμα (απομάκρυνση μετάλλων, γυαλιού κ.λ.π.). Τα τελικά προϊόντα της πυρόλυσης είναι τριών ειδών:

- Αέρια: αποτελούνται από υδρογόνο, μεθάνιο, μονοξείδιο του άνθρακα, διοξείδιο του άνθρακα και άλλα αέρια που εξαρτώνται από τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά των στερεών αποβλήτων που υπόκεινται σε επεξεργασία.
- Υγρά: το υγρό κλάσμα των αποβλήτων αποτελείται από ένα ελαιώδες μίγμα, υψηλής πυκνότητας και ιξώδους, το οποίο περιέχει οξικό οξύ, ακετόνη, μεθανόλη και σύνθετους οξυγονωμένους υδρογονάνθρακες. Με περαιτέρω επεξεργασία, το υγρό κλάσμα των αποβλήτων μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως συνθετικό καύσιμο.
- Στερεά: το στερεό υπόλειμμα αποτελείται από σχεδόν καθαρό άνθρακα που συσσωματώνεται με τα αδρανή συστατικά που υπάρχουν στα στερεά απόβλητα.

Σύμφωνα με την εμπειρία, η κατανομή των προϊόντων μεταξύ αερίων, υγρών και στερεών διαφοροποιείται σημαντικά ανάλογα με τις μεταβολές της θερμοκρασίας πυρόλυσης, όπως φαίνεται στον Πίνακας 2. 2.

Πίνακας 2. 2 Κατανομή προϊόντων σε σχέση με τη θερμοκρασία πυρόλυσης

Θερμοκρασία (°C)	Ποσοστό αερίων (%)	Ποσοστό υγρών (%)	Ποσοστό στερεών (%)
485	12,33	61,08	24,71
650	18,64	59,18	21,8
815	23,69	59,67	17,24
930	24,36	58,70	17,67

Παρατηρείται ότι με την αύξηση της θερμοκρασίας, μειώνεται σημαντικά το ποσοστό των στερεών και σε μικρό βαθμό το ποσοστό των υγρών, ενώ αυξάνεται η παρουσία των αερίων προϊόντων.

Από τη λειτουργία μεγάλων μονάδων πυρόλυσης φαίνεται ότι προκύπτουν δύο προβλήματα. Πρώτον παρατηρείται δυσκολία στην απομάκρυνση μετάλλων και γυαλιού, γεγονός που επιφέρει σημαντική αύξηση των λειτουργικών εξόδων της μονάδας και προϋποθέτει την επιτυχή εφαρμογή διαλογής στην πηγή ή μηχανικής διαλογής. Δεύτερον παρατηρείται δυσκολία στην επίτευξη προδιαγραφών εμπορικού καυσίμου για τα παραγόμενα υγρά προϊόντα, κυρίως λόγω υψηλής υγρασίας που περιέχουν. Παρόλα αυτά, η πυρόλυση διευρύνεται σε σημαντικό βαθμό διεθνώς και επιδιώκεται η μετατροπή της σε τεχνολογία μεγάλης κλίμακας. Ιδιαίτερη σημασία δίδεται στην τεχνολογία της θερμόλυσης η οποία μία παραλλαγή της πυρόλυσης αλλά συγκεντρώνει συγκριτικά πλεονεκτήματα σε σχέση με την αποτέφρωση. [24], [38]

2.6.3 Αεριοποίηση

Η αεριοποίηση είναι μια διαδικασία ατελούς καύσης στην οποία τα στερεά απόβλητα υπόκεινται σε θερμική επεξεργασία με χρήση οξυγόνου, σε ποσότητα μικρότερη από τη στοιχειομετρικά απαιτούμενη. Κατά τη διάρκεια της αεριοποίησης, λαμβάνουν χώρα οι ακόλουθες αντιδράσεις:

$C + O_2 \rightarrow CO_2$ (εξώθερμη)

$C + H_2O \rightarrow CO + H_2$ (ενδόθερμη)

$C + CO_2 \rightarrow 2CO$ (ενδόθερμη)

$C + 2H_2 \rightarrow CH_4$ (εξώθερμη)

$CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$ (εξώθερμη)

Η θερμότητα η οποία συντηρεί τη συνολική διαδικασία της αεριοποίησης παράγεται από τις εξώθερμες αντιδράσεις, ενώ το μονοξείδιο του άνθρακα και το υδρογόνο, δηλαδή τα κύρια συστατικά του παραγόμενου αερίου, δημιουργούνται από τις ενδόθερμες αντιδράσεις.

Τα τελικά προϊόντα της αεριοποίησης είναι αέριο, στερεό υπόλειμμα και το συμπυκνωμένο υγρό. Το αέριο είναι πλούσιο σε μονοξείδιο του άνθρακα, υδρογόνο και κορεσμένους υδρογονάνθρακες (κυρίως μεθάνιο) που μπορεί να χρησιμοποιηθεί

ως καύσιμο. Το αέριο αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μηχανές εσωτερικής καύσης, σε λέβητα θέρμανσης κλπ. Το στερεό υπόλειμμα που αποτελείται από άνθρακα και αδρανή. Ενώ, το συμπυκνωμένο υγρό υπόλειμμα, με χαρακτηριστικά και σύσταση παρόμοια με αυτό που παράγεται κατά την πυρόλυση. [24]

2.7 Βιολογική Ξήρανση

Μια παραλλαγή της Μηχανικής-Βιολογικής Επεξεργασίας, όπου η βιολογική επεξεργασία προηγείται της μηχανικής έχει επιτευχθεί τα τελευταία χρόνια. Σκοπός της παραλλαγής αυτής, είναι η παραγωγή στερεού καυσίμου με καλή ποιότητα, του οποίου οι προδιαγραφές ποικίλουν ανάλογα με τον τελικό χρήστη και είναι γνωστό ως Solid Recover Fuel (SRF). Η παραλλαγή αυτή είναι γνωστή με το όνομα Βιολογική Ξήρανση και περιληπτικά μπορούμε να πούμε ότι αποτελείται από:

- Την αερόβια επεξεργασία των αποβλήτων κατά την οποία συνήθως γίνεται ελάττωση του μεγέθους με τεμαχισμό. Στο στάδιο αυτό γίνεται αποδόμηση των αποβλήτων, με παροχή οξυγόνου, αλλά σε αντίθεση με την κλασσική κομποστοποίηση δεν πραγματοποιείται προσθήκη νερού στα απόβλητα, με αποτέλεσμα η περιεχόμενη υγρασία όσο προχωρά η δράση των μικροοργανισμών ελαττώνεται. Έτσι λοιπόν γίνεται μερική αποδόμηση των αποβλήτων και ένα μεγάλο μέρος του βιολογικού τους περιεχομένου διατηρείται. Μετά την εξάτμιση του εισερχόμενου νερού και λόγω της βιοαποδόμησης (συνολικά σε ποσοστό περίπου 24-30% κ.β της εισόδου), παράγεται ένα προϊόν το είναι απαλλαγμένο από οσμές και μικροοργανισμούς και έχει χαμηλή περιεκτικότητα σε υγρασία, λόγω των εξώθερμων αντιδράσεων που πραγματοποιούνται κατά το στάδιο της βιοξήρανσης (~50°C).
- Μετά το στάδιο της βιοξήρανσης ακολουθεί μηχανική μετεπεξεργασία, η οποία γίνεται με συνδυασμούς μηχανολογικού εξοπλισμού και έχει σκοπό τη βελτίωση της σύστασης του υλικού μέσω της απομάκρυνσης μετάλλων και της μείωσης των μη καύσιμων υλικών όπως οι πέτρες και τα γυαλιά. Το SRF/RDF, το οποίο αποτελεί το τελικό προϊόν της βιοξήρανσης, είναι ένα δευτερογενές καύσιμο με αρκετά σημαντική θερμογόνο δύναμη, περίπου (15-18 MJ/kg), ενώ παράλληλα λόγω της χαμηλής περιεκτικότητας σε υγρασία, γίνονται πιο εύκολα οι μηχανικοί διαχωρισμοί, με αποτέλεσμα το τελικό προϊόν να έχει χαμηλό ποσοστό προσμίξεων.

Σε αυτό το σημείο αξίζει να αναφερθεί ότι η προσωρινή αποθήκευση ή μεταφορά του SRF πριν από τη χρήση του ως καύσιμο θα μπορούσε να οδηγήσει σε ανεπιθύμητα προβλήματα, δηλαδή την αυθόρμητη ανάφλεξή, τις εκπομπές οσμών κτλ με συνέπεια υλικών ζημιών, τη μόλυνση του περιβάλλοντος και τις επιπτώσεις για την υγεία. Τα βιοαποικοδομήσιμα οργανικής ύλης που περιέχονται στα ΑΣΑ/ SRF είναι υπεύθυνα για αυτές τις επιπτώσεις, λόγω της μικροβιακής δραστηριότητας. Ωστόσο, αναστέλλοντας τις συνθήκες για μικροβιακή δραστηριότητα αποφεύγονται ή μειώνονται όλες οι ανεπιθύμητες επιπτώσεις. Στ πλαίσιο αυτό, τα αποξηραμένα απόβλητα και τα παράγωγα SRFs, λόγω της χαμηλής τους περιεκτικότητας σε

υγρασία που περιορίζει τη μικροβιακή δραστηριότητα, έχουν το πλεονέκτημα, σε σχέση με τα μαζικά ΑΣΑ και / ή SRFs που προέρχονται από τη διαδικασία MBT, να μειώνουν τις πιθανές επιπτώσεις, όταν αποθηκεύονται ή μεταφέρονται. [35]

Οι κύριες διαφοροποιήσεις των διαφόρων συστημάτων που εφαρμόζονται έγκειται κυρίως ως προς το πως διαμορφώνεται ο χώρος της ξήρανσης. Τα βασικά συστήματα είναι τρία:

- Η βιολογική ξήρανση σε καλυμμένους σωρούς
- Εντός ενιαίας δεξαμενής
- Σε κουτιά

2.8 Βιολογική μηχανική επεξεργασία

Η βιολογική επεξεργασία των οργανικών αποβλήτων, δεν αποτελεί μια τεχνολογία που πραγματοποιείται από μόνη της, διότι για να επιτευχθούν τα επιθυμητά αποτελέσματα, εκτός από την βιολογική επεξεργασία, είναι απαραίτητος και μηχανολογικός εξοπλισμός με τον οποίο πραγματοποιείται η αφαίρεση προσμίξεων από τα οργανικά απόβλητα (κοσκίνηση) αλλά και η ομογενοποίησή τους (ανάμειξη και τεμαχισμός).

Παράλληλα ολοκληρωμένη λύση δεν μπορεί να αποτελέσει ούτε η Μηχανολογική Διαλογή, καθώς εκτός από το ότι ανακτούνται κάποια ανακυκλώσιμα υλικά, απαιτείται περαιτέρω επεξεργασία όσον αφορά τα υπόλοιπα ρεύματα που διαχωρίζονται. Η διαφορά μεταξύ των συστημάτων βιολογικής επεξεργασίας οργανικών αποβλήτων και των συστημάτων MBT (των συστημάτων δηλαδή που συνδυάζουν μηχανική διαλογή και βιολογική επεξεργασία), έγκειται στην πολυπλοκότητα των απαιτούμενων μηχανικών διαχωρισμών αλλά και τα προϊόντα τα οποία παράγονται.

Επομένως, όσον αφορά τα «καθαρά» ρεύματα οργανικών αποβλήτων (π.χ. απόβλητα κήπου κ.λ.π), στον μηχανολογικό εξοπλισμό περιλαμβάνονται κάποια στάδια, όπως ο τεμαχισμός και η κοσκίνηση, κατά τα οποία προετοιμάζονται τα απόβλητα με σκοπό να μεγιστοποιηθεί η καθαρότητά τους. Στην περίπτωση όπου γίνεται επεξεργασία ΑΣΑ, τότε το τμήμα της μηχανικής διαλογής, αποτελεί βασικό μέρος της επεξεργασίας και το κόστος επένδυσης και λειτουργίας του είναι ιδιαίτερα υψηλό. Επίσης, για να επιτευχθούν οι κατάλληλες συνθήκες για τη βιοσταθεροποίηση του οργανικού κλάσματος των ΑΣΑ, που έχει διαχωριστεί κατά τη μηχανική διαλογή, το τμήμα της βιολογικής επεξεργασίας εμφανίζει μεγαλύτερη πολυπλοκότητα

Στη συνέχεια, τη μηχανική επεξεργασία των Α.Σ.Α, ακολουθεί η βιολογική επεξεργασία ενός κλάσματος το οποίο είναι εμπλουτισμένο σε βιοαποδομίσημα υλικά και η ποιότητά του εξαρτάται από τις αντίστοιχες διεργασίες της μηχανικής διαλογής. Σε αυτή την περίπτωση η βιολογική επεξεργασία μπορεί να λειτουργήσει εξ ίσου καλά όσον αφορά τις βιολογικά εξαρτώμενες παραμέτρους (καταστροφή παθογόνων – υγειονοποίηση και βιοσταθεροποίηση), όμως στο τελικό προϊόν θα περιλαμβάνονται όλες οι μη βιοδιασπώμενες προσμείξεις και ρύποι του υλικού

εισόδου. Παράλληλα λόγω του ότι μέρος του οργανικού υλικού έχει αποδομηθεί σε CO_2 , είναι πολύ πιθανό αυτό να συμβεί σε υψηλότερες συγκεντρώσεις.

Στην ουσία, τα υλικά που δεν βιοαποδομούνται και εισέρχονται σε μια μονάδα βιολογικής επεξεργασίας, θα ληφθούν ως έχουν στην έξοδό της. Στην περίπτωση των ΑΣΑ αυτά τα υλικά περιλαμβάνουν προσμείξεις ξένων σωμάτων, όπως πλαστικό φιλμ και γυαλί, καθώς επίσης και μη βιοδιασπάσιμους ρύπους (βαρέα μέταλλα, εμμένοντες οργανικούς ρύπους), που εντοπίζονται στο τελικό προϊόν κι έχουν σαν αποτέλεσμα να υποβαθμίζουν την αξία του και να περιορίζουν τις δυνατότητες χρήσης του. Επομένως η ποιότητα του τελικού προϊόντος εξαρτάται κατά ένα μεγάλο ποσοστό από την καθαρότητα των υλικών εισόδου.

Τέτοια συστήματα, στα οποία γίνεται συνδυασμός των μηχανικών διαχωρισμών και της επεξεργασίας του διαχωρισμένου οργανικού κλάσματος, ονομάζονται συστήματα Μηχανικής Βιολογικής Επεξεργασίας (Mechanical Biological Treatment - MBT).

Σε πολλές χώρες έχουν αναπτυχθεί πολύπλοκα συστήματα ΜΒΕ τα οποία έχουν ως αποτέλεσμα την παραγωγή των εξής προϊόντων:

- Εδαφοβελτιωτικό χαμηλής ποιότητας (χρήση ως υλικό αποκαταστάσεων, τελικής κάλυψης, κ.λ.π), το οποίο για να παραχθεί απαιτεί εκτεταμένη επεξεργασία του οργανικού κλάσματος. Αυτό συμβαίνει, γιατί πρέπει να πληρούνται συγκεκριμένα κριτήρια σε ότι αφορά το βαθμό χουμοποίησης (αποσύνθεση των οργανικών υπολλειμάτων που υπάρχουν στο έδαφος ή που βάζουμε εμείς κατά την οργανική λίπανση), την κοκκομετρία και την παρουσία μικροοργανισμών κ.λ.π., από υλικά όπως, εδαφοβελτιωτικά ή υλικά τύπου κομπόστ.
- Δευτερογενές καύσιμο, το γνωστό RDF, το οποίο είναι ένα ξηρό κλάσμα υψηλότερης θερμογόνου δύναμης από τα σύμμεικτα ΑΣΑ το οποίο περιέχει χαρτί, πλαστικό, οργανικά σε μικρότερο βαθμό και άλλα καύσιμα και μη καύσιμα υλικά. Η αξιοποίηση του κλάσματος αυτού πραγματοποιείται σε ενεργοβόρες βιομηχανίες ή ειδικά σχεδιασμένες εγκαταστάσεις.
- Σιδηρούχα και μη σιδηρούχα μέταλλα και σε μικρότερο βαθμό χαρτί και πλαστικά τα οποία είναι ανακυκλώσιμα υλικά.
- Σε περίπτωση που η βιολογική επεξεργασία γίνει με τη μέθοδο της αναερόβιας χώνευσης , παραγωγή βιοαερίου.

Εδώ αξίζει να σημειώσουμε ότι οι περισσότερες μονάδες MBT βρίσκονται στην Ευρώπη και στη Βόρειο Αμερική Η χρήση της αερόβιας MBT, γνωρίζει μεγάλη άνθιση τα τελευταία χρόνια καθώς είναι συμβατή με τους στόχους που θέτει η Ε.Ε, όσον αφορά στις εγκαταστάσεις που επεξεργάζονται απορρίμματα. Αυτό προκύπτει από τα πολλά πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου η οποία επιτρέπει την παραγωγή ποικίλων προϊόντων, όπως εδαφοβελτιωτικά, καύσιμα (SRF) υψηλής θερμογόνου δύναμης κτλ. ακόμη δίνουν τη δυνατότητα ανάκτησης σιδηρούχων υλικών και

μετάλλων, συμβάλλοντας με αυτό τον τρόπο στην ανακύκλωση. Αντίθετα, τα κυριότερα μειονεκτήματα είναι η περιορισμένη αγορά που απευθύνονται τα RDF και SRF, ο υψηλός βαθμός εξάρτησης από την εφαρμοσμένη τεχνολογία και η αδυναμία ανάπτυξης αγοράς για τα προϊόντα επεξεργσίας με αποτέλεσμα να οδηγούνται σε ΧΥΤΑ. [2], [12], [35]

2.9 Υγειονομική ταφή

Υγειονομική ταφή ονομάζεται η διαδικασία ταφής των στερεών αποβλήτων – απορριμμάτων με την οποία ελαχιστοποιούνται οι επιπτώσεις στο περιβάλλον και στη δημόσια υγεία, μέσω κατάλληλων έργων υποδομής και συγκεκριμένες διαδικασίες λειτουργίας και ελέγχου. Ασφαλής ταφή ονομάζεται η ταφή επικίνδυνων αποβλήτων. Βασικές παράμετροι για την εφαρμογή της τεχνικής της υγειονομικής ταφής αποτελούν η καταλληλότητα του προς επιλογή χώρου καθώς και η χρήση αποτελεσματικής τεχνολογίας, έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η προστασία του περιβάλλοντος και η ασφαλής επανένταξη του χώρου στη φύση μετά την ολοκλήρωση του χρόνου ζωής του.

Με την αύξηση του μεγέθους των χώρων υγειονομικής ταφής (ΧΥΤΑ) αλλά και του φάσματος των υλικών προς ταφή το ρυπαντικό δυναμικό των διηθημάτων αυξήθηκε και έγινε αναγκαία η εισαγωγή διατάξεων περιβαλλοντικής προστασίας από τα διηθήματα. Οι διατάξεις αυτές εκφράζονται ως προδιαγραφές εγκλεισμού των διηθημάτων σε μορφή μέγιστης επιτρεπτής υδραυλικής διαπερατότητας του μανδύα στεγανοποίησης.

Η επιλογή του μεγέθους πρέπει να γίνεται αφού έχει γίνει μακροπρόθεσμος προγραμματισμός διαχείρισης των ΑΣΑ και έχουν ληφθεί υπόψη προγράμματα διαλογής στη πηγή και ανακύκλωσης των ΑΣΑ για την εκτίμηση μελλοντικών αναγκών σε χώρους ταφής. Εν γένει το μέγεθος ενός ΧΥΤΑ δεν πρέπει να προβλέπεται σε διάστημα μεγαλύτερο 25ετίας. Για μεγαλύτερα διαστήματα, ο βαθμός αβεβαιότητας και επομένως και διαχειριστικής επικινδυνότητας που εισάγεται αυξάνει υπερβολικά κυρίως λόγω της άγνοιας των τεχνολογικών δεδομένων που θα έχουν διαμορφωθεί μέχρι το χρονικό αυτό ορίζοντα αλλά και των αναγκών σε χώρους διάθεσης.

Με βάση τα παραπάνω δεδομένα προκύπτει ότι τα κυριότερα ζητήματα που πρέπει να αντιμετωπισθούν είναι η χωροθέτηση, ο σχεδιασμός και η λειτουργία και τέλος, οι μακροπρόθεσμες εγγυήσεις και νομικές ευθύνες. [17], [24]

2.9.1 Τεχνική περιγραφή ΧΥΤΑ

Η σύγχρονη τεχνολογία υγειονομικής ταφής επιτρέπει την κατασκευή και λειτουργία των χώρων υγειονομικής ταφής απορριμμάτων (ΧΥΤΑ) σταδιακά με τη μέθοδο των κυττάρων. Κύτταρο (cell) ονομάζεται ο όγκος του υλικού που τοποθετείται σε κάθε προκαθορισμένη λειτουργική περίοδο (αντίστοιχη φάση λειτουργίας), συνήθως μία μέρα.

Κάθε κύτταρο έχει ίδιο διαμορφωμένο και στεγανοποιημένο πυθμένα με σαφή υδραυλικά όρια από τον προηγούμενο και το επόμενο και ίδιο σύστημα συλλογής διηθημάτων. Πληρούται εξ ‘ ολοκλήρου πριν την αρχή πλήρωσης του επόμενου. Το κύτταρο αποτελείται από τα απορρίμματα και το υλικό κάλυψης. Η ημερήσια κάλυψη είναι 15 – 30 cm χώματος ή εδαφοβελτιωτικού που τοποθετείται στο τέλος κάθε μέρας, προκειμένου να αποφευχθεί η διασπορά των απορριμμάτων και να ελεγχθεί η εισροή νερού στα απορρίμματα.

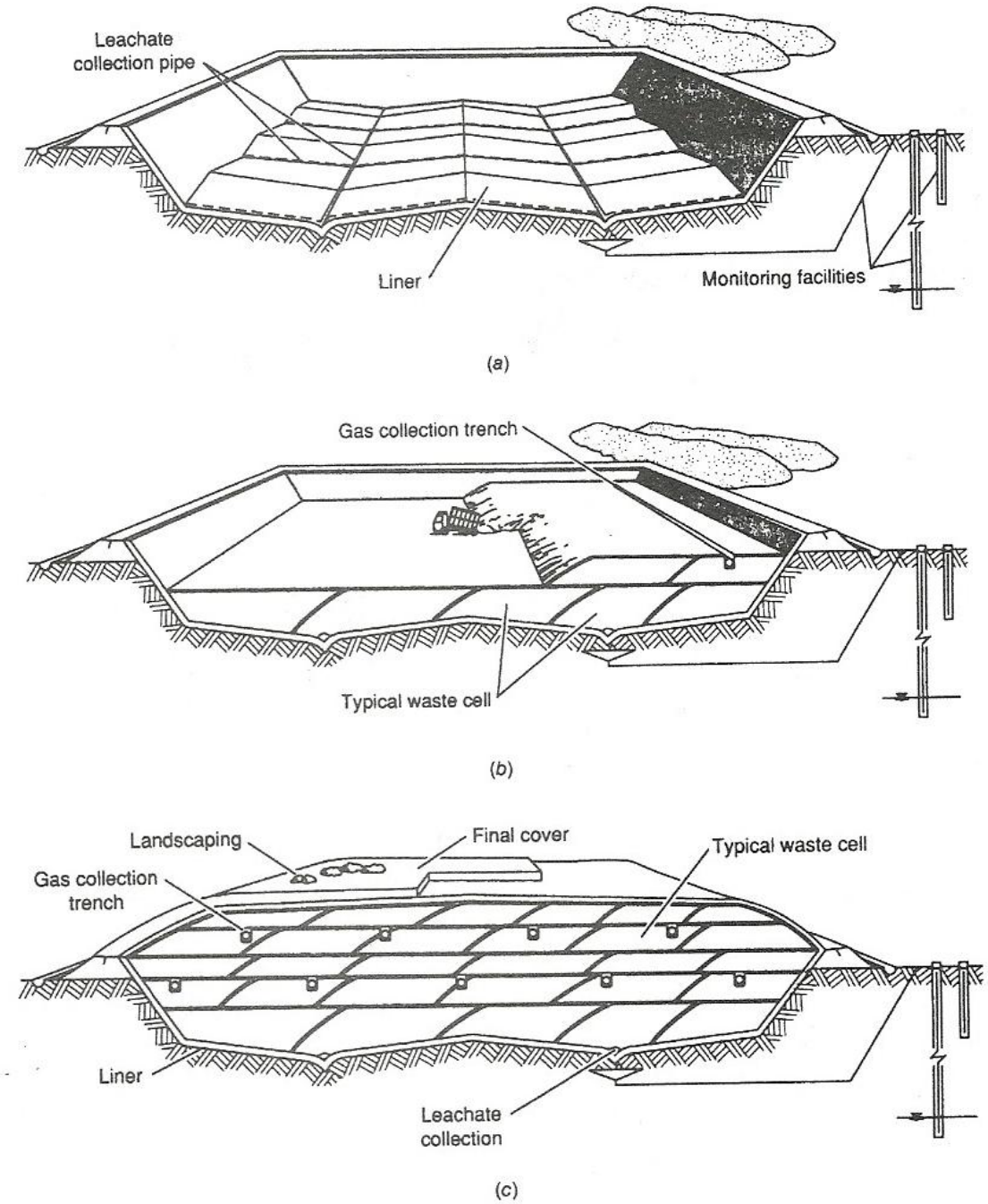
Ταμπάνι (lift) ονομάζεται ένα πλήρες στρώμα σε όλη την έκταση του κυττάρου. Όταν το ύψος υπερβαίνει τα 16 – 25 m, χρησιμοποιούνται τοιχεία (benches) για να διατηρηθεί η κλίση των πρανών, για να τοποθετηθούν κανάλια για τα υγρά διηθήματα και για την τοποθέτηση αγωγών βιοαερίου. Το τελικό ταμπάνι περιλαμβάνει το στρώμα κάλυψης. Το τελικό στρώμα κάλυψης εφαρμόζεται σε όλη την επιφάνεια κάθε κυττάρου αφού συμπληρωθούν όλες οι λειτουργίες. Το τελικό κάλυμμα συνήθως αποτελείται από πολλαπλά στρώματα χώματος ή/και υλικών γεωμεμβρανών σχεδιασμένων με σκοπό την αύξηση των επιφανειακών απορροών, την παρεμπόδιση εισροής νερού και την υποστήριξη επιφανειακής βλάστησης φυτών. Το υγρό που συλλέγεται στον βυθό ονομάζεται διήθημα (leachate) και περιλαμβάνει την διήθηση βροχών, νερών αρδεύσεως και την υγρασία των απορριμμάτων.

Στην χωματερή παράγεται βιοαέριο (μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα) με κάποια περιεκτικότητα σε άζωτο, οξυγόνο, αμμωνία και πτητικά οργανικά. Κάτω υπάρχει στρώμα πηλού ή γεωμεμβρανών για αποφυγή διήθησης. Ένας χώρος υγειονομικής ταφής κλείνει σε 10 – 15 χρόνια ανάλογα με τον όγκο και τις ροές των απορριμμάτων και στην συνέχεια εξακολουθεί να ελέγχεται.

2.9.2 Στάδια ανάπτυξης ΧΥΤΑ

Η προετοιμασία του χώρου υγειονομικής ταφής περιλαμβάνει την εξασφάλιση απορροής υγρών, την περίφραξη και την δημιουργία οδών πρόσβασης. Το επόμενο βήμα περιλαμβάνει εκσκαφή και προετοιμασία του δαπέδου (διαδοχικά κατά τμήματα). Τα χώματα χρησιμοποιούνται αργότερα για κάλυψη. Τοποθετούνται περιμετρικοί αισθητήρες μεταξύ του πυθμένα και του υδροφόρου ορίζοντα και δάπεδο από πηλό χαμηλής διαπερατότητας.

Κάθε ημερήσιο φορτίο τοποθετείται συμπιεσμένο σε στρώμα 2,5 – 4 m. Το πάχος είναι 3 – 10m. Το κάλυμμα χώματος είναι 15 – 30cm στο τέλος κάθε μέρας. Στο τέλος με το κλείσιμο του κυττάρου τοποθετούνται κατακόρυφοι αγωγοί αερίου. Χρειάζεται διαρκής έλεγχος και χειρισμός ενός ΧΥΤΑ μια και με τις αντιδράσεις ο χώρος καθιζάνει. Η παρακολούθηση και συντήρηση εξακολουθεί για 30 – 50 χρόνια μετά το κλείσιμο. Μέσα στον χώρο λαμβάνουν χώρα βιολογικές αντιδράσεις (αρχικά αερόβιες, έπειτα αναερόβιες) και χημικές και φυσικές μετατροπές (διαλυτοποίηση κ.ο.κ.) που οδηγούν σε διάφορα συστατικά τόσο στα υγρά όσο και στα αέρια απόβλητα.



Εικόνα 2. 17 Ανάπτυξη και συμπλήρωση ΧΥΤΑ: εκσκαφή και προετοιμασία (a), τοποθέτηση στερεών απορριμμάτων (b) και τομή συμπληρωμένης χωματερής (c) [35]

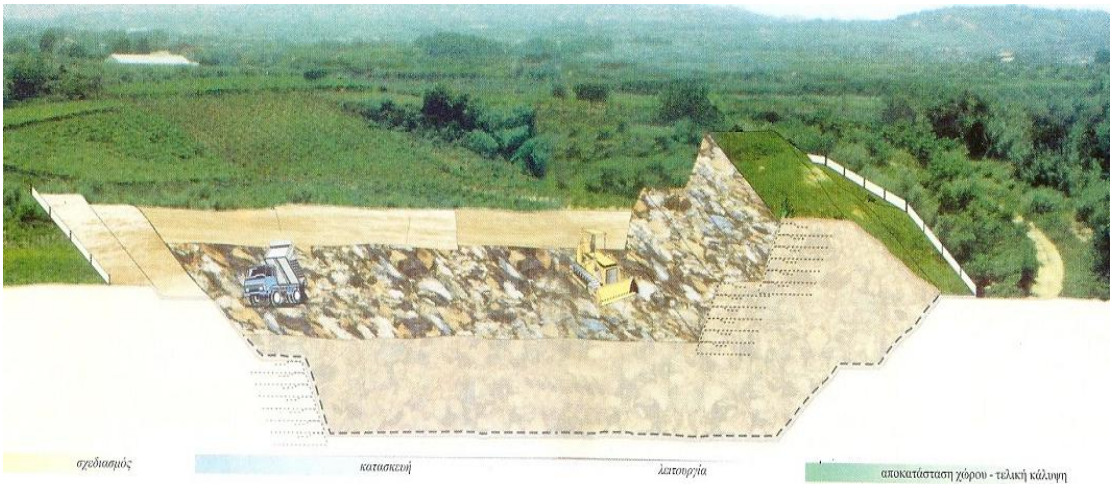
2.9.3 Γήρανση χώρου υγειονομικής ταφής

Οι πτητικές οργανικές ενώσεις αυξάνουν με την ηλικία του ΧΥΤΑ. Διακρίνονται 5 φάσεις λειτουργίας ενός ΧΥΤΑ:

I. Αρχική προσαρμογή (αερόβια)
II. Μεταβατική φάση (απονιτροποίηση, αποθείωση, μεταβατική αναερόβια)
III. Όξινη φάση (οξεογένεση, διαλυτοποίηση FE, Zn κλπ.)

IV. Μεθανογένεση (παραγωγή μεθανίου)
V. Ωρίμανση (παραγωγή δύσκολα αποδομήσιμων χουμικού και φουλβικού οξέος)

Η διάρκεια των φάσεων εξαρτάται από την κατανομή οργανικών, την διαθεσιμότητα θρεπτικών, την υγρασία και τον βαθμό αρχικής συμπίεσης. Η αναερόβια αποσύνθεση του οργανικού κλάσματος των ΑΣΑ παράγει βιοαέριο. Το βιοαέριο μεταφέρεται με μεταφορά και διάχυση. Ο πρώτος μηχανισμός υπερισχύει όταν έχουμε μεγάλη παραγωγή ενώ ο δεύτερος όταν έχει μειωθεί η παραγωγή αερίου. Ο σχηματισμός του βιοαερίου στο χώρο της υγειονομικής ταφής και οι ανεξέλεγκτες εκλύσεις του είναι δυνατόν να προξενήσουν πυρκαγιές, εκρήξεις, επικίνδυνες συγκεντρώσεις αερίων, οσμές κλπ. Όταν το μεθάνιο είναι μεταξύ 5 – 15% το αέριο είναι εκρηκτικό. Η παραγωγή βιοαερίου παρουσιάζει μέγιστο σε 5 – 10 χρόνια ανάλογα με την υγρασία της χωματερής. [24]



Εικόνα 2. 18 Γενική άποψη της εξέλιξης ενός ΧΥΤΑ [35]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

3 Μαθηματικός Προγραμματισμός

3.1 Εισαγωγή στον Μαθηματικό προγραμματισμό

Ο Μαθηματικός Προγραμματισμός (Mathematical Programming) αποτελεί ένα ιδιαίτερα ενδιαφέρον πεδίο της Επιστήμης των Αποφάσεων (Decision Science) και της επιχειρησιακής έρευνας και προφανώς των Μαθηματικών, των Οικονομικών και της Πληροφορικής. Βασικός σκοπός του Προγραμματισμού είναι η αντιμετώπιση και επίλυση προβλημάτων και η συμβολή στη λήψη αποφάσεων μέσω της οδού της βελτιστοποίησης και της εύρεσης της άριστης λύσης στο εκάστοτε πρόβλημα.

Ασχολείται με προβλήματα βελτιστοποίησης ή αλλιώς αριστοποίησης (optimization) τα οποία διαθέτουν μια συγκεκριμένη εν γένει μορφή και αποσκοπούν στη μεγιστοποίηση (maximize) ή ελαχιστοποίηση (minimize) μιας αντικειμενικής συνάρτησης (objective function) η οποία υπόκειται σε ένα σύνολο περιορισμών (constraints). Η αντικειμενική συνάρτηση και οι περιορισμοί είναι μαθηματικές σχέσεις-συναρτήσεις των μεταβλητών απόφασης (decision variables) και των παραμέτρων (parameters) του εκάστοτε προβλήματος Μαθηματικού Προγραμματισμού. Οι μεταβλητές απόφασης είναι τα άγνωστα και ελέγξιμα μεγέθη συστατικά του συστήματος ενώ οι παράμετροι αποτελούν τις γνωστές εκ των προτέρων ποσότητες οι οποίες και δε μεταβάλλονται (Cohon 2003). Οι τιμές τις οποίες λαμβάνουν οι μεταβλητές απόφασης δύνανται να είναι συνεχείς, ακέραιες ή δυαδικές. Οι τιμές των παραμέτρων μπορεί να είναι ρητά δοσμένες ή να περιγράφονται ως ασαφείς αριθμοί ή να αποδίδονται μέσω της χρήσης πιθανοτήτων.

Ο Μαθηματικός Προγραμματισμός παρέχει το επιστημονικό πλαίσιο για την αποτύπωση ενός πραγματικού προβλήματος μέσω της χρήσης μαθηματικών σχέσεων και την κατασκευή ενός ολοκληρωμένου μαθηματικού μοντέλου το οποίο να περιγράφει όσο το δυνατόν καλύτερα το αρχικό πραγματικό σύστημα. Σκοπός του Μαθηματικού Προγραμματισμού είναι η κατασκευή και η επίλυση του μαθηματικού μοντέλου (μαθηματικού προγράμματος) και η ανακάλυψη εκείνων των αποφάσεων του μελετώμενου συστήματος οι οποίες θεωρούνται βέλτιστες (Cohon 2003).Με την έννοια βέλτιστο ή άριστο ορίζεται είτε η μέγιστη τιμή ενός μεγέθους (η μιας ποσότητας) η οποία είναι επιθυμητή είτε αντίστοιχα η ελάχιστη τιμή του η οποία είναι ανεπιθύμητη.

Η λύση ενός μαθηματικού προγράμματος από τις τιμές τις οποίες λαμβάνουν όντας αριστοποιημένες οι μεταβλητές απόφασης. Μια λύση η οποία ικανοποιεί όλους τους ισχύοντες περιορισμούς καλείται εφικτή λύση (feasible solution) ενώ αν δεν ανήκει στο εφικτό χωρίο των περιορισμών τότε χαρακτηρίζεται ως μη εφικτή λύση (Μαυρωτάς Γ. 2000, Holzman 1981). Γενικά υφίσταται μεγάλος αριθμός εφικτών λύσεων και γι αυτό το λόγο ο ρόλος της αντικειμενικής συνάρτησης είναι η

αξιολόγηση αυτών των εφικτών λύσεων. Συγκεκριμένα η εφικτή λύση η οποία αποδίδει τη βέλτιστη τιμή-είτε μέγιστη είτε ελάχιστη- στην αντικειμενική συνάρτηση ονομάζεται βέλτιστη ή άριστη λύση (optimal solution) του προβλήματος (Cohon 2003). Επισημαίνεται ότι είναι δυνατόν να ενυπάρχουν περισσότερες από μια άριστες λύσεις σε ένα πρόβλημα Μαθηματικού Προγραμματισμού (Holzman 1981) οι οποίες ονομάζονται και εναλλακτικά βέλτιστα (alternative optima). [25], [33]

Εκφρασμένο σε μαθηματική γλώσσα ένα πρόβλημα Μαθηματικού Προγραμματισμού διατυπώνεται υπό την ακόλουθη μορφή:

$$\min \text{ or } \max \ Z(x_{1,} x_{2,} ..., x_n)$$

$$\text{st}: \quad g_1(x_1, x_2, ..., x_n) \overset{\leq}{\underset{\geq}{=}} b_1$$

$$g_2(x_1, x_2, ..., x_n) \overset{\leq}{\underset{\geq}{=}} b_2$$

$$...$$

$$g_m(x_1, x_2, ..., x_n) \overset{\leq}{\underset{\geq}{=}} b_m$$

όπου : ο αριθμός των μεταβλητών απόφασης

: οι μεταβλητές απόφασης

: η αντικειμενική συνάρτηση

: ο αριθμός των περιορισμών

:οι περιορισμοί

: το δεξί μέλος των περιορισμών

Προφανώς οι περιορισμοί ενός προβλήματος Μαθηματικού Προγραμματισμού μπορεί να είναι είτε ισότητες είτε ανισότητες ενώ οι μαθηματικές σχέσεις ενδέχεται να μην είναι πάντα γραμμικές συναρτήσεις των μεταβλητών απόφασης. Επίσης ένα πρόγραμμα Μαθηματικού Προγραμματισμού μπορεί να περιλαμβάνει περισσότερες από μία αντικειμενικές συναρτήσεις οπότε σε αυτή την περίπτωση ανήκει στην κατηγορία του Πολυκριτηριακού Μαθηματικού Προγραμματισμού.

Ο Μαθηματικός Προγραμματισμός αποτελεί ένα ευρύτερο σύνολο μαθηματικών τεχνικών, μεθόδων και μοντέλων ο οποίος μπορεί να διακριθεί σε πολλές κατηγορίες ανάλογα με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά τους. Η κατηγοριοποίηση αυτή οφείλεται σε διάφορους κανόνες όπως η γραμμικότητα των σχέσεων, η ύπαρξη ακέραιων μεταβλητών, η χρήση ρητών αριθμών κοκ Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία οι περισσότερο δεδομένες κατηγορίες Γραμμικού Προγραμματισμού είναι οι ακόλουθες:

- Γραμμικός Προγραμματισμός (ΓΠ| Linear Programming, LP)

- Ακέραιος Γραμμικός Προγραμματισμός (ΑΓΠ| Integer Linear Programming,ILP)
- Μικτός Ακέραιος Γραμμικός Προγραμματισμός (ΜΑΓΠ| Mixed Linear Integer Programming, MILP)
- Μη Γραμμικός Προγραμματισμός (ΜΓΠ| Non-Linear Programming, NLP)
- Ακέραιος Μη Γραμμικός Προγραμματισμός (ΑΚΓΠ| Integer Non- Linear Programming, INLP)
- Μικτός Ακέραιος Μη Γραμμικός Προγραμματισμός (ΜΑΜΓΠ| Mixed Integer Non Linear Programming, MINLP)
- Δυναμικός Προγραμματισμός (ΔΠ| Dynamic Programming,DP)
- Στοχαστικός Προγραμματισμός (ΣΠ| Stochastic Programming, SP)
- Ασαφής Προγραμματισμός (ΑΠ| Fuzzy programming, FP)
- Δευτεροβάθμιος ή Τετραγωνικός Προγραμματισμός (Quadratic Programming,QP)
- Προγραμματισμός Στόχων (en > Goal Programming)

Εκτός του Προγραμματισμού των Στόχων ο οποίος ήδη αποτελεί γνώριμο εκπρόσωπο του ΠΚΜΠ, οι προαναφερθείσες κατηγορίες απαντώνται στην πλειοψηφία τους και σε πολυκριτηριακά προβλήματα.

Γενικά όλα τα προβλήματα Μαθηματικού Προγραμματισμού διακρίνονται από δύο βασικές φάσεις, της φάσης της κατασκευής του μαθηματικού μοντέλου και τη φάση της επίλυσής του. Η ανάπτυξη των μαθηματικών προγραμμάτων υλοποιείται με τη χρήση γλωσσών μοντελοποίησης ή ακόμη και γλωσσών προγραμματισμού, οι οποίες είναι ιδιαίτερα εξελιγμένες και οι οποίες προσφέρουν σημαντικές δυνατότητες στους χρήστες και κυρίως μεγαλύτερη ευχέρεια στην αναπαράσταση των πραγματικών προβλημάτων και την κατασκευή των μαθηματικών μοντέλων.

Η επίλυση των προβλημάτων αυτών συνιστά τον σκοπό του Μαθηματικού Προγραμματισμού και για αυτό έχει αναπτυχθεί μια πληθώρα από μεθόδους και τεχνικές επίλυσης οι οποίες συνεχώς βελτιώνονται. Οι μέθοδοι ή αλλιώς αλγόριθμοι επίλυσης καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα προβλημάτων εξειδικευμένοι ανά κατηγορία Μαθηματικού Προγραμματισμού και αποτελούν συνήθως ανεξάρτητα προγράμματα τα οποία είτε συμπεριλαμβάνονται στις γλώσσες μοντελοποίησης είτε καλούνται με εξωγενή τρόπο από αυτές.

Οι αυξημένες δυνατότητες των υπολογιστικών συστημάτων έχουν δώσει τεράστια ώθηση στην επίλυση των πολύπλοκων αυτών προβλημάτων τα οποία τα οποία πρωθύστερα θεωρούνταν πρακτικά ανεπίλυτα λόγω απειρισμού των απαιτούμενων υπολογιστικών χρόνων, έλλειψης πόρων μνήμης, υπολογιστικής ισχύος και αποθηκευτικού χώρου κλπ ενώ τώρα μπορούν να επιλυθούν σε ταχύτερους χρόνους εξασφαλίζοντας ταυτόχρονα ακριβέστερες και πληρέστερες λύσεις.

3.2 Πολυκριτηριακή Λήψη Αποφάσεων

Η πολυκριτηριακή λήψη αποφάσεων (ΠΚΛΑ) (Multiple Criteria Decision Making, MCDM) είναι ο κλάδος εκείνος της Επιχειρησιακής Έρευνας (Operational Research) που ασχολείται με την επίλυση προβλημάτων λαμβάνοντας υπόψη περισσότερα από ένα κριτήρια απόφασης. Αποτελεί μια προσέγγιση η οποία αποβλέπει στην επιλογή μιας λύσης από ένα σύνολο εναλλακτικών επιλογών και αντιμαχόμενων στόχων. Υλοποιείται από τον εκάστοτε αποφασίζοντα ο οποίος συγκρίνει και αξιολογεί τις προσφερόμενες εναλλακτικές αυτές λύσεις.

Η εισαγωγή περισσότερων του ενός κριτηρίων οδηγεί σε μια πιο ρεαλιστική απεικόνιση των πραγματικών προβλημάτων ενώ ταυτόχρονα προσφέρει μεγαλύτερη ευελιξία και καλύτερη αντιμετώπιση τους καθώς εξετάζονται περισσότερες διαστάσεις και πτυχές τους. Όμως, η ΠΚΛΑ δε συνιστά μία μεθοδολογία εύρεσης της άριστης λύσης επειδή δεν υπάρχει άριστη λύση η οποία να εμφανίζει τις καλύτερες επιδόσεις σε όλα τα κριτήρια.

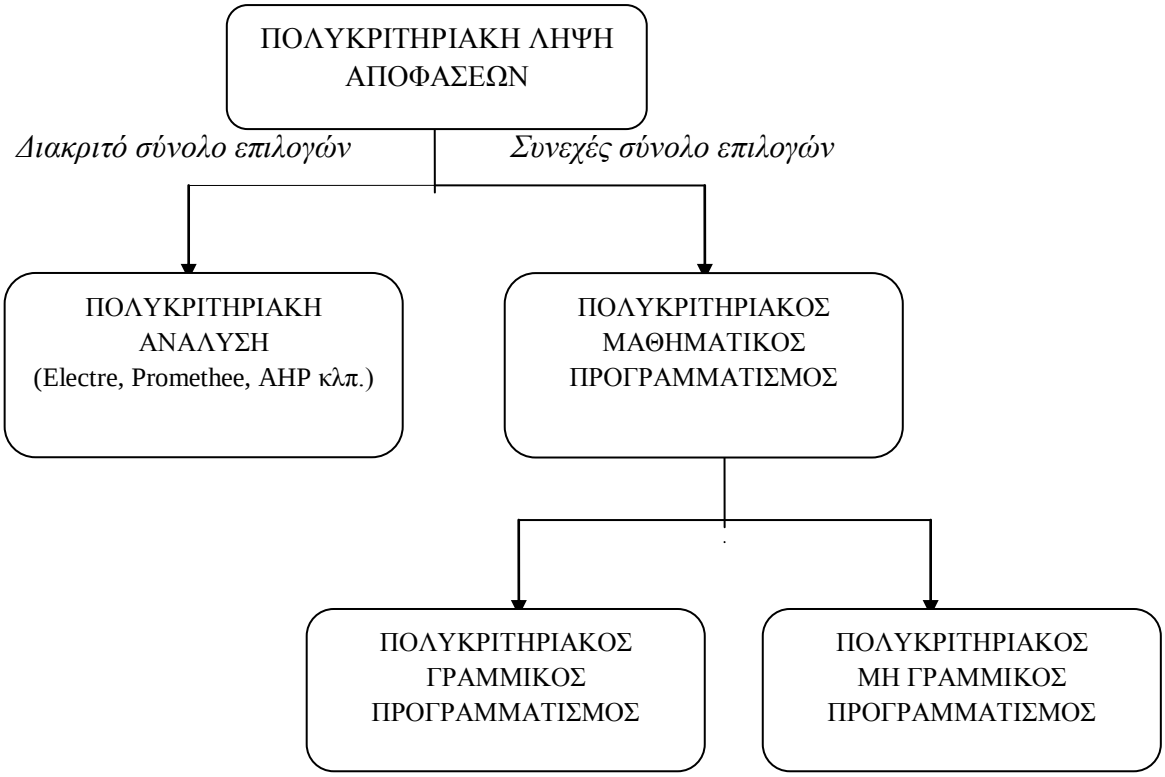
Στα μονοκριτηριακά προβλήματα, ο αποφασίζων συμμετέχει μόνο κατά το στάδιο της διαμόρφωσης του μοντέλου αφού η επίλυσή του γίνεται χωρίς την περαιτέρω ανάμιξή του στη διαδικασία λήψης απόφασης για αυτό και ουσιαστικά δεν θεωρούνται προβλήματα λήψης απόφασης, αλλά προβλήματα υπολογισμού βέλτιστης λύσης. Αντίθετα στην ΠΚΛΑ είναι απαραίτητη η συμμετοχή του αποφασίζοντα στην όλη διαδικασία επίλυσης έτσι ώστε να είναι δυνατή η έκφραση των προτιμήσεων του σε σχέση με τις επιδόσεις των εναλλακτικών επιλογών στα εξεταζόμενα κριτήρια και να οδηγηθεί στην τελική του απόφαση. Επισημαίνεται ότι εάν υπάρχει κάποια εναλλακτική επιλογή η οποία έχει την καλύτερη επίδοση ως προς όλα τα κριτήρια τότε η λύση καθίσταται προφανής. Αυτό όμως συμβαίνει σπάνια καθώς τα κριτήρια απόφασης είναι συνήθως αλληλοσυγκρουόμενα μιας και εκφράζουν διαφορετικά χαρακτηριστικά των διαφόρων εναλλακτικών επιλογών.

Τα προβλήματα της ΠΚΛΑ είναι χαμηλού βαθμού δόμησης (ill structured problems) μιας και η ορθολογική λύση δεν καθορίζεται από το ίδιο το πρόβλημα όπως στην περίπτωση ύπαρξης ενός μόνο κριτηρίου, αλλά αποτελεί αντικείμενο αναζήτησης με άμεση εμπλοκή του αποφασίζοντα στη συγκεκριμένη διαδικασία κατά την οποία εκφράζει τις υποκειμενικές του προτιμήσεις. Για το λόγο αυτό οι μέθοδοι αντιμετώπισης τέτοιων προβλημάτων ορίζονται και ως μέθοδοι πολυκριτηριακής υποστήριξης αποφάσεων (Multiple Criteria Decision Aid, MCDA). [22]

Ο επιστημονικός κλάδος της ΠΚΛΑ περιλαμβάνει πολλές και διαφορετικές θεωρητικές προσεγγίσεις ενώ έχει αναπτυχθεί ένα πλήθος κατάλληλων μεθόδων και τεχνικών για την αντιμετώπιση μιας μεγάλης ποικιλίας προβλημάτων. Οι μέθοδοι της ΠΚΛΑ διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες σύμφωνα με το είδος των εναλλακτικών επιλογών/ λύσεων οι οποίες είναι:

- Η Πολυκριτηριακή Ανάλυση (Multi-Attribute Decision Making, MADM) ο οποίος αφορά την ύπαρξη ενός συνόλου διακριτών και ρητά εκ των προτέρων καθορισμένων εναλλακτικών λύσεων.

- Ο Πολυκριτηριακός Μαθηματικός Προγραμματισμός (Multiple Objective Mathematical Programming, MOMP) ο οποίος αναφέρεται σε ένα σύνολο δυνατών επιλογών το οποίο δεν είναι προκαθορισμένο και δε δίδεται ρητά αλλά έμμεσα μέσω των τιμών μεταβλητών απόφασης ενός προβλήματος Μαθηματικού Προγραμματισμού. Ο ΠΚΜΠ επιλύει το πρόβλημα της διανυσματικής βελτιστοποίησης (vector optimization problem) το οποίο συνιστά επέκταση της βαθμωτής βελτιστοποίησης (scalar optimization) με την οποία ασχολείται ο συμβατικός Μαθηματικός Προγραμματισμός με μία αντικειμενική συνάρτηση. [33], [34]



Σχήμα 3-1: Ταξινόμηση μεθόδων ΠΚΛΑ

3.3 Το πρόβλημα του Πολυκριτηριακού Γραμμικού Προγραμματισμού (ΠΚΓΠ)

Ο ΠΚΓΠ ασχολείται με την εισαγωγή πολλών αντικειμενικών συναρτήσεων σε ένα κλασικό πρόβλημα ΓΠ, δημιουργώντας έτσι το πρόβλημα της γραμμικής διανυσματικής μεγιστοποίησης (linear vector maximum problem). Με τον όρο μεγιστοποίηση εννοείται γενικότερα η αριστοποίηση αφού και η ελαχιστοποίηση μπορεί εύκολα να μετατραπεί σε μεγιστοποίηση με αλλαγή προσήμου. Η ανάλυση

των προβλημάτων αυτών αποτελεί το αντικείμενο του ΠΚΓΠ. Το πρόβλημα του ΠΚΓΠ μαθηματικά ορίζεται ως εξής:

$$\max \{\mathbf{c}^1 \mathbf{x} = z_1\}$$

$$\max \{\mathbf{c}^2 \mathbf{x} = z_2\}$$

$$\ldots\ldots \qquad (3.1)$$

$$\max \{\mathbf{c}^p \mathbf{x} = z_p\}$$

$$\text{s.t. } \mathbf{x} \in S = \{\mathbf{x} \in R^n \mid \mathbf{A}\mathbf{x} = \mathbf{b}, \mathbf{x} \geq \mathbf{0}, \mathbf{b} \in R^m\}$$

S: το εφικτό χωρίο των περιορισμών

n: ο αριθμός των μεταβλητών

m: ο αριθμός των περιορισμών

p: ο αριθμός των αντικειμενικών συναρτήσεων

$\mathbf{c}^i$: το διάνυσμα γραμμής των συντελεστών της 'i' αντικειμενικής συνάρτησης

z^i: η τιμή της 'i' αντικειμενικής συνάρτησης

A : η μήτρα (m $\times$ n) των τεχνολογικών συντελεστών

b : το διάνυσμα (m $\times$ 1) των σταθερών όρων (δεξί σκέλος περιορισμών)

x : το διάνυσμα (n $\times$ 1) των μεταβλητών απόφασης

Οι μεταβλητές απόφασης εκφράζουν τα μεγέθη εκείνα του προβλήματος για τα οποία πρέπει να υπολογιστούν οι τιμές τους. Τα ήδη γνωστά μεγέθη του προβλήματος (μήτρα A, διανύσματα b και c^i) ονομάζονται παράμετροι του προβλήματος. Οι αντικειμενικές συναρτήσεις είναι συναρτήσεις των μεταβλητών απόφασης, των οποίων επιδιώκεται η βελτιστοποίηση (μεγιστοποίηση ή ελαχιστοποίηση). Οι περιορισμοί είναι οι διάφορες σχέσεις (ισότητες ή ανισότητες '$\leq$' και '$\geq$') που πρέπει να πληρούν οι μεταβλητές απόφασης σύμφωνα με το πρόβλημα και οριοθετούν το εφικτό χωρίο S. Με τον όρο λύση ενός προβλήματος ΠΚΓΜ ή ΓΠ, εννοείται ο συνδυασμός των τιμών που λαμβάνουν οι μεταβλητές απόφασης. Αν η λύση αυτή ανήκει στο S (οι τιμές των μεταβλητών απόφασης ικανοποιούν τους περιορισμούς) τότε πρόκειται για εφικτή λύση του προβλήματος αλλιώς χαρακτηρίζεται ως μη εφικτή λύση.

Σε αντίθεση με τον ΓΠ όπου η διαδικασία επίλυσης επικεντρώνεται στην εξέταση του χώρου των μεταβλητών απόφασης R^n, στον ΠΚΓΠ έχει ιδιαίτερη σημασία ο χώρος των αντικειμενικών συναρτήσεων R^p. Αυτό συμβαίνει διότι η διαδικασία επίλυσης στα προβλήματα του ΠΚΓΠ αφορά την εξέταση των τιμών των αντικειμενικών συναρτήσεων που προκύπτουν από κάθε λύση. Συνεπώς, είναι αρκετά

βοηθητική η απεικόνιση του προβλήματος στο χώρο των αντικειμενικών συναρτήσεων R^p αντί του χώρου των μεταβλητών απόφασης R^n. Εξάλλου, το p, δηλαδή ο αριθμός των αντικειμενικών συναρτήσεων, είναι συνήθως πολύ μικρότερο του n που εκφράζει το πλήθος των μεταβλητών απόφασης, κι έτσι η γραφική απεικόνιση της κατάστασης του προβλήματος είναι πιο εύκολη.

Επίσης στα μεν προβλήματα ΓΠ υφίσταται η έννοια της άριστης λύσης (βελτιστοποίηση της μοναδικής αντικειμενικής συνάρτησης) η οποία όμως δεν ισχύει στα αντίστοιχα πολυκριτηριακά προβλήματα καθώς δεν υπάρχει μία λύση η οποία να αριστοποιεί συγχρόνως όλες τις αντικειμενικές συναρτήσεις. Γι' αυτό το λόγο ο όρος άριστη λύση του ΓΠ αντικαθίσταται στον ΠΚΓΠ με εκείνον της ικανής λύσης (efficient solution).

i. Ικανή ή μη κυριαρχούμενη λύση (efficient, non-dominated solution)

Μία λύση **x'** ενός προβλήματος ΠΚΓΠ λέγεται ικανή (ή κατά Pareto άριστη, ή αποτελεσματική) αν και μόνο αν **x'** ∈ S και δεν υπάρχει άλλη λύση **x** ∈ S τέτοια ώστε $\mathbf{c}^i\mathbf{x} \geq \mathbf{c}^i\mathbf{x'}$ για κάθε i=1, 2, …,p και **c**i **x** > **c**i **x'** για τουλάχιστον ένα i.

Κάθε ικανή λύση αντιστοιχεί σε ένα *μη βελτιώσιμο* διάνυσμα στο χώρο των αντικειμενικών συναρτήσεων, με την έννοια ότι δεν μπορούμε να βελτιώσουμε την τιμή μιας αντικειμενικής συνάρτησης χωρίς να χειροτερεύσουμε τουλάχιστον μία από τις άλλες. Ο όρος "ικανή λύση" χρησιμοποιείται επίσης για να εκφράσει και το αντίστοιχο διάνυσμα τιμών των κριτηρίων $\mathbf{z'}=(\mathbf{c}^1\mathbf{x'}, \mathbf{c}^2\mathbf{x'},\ldots,\mathbf{c}^p\mathbf{x'})$ στο χώρο των αντικειμενικών συναρτήσεων R^p. Όταν υπάρχει λύση **x** ∈ S τέτοια ώστε **c**i **x** ≥ **c**i **x'** για i=1, 2, …, p με τουλάχιστον μία αυστηρή ανισότητα τότε η λύση **x** *υπερτερεί* της **x'** και η **x'** *κυριαρχείται* από την **x.**

Αντικειμενικός σκοπός της επίλυσης των προβλημάτων ΠΚΓΠ είναι, αρχικά, ο προσδιορισμός των ικανών λύσεων και στη συνέχεια η υποστήριξη του αποφασίζοντα ώστε να επιλέξει εκείνη την ικανή λύση που εκφράζει καλύτερα τις προτιμήσεις του. Απαραίτητη προϋπόθεση για να είναι μία λύση ενός προβλήματος ΠΚΓΠ αποδεκτή είναι να πρόκειται για ικανή λύση. [33]

ii. Τελική ή σχετικά βέλτιστη λύση (final or best compromise solution)

Η ικανή εκείνη λύση που τελικά επιλέγει από το σύνολο των ικανών λύσεων ο αποφασίζων, λέγεται τελική ή σχετικά βέλτιστη λύση. Ο όρος «σχετικά» σημαίνει ακριβώς ότι αποτελεί υποκειμενική επιλογή του αποφασίζοντα σε αντίθεση με τη βέλτιστη λύση σε ένα πρόβλημα ΓΠ που είναι αντικειμενικά προσδιοριζόμενη.

iii. Ικανή ακραία λύση (efficient extreme solution)

Μια ικανή λύση ενός προβλήματος ΠΚΓΠ που αντιστοιχεί σ' ένα ακραίο σημείο του εφικτού χωρίου του προβλήματος (κορυφή) λέγεται ικανή ακραία λύση. Οι ακραίες λύσεις οι οποίες βρίσκονται σε γειτονικές κορυφές στο εφικτό σύνορο, ονομάζονται γειτονικές ακραίες λύσεις (adjacent extreme solutions). Η μετάβαση από μία ακραία

λύση σε μία γειτονική της, πραγματοποιείται με μία επανάληψη της μεθόδου Simplex, δηλαδή με αντικατάσταση μίας βασικής μεταβλητής από μία μη βασική έτσι ώστε να προκύψει εφικτή λύση. Επίσης, αποδεικνύεται (Steuer 1989) το ακόλουθο θεώρημα:

«Το σύνολο των ικανών ακραίων λύσεων στα προβλήματα ΠΚΓΠ με συνεχείς μεταβλητές απόφασης είναι διασυνδεδεμένο, δηλαδή κάθε μία ικανή ακραία λύση έχει τουλάχιστον μία γειτονική ικανή ακραία λύση.» Σε αυτήν την ιδιότητα στηρίζονται και οι αλγόριθμοι παραγωγής του συνόλου των ακραίων ικανών λύσεων. [33]

iv. Διάνυσμα τιμών των κριτηρίων (criterion vector)

Κάθε λύση $x = (x_1, x_2, \ldots, x_n)$ που ανήκει στο χώρο των μεταβλητών απόφασης R^n απεικονίζεται μέσω των αντικειμενικών συναρτήσεων στο χώρο των κριτηρίων R^p σ' ένα διάνυσμα (σημείο) $z = (z_1, z_2, \ldots, z_p)$ όπου $z_1=c^1x$, $z_2=c^2x$ κλπ. Το διάνυσμα z ορίζεται ως διάνυσμα τιμών των κριτηρίων.

v. Ιδεώδες σημείο (ideal point)

Ιδεώδες σημείο (ή ιδεώδες διάνυσμα, ideal vector) στο χώρο των αντικειμενικών συναρτήσεων R^p, ορίζεται το σημείο εκείνο που έχει ως συντεταγμένες τα άριστα των αντικειμενικών συναρτήσεων όπως αυτά προκύπτουν από τις μεμονωμένες αριστοποιήσεις. Συνήθως πρόκειται για σημείο που αντιστοιχεί σε μη εφικτή λύση (δεν υπάρχει εφικτή λύση που να αριστοποιεί συγχρόνως όλες τις αντικειμενικές συναρτήσεις). Συχνά αναφέρεται και ως σημείο ουτοπίας (utopia point). Το ιδεώδες σημείο χρησιμοποιείται συνήθως ως σημείο αναφοράς για να διερευνηθεί η προσέγγιση σ' αυτό των ικανών λύσεων. [22]

vi. Εναλλακτικές άριστες λύσεις (alternative optima)

Στην περίπτωση κατά την οποία η άριστη τιμή μίας αντικειμενικής συνάρτησης προκύπτει από διαφορετικές λύσεις στο χώρο των μεταβλητών απόφασης τότε προκύπτουν εναλλακτικές άριστες λύσεις.

vii. Λεξικογραφική αριστοποίηση (lexicographic optimization)

Ο όρος αναφέρεται σε μια κατά στάδια αριστοποίηση προβλημάτων ΠΚΓΠ. Στο πρώτο στάδιο αριστοποιείται η πρώτη αντικειμενική συνάρτηση. Αν υπάρχουν εναλλακτικά άριστα αναζητείται μεταξύ αυτών αυτό που αριστοποιεί τη δεύτερη αντικειμενική συνάρτηση (δεύτερο στάδιο). Με σταθερή δηλαδή την άριστη τιμή της πρώτης αντικειμενικής συνάρτησης επιδιώκεται η αριστοποίηση της δεύτερης. Στη συνέχεια με σταθερές τις τιμές της πρώτης και της δεύτερης αντικειμενικής συνάρτησης επιδιώκεται η βελτιστοποίηση της τρίτης κ.ο.κ. μέχρι την τελευταία αντικειμενική συνάρτηση. Το αποτέλεσμα της λεξικογραφικής αριστοποίησης για κάποια αντικειμενική συνάρτηση είναι η λύση εκείνη που αριστοποιεί τη συγκεκριμένη αντικειμενική συνάρτηση και παρουσιάζει τις καλύτερες δυνατές τιμές

για τις υπόλοιπες αντικειμενικές συναρτήσεις με κάποια σειρά προτεραιότητας. Πρέπει να σημειωθεί ότι αν δεν υπάρχουν εναλλακτικά άριστες λύσεις για μία αντικειμενική συνάρτηση τότε το αποτέλεσμα της λεξικογραφικής αριστοποίησης ταυτίζεται με αυτό της απλής αριστοποίησης.

viii. Πίνακας πληρωμών ή πίνακας τιμών (payoff table)

Είναι ο τετραγωνικός πίνακας που αποτελείται από τόσες γραμμές και στήλες όσες και οι αντικειμενικές συναρτήσεις του προβλήματος ΠΚΓΠ. Σε κάθε στήλη αριστοποιείται μεμονωμένα μια αντικειμενική συνάρτηση και οι τιμές των αντικειμενικών συναρτήσεων που προκύπτουν (τόσο αυτής που αριστοποιήθηκε όσο και των υπολοίπων) τοποθετούνται στις σειρές του πίνακα. Στη διαγώνιο του πίνακα τιμών μπορούμε να διαβάσουμε τις συντεταγμένες του ιδεώδους σημείου. Στον Πίνακα 3.1 φαίνεται η μορφή του πίνακα τιμών ενός προβλήματος ΠΚΓΠ με k αντικειμενικές συναρτήσεις. Με z_i* απεικονίζεται η άριστη τιμή της i αντικειμενικής συνάρτησης και με z_{ij} η τιμή της j αντικειμενικής συνάρτησης όπως προκύπτει από την άριστη λύση της i αντικειμενικής συνάρτησης.[33]

Πίνακας 3 1 Πίνακας πληρωμών προβλήματος ΠΚΓΠ με k αντικειμενικές συναρτήσεις

z_1*	z_{12}	…	z_{1k}
z_{21}	z_2*	…	z_{2k}
…	…	…	…
z_{k1}	z_{k2}	…	z_k*

ix. Συντελεστής αντιστάθμισης (trade off)

Με τον όρο αντιστάθμιση κριτηρίων ορίζεται το κατά πόσο πρέπει να χειροτερεύσει ένα κριτήριο ώστε να βελτιωθεί κάποιο άλλο. Μεταξύ δύο ικανών λύσεων, ο συντελεστής αντιστάθμισης μας δείχνει πόσο πρέπει να θυσιάσουμε από ένα κριτήριο προκειμένου να κερδίσουμε σε κάποιο άλλο και να μεταβούμε από την μία ικανή λύση στην άλλη.

x. Σταθμισμένο άθροισμα αντικειμενικών συναρτήσεων (weighted sum of objective functions)

Με τον όρο αυτό εννοείται η σύνθεση των αντικειμενικών συναρτήσεων, μέσω του σταθμισμένου αθροίσματός τους, ώστε να δημιουργηθεί μία γενικευμένη αντικειμενική συνάρτηση. Το αντίστοιχο πρόβλημα σταθμισμένου αθροίσματος του προβλήματος ΠΚΓΠ που περιγράφεται στην 3.2 ορίζεται ως εξής:

$\max \{\lambda^T c^i x , i:=1..p, | x \in S \}$ (3.2)

Πρόκειται δηλαδή για πρόβλημα ΓΠ, όπου οι συντελεστές στάθμισης λ_i (ή απλά «βάρη») των αντικειμενικών συναρτήσεων παίρνουν τιμές στο χώρο των συντελεστών στάθμισης, Λ που ορίζεται ως εξής:

$\lambda_i \in \Lambda = \{ \lambda_i \in R^p \mid \lambda_i \in (0,1), \Sigma \lambda_i = 1\}$ (3.3)

Όταν οι συντελεστές στάθμισης είναι αυστηρά θετικοί, όπως υποδηλώνεται από τη σχέση (3.3), τότε αποδεικνύεται το ακόλουθο θεώρημα (Θεώρημα Geoffrion, Steuer 1989)

Θεώρημα: Ικανή και αναγκαία συνθήκη για να είναι ικανή μια λύση του προβλήματος ΠΚΓΠ της (3.1), είναι να υπάρχει $\lambda_i \in \Lambda$ (βλ. 3.3), έτσι ώστε, η συγκεκριμένη λύση να αποτελεί άριστη λύση του προβλήματος ΓΠ της (3.2).

Το πρόβλημα του σταθμισμένου αθροίσματος χρησιμοποιείται κυρίως ως μέσο παραγωγής ικανών λύσεων σε διάφορες μεθόδους ΠΚΓΠ. Πρέπει να σημειωθεί ότι η αναγκαιότητα του παραπάνω Θεωρήματος δεν ισχύει για προβλήματα ΠΚΓΠ που περιέχουν και ακέραιες μεταβλητές. [22], [33]

xi. Πρόβλημα min – max (problem min – max)

Στον ΠΚΓΠ ο όρος πρόβλημα min-max αναφέρεται στο πρόβλημα ελαχιστοποίησης της μέγιστης απόκλισης από ένα συγκεκριμένο σημείο – στόχο. Στον ΠΚΓΠ το σημείο – στόχος ανήκει στον χώρο των p διαστάσεων R^p, όπου p είναι ο αριθμός των αντικειμενικών συναρτήσεων. Η ελαχιστοποίηση της μέγιστης απόκλισης από το σημείο – στόχο, οδηγεί στην εύρεση της εφικτής λύσης η οποία αντιστοιχεί στο σημείο εκείνο του χώρου R^p, για το οποίο η μεγαλύτερη απόκλιση (ως προς τις p διαστάσεις) από το σημείο – στόχο, λαμβάνει την ελάχιστη τιμή της. Ενδέχεται το σημείο στόχος να ταυτίζεται και με το λεγόμενο ιδεώδες σημείο ενός προβλήματος ΠΚΓΠ. [22], [33]

xii. Οικογένεια L_p αποστάσεων (family of L_p – metrics)

Η καλούμενη οικογένεια L_p αποστάσεων χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση των αποστάσεων (μετρική) μεταξύ των διαφόρων λύσεων (διανυσμάτων) στο χώρο R^n των αντικειμενικών συναρτήσεων. Έτσι, για δύο διανύσματα $x=(x_1,x_2,\ldots x_k)$ και $y=(y_1,y_2,\ldots y_k)$ ορίζεται:

$$\| x - y \|_p = [\textstyle\sum_{i=1}^{k} | x_i - y_i |^p]^{1/p}$$

Συνήθως χρησιμοποιούνται p=1 (Γραμμική απόσταση), p=2 (Ευκλείδεια απόσταση) και p=∞. Όσο μεγαλύτερο είναι το p τόσο μεγαλύτερη βαρύτητα δίδεται στις μεγαλύτερες αποκλίσεις. Για p=∞ η απόσταση ορίζεται ως εξής:

$$\| x - y\|_\infty = \max\{|x_1 - y_1|, |x_2 - y_2|, \ldots, |x_k - y_k|\}$$

και ονομάζεται απόσταση Tchebycheff. Η απόσταση Tchebycheff χρησιμοποιείται ευρέως στον ΠΚΓΠ διότι δεν καταστρέφει τη γραμμικότητα του προβλήματος. Η

επιδίωξη της ελαχιστοποίησης της απόστασης Tchebycheff μιας λύσης από κάποιο σημείο-στόχο είναι ουσιαστικά η επίλυση του προβλήματος min-max.

Η οικογένεια των L_p αποστάσεων μπορεί να χρησιμοποιηθεί και με συντελεστές στάθμισης για κάθε διάσταση, αποδίδοντας έτσι διαφορετική σημασία για κάθε διάσταση:

$$\|x - y\|^{\lambda}_{p} = [\sum_{i=1}^{k} (\lambda_i |x_i - y_i|)^p]^{1/p}$$

Στην προκειμένη περίπτωση η απόσταση Tchebysheff ορίζεται ως εξής:

$$\|x - y\|^{\lambda}_{\infty} = \max \{\lambda_1|x_1 - y_1|, \lambda_2 |x_2 - y_2|, \ldots, \lambda_k| x_k - y_k|\}$$

Και ονομάζεται σταθμισμένη απόσταση Tchebycheff. [22]

3.4 Μέθοδοι ΠΚΓΠ

Οι μέθοδοι ΠΚΓΠ αποσκοπούν στην επίλυση των αντίστοιχων προβλημάτων, την παραγωγή των ικανών λύσεων και την υποστήριξη του αποφασίζοντα στην έκφραση των προτιμήσεών του και την επιλογή ανάμεσα στο σύνολο των ικανών λύσεων. Εν αντιθέσει με τα προβλήματα με μία αντικειμενική συνάρτηση, η συμμετοχή του αποφασίζοντα στη διαδικασία επίλυσης και εντοπισμού της τελικής λύσης, είναι απαραίτητη στα προβλήματα με πολλαπλά κριτήρια, έτσι ώστε να εκφράσει τις υποκειμενικές του προτιμήσεις μεταξύ μαθηματικά μη συγκρίσιμων λύσεων. Για αυτό και μία ολοκληρωμένη μέθοδος επίλυσης προβλημάτων ΠΚΓΠ ουσιαστικά αποτελεί ένα σύστημα υποστήριξης αποφάσεων. [15], [22]

Γενικά έχουν αναπτυχθεί πάρα πολλές μέθοδοι και τεχνικές επίλυσης προβλημάτων ΠΚΓΠ οι οποίες απορρέουν από την αρχική μέθοδο ΓΠ, Simplex και τις επόμενες παραλλαγές της. Οι μέθοδοι ΠΚΓΠ διαφέρουν μεταξύ τους και αυτό οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι η επιλογή της μεθόδου εξαρτάται τόσο από τα χαρακτηριστικά του προβλήματος (μέγεθος, είδος μεταβλητών κλπ.) όσο και από τις απαιτήσεις και τον τρόπο εμπλοκής του αποφασίζοντα στη διαδικασία επίλυσης και εύρεσης της τελικής λύσης (Evans G.W., 1984; Ravidran, 1991). Ένας αρκετά διαδεδομένος τρόπος ταξινόμησης των μεθόδων ΠΚΓΠ γίνεται ανάλογα με το στάδιο επίλυσης στο οποίο εμπλέκεται και εκφράζει τις προτιμήσεις του ο αποφασίζων (Hwang & Masud, 1979; Hwag, Paidy, Yoon & Masud, 1980; Evans G.W., 1984). Έτσι υφίστανται οι εξής τρεις βασικές κατηγορίες:

- Μέθοδοι ΠΚΓΠ με έκφραση προτίμησης πριν τη διαδικασία επίλυσης
- Μέθοδοι ΠΚΓΠ με έκφραση προτίμησης κατά τη διάρκεια της διαδικασίας επίλυσης
- Μέθοδοι ΠΚΓΠ με έκφραση προτίμησης μετά τη διαδικασία επίλυσης

3.4.1 Μέθοδοι ΠΚΓΠ με έκφραση προτίμησης πριν από την επίλυση

Οι μέθοδοι ΠΚΓΠ με έκφραση προτίμησης πριν από την επίλυση (a priori methods) επιτρέπουν στον αποφασίζοντα να ορίσει ρητά τις προτιμήσεις του πριν τη διαδικασία επίλυσης του προβλήματος. Αυτό γίνεται είτε καθορίζοντας εκ των προτέρων τη σημαντικότητα των κριτηρίων είτε καθορίζοντας κάποιες τιμές - στόχους για τα κριτήρια.

Στην πρώτη περίπτωση, μπορεί να αποδώσει σε κάθε κριτήριο (αντικειμενική συνάρτηση) έναν συντελεστή βαρύτητας εκφρασμένο με έναν πραγματικό αριθμό (συνήθως στο διάστημα [0,1]) και στη συνέχεια να συνθέσει τα επιμέρους κριτήρια σε ένα και μοναδικό καθολικό κριτήριο. Ο τρόπος σύνθεσης είναι συνήθως με τη δημιουργία του σταθμισμένου αθροίσματος των αντικειμενικών συναρτήσεων ώστε να μην καταστρέφεται και η γραμμικότητα του προβλήματος. Αποδεικνύεται ότι η άριστη λύση του προκύπτοντος προβλήματος ΓΠ αποτελεί και ικανή λύση για το αρχικό πρόβλημα ΠΚΓΠ όταν όλοι οι συντελεστές βαρύτητας είναι διάφοροι του μηδενός (βλ. Steuer 1989). Σημαντικό είναι να προηγηθεί η αναγωγή των αντικειμενικών συναρτήσεων στην ίδια κλίμακα (scaling), διαιρώντας τους συντελεστές τους με τον ανάλογο συντελεστή στάθμισης (scaling factor). Επειδή οι συντελεστές της μιας αντικειμενικής συνάρτησης μπορεί να διαφέρουν τάξεις μεγέθους από τους συντελεστές μιας άλλης, η αναγωγή στην ίδια κλίμακα είναι απαραίτητη, έτσι ώστε, το σταθμισμένο άθροισμα να αντιστοιχεί στις αρχικές εκτιμήσεις για τη σημαντικότητα των αντικειμενικών συναρτήσεων και να μην επηρεάζεται από τις μονάδες μέτρησης των αντικειμενικών συναρτήσεων. Ουσιαστικά, με την απόδοση συντελεστών βαρύτητας στα διάφορα κριτήρια ο αποφασίζων δημιουργεί μια συνάρτηση πολυκριτηριακής χρησιμότητας (Keeney and Raiffa, 1976).

Η δεύτερη κατηγορία μεθόδων ΠΚΓΠ με έκφραση προτίμησης πριν από την επίλυση αφορά τον Προγραμματισμού Στόχων (Goal Programming) ο οποίος συνιστά μία εναλλακτική εκδοχή του ΓΠ για την ενσωμάτωση περισσοτέρων από ένα κριτήρια. Ο Προγραμματισμός Στόχων πρωτοεμφανίστηκε με τις εργασίες των Charnes και Cooper το 1957 και το 1961 (Ignizio, 1982). Αποτελεί μία εναλλακτική εκδοχή του ΓΠ ώστε να συμπεριλαμβάνει περισσότερα του ενός κριτήρια. Στον Προγραμματισμό Στόχων επιδιώκεται η ελαχιστοποίηση των αποστάσεων διαφόρων αντικειμενικών συναρτήσεων από κάποιες προκαθορισμένες τιμές-στόχους. Η ενοποίηση των κριτηρίων σε μία αντικειμενική συνάρτηση γίνεται συνήθως μέσω του σταθμισμένου αθροίσματος των αποκλίσεων αυτών. Ο αποφασίζων μπορεί επίσης να θέσει προτεραιότητες στην επίτευξη των στόχων (preemptive goal programming) έτσι ώστε αφού προσεγγισθεί όσο είναι δυνατόν ο πρώτος στόχος να προχωρήσει στο δεύτερο στόχο κ.ο.κ. Ο Προγραμματισμός Στόχων έγινε γρήγορα πολύ δημοφιλής επειδή αφενός ενσωματώνει περισσότερα του ενός κριτήρια στη διαδικασία επίλυσης και αφετέρου λόγω της ευκολίας στην κατανόηση και στην εφαρμογή του (χρησιμοποιεί λογισμικό συμβατικού ΓΠ). Οι περισσότερες εφαρμογές πολυκριτηριακής αριστοποίησης έχουν γίνει με

Προγραμματισμό Στόχων (White 1990) ο οποίος μπορεί να θεωρηθεί ως μια ενδιάμεση κατάσταση μεταξύ ΓΠ και ΠΚΓΠ. Το βασικό μειονέκτημα του Προγραμματισμού Στόχων σε σχέση με τον ΠΚΓΠ είναι η ανάγκη καθορισμού συγκεκριμένων τιμών-στόχων για τις αντικειμενικές συναρτήσεις με βάση τις οποίες υπολογίζονται οι «άριστες» λύσεις, που μπορεί τελικά να μην είναι ικανές λύσεις.

Το πλεονέκτημα των τεχνικών αυτής της κατηγορίας είναι ότι η διαδικασία επίλυσης είναι απλή και γρήγορη καθώς καταλήγει σε ένα πρόβλημα ΓΠ, για την επίλυση του οποίου, υπάρχει άφθονο διαθέσιμο λογισμικό. Η έντονη κριτική που δέχονται όμως υποστηρίζει ότι είναι αδύνατο για τον αποφασίζοντα να εκφράσει εξ αρχής τις πραγματικές του προτιμήσεις για την σημαντικότητα ή τις τιμές στόχους των κριτηρίων με ένα τόσο συγκεκριμένο τρόπο. Γι' αυτό το λόγο οι μέθοδοι αυτές δεν χρησιμοποιούνται μεμονωμένα, αλλά συνήθως αποτελούν κομμάτι μιας επαναληπτικής διαδικασίας επίλυσης όπου ο αποφασίζων αποκτά σταδιακά μεγαλύτερη επίγνωση των προτιμήσεων του. [33]

3.4.2 Μέθοδοι ΠΚΓΠ με έκφραση προτίμησης κατά τη διάρκεια της διαδικασίας επίλυσης

Οι μέθοδοι ΠΚΓΠ με έκφραση προτίμησης κατά τη διάρκεια της επίλυσης ονομάζονται και αλληλεπιδραστικές μέθοδοι (interactive methods) λόγω της άμεσης εμπλοκής και καθοδήγησης του αποφασίζοντα στη διαδικασία επίλυσης. Οι αλληλεπιδραστικές μέθοδοι χαρακτηρίζονται από φάσεις διαλόγου με τον αποφασίζοντα οι οποίες εναλλάσσονται με φάσεις υπολογισμών από το πρόγραμμα. Είναι επαναληπτικές διαδικασίες κατά τις οποίες η αλληλεπίδραση μεταξύ αποφασίζοντα και μεθόδου συνεχίζεται μέχρι να ικανοποιηθεί κάποιο κριτήριο σύγκλισης και να βρεθεί η τελική λύση.

Οι αλληλεπιδραστικές μέθοδοι ακολουθούν τη λογική της σταδιακής έκφρασης των προτιμήσεων του αποφασίζοντα η οποία γίνεται με επαναληπτικό τρόπο. Σε κάθε επανάληψη μία ή περισσότερες λύσεις παρουσιάζονται στον αποφασίζοντα ο οποίος επιλέγει μία λύση εκφράζοντας την προτίμησή του και στη συνέχεια διαμορφώνεται αναλόγως η επόμενη επανάληψη για τον προσδιορισμό της νέας λύσης. Ουσιαστικά ο αποφασίζων κατευθύνει τη διαδικασία επίλυσης μέχρις ότου βρεθεί η τελική λύση.

Οι αλληλεπιδραστικές μέθοδοι παρουσιάζουν αρκετά πλεονεκτήματα όπως το γεγονός ότι δεν απαιτείται εκ των προτέρων η παροχή κάποιου είδους πληροφορίας περί των προτιμήσεων του αποφασίζοντα. Συνιστούν μία διαδικασία εκμάθησης για τον ίδιο τον αποφασίζοντα ο οποίος αντιλαμβάνεται καλύτερα τη συμπεριφορά του συστήματος και μέσω του επαναληπτικού χαρακτήρα των εν λόγω μεθόδων, εξερευνά βαθύτερα το πρόβλημα και συνειδητοποιεί – συγκεκριμενοποιεί καλύτερα τις προτιμήσεις του. Επίσης καθώς ο αποφασίζων γίνεται συμμέτοχος της διαδικασίας επίλυσης η αποκτούμενη λύση έχει καλύτερες προοπτικές για να υλοποιηθεί. Ακόμη στις συγκεκριμένες μεθόδους δεν απαιτείται η παραγωγή του

συνόλου των ικανών λύσεων παρά μόνο αντιπροσωπευτικά δείγματα ικανών λύσεων σε κάθε επανάληψη τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την επίλυση μεγάλων προβλημάτων. Τέλος δεν απαιτείται κάποιο ιδιαίτερο λογισμικό καθώς χρησιμοποιούν κυρίως αλγορίθμους ΓΠ για την πραγματοποίηση των απαραίτητων ενδιάμεσων (τοπικών) βελτιστοποιήσεων. Η αρνητική πλευρά των αλληλεπιδραστικών μεθόδων έγκειται στην ακρίβεια απόδοσης της προτίμησης του αποφασίζοντα και στην πιθανή κόπωσή του ειδικά όταν απαιτούνται πολλοί επαναληπτικοί κύκλοι για την επίτευξη της τελικής λύσης. [33]

3.4.3 Μέθοδοι ΠΚΓΠ με έκφραση προτίμησης μετά τη διαδικασία επίλυσης

Οι μέθοδοι ΠΚΓΠ με έκφραση προτίμησης μετά από την επίλυση (a posteriori methods) καλούνται και ως μέθοδοι παραγωγής (generation methods) και έχουν ως αντικείμενο τον υπολογισμό του συνόλου ή κάποιου αντιπροσωπευτικού υποσυνόλου των ικανών λύσεων. Προσφέρουν στον αποφασίζοντα τη δυνατότητα να έχει εποπτεία όλων των λύσεων και μία πλήρη εικόνα των δυνατών επιλογών προκειμένου να εκφράσει τις προτιμήσεις του, προσδίδοντας του έτσι μεγαλύτερη εμπιστοσύνη για την τελική του απόφαση. Οι μέθοδοι παραγωγής δεν απαιτούν την έντονη εμπλοκή του αποφασίζοντα με συχνές και πολλές φορές πολύπλοκες ερωταποκρίσεις οι οποίες μπορεί να κουράσουν ή και να μπερδέψουν τον αποφασίζοντα.

Ωστόσο η πιο ολοκληρωμένη και αναλυτικότερη πληροφόρηση την οποία παρέχουν οι μέθοδοι παραγωγής συνοδεύεται και από ορισμένα εμπόδια τα οποία αφορούν την αυξημένη δυσκολία επίλυσης και τους μεγαλύτερους απαιτούμενους υπολογιστικούς χρόνους. Είναι γεγονός ότι σε σχέση με την εύρεση της άριστης λύσης σε ένα πρόβλημα ΓΠ, η παραγωγή των ικανών λύσεων σε ένα πρόβλημα ΠΚΓΠ αντίστοιχου μεγέθους χρειάζεται πολλαπλάσιο χρόνο επίλυσης και περισσότερη κατανάλωση πόρων του υπολογιστικού συστήματος. Βέβαια η ραγδαία εξέλιξη των δυνατοτήτων των σύγχρονων ηλεκτρονικών υπολογιστών και των αλγορίθμων επίλυσης επιτρέπει την πιο ακριβή και γρήγορη επίλυση ιδιαίτερα ευμεγεθών προβλημάτων ΠΚΓΠ. Παρόλα αυτά όμως παραμένει το πρόβλημα της πρακτικής αξιοποίησης όλου του όγκου των πληροφοριών καθώς στη περίπτωση της παραγωγής πάρα πολλών μη κυριαρχούμενων λύσεων, ο αποφασίζων είναι αδύνατον να επιλέξει ανάμεσα τους την πιο αρεστή επιλογή.

Οι μέθοδοι παραγωγής διακρίνονται σε δύο κατηγορίες: αυτές που παράγουν το σύνολο των ακραίων ικανών λύσεων και αυτές παράγουν και τις ενδιάμεσες (μη ακραίες) ικανές λύσεις, που βρίσκονται στο εσωτερικό των εδρών ή των ακμών του ικανού συνόρου. Προαπαιτούμενο βέβαια για την παραγωγή του συνόλου των ικανών λύσεων (ακραίων και ενδιάμεσων) είναι η παραγωγή του συνόλου των ακραίων ικανών λύσεων. Συνήθως η τελική λύση αναζητείται από τις ακραίες ικανές λύσεις οι οποίες αρκούν για τη διαδικασία λήψης απόφασης (Breslawski and Zionts, 1992). Υπάρχει όμως η δυνατότητα από την προτιμότερη ικανή ακραία λύση και τις γειτονικές της ακραίες ικανές λύσεις να προκύψουν και οι ενδιάμεσες ικανές λύσεις τις οποίες μπορεί επίσης να εξετάσει ο αποφασίζων.

Η πρώτη και περισσότερη απλή διαδικασία παραγωγής των ακραίων ικανών λύσεων είναι μέσω του σταθμισμένου αθροίσματος των αντικειμενικών συναρτήσεων και ονομάζεται μέθοδος των συντελεστών στάθμισης (weighting method) η οποία ακολουθεί τις αναγκαίες συνθήκες ύπαρξης ικανών λύσεων των Kuhn και Tucker. Η μέθοδος αυτή είναι σχετικά απλή χωρίς ιδιαίτερες απαιτήσεις σε λογισμικό (αρκεί ένας επιλύτης ΓΠ). Η συστηματική όμως εξέταση των συνδυασμών των συντελεστών στάθμισης λ_i, για προβλήματα με περισσότερες από δύο αντικειμενικές συναρτήσεις είναι χρονοβόρα.

Μία δεύτερη μέθοδος παραγωγής των ικανών λύσεων είναι η μέθοδος των περιορισμών (e - constraint method). Κατά τη μέθοδο αυτή επιλέγεται μία αντικειμενική συνάρτηση και οι υπόλοιπες μετατρέπονται σε περιορισμούς του προβλήματος, ανάλογα με την κατεύθυνση της αριστοποίησής τους. Αν δηλαδή μία αντικειμενική συνάρτηση είναι προς μεγιστοποίηση, τότε μετατρέπεται σε περιορισμό «μεγαλύτερο ή ίσο», ενώ αν πρόκειται να ελαχιστοποιηθεί μετατρέπεται σε περιορισμό «μικρότερο ή ίσο». Η άριστη λύση του προκύπτοντος προβλήματος ΓΠ αποτελεί ικανή λύση, μόνο εάν όλοι οι περιορισμοί που προκύπτουν από τις υπόλοιπες αντικειμενικές συναρτήσεις ικανοποιούνται ως ισότητες (binding constraints). Εάν δε συμβαίνει αυτό και υπάρχουν εναλλακτικά άριστα, τότε η άριστη λύση που θα βρεθεί μπορεί να μην αποτελεί ικανή λύση του προβλήματος ΠΚΓΠ. Μεταβάλλοντας συστηματικά το δεξί σκέλος των περιορισμών των αντικειμενικών συναρτήσεων «σαρώνεται» το σύνολο των ικανών λύσεων. Πρέπει να σημειωθεί ότι λαμβάνονται και ικανές λύσεις που είναι μη-ακραίες ως προς το αρχικό πρόβλημα ΠΚΓΠ. Ο πίνακας πληρωμών του προβλήματος ΠΚΓΠ μπορεί να βοηθήσει σημαντικά στον καθορισμό της συστηματικής μεταβολής του δεξιού σκέλους των περιορισμών των αντικειμενικών συναρτήσεων. Ο καθορισμός αυτός του δεξιού σκέλους, μπορεί να γίνει και αντικείμενο αλληλεπιδραστικής διαδικασίας με τον αποφασίζοντα. Για την παραγωγή του συνόλου των ικανών λύσεων το βήμα της συστηματικής μεταβολή του δεξιού σκέλους των περιορισμών των αντικειμενικών συναρτήσεων πρέπει να είναι αρκετά μικρό. Όσο μεγαλύτερο είναι το βήμα της συστηματικής μεταβολής του δεξιού σκέλους των περιορισμών των αντικειμενικών συναρτήσεων τόσο συντομότερη είναι η διαδικασία αλλά είναι και «αραιότερο» το αντιπροσωπευτικό υποσύνολο των ικανών λύσεων. Συμπερασματικά, για προβλήματα με περισσότερες από δύο αντικειμενικές συναρτήσεις η παραγωγή του συνόλου των ικανών λύσεων μέσω της μεθόδου των περιορισμών είναι δυσεφάρμοστη.

Μία ακόμη μέθοδος παραγωγής είναι η μέθοδος NISE (Non Inferior Set Estimation) η οποία αναπτύχθηκε από τον Cohon το 1978 και υπολογίζει προσεγγιστικά το σύνολο των ικανών λύσεων με ρυθμιζόμενο βαθμό προσέγγισης. Το μειονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι ότι εφαρμόζεται κυρίως σε προβλήματα με δύο αντικειμενικές συναρτήσεις.

Τέλος υπάρχουν και μέθοδοι παραγωγής οι οποίες δε στηρίζονται στη μετατροπή του προβλήματος ΠΚΓΠ σε μονοκριτηριακό - όπως οι

προαναφερθείσες – αλλά αποτελούν παραλλαγή της μεθόδου Simplex έτσι ώστε να είναι σε θέση να διαχειρισθούν περισσότερες από μία αντικειμενικές συναρτήσεις. Οι μέθοδοι αυτές ονομάζονται μέθοδοι πολυκριτηριακής Simplex (multicriterion Simplex methods) και αποσκοπούν στον υπολογισμό του συνόλου των ικανών ακραίων λύσεων για προβλήματα ΠΚΓΠ. [9], [10], [22], [33]

3.5 Πολυκριτηριακός Γραμμικός Προγραμματισμός με ακέραιες μεταβλητές

Τα προβλήματα ΠΚΓΠ εκτός από συνεχείς μεταβλητές απόφασης, συχνά περιλαμβάνουν και διακριτές μεταβλητές όπως τα κλασσικά προβλήματα ΑΠ. Στην περίπτωση κατά την οποία υπάρχουν αποκλειστικά μόνο ακέραιες μεταβλητές, το πρόβλημα ανήκει στο λεγόμενο Πολυκριτηριακό Ακέραιο Γραμμικό Προγραμματισμό (ΠΚΑΓΠ) και ειδικότερα εάν οι ακέραιες μεταβλητές περιορίζονται στις τιμές 0 ή 1 (δυαδικές μεταβλητές) τότε το πρόβλημα χαρακτηρίζεται ως Πολυκριτηριακού 0-1 Γραμμικού Προγραμματισμού. Στις περισσότερες ενυπάρχουν τόσο συνεχείς όσο και ακέραιες ή δυαδικές μεταβλητές οπότε τα προβλήματα αναφέρονται ως προβλήματα Πολυκριτηριακού Μικτού Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού (ΜΑΠΚΓΠ) και Πολυκριτηριακού Μικτού 0 -1 Γραμμικού Προγραμματισμού (Μ0-1ΠΚΓΠ) αντίστοιχα.

Ο ΜΑΠΚΓΠ είναι μία σχετικά νέα και αρκετά ενδιαφέρουσα περιοχή του Μαθηματικού Προγραμματισμού. Οι πολλαπλές αντικειμενικές συναρτήσεις μαζί με τη δυνατότητα εισαγωγής ακεραίων μεταβλητών προσφέρουν μια πιο ρεαλιστική απεικόνιση των προβλημάτων και των συνθηκών λήψης απόφασης. Αρκετά γνωστά προβλήματα Μικτού Ακεραιου ΓΠ (ΜΑΓΠ) όπως το πρόβλημα της επέκτασης δυναμικότητας (Williams, 1985), της χωροθέτησης δραστηριοτήτων (ReVelle, 1993), του προγραμματισμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (Williams, 1985, Oliveira et al, 1993, Hobbs, 1995), της επιλογής δημοσίων επενδύσεων (Rasmussen, 1986) κλπ., που χρησιμοποιούν δυαδικές ή ακέραιες μεταβλητές σε μοντέλα ΓΠ, θα εξέφραζαν πιο πιστά τη διαδικασία λήψης απόφασης αν περιείχαν περισσότερες από μία αντικειμενικές συναρτήσεις. Επίσης ο ΜΑΠΓΠ μπορεί να χρησιμοποιηθεί όταν επιδιώκεται η ενσωμάτωση σ' ένα πρόβλημα ΠΚΓΠ διακριτών μεγεθών (λογικές συνθήκες, σταθερά κόστη, οικονομίες κλίμακας, διαζευκτικούς περιορισμούς κλπ.), οπότε ο απλός ΠΚΓΠ δεν επαρκεί (Williams, 1985, Mitra, 1994).

Λόγω της ιδιαιτερότητας που προσδίδει στο πρόβλημα η ύπαρξη των ακεραίων μεταβλητών, οι αντίστοιχες μέθοδοι ΠΚΓΠ εξετάζονται ξεχωριστά. Γενικότερα, με την ύπαρξη των ακεραίων μεταβλητών, ένα πρόβλημα ΓΠ (ή ΠΚΓΠ) γίνεται συνδυαστικό με την έννοια ότι πρέπει να ελεγχθεί ο πεπερασμένος (αλλά πολύ μεγάλος) αριθμός των δυνατών συνδυασμών των τιμών που μπορούν να λάβουν οι ακέραιες μεταβλητές. Τα προβλήματα αυτά χαρακτηρίζονται και ως προβλήματα συνδυαστικής αριστοποίησης (combinatorial optimization). Οι ασυνέχειες του εφικτού χωρίου, λόγω της ύπαρξης των ακεραίων μεταβλητών, καθιστούν μη εφαρμόσιμη τη μέθοδο Simplex σε προβλήματα ΓΠ με ακέραιες

μεταβλητές (Rasmussen, 1986, Ulungu and Teghem, 1994). Για την επίλυση των αντίστοιχων προβλημάτων η έρευνα κατέφυγε σε διάφορες τεχνικές που χρησιμοποιούν ως υποπρόγραμμα τη μέθοδο Simplex και επιχειρούν την αποτελεσματική κάλυψη του συνόλου των δυνατών συνδυασμών, έτσι ώστε η άριστη λύση που θα βρεθεί να είναι πράγματι η άριστη λύση του προβλήματος. Η πιο δημοφιλής τεχνική για προβλήματα Ακέραιου ή Μικτού Ακέραιου ΓΠ είναι η μέθοδος Branch and Bound των Land και Doig που αναπτύχθηκε το 1960 (Williams, 1993, Hillier and Lieberman 1995, Σίσκος, 1998).

Στην περίπτωση του ΜΑΠΚΓΠ, οι περιορισμοί τους οποίους επιφέρουν οι ακέραιες μεταβλητές είναι ακόμα πιο έντονοι καθώς το θεώρημα του Geoffrion το οποίο ορίζει ότι οι ικανές λύσεις ενός προβλήματος ΠΚΓΠ μπορούν να προκύψουν ως άριστες λύσεις του σταθμισμένου αθροίσματος των αντικειμενικών συναρτήσεων, παύει να ισχύει. Στα συγκεκριμένα προβλήματα, οι ικανές λύσεις οι οποίες μπορεί να προκύψουν από το σταθμισμένο άθροισμα των αντικειμενικών συναρτήσεων λέγονται υποστηριζόμενες ικανές λύσεις (supported efficient solutions), ενώ αυτές οι οποίες δε μπορούν να προκύψουν με τον τρόπο αυτό, ονομάζονται μη υποστηριζόμενες (non- supported efficient solutions) ικανές λύσεις. Ο εντοπισμός των μη υποστηριζόμενων ικανών λύσεων είναι πολύ σημαντικός καθώς σε πολλές περιπτώσεις υπερτερούν σε αριθμό από τις προκύπτουσες υποστηριζόμενες ικανές λύσεις.

Η παρουσία των ακεραίων μεταβλητών μετατρέπει ένα πρόβλημα ΠΚΓΠ όπως και εκείνου του ΓΠ, σε συνδυαστικό καθώς απαιτείται ο υπολογισμός ενός πεπερασμένου αλλά πολύ μεγάλου αριθμού δυνατών συνδυασμών των τιμών τις οποίες μπορούν να λάβουν οι ακέραιες μεταβλητές. Για αυτό και τα προβλήματα αυτά χαρακτηρίζονται και ως προβλήματα πολυκριτηριακής συνδυαστικής αριστοποίησης. [22], [37]

3.6 Η πολυκριτηριακή μέθοδος Augmecon

Η μέθοδος augmented ε-constraint (AUGMECON) ανήκει στις πολυκριτηριακές μεθόδους με έκφραση προτίμησης μετά από την επίλυση και αποτελεί μια παραλλαγή και συνάμα μια βελτιωμένη εκδοχή της μεθόδου των περιορισμών. Η AUGMECON μπορεί να εφαρμοσθεί σε πολλές κατηγορίες πολυκριτηριακών μοντέλων λόγω της γενικευμένης της μορφής και της ανεξαρτησίας της από το σώμα του υπόλοιπου μοντέλου. Κατά τα γνωστά, η συγκεκριμένη μέθοδος μετασχηματίζει ένα πολυκριτηριακό πρόβλημα σε πρόβλημα με μια αντικειμενική συνάρτηση, μετατρέποντας εναλλασσόμενα τις υπόλοιπες εμπεριεχόμενες αντικειμενικές συναρτήσεις σε περιορισμούς. [9], [10]

Η χρήση της AUGMECON παρουσιάζει ορισμένα πλεονεκτήματα έναντι της κλασσικής μεθόδου των περιορισμών και προφανώς συνεχίζει να υπερτερεί σε σχέση με τη μέθοδο των συντελεστών στάθμισης. Τα πλεονεκτήματα και συνάμα βελτιώσεις της AUGMECON είναι τα εξής:

I. Χρήση της λεξικογραφικής αριστοποίησης στην κατασκευή του πίνακα πληρωμών

Για να μπορέσει να εφαρμοσθεί η μέθοδος των περιορισμών θα πρέπει να γνωρίζουμε το εύρος της κάθε αντικειμενικής συνάρτησης, τουλάχιστον για τις p-1 αντικειμενικές συναρτήσεις οι οποίες θα χρησιμοποιηθούν ως περιορισμοί. Ο υπολογισμός του εύρους των αντικειμενικών συναρτήσεων στο σύνολο του εφικτού πεδίου τιμών δεν είναι κάτι τετριμμένο.

Στο πλαίσιο αυτό προσδιορίζεται το ιδεώδες σημείο και το σημείο ναδίρ τα οποία ειδικά στην περίπτωση των δικριτηριακών προβλημάτων, οριοθετούν ένα τετράγωνο στο χώρο των αντικειμενικών συναρτήσεων στο οποίο το άνω αριστερό άκρο και το κάτω δεξιό άκρο αντιστοιχούν στις άριστες τιμές – λύσεις των αντικειμενικών συναρτήσεων αντίστοιχα (λεξικογραφικά άριστες λύσεις). Έτσι ξεκινώντας από τη μία εκ των δύο άριστων λύσεων, πραγματοποιείται η εξερεύνηση του εφικτού χωρίου και χρησιμοποιείται η μέθοδος των περιορισμών. Επισημαίνεται ότι ενώ η εύρεση της άριστης τιμής κάθε αντικειμενικής συνάρτησης και του ιδεώδους σημείου είναι εύκολα επιτεύξιμη μέσω της μεμονωμένης αριστοποίησης, ο προσδιορισμός του σημείου ναδίρ είναι συχνά ιδιαίτερα χρονοβόρος και δυσχερής. Για τον υπολογισμό του, ένας απλός τρόπος αντιμετώπισης της δυσκολίας αυτής είναι ο ορισμός-επιβολή μιας τιμής (reservation value) για κάθε αντικειμενική συνάρτηση η οποία λειτουργεί ως κάτω όριο (κατώφλι) για προβλήματα μεγιστοποίησης και ως άνω όριο για προβλήματα (ανώφλι) για προβλήματα ελαχιστοποίησης. Με αυτές την τακτική τιμές χειρότερες από τα ορισμένα ανώφλια και κατώφλια βρίσκονται εκτός του χώρου ικανών λύσεων και δεν επιτρέπονται. [9]

II. Αποτελέσματα των λύσεων

Το δεύτερο σημείο που χρίζει προσοχής είναι ότι η λύση του προβλήματος θα είναι κατά Pareto βέλτιστη μόνο όταν οι p-1 αντικειμενικές συναρτήσεις που είναι περιορισμοί ικανοποιούνται ως ισότητες. Διαφορετικά, εάν υπάρχουν εναλλακτικά βέλτιστα η αποκτηθείσα λύση για το πρόβλημα δεν είναι Pareto βέλτιστη αλλά μια ασθενώς Pareto βέλτιστη λύση (weakly efficient solution). Με σκοπό να ξεπεραστεί αυτή η ασάφεια προτείνεται η μετατροπή των περιοριστικών αντικειμενικών συναρτήσεων σε ισότητες ενσωματώνοντας την κατάλληλη μεταβλητή απόκλισης. Ταυτόχρονα, αυτές οι μεταβλητές χρησιμοποιούνται σαν δεύτερος όρος (με χαμηλότερη προτεραιότητα) στην αντικειμενική συνάρτηση, αναγκάζοντας το πρόγραμμα να παράγει μόνο ικανές λύσεις. [22]

III. Επιτάχυνση του αλγόριθμου με πρώιμη έξοδο από τις επαναλήψεις

Μια επιπρόσθετη καινοτομία του αλγορίθμου είναι η πρώιμη έξοδος από τους βρόγχους όπου το πρόβλημα γίνεται ανέφικτο, κάτι που επιταχύνει τον αλγόριθμο σε περιπτώσεις πολλαπλών αντικειμενικών συναρτήσεων (περισσότερες από τρεις). Ο αλγόριθμος ξεκινά με την πιο χαλαρή έκδοση των περιοριστικών αντικειμενικών

συναρτήσεων και σταδιακά περιορίζει τις ισότητες. Αυτό σημαίνει ότι για μεγιστοποίηση αντικειμενικών συναρτήσεων, ξεκινά από το ελάχιστο και σταδιακά αυξάνει το δεξί σκέλος (RHS) του αντίστοιχου περιορισμού. Σε αυτή τη διεργασία, όπου το πρόβλημα γίνεται ανέφικτο, σημαίνει ότι δεν χρειάζεται περαιτέρω περιορισμός της αντίστοιχης αντικειμενικής συνάρτησης, αφού θα καταλήξει σε ανέφικτες λύσεις. Επομένως, ο αλγόριθμος βγαίνει από τον εσώτατο βρόγχο και συνεχίζει με το επόμενο grid point της προηγούμενης αντικειμενικής συνάρτησης που αντιστοιχεί στον εξωτερικό βρόγχο.

IV. Υλοποίηση

Πρακτικά, η μέθοδος των περιορισμών εφαρμόζεται ως εξής: από τον πίνακα πληρωμών λαμβάνουμε το εύρος κάθε μιας από τις p-1 αντικειμενικές συναρτήσεις οι οποίες θα χρησιμοποιηθούν ως περιορισμοί. Κατόπιν χωρίζουμε το εύρος της i-οστής αντικειμενικής συνάρτησης σε q_i ίσα διαστήματα χρησιμοποιώντας (q_i-1) ενδιάμεσα ισαπέχοντα grid points. Έτσι έχουμε συνολικά (q_i+1) grid points που χρησιμοποιούνται για να διαφοροποιήσουν παραμετρικά το RHS (e_i) της i-οστής αντικειμενικής συνάρτησης. Ο συνολικός αριθμός των τρεξιμάτων είναι $(q_2+1)\times(q_3+1)\times\ldots\times(q_p+1)$

Μια επιθυμητή ιδιότητα της μεθόδου των περιορισμών είναι ότι μπορούμε να ελέγξουμε την πυκνότητα της αναπαράστασης του συνόλου των ικανών λύσεων με σωστή ανάθεση των τιμών στο q_i. Όσο πιο μεγάλος είναι ο αριθμός των grid points τόσο πιο πολλές είναι και οι ικανές λύσεις, με το κόστος όμως, του παραπάνω υπολογιστικού χρόνου.

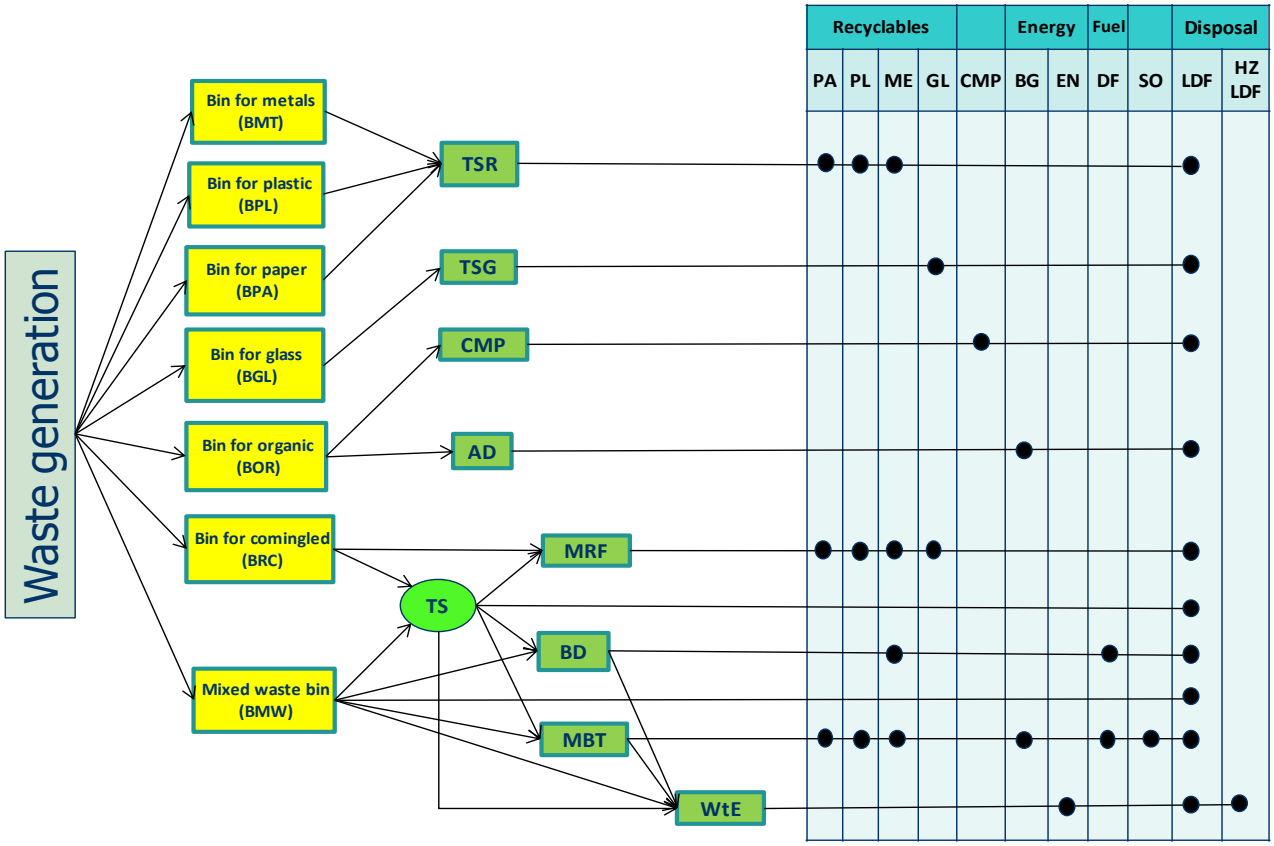
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

4 Το Μοντέλο

4.1 Υπερδομή διαχείρισης Αστικών Στερεών Απορριμμάτων

Το μαθηματικό μοντέλο που περιγράφει το σύστημα διαχείρισης αστικών στερεών απορριμμάτων (ΑΣΑ) βασίζεται στις αρχές του Μαθηματικού Προγραμματισμού (Mathematical Programming, MP). Όλες οι διαθέσιμες τεχνολογίες και μέθοδοι του συστήματος διαχείρισης των ΑΣΑ εκφράζονται με τις κατάλληλες σχέσεις (ισότητες και ανισότητες). Το αποτέλεσμα αυτού του μοντέλου (βέλτιστη λύση) αποτελείται από τα ακόλουθα στοιχεία: (1) τεχνολογικές μονάδες που χρησιμοποιούνται μαζί με τις αλληλοσυνδέσεις τους για το σύστημα διαχείρισης των ΑΣΑ, (2) δυναμικότητα αυτών των μονάδων και (3) ισοζύγια μάζας, ενέργειας και φορτία από και προς τις μονάδες (λειτουργική βελτιστοποίηση). Κάθε εισροή στο σύστημα γίνεται σε προκαθορισμένο χρονικό διάστημα.

Το σύστημα διαχείρισης των ΑΣΑ μπορεί να περιγραφεί καλύτερα από το παρακάτω διάγραμμα. Οι κόμβοι παρουσιάζουν τις διεργασίες και τα βέλη δηλώνουν τις συνδέσεις ή τις ροές ανάμεσα στις διεργασίες. Τα όρια του συστήματος ξεκινούν από την παραγωγή των απορριμμάτων μέχρι και την τελική διάθεσή τους. Το μοντέλο αυτό παρουσιάζει την υπερδομή του συστήματος δηλαδή όλες τις διαθέσιμες διεργασίες με τις αλληλοσυνδέσεις τους. Για παράδειγμα, φαίνεται πως οι κάδοι συνδέονται με τις διεργασίες, πως οι διεργασίες αλληλοσυνδέονται και την κύρια εκροή από κάθε διεργασία. Αξίζει να σημειωθεί ότι για κάθε γενικής χρήσης τεχνολογία μπορεί να υπάρχουν παραπάνω από μία εκδοχές. Όπως στην κομποστοποίησης (Composting, CMP) μπορούν να υπάρξουν μέχρι και 5 διαφορετικοί τύποι της μονάδας αυτής, ενώ, για την μηχανική και βιολογική διαχείριση (MBT) οι τύποι των μονάδων με διαφορετικά χαρακτηριστικά μπορεί να φθάνουν μέχρι και τους 18. Κάθε φορά επιλέγεται η βέλτιστη μονάδα από κάθε τεχνολογία με σκοπό τη βελτιστοποίηση του μοντέλου.



Εικόνα 4. 1 Γραφική απεικόνιση της υπερδομής του συστήματος διαχείρισης των ΑΣΑ

Ακρωνύμια για τις Διεργασίες: TSR: Temporary Storage for Metals, Plastic and Paper, TSG: Temporary Storage for Glass, CMP: Composting, AD: Anaerobic Digestion, MRF: Material Recycle Facility, WTE: Waste to Energy, BD: Biodrying, MBT: Mechanical and Biological Treatment, TS: Transfer Station, LDF: Landfill, HZLDF: Landfill for Hazardous Waste.

Ακρωνύμια για τα Προϊόντα: PA: paper, PL: Plastic, ME: Metals, GL: Glass, CMP: Compost, BG: Biogas, EN: Energy, DF: Derived Fuel, SO: Stabilized Organic

4.2 Κατασκευή Μοντέλου

Το μοντέλο είναι δομημένο έτσι ώστε να εκτελεί δομική, σχεδιαστική και λειτουργική βελτιστοποίηση. Οπότε, τα μεγάλα ερωτήματα που θα απαντηθούν με τη διαδικασία της βελτιστοποίησης είναι: (i) ποιες διεργασίες, (ii) ποια θα είναι η χωρητικότητά τους και (iii) ποιο θα είναι το ετήσιο λειτουργικό τους φορτίο. Όλα αυτά τα στοιχεία θα υπολογίζονται κατά περιόδους.

4.2.1 Μεταβλητές Απόφασης

Οι μεταβλητές απόφασης του μοντέλου είναι στην πραγματικότητα οι άγνωστοι του προβλήματος, δηλαδή τις μεταβλητές για τις οποίες προσπαθούμε να βρούμε τις βέλτιστες τιμές τους. Στη συγκεκριμένη περίπτωση έχουμε διακριτές (δυαδικούς και ακέραιους αριθμούς) και συνεχείς μεταβλητές. Οι διακριτές

μεταβλητές συνδέονται κυρίως με τα δομικά χαρακτηριστικά (χρησιμοποιείται η i-οστη τεχνολογία στο βελτιστοποιημένο σύστημα; Πόσες διεργασίες θα χρειασθούν;). Οι συνεχείς μεταβλητές σχετίζονται κυρίως με τα χαρακτηριστικά σχεδιασμού και τα λειτουργικά χαρακτηριστικά (ποια είναι η δυναμικότητα της i-οστής διεργασίας κατά την t περίοδο; Ποια είναι η ποσότητα των αποβλήτων που μεταφέρονται από την j-οστή μονάδα στην p-οστή μονάδα;) [9], [10]

4.2.2 Περιορισμοί

Οι κύριοι περιορισμοί του μοντέλου είναι τα ισοζύγια μάζας τα οποία πρέπει να ικανοποιούνται μεταξύ κόμβων (περιορισμοί ισορροπίας) και οι περιορισμοί χωρητικότητας οι οποίοι πρέπει να ικανοποιούνται ('μικρότερο από' περιορισμοί). Μπορούν να υπάρχουν επίσης τεχνικοί περιορισμοί (ισοζύγια ενέργειας) και περιορισμοί πολιτικής (το ποσοστό ανακύκλωσης του χαρτιού). Υπάρχουν επίσης λογικοί περιορισμοί προκειμένου να εφαρμόζονται οι όροι για αμοιβαία αποκλειόμενες εναλλακτικές λύσεις.

4.2.3 Παράμετροι

Οι παράμετροι του μοντέλου είναι στην ουσία τα δεδομένα. Τα δεδομένα αυτά είναι τα οικονομικά και τεχνολογικά χαρακτηριστικά των διεργασιών, οι τιμές των ανακυκλώσιμων υλικών και της παραγόμενης ενέργειας, ο συντελεστής μετατροπής του κάθε υλικού σε κάθε μία από τις υποψήφιες τεχνολογίες κτλ. Η σύνθεση των κάδων θεωρείται επίσης δεδομένη στο μοντέλο, δηλαδή, ποιοι τύποι κάδων χρησιμοποιούνται , όπως επίσης και η δυναμικότητά τους. Η αρχική ποσότητα των ΑΣΑ κατατάσσεται σε 34 συστατικά και η σύνθεσή της θεωρείται γνωστή για το μοντέλο.

4.2.4 Αντικειμενικές Συναρτήσεις

Δύο είναι οι αντικειμενικές συναρτήσεις του προβλήματος: (1) η ελαχιστοποίηση του τρέχοντος καθαρού κόστους (NPC) του συστήματος σε περίοδο μίας εικοσαετίας, η οποία αποτελεί τον οικονομικό στόχο και (2) η ελαχιστοποίηση των συνολικών εκπομπών CO_2-eq του συστήματος, η οποία αποτελεί τον περιβαλλοντικό στόχο. Το τρέχον καθαρό κόστος εκφράζει τα λειτουργικά και τα επενδυτικά κόστη, όπως επίσης και το εισόδημα από τα ανακυκλώσιμα, τον ηλεκτρισμό και άλλα προϊόντα στην περίοδο αυτής της εικοσαετίας.

4.3 Ανάπτυξη Μοντέλου

4.3.1 Συστατικά μοντέλου

Στο συγκεκριμένο σύστημα διαχείρισης των ΑΣΑ έχουμε θεωρήσει 34 υλικά ως συστατικά των αστικών στερεών αποβλήτων, όπως φαίνεται και στον πίνακα.

Πίνακας 4. 1 Τα συστατικά των αποβλήτων που μελετήθηκαν

Οργανικά (Organic)	Γυαλί (Glass)	Πλαστικά (Plastic)
Απόβλητα τροφίμων (Food waste) Απόβλητα κήπου (Garden & park waste) Άλλα οργανικά (Other organics)	Μικτές γυάλινες συσκευασίες (Mixed packaging glass) Άλλο είδος γυαλιού (Other glass) Πράσινα μπουκάλια (Green bottles) Καφέ μπουκάλια (Brown bottles) Διαφανή μπουκάλια (Clear bottles)	Μικτές Πλαστικές Συσκευασίες (Mixed packaging plastic) Άλλο είδος πλαστικού (Other plastic) Τσάντες (Bags) Ταινία συσκευασίας (Packaging Film) Άλλο είδος ταινίας (Other film) PET μπουκάλια (PET bottles) PVC μπουκάλια (PVC bottles) Άλλα πυκνά πλαστικά (Other dense plastic)
Δέρμα-Ξύλο-Ύφασμα (Leather-Wood-Textile)		
Καουτσούκ (Rubber) Δέρμα (Leather) Ξύλινη συσκευασία (Wood packaging) Άλλο είδος ξύλου (Other wood) Ύφασμα (Textile)	Μέταλλα (Metals) Σιδηρούχες μεταλλικές συσκευασίες (Ferrous metals packaging) Άλλα είδη σιδηρούχων μετάλλων (Other Ferrous metals) Αλουμινένιες συσκευασίες (Aluminum packaging) Άλλο είδος αλουμινίου (Other Ferrous metals) Φύλο (Foil)	Άλλα (Other)
Χαρτί (Paper)		Χάρτινα κουτιά αναψυκτικών (Drink Cartons) Ανόργανα (Inorganic) Μικρά υλικά < 10mm (Fine materials<10mm) Άλλα (Other)
Χάρτινη συσκευασία (Packaging paper) Χαρτόνι (Cardboard) Χαρτί εκτύπωσης (Print paper) Άλλο είδος χαρτιού (Other paper)		

Επίσης έχουν θεωρηθεί οι ακόλουθοι τύποι κάδων απορριμμάτων για την συλλογή των ΑΣΑ του συγκεκριμένου συστήματος διαχείρισης. Οι κάδοι αυτοί είναι:

- Γυαλιού – BGL
- Μετάλλων – BMT
- Πλαστικού – BPL

- Χαρτιού – BPA
- Συσκευασιών – BRC
- Οργανικών – BOR
- Μικτών αποβλήτων – BMW

Κάθε συνδυασμός των παραπάνω κάδων μπορεί να θεωρηθεί σαν ένα διαφορετικό σενάριο συλλογής στο μοντέλο αυτό. Η επεξεργασία των αποβλήτων από τους κάδους στον χώρο υγειονομικής ταφής μπορεί να συγχωνευτεί σε 10 διαφορετικές, κύριες τεχνολογίες/διεργασίες όπου η κάθε μία έχει έναν αριθμό διαφορετικών εκδοχών όπως φαίνεται και στον Πίνακας 4. 2.

Πίνακας 4. 2 Τεχνολογίες/Διεργασίες

Τεχνολογία	Εκδοχή/Τύπος	Κωδικός
Προσωρινή αποθήκευση ανακυκλώσιμων	1	TSR
Προσωρινή αποθήκευση γυαλιού	1	TSG
Κομποστοποίηση	5	CMP
Αναερόβια χώνευση	5	AD
Μονάδα ανάκτησης υλικών	3	MRF
Θερμική επεξεργασία αποβλήτων με ανάκτηση ενέργειας	4	WTE
Βιολογική ξήρανση	2	BD
Βιολογική μηχανική επεξεργασία	18	MBT
Υγειονομική ταφή	2	LDF
Σταθμός μεταφοράς	1	TS

Τα αποτελέσματα από κάθε μία διεργασία ομαδοποιούνται στις επτά επόμενες κατηγορίες:

- Ανακυκλώσιμα (recyclables)
- Κομπόστ (compost)
- Σταθεροποιημένο οργανικό (stabilized organic)

- Παραγόμενο καύσιμο (derived fuel)
- Βιοαέριο (biogas)
- Απώλειες (losses)
- Υπόλειμμα (residual)

Δεδομένων όλων των πιθανών διατάξεων των κάδων και των τεχνολογικών διαδικασιών μπορεί να σχεδιαστεί η δομή του συστήματος (με όλες τις διαθέσιμες τεχνολογίες και τις αλληλοσυνδέσεις τους) όπως φαίνεται στην εικόνα 3-1. Οι αρχικές μεταβλητές απόφασης είναι η ροή των απορριμμάτων, η ύπαρξη των διεργασιών και η δυναμική τους. Οι κύριοι περιορισμοί είναι τα ισοζύγια μάζας και ενέργειας και η ικανότητα των διεργασιών. Ο σχεδιασμός του χώρου υγειονομικής ταφής είναι διαφορετικό αλλά εξίσου σημαντικό κομμάτι του μοντέλου. Το μοντέλο είναι πολλών χρονικών περιόδων δηλαδή έχει δομηθεί σε τέσσερις πενταετείς περιόδους που καλύπτουν 20 χρόνια. Με αυτό τον τρόπο μπορούμε να έχουμε μία ποικιλία στην συμπεριφορά του συστήματος διαχείρισης των ΑΣΑ. Με άλλα λόγια, η λύση παρέχει το χρόνο εισαγωγής κάθε διαδικασίας δεδομένου του προφίλ της παραγωγής απορριμμάτων στις τέσσερις περιόδους. [9], [10]

Για να διευκολύνουμε την ανάγνωση του μοντέλου χρησιμοποιήσαμε κεφαλαία γράμματα για τις μεταβλητές απόφασης (οι άγνωστοι του προβλήματος) και πεζά για τις παραμέτρους (δεδομένα). Επίσης, χρησιμοποιήθηκαν οι ακόλουθοι δείκτες:

i: τα συστατικά των αποβλήτων, i=1..I (max(I)=34)

j: οι τύποι των κάδων, j=1..J (max(J)=7)

p: οι διεργασίες p=1..P (max(P)=42)

o: τα παράγωγα των διεργασιών, o=1..O (max(O)=7)

t: οι χρονικοί περίοδοι, t=1..4

e: οι εξεταζόμενες εκπομπές (CO_2, CH_4, N_2O, NH_3, PM_{10}, SO_X, NO_X, NMVOC, PCDDs), e=1..9

f: τα περιλαμβανόμενα καύσιμα (όπως ντίζελ, φυσικό αέριο, ηλεκτρισμός), f=1..3

4.4 Εξισώσεις μοντέλου

4.4.1 Ισοζύγια μάζας στους κάδους

Η ροή των αποβλήτων στους κάδους περιγράφεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$inbin_{j,t} = \sum_{i=1}^{I} q_{i,j,t,} \times bin_j \qquad j=1..J,\ t=1..4 \qquad (4.1)$$

όπου $q_{i,j,t}$ είναι το i συστατικό των αποβλήτων που πηγαίνει στο j τύπου κάδο την t περίοδο, bin_j είναι η δυαδική παράμετρος όπου δείχνει εάν οι j τύποι κάδων έχουν επιλεχθεί ή όχι στο συγκεκριμένο σενάριο και $inbin_{j,t}$ είναι η υπολογίσιμη παράμετρος για το συνολικό ποσό των ΑΣΑ στο j τύπο κάδου που έχει θεωρηθεί στο μοντέλο βελτιστοποίησης. Η έξοδος από τους κάδους δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$OUTBIN_{j,t} = \sum_{p=1}^{P}(link_{p,j} \times W_{j,p,t}) \qquad j=1..J,\ t=1..4 \qquad (4.2)$$

όπου $link_{p,j}$ είναι η ενδεικτική παράμετρος η οποία αποδίδει τιμή 1 αν ο j τύπος κάδου είναι συνδεδεμένος με την p διεργασία και 0 σε αντίθετη περίπτωση, $W_{j,p,t}$ είναι η ποσότητα των αποβλήτων που έχουν μεταφερθεί από τον j τύπο κάδου στην p διεργασία την t χρονική περίοδο (σε ετήσια βάση) και $OUTBIN_{j,t}$ είναι η συνολική ποσότητα των αποβλήτων για τον j τύπο κάδου την t περίοδο.

Δεδομένου ότι δεν υπάρχει συσσώρευση ή απώλειες στους κάδους η ακόλουθη εξίσωση ισορροπίας πρέπει να διατηρηθεί:

$$inbin_{j,t} = OUTBIN_{j,t} \qquad j=1..J,\ t=1..4 \qquad (4.3)$$

4.4.2 Ισοζύγια μάζας στις διεργασίες

Η εισροή στις διεργασίες περιγράφεται από τις παρακάτω εξισώσεις. Πρώτα θεωρούμε ότι οι διεργασίες λαμβάνουν δεδομένα μόνο από τους κάδους (αυτοί είναι TSR, TSG, CMP, AD, TS). Οι εισροές ($INPROC_{p,t}$) στις διεργασίες είναι:

$$INPROC_{p,t} = \sum_{j=1}^{j}(bin_j \times link_{p,j} \times W_{j,p,t}) \qquad p= TSR, TSG, CMP, AD, TS,\ t=1..4 \qquad (4.4)$$

Οι εξερχόμενες ροές για τις διεργασίες όπου υπάρχει αλλαγή στη σύνθεση δίνονται από:

$$OUTPROC_{p,o,t} = \sum_{i=1}^{I}(cc_{p,i,o} \times \sum_{j=1}^{J}(sh_{i,j,t} \times link_{p,j} \times W_{j,p,t})) \qquad (4.5)$$

p= TSR, TSG, CMP, AD o= 1..O, t=1..4

όπου $cc_{p,i,o}$ είναι ο συντελεστής μετατροπής στην p διεργασία για το i συστατικό σε ο εξερχόμενο προϊόν, $sh_{i,j,t}$ είναι ο καταμερισμός του i συστατικού σε j τύπου κάδο κατά τη διάρκεια της t περιόδου και $link_{p,j}$ και $W_{j,p,t}$ όπως έχουν οριστεί παραπάνω.

Για το στάδιο μεταφοράς (TS) όπου δεν υπάρχει αλλαγή στη σύνθεση η εξερχόμενη ροή δίνεται απευθείας από την ισότητα με την εισερχόμενη ροή:

$$W_{bmt,ts,t} = WTS_{mbt,t} + WTS_{bd,t} + WTS_{wte,t} + WTS_{ldf1,t} \quad t=1..4 \qquad (4.6)$$

$$W_{brc,ts,t} = WTS_{mrf,t} \quad t=1..4 \qquad (4.7)$$

όπου $WTS_{p,t}$ είναι η ποσότητα των αποβλήτων που μεταφέρεται από το σταθμό μεταφοράς (TS) στη διεργασία p τη χρονική περίοδο t και το $W_{j,p,t}$ όπως ορίστηκε παραπάνω. Για τις MRF, MBT, BD η εισερχόμενη ροή έχει οριστεί ως:

$$INPROC_{mrf,t} = W_{brc,mrf,t} + WTS_{mrf,t} \qquad t=1..4 \qquad (4.8)$$

$$INPROC_{mbt,t} = W_{bmw,mbt,t} + WTS_{mbt,t} \qquad t=1..4 \qquad (4.9)$$

$$INPROC_{bd,t} = W_{bmw,bd,t} + WTS_{bd,t} \qquad t=1..4 \qquad (4.10)$$

Οι εξερχόμενες ροές είναι:

$$OUTPROC_{p,o,t} = \sum_{i=1}^{I}(cc_{p,i,o} \times sh_{i,f,t} \times link_{p,j} \times (W_{j,p,t} + WTS_{p,t})$$

$$p= MRF, BD, MBT \quad o=1..O \quad t=1..4 \qquad (4.11)$$

Οι ανακυκλώσιμες ποσότητες προσδιορίζονται επίσης και από τους συντελεστές μετατροπής και δίνονται στη συνέχεια:

$$RECPROC_{p,i,t} = cc_{p,i,'recy'} \times \sum_{j=1}^{J}(sh_{i,j,t} \times link_{p,j} \times W_{j,p,t}) \qquad (4.12)$$

i= 1..I, p= TSR, TSG, CMP, AD, t=1..4

$$RECPROC_{p,i,t} = cc_{p,i,'recy'} \times sh_{i,j,t} \times link_{p,j} \times (W_{j,p,t} + WTS_{p,t}) \qquad (4.13)$$

i= 1..I, p=MRF, BD, MBT, t=1..4

Για τη διεργασία της θερμικής επεξεργασίας αποβλήτων με ανάκτηση ενέργειας (WTE) οι εισροές, εκτός από τους κάδους και το σταθμό μεταφοράς, μπορούν επίσης να προέρχονται από τα παραγόμενα καύσιμα, από τη βιολογική ξήρανση (BD) και από τις διεργασίες της βιολογικής μηχανικής επεξεργασίας (MBT). Το παραγόμενο καύσιμο (DF) αποτελεί εκροή από αυτές τις διεργασίες. Επειδή η σύσταση του είναι απαραίτητη για τα ισοζύγια ενέργειας στις διεργασίες θερμικής επεξεργασίας των αποβλήτων, πρέπει να διατυπωθεί το ισοζύγιο μάζας για το παραγόμενο καύσιμο από κάθε ένα από τα υλικά.

Όσον αφορά στη διεργασία MBT, κάθε συστατικό που εμπεριέχεται σε αυτές τις ροές περιγράφεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$DF_{mbt,wte,i,t} + DF_{mbt,sell,i,t} = cc_{mbt,i,'derf'} \times sh_{i,mbw,t} \times (W_{bmw,mbt,t} + WTS_{mbt,t}) \quad i=1..I, t=1..4$$

(4.14)

$$\sum_{i=1}^{I} DF_{mbt,wte,i,t} = WTE_{mbt,t} \qquad t=1..4 \qquad (4.15)$$

όπου $DF_{mbt,wte,i,t}$ είναι η ποσότητα του i υλικού στη DF ροή που πηγαίνει από το MBT στο WTE τη χρονική περίοδο t, $DF_{mbt,sell,i,t}$ είναι η ποσότητα του i υλικού στη DF ροή από το MBT στην αγορά (με αρνητικό κόστος) ή σε διαθεσιμότητα (με θετικό κόστος), $WWTE_{mbt,t}$ είναι η συνολική ποσότητα του DF που πηγαίνει από το MBT στο WTE.

Ομοίως για το BD έχουμε:

$DF_{bd,wte,i,t} + DF_{bd,sell,i,t} = cc_{bd,i,'derf'} \times sh_{i,bmw,t} \times (W_{bmw,bd,t} + WTS_{bd,t})$ i=1..I, t=1..4

$$\sum_{i=1}^{I} DF_{bd,wte,i,t} = WWTE_{bd,t} \quad t=1..4 \qquad (4.16)$$

Ενώ η συνολική εισροή για το WTE δίνεται από:

$$INPROC_{wte,t} = W_{bmw,wte,t} + WTS_{wte,t} + WWTE_{mbt,t} + WWTE_{bd,t} \quad t=1..4 \qquad (4.17)$$

4.4.3 Ισοζύγια μάζας στο χώρο υγειονομικής ταφής

Υπάρχουν δύο είδη χώρων υγειονομικής ταφής, ένας για τα συνηθισμένα υπολείμματα (LDF) και ο άλλος για τα επικίνδυνα υπολείμματα που προέρχονται από τη θερμική επεξεργασία των αποβλήτων με ανάκτηση ενέργειας (HZLDF). Τα ισοζύγια μάζας που σχετίζονται με τη συμβατική LDF περιλαμβάνουν τον υπολογισμό των υπολειμμάτων από κάθε διεργασία:

$$WLDF_{p,ldf,t} = OUTPROC_{p,'resd',t} \quad p=1..P\setminus\{LDF,HZLDF\}, \quad t=1..4 \qquad (4.18)$$

όπου $WLDF_{p,ldf,t}$ είναι η ποσότητα του υπολείμματος που πηγαίνει από την p διαδικασία στη συμβατική LDF τη χρονική περίοδο t.

Η ροή των υπολειμμάτων που πηγαίνει στην επικίνδυνη LDF σχετίζεται μόνο με την WTE διεργασία:

$$WLDF_{wte,hzldf,t} = \sum_{i=1}^{I} cc_{wte,i,'resdh'} \times (DF_{mbt,wte,i,t} + DF_{bd,wte,i,t} + sh_{i,bmw,t} \times (W_{bmw,wte,t} + WTS_{wte,t})$$

$$t=1..4 \qquad (4.19)$$

όπου $DF_{mbt,wte,i,t}$ είναι η ποσότητα του i υλικού που πηγαίνει από το MBT στο WTE τη χρονική περίοδο t και $DF_{bd,wte,i,t}$ είναι η ποσότητα του i υλικού που πηγαίνει από το BD στο WTE τη χρονική περίοδο t. Το σύνολο αυτών των υπολειμμάτων που οδηγούνται στο χώρο υγειονομικής ταφής σύμφωνα με την ακόλουθη εξίσωση είναι:

$$INPROC_{ldf,t} = \sum_{p=1}^{P\setminus\{LDF,HZLDF\}} WTDF_{p,ldf,t} + W_{bmw,ldf,t} + WTS_{ldf,t} \quad t=1..4 \qquad (4.20)$$

$$INPROC_{hzldf,t} = WLDF_{wte,hzldf,t} \quad t=1..4 \qquad (4.21)$$

4.5 Ισοζύγια ενέργειας

Τα ισοζύγια ενέργειας έχουν διατυπωθεί για τις διεργασίες στις οποίες υπάρχει παραγωγή ενέργειας. Αυτές είναι οι AD, κάποιες από τις MBT και φυσικά οι WTE. Για τις AD και MBT η ενέργεια παράγεται από το παραγόμενο βιοαέριο και το ισοζύγιο ενέργειας είναι:

$$ELPROD_{p,t} = elef_{bg} \times OUTPROC_{p,'biog',t} \qquad p = AD, MBT \quad t = 1..4 \qquad (4.22)$$

όπου $elef_{bg}$ είναι ο συντελεστής απόδοσης για παραγωγή ηλεκτρισμού από βιοαέριο και $OUTPROC_{p,'biog',t}$ είναι το παραγόμενο βιοαέριο από την αντίστοιχη διεργασία.

Στην περίπτωση της WTE η κατάσταση είναι πιο περίπλοκη. Οι εισροές της διεργασίας αυτής προέρχονται από διαφορετικές διεργασίας (BD και MBT) ή απευθείας από τους κάδους ή το σταθμό μεταφοράς. Επομένως, η σύνθεση της εισροής δεν είναι σταθερή αλλά εξαρτάται από το μείγμα των εισροών. Για να διατηρηθούν σε σειρά τα ενεργειακά περιεχόμενα των εισροών, τα υπολογίζουμε σύμφωνα με την ακόλουθη εξίσωση:

$$NCVDF_{mbt,t} = \sum_{i=1}^{I} ncv_i \times (1 - moist_i) \times DF_{mbt,wte,i,t} \qquad t = 1..4 \tag{4.23}$$

όπου $NCVDF_{mbt,t}$ είναι η καθαρή θερμική αξία (ενεργειακό περιεχόμενο) του παραγόμενου καυσίμου από MBT σε WTE, ncv_i είναι η καθαρή θερμική αξία του i συστατικού, $moist_i$ είναι η υγρασία του i συστατικού και $DF_{mbt,wte,i,t}$ είναι η ποσότητα του i συστατικού στο παραγόμενο καύσιμο όπως έχει υπολογιστεί από την εξίσωση (4.16).

Για τη διεργασία της βιολογικής ξήρανσης (BD) η εξίσωση είναι κάπως πιο περίπλοκη αφού υπάρχει απώλεια υγρασίας σε κάθε συστατικό. Δηλώνουμε σαν $bdmlos_i$ την παράμετρο που εκφράζει την απώλεια της υγρασίας στο i συστατικό, έτσι ώστε το ισοζύγιο ενέργειας γίνεται (υποθέτοντας ότι όλες οι απώλειες στη βιολογική ξήρανση είναι εξαιτίας της υγρασίας):

$$NCVDF_{bd,t} = \sum_{i=1}^{I} ncv_i \times (1 - moist_i) \times \frac{(1 - bdmlos_i)}{(1 - cc_{bd,i,'loss'})} \times DF_{bd,wte,i,t} \qquad t = 1..4 \tag{4.24}$$

Το ενεργειακό περιεχόμενο του μεικτού αποβλήτου από τον κάδο BMW και το σταθμός μεταφοράς TS που πηγαίνει στη μονάδα WTE δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$NCVMW_t = \sum_{i=1}^{I} ncv_i \times (1 - moist_i) \times sh_{i,bmw,t} \times (W_{bmw,wte,t} + WTS_{wte,t}) \qquad t = 1..4 \tag{4.25}$$

Άρα, η παραγόμενη ισχύς στη WTE δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$ELPROD_{wte,t} = elef_{wte} \times (NCVDF_{mbt,t} + NCVDF_{bd,t} + NCVMW_t) \qquad t = 1..4 \tag{4.26}$$

όπου $elef_{wte}$ είναι η ηλεκτρική απόδοση της μονάδας WTE.

4.6 Περιορισμοί δυναμικότητας διεργασίας

Η εισροή σε κάθε μία από τις διεργασίες πρέπει να είναι μικρότερη ή ίση με την ήδη εγκατεστημένη δυναμικότητα όπως περιγράφεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$INPROC_{p,t} \le \sum_{tt=1}^{t} CAP_{p,tt} \qquad p = 1..P_{-LDF}, \quad t = 1..4 \tag{4.27}$$

όπου $CAP_{p,tt}$ είναι η δυναμικότητα της διεργασίας p εγκατεστημένη την περίοδο tt. Η παραπάνω εξίσωση ισχύει για όλες τις διεργασίες εκτός από τους χώρους υγειονομικής ταφής. Για τους χώρους υγειονομικής ταφής για κάθε περίοδο η διαθέσιμη ποσότητα προστίθεται στην ποσότητα των προηγούμενων περιόδων. Άρα, η εξίσωση γίνεται:

$$5 \times INPROC_{ldf,t} \leq CAP_{ldf,t} \qquad t = 1..4 \tag{4.28}$$

Ο πολλαπλασιαστής «5» είναι ίσος με τη διάρκεια κάθε περιόδου σε χρόνια.

Κάθε τεχνολογία (διεργασία) έχει ένα ελάχιστο και ένα μέγιστο όριο δυναμικότητας το οποίο σημαίνει ότι η δυναμικότητα της απαιτούμενης διεργασίας πρέπει να είναι μεταξύ αυτών των δύο ορίων όπως περιγράφεται στις ακόλουθες εξισώσεις:

$$CAP_{p,t} \geq capmin_p \times N_{p,t} \qquad p = 1..P, \quad t = 1..4 \tag{4.29}$$

$$CAP_{p,t} \leq capmax_p \times N_{p,t} \qquad p = 1..P, \quad t = 1..4 \tag{4.30}$$

όπου $capmin_p$ και $capmax_p$ είναι η ελάχιστη και η μέγιστη δυναμικότητα αντιστοίχως της διεργασίας p, $N_{p,t}$ είναι σταθερά απόφασης που εκφράζει τον αριθμό των μονάδων της διεργασίας p που έχουν εγκατασταθεί στην περίοδο t. Εξαιτίας της κλίμακας των οικονομικών είναι προτιμότερο να εγκατασταθεί ο ελάχιστος αριθμός μονάδων που χρειάζονται για να καλύψουν μία συγκεκριμένη συνολική δυναμικότητα. Για να εγγυηθούμε αυτή τη λογική συμπεριφορά του μοντέλου προσθέτουμε επίσης τους ακόλουθους περιορισμούς:

$$N_{p,t} \leq 1 + \frac{CAP_{p,t}}{capmax_p} \qquad p = 1..P, \quad t = 1..4 \tag{4.31}$$

ώστε ο αριθμός των μονάδων να πάρει την ελάχιστη τιμή του δεδομένου της μέγιστης δυναμικότητας για κάθε μονάδα και την απαιτούμενη συνολική δυναμικότητα της τεχνολογίας.

4.7 Ποσοστά ανακύκλωσης

Τα ποσοστά ανακύκλωσης των ανακυκλώσιμων υλικών πρέπει να ελέγχονται από τον χρήστη. Υπάρχουν δύο είδη επιλογών που ελέγχουν τα ποσοστά ανακύκλωσης. Η πρώτη είναι οι νομοθετικοί περιορισμοί που εκφράζονται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$\sum_{p=1}^{P} RECPROC_{p,i,t} \geq lrb_{i,t} \times tquant_{i,t} \qquad i = pa, pl, mt, gl, wd \quad t = 1..4 \tag{4.32}$$

όπου $lrb_{i,t}$ είναι το νομοθετικό όριο ανακύκλωσης για το i υλικό την περίοδο t και $tquant_{i,t}$ είναι η ολική ποσότητα που συλλέχθηκε από το i υλικό την t περίοδο και

$RECPROC_{p,i,t}$ είναι η ανακυκλώσιμη ποσότητα του i συστατικού που αποκτήθηκε από την διεργασία p την χρονική περίοδο t.

Η δεύτερη επιλογή είναι ότι ο χρήστης μπορεί να επιβάλλει κάποιους περιορισμούς πολιτικής (για όλα ή κάποια από τα ανακυκλώσιμα υλικά) που μπορεί να είναι πιο φιλόδοξοι από τους νομοθετικούς περιορισμούς. Η διατύπωση είναι η ίδια:

$$\sum_{p=1}^{P} RECPROC_{p,i,t} \geq prb_{i,t} \times tquant_{i,t} \qquad i = \text{PA,PL,MT,GL} \quad t = 1..4 \tag{4.33}$$

όπου $prb_{i,t}$ είναι ο στόχος ανακύκλωσης που συνεπάγεται από μία συγκεκριμένη πολιτική ανακύκλωσης για το i υλικό την t περίοδο. Η διαφορά μεταξύ των δύο ειδών των περιορισμών είναι ότι η πρώτη εξίσωση είναι υποχρεωτική ενώ η δεύτερη είναι προαιρετική. Πρέπει να αναφερθεί ότι εάν υπάρχουν νομοθετικοί στόχοι ή στόχοι πολιτικής για κάθε μία κατηγορία υλικών (π.χ. ανακυκλώσιμα γενικά) μπορούν εύκολα να ενσωματωθούν στο μοντέλο συσσωρεύοντας τα υλικά όπως περιγράφεται παρακάτω:

$$\sum_{rec(i)} \sum_{p=1}^{P} RECPROC_{p,rec,t} \geq lrbtot_t \times \sum_{rec} tquant_{rec,t} \qquad t = 1..4 \tag{4.34}$$

όπου rec(i) είναι η ομάδα των ανακυκλώσιμων υλικών (χαρτί, πλαστικό, γυαλί και μέταλλο) και $lrbtot_t$ είναι το όριο για τα συνολικά ανακυκλώσιμα την περίοδο t.

4.8 Εκπομπές

Οι θεωρούμενες εκπομπές δεν περιορίζονται μόνο στα αέρια του θερμοκηπίου. Οι ακόλουθες εκπομπές αναφέρονται στο μοντέλο αυτό, ενώ οι εκπομπές των τριών αερίων του θερμοκηπίου διατυπώνουν τη δεύτερη αντικειμενική συνάρτηση. Υπάρχουν μέχρι και εννέα εκπομπές αερίων: CO_2, CH_4, N_2O, NH_3, PM_{10}, SO_x, NO_x, NMVOC (όχι οργανικά, πτητικά μίγματα μεθανίου) και PCDDs (πολυχρωμιωμένες διβενζο-π-διοξίνες και διβενζοφουράνια). Οι πρώτες τρεις εκπομπές είναι τα αέρια του θερμοκηπίου (GHG) και συμμετέχουν στη δεύτερη αντικειμενική συνάρτηση του μοντέλου (ελαχιστοποίηση του CO_2-ισοδύναμα). Οι εκπομπές χωρίζονται σε αυτές που προέρχονται από τις διεργασίες και σε αυτές που προέρχονται από την μεταφορά.

4.8.1 Εκπομπές από τις διεργασίες

Έχουμε τις εκπομπές από την κατανάλωση του καυσίμου που δίνονται από τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$FCEMS_{f,e,t} = \sum_{p=1}^{P} spc_{f,p} \times ef_{f,e} \times INPROC_{p,t} \qquad f = 1..3, \quad e = 1..9, \quad t = 1..4 \tag{4.35}$$

όπου $FCEMS_{f,e,t}$ είναι οι e τύπου εκπομπές από το καύσιμο f (f = diesel, φυσικό αέριο και ηλεκτρισμός) τη χρονική περίοδο t, $spc_{f,p}$ είναι η ειδική κατανάλωση καυσίμου f στη διεργασία p (σε μονάδες καυσίμου ανά μονάδα εισροής στη διεργασία), $ef_{f,e}$ είναι ο παράγοντας εκπομπής της e εκπομπής από το f καύσιμο και $INPROC_{p,t}$ είναι η εισροή στη p διεργασία τη χρονική περίοδο t.

Επίσης, έχουμε τις εκπομπές από τις ίδιες τις διεργασίες. Αυτές οι εκπομπές δίνονται από τις παρακάτω εξισώσεις για όλες τις διεργασίες εκτός από την WTE και τον χώρο υγειονομικής ταφής που περιγράφονται στην επόμενες παραγράφους:

$$PREMS_{e,t} = \sum_{p=1}^{P_WTE,LDF} efproc_{p,e} \times INPROC_{p,t} \qquad e = 1..9, \quad t = 1..4 \tag{4.36}$$

όπου $FCEMS_{f,e,t}$ είναι οι e τύπου εκπομπές από όλες τις διεργασίες σε χρόνο t, $efproc_{p,e}$ είναι ο παράγοντας εκπομπών της e εκπομπής από την p διεργασία.

Για τις μονάδες της θερμικής επεξεργασίας αποβλήτων με ανάκτηση ενέργειας (WTE) η κατάσταση είναι πιο περίπλοκη γιατί η εισροή δεν έχει σταθερή σύνθεση. Συνεπώς, οι εκπομπές πρέπει να υπολογίζονται με βάση τα ακατέργαστα υλικά που εισέρχονται στη διεργασία. Πρώτον, υπολογίζουμε τις εκπομπές CO_2 οι οποίες είναι άμεσα συνδεδεμένες με τον περιεχόμενο άνθρακα του παραγόμενου καυσίμου το οποίο εισέρχεται στη διεργασία WTE:

$$DFEMS_{p,'CO2',t} = \sum_{i=1}^{I} dmc_i \times carbc_i \times fc_i \times \frac{44}{12} \times DF_{p,wte,i,t} \qquad p = BD, MBT, \quad t = 1..4 \tag{4.37}$$

όπου dmc_i είναι η ξηρή ουσία που περιέχεται στο i υλικό, $carbc_i$ είναι ο άνθρακας που περιέχεται στο i υλικό και fc_i είναι ο ορυκτός άνθρακας που περιέχεται σε κάποιο ποσοστό του i υλικού. Η αναλογία 44/12 είναι η παραγωγή CO_2 από μία μονάδα μάζας του C. Οι υπόλοιπες εκπομπές δίνονται από τις εξισώσεις:

$$DFEMS_{p,e,t} = \sum_{i=1}^{I} efwte_{i,e} \times DF_{p,wte,i,t} \qquad p = BD, MBT, e = 2..9 \ (not\ CO_2), t = 1..4 \tag{4.38}$$

όπου $efwte_{i,e}$ είναι ο παράγοντας εκπομπής της e εκπομπής από το i υλικό στη διεργασία WTE.

Οι άλλες ροές οι οποίες τροφοδοτούν τη WTE είναι πρώτον απευθείας από τον κάδο BMW και δεύτερον από το στάδιο μεταφοράς (TS). Παρομοίως, οι εκπομπές του CO_2 και οι υπόλοιπες οχτώ εκπομπές από αυτές τις ροές δίνονται από τις εξισώσεις:

$$MWEMS_{CO2',t} = \sum_{i=1}^{I} dmc_i \times carbc_i \times fc_i \times \frac{44}{12} \times sh_{i,bmw,t} \times (W_{bmw,wte,t} + WTS_{wte,t}) \qquad t = 1..4 \tag{4.39}$$

$$MWEMS_{e,t} = \sum_{i=1}^{I} efwte_{i,e} \times sh_{i,bmw,t} \times (W_{bmw,wte,t} + WTS_{wte,t}) \qquad e = 2..9\ (not\ CO2), \quad t = 1..4 \tag{4.40}$$

Άρα, οι ολικές εκπομπές από τη WTE είναι:

$$WTEEMS_{e,t} = \sum_{p=BD,MBT} DFEMS_{p,e,t} + MWEMS_{e,t} \qquad e = 1..9, \quad t = 1..4 \tag{4.41}$$

4.8.2 Εκπομπές από τη μεταφορά

Οι εκπομπές από τη μεταφορά σχετίζονται με την κατανάλωση καυσίμου των φορτηγών που είναι ανάλογη με την απόσταση της διαδρομής. Ειδικότερα οι εκπομπές της μεταφοράς δίνονται:

$$\begin{aligned} TREMS_{e,t} = \sum_{f=1}^{3} tref_{e,f} \times (&\sum_{p=1}^{P} \sum_{j=1}^{J} sctrw_{p,f} \times db_p \times W_{j,p,t}) + \\ &(\sum_{p=1}^{P} sctrwldf_{p,f} \times dldf_p \times WLDF_{p,t}) + \\ &(\sum_{p=1}^{P} sctrwts_{p,f} \times dts_p \times WTS_{p,t}) + \\ &(\sum_{p=bd,mbt} sctrwte_{p,f} \times dwte_p \times WWTE_{p,t}) \qquad e = 1..9, \quad t = 1..4 \end{aligned} \tag{4.42}$$

όπου $tref_{e,f}$ είναι ο παράγοντας εκπομπής που χρησιμοποιείται στη μεταφορά για την e εκπομπή του f καυσίμου, $sctrw_{p,f}$ είναι η ειδική κατανάλωση του καυσίμου f στα φορτηγά τα οποία μεταφέρουν απόβλητα από τους κάδους στη p διεργασία, $sctrwldf_{p,f}$ είναι η ειδική κατανάλωση του καυσίμου f στα φορτηγά τα οποία μεταφέρουν απόβλητα από την p διεργασία στον χώρο υγειονομικής ταφής, $sctrwts_{p,f}$ είναι η ειδική κατανάλωση του καυσίμου f στα φορτηγά τα οποία μεταφέρουν απόβλητα από το σταθμό μεταφοράς (TS) στην p διεργασία, $sctrwte_{p,f}$ είναι η ειδική κατανάλωση καυσίμου f στα φορτηγά τα οποία μεταφέρουν απόβλητα από την βιολογική ξήρανση (BD) και MBT στη WTE, db_p είναι η απόσταση από τους κάδους στη p διεργασία και πίσω διαιρούμενη από το αντίστοιχο φορτίο του φορτηγού, $dldf_p$ είναι η απόσταση από την p διεργασία στο χώρο υγειονομικής ταφής και πίσω διαιρούμενη από το αντίστοιχο φορτίο του φορτηγού, dts_p είναι η απόσταση από το σταθμό μεταφοράς στην p διεργασία και αντίστροφα διαιρούμενη από το αντίστοιχο φορτίο του φορτηγού, $dwte_p$ είναι η απόσταση από τη BD και το MBT στη WTE και αντίστροφα

διαιρούμενη από το αντίστοιχο φορτίο του φορτηγού. Ο υπολογισμός όλων αυτών των παραμέτρων από τα εισερχόμενα δεδομένα δίνεται από το Appendix II.

4.8.3 Εκπομπές από τον χώρο υγειονομικής ταφής

Ο χώρος υγειονομικής ταφής (ΧΥΤΑ) είναι από τα πιο δύσκολα χαρακτηριστικά σχετικά με τον υπολογισμό και την μοντελοποίηση των εκπομπών. Το ενδιαφέρον κομμάτι στη μοντελοποίηση των ΧΥΤΑ είναι ότι τα απόβλητα που διατίθενται την χρονική περίοδο t επηρεάζουν τις εκπομπές CH_4 όλων των επακόλουθων περιόδων t+1, t+2,…, σύμφωνα με το ρυθμό παραγωγής του μεθανίου. Βεβαιώνουμε ότι η παραγωγή μεθανίου ακολουθεί πρώτης τάξεως εξασθένηση (First Order Decay- FOD) σύμφωνα με τις οδηγίες του IPCC (IPCC, 2006). Συνεπώς, έχουμε να μοντελοποιήσουμε ένα συσσωρευτικό αποτέλεσμα για την θεωρούμενη περίοδο. Αυτό σημαίνει ότι για τον υπολογισμό των εκπομπών CH_4 της τρίτης περιόδου, πρέπει να συνυπολογίσουμε την ποσότητα των αποβλήτων που διατίθενται επίσης την πρώτη και την δεύτερη περίοδο καθώς συνεχίζουν να εκπέμπουν CH_4. Οι εκπομπές CH_4 από τα ΧΥΤΑ συμβαίνουν κατά τη διάρκεια όλης της ζωής των χώρων αυτών και όχι μόνο τη διαθέσιμη περίοδο. Επίσης, διαρκούν ακόμη και μετά το τέλος της περιόδου μελέτης και πρέπει να ενσωματωθούν αυτές οι εκπομπές που προκύπτουν μετά την μελέτη στους υπολογισμούς μας για πιο αξιόπιστα αποτελέσματα. Η μοντελοποίηση αυτού του μηχανισμού για τον μαθηματικό προγραμματισμό είναι ένα ενδιαφέρον θέμα αφού δεν έχει βρεθεί κάτι παρόμοιο στη σχετική βιβλιογραφία. Πρέπει να σημειωθεί ότι στη βιβλιογραφία, οι προσπάθειες να ενσωματωθούν οι εκπομπές του χώρου υγειονομικής ταφής σε μία πολλαπλή περίοδο, σε ένα πολυκριτηριακό μοντέλο δηλώνει ότι οι εκπομπές GHG είναι γραμμικά συνδεδεμένες στη ποσότητα που διατίθεται (βλ. Lu et al, 2009, p.401, assumption 2, He et al. 2011, p.114). Ωστόσο, η ακριβής μοντελοποίηση των εκπομπών μεθανίου από τον χώρο υγειονομικής ταφής είναι ένα κρίσιμο σημείο στην παρούσα εργασία, αφού αυτές οι εκπομπές κυριαρχούν στα συστήματα διαχείρισης ΑΣΑ. Αξίζει να σημειωθεί ότι ποσοτικά το CH_4 είναι 21 φορές πιο αποτελεσματικό από το CO_2 στη δημιουργία του φαινομένου του θερμοκηπίου.

Σύμφωνα με τις οδηγίες της IPCC (IPCC,2006) ο χρήστης καθορίζει την απαιτούμενη παράμετρο για κάθε τύπο αποβλήτου. Στην εργασία αυτή έχουμε 10 είδη αποβλήτων που οδηγούνται στο χώρο υγειονομικής ταφής, δηλαδή, "Φαγητό", "Κήπος", "Χαρτί", "Ξύλο" και "Υφασμα" και για κάθε ένα από αυτά επεξεργάσιμο και μη. Οι απαιτούμενες παράμετροι είναι:

- Βιοαποικοδομήσιμος οργανικός άνθρακας (DOC)
- Ποσοστό του DOC που αποικοδομείται αναερόβια (DOCf)
- Συντελεστής διόρθωσης μεθανίου (MCF)
- Κλάσμα μεθανίου στο ΧΥΤΑ (f)
- Σταθερά ρυθμού αντίδρασης της παραγωγής μεθανίου (k)

Σύμφωνα με τις οδηγίες της IPCC 2006, από την ποσότητα των αποβλήτων W_k που πηγαίνει στο χώρο υγειονομικής ταφής τη χρονιά k, το ενεργό κομμάτι όπως η

αποσυνθέσιμη μάζα η οποία συμμετέχει στους υπολογισμούς των εκπομπών του CH_4 είναι:

$$WA_k = DOC \times DOCf \times MCF \times W_k \tag{4.43}$$

Το μεθάνιο που παράγεται από αυτή την ποσότητα είναι:

$$\begin{aligned} MTH_k &= WA_k \times \left(1-e^{-k}\right) \times \frac{16}{12} \times f \\ &= W_k \times [DOC \times DOCf \times MCF \times \left(1-e^{-k}\right) \times \frac{16}{12} \times f] \end{aligned} \tag{4.44}$$

Στην παραπάνω εξίσωση έχουμε το παραγόμενο CH_4 στο χώρο υγειονομικής ταφής (MTH_k) σαν κλάσμα της ροής αποβλήτων (W_k):

$$MTH_k = W_k \times d \tag{4.45}$$

όπου:

$$d = DOC \times DOCf \times MCF \times \left(1-e^{-k}\right) \times \frac{16}{12} \times f \tag{4.46}$$

Βεβαιώνουμε ότι την πρώτη περίοδο έχουμε μία ετήσια ποσότητα αποβλήτων W από την κατηγορία "Φαγητό"- μη επεξεργασμένο που πηγαίνει στο χώρο υγειονομικής ταφής. Υπενθυμίζουμε εδώ ότι κάθε περίοδος χαρακτηρίζεται από μία σταθερή ετήσια ποσότητα αποβλήτων που μπορεί να αλλάξει από περίοδο σε περίοδο. Ακόμη, η ετήσια ποσότητα της πρώτης περιόδου για το φαγητό-μη επεξεργασμένο απόβλητο πηγαίνει στο χώρο υγειονομικής ταφής W_1, για τη δεύτερη περίοδο W_2 κ.ο.κ. Μέσα σε 20 χρόνια, αυτός ο περιοδικά επαναλαμβανόμενος σχηματισμός μπορεί να εκφραστεί σαν κλάσμα των ποσοτήτων W_1, W_2, W_3 και W_4 που πηγαίνουν στο χώρο υγειονομικής ταφής κάθε 5 χρόνια. Έχουμε μία ετήσια ποσότητα αποβλήτων W_t που πηγαίνει στο χώρο υγειονομικής ταφής την περίοδο t. Με επεξεργασία του περιοδικά επαναλαμβανόμενου τύπου που χαρακτηρίζει τα εναπομείναντα «ενεργά» απόβλητα στα ΧΥΤΑ, η ποσότητα των εκπομπών μεθανίου που παράγονται κατά τη διάρκεια της περιόδου t δίνεται από την ακόλουθη έκφραση η οποία είναι γραμμική των μεταβλητών απόφασης W_t.

$$\begin{aligned} MTH_t &= d \times [W_t \times \left(5+4e^{-k}+3e^{-2k}+2e^{-3k}+e^{-4k}\right) + \\ &\sum_{tt=1}^{t-1} W_{tt} \times \left(e^{-(5t-9)k}+2e^{-(5t-8)k}+3e^{-(5t-7)k}+4e^{-(5t-6)k}+5e^{-(5t-5)k}+4e^{-(5t-4)k}+3e^{-(5t-3)k}+2e^{-(5t-2)k}+e^{-(5t-1)k}\right)] \end{aligned} \tag{4.47}$$

Οι ποσότητες W_t εκφράζονται διαφορετικά για κάθε ένα από τα 10 είδη αποβλήτων (Φαγητό, Κήπος, Χαρτί, Ξύλο, Ύφασμα και για κάθε ένα από αυτά επεξεργασμένο ή

μη). Το ισοζύγιο μάζας που παρέχει τις απαιτούμενες ποσότητες είναι το ακόλουθο για τα μη επεξεργασμένα υλικά.

$$
\begin{aligned}
RSDLDF_{i,t} = & \sum_{p=tsr,tsg} cc_{p,i,resd} \times \sum_{j=1}^{J} sh_{i,j,t} \times W_{j,p,t} + \\
& \sum_{p=cmp,ad} (1-tr_{i,p}) \times cc_{p,i,resd} \times \sum_{j=1}^{7} sh_{i,j,t} \times W_{j,p,t} + \\
& \sum_{p=mbt} (1-tr_{i,p}) \times cc_{p,i,resd} \times sh_{i,bmw,t} \times (W_{bmw,p,t} + WTS_{p,t}) + \\
& \sum_{p=mrf} cc_{p,i,resd} \times sh_{i,brc,t} \times (W_{brc,p,t} + WTS_{p,t}) + \\
& \sum_{p=bd,wte} cc_{p,i,resd} \times sh_{i,bmw,t} \times (W_{bmw,p,t} + WTS_{p,t}) + \\
& sh_{i,bmw,t} \times (W_{bmw,ldf,t} + WTS_{ldf,t}) \qquad i = fd, gd, pa, wd, tx \qquad t = 1..4
\end{aligned}
\tag{4.48}
$$

όπου η παράμετρο $tr_{i,p}$ ορίζει ποιο κομμάτι του i υλικού θεωρείται επεξεργασμένο στην p διεργασία. Τα επεξεργασμένα υλικά αποκτούνται από τα AD, CMP και MBT όπως φαίνεται και παρακάτω:

$$
\begin{aligned}
TRSDLDF_{i,t} = & \sum_{p=cmp,ad} tr_{i,p} \times cc_{p,i,resd} \times \sum_{j=1}^{J} sh_{i,j,t} \times W_{j,p,t} + \\
& \sum_{p=mbt} tr_{i,p} \times cc_{p,i,resd} \times sh_{i,bmw,t} \times (W_{bmw,p,t} + WTS_{p,t}) \\
& i = fd, gd, pa, wd, tx \qquad t = 1..4
\end{aligned}
\tag{4.49}
$$

Σε αυτό το μοντέλο επίσης συνυπολογίζουμε τις εκπομπές του χώρου υγειονομικής ταφής από τον 20° χρόνο μέχρι τον 40° χρόνο, αφού οι χώροι αυτοί συνεχίζουν να εκπέμπουν CH_4 ακόμα και μετά το κλείσιμό τους. Αυτές οι εκπομπές δίνονται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$
\begin{aligned}
MTH20_40 = [& W_1 \times (e^{-16k} + 2 \times e^{-17k} + 3 \times e^{-18k} + 4 \times e^{-19k} + 5 \times e^{-20k} + 5 \times e^{-21k} + \ldots + 5 \times e^{-35k} + \\
& 4 \times e^{-36k} + 3 \times e^{-37k} + 2 \times e^{-38k} + e^{-39k}) + \\
& W_2 \times (e^{-11k} + 2 \times e^{-12k} + 3 \times e^{-13k} + 4 \times e^{-14k} + 5 \times e^{-15k} + 5 \times e^{-16k} + \ldots + 5 \times e^{-30k} + \\
& 4 \times e^{-31k} + 3 \times e^{-32k} + 2 \times e^{-33k} + e^{-34k}) \\
& W_3 \times (e^{-6k} + 2 \times e^{-7k} + 3 \times e^{-8k} + 4 \times e^{-9k} + 5 \times e^{-10k} + 5 \times e^{-11k} + \ldots + 5 \times e^{-25k} + \\
& 4 \times e^{-26k} + 3 \times e^{-27k} + 2 \times e^{-88k} + e^{-29k}) \\
& W_4 \times (e^{-k} + 2 \times e^{-2k} + 3 \times e^{-3k} + 4 \times e^{-4k} + 5 \times e^{-5k} + 5 \times e^{-6k} + \ldots + 5 \times e^{-20k} +
\end{aligned}
$$

$$4\times e^{-21k}+3\times e^{-22k}+2\times e^{-23k}+e^{-24k})] \times d \qquad (4.50)$$

Όμοια με αυτό που κάναμε για την μελετώμενη περίοδο, οι εκπομπές μεθανίου από τον χώρο υγειονομικής ταφής από τον 21° χρόνο μέχρι τον 40° (περίοδος 20 χρόνων μετά την μελέτη).

$$MTH20_40LDF = \sum_{i=1}^{5}\sum_{t=1}^{4} mth20_40coef_{i,t} \times RSDLDF_{i,t} + \sum_{i=1}^{5}\sum_{t=1}^{4} tmth20_40coef_{i,t} \times TRSDLDF_{i,t} \qquad (4.51)$$

όπου mth20_40coef$_{i,t}$ και tmth20_40coef$_{i,t}$ είναι στην πραγματικότητα οι πολλαπλασιαστές των W_1, W_2, W_3 και W_4 στην εξίσωση (4.50) η οποία υπολογίζει MTH20_40 για το επεξεργάσιμο και μη υλικό αντίστοιχα και i=5 (=fd, gd,pa, wd, tx).

4.9 Αντικειμενική συνάρτηση κόστους

Η πρώτη αντικειμενική συνάρτηση του μοντέλου είναι ο οικονομικός αντικειμενικός στόχος ο οποίος ποσοτικοποιείται από το τρέχον καθαρό κόστος (Net Present Cost – NPC) του συστήματος υπολογιζόμενο σε περίοδο 20 χρόνων. Για να υπολογιστεί η NPC απαιτείται η ετήσια ροή μετρητών. Για αυτό το λόγο όλα τα κόστη των επενδύσεων (κάδοι, διεργασίες, φορτηγά κτλ.) ανάγονται σε ετήσια βάση με σκοπό να μπορεί να ενσωματωθεί το ετήσιο λειτουργικό κόστος και το εισόδημα από την ανακύκλωση ή τις πωλήσεις ηλεκτρισμού σε ροή μετρητών ετησίως.

4.9.1 Ετήσιο κόστος κάδων

Το επενδυτικό κόστος των κάδων είναι άμεσα συνδεδεμένο στην απαιτούμενη δυναμικότητα. Το ετήσιο επενδυτικό κόστος ανά τόνο αποβλήτων στην εισροή ανά χρόνο υπολογίζεται για κάθε τύπο κάδου (βλ. Appendix II) και ο υπολογισμός του συνολικού κόστους δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$BNANCAPEX_t = \sum_{j=1}^{J} binaicpt_j \times OUTBIN_{j,t} \qquad t = 1..4 \qquad (4.52)$$

όπου BNACAPEX$_t$ είναι το ετήσιο επενδυτικό κόστος των κάδων, binaicpt$_j$ είναι το ετήσιο επενδυτικό κόστος για τον j τύπο κάδου ανά τόνο εισροής και OUTBIN$_{j,t}$ είναι το ετήσιο φορτίο για τον j τύπο κάδου την χρονική περίοδο t.

4.9.2 Ετησιοποιημένο κόστος επένδυσης στη μεταφορά (φορτηγά)

Το επενδυτικό κόστος για τη μεταφορά σχετίζεται με τα φορτηγά που χρειάζονται για να πραγματοποιηθεί η μεταφορά από τους κάδους στις διεργασίες, από διεργασία σε διεργασία και από τις διεργασίες στο χώρο υγειονομικής ταφής. Ο αριθμός των απαιτούμενων φορτηγών είναι άμεσα συνδεδεμένος με την ποσότητα που μεταφέρεται από τον ένα κόμβο στον άλλο σε ένα σύστημα διαχείρισης ΑΣΑ. Η μοναδική μεταβλητή απόφασης στην υπομονάδα μεταφοράς είναι η ποσότητα

αποβλήτων που μεταφέρεται ενώ το είδος των φορτηγών (μαζί με το κόστος και τη δυναμικότητά τους), η απόσταση μεταξύ των κόμβων, οι ώρες φόρτωσης, η μέση ταχύτητα μεταφοράς κτλ. θεωρούνται σαν γνωστές παράμετροι. Η ακόλουθη εξίσωση περιγράφει το κόστος δυναμικότητας μεταφοράς:

$$\begin{aligned} TRANCAPEX_t = & \sum_{tt=1}^{t} \sum_{p=1}^{P} \sum_{j=1}^{J} tcbin_p \times W_{j,p,tt} + \\ & \sum_{tt=1}^{t} \sum_{p=1}^{P} tcldf_p \times WLDF_{p,ldf,tt} + \\ & \sum_{tt=1}^{t} \sum_{p=1}^{P} tcts_p \times WTS_{p,tt} + \\ & \sum_{tt=1}^{t} \sum_{p=bd,mbt} tcwte_p \times WWTE_{p,tt} \qquad t = 1..4 \end{aligned} \tag{4.53}$$

όπου $TRANCAPEX_t$ είναι το ολικό ετήσιο κόστος δυναμικότητας του συστήματος μεταφοράς, $tcbin_p$ είναι το ετήσιο κόστος δυναμικότητας μεταφοράς από τους κάδους στη διεργασία p ανά τόνο μεταφερόμενου αποβλήτου, $tcldf_p$ είναι το ετήσιο κόστος δυναμικότητας μεταφοράς από τη διεργασία p στο χώρο υγειονομικής ταφής ανά τόνο μεταφερόμενου αποβλήτου, $tcts_p$ είναι το ετήσιο κόστος δυναμικότητας μεταφοράς από το σταθμό μεταφοράς στη διεργασία p ανά τόνο μεταφερόμενου αποβλήτου, $tcwte_{bd}$ και $tcwte_{mbt}$ είναι το ετήσιο κόστος δυναμικότητας μεταφοράς από τις διεργασίες BD και MBT αντιστοίχως στη διεργασία WTE. Ο υπολογισμός όλων των παραμέτρων από τα ακατέργαστα εισερχόμενα δεδομένα δίνεται στο Appendix II.

4.9.3 Ετήσιο λειτουργικό κόστος μεταφοράς (φορτηγά)

Το ετήσιο λειτουργικό κόστος για τη μεταφορά σχετίζεται άμεσα με τις αποστάσεις ανάμεσα στους κόμβους του γραφήματος της εικόνας 4-1. Δεδομένων των αποστάσεων και των τύπων των φορτηγών (δυναμικότητα και ειδική κατανάλωση) μπορεί να εκφραστεί το λειτουργικό κόστος σαν συνάρτηση της ποσότητας των αποβλήτων που μεταφέρονται. Οι μοναδικές μεταβλητές απόφασης είναι πάλι η ποσότητα των αποβλήτων που μεταφέρονται όπως περιγράφεται και στην επόμενη εξίσωση:

$$\begin{aligned} TROPEX_t = & \sum_{p=1}^{P} \sum_{j=1}^{J} cpkmbin_p \times dpybin_p \times W_{j,p,t} + \\ & \sum_{p=1}^{P} cpkmldf_p \times dpyldf_p \times WLDF_{p,ldf,t} + \\ & \sum_{p=1}^{P} cpkmts_p \times dpyts_p \times WTS_{p,tt} + \\ & \sum_{p=bd,mbt} cpkmwte_p \times dpywte_p \times WWTE_{p,tt} \qquad t = 1..4 \end{aligned} \tag{4.54}$$

όπου $TROPEX_t$ είναι το ολικό ετήσιο λειτουργικό κόστος του συστήματος μεταφοράς, $cpkmbin_p$ είναι το λειτουργικό κόστος ανά km (€/km) για τα απόβλητα που μεταφέρονται από τους κάδους στη διεργασία p, $dpybin_p$ είναι η απόσταση από τους κάδους στη διεργασία p διαιρούμενη από το ειδικό φορτίο του φορτηγού (km/tn). Επομένως, οι υπόλοιπες παράμετροι ορίζονται για τη μεταφορά από τις διεργασίες στο χώρο υγειονομικής ταφής, από το σταθμό μεταφοράς στις διεργασίες και από το BD και MBT στη WTE. Ο υπολογισμός όλων αυτών των παραμέτρων από τα ακατέργαστα εισερχόμενα δεδομένα δίνεται από το Appendix II.

4.9.4 Ετησιοποιημένο κόστος επένδυσης των διεργασιών

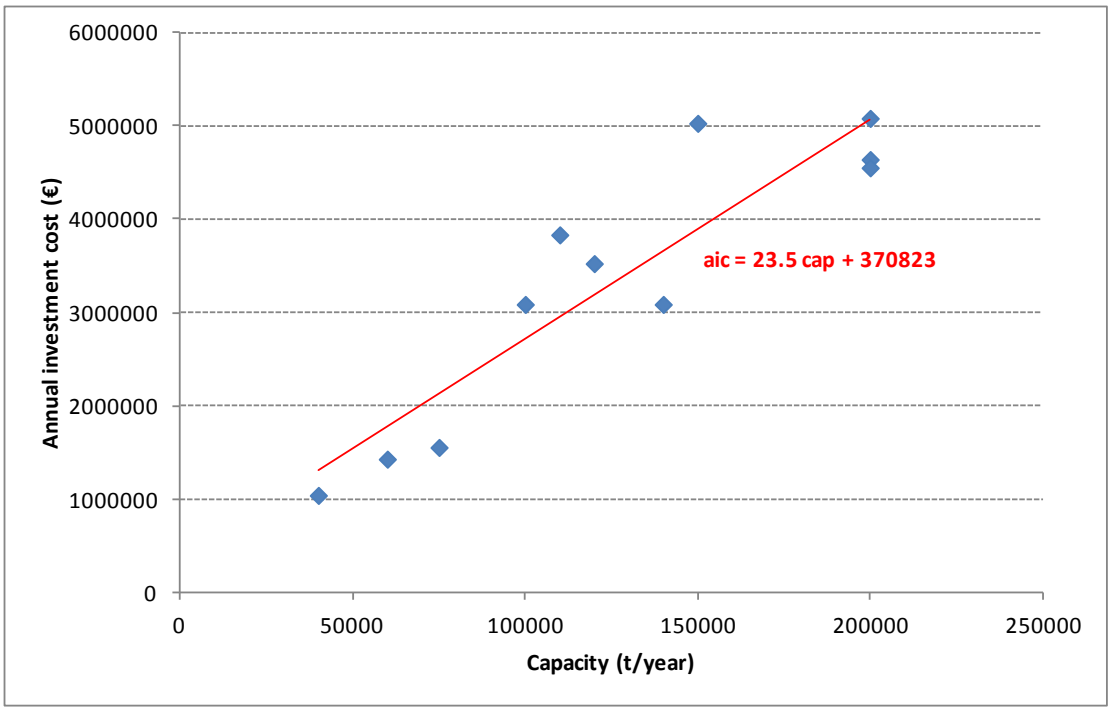
Όπως έχει αναφερθεί το επενδυτικό κόστος των διεργασιών αναλύεται σε ετήσια βάση με σκοπό να επιτευχθεί η ετήσια ανάλυση του κόστους δυναμικότητας. Το επενδυτικό κόστος είναι ανάλογο με τη δυναμικότητα της κάθε διεργασία συν ένα σταθερό κόστος. Η κλίση και η αποτέμνουσα της γραμμής του κόστους δυναμικότητας υπολογίζονται χρησιμοποιώντας γραμμική παλινδρόμηση από τα δεδομένα των μονάδων που υπάρχουν για κάθε μία ειδική διεργασία. Για κάθε τύπο διεργασίας p έχουμε ένα σύνολο K διαθέσιμων μονάδων για τις οποίες έχουμε το επενδυτικό κόστος και τη δυναμικότητά τους. Υπολογίζεται το ετήσιο επενδυτικό κόστος ($aic_{p,i}$) για κάθε μία από αυτές χρησιμοποιώντας την εξίσωση:

$$aic_{p,k} = CRF \times ic_{p,k} \qquad k = 1..K \tag{4.55}$$

όπου $ic_{p,k}$ είναι το επενδυτικό κόστος της k μονάδας του p τύπου και CRF είναι ο συντελεστής αναγωγής σε ετήσιο κόστος (Capital Recovery Factor) το οποίο είναι μία συνάρτηση της διάρκειας ζωής (T) και του συνεπαγόμενου παράγοντα προεξόφλησης (r) που δίνεται από:

$$CRF = \frac{r \times (1+r)^T}{(1+r)^T - 1} \tag{4.56}$$

Σχεδιάζοντας το $aic_{p,k}$ συναρτήσει της δυναμικότητας έχουμε το διάγραμμα (Σχήμα 4-1)



Σχήμα 4. 1 Εξαγωγή αποτελεσμάτων από το γραμμικό μοντέλο για το ετήσιο επενδυτικό κόστος με βάση τα διαθέσιμα δεδομένα

Σχεδιάζοντας τη γραμμή παλινδρόμησης έχουμε το γραμμικό μοντέλο που εκφράζει το ετήσιο επενδυτικό κόστος (aic) ως συνάρτηση της δυναμικότητας (cap) για τη διεργασία p. Η δυναμικότητα των διεργασιών πάντα εκφράζεται σε τόνους ανά έτος (t/y). Η κλίση της γραμμής είναι η παράμετρος $aicslope_p$ και η αποτέμνουσα δηλώνεται ως $aicincpt_p$ (σχήμα 4-1: $aicslope_p$=23.5 και $aicitcpt_p$=370823).

Σε περίπτωση που δεν υπάρχουν τόσα διαθέσιμα δεδομένα, αλλά μόνο μία μικρή και μία μεγάλη μονάδα για κάθε τύπο η $aicslope_p$ και η $aicitcpt_p$ υπολογίζονται από τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$aicslope_p = \frac{aic_p^{\max} - aic_p^{\min}}{cap_p^{\max} - cap_p^{\min}} \tag{4.57}$$

$$aicitcpt_p = aic_p^{min} - aicslope_p \times cap_p^{min} \tag{4.58}$$

όπου aic_p^{max}, aic_p^{min} είναι τα ετήσια επενδυτικά κόστη για τις μικρές και τις μεγάλες μονάδες και cap_p^{max}, cap_p^{min} είναι οι αντίστοιχες δυναμικότητες (σε t/y) για τις συγκεκριμένες μονάδες τύπου p.

Συνεπώς, το ετήσιο επενδυτικό κόστος για τις διεργασίες δίνεται από την εξίσωση:

$$PRANCAPEX_t = \sum_{tt=1}^{t} \sum_{p=1}^{P} aicitcpt_p \times N_{p,tt} + aicslope_p \times CAP_{p,tt} \qquad t = 1..4 \tag{4.59}$$

4.9.5 Ετήσιο λειτουργικό κόστος των διεργασιών

Το λειτουργικό κόστος των διεργασιών έχει δύο συνιστώσες, το πάγιο και το μεταβλητό λειτουργικό κόστος. Το πάγιο λειτουργικό κόστος είναι ανάλογο με την εγκατεστημένη δυναμικότητα και το μεταβλητό λειτουργικό κόστος είναι ανάλογο με το φορτίο της διεργασίας. Η εξίσωση που εκφράζει το ολικό λειτουργικό κόστος των διεργασιών είναι η ακόλουθη:

$$PROPEX_t = \sum_{tt=1}^{t} \sum_{p=1}^{P} (aocitcpt_p \times N_{p,tt} + aocslope_p \times CAP_{p,tt}) + \sum_{p=1}^{P} pv\cos t_p \times INPROC_{p,t} \qquad t = 1..4 \tag{4.60}$$

όπου οι παράμετροι $aocslope_p$ και $aocincpt_p$ είναι η κλίση και η αποτέμνουσα αντίστοιχα του ετήσιου λειτουργικού κόστους τα οποία υπολογίζονται από τα εισερχόμενα δεδομένα με τον ίδιο τρόπο όπως οι $aicslope_p$ και $aicincpt_p$. Η παράμετρος $pvcost_p$ είναι το μεταβλητό λειτουργικό κόστος της διεργασίας p (πολλαπλασιασμένο με το φορτίο κάθε διεργασίας).

4.9.6 Ετήσιο εισόδημα από τα ανακυκλώσιμα

Το εισόδημα από τα ανακυκλώσιμα δίνεται από την επόμενη εξίσωση:

$$RECINC_t = \sum_{i=1}^{I} \sum_{p=1}^{P} pricerm_i \times RECPROC_{p,i,t} + \sum_{o=1}^{J} \sum_{p=1}^{P} priceout_o \times OUTPROC_{p,o,t} + pricedf \times DFSELL_t \qquad t = 1..4 \tag{4.61}$$

όπου $pricerm_i$ είναι η τιμή του ακατέργαστου ανακυκλωμένου υλικού i, $priceout_o$ είναι η τιμή του ο προϊόντος και pricedf είναι η τιμή του παραγόμενου καυσίμου και $DFSELL_t$ η ποσότητα του πουλημένου παραγόμενου καυσίμου.

4.9.7 Ετήσιο εισόδημα από τον παραγόμενο ηλεκτρισμό

Τα έσοδα από τον παραγόμενο ηλεκτρισμό που πουλήθηκε στο ηλεκτρικό δίκτυο δίνεται από:

$$ELINC_t = \sum_{p=ad,mbt,wte} pricel \times ELPROD_{p,t} \qquad t = 1..4 \tag{4.62}$$

όπου pricel είναι τιμή που πουλήθηκε ο ηλεκτρισμός στο δίκτυο.

4.9.8 Καθαρό παρόν κόστος της περιόδου των 20 χρόνων

Μετά τον υπολογισμό των ετήσιων ροών, μπορούμε να υπολογίσουμε και το καθαρό παρόν κόστος (NPC) της εικοσαετίας. Πρώτα, υπολογίζουμε τα ολικά ετήσια κόστη όπως φαίνεται:

$$ANNCOST_t = BNANCAPEX_t + TRANCAPEX_t + TROPEX_t + PRANCAPEX_t + PROPEX_t - RECINC_t - ELINC_t \qquad t = 1..4 \tag{4.63}$$

Τελικά, το καθαρό παρόν κόστος εκφράζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$NPC = \sum_{t=1}^{4} \frac{5 \times ANNCOST_t}{(1+r)^{(5\times t-2)}} \tag{4.64}$$

Στην παραπάνω εξίσωση εστιάζουμε στη ροή ρευστού σε μία από τις τέσσερις περιόδους στη μεσαία χρονιά ($3^{η}$ χρονιά για την πρώτη περίοδο, $8^{η}$ για την δεύτερη κ.ο.κ).

4.10 Η αντικειμενική συνάρτηση των ισοδύναμων εκπομπών CO_2

Υπολογίζουμε τις ισοδύναμες εκπομπές CO_2 (CO_2 – eq) για κάθε μία από τις διαφορετικές διεργασίες. Λαμβάνουμε υπ' όψιν τις ενδεχόμενες εκπομπές θερμοκηπίου των CH_4 και NO_2 (με πολλαπλασιαστές 21 και 310 αντίστοιχα) με σκοπό να μπορούν να προστεθούν στις εκπομπές των CO_2, CH_4 και N_2O (αυτές θεωρούνται οι εκπομπές του θερμοκηπίου).

4.10.1 Εκπομπές CO_2 –eq από την ενεργειακή κατανάλωση στις διεργασίες

Οι εκπομπές CO_2 –eq από την κατανάλωση του καυσίμου στις διεργασίες δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση λαμβάνοντας υπ' όψιν την υπερθέρμανση του πλανήτη από τα CH_4 (=21) και N_2O (=310)

$$PRFLCO2EQ_t = \sum_{f=1}^{3} FCEMS_{f,CO2,t} + 21 \times \sum_{f=1}^{3} FCEMS_{f,CH4,t} + 310 \times \sum_{f=1}^{3} FCEMS_{f,N2O,t} \qquad t = 1..4 \tag{4.66}$$

4.10.2 Εκπομπές CO_2 –eq από την διεργασία παραγωγής

Οι ισοδύναμες εκπομπές του CO_2 από τις διεργασίες δίνονται από την παρακάτω εξίσωση:

$$PRCO2EQ_t = (PREMS_{CO2,t} + WTEEMS_{CO2,t}) + 21 \times (PREMS_{CH4,t} + WTEEMS_{CH4,t}) + 310 \times (PREMS_{N2O,t} + WTEEMS_{N2O,t}) \qquad t = 1..4 \tag{4.67}$$

4.10.3 Εκπομπές CO_2 -eq από την ενεργειακή κατανάλωση στην μεταφορά

Οι ισοδύναμες εκπομπές του CO_2 από την μεταφορά δίνεται από την εξίσωση:

$$TRCO2EQ_t = TREMS_{CO2,t} + 21 \times TREMS_{CH4,t} + 310 \times TREMS_{N2O,t} \qquad t = 1..4 \tag{4.68}$$

4.10.4 Εκπομπές CO_2 –eq από τον χώρο υγειονομικής ταφής

Οι ισοδύναμες εκπομπές από τον χώρο υγειονομικής ταφής χαρακτηρίζονται από τις σχετικές εκπομπές του CH_4. Αυτές οι εκπομπές εκφράζονται ως συνάρτηση των εισροών στην αντίστοιχη παράγραφο με τις εκπομπές του χώρου υγειονομικής ταφής. Επίσης λαμβάνουμε υπ' όψιν το CH_4 που έχει καεί πριν ελευθερωθεί στην ατμόσφαιρα (flaring). Οι ισοδύναμες εκπομπές CO_2 από τον χώρο υγειονομικής ταφής δίνονται από την εξίσωση:

$$LDFCO2EQ_t = 21 \times (1 - flare) \times MTHLDF_t \qquad t = 1..4 \qquad (4.69)$$

όπου flare είναι το μερίδιο του παραγόμενου μεθανίου που έχει καεί, ο συντελεστής 21 είναι οι δυνητικές GHG του μεθανίου, με σκοπό να το μετασχηματίσουμε στην ισοδύναμη ποσότητα του CO_2. Με τον ίδιο τρόπο, οι CO_2 –eq για την περίοδο από τον 21° χρόνο μέχρι τον 40° είναι:

$$LDF20_40CO2EQ = 21 \times MTH20_40LDF \qquad (4.70)$$

όπου η φλόγα θεωρείται ως απενεργοποιημένη επειδή ο χώρος υγειονομικής ταφής έχει σταματήσει να λειτουργεί.

4.10.5 Ολικές εκπομπές ισοδύναμου CO_2 του συστήματος

Οι ολικές εκπομπές ισοδύναμου CO_2 του συστήματος δίνονται από την εξίσωση:

$$TOTCO2EQ = \sum_{t=1}^{4} [5 \times (PRFLCO2EQ_t + PRCO2EQ_t + TRCO2EQ_t) + LDFCO2EQ_t] + LDF20_40CO2EQ \qquad (4.71)$$

Παρατηρούμε ότι οι εκπομπές του χώρου υγειονομικής ταφής στο άθροισμα δεν είναι ετήσιες εκπομπές αλλά κάθε περιόδου και γι' αυτό δεν πολλαπλασιάζονται με το 5. Αυτή η εξίσωση είναι η δεύτερη αντικειμενική συνάρτηση του μοντέλου μας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

5 Αποτελέσματα

5.1 Στοιχεία Σχεδιασμού

Η ετήσια παραγωγή Αστικών Στερεών Αποβλήτων (ΑΣΑ) σύμφωνα με στοιχεία του Ενιαίου Συνδέσμου Δήμων και Κοινοτήτων Νομού Αττικής (ΕΣΔΚΝΑ) ανήλθε σε 2.222.828 tn στην Αττική το έτος 2010 [43]. Σύμφωνα με στοιχεία Ερευνητικού Προγράμματος που εκπονήθηκε για λογαριασμό του ΕΣΔΚΝΑ και τα οποία παρουσιάζονται αναλυτικά στον Πίνακα 5.1, πάνω από το 70% των παραγόμενων ΑΣΑ στην Αττική είναι βιοαποδομήσιμα υλικά (οργανικά απορρίμματα, χαρτί, κλπ.), ένα μικρό μέρος μόνο των οποίων ανακυκλώνεται, ενώ τα υπόλοιπα οδηγούνται απευθείας προς Υγειονομική Ταφή με αποτέλεσμα την εκπομπή σημαντικών ποσοτήτων Αεριών Φαινομένου του Θερμοκηπίου (ΑΦΘ).

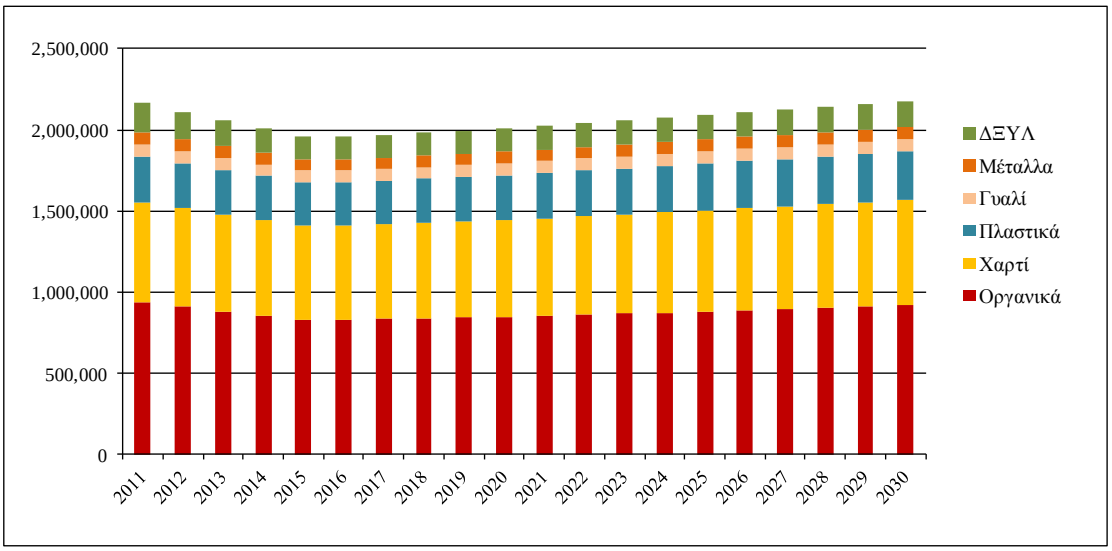
Πίνακας 5. 1 Ποσοστιαία σύνθεση ΑΣΑ λεκανοπεδίου Αττικής (Χειμώνας – Άνοιξη 2007-2008) Πηγή: Ερευνητικό Πρόγραμμα «Προσδιορισμός Φυσικοχημικών Παραμέτρων και Ποιοτικής Σύστασης Απορριμάτων Λεκανοπεδίου Αττικής» (Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, 2008)

Κατηγορίες		**Σύσταση**
1	Οργανικά (υπολείμματα τροφών, λαϊκών αγορών)	43,50%
2	Χαρτί	28,10%
3	Πλαστικό	13,00%
4	Γυαλί	3,40%
5	Μέταλλα	3,40%
6	Δέρμα-Ξύλο-Υφασμα- Λοιπά (ΔΞΥΛ)	8,70%

Η διαχρονική εξέλιξη των παραγόμενων ΑΣΑ στην Αττική για την περίοδο 2011-2030 εκτιμάται στη βάση των ακόλουθων παραδοχών:

- ο ρυθμός αύξησης του πληθυσμού της Αττικής τις επόμενες δεκαετίες θα είναι ίσος με το μικρό ρυθμό αύξησης της τελευταίας εικοσαετίας (1991-2011)
- η παραγόμενη ποσότητα ΑΣΑ ανά κάτοικο σχετίζεται άμεσα με το ρυθμό αύξησης (ή μείωσης) του ΑΕΠ της χώρας.

Με βάση τις παραδοχές αυτές την περίοδο 2011-2015 λόγω της ύφεσης και της οικονομικής κρίσης εκτιμάται ετήσια μείωση της παραγωγής ΑΣΑ της τάξης του 2,5%, ενώ εκτιμάται μια μικρή ετήσια αύξηση της τάξης του 0,6% την περίοδο 2016-2020 και 0,8% για την περίοδο 2021-2030. Για τη σύσταση των ΑΣΑ χρησιμοποιούνται τα στοιχεία του Πίνακα 5.1, ενώ γίνεται η παραδοχή ότι η ποσοστιαία σύσταση ανά κατηγορία υλικού παραμένει σταθερή όλη την περίοδο 2011-2030. Η διαχρονική εξέλιξη των συνολικών και ανά υλικό ποσοτήτων παραγόμενων ΑΣΑ στην Αττική για την περίοδο 2011-2030 όπως υπολογίζονται βάσει των παραπάνω παραδοχών παρουσιάζονται στην Εικόνα 5.1.



Εικόνα 5. 1 Εκτίμηση διαχρονική εξέλιξη ποσοτήτων και σύστασης παραγόμενων ΑΣΑ στην Αττική για την περίοδο 2011-2030.

Στο υφιστάμενο σύστημα διαχείρισης των ΑΣΑ στην Αττική τα δύο βασικά ρεύματα συλλογής αποτελούν ο κάδος σύμμεικτων και ο κάδος συλλογής ανακυκλώσιμων συσκευασιών («μπλε κάδος»). Παράλληλα και σε μικρότερη έκταση εφαρμόζονται και άλλα προγράμματα διαλογής στην πηγή όπως είναι για παράδειγμα το πρόγραμμα ανακύκλωσης χαρτιού του Ειδικού Διαβαθμιδικού Σύνδεσμου Νομού Αττικής (πρώην ΕΣΔΚΝΑ), τα Κέντρα Ανταποδοτικής Ανακύκλωσης καθώς και πιλοτικές δράσεις διαλογής στην πηγή κλπ. Τα συγκεκριμένα προγράμματα λόγω της μορφής τους στο μοντέλο προσομοιώνονται με κάδους μεμονωμένων υλικών (γυαλιού, χαρτιού, πλαστικού και μετάλλου). Σύμφωνα με στοιχεία των ετήσιων εκθέσεων της Ελληνικής Εταιρείας Αξιοποιήσης Ανακύκλωσης που διαχειρίζεται τα έργα «μπλε κάδου» και της Ανταποδοτικής Ανακύκλωσης Α.Ε που διαχειρίζεται τα Κέντρα Ανταποδοτικής Ανακύκλωσης οι συλλεγόμενες ποσότητες των υλικών με διαλογή στην πηγή το 2010 ανέρχονται σε 250.000 tn περίπου. Στα πλαίσια της παρούσας ανάλυσης στις επόμενες περιόδους εκτιμάται σταδιακή αύξηση των ποσοτήτων ανακυκλώσιμων υλικών που συλλέγονται χωριστά έτσι ώστε να επιτυγχάνονται οι στόχοι της Οδηγίας Πλαίσιο για τα απόβλητα (2008/98/ΕΚ) και της Οδηγίας 2004/12/ΕΚ για τις συσκευασίες και τα απορρίμματα συσκευασίας. Η αύξηση των συλλεγόμενων ποσοτήτων θεωρείται ότι επιτυγχάνεται κυρίως μέσω κάδων χωριστής συλλογής χαρτιού, γυαλιού, μετάλλου και πλαστικού. Επιπλέον θεωρείται εφαρμογή εκτεταμένης διαλογής στην πηγή βιοαποβλήτων σε ειδικούς κάδους προδιαλεγμένου οργανικού με σταδιακή αύξηση των ποσοτήτων ως τους 160.000 tn/έτος την περίοδο 2025-2030.

Στα πλαίσια της παρούσας ανάλυσης λαμβάνονται υπόψη οι υφιστάμενες μονάδες επεξεργασίας ΑΣΑ που λειτουργούν στην Αττική, όπως:

- ΕΜΑΚΑ. Λιοσίων δυναμικότητας 250.000 tpa
- ΣΜΑ Σχιστού με δυναμικότητα 500.000 tpa

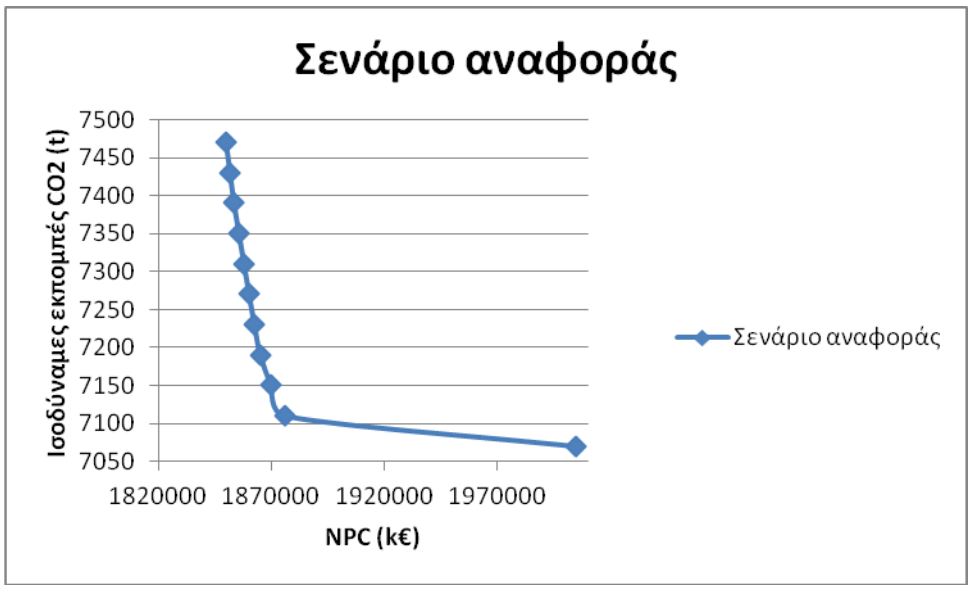
- Τα λειτουργούντα ΚΔΑΥ (Φυλή, Ελευσίνα, Ασπρόπυργος, Επανάκτηση) συνολικής δυναμικότητας 225.000 tpa

Τα ισοζύγια μάζας ανα υλικό των υφιστάμενων μονάδων διαμορφώνονται στη βάση των διαθέσιμων πραγματικών στοιχείων λειτουργίας, ενώ για τις υπόλοιπες τεχνολογίες αξιοποιούνται στοιχεία από παρόμοιες εγκαταστάσεις στην Ευρώπη.

Σε ότι αφορά το παραγόμενο δευτρογενές καύσιμο από μονάδες επεξεργασίας σύμμεικτών ΑΣΑ, παρόλο που υπάρχει η δυνατότητα αξιοποιήσής του από υφιστάμενες μονάδες (π.χ. τσιμεντοβιομηχανία), στα πλαίσια της παρούσας ανάλυσης θεωρείται ότι το σύνολο της παραγόμενης ποσότητας θα οδηγείται σε μονάδα θερμικής επεξεργασίας με παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Σημειώνεται ότι οι περισσότερες εγκαταστάσεις θερμικής επεξεργασίας στο εξωτερικό παράγουν όχι μόνο ηλεκτρισμό αλλά και θερμότητα, η οποία αξιοποιείται από καταναλωτές του οικιακού – τριτογενή και βιομηχανικού τομέα. Ωστόσο, καθώς στην παρούσα μελέτη περίπτωσης δεν είναι δυνατόν να προσδιοριστούν οι πιθανοί καταναλωτές θερμότητας / ατμού γίνεται η παραδοχή ότι η ανάκτηση ενέργειας αφορά αποκλειστικά σε ηλεκτροπαραγωγή.

5.2 Σενάριο αναφοράς

Ως σενάριο αναφοράς ορίζεται αυτό στο οποίο δεν υπάρχουν αλλαγές στις τιμές των ανακυκλώσιμων, ούτε στη συμφωνία με τους νομοθετικούς περιορισμούς, ούτε στις ποσότητες των απορριμμάτων ανά συστατικό, ούτε στην ποσότητα και την τιμή του παραγόμενου καυσίμου.



Διάγραμμα 5. 1 Σχέση συσχέτισης του NPC με τις ισοδύναμες εκπομπές CO_2 για το σενάριο αναφοράς

Αναλυτικότερα, εμφανίζονται οι κατά Pareto βέλτιστες λύσεις για το σενάριο αναφοράς. Ξεκινώντας από αριστερά εμφανίζονται τα σημεία ελάχιστου κόστους, ενδιάμεσης κατάστασης και ελάχιστων εκπομπών. Κάθε σημείο της καμπύλη αυτής αντιστοιχεί σε συγκεκριμένα δομικά, σχεδιαστικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά

του συστήματος. Γι' αυτό αξίζει να παρουσιαστούν οι μονάδες όπως διαφοροποιούνται ανάλογα και με τη δυναμικότητά τους σε κάθε ένα από τα σημεία που αναφέρθηκαν παραπάνω.

Πίνακας 5. 2 Συνολική χωρητικότητα διεργασιών για τις 4 περιόδους στα σημεία ελάχιστου κόστους, ενδιάμεση λύση και ελάχιστων εκπομπών CO_2 για το σενάριο αναφοράς

Διεργασίες	Συνολική χωρητικότητα διεργασιών για τις 4 περιόδους (tn)		
	Σημείο ελάχιστου κόστους (1)	Σημείο ενδιάμεσης τιμής (6)	Σημείο ελάχιστων εκπομπών CO_2 (11)
TSR1	51856	51856	51856
TSG1	11402	11402	11402
CMP2	80000	40000	0
CMP5	87215	87215	80001
AND5	0	40000	80000
MRF1	256026	256026	225000
MRF3	465064	465064	721090
WTE1	489503	489503	534003
WTE3	44500	44500	0
BDR1	700000	700000	700000
MBT1	655000	655000	655000
LDF1	8104136	8211617	7994997
LDF2	69383	67942	51520
TS	500000	500000	500000

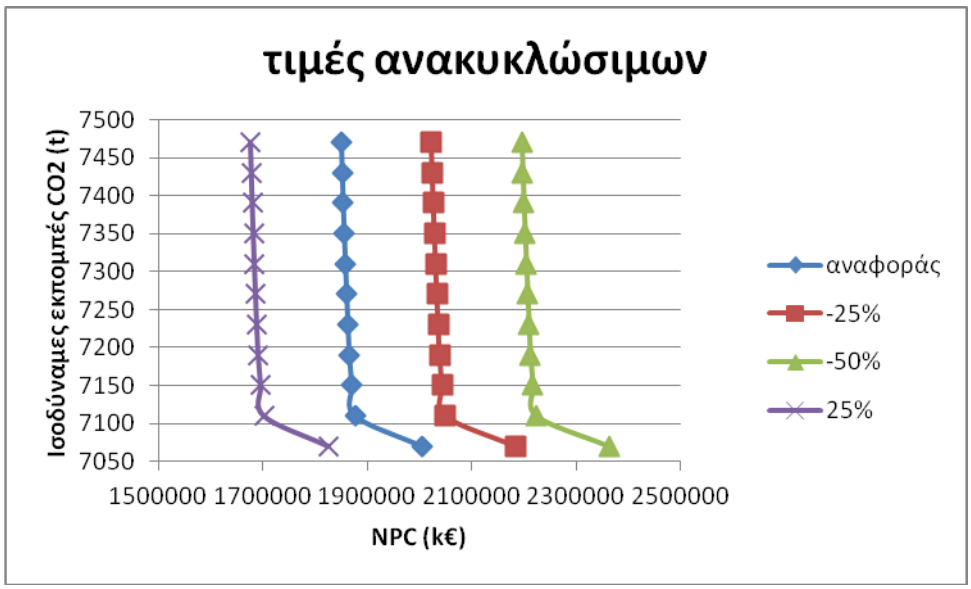
Παρατηρείται διαφοροποίηση στις μονάδες που επιλέγονται σε κάθε περίπτωση. Στο σημείο ελάχιστου κόστους χρησιμοποιούνται οι τεχνολογίες κομποστοποίησης με κλειστού τύπου σειράδια (CMP2) και κομποστοποίηση σε κλειστή τράπεζα για να καλύψουν τις ανάγκες των οργανικών απορριμμάτων. Στο ενδιάμεσο σημείο φαίνεται ότι η εισροή μοιράζεται ανάμεσα στη τεχνολογία CMP2 και στην ολοκληρωμένη ξηρή αναερόβια χώνευση και ανοιχτού τύπου κομποστοποίηση (AND5). Ενώ, αντίθετα στο σημείο ελάχιστων εκπομπών CO_2 δεν επιλέγονται οι διεργασίες της κομποστοποίησης με κλειστού τύπου σειράδια (CMP2) και η θερμική επεξεργασία αποβλήτων με ανάκτηση ενέργειας –κλίβανος

ρευστοποιημένης κλίνης και παραγωγή μόνο ηλεκτρικής ενέργειας (WTE3). Αυτό συμβαίνει γιατί οι ανάγκες του συστήματος για επεξεργασία οργανικών σε αυτή τη λύση καλύπτονται από τη μονάδα AND5 και του κάδου BMW με την αύξηση της δυναμικότητας της μονάδας MRF3 και WTE1. Τεχνολογίες που αυξάνουν κατά πολύ το κόστος και ιδιαίτερα σε σύγκριση με το σημείο 10 που υπάρχει μία μικρή αύξηση των εκπομπών αλλά μεγάλη μείωση του κόστους.

Για τις υπόλοιπες διεργασίες δεν παρατηρούνται έντονες αλλαγές στις δυναμικότητες. Ακόμη χρησιμοποιείται σταθμός μεταφόρτωσης και στα τρία σημεία ο οποίος αυξάνει το κόστος της διαδικασίας. Όπως προκύπτει από τον πίνακα χρησιμοποιείται και δεύτερη μονάδα υγειονομικής ταφής στην οποία υπάρχει είσοδος μόνο από τις διεργασίες WTE1 και WTE3.

5.3 Διαφορετικές τιμές ανακυκλώσιμων

Σε αυτή την παραλλαγή το αρχικό σενάριο παραμένει σταθερό αλλάζοντας μόνο τις τιμές των ανακυκλώσιμων στα 34 συστατικά των απορριμμάτων. Εξετάζεται δηλαδή η επίδραση της μείωσης ή της αύξησης της τιμής τους, στο ΚΠΑ και στις ισοδύναμες εκπομπές CO_2. Οι αλλαγές αυτές είναι της τάξεως του ±25% και -50%.



Διάγραμμα 5. 2 Σχέση συσχέτισης του NPC με τις ισοδύναμες εκπομπές CO_2 για τις διαφορετικές τιμές των ανακυκλώσιμων

Τα αποτελέσματα αυτής της παραλλαγής παρουσιάζονται και αναλυτικότερα στους παρακάτω πίνακες όπου ενδεικτικά επιλέγονται τρία σημεία.

Πίνακας 5. 3Συνολική χωρητικότητα διεργασιών για τις 4 περιόδους στο σημείο ελάχιστου κόστους για τις διαφορετικές τιμές των ανακυκλώσιμων

Διεργασίες	Σενάριο Αναφοράς	-25%	-50%	+25%
TSR1	51856	51856	51856	51856
TSG1	11402	11402	11402	11402
CMP2	80000	80000	80000	80000
CMP5	87215	87215	87215	87215
MRF1	256026	256026	256026	256026
MRF3	465064	465064	465064	465064
WTE1	489503	489503	489503	489503
WTE3	44500	44500	44500	44500
BDR1	700000	700000	700000	700000
MBT1	655000	655000	655000	655000
LDF1	8104136	8104136	8104136	8104136
LDF2	69383	69383	69383	69383
TS	500000	500000	500000	500000

Πίνακας 5. 4 Συνολική χωρητικότητα διεργασιών για τις 4 περιόδους στην ενδιάμεση λύση για τις διαφορετικές τιμές των ανακυκλώσιμων

Διεργασίες	Σενάριο Αναφοράς	-25%	-50%	+25%
TSR1	51856	51856	51856	51856
TSG1	11402	11402	11402	11402
CMP2	40000	40000	0	40000
CMP5	87215	87215	87215	87215
AND5	40000	40000	80000	40000
MRF1	256026	256026	256026	256026
MRF3	465064	465064	465064	465064
WTE1	489503	489503	489503	489503
WTE3	44500	44500	44500	44500
BDR1	700000	700000	700000	700000
MBT1	655000	655000	655000	655000
LDF1	8211617	8211617	8164144	8211618
LDF2	67942	67942	68540	67942
TS	500000	500000	500000	500000

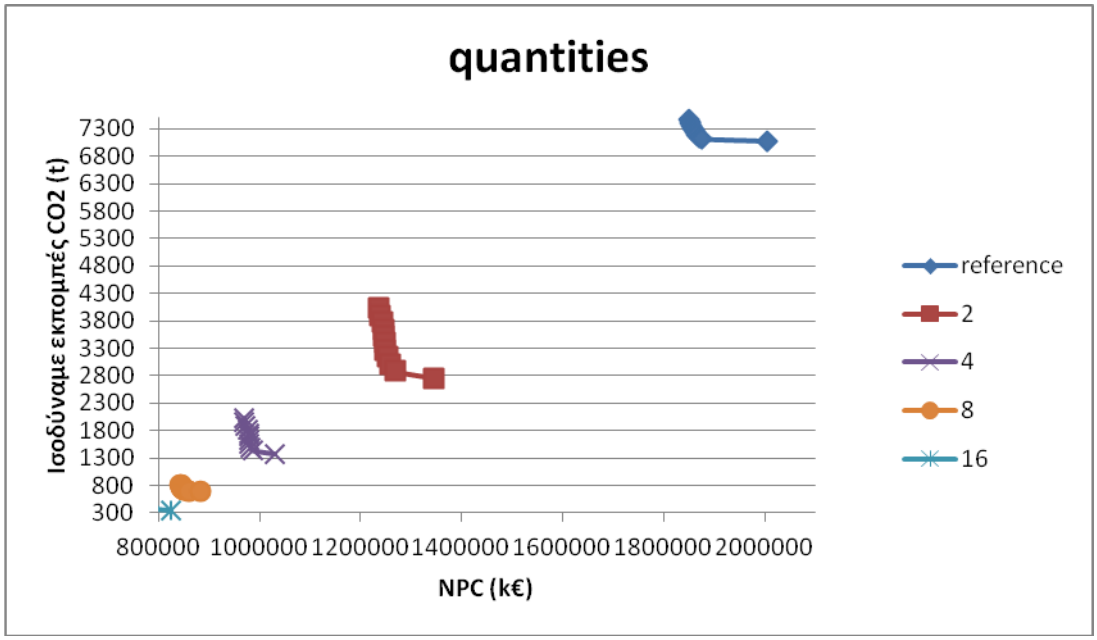
Πίνακας 5. 5 Συνολική χωρητικότητα διεργασιών για τις 4 περιόδους στο σημείο ελάχιστων ισοδύναμων εκπομπών CO_2 για τις διαφορετικές τιμές των ανακυκλώσιμων

Διεργασίες	Σενάριο Αναφοράς	-25%	-50%	+25%
TSR1	51856	51856	51856	51856
TSG1	11402	11402	11402	11402
CMP5	80001	80001	80001	80001
AND5	80000	80000	80000	80000
MRF1	225000	225000	225000	225000
MRF3	721090	721090	721090	721090
WTE1	534003	534003	534003	534003
BDR1	700000	700000	700000	700000
MBT1	655000	655000	655000	655000
LDF1	7994997	7994998	7995000	7994995
LDF2	51520	51520	51520	51520
TS	500000	500000	500000	500000

Σε αυτό το σενάριο τα αποτελέσματα ήταν τα αναμενόμενα αφού μειώνοντας την τιμή πώλησης των ανακυκλώσιμων υπήρξε αύξηση του κόστους ενώ οι ισοδύναμες εκπομπές CO_2 έμεναν ανεπηρέαστε. Αντίθετα με αύξηση των τιμών της τάξης του 25% το κόστος μειωνόταν σημαντικά σε σχέση με το σενάριο αναφοράς

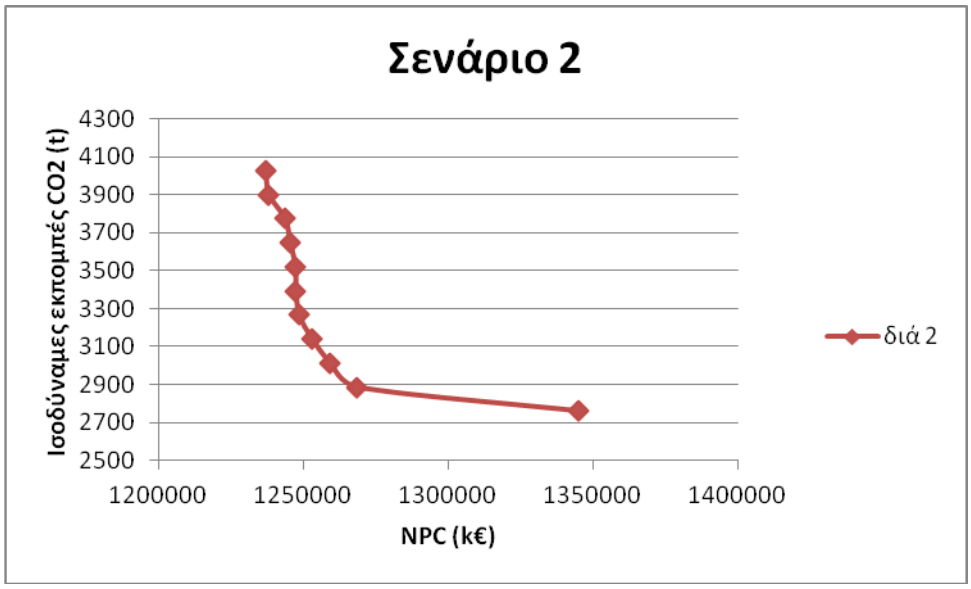
5.4 Παραλλαγή με βάση τις Ποσότητες των Απορριμμάτων που αντιστοιχούν στην Αττική

Σε αυτή την παραλλαγή η ποσότητα των απορριμμάτων ανά συστατικό μειώνονται με σκοπό την μελέτη της επίδρασής τους στη δυναμικότητα των μονάδων. Παρατηρείται ένα μεγάλο εύρος τιμών όσον αφορά στις ισοδύναμες εκπομπές CO_2 και στο κόστος αντίστοιχο των διαιρέσεων που γίνονται στις ποσότητες των συστατικών. Ξεκινώντας με υποδιαίρεση των αρχικών ποσοτήτων έως και διαίρεσή τους με το 16. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα να επηρεαστούν και οι τιμές των άνω και κάτω ορίων που έχει η κάθε μονάδα ώστε οι τιμές που προκύπτουν να έχουν βάση και να είναι εντός νομοθετικών περιορισμών. Στο ακόλουθο διάγραμμα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν ανά σενάριο.



Διάγραμμα 5. 3 Σχέση συσχέτισης της ΚΠΑ με τις ισοδύναμες εκπομπές CO_2 για τα 5 διαφορετικά σενάρια ποσοτήτων.

Λόγω του μεγάλου εύρους τιμών παρατίθενται ξεχωριστά τα διαγράμματα για τα 4 σενάρια της παραλλαγής αυτής. Για το σενάριο αναφοράς τα δεδομένα και το διάγραμμα έχουν παρουσιαστεί παραπάνω.

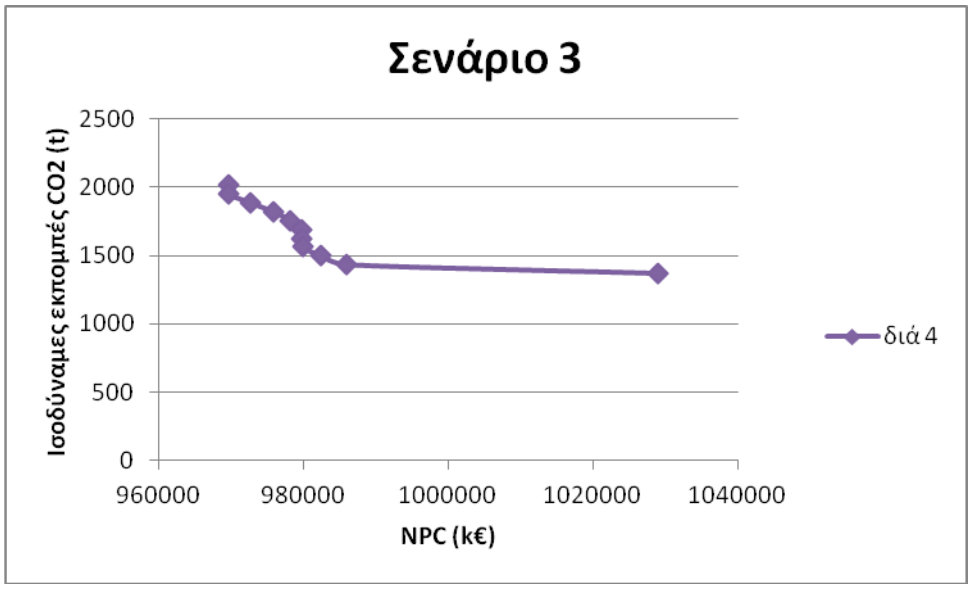


Διάγραμμα 5. 4 Σχέση συσχέτισης της ΚΠΑ με τις ισοδύναμες εκπομπές CO_2 για το σενάριο υποδιπλασιασμού των ποσοτήτων

Πίνακας 5. 6Συνολική χωρητικότητα διεργασιών για τις 4 περιόδους στα σημεία ελάχιστου κόστους, ενδιάμεσης λύσης και ελάχιστων εκπομπών CO_2 για το σενάριο 2 (υποδιπλασιασμός αρχικής ποσότητας)

Διεργασίες	Συνολική χωρητικότητα διεργασιών για τις 4 περιόδους (tn)		
	Σημείο ελάχιστου κόστους (1)	Σημείο ενδιάμεσης τιμής (6)	Σημείο ελάχιστων εκπομπών CO_2 (11)
TSR1	25928	25928	25928
TSG1	5701	5701	5701
CMP1	20000	20000	0
CMP2	60001	0	0
AND5	0	60001	80001
MRF3	360545	360545	360545
WTE1	333049	257562	171515
BDR1	676254	371610	24346
MBT1	5000	304644	651908
LDF1	3500844	3953302	4447695
LDF2	33049	26407	21162
TS	250000	250000	250000

Σε αυτό το σενάριο παρατηρείται μία προτίμηση του σημείου ελάχιστων εκπομπών CO_2 για τη διεργασία AND5 σε αντίθεση με τις τεχνολογίες κομποστοποίησης που δεν χρησιμοποιούνται καθόλου. Λόγω της μείωσης της αρχικής ποσότητας στο δεύτερο σενάριο δεν χρησιμοποιούνται οι διεργασίες CPM5 και WTE3. Αντίθετα στο σημείο ελάχιστου κόστους προτιμούνται οι κομποστοποιήσεις αφού επεξεργάζονται στις εισροές του κάδου των οργανικών με μικρότερο κόστος από την AND5. Ακόμη παρατηρείται μία αντίθεση στις προτιμήσεις για την επεξεργασία του κάδου BMW ανάμεσα στις λύσεις με χαμηλό κόστος και χαμηλές εκπομπές. Αυτό αφορά τις τεχνολογίες WTE, BDR, MBT και LDF.

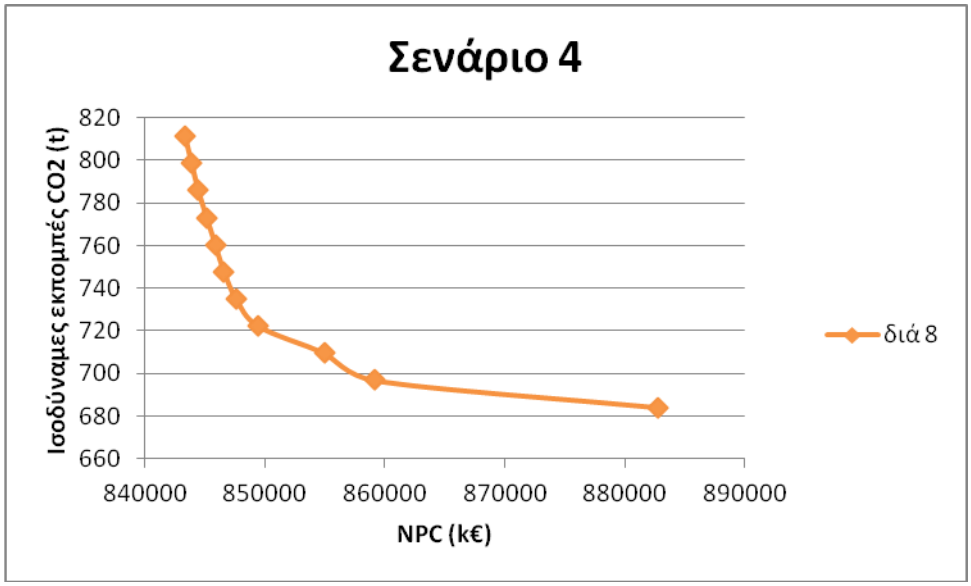


Διάγραμμα 5. 5 Σχέση συσχέτισης της ΚΠΑ με τις ισοδύναμες εκπομπές CO_2 για το σενάριο 3

Πίνακας 5. 7 Συνολική χωρητικότητα διεργασιών για τις 4 περιόδους στα σημεία ελάχιστου κόστους, ενδιάμεσης λύσης και ελάχιστων εκπομπών CO_2 για το σενάριο 3 (αρχικής ποσότητας δια 4)

Διεργασίες	Συνολική χωρητικότητα διεργασιών για τις 4 περιόδους (tn)		
	Σημείο ελάχιστου κόστους (1)	Σημείο ενδιάμεσης τιμής (6)	Σημείο ελάχιστων εκπομπών CO_2 (11)
TSR1	12966	12966	12966
TSG1	5000	5000	5000
CMP1	43441	43441	5000
AND5	0	0	39937
MRF3	180276	180276	180276
WTE1	166525	121506	83163
BDR1	338128	156443	5000
MBT1	5000	181685	338128
LDF1	1751728	2011753	2232063
LDF2	20000	20000	20000
TS	125000	125000	125000

Και σε αυτό το σενάριο παρατηρείται μία προτίμηση της AND5 για το σημείο ελάχιστων εκπομπών CO_2. Αυτό είναι αναμενόμενο αφού αποτελεί μία λύση ακριβή αλλά περισσότερη φιλική προς το περιβάλλον. Οι διεργασίες CMP5 και WTE3 δεν χρησιμοποιούνται.

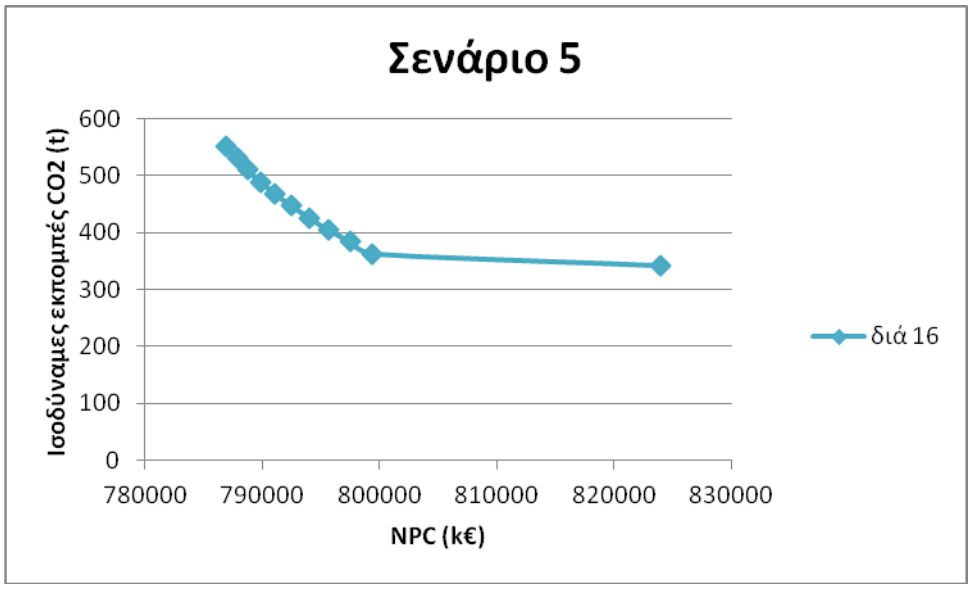


Διάγραμμα 5. 6 Σχέση συσχέτισης της ΚΠΑ με τις ισοδύναμες εκπομπές CO_2 για το σενάριο 4

Πίνακας 5. 8 Συνολική χωρητικότητα διεργασιών για τις 4 περιόδους στα σημεία ελάχιστου κόστους, ενδιάμεσης λύσης και ελάχιστων εκπομπών CO_2 για το σενάριο 4 (αρχικής ποσότητας δια 8)

Διεργασίες	Συνολική χωρητικότητα διεργασιών για τις 4 περιόδους (tn)		
	Σημείο ελάχιστου κόστους (1)	Σημείο ενδιάμεσης τιμής (6)	Σημείο ελάχιστων εκπομπών CO_2 (11)
TSR1	6484	6484	6484
TSG1	5000	5000	5000
CMP1	39221	39221	5000
AND5	0	0	19997
MRF3	90135	90135	90135
WTE1	83262	0	41581
WTE3	0	41581	0
BDR1	169067	5000	5000
MBT1	5000	169067	169067
LDF1	875847	1097743	1116012
LDF2	20000	23051	20000
TS	62500	62500	62500

Και σε αυτό το σενάριο παρατηρείται μία προτίμηση της AND5 και της WTE1 για το σημείο ελάχιστων εκπομπών CO_2. Ενώ η διεργασία WTE3 δεν εμφανίζεται στο σημείο ελάχιστων εκπομπών CO_2. Στις υπόλοιπες τεχνολογίες η δυναμικότητα δεν έχει σημαντικές αλλαγές.



Διάγραμμα 5. 7 Σχέση συσχέτισης της ΚΠΑ με τις ισοδύναμες εκπομπές CO_2 για το σενάριο 5

Πίνακας 5. 9 Συνολική χωρητικότητα διεργασιών για τις 4 περιόδους στα σημεία ελάχιστου κόστους, ενδιάμεσης λύσης και ελάχιστων εκπομπών CO2 για το σενάριο 5 (αρχικής ποσότητας δια 16)

Διεργασίες	Συνολική χωρητικότητα διεργασιών για τις 4 περιόδους (tn)		
	Σημείο ελάχιστου κόστους (1)	Σημείο ενδιάμεσης τιμής (6)	Σημείο ελάχιστων εκπομπών CO_2 (11)
TSR1	5000	5000	5000
TSG1	5000	5000	5000
CMP1	29609	29609	14609
AND5	0	0	5000
MRF2	11816	11816	11816
MRF3	33252	33252	33252
WTE3	41632	20791	20791
BDR1	84534	5000	5000
MBT1	5000	84534	84534
LDF1	427578	553402	554624
LDF2	21183	20000	20000
TS	31250	31250	31250

Τέλος και σε αυτό το σενάριο παρατηρείται μία προτίμηση της AND5 για το σημείο ελάχιστων εκπομπών CO_2. Ενώ για τη διεργασία WTE3 ισχύει ότι μειώνεται η

δυναμικότητά της στο σημείο ελάχιστων εκπομπών CO_2. Στις υπόλοιπες διεργασίες η δυναμικότητα παραμένει σχεδόν ίδια και στα τρία σημεία.

Στη συνέχεια για την καλύτερη σύγκριση των αποτελεσμάτων και εξαγωγή των συμπερασμάτων παρατίθενται οι πίνακες για κάποια σημεία ενδεικτικά ανά σενάριο με σκοπό να μελετηθεί η επίδραση της ποσότητας των συστατικών των απορριμμάτων στη δυναμικότητα των μονάδων

Πίνακας 5. 10 Συνολική χωρητικότητα διεργασιών για τις 4 περιόδους στο σημείο ελάχιστου κόστους-σημείο 1 για τα πέντε διαφορετικά σενάρια

Διεργασίες	Σενάριο1	Σενάριο 2	Σενάριο 3	Σενάριο 4	Σενάριο 5
TSR1	51856	25928	12966	6484	5000
TSG1	13783	5701	5000	5000	5000
CMP1	20000	20000	43441	39221	29609
CMP2	39676	60001	0	0	0
CMP5	100325	0	0	0	0
MRF2	0	0	0	0	11816
MRF3	721090	360545	180276	90135	33252
WTE1	490116	333049	166525	83262	0
WTE3	14748	0	0	0	41632
BDR1	700000	676254	338128	169067	84534
MBT1	652508	5000	5000	5000	5000
LDF1	7851323	3500844	1751728	875847	427578
LDF2	58861	33049	20000	20000	21183
TS	500000	250000	125000	62500	31250

Ο παραπάνω πίνακας δείχνει ότι η διεργασία της κομποστοποίησης σε κλειστή τράπεζα (CMP5) χρησιμοποιείται μόνο στο σενάριο αναφοράς. Σύμφωνα με το διάγραμμα ροής, ισχύει ότι οι διεργασίες CMP τροφοδοτούνται αποκλειστικά από οργανικά. Επομένως, με την μείωση της ποσότητας των απορριμμάτων προκύπτει ότι ο κάδος των οργανικών (BOR) οδηγείται στις διεργασίες CMP1 και CMP2 . Ακόμη, η διεργασία WTE1 επιλέγεται στα τέσσερα πρώτα σενάρια ενώ στο τελευταίο στο οποίο οι αρχικές ποσότητες έχουν μειωθεί αισθητά διαιρούμενες με το δεκαέξι δεν χρησιμοποιείται. Η διεργασία WTE3 χρησιμοποιείται στο σενάριο αναφοράς και στη

συνέχεια στο σενάρια 5. Αυτό μπορεί να συμβαίνει γιατί εμφανίζεται LDF2 όπου έχει δυνατότητα να καταλήγει η WTE3.

Πίνακας 5. 11 Συνολική χωρητικότητα διεργασιών για τις 4 περιόδους στο σημείο ενδιάμεσης λύσης (6^{ο} σημείο) για τα πέντε διαφορετικά σενάρια

Διεργασίες	Σενάριο1	Σενάριο 2	Σενάριο 3	Σενάριο 4	Σενάριο 5
TSR1	51856	25928	12966	6484	5000
TSG1	13783	5701	5000	5000	5000
CMP1	0	20000	43441	39221	29609
CMP5	87215	0	0	0	0
AND5	72786	60001	0	0	0
MRF2	0	0	0	0	11816
MRF3	721090	360545	180276	90135	33252
WTE1	490116	257562	121506	0	0
WTE3	14947	0	0	41581	20791
BDR1	700000	371610	156443	5000	5000
MBT1	652508	304644	181685	169067	84534
LDF1	7915844	3953302	2011753	1097743	553402
LDF2	58054	26407	20000	23051	20000
TS	500000	250000	125000	62500	31250

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, σύμφωνα με το διάγραμμα ροής ισχύει ότι οι διεργασίες CMP και AND τροφοδοτούνται αποκλειστικά από τον κάδο των οργανικών. Δηλαδή στα σενάρια 3,4 και 5 κάτι τέτοιο δεν απαιτείται αφού ολόκληρη η ποσότητα των οργανικών οδηγείται στη διεργασία CMP1. Η διεργασία WTE1 περιορίζεται στα τρία πρώτα σενάρια όπου μειώνεται σταδιακά η δυναμικότητα της καύσης μέχρι να μηδενιστεί στα σενάρια 4 και 5. Αντίθετα η διεργασία WTE3 χρησιμοποιείται στα σενάρια 1,4 και 5.

Πίνακας 5. 12 Συνολική χωρητικότητα διεργασιών για τις 4 περιόδους στο σημείο ελάχιστων εκπομπών CO2 – 11° σημείο για τα πέντε διαφορετικά σενάρια

Διεργασίες	Σενάριο1	Σενάριο 2	Σενάριο 3	Σενάριο 4	Σενάριο 5
TSR1	51856	25928	12966	6484	5000
TSG1	13783	5701	5000	5000	5000
CMP1	0	0	5000	5000	14609
CMP5	80001	0	0	0	0
AND5	80000	80001	39937	19997	5000
MRF2	0	0	0	0	11816
MRF3	721090	360545	180276	90135	33252
WTE1	489630	171515	83163	41581	0
WTE3	15681	0	0	0	20791
BDR1	698022	24346	5000	5000	5000
MBT1	654486	651908	338128	169067	84534
LDF1	7986266	4447695	2232063	1116012	554624
LDF2	53533	21162	20000	20000	20000
TS	500000	250000	125000	62500	31250

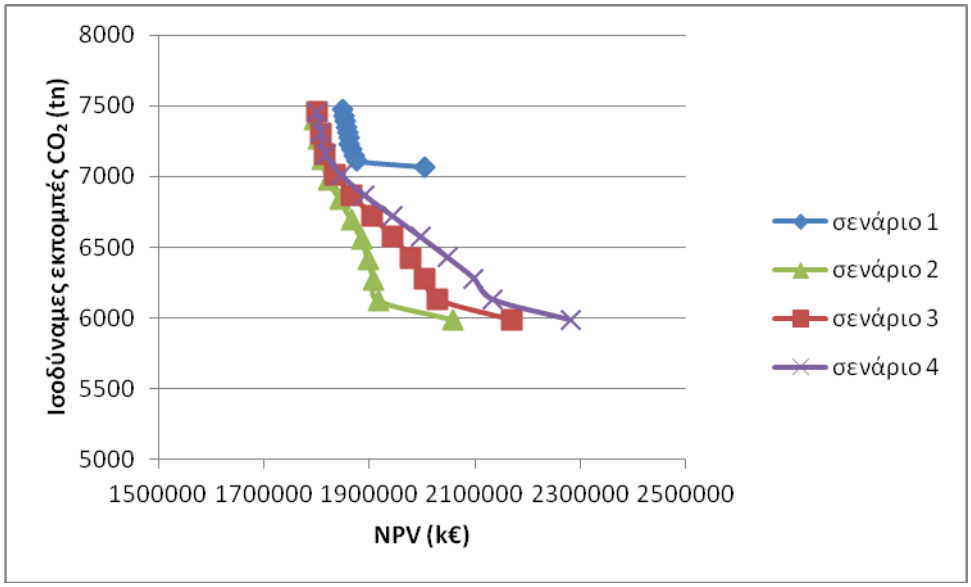
Η διεργασία CMP2 χρησιμοποιείται στο σημείο ελάχιστων ισοδύναμων εκπομπών CO_2. Ενώ η διεργασία CMP5 χρησιμοποιείται μόνο στο σενάριο αναφοράς. Από τα παραπάνω προκύπτει ότι στο σενάριο 2 ο κάδος των οργανικών καταλήγει εξ ολοκλήρου στην τεχνολογία AND5 ενώ στα υπόλοιπα σενάρια τα οργανικά τροφοδοτούνται ή στην αναερόβια χώνευση ή στην κομποστοποίηση. Επίσης η σταδιακή μείωση των τιμών της δυναμικότητας στην τεχνολογία TS ήταν αναμενόμενη λόγω της αρχικής μείωσης των εισροών και κατά συνέπεια των ποσοτήτων αποθήκευσης.

5.5 Παραλλαγή Τιμής Παραγόμενου Καυσίμου

Η ποσότητα παραγόμενου καυσίμου που πωλείται επηρεάζει άμεσα τα ολικά ετήσια κόστη και κατά συνέπεια το καθαρό παρόν κόστος (NPC). Υποθέτοντας ότι η ποσότητα του καυσίμου που μπορεί να πουληθεί είναι πολύ μεγάλη της τάξεως του 10^{9}΄tn τα αποτελέσματα που προκύπτουν για διαφορετικές τιμές αυτού του παραγόμενου καυσίμου (€/tn) και με βάση τη σχέση που δίνει τα ολικά ετήσια κόστη:

$$ANNCOST_t = BNANCAPEX_t + TRANCAPEX_t + TROPEX_t + PRANCAPEX_t + PROPEX_t - RECINC_t - ELINC_t \qquad t = 1..4 \tag{4.63}$$

είναι αυτά του διαγράμματος:



Διάγραμμα 5. 8 Σχέση συσχέτισης της ΚΠΑ με τις ισοδύναμες εκπομπές CO_2 για τις διαφορετικές ποσότητες και τιμές του καυσίμου.

Στα σενάρια 2,3 και 4 έχοντας ως δεδομένο την μεγάλη ποσότητα του παραγόμενου καυσίμου που μπορεί να πουληθεί και αλλάζοντας μόνο τις τιμές του, παρατηρήθηκε ότι αυξάνοντας την τιμή του από -50€/tn (σενάριο 4) σε -30 €/tn (σενάριο 3) και -10€/tn (σενάριο 2), η μεταβλητή $RECINC_t$ γινόταν θετική δηλαδή τα ολικά ετήσια κόστη ελαττωνόντουσαν και αντίστοιχα το καθαρό παρόν κόστος μειωνόταν και αυτό με τη σειρά του όπως φαίνεται και στο διάγραμμα.

Στο σενάριο 1 υποτίθεται ότι η ποσότητα που μπορεί να πουληθεί είναι μηδενική δηλαδή η συνολική ποσότητα πρέπει να επεξεργαστεί. Αυτό σημαίνει ότι η παράμετρος $RECINC_t$ μηδενίζεται οπότε και το καθαρό παρόν κόστος μειώνεται σε σύγκριση με τα υπόλοιπα σενάρια.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

6 Συμπεράσματα

Η διαχείριση των Αστικών Στερεών Αποβλήτων (ΑΣΑ) έχει εξελιχθεί τα τελευταία χρόνια σε ένα μείζονος σημασίας πρόβλημα για τις σύγχρονες κοινωνίες. Έτσι εμφανίζεται σαν επιτακτική ανάγκη η ολοκληρωτική σχεδίαση ενός συστήματος διαχείρισής τους. Στη συγκεκριμένη εργασία η ανάγκη αυτή καλύπτεται με ένα μοντέλο Μικτού Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού (MILP) για το βέλτιστο σχεδιασμό του συστήματος.

Το ζήτημα όμως της διαχείρισης των ΑΣΑ κατατάσσεται στην κατηγορία της πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης καθώς αποτελείται από δύο αντικρουόμενα κριτήρια. Το πρώτο είναι η οικονομική αντικειμενική συνάρτηση δηλαδή η ελαχιστοποίηση της Καθαρής Παρούσας Αξίας (ΚΠΑ) και το δεύτερο είναι η περιβαλλοντική αντικειμενική συνάρτηση δηλαδή η ελαχιστοποίηση των ισοδύναμων εκπομπών CO_2. Συνεπώς εφαρμόζοντας πολυκριτηριακή ανάλυση προκύπτει ένα σύνολο των κατά Pareto βέλτιστων λύσεων που δίνει βαθμούς ελευθερίας στον αποφασίζοντα. Ο τελευταίος με τη σειρά του έχει τη δυνατότητα να συγκρίνει και να επιλέξει ανάμεσα σε εξίσου καλές εναλλακτικές επιλογές εκείνη που θα καλύψει τις ανάγκες του. Γι' αυτό και η πολυκριτηριακή ανάλυση θεωρείται μία πιο ρεαλιστική προσέγγιση των προβλημάτων.

Σε αυτό το σημείο αξίζει να σημειωθεί ο όγκος των δεδομένων που είναι απαραίτητος για ένα πλήρη και λεπτομερή σχεδιασμό ενός τέτοιου συστήματος. Το μοντέλο αυτό έχει αναπτυχθεί σε GAMS και περιλαμβάνει περίπου 24.000 συνεχείς μεταβλητές, 168 ακέραιες και 12.000 περιορισμούς. Οι λύσεις που προκύπτουν δηλώνουν τα δομικά (ποιες μονάδες θα κατασκευαστούν), σχεδιαστικά (η χωρητικότητα αυτών των μονάδων) και λειτουργικά (οι ετήσιες ροές μεταξύ των μονάδων) χαρακτηριστικά.

Τα πρώτα αποτελέσματα που προκύπτουν χαρακτηρίζονται ως σενάριο αναφοράς και δίνουν τη δυνατότητα για περαιτέρω μελέτη των συνθηκών μέσα από παραλλαγές του αρχικού σεναρίου. Στο αρχικό σενάριο δεν υπάρχουν αλλαγές στις τιμές των ανακυκλώσιμων, ούτε στις ποσότητες των απορριμμάτων ανά συστατικό, ούτε στην ποσότητα και την τιμή του παραγόμενου καυσίμου. Από το σενάριο αναφοράς καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι ανάλογα με το κριτήριο στο οποίο στοχεύουμε κάθε περίοδο, δηλαδή, ελαχιστοποίηση κόστους ή ισοδύναμων εκπομπών CO_2 χρησιμοποιούνται και διαφορετικές μονάδες. Χαρακτηριστικά, η ελαχιστοποίηση του κόστους επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας τις μονάδες CPM που καταλήγουν μόνο οργανικά απόβλητα και WTE οι οποίες δεν χρησιμοποιούνται καθόλου στο σημείο ελαχιστοποίησης των εκπομπών. Αντίθετα, στην ελαχιστοποίηση των ισοδύναμων εκπομπών CO_2 επιλέγεται η μονάδα AND για τα οργανικά που δεν χρησιμοποιείται καθόλου στην επιλογή της ελαχιστοποίησης του

κόστους αφού αποτελεί μία τεχνολογία πιο φιλική ως προς το περιβάλλον αλλά ταυτόχρονα και πιο δαπανηρή.

Η πρώτη παραλλαγή του σεναρίου αναφοράς εφαρμόστηκε στις τιμές των ανακυκλώσιμων αυξάνοντας και μειώνοντας κάθε φορά και παρακολουθώντας την επίδραση της στις λύσεις. Όπως ήταν αναμενόμενο όσο μεγαλύτερη η μείωση της τιμής τους (φθάνοντας μέχρι και το -50%) τόσο αυξανόταν το NPC. Αντίθετα οι ισοδύναμες εκπομπές CO_2 έμεναν σχεδόν ανεπηρέαστες καθώς δεν υπήρχε άμεση επίδραση των τιμών των ανακυκλώσιμων στο περιβαλλοντικό κριτήριο.

Η επόμενη παραλλαγή και ενώ οι τιμές των ανακυκλώσιμων επαναφέρθηκαν στις τιμές του σεναρίου αναφοράς, είναι η μείωση της ποσότητας των απορριμμάτων. Και σε αυτό το σημείο τα αποτελέσματα ήταν τα αναμενόμενα, δηλαδή, όσο μικρότερη η ποσότητα τους τόσο μικρότερο το κόστος διαχείρισής τους αλλά και οι ισοδύναμες εκπομπές CO_2. Όσον αναφορά στο οικονομικό κριτήριο η επίδραση της ποσότητας τους σχετίζεται με τις διεργασίες που θα επιλεχθούν να τα επεξεργαστούν με αποτέλεσμα το κόστος να είναι αναλογικά μικρότερο. Ταυτόχρονα, οι εκπομπές CO_2 έχουν άμεση σχέση με την ποσότητα των απορριμμάτων γι' αυτό και η μείωσή τους δίνει τεράστια απόκλιση στα αποτελέσματα. Δηλαδή το αρχικό σενάριο σε σχέση με το σενάριο της ποσότητας διαιρούμενης δια 16 έχει απόκλιση της τάξεως του 95% σε βάθος 20ετίας.

Ενδιαφέροντα αποτελέσματα προέκυψαν και από την επόμενη παραλλαγή, αυτή της τιμής του παραγόμενου καυσίμου. Στο σενάριο 1 θεωρήθηκε ότι η ποσότητα που μπορεί να πουληθεί είναι μηδενική με αποτέλεσμα να μειωθεί αισθητά το κόστος σε σχέση με τα επόμενα σενάρια. Αυτό όμως δεν είχε αντίστοιχη επίπτωση και στις εκπομπές με αποτέλεσμα να παραμένουν υψηλές και σταθερά πάνω από 7000tn. Στα άλλα τρία σενάρια παρατηρήθηκε ότι αυξάνοντας την τιμή του, μειωνόταν και το κόστος χωρίς ιδιαίτερες επιδράσεις στις εκπομπές του CO_2.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] Alves M. J & Climaco J., A review of interactive methods for multiobjective integer and mixed – integer programming, European Journal of Operational Research, 2007

[2] Athanasios C. Karmperis, Konstantinos Aravossis, Ilias P. Tatsiopoulos, Anastasios Sotirchos, Decision support models for solid waste management: Review and game – theoretic approaches, 2013

[3] Dantzing g.B. & Thapa M.N, Linear Programming 1: Introduction, Springer, New York, 1997

[4] Dantzing G.B. & Thapa M.N., Linear Programming 2: Theory and Extensions, Springer, New York, 2003

[5] Ehrgott M, Multicriteria Optimization, Springer, Berlin, 2005

[6] Ehrgott M & Gandibleux X., A survey and annotated bibliography of multiobjective combinatorial optimization, OR Spectrum, 2000

[7] Gian Andrea Blengini, Moris Fantomi, Mirko Busto, Giuseppe Genon, Maria Chiara Zanetti, Participatory approach, acceptability and transparency of waste management LCAs: Case studies of Torino and Cuneo, 2012

[8] J. Sunberg, P. Gipperthand C.O Wene, A System's approach to municipal solid waste management: a pilot study of Goteborg, January 1993

[9] Mavrotas G., Effective implementation of the ε-constraint method in Multi-Objective Mathematical Programming problems, July 2009

*[10]*Mavrotas G., Skoulaxinou S.,Gakis N., Katsouros V., Georgopoulou E., A multi-objective programming model for assessment the GHG emissions in MSW management

*[11]*McDougall F., White P., Franke M., Hindle P., Integrated solid waste management: a Life Cycle Inventory, Blackwell Publishing, 2001

*[12]*M.D.Bovea, V. Ibanez- Fores, A. Gallardo, F.J. Colomer – Mendoza, Environmental assessment of alternative municipal solid waste management strategies. A Spanish case study, 2010

*[13]*P.E.Rushbrook and E.E.Finnecy, Planning for future waste management operations in developing countries, February 1987

*[14]*Rachal E. Marshall, Khosrow Farahbakhsh, Systems approaches to integrated solid waste management in developing countries, January 2013

*[15]*Schrijver A., Combinatorial Optimization, Polyhedra and Efficiency (vol. A), Springer, New York, 2003

*[16]*Smith A.,Brown K., Ogilvie S., Rushton K., Bates J., Waste Management Operations and Climate Change, final report to the European Commision, DG Enviroment, July 2001

*[17]*Solid Waste Disposal, 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories

*[18]*Steuer R.E., Multiple Criteria Optimization theory, Computation and Application, Krieger 2nd edition, Malabar FL, 1986

*[19]*Tchobanoglous G., Theisen H., Vigil S.A., Integrated solid waste management: Engineering principles and Management issues, McGraw-Hill International Editions, 1993

*[20]*Warmer Bulletin, Anaerobic Digestion –Systems and Markets, July 1998

*[21]*Βλυσίδης Απόστολος Καθηγητής ΕΜΠ, Περιβαλλοντική Μηχανική Μέρος ΙΙΙ: Στερεά Απόβλητα, εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα 2010

*[22]*Γεωργίου Ν. Παρασκευάς, Ανάπτυξη μοντέλου μαθηματικού προγραμματισμού και κατασκευή πληροφοριακού συστήματος υποστήριξης αποφάσεων για το μακροχρόνιο ενεργειακό σχεδιασμό του ελληνικού συστήματος ηλεκτροπαραγωγής, ΕΜΠ, Αθήνα 2010

*[23]*Γκόγκος. Χ. Γ., Αλγόριθμοι συνδυαστικής βελτιστοποίησης με έμφαση σε μεταευρετικές τεχνικές, διδακτορική διατριβή, Πάτρα, 2009

*[24]*Γρηγοροπούλου Ε., Λυμπεράτος Γ., Χαλουλάκου Α., Βλυσίδης Α., Περιβαλλοντική Μηχανική, εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα 2013

*[25]*Διακουλάκη Δ., Ανάλυση Συστημάτων και Λήψη Αποφάσεων, ΕΜΠ, Αθήνα 2003

*[26]*Δόσιος Κ.Γ., Ένας δικριτήριος αλγόριθμος για το γραμμικό πρόβλημα, διδακτορική διατριβή, Πανεπιστήμιο Μακεδονίας, τμήμα Εφαρμοσμένης Πληροφορικής, Θεσσαλονίκη, 2005

*[27]*Εναλλακτικές λύσεις επεξεργασίας σύμμεικτων απορριμμάτων: http://www.diaamath.gr/

*[28]*Καρβούνης Σ., Γεωργακέλλος Δ., Διαχείριση του Περιβάλλοντος Επιχειρήσεις και Βιώσιμη Ανάπτυξη, εκδόσεις Αθ. Σταμούλης, Αθήνα 2003

*[29]*Κοινή Υπουργική Απόφαση (ΚΥΑ) 113944/ΦΕΚ 1016/17-11-1997 (Γενικές Κατευθύνσεις της Πολιτικής Διαχείρισης των Στερεών Αποβλήτων)

*[30]*Κοινή Υπουργικά Απόφαση (ΚΥΑ) 14312/1302/ΦΕΚ 723/9-6-2000

*[31]*Κοινοτική οδηγία 99/31 (Περί Υγειονομικής Ταφής των Αποβλήτων)

*[32]*Λοϊζίδου Μαρία Καθηγήτρια ΕΜΠ, Στερεά Απόβλητα, εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα 2006

*[33]*Μαυρωτάς Γ. Πολυκριτηριακός Προγραμματισμός σε Συνθήκες Αβεβαιότητας, Κατασκευή Συστήματος Υποστήριξης αποφάσεων και Εφαρμογή στον Ενεργειακό Σχεδιασμό, ΕΜΠ, Αθήνα 2000

*[34]*Νικολακόπουλος Α., Ανάπτυξη μεταευρετικών αλγόριθμων για την επίλυση προβλημάτων μη γραμμικού προγραμματισμού και σύνθετων προβλημάτων συνδυαστικής βελτιστοποίησης, διδακτορική διατριβή, σχολή Χημικών Μηχανικών ΕΜΠ, Αθήνα 2006

*[35]*Παναγιωτακόπουλος Δ., Βιώσιμη Διαχείριση Αστικών Αποβλήτων, Εκδόσεις Συγός, 2002

*[36]*Πραστάκος Γ., Διοικητική Επιστήμη, Λήψη Επιχειρηματικών Αποφάσεων στην Κοινωνία της Πληροφορίας, εκδόσεις Αθ. Σταμούλης, Αθήνα 2000

*[37]*Σίσκος Γ., Γραμμικός προγραμματισμός, εκδόσεις Νέων Τεχνολογιών, Αθήνα 1998

*[38]*Σκορδίλης Α., Η θερμική Επεξεργασία Απορριμμάτων και RDF, εκδόσεις Κόσμος 1997

*[39]*Τσιλέμου Κ., Κοστολόγηση Εγκαταστάσεων Ανάκτησης Υλικών και Κομποστοποίησης Στερεών Αποβλήτων, Μεταπτυχιακή Διατριβή, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, ΔΠθ

*[40]*http://www.wtert.gr/attachments/article/271/%CE%94.%CE%A3.%CE%91.%20%CE%95%CE%BB%CE%BB%CE%AC%CE%B4%CE%B1.pdf

*[41]*http://www.uest.gr/index.php/useful-links

*[42]*http://users.sch.gr/xarito/TROPOI%20PROSTASIAS%20%20LIPANSHS%20GIA%20APOTELESMATIKOTERI%20ANAPTIXH%20TWN%20BIOKALLIERGIWN.HTM

[43] Argyropoulou-Papa, Integrated waste and resource management in the Greater Attica Area: A comprehensive profile, MSc Thesis, Imperial College, London, (2011), p.24-27.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Παράρτημα 1: Συμβολισμοί και περιγραφή Τεχνολογιών

Κωδικός	Τεχνολογία	Technology
ts1	Προσωρινή αποθήκευση ανακυκλώσιμων εκτός γυαλιού	Temporary Storage separely collected recyclables except glass
ts2	Προσωρινή αποθήκευση ανακυκλώσιμου γυαλιού	Temporary Storage separely collected glass
mrf1	Τυπική μονάδα ανάκτησης υλικών με χαμηλή μηχανική ένταση (Χειροδιαλογή)	Material Recovery Facility with low mechanical intensity (Handpicking)
mrf2	Τυπική μονάδα ανάκτησης υλικών με μεσαία μηχανική ένταση -χρήση μαγνητικού διαχωριστή για Fe και διαχωριστή με επαγωγικά ρεύματα για Al	Material Recovery Facility with medium mechanical intensity -Magnet for Fe and eddy current for Al
mrf3	Τυπική μονάδα ανάκτησης υλικών με υψηλή μηχανική ένταση -χρήση μαγνητικού διαχωριστή, διαχωριστή με επαγωγικά ρεύματα και διαχωριστή αισθητήρων υπερύθρων για πλαστικά	Material Recovery Facility with high mechanical intensity -Magnet, Eddy Current & NIR for plastics
cmp1	Κομποστοποίηση με ανοικτύ τύπου σειράδια	Composting with open air windrows
cmp2	Κομποστοποίηση με κλειστού τύπου σειράδια	Composting with covered windrows
cmp3	Κομποστοποίηση σε τούνελ	Composting with tunnels
cmp4	Κομποστοποίηση με κουτιά κομποστοποίησης	Composting with boxes
cmp5	Κομποστοποίηση σε κλειστή τράπεζα	Composting with closed halls
ad1	Ξηρή αναερόβια χώνευση και ανοιχτού τύπου κομποστοποίηση	Dry AD and open air composting
ad2	Ξηρή αναερόβια χώνευση και κλειστού τύπου κομποστοποίηση	Dry AD and covered windrows composting

ad3	Υγρή αναερόβια χώνευση και ανοιχτού τύπου κομποστοποίηση	Wet AD and open air composting
ad4	Υγρή αναερόβια χώνευση και κλειστού τύπου κομποστοποίηση	Wet AD and covered windrows composting
ad5	Ολοκληρωμένη ξηρή αναερόβια χώνευση και ανοιχτού τύπου κομποστοποίηση	Complete dry AD and covered windrows composting
wte1	Θερμική επεξεργασία αποβλήτων με ανάκτηση ενέργειας -κλίβανος με κυλιόμενες εσχάρες και παραγωγή μόνο ηλεκτρικής ενέργειας	Waste To Energy -rolling grates furnaces only power generation
wte2	Θερμική επεξεργασία αποβλήτων με ανάκτηση ενέργειας- κλίβανος με κυλιόμενες εσχάρες και συμπαραγωγή ηλεκτρισμού θερμότητας (ΣΗΘ)	Waste To Energy with rolling grates furnaces combined heat power generation
wte3	Θερμική επεξεργασία αποβλήτων με ανάκτηση ενέργειας- κλίβανος ρευστοποιημένης κλίνης και παραγωγή μόνο ηλεκτρικής ενέργειας	Waste To Energy with fluidized bed furnaces only power generation
wte4	Θερμική επεξεργασία αποβλήτων με ανάκτηση ενέργειας- κλίβανος ρευστοποιημένης κλίνης και συμπαραγωγή ηλεκτρισμού θερμότητας (ΣΗΘ)	Waste To Energy with fluidized bed furnaces combined heat power generation
mbt1 (mbt1+cmp2)	Βιολογική Μηχανική Επεξεργασία- βαλλιστικός διαχωριστής, κόσκινα δύο βαθμίδων, μαγνητικός διαχωριστής, διαχωριστής με επαγωγικά ρεύματα και διαχωριστής με αισθητήρες υπερύθρων. Κομποστοποίηση κλειστού τύπου σειράδια	Mechanical Biological Treatment-Ballistic separator, 2 stages sieving, magnet, eddy current & NIR Composting with covered air windrows
mbt2 (mbt1+cmp3)	Βιολογική Μηχανική Επεξεργασία- βαλλιστικός διαχωριστής, κόσκινα δύο βαθμίδων, μαγνητικός διαχωριστής, διαχωριστής με επαγωγικά ρεύματα και διαχωριστής με αισθητήρες υπερύθρων. Κομποστοποίηση σε τούνελ	Mechanical Biological Treatment-ballistic separator, 2 stages sieving, magnet, eddy current & NIR Composting with tunnels

mbt3 (mbt1+cmp5)	Βιολογική Μηχανική Επεξεργασία-βαλλιστικός διαχωριστής, κόσκινα δύο βαθμίδων, μαγνητικός διαχωριστής, διαχωριστής με επαγωγικά ρεύματα και διαχωριστής με αισθητήρες υπερύθρων. Κομποστοποίηση σε κλειστή τράπεζα	Mechanical Biological Treatment-Ballistic separator, 2 stages sieving, magnet, eddy current & NIR Composting with closed halls
mbt4 (mbt1+ad2)	Βιολογική Μηχανική Επεξεργασία-βαλλιστικός διαχωριστής, κόσκινα δύο βαθμίδων, μαγνητικός διαχωριστής, διαχωριστής με επαγωγικά ρεύματα και διαχωριστής με αισθητήρες υπερύθρων. Ξηρή αναερόβια χώνευση και κομποστοποίηση κλειστού τύπου σειράδια.	Mechanical Biological Treatment-ballistic separator, 2 stages sieving, magnet, eddy current & NIR Dry AD and covered windrows composting
mbt5 (mbt1+ad4)	Βιολογική Μηχανική Επεξεργασία-βαλλιστικός διαχωριστής, κόσκινα δύο βαθμίδων, μαγνητικός διαχωριστής, διαχωριστής με επαγωγικά ρεύματα και διαχωριστής με αισθητήρες υπερύθρων. Υγρή αερόβια χώνευση και κομποστοποίηση με κλειστού τύπου σειράδια	Mechanical Biological Treatment-ballistic separator, 2 stages sieving, magnet, eddy current & NIR Wet AD and covered windrows composting
mbt6 (mbt1+ad5)	Βιολογική Μηχανική Επεξεργασία-βαλλιστικός διαχωριστής, κόσκινα δύο βαθμίδων, μαγνητικός διαχωριστής, διαχωριστής με επαγωγικά ρεύματα και διαχωριστής με αισθητήρες υπερύθρων. Ολοκληρωμένη ξηρή αερόβια χώνευση και κομποστοποίηση με κλειστού τυπου σειράδια	Mechanical Biological Treatment-ballistic separator, 2 stages sieving, magnet, eddy current & NIR Complete dry AD and covered windrows composting
mbt7 (mbt2+cmp2)	Βιολογική Μηχανική Επεξεργασία-βαλλιστικός διαχωριστής, κόσκινα δύο βαθμίδων, μαγνητικός διαχωριστής, διαχωριστής με επαγωγικά ρεύματα. Κομποστοποίηση με ανοιχτού τύπου σειράδια	Mechanical Biological Treatment-ballistic separator, 2 stages sieving, magnet, eddy current Composting with covered air windrows
mbt8 (mbt2+cmp3)	Βιολογική Μηχανική Επεξεργασία-βαλλιστικός διαχωριστής, κόσκινα δύο βαθμίδων, μαγνητικός διαχωριστής,	Mechanical Biological Treatment-ballistic separator, 2 stages sieving,

	διαχωριστής με επαγωγικά ρεύματα. Κομποστοποίηση σε τούνελ	magnet, eddy current Composting with tunnels
mbt9 (mbt2+cmp5)	Βιολογική Μηχανική Επεξεργασία-βαλλιστικός διαχωριστής, κόσκινα δύο βαθμίδων, μαγνητικός διαχωριστής, διαχωριστής με επαγωγικά ρεύματα. Κομποστοποίηση σε κλειστή τράπεζα	Mechanical Biological Treatment-ballistic separator, 2 stages sieving, magnet, eddy current Composting with closed halls
mbt10 (mbt2+ad2)	Βιολογική Μηχανική Επεξεργασία-βαλλιστικός διαχωριστής, κόσκινα δύο βαθμίδων, μαγνητικός διαχωριστής, διαχωριστής με επαγωγικά ρεύματα. Ξηρή αναερόβια χώνευση και κομποστοποίηση κλειστού τύπου σειράδια.	Mechanical Biological Treatment-ballistic separator, 2 stages sieving, magnet, eddy current Dry AD and covered windows composting
mbt11 (mbt2+ad4)	Βιολογική Μηχανική Επεξεργασία-βαλλιστικός διαχωριστής, κόσκινα δύο βαθμίδων, μαγνητικός διαχωριστής, διαχωριστής με επαγωγικά ρεύματα. Υγρή αερόβια χώνεση και κομποστοποίηση με κλειστού τύπου σειράδια	Mechanical Biological Treatment-ballistic separator, 2 stages sieving, magnet, eddy current Wet AD and covered windows composting
mbt12 (mbt2+ad5)	Βιολογική Μηχανική Επεξεργασία-βαλλιστικός διαχωριστής, κόσκινα δύο βαθμίδων, μαγνητικός διαχωριστής, διαχωριστής με επαγωγικά ρεύματα. Ολοκληρωμένη ξηρή αερόβια χώνευση και κομποστοποίηση με κλειστού τυπου σειράδια	Mechanical Biological Treatment-ballistic separator, 2 stages sieving, magnet, eddy current Complete dry AD and covered windows composting
mbt13 (mbt2+cmp2)	Βιολογική Μηχανική Επεξεργασία-κόσκινα δύο βαθμίδων, μαγνητικός διαχωριστής, διαχωριστής με επαγωγικά ρεύματα. Κομποστοποίηση με κλειστού τυπου σειράδια	Mechanical Biological Treatment- 2 stages sieving, magnet, eddy current Composting with covered air windows
mbt14 (mbt3+cmp3)	Βιολογική Μηχανική Επεξεργασία-κόσκινα δύο βαθμίδων, μαγνητικός διαχωριστής, διαχωριστής με επαγωγικά	Mechanical Biological Treatment- 2 stages sieving, magnet,

	ρεύματα. Κομποστοποίηση με τούνελ	eddy current Composting with tunnels
mbt15 (mbt3+cmp5)	Βιολογική Μηχανική Επεξεργασία-κόσκινα δύο βαθμίδων, μαγνητικός διαχωριστής, διαχωριστής με επαγωγικά ρεύματα. Κομποστοποίηση σε κλειστή τράπεζα	Mechanical Biological Treatment- 2 stages sieving, magnet, eddy current Composting with closed halls
mbt16 (mbt3+ad2)	Βιολογική Μηχανική Επεξεργασία-κόσκινα δύο βαθμίδων, μαγνητικός διαχωριστής, διαχωριστής με επαγωγικά ρεύματα. Ξηρή αερόβια χώνευση και κομποστοποίηση με κλειστού τύπου σειράδια	Mechanical Biological Treatment- 2 stages sieving, magnet, eddy current Dry AD and covered windows composting
mbt17 (mbt3+ad4)	Βιολογική Μηχανική Επεξεργασία-κόσκινα δύο βαθμίδων, μαγνητικός διαχωριστής, διαχωριστής με επαγωγικά ρεύματα. Υγρή αερόβια χώνευση και κομποστοποίηση με κλειστού τύπου σειράδια	Mechanical Biological Treatment- 2 stages sieving, magnet, eddy current Wet AD and covered windows composting
mbt18 (mbt3+ad5)	Βιολογική Μηχανική Επεξεργασία-κόσκινα δύο βαθμίδων, μαγνητικός διαχωριστής, διαχωριστής με επαγωγικά ρεύματα. Ολοκληρωμένη ξηρή αερόβια χώνευση και κομποστοποίηση με κλειστού τύπου σειράδια	Mechanical Biological Treatment- 2 stages sieving, magnet, eddy current Complete dry AD and covered windows composting
bd1	Βιολογική Ξήρανση με αναγεννητική θερμική οξείδωση, αεροδιαχωρηστης, κόσκινα δύο βαθμίδων, μαγνητικός διαχωριστής, διαχωριστής με επαγωγικά ρεύματρα	Biodrying with RTO, air separator, 2 stages sieving, magnet, eddy current
bd2	Βιολογική Ξήρανση με βιοφίλτρο, κόσκινα δύο βαθμίδων, μαγνητικός διαχωριστής, διαχωριστής με επαγωγικά ρεύματα	Biodrying with biofilter, 2 stages sieving, magnet, eddy current

bd3	Βιολογική Ξήρανση, διπλός έλεγχος, αεροδιαχωριστήρας, οπτικός διαχωριστής και δονούμενη τράπεζα, μαγνητικός διαχωριστής, διαχωριστής με επαγωγικά ρεύματα	Biodrying, double screening, air separator, optical scanner & vibrating plates, magnet, eddy current

Παράρτημα 2: Κώδικας GAMS

```
$TITLE WASTE MANAGEMENT
$eolcom //

SETS
I  34 waste ingredients
/ORFW,ORGP,OROT,LWRB,LWLT,LWWP,LWOW,LWTX,PAPP,PACB,PAPR,PAOT,GLMX
,GLOT,GLGR,GLBR,GLCB,
FEPA,FEOT,ALPC,ALOA,ALFL,PLMX,PLOT,PLBG,PLPF,PLOF,PLPT,PLPV,PLOD,
OTDC,OTIN,OT10,OTOT/
*subsets of recycled and other set of materials involved in
legislation

ORG(I) organics /ORFW,ORGP,OROT/
PAP(I) paper /PAPP,PACB/
GLS(I) glass / GLMX,GLGR,GLBR,GLCB/
MET(I) metal - ferrous and aluminum / FEPA,ALPC/
PLA(I) plastic / PLMX,PLBG,PLPF,PLPT,PLPV/
PAPTOT(I) paper total /PAPP,PACB,PAPR,PAOT/
GLSTOT(I) glass total /GLMX,GLOT,GLGR,GLBR,GLCB/
METTOT(I) metal - ferrous and aluminum total
/FEPA,FEOT,ALPC,ALOA,ALFL/
PLATOT(I) plastic total/PLMX,PLOT,PLBG,PLPF,PLOF,PLPT,PLPV,PLOD/
RECYC(I) recyclables
/LWWP,PAPP,PACB,GLMX,GLGR,GLBR,GLCB,FEPA,ALPC,PLMX,PLBG,PLPF,PLPT
,PLPV/
* subsets related to landfill
LDFOOD(I) food that is going to landfill /ORFW, OROT/
LDFPAP(I) paper that is going to landfill /PAPP,PACB,PAPR,PAOT/
LDFLWT(I) wood going to landfill /LWWP,LWOW/
BDEGR(I) biodegrabable organics going to landfill use for the
1995 constraint /ORFW,ORGP,OROT,LWWP,PAPP,PACB,PAPR,PAOT/
LDFDOC 5(x2) categories for landfill CH4 calculation
/FUD1,FUD2,GRD1,GRD2,PAP1,PAP2,WDS1,WDS2,TXT1,TXT2/
//,NAP1,NAP2/

T  time period  /1*4/
J  type of bins /BGL, BMT, BPL, BPA, BRC, BOR, BMW/
P  processes /TSR1, TSG1, CMP1*CMP5, AND1*AND5, MRF1*MRF3,
WTE1*WTE4, BDR1*BDR2, MBT1*MBT18, LDF1*LDF2, TS/
TSR(P) Temporary storage paper-plastic-metal /TSR1/
TSG(P) Temporary storage glass /TSG1/
CMP(P) Composting /CMP1*CMP5/
AD(P)  Anaerobic digestion /AND1*AND5/
MRF(P) Material Recycling Facilities for comingled /MRF1*MRF3/
WTE(P) Waste to Energy /WTE1*WTE4/
BD(P)  Biodrying /BDR1*BDR2/
MBT(P) Mechanical and Biological Treatment /MBT1*MBT18/
LDF(P) Landfill /LDF1*LDF2/
PONLYBIN(P) processes that receive input only from bins /TSR1,
TSG1, CMP1*CMP5, AND1*AND5, TS/
OUTWTE types of output from process WTE  /RECY, OCMP, STOR, DERF,
BIOG, LOSS, RESD, RESDH/
O(OUTWTE)  types of output from processes  /RECY, OCMP, STOR,
DERF, BIOG, LOSS, RESD/
EMS emissions /CO2,CH4,N2O,NH3,PM10,SOX,NOX,NMVOC,PCDD/
TFL fuels in transportation /DSL, NG/
```

```
K objective functions /1*2/
alias(T,TT)
alias(I,II)
;

parameter bin(J)  configuration of bins
/
$include c:\gams\waste\Attica2\bin_j.txt
/
;

table lnk(P,J) links of bins to processes
        BGL     BMT     BPL     BPA     BRC     BOR     BMW
TSR1    0       1       1       1       0       0       0
TSG1    1       0       0       0       0       0       0
CMP1    0       0       0       0       0       1       0
CMP2    0       0       0       0       0       1       0
CMP3    0       0       0       0       0       1       0
CMP4    0       0       0       0       0       1       0
CMP5    0       0       0       0       0       1       0
AND1    0       0       0       0       0       1       0
AND2    0       0       0       0       0       1       0
AND3    0       0       0       0       0       1       0
AND4    0       0       0       0       0       1       0
AND5    0       0       0       0       0       1       0
MRF1    0       0       0       0       1       0       0
MRF2    0       0       0       0       1       0       0
MRF3    0       0       0       0       1       0       0
WTE1    0       0       0       0       0       0       1
WTE2    0       0       0       0       0       0       1
WTE3    0       0       0       0       0       0       1
WTE4    0       0       0       0       0       0       1
BDR1    0       0       0       0       0       0       1
BDR2    0       0       0       0       0       0       1
MBT1    0       0       0       0       0       0       1
MBT2    0       0       0       0       0       0       1
MBT3    0       0       0       0       0       0       1
MBT4    0       0       0       0       0       0       1
MBT5    0       0       0       0       0       0       1
MBT6    0       0       0       0       0       0       1
MBT7    0       0       0       0       0       0       1
MBT8    0       0       0       0       0       0       1
MBT9    0       0       0       0       0       0       1
MBT10   0       0       0       0       0       0       1
MBT11   0       0       0       0       0       0       1
MBT12   0       0       0       0       0       0       1
MBT13   0       0       0       0       0       0       1
MBT14   0       0       0       0       0       0       1
MBT15   0       0       0       0       0       0       1
MBT16   0       0       0       0       0       0       1
MBT17   0       0       0       0       0       0       1
MBT18   0       0       0       0       0       0       1
LDF1    0       0       0       0       0       0       1
LDF2    0       0       0       0       0       0       0
TS      0       0       0       0       1       0       1
;
```

```
scalar
yp       years per period /5/
$include c:\gams\waste\Attica2\scalarvalues.txt
$include c:\gams\waste\Attica2\excostflag.txt
crfbn, crftr, crfpr   crf for bins transport and processes
;

crfbn = (df*(1+df)**4)/((1+df)**4-1);
crftr = (df*(1+df)**12)/((1+df)**12-1);
crfpr = (df*(1+df)**20)/((1+df)**20-1);

parameter dfc(T) coefficient for discounted cashflows in period T
centered in the mid year of perion ;
dfc(T) = 1/(1+df)**(yp*ord(T)-2)    ;

parameter dens(TFL) density of fuel TFL in transport (kg per lt)
/
$include c:\gams\waste\Attica2\dslng.txt
/
;

parameters
* for reporting after optimization, not included in the
calculations
param_orgldf(T) parameter for calculation of the share of
organics going to the landfill
param_rr_wood(T) parameter for calculation of wood recycle
param_rr_paper(T) parameter for calculation of paper recycle
param_rr_glass(T) parameter for calculation of glass recycle
param_rr_metal(T) parameter for calculation of metal recycle
param_rr_plast(T) parameter for calculation of plastic recycle
param_rr_recenrg(T) parameter for calculation of materials going
to recycle and energy

param_rr_papertot(T) parameter for calculation of paper recycle
param_rr_glasstot(T) parameter for calculation of glass recycle
param_rr_metaltot(T) parameter for calculation of metal recycle
param_rr_plasttot(T) parameter for calculation of plastic recycle
;

TABLE tquant(I,T) estimated quantity per waste ingredient in tons
(obtained from excel)
$include c:\gams\waste\Attica2\quant_it.txt
;
parameter   totwaste(T) total amount of waste in period T (tn per
year) ;
totwaste(T)=sum(I,tquant(I,T))
;
parameter bfcost(J) annual cost for the bins (euro per tn input-
INBIN calculated in excel)
/
$include c:\gams\waste\Attica2\bfcost_j.txt
/
;
parameter capmin(P) minimum capacity for process P (tn per year)
/
$include c:\gams\waste\Attica2\capmin_p.txt
/
```

```
;
parameter capmax(P) maximum capacity for process P (tn per year)
/
$include c:\gams\waste\Attica2\capmax_p.txt
/
;
parameter aicslope(P) slope for annual investment cost (euro per
tn of capacity)
/
$include c:\gams\waste\Attica2\aicslope_p.txt
/
;
parameter aicintercept(P) intercept for annual investment cost
(euro)
/
$include c:\gams\waste\Attica2\aicintercept_p.txt
/
;
parameter aocslope(P) slope for annual operational cost (euro per
tn of capacity)
/
$include c:\gams\waste\Attica2\aocslope_p.txt
/
;
parameter aocintercept(P) intercept for annual operational cost
(euro)
/
$include c:\gams\waste\Attica2\aocintercept_p.txt
/
;
parameter pvcost(P) ammual operation cost for process P (euro per
tn input)
/
$include c:\gams\waste\Attica2\pvcost_p.txt
/
;
parameter price_i(I) in euro per tn
/
$include c:\gams\waste\Attica2\price_i.txt
/
;
parameter price_o(O) in euro per tn
/
$include c:\gams\waste\Attica2\price_o.txt
/
;
parameter ncv(I) energy content MWh per ton
/
$include c:\gams\waste\Attica2\ncv_i.txt
/
;
parameter moist(I) energy content MWh per ton
/
$include c:\gams\waste\Attica2\moist_i.txt
/
;
parameter tc(P) anual investment transportation cost from bins to
process P in euro per tn
```

```
/
$include c:\gams\waste\Attica2\tc_p.txt
/
;
parameter tcts(P) anual investment transportation cost from bins
to process P in euro per tn
/
$include c:\gams\waste\Attica2\tctsp_p.txt
/
table tcldf(P,LDF) annual investment transportation cost from
process P to landfill in euro per tn
$include c:\gams\waste\Attica2\tcldf_pldf.txt
;
parameter dpybp(P) distance per year for transportation from bins
to process P (km per tn)
/
$include c:\gams\waste\Attica2\dpybp_p.txt
/
;
parameter dpytsp(P) distance per year for transportation from
bins to process P (km per tn)
/
$include c:\gams\waste\Attica2\dpytsp_p.txt
/
;
table dpypl(P,LDF) distance per year for transportation from
process P to landfill (km per tn)
$include c:\gams\waste\Attica2\dpypl_pldf.txt
;
parameter cpkmbp(P) operational cost for transport from bins to
process P ($ per km)
/
$include c:\gams\waste\Attica2\cpkmbp_p.txt
/
;
parameter cpkmpl(P) operational cost for transport from process P
to landfils($ per km)
/
$include c:\gams\waste\Attica2\cpkmpl_p.txt
/
;
parameter cpkmts(P) operational cost for TS to process P ($ per
km)
/
$include c:\gams\waste\Attica2\cpkmts_p.txt
/
;
table emtrans(EMS,TFL) emission factor from transportation for
pollutant EMS for fuel TFL (kg per kg fuel)
$include c:\gams\waste\Attica2\emtrans_EMSTFL.txt
;
TABLE emswte(I,EMS) emission factor of polutant EMS in process
WTE for material I (g per tn except PDCC that iS mg per tn))
$include c:\gams\waste\Attica2\emswte_IEMS.txt
;
table efprocems(P,EMS) emission factor for process P and
pollutant EMS(g per tn)
$include c:\gams\waste\Attica2\efprocems_PEMS.txt
```

```
;
parameter efelproc(EMS) emission factor of electricity in process
(g per kWh)
/
$include c:\gams\waste\Attica2\efelproc_EMS.txt
/
;
parameter efngproc(EMS) emission factor of natural gas in process
(g per Nm3)
/
$include c:\gams\waste\Attica2\efngproc_EMS.txt
/
;
parameter efdlproc(EMS) emission factor of diesel in process (g
per kg)
/
$include c:\gams\waste\Attica2\efdlproc_EMS.txt
/
;
parameter spcel(P) specific consumption of electricity for
process P (kWh per tn)
/
$include c:\gams\waste\Attica2\spcel_P.txt
/
;
parameter spcng(P) specific consumption of natural gas for
process P (Nm3 per tn)
/
$include c:\gams\waste\Attica2\spcng_P.txt
/
;
parameter spcdl(P) specific consumption of diesel gas for process
P (lt per tn)
/
$include c:\gams\waste\Attica2\spcdl_P.txt
/
;
parameter fc(I) fossil carbon in material I (%)
/
$include c:\gams\waste\Attica2\fc_I.txt
/
;
parameter cc(I) carbon content in material I (%)
/
$include c:\gams\waste\Attica2\cc_I.txt
/
;
parameter dmc(I) dry matter content in material I (%)
/
$include c:\gams\waste\Attica2\dmc_I.txt
/
;
table ch4ldf(LDFDOC,T) table with the CH4 coeficients for DDOC
base on time lag T-1
$include c:\gams\waste\Attica2\ch4ldf_ddoc_t.txt
;
table ch4ldf_upto40(LDFDOC,T) table with the CH4 coeficients for
DDOC base on time lag T-1
```

```
$include c:\gams\waste\Attica2\ch4ldf_upto40.txt
;
table rectarget(I,T) recycling targets per material I
$include c:\gams\waste\Attica2\rectarget_it.txt
;
TABLE q(I,J,T) quantity of material I in bin J in period T  //
from excel "collection&transportation.xls"
$include c:\gams\waste\Attica2\quant_ijt.txt
;
parameter sh(I,J,T) share of material I in bin J in period T;
sh(I,J,T)= q(I,J,T)/max(0.001,sum(II,q(II,J,T)));
;
TABLE tsrcc(TSR,I,O) conversion coefficients of ingredient I to
output O in TSR process
$include c:\gams\waste\Attica2\tsrcc.txt
;
TABLE tsgcc(TSG,I,O) conversion coefficients of ingredient I to
output O in TSG process
$include c:\gams\waste\Attica2\tsgcc.txt
;
TABLE mrfcc(MRF,I,O) conversion coefficients of ingredient I to
output O in MRF process
$include c:\gams\waste\Attica2\mrfcc.txt
;
TABLE cmpcc(CMP,I,O) conversion coefficients of ingredient I to
output O in CMP process
$include c:\gams\waste\Attica2\cmpcc.txt
;
TABLE cmpcoef(I,CMP) coefficients of treated material I in
residual from process CMP
$include c:\gams\waste\Attica2\cmpcoef_ICMP.txt
;
TABLE adcc(AD,I,O) conversion coefficients of ingredient I to
output O in AD process
$include c:\gams\waste\Attica2\adcc.txt
;
TABLE adcoef(I,AD) coefficients of treated material I in residual
from process AD
$include c:\gams\waste\Attica2\adcoef_IAD.txt
;
TABLE bdcc(BD,I,O) conversion coefficients of ingredient I to
output O in BD process
$include c:\gams\waste\Attica2\bdcc.txt
;
TABLE mbtcc(MBT,I,O) conversion coefficients of ingredient I to
output O in MBT process
$include c:\gams\waste\Attica2\mbtcc.txt
;
TABLE mbtcoef(I,MBT) coefficients of treated material I in
residual from process MBT
$include c:\gams\waste\Attica2\mbtcoef_IMBT.txt
;
TABLE wtecc(WTE,I,OUTWTE) conversion coefficients of ingredient I
to output O in WTE process
$include c:\gams\waste\Attica2\wtecc.txt
;
table sctrw(P,TFL) specific consumption from bins to process P
for fuel TFL
```

```
$include c:\gams\waste\Attica2\sctrw_PTFL.txt
;
table sctrwldf(P,TFL) specific consumption from process P to
landfill for fuel TFL
$include c:\gams\waste\Attica2\sctrwldf_PTFL.txt
;
table sctrwts(P,TFL) specific consumption from transfer station
to process P for fuel TFL
$include c:\gams\waste\Attica2\sctrwts_PTFL.txt
;
parameter sctrwbdwte(TFL) specific consumption from BD to WTE for
fuel TFL
/
$include c:\gams\waste\Attica2\sctrwbdwte_TFL.txt
/
;
parameter sctrwmbtwte(TFL) specific consumption from MBT to WTE
for fuel TFL
/
$include c:\gams\waste\Attica2\sctrwmbtwte_TFL.txt
/
;
parameter bdmlos(I) proportion of moisture of material I that is
lost in Biodrying
/
$include c:\gams\waste\Attica2\bdmlos_I.txt
/
;
parameter excostql(P) proportion of moisture of material I that
is lost in Biodrying
/
$include c:\gams\waste\Attica2\excostql_P.txt
/
;
parameter dfmbt(I,MBT,T) coefficient that provides share of i-th
material in DERF from MBT ;
dfmbt(I,MBT,T)=
mbtcc(MBT,I,'DERF')*sh(I,'BMW',T)/max(0.001,sum(II,mbtcc(MBT,II,'
DERF')*sh(II,'BMW',T)));

parameter dfbd(I,BD,T) coefficient that provides share of i-th
material in DERF from BD ;
dfbd(I,BD,T)=
bdcc(BD,I,'DERF')*sh(I,'BMW',T)/max(0.001,sum(II,bdcc(BD,II,'DERF
')*sh(II,'BMW',T)));

$include c:\gams\waste\Attica2\reclegisl_T.txt

;

positive variables
W(J,P,T)      waste flow from bin J to process P in period T
WLDF(P,LDF,T) waste flow from process P to landfill LDF in period
T
WTS(P,T)
INBIN(J,T)     input in bin J in period T in annual base (t)
INPROC(P,T)    Input in process P in period T in annual base (t)
```

OUTPROC(P,O,T) Output of type O from process P in period T in annual base (t)
RECPROC(P,I,T) Recyclable of type I from process P in period T in annual base (t)
NCVMBTDF(MBT,T) energy content of DF from MBT going to WTE in period T in annual base (MWh)
NCVBDDF(BD,T) energy content of DF from BD going to WTE in period T in annual base (MWh)
NCVMWWTE(WTE,T) energy content of waste from bin BMW going directly to WTE in period T in annual base (MWh)
WMBTWTE(MBT,WTE,T) waste flow from MBT to WTE (t)
WBDWTE(BD,WTE,T) waste flow from BD to WTE (t)
DERFMBTWTE(MBT,WTE,T) calculation of DERF from MBT going to WTE in period T
DERFMBTSELL(MBT,T) calculation of DERF from MBT going to be sold in period T
DERFEMSMBT(MBT,EMS,T) emissions of EMS in WTE from derived fuel from MBT in period T (kg)
DERFCO2MBT(MBT,T) emissions of CO2 in WTE from derived fuel from MBT in period T (kg)
DERFBDWTE(BD,WTE,T) calculation of I material in DERF from BD going to WTE in period T
DERFBDSELL(BD,T) calculation of DERF from BD going to WTE in period T
DERFSELL(T) calculation of DERF from BD going to be sold
DERFEMSBD(BD,EMS,T) emissions of EMS in WTE from derived fuel from BD in period T (kg)
DERFCO2BD(BD,T) emissions of CO2 in WTE from derived fuel from MBT in period T (kg)
WTEEMSMW(EMS,T) emissions of EMS in WTE from mixed waste bin in period T (kg)
WTECO2MW(T) emissions of EMS in WTE from mixed waste bin in period T (kg)

DFINWTE(WTE,T) Derived fuel going to process WTE
ELPROD_MBT(T) electricty production from biogas in MBT
ELPROD_AD(T) electricty production from biogas in anaerobic digestion
ELPROD(WTE,T) produced electricity in WTE in period T in annual base (MWh)
CAP(P,T) capacity of process P installed in period T
RECRAT(I,T) recycling rate for material I in period T
BDEGRLDF(T) biodegradables going to LDF
RECTOENRG(T) recyclables materials going to energy
REC_RATE_PACK(T) recycle rate of packaging materials

EM_DIES(EMS,T) emissions of EMS from diesel in energy production of processes (kg)
EM_NATG(EMS,T) emissions of EMS from natural gas in energy production of processes (kg)
EM_ELEC(EMS,T) emissions of EMS from electricity in energy production of processes (kg)

EM_PROC(EMS,T) emissions of EMS from process(kg)
EM_WTE_CO2(T) emissions of CO2 from WTE (kg)
EM_WTE_CH4(T) emissions of CH4 from WTE (kg)
EM_WTE_N2O(T) emissions of N2O from WTE (kg)

EM_WTE_NH3(T) emissions of NH3 from WTE (kg)
EM_WTE_PM10(T) emissions of PM10 from WTE (kg)
EM_WTE_SOX(T) emissions of SOX from WTE (kg)
EM_WTE_NOX(T) emissions of NOX from WTE (kg)
EM_WTE_NMVOC(T) emissions of NMVOC from WTE (kg)
EM_WTE_PCDD(T) emissions of PCDD from WTE (kg)
EM_TRANS(EMS,T) emissions of EMS from transport (kg)
EM_NH3(T) annual NH3 emissions (t)
EM_PM10(T) annual PM10 emissions (t)
EM_SOX(T) annual SOx emissions (t)
EM_NOX(T) annual NOx emissions (t)
EM_NMVOC(T) annual NMVOC emissions (t)
EM_PCDD(T) annual PCDD emissions (kg)

FOOD1LDF(T) food ingredients going to landfill - from type 1 process
FOOD2LDF(T) food ingredients going to landfill - from type 2 process
GARD1LDF(T) garden ingredients going to landfill - from type 1 process
GARD2LDF(T) garden ingredients going to landfill - from type 2 process
PAP1LDF(T) paper ingredients going to landfill - from type 1 process
PAP2LDF(T) paper ingredients going to landfill - from type 2 process
WDS1LDF(T) wood and straw ingredients going to landfill - from type 1 process
WDS2LDF(T) wood and straw ingredients going to landfill - from type 2 process
TXT1LDF(T) textile ingredients going to landfill - from type 1 process
TXT2LDF(T) textile ingredients going to landfill - from type 2 process
NAP1LDF(T) nappier ingredients going to landfill - from type 1 process
NAP2LDF(T) textile ingredients going to landfill - from type 2 process
LDF_CH4_FOOD(T) CH4 emissions from food in the landfill
LDF_CH4_GARD(T) CH4 emissions from garden in the landfill
LDF_CH4_PAP(T) CH4 emissions from paper in the landfill
LDF_CH4_WDS(T) CH4 emissions from wood and straw in the landfill
LDF_CH4_TXT(T) CH4 emissions from textile in the landfill
LDF_CH4_NAP(T) CH4 emissions from nappier in the landfill

CO2EQENRGY(T) annual emissions of CO2 equivalent from energy in processes in period T (kt)
CO2EQPROC(T) annual emissions of CO2 equivalent from process (except landfill) in period T (kt)
CO2EQTRANS(T) annual emissions of CO2 equivalent from transport in period T (kt)
CO2EQLDF(T) emissions of CO2 equivalent from landfill in whole period T (kt)
CO2LDF20_40 emissions of CO2 equivalent from landfill outside horizon (from year 20 to year 40)

L_ORGLDF(T) deviation from organic to landfill target

```
L_WOOD(T)   deviation from wood recycle target
L_PAPER(T)  deviation from paper recycle target
L_GLASS(T)  deviation from glass recycle target
L_METAL(T)  deviation from metal recycle target
L_PLAST(T)  deviation from plastic recycle target
L_PAPERTOT(T)  deviation from total paper recycle target
L_GLASSTOT(T)  deviation from total glass recycle target
L_METALTOT(T)  deviation from total metal recycle target
L_PLASTTOT(T)  deviation from total plastic recycle target

L_RECENRG(T) deviation from recyclable to energy target

ANNBNCAPEX(T) annual investment cost for bins in period T (keuro)
ANNTRCAPEX(T) annual investment cost for trucks in period T
(keuro)
ANNPRCAPEX(T) annual investment cost for processes in period T
(keuro)
ANNTROPEX(T)  annual operation  cost for transportation in period
T (keuro)
ANNPROPEX(T)  annual operation  cost for processes in period T
(keuro)
ANNINCMREC(T) annual income from recyclables in period T (keuro)
ANNINCMEL(T)  annual income from recyclables in period T (keuro)
INVBN(T)      investment in bins for period T (keuro)
INVPR(T)      investment in processes for period T (keuro)
ANNEXCOST(T)  annual external cost for period T (keuro)

integer variables
B(P,T)  number of installations of process P in period T

binary variables
EXIST(P)  existence or not of the p-th technology

free variables
NPC              net present cost in keuros
NPC_ECON         net present cost without the external cost in
keuros
NPC_EXC          net present external cost in keuros
NPC_EXC_20_40    net present external cost for emissions 20_40 in
keuros
ANNCOST(T)       annual cost in keuros in period T
TOTCO2           total CO2 emissions for 20 years
INVTR(T)         investment in trucks for period T (keuro)
LAMDA            maximum tolerance for legislation thresholds
Z(K)             objective functions

EQUATIONS

EQ_INPUTBIN(J,T)     flow of the waste to the bins for period T
EQ_BALBINOUT(J,T)    flow of the waste from the bins to processes
- definition of W(J-P-T)
EQ_BALPROCIN(PONLYBIN,T)  definition of the inflow to the
processes (INPROC)
EQ_BALTS1(T)         balance from BMW to TS
EQ_BALTS2(T)         balance from BRC to TS
EQ_TSEXIST(T)        condition for existence of TS
EQ_CAPMIN(P,T)       lower bound for capacity addition for
process P in period T
```

EQ_CAPMAX(P,T) upper bound for capacity addition for process P in period T
EQ_INTCAPMAX(P,T) use the minimum number expoliting full capacity for process P in period T
EQ_PEXIST1(P) flag-equation 1 if P-process exists
EQ_PEXIST2(P) flag-equation 2 if P-process exists

EQ_OUTTSR(TSR,O,T) definition of outputs from process TSR in period T
EQ_RECTSR(TSR,I,T) definition of recycling of material I in process TSR in period T
EQ_TSREXIST(TSR,T) capacity limit that must be satisfied by operation load
EQ_OUTTSG(TSG,O,T) definition of outputs from process TSG in period T
EQ_RECTSG(TSG,I,T) definition of recycling of material I in process TSG in period T
EQ_TSGEXIST(TSG,T) capacity limit that must be satisfied by operation load
EQ_OUTCMP(CMP,O,T) definition of outputs from process CMP in period T
EQ_RECCMP(CMP,I,T) definition of recycling of material I in process CMP in period T
*EQ_ELPROD_CMP(T) electricity production from process CMP in period T
EQ_CMPEXIST(CMP,T) capacity limit that must be satisfied by operation load
EQ_OUTAD(AD,O,T) definition of outputs from process AND in period T
EQ_RECAD(AD,I,T) definition of recycling of material I in process AND in period T
EQ_ELPROD_AD(T) electricity production from process AND in period T
EQ_ADEXIST(AD,T) capacity limit that must be satisfied by operation load
EQ_INMRF(MRF,T)
EQ_OUTMRF(MRF,O,T) definition of outputs from process MRF in period T
EQ_RECMRF(MRF,I,T) definition of recycling of material I in process MRF in period T
EQ_MRFEXIST(MRF,T) capacity limit that must be satisfied by operation load
EQ_INMBT(MBT,T)
EQ_OUTMBT(MBT,O,T) definition of outputs from process MBT in period T
EQ_RECMBT(MBT,I,T) definition of recycling of material I in process MBT in period T
EQ_MBTEXIST(MBT,T) capacity limit that must be satisfied by operation load
EQ_NCVDFMBT(MBT,T) calculation of calorific value for Derived Fuel DERF from MBT
EQ_ELPROD_MBT(T) electricity production from process MBT in period T

EQ_WMBTWTE(MBT,WTE,T) definition of flow from MBT to WTE in period T
EQ_DERFMBT(MBT,T) calculation of i-material in DERF from MBT in period T

EQ_DERFEMSMBT(MBT,EMS,T) calculation of emitted quantity EMS in derived fuel from MBT
EQ_DERFCO2MBT(MBT,T) calculation of emitted quantity of CO2 in derived fuel from MBT
EQ_WBDWTE(BD,WTE,T) definition of flow from BD to WTE in period T
EQ_DERFBD(BD,T) calculation of i-material in DERF from BD in period T
EQ_DERFEMSBD(BD,EMS,T) calculation of emitted quantity EMS in derived fuel from BD
EQ_DERFCO2BD(BD,T) calculation of emitted quantity of CO2 in derived fuel from BD
EQ_DERFSELL(T)
EQ_INBD(BD,T)
EQ_OUTBD(BD,O,T) definition of outputs from process BD in period T
EQ_RECBD(BD,I,T) definition of recycling of material I in process BD in period T
EQ_BDEXIST(BD,T) capacity limit that must be satisfied by operation load
EQ_NCVDFBD(BD,T) calculation of calorific value for Derived Fuel DERF from BD
EQ_INWTE(WTE,T) inflow to the WTE process in period T
EQ_NCVMWWTE(WTE,T) calculation of calorific value for Mixed Waste going to WTE in period T
EQ_DFINWTE(T) calculation of DERF from BD and MBT going into WTE in period T
EQ_OUTWTE(WTE,O,T) definition of outputs from process WTE in period T
EQ_RECWTE(WTE,I,T) definition of recycling of material I in process WTE in period T
EQ_WTEEXIST(WTE,T) capacity limit that must be satisfied by operation load
EQ_WTEEMSMW(EMS,T) calculation of emitted quantity of EMS from BMW going to WTE
EQ_WTECO2MW(T) calculation of emitted quantity of CO2 in derived fuel from BMW
EQ_ELPROD(WTE,T) electricity production from process WTE in period T
EQ_BALWLDF1(P,T) calculation of streams from processes to landfill1 - definition of W(P-LDF1-T)
EQ_BALWLDF2(WTE,T) calculation of streams from processes to hazardous landfill2 - definition of W(WTE-LDF2-T)
EQ_INLDF(T) input in LDF1
EQ_INHZLDF(T) input in LDF2
EQ_OUTLDF(LDF,O,T) outflow rom landfill (= 0)
EQ_RECLDF(LDF,I,T) recycling from landfill (=0)
EQ_LDFEXIST(LDF,T) capacity limit that must be satisfied by operation load

EQ_FOOD1_TO_LDF(T) calculation of food going to landfill as residual type 1
EQ_FOOD2_TO_LDF(T) calculation of food going to landfill as residual type 2
EQ_GARD1_TO_LDF(T) calculation of garden going to landfill as residual type 1
EQ_GARD2_TO_LDF(T) calculation of garden going to landfill as residual type 2

EQ_PAP1_TO_LDF(T) calculation of paper going to landfill as residual type 1
EQ_PAP2_TO_LDF(T) calculation of paper going to landfill as residual type 2
EQ_WDS1_TO_LDF(T) calculation of wood&straw going to landfill as residual type 1
EQ_WDS2_TO_LDF(T) calculation of wood&straw going to landfill as residual type 2
EQ_TXT1_TO_LDF(T) calculation of textile going to landfill as residual type 1
EQ_TXT2_TO_LDF(T) calculation of textile going to landfill as residual type 2

EQ_LDF_CH4_FOOD(T) calculation of CH4 emissions from food in the landfill in period T
EQ_LDF_CH4_GARD(T) calculation of CH4 emissions from garden in the landfill in period T
EQ_LDF_CH4_PAP(T) calculation of CH4 emissions from paper in the landfill in period T
EQ_LDF_CH4_WDS(T) calculation of CH4 emissions from wood&straw in the landfill in period T
EQ_LDF_CH4_TXT(T) calculation of CH4 emissions from textile in the landfill in period T

EQ_EM_DIES(EMS,T) calculation of energy emissions of processes from diesel
EQ_EM_NATG(EMS,T) calculation of energy emissions of processes from natural gas
EQ_EM_ELEC(EMS,T) calculation of energy emissions of processes from electricity

EQ_EM_PROC(EMS,T) calculation of process emissions except WTE and LDF
EQ_EM_WTE_CO2(T) calculation of WTE process CO2 emissions
EQ_EM_WTE_NH3(T) calculation of WTE process NH3 emissions
EQ_EM_WTE_PM10(T) calculation of WTE process PM10 emissions
EQ_EM_WTE_SOX(T) calculation of WTE process SOX emissions
EQ_EM_WTE_NOX(T) calculation of WTE process NOX emissions
EQ_EM_WTE_NMVOC(T) calculation of WTE process NMVOC emissions
EQ_EM_WTE_PCDD(T) calculation of WTE process PCDD emissions
EQ_EM_TRANS(EMS,T) calculation of EMS emissions from transport
EQ_EM_NH3(T) calculation of annual NH3 emissions
EQ_EM_PM10(T) calculation of annual PM10 emissions
EQ_EM_SOX(T) calculation of annual SOx emissions
EQ_EM_NOX(T) calculation of annual NOx emissions
EQ_EM_NMVOC(T) calculation of annual NMVOC emissions
EQ_EM_PCDD(T) calculation of annual PCDD emissions

EQ_REC_RATE(I,T) calculation of the recycling rate for material I in period T

EQ_BDEGR_TO_LDF(T) calculation of organics going to LDF
EQ_REC_TO_ENRG(T) calculation of recyclables going to energy
EQ_REC_RATE_WOOD(T) constraint on the recycling of wood
EQ_REC_RATE_PAPER(T) constraint on the recycling of paper
EQ_REC_RATE_GLASS(T) constraint on the recycling of glass
EQ_REC_RATE_METAL(T) constraint on the recycling of metal
EQ_REC_RATE_PLASTIC(T) constraint on the recycling of plastic

EQ_REC_RATE_PAPERTOT(T) constraint on the total paper
EQ_REC_RATE_GLASSTOT(T) constraint on the total glass
EQ_REC_RATE_METALTOT(T) constraint on the total metal
EQ_REC_RATE_PLASTICTOT(T) constraint on the total plastic
EQ_RATE_REC_ENRG(T) constraint on the recyclables going to energy
EQ_RATE_REC_PACK(T) constraint for the recycling of packaging materials
EQ_LAMDA definition of LAMDA as average tolerance for deviation from recycling target

EQ_ANNBNCAPEX(T) equation for annual investment cost for bins in period T
EQ_ANNTRCAPEX(T) equation for annual investment cost for trucks in period T
EQ_ANNPRCAPEX(T) equation for annual investment cost for processes in period T (keuro)
EQ_ANNTROPEX(T) equation for annual operation cost for transportation in period T (keuro)
EQ_ANNPROPEX(T) equation for annual operation cost for processes in period T (keuro)
EQ_AMMINCMREC(T) equation for annual income from recyclables in period T (keuro)
EQ_AMMINCMEL(T) equation for annual income from recyclables in period T (keuro)
EQ_INVBN(T) equation for investment in bins for period T (keuro)
EQ_INVTR1 equation for investment in trucks for period 1 (keuro)
EQ_INVTR(T) equation for investment in trucks for period T>1 (keuro)
EQ_INVPR(T) equation for investment in processes for period T (keuro)
EQ_ANNCOST(T) equation for total annual cost in period T (keuro)
EQ_ANNEXCOST(T) equation for the annual external cost in period T (keuro)
EQ_NPC calculation of Net Present Cost during the 20 years
EQ_NPC_ECON calculation of Net Present Cost during the 20 years (only the economic without the external cost)
EQ_NPC_EXC calculation of Net External Cost including external cost for landfill emissions from year 20 to 40
EQ_NPC_EXC_20_40 calculation of Net External Cost for landfill emissions from year 20 to 40

EQ_CO2EQENRGY(T) calculation of annual CO2 equivalent emissions from energy cinsumption in processes in period T
EQ_CO2EQPROC(T) calculation of annual CO2 equivalent emissions from process in period T
EQ_CO2EQTRANS(T) calculation of annual CO2 equivalent emissions from transportation in period T
EQ_CO2EQLDF(T) calculation of CO2 equivalent emissions from landfill in period T
EQ_CO2EQLDF20_40 calculation of CO2 equivalent emissions from landfill for years 20-40
EQ_TOTCO2 calculation of total CO2 emissions of the 20 years period

```
obj1                first objective function
obj2                second objective function

*constraints imposed by user's preferences
$include c:\gams\waste\Attica2\usc_decl.txt
;
*balances for the ingredients
EQ_INPUTBIN(J,T).. INBIN(J,T)=e=sum(I,q(I,J,T)*bin(J));
EQ_BALBINOUT(J,T).. INBIN(J,T) =e= sum(P,lnk(P,J)*W(J,P,T));
EQ_BALPROCIN(PONLYBIN,T).. INPROC(PONLYBIN,T) =e=
sum(J,bin(J)*lnk(PONLYBIN,J)*W(J,PONLYBIN,T));
EQ_BALTS1(T)..
W('BMW','TS',T)=e=sum(MBT,WTS(MBT,T))+sum(BD,WTS(BD,T))+sum(WTE,W
TS(WTE,T))+WTS('LDF1',T);
EQ_BALTS2(T)..  W('BRC','TS',T)=e=sum(MRF,WTS(MRF,T));
EQ_TSEXIST(T)..    INPROC('TS',T) =l= sum(TT$(ord(TT)<=ord(T)),
CAP('TS',TT));

EQ_CAPMIN(P,T).. CAP(P,T)=g=capmin(P)*B(P,T);
EQ_CAPMAX(P,T).. CAP(P,T)=l=capmax(P)*B(P,T);
EQ_INTCAPMAX(P,T).. B(P,T)=l= CAP(P,T)/capmax(P)+1;
EQ_PEXIST1(P)..     sum(T,B(P,T))=g= EXIST(P);
EQ_PEXIST2(P)..     sum(T,B(P,T))=l= 1000*EXIST(P);

EQ_OUTTSR(TSR,O,T).. OUTPROC(TSR,O,T)=e=
sum(I,tsrcc(TSR,I,O)*sum(J,sh(I,J,T)*lnk(TSR,J)*W(J,TSR,T)));
EQ_RECTSR(TSR,I,T)..
RECPROC(TSR,I,T)=e=tsrcc(TSR,I,'RECY')*sum(J,sh(I,J,T)*lnk(TSR,J)
*W(J,TSR,T));;
EQ_TSREXIST(TSR,T)..    INPROC(TSR,T) =l=
sum(TT$(ord(TT)<=ord(T)), CAP(TSR,TT));

EQ_OUTTSG(TSG,O,T).. OUTPROC(TSG,O,T)=e=
sum(I,tsgcc(TSG,I,O)*sum(J,sh(I,J,T)*lnk(TSG,J)*W(J,TSG,T)));
EQ_RECTSG(TSG,I,T)..
RECPROC(TSG,I,T)=e=tsgcc(TSG,I,'RECY')*sum(J,sh(I,J,T)*lnk(TSG,J)
*W(J,TSG,T));;
EQ_TSGEXIST(TSG,T)..    INPROC(TSG,T) =l=
sum(TT$(ord(TT)<=ord(T)), CAP(TSG,TT));

EQ_OUTCMP(CMP,O,T)..
OUTPROC(CMP,O,T)=e=sum(I,cmpcc(CMP,I,O)*sum(J,sh(I,J,T)*lnk(CMP,J
)*W(J,CMP,T)));
EQ_RECCMP(CMP,I,T)..
RECPROC(CMP,I,T)=e=cmpcc(CMP,I,'RECY')*sum(J,sh(I,J,T)*lnk(CMP,J)
*W(J,CMP,T));
EQ_CMPEXIST(CMP,T).. INPROC(CMP,T) =l= sum(TT$(ord(TT)<=ord(T)),
CAP(CMP,TT));

EQ_OUTAD(AD,O,T)..
OUTPROC(AD,O,T)=e=sum(I,adcc(AD,I,O)*sum(J,sh(I,J,T)*lnk(AD,J)*W(
J,AD,T)));
EQ_RECAD(AD,I,T)..
RECPROC(AD,I,T)=e=adcc(AD,I,'RECY')*sum(J,sh(I,J,T)*lnk(AD,J)*W(J
,AD,T));
EQ_ELPROD_AD(T).. ELPROD_AD(T)=e=sum(AD,
el_eff_bg*OUTPROC(AD,'BIOG',T));
```

```
EQ_ADEXIST(AD,T)..  INPROC(AD,T) =l= sum(TT$(ord(TT)<=ord(T)),
CAP(AD,TT));

EQ_INMRF(MRF,T)..  INPROC(MRF,T)=e= W('BRC',MRF,T) + WTS(MRF,T);
EQ_OUTMRF(MRF,O,T).. OUTPROC(MRF,O,T)=e=
sum(I,mrfcc(MRF,I,O)*sh(I,'BRC',T)*(W('BRC',MRF,T)+WTS(MRF,T)));
EQ_RECMRF(MRF,I,T).. RECPROC(MRF,I,T)=e=
mrfcc(MRF,I,'RECY')*sh(I,'BRC',T)*(W('BRC',MRF,T)+WTS(MRF,T));
EQ_MRFEXIST(MRF,T)..    INPROC(MRF,T) =l=
sum(TT$(ord(TT)<=ord(T)), CAP(MRF,TT));

EQ_INMBT(MBT,T)..  INPROC(MBT,T)=e= W('BMW',MBT,T) + WTS(MBT,T);
EQ_OUTMBT(MBT,O,T).. OUTPROC(MBT,O,T)=e=
sum(I,mbtcc(MBT,I,O)*sh(I,'BMW',T)*(W('BMW',MBT,T)+WTS(MBT,T)));
EQ_RECMBT(MBT,I,T).. RECPROC(MBT,I,T)=e=
mbtcc(MBT,I,'RECY')*sh(I,'BMW',T)*(W('BMW',MBT,T)+WTS(MBT,T));
EQ_MBTEXIST(MBT,T)..  INPROC(MBT,T) =l= sum(TT$(ord(TT)<=ord(T)),
CAP(MBT,TT));
EQ_DERFMBT(MBT,T).. sum(WTE,DERFMBTWTE(MBT,WTE,T))+
DERFMBTSELL(MBT,T)=e=sum(I,mbtcc(MBT,I,'DERF')*sh(I,'BMW',T)*(W('
BMW',MBT,T)+WTS(MBT,T)));
EQ_WMBTWTE(MBT,WTE,T)..
DERFMBTWTE(MBT,WTE,T)=e=WMBTWTE(MBT,WTE,T);
EQ_NCVDFMBT(MBT,T)..  NCVMBTDF(MBT,T)=e=sum(I,ncv(I)*(1-
moist(I))*dfmbt(I,MBT,T)*sum(WTE,DERFMBTWTE(MBT,WTE,T)));
EQ_DERFEMSMBT(MBT,EMS,T)..
DERFEMSMBT(MBT,EMS,T)=e=sum(I,emswte(I,EMS)*dfmbt(I,MBT,T)*sum(WT
E,DERFMBTWTE(MBT,WTE,T)));
EQ_DERFCO2MBT(MBT,T).. DERFCO2MBT(MBT,T)=e= sum(I,
dmc(I)*cc(I)*fc(I)*44/12*dfmbt(I,MBT,T)*sum(WTE,DERFMBTWTE(MBT,WT
E,T)));
EQ_ELPROD_MBT(T).. ELPROD_MBT(T)=e=sum(MBT,
el_eff_bg*OUTPROC(MBT,'BIOG',T));

EQ_INBD(BD,T)..  INPROC(BD,T)=e= W('BMW',BD,T) + WTS(BD,T);
EQ_OUTBD(BD,O,T).. OUTPROC(BD,O,T)=e=
sum(I,bdcc(BD,I,O)*sh(I,'BMW',T)*(W('BMW',BD,T)+WTS(BD,T)));
EQ_RECBD(BD,I,T).. RECPROC(BD,I,T)=e=
bdcc(BD,I,'RECY')*sh(I,'BMW',T)*(W('BMW',BD,T)+WTS(BD,T));
EQ_BDEXIST(BD,T)..    INPROC(BD,T) =l= sum(TT$(ord(TT)<=ord(T)),
CAP(BD,TT));
EQ_DERFBD(BD,T).. sum(WTE,DERFBDWTE(BD,WTE,T))+
DERFBDSELL(BD,T)=e=sum(I,bdcc(BD,I,'DERF')*sh(I,'BMW',T)*(W('BMW'
,BD,T)+WTS(BD,T)));
EQ_WBDWTE(BD,WTE,T)..  DERFBDWTE(BD,WTE,T)=e=WBDWTE(BD,WTE,T);
EQ_NCVDFBD(BD,T)..  NCVBDDF(BD,T)=e= sum(I,ncv(I)*(1-moist(I)*(1-
bdmlos(I))/(bdcc(BD,I,'DERF')+bdcc(BD,I,'RESD')+bdcc(BD,I,'RECY')
))*dfbd(I,BD,T)*sum(WTE,DERFBDWTE(BD,WTE,T)));
EQ_DERFEMSBD(BD,EMS,T)..
DERFEMSBD(BD,EMS,T)=e=sum(I,emswte(I,EMS)*dfbd(I,BD,T)*sum(WTE,DE
RFBDWTE(BD,WTE,T)));
EQ_DERFCO2BD(BD,T).. DERFCO2BD(BD,T)=e= sum(I,
dmc(I)*cc(I)*fc(I)*44/12*dfbd(I,BD,T)*sum(WTE,DERFBDWTE(BD,WTE,T)
));
EQ_DERFSELL(T)..
SUM(MBT,DERFMBTSELL(MBT,T))+SUM(BD,DERFBDSELL(BD,T))=E=DERFSELL(T
);
```

```
EQ_NCVMWWTE(WTE,T)..  NCVMWWTE(WTE,T)=e= sum(I,ncv(I)*(1-
moist(I))*sh(I,'BMW',T)*(W('BMW',WTE,T)+WTS(WTE,T)));
EQ_WTEEMSMW(EMS,T)..
WTEEMSMW(EMS,T)=e=sum(I,emswte(I,EMS)*sum(WTE,sh(I,'BMW',T)*(W('B
MW',WTE,T)+WTS(WTE,T))));
EQ_WTECO2MW(T)..
WTECO2MW(T)=e=sum(I,dmc(I)*cc(I)*fc(I)*44/12*sum(WTE,sh(I,'BMW',T
)*(W('BMW',WTE,T)+WTS(WTE,T))));
EQ_DFINWTE(T).. sum(MBT,
NCVMBTDF(MBT,T))+sum(BD,NCVBDDF(BD,T))=e= sum(WTE,
DFINWTE(WTE,T));
EQ_INWTE(WTE,T)..     INPROC(WTE,T)=e=W('BMW',WTE,T)+ sum(BD,
WBDWTE(BD,WTE,T))+sum(MBT, WMBTWTE(MBT,WTE,T))+WTS(WTE,T);
EQ_OUTWTE(WTE,O,T).. OUTPROC(WTE,O,T)=e=
sum(I,wtecc(WTE,I,O)*(SUM(MBT,dfmbt(I,MBT,T)*DERFMBTWTE(MBT,WTE,T
))+

SUM(BD,dfbd(I,BD,T)*DERFBDWTE(BD,WTE,T))+

sh(I,'BMW',T)*(W('BMW',WTE,T)+WTS(WTE,T))));
EQ_RECWTE(WTE,I,T).. RECPROC(WTE,I,T)=e=
wtecc(WTE,I,'RECY')*sh(I,'BMW',T)*(W('BMW',WTE,T)+WTS(WTE,T));
EQ_ELPROD(WTE,T)..
ELPROD(WTE,T)=e=el_eff*(DFINWTE(WTE,T)+NCVMWWTE(WTE,T));
EQ_WTEEXIST(WTE,T)..    INPROC(WTE,T) =l=
sum(TT$(ord(TT)<=ord(T)), CAP(WTE,TT));

EQ_BALWLDF1(P,T).. WLDF(P,'LDF1',T)=e=OUTPROC(P,'RESD',T);
EQ_BALWLDF2(WTE,T)..
WLDF(WTE,'LDF2',T)=e=sum(I,wtecc(WTE,I,'RESDH')*(SUM(MBT,dfmbt(I,
MBT,T)*DERFMBTWTE(MBT,WTE,T))+

SUM(BD,dfbd(I,BD,T)*DERFBDWTE(BD,WTE,T))+

sh(I,'BMW',T)*(W('BMW',WTE,T)+WTS(WTE,T))));
EQ_INLDF(T)..
INPROC('LDF1',T)=e=sum(P,WLDF(P,'LDF1',T))+W('BMW','LDF1',T)+WTS(
'LDF1',T);
EQ_INHZLDF(T)..  INPROC('LDF2',T)=e=sum(WTE,WLDF(WTE,'LDF2',T));
EQ_OUTLDF(LDF,O,T).. OUTPROC(LDF,O,T)=e= 0;
EQ_RECLDF(LDF,I,T).. RECPROC(LDF,I,T)=e= 0;
EQ_LDFEXIST(LDF,T)..  INPROC(LDF,T)*yp =l= CAP(LDF,T);

*****************************************************************
*****************************************************************
****
* The following is for landfill CH4 emissions
EQ_FOOD1_TO_LDF(T).. FOOD1LDF(T)=e=
sum((LDFOOD,TSR),tsrcc(TSR,LDFOOD,'RESD')*sum(J,sh(LDFOOD,J,T)*ln
k(TSR,J)*W(J,TSR,T)))+

sum((LDFOOD,TSG),tsgcc(TSG,LDFOOD,'RESD')*sum(J,sh(LDFOOD,J,T)*ln
k(TSG,J)*W(J,TSG,T)))+
                                  sum((LDFOOD,CMP),(1-
cmpcoef(LDFOOD,CMP))*cmpcc(CMP,LDFOOD,'RESD')*sum(J,sh(LDFOOD,J,T
)*lnk(CMP,J)*W(J,CMP,T)))+
```

```
                                  sum((LDFOOD,AD),(1-
adcoef(LDFOOD,AD))*adcc(AD,LDFOOD,'RESD')*sum(J,sh(LDFOOD,J,T)*ln
k(AD,J)*W(J,AD,T)))+

sum((LDFOOD,MRF),mrfcc(MRF,LDFOOD,'RESD')*sh(LDFOOD,'BRC',T)*(W('
BRC',MRF,T)+WTS(MRF,T)))+
                                  sum((LDFOOD,MBT),(1-
mbtcoef(LDFOOD,MBT))*mbtcc(MBT,LDFOOD,'RESD')*sh(LDFOOD,'BMW',T)*
(W('BMW',MBT,T)+WTS(MBT,T)))+

sum((LDFOOD,BD),bdcc(BD,LDFOOD,'RESD')*sh(LDFOOD,'BMW',T)*(W('BMW
',BD,T)+WTS(BD,T)))+

sum((LDFOOD,WTE),wtecc(WTE,LDFOOD,'RESD')*sh(LDFOOD,'BMW',T)*(W('
BMW',WTE,T)+WTS(WTE,T)))+
                                  sum((LDFOOD,LDF),
sh(LDFOOD,'BMW',T)*lnk(LDF,'BMW')*(W('BMW',LDF,T)+WTS(LDF,T)));


EQ_FOOD2_TO_LDF(T).. FOOD2LDF(T)=e=
sum((LDFOOD,CMP),cmpcoef(LDFOOD,CMP)*cmpcc(CMP,LDFOOD,'RESD')*sum
(J,sh(LDFOOD,J,T)*lnk(CMP,J)*W(J,CMP,T)))+

sum((LDFOOD,AD),adcoef(LDFOOD,AD)*adcc(AD,LDFOOD,'RESD')*sum(J,sh
(LDFOOD,J,T)*lnk(AD,J)*W(J,AD,T)))+

sum((LDFOOD,MBT),mbtcoef(LDFOOD,MBT)*mbtcc(MBT,LDFOOD,'RESD')*sh(
LDFOOD,'BMW',T)*(W('BMW',MBT,T)+WTS(MBT,T)));

EQ_GARD1_TO_LDF(T).. GARD1LDF(T)=e=
sum(TSR,tsrcc(TSR,'ORGP','RESD')*sum(J,sh('ORGP',J,T)*lnk(TSR,J)*
W(J,TSR,T)))+

sum(TSG,tsgcc(TSG,'ORGP','RESD')*sum(J,sh('ORGP',J,T)*lnk(TSG,J)*
W(J,TSG,T)))+
                                   sum(CMP,(1-
cmpcoef('ORGP',CMP))*cmpcc(CMP,'ORGP','RESD')*sum(J,sh('ORGP',J,T
)*lnk(CMP,J)*W(J,CMP,T)))+
                                  sum(AD,(1-
adcoef('ORGP',AD))*adcc(AD,'ORGP','RESD')*sum(J,sh('ORGP',J,T)*ln
k(AD,J)*W(J,AD,T)))+

sum(MRF,mrfcc(MRF,'ORGP','RESD')*sh('ORGP','BRC',T)*(W('BRC',MRF,
T)+WTS(MRF,T)))+
                                  sum(MBT,(1-
mbtcoef('ORGP',MBT))*mbtcc(MBT,'ORGP','RESD')*sh('ORGP','BMW',T)*
(W('BMW',MBT,T)+WTS(MBT,T)))+

sum(BD,bdcc(BD,'ORGP','RESD')*sh('ORGP','BMW',T)*(W('BMW',BD,T)+W
TS(BD,T)))+

sum(WTE,wtecc(WTE,'ORGP','RESD')*sh('ORGP','BMW',T)*(W('BMW',WTE,
T)+WTS(WTE,T)))+
                                  sum(LDF,
sh('ORGP','BMW',T)*lnk(LDF,'BMW')*(W('BMW',LDF,T)+WTS(LDF,T)));
```

```
EQ_GARD2_TO_LDF(T).. GARD2LDF(T)=e=
sum(CMP,cmpcoef('ORGP',CMP)*cmpcc(CMP,'ORGP','RESD')*sum(J,sh('OR
GP',J,T)*lnk(CMP,J)*W(J,CMP,T)))+

sum(AD,adcoef('ORGP',AD)*adcc(AD,'ORGP','RESD')*sum(J,sh('ORGP',J
,T)*lnk(AD,J)*W(J,AD,T)))+

sum(MBT,mbtcoef('ORGP',MBT)*mbtcc(MBT,'ORGP','RESD')*sh('ORGP','B
MW',T)*(W('BMW',MBT,T)+WTS(MBT,T)));

EQ_PAP1_TO_LDF(T).. PAP1LDF(T)=e=
sum((LDFPAP,TSR),tsrcc(TSR,LDFPAP,'RESD')*sum(J,sh(LDFPAP,J,T)*ln
k(TSR,J)*W(J,TSR,T)))+

sum((LDFPAP,TSG),tsgcc(TSG,LDFPAP,'RESD')*sum(J,sh(LDFPAP,J,T)*ln
k(TSG,J)*W(J,TSG,T)))+
                                    sum((LDFPAP,CMP),(1-
cmpcoef(LDFPAP,CMP))*cmpcc(CMP,LDFPAP,'RESD')*sum(J,sh(LDFPAP,J,T
)*lnk(CMP,J)*W(J,CMP,T)))+
                                   sum((LDFPAP,AD),(1-
adcoef(LDFPAP,AD))*adcc(AD,LDFPAP,'RESD')*sum(J,sh(LDFPAP,J,T)*ln
k(AD,J)*W(J,AD,T)))+

sum((LDFPAP,MRF),mrfcc(MRF,LDFPAP,'RESD')*sh(LDFPAP,'BRC',T)*(W('
BRC',MRF,T)+WTS(MRF,T)))+
                                   sum((LDFPAP,MBT),(1-
mbtcoef(LDFPAP,MBT))*mbtcc(MBT,LDFPAP,'RESD')*sh(LDFPAP,'BMW',T)*
(W('BMW',MBT,T)+WTS(MBT,T)))+

sum((LDFPAP,BD),bdcc(BD,LDFPAP,'RESD')*sh(LDFPAP,'BMW',T)*(W('BMW
',BD,T)+WTS(BD,T)))+

sum((LDFPAP,WTE),wtecc(WTE,LDFPAP,'RESD')*sh(LDFPAP,'BMW',T)*(W('
BMW',WTE,T)+WTS(WTE,T)))+
                                   sum((LDFPAP,LDF),
sh(LDFPAP,'BMW',T)*lnk(LDF,'BMW')*(W('BMW',LDF,T)+WTS(LDF,T)));

EQ_PAP2_TO_LDF(T).. PAP2LDF(T)=e=
sum((LDFPAP,CMP),cmpcoef(LDFPAP,CMP)*cmpcc(CMP,LDFPAP,'RESD')*sum
(J,sh(LDFPAP,J,T)*lnk(CMP,J)*W(J,CMP,T)))+

sum((LDFPAP,AD),adcoef(LDFPAP,AD)*adcc(AD,LDFPAP,'RESD')*sum(J,sh
(LDFPAP,J,T)*lnk(AD,J)*W(J,AD,T)))+

sum((LDFPAP,MBT),mbtcoef(LDFPAP,MBT)*mbtcc(MBT,LDFPAP,'RESD')*sh(
LDFPAP,'BMW',T)*(W('BMW',MBT,T)+WTS(MBT,T)));

EQ_WDS1_TO_LDF(T).. WDS1LDF(T)=e=
sum((LDFLWT,TSR),tsrcc(TSR,LDFLWT,'RESD')*sum(J,sh(LDFLWT,J,T)*ln
k(TSR,J)*W(J,TSR,T)))+

sum((LDFLWT,TSG),tsgcc(TSG,LDFLWT,'RESD')*sum(J,sh(LDFLWT,J,T)*ln
k(TSG,J)*W(J,TSG,T)))+
                                    sum((LDFLWT,CMP),(1-
cmpcoef(LDFLWT,CMP))*cmpcc(CMP,LDFLWT,'RESD')*sum(J,sh(LDFLWT,J,T
)*lnk(CMP,J)*W(J,CMP,T)))+
```

```
                                    sum((LDFLWT,AD),(1-
adcoef(LDFLWT,AD))*adcc(AD,LDFLWT,'RESD')*sum(J,sh(LDFLWT,J,T)*ln
k(AD,J)*W(J,AD,T)))+

sum((LDFLWT,MRF),mrfcc(MRF,LDFLWT,'RESD')*sh(LDFLWT,'BRC',T)*(W('
BRC',MRF,T)+WTS(MRF,T)))+
                                    sum((LDFLWT,MBT),(1-
mbtcoef(LDFLWT,MBT))*mbtcc(MBT,LDFLWT,'RESD')*sh(LDFLWT,'BMW',T)*
(W('BMW',MBT,T)+WTS(MBT,T)))+

sum((LDFLWT,BD),bdcc(BD,LDFLWT,'RESD')*sh(LDFLWT,'BMW',T)*(W('BMW
',BD,T)+WTS(BD,T)))+

sum((LDFLWT,WTE),wtecc(WTE,LDFLWT,'RESD')*sh(LDFLWT,'BMW',T)*(W('
BMW',WTE,T)+WTS(WTE,T)))+
                                    sum((LDFLWT,LDF),
sh(LDFLWT,'BMW',T)*lnk(LDF,'BMW')*(W('BMW',LDF,T)+WTS(LDF,T)));

EQ_WDS2_TO_LDF(T).. WDS2LDF(T)=e=
sum((LDFLWT,CMP),cmpcoef(LDFLWT,CMP)*cmpcc(CMP,LDFLWT,'RESD')*sum
(J,sh(LDFLWT,J,T)*lnk(CMP,J)*W(J,CMP,T)))+

sum((LDFLWT,AD),adcoef(LDFLWT,AD)*adcc(AD,LDFLWT,'RESD')*sum(J,sh
(LDFLWT,J,T)*lnk(AD,J)*W(J,AD,T)))+

sum((LDFLWT,MBT),mbtcoef(LDFLWT,MBT)*mbtcc(MBT,LDFLWT,'RESD')*sh(
LDFLWT,'BMW',T)*(W('BMW',MBT,T)+WTS(MBT,T)));

EQ_TXT1_TO_LDF(T).. TXT1LDF(T)=e=
sum(TSR,tsrcc(TSR,'LWTX','RESD')*sum(J,sh('LWTX',J,T)*lnk(TSR,J)*
W(J,TSR,T)))+

sum(TSG,tsgcc(TSG,'LWTX','RESD')*sum(J,sh('LWTX',J,T)*lnk(TSG,J)*
W(J,TSG,T)))+
                                     sum(CMP,(1-
cmpcoef('LWTX',CMP))*cmpcc(CMP,'LWTX','RESD')*sum(J,sh('LWTX',J,T
)*lnk(CMP,J)*W(J,CMP,T)))+
                                    sum(AD,(1-
adcoef('LWTX',AD))*adcc(AD,'LWTX','RESD')*sum(J,sh('LWTX',J,T)*ln
k(AD,J)*W(J,AD,T)))+

sum(MRF,mrfcc(MRF,'LWTX','RESD')*sh('LWTX','BRC',T)*(W('BRC',MRF,
T)+WTS(MRF,T)))+
                                    sum(MBT,(1-
mbtcoef('LWTX',MBT))*mbtcc(MBT,'LWTX','RESD')*sh('LWTX','BMW',T)*
(W('BMW',MBT,T)+WTS(MBT,T)))+

sum(BD,bdcc(BD,'LWTX','RESD')*sh('LWTX','BMW',T)*(W('BMW',BD,T)+W
TS(BD,T)))+

sum(WTE,wtecc(WTE,'LWTX','RESD')*sh('LWTX','BMW',T)*(W('BMW',WTE,
T)+WTS(WTE,T)))+
                                    sum(LDF,
sh('LWTX','BMW',T)*lnk(LDF,'BMW')*(W('BMW',LDF,T)+WTS(LDF,T)));

EQ_TXT2_TO_LDF(T).. TXT2LDF(T)=e=
sum(CMP,cmpcoef('LWTX',CMP)*cmpcc(CMP,'LWTX','RESD')*sum(J,sh('LW
TX',J,T)*lnk(CMP,J)*W(J,CMP,T)))+
```

```
sum(AD,adcoef('LWTX',AD)*adcc(AD,'LWTX','RESD')*sum(J,sh('LWTX',J
,T)*lnk(AD,J)*W(J,AD,T)))+

sum(MBT,mbtcoef('LWTX',MBT)*mbtcc(MBT,'LWTX','RESD')*sh('LWTX','B
MW',T)*(W('BMW',MBT,T)+WTS(MBT,T)));

EQ_LDF_CH4_FOOD(T)..  LDF_CH4_FOOD(T)=e= sum(TT$(ord(TT)<=
ord(T)), (ch4ldf('fud1',T-(ord(TT)-
1))*FOOD1LDF(TT)+ch4ldf('fud2',T-(ord(TT)-1))*FOOD2LDF(TT)));
EQ_LDF_CH4_GARD(T)..  LDF_CH4_GARD(T)=e= sum(TT$(ord(TT)<=
ord(T)), (ch4ldf('grd1',T-(ord(TT)-
1))*GARD1LDF(TT)+ch4ldf('grd2',T-(ord(TT)-1))*GARD2LDF(TT)));
EQ_LDF_CH4_PAP(T)..   LDF_CH4_PAP(T)=e=  sum(TT$(ord(TT)<=
ord(T)), (ch4ldf('pap1',T-(ord(TT)-1))*PAP1LDF(TT)
+ch4ldf('pap2',T-(ord(TT)-1))*PAP2LDF(TT)));
EQ_LDF_CH4_WDS(T)..   LDF_CH4_WDS(T)=e=  sum(TT$(ord(TT)<=
ord(T)), (ch4ldf('wds1',T-(ord(TT)-1))*WDS1LDF(TT)
+ch4ldf('wds2',T-(ord(TT)-1))*WDS2LDF(TT)));
EQ_LDF_CH4_TXT(T)..   LDF_CH4_TXT(T)=e=  sum(TT$(ord(TT)<=
ord(T)), (ch4ldf('txt1',T-(ord(TT)-1))*TXT1LDF(TT)
+ch4ldf('txt2',T-(ord(TT)-1))*TXT2LDF(TT)));

*****************************************************************
*****************************************************************
*****************
* The following is for calculating ALL emissions
EQ_EM_DIES(EMS,T).. EM_DIES(EMS,T)*1000=e= sum(P,
spcdl(P)*dens('DSL')*efdlproc(EMS)*INPROC(P,T));
EQ_EM_NATG(EMS,T).. EM_NATG(EMS,T)*1000=e= sum(P,
spcng(P)*efngproc(EMS)*INPROC(P,T));
EQ_EM_ELEC(EMS,T).. EM_ELEC(EMS,T)*1000=e= sum(P,
spcel(P)*efelproc(EMS)*INPROC(P,T));

EQ_EM_PROC(EMS,T).. EM_PROC(EMS,T)=e=sum(P,
efprocems(P,EMS)*INPROC(P,T));

EQ_EM_WTE_CO2(T)..
EM_WTE_CO2(T)=e=sum(BD,DERFCO2BD(BD,T))+sum(MBT,DERFCO2MBT(MBT,T)
)+ WTECO2MW(T) ;
EQ_EM_WTE_NH3(T)..
EM_WTE_NH3(T)=e=sum(BD,DERFEMSBD(BD,'NH3',T))+sum(MBT,DERFEMSMBT(
MBT,'NH3',T))+ WTEEMSMW('NH3',T) ;
EQ_EM_WTE_PM10(T)..
EM_WTE_PM10(T)=e=sum(BD,DERFEMSBD(BD,'PM10',T))+sum(MBT,DERFEMSMB
T(MBT,'PM10',T))+ WTEEMSMW('PM10',T) ;
EQ_EM_WTE_SOX(T)..
EM_WTE_SOX(T)=e=sum(BD,DERFEMSBD(BD,'SOX',T))+sum(MBT,DERFEMSMBT(
MBT,'SOX',T))+ WTEEMSMW('SOX',T) ;
EQ_EM_WTE_NOX(T)..
EM_WTE_NOX(T)=e=sum(BD,DERFEMSBD(BD,'NOX',T))+sum(MBT,DERFEMSMBT(
MBT,'NOX',T))+ WTEEMSMW('NOX',T) ;
EQ_EM_WTE_NMVOC(T)..
EM_WTE_NMVOC(T)=e=sum(BD,DERFEMSBD(BD,'NMVOC',T))+sum(MBT,DERFEMS
MBT(MBT,'NMVOC',T))+ WTEEMSMW('NMVOC',T) ;
EQ_EM_WTE_PCDD(T)..
EM_WTE_PCDD(T)=e=sum(BD,DERFEMSBD(BD,'PCDD',T))+sum(MBT,DERFEMSMB
T(MBT,'PCDD',T))+ WTEEMSMW('PCDD',T) ;
```

```
EQ_EM_TRANS(EMS,T).. EM_TRANS(EMS,T) =e=
sum(TFL,emtrans(EMS,TFL)*(

sum((P,J),sctrw(P,TFL)*dens(TFL)*dpybp(P)*W(J,P,T))+

sum((P,LDF),sctrwldf(P,TFL)*dens(TFL)*dpypl(P,LDF)*WLDF(P,LDF,T))
+

sum(P,sctrwts(P,TFL)*dens(TFL)*dpytsp(P)*WTS(P,T))+

sctrwbdwte(TFL)*dens(TFL)*dpybdwte*sum((BD,WTE),WBDWTE(BD,WTE,T))
+

sctrwmbtwte(TFL)*dens(TFL)*dpymbtwte*sum((MBT,WTE),WMBTWTE(MBT,WT
E,T))
                                  ));

*total quantities of emissions in tons/year except from PCDD
which is kg/year
EQ_EM_NH3(T)..
EM_NH3(T)*10**3=e=EM_DIES('NH3',T)+EM_NATG('NH3',T)+EM_ELEC('NH3'
,T)+EM_PROC('NH3',T)+EM_TRANS('NH3',T)+EM_WTE_NH3(T);
EQ_EM_PM10(T)..
EM_PM10(T)*10**3=e=EM_DIES('PM10',T)+EM_NATG('PM10',T)+EM_ELEC('P
M10',T)+EM_PROC('PM10',T)+EM_TRANS('PM10',T)+EM_WTE_PM10(T);
EQ_EM_SOX(T)..
EM_SOX(T)*10**3=e=EM_DIES('SOX',T)+EM_NATG('SOX',T)+EM_ELEC('SOX'
,T)+EM_PROC('SOX',T)+EM_TRANS('SOX',T)+EM_WTE_SOX(T);
EQ_EM_NOX(T)..
EM_NOX(T)*10**3=e=EM_DIES('NOX',T)+EM_NATG('NOX',T)+EM_ELEC('NOX'
,T)+EM_PROC('NOX',T)+EM_TRANS('NOX',T)+EM_WTE_NOX(T);
EQ_EM_NMVOC(T)..
EM_NMVOC(T)*10**3=e=EM_DIES('NMVOC',T)+EM_NATG('NMVOC',T)+EM_ELEC
('NMVOC',T)+EM_PROC('NMVOC',T)+EM_TRANS('NMVOC',T)+EM_WTE_NMVOC(T
);
EQ_EM_PCDD(T)..
EM_PCDD(T)=e=EM_DIES('PCDD',T)+EM_NATG('PCDD',T)+EM_ELEC('PCDD',T
)+10**(-9)*EM_PROC('PCDD',T)+EM_TRANS('PCDD',T)+10**(-
6)*EM_WTE_PCDD(T);


*****************************************************************
*****************************************************************
*****************
* The following is for calculating recycling rates and compliance
with legislation

EQ_BDEGR_TO_LDF(T).. BDEGRLDF(T)=e=
sum((BDEGR,TSR),tsrcc(TSR,BDEGR,'RESD')*sum(J,sh(BDEGR,J,T)*lnk(T
SR,J)*W(J,TSR,T)))+

sum((BDEGR,TSG),tsgcc(TSG,BDEGR,'RESD')*sum(J,sh(BDEGR,J,T)*lnk(T
SG,J)*W(J,TSG,T)))+
                                  sum((BDEGR,CMP),(1-
cmpcoef(BDEGR,CMP))*cmpcc(CMP,BDEGR,'RESD')*sum(J,sh(BDEGR,J,T)*l
nk(CMP,J)*W(J,CMP,T)))+
```

```
                                  sum((BDEGR,AD),(1-
adcoef(BDEGR,AD))*adcc(AD,BDEGR,'RESD')*sum(J,sh(BDEGR,J,T)*lnk(A
D,J)*W(J,AD,T)))+

sum((BDEGR,MRF),mrfcc(MRF,BDEGR,'RESD')*sh(BDEGR,'BRC',T)*(W('BRC
',MRF,T)+WTS(MRF,T)))+
                                  sum((BDEGR,MBT),(1-
mbtcoef(BDEGR,MBT))*mbtcc(MBT,BDEGR,'RESD')*sum(J,sh(BDEGR,J,T)*l
nk(MBT,J)*W(J,MBT,T)))+

sum((BDEGR,BD),bdcc(BD,BDEGR,'RESD')*sh(BDEGR,'BMW',T)*(W('BMW',B
D,T)+WTS(BD,T)))+

sum((BDEGR,WTE),wtecc(WTE,BDEGR,'RESD')*sh(BDEGR,'BMW',T)*(W('BMW
',WTE,T)+WTS(WTE,T)))+
                                  sum((BDEGR,LDF),
sh(BDEGR,'BMW',T)*lnk(LDF,'BMW')*(W('BMW',LDF,T)+WTS(LDF,T)));

EQ_REC_TO_ENRG(T).. RECTOENRG(T)=e=
sum((RECYC,TSR),tsrcc(TSR,RECYC,'DERF')*sum(J,sh(RECYC,J,T)*lnk(T
SR,J)*W(J,TSR,T)))+

sum((RECYC,TSG),tsgcc(TSG,RECYC,'DERF')*sum(J,sh(RECYC,J,T)*lnk(T
SG,J)*W(J,TSG,T)))+

sum((RECYC,CMP),cmpcc(CMP,RECYC,'DERF')*sum(J,sh(RECYC,J,T)*lnk(C
MP,J)*W(J,CMP,T)))+

sum((RECYC,AD),adcc(AD,RECYC,'DERF')*sum(J,sh(RECYC,J,T)*lnk(AD,J
)*W(J,AD,T)))+

sum((RECYC,MRF),mrfcc(MRF,RECYC,'DERF')*sh(RECYC,'BRC',T)*(W('BRC
',MRF,T)+WTS(MRF,T)))+

sum((RECYC,MBT),mbtcc(MBT,RECYC,'DERF')*sh(RECYC,'BMW',T)*(W('BMW
',MBT,T)+WTS(MBT,T)))+

sum((RECYC,BD),bdcc(BD,RECYC,'DERF')*sh(RECYC,'BMW',T)*(W('BMW',B
D,T)+WTS(BD,T)))+

sum((RECYC,WTE),wtecc(WTE,RECYC,'DERF')*sh(RECYC,'BMW',T)*(W('BMW
',WTE,T)+WTS(WTE,T)))+

sum((RECYC,TSR),tsrcc(TSR,RECYC,'BIOG')*sum(J,sh(RECYC,J,T)*lnk(T
SR,J)*W(J,TSR,T)))+

sum((RECYC,TSG),tsgcc(TSG,RECYC,'BIOG')*sum(J,sh(RECYC,J,T)*lnk(T
SG,J)*W(J,TSG,T)))+

sum((RECYC,CMP),cmpcc(CMP,RECYC,'BIOG')*sum(J,sh(RECYC,J,T)*lnk(C
MP,J)*W(J,CMP,T)))+

sum((RECYC,AD),adcc(AD,RECYC,'BIOG')*sum(J,sh(RECYC,J,T)*lnk(AD,J
)*W(J,AD,T)))+

sum((RECYC,MRF),mrfcc(MRF,RECYC,'BIOG')*sh(RECYC,'BRC',T)*(W('BRC
',MRF,T)+WTS(MRF,T)))+
```

```
sum((RECYC,MBT),mbtcc(MBT,RECYC,'BIOG')*sh(RECYC,'BMW',T)*(W('BMW
',MBT,T)+WTS(MBT,T)))+

sum((RECYC,BD),bdcc(BD,RECYC,'BIOG')*sh(RECYC,'BMW',T)*(W('BMW',B
D,T)+WTS(BD,T)))+

sum((RECYC,WTE),wtecc(WTE,RECYC,'BIOG')*sh(RECYC,'BMW',T)*(W('BMW
',WTE,T)+WTS(WTE,T)))+
                                sum((RECYC,WTE),
sh(RECYC,'BMW',T)*lnk(WTE,'BMW')*(W('BMW',WTE,T)+WTS(WTE,T)));

*constraints for recycling targets
EQ_REC_RATE(I,T).. RECRAT(I,T)*tquant(I,T)=e=sum(P,
RECPROC(P,I,T))  ;
RECRAT.LO(I,T)=rectarget(I,T);
*packing recyclables
EQ_REC_RATE_WOOD(T).. (rr_wood(T) - L_WOOD(T))*tquant('LWWP',T)
=l= sum(P, RECPROC(P,'LWWP',T));
EQ_REC_RATE_PAPER(T).. (rr_paper(T) -
L_PAPER(T))*sum(PAP,tquant(PAP,T)) =l= sum((P,PAP),
RECPROC(P,PAP,T));
EQ_REC_RATE_GLASS(T).. (rr_glass(T) -
L_GLASS(T))*sum(GLS,tquant(GLS,T)) =l= sum((P,GLS),
RECPROC(P,GLS,T));
EQ_REC_RATE_METAL(T).. (rr_metal(T) -
L_METAL(T))*sum(MET,tquant(MET,T)) =l= sum((P,MET),
RECPROC(P,MET,T));
EQ_REC_RATE_PLASTIC(T).. (rr_plast(T) -
L_PLAST(T))*sum(PLA,tquant(PLA,T)) =l= sum((P,PLA),
RECPROC(P,PLA,T));
*total recyclables
EQ_REC_RATE_PAPERTOT(T).. (rr_papertot(T) -
L_PAPERTOT(T))*sum(PAPTOT,tquant(PAPTOT,T)) =l= sum((P,PAPTOT),
RECPROC(P,PAPTOT,T));
EQ_REC_RATE_GLASSTOT(T).. (rr_glasstot(T) -
L_GLASSTOT(T))*sum(GLSTOT,tquant(GLSTOT,T)) =l= sum((P,GLSTOT),
RECPROC(P,GLSTOT,T));
EQ_REC_RATE_METALTOT(T).. (rr_metaltot(T) -
L_METALTOT(T))*sum(METTOT,tquant(METTOT,T)) =l= sum((P,METTOT),
RECPROC(P,METTOT,T));
EQ_REC_RATE_PLASTICTOT(T).. (rr_plasttot(T) -
L_PLASTTOT(T))*sum(PLATOT,tquant(PLATOT,T)) =l= sum((P,PLATOT),
RECPROC(P,PLATOT,T));
* recycle and energy
EQ_RATE_REC_ENRG(T).. (p_recenrg(T) -
L_RECENRG(T))*sum(RECYC,tquant(RECYC,T))=l= sum((P,RECYC),
RECPROC(P,RECYC,T))+ RECTOENRG(T);
* total packing
EQ_RATE_REC_PACK(T)..
REC_RATE_PACK(T)*sum(RECYC,tquant(RECYC,T))=e= sum((P,RECYC),
RECPROC(P,RECYC,T));

REC_RATE_PACK.LO(T)=(1-rectargmaxdev)*rr_pack_min(T);
REC_RATE_PACK.UP(T)=(1+rectargmaxdev)*rr_pack_max(T);
EQ_LAMDA.. LAMDA =e= 100*sum(T,
(L_WOOD(T)+L_PAPER(T)+L_GLASS(T)+L_METAL(T)+L_PLAST(T)))/(CARD(T)
*5) + 10**(-9)*NPC;
```

```
L_RECENRG.UP(T) = rectargmaxdev*p_recenrg(T); //0;
L_WOOD.up(T)  = rectargmaxdev*rr_wood(T);   //0;
L_PAPER.up(T) = rectargmaxdev*rr_paper(T);  //0;
L_GLASS.up(T) = rectargmaxdev*rr_glass(T);  //0;
L_METAL.up(T) = rectargmaxdev*rr_metal(T);  //0;
L_PLAST.up(T) = rectargmaxdev*rr_plast(T);  //0;

* regulation for Biodegradables going to landfill in relation to
1995 amounts
BDEGRLDF.UP(T)=bdegrprop(T)*bdegrldf1995*(1+rectargmaxdev);

*****************************************************************
*****************************************************************
*****************
* The following is for calculating costs

EQ_ANNBNCAPEX(T)..  1000*ANNBNCAPEX(T)=e=
sum(J,bfcost(J)*INBIN(J,T));
EQ_ANNTRCAPEX(T)..  1000*ANNTRCAPEX(T)=e=
SUM(TT$(ord(TT)<=ord(T)),sum((P,J),tc(P)*W(J,P,TT)))+

SUM(TT$(ord(TT)<=ord(T)),sum((P,LDF),tcldf(P,LDF)*WLDF(P,LDF,TT))
)+

SUM(TT$(ord(TT)<=ord(T)),sum(P,tcts(P)*WTS(P,TT)))+

tcbdwte*SUM(TT$(ord(TT)<=ord(T)),sum((BD,WTE),
WBDWTE(BD,WTE,TT)))+

tcmbtwte*SUM(TT$(ord(TT)<=ord(T)),sum((MBT,WTE),WMBTWTE(MBT,WTE,T
T)));
EQ_ANNPRCAPEX(T)..  1000*ANNPRCAPEX(T)=e=
sum(TT$(ord(TT)<=ord(T)),sum(P,
(aicintercept(P)*B(P,TT)+aicslope(P)*CAP(P,TT))));

EQ_ANNTROPEX(T)..   1000*ANNTROPEX(T)=e=
sum((P,J),cpkmbp(P)*dpybp(P)*W(J,P,T))+

sum((P,LDF),cpkmpl(P)*dpypl(P,LDF)*WLDF(P,LDF,T))+

sum(P,cpkmts(P)*dpytsp(P)*WTS(P,T))+

cpkmbdwte*dpybdwte*sum((BD,WTE),WBDWTE(BD,WTE,T))+

cpkmmbtwte*dpymbtwte*sum((MBT,WTE),WMBTWTE(MBT,WTE,T));
EQ_ANNPROPEX(T)..  1000*ANNPROPEX(T)=e=
sum(TT$(ord(TT)<=ord(T)),sum(P$(not LDF(P)),
(aocintercept(P)*B(P,TT)+aocslope(P)*CAP(P,TT))))
                                          +
sum(LDF(P),(aocintercept(P)*B(P,T)+aocslope(P)*CAP(P,T))) +sum(P,
pvcost(P)*INPROC(P,T));

EQ_AMMINCMREC(T).. 1000*ANNINCMREC(T)=e=
sum((I,P),price_i(I)*RECPROC(P,I,T))+

sum((O,P),price_o(O)*OUTPROC(P,O,T))+
                                    derfprice*DERFSELL(T);
```

```
EQ_AMMINCMEL(T).. 1000*ANNINCMEL(T)=e=
(ELPROD_MBT(T)+ELPROD_AD(T))*el_price_biog +
sum(WTE,ELPROD(WTE,T))*el_price ;

EQ_ANNCOST(T)..
ANNCOST(T)=e=ANNBNCAPEX(T)+ANNTRCAPEX(T)+ANNPRCAPEX(T)+ANNTROPEX(
T)+ANNPROPEX(T)-ANNINCMREC(T)-
ANNINCMEL(T)+excostflag*ANNEXCOST(T);
EQ_ANNEXCOST(T).. 1000*ANNEXCOST(T)=e=
1000*excostco2eq*(CO2EQENRGY(T)+CO2EQPROC(T)+CO2EQTRANS(T)+CO2EQL
DF(T)/card(T))+
                                excostWTE*(sum(MBT,
NCVMBTDF(MBT,T))+sum(BD,NCVBDDF(BD,T))+sum(WTE,NCVMWWTE(WTE,T)))+

excostldf*INPROC('LDF1',T)+excosthzldf*INPROC('LDF2',T)+
                                sum(P,excostql(P)*INPROC(P,T))-

exbenefitel*(ELPROD_MBT(T)+ELPROD_AD(T) +
sum(WTE,ELPROD(WTE,T)))-
                                exbenefitcmp*(sum(P,
OUTPROC(P,'OCMP',T))+sum(P,OUTPROC(P,'STOR',T)));

EQ_INVBN(T)..
1000*crfbn*INVBN(T)=e=sum(J,bfcost(J)*INBIN(J,T));
EQ_INVTR1..   1000*crftr*INVTR('1') =e=
sum((P,J),tc(P)*W(J,P,'1'))+
sum((P,LDF),tcldf(P,LDF)*WLDF(P,LDF,'1'))+sum(P,tcts(P)*WTS(P,'1'
))+
                                   tcbdwte*sum((BD,WTE),
WBDWTE(BD,WTE,'1'))+tcmbtwte*sum((MBT,WTE),WMBTWTE(MBT,WTE,'1'));
EQ_INVTR(T)$(ord(T)>1).. 1000*crftr*INVTR(T) =e=
sum((P,J),tc(P)*(W(J,P,T)-W(J,P,T-1)))+
sum((P,LDF),tcldf(P,LDF)*(WLDF(P,LDF,T)-WLDF(P,LDF,T-1)))+
                                         sum(P,tcts(P)*(WTS(P,T)-
WTS(P,T-1)))+
                                        tcbdwte*sum((BD,WTE),
(WBDWTE(BD,WTE,T)-WBDWTE(BD,WTE,T-1)))+

tcmbtwte*sum((MBT,WTE),(WMBTWTE(MBT,WTE,T)-WMBTWTE(MBT,WTE,T-
1)));
EQ_INVPR(T)..  1000*crfpr*INVPR(T)=e= sum(P,
(aicintercept(P)*B(P,T)+aicslope(P)*CAP(P,T)));

*****************************************************************
*****************************************************************
*****************
* The following is for calculating CO2 equivalent

EQ_CO2EQENRGY(T).. CO2EQENRGY(T)*10**6 =e= EM_DIES('CO2',T) +
EM_NATG('CO2',T)+ EM_ELEC('CO2',T)+
                                       21*(EM_DIES('CH4',T) +
EM_NATG('CH4',T)+ EM_ELEC('CH4',T)) +
                                       310* (EM_DIES('N2O',T) +
EM_NATG('N2O',T)+ EM_ELEC('N2O',T));
EQ_CO2EQPROC(T)..  CO2EQPROC(T)*10**6 =e= EM_PROC('CO2',T)+
EM_WTE_CO2(T)+
                                     21*(EM_PROC('CH4',T)+
EM_WTE_CH4(T))+
```

```
                                    310*(EM_PROC('N2O',T)+
EM_WTE_N2O(T));
EQ_CO2EQTRANS(T).. CO2EQTRANS(T)*10**6 =e=
EM_TRANS('CO2',T)+21*EM_TRANS('CH4',T)+310*EM_TRANS('N2O',T);
EQ_CO2EQLDF(T).. 10**3*CO2EQLDF(T)=e= (1-
flareprop)*21*(LDF_CH4_FOOD(T)+LDF_CH4_GARD(T)+LDF_CH4_PAP(T)+LDF
_CH4_WDS(T)+LDF_CH4_TXT(T)+LDF_CH4_NAP(T));
EQ_CO2EQLDF20_40..  10**3*CO2LDF20_40=e=(1-flareprop2)*21*sum(T,
FOOD1LDF(T)*ch4ldf_upto40('FUD1',T)+FOOD2LDF(T)*ch4ldf_upto40('FU
D2',T)+

GARD1LDF(T)*ch4ldf_upto40('GRD1',T)+GARD2LDF(T)*ch4ldf_upto40('GR
D2',T)+

PAP1LDF(T)*ch4ldf_upto40('PAP1',T)+PAP2LDF(T)*ch4ldf_upto40('PAP2
',T)+

WDS1LDF(T)*ch4ldf_upto40('WDS1',T)+WDS2LDF(T)*ch4ldf_upto40('WDS2
',T)+

TXT1LDF(T)*ch4ldf_upto40('TXT1',T)+TXT2LDF(T)*ch4ldf_upto40('TXT2
',T));

*****************************************************************
*****************************************************************
*****************

EQ_TOTCO2..  TOTCO2 =e=
sum(T,yp*(CO2EQENRGY(T)+CO2EQPROC(T)+CO2EQTRANS(T))+CO2EQLDF(T))+
CO2LDF20_40 + 10**(-7)*NPC ;  //+10**(-7)*NPC;
EQ_NPC_EXC_20_40.. NPC_EXC_20_40 =e=
(excostco2eq*CO2LDF20_40)/(1+df)**30 ;       // calculation of
external cost for the 20_40 emissions  centered to year 30
EQ_NPC_EXC.. NPC_EXC =e=
sum(T,yp*ANNEXCOST(T)*dfc(T))+NPC_EXC_20_40 ;            //
calculation of total external cost (annual external cost and
ternal cost for the 20_40 emissions
EQ_NPC..     NPC =e=
sum(T,yp*ANNCOST(T)*dfc(T))+(excostflag*NPC_EXC_20_40);  //
calculation of total cost (private & external) depending on
excostflag
EQ_NPC_ECON.. NPC_ECON =e= sum(T,yp*(ANNCOST(T)-
excostflag*ANNEXCOST(T))*dfc(T)); //  calculation of private cost
only (ignoring external cost)

obj1.. z('1')=e= NPC;
obj2.. z('2')=e= TOTCO2;

OUTPROC.FX('TS',O,T)= 0;  // output from TS is already taken into
account
RECPROC.FX('TS',I,T)= 0;  // no recycle from TS

* files with the user defined constraints
* existent units - (lower bounds)
$include c:\gams\waste\Attica2\usc_descr.txt
*excluded units (fixed bounds)
$include c:\gams\waste\Attica2\usc_descrexclu.txt
* upper bound for derived fuel sold (upper bound)
```

```
$include c:\gams\waste\Attica2\usc_descrR.txt
* restriction on flows through appropriate bounds
$include c:\gams\waste\Attica2\usc_desflows.txt

W.FX(J,P,T)$(lnk(P,J)=0)=0;
DERFSELL.UP(T) = derfsellup;

model waste /all/;

*-----------------------------------------------------------------
-----------
$STitle eps-constraint method

Set k1(k) the first element of k, km1(k) all but the first
elements of k;
k1(k)$(ord(k)=1) = yes; km1(k)=yes; km1(k1) = no;
Set kk(k)     active objective function in constraint allobj

Parameter
   rhs(k)     right hand side of the constrained obj functions in
eps-constraint
   maxobj(k)  maximum value from the payoff table
   minobj(k)  minimum value from the payoff table

Parameter dir(k) direction of the objective functions
/
1  -1
2  -1
/ ;


Scalar
iter   total number of iterations
infeas total number of infeasibilities
elapsed_time elapsed time for payoff and e-sonstraint
start start time
finish finish time

Variables
   a_objval   auxiliary variable for the objective function
   obj        auxiliary variable during the construction of the
payoff table
Positive Variables
   sl(k)      slack or surplus variables for the eps-constraints
Equations
   con_obj(k) constrained objective functions
   augm_obj   augmented objective function to avoid weakly
efficient solutions
   allobj     all the objective functions in one expression;

con_obj(km1)..   z(km1) - dir(km1)*sl(km1) =e= rhs(km1);

* We optimize the first objective function and put the others as
constraints
* the second term is for avoiding weakly efficient points
augm_obj..
  sum(k1,dir(k1)*z(k1))+1e-3*sum(km1,sl(km1)/(maxobj(km1)-
minobj(km1)+0.001)) =e= a_objval;
```

```
allobj..  sum(kk, dir(kk)*z(kk)) =e= obj;

Model mod_payoff    / waste, allobj / ;
Model mod_epsmethod / waste, con_obj, augm_obj / ;

Parameter
  payoff(k,k)  payoff tables entries;
Alias(k,kp);


File vx  / c:\gams\waste\Attica2\waste_biobj39_Xvalues.out /;
File fx  / c:\gams\waste\Attica2\waste_biobj39_Pareto.out /;

vx.lw = 8;   // label width for vx file

option optcr=0.000;
start=jnow;

* Generate payoff table applying lexicographic optimization
loop(kp,
  kk(kp)=yes;
  repeat
    solve mod_payoff using mip maximizing obj;
    payoff(kp,kk) = z.l(kk);
    z.fx(kk) = z.l(kk)+0.005; // freeze the value of the last
objective optimized
    kk(k++1) = kk(k);   // cycle through the objective functions
  until kk(kp); kk(kp) = no;
* release the fixed values of the objective functions for the new
iteration
  z.up(k) = inf; z.lo(k) =-inf;
);
if (mod_payoff.modelstat<>1 and mod_payoff.modelstat<>8, abort
'no optimal solution for mod_payoff');


PUT fx ' PAYOFF TABLE'/   ;
loop (kp,
        loop(k, put payoff(kp,k):12:2);
        put /;
     );
put fx /;

*display payoff;
minobj(k)=smin(kp,payoff(kp,k));
maxobj(k)=smax(kp,payoff(kp,k));


*$set fname h.%scrext.dat%


$if not set gridpoints $set gridpoints 10
Set g grid points /g0*g%gridpoints%/
    grid(k,g) grid
Parameter
    gridrhs(k,g) rhs of eps-constraint at grid point
    maxg(k) maximum point in grid for objective
```

```
    posg(k) grid position of objective
    firstOffMax, lastZero some counters
    first counter for printing output
    numk(k) ordinal value of k starting with 1
    numg(g) ordinal value of g starting with 0
    step(k) step of grid points in objective functions
    jump(k) jumps in the grid points' traversing
;
lastZero=1; loop(km1, numk(km1)=lastZero; lastZero=lastZero+1);
numg(g) = ord(g)-1;

grid(km1,g) = yes; // Here we could define different grid
intervals for different objectives
maxg(km1) = smax(grid(km1,g), numg(g));
step(km1)=(maxobj(km1)- minobj(km1))/maxg(km1);
gridrhs(grid(km1,g))$(dir(km1)=-1) = maxobj(km1) -
numg(g)/maxg(km1)*(maxobj(km1)- minobj(km1));
gridrhs(grid(km1,g))$(dir(km1)=1) = minobj(km1) +
numg(g)/maxg(km1)*(maxobj(km1)- minobj(km1));
*display gridrhs;

PUT fx ' Grid points'/   ;
loop (g,
        loop(km1, put gridrhs(km1,g):12:2);
        put /;
     );
put fx /;
put fx 'Pareto front with efficient solutions'/;
put fx '    *  Net_Present_Cost_(k€)  CO2_(t)';
put fx '  Net_Present_Private_Cost';
put fx '  Net_Present_External_Cost';
put fx /;

* Walk the grid points and take shortcuts if the model becomes
infeasible
posg(km1) = 0;
iter=0;
infeas=0;


repeat
  rhs(km1) = sum(grid(km1,g)$(numg(g)=posg(km1)),
gridrhs(km1,g));
  solve mod_epsmethod maximizing a_objval using mip;
  iter=iter+1;
  if (mod_epsmethod.modelstat<>1 and mod_epsmethod.modelstat<>8,
// not optimal is in this case infeasible
    infeas=infeas+1;
    put fx iter:5:0, '  infeasible'/;
    lastZero = 0; loop(km1$(posg(km1)>0 and lastZero=0),
lastZero=numk(km1));
    posg(km1)$(numk(km1)<=lastZero) = maxg(km1); // skip all
solves for more demanding values of rhs(km1)
  else
    put fx iter:5:0,' ';
    loop(k, put fx z.l(k):15:2);
    put NPC_ECON.L:15:2;
    put NPC_EXC.L:15:2;
```

```
    put /;
    put vx iter:5:0,' ';
    loop(k, put vx z.l(k):12:2); put /;

put vx 'Annual_cost_per_period_(keuro):' /;
loop(T,
         put vx T.TL:3:0, ANNCOST.L(T):12:0;
*         if (excostflag=1, put vx (ANNCOST.L(T)-
ANNEXCOST.L(T)):12:0)
         put vx /;
     );

put vx 'Net_Present_Cost_for_20_years_(keuro)  : ', NPC.L:12:0/;
put vx 'Total_emissions_CO2-eq_for_20_years(kt): ',
TOTCO2.L:12:0/;
put /;

*$ontext

param_orgldf(T)=BDEGRLDF.L(T)/(bdegrldf1995+0.1);
param_rr_wood(T)=sum(P,
RECPROC.L(P,'LWWP',T))/(tquant('LWWP',T)+0.1);
param_rr_paper(T)=sum((P,PAP), RECPROC.L(P,PAP,T))/
(sum(PAP,tquant(PAP,T))+0.1);
param_rr_glass(T)= sum((P,GLS),
RECPROC.L(P,GLS,T))/(sum(GLS,tquant(GLS,T))+0.1);
param_rr_metal(T)=sum((P,MET),
RECPROC.L(P,MET,T))/(sum(MET,tquant(MET,T))+0.1) ;
param_rr_plast(T)=sum((P,PLA),
RECPROC.L(P,PLA,T))/(sum(PLA,tquant(PLA,T))+0.1);
param_rr_recenrg(T)=(sum((P,RECYC), RECPROC.L(P,RECYC,T))+
RECTOENRG.L(T))/(sum(RECYC,tquant(RECYC,T))+0.1);

param_rr_papertot(T)=sum((P,PAPTOT), RECPROC.L(P,PAPTOT,T))/
(sum(PAPTOT,tquant(PAPTOT,T))+0.1);
param_rr_glasstot(T)= sum((P,GLSTOT),
RECPROC.L(P,GLSTOT,T))/(sum(GLSTOT,tquant(GLSTOT,T))+0.1);
param_rr_metaltot(T)=sum((P,METTOT),
RECPROC.L(P,METTOT,T))/(sum(METTOT,tquant(METTOT,T))+0.1) ;
param_rr_plasttot(T)=sum((P,PLATOT),
RECPROC.L(P,PLATOT,T))/(sum(PLATOT,tquant(PLATOT,T))+0.1);


put vx /;
put vx 'Annual_costs_and_income_by_category_(keuros)'/;
put vx '*****************************************'/;
put vx 'Bins:                          ',loop(T, put
ANNBNCAPEX.L(T):10:0); put /;
put vx 'Transportation_(capacity):   ',loop(T, put
ANNTRCAPEX.L(T):10:0); put /;
put vx 'Transportation_(operation):  ',loop(T, put
ANNTROPEX.L(T):10:0); put /;
put vx 'Processes_(capacity):        ',loop(T, put
ANNPRCAPEX.L(T):10:0); put /;
put vx 'Processes_(operation):       ',loop(T, put
ANNPROPEX.L(T):10:0); put /;
put vx 'Income_from_recycle:         ',loop(T, put
ANNINCMREC.L(T):10:0); put /;
```

```
put vx 'Income_from_electricity:     ',loop(T, put
ANNINCMEL.L(T):10:0); put /;
put vx 'External_cost:               ',loop(T, put
ANNEXCOST.L(T):10:0); put /;
put vx 'Ext_cost_for_next_20_years:  ',NPC_EXC_20_40.L:10:0 /;
put vx 'Derived_fuel_sold_(t):       ',loop(T, put
DERFSELL.L(T):10:0); put /;
put vx /;
put vx 'Investment_costs'/;
put vx '*****************************************'/;
put vx 'Bins:           ',loop(T, put INVBN.L(T):10:0); put /;
put vx 'Transportation: ',loop(T, put (max(INVTR.L(T),0)):10:0);
put /;
put vx 'Processes:      ',loop(T, put INVPR.L(T):10:0); put /;
put vx /;
put vx 'Recycling_rates'/;
put vx '*****************************************'/;
put vx 'wood_packaging:                 ',loop(T, put
param_rr_wood(T):6:2); put /;
put vx 'paper_packaging:                ',loop(T, put
param_rr_paper(T):6:2); put /;
put vx 'glass_packaging:                ',loop(T, put
param_rr_glass(T):6:2); put /;
put vx 'metal_packaging:                ',loop(T, put
param_rr_metal(T):6:2); put /;
put vx 'plastic_packaging:              ',loop(T, put
param_rr_plast(T):6:2); put /;
put vx 'packaging_to_recycle_&_energy:  ',loop(T, put
param_rr_recenrg(T):6:2); put /;
put vx 'paper_total:                    ',loop(T, put
param_rr_papertot(T):6:2); put /;
put vx 'glass_total:                    ',loop(T, put
param_rr_glasstot(T):6:2); put /;
put vx 'metal_total:                    ',loop(T, put
param_rr_metaltot(T):6:2); put /;
put vx 'plastic_total:                  ',loop(T, put
param_rr_plasttot(T):6:2); put /;


*CO2 report

put vx /;
put vx 'Annual_CO2-equivalent_emissions_by category_(kt)'/;
put vx '*****************************************'/;
put vx 'From_energy_in_processes:',loop(T, put
CO2EQENRGY.L(T):10:2); put /;
put vx 'From_processes_(no_LDF): ',loop(T, put
CO2EQPROC.L(T):10:2); put /;
put vx 'From_transportation:     ',loop(T, put
CO2EQTRANS.L(T):10:2); put /;
put vx 'From_Landfill:           ',loop(T, put
(CO2EQLDF.L(T)/yp):10:2); put /;
put vx 'CO2eq_for_next_20_years: ', CO2LDF20_40.L:10:2 /;

put vx /;
put vx 'Load_in_the_bins_(tons)'/;
put vx '***********************************'/;
loop(J,
```

```
     put vx J.TL:5:0,
     loop(T, put INBIN.L(J,T):10:0);
     put /;
     );

put vx /;

*$ontext
put vx /;
put vx 'Capacity_of_processes_(in_tons/year)'/;
put vx '***********************************'/;
loop(P,
     first=1;
     loop(T,
           if(CAP.L(P,T)>1 and first=1,
              put P.tl:5:0,
              loop(TT, put CAP.L(P,TT):10:0);
*             loop(TT, put (100*round(CAP.L(P,TT)/100)):10:0);
              put /;
              first=0;
              );
          );
     );

put vx /;
put vx 'Input_in_processes_(in tons/year)'/;
put vx '***********************************'/;
loop(P,
     first=1;
     loop(T,
           if(CAP.L(P,T)>1 and first=1,
              put P.tl:5:0,
              loop(TT, put INPROC.L(P,TT):10:0);
              put /;
              first=0;
              );
          );
     );
put
'*****************************************************************
*****************'/;
put /;

put vx 'Flows from bin to process - from process to process -
from process to landfill(in tons/year)'/;
put
'*****************************************************************
****************************'/;
loop(J,
     loop(P,
          first=1;
          loop(T,
                if(W.L(J,P,T)>1 and first=1,    // "and first=1"
in order not to repeat the output for all T
                   put "Flow from ", J.tl, " to ", P.tl, " : "
                   loop(TT, put W.L(J,P,TT):10:0);
                   put /;
                   first = 0;
```

```
                    );
                );
            );
        );
*put vx 'Flows from TS to processes(in tons/year)'/;
loop(P,
     first=1;
     loop(T,
           if(WTS.L(P,T)>1 and first=1,
              put "Flow from TS       to ", P.tl,  " : "
              loop(TT, put WTS.L(P,TT):10:0);
              put /;
              first=0;
              );
            );
     );

*put vx 'Flows from MBT to WTE(in tons/year)'/;
loop(MBT,
     loop(WTE,
          first=1;
          loop(T,
                if(WMBTWTE.L(MBT,WTE,T)>1 and first=1,
                   put "Flow from ", MBT.tl, " to ", WTE.tl, " :
"
                   loop(TT, put WMBTWTE.L(MBT,WTE,TT):10:0);
                   put /;
                   first=0;
                   );
                );
          );
      );

*put vx 'Flows from BD to WTE(in tons/year)'/;
loop(BD,
     loop(WTE,
          first=1;
          loop(T,
                if(WBDWTE.L(BD,WTE,T)>1 and first=1,
                   put "Flow from ", BD.tl, " to ", WTE.tl, " : "
                   loop(TT, put WBDWTE.L(BD,WTE,TT):10:0);
                   put /;
                   first=0;
                   );
                );
          );
      );

*put vx 'Flows from processes to conventional landfill (in
tons/year)'/;
loop(LDF,
     loop(P,
          first=1;
          loop(T,
                if(WLDF.L(P,LDF,T)>1 and first=1,
                   put "Flow from ", P.tl, " to ", LDF.tl, " : "
                   loop(TT, put WLDF.L(P,LDF,TT):10:0);
                   put /;
```

```
                    first=0;
                    );
                );
            );
        );
put
'*****************************************************************
****************************'/;
put /;
put 'Other_emissions (annual amounts)' /;
put 'NH3_(t):   '; loop(T, put EM_NH3.L(T):10:0); put /;
put 'PM10_(t):  '; loop(T, put EM_PM10.L(T):10:0); put /;
put 'SOx_(t):   '; loop(T, put EM_SOX.L(T):10:0); put /;
put 'NOx_(t):   '; loop(T, put EM_NOX.L(T):10:0); put /;
put 'NMVOC_(t): '; loop(T, put EM_NMVOC.L(T):10:0); put /;
put 'PCDD_(kg): '; loop(T, put EM_PCDD.L(T):10:4); put /;
put
'*****************************************************************
****************************'/;
put
'*****************************************************************
****************************'/;


*$offtext

    jump(km1)=1;
*   find last objective function in the sequence with slack less
than step
    lastZero = 0; loop(km1$(floor(sl.L(km1)/step(km1))=0 and
lastZero=0), lastZero=numk(km1));
    jump(km1)$(numk(km1)<=lastZero)=1+floor(sl.L(km1)/step(km1));
    loop(km1$(jump(km1)>1),put 'jump' /);
    );

* Proceed forward in the grid
  firstOffMax = 0;
  loop(km1$(posg(km1)<maxg(km1) and firstOffMax=0),
posg(km1)=posg(km1)+jump(km1); firstOffMax=numk(km1));
  posg(km1)$(numk(km1)<firstOffMax) = 0;
until sum(km1$(posg(km1)=maxg(km1)),1)=card(km1) and
firstOffMax=0;

finish=jnow;
elapsed_time=(finish-start)*86400;

put fx /;
put fx 'Infeasibilities = ', infeas:5:0 /;
put fx 'Elapsed time: ',elapsed_time:7:2, ' seconds' / ;

putclose fx; // close the point file
putclose vx; // close the point file
```