

Integrated Municipal Solid Waste management through multi-criteria optimisation encountering cost and GHG emissions: Model building and application

George MAVROTAS¹, Sotiria SKOULAXINOY², Nikos GAKIS³, Vassilis KATSOUROS⁴, Nikolaos GARGOULAS² and Eleni GEORGOPOULOU⁵

¹National Technical University of Athens, ²EPEM SA, ³FACE³TS SA, ⁴Institute for Language and Speech Processing,

⁵National Observatory of Athens

CONTACT

George Mavrotas

Assistant Professor

Laboratory of Industrial & Energy Economics / School of Chemical Engineering / National Technical University of Athens
Zografou Campus, Athens 15780

Office: H1 304 (Level 3, Compartment H1)

tel: +30 210 772 3202, +30 210 772 3283, fax: +30 210 772 3155

Email: mavrotas@chemeng.ntua.gr

ABSTRACT

The aim of the work is to develop a mathematical model that offers realistic description of the Municipal Solid Waste (MSW) activities in a specific region and subsequently to optimize this model using Mathematical Programming (MP). The optimization process takes into account two criteria or objective functions (Multi-Objective MP): The minimization of the Net Present Value (NPV - economic criterion) and the minimization of CO₂-equivalent emissions (environmental criterion). The model contains all the available technologies and paths of the MSW system (the superstructure in process synthesis terminology) that are expressed in the model with proper relationships.

The model performs a simultaneous, structural, design and operational optimization of the MSW system, i.e. the output of the created model is which technology units will be used and which paths are followed for the MSW system (structure), what is the capacity of these units (design) and what are the operating loads to and from the units (operational optimization).

The multi-objective optimization provides not just one optimal solution, but the Pareto front (NPV vs CO₂eq. emissions) for the whole system. This information is essential to the Decision Maker because he can see the trade-offs in the Pareto curve and select his/her most preferred among the Pareto optimal solutions.

The tool has been tested through three case studies in Greece, namely in the prefecture of Chania, the Region of Eastern Macedonia-Thrace (north-eastern Greece) and the Region of Western Macedonia (north-central Greece). In this paper, data and results will be presented for the prefecture of Chania.

KEYWORDS

Waste management optimization, multi-objective mathematical programming, waste management greenhouse gas emissions, waste management multi-criteria optimisation

METHODOLOGY

The mathematical model that describes the Municipal Solid Waste (MSW) management system is developed using the principles of Mathematical Programming (MP). All the available technologies and paths of the MSW system are expressed in the model with proper relationships (equalities and inequalities). The model consists of the decision variables (the unknowns of the problem), the parameters (the known data), the constraints (the relationships that describe the system) and one or more objective functions (the drivers of the optimization).

Borrowing ideas from the field of process synthesis in chemical engineering, the problem can be formulated as a multi-period structure, design and operational optimization problem [7]. All the available MSW options and their interdependencies can be considered in the superstructure of the system (topology of all the available MSW options) and the MP model proposes the best solution. A simultaneous, structural, design and operational optimization of the MSW system is achieved i.e. the output of the created model is which technology units will be used and which paths are followed for the MSW system (structure), what is the capacity of these units (design) and what are the flows and operating loads to and from the units (operational optimization). MP has already been used for the optimization of MSW systems in various cases [1, 8, 9].

The model which is developed is a multi-objective mathematical programming model. Specifically it has two objective functions: (1) the Net Present Value of the system over the 20-year horizon and (2) the CO₂-equivalent emissions. As the name suggests, multi-objective optimization (or multi-criteria optimization) involves optimisation in the presence of more than one (usually conflicting) objective functions (criteria). The main difference between single and multi-objective optimization is that in the case of the latter, there is usually no single optimal solution, but a set of equally good alternatives with different trade-offs, also known as Pareto-optimal (or non-dominated or efficient) solutions. The Pareto optimal solutions are the feasible solutions that cannot be improved in one objective function without deteriorating their performance in at least one of the rest. In the absence of any other information, none of these solutions can be said to be better than the other. Usually a decision maker is needed to provide additional preference information and to identify the “most preferred” solution (“optimal” according to his/her subjective preferences). Depending on the paradigm used, such knowledge may be introduced before, during or after the optimization process. Multi-objective optimization thus has to combine two aspects: optimization and decision support (Steuer, 1986). In the present study, the generation of the Pareto optimal solutions will be done using a version of the popular epsilon constraint method [10].

Model Building

The mathematical model will describe the MSW system as a directed graph. There are nodes that represent the processes and arcs that represent the flows between the processes. The boundaries of the system are defined from the collection phase till the final disposal. The model will represent the superstructure of the system, i.e. all the available options with their interconnections as shown in Figure 1. In Figure 1, one can see how the bins are connected with the processes, how the processes are interconnected and which the main products of each process are. It must be noted that for each generic technology there are more than one specific type of units that can be utilised which are mutually exclusive. For example, for Composting we have 5 types of units while for MBT we have 18 types of units. The optimal type of unit for each technology will be selected by the model.

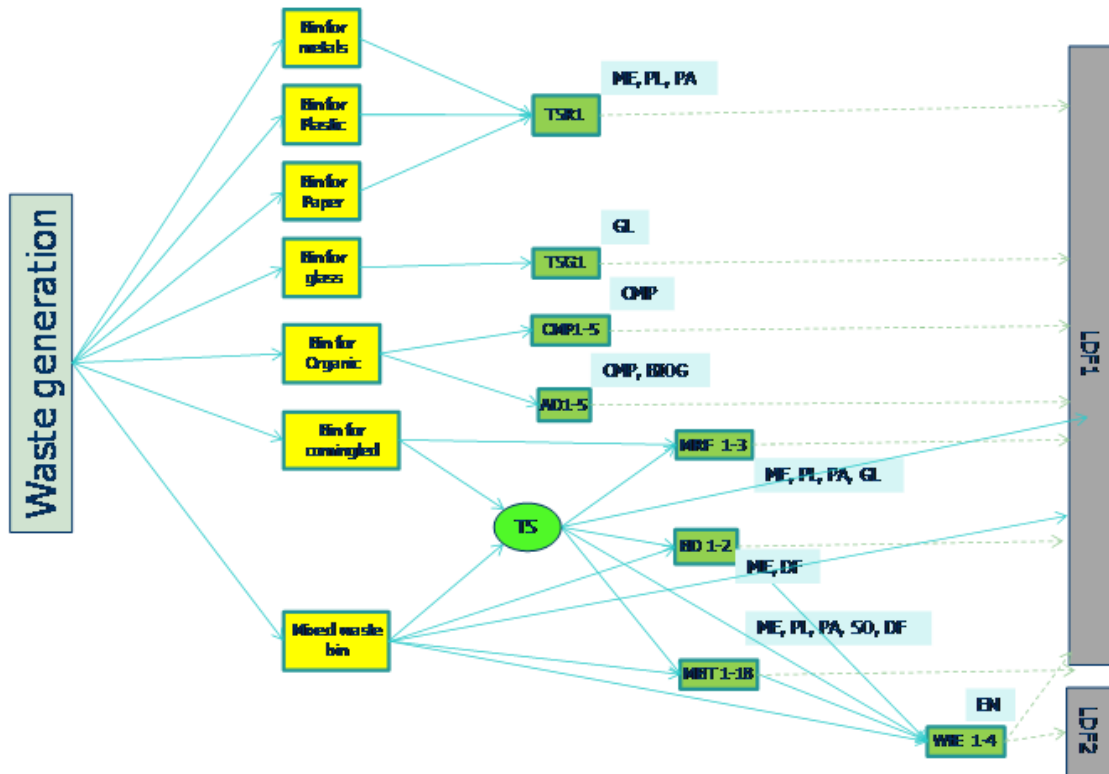


Figure 1: Graphical representation of the superstructure of the MSW system

(Acronyms for Processes: 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, LDF1: Landfill, LDF2: Landfill for Hazardous Waste. Acronyms for products: ME: Metals, PL: Plastic, PA: paper, GL: Glass, CMP: Compost, BIOG: Biogas, DF: Derived Fuel, SO: Stabilized Organic, EN: Energy)

The model is properly formulated in order to perform structural, design and operational optimization. In other words, the major questions that will be answered with the optimization process are: which processes (structure), what will be their capacity (design) and what will be their annual operational load (operation). All these figures will be computed in period-wise basis. In technical terms the model is a Multi-Objective Mixed Integer Linear Programming (MO-MILP) model, which means it contains continuous and integer (mostly binary) variables. The basic elements of the multi-objective mathematical programming model are briefly described below:

Objective functions

Two are the objective functions of the problem: (1) the minimization of the Net Present Value (NPV) of the MSW system over a period of 20 y, which represents the economic objective and (2) the minimization of total CO₂-eq emissions of the MSW system, which represents the environmental objective. The NPV incorporates the investment and operational costs, as well as the income from recyclables, electricity and other products over a 20-year period.

Decision variables

The decision variables of the model are actually the unknowns of the problems, i.e. those variables for which we are trying to find their optimal values. In our case we have discrete (binary or integer) and continuous decision variables. The discrete variables are mostly associated with the structural characteristics (is i-th technology present in the optimized MSW system? how many units will be needed?). The continuous variables are mostly

associated with the design and operational characteristics (what is the capacity of i-th unit in period t? Which is the amount of waste transported from i-th unit to j-th unit?).

Constraints

The main constraints of the model are the mass balances that have to be satisfied between nodes (equality constraints) and the capacity constraints that have to be satisfied (“less than” constraints). There can be policy constraints (e.g. the recycling rate or the amount of waste sent to landfill). Logical constraints are also present in order to apply conditions for mutually exclusive alternatives. Auxiliary constraints may also be present (e.g. linearization of non-linear terms). Special reference should be made to the modeling of the landfill and the associated CH₄ emissions. It has been done using the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) guidelines [6] and takes into account five waste categories (food, garden, paper, textile and wood) and the different behavior of treated – untreated material. The calculation of the CH₄ emissions (and therefore the CO₂ – equivalent) takes into account in a flexible manner the possibility of flaring, as well as the ongoing process of CH₄ emissions after the expiration of the study horizon. These ex-post emissions are explicitly calculated and participate in the minimization of CO₂-eq. objective function.

Parameters

The parameters of the model are the known data. These data are the economic and technological characteristics of the processes, the prices of the recycled materials and produced energy, and the conversion factor of every ingredient in each one of the candidate technologies. The original waste is classified in 34 ingredients and its composition is considered known for the model based on representative past data. The scheme of the bin configuration is also considered as given (which types of bins are used) in the model. The different bin schemes can be examined as different scenarios.

Modes of Operation and Expected Results

The model can be used as an optimization tool or just as a simple calculation tool. The user can adjust the extent of optimization by controlling the degrees of freedom of the model. Instead of performing a full optimization (with all the degrees of freedom), he/she can consider some technologies as given and the system will be optimized given this information. In this case the corresponding decision variables will have fixed values in the optimization and will not be altered. Moreover, the user can impose constraints (user defined constraints) on the flows (e.g. no more than 30,000 tn/year can be sent from the mixed waste bin to the MBT units). The full model includes approximately 24,445 continuous variables, 210 integer variables and 12,399 constraints.

The optimization of the multi-objective model provides a representative set of the Pareto optimal solutions for the MSW management problem. With the term “solution” we mean the structural characteristics (which units will be constructed in each period), the design characteristics (the capacity of the units, what capacity expansions will be required) and the operational characteristics (annual waste flows between the units). All these amounts are expressed with appropriate decision variables and their values will be the main output of the system, of course along with the value of the objective function(s).

The model is multiperiod and has a dynamic evolving element over time, following the scenario for the quantity of produced MSW (20y horizon divided into four periods). The results of the optimization will refer to each period of time and there will be inter-period constraints quantifying the relevant linking relationships. The model has been implemented and solved using the widely known modeling language GAMS / General Algebraic Modeling System [4].

SOFTWARE TOOL

The tool is a decision support software (DSS) targeted to experts and/or practitioners in the field of MSW management. The user is able to examine various scenarios by designing conceptual architectures of MSW systems by selecting among the component technologies. Depending on the selected component technologies the system creates the conceptual architecture by adding in the graphical map the respective type of bins in the

collection system, the types of landfills for disposal following the superstructure constraints illustrated in Figure 1 and the links among the component technologies (Figure 2). Note that for the disposal we use two types of landfill, with the hazardous connected only with the Waste to Energy component. For each technology (i.e. composting, anaerobic, WtE, etc.), many types of processes have been incorporated. Therefore, the software contains an extensive library with cost data (capex, opex) and environmental data (emissions, fuel consumption, etc.) for each technology type. Data has been drawn from literature [2, 6, 11], but also from questionnaires distributed to operating plants in Greece and Europe.

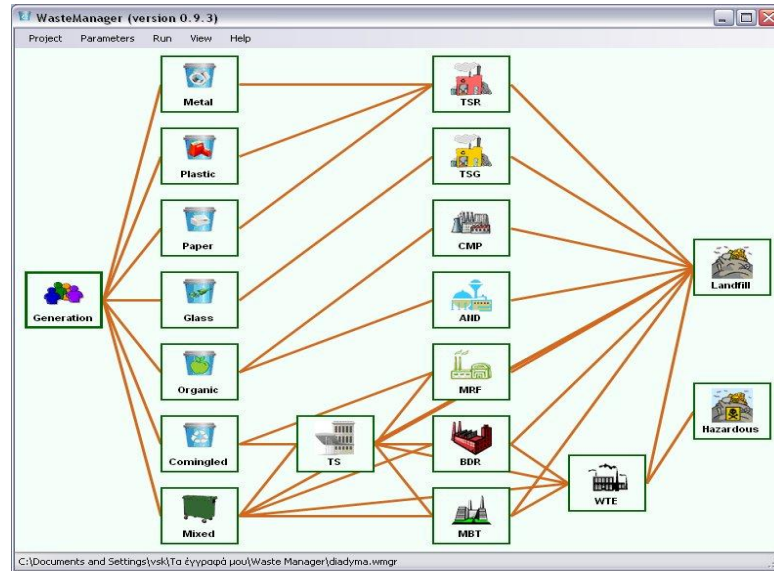


Figure 2: Conceptual map of an MSW system

Subsequently, the user has to define the parameters of the MSW system: (a) the composition of the MSW generated, (b) the collection system parameters, i.e. bin models, collection frequency, etc., (c) the component technologies parameters, e.g. min/max capacities of units in tonnes per year, etc., and (d) the transportation parameters, e.g. truck models of each link, average distances, etc. Next, the user may define constraints to be considered in the optimization problem, e.g. recycling targets, restrictions on the number of units, or in the flows between component technologies and run the optimization. The outcome of the optimization is the “Pareto frontier”; in this case a curve with the x-axis representing the net present cost for the 20y horizon and the y-axis the environmental impact of each solution, thus tons of CO₂-eq. (Figure 3). The user may select a point on the Pareto curve and see the parameters and outcomes of the respective solution analysed in the four 5-year periods (Figure 4).

Pareto front with efficient solutions		
1	887429.59	2240.41
2	889725.80	2232.68
3	891524.68	2224.95
4	893323.57	2217.21
5	895122.45	2209.48
6	896921.34	2201.75
7	898720.22	2194.01
8	900519.11	2186.28
9	902317.99	2178.54
10	904116.88	2170.81
11	906534.07	2163.08
12	914491.04	2155.34

Infeasibilities = 0

Elapsed time: 29.25 seconds

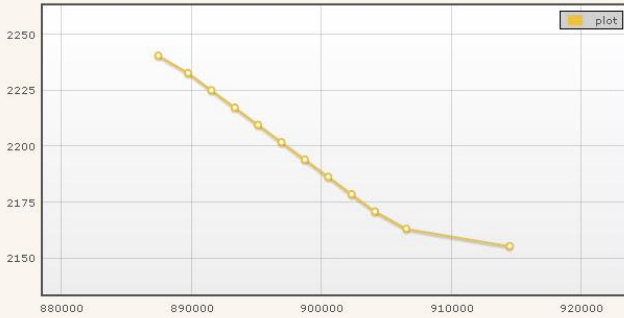


Figure 3: Pareto curve for the feasible solutions of an MSW system

Solution 1 887429.59 2240.41

[Return](#)

Annual cost per period (keuro):

1	32496
2	64473
3	96938
4	130844

Net Present Cost for 20 years (keuro): 887430
Total emissions CO2-eq for 20 years(kt): 2240

Annual costs and income by category (keuro)				
Bins:	518	550	664	750
Transportation (capacity):	342	711	1113	1547
Transportation (operation):	1518	1633	1812	1966
Processes (capacity):	1640	2763	4237	5613
Processes (operation):	30269	60665	92871	126296
Income from recycle:	1791	1848	3758	5328
Income from electricity:	0	0	0	0

Investment costs				
Bins:	2245	2379	2873	3248
Transportation:	4270	327	411	402
Processes:	20444	14002	18381	17157

Recycling rates				
wood packaging:	0.03	0.03	0.04	0.04
paper:	0.40	0.40	0.47	0.52
glass:	0.13	0.00	0.22	0.29
metal:	0.09	0.07	0.30	0.43
plastic:	0.05	0.05	0.07	0.08
recyclable to recycle & energy:	0.15	0.13	0.21	0.25
organics to landfill:	1.07	1.15	1.18	1.25

Annual CO2-equivalent emissions by category (kt)				
From energy in processes:	3.43	3.52	5.20	6.29
From processes (no LDF):	1.95	2.10	2.84	3.06
From transportation:	2.13	2.30	2.55	2.76
From Landfill:	34.36	94.46	129.22	151.88

Load in the bins (tons)				
BGL	0	0	0	0
BMT	0	0	0	0
BPL	0	0	0	0
BPA	0	0	0	0
BRC	34999	35630	53440	65732
BOR	28769	30991	41892	45129
BMW	256232	278110	276041	289213

Figure 4: Summary of the outcomes of a feasible solution

CASE STUDY: THE PREFECTURE OF CHANIA/CRETE

Background Information

The prefecture of Chania is the westernmost prefecture of Crete, in the south of Greece. The population reaches 156,220 inhabitants, which equals to about 25% of the total population of Crete (temporary data of 2011 inventory).

In the prefecture of Chania an integrated waste management system is in operation that serves the majority of the municipalities of the area. The core of the system is the Mechanical Biological (aerobic composting) Treatment Plant (MBT plant), located in Korakia. Next to the MBT, a sanitary landfill for the residues is in operation.

At this time, the plant processes about 93,000 tons/year and the operation is set in 2 shifts, 6 days/week. The facility (MBT plant and SL) receives mixed MSW, commingled recyclables from the separation at source system ("blue" bin) and small quantities of green and bulky waste.

Table 1: Waste Quantities

<i>Waste Stream</i>	<i>Tons/y</i>
Mixed Wastes	79.122,00
Recyclables From Selection at Source	13.158,00
Green Wastes	960,00
Bulky Wastes	1.201,5

Waste composition (as they enter the facility) is presented in the following table:

Table 2: Composition of MSW in the facility of Chania

	<i>Recyclables</i>	<i>Mixed Wastes</i>	<i>Green wastes</i>
Mixed paper/Cardboard	28,47% / 42,2%	13,14%/6,10%	
Plastic (white film/mixed)	4,32% / 6,28%	6,28 %	
PET	1,08 %	14,25 %	
PP	0,46%		
PE	1,06 %		
Ferrous Metals	1,62%	2,78 %	
Aluminum	0,22%		
Glass	2,52%	2,23 %	
Tetrapak	0,086%	1,77 %	
Textiles/Leather/Rubber/Wood	3,12%	7,15 %	
Organic material	2,54%	37,17 %	100 %
Inner materials	6,11 %	5,58 %	
Other		3,55 %	

The responsible Waste Management Authority is DEDISA: Trans-Municipal Enterprise of Solid Waste Management in Chania. The MSW management system includes:

- Collection (no transfer stations at the moment)
- Separation at source of paper and commingled recyclables (blue bin: metals, paper, glass, plastics)
- Processing of mixed MSW and green wastes at the MBT plant
- Landfilling

The facility of Korakia was built with a total budget of 30 mEuro, with 75% co-financing from the Cohesion Fund II (2000-2006) and the rest 25% by the Public Investment Fund. The facility includes:

- Weighbridge
- Waste Reception
- Mechanical pretreatment – manual sorting
- Composting in a fast composting tank with forced aeration
- Refinery of compost, maturation and storage
- Sanitary Landfill of the residues
- Tertiary treatment of leachate

The recyclables from the “blue-bin” are hand-sorted in the MBT plant and separated into paper, cardboard, ferrous metals, aluminium, glass and plastics.

About 25,000 tons/y of mixed municipal waste are processed at the MBT plant to recover ferrous and non-ferrous metals and to produce compost. The produced has been used for dumpsites restoration, in gardens, in areas where a fire has caused damages, etc., with exceptional results.

The rest of the mixed waste (55,000 tons) is landfilled at the Sanitary landfill adjacent to the MBT plant.

Tool Application in Chania

DEDISA has used the Waste-C-Control Tool to examine several waste management options (scenarios) with the aim to propose improvements to the existing management system (as applied so far), in order to reduce GHG emissions and costs. The results of this application will be incorporated in a Local Action Plan (LAP) that DESISA is determined to apply.

Input data were based on Tables 1 and 2 for MSW and recyclables. An assumption was made with regards to future waste quantities that an annual increase by 1% to 2% is expected. Whereas it is likely that growth may slow down to some extent in certain areas, it seems that during the 10 -year period of 2009-2019, the annual expected increase will be around 1.5%, while the next decade (2019-2029) the annual growth rate is expected to fall to about 1.2%. Also, due to the fact that changes in waste composition are rather difficult to foresee, an assumption was made that for all four periods the composition remains constant (see Table 2).

Five (5) scenarios were formulated using the software tool, with scenario 1 being used as the reference case.

Scenario 1: Reference case

- The existing MBT receives 13,000 tons of recyclables (mainly packaging waste) from the “blue bin” system.
- The MBT also receives 25,000 tons of mixed waste that are processed (mechanical treatment and composting). The MBT has a maximum capacity of 70,000 t/y
- 200 tons of glass are temporary stored within the facility.
- 55,000 tons of mixed MSW enter the Sanitary Landfill (SL).
- No transfer Stations are in operation

In this scenario, the Tool is “free” to decide whether the MBT capacity will be fully exploited and even whether this capacity should be increased. Also, the tool is free to increase the capacity for processing the recyclables or to add a new sorting plant. However, the technology for mixed wastes (MBT with aerobic composting) cannot be changed (all other MBT types are excluded and mass balances are user-defined to match the mass balance of the existing MBT plant). Also the technology for sorting recyclables is determined by the user (hand sorting and some mechanical treatment). Investment and operational cost data are customised based on real prices (provided by DEDISA) to match the existing infrastructure.

Scenario 2: Advanced mechanical treatment and source separation of the organic fraction and of paper

- 4 Transfer Stations (TS)
- Source separation of paper (8,000 tons/y) and temporary storage within the Korakia premises
- Source separation of glass as in scenario 1
- Source separation of 10,000 tons of the organic fraction of MSW (OFMSW). This stream is treated in one of the two existing composting tanks of the MBT.
- High tech equipment is installed to assist the existing hand-sorting line for recyclables coming from the blue bin. These recyclables are now reduced by 8,000 tons (paper) and reach 5,000 tons.
- The MBT plant is equipped with advanced recycling equipment for the rest of MSW (max. 70,000 t/y).
- The SL receives only residues

In this scenario, the Tool is “free” to decide whether the MBT capacity will be fully exploited and even whether this capacity should be increased. Also, the tool is free to increase the capacity for processing the recyclables or to add a new sorting plant. However, the technology for mixed wastes (MBT with advanced recycling and aerobic composting) cannot be changed (all other MBT types are excluded and mass balances are user-defined to match the mass balance of the MBT plant according to DEDISA data). Also the technology for sorting recyclables and for treating organic wastes are determined by the user (advanced mechanical sorting and in vessel composting, respectively). Investment and operational cost data are customised based on real prices (provided by DEDISA) to match the existing or planned infrastructure.

Scenario 3: Production of RDF and source separation of the organic fraction and of paper

This scenario is similar to Scenario 2, with only difference being the extra equipment installed at the existing MBT line for mixed wastes. In this scenario, some additions are made to enable the production of RDF instead of installing advanced sorting equipment to recover recyclables from mixed wastes.

In this scenario, the Tool is “free” to decide whether the MBT capacity will be fully exploited and even whether this capacity should be increased. Also, the tool is free to increase the capacity for processing the recyclables or to add a new sorting plant. However, the technology for mixed wastes (MBT with RDF production and aerobic composting) cannot be changed (all other MBT types are excluded and mass balances are user-defined to match the mass balance of the MBT plant according to DEDISA data). Also the technology for sorting recyclables and for treating organic wastes are determined by the user (advanced mechanical sorting and in vessel composting, respectively). Investment and operational cost data are customised based on real prices (provided by DEDISA) to match the existing or planned infrastructure.

Scenario 4.1: Free

In this scenario, there is source separation of paper (8,000 tons), OFMSW (10,000 tons/y) and glass (200 tons), there is a “blue bin” system (5,000 tons of recyclables), and collection of mixed wastes (70,000 tons/y), via four TS. The technologies used to treat all these fractions are “chosen” by the model (free scenario). For comparative reasons, the customised MBT types used in scenarios 1-3 are incorporated in the model (including mass balances and cost data).

Scenario 4.2: Free with targets for Biodegradable Municipal Waste (BMW targets based on Dir. 31/99/EC)

This scenario is identical to scenario 4.1 but the constraint for BMW diversion from landfill is activated.

Results

Each scenario was a different “run” of the software and one Pareto front with 11 feasible solutions was produced for each scenario (see Figure 5).

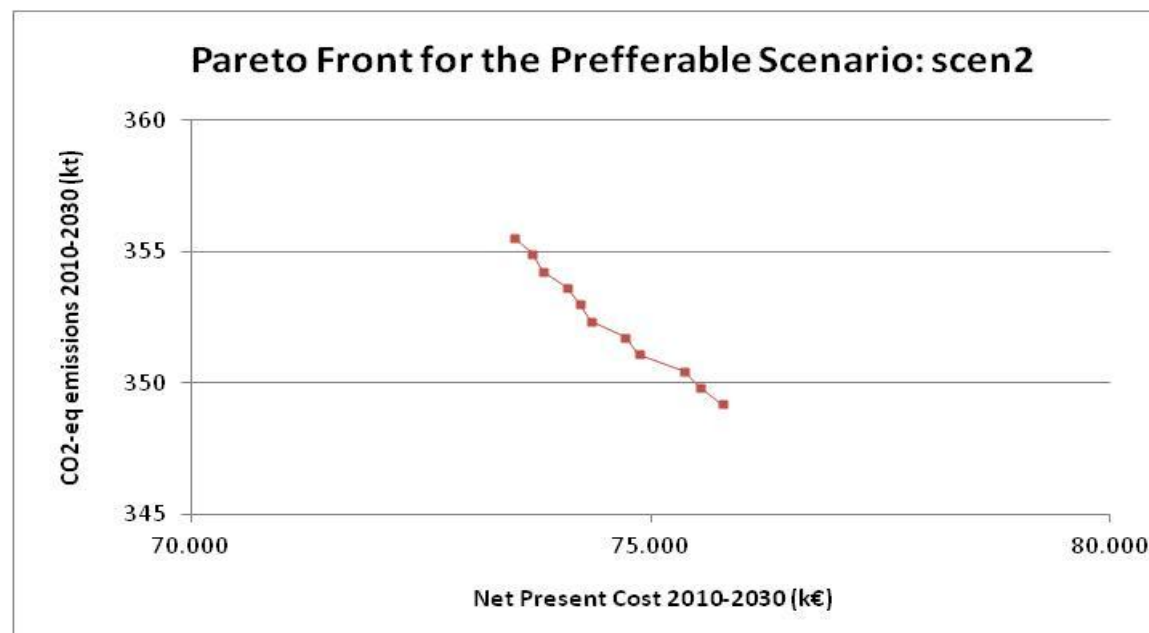
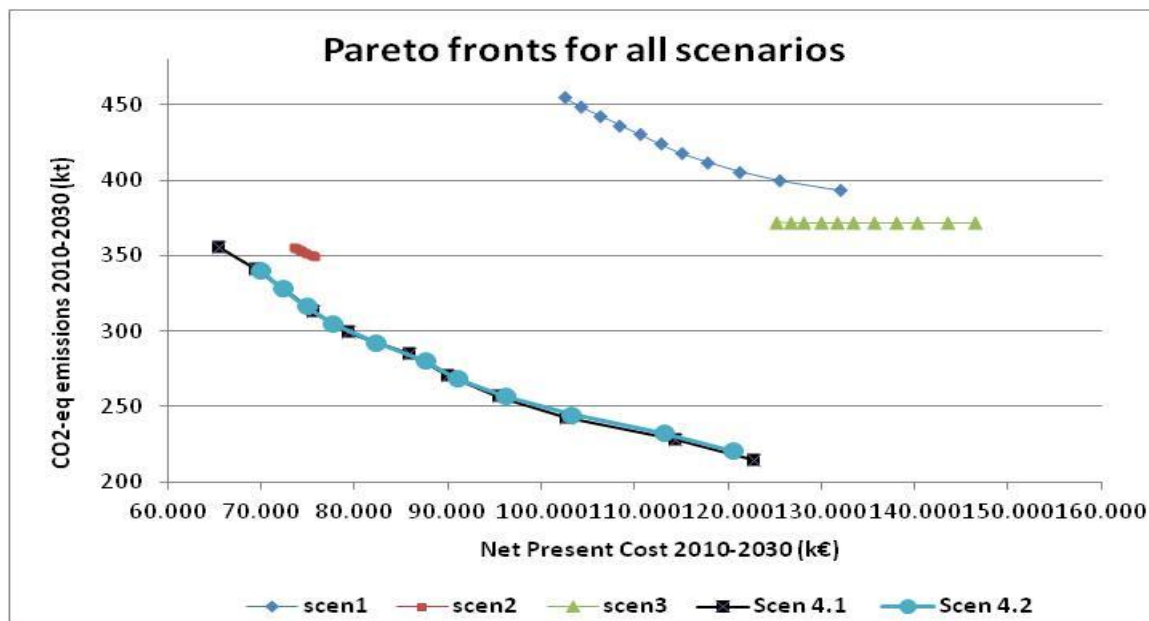


Figure 5: Pareto “fronts” or curves, for each scenario in REMTH

Compared with scenario 1 which represents the current situation, one can see the curve moving to lower costs and emissions, because of the optimization of MBT, of the introduction of TS, and because of landfill costs and emissions reduction (landfilling of residues only).

All scenarios indicate that source separation of fractions (OFMSW, paper, glass) improves the environmental performance of the system.

In scenarios 4.1 and 4.2 the Tool “suggests” technologies like anaerobic digestion for the OFMSW or MBT with an anaerobic digestion step in order to increase income (selling of renewable energy). Both scenarios result in achievement of the objectives of Directive 99/31/EC and this means significant emissions reduction compared to all other scenarios. However, investment costs are higher. It is worth mentioning that even though in scenario

4.1 the directive 99/31 target is inactive, the Tool itself optimises the system towards achieving the targets in order to reduce emissions. So scenarios 4.1 and 4.2 have more or less the same Pareto curve.

In scenario 3, costs increase because there is no RDF combustion unit in Crete, so the transfer in a cement industry would be economically intolerable.

Finally, scenario 2 results in significant emissions reduction compared to the reference case, while there is full exploitation of the existing infrastructure. It is also obvious that the modifications of the existing MBT to enhance recycling, offers additional benefits without an intolerable cost increase. So, even though scenarios 4.1 and 4.2 may present better results in terms of CO₂eq. minimisation, they require significant alterations to the existing management system. That is why, Scenario 2 is preferable by the decision makers.

Future State

In this context, D.E.D.I.S.A. with the help of the Tool aims at the adoption of the following options for meeting the targets for reducing GHG at local level:

- Support Sorting at Source programs: Create an adequate network of waste collection bins, by offering opportunities for source separation. (availability of different bins for paper, glass, organic)
- Working with large scale units (e.g hotels, military) from which the organic fraction will be collected in a separate container and therefore large amounts of biodegradable fraction are diverted from the SL. In the same time, the production of compost material is enhanced
- Locate bins correctly for optimum collection, which aims to reduce GHG emissions from transportation of waste
- Information campaigns and public awareness for the need of limited production and proper segregation of waste and the available options.

CONCLUSIONS

Mathematical Programming proved to be a reliable tool for the multi-objective optimization of the MSW management system. The developed model is flexible and can be customized to any case, as the main key parameters are determined by the user. The synthesis (which units), design (which capacity) and operational (annual flows) optimization provides the Pareto optimal solutions based on two criteria: (1) the net present cost over the 20 years period and (2) the cumulative CO₂-eq emissions over the 20-year period. The obtained Pareto fronts from different scenarios can be compared and the tradeoffs among the Pareto optimal solutions within each one Pareto front can be also investigated by the user. The dynamic evolution within the 20-year period of the corresponding technologies associated with each solution is also calculated.

The application of the software tool in Chania enabled the development of a Local Action Plan, which aims to reduce GHG emissions from waste management activities at local level. Through the use of the tool, DEDISA was able to answer questions like “what is the impact of adding OFMWS recycling in terms of costs and emissions”, “is it necessary to use transfer stations”, “is the system improved by introducing advance recycling equipment to the existing plant”, etc. The answers to these questions, which could not be materialised in the past, are now provided through an integrated solution that has been formulated and can be easily communicated by DEDISA waste experts to decisions-makers and the broader public, by using two comprehensive indicators: cost (NPV in million euros) and emissions (in CO₂-eq.), over a 20y period.

ACKNOWLEDGMENTS

The tool has been developed under the project: “Waste Management Options for Greenhouse Gases Emissions Control” (LIFE09/ENV/GR/294), with the contribution of the LIFE financial instrument of the European

Community. The project acronym is WASTE-C Control and more information is available at: www.epem.gr/waste-c-control.

REFERENCES

1. Abou Najm, M., El-Fadel, M.: *Computer-based interface for an integrated solid waste management optimization model*. Environmental Modelling & Software 19, pp. 1151-1164 (2004)
2. Amlinger, F., Peyr, S., Cuhls, C.: *Greenhouse gas emissions from composting and mechanical biological treatment*. Waste Management and Research 26 (1), 47–60 (2008)
3. Boldrin, A., Anderson, J., Moller, J. and Christensen T. *Composting and Compost Utilisation: Accounting of Greenhouse Gases and Global Warming Contribution*. Waste Management & Research, vol. 27 no. 8, pp. 696-706 (2009).
4. Brooke, A., Kendrick, D., Meeraus, A., Raman, R.: *GAMS. A user's guide*, GAMS development corporation, Washington (1998)
5. Harrison KW, Dumas RD, Barlaz MA, Nishtala SR.: *A life-cycle inventory model of municipal solid waste combustion*. Journal of Air & Waste Management Association, Vol. 50(6), pp. 993-1003 (2000).
6. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. and Tanabe K. (eds). Published: IGES, Japan, (2006).
7. Iyer, R.R., Grossmann, I.E.: *Synthesis and operational planning of utility systems for multiperiod operation*. Computers & Chemical Engineering 22, pp. 979-993 (1998).
8. Jing, S., Huang, G.H., Xi, B.D., Li, Y.P., Qin, X.S., Huo, S.L., Jiang, Y.: A hybrid inexact optimization approach for solid waste management in the city of Foshan, China. *Journal of Environmental Management* 91, 389-402 (2009)
9. Louis, G., Shih, J-S.: *A flexible inventory model for municipal solid waste recycling*. Socio-Economic Planning Sciences 41, pp. 61-89 (2007)
10. Mavrotas, G.: *Effective implementation of the ε -constraint method in multiobjective mathematical programming problems*. Applied Mathematics and Computation, 21 (3), pp. 455-465 (2009).
11. McDougall, F., White, P., Franke, M., Hindle, P.: *Integrated Solid Waste Management: a Life Cycle Inventory*, Blackwell Publishing, Oxford, UK (2002)
12. Steuer, R.E.: *Multiple Criteria Optimization Theory, Computation and Application*, Krieger, Malabar, FL (1986).

ISBN: 978-960-87277-8-6



23^ο Εθνικό Συνέδριο



Ελληνικής Εταιρείας Επιχειρησιακών Ερευνών



Διαχείριση Ενεργειακών Πόρων & Συστημάτων

Επιμέλεια Έκδοσης:

Ιωάννης Ψαρράς
Καθηγητής ΕΜΠ

Νικόλαος Ματσασίνης
Καθηγητής Πολυτεχνείου Κρήτης

Αθήνα, 12-14 Σεπτεμβρίου 2012, ΕΜΠ

Διοργάνωση:

Εργαστήριο Συστημάτων Αποφάσεων & Διοίκησης, ΕΜΠ

Χορηγοί:



Πίνακας περιεχομένων

1. Οικονομοτεχνική ανάλυση και αξιολόγηση μονάδας παραγωγής βιοκαυσίμων από ανακυκλωμένα βρώσιμα έλαια Μ. Κορακάκη, Δ. Γεωργακέλλος.....	4
2. Πειραματική εφαρμογή, αξιολόγηση και σύγκριση μεθόδων πρόβλεψης της οριακής τιμής συστήματος της ηλεκτρικής ενέργειας: Μελέτη στην ελληνική αγορά ενέργειας Ε. Μουνταλάς, Γ. Σπιθουράκης, Β. Ασημακόπουλος.....	9
3. Design and implementation of BI infrastructure: The case of a DSS for monitoring the past, current and future pricing conditions in a countrywide FMCG market Α. Ζαράς.....	14
4. Finding the exact Pareto set in multiple objective integer programming problems using an improved version of the augmented epsilon constraint method Γ. Μανωτάς, Κ. Φλοΐος.....	20
5. Ανάπτυξη προσχεδίου δράσης για την αειφόρο ενέργεια για το Δήμο Σικυωνίων Π. Μπουρτσάλας, Α. Παπαδοπούλου, Ι. Ψαρράς.....	25
6. Αξιολόγηση εναλλακτικών συστημάτων παραγωγής βιοαιθανόλης με πρώτη ύλη λιγνοκυτταρινούχα βιομάζα και παραπροϊόντα Ε. Πέτρου, Κ. Παπτής.....	30
7. Τεχνικές γραμμικοποίησης μοντέλων μαθηματικού προγραμματισμού για την υποστήριξη αποφάσεων της αγοράς φυσικού αερίου Σ. Ανδρουλάκη, Χ. Δούκας, Ι. Ψαρράς.....	35
8. Στρατηγικός σχεδιασμός και πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση: Η περίπτωση της διαχείρισης και ενεργειακής αξιοποίησης αστικών στερεών απορριμμάτων σε περιφερειακό επίπεδο Γ. Μαυρωτάς, Χ. Κατσή, Ρ. Σκουλάξινου, Ν. Γάκης, Β. Κατσούρος, Ε. Γεωργοπούλου, Ν. Γκάργκουλας.....	40
9. Διαστασιολόγηση υβριδικού συστήματος ενέργειας στον οικιακό τομέα χρησιμοποιώντας πολυκριτηριακή προσέγγιση Χ. Σμπιλίρης, Β. Δεδούσης.....	47
10. Ακριβείς και ευρετικοί αλγόριθμοι μεικτού-ακέραιου διεπίπεδου προγραμματισμού για βέλτιστη υποβολή προσφορών σε αγορές ημερήσιου προγραμματισμού ηλεκτρικής ενέργειας Ε. Κωσταρέλου Γ. Κοζανίδης.....	52
11. Μελέτη της αξιοποίησης και της κατανομής των διατιθέμενων πόρων για την περίθαλψη των δημοσίων υπαλλήλων στην Ελλάδα Ν. Πόθος, Μ. Σκορδούλης, Μ. Χαλκιάς.....	58
12. Πρόβλεψη ζήτησης φυσικού αερίου: Ανάλυση και μοντελοποίηση Ν. Μαυροειδής, Β. Ασημακόπουλος.....	63
13. Αξιοποίηση της ανάλυσης αποδόμησης στην πολυκριτηριακή ιεράρχηση χωρών της ΕΕ με βάση τις ενεργειακές και περιβαλλοντικές τους επιδόσεις Δ. Κοπίδου, Δ. Διακουλάκη.....	69
14. Η τριγωνική παραγοντοποίηση στον αναθεωρημένο αλγόριθμο Simplex Ν. Πλόσκας, Ν. Σαμαράς, Ι. Παπαθανασίου.....	74
15. Παράλληλη υλοποίηση αλγορίθμου για το πρόβλημα της χωροθέτησης μονάδων παραγωγής Ν. Πλόσκας, Ι. Παπαθανασίου, Ν. Σαμαράς.....	79
16. Πρόβλεψη Παραγωγής και Μακροπρόθεσμης Διείσδυσης των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας για τις Χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης Ν. Κολέρη, Β. Ασημακόπουλος.....	84
17. Ενεργειακά βιώσιμες κοινότητες: Ένα μεθοδολογικό πλαίσιο για την υποστήριξη των τοπικών και περιφερειακών φορέων Ε. Μαρινάκης, Α. Παπαδοπούλου, Ι. Σίσκος, Ι. Ψαρράς.....	89

Στρατηγικός Σχεδιασμός και Πολυκριτηριακή Βελτιστοποίηση: Η περίπτωση της διαχείρισης και ενεργειακής αξιοποίησης Αστικών Στερεών Απορριμμάτων σε περιφερειακό επίπεδο

Γ. Μαυρωτάς*, Χ. Κασιή
Σχολή Χημικών Μηχανικών ΕΜΠ
*mavrotas@chemeng.ntua.gr

Ρ. Σκουλάξινου, Ν.
Γκάργκουλας
ΕΠΕΜ Α.Ε.

Ν. Γάκης
FACETS

Β. Κατσούρος
Ινστιτούτο Επεξεργασίας Λόγου
Περίληψη

Ε. Γεωργοπούλου
Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών

Ο ολοκληρωμένος σχεδιασμός ενός συστήματος διαχείρισης αστικών στερεών απορριμμάτων (ΑΣΑ) σε περιφερειακό επίπεδο αποτελεί από τις μεγαλύτερες προκλήσεις στρατηγικού σχεδιασμού. Στην παρούσα εργασία αναπτύσσεται ένα μοντέλο στρατηγικού σχεδιασμού που καλύπτει έναν 20ετή ορίζοντα για την διαχείριση ΑΣΑ σε περιφερειακό επίπεδο χρησιμοποιώντας Μαθηματικό Προγραμματισμό (ΜΠ). Το μοντέλο ΜΠ χρησιμοποιεί τις αρχές της σύνθεσης διεργασιών, δηλαδή περιγράφει την υπερδομή του συστήματος (περιλαμβάνει δηλαδή όλες τις δυνατές διεργασίες και τις διασυνδέσεις τους) και με την επίλυση βρίσκουμε τη βέλτιστη λύση. Η βέλτιστη λύση καθορίζει τη δομή του συστήματος (ποιές διεργασίες), τον σχεδιασμό (τις διαστάσεις των μονάδων) και τη λειτουργία (τις ετήσιες ροές). Το μοντέλο είναι πολυπεριοδικό έτσι ώστε να προσδιορίζεται και ο χρόνος έναρξης των μονάδων μέσα στον 20ετή ορίζοντα. Οι μεταβλητές απόφασης του μοντέλου είναι συνεχείς (ροές υλικών, δυναμικότητες διεργασιών κλπ) και ακέραιες (αριθμός μονάδων ανά κατηγορία διεργασιών). Οι περιορισμοί είναι ή μετατρέπονται σε γραμμικούς έτσι ώστε το προκύπτον μοντέλο να είναι μοντέλο Μικτού Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού (ΜΑΓΠ). Η βελτιστοποίηση γίνεται με βάση δύο αντικειμενικές συναρτήσεις: (1) Την Καθαρά Παρούσα Αξία της 20ετίας και (2) τις συνολικές εκπομπές CO₂. Το πρόβλημα του Πολυ-κριτηριακού ΜΑΓΠ επιλύεται με τη μέθοδο AUGMECON και παράγεται η καμπύλη με τις κατά Pareto βέλτιστες λύσεις από τις οποίες καλείται να επιλέξει ο αποφασίζων. Το μοντέλο αναπτύσσεται και επιλύεται σε περιβάλλον GAMS. Η μέθοδος θα εφαρμοσθεί σε μια μελέτη περίπτωσης που αφορά στη Δυτική Μακεδονία.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

Πολυκριτηριακός Μαθηματικός Προγραμματισμός, Διαχείριση στερεών απορριμμάτων, στρατηγικός σχεδιασμός

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο σκοπός της εργασίας αυτής είναι η ανάπτυξη ενός υπολογιστικού μοντέλου για το βέλτιστο σχεδιασμό διαχείρισης Αστικών Στερεών Απορριμμάτων (ΑΣΑ) σε περιφερειακό επίπεδο. Στην ουσία πραγματοποιείται μελέτη όλων των διαθέσιμων τεχνολογιών και διαδρομών του συστήματος ΑΣΑ με έμφαση στις τεχνολογίες και όχι στη χωροθέτηση. Το μοντέλο αποτελείται από τις μεταβλητές απόφασης (οι άγνωστοι του προβλήματος), τις παραμέτρους (τα γνωστά δεδομένα), τους περιορισμούς (οι σχέσεις που περιγράφουν το σύστημα) και μια ή περισσότερες αντικειμενικές συναρτήσεις (οι οδηγοί της βελτιστοποίησης). Μόλις το μοντέλο δημιουργηθεί, τότε πραγματοποιείται η βελτιστοποίηση του μοντέλου.

Δανειζόμενοι ιδέες από τον τομέα σύνθεσης διεργασιών στη χημική κινητική, το πρόβλημα μπορεί να διατυπωθεί ως ένα πολυπεριοδικό, δομικό, διαστασιολογικό και λειτουργικό πρόβλημα βελτιστοποίησης (IyegandGrossmann, 1998). Όλες οι επιλογές ΑΣΑ και οι αλληλεξαρτήσεις τους μπορούν να θεωρηθούν στοιχεία της υπερδομής του συστήματος και το μοντέλο Μαθηματικού Προγραμματισμού προτείνει τη βέλτιστη λύση. Επιτυγχάνεται ταυτόχρονη, δομική, διαστασιολογική και λειτουργική βελτιστοποίηση του συστήματος των ΑΣΑ, δηλαδή τα αποτελέσματα του μοντέλου που δημιουργήθηκε είναι ποιες μονάδες τεχνολογιών θα χρησιμοποιηθούν και ποια μονοπάτια θα ακολουθηθούν για το σύστημα ΑΣΑ (δομική), ποια θα είναι η χωρητικότητα των μονάδων αυτών (διαστασιολογική) και ποιες θα είναι οι ροές και τα λειτουργικά φορτία προς και από τις μονάδες σε ετήσια βάση (λειτουργική βελτιστοποίηση). Όλα αυτά τα στοιχεία θα υπολογίζονται κατά περιόδους. Από τεχνικής απόψεως το μοντέλο είναι ένα μοντέλο Μικτού Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού (ΜΑΓΠ), το οποίο σημαίνει ότι περιέχει συνεχείς και ακέραιες (συνήθως δυαδικές) μεταβλητές. Ο Μαθηματικός Προγραμματισμός έχει ήδη χρησιμοποιηθεί για τη βελτιστοποίηση των συστημάτων ΑΣΑ σε διάφορες περιπτώσεις (βλέπε για παράδειγμα AbouNajmandEl-Fadel, 2004; LouisandShih, 2007).

Όσον αφορά το πεδίο εφαρμογής πρόκειται για μακροπρόθεσμη κλίμακα καθώς το μοντέλο καλύπτει ένα 20-ετή ορίζοντα χωρισμένο σε τέσσερις περιόδους. Τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης αναφέρονται σε κάθε περίοδο του χρόνου και υπάρχουν περιορισμοί μεταξύ των 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, Brooke et al. 1998).

Σήμερα, η περιβαλλοντική ανησυχία αυξάνεται όλο και περισσότερο, αμφισβητώντας τη "δικτατορία" του οικονομικού κριτηρίου ως το μοναδικό κριτήριο για τη λήψη αποφάσεων σε διάφορα πλαίσια. Δεδομένου ότι τα περιβαλλοντικά οφέλη δεν μπορούν να αποτιμηθούν εύκολα σε χρήμα προκειμένου να ενσωματωθούν σε μία οικονομική αντικειμενική συνάρτηση, ο ολοκληρωμένος σχεδιασμός ΑΣΑ απαιτεί τη χρήση πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης. Κατά τη διάρκεια των δύο τελευταίων δεκαετιών, έχουν εφαρμοστεί σχετικά μοντέλα με πολλαπλούς στόχους για τη βελτιστοποίηση σε τομείς όπως ενεργειακά συστήματα, διαδικασία σύνθεσης, επιλογή έργων (projects), διαχείριση περιβάλλοντος, διαχείριση υδάτων κλπ. (Belton and Stewart, 2002). Σήμερα, ο ολοκληρωμένος σχεδιασμός στα συστήματα ΑΣΑ καθίσταται υποχρεωτικός (Abou Najm and El-Fadel, 2004). Ο όρος "ολοκληρωμένος" χρησιμοποιείται για να τονίσει μια ευρύτατη άποψη του συστήματος, όπου πέρα από τους οικονομικούς στόχους (επενδυτική άποψη) επιδιώκονται και οι περιβαλλοντικοί στόχοι (άποψη βιωσιμότητας) και οι κοινωνικοί στόχοι (κοινωνική άποψη).

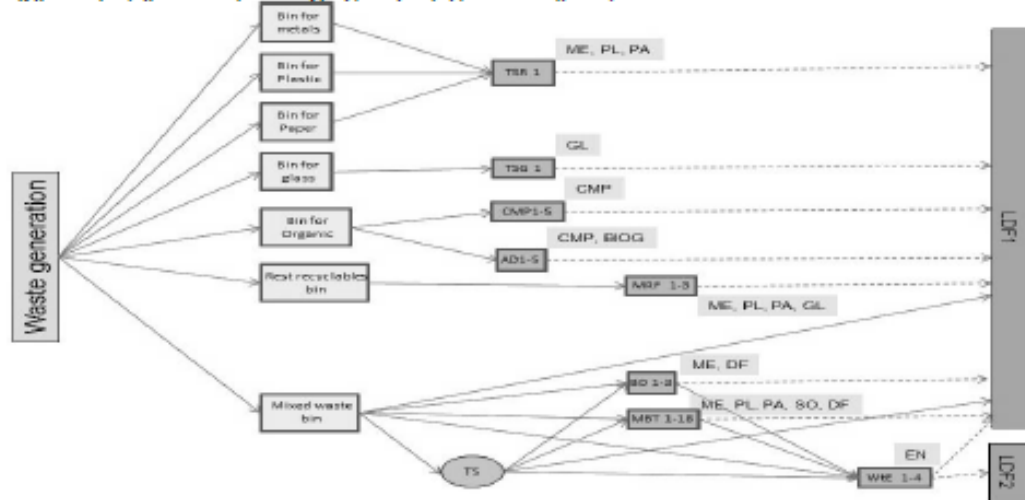
Στο πλαίσιο του Μαθηματικού Προγραμματισμού η πολλαπλών στόχων βελτιστοποίηση γίνεται μέσω Πολυκριτηριακού Μαθηματικού Προγραμματισμού (ΠΜΠ). Όπως υποδηλώνει το όνομα, στα μοντέλα ΠΜΠ πραγματοποιείται βελτιστοποίηση με την παρουσία περισσότερων του ενός (συνήθως αλληλοσυγκρουόμενων) αντικειμενικών συναρτήσεων (κριτήρια). Η κύρια διαφορά μεταξύ της μονοκριτηριακής και της πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης είναι ότι στην δεύτερη περίπτωση, συνήθως δεν υπάρχει μία μόνο βέλτιστη λύση, αλλά μια σειρά από εξίσου καλές εναλλακτικές επιλογές, επίσης γνωστές ως οι βέλτιστες κατά Pareto (ή μη κυριαρχούμενων ή αποδοτικές) λύσεις (Figueira et al. 2005). Συνήθως, χρειάζεται ένας υπεύθυνος για τη λήψη αποφάσεων, ο αποφασίζοντας, και με την παροχή πρόσθετων πληροφοριών αυτός να προσδιορίζει την "πλέον προτιμώμενη" λύση («βέλτιστη»), σύμφωνα με τις υποκειμενικές του προτιμήσεις. Ανάλογα με το χρησιμοποιούμενο μοντέλο, η γνώση αυτή μπορεί να εισαχθεί πριν, κατά τη διάρκεια ή μετά τη διαδικασία βελτιστοποίησης. Συνεπώς, η λύση των προβλημάτων ΜΠΜ είναι μια διπλή αποστολή: πρώτον, η παραγωγή των κατά Pareto βέλτιστων λύσεων και στη συνέχεια η επιλογή μεταξύ αυτών. Το πρώτο μέρος είναι μια καθαρά υπολογιστική εργασία, ενώ το δεύτερο περιλαμβάνει τη λήψη αποφάσεων που εκφράζει τις προτιμήσεις του αποφασίζοντα (Steuer, 1986).

2. ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Το μαθηματικό μοντέλο περιγράφει το σύστημα των ΑΣΑ ως ένα κατευθυνόμενο γράφημα. Υπάρχουν κόμβοι που αναπαριστούν τις διεργασίες και τα τόξα που αντιπροσωπεύουν τις ροές μεταξύ των διεργασιών. Τα όρια του συστήματος ορίζονται από τη φάση της συλλογής μέχρι την τελική διάθεση. Το μοντέλο εκπροσωπεί την υπερδομή του συστήματος, δηλαδή όλες τις διαθέσιμες επιλογές με τις διασυνδέσεις τους.

Στο Σχήμα 1 μπορούμε να δούμε πως οι κάδοι συνδέονται με τις διεργασίες, πως οι διεργασίες διασυνδέονται μεταξύ τους και ποια είναι τα κύρια προϊόντα της κάθε διεργασίας. Τα διακεκομμένα βέλη είναι οι ροές προς το χώρο υγειονομικής ταφής από κάθε διεργασία. Πρέπει να σημειωθεί ότι για κάθε γενικής τεχνολογίας έχουμε περισσότερους από έναν ειδικό τύπο μονάδων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι οποίες είναι αμοιβαίως αποκλειστικές. Για παράδειγμα, για την κομποστοποίηση έχουμε 5 τύπους μονάδων, ενώ για την Μηχανική - Βιολογική επεξεργασία έχουμε 18 τύπους μονάδων. Ο βέλτιστος τύπος μονάδας για κάθε τεχνολογία θα επιλεγεί από το μοντέλο.

Σχήμα 1. Γράφημα αναπαράστασης της υπερδομής του συστήματος των ΑΣΑ



2.1 Χαρακτηριστικά Μαθηματικού Προγραμματισμού

Υπάρχουν τέσσερα στοιχεία για κάθε μοντέλο Μαθηματικού Προγραμματισμού: Οι μεταβλητές απόφασης, οι περιορισμοί, η αντικειμενική συνάρτηση (ή αντικειμενικές συναρτήσεις) και οι παράμετροι.

- 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. Σε αυτές περιλαμβάνονται οι ροές των υλικών, η ύπαρξη μονάδων, η χρονική ένταξη των μονάδων, οι δυναμικότητες μονάδων
- Οι παράμετροι του μοντέλου είναι τα γνωστά δεδομένα μας. Τα δεδομένα αυτά είναι τα οικονομικά και τεχνολογικά χαρακτηριστικά των διεργασιών, οι τιμές των ανακυκλώμενων υλικών και της παραγόμενης ενέργειας, ο συντελεστής μετατροπής του κάθε συστατικού σε κάθε μια από τις υποψήφιες τεχνολογίες. Τα αρχικά απόβλητα κατατάσσονται πάνω κάτω σε τριάντα τέσσερα συστατικά και η σύστασή τους θεωρείται γνωστή για το μοντέλο βασισμένη σε αντιπροσωπευτικά δεδομένα του παρελθόντος. Η σύνθεση των κάδων θεωρείται επίσης γνωστή (ποιοί τύποι κάδων χρησιμοποιούνται) στο μοντέλο και με τη δυναμικότητα του κάθε κάδου εξετάζονται διαφορετικά σενάρια.
- Οι βασικοί περιορισμοί του μοντέλου είναι τα ισοζύγια μάζας που πρέπει να ικανοποιούνται μεταξύ των κόμβων (περιορισμοί ισορροπίας) και οι περιορισμοί χωρητικότητας που πρέπει να ικανοποιούνται ("λιγότερο από" περιορισμοί). Μπορούν να υπάρχουν επίσης και οι περιορισμοί πολιτικής (π.χ. "το ποσοστό ανακύκλωσης για το γυαλί πρέπει να είναι τουλάχιστον α% ή λιγότερο από β% της αρχικής ποσότητας των αποβλήτων που μπορούν να πάνε στα ΧΥΤ). Ακόμα, μπορούν να είναι παρόντες λογικοί περιορισμοί για την εφαρμογή των προϋποθέσεων για αμοιβαίες αποκλειόμενες εναλλακτικές. Βοηθητικοί περιορισμοί μπορεί επίσης να είναι παρόντες (π.χ. γραμμικοποίηση των μη-γραμμικών όρων).
- Δύο είναι οι βασικές αντικειμενικές συναρτήσεις του προβλήματος: (1) η ελαχιστοποίηση της Καθαρής Παρούσας Αξίας – ΚΠΑ - του συστήματος των ΑΣΑ (Net Present Cost - NPC) του συστήματος των ΑΣΑ σε μια περίοδο είκοσι ετών, η οποία αντιπροσωπεύει τον οικονομικό στόχο και (2) η ελαχιστοποίηση των συνολικών εκπομπών CO₂ του συστήματος των ΑΣΑ, η οποία αντιπροσωπεύει τον περιβαλλοντικό στόχο. Για την επίλυση του προβλήματος πολυκριτηριακού προγραμματισμού χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος AUGMECON (Manrotas, 2009).

3. ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ

Αφού κατασκευαστεί το μοντέλο Πολυκριτηριακού Μαθηματικού Προγραμματισμού πραγματοποιείται η εφαρμογή του σε μια πόλη με ελληνικά χαρακτηριστικά σε ότι αφορά τη σύνθεση των σκουπιδιών. Πρόκειται για μια πόλη με πληθυσμό 4.000.000 κατοίκων και με σκουπίδια 2.100.000 t/year.

Συνολικά χρησιμοποιήθηκαν επτά τύποι κάδων:

- Γυαλί (Bin for Glass – BGL)
- Μέταλλο (Bin for Metal – BMT)
- Πλαστικό (Bin for Plastic – BPL)
- Χαρτί (Bin for paper – BPA)
- Ανακυκλώσιμα (Bin for comingled – BRC)
- Οργανικά (Bin for Organics – BOR)
- Μικτά (Bin for Mixed Waste – BMW)

Ο χρήστης καλείται να επιλέξει το συνδυασμό τους δημιουργώντας έτσι διαφορετικά σενάρια. Οι πίνακες που ακολουθούν παρουσιάζουν τα συστατικά των ΑΣΑ τα οποία συνολικά είναι τριάντα τέσσερα.

Πίνακας 1. Σύνθεση ΑΣΑ

Οργανικά	Μέταλλα
Απόβλητα τροφίμων (Food waste)	Σιδηρούχες μεταλλικές συσκευασίες (Ferrous metal packaging)
Απόβλητα κήπου (Garden & park waste)	Άλλα είδη σιδηρούχων μετάλλων (Other ferrous metals)
Άλλα οργανικά (Other organics)	Αλουμινένιες συσκευασίες (Aluminum packaging)
Δέρμα- Ξύλο- Ύφασμα	Άλλο είδος αλουμινίου (Other aluminum)
Καουτσούκ (Rubber)	Φύλλο (Foil)
Δέρμα (Leather)	Πλαστικά
Ξύλινη συσκευασία (Wood packaging)	Μικτές πλαστικές συσκευασίες (Mixed packaging plastic)
Άλλο είδος ξύλου (Other wood)	Άλλο είδος πλαστικού (Other plastic)
Ύφασμα (Textile)	Τσάντες (Bags)
Χαρτί	Ταινία συσκευασίας (Packaging film)
Χάρτινη συσκευασία (Packaging paper)	Άλλο είδος ταινίας (Other film)
Χαρτόνι (Cardboard)	PET μπουτίλιες (PET bottles)
Χαρτί εκτύπωσης (Print paper)	PVC μπουτίλιες (PVC bottles)
Άλλο είδος χαρτιού (Other paper)	Άλλα πυκνά πλαστικά (Other dense plastic)
Γυαλί	Διάφορα
Μικτές γυάλινες συσκευασίες (Mixed packaging glass)	Χαρτίνα κουτιά αναψυκτικών (Drink cartons)
Άλλο είδος γυαλιού (Other glass)	Ανόργανα (Inorganic)
Πράσινες μπουτίλιες (Green bottles)	Μικρά υλικά <10mm (Fine materials <10mm)
Καφέ μπουτίλιες (Brown bottles)	Άλλο (Other)

Όσον αφορά τις διεργασίες του συστήματος ΑΣΑ ακολουθεί πίνακας που παρουσιάζει τις τεχνολογίες και τον αριθμό των ειδικών μονάδων που χρησιμοποιήθηκαν.

Πίνακας 2. Διεργασίες του συστήματος ΑΣΑ

Τεχνολογία	Διαφορετικοί τύποι
Προσωρινή αποθήκευση ανακυκλώσιμων εκτός γυαλιού (TSR)	1
Προσωρινή αποθήκευση ανακυκλώσιμου γυαλιού (TSG)	1
Κομποστοποίηση (CMP)	5
Αναερόβια χώνευση (AD)	5
Τυπική μονάδα ανάκτησης υλικών (MRF)	3
Θερμική επεξεργασία αποβλήτων με ανάκτηση ενέργειας (WTE)	4
Βιοξήρανση (BD)	3
Μηχανική-Βιολογική Επεξεργασία (MBT)	18
Υγειονομική ταφή (LDF)	2

Με βάση τα παραπάνω δεδομένα, τρέχουμε αρχικά το πρόγραμμα έχοντας ως σενάριο αναφοράς το σενάριο κατά το οποίο δεν έχουμε περιορισμούς ανακύκλωσης, δεν έχουμε περιορισμό ελάχιστης

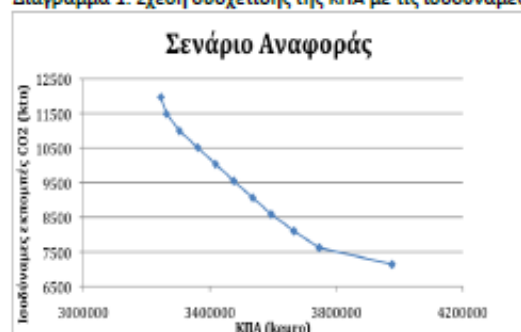
χωρητικότητας στην υγειονομική ταφή 1 (LDF1), χρησιμοποιούνται και οι 7 κάδοι και τέλος η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται στο wte και πωλείται στο δίκτυο είναι 85 ευρώ/MWh. Στην συνέχεια τρέχουμε το μοντέλο μας με διάφορες παραλλαγές, όπως για παράδειγμα αλλάζοντας τον περιορισμό για μέγιστη χωρητικότητα στο LDF1, αλλάζοντας τη σύνθεση των κάδων, αλλάζοντας την τιμή ηλεκτρισμού κ.α.

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

4.1 Σενάριο Αναφοράς

Τρέχοντας το πρόγραμμα για το σενάριο αναφοράς παίρνουμε το εξής Διάγραμμα 1 με τις κατά Pareto βέλτιστες λύσεις. Ο Πίνακας 3 παρουσιάζει τις μονάδες που διαφοροποιούνται στα σημεία ελάχιστου κόστους, ενδιάμεσης λύσης (6^ο σημείο) και ελάχιστων εκπομπών CO₂.

Διάγραμμα 1. Σχέση συσχέτισης της ΚΠΑ με τις ισοδύναμες εκπομπές CO₂ για το σενάριο αναφοράς



Πίνακας 3. Συνολική χωρητικότητα διεργασιών για τις 4 περιόδους στα σημεία ελάχιστου κόστους, ενδιάμεσης λύσης και ελάχιστων εκπομπών CO₂ για το σενάριο αναφοράς

Διεργασίες	Συνολική χωρητικότητα διεργασιών για τις 4 περιόδους (tn)		
	Σημείο ελάχιστου κόστους	Σημείο ενδιάμεσης λύσης (6)	Σημείο ελάχιστων εκπομπών CO ₂
tsr1	777000	777000	777000
tsg1	67400	67400	67400
ad2	573500	573500	573500
mr2	212200	0	0
mr3	0	212200	212200
wte1	236600	247500	0
wte4	111300	100800	360300
mbt1	281700	177000	0
mbt6	72300	205400	468100
mbt13	0	841600	841600
mbt18	841500	0	0
ldf1	16571800	16274400	14227100
ldf2	616200	642400	622000
Ts	0	0	1308300

Παρατηρούμε ότι στο σημείο ελαχίστου κόστους υπάρχει προτίμηση στα mr2 και mbt18 καθώς πρόκειται για φτηνές μονάδες. Αντιθέτως, στο σημείο ελαχίστων εκπομπών CO₂ υπάρχει προτίμηση στη μονάδα mbt13. Επιπλέον, είναι εμφανές ότι στα δύο πρώτα σημεία δεν χρησιμοποιείται σταθμός μεταφόρτωσης. Ο λόγος είναι καθαρά οικονομικός. Το κόστος του σταθμού μεταφόρτωσης μπορεί να μην καλύπτει το κόστος για παράδειγμα της εξοικονόμησης καυσίμου που πραγματοποιείται με την πρόσθεση του σταθμού. Από την άλλη όμως, για την ελαχιστοποίηση των εκπομπών CO₂ πραγματοποιείται εξοικονόμηση καθώς δεν γίνονται μετακινήσεις.

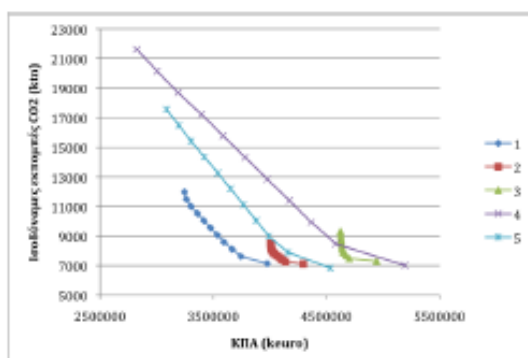
4.2 Παραλλαγή με βάση τη σύνθεση των κάδων

Μία από τις παραλλαγές μας αφορά τη σύνθεση των κάδων. Για το λόγο αυτό, όπως φαίνεται στον Πίνακα 4 που ακολουθεί, δημιουργήσαμε πέντε διαφορετικά σενάρια σύνθεσης κάδων.

Πίνακας 4. Σενάρια σύνθεσης κάδων

Σενάριο	1	2	3	4	5
BGL	1	0	0	0	0
BMT	1	0	0	0	0
BPL	1	0	0	0	0
BPA	1	1	1	0	0
BRC	1	1	1	1	1
BOR	1	1	0	0	1
BMW	1	1	1	1	1

Διάγραμμα 2. Σχέση συσχέτισης της ΚΠΑ με τις ισοδύναμες εκπομπές CO₂ για τα πέντε διαφορετικά σενάρια σύνθεσης των κάδων.



Από το διάγραμμα παρατηρούμε ότι το σενάριο 1, το οποίο αποτελεί και το σενάριο αναφοράς, είναι το καλύτερο καθώς πηγαίνει στα πιο μικρά κόσθη και στις πιο μικρές εκπομπές CO₂. Οι εκπομπές γενικότερα έχουν ένα κάτω όριο 7000 ktn. Το κόστος μπορεί να πάει μέχρι και 22000 ktn/year (σενάριο 4). Τέλος το σενάρια 3 και 4 είναι τα πιο ακριβά καθώς δεν έχουν κάδο για οργανικά απόβλητα.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Έν κατακλείδι, με τον Μαθηματικό Προγραμματισμό πραγματοποιήσαμε μια λεπτομερή μοντελοποίηση του προβλήματος της διαχείρισης των ΑΣΑ. Η εφαρμογή δε του μοντέλου μας προσφέρει αρκετή ευελιξία καθώς έχουμε τη δυνατότητα να αλλάζουμε εύκολα κάποια δεδομένα μας, όπως για παράδειγμα τη σύνθεση των κάδων ή την τιμή του ηλεκτρισμού, και να λαμβάνουμε άμεσα τα νέα αποτελέσματα. Επιπλέον, αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι η πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση παρέχει βαθμούς ελευθερίας στον αποφασίζοντα. Ο τελευταίος έχει τη δυνατότητα να συγκρίνει και να επιλέξει ανάμεσα από εξίσου καλές εναλλακτικές επιλογές, τις βέλτιστες λύσεις κατά Pareto, την «πλέον προτιμώμενη» σύμφωνα με τις υποκειμενικές του προτιμήσεις. Έτσι λοιπόν, η εισαγωγή περισσότερων του ενός κριτηρίων στη διαδικασία λήψης απόφασης οδηγεί σε μια πιο ρεαλιστική απεικόνιση των πραγματικών προβλημάτων.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η εργασία έγινε στα πλαίσια του έργου LIFE09 ENV/GR/000294 του προγράμματος LIFE

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- Abou Najm, M., El-Fadel, M. *Computer-based interface for an integrated solid waste management optimization model. Environmental Modelling & Software*, 2004, 19, 1151-1164.
- Belton, V., Stewart, T. *Multiple Criteria Decision Analysis. An Integrated Approach. Kluwer Academic Publishers*, 2002.
- Brooke, A., Kendrick, D., Meeraus, A., Raman, R. *GAMS. A user's guide*, GAMS development corporation, Washington, 1998.
- Figueira, J., Greco, S., Ehrgott, M. *Multiple Criteria Decision Analysis. State of the Art Surveys*, Springer, 2005.
- Iyer, R.R., Grossmann, I.E. *Synthesis and operational planning of utility systems for multiperiod operation. Computers & Chemical Engineering*, 1998, 22, 979-993.
- Louis, G., Shih, J-S. *A flexible inventory model for municipal solid waste recycling. Socio-Economic Planning Sciences*, 2007, 41, 61-89
- Mavrotas, G. *Effective implementation of the ϵ -constraint method in multiobjective mathematical programming problems. Applied Mathematics and Computation*, 2009, 21 (3), 455-465.
- Steuer, R.E. *Multiple Criteria Optimization. Theory, Computation and Application*, Krieger, 2nd edition, Krieger, Malabar FL, 1986

Waste Management Multi-Objective Optimization for Greenhouse Gases Emissions Control

SKOULAXINOY, Sotiria/EPEM SA, KARKAZI, Anna/EPEM SA, GARGOULAS, Nikolaos/EPEM SA, MAVROPOULOS, Antonis/EPEM SA, GEORGOPOULOU, Eleni/N.O.A, GAKIS, Nikolaos/FACE³TS SA, DERMATAS, Dimitris/DIAAMATH & N.T.U.A., MAVROTAS, Georgios/N.T.U.A., KATSOUROS, Vassilis/I.L.S.P.

CONTACT

Skoulaxinou, Sotiria / EPEM SA
141B Acharnon Str., Athens, GREECE
Tel.: +30 210 8627598, fax: +30 210 8627189, email: rskoulaxinou@epem.gr

EXECUTIVE SUMMARY

This paper presents the methodology that has been followed and the results that came up from the elaboration of an EC co-financed LIFE+ project in Greece (LIFE09/ENV/GR/294). The objective of the project is to develop a software tool that enables Waste Management Authorities and other stakeholders to substantially reduce GHG emissions resulting from their waste management (WM) activities. The tool provides "decision support" for the optimization of WM practices, in terms of GHG emissions and financial data through a simulation environment, where an existing or desired regional / local waste management system can be designed by the user. The innovative idea is the incorporation of an optimization function through which the tool will calculate the optimal values for the decision variables using Mathematical Programming (MP). The results of the software tool enabled the identification of procedures for the development of Local Action Plans, which aim to reduce GHG emissions from waste management activities at local level. Each Action Plan sets specific quantitative goals for GHG emissions reductions, specifies the means to attain them, as well as the relevant investments that need to take place and the timing of these investments.

INTRODUCTION

The main objective of the WASTE-C-CONTROL project is to develop a software tool that assists decision-makers to design and evaluate different integrated waste management systems, from the level of waste generation up to the level of waste treatment and disposal, on the basis of overall GHG emissions and management cost. In addition, the evaluation is extended also to ancillary environmental impacts, such as generation of air pollutants.

The investigation of different WM alternatives is performed through mathematical programming, the outcome of which is the identification of those integrated systems where their overall GHG emissions can be reduced only at the expense of management cost. In other words, the tool assists the user to build the so-called 'Pareto frontier' in the particular situation faced. In this way, decision-makers

become aware of trade-offs involved in their waste management problem and are able to select a solution by being aware of the main dilemmas and constraints faced.

The tool has been tested through three case studies in Greece, namely in the Regional Union of Chania, Crete, the Region of Eastern Macedonia-Thrace (north-eastern Greece) and the Region of Western Macedonia (north-central Greece). In this paper, data and results will be presented for the Region of Eastern Macedonia and Thrace (REMTH).

METHODOLOGY

The mathematical model that describes the Municipal Solid Waste (MSW) management system is developed using the principles of Mathematical Programming (MP). All the available technologies and paths of the MSW system are expressed in the model with proper relationships (equalities and inequalities). The model consists of the decision variables (the unknowns of the problem), the parameters (the known data), the constraints (the relationships that describe the system) and one or more objective functions (the drivers of the optimization).

Borrowing ideas from the field of process synthesis in chemical engineering, the problem can be formulated as a multi-period structure, design and operational optimization problem (Iyer and Grossmann, 1998). All the available MSW options and their interdependencies can be considered in the superstructure of the system (topology of all the available MSW options) and the MP model proposes the best solution. A simultaneous, structural, design and operational optimization of the MSW system is achieved i.e. the output of the created model is which technology units will be used and which paths are followed for the MSW system (structure), what is the capacity of these units (design) and what are the flows and operating loads to and from the units (operational optimization). MP has already been used for the optimization of MSW systems in various cases (see e.g. Abou Najm and El-Fadel, 2004, Louis and Shih, 2007, Jing et al., 2009).

The model which is developed is a multi-objective mathematical programming model. Specifically it has two objective functions: (1) the Net Present Value of the system over the 20-year horizon and (2) the CO₂-equivalent emissions. As the name suggests, multi-objective optimization (or multi-criteria optimization) involves optimisation in the presence of more than one (usually conflicting) objective functions (criteria). The main difference between single and multi-objective optimization is that in the case of the latter, there is usually no single optimal solution, but a set of equally good alternatives with different trade-offs, also known as Pareto-optimal (or non-dominated or efficient) solutions. The Pareto optimal solutions are the feasible solutions that cannot be improved in one objective function without deteriorating their performance in at least one of the rest. In the absence of any other information, none of these solutions can be said to be better than the other. Usually a decision maker is needed to provide additional preference information and to identify the “most preferred” solution (“optimal” according to his/her subjective preferences). Depending on the paradigm used, such knowledge may be introduced before, during or after the optimization process. Multi-objective optimization thus has to combine two aspects: optimization and decision support (Steuer, 1986). In the present study, the generation of the Pareto optimal solutions will be done using a version of the popular epsilon constraint method (Mavrotas, 2009).

Model Building

The mathematical model will describe the MSW system as a directed graph. There are nodes that represent the processes and arcs that represent the flows between the processes. The boundaries of the system are defined from the collection phase till the final disposal. The model will represent the

superstructure of the system, i.e. all the available options with their interconnections as shown in Figure 1. In Figure 1, one can see how the bins are connected with the processes, how the processes are interconnected and which the main products of each process are. It must be noted that for each generic technology there are more than one specific type of units that can be utilised which are mutually exclusive. For example, for Composting we have 5 types of units while for MBT we have 18 types of units. The optimal type of unit for each technology will be selected by the model.

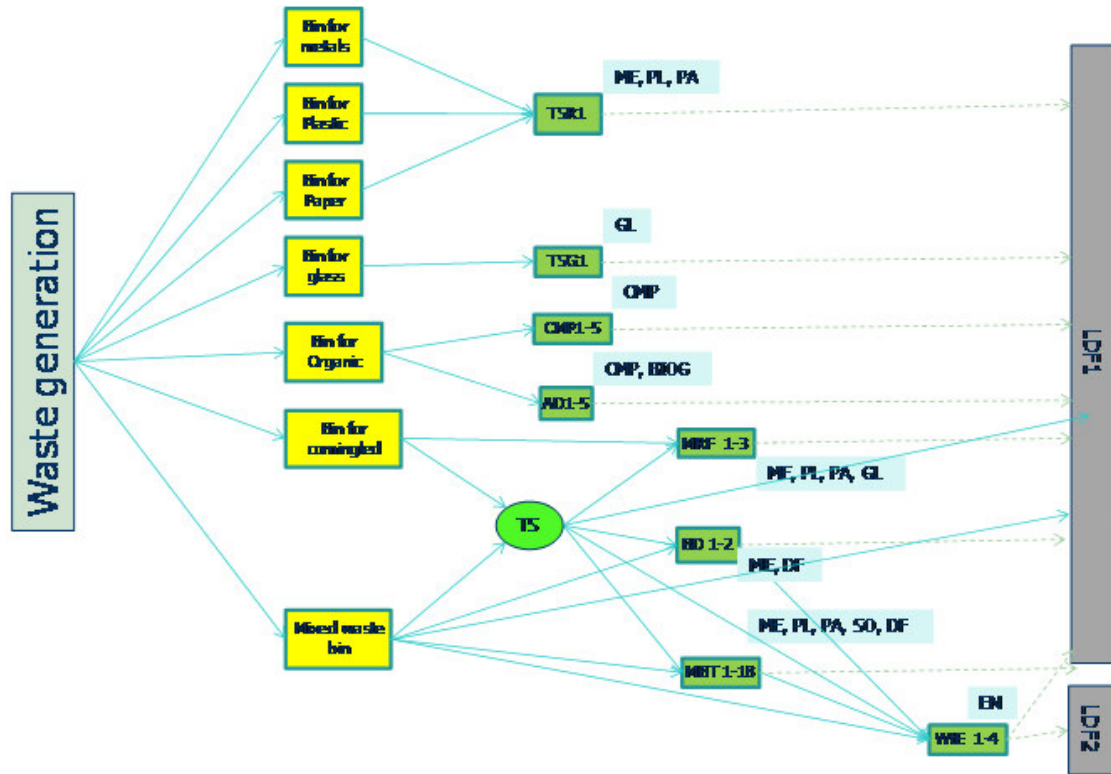


Figure 1 Graphical representation of the superstructure of the MSW system (Acronyms for Processes: TSR: Temporary Storage for Metals, Plastic and Paper, TSG: Temporary Storage for Glass, CMP: Composting, AD: Anaerobic Digestion, MRF: Material Recycle Facility, WtE: Waste to Energy, BD: Biodrying, MBT: Mechanical and Biological Treatment, TS: Transfer Station, LDF1: Landfill, LDF2: Landfill for Hazardous Waste. Acronyms for products: ME: Metals, PL: Plastic, PA: paper, GL: Glass, CMP: Compost, BIOG: Biogas, DF: Derived Fuel, SO: Stabilized Organic, EN: Energy)

The model is properly formulated in order to perform structural, design and operational optimization. In other words, the major questions that will be answered with the optimization process are: which processes (structure), what will be their capacity (design) and what will be there annual operational load (operation). All these figures will be computed in period-wise basis. In technical terms the model is a Multi-Objective Mixed Integer Linear Programming (MO-MILP) model, which means it contains continuous and integer (mostly binary) variables. The basic elements of the multi-objective mathematical programming model are briefly described below:

Objective functions

Two are the objective functions of the problem: (1) the minimization of the Net Present Value (NPV) of the MSW system over a period of 20 y, which represents the economic objective and (2) the minimization of total CO₂-eq emissions of the MSW system, which represents the environmental objective. The NPV incorporates the investment and operational costs, as well as the income from recyclables, electricity and other products over a 20-year period.

Decision variables

The decision variables of the model are actually the unknowns of the problems, i.e. those variables for which we are trying to find their optimal values. In our case we have discrete (binary or integer) and continuous decision variables. The discrete variables are mostly associated with the structural characteristics (is i-th technology present in the optimized MSW system? how many units will be needed?). The continuous variables are mostly associated with the design and operational characteristics (what is the capacity of i-th unit in period t? Which is the amount of waste transported from i-th unit to j-th unit?).

Constraints

The main constraints of the model are the mass balances that have to be satisfied between nodes (equality constraints) and the capacity constraints that have to be satisfied (“less than” constraints). There can be policy constraints (e.g. the recycling rate or the amount of waste sent to landfill). Logical constraints are also present in order to apply conditions for mutually exclusive alternatives. Auxiliary constraints may also be present (e.g. linearization of non-linear terms). Special reference should be made to the modeling of the landfill and the associated CH₄ emissions. It has been done using the IPCC guidelines and takes into account five waste categories (food, garden, paper, textile and wood) and the different behavior of treated – untreated material. The calculation of the CH₄ emissions (and therefore the CO₂ – equivalent) takes into account in a flexible manner the possibility of flaring, as well as the ongoing process of CH₄ emissions after the expiration of the study horizon. These ex-post emissions are explicitly calculated and participate in the minimization of CO₂-eq. objective function.

Parameters

The parameters of the model are the known data. These data are the economic and technological characteristics of the processes, the prices of the recycled materials and produced energy, and the conversion factor of every ingredient in each one of the candidate technologies. The original waste is classified in 34 ingredients and its composition is considered known for the model based on representative past data. The scheme of the bin configuration is also considered as given (which types of bins are used) in the model. The different bin schemes can be examined as different scenarios.

Modes of Operation and Expected Results

The model can be used as an optimization tool or just as a simple calculation tool. The user can adjust the extent of optimization by controlling the degrees of freedom of the model. Instead of performing a full optimization (with all the degrees of freedom), he/she can consider some technologies as given and the system will be optimized given this information. In this case the corresponding decision variables will have fixed values in the optimization and will not be altered. Moreover, the user can impose constraints (user defined constraints) on the flows (e.g. no more than 30,000 tn/year can be sent from the mixed waste bin to the MBT units). The full model includes approximately 24,445 continuous variables, 210 integer variables and 12,399 constraints.

The optimization of the multi-objective model provides a representative set of the Pareto optimal solutions for the MSW management problem. With the term “solution” we mean the structural characteristics (which units will be constructed in each period), the design characteristics (the capacity of the units, what capacity expansions will be required) and the operational characteristics (annual waste flows between the units). All these amounts are expressed with appropriate decision variables and their values will be the main output of the system, of course along with the value of the objective function(s).

The model is multiperiod and has a dynamic evolving element over time, following the scenario for the quantity of produced MSW (20y horizon divided into four periods). The results of the optimization will refer to each period of time and there will be inter-period constraints quantifying the relevant linking relationships. The model has been implemented and solved using the widely known modeling language GAMS / General Algebraic Modeling System (Brooke et al., 1998).

SOFTWARE TOOL

The Waste-C-Control tool is a decision support software (DSS) targeted to experts and/or practitioners in the field of MSW management. The user is able to examine various scenarios by designing conceptual architectures of MSW systems by selecting among the component technologies. Depending on the selected component technologies the system creates the conceptual architecture by adding in the graphical map the respective type of bins in the collection system, the types of landfills for disposal following the superstructure constraints illustrated in Figure 1 and the links among the component technologies (Figure 2). Note that for the disposal we use two types of landfill, with the hazardous connected only with the Waste to Energy component. For each technology (i.e. composting, anaerobic, WtE, etc.), many types of processes have been incorporated. Therefore, the software contains an extensive library with cost data (capex, opex) and environmental data (emissions, fuel consumption, etc.), for each technology type. Data has been drawn from literature, but also from questionnaires distributed to operating plants in Greece and Europe.

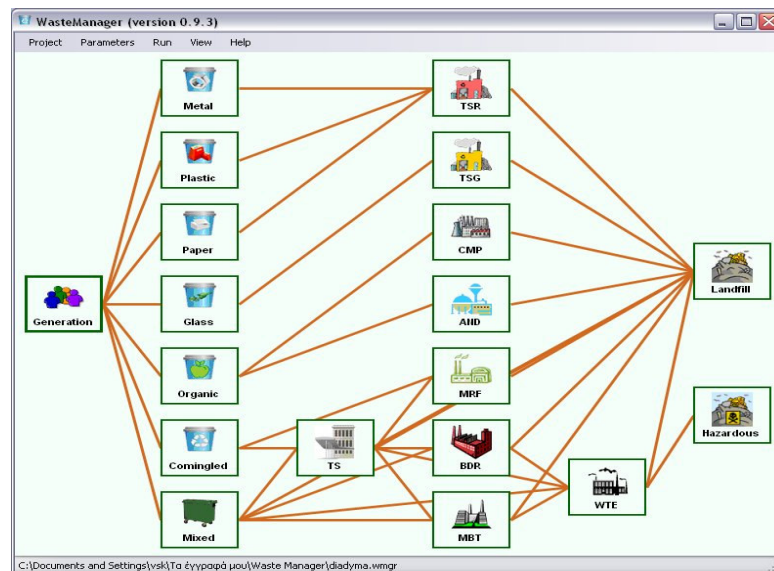


Figure 2 Conceptual map of an MSW system

Subsequently, the user has to define the parameters of the MSW system: (a) the composition of the MSW generated, (b) the collection system parameters, i.e. bin models, collection frequency, etc., (c) the component technologies parameters, e.g. min/max capacities of units in tonnes per year, etc., and (d) the transportation parameters, e.g. truck models of each link, average distances, etc. Next, the user may define constraints to be considered in the optimization problem, e.g. recycling targets, restrictions on the number of units, or in the flows between component technologies and run the optimization. The outcome of the optimization is the “Pareto frontier”; in this case a curve with the x-axis representing the net present cost for the 20y horizon and the y-axis the environmental impact of each solution, thus tons of CO₂-eq. (Figure 3). The user may select a point on the Pareto curve and see the parameters and outcomes of the respective solution analysed in the four 5-year periods (Figure 4).

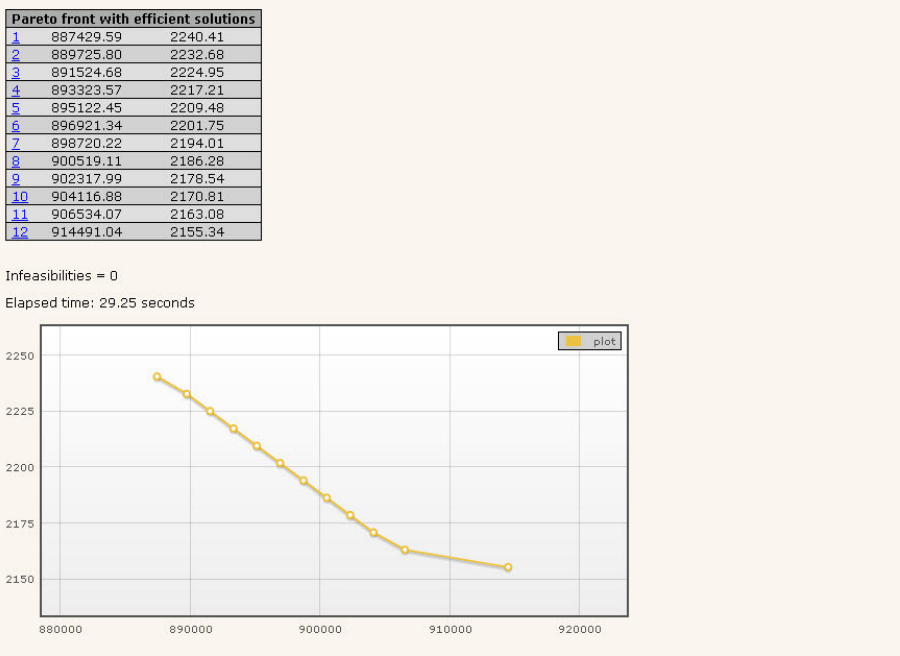


Figure 3 Pareto curve for the feasible solutions of an MSW system

Solution 1 887429.59 2240.41					Return
Annual cost per period (keuro):					
1	32496				
2	64473				
3	96938				
4	130844				
Net Present Cost for 20 years (keuro): 887430 Total emissions CO2-eq for 20 years(kt): 2240					
Annual costs and income by category (keuro)					
Bins:	518	550	664	750	
Transportation (capacity):	342	711	1113	1547	
Transportation (operation):	1518	1633	1812	1966	
Processes (capacity):	1640	2763	4237	5613	
Processes (operation):	30269	60665	92871	126296	
Income from recycle:	1791	1848	3758	5328	
Income from electricity:	0	0	0	0	
Investment costs					
Bins:	2245	2379	2873	3248	
Transportation:	4270	327	411	402	
Processes:	20444	14002	18381	17157	
Recycling rates					
wood packaging:	0.03	0.03	0.04	0.04	
paper:	0.40	0.40	0.47	0.52	
glass:	0.13	0.00	0.22	0.29	
metal:	0.09	0.07	0.30	0.43	
plastic:	0.05	0.05	0.07	0.08	
recyclable to recycle & energy:	0.15	0.13	0.21	0.25	
organics to landfill:	1.07	1.15	1.18	1.25	
Annual CO2-equivalent emissions by category (kt)					
From energy in processes:	3.43	3.52	5.20	6.29	
From processes (no LDF):	1.95	2.10	2.84	3.06	
From transportation:	2.13	2.30	2.55	2.76	
From Landfill:	34.36	94.46	129.22	151.88	
Load in the bins (tons)					
BGL	0	0	0	0	
BMT	0	0	0	0	
BPL	0	0	0	0	
BPA	0	0	0	0	
BRC	34999	35630	53440	65732	
BOR	28769	30991	41892	45129	
BMW	256232	278110	276041	289213	

Figure 4 Summary of the outcomes of a feasible solution

CASE STUDY: THE REGION OF EASTERN MACEDONIA-THRACE (REMTH)

Background Information

REMTH lies in the North-East part of Greece and is divided in five Regional Unions with a total of 22 Municipalities, with the main urban centres being Drama, Kavala, Xanthi, Komotini and Alexandroupolis. The rest of the municipalities are rural based. Also, the two islands / municipalities of Thasos and Samothrace are included. The total population is approximately 610,000 inhabitants.

Waste quantities are estimated based on the daily production rate of MSW per inhabitant. This rate is estimated as 1.40 kg/(inh.*d) for the urban areas and as 1.14 kg/(inh.*d) for the rest municipalities. This estimation results in a quantity of 320,000 tpa MSW, with an annual increase of 1.5%. The estimation is verified by sample weighing of the MSW collection vehicles.

REMTH has an officially approved Regional Waste Management Plan (RWMP, 2009), as dictated by the relevant Greek legislation. The RWMP sets key issues for MSW management:

- Utilization of transfer stations (TS) to efficiently (in environmental and cost terms) transfer waste to the dedicated facilities
- Achievement of the Packaging Directive targets by use of dedicated bins for dry recyclables and Material Recycling Facilities (MRF)
- Achievement of the Landfill Directive targets (Dir. 99/31/EC) by: a. Recycling of the organic fraction of MSW (separate collection and biological treatment) and b. Treatment of the rest of MSW in Integrated Waste Management Units (IWMU), incorporating mechanical –biological treatment in two central facilities with energy and material recovery and landfill of the residue.

So far, not all of the planned facilities have been constructed and MSW management is based mainly on landfill. Currently, the use of two (2) transfer stations has been initiated and one Material Recycling Facilities (MRF) (six are foreseen by the RWMP). As a result, the recycling of waste packaging material (“blue bin”) is practised only in three municipalities. The recycling of special types of solid wastes, such as ELVs, tyres, WEEE, batteries, etc., is extensively practiced in the whole Region.

Tool Application in REMTH

DIAAMATH, the formal Waste Management Body of REMTH, participates as a beneficiary in the LIFE 2009+ project. DIAAMATH has used the Waste-C-Control Tool to examine several waste management options (scenarios) with the aim to propose improvements to the MSW management plan (as applied so far, but also as planned in the official RWMP), in order to reduce GHG emissions and costs. The results (improvements) of this application will be incorporated in a Local Action Plan (LAP) that DIAAMATH is determined to apply.

Seven (7) scenarios were formulated using the software tool. The rationale behind the scenarios development was that from scenario 1 to scenario 7, there is a gradual improvement of waste treatment options, from only landfilling to more sophisticated options:

1. One – bin system for the total MSW – Landfilling. (Blank scenario).
2. Two – bin system/6 spots: packaging material (“blue bin”) and the rest MSW. Packaging Material recycling in six MRFs - landfilling of the rest MSW. The software “decides” the MRF technology, their capacity and the mass flow in the respective 5-y period.
3. Two – bin system/2 spots: Like scenario 2, but 2 MRFs, 2 composting facilities. The software “decides” also for the composting technology, capacity and mass flow.

4. Three – bin system/6 spots: packaging material (“blue bin”), organic fraction of MSW (OFMSW) and rest MSW. Recycling in 6 MRFs, composting of OFMSW in 6 composting facilities and landfilling of the rest MSW. The software “decides” for the MRF and composting technology, capacity and mass flow.
5. Three – bin system/2 spots: Like scenario 4, but 2 MRFs, 2 composting facilities
6. Three – bin system/2 spots/MBTs. Like scenario 5, but treatment of rest MSW in 2 MBTs producing RDF and in situ thermal utilization of the RDF. The software “decides” respectively for the MRF, composting, MBT and RDF thermal treatment technology, capacity and mass flow.
7. Three – bin system/2 spots/MBTs. Like scenario 5, but treatment of rest MSW in 2 MBTs producing RDF. Ex situ thermal utilization of the RDF (sale to end user). The software “decides” respectively for the MRF, composting and MBT technology, capacity and mass flow.

Results - Local Action Plan

Each scenario was a different “run” of the software and one Pareto front with 11 feasible solutions was produced for each scenario (see Figure 5). Based on the tool’s results, the most favoured scenario is 7.

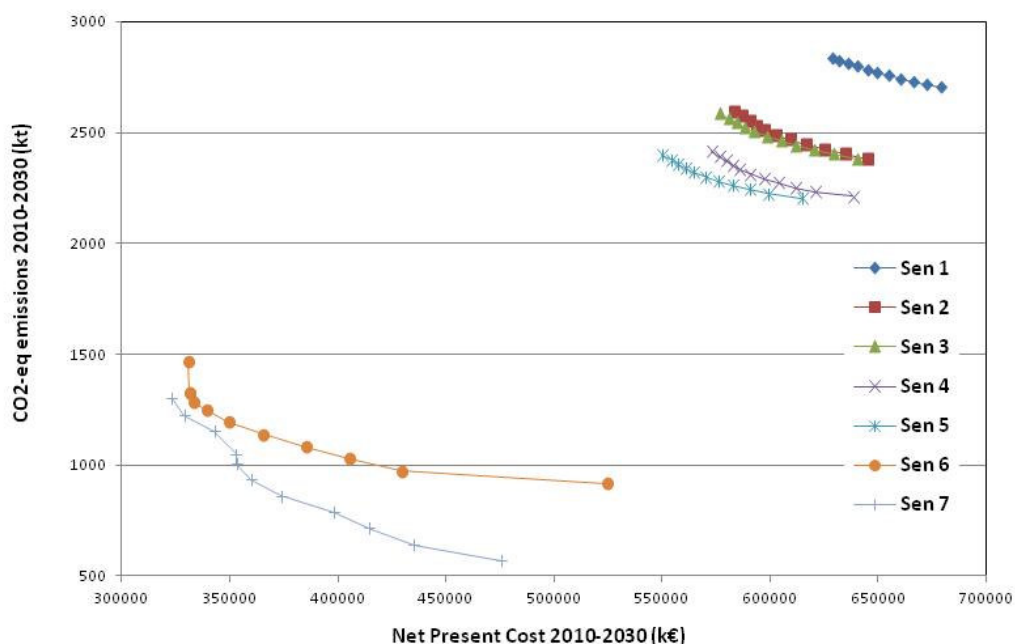


Figure 5 Pareto “fronts” or curves, for each scenario in REMTH

One can see from the curves that Scenario 7 results in lower emissions and costs. The points of each curve are the 11 feasible solutions that the tool produces. Each solution consists of different structural, design and operational characteristics. The decision-maker may choose the least costly one or (usually), the one in the middle of the curve.

By examining the scenarios and the feasible solutions of the preferable scenario, DIAAMATH has formulated a Local Action Plan (LAP), for the short-term, mid-term and long-term, with policies and measures regarding recycling of materials, collection and transport of wastes, waste treatment and disposal. The relative cost for the application of the LAP can be obtained by the software tool, while the reduction of GHG has been quantified, as well. As such, the environmental and cost “impact” of the plan is transparent to all involved stakeholders and can be communicated to the public.

Transfer of waste

The operation of all planned transfer stations should begin as soon as possible (short-term target), since, according to the tool, this results in lower GHG emissions (compared to current fuel consumption data), regardless the scenario examined.

Recycling of materials

In a mid-term period, the recycling of packaging materials by the “blue bin” system should be expanded to most of the municipalities in REMTH. Also in a mid-term horizon period the initiation of the operation of a second MRF should be considered.

Additionally, the introduction of a 3rd bin (organic bin) should apply, with the respective composting facilities. The tool indicated that two simple open-windrow composting plants would be sustainable for the case of REMTH.

Waste treatment

In the long-term the treatment of waste should be a reality by the utilization of appropriate treatment facilities. The solution positioned in the middle of the curve for scenario 7 (light purple curve, Figure 5), consists of two MBTs with the “B” part being dry anaerobic digestion and the “M” being high intensity mechanical pretreatment to supplement packaging waste recycling and to produce RDF. It is preferable to utilise the RDF in ex-situ installations (even though a negative selling price was used). These suggestions will be taken into account when the realization of the MBT plants is due.

Waste disposal

Also, in a long-term horizon period the waste heading towards disposal and landfilling should be the minimum. This means that in a long-term horizon period the IWMU should be constructed and operational.

Expected results

The expected results, in respect to the foreseen improvements of the waste management system can be summarized in the following:

- Short-term results (2012-2013): Utilization of Transfer Stations with respective saving of fuel, time and money.
- Mid-term results (until 2015): Covering more municipalities with the blue bin system and respectively increasing the recycling levels. The increased recycling levels means less amounts of waste heading for landfilling, saving in this way valuable space-volume in landfills. Treatment of the OFMSW by saving and reducing the GHG emissions (especially CH₄) from landfills.
- Long-term results (2016-2017): Treatment of mixed MSW in MBTs will result in the minimization of landfilling, increase of recycling and recovery of renewable energy.

CONCLUSIONS

Mathematical Programming proved to be a reliable tool for the multi-objective optimization of the MSW management system. The developed model is flexible and can be customized to any case, as the main key parameters are determined by the user. The synthesis (which units), design (which capacity) and operational (annual flows) optimization provides the Pareto optimal solutions based on two criteria: (1) the net present cost over the 20 years period and (2) the cumulative CO₂-eq emissions over the 20-year period. The obtained Pareto fronts from different scenarios can be compared and the

tradeoffs among the Pareto optimal solutions within each one Pareto front can be also investigated by the user. The dynamic evolution within the 20-year period of the corresponding technologies associated with each solution is also calculated.

The application of the software tool in REMTH enabled the development of a Local Action Plan, which aims to reduce GHG emissions from waste management activities at local level. Through the use of the tool, DIAAMATH was able to answer questions like “what is the necessary number of installations”, “what is the impact of adding OFMWS recycling in terms of costs and emissions”, “is it necessary to use transfer stations”, etc. The answers to these questions, which could not be materialised in the past, are now provided through an integrated solution that has been formulated and can be easily communicated by DIAAMATH’s waste experts to decisions-makers and the broader public, by using two comprehensive indicators: cost (NPV in million euros) and emissions (in CO₂-eq.), over a 20y period.

ACKNOWLEDGMENTS

The “Waste Management Options for Greenhouse Gases Emissions Control” project (LIFE09/ENV/GR/294) is being implemented with the contribution of the LIFE financial instrument of the European Community. More information is available at: www.epem.gr/waste-c-control.

REFERENCES

- Abou Najm, M., El-Fadel, M., (2004): *Computer-based interface for an integrated solid waste management optimization model*. Environmental Modelling & Software 19, pp. 1151-1164
- Amlinger, F., Peyr, S., Cuhls, C., (2008): *Greenhouse gas emissions from composting and mechanical biological treatment*. Waste Management and Research 26 (1), 47–60.
- Boldrin, A., Anderson, J., Moller, J. and Christensen T., (2009). *Composting and Compost Utilisation: Accounting of Greenhouse Gases and Global Warming Contribution*. Waste Management & Research, vol. 27 no. 8, pp. 696-706
- Brooke, A., Kendrick, D., Meeraus, A., Raman, R., (1998): *GAMS. A user’s guide*, GAMS development corporation, Washington.
- Harrison KW, Dumas RD, Barlaz MA, Nishtala SR, (2000): *A life-cycle inventory model of municipal solid waste combustion*. Journal of Air & Waste Management Association, Vol. 50(6), pp. 993-1003.
- Iyer, R.R., Grossmann, I.E. (1998): *Synthesis and operational planning of utility systems for multiperiod operation*. Computers & Chemical Engineering 22, pp. 979-993.
- Jing, S., Huang, G.H., Xi, B.D., Li, Y.P., Qin, X.S., Huo, S.L., Jiang, Y. (2009): A hybrid inexact optimization approach for solid waste management in the city of Foshan, China. *Journal of Environmental Management* 91, 389-402
- Louis, G., Shih, J-S. (2007): *A flexible inventory model for municipal solid waste recycling*. Socio-Economic Planning Sciences 41, pp. 61-89
- Mavrotas, G., (2009): *Effective implementation of the ϵ -constraint method in multiobjective mathematical programming problems*. Applied Mathematics and Computation, 21 (3), pp. 455-465.
- McDougall, F., White, P., Franke, M., Hindle, P., (2002): *Integrated Solid Waste Management: a Life Cycle Inventory*, Blackwell Publishing, Oxford, UK.
- Steuer, R.E., (1986): *Multiple Criteria Optimization Theory, Computation and Application*, Krieger, Malabar, FL.

ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΟΥ ΚΑΙΝΟΤΟΜΟΥ ΕΡΓΑΛΕΙΟΥ ΛΗΨΗΣ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ WASTE-C-CONTROL ΓΙΑ ΤΟΝ ΕΛΕΓΧΟ ΤΩΝ ΕΚΠΟΜΠΩΝ ΑΕΡΙΩΝ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ ΤΟΥ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ ΑΠΟ ΤΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΑΣΤΙΚΩΝ ΣΤΕΡΕΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ: ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑΚΗ ΕΝΟΤΗΤΑ ΧΑΝΙΩΝ

Σ.Α. Σκουλάξινου, Ν. Γάκης, Γ. Μαυρωτάς Ν. Γκάργκουλας

Εταιρία Περιβαλλοντικών Μελετών – ΕΠΕΜ Α.Ε, Αχαρνών 141β & Λαερτίου, Αθήνα, Email: rskoulaxinou@epem.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο στόχος της παρούσας εργασίας είναι να παρουσιάσει τη διαδικασία και τη μέθοδο που ακολουθήθηκε καθώς και τα αποτελέσματα που προέρχονται από την εκπόνηση ενός έργου που συγχρηματοδοτείται από το πρόγραμμα LIFE + (LIFE09/ENV/GR/294). Ο στόχος του έργου ήταν να αναπτύξει ένα εργαλείο λογισμικού, (WASTE-C-CONTROL), που δίνει τη δυνατότητα σε Φορείς Διαχείρισης Στερεών Αποβλήτων-ΦοΔΣΑ και άλλους εμπλεκόμενους, να μειώσουν τις εκπομπές Αερίων Φαινομένου του Θερμοκηπίου –ΑΦΘ, οι οποίες προκύπτουν από τις δραστηριότητες διαχείρισης των ΑΣΑ.

Το εργαλείο προσφέρει υποστήριξη αποφάσεων μέσα από μία καινοτόμο προσέγγιση, αυτή της βελτιστοποίησης δύο βασικών στόχων: τη μείωση των εκπομπών ΑΦΘ από τη διαχείριση ΑΣΑ και τη μείωση του κόστους. Προκειμένου να επιτευχθεί αυτό, χρησιμοποιούνται οι αρχές του Μαθηματικού Προγραμματισμού σε ένα δυναμικό περιβάλλον προσομείωσης όπου ο χρήστης μπορεί να δημιουργήσει ένα νέο επιθυμητό σύστημα διαχείρισης ή να επανασχεδιάσει ένα υπάρχον, ξεκινώντας από τη συλλογή, περνώντας στην επεξεργασία και καταλήγοντας στην τελική διάθεση.

Προκειμένου να γίνει σαφέστερη η δυναμική του εργαλείου, στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται ως παράδειγμα η περίπτωση της διαχείρισης των ΑΣΑ στην περιφερειακή ενότητα Χανίων, Περιφέρειας Κρήτης.

Λέξεις Κλειδιά: *αέριες εκπομπές θερμοκηπίου (ΑΦΘ), μείωση ΑΦΘ, βελτιστοποίηση συστήματος*

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο κύριος στόχος του έργου είναι να αναπτύξει ένα εργαλείο λογισμικού που βοηθάει τους ιθύνοντες να σχεδιάζουν και να αξιολογούν διαφορετικά συστήματα ολοκληρωμένης διαχείρισης αποβλήτων, από το επίπεδο της παραγωγής αποβλήτων μέχρι το επίπεδο της επεξεργασίας και της διάθεσής τους, με βάση τις συνολικές εκπομπές ΑΦΘ και τη διαχείριση του κόστους.

Το εργαλείο έχει δοκιμαστεί μέσω τριών φορέων διαχείρισης στην Ελλάδα (οι οποίοι συμμετέχουν στο πρόγραμμα LIFE ως συνδικαιούχοι): τη ΔΕΔΙΣΑ στην περιφερειακή ενότητα των Χανίων, τη ΔΙΑΑΜΑΘ στην περιφέρεια Ανατολικής Μακεδονίας-Θράκης και τη ΔΙΑΔΥΜΑ στην περιφέρεια Δυτικής Μακεδονίας. Στο παρόν άρθρο, δεδομένα και αποτελέσματα θα παρουσιαστούν για την περιφερειακή ενότητα Χανίων.

2 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Το μαθηματικό μοντέλο που περιγράφει το σύστημα Διαχείρισης αστικών Στερεών Αποβλήτων (Δ.Σ.Α) έχει αναπτυχθεί χρησιμοποιώντας τις αρχές του Μαθηματικού Προγραμματισμού (ΜΠ). Όλες οι διαθέσιμες τεχνολογίες και οι διαδρομές του συστήματος εκφράζονται στο μοντέλο με τις κατάλληλες σχέσεις (ισότητες και ανισότητες). Το μοντέλο αποτελείται από τις μεταβλητές απόφασης (οι άγνωστοι της εξίσωσης του προβλήματος), τις παραμέτρους (τα γνωστά δεδομένα), τους περιορισμούς (οι σχέσεις που περιγράφουν το σύστημα) και μία ή περισσότερες αντικειμενικές συναρτήσεις (τις οποίες προσπαθεί το μοντέλο να βελτιστοποιήσει).

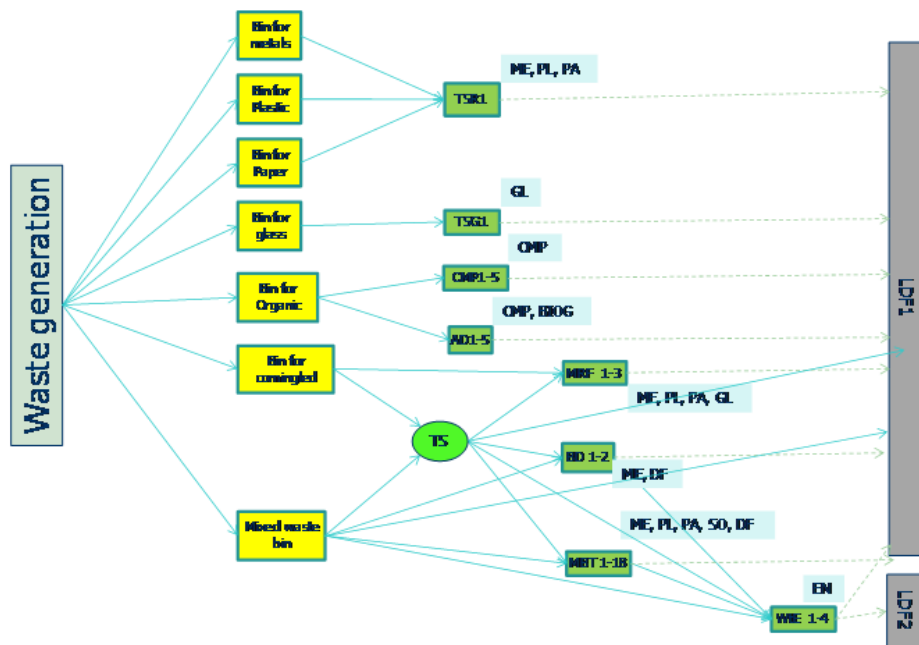
Δανειζόμενος κανείς ιδέες από το πεδίο της σύνθεσης διεργασιών στη χημική μηχανική, μπορεί να διατυπώσει το πρόβλημα ως ένα δομικό, σχεδιαστικό, λειτουργικό και πολύ-περιοδικό πρόβλημα αριστοποίησης (Iyer and Grossmann, 1998). Έτσι, επιτυγχάνεται μια ταυτόχρονη βελτιστοποίηση του συστήματος Δ.Σ.Α σε 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 20ετίας, χωρισμένου σε 4 περιόδους, οπότε το μοντέλο προτείνει και τη χρονική περίοδο εισαγωγής μιας μονάδας στο σύστημα διαχείρισης (χρονικό επίπεδο). Ο ΜΠ έχει ήδη χρησιμοποιηθεί για την βελτιστοποίηση των συστημάτων Δ.Σ.Α σε διάφορες περιπτώσεις (π.χ. Abou Najm & El-Fadel, 2004, Louis & Shih, 2007, Jing et al., 2009).

Το μοντέλο που έχει αναπτυχθεί είναι ένα πολυκριτηριακό μαθηματικό μοντέλο προγραμματισμού. Συγκεκριμένα, προσπαθεί να βελτιστοποιήσει δύο αντικειμενικές συναρτήσεις: (1) την καθαρή παρούσα αξία του κόστους του συστήματος κατά τη διάρκεια του χρονικού ορίζοντα 20 ετών και (2) τις εκπομπές CO_{2-eq}. Όπως υποδηλώνει το όνομα, το πολυκριτηριακό μοντέλο βελτιστοποίησης (ή Πολυκριτηριακή ανάλυση στη βελτιστοποίηση) περιλαμβάνει την βελτιστοποίηση παρουσία πάνω από ενός (συνήθως αντικρουόμενων) αντικειμενικών συναρτήσεων (κριτήρια). Η κύρια διαφορά μεταξύ απλής και πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης είναι ότι στην περίπτωση των τελευταίων, 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. Ελλείπει 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 ιθύνοντα) λύση.

2.1 Δημιουργία Μοντέλου

Το μαθηματικό μοντέλο περιγράφει το σύστημα Δ.Σ.Α ως ένα γράφημα. Υπάρχουν κόμβοι που αντιπροσωπεύουν τις τεχνολογίες και γραμμές που αντιπροσωπεύουν τις ροές μεταξύ των διεργασιών. Τα όρια του συστήματος ξεκινούν από τη φάση της συλλογής μέχρι την τελική διάθεση. Το μοντέλο δημιουργεί δηλαδή την λεγόμενη «υπερκατασκευή» του συστήματος, δηλαδή όλες οι διαθέσιμες επιλογές με τη μεταξύ τους διασύνδεση, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1. Στο Σχήμα 1, μπορεί κανείς να δει πώς οι κάδοι είναι συνδεδεμένοι με τις διεργασίες (τεχνολογίες), τον τρόπο που οι διεργασίες είναι διασυνδεδεμένες και ποιά είναι τα κύρια προϊόντα της κάθε διεργασίας.



Σχήμα 1: Γραφική αναπαράσταση της «υπερκατασκευής» του μοντέλου (Ακρωνύμια τεχνολογιών: TSR: Temporary Storage/Προσωρινή αποθήκευση ανακυκλώσιμων πλην γυαλιού, TSG: Temporary Storage for Glass/ Προσωρινή αποθήκευση γυαλιού, CMP: Composting/κομποστοποίηση βιοαποβλήτων, AD: Anaerobic Digestion/ Αναερόβια Χώνευση βιοαποβλήτων, MRF: Material Recycle Facility/Κέντρο Διαλογής Ανακυκλώσιμων Υλικών, WtE: Waste to Energy/Μονάδα ενεργειακής αξιοποίησης, BD: Biodrying/Μονάδα βιολογικής ξήρανσης, MBT: Mechanical and Biological Treatment/Μηχανική Βιολογική Επεξεργασία, TS: Transfer Station/Σταθμός Μεταφόρτωσης, LDF1: Landfill/XYT μη επικινδύνων, LDF2: Landfill for Hazardous Waste/ XYT επικινδύνων. Ακρωνύμια προϊόντων: ME: Metals/μέταλλα, PL: Plastic/πλαστικό, PA: paper/χαρτί, GL: Glass/γυαλί, CMP: Compost/κομποστό, BIOG: Biogas/βιοαέριο, DF: Derived Fuel/δευτερογενές καύσιμο, SO: Stabilized Organic/σταθεροποιημένο οργανικό, EN: Energy/ενέργεια)

Τα βασικά στοιχεία του μαθηματικού μοντέλου προγραμματισμού περιγράφονται παρακάτω

Αντικειμενικές Συναρτήσεις

Δύο είναι οι αντικειμενικές συναρτήσεις του προβλήματος: (1) η ελαχιστοποίηση της Καθαρής Παρούσας Αξία (ΚΠΑ) του συστήματος διαχείρισης σε περίοδο 20 ετών, η οποία αντιπροσωπεύει το οικονομικό κριτήριο και (2) η ελαχιστοποίηση των συνολικών εκπομπών CO₂-eq του συστήματος, η οποία αντιπροσωπεύει το περιβαλλοντικό κριτήριο. Η συνάρτηση της ΚΠΑ ενσωματώνει το κόστος επένδυσης και λειτουργίας, καθώς και τα έσοδα πώληση υλικών και ενέργειας για περίοδο 20 ετών.

Μεταβλητές Απόφασης

Οι μεταβλητές απόφασης του μοντέλου είναι οι άγνωστοι των εξισώσεων του προβλήματος, για τους οποίους το μοντέλο προσπαθεί να υπολογίσει τις βέλτιστες τιμές. Στο μοντέλο που έχει δημιουργηθεί υπάρχουν διακριτές (δυναμικές ή ακέραιες) και συνεχείς μεταβλητές απόφασης. Οι διακριτές μεταβλητές ως επί το πλείστον είναι συνδεδεμένες με τα δομικά χαρακτηριστικά (είναι η τεχνολογία *i*, παρούσα στο βελτιστοποιημένο σύστημα διαχείρισης; πόσες μονάδες θα χρειαστούν;). Οι συνεχείς μεταβλητές σχετίζονται κυρίως με το

σχεδιασμό και τα λειτουργικά χαρακτηριστικά (ποιά είναι η δυναμικότητα της μονάδας i , κατά την περίοδο t ; Τι ποσότητα αποβλήτων από τη μονάδα i μεταφέρονται στη μονάδα j);

Περιορισμοί

Οι κύριοι περιορισμοί του μοντέλου είναι τα ισοζύγια μάζας που πρέπει να ικανοποιούνται μεταξύ κόμβων (περιορισμοί ισότητας) και οι περιορισμοί χωρητικότητας (περιορισμοί τύπου «μικρότερο από»). Μπορεί να εισαχθούν και περιορισμοί πολιτικής (π.χ. το ποσοστό ανακύκλωσης ή η ποσότητα αποβλήτων που αποστέλλονται προς υγειονομική ταφή). Υπάρχουν επίσης λογικοί περιορισμοί προκειμένου να εφαρμόζονται οι όροι για αμοιβαία αποκλειόμενες εναλλακτικές λύσεις. Βοηθητικοί περιορισμοί μπορεί επίσης να είναι παρόντες (π.χ. γραμμικοποίηση των μη γραμμικών όρων).

Παράμετροι

Οι παράμετροι του μοντέλου είναι τα γνωστά δεδομένα. Τα δεδομένα αυτά είναι τα οικονομικά και τεχνολογικά χαρακτηριστικά των τεχνολογιών, οι τιμές των ανακυκλωμένων υλικών και της ενέργειας που παράγονται, καθώς και ο συντελεστής μετατροπής του κάθε συστατικού σε κάθε μία από τις υποψήφιες τεχνολογίες. Η αρχική ποσότητα των Α.Σ.Α κατατάσσεται σε 34 συστατικά και η σύνθεσή της θεωρείται γνωστή για το μοντέλο (εισαγωγή στοιχείων από το χρήστη). Το σύστημα συλλογής (αριθμός και είδος κάδων), επίσης θεωρείται γνωστό από το μοντέλο. Τυχόν διαφορετικοί συνδυασμοί κάδων συλλογής μπορούν να εξετασθούν ως διαφορετικά σενάρια.

2.2 Τύποι λειτουργίας και αποτελέσματα

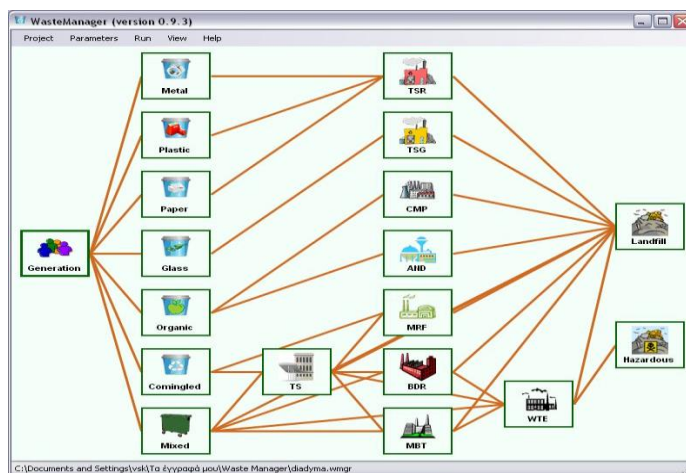
Το μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ένα εργαλείο βελτιστοποίησης ή ως ένα απλό εργαλείο υπολογισμών. Ο χρήστης μπορεί να ρυθμίσει το βαθμό βελτιστοποίησης, ελέγχοντας τους βαθμούς ελευθερίας του μοντέλου. Αντί επομένως να εκτελείται μια πλήρης βελτιστοποίηση (με όλους τους βαθμούς ελευθερίας), ο χρήστης μπορεί να εισάγει ορισμένες τεχνολογίες ως δεδομένες και το σύστημα θα βελτιστοποιηθεί με δεδομένες αυτές τις πληροφορίες. Στην περίπτωση αυτή οι αντίστοιχες μεταβλητές απόφασης θα έχουν σταθερές τιμές στη βελτιστοποίηση και δεν θα μεταβάλλονται. Επιπλέον, ο χρήστης μπορεί να επιβάλει περιορισμούς σχετικά με τις ροές (π.χ. όχι περισσότεροι από 30.000 tn/y μπορούν να σταλούν από το κάδο των ΑΣΑ σε μονάδες ΜΒΕ).

Για την επίλυση χρησιμοποιείται η ευρέως γνωστή γλώσσα GAMS (General Algebraic Modeling System, Brooke et al., 1998).

3 ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΕΡΓΑΛΕΙΟ

Το εργαλείο Waste-C-Control είναι ένα λογισμικό υποστήριξης απόφασης (Decision Support Software-DSS) που απευθύνεται σε εμπειρογνώμονες ή/και επαγγελματίες στον τομέα ΔΣΑ. Ο χρήστης είναι σε θέση να εξετάζει διάφορα σενάρια σχεδιάζοντας διάφορες «αρχιτεκτονικές» συστημάτων διαχείρισης, επιλέγοντας μεταξύ των διαθέσιμων τεχνολογιών. Ανάλογα με την επιλεγμένη τεχνολογία το σύστημα δημιουργεί την αρχιτεκτονική προσθέτοντας στο γράφημα (βλέπε Σχήμα 2) το αντίστοιχο είδος κάδου, το είδος του χώρου υγειονομικής ταφής και τις συνδέσεις μεταξύ των τεχνολογιών.

Το λογισμικό περιλαμβάνει μια εκτεταμένη βιβλιοθήκη με δεδομένα κόστους (επενδυτικό, λειτουργικό) και περιβαλλοντικά δεδομένα (εκπομπές, κατανάλωση καυσίμου, κ.λπ.). Τα στοιχεία αντλήθηκαν από τη βιβλιογραφία αλλά και από κατάλληλα σχεδιασμένα ερωτηματολόγια που διανεμήθηκαν σε μονάδες εν λειτουργία στην Ελλάδα και το εξωτερικό.



Σχήμα 2: Γραφική αναπαράσταση ενός συστήματος διαχείρισης ΑΣΑ, στο υπολογιστικό εργαλείο

Το αποτέλεσμα της βελτιστοποίησης είναι η «καμπύλη Pareto». Δηλαδή μια καμπύλη με τον άξονα x, να αντιπροσωπεύει την καθαρή παρούσα κόστους για τον 20ετή ορίζοντα και τον άξονα y τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της κάθε λύσης, δηλαδή τους τόνους CO₂-eq (Σχήμα 3). Ο χρήστης μπορεί να επιλέξει ένα σημείο στην καμπύλη Pareto και να δει τις παραμέτρους και τα αποτελέσματα της επίλυσης για καθεμιά από τις τέσσερις περιόδους των 5 ετών.

4 ΕΦΑΡΜΟΓΗ: ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑΚΗ ΕΝΟΤΗΤΑ ΧΑΝΙΩΝ

4.1 Δεδομένα

Η Περιφ. Ενότητα Χανίων βρίσκεται στο δυτικότερο άκρο της Κρήτης, στη Νότια Ελλάδα. Αποτελείται από επτά δήμους: Αποκόρωνας, Χανιά-Κίσσαμος, Σεληνός, Καντάνος, Πλατανιάς Σφακιά και Γαύδος (μικρά Νήσος). Ο πληθυσμός φτάνει τους 156.220 κατοίκους, σύμφωνα με τα προσωρινά στοιχεία της απογραφής του 2011.

Η διαχείριση των Α.Σ.Α της ενότητας των Χανίων στηρίζεται στην ολοκληρωμένη εγκατάσταση επεξεργασίας και διάθεσης που βρίσκεται στη θέση Κορακιά. Υπεύθυνος Φορέας Διαχείρισης Αποβλήτων είναι η Διαδημοτική Επιχείρηση Διαχείρισης Στερεών Αποβλήτων Α.Ε. - Δ.Ε.ΔΙ.Σ.Α..

Το Εργοστάσιο Μηχανικής Ανακύκλωσης και Κομποστοποίησης (Ε.Μ.Α.Κ.) ξεκίνησε τη λειτουργία του την άνοιξη του 2005. Αυτή τη στιγμή επεξεργάζονται ~93,000 tn/y και η λειτουργία της εγκατάστασης γίνεται σε 2 βάρδιες, 6 ημέρες την εβδομάδα. Η μέγιστη προβλεπόμενη παραγωγή αποβλήτων υπολογίστηκε στους 70.000 tn έως το 2015 και τα πράσινα απορρίμματα στους 10.500 tn.

Στο ΕΜΑΚ Χανίων καθημερινά διαχωρίζονται σε επιμέρους υλικά 50 τόνοι ανακυκλώσιμων υλικών (περίπου 13,000 tn/y) όπως χαρτί, χαρτόνι, πλαστικά, αλουμίνιο, μέταλλα, γυαλί, οι οποίοι οδηγούνται στην εγκατάσταση μέσω του εκτεταμένου δικτύου διαλογής στην πηγή των μπλε και κίτρινων κάδων (γυαλί), της ΔΕΔΙΣΑ. Τα διαχωρισμένα υλικά οδηγούνται σε πιστοποιημένες βιομηχανίες και εταιρίες της Αττικής και του Ηρακλείου.

Στο τμήμα Μηχανικής Διαλογής και Κομποστοποίησης Συμμείκτων διαχωρίζονται μηχανικά 100 τόνοι συμμεικτων απορριμμάτων και οδηγούνται προς κομποστοποίηση περί τους 40 τόνους ζυμώσιμων υλικών, στα οποία προστίθενται τεμαχισμένα κλαδιά από κλαδέματα.

Κάθε μέρα οδηγούνται για διάθεση στον Χώρο Υγειονομικής Ταφής, 174 τόνοι απορριμμάτων.

Προς το παρόν, στο νομό Χανίων δεν γίνεται χωριστή συλλογή των οργανικών αποβλήτων. Το Ε.Μ.Α.Κ. επεξεργάζεται και διαχειρίζεται τα Α.Σ.Α. με σκοπό τη μείωση του οργανικού κλάσματος των αποβλήτων που οδηγούνται στον Χ.Υ.Τ.

Πίνακας 1: Παραγωγή ΑΣΑ και ανακυκλώσιμων ανά δήμο

Δήμος	ΑΣΑ, tn	Ανακυκλώσιμα, tn
Χανίων	53.446	11.532
Κισσάμου	5.460	267
Πλατανιά	11.800	777
Σφακίων	1.311	0
Αποκορώνου	8.400	406
Σύνολο	80,417	12,982

Η σύνθεση των αποβλήτων παρατίθεται στον επόμενο πίνακα:

Πίνακας 2: Σύνθεση αποβλήτων

	Ανακυκλώσιμα υλικά	Α.Σ.Α.	Πράσινα κήπων
Ανάμικτο χαρτί/χαρτόκουτα	28.47 % / 42.2 %	13.14 % / 6.10 %	
Πλαστικό (λευκό φιλμ/ανάμικτο)	4.32 % / 6.28 %	6.28 %	
ΡΕΤ	1.08 %		
ΡΡ	0.46 %	14.25 %	
ΡΕ	1.06 %		
Σιδηρούχα	1.62 %	2.78 %	
Αλουμίνιο	0.22 %		
Γυαλί	2.52 %	2.23 %	
Τετραπάκ	0.086 %	1.77 %	
Ύφασμα/δέρμα/ελαστικά/ξύλο	3.12 %	7.15 %	
Οργανικά	2.54 %	37.17 %	100 %
	6.11 %	5.58 %	
Άλλα		3.55 %	

4.2 Σενάρια που εξετάστηκαν

Με στόχο, στα πλαίσια του προγράμματος LIFE, να δημιουργηθεί ένα Τοπικό Σχέδιο Δράσης (ΤΣΔ), για τη μείωση των εκπομπών ΑΦΘ από τη διαχείριση ΑΣΑ, εξετάστηκαν τα επόμενα σενάρια:

Σενάριο 1: Υφιστάμενη κατάσταση διαχείρισης ΑΣΑ. Λαμβάνεται παραγωγή αποβλήτων ίση με 93.000 tn/y και:

- 13.000 συλλεγόμενοι τόνοι ανακυκλώσιμων υλικών από το μπλε κάδο εισέρχονται στο ΕΜΑΚ και διαχωρίζονται σε επιμέρους υλικά
- 25.000 τόνοι από τα εισερχόμενα σύμμεικτα ΑΣΑ εισέρχονται στο ΕΜΑΚ, ενώ 55.000 τόνοι ΑΣΑ οδηγούνται κατευθείαν προς ταφή χωρίς επεξεργασία
- Δεν υπάρχουν Σταθμοί Μεταφόρτωσης

Σενάριο 2: Εφαρμογή ΠΕΣΔΑ και βελτιστοποίηση εξοπλισμού ΕΜΑΚ: Για τη δημιουργία του δεύτερου σεναρίου λήφθηκε υπ'όψιν κυρίως ο Περιφερειακός Σχεδιασμός καθώς και οι δυνατότητες βελτιστοποίησης του ΕΜΑΚ (αύξηση βαθμού αυτοματοποίησης).

- Δημιουργία τεσσάρων σταθμών Μεταφόρτωσης/ ένας σε κάθε δήμο.
- Προδιαλογή χαρτιού 8.000 tn/y, γυαλιού 200 tn/y και ανάμικτων ανακυκλώσιμων (μπλε κάδος) 5.000 tn/y, καθώς και 10.000 tn/y οργανικού. Το οργανικό κλάσμα θα επεξεργάζεται στη μία εκ των δύο υφιστάμενων δεξαμενών κομποστοποίησης του ΕΜΑΚ
- Τα ανάμικτα ανακυκλώσιμα επεξεργάζονται στο ΕΜΑΚ, το οποίο έχει αναβαθμιστεί από άποψη μηχανολογικού εξοπλισμού (διαχωρισμοί με μηχανικό τρόπο κι όχι χειρονακτικά)
- Λειτουργία του αναβαθμισμένου ΕΜΑΚ για την υπολειπόμενη ποσότητα από τα ΑΣΑ, με δεδομένη δυναμικότητα 70.000tn/y.
- Ο ΧΥΤ δέχεται μόνο υπολείμματα

Σενάριο 3: Παραγωγή RDF: Ομοίως με το δεύτερο σενάριο αλλά με τη διαφορά ότι κατά τη Μηχανική επεξεργασία παράγεται RDF, το οποίο διατίθεται με αρνητική τιμή -30 €/tn, σε τσιμεντοβιομηχανία εκτός της Περιφέρειας Κρήτης.

Σενάριο 4.1: Όμοιο με το Σενάριο 3, με τη διαφορά ότι, το υπολογιστικό εργαλείο επιλέγει τεχνολογία για τον μπλε κάδο (τύπος ΚΔΑΥ), για το οργανικό (κομποστοποίηση ή αναερόβια χώνευση) και για τα σύμμεικτα.

Σενάριο 4.2: Όμοιο με το σενάριο 4.1, ωστόσο επιβάλλεται περιορισμός στην ταφή Βιοαποδομήσιμων Αστικών Αποβλήτων - ΒΑΑ. Οι στόχοι υπολογίστηκαν για την ενότητα Χανίων ως ποσοστό 22% του στόχου της Κρήτης, βάση της ΚΥΑ 29407/3508.

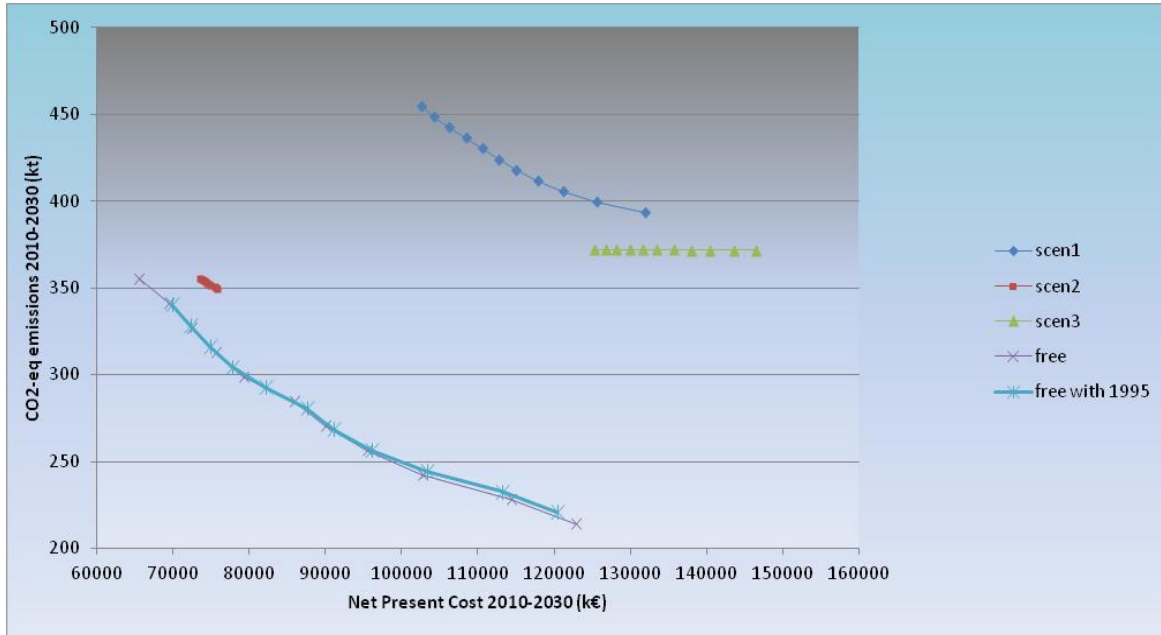
4.3 Αποτελέσματα από τη χρήση του εργαλείου

Το εργαλείο παρέχει τη δυνατότητα να παραχθούν έντεκα λύσεις ανά σενάριο. Η κάθε λύση μπορεί να παρέχει διαφορετικές τεχνολογίες για τη διαχείριση των αποβλήτων σε συνδυασμό με το κόστος διαχείρισης και τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα. Η λύση 1 σε κάθε σενάριο αντιπροσωπεύει τη λύση ελαχίστου κόστους και η λύση 11 τη λύση ελαχίστων εκπομπών (Σχήμα 3).

Σε σχέση με το σενάριο 1 το οποίο παρουσιάζει την υφιστάμενη κατάσταση, παρατηρείται μετακίνηση της καμπύλης σε μικρότερα κόστη και εκπομπές εξαιτίας της βελτιστοποίησης του Ε.Μ.Α.Κ., της προσθήκης ΣΜΑ (μείωση εκπομπών και οικονομία κλίμακας), της μείωσης της ταφής συμμείκτων και του κόστους της διαλογής εξαιτίας της χωριστής συλλογής χαρτιού και οργανικού. Σχετικά με το σενάριο 3 παρατηρείται αύξηση στα κόστη λόγω του ότι δεν υπάρχει μονάδα ενεργειακής αξιοποίησης RDF στη Κρήτη. Στα σενάρια 4.1 και 4.2 ενώ επιτυγχάνονται οι στόχοι της ΚΥΑ 29407/3508 για την ταφή, παρατηρούνται αρκετά υψηλά κόστη επένδυσης, λόγω εισαγωγής μονάδων αναερόβιας χώνευσης.

Είναι αξιοσημείωτο ότι στην περίπτωση αυξημένων βαθμών ελευθερίας (σενάρια 3, 4.1 και 4.2), το μοντέλο εισάγει τεχνολογία αναερόβιας χώνευσης δεδομένης της καλής τιμής πώλησης της παραγόμενης KWh (επιδότηση λόγω Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας). Προφανώς κατά το σχεδιασμό του ΕΜΑΚ δεν ίσχυε η σημερινή νομοθεσία προώθησης της διείσδυσης των ΑΠΕ, αλλά το εν λόγω αποτέλεσμα μπορεί να ληφθεί υπόψη σε μελλοντικούς σχεδιασμούς ΔΣΑ στην περιοχή.

Από τα εξεταζόμενα σενάρια, η ΔΕΔΙΣΑ επέλεξε το σενάριο 2 για τη δημιουργία του ΤΣΔ, διότι αξιοποιεί πλήρως τις υφιστάμενες υποδομές. Μέσω του σεναρίου αυτού καταδεικνύεται επίσης η αναγκαιότητα λειτουργίας του ΕΜΑΚ σε πλήρη δυναμικότητα με αναβαθμισμένο εξοπλισμό, αλλά και η θετική επιρροή της προδιαλογής του οργανικού των Α.Σ.Α



Σχήμα 3: Αποτελέσματα από την χρήση του WASTE-C-CONTROL-καμπύλες Pareto ανά σενάριο

5 ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Το έργο “Waste Management Options for Greenhouse Gases Emissions Control” (LIFE09/ENV/GR/294) πραγματοποιείται με τη συνδρομή του οικονομικού εργαλείου LIFE της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Πληροφορίες στο: www.epem.gr/waste-c-control.

6 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- About Najm, M., El-Fadel, M., (2004): Computer-based interface for an integrated solid waste management optimization model. *Environmental Modelling & Software* 19, pp. 1151-1164
- Boldrin, A., Anderson, J., Moller, J. and Christensen T., (2009). Composting and Compost Utilisation: Accounting of Greenhouse Gases and Global Warming Contribution. *Waste Management & Research*, vol. 27 no. 8, pp. 696-706
- Brooke, A., Kendrick, D., Meeraus, A., Raman, R., (1998): GAMS. A user's guide, GAMS development corporation, Washington.
- Iyer, R.R., Grossmann, I.E. (1998): Synthesis and operational planning of utility systems for multiperiod operation. *Computers & Chemical Engineering* 22, pp. 979-993.
- Jing, S., Huang, G.H., Xi, B.D., Li, Y.P., Qin, X.S., Huo, S.L., Jiang, Y. (2009): A hybrid inexact optimization approach for solid waste management in the city of Foshan, China. *Journal of Environmental Management* 91, 389-402
- Louis, G., Shih, J-S. (2007): A flexible inventory model for municipal solid waste recycling. *Socio-Economic Planning Sciences* 41, pp. 61-89
- Mavrotas, G., (2009): Effective implementation of the ϵ -constraint method in multiobjective mathematical programming problems. *Applied Mathematics and Computation*, 21 (3), pp. 455-465.
- McDougall, F., White, P., Franke, M., Hindle, P., (2002): *Integrated Solid Waste Management: a Life Cycle Inventory*, Blackwell Publishing, Oxford, UK.

Η ΕΝΣΩΜΑΤΩΣΗ ΤΟΥ ΕΞΩΤΕΡΙΚΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ ΣΤΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΑΣΤΙΚΩΝ ΣΤΕΡΕΩΝ ΑΠΟΡΡΙΜΜΑΤΩΝ ΜΕΣΩ ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΟΥ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΥ: Η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

Γ. Μαυρωτάς¹, Ν. Γάκης², Ρ. Σκουλάξινου³, Β. Κατσούρος⁴, Ε. Γεωργοπούλου⁵,
Ν. Γκάργκουλας³

¹Εργαστήριο Βιομηχανικής & Ενεργειακής Οικονομίας, Σχολή Χημικών Μηχανικών, ΕΜΠ, ²FACETS A.E., ³ΕΠΕΜ Α.Ε., ⁴Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών, ⁵«ΑΘΗΝΑ» Ερευνητικό Κέντρο

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο ολοκληρωμένος σχεδιασμός ενός συστήματος διαχείρισης αστικών στερεών απορριμμάτων (ΑΣΑ) σε περιφερειακό επίπεδο αποτελεί από τις μεγαλύτερες προκλήσεις στρατηγικού σχεδιασμού. Στην παρούσα εργασία αναπτύσσεται ένα μοντέλο στρατηγικού σχεδιασμού που καλύπτει έναν 20ετή ορίζοντα για την διαχείριση ΑΣΑ σε περιφερειακό επίπεδο χρησιμοποιώντας Μαθηματικό Προγραμματισμό (ΜΠ). Το μοντέλο ΜΠ είναι πολυπεριοδικό και χρησιμοποιεί τις αρχές της σύνθεσης διεργασιών, δηλαδή περιγράφει την υπερδομή του συστήματος και με την επίλυση βρίσκουμε τη βέλτιστη λύση. Η βέλτιστη λύση καθορίζει τη δομή του συστήματος (ποιές διεργασίες), τον σχεδιασμό (τις διαστάσεις των μονάδων) και τη λειτουργία (τις ετήσιες ροές). Οι μεταβλητές απόφασης του μοντέλου είναι συνεχείς (ροές υλικών, δυναμικότητες διεργασιών κλπ) και ακέραιες (αριθμός μονάδων ανά κατηγορία διεργασιών) και το μοντέλο είναι μοντέλο Μικτού Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού (ΜΑΓΠ). Η βελτιστοποίηση γίνεται με βάση δύο αντικειμενικές συναρτήσεις: (1) Την Καθαρά Παρούσα Αξία (ΚΠΑ) της 20ετίας και (2) τις συνολικές εκπομπές CO₂. Το προκύπτον μοντέλο Πολυκριτηριακού ΜΑΓΠ επιλύεται με τη μέθοδο AUGMECON και παράγεται η καμπύλη με τις κατά Pareto βέλτιστες λύσεις από τις οποίες καλείται να επιλέξει ο αποφασίζων. Η καινοτομία της συγκεκριμένης εργασίας είναι η δυνατότητα ενσωμάτωσης στο μοντέλο του εξωτερικού κόστους έτσι ώστε η βελτιστοποίηση να γίνει όχι μόνο με βάση το οικονομικό κόστος αλλά το συνολικό κόστος (οικονομικό κόστος συν εξωτερικό κόστος). Με τον τρόπο αυτό υπολογίζεται μια νέα ΚΠΑ που συμπεριλαμβάνει και το εξωτερικό κόστος από (α) Κλιματική αλλαγή (β) Αέρια Ρύπανση (γ) Εδαφος – Υπέδαφος (δ) Ποιότητα ζωής το οποίο σε κάθε περίπτωση υπολογίζεται κατάλληλα. Τα αποτελέσματα δείχνουν την απόκλιση που έχουν μεταξύ τους τα αποτελέσματα όταν στην οικονομική αντικειμενική συνάρτηση χρησιμοποιείται το συνολικό κόστος αντί για αποκλειστικά το οικονομικό κόστος. Ως μελέτη εφαρμογής το μοντέλο εφαρμόζεται στην περιοχή της Αττικής.

Λέξεις κλειδιά: Διαχείριση Αστικών Στερεών Απορριμμάτων, εκπομπές αερίων θερμοκηπίου, εξωτερικό κόστος, Μαθηματικός Προγραμματισμός

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η διαχείριση Αστικών Στερεών Αποβλήτων (ΑΣΑ) αποτελεί ένα από τα πιο σύνθετα προβλήματα των σύγχρονων κοινωνιών. Υπάρχουν διάφορες δυνατότητες στη συλλογή, στη μεταφορά, στην επεξεργασία και στην απόθεση. Η καταλληλότητα κάθε συνδυασμού τεχνολογιών εξαρτάται από συγκεκριμένα χαρακτηριστικά και δεν υπάρχει μια καθολικά επικρατούσα άποψη. Λόγω της πολυπλοκότητας του προβλήματος χρειάζεται μια συστηματική προσέγγιση όπου θα εξετάζονται όλες οι δυνατές λύσεις και θα επιλέγεται η καλύτερη.

Ο Μαθηματικός Προγραμματισμός αποτελεί το ιδανικό εργαλείο για τέτοιες συστηματικές προσεγγίσεις. Η μοντελοποίηση του προβλήματος και η επίλυσή του, δηλαδή η εύρεση της βέλτιστης λύσης, δίνει στον αποφασίζοντα τη δυνατότητα μιας σφαιρικής αντιμετώπισης κι εξέτασης πολλών σεναρίων.

Στην διαχείριση των ΑΣΑ ο μαθηματικός προγραμματισμός έκανε την εμφάνισή του τη δεκαετία του '70 κι έκτοτε έχουν παρουσιαστεί εκατοντάδες εφαρμογές [1].

Στη συγκεκριμένη εργασία εκτός από το συνολικό κόστος λαμβάνονται υπόψη και οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου του συστήματος διαχείρισης ΑΣΑ δίνοντας έναν πολυκριτηριακό χαρακτήρα στο πρόβλημα. Παράγεται με τη μέθοδο Augmecon [2] το σύνολο των κατά Pareto λύσεων από τις οποίες καλείται να επιλέξει ο αποφασίζων. Το καινοτομικό στοιχείο είναι ότι στο κόστος μπορούμε να συμπεριλάβουμε και το εξωτερικό κόστος των διαφόρων δραστηριοτήτων που σχετίζονται με τη διαχείριση των ΑΣΑ. Η προτεινόμενη μεθοδολογία θα εφαρμοστεί στην περιοχή της Αττικής.

Η δομή της εργασίας έχει ως εξής: Στο 2^ο κεφάλαιο περιγράφεται η μεθοδολογία, στο 3^ο κεφάλαιο τα βασικά χαρακτηριστικά του μοντέλου, στο 4^ο κεφάλαιο η μελέτη περίπτωσης για την Αττική και ο υπολογισμός του εξωτερικού κόστους, στο 5^ο κεφάλαιο τα αποτελέσματα και τέλος τα βασικά συμπεράσματα στο 6^ο κεφάλαιο.

ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Μαθηματικός Προγραμματισμός και υπερδομή του συστήματος

Το μαθηματικό μοντέλο που περιγράφει το σύστημα διαχείρισης ΑΣΑ έχει αναπτυχθεί χρησιμοποιώντας τις αρχές του Μαθηματικού Προγραμματισμού (ΜΠ). Όλες οι διαθέσιμες τεχνολογίες και οι διαδρομές του συστήματος εκφράζονται στο μοντέλο με τις κατάλληλες σχέσεις (ισότητες και ανισότητες). Το μοντέλο αποτελείται από τις μεταβλητές απόφασης (οι άγνωστοι της εξίσωσης του προβλήματος), τις παραμέτρους (τα γνωστά δεδομένα), τους περιορισμούς (οι σχέσεις που περιγράφουν το σύστημα) και μία ή περισσότερες αντικειμενικές συναρτήσεις (τις οποίες προσπαθεί το μοντέλο να βελτιστοποιήσει).

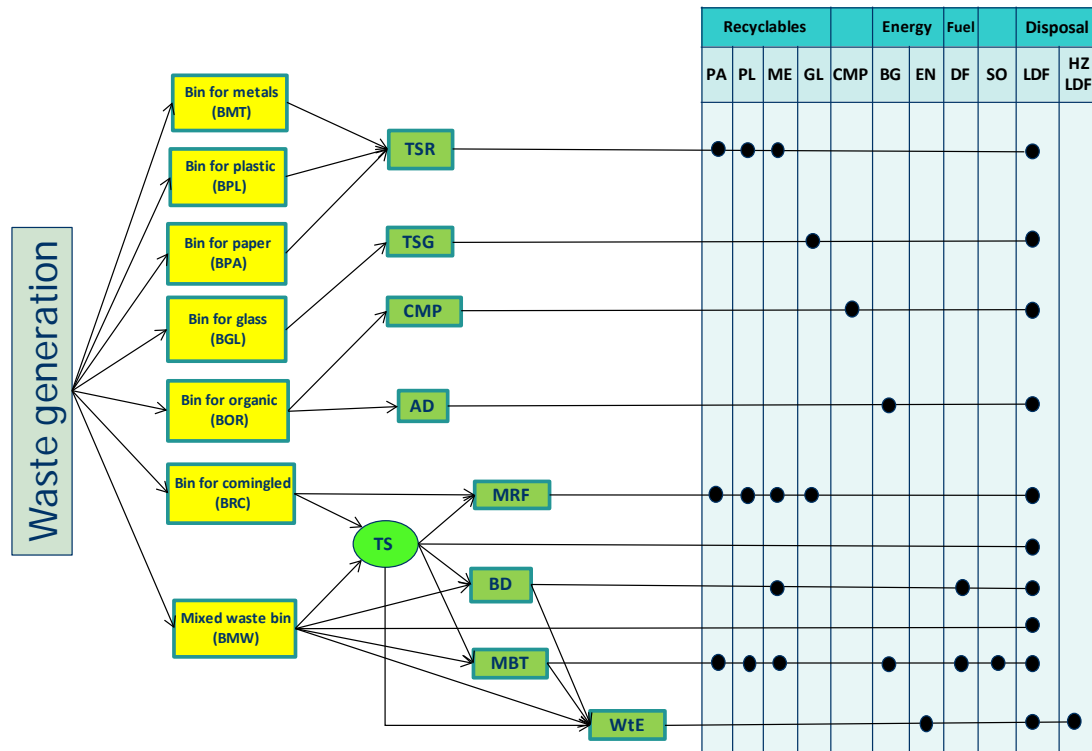
Δανειζόμενος κανείς ιδέες από το πεδίο της σύνθεσης διεργασιών στη χημική μηχανική, μπορεί να διατυπώσει το πρόβλημα ως ένα δομικό, σχεδιαστικό, λειτουργικό και πολύ-περιοδικό πρόβλημα αριστοποίησης [3]. Έτσι, επιτυγχάνεται μια ταυτόχρονη βελτιστοποίηση του συστήματος Δ.Σ.Α σε δομικό, σχεδιαστικό, λειτουργικό 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 20ετίας, χωρισμένου σε 4 περιόδους, οπότε το μοντέλο προτείνει και τη χρονική περίοδο εισαγωγής μιας μονάδας στο σύστημα διαχείρισης (χρονικό επίπεδο).

Το μοντέλο που έχει αναπτυχθεί είναι ένα πολυκριτηριακό μαθηματικό μοντέλο προγραμματισμού. Συγκεκριμένα, προσπαθεί να βελτιστοποιήσει δύο αντικειμενικές συναρτήσεις: (1) την καθαρή παρούσα αξία του κόστους του συστήματος κατά τη διάρκεια του χρονικού ορίζοντα 20 ετών και (2) τις εκπομπές CO₂-eq. Όπως υποδηλώνει το όνομα, το πολυκριτηριακό μοντέλο βελτιστοποίησης (ή Πολυκριτηριακή ανάλυση στη βελτιστοποίηση) περιλαμβάνει την βελτιστοποίηση παρουσία πάνω από ενός (συνήθως αντικρουόμενων) αντικειμενικών συναρτήσεων (κριτήρια). Η κύρια διαφορά μεταξύ απλής και πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης είναι ότι στην περίπτωση των τελευταίων, 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. Ελλείπει 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. Στη συνέχεια παρατίθενται ο τρόπος δημιουργίας και τα χαρακτηριστικά του μοντέλου Μαθηματικού Προγραμματισμού.

Χαρακτηριστικά του Μοντέλου

Το μαθηματικό μοντέλο περιγράφει το σύστημα διαχείρισης ΑΣΑ ως ένα γράφημα. Υπάρχουν κόμβοι που αντιπροσωπεύουν τις τεχνολογίες και γραμμές που αντιπροσωπεύουν τις ροές μεταξύ των διεργασιών. Τα όρια του συστήματος ξεκινούν από τη φάση της συλλογής μέχρι την τελική διάθεση. Το μοντέλο δημιουργεί δηλαδή την λεγόμενη «υπερδομή» του συστήματος, δηλαδή όλες οι διαθέσιμες επιλογές με τη μεταξύ τους διασύνδεση, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1 όπου μπορεί κανείς να δει πώς οι κάδοι είναι συνδεδεμένοι με τις διεργασίες (τεχνολογίες), τον τρόπο που οι διεργασίες είναι διασυνδεδεμένες και ποιά είναι τα κύρια προϊόντα της κάθε διεργασίας. Τα επιμέρους συστατικά που αποτελούν τα ΑΣΑ είναι 34.



Σχήμα 1: Γραφική αναπαράσταση της «υπερκατασκευής» του μοντέλου (Ακρωνύμια τεχνολογιών: TSR: Προσωρινή αποθήκευση ανακυκλώσιμων πλην γυαλιού, TSG: Προσωρινή αποθήκευση γυαλιού, CMP: κομποστοποίηση βιοαποβλήτων, AD: Αναερόβια Χώνευση βιοαποβλήτων, MRF: Κέντρο Διαλογής Ανακυκλώσιμων Υλικών, WtE: Μονάδα ενεργειακής αξιοποίησης, BD: Μονάδα βιολογικής ξήρανσης, MBT: Μηχανική Βιολογική Επεξεργασία, TS: Σταθμός Μεταφόρτωσης, LDF1: XYT μη επικινδύνων, HZLDF: XYT επικινδύνων. Ακρωνύμια προϊόντων: ME: /μέταλλα, PL: πλαστικό, PA: χαρτί, GL: γυαλί, CMP: κομπόστ, BG: βιοαέριο, EN: Ενέργεια, DF: δευτερογενές καύσιμο, SO: σταθεροποιημένο οργανικό)

Τα βασικά στοιχεία του μαθηματικού μοντέλου προγραμματισμού περιγράφονται παρακάτω.

Αντικειμενικές Συναρτήσεις

Δύο είναι οι αντικειμενικές συναρτήσεις του προβλήματος: (1) η ελαχιστοποίηση της Καθαρής Παρούσας Αξία (ΚΠΑ) του συστήματος διαχείρισης σε περίοδο 20 ετών, η οποία αντιπροσωπεύει το οικονομικό κριτήριο και μπορεί να συμπεριλαμβάνει και το εξωτερικό κόστος και (2) η ελαχιστοποίηση των συνολικών εκπομπών CO₂-eq του συστήματος, η οποία αντιπροσωπεύει το περιβαλλοντικό κριτήριο. Η συνάρτηση της ΚΠΑ ενσωματώνει το κόστος επένδυσης και λειτουργίας, καθώς και τα έσοδα πώληση υλικών και ενέργειας για περίοδο 20 ετών.

Μεταβλητές Απόφασης

Οι μεταβλητές απόφασης του μοντέλου είναι οι άγνωστοι των εξισώσεων του προβλήματος, για τους οποίους το μοντέλο προσπαθεί να υπολογίσει τις βέλτιστες τιμές. Στο μοντέλο που έχει δημιουργηθεί υπάρχουν διακριτές (δυναδικές ή ακέραιες) και συνεχείς μεταβλητές απόφασης. Οι διακριτές μεταβλητές ως επί το πλείστον είναι συνδεδεμένες με τα δομικά χαρακτηριστικά (είναι η τεχνολογία i , παρούσα στο βελτιστοποιημένο σύστημα διαχείρισης; πόσες μονάδες θα χρειαστούν;). Οι συνεχείς μεταβλητές σχετίζονται κυρίως με το σχεδιασμό και τα λειτουργικά χαρακτηριστικά (ποιά είναι η δυναμικότητα της μονάδας i , κατά την περίοδο t ; Τι ποσότητα αποβλήτων από τη μονάδα i μεταφέρονται στη μονάδα j);

Περιορισμοί

Οι κύριοι περιορισμοί του μοντέλου είναι τα ισοζύγια μάζας που πρέπει να ικανοποιούνται μεταξύ κόμβων (περιορισμοί ισότητας) και οι περιορισμοί χωρητικότητας (περιορισμοί τύπου «μικρότερο από»). Μπορεί να εισαχθούν και περιορισμοί πολιτικής (π.χ. το ποσοστό ανακύκλωσης ή η ποσότητα αποβλήτων που αποστέλλονται προς υγειονομική ταφή). Υπάρχουν επίσης λογικοί περιορισμοί προκειμένου να εφαρμόζονται οι όροι για αμοιβαία αποκλειόμενες εναλλακτικές λύσεις. Βοηθητικοί περιορισμοί μπορεί επίσης να είναι παρόντες (π.χ. γραμμικοποίηση των μη γραμμικών όρων).

Παράμετροι

Οι παράμετροι του μοντέλου είναι τα γνωστά δεδομένα. Τα δεδομένα αυτά είναι τα οικονομικά και τεχνολογικά χαρακτηριστικά των τεχνολογιών, οι τιμές των ανακυκλωμένων υλικών και της ενέργειας που παράγονται, καθώς και ο συντελεστής μετατροπής του κάθε συστατικού σε κάθε μία από τις υποψήφιες τεχνολογίες. Η αρχική ποσότητα των Α.Σ.Α κατατάσσεται σε 34 συστατικά και η σύνθεσή της θεωρείται γνωστή για το μοντέλο (εισαγωγή στοιχείων από το χρήστη). Το σύστημα συλλογής (είδος κάδων), επίσης θεωρείται γνωστό από το μοντέλο. Διάφοροι συνδυασμοί κάδων συλλογής μπορούν να εξετασθούν ως διαφορετικά σενάρια.

Το μοντέλο αυτό έχει αναπτυχθεί σε GAMS [4] και περιλαμβάνει περίπου 24,000 συνεχείς μεταβλητές, 168 ακέραιες μεταβλητές και 12,000 περιορισμούς. Λεπτομέρειες για το μοντέλο υπάρχουν στη δημοσίευση [5] ενώ έχει αναπτυχθεί και αντίστοιχο λογισμικό (Waste-C-control tool [6]).

ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

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 [7]. Σύμφωνα με στοιχεία Ερευνητικού Προγράμματος που εκπονήθηκε για λογαριασμό του ΕΣΔΚΝΑ και τα οποία παρουσιάζονται αναλυτικά στον Πίνακα 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 Αερίων Φαινομένου του Θερμοκηπίου (ΑΦΘ).

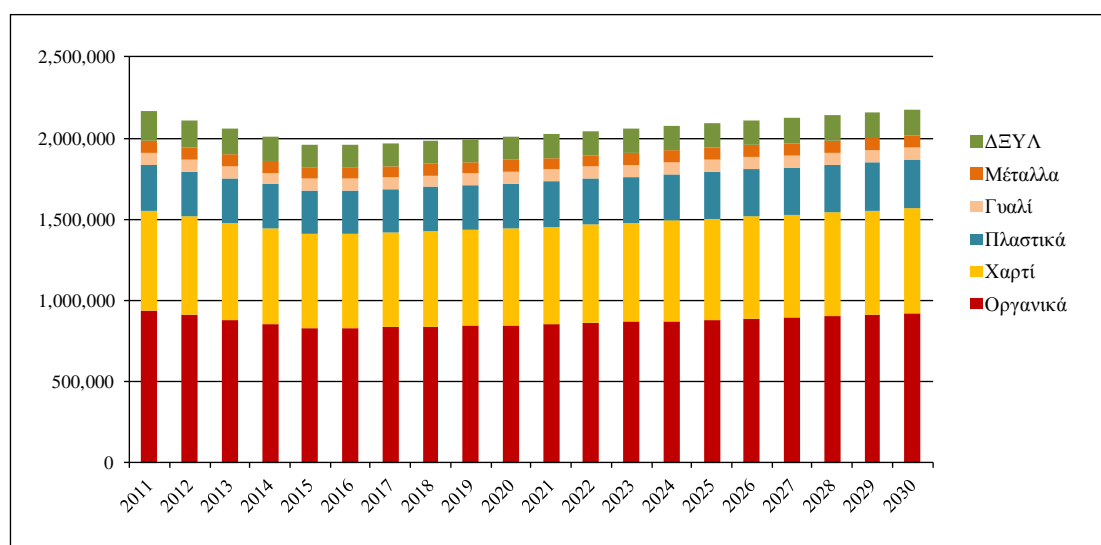
Πίνακας 1. Ποσοστιαία σύνθεση ΑΣΑ λεκανοπεδίου Αττικής (Χειμώνας – Άνοιξη 2007-2008) Πηγή: Ερευνητικό Πρόγραμμα «Προσδιορισμός Φυσικοχημικών Παραμέτρων και Ποιοτικής Σύστασης Απορριμάτων Λεκανοπεδίου Αττικής» (Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, 2008)

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 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 στο Σχήμα 2.



Σχήμα 2. 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 Αξιοποίησης 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:

- ΕΜΑΚ Α. 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 αξιοποίησής 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.

ΕΞΩΤΕΡΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ

Στην παρούσα εργασία στο μοντέλο λαμβάνονται υπόψη και οι εξωτερικές οικονομίες που συνδέονται με την περιβαλλοντική υποβάθμιση και τις γενικότερες επιπτώσεις στην ποιότητα ζωής των διαφόρων τεχνολογιών επεξεργασίας ΑΣΑ και οι οποίες αποτιμώνται σε οικονομικούς όρους και ενσωματώνονται στην αντικειμενική συνάρτηση του κόστους.

Η οικονομική αποτίμηση των επιπτώσεων που προκαλούνται από την έκλυση αερίων που συμβάλλουν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου, έγινε στη βάση των πλέον πρόσφατα προτεινόμενων τιμών από την ομάδα εργασίας του ExternE [8]. Σύμφωνα με αυτές, οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής υπολογίζονται με μία κεντρική τιμή κόστους ίση με 19 €/2000/t CO₂eq, λαμβάνοντας υπόψη κατάλληλους αποπληθωριστές, έτσι ώστε οι ζημιές της κατηγορίας αυτής που κατά βάση θα εκδηλωθούν σε βάθος χρόνου να αναχθούν στο παρόν.

Το οικονομικό μέγεθος των επιπτώσεων που προκαλούνται από τους εκλυόμενους αέριους ρυπαντές (εξαιρουμένων των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου) υπολογίστηκε αναλυτικά μόνο για τις μονάδες θερμικής επεξεργασίας όπου οι αέριες εκπομπές είναι σημαντικές. Για τις υπόλοιπες τεχνολογίες μηχανικής και βιολογικής επεξεργασίας οι αέριες εκπομπές (εκτός των εκπομπών ΑΦΘ) συνδεούνται κυρίως με τη χρήση καυσίμων και ως εκ τούτου οι εξωτερικές οικονομίες δεν κρίνονται σημαντικές. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνεται και από σχετικές μελέτες [9, 10] όπου το εξωτερικό κόστος της αέριας ρύπανσης από μονάδες κομποστοποίησης υπολογίζεται σε 0,61 – 1,32 €/t υλικού που επεξεργάζεται, ενώ για τις μονάδες αναερόβιας χώνευσης και τους ΧΥΤΑ δεν υπερβαίνει τα 0,10 €/t. Το οικονομικό μέγεθος των επιπτώσεων που προκαλούνται από τους εκλυόμενους αέριους ρυπαντές κατά τη λειτουργία μονάδων θερμικής επεξεργασίας, εξαρτάται σε πολύ μεγάλο βαθμό από τη χρησιμοποιούμενη τεχνολογία, τη χωροθέτηση της μονάδας, το πλήθος και το είδος των αποδεκτών στην ευρύτερη περιοχή, τις κρατούσες μετεωρολογικές συνθήκες, κλπ. Στο πλαίσιο λοιπόν της παρούσας μελέτης εφαρμογής και λαμβάνοντας υπόψη τις παραπάνω ιδιαιτερότητες, διαμορφώθηκε μια τυπική ως προς τα χαρακτηριστικά της (ύψος και διάμετρος καμινάδας, θερμοκρασία απαερίων κλπ) μονάδα θερμικής επεξεργασίας που χωροθετήθηκε στον ΟΕΔΑ Δ. Αττικής. Οι εκπομπές της μονάδας υπολογίστηκαν με βάση τα θεσμοθετημένα όρια εκπομπών της οδηγίας 2000/76/ΕΚ και το θερμικό περιεχόμενο του καυσίμου της μονάδας (το οποίο εξαρτάται από την ποσότητα, τη σύσταση και τα φυσικά χαρακτηριστικά του).

Για τη διασπορά των αερίων ρύπων χρησιμοποιήθηκαν δύο μοντέλα διασποράς αερίων ρύπων σε τοπικό και περιφερειακό επίπεδο, ενώ η εκτίμηση των επιπτώσεων στην υγεία, τη γεωργία και τις υποδομές πραγματοποιήθηκε στη βάση καταλλήλων συναρτήσεων έκθεσης – απόκρισης και των μοναδιαίων τιμών κόστους διαφόρων κατηγοριών επιπτώσεων με το μοντέλο Ecosense. Με βάση τους υπολογισμούς το εξωτερικό κόστος υπολογίστηκε σε 68,13 €/MWh καυσίμου που αξιοποιείται στη μονάδα.

Η οικονομική αποτίμηση των επιπτώσεων που συνδέονται με τη ρύπανση των υδατικών πόρων και του εδάφους / υπεδάφους εξαιτίας της δημιουργίας και διαρροής στραγγισμάτων σε χώρους διάθεσης απορριμμάτων, έγινε στη βάση τεχνικών μεταφοράς οφέλους χρησιμοποιώντας ως βασικές πηγές αναφοράς δημοσιευμένες μελέτες [11, 12]. Για το βασικό σενάριο εξωτερικών οικονομιών χρησιμοποιήθηκε η τιμή 0.77 €/t για το ΧΥΤΑ και 1.35 €/t για την ταφή των επικίνδυνων αποβλήτων από μονάδες θερμικής επεξεργασίας.

Σε ότι αφορά τις επιπτώσεις στην ποιότητα ζωής από την ύπαρξη και λειτουργία μονάδων επεξεργασίας απορριμμάτων χρησιμοποιήθηκε η τιμή 37,00 €/t για το ΧΥΤΑ και η τιμή 43,75 €/t για τις μονάδες θερμικής επεξεργασίας, οι οποίες αντιστοιχούν στο άνω όριο των τιμών που υπολογίστηκαν με βάση δημοσιευμένες μελέτες για την Ελλάδα [8, 9] και για 12 χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης [13]. Για τις υπόλοιπες τεχνολογίες όπου δεν υπάρχουν διαθέσιμα στοιχεία εκτιμάται ότι το εξωτερικό κόστος είναι χαμηλότερο από το αντίστοιχο για το ΧΥΤΑ και προσεγγίζει το κατώτερο όριο του εύρους (2,75 €/t) για τις μονάδες μηχανικής επεξεργασίας και τα 20 €/t (μέση τιμή εύρους) για τις μονάδες βιολογικής επεξεργασίας.

Τα εξωτερικά οφέλη από την αξιοποίηση των προϊόντων (ανακυκλώσιμα υλικά, κόμποστ) και την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας δε λαμβάνονται υπόψη στα πλαίσια της παρούσας μελέτης εφαρμογής για την περίπτωση της Αττικής, αν και το μοντέλο παρέχει αυτή τη δυνατότητα. Ο λόγος είναι ότι αφενός είναι δύσκολο οι επιπτώσεις αυτές να αποτιμηθούν στη βάση τεχνικών μεταφοράς οφέλους από προηγούμενες μελέτες ιδιαίτερα αν αυτές έχουν εκπονηθεί σε άλλες χώρες, γιατί εξαρτώνται σε πολύ μεγάλο βαθμό από τις τοπικές συνθήκες και αφετέρου ότι τα πλέον πρόσφατα δημοσιευμένα αποτελέσματα σχετικά με το εξωτερικό κόστος χαρακτηριστικών μονάδων του Ελληνικού ηλεκτρικού συστήματος προέρχονται από τη μελέτη ExternE που εκπονήθηκε το 1999 [8] και έκτοτε ότι δεν έχει πραγματοποιηθεί μια ολοκληρωμένη μελέτη επικαιροποίησης των αποτελεσμάτων.

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Η βελτιστοποίηση των τεχνικών και λειτουργικών χαρακτηριστικών πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια του μοντέλου μαθηματικού προγραμματισμού:

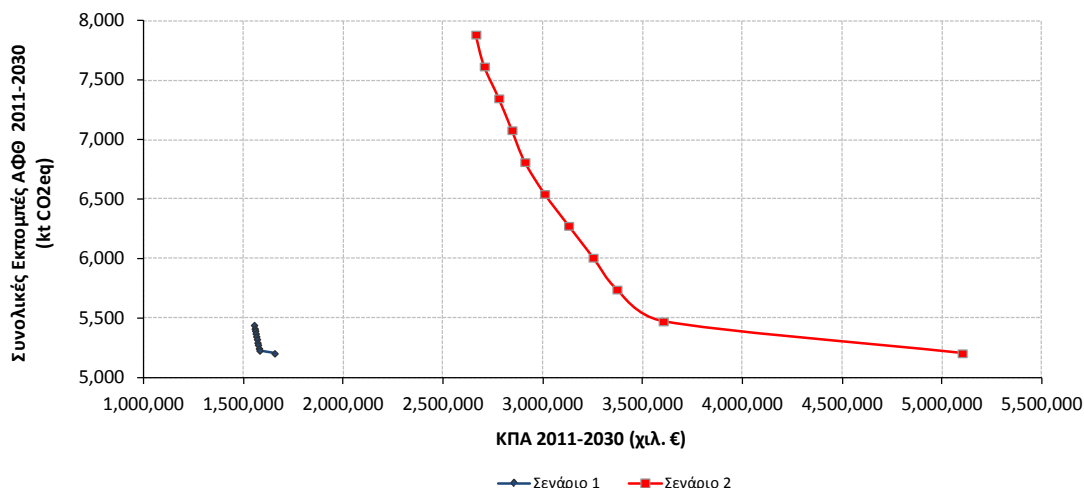
- Σενάριο 1: μόνο προς το ιδιωτικο-οικονομικό κόστος και τις εκπομπές ΑΦΘ
- Σενάριο 2: προς το συνολικό (ιδιωτικο-οικονομικό και εξωτερικό) κόστος και τις εκπομπές ΑΦΘ

Οι pareto βέλτιστες λύσεις για τα δύο Σενάρια παρουσιάζονται στο Σχήμα 3. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα, σε κάθε καμπύλη pareto αποτυπώνονται οι λύσεις ελάχιστου κόστους, ελάχιστων εκπομπών ΑΦΘ και οι ενδιάμεσες λύσεις. Στα σημεία όπου οι καμπύλες pareto εμφανίζουν μεγάλη κλίση είναι τα σημεία στα οποία με μικρή αύξηση του κόστους επιτυγχάνεται σημαντική μείωση των εκπομπών ΑΦΘ και αντιστοιχούν στις «καλύτερες συμβιβαστικές λύσεις».

Τα ποσοτικά χαρακτηριστικά (ιδιωτικο-οικονομικό κόστος και εκπομπές αερίων ρύπων) των τριών λύσεων (ελάχιστου κόστους, ελάχιστων εκπομπών και καλύτερης συμβιβαστικής) παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.

Και στα δύο σενάρια όλες οι λύσεις επιτυγχάνουν τους στόχους:

- της οδηγίας πλαίσιο 2008/98/ΕΚ για τα απόβλητα (50% ανακύκλωση χαρτιού, γυαλιού, πλαστικού και μετάλλων το 2020)
- της οδηγίας 1999/31/ΕΚ περί υγειονομικής ταφής των αποβλήτων (Μέχρι το 2020 τα βιοαποδομήσιμα αστικά απόβλητα που προορίζονται για χώρους υγειονομικής ταφής πρέπει να μειωθούν στο 35% της συνολικής ποσότητας των βιοαποδομήσιμων αστικών αποβλήτων που είχαν παραχθεί το 1995)



Σχήμα 3. Pareto βέλτιστες λύσεις. Βελτιστοποίηση με ιδιωτικό-οικονομικό και συνολικό (ιδιωτικό-οικονομικό και εξωτερικό κόστος)

Στη λύση ελαχίστου κόστους και στα δύο σενάρια προκρίνεται η κατασκευή μονάδων κομποστοποίησης για την επεξεργασία του προδιαλεγμένου οργανικού σε ανοιχτά σειράδια συνολικής δυναμικότητας 160.000 tn/έτος, η κατασκευή μονάδων δεματοποίησης / προσωρινής αποθήκευσης για τα ανακυκλώσιμα υλικά που συλλέγονται σε κάδους χωριστής συλλογής συνολικής δυναμικότητας 490.000 tn/έτος περίπου, καθώς και Κέντρων Διαλογής Ανακυκλώσιμων Υλικών υψηλής μηχανικής έντασης δυναμικότητας περίπου 70.000 tpa που θα λειτουργούν συμπληρωματικά ως προς τα υφιστάμενα ΚΔΑΥ. Για τα σύμμεικτα ΑΣΑ στην περίπτωση της βελτιστοποίησης με το ιδιωτικό-οικονομικό κόστος προκρίνεται η κατασκευή μονάδων θερμικής επεξεργασίας συνολικής δυναμικότητας 1.200.000 tn/έτος όπου θα οδηγούνται απευθείας τα ΑΣΑ από τον κάδο σύμμεικτων και το παραγόμενο δευτερογενές καύσιμο από το ΕΜΑΚ Α. Λιοσίων. Στην περίπτωση της βελτιστοποίησης με το συνολικό κόστος προκρίνεται η κατασκευή μονάδων μηχανικής-βιολογικής επεξεργασίας συνολικής δυναμικότητας 1.300.000 tn/έτος με μαγνήτες και διαχωριστές επαγωγικών ρευμάτων για την ανάκτηση μετάλλων και χειροδιαλογή για τα λοιπά ανακυκλώσιμα σε συνδυασμό με ξηρή αναερόβια χώνευση με μετακομποστοποίηση για την παραγωγή προϊόντος τύπου κόμποστ από οργανικό κλάσμα των ΑΣΑ.

Στην καλύτερη συμβιβαστική λύση και για το Σενάριο 1 η μόνη διαφοροποίηση σε σχέση με τη λύση χαμηλών εκπομπών είναι η κατασκευή μονάδων ξηρής αναερόβιας χώνευσης αντί των μονάδων κομποστοποίησης για την επεξεργασία του προδιαλεγμένου οργανικού. Αντίθετα στο Σενάριο 2 πέρα από την κατασκευή μονάδων ξηρής αναερόβιας χώνευσης προτείνεται η κατασκευή μονάδων μηχανικής-βιολογικής επεξεργασίας συνολικής δυναμικότητας 1.100.000 tn/έτος όπου θα ανακτώνται ανακυκλώσιμα υλικά και θα παράγεται προϊόν τύπου κόμποστ (CLO) και δευτερογενές καύσιμο. Το παραγόμενο δευτερογενές καύσιμο από τις νέες μονάδες μαζί με το δευτερογενές καύσιμο του ΕΜΑΚ Α. Λιοσίων θα οδηγούνται σε μονάδα θερμικής επεξεργασίας για ενεργειακή αξιοποίηση δυναμικότητας 300.000 tn/έτος.

Οι λύσεις ελαχίστων εκπομπών ταυτίζονται και στα δύο σενάρια. Με βάση τα αποτελέσματα του μοντέλου προκρίνεται η κατασκευή μονάδων ξηρής αναερόβιας χώνευσης για την επεξεργασία του προδιαλεγμένου οργανικού συνολικής δυναμικότητας 160.000 tn/έτος, η κατασκευή μονάδων δεματοποίησης / προσωρινής αποθήκευσης για τα ανακυκλώσιμα υλικά που συλλέγονται σε κάδους χωριστής συλλογής συνολικής δυναμικότητας 490.000 tn/έτος περίπου, καθώς και νέων Κέντρων Διαλογής Ανακυκλώσιμων Υλικών υψηλής μηχανικής έντασης συνολικής δυναμικότητας περίπου 110.000 tn/έτος για τη σταδιακή υποκατάσταση των υφιστάμενων ΚΔΑΥ. Για τα σύμμεικτα ΑΣΑ προκρίνεται η κατασκευή μονάδων

θερμικής επεξεργασίας συνολικής δυναμικότητας 1.360.000 tn/έτος όπου θα οδηγούνται απευθείας τα ΑΣΑ από τον κάδο σύμμεικτων.

Πίνακας 2. Καθαρή Παρούσα Αξία ιδιωτικο-οικονομικού κόστους και εξωτερικού κόστους, εκπομπές 20ετίας ΑΦΘ και λοιπών ρύπων, λύσεων ελάχιστου κόστους, ελάχιστων εκπομπών και καλύτερων συμβιβαστικών.

Λύσεις ελάχιστου κόστους	Σενάριο 1	Σενάριο 2
ΚΠΑ ιδιωτικό-οικονομικού κόστους 20ετίας, εκ €	1.554	2.073
ΚΠΑ εξωτερικού κόστους 20ετίας, εκ €	3.242	592
Εκπομπές ΑΦΘ 20ετίας, ktn CO ₂ eq	5.446	7.885
Εκπομπές PM ₁₀ 20ετίας, tn	4.110	1.925
Εκπομπές SO _x 20ετίας, tn	24.885	16.545
Εκπομπές NO _x 20ετίας, tn	30.925	16.420
Εκπομπές Διοξινών 20ετίας, gr	1.126	0
Καλύτερες Συμβιβαστικές Λύσεις	Σενάριο 1	Σενάριο 2
ΚΠΑ ιδιωτικό-οικονομικού κόστους 20ετίας, εκ €	1.581	1.895
ΚΠΑ εξωτερικού κόστους 20ετίας, εκ €	3.241	1.707
Εκπομπές ΑΦΘ 20ετίας, ktn CO ₂ eq	5.233	5.477
Εκπομπές PM ₁₀ 20ετίας, tn	4.140	2.425
Εκπομπές SO _x 20ετίας, tn	25.185	16.415
Εκπομπές NO _x 20ετίας, tn	31.045	21.325
Εκπομπές Διοξινών 20ετίας, gr	1.126	427
Λύσεις ελάχιστων εκπομπών ΑΦΘ	Σενάριο 1	Σενάριο 2
ΚΠΑ ιδιωτικό-οικονομικού κόστους 20ετίας, εκ €	1.659	1.659
ΚΠΑ εξωτερικού κόστους 20ετίας, εκ €	3.441	3.441
Εκπομπές ΑΦΘ 20ετίας, ktn CO ₂ eq	5.209	5.209
Εκπομπές PM ₁₀ 20ετίας, tn	4.330	4.330
Εκπομπές SO _x 20ετίας, tn	32.095	32.095
Εκπομπές NO _x 20ετίας, tn	26.130	26.130
Εκπομπές Διοξινών 20ετίας, gr	1.203	1.203

Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα καθίσταται σαφές ότι στην περίπτωση που ληφθούν υπόψη στην ανάλυση οι εξωτερικές οικονομίες, η θερμική επεξεργασία των ΑΣΑ δεν προκρίνεται ως λύση, τουλάχιστον στις λύσεις χαμηλού κόστους, λόγω των υψηλών ρυπαντικών φορτίων που συνδέονται με τη λειτουργία των μονάδων αυτών και του συνεπακόλουθου υψηλού εξωτερικού κόστους. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνεται και από τις υψηλότερες εκπομπών αερίων ρύπων (PM₁₀, SO_x, NO_x και Διοξίνες) στις λύσεις του Σεναρίου 1 όπως φαίνεται στον Πίνακα 2.

Στις λύσεις του Σεναρίου 2 όμως παρατηρούνται υψηλότερες εκπομπές ΑΦΘ, σε σχέση με τις λύσεις που περιέχουν την τεχνολογία θερμικής επεξεργασίας, γεγονός που οφείλεται στα εξής:

- οι μονάδες μηχανικής-βιολογικής επεξεργασίας παράγουν περισσότερο και λιγότερο βιοσταθεροποιημένο υπόλειμμα και επομένως οδηγούν σε υψηλότερες εκπομπές κατά τη διάθεση στους ΧΥΤΥ
- από τα επιμέρους συστατικά των ΑΣΑ και του δευτερογενούς καυσίμου μόνο για το πλαστικό το σύνολο του περιεχόμενου άνθρακα θεωρείται ορυκτής πορέλευσης (για το χαρτί ο αντίστοιχος συντελεστής είναι 1%, για Δέρμα, Ύφασμα, Λάστιχο είναι 20% και για τα οργανικά 0%) με βάση τις Κατευθυντήριες Οδηγίες του IPCC και [14].

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ο Πολυκριτηριακός Μαθηματικός Προγραμματισμός αποτελεί ένα ευέλικτο και αξιόπιστο εργαλείο για μοντελοποίηση και βελτιστοποίηση στο χώρο της διαχείρισης των ΑΣΑ. Η ενσωμάτωση του εξωτερικού κόστους μπορεί να γίνει και να οδηγήσει μάλιστα σε αποτελέσματα διαφορετικά από αυτά όπου θεωρείται μόνο το ιδιωτικο-οικονομικό κόστος (όπως π.χ η λειτουργία των μονάδων θερμικής επεξεργασίας στην περίπτωση της Αττικής).

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η εργασία έγινε στα πλαίσια του έργου: “Waste Management Options for Greenhouse Gases Emissions Control” (LIFE09/ENV/GR/294), με την συμβολή χρηματοδότησης LIFE της Ευρωπαϊκής Ένωσης

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Pires, A., Martinho, G., Chang, N-B. *Journal of Environmental Management* 92, 1033-1050, (2011)
- [2] Mavrotas, G. *Applied Mathematics and Computation* 21, 455-465 (2009)
- [3] Iyer, R.R., Grossmann, I.E. *Computers & Chemical Engineering* 22, 979-993 (1998)
- [4] Brooke, A., Kendrick, D., Meeraus, A., Raman, R. *GAMS. A user’s guide*, GAMS development corporation, Washington (1998)
- [5] Mavrotas, G. Skoulaxinou, R., Gakis, N., Katsouros, V., Georgopoulou, E. “A Multi-Objective Programming model for assessment the GHG emissions in MSW management” accepted for publication in *Waste Management* (2013)
- [6] <http://www.epem.gr/waste-c-control/>
- [7] Argyropoulou-Papa, *Integrated waste and resource management in the Greater Attica Area: A comprehensive profile*, MSc Thesis, Imperial College, London, (2011), p.24-27.
- [8] Externe, *Externalities of energy: national implementation*, Vol. 10, European Commission, EUR 18528 (1999).
- [9] Eunomia Research & Consulting, *Costs for Municipal Waste Management in the EU*, Final Report to DG Environment, European Commission (<http://ec.europa.eu/environment/waste/studies/>) (2002).
- [10] COWI, *A study on the economic valuation of environmental externalities from landfill disposal and incineration of waste*, Final Report prepared for European Commission (2000).
- [11] CSERGE, Warren Spring Laboratory, EFTEC, *Externalities from landfill and incineration*, Report to the UK Department of the Environment, London: HMSO (1993).
- [12] Miranda M L and Hale B, *Energy Policy*, 25(6), pp. 587-600 (1997).
- [13] RDC & Pira, *Evaluation of costs and benefits for the achievement of reuse and recycling targets for the different packaging materials in the frame of the packaging and packaging waste directive 94/62EC*, Proposed draft Final Report, www.scotland.gov.uk/library5/environment/pptc-00.asp. (2001)
- [14] IPCC, *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories - Waste (Vol.5)* Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. and Tanabe K. (eds). Published: IGES, Japan (2006).



A mathematical programming framework for adopting the IPCC-2006 guidelines for landfill emissions in MSW management

Journal:	<i>Waste Management & Research</i>
Manuscript ID:	Draft
Manuscript Type:	Original article: 30,000 characters
Date Submitted by the Author:	n/a
Complete List of Authors:	Mavrotas, George; National Technical University of Athens, Chemical Engineering Skoulaxinou, Sotiria; EPEM S.A., Gakis, Nikos; FACETS, Katsouros, Vassilis; Athena Research and Innovation Center, Georgopoulou, Elena; National Observatory of Athens,
Keywords:	MSW, optimization, mathematical programming, multi-objective, landfill, GHG emissions, IPCC, First Order Decay model
Abstract:	Mathematical Programming models are often used for structural, design and operational optimization of various systems (energy, supply chain, processes etc.) The last 20 years they are used all the more often in Municipal Solid Waste (MSW) management in order to provide optimal solutions. While the cost objective usually drives the optimization, in the present work the minimization of green house gas (GHG) emissions is also considered as objective function leading to a multi-objective approach providing the Pareto optimal solutions. This information is essential for the Decision Maker because he can assess the trade-offs among the Pareto optimal solutions and select the most preferable one. Accurate estimation of the GHG emissions is of crucial importance in the modeling. In this work the focus is on the landfill emissions, which is the most intricate and least examined factor in similar models. An innovative formulation is proposed that adopts the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) 2006 guidelines for the CH ₄ generated in the landfills i.e. the first order decay model. In this way, the "landfill memory effect" is captured (the emissions of CH ₄ do not occur only in the disposal period, but continue to affect the subsequent periods of the study horizon). The traditional formulation that attributes the landfill emissions only to the specific period's disposals and the proposed formulation are compared in a case study revealing significant differences.

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60



SCHOLARONE™
Manuscripts

For Peer Review

Adopting the IPCC guidelines for landfill emissions in a mathematical programming framework for MSW management

George MAVROTAS^{1*}, Sotiria SKOULAXINOY², Nikos GAKIS³, Vassilis KATSOUROS⁴, Elena GEORGOPOULOU⁵

¹National Technical University of Athens, Zografou Campus, Athens, 15780, Greece

²EPEM SA,, 141 B Acharnon Str., Athens, 10446, Greece

³FACETS SA, Agiou Isidorou Str., Athens, 11471, Greece

⁴Athena Research and Innovation Center, Artemidos 6 & Epidavrou Str., Maroussi, 15125, Greece

⁵National Observatory of Athens, Thisio, Athens, 11810, Greece

Abstract: Mathematical Programming models are often used for structural, design and operational optimization of various systems (energy, supply chain, processes etc.) The last 20 years they are used all the more often in Municipal Solid Waste (MSW) management in order to provide optimal solutions. While the cost objective usually drives the optimization, in the present work the minimization of green house gas (GHG) emissions is also considered as objective function leading to a multi-objective approach providing the Pareto optimal solutions. This information is essential for the Decision Maker because he can assess the trade-offs among the Pareto optimal solutions and select the most preferable one. Accurate estimation of the GHG emissions is of crucial importance in the modeling. In this work the focus is on the landfill emissions, which is the most intricate and least examined factor in similar models. An innovative formulation is proposed that adopts the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) 2006 guidelines for the CH₄ generated in the landfills i.e. the first order decay model. In this way, the “landfill memory effect” is captured (the emissions of CH₄ do not

* Corresponding author, Assistant Professor, Laboratory of Industrial & Energy Economics / School of Chemical Engineering / National Technical University of Athens, Zografou Campus, Athens 15780,
e-mail: mavrotas@chemeng.ntua.gr

1
2 occur only in the disposal period, but continue to affect the subsequent periods of the study horizon). The
3
4 traditional formulation that attributes the landfill emissions only to the specific period's disposals and the
5
6 proposed formulation are compared in a case study revealing significant differences.
7
8
9

10 *keywords: MSW, optimization, mathematical programming, multi-objective, landfill, GHG emissions, IPCC*
11
12
13
14
15

16 **1. Introduction**

17 Municipal Solid Waste (MSW) management is one of the most challenging technical problems of our era.
18
19 Several technologies are now available and various policy goals are imposed for recycling of materials and
20
21 amounts to be disposed. The suitability of each technology depends on the collection scheme, the composition of
22
23 weight and the imposed policy goals. There is no a dominating technology scheme appropriate for every case so
24
25 different combinations of technologies should be examined. Due to the complexity of the problem, a systematic
26
27 approach is required in order to select the "most appropriate" solution. One of the most popular tools for
28
29 optimizing a complex system with many variables and constraints, such as the MSW management system, is
30
31 Mathematical Programming (MP).
32
33
34

35 Mathematical Programming and especially Linear Programming (LP) and Mixed Integer LP (MILP) are among
36
37 the most popular tools of Operational Research. MP models describe the system at hand using decision variables
38
39 (the unknowns of the problem), parameters (the known data) and constraints (the equations that describe the
40
41 system). The optimization criterion is expressed as the objective function that involves one or more decision
42
43 variables. The optimal solution provides the values of the decision variables that optimize the objective function,
44
45 satisfying at the same time the imposed constraints.
46
47
48

49 In the present case the MSW management system is expressed as a MILP model. All the available MSW options
50
51 and their interdependencies can be considered in the superstructure of the system (Iyer and Grossmann, 1998)
52
53 according to the process synthesis principals. The optimization of the formulated MILP model will result in the
54
55 best solution. A simultaneous, structural, design and operational optimization of the MSW system is achieved,
56
57
58
59
60

1
2 i.e. the optimal solution comprises the suggested technology units together with their interconnections and the
3 timing of initiation in the MSW system (structure), their capacity (design) and the flows of the MSW quantities
4 and the operating loads to and from the units (operational optimization). MP has already been used for the
5 optimization of MSW systems in various cases (see e.g. Pires, 2011; Gottinger, 1988; Abou Najm and El-Fadel,
6 2004; Louis and Shih, 2007; Bonomo et al. 2012). A lot of work in the literature deals with the uncertainty in the
7 problem's parameters, especially in the waste generation using fuzzy, stochastic and interval parameters (see e.g.
8 Huang et al., 1995; Cheng et al., 2003; Li et al., 2012).

9
10
11
12
13
14
15
16
17
18 In our days, environmental concern is growing more and more, questioning the “dictatorship” of the economic
19 criterion as the unique criterion in various decision making contexts. As the environmental benefits cannot be
20 easily monetized in order to be embedded in one economic objective function, the integrated MSW planning
21 requires the use of multi-objective optimization. During the last two decades, relevant multi-objective models
22 have been applied for optimization in fields such as energy systems, process synthesis, project selection,
23 environmental management, water management etc. (Steuer, 1986; Belton and Stewart, 2002; Figueira et al.
24 2005). Today, integrated planning becomes mandatory in MSW management too. The term “integrated” is used
25 to emphasize a broader view of the system, where beyond the economic objectives (the investor's point of view)
26 also the environmental objectives (the sustainability's point of view) and societal objectives (the society's point
27 of view) are pursued.

28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40 As the name suggests, multi-objective optimization (or multi-criteria optimization) involves optimization in the
41 presence of more than one objective functions (criteria). The main difference between single and multi-objective
42 optimization is that in the case of latter, there optimal solution is not unique, but rather a set of equally good
43 alternatives with different trade-offs, which are known as Pareto-optimal (or non-dominated or efficient)
44 solutions. The Pareto optimal solutions define the feasible solutions that cannot be improved in one objective
45 function without deteriorating their performance in at least one of the rest. Usually a decision maker is needed to
46 provide additional preference information and to identify the “most preferred” solution (“optimal” according to
47 his/her subjective preferences). Therefore, multi-objective optimization has to combine two aspects, namely,
48
49
50
51
52
53
54
55
56

1 optimization and decision support. In the context of MP, the multi-objective optimization is performed through
2
3 Multi-Objective Mathematical Programming (MOMP). Works in MSW management that apply multi-objective
4
5 optimization can be found in Perlack and Willis (1985), Su et al. (2008), Minciardi et al. (2008) and Galante et
6
7 al. (2010), Lu et al. (2009) and He et al. (2011) among others.
8
9

10
11 In the present study one of the objective functions is the GHG emissions (expressed as tons of CO₂-equivalents).
12
13 Therefore an accurate formulation for the emissions of CO₂, CH₄ and N₂O caused by the MSW activities should
14
15 be provided. In MSW management CH₄ is one of the dominant factors due to its massive release from the
16
17 landfills and its GHG potential which is 21 times higher than CO₂'s. CH₄ produced in landfills contributes
18
19 approximately 3%-4% to the annual global anthropogenic GHG emissions (IPCC, 2006). Therefore, precise
20
21 modeling of this process is of crucial importance for an accurate calculation of GHG emissions from the MSW
22
23 system (see also Gentil et al. 2009; Manfredi et al. 2009). In 2006, IPCC provided guidelines for a realistic
24
25 estimation of CH₄ from the landfill (IPCC, 2006). Moreover, in these guidelines, it is stated that "...In this
26
27 Volume, the use of the mass balance method [Tier 1 method in the previous report (IPCC, 1996)] is strongly
28
29 discouraged as it produces results that are not comparable with the FOD [=First Order Decay] method which
30
31 produces more accurate estimates of annual emissions" (p. 3.6, IPCC, 2006). The incorporation of the suggested
32
33 FOD model in mathematical programming models is not a trivial task as it contains first order kinetics for the
34
35 generation of the CH₄ in the landfill. In addition, for the accurate estimation of CH₄ emissions, the composition
36
37 of disposed waste in the landfill is required. This composition is not considered as a fixed parameter (as e.g. in
38
39 IPCC, 1997; Papageorgiou et al. 2009), but it depends on the previous treatment processes before the disposal to
40
41 the landfill and it is expressed by the FOD model based on Tier 3 accounting method (IPCC, 2006; Bogner et al.
42
43 2011). According to our knowledge, it is the first time that the FOD model based on Tier 3 is incorporated in a
44
45 MP framework for MSW systems.
46
47
48

49
50 The remaining of the paper has the following structure. In Section 2 the general model of the MSW system and
51
52 the basic components of its MP formulation are described along with the landfill modeling regarding the CH₄
53
54
55
56
57
58
59
60

emissions. In Section 4 the proposed and the conventional formulation are used in a case study and the results are compared. Finally, Section 5 summarizes the basic conclusions of the study.

2. Model building

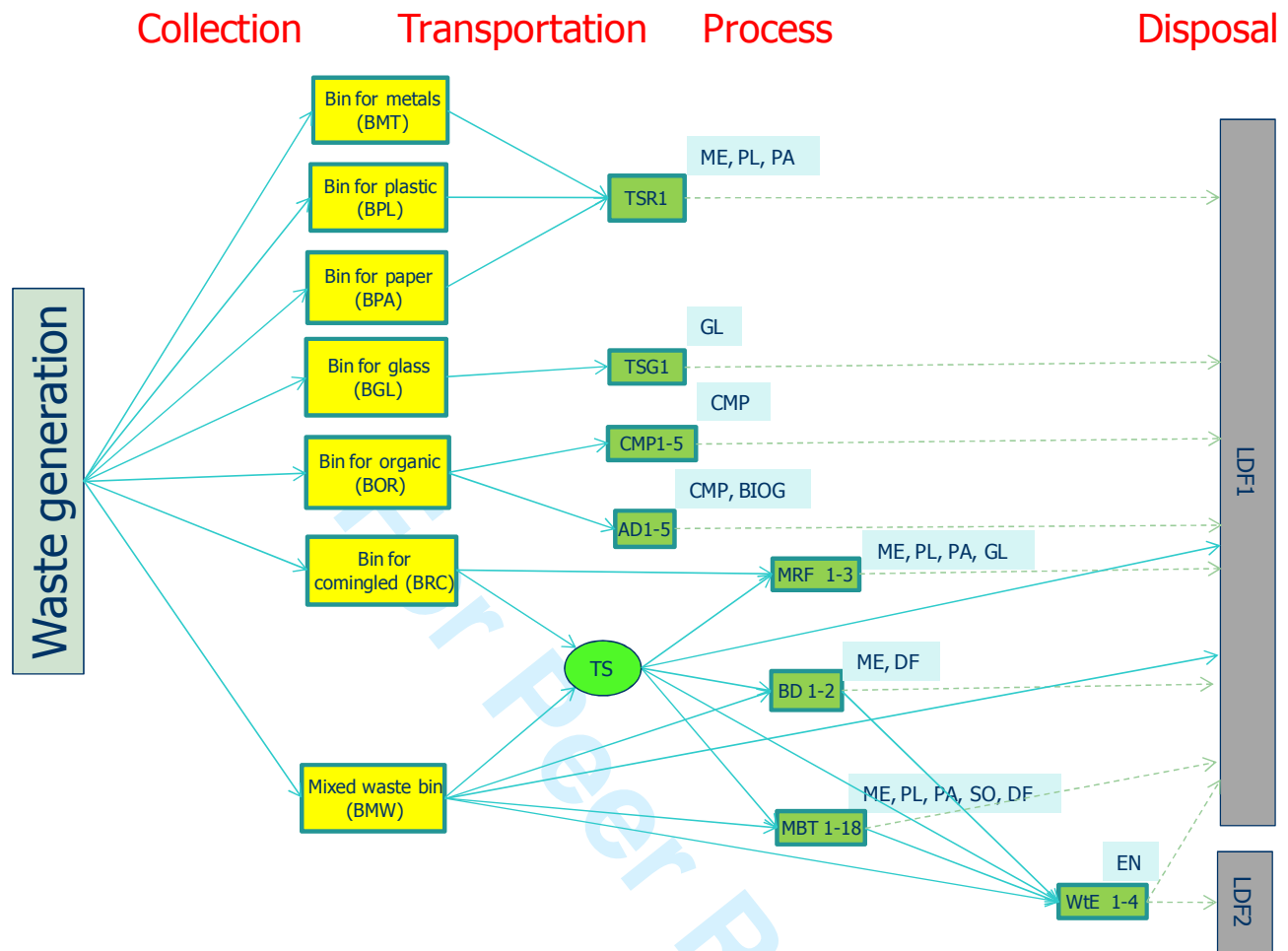
2.1 The general model

In the present case the mathematical model that describes the MSW management system is developed using the principles of MP. The superstructure of the MSW management system is depicted as a directed graph in Figure

1. It must be noted that for each generic technology there can be more than one specific type (versions). For example, Composting (CMP) may have up to five types of units while for Mechanical and Biological Treatment (MBT) up to 18 types of units with different characteristics may be considered. All the available technologies and paths of the MSW system are expressed in the model with proper relationships (equalities and inequalities). The model consists of the decision variables (the unknowns of the problem), the parameters (the known data), the constraints (the relationships that describe the system) and one or more objective functions (the drivers of the optimization).

Objective functions: The two-objective functions of the problem are: (1) the minimization of the Net Present Value (NPV) of the MSW system over a period of 20 years, which represents the economic objective and (2) the minimization of total CO₂-eq emissions of the MSW system, which represents the environmental objective. The NPV takes into account the investment and operational costs for technologies, transportation, etc. as well as income from recyclables, electricity and other products over a 20-year period.

Decision variables: The decision variables of the model are actually the unknowns of the optimization problem, i.e. those variables for which we are trying to find their optimal values. The decision variables are discrete (binary or integer) and continuous. The discrete variables are mainly associated with the structural characteristics (e.g. is the i -th technology present in period t for the optimized MSW system? How many units will be needed?). The continuous variables are typically associated with the design and operational characteristics (What is the capacity of i -th unit in period t ? Which is the amount of waste to be transported from i -th unit to j -th unit?).



35 **Figure 1: Graphical representation of the superstructure of the MSW system .**

36
37 **Acronyms for Processes:** TSR: Temporary Storage for Metals, Plastic and Paper, TSG: Temporary Storage for
38 Glass, CMP: Composting, AD: Anaerobic Digestion, MRF: Material Recycle Facility, WtE: Waste to Energy, BD:
39 Biodrying, MBT: Mechanical and Biological Treatment, TS: Transfer Station, LDF1: Landfill, LDF2: Landfill for
40 Hazardous Waste.

41
42
43
44
45 **Acronyms for Products:** ME: Metals, PL: Plastic, PA: paper, GL: Glass, CMP: Compost, BIOG: Biogas, DF:
46 Derived Fuel, SO: Stabilized Organic, EN: Energy

47
48
49
50
51
52 ***Constraints:***The main constraints of the model are the mass balances that have to be satisfied between nodes
53 (equality constraints) and the capacity constraints that have to be satisfied (inequality constraints). In addition,
54
55

1
2 one may define policy constraints (e.g. the recycling rate or the amount of waste sent to landfill), logical
3
4 constraints in order to apply conditions for mutually exclusive alternatives or auxiliary constraints (e.g.
5
6 linearization of non-linear terms). Special reference should be made to the modeling of the landfill and the
7
8 associated CH₄ emissions as it will be shown in the next section. In order to calculate the emissions from WTE
9
10 and the landfill in a realistic way, the waste streams as well as their composition must be taken into account. The
11
12 composition of each stream is not considered fixed but it depends on the previous treatment. That's why the
13
14 specific modeling requires detailed description of the material balances in each process.
15
16

17
18 **Parameters:**The parameters of the model are the known data. These data are the economic and technological
19
20 characteristics of the processes, the prices of the recycled materials and produced energy, the conversion factor
21
22 of every ingredient in each one of the candidate technologies, the emission factors etc. The scheme of the bin
23
24 configuration is also considered as given in the model (which types of bins are used) as well as their
25
26 composition. The different bin schemes can be examined as different scenarios. In addition, transportation
27
28 parameters related to the transport of MSW between processes are taking into account.
29
30

31
32 In the present study, the generation of the Pareto optimal solutions is performed using a version of the ϵ -
33
34 constraint method, namely the AUGMECON method (Mavrotas, 2009). The optimization of the multi-objective
35
36 model provides a representative set of the Pareto optimal solutions for the MSW management problem. With the
37
38 term "solution" we mean the structural characteristics (which units will be constructed in each period), the
39
40 design characteristics (the capacity of the units, what capacity expansions will be required) and the operational
41
42 characteristics (annual waste flows between the units). All these quantities are expressed with appropriate
43
44 decision variables and their values will be the main output of the system along with the respective value of the
45
46 objective function(s). More information about the specific multi-objective multi-period mathematical
47
48 programming model can be found in <http://www.epem.gr/waste-c-control/actions.html> in Actions 1-3.
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60

2.2 The model for landfill emissions according to IPCC 2006 FOD model

As it was mentioned, the focus of the paper is on the modeling of the landfill emissions. The landfill is the most challenging module regarding the emission calculation since a cumulative effect should be modeled. In particular, the waste disposed in period t affects the CH_4 emissions of all the subsequent periods $t+1, t+2, \dots$, according to its methane generation rate (“landfill memory effect”) that follows a first order decay model. In all other MSW activities (transportation and processes) the emissions are related only to the specific period. For example, this means that for the calculation of the CH_4 emissions for the third period, the amount of waste disposed in the first and the second period, must be also taken into account as they continue to emit CH_4 . The CH_4 emissions from the landfill occur during the whole life-span of the landfill and not just in the disposal period. In addition, they last even after the end of the study period and we need to incorporate these “post - study horizon” emissions in our calculations for more reliable results. The modeling of this mechanism for a mathematical programming model is a rather challenging task and to the best of our knowledge something similar has not been reported before in the literature. It must be noted that in the literature, the attempts to incorporate the landfill emissions in a multi-period, multi-objective model, make the assumption that the GHG emissions are linearly related to the disposed amount (see e.g. Lu et al., 2009, p. 401, assumption 2; and He et al., 2011, p. 114). Moreover, the reliable modeling of CH_4 emissions from the landfill is one of the crucial issues in our work, as these emissions dominate in the waste management systems. Bear in mind that in quantitative terms CH_4 is 21 times more effective than CO_2 in the creation of the greenhouse effect (GHG potential).

According to the IPCC guidelines, the user defines the required parameters for each type of waste. In the current case ten types of waste are disposed to the landfill, namely, “Food”, “Garden”, “Paper”, “Wood” and “Textile” and each one of them is categorized into “treated” or “untreated”; thus, in total 10 types of waste are considered. The required parameters according to the IPCC guidelines for each one of these materials as well as the landfill characteristics are (IPCC, 2006):

1. Degradable Organic Carbon under aerobic conditions (*DOC*)
2. Fraction of DOC decomposing under anaerobic conditions (*DOC_f*)

3. Methane Correction Fraction (MCF)
4. Fraction of Methane in developed Landfill Gas (f)
5. Rate of reaction constant for methane generation (k)

According to the IPCC guidelines from the amount of waste W_k that goes to the landfill in year k , the “active” part that participates in the calculation of CH_4 emissions (i.e. the decomposable mass) is:

$$WA_k = DOC \times DOCf \times MCF \times W_k \quad (1)$$

The methane produced from this quantity is:

$$\begin{aligned} MTH_k &= WA_k \times (1 - e^{-k}) \times \frac{16}{12} \times f \\ &= W_k \times [DOC \times DOCf \times MCF \times (1 - e^{-k}) \times \frac{16}{12} \times f] \end{aligned} \quad (2)$$

In the above equation the produced CH_4 in the landfill (MTH_k) is expressed as a function of the waste stream (W_k):

$$MTH_k = W_k \times d \quad (3)$$

where:

$$d = DOC \times DOCf \times MCF \times (1 - e^{-k}) \times \frac{16}{12} \times f \quad (4)$$

Assume that the annual amount for the first period of food – untreated waste going to the landfill is W_1 , for the second period W_2 and so on. It must be noted that in the present model each period consists of 5 years and is characterized by a constant annual amount of waste that may be varied from period to period. Therefore, in the first year of the first period, the amount of one category of waste (e.g. food – untreated) that is going to the landfill is W_1 . In the second year the same amount is added to the landfill. However, the landfill has in place also the remaining part of the first year disposals which is $W_1 \times e^{-k}$. In the subsequent table, the amount that exists in the landfill in year k of the first period is denoted as $W_{1,k}$.

Table 1: The annual disposal in the landfill and the generated CH₄ emissions

		Quantity added in landfill	Quantity existent in landfill	CH ₄ generated
Period 1	Year 1	W_1	$W_{1,1}=W_1$	$d \times W_{1,1}$
	Year 2	W_1	$W_{1,2}=W_1+ W_{1,1} \times e^{-k}$	$d \times W_{1,2}$
	Year 3	W_1	$W_{1,3}=W_1 + W_{1,2} \times e^{-k}$	$d \times W_{1,3}$
	Year 4	W_1	$W_{1,4}=W_1 + W_{1,3} \times e^{-k}$	$d \times W_{1,4}$
	Year 5	W_1	$W_{1,5}=W_1 + W_{1,4} \times e^{-k}$	$d \times W_{1,5}$
Period 2	Year 6	W_2	$W_{2,1}=W_2+W_{1,5} \times e^{-k}$	$d \times W_{2,1}$
	Year 7	W_2	$W_{2,2}=W_2+W_{2,1} \times e^{-k}$	$d \times W_{2,2}$
...
Period 4	Year 19	W_4	$W_{4,4}=W_4+W_{4,3} \times e^{-k}$	$d \times W_{4,4}$
	Year 20	W_4	$W_{4,5}=W_4+W_{4,4} \times e^{-k}$	$d \times W_{4,5}$

Over the 20 year time horizon, this recursive formulation can be expressed as a function of the quantities W_1 , W_2 , W_3 and W_4 going to the landfill in each of the four 5-year periods. For each year of the first period it is:

$$\text{Year01} \quad W_{1,1}=W_1$$

$$\text{Year02} \quad W_{1,2}=W_1+ W_1 \times e^{-k} = W_1 \times (1+e^{-k})$$

$$\text{Year03} \quad W_{1,3}=W_1+ W_1 \times (1+e^{-k}) \times e^{-k} = W_1 \times (1+e^{-k}+e^{-2k})$$

$$\text{Year04} \quad W_{1,4}=W_1+ W_1 \times (1+e^{-k}+e^{-2k}) \times e^{-k} = W_1 \times (1+e^{-k}+e^{-2k}+e^{-3k})$$

$$\text{Year05} \quad W_{1,5}=W_1+ W_1 \times (1+e^{-k}+e^{-2k}+e^{-3k}) \times e^{-k} = W_1 \times (1+e^{-k}+e^{-2k}+e^{-3k}+e^{-4k})$$

Therefore the aggregate CH₄ emissions for period 1 will be:

$$MTH_1 = (W_{1,1} + W_{1,2} + W_{1,3} + W_{1,4} + W_{1,5}) \times d = W_1 \times (5 + 4 \times e^{-k} + 3 \times e^{-2k} + 2 \times e^{-3k} + 1 \times e^{-4k}) \times d \quad (5)$$

In the second period, in addition to the new amount W_2 that is annually added in the landfill, it is also the remaining from 1st period that will decay during the 2nd period as follows:

$$\text{Year06} \quad R_{1,6} = W_1 \times (1 + e^{-k} + e^{-2k} + e^{-3k} + e^{-4k}) \times e^{-k} = W_1 \times (e^{-k} + e^{-2k} + e^{-3k} + e^{-4k} + e^{-5k})$$

$$\text{Year07} \quad R_{1,7} = W_1 \times (e^{-k} + e^{-2k} + e^{-3k} + e^{-4k} + e^{-5k}) \times e^{-k} = W_1 \times (e^{-2k} + e^{-3k} + e^{-4k} + e^{-5k} + e^{-6k})$$

$$\text{Year08} \quad R_{1,8} = W_1 \times (e^{-2k} + e^{-3k} + e^{-4k} + e^{-5k} + e^{-6k}) \times e^{-k} = W_1 \times (e^{-3k} + e^{-4k} + e^{-5k} + e^{-6k} + e^{-7k})$$

$$\text{Year09} \quad R_{1,9} = W_1 \times (e^{-3k} + e^{-4k} + e^{-5k} + e^{-6k} + e^{-7k}) \times e^{-k} = W_1 \times (e^{-4k} + e^{-5k} + e^{-6k} + e^{-7k} + e^{-8k})$$

$$\text{Year10} \quad R_{1,10} = W_1 \times (e^{-4k} + e^{-5k} + e^{-6k} + e^{-7k} + e^{-8k}) \times e^{-k} = W_1 \times (e^{-5k} + e^{-6k} + e^{-7k} + e^{-8k} + e^{-9k})$$

Therefore, in the 2nd period the following amounts of waste are disposed in the landfill:

$$\text{Year06} \quad W_{2,1} = W_2 + W_1 \times (e^{-k} + e^{-2k} + e^{-3k} + e^{-4k} + e^{-5k})$$

$$\text{Year07} \quad W_{2,2} = W_2 \times (1 + e^{-k}) + W_1 \times (e^{-2k} + e^{-3k} + e^{-4k} + e^{-5k} + e^{-6k})$$

$$\text{Year08} \quad W_{2,3} = W_2 \times (1 + e^{-k} + e^{-2k}) + W_1 \times (e^{-3k} + e^{-4k} + e^{-5k} + e^{-6k} + e^{-7k})$$

$$\text{Year09} \quad W_{2,4} = W_2 \times (1 + e^{-k} + e^{-2k} + e^{-3k}) + W_1 \times (e^{-4k} + e^{-5k} + e^{-6k} + e^{-7k} + e^{-8k})$$

$$\text{Year10} \quad W_{2,5} = W_2 \times (1 + e^{-k} + e^{-2k} + e^{-3k} + e^{-4k}) + W_1 \times (e^{-5k} + e^{-6k} + e^{-7k} + e^{-8k} + e^{-9k})$$

Consequently, the methane emissions will be:

$$MTH_2 = (W_{2,1} + W_{2,2} + W_{2,3} + W_{2,4} + W_{2,5}) \times d$$

$$= [W_1 \times (e^{-k} + 2 \times e^{-2k} + 3 \times e^{-3k} + 4 \times e^{-4k} + 5 \times e^{-5k} + 4 \times e^{-6k} + 3 \times e^{-7k} + 2 \times e^{-8k} + e^{-9k}) +$$

$$W_2 \times (5 + 4 \times e^{-k} + 3 \times e^{-2k} + 2 \times e^{-3k} + 1 \times e^{-4k})] \times d \quad (6)$$

The same procedure is repeated for years 11 to 20, i.e. for the 3rd and 4th periods. Following the same scheme the CH₄ emissions for the 3rd and 4th periods are calculated as follows:

$$\begin{aligned}
MTH_3 &= [W_1 \times (e^{-6k} + 2 \times e^{-7k} + 3 \times e^{-8k} + 4 \times e^{-9k} + 5e^{-10k} + 4e^{-11k} + 3e^{-12k} + 2e^{-13k} + e^{-14k}) + \\
&W_2 \times (e^{-k} + 2 \times e^{-2k} + 3 \times e^{-3k} + 4 \times e^{-4k} + 5e^{-5k} + 4e^{-6k} + 3e^{-7k} + 2e^{-8k} + e^{-9k}) + \\
&W_3 \times (5 + 4 \times e^{-k} + 3 \times e^{-2k} + 2 \times e^{-3k} + 1 \times e^{-4k})] \times d
\end{aligned} \tag{7}$$

$$\begin{aligned}
MTH_4 &= [W_1 \times (e^{-11k} + 2 \times e^{-12k} + 3 \times e^{-13k} + 4 \times e^{-14k} + 5e^{-15k} + 4e^{-16k} + 3e^{-17k} + 2e^{-18k} + e^{-19k}) + \\
&W_2 \times (e^{-6k} + 2 \times e^{-7k} + 3 \times e^{-8k} + 4 \times e^{-9k} + 5e^{-10k} + 4e^{-11k} + 3e^{-12k} + 2e^{-13k} + e^{-14k}) + \\
&W_3 \times (e^{-k} + 2 \times e^{-2k} + 3 \times e^{-3k} + 4 \times e^{-4k} + 5e^{-5k} + 4e^{-6k} + 3e^{-7k} + 2e^{-8k} + e^{-9k}) + \\
&W_4 \times (5 + 4 \times e^{-k} + 3 \times e^{-2k} + 2 \times e^{-3k} + 1 \times e^{-4k})] \times d
\end{aligned} \tag{8}$$

There is a good practice mentioned in IPCC guidelines (2006, p. 3.6) that also takes into account the landfill emissions from year 20 to year 40, as landfills keeps on emitting CH₄ even after their shut down. This practice is also followed here. These emissions are given by the following equation:

$$\begin{aligned}
MTH_{20_40} &= [W_1 \times (e^{-16k} + 2 \times e^{-17k} + 3 \times e^{-18k} + 4 \times e^{-19k} + 5 \times e^{-20k} + 5 \times e^{-21k} + \dots + 5 \times e^{-35k} + \\
&4 \times e^{-36k} + 3 \times e^{-37k} + 2 \times e^{-38k} + e^{-39k}) + \\
&W_2 \times (e^{-11k} + 2 \times e^{-12k} + 3 \times e^{-13k} + 4 \times e^{-14k} + 5 \times e^{-15k} + 5 \times e^{-16k} + \dots + 5 \times e^{-30k} + \\
&4 \times e^{-31k} + 3 \times e^{-32k} + 2 \times e^{-33k} + e^{-34k}) + \\
&W_3 \times (e^{-6k} + 2 \times e^{-7k} + 3 \times e^{-8k} + 4 \times e^{-9k} + 5 \times e^{-10k} + 5 \times e^{-11k} + \dots + 5 \times e^{-25k} + \\
&4 \times e^{-26k} + 3 \times e^{-27k} + 2 \times e^{-28k} + e^{-29k}) + \\
&W_4 \times (e^{-k} + 2 \times e^{-2k} + 3 \times e^{-3k} + 4 \times e^{-4k} + 5 \times e^{-5k} + 5 \times e^{-6k} + \dots + 5 \times e^{-20k} + \\
&4 \times e^{-21k} + 3 \times e^{-22k} + 2 \times e^{-23k} + e^{-24k})] \times d
\end{aligned} \tag{9}$$

Eventually, all the amounts of emitted CH₄ from the landfill are expressed as a linear function of the quantities disposed. In other words, there is no need for non-linear models in order to capture the first order decay model that describes CH₄ generation in landfills.

The above modeling procedure can be incorporated in most MSW management models that implement MP. If the amounts of decomposable materials that are disposed in the landfill are expressed by appropriate decision variables, a reliable estimation of the relevant CH₄ emissions over the study period can be obtained. The material balances from the collection up to the disposal stage are needed in order to express these decision variables as a function of the original quantities in the collection.

The decomposable materials in the waste streams are classified to “Food”, “Garden”, “Paper”, “Wood” and “Textile”. The decision variables that express the quantity of the *i*-th material that goes to the landfill in period *t* is denoted as *RSDLDF_{i,t}*. Then the methane emissions for period *t* are given by:

$$MTHLDF_t = \sum_{i=1}^5 \sum_{\tau=1}^t mthcoef_{i,t-(\tau-1)} \times RSDLDF_{i,\tau} \quad t = 1..4 \quad (10)$$

The parameters *mthcoef_{i,t}* are actually the multipliers of *W₁*, *W₂*, *W₃* and *W₄* in the equations (5)-(8) that calculate *MTH₁*, *MTH₂*, *MTH₃* and *MTH₄* (see above) that depend on the kind of material (food, garden, paper, wood, textile) and the timing of the disposal (1st, 2nd, 3rd or 4th period).

In addition, the cases of “treated” and “untreated” material are also considered in the current model. The “treated” material is obtained as residual from the anaerobic digestion, composting and MBT and the “untreated” from the other processes. The reason for this distinction is due to the different behavior regarding the generation of CH₄ (different rate of reaction *k*). Let *TRSDLDF_{i,t}* be the decision variables that express the quantity of the *i*-th “treated” material that goes to the landfill in period *t* and *RSDLDF_{i,t}* the corresponding “untreated” material. Then the landfill methane emissions for period *t* are given by:

$$MTHLDF_t = \sum_{i=1}^5 \sum_{\tau=1}^t mthcoef_{i,t-(\tau-1)} \times RSDLDF_{i,\tau} + \sum_{i=1}^5 \sum_{\tau=1}^t tmthcoef_{i,t-(\tau-1)} \times TRSDLDF_{i,\tau} \quad t = 1..4 \quad (11)$$

where *tmthcoef_{i,t}* are the multipliers of *W₁*, *W₂*, *W₃* and *W₄* in the equations (5)-(8) that calculate *MTH₁*, *MTH₂*, *MTH₃* and *MTH₄* for the treated material (they differ in *k* with the corresponding *mthcoef_{i,t}* parameters).

A similar equation holds for the methane emissions from the landfill for the years 21 to 40 (a period of 20 years after the study horizon).

$$MTH20_40LDF = \sum_{i=1}^5 \sum_{t=1}^4 mth20_40coef_{i,t} \times RSDLDF_{i,t} + \sum_{i=1}^5 \sum_{t=1}^4 tmth20_40coef_{i,t} \times TRSDLDF_{i,t} \quad (12)$$

where $mth20_40coef_{i,t}$ and $tmth20_40coef_{i,t}$ are actually the multipliers of W_1 , W_2 , W_3 and W_4 in the equation (9) that calculate $MTH20_40$ (see above) for the treated and the untreated material respectively.

In this way the CH_4 emissions are expressed as linear functions of the disposed amounts of materials in each period. However, the coefficients of these expressions (the “emission factors”) are not the same for each period but they reflect the timing of the disposal. The equations (5)-(12) can be flexible according to the granulation of the examined materials. The IPCC software tool for the calculation of landfill emissions (available through page 3.7 of IPCC, 2006) has seven types of waste material, namely, food, garden, paper, wood, textile, nappies and sludge and two more general types for MSW and industry waste. The required specific parameters for these materials (DOC , $DOCf$, MCF , f , k) have some default values in this software tool but they may be altered by the user. Depending on the material granulation that a MSW model may have, it may use the individual material amounts or the average values of MSW. In case that the corresponding amounts of the individual materials that go to the landfill can be reliably estimated from the material balances of the processes, the material-wise approach is more accurate than using an average MSW stream.

3. Case study

The data for the case study is drawn from the prefecture of Chania, the westernmost prefecture of the Crete island, in Greece. The population is 156,220 inhabitants, which corresponds to approximately 25% of the total population of Crete (temporary data of 2011 census). The MSW superstructure for the case study is shown in Figure 2. The multi-objective, multi-period model described in the Waste-C-Control web page

<http://www.epem.gr/waste-c-control> (mostly in the “Action 2” and “Action 3”) is used. The model has been implemented and solved using GAMS / General Algebraic Modeling System (Brooke et al. 1998).

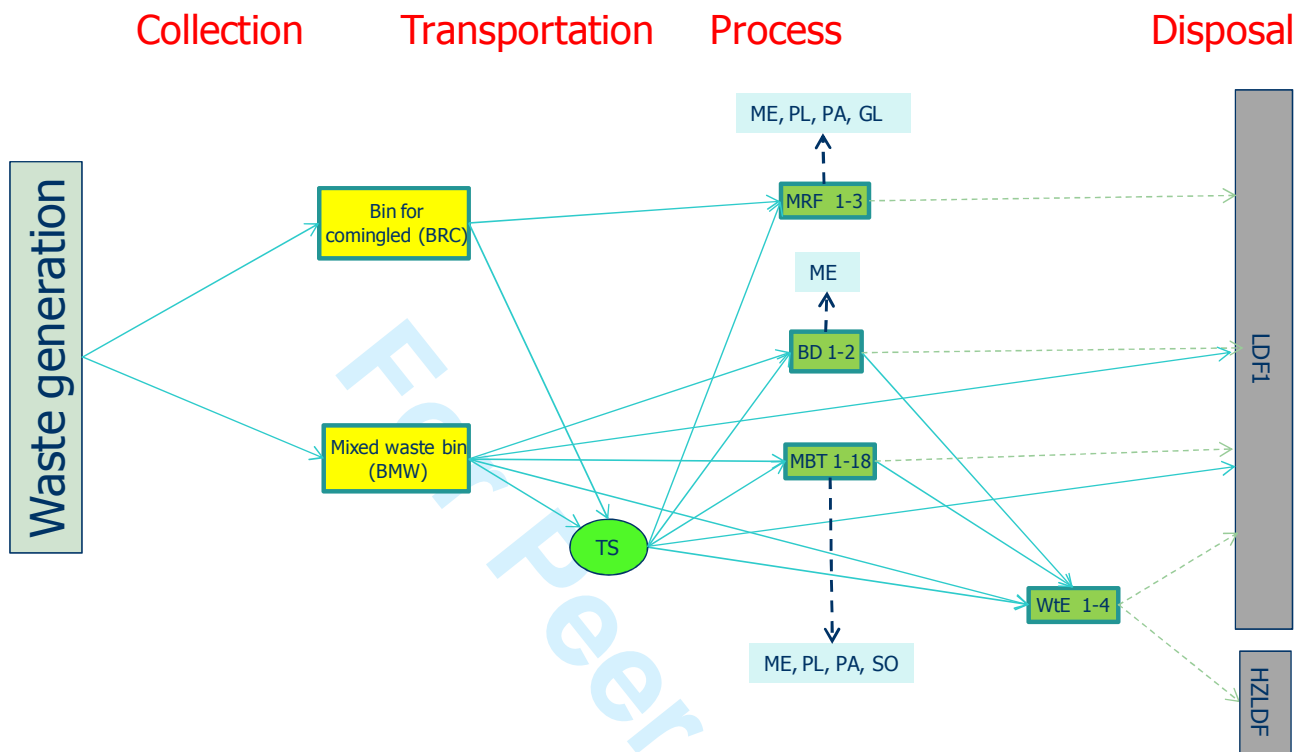


Figure 2: The MSW superstructure of the case study

For the superstructure of the model two types of bins and four processes (MRF with 3 types, Bio-drying with 2 types, MBT with 18 types and Waste to Energy with 4 types) are considered. Two versions of the multi-objective optimization model are developed and solved:

- Model 1: With FOD model (based on Tier 3 accounting method) for the landfill emissions. The landfill emissions are treated as suggested by the IPCC 2006 guidelines and described above (taking into account for period t the CH_4 emissions of periods $t-1$, $t-2$ etc.)
- Model 2: Assuming linear relationship between emissions and disposed quantities in period t (based on Tier 1 accounting method – IPCC 1996). We treat the landfill emissions as there is no emissions from previous

disposals (the CH₄ emissions for period t depend only on period's t disposal) as it is suggested by Lu et al. (2009, p. 401, assumption 2) and He et al. (2011, p. 114).

The two versions differ in the way they handle the CH₄ emissions from the landfill. We apply the two models and we obtain the Pareto curves shown in Figure 3. The Pareto curves (or efficient frontiers) are shaped by 11 Pareto optimal solutions generated with the augmented ε -constraint method (Mavrotas, 2009). Some solutions are very close to each other and cannot be discriminated in the chart. As it was expected, model 2 constantly underestimates the GHG emissions of the 20-year period although the optimal cost obtained from the two models is the same. Examining the curves it is obvious that a rational choice for a decision maker is to select the solution with the greatest slope. For both models this is the third solution from the left (the third less expensive solution), because with a little sacrifice in the Net Present Cost we obtain significant reduction in the GHG emissions.

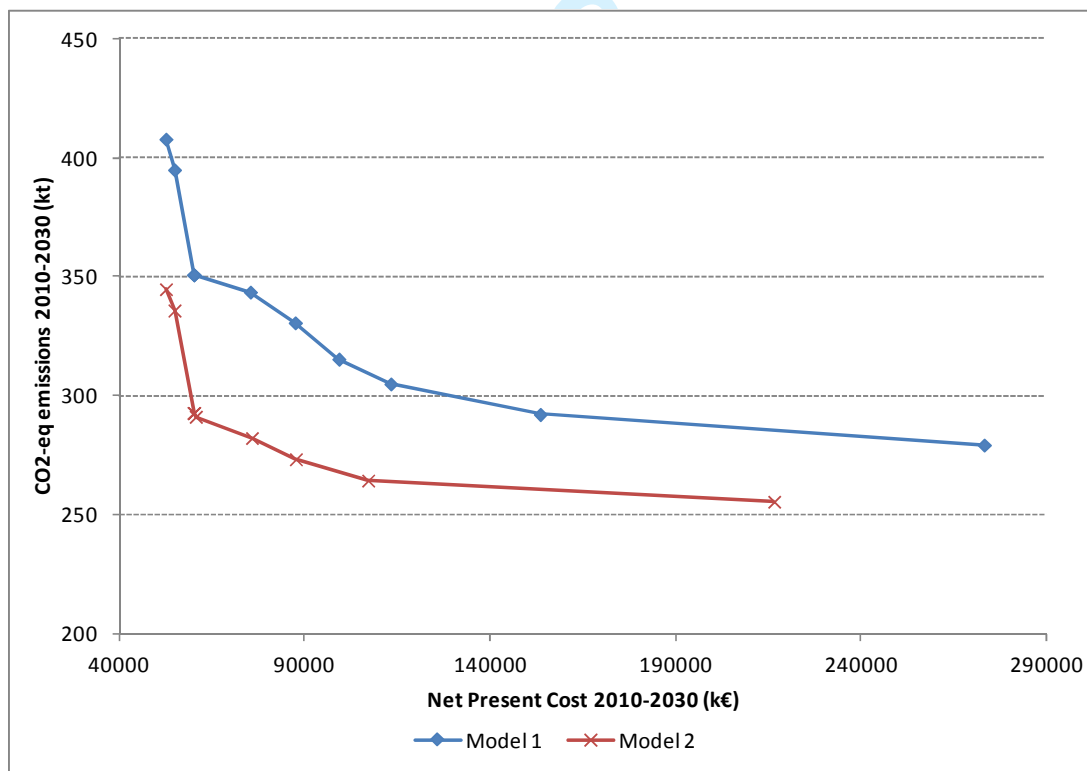


Figure 3: Pareto curves from the implementation of the two models

1
2 Regarding the structure of the respective optimal solutions, we isolate solutions 1 (minimum cost solution), 6
3 (equally balanced solution) and 11 (minimum GHG emissions). The required processes along with their timing
4 of initiation and capacities are shown in Table 2.
5
6
7

8
9 The capacity of the landfill refers to the whole 5-year period while the capacity of the other technologies is in
10 tones/year. A first observation is that going from the least cost solution to the least GHG emissions the structure
11 of the solutions change. Namely, while the system starts with the most cheap MBT type, i.e. MBT18 is a
12 combination of hand picking and mechanical sorting to recover recyclables along with composting of organic
13 fraction, it turns to MBT13 which is conventional mechanical sorting for the recovery of metals and production
14 of RDF & Anaerobic Digestion of the organic fraction and maturation (composting) in covered windrows and
15 then turns to MBT4 which is advanced mechanical sorting for the recovery of recyclables & the production of
16 RDF followed by a contained system for the composting of the organic fraction. MBT4 is the most expensive
17 but produces the least residue for the landfill. Another remark is that according to Model 1 the Waste to Energy
18 technology is inserted already from Solution 6 (last period). In Solution 11 the Waste to Energy technology is
19 inserted in period 1 for Model 1 and in period 2 for Model 2 accompanied by the hazardous landfill (the
20 hazardous landfill receives input only from the WTE facility).
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34

35 The biggest difference in the structural characteristics between Model 1 and Model 2 is in the least GHG
36 emissions solution (solution 11) as it was expected. Because according to Model 1 the first period's disposal to
37 landfill affects all the periods' emissions the Model 1 tries to minimize the landfill input already from the first
38 period. This is not the case in Model 2 where it seems that the GHG emissions from the landfill in the first year
39 are less than the respective emissions of MBT and WTE, exactly because they refer only to the first period and
40 do not count for the later periods. In the current study we assume that 70% of the landfill's methane is captured
41 or flared. The above observations will be magnified if the flaring share is even lower, which is not unusual.
42
43
44
45
46
47
48
49
50

51 In addition, if we use Model 2 ignoring the CH₄ emissions after the study period (i.e. exclude the variable
52 *MTH20_40LDF* from the expression of the GHG objective function), the underestimation of CO₂-eq emissions
53 is even bigger. The CO₂-eq emissions in this case vary from 143 kt to 238 kt in the Pareto front and the structure
54
55
56
57
58
59
60

of the system for the least GHG emissions is significantly different, allowing even greater amounts to be disposed in the landfill.

Table 2. Comparison of the installed capacities in the three solutions

Solution 1 (minimum Net Present Cost solution)									
Model 1					Model 2				
NPC (k€)	52531				NPC (k€)	52531			
CO ₂ -eq (kt)	408				CO ₂ -eq (kt)	345			
	Period 1	Period 2	Period 3	Period 4		Period 1	Period 2	Period 3	Period 4
MRF1	16100	0	0	0	MRF1	16100	0	0	0
MBT18	75000	0	0	0	MBT18	75000	0	0	0
LDF	242600	275600	311200	344700	LDF	242600	275600	311200	344700
Solution 6 (balanced solution between cost and GHG emissions)									
Model 1					Model 2				
NPC (k€)	75322				NPC (k€)	60061			
CO ₂ -eq (kt)	344				CO ₂ -eq (kt)	293			
	Period 1	Period 2	Period 3	Period 4		Period 1	Period 2	Period 3	Period 4
MRF1	16100	0	0	0	MRF1	16100	0	0	0
WTE3	0	0	0	44500	MBT13	87200	0	0	0
MBT13	86600	0	0	0	LDF	238000	256400	292000	325500
LDF	238000	257800	293400	193200					
HZLDF	0	0	0	16700					
Solution 11 (minimum CO ₂ -eq solution)									
Model 1					Model 2				
NPC (k€)	273257				NPC (k€)	216583			
CO ₂ -eq (kt)	279				CO ₂ -eq (kt)	255			
	Period 1	Period 2	Period 3	Period 4		Period 1	Period 2	Period 3	Period 4
MRF1	16100	0	0	0	MRF1	16100	0	0	0
WTE1	44500	0	0	0	WTE1	0	44500	0	0
MBT4	100200	0	0	0	MBT4	0	100200	0	0
LDF	144900	156000	168100	180000	LDF	427500	156000	168100	180000
HZLDF	5000	5000	5000	5000	HZLDF	0	5000	5000	5000

Conclusively, except from the underestimation of the GHG emissions Model 2 may result in misleading conclusions regarding the timing of the unit commissioning, especially when we move towards environmentally friendly solutions in the Pareto front. Model 1 estimates more realistically the impact of the first periods' behavior and advises for less input in the landfills from the first periods.

4. Conclusive remarks

In the present paper a brief outline of a multi-period multi-objective programming model for integrated MSW management that incorporates economic cost and GHG emissions is presented. The focus of the paper is on the detailed modeling of the landfill CH₄ emissions following the IPCC 2006 guidelines (FOD model). The incorporation of IPCC guidelines in the modeling offers a more realistic view to the MSW emission estimation. The landfill emissions is usually the greatest component in the MSW system's emission (among e.g. transportation, other processes etc.) Actually, the basic environmental objective of the whole MSW management aims at reducing the amounts going to landfill because of these long standing emissions. Therefore, a reliable modeling for the calculation of these emissions is of paramount importance.

The comparison of this formulation with the conventional formulation used in the literature (the GHG emissions are linearly related to the disposed amount) reveals: (i) the underestimation of the GHG emissions with the obtained solutions and (ii) the different structural characteristics of the respective Pareto optimal solutions especially when we move towards the least GHG emissions edge of the Pareto front.

Acknowledgements

The present work has been partially developed under the project "Waste Management Options for Greenhouse Gases Emissions Control" (LIFE09/ENV/GR/294), with the contribution of the LIFE financial instrument of the European Community. More information on the WASTE-C-CONTROL project is available at: www.epem.gr/waste-c-control.

References

- Abou Najm, M., El-Fadel, M. (2004) Computer-based interface for an integrated solid waste management optimization model. *Environmental Modelling & Software* 19, 1151-1164.
- Belton, V. & Stewart, T. (2002) *Multiple Criteria Decision Analysis. An Integrated Approach*. Kluwer Academic Publishers.
- Bogner, J., Pipatti, R., Hashimoto, S., Diaz, C., Mareckova, K., Diaz, L., Kjeldsen, P., Monni, S., Faaij, A., Gao, Q., Zhang, T., Ahmed, M.A., Sutamihardja, R.T.M., & Gregory, R. (2008) Mitigation of global

- 1
2 greenhouse gas emissions from waste: conclusions and strategies from the Intergovernmental Panel on
3 Climate Change (IPCC) Fourth Assessment Report. Working Group III (Mitigation). *Waste*
4 *Management & Research*, 26, 11-32.
5
6
7 Bonomo, F., Durán, G., Larumbe F. & Marengo, J. (2012) A method for optimizing waste collection using
8 mathematical programming: a Buenos Aires case study. *Waste Management & Research*, 30, 311-324.
9
10 Brooke, A., Kendrick, D., Meeraus, A., Raman, R. (1998). *GAMS. A user's guide*, GAMS development
11 corporation, Washington
12
13 Cheng, S., Chan, C.W., Huang, G.H. (2003) An integrated multi-criteria decision analysis and inexact mixed
14 integer linear programming approach for solid waste management. *Engineering Applications of Artificial*
15 *Intelligence* 16, 543-554.
16
17
18 Figueira, J., Greco, S., Ehrgott, M. (2005). *Multiple Criteria Decision Analysis. State of the Art Surveys*,
19 Springer.
20
21 Galante, G., Aiello, G., Enea, M., Panascia, E. (2010) A multi-objective approach to solid waste management.
22 *Waste Management* 30, 1720-1728.
23
24
25 Gentil, E., Christensen, T.H., Aoustin, E. (2009) Greenhouse gas accounting and waste management. *Waste*
26 *Management & Research*, 27, 696-706.
27
28
29 Gottinger, H.W. (1988) A computational model for solid waste management with application. *European Journal*
30 *of Operational Research* 35, 350-364.
31
32
33 He, L., Huang, G.H., Lu, H. (2011) Greenhouse gas emissions control in integrated municipal solid waste
34 management through mixed integer bilevel decision-making, *Journal of Hazardous Materials* 193, 112-
35 119.
36
37
38 Huang, G.H., Baetz, B.W., Patry, G.G. (1995) Grey integer programming: An application to waste management
39 planning under uncertainty. *European Journal of Operational Research* 83, 594-620.
40
41
42 IPCC (1997). *Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Inventories*. Intergovernmental Panel on
43 Climate Change (IPCC), IPCC/OECD/IEA, Paris, France.
44
45
46 IPCC (2006). *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Volume 5: Waste, Chapter 3: Solid waste*
47 *disposal*, IPCC/OECD/IEA, Paris, France.
48
49
50 Iyer, R.R., Grossmann, I.E. (1998) Synthesis and operational planning of utility systems for multiperiod
51 operation. *Computers & Chemical Engineering* 22, 979-993.
52
53
54
55
56
57
58
59
60

- 1
2 Li, Y.P., Huang, G.H., Nie, S.L., 2012. A mathematical model for identifying an optimal waste management
3 policy under uncertainty. *Applied Mathematical Modelling* 36, 2658-2673.
4
5
6 Louis, G., Shih, J-S. (2007) A flexible inventory model for municipal solid waste recycling. *Socio-Economic
7 Planning Sciences* 41, 61-89.
8
9
10 Lu, H.W., Huang, G.H., He, L., Zeng, G.M. (2009). An inexact dynamic optimization model for municipal solid
11 waste management in association with greenhouse gas emission control. *Journal of Environmental
12 Management* 90, 396-409.
13
14
15 Manfredi, S., Tonini, D., Christensen, T.H., Scharff, H. (2009) Landfilling of waste: accounting of greenhouse
16 gases and global warming contributions. *Waste Management & Research*, 27, 825-836.
17
18
19 Mavrotas, G. (2009) Effective implementation of the ϵ -constraint method in multiobjective mathematical
20 programming problems. *Applied Mathematics and Computation* 21, 455-465.
21
22
23 Minciardi, R., Paolucci, M., Robba, M., Sacile, R. (2008) Multi-objective optimization of solid waste flows:
24 Environmentally sustainable strategies for municipalities. *Waste Management* 28, 2201-2212.
25
26
27 Papageorgiou, A., Karagiannidis, A., Barton, J.R. & Kalogirou, E. (2009) Municipal soMunicipal solid waste
28 management scenarios for Attica and their greenhouse gas emission impact. *Waste Management &
29 Research*, 27, 928-937.
30
31
32 Perlack, R.D., Willis, C.E. (1985) Multi-objective decision-making in waste disposal planning. *Journal of
33 Environmental Engineering* 111, 373-385.
34
35
36 Pires, A., Martinho, G., Chang, N-B. (2011). Solid waste management in European countries: A review of
37 system analysis techniques, *Journal of Environmental Management* 92, 1033-1050.
38
39
40 Steuer, R.E. (1986) *Multiple Criteria Optimization. Theory, Computation and Application*, Krieger, Malabar, FL
41
42 Su, J., Xi, B.D., Liu, H.L., Jiang, Y.H., Warith, M.A. (2008) An inexact multi-objective dynamic model and its
43 application in China for the management of municipal solid waste. *Waste Management* 28, 2532-2541.
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60