

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Μεταπτυχιακή Εργασία

ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΑΠΟΡΡΙΜΜΑΤΩΝ

υπό

ΖΩΗΣ ΜΟΖΑ

Διπλωματούχου Μηχανικού Παραγωγής και Διοίκησης

Πολυτεχνείου Κρήτης, 2002

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των

απαιτήσεων για την απόκτηση του

Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης

2015

© 2015 Ζωή Μόζα

Η έγκριση της μεταπτυχιακής εργασίας από το Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

Πρώτος Εξεταστής Δρ. Γεώργιος Σαχαρίδης
(Επιβλέπων) Λέκτορας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο
Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής Δρ. Γεώργιος Κοζανίδης
Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής Δρ. Γεώργιος Λυμπερόπουλος
Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο
Θεσσαλίας

Ευχαριστίες

Πρώτα απ' όλα, θέλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της μεταπτυχιακής εργασίας μου, Λέκτορα κ. Γεώργιο Σαχαρίδη, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή του κατά τη διάρκεια της δουλειάς μου. Επίσης, είμαι ευγνώμων σε όλους τους καθηγητές του τμήματός Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας για όλα αυτά που μου έμαθαν κατά τη διάρκεια των σπουδών. Η στήριξη από τον επιβλέπων της διπλωματικής μου Λέκτορα κ. Γεώργιο Σαχαρίδη, αλλά και από τους υπόλοιπους καθηγητές του μεταπτυχιακού τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών στον τομέα Οργάνωσης Παραγωγής και Βιομηχανικής Διοίκησης, ήταν αμέριστη και τους ευχαριστώ όλους θερμά.

Πάνω απ' όλα, είμαι ευγνώμων στους γονείς μου, Γιάννη και Πέπη Μόζα για την ολόψυχη αγάπη και υποστήριξή τους όλα αυτά τα χρόνια. Αφιερώνω αυτήν την μεταπτυχιακή εργασία στην μητέρα μου και στον πατέρα μου.

Ζωή Μόζα

ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΑΠΟΡΡΙΜΜΑΤΩΝ

ZΩΗ MOZA

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, 2015

Επιβλέπων Καθηγητής: Δρ. Γεώργιος Σαχαρίδης, Λέκτορας Μεθόδων Επιχειρησιακής
Έρευνας στη Βιομηχανική Διοίκηση

Περίληψη

Η χωροθέτηση κάδων σε ένα αστικό δίκτυο διαχείρισης απορριμμάτων είναι ένα πρόβλημα που έχει απασχολήσει τα τελευταία χρόνια την επιστημονική κοινότητα, παρόλη τη σημαντικότητα του, τόσο για τους πολίτες μεμονωμένα όσο και για την πολιτεία συνολικά.

Στην παρούσα μελέτη προτείνουμε μια μεθοδολογία βελτιστοποίησης της χωροθέτησης κάδων σε μία αστική περιοχή που στόχος της είναι η μείωση του κόστους αποκομιδής για την πολιτεία με την καλύτερη τοποθέτηση κάδων, αλλά και η μείωση της όχλησης των πολιτών. Ταυτόχρονα προτείνουμε και μεθοδολογίες εκτίμησης της ημερήσιας παραγωγής απορριμμάτων, καθώς αποτελεί σημαντική παράμετρο για την διαχείριση συστημάτων διαχείρισης απορριμμάτων.

Τα μοντέλα που προτείνουμε βασίζονται στον μικτό ακέραιο γραμμικό και μη γραμμικό προγραμματισμό. Η εφαρμογή τους έδωσε αρκετά καλά αποτελέσματα, τα οποία μπορούν να εφαρμοστούν στην πράξη δίνοντας μεγάλη ακρίβεια και βελτιώνοντας πολύ την αρχική κατάσταση.

Περιεχόμενα

Περιεχόμενα.....	1
Σχηματιζόμενα δίκτυα	5
Ευρετήριο εξισώσεων και περιορισμών.....	7
Εξισώσεις	7
Περιορισμοί	7
Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή.....	10
1.1 Διαχείριση Απορριμμάτων	10
1.2 Τα συστήματα Πληρώνω Όσο Πετάω - ΠΟΠ (<i>Pay-As-You-Throw – PAYT</i>)	11
1.2.1 Σύστημα Πληρώνω Όσο Πετάω με Ζύγιση	13
1.2.2 Σύστημα Πληρώνω Όσο Πετάω με Κάδο	13
1.2.3 Σύστημα Πληρώνω Όσο Πετάω με Σακούλα.....	14
1.2.4 Σύστημα Πληρώνω Όσο Πετάω με Ζύγιση Σακούλας	14
1.3 Εφαρμογή των συστημάτων ΠΟΠ.....	16
1.4 Τα συστήματα ΠΟΠ στην Ελλάδα.....	17
Κεφάλαιο 2 Ανασκόπηση μελετών	20
2.1 Μεθοδολογίες που βασίζονται σε ακριβείς μεθόδους επίλυσης.....	21

2.1.1	Badran M.F., El-Hagar S.M. (2006)	21
2.1.2	Erkut et al. (2008)	22
2.1.3	Coutinho – Rodrigues J. et al. (2012)	24
2.2	Μεθοδολογίες που βασίζονται σε ευρετικές μεθόδους.....	25
2.2.1	Bautista J., Pereira J. (2006)	25
2.2.2	Ghiani G. et al. (2012) και Ghiani G. et al. (2014)	26
2.3	Μεθοδολογίες σε συνθήκες αβεβαιότητας	27
2.3.1	Tralhão et al. (2010)	27
2.3.2	Toso E.A.V., Alem D. (2014)	29
2.4	Μεθοδολογίες για την πρόβλεψη της παραγωγής απορριμμάτων	30
2.4.1	Matsuto και Tanaka (1993)	31
2.4.2	Katsamaki, Willems και Diamantopoulos (1998)	32
Κεφάλαιο 3	Μοντέλο τοποθέτησης κάδων απορριμμάτων	33
3.1	Διαμόρφωση προβλήματος.....	34
3.2	Υπολογισμός της αναμενόμενης ημερήσιας παραγωγής απορριμμάτων	37
3.2.1	Κανονική κατανομή	37
3.2.2	Εκτίμηση τριών σημείων.....	38
3.3	Εκτίμηση αρχικής κατάστασης.....	39
3.4	Γραμμικό μοντέλο.....	40
3.5	Γραμμικό μοντέλο με εκτίμηση σεναρίων	44
3.6	Μη γραμμικό μοντέλο.....	46

3.7	Μοντέλο όπου επιτρέπεται η υπερχείλιση κάδων.....	51
Κεφάλαιο 4 Εφαρμογή της μεθοδολογίας		56
4.1	Εκτίμηση αρχικής κατάστασης.....	58
4.1.1	Κανονική κατανομή.....	58
4.1.2	Εκτίμηση τριών σημείων.....	60
4.1.3	Μοντέλο με εκτίμηση σεναρίων	62
4.2	Αποτελέσματα γραμμικού μοντέλου	65
4.2.1	Κανονική κατανομή.....	65
4.2.2	Εκτίμηση τριών σημείων.....	67
4.3	Εκτίμηση σεναρίων	68
4.4	Αποτελέσματα μη γραμμικού μοντέλου	71
4.4.1	Κανονική κατανομή.....	71
4.4.2	Εκτίμηση τριών σημείων.....	73
4.5	Αποτελέσματα μη γραμμικού μοντέλου όπου επιτρέπεται η υπερχείλιση κάδων	75
4.5.1	Κανονική κατανομή.....	75
4.5.2	Εκτίμηση τριών σημείων.....	78
Κεφάλαιο 5 Συμπεράσματα		81
Παράρτημα		83
Παράρτημα-1. Κριτήριο minimax		83
Παράρτημα-2. Γραμμικοποίηση γινομένου μεταβλητών		84
2.1. Δύο δυαδικές μεταβλητές		85

Διαχείριση απορριμμάτων

Μεταπτυχιακή εργασία για την εκπλήρωση μέρους των απαιτήσεων του

Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης

2.2. Μία δυαδική και μία συνεχής μεταβλητή	85
--------------------------------------------------	----

Βιβλιογραφία	87
---------------------------	-----------

Σχηματιζόμενα δίκτυα

Δίκτυο 4.1.1	Αρχική χωροθέτηση κάδων με εκτίμηση ημερήσιας πλήρωσης με την κανονική κατανομή.....	60
Δίκτυο 4.1.2	Αρχική χωροθέτηση κάδων με εκτίμηση ημερήσιας πλήρωσης με την μέθοδο εκτίμησης τριών σημείων.....	62
Δίκτυο 4.1.3	Αρχική χωροθέτηση κάδων με εκτίμηση ημερήσιας πλήρωσης με την δημιουργία σεναρίων.....	64
Δίκτυο 4.2.1	Χωροθέτηση κάδων γραμμικού μοντέλου με εκτίμηση ημερήσιας πλήρωσης με την κανονική κατανομή	66
Δίκτυο 4.2.2	Χωροθέτηση κάδων γραμμικού μοντέλου με εκτίμηση ημερήσιας πλήρωσης με την μέθοδο των τριών σημείων.....	68
Δίκτυο 4.3.1	Χωροθέτηση κάδων γραμμικού μοντέλου με εκτίμηση ημερήσιας πλήρωσης κάδου με εκτίμηση σεναρίων.....	70
Δίκτυο 4.4.1	Χωροθέτηση κάδων μη γραμμικού μοντέλου με εκτίμηση ημερήσιας πλήρωσης με την κανονική κατανομή	72
Δίκτυο 4.4.2	Χωροθέτηση κάδων μη γραμμικού μοντέλου με εκτίμηση ημερήσιας πλήρωσης με την μέθοδο των τριών σημείων	74

Διαχείριση απορριμμάτων

Μεταπτυχιακή εργασία για την εκπλήρωση μέρους των απαιτήσεων του

Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης

Δίκτυο 4.5.1	Χωροθέτηση κάδων μη γραμμικού μοντέλου με υπερχειλίσσεις με εκτίμηση ημερήσιας πλήρωσης με την κανονική κατανομή	78
Δίκτυο 4.5.2	Χωροθέτηση κάδων μη γραμμικού μοντέλου με υπερχειλίσσεις με εκτίμηση ημερήσιας πλήρωσης με την μέθοδο των τριών σημείων	80

Ευρετήριο εξισώσεων και περιορισμών

Εξισώσεις	Εξ. 3.7.5	53
	Εξ. 3.7.6	53
Εξ. 3.2.1.....		37
Εξ. 3.2.2.....		38
Εξ. 3.2.3.....		38
Εξ. 3.2.4.....		38
Εξ. 3.2.5.....		39
Εξ. 3.2.6.....		39
Εξ. 3.5.1.....		45
Εξ. 3.6.1.....		47
Εξ. 3.6.2.....		48
Εξ. 3.6.3.....		50
Εξ. 3.7.1.....		53
Εξ. 3.7.2.....		53
Εξ. 3.7.3.....		53
Εξ. 3.7.4.....		53
	Περιορισμοί	
	(3.3.1)	40
	(3.3.2)	40
	(3.3.3)	40
	(3.3.4)	40
	(3.3.5)	40
	(3.4.1)	41
	(3.4.2)	41
	(3.4.3)	41
	(3.4.4)	41
	(3.4.5)	41
	(3.4.6)	41

Διαχείριση απορριμμάτων

Μεταπτυχιακή εργασία για την εκπλήρωση μέρους των απαιτήσεων του

Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης

(3.4.7).....	41	(3.6.5).....	49
(3.4.8).....	41	(3.6.6).....	49
(3.4.9).....	41	(3.6.7).....	49
(3.5.1).....	45	(3.6.8).....	49
(3.5.2).....	45	(3.6.9).....	49
(3.5.3).....	45	(3.6.10).....	49
(3.5.4).....	45	(3.6.11).....	50
(3.5.5).....	45	(3.6.12).....	50
(3.5.6).....	46	(3.6.13).....	50
(3.5.7).....	46	(3.6.14).....	50
(3.5.8).....	46	(3.6.15).....	50
(3.5.9).....	46	(3.6.16).....	51
(3.5.10).....	46	(3.6.17).....	51
(3.5.11).....	46	(3.6.18).....	51
(3.5.12).....	46	(3.6.19).....	51
(3.6.1).....	48	(3.7.1).....	54
(3.6.2).....	48	(3.7.2).....	54
(3.6.3).....	49	(3.7.3).....	54
(3.6.4).....	49	(3.7.4).....	54

Διαχείριση απορριμμάτων

Μεταπτυχιακή εργασία για την εκπλήρωση μέρους των απαιτήσεων του
Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης

(3.7.5)	54
(3.7.6)	54
(3.7.7)	55
(3.7.8)	55
(3.7.9)	55
(3.7.10)	55
(3.7.11)	55
(3.7.12)	55
(3.7.13)	55
(3.7.14)	55
(3.7.15)	55

Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή

1.1 Διαχείριση Απορριμμάτων

Η διαχείριση απορριμμάτων είναι η διαδικασία που περιλαμβάνει τη συλλογή, μεταφορά, επεξεργασία ή αποκομιδή, οργάνωση και έλεγχο των απορριμμάτων με επίδραση στην δημόσια υγεία, το περιβάλλον και την γενικότερη αισθητική. Ο όρος συνήθως αναφέρεται σε απόβλητα που προκύπτουν από ανθρώπινη δραστηριότητα και στόχος των μεθοδολογιών που προτείνονται είναι η μείωση της επίδρασης των απορριμμάτων στην δημόσια υγεία, στο περιβάλλον και στην γενικότερη αισθητική. Η διαχείριση όλων των προς απόρριψη υλικών, είτε είναι στερεά, είτε υγρά, είτε αέρια, είτε ραδιενεργά, εμπίπτει στα επιστημονικά πεδία της διαχείρισης απορριμμάτων

Η διαχείριση απορριμμάτων περιλαμβάνει μια πληθώρα δραστηριοτήτων, που μπορούν να κατηγοριοποιηθούν στα ακόλουθα στάδια [1]:

1. Παραγωγή
2. Συλλογή
3. Μεταποίηση
4. Απόρριψη

Στάδιο παραγωγής: Το στάδιο αυτό περιλαμβάνει το σύνολο των διεργασιών που λαμβάνουν χώρα μέσα στην κοινωνία μέχρι να προκύψει μια ποσότητα απορριμμάτων. Εδώ

μοναδικός συμμετέχων και υπεύθυνος είναι ο πολίτης, είτε ως μονάδα είτε συλλογικά, μια και ο τρόπος παραγωγής απορριμμάτων δεν μπορεί να επηρεαστεί ή να διαφοροποιηθεί (π.χ. οι ρυθμοί παραγωγής ή οι συνολικές ποσότητες).

Στάδιο συλλογής: Τα απορρίμματα που παράχθηκαν κατά το προηγούμενο στάδιο αποθηκεύονται προσωρινά σε κάποια πλαστική σακούλα και στη συνέχεια καταλήγουν σε κάποιο κάδο απορριμμάτων. Τα συγκεντρωμένα απορρίμματα συλλέγονται στη συνέχεια από απορριμματοφόρα οχήματα και δρομολογούνται σε χώρους επεξεργασίας ή σε χώρους διάθεσης.

Στάδιο μεταποίησης: Πολλά από τα απορρίμματα που παράγονται επεξεργάζονται και μετατρέπονται σε μια άλλη μορφή. Αυτό μπορεί να γίνει είτε μέσω της ανακύκλωσης και της παραγωγής νέων υλικών είτε μέσω της παραγωγής ενέργειας και καύσιμου από τα απορρίμματα.

Στάδιο απόρριψης: Τα απορρίμματα που έχουν συλλεχθεί από τους κάδους απορριμμάτων και δεν έχουν δρομολογηθεί σε κάποιο χώρο μεταποίησης, οδηγούνται σε χώρους ταφής απορριμμάτων.

1.2 Τα συστήματα Πληρώνω Όσο Πετάω - ΠΟΠ (*Pay-As-You-Throw – PAYT*)

Η μοναδιαία τιμολόγηση, γνωστή και ως μεταβλητού ρυθμού τιμολόγηση ή Pay-As-You-Throw (PAYT) είναι ένα σύστημα στο οποίο οι κάτοικοι πληρώνουν για τις υπηρεσίες διαχείρισης αστικών αποβλήτων ανά μονάδα συλλεγόμενων απορριμμάτων και όχι μέσω ενός

σταθερού τέλους [2]. Τα συστήματα αυτά στην Ελλάδα είναι γνωστά με την αγγλική τους ορολογία, αλλά και ως συστήματα «Πληρώνω Όσο Πετάω - ΠΟΠ» [3]. Τα συστήματα αυτά, που δύναται να προσφερθούν από τους ΟΤΑ, βασίζονται στην αρχή «ο ρυπαίνων πληρώνει», και ακολουθούν μια μεθοδολογία παρόμοια με αυτή που ισχύει για την κοστολόγηση του νερού και του ρεύματος. Σύμφωνα με αυτά, τα τέλη που πληρώνει κάθε νοικοκυριό συνδέονται με την ποσότητα των αποβλήτων που παράγει αυτό, δίνοντας έτσι στους δημότες ένα επιπλέον κίνητρο για να τα μειώσουν, συμμετέχοντας ενεργά στην ανακύκλωση και στην κομποστοποίηση.

Η λειτουργία του συστήματος ΠΟΠ στηρίζεται στην απόδοση ευθύνης, άρα και χρέωσης, στον κάθε ξεχωριστό παραγωγό ή ομάδα παραγωγών για τα απόβλητα που παράγει (ο ρυπαίνων πληρώνει). Η επιτυχία του συστήματος έγκειται στην ακρίβεια με την οποία αναγνωρίζεται ο παραγωγός, προσδιορίζεται η ποσότητα των απορριμμάτων και χρεώνεται με βάση αυτήν την ποσότητα αποβλήτων ο παραγωγός τους. Αυτή η λειτουργία επιτυγχάνεται τεχνικά, είτε με την Ζύγιση του κάδου, είτε με την αγορά από τους δημότες ειδικών Σακουλών με προπληρωμένα τέλη, είτε με ατομικό Κάδο σε κάθε νοικοκυριό και χρέωση με τον όγκο και τη συχνότητα αποκομιδής, είτε τέλος με προπληρωμένες Κάρτες, με τις οποίες μπορεί κάποιος να τοποθετήσει τα απορρίμματά του σε press containers και να αφαιρούνται μονάδες.

Μερικά σενάρια χρέωσης δημοτικών τελών για συστήματα Πληρώνω Όσο Πετάω αναλύονται στη συνέχεια [4].

1.2.1 Σύστημα Πληρώνω Όσο Πετάω με Ζύγιση

Σύμφωνα με το σύστημα αυτό, κάθε κάδος όταν αδειάζει ζυγίζεται και αναγνωρίζεται. Κάθε κάδος έχει συνδεθεί με ένα ή περισσότερα νοικοκυριά και η χρέωση του/των νοικοκυριού/ών του κάδου γίνεται περιοδικά με βάση το βάρος.

Το σύστημα ΠΟΠ με ζύγιση μπορεί να εφαρμοσθεί σε κάθε αστική περιοχή. Το μειονέκτημα στη χρέωση είναι ότι σε πυκνοκατοικημένες περιοχές οι κάδοι αφορούν περισσότερα του ενός νοικοκυριά και η χρέωση γίνεται με βάση τη μέση συμπεριφορά του συνόλου των νοικοκυριών του κάθε κάδου. Εάν σε πυκνοκατοικημένες περιοχές κάθε νοικοκυριό έχει τον κάδο του, τότε προκύπτουν προβλήματα τοποθέτησης και ασφάλειας του κάδου. Ακόμη και αν οι κάδοι κλειδωθούν, μπορεί το νοικοκυριό να μεταφέρει τα απορρίμματά σε άλλο κάδο άλλης περιοχής ή ακόμα και ανεξέλεγκτα στο περιβάλλον.

1.2.2 Σύστημα Πληρώνω Όσο Πετάω με Κάδο

Κάθε νοικοκυριό επιλέγει τον κάδο του από ένα σύστημα κάδων του ΟΤΑ και η χρέωση γίνεται με βάση τον όγκο του κάδου και τη συχνότητα αποκομιδής. Περιοδικά μπορεί το νοικοκυριό να αλλάξει τον κάδο ή τη συχνότητα αποκομιδής.

Το σύστημα ΠΟΠ με τον κάδο μπορεί να εφαρμοσθεί σε κάθε αστική περιοχή, αλλά είναι ευκολότερο να εφαρμοσθεί σε αραιοκατοικημένες περιοχές. Το σύστημα αυτό γενικότερα δεν έχει μειονεκτήματα, γιατί η χρέωση γίνεται με ευθύνη του ίδιου του νοικοκυριού, που επιλέγει τον όγκο του κάδου του και τη συχνότητα αποκομιδής σύμφωνα με τις ανάγκες του. Ωστόσο υπάρχει ο κίνδυνος της ζαβολιάς, καθώς το νοικοκυριό μπορεί να πάρει έναν κάδο

μικρής χωρητικότητας και να μεταφέρει τα απορρίμματά του σε άλλον κάδο του ΟΤΑ ή ακόμη και ανεξέλεγκτα στο περιβάλλον.

1.2.3 Σύστημα Πληρώνω Όσο Πετάω με Σακούλα

Κάθε νοικοκυριό αγοράζει ειδικές δημοτικές σακούλες για να τοποθετήσει τα απορρίμματά του. Οι ειδικές σακούλες εμπεριέχουν τα δημοτικά τέλη. Όσο λιγότερες σακούλες αγοράσει το νοικοκυριό, τόσο λιγότερα τέλη θα πληρώσει.

Το σύστημα ΠΟΠ με ειδική σακούλα μπορεί να εφαρμοσθεί σε κάθε αστική περιοχή. Μειονέκτημα στη χρέωση δεν υπάρχει. Από την άλλη πλευρά όμως, υπάρχει η δυνατότητα της ζαβολιάς, καθώς το νοικοκυριό μπορεί να τοποθετήσει τα απορρίμματά του σε κοινή σακούλα, χωρίς τα ενσωματωμένα δημοτικά τέλη και να την πετάξει στον κοινό με τα άλλα νοικοκυριά κάδο, ή να μεταφέρει τα απορρίμματά του σε κοινή σακούλα σε άλλον κάδο του ΟΤΑ, ή ακόμα και ανεξέλεγκτα στο περιβάλλον.

1.2.4 Σύστημα Πληρώνω Όσο Πετάω με Ζύγιση Σακούλας

Κάθε νοικοκυριό αγοράζει ειδικές δημοτικές σακούλες για να τοποθετήσει τα απορρίμματά του. Οι ειδικές σακούλες φέρουν ένα ειδικό σύστημα αναγνώρισης του νοικοκυριού και εμπεριέχουν τα δημοτικά τέλη. Όσο λιγότερες σακούλες αγοράσει το νοικοκυριό τόσο λιγότερα τέλη θα πληρώσει. Οι κάδοι έχουν εφοδιαστεί με ζυγαριές και ειδικό ηλεκτρονικό λογαριασμό αναγνώρισης και αποθήκευσης συμβάντων. Μόλις η ειδική

σακούλα τοποθετηθεί στον κάδο, αυτή αναγνωρίζεται αυτόματα και αναγνωρίζεται το νοικοκυριό. Τα δεδομένα είτε μεταδίδονται online στον ΟΤΑ, είτε αποθηκεύονται στα συστήματα του κάδου και μεταφέρονται μαζί με τα δεδομένα της αποκομιδής στο σύστημα του απορριμματοφόρου.

Το σύστημα ΠΟΠ με ειδική σακούλα μπορεί να εφαρμοσθεί σε κάθε αστική περιοχή. Μειονέκτημα στη χρέωση δεν υπάρχει. Δυνατότητα ζαβολιάς υπάρχει και σε αυτή την περίπτωση, καθώς το νοικοκυριό μπορεί να τοποθετήσει τα απορρίμματά του σε κοινή σακούλα, χωρίς τα ενσωματωμένα δημοτικά τέλη ή να την πετάξει σε κοινό με άλλα νοικοκυριά κάδο ή ακόμα και ανεξέλεγκτα στο περιβάλλον.

Η αποτελεσματικότερη εφαρμογή του ΠΟΠ προϋποθέτει την προηγούμενη ύπαρξη υποδομών και διαδικασιών, που θα υποστηρίζουν τη μείωση, επαναχρησιμοποίηση, ανακύκλωση και κομποστοποίηση των αποβλήτων, για να μπορέσει ο δημότης να μειώσει στο ελάχιστο δυνατό την ποσότητα αποβλήτων που στέλνει για τελική διάθεση και συνεπώς, να μειώσει το κόστος διαχείρισης που τον επιβαρύνει. Επίσης, καθοριστικός παράγοντας για την επιτυχία ενός συστήματος ΠΟΠ είναι η συνεχής και ολοκληρωμένη ενημέρωση, ευαισθητοποίηση και ενεργοποίηση των δημοτών, εάν είναι δυνατόν σπίτι-σπίτι (πόρτα-πόρτα).

1.3 Εφαρμογή των συστημάτων ΠΟΠ

Τα συστήματα ΠΟΠ έχουν εφαρμοστεί σε διάφορες πόλεις σε ΗΠΑ, Καναδά, Ασία και Ευρώπη [5]. Από τις πρώτες χώρες της Ευρώπης που εφάρμοσαν συστήματα ΠΟΠ και μάλιστα από τα μέσα της δεκαετίας του '90 ήταν η Σουηδία, η Ελβετία και η Δανία. Παρόμοια συστήματα εφαρμόστηκαν στη Γερμανία, το Βέλγιο, τη Γαλλία και την Ολλανδία [6].

Στη Σουηδία η πρώτη εφαρμογή συστήματος ΠΟΠ εμφανίστηκε ήδη από το 1995. Το 1990 οδηγήθηκαν στους ΧΥΤΑ το 44% της συνολικής παραγόμενης ποσότητας απορριμμάτων, ενώ το 1997 (δηλ. μετά την εφαρμογή του ΠΟΠ), το παραπάνω ποσοστό μειώθηκε στο 31%. Αντίστοιχα, για το ίδιο χρονικό διάστημα, επιτεύχθηκε αύξηση του ποσοστού ανακύκλωσης από 12% σε 25% [7].

Στη Γερμανία συναντώνται πολλές περιπτώσεις εφαρμογής συστημάτων ΠΟΠ και ιδιαίτερα στο δυτικό τμήμα της χώρας. Η πλειοψηφία των συστημάτων σε εφαρμογή είναι με χρέωση βάσει όγκου απορριμμάτων ανά παραγόμενο νοικοκυριό και συνδυάζονται πάντοτε με δυναμικά προγράμματα ανακύκλωσης [8].

Στη Γαλλία συναντώνται λίγες περιπτώσεις εφαρμογής συστήματος ΠΟΠ. Η πιο ενδιαφέρουσα περίπτωση είναι του δήμου Les Sorinieres (πληθυσμός 6.500 κάτοικοι), όπου πρωτοεφαρμόστηκε το ΠΟΠ το 1997. Κάθε νοικοκυριό έχει τη δυνατότητα να επιλέξει το μέγεθος του κάδου και τη συχνότητα εκκένωσής του, ενώ χρεώνεται ανάλογα με την επιλογή του. Η αύξηση της συχνότητας εκκένωσης επιφέρει επιπρόσθετη χρέωση, η οποία εξαρτάται από τον όγκο του κάδου που έχει επιλέξει ο πολίτης [8].

Στην Ελβετία, μεταξύ των συστημάτων ΠΟΠ που εφαρμόζονται από το 1993, ξεχωρίζουν οι περιπτώσεις της Ζυρίχης και του Fribourg που έχουν εγκαθιδρύσει επιτυχημένα σχετικά συστήματα χρέωσης. Στη Ζυρίχη ακολουθήθηκε ένα μικτό σχήμα πάγιας και μεταβλητής (βάσει βάρους) κοστολόγησης των υπηρεσιών αποκομιδής. Στο Fribourg υιοθετήθηκε αναλογικό σχήμα χρέωσης βάσει όγκου παραγωγής και εφαρμόστηκε για πρώτη φορά το 1998 [8].

1.4 Τα συστήματα ΠΟΠ στην Ελλάδα

Στην Ελευσίνα εφαρμόστηκε για πρώτη φορά πιλοτικά το σύστημα Πληρώνω όσο Πετάω στα πλαίσια του προγράμματος LIFE “HEC-PAYT”. Η εφαρμογή του προγράμματος σε επιλεγμένη περιοχή της Ελευσίνας ξεκίνησε στις 14 Απριλίου 2009 [9] και αφορούσε πράσινους κάδους (κοινά αστικά απόβλητα) και μπλε κάδους (ανακυκλώσιμα) χωρητικότητας 1.100 λίτρων.

Από την αρχή του προγράμματος και πριν την πιλοτική εφαρμογή της ζύγισης κάθε κάδου χωριστά, ζυγιζόταν το απορριμματοφόρο κάθε μέρα μετά το τέλος του δρομολογίου του. Έτσι άρχισε να σχηματίζεται μια εικόνα για την ημερήσια παραγωγή απορριμμάτων της περιοχής.

Μετά την εγκατάσταση του ζυγιστικού εξοπλισμού ξεκίνησε η ενημέρωση των νοικοκυριών πόρτα-πόρτα για τη διαχείριση των απορριμμάτων τους και για το πρόγραμμα Πληρώνω Όσο Πετάω.

Στη συνέχεια τοποθετήθηκαν αυτοκόλλητα νούμερα πάνω στους κάδους, τσιπ αναγνώρισης και barcode σε κάθε κάδο, ώστε να γίνεται γνωστή η θέση του και τα κιλά που ζυγίζει κατά την αποκομιδή του.

Κατά τη διάρκεια της πιλοτικής εφαρμογής (ζύγιση κάδου-κάδου) και κατά την ενημέρωση πόρτα-πόρτα έγινε αντιστοίχιση κάθε νοικοκυριού με αριθμημένο μπλε και πράσινο κάδο. Ταυτόχρονα διανεμόταν δωρεάν στα νοικοκυριά βιοδιασπώμενες σακούλες και τσάντες πολλαπλών χρήσεων.

Σε σύγχρονο απορριμματοφόρο εγκαταστάθηκε ο ζυγιστικός εξοπλισμός με το κατάλληλο λογισμικό πρόγραμμα ώστε να καταγράφονται τα δεδομένα μέρα-μέρα και κάδο ανά κάδο. Το απορριμματοφόρο εκτελούσε δύο δρομολόγια: ένα για τη συλλογή των πράσινων κάδων και ένα για τη συλλογή των μπλε κάδων και η διαδρομή που ακολουθούσε ήταν η ίδια ανεξαρτήτως οδηγού. Στο τέλος των δρομολογίων πραγματοποιούνταν μεταφορά δεδομένων. Έτσι προέκυπτε η κίνηση της ημέρας, που περιλάμβανε τη διεύθυνση που βρίσκεται ο κάδος, τον κωδικό του, τα κιλά του, την ώρα της αποκομιδής και το είδος του κάδου.

Κατά τη διάρκεια της πιλοτικής εφαρμογής του προγράμματος καταγράφηκε πληθώρα προβλημάτων. Μερικά από αυτά ήταν μετακινήσεις το κάδων είτε για παρκάρισμα είτε από το ίδιο το προσωπικό του δήμου, καταστροφές κάδων, αποκόλληση των τσιπ αναγνώρισης από τους κάδους, αλλαγές δρομολογίου του απορριμματοφόρου λόγω έργων, μηχανικές βλάβες του απορριμματοφόρου και προσωρινή αντικατάσταση από απορριμματοφόρα που δεν διέθεταν εξοπλισμό, κ.α.

Επίσης, παρόλο που η συμμετοχή του κόσμου ήταν ενθαρρυντική, οι δημότες δεν συμμετείχαν ενεργά και σωστά και ήταν δύσπιστοι, καθώς δεν έβλεπαν μείωση στα δημοτικά

τέλη ταυτόχρονα με την εφαρμογή του προγράμματος. Η χρήση της σακούλας δεν φάνηκε καθόλου δημοφιλής στους πολίτες και την αντιλήφθηκαν περισσότερο ως δώρο του δήμου χωρίς κάποιο αντίκρισμα. Μετά τη λήξη του πιλοτικού τα περισσότερα νοικοκυριά δεν δώσανε στοιχεία ως προς τη χρήση της σακούλας είτε γιατί φοβήθηκαν πως θα τους ζητηθούμε οι σακούλες πίσω, είτε γιατί δεν είχαν ενημέρωση από τα άλλα μέλη του νοικοκυριού για τη συμμετοχή τους στο πρόγραμμα και τη χρήση της σακούλας.

Συμπερασματικά, η απόφαση εγκατάστασης ενός τέτοιου συστήματος χρέωσης χρειάζεται πολύ καλή προετοιμασία, οργάνωση, επικοινωνία των ανθρώπων που δουλεύουν ή εμπλέκονται έστω και λίγο στο ΠΟΠ ώστε να λειτουργούν όλα σωστά.

Σκοπός της παρούσας διατριβής είναι η βελτιστοποίηση της τοποθέτησης των κάδων σε μία αστική περιοχή όπου εφαρμόζεται σύστημα Πληρώνω όσο Πετάω. Πιο συγκεκριμένα μπορεί να εφαρμοστεί για τις περιπτώσεις συστήματος ΠΟΠ με σακούλα (ενότητα 1.2.3) ή με ζύγιση σακούλας (ενότητα 1.2.4). Δεδομένου ενός τέτοιου συστήματος, όπου δεν μας ενδιαφέρει η αντιστοίχιση νοικοκυριών σε κάδους, αφού η χρέωση γίνεται με σακούλες και όχι με κάδους, στόχος μας είναι να κάνουμε αναδιανομή των κάδων με τέτοιον τρόπο, ώστε να εξυπηρετούν την ήδη καταγεγραμμένη ημερήσια ζήτηση, αλλά και να γεμίζουν πάνω από κάποια όρια που θέτει ο αποφασίζων. Ταυτόχρονα, με την ανακατανομή το σύστημα «εξισορροπείται», καθώς διορθώνονται περιπτώσεις υπερχειλίσας αλλά και περιπτώσεις όπου η αποκομιδή σε γειτονικούς κάδους δεν χρειάζεται να γίνεται με την ίδια συχνότητα.

Κεφάλαιο 2 Ανασκόπηση μελετών

Οι περισσότερες μεθοδολογίες που αναπτύχθηκαν για την χωροθέτηση κάδων απορριμμάτων βασίζονται στη χρήση των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών – ΓΣΠ (Geographical Information System – GIS) [5], [10, 11]. Τα ΓΣΠ αποτελούν εργαλείο για την εισαγωγή, επεξεργασία και αξιολόγηση δεδομένων για την προσωρινή αποθήκευση των απορριμμάτων μέσω της ψηφιακής χαρτογραφικής απεικόνισης. Είναι ένα ηλεκτρονικό σύστημα ικανό να ενσωματώσει, αποθηκεύσει, προσαρμόσει, αναλύσει και παρουσιάσει γεωγραφικά συσχετισμένες πληροφορίες.

Στον Ελλαδικό χώρο πολλοί δήμοι χρησιμοποίησαν το ΓΣΠ για προβλήματα που σχετίζονται με το στάδιο της συλλογής, όπως για τη χωροθέτηση των κάδων και τη βελτιστοποίηση της δρομολόγησης των απορριμματοφόρων οχημάτων [12-14].

Πέρα όμως από τις μεθοδολογίες που αναπτύχθηκαν με τη βοήθεια των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών, που είναι και οι πιο διαδεδομένες και ευρέως χρησιμοποιημένες για την επίλυση των προβλημάτων του σταδίου συλλογής απορριμμάτων, στη βιβλιογραφία μπορεί να βρει κανείς ευρεία ποικιλία μεθοδολογιών.

Οι πρώτες μελέτες που παρουσιάστηκαν αφορούσαν κυρίως τη χωροθέτηση εγκαταστάσεων διαχείρισης απορριμμάτων (χωματερές, σταθμούς μεταφόρτωσης, χώρους ταφής απορριμμάτων, κ.α.) [15-17]. Τα προβλήματα της δρομολόγησης απορριμματοφόρων οχημάτων και χωροθέτησης κάδων, εμφανίζονται πολύ αργότερα στη βιβλιογραφία.

Παρά την ευρεία έρευνα που έχει διενεργηθεί στον τομέα της χωροθέτησης εγκαταστάσεων, ελάχιστη προσοχή έχει δοθεί στη μελέτη της χωροθέτησης κάδων απορριμμάτων. Η βιβλιογραφία πάνω στο συγκεκριμένο θέμα είναι ιδιαίτερα περιορισμένη, και οι μελέτες που έχουν δημοσιευτεί είναι αρκετά πρόσφατες.

2.1 Μεθοδολογίες που βασίζονται σε ακριβείς μεθόδους επίλυσης

2.1.1 Badran M.F., El-Hagar S.M. (2006)

Ο στόχος της συγκεκριμένης μελέτης [18] είναι η ανάπτυξη ενός μοντέλου διαχείρισης στερεών αποβλήτων για την πόλη Port Said της Αιγύπτου, που περιλαμβάνει την έννοια των σταθμών συλλογής. Το προτεινόμενο μοντέλο βελτιστοποίησης ελαχιστοποιεί το κόστος διαχείρισης του συστήματος με τη βοήθεια του μικτού ακέραιου προγραμματισμού. Η βέλτιστη τοποθεσία των σταθμών συλλογής επιλέγεται από δεδομένα υποψήφια σημεία έτσι ώστε το κόστος του συστήματος να ελαχιστοποιείται. Τα αστικά απόβλητα περιλαμβάνουν τα επικίνδυνα, τα κατασκευαστικά και τα απόβλητα κατεδάφισης στο Port Said.

Το προτεινόμενο μοντέλο διαμορφώνεται λαμβάνοντας υπόψη τις ιδιαιτερότητες της ροής αποβλήτων στις πόλεις της Αιγύπτου, όπως το γεγονός πως δεν γίνεται διαχωρισμός απορριμμάτων στην πηγή και πως τα βιομηχανικά, τα κατασκευαστικά και τα απόβλητα κατεδάφισης μεταφέρονται στον πλησιέστερο σταθμό συλλογής με ευθύνη του δημιουργού τους.

Το συνολικό κόστος χωρίζεται σε δύο μέρη, ένα που εξαρτάται από τις εγκαταστάσεις και ένα που εξαρτάται από τη λειτουργία του συστήματος. Το πρώτο περιλαμβάνει το μεταφορικό κόστος και τα σταθερά και μεταβλητά κόστη των εγκαταστάσεων. Το δεύτερο περιλαμβάνει το κόστος του λειτουργικού συστήματος και περιλαμβάνει το κόστος των κάδων, τον εξοπλισμό του προσωπικού συλλογής και τα διαχειριστικά έξοδα. Το κόστος που εξαρτάται από τις εγκαταστάσεις ελαχιστοποιείται από το μοντέλο μικτού ακέραιου προγραμματισμού, ενώ το κόστος της λειτουργίας του συστήματος προστίθεται στο ελαχιστοποιημένο κόστος και προκύπτει το ελαχιστοποιημένο κόστος του συνολικού συστήματος.

Στην παρούσα μελέτη ο βασικός περιορισμός είναι η ποιότητα των δεδομένων κατανομής των απορριμμάτων και οι λεπτομερείς χάρτες, καθώς η πηγή παραγωγής απορριμμάτων υποτίθεται πως βρίσκεται στο κέντρο της περιοχής παραγωγής απορριμμάτων. Επιπλέον, οι αποστάσεις μεταξύ των διαφορετικών τοποθεσιών υποτίθεται πως είναι οι αποστάσεις ανάμεσα στα κέντρα τους. Αυτή η υπόθεση οδήγησε σε μια λύση η οποία θεωρείται η καλύτερη λύση. Η βέλτιστη λύση θα επιτευχθεί μόνο με υψηλής λεπτομέρειας δεδομένα για τις τοποθεσίες των σημείων παραγωγής απορριμμάτων και τις κατανομές τους.

2.1.2 Erkut et al. (2008)

Η παρούσα μελέτη [13] εστιάζει στη διαχείριση αστικών στερεών αποβλήτων στην περιφέρεια της Κεντρικής Μακεδονίας στην Ελλάδα. Αναπτύσσεται ένα μοντέλο μικτού ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού με πολλαπλούς στόχους για την επίλυση του

προβλήματος τοποθέτησης – επανατοποθέτησης συμπεριλαμβάνοντας την επιλογή της τεχνολογίας των σταθμών μεταφοράς, των εγκαταστάσεων ανάκτησης υλικών, των κλιβάνων αποτέφρωσης απορριμμάτων και των χώρων υγειονομικής ταφής. Επίσης λαμβάνονται υπόψη οικονομικά και περιβαλλοντικά κριτήρια.

Η ανάπτυξη του μοντέλου δεν περιλαμβάνει τη συμμετοχή υπευθύνων των περιφερειών. Έτσι γίνεται η υπόθεση πως όλοι οι στόχοι έχουν την ίδια βαρύτητα και αναζητείται η «δίκαιη» λύση, δηλαδή η λύση στην οποία όλες οι κανονικοποιημένες τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης θα είναι στα ίδια επίπεδα.

Έτσι, στο προτεινόμενο μοντέλο, δεδομένου ενός συνόλου σημείων παραγωγής απορριμμάτων και ενός συνόλου υποψηφίων σταθμών μεταφόρτωσης, εγκαταστάσεων ανάκτησης υλικών, κλιβάνων αποτέφρωσης απορριμμάτων και χώρων υγειονομικής ταφής, αναζητείται η τοποθεσία και η τυπολογία αυτών των εγκαταστάσεων απορριμμάτων, έτσι ώστε να ικανοποιούνται τα ακόλουθα κριτήρια, που συνήθως έρχονται σε σύγκρουση μεταξύ τους: η ελαχιστοποίηση του φαινομένου του θερμοκηπίου, η ελαχιστοποίηση των απορριμμάτων που καταλήγουν για ταφή, η μεγιστοποίηση της ανάκτησης ενέργειας, η μεγιστοποίηση της ανακύκλωσης υλικών και η ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους, που περιλαμβάνει το κόστος αρχικής εγκατάστασης, το κόστος μεταφοράς και το κόστος συντήρησης.

Το μοντέλο αναπτύσσεται τόσο σε επίπεδο περιφερειακών ενοτήτων, όσο και σε επίπεδο όλης της περιφέρειας. Τα αποτελέσματα που αποκτώνται σε επίπεδο περιφερειακών ενοτήτων είναι καλύτερα σε σχέση με αυτά σε επίπεδο περιφέρειας, κάτι που είναι αναμενόμενο, καθώς η πρώτη προσέγγιση αποτελεί χαλάρωση της δεύτερης. Παρόλα αυτά τα

οφέλη από τη μετάβαση από τη μία προσέγγιση στην άλλη είναι ελάχιστα, καθώς η ροή απορριμμάτων είναι μικρή.

2.1.3 Coutinho – Rodrigues J. et al. (2012)

Η παρούσα μελέτη [19] παρουσιάζει μία προσέγγιση μικτού ακέραιου προγραμματισμού πολλαπλών στόχων για την εύρεση των τοποθεσιών και των χωρητικοτήτων μη-επιθυμητών εγκαταστάσεων, όπως αυτή του χώρου συλλογής απορριμμάτων. Ο πρώτος στόχος είναι η ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους επένδυσης. Ο δεύτερος είναι η ελαχιστοποίηση της δυσαρέσκειας, περιλαμβάνοντας στην ίδια συνάρτηση χαρακτηριστικά «ελκυστικότητας» και «απόθησης» του προβλήματος απόφασης, δηλαδή πως οι κάτοικοι δεν θέλουν να είναι πολύ κοντά, αλλά δεν θέλουν να είναι και πολύ μακριά από τις εγκαταστάσεις.

Το μοντέλο καθορίζει τον αριθμό των εγκαταστάσεων που θα ενεργοποιηθούν, τις αντίστοιχες χωρητικότητές τους, τις τοποθεσίες τους, τα αντίστοιχα μερίδιά τους στη συνολική ζήτηση και τον πληθυσμό που θα ανατεθεί σε κάθε υποψήφια τοποθεσία που θα ενεργοποιηθεί.

Η προτεινόμενη μεθοδολογία εφαρμόστηκε στο πρόβλημα σχεδίασης ταξινομημένων κάδων ανακύκλωσης απορριμμάτων στο ιστορικό κέντρο της πόλης Coimbra της Πορτογαλίας.

2.2 Μεθοδολογίες που βασίζονται σε ευρετικές μεθόδους

2.2.1 Bautista J., Pereira J. (2006)

Η παρούσα μελέτη [20] εστιάζει στη μελέτη μεθόδων για τον εντοπισμό επιλεγμένων σημείων συλλογής απορριμμάτων σε πληθυσμιακά κέντρα. Ο στόχος είναι ο προσδιορισμός ενός ελάχιστου συνόλου σημείων συλλογής, έτσι ώστε ο κάθε πολίτης να μπορεί να βρει ένα σημείο συλλογής εντός μιας συγκεκριμένης απόστασης από το σπίτι του.

Στο μοντέλο ενσωματώνονται δύο επιθυμητά χαρακτηριστικά του συστήματος συλλογής. Το πρώτο είναι ο αριθμός των κάδων να είναι ανάλογος του οπτικού και ακουστικού αντίκτυπου, κάτι που επιτυγχάνεται λαμβάνοντας υπόψη τις διαστάσεις των κάδων συλλογής και ελαχιστοποιώντας τον αριθμό των ενεργοποιημένων σημείων, ώστε να μειώνεται το σύνολο των κατοίκων που επηρεάζεται από τον θόρυβο κατά το στάδιο της συλλογής. Το δεύτερο είναι η διασφάλιση μιας μέγιστης απόστασης ανάμεσα στους χρήστες και τα σημεία συλλογής.

Για την επίλυση του προβλήματος αναπτύσσονται δύο ευρετικοί αλγόριθμοι. Ένας γενετικός αλγόριθμος για την επίλυση του προβλήματος κάλυψης συνόλων (*set covering problem*) και ένας αλγόριθμος άπληστης τυχαιοποιημένης προσαρμοστικής αναζήτησης (*Greedy Randomized Search Procedure*, GRASP) για την επίλυση του προβλήματος ελέγχου μέγιστης ικανοποίησης (*Satisfiability Testing Problem*, MAX-SAT).

Για την εφαρμογή των αλγορίθμων χρησιμοποιήθηκαν και συγκρίθηκαν ως προς τα αποτελέσματά τους δύο διαφορετικά σετ δεδομένων: το πρώτο σετ συμπεριλάμβανε 10 πραγματικές περιπτώσεις από το σύστημα διαχείρισης αστικών αποβλήτων της πόλης Sant de

Boi del Llobregat, που βρίσκεται στην ευρύτερη περιοχή της Βαρκελώνης στην Ισπανία και στο δεύτερο συμπεριλήφθηκαν δεδομένα για προβλήματα κάλυψης συνόλων από τη βιβλιογραφία.

2.2.2 Ghiani G. et al. (2012) και Ghiani G. et al. (2014)

Στην μελέτη των Ghiani G. et al. [21] αναπτύχθηκε ένα μοντέλο επιλογής τοποθεσιών σημείων απόρριψης απορριμμάτων σε κατοικημένη περιοχή. Στόχος του μοντέλου βελτιστοποίησης είναι η ελαχιστοποίηση του συνολικού αριθμού τοποθεσιών απόρριψης απορριμμάτων, επιλέγοντας μέσα από ένα σύνολο υποψήφιων τοποθεσιών. Η συγκεκριμένη μεθοδολογία διασφαλίζει τόσο το οπτικό αποτέλεσμα που προκύπτει από την τοποθέτηση κάδων απορριμμάτων, όσο και τη μείωση του συνολικού κόστους του σταδίου συλλογής.

Επιπλέον, το μοντέλο τους προτείνει το βέλτιστο καταμερισμό των πολιτών σε σχέση με τα σημεία απόρριψης απορριμμάτων, καθώς και τον καταμερισμό των κάδων στα σημεία απόρριψης, ώστε να ικανοποιείται η ζήτηση, που στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι η παραγωγή απορριμμάτων. Οι κάδοι που θα τοποθετηθούν μπορεί να είναι διαφορετικού τύπου, με διαφορετικό μήκος και χωρητικότητα. Τέλος, επιπλέον περιορισμοί διασφαλίζουν πως κάθε πολίτης εξυπηρετείται από ένα σημείο απόρριψης απορριμμάτων, που είναι και το πλησιέστερο στην κατοικία του.

Για την επίλυση του προβλήματος αναπτύχθηκε ένας ευρετικός αλγόριθμος δύο φάσεων, εμπνευσμένος από τους κατασκευαστικούς ευρετικούς (constructive heuristics) για χωροθέτηση εγκαταστάσεων. Η πρώτη φάση του ευρετικού ασχολείται με την ενεργοποίηση

των καλύτερων σημείων τοποθέτησης των κάδων και τον καταμερισμό των κέντρων παραγωγής απορριμμάτων σε αυτά τα σημεία. Στη δεύτερη φάση, επιλύεται το πρόβλημα απόφασης αριθμού και χωρητικότητας των κάδων που θα τοποθετηθούν.

Η μεθοδολογία εφαρμόστηκε σε πραγματικά δεδομένα που αφορούσαν την πόλη Nardo της νότιας Ιταλίας.

Ένα παρόμοιο πρόβλημα παρουσιάζεται και στη μελέτη των Ghiani et al (2014) [22]. Εδώ, σε σχέση με το προηγούμενο μοντέλο, δεν επιτρέπεται η τοποθέτηση στο ίδιο σημείο κάδων διαφορετικού τύπου, ανάγκη που προέκυψε κατά την εφαρμογή του μοντέλου σε πραγματικά δεδομένα. Η μεθοδολογία που ακολουθείται για την επίλυση του προβλήματος είναι η ίδια που παρουσιάστηκε στην προηγούμενη μελέτη. Προτείνονται επίσης και δύο κατασκευαστικοί ευρετικοί αλγόριθμοι για τον καθορισμό των ζωνών συλλογής.

2.3 Μεθοδολογίες σε συνθήκες αβεβαιότητας

2.3.1 Tralhão et al. (2010)

Στην μελέτη των Tralhão et al. [23] αναπτύσσεται ένα σύστημα υποστήριξης αποφάσεων για την πολυκριτήρια ανάλυση της τοποθεσίας και των χωρητικοτήτων για διαφορετικούς τύπους κάδων. Το πρόβλημα μικτού ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού που αναπτύσσεται έχει τέσσερα κριτήρια: την ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους εγκατάστασης που περιλαμβάνει το κόστος των κάδων και το κόστος των τροποποιήσεων που ενδεχομένως χρειάζεται να γίνουν στα οχήματα συλλογής, την ελαχιστοποίηση της

απόστασης μεταξύ των κατοικιών και των σημείων απόρριψης, την ελαχιστοποίηση του συνολικού πληθυσμού που βρίσκονται μέσα στα όρια της απόστασης «απόθησης» και την ελαχιστοποίηση των κατοικιών που βρίσκονται εκτός των ορίων της απόστασης «ελκυστικότητας» (όπως περιγράφηκαν στην ενότητα 2.1.3).

Η εφαρμογή του μοντέλου έγινε για τοποθέτηση υπογείων κάδων ανακύκλωσης χαρτιού στην πόλη Coimbra της Πορτογαλίας. Αναλύθηκαν τρία σενάρια, καθώς ο πληθυσμός και η εμπορική δραστηριότητα της περιοχής είναι πολύ πιθανό να μεταβάλλονται μετά την εφαρμογή του προγράμματος. Το πρώτο σενάριο αφορούσε μόνο τις ποσότητες χαρτιού που παράγονταν από τους κατοίκους της περιοχής και γι' αυτό το λόγο προτάθηκαν μικρότερης χωρητικότητας κάδοι. Στο δεύτερο σενάριο λήφθηκε υπόψη και η εμπορική δραστηριότητα της περιοχής. Στο τρίτο σενάριο έγινε η πρόβλεψη πως οι ποσότητες χαρτιού που θα καταλήγουν προς ανακύκλωση θα αυξηθούν κατά 50% με βάση την ευρωπαϊκή τάση.

Το σύστημα που αναπτύχθηκε περιλαμβάνει τον αλγόριθμο που κατασκευάζει το γραμμικό πρόβλημα, βρίσκει τη λύση και επιστρέφει στον χρήστη τα αποτελέσματα σε μορφή πίνακα, ο οποίος αποθηκεύεται σε Σύστημα Γεωγραφικών Πληροφοριών (GIS). Στο σχεδιαστή του συστήματος παρέχονται επίσης πολλά γραφικά εργαλεία ώστε να μπορεί να συγκρίνει τις διαθέσιμες λύσεις και να αποφασίζει αν και επιπλέον λύσεις μπορούν να επιτευχθούν.

2.3.2 Toso E.A.V., Alem D. (2014)

Στην μελέτη των Toso και Alem [24] προτείνεται μία ντετερμινιστική εκδοχή του προβλήματος χωροθέτησης εγκαταστάσεων περιορισμένης χωρητικότητας (*Capacitated Location Facility Problem* - CLFP), ένα μοντέλο στοχαστικού προγραμματισμού δύο φάσεων και αρκετές προεκτάσεις του στοχαστικού μοντέλου που ενσωματώνουν προτιμήσεις όσον αφορά τη μείωση του κινδύνου (*risk averse models*). Η προτεινόμενη μεθοδολογία εφαρμόζεται για το πρόβλημα χωροθέτησης κέντρων διαχωρισμού ανακυκλώσιμων απορριμμάτων στην πόλη Sorocaba της Βραζιλίας.

Στόχος του αρχικού μοντέλου είναι η ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους που περιλαμβάνει το κόστος μεταφοράς των ανακυκλώσιμων απορριμμάτων από τις διάφορες ζώνες συλλογής στα κέντρα διαχωρισμού, το κόστος εγκατάστασης ενός καινούριου κέντρου διαχωρισμού, το κόστος λειτουργίας των ήδη υπαρχόντων κέντρων διαχωρισμού και το κόστος που προκύπτει στις περιπτώσεις που τα ανακυκλώσιμα απορρίμματα δεν συλλεχτούν από κάποια ζώνη.

Η εκτίμηση παραγόντων του μοντέλου όπως το κόστος εγκατάστασης, η παραγωγή απορριμμάτων και η χωρητικότητα των κέντρων διαχωρισμού δεν μπορεί να γίνει με ακρίβεια, καθώς βασίζεται σε διάφορους αβέβαιους παράγοντες. Προκειμένου να ληφθεί υπόψη η αβεβαιότητα των δεδομένων, αυτά θεωρήθηκαν ως στοχαστικές παράμετροι με γνωστές κατανομές. Για τα δεδομένα αυτά εμφανίστηκαν διάφορα σενάρια με συγκεκριμένες πιθανότητες εμφάνισης. Οι μεταβλητές απόφασης χωρίστηκαν σε δύο κατηγορίες, τις μεταβλητές που είναι ανεξάρτητες από τα σενάρια (μεταβλητές πρώτου σταδίου) και αυτές

που εξαρτώνται από τα σενάρια (μεταβλητές δεύτερου σταδίου). Οι περιορισμοί του ντετερμινιστικού μοντέλου θα πρέπει να ισχύουν για κάθε ένα σενάριο χωριστά.

Τέλος, χρησιμοποιήθηκαν διάφορες στρατηγικές για τον μετριασμό του κινδύνου, όπως η προσέγγιση μέσου κινδύνου (*mean-risk approach*, MR-VaR), το κριτήριο minimax, κ.α.

2.4 Μεθοδολογίες για την πρόβλεψη της παραγωγής απορριμμάτων

Ένα βασικό πρόβλημα που αντιμετωπίζεται στις εφαρμογές που αναπτύχθηκαν είναι η εύρεση δεδομένων για την ημερήσια παραγωγή απορριμμάτων. Πολλές μεθοδολογίες προτάθηκαν από το χώρο της στατιστικής ανάλυσης με μεθόδους ανάλυσης χρονολογικών σειρών (*Time Series Analysis*) [25-27], ανάλυσης συσχέτισης και παλινδρόμησης (*Correlation and Regression Methods*) [28-30], κ.α. Μία ανασκόπηση των μεθόδων αυτών γίνεται στην μελέτη των *Beigl et al.* (2008) [31].

Ωστόσο, όλα τα παραπάνω μοντέλα που αναπτύχθηκαν αναφέρονται σε επίπεδο χώρας και όχι σε επίπεδο νοικοκυριού. Κατά συνέπεια η εφαρμογή τους στο πρόβλημα χωροθέτησης κάδων δεν είναι εφαρμόσιμη. Οι μόνες μελέτες πρόβλεψης που βρίσκουν εφαρμογή στο πρόβλημα που εξετάζουμε είναι αυτές που παρουσιάστηκαν στην ενότητα 2.3.

Ωστόσο, αξίζει να αναφερθούμε σε μελέτες που διενεργήθηκαν για την εκτίμηση της ημερήσιας ζήτησης απορριμμάτων σε συγκεκριμένες περιοχές.

2.4.1 Matsuto και Tanaka (1993)

Οι Matsuto και Tanaka (1993) [26] ανέπτυξαν μία μέθοδο για τη διαχείριση και ανάλυση των ημερησίων ποσοτήτων απορριμμάτων που βελτιώνει την κατανόηση του μηχανισμού δημιουργίας απορριμμάτων στην Ιαπωνία. Οι ποσότητες απορριμμάτων κανονικοποιήθηκαν και υπολογίστηκαν οι κινούμενοι μέσοι λαμβάνοντας υπόψη συγκεκριμένες ημερήσιες αλλαγές που προκαλούνταν από τις συνήθειες των κατοίκων.

Πιο συγκεκριμένα, εξέτασαν μια Ιαπωνική πόλη μεγέθους 224.363 κατοίκων. Απορριμματοφόρα κινούνταν ανάλογα με την ημέρα της εβδομάδας σε 7 διαφορετικές περιοχές στις οποίες ήταν χωρισμένη η υπό εξέταση πόλη. Κατά την άφιξη στη χωματερή το απορριμματοφόρο ζυγιζόταν και καταγράφονταν η εβδομαδιαία παραγωγή της κάθε περιοχής για ένα χρόνο.

Δεδομένου πως οι ποσότητες απορριμμάτων από περιοχή σε περιοχή ήταν διαφορετικές, τα δεδομένα κανονικοποιήθηκαν, δηλαδή για κάθε περιοχή οι ποσότητες ημερήσιων απορριμμάτων διαιρέθηκαν με τη μέση ημερήσια παραγωγή απορριμμάτων δημιουργώντας αδιάστατα δεδομένα. Απομονώνοντας τις ημέρες αργιών, λόγω πως δεν ακολουθούσαν το σύνολο και παρουσίαζαν ιδιαιτερότητες, εφαρμόστηκε η μέθοδος του κινούμενου μέσου και αποτυπώθηκε με ακρίβεια η εποχιακή διακύμανση.

Απαραίτητες προϋποθέσεις για την εφαρμογή του μοντέλου είναι οι ακόλουθες:

- ✓ Οι ποσότητες απορριμμάτων που συλλέγονται ζυγίζονται, δεν μαντεύονται.
- ✓ Η συλλογή απορριμμάτων διεξάγεται σε τακτικά χρονικά διαστήματα, π.χ. μία ή δύο φορές την εβδομάδα.

- ✓ Η ημερήσια ποσότητα που συλλέχθηκε αφορά ακριβώς μια συγκεκριμένη περιοχή.
- ✓ Απαιτούνται στοιχεία σε βάθος χρόνου ενός έτους ή και περισσότερο προκειμένου να εκτιμηθεί επαρκώς η μέση ημερήσια ποσότητα.

2.4.2 Katsamaki, Willems και Diamantopoulos (1998)

Στην παρούσα μελέτη [32] παρουσιάζεται μία μεθοδολογία για την ανάλυση δεδομένων και τη στοχαστική μοντελοποίηση των ρυθμών ημερήσιας παραγωγής απορριμμάτων. Τα σύνολα δεδομένων που εξετάστηκαν περιλαμβάνουν τις ημερήσιες ποσότητες των αστικών στερεών αποβλήτων για συνεχόμενες ημέρες σε ημερήσια βάση. Κάθε αλληλουχία παρατηρήσεων μοντελοποιήθηκε με τα στοχαστικά μοντέλα Box-Jenkins ως συνάρτηση αυτοπαλινδρόμησης, κινούμενου μέσου και εποχιακών τάσεων.

Για τη συνολική χρονολογική σειρά διαπιστώθηκε πως ένα εποχιακό *ARMA* μοντέλο είναι επαρκές. Η παρατηρούμενη εποχικότητα ήταν ανάλογη της συχνότητας συλλογής.

Για μεμονωμένες ημερήσιες χρονολογικές σειρές τα μεμονωμένα μοντέλα παλινδρόμησης ήταν επαρκή χωρίς εποχιακούς όρους.

Γενικά, τα μοντέλα αυτά αποδείχθηκαν στατιστικά εφαρμόσιμα και η μοντελοποίηση των τάσεων αποδείχθηκε ικανοποιητική. Η ικανότητα πρόβλεψης των μοντέλων Box-Jenkins συγκρίθηκε με απλούστερα στατιστικά μοντέλα, όπως η μέση τιμή και η μέθοδος του κινούμενου μέσου. Ανάλογα με την εξεταζόμενη ημέρα, διαφορετικά μοντέλα έδιναν τα βέλτιστα αποτελέσματα πρόβλεψης.

Κεφάλαιο 3 Μοντέλο τοποθέτησης κάδων απορριμμάτων

Ο στόχος των μοντέλων βελτιστοποίησης που θα αναπτύξουμε είναι η ελαχιστοποίηση του περιθωρίου πλήρωσης των κάδων σε σχέση με τη χωρητικότητά τους. Ο στόχος αυτός διασφαλίζει πως οι κάδοι καθημερινά θα είναι όσο το δυνατόν πιο γεμάτοι κατά τη διάρκεια της συλλογής απορριμμάτων από τα απορριμματοφόρα, εξασφαλίζοντας πως κάδοι θα τοποθετούνται όπου αυτό είναι αναγκαίο, ανάλογα με τις τρέχουσες ανάγκες της περιοχής. Με αυτό τον τρόπο διασφαλίζεται η μείωση της όχλησης των κατοίκων που προκύπτει από την κακή παρέμβαση στην αισθητική του δημοσίου χώρου που δημιουργεί η ύπαρξη κάδων, αλλά και από την ηχορύπανση που δημιουργείται κατά τη διάρκεια της αποκομιδής. Επίσης τα μοντέλα μας εξασφαλίζουν πως δεν θα υπάρχουν υπερχειλίσσεις, ή αν τελικά υπάρχουν αυτές θα είναι οι ελάχιστες δυνατές.

Επιπλέον, το μοντέλο μας καθορίζει τον αριθμό των κάδων που θα τοποθετηθούν σε κάθε σημείο που θα παραμείνει ενεργοποιημένο. Αυτό εξαρτάται από τις δυνατότητες του σημείου, αφού δίνεται η δυνατότητα η χωρητικότητα κάθε σημείου όσον αφορά την τοποθέτηση κάδων να εξεταστεί μεμονωμένα.

Τέλος, δεδομένης της ύπαρξης μεγάλης μεταβλητότητας στις ποσότητες πλήρωσης των κάδων, παρουσιάζονται κάποιες προσεγγίσεις εκτίμησης της ημερήσια παραγωγής απορριμμάτων.

3.1 Διαμόρφωση προβλήματος

Το πρόβλημα μπορεί να μοντελοποιηθεί ως ένα πρόβλημα χωροθέτησης εγκαταστάσεων περιορισμένης χωρητικότητας (*Capacitated Facility Location Problem* – CPLP), όπου ως εγκαταστάσεις περιορισμένης χωρητικότητας θεωρούνται οι κάδοι. Ως ζήτηση θεωρείται η εκτίμηση της ποσότητας ημερήσιας πλήρωσης των κάδων πριν την επανατοποθέτηση.

Έτσι, το πρόβλημα περιλαμβάνει τα ακόλουθα σύνολα:

$V_1 = \{1 \dots I\}$: σύνολο που περιλαμβάνει τα σημεία όπου είναι αρχικά τοποθετημένοι οι κάδοι,

$V_2 = \{1 \dots J\}$: σύνολο που περιλαμβάνει τα πιθανά σημεία επανατοποθέτησης των κάδων, που θεωρήσαμε πως είναι τα ίδια με τα αρχικά.

$T = \{1 \dots N\}$: σύνολο των χρονικών περιόδων μέτρησης της πλήρωσης των κάδων,

ενώ οι σχετικοί δείκτες των δεδομένων και των μεταβλητών απόφασης είναι:

i = σημεία όπου είναι τοποθετημένοι αρχικά οι κάδοι, $i \in V_1$

j = σημεία όπου θα τοποθετηθούν οι κάδοι, $j \in V_2$

t = χρονικές περίοδοι καταχώρησης της πλήρωσης των κάδων σε ημέρες, $t \in T$.

Διαχείριση απορριμμάτων

Μεταπτυχιακή εργασία για την εκπλήρωση μέρους των απαιτήσεων του

Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης

Οι γενικές παράμετροι του προβλήματος που θα αποφασιστούν εκ των προτέρων με βάση τις ανάγκες της υπό εξέταση περιοχής είναι:

- D = μέγιστη επιτρεπόμενη απόσταση μεταξύ του σημείου i και του σημείου j ώστε να επιτρέπεται η ανάθεση,
- Q = χωρητικότητα κάδων που θα τοποθετηθούν,
- p_{min} = ελάχιστο ποσοστό επιθυμητής χωρητικότητας του κάδου, $p_{min} \geq 0$,
- p_{max} = μέγιστο ποσοστό επιθυμητής χωρητικότητας του κάδου, $p_{min} \leq p_{max} \leq 1$,
- Q_{max} = μέγιστη επιτρεπόμενη ποσότητα απορριμμάτων που θα διοχετευθεί στα σημεία,
 $Q_{max} = p_{max} \cdot Q$,
- Q_{min} = ελάχιστη επιτρεπόμενη ποσότητα που θα διοχετευθεί στα σημεία, $Q_{min} = p_{min} \cdot Q$,
- B = διαθέσιμος αριθμός κάδων,
- M = πολύ μεγάλος αριθμός (βοηθητική παράμετρος για λόγους μοντελοποίησης).

Ως δεδομένα για την επίλυση του προβλήματος χρειαζόμαστε τα ακόλουθα:

- q_{it} = πλήρωση του κάδου που είναι αρχικά τοποθετημένος στο σημείο i κατά την ημέρα t ,
- d_{ij} = απόσταση μεταξύ του αρχικού σημείου i και του υποψηφίου σημείου τοποθέτησης j . Για $i = j$, $d_{ij} = 0$,
- K_i = αριθμός κάδων που είναι αρχικά τοποθετημένος στο σύστημα,
- K_j^{max} = μέγιστος αριθμός κάδων που μπορούν να τοποθετηθούν στο σημείο j .

Το πρόβλημα περιλαμβάνει μία δυαδική, μία ακέραια και μία συνεχή μεταβλητή απόφασης. Πρόκειται για ένα πρόβλημα μικτού ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού (*Mixed Integer Linear Programming – MILP*). Η δυαδική μεταβλητή απόφασης σχετίζεται με την επανατοποθέτηση των κάδων, ενώ η ακέραια με τον αριθμό των κάδων που θα τοποθετηθούν και η συνεχής με το ποσοστό (ή διαφορετικά την πιθανότητα) δρομολόγησης των ποσοτήτων απορριμμάτων από την αρχική τοποθέτηση στην νέα τοποθέτηση.

- z_j = δυαδική μεταβλητή που παίρνει την τιμή 1 αν στο σημείο j διατηρηθεί κάδος και 0 αλλιώς.
- X_{ij} = συνεχής μεταβλητή που δηλώνει το ποσοστό κατά το οποίο τα απορρίμματα που εξυπηρετούνται από τον κάδο i με την επανατοποθέτηση κάδων θα εξυπηρετούνται πλέον από το σημείο j . Αν τα απορρίμματα στο σημείο i διοχετεύονται αποκλειστικά στο σημείο j , τότε $X_{ij} = 1$. $0 \leq X_{ij} \leq 1$.
- K_j = ακέραια μεταβλητή, που δείχνει τον αριθμό των κάδων που θα τοποθετηθούν στο σημείο j . Ανάλογα με το σημείο και τα χαρακτηριστικά του επιτρέπεται η τοποθέτηση ενός μέγιστου αριθμού κάδων K_j^{max} . Έτσι αν, για παράδειγμα, σε ένα σημείο μπορούν να τοποθετηθούν το πολύ ένας κάδος, τότε $K_j^{max} \leq 1$, ενώ αν σε ένα σημείο πρέπει να καταργηθούν οι κάδοι τότε $K_j^{max} = 0$, ενώ γενικότερα μπορεί να ισχύει $K_j^{max} \leq 4$.

3.2 Υπολογισμός της αναμενόμενης ημερήσιας παραγωγής απορριμμάτων

Θεωρούμε την εκτίμηση της ημερήσιας πλήρωσης του κάδου ως μία στοχαστική διαδικασία. Προκειμένου να προχωρήσουμε σε επανατοποθέτηση των κάδων θα πρέπει αρχικά να υπολογίσουμε την αναμενόμενη ημερήσια πλήρωση του κάθε κάδου i (μαθηματική προσδοκία $E(q_i)$, $\forall i \in V_1$).

Για το σκοπό αυτό θα ακολουθήσουμε δύο διαφορετικές προσεγγίσεις, μία κατά την οποία θεωρούμε πως η διαδικασία παραγωγής απορριμμάτων ακολουθεί την κανονική κατανομή και μία κατά την οποία θα υπολογίσουμε την εκτίμηση παραγωγής απορριμμάτων ακολουθώντας την μεθοδολογία που ακολουθείται για τον υπολογισμό του χρόνου στα διαγράμματα PERT (*Program Evaluation and Review Technique*) [33].

3.2.1 Κανονική κατανομή

Η ημερήσια ποσότητα πλήρωσης των κάδων μπορεί να περιγράψει ικανοποιητικά από την κανονική κατανομή, καθώς με μεγάλη πιθανότητα τείνει προς μια μέση τιμή και αποκλίνει από τη συγκεκριμένη τιμή με μικρότερες πιθανότητες [34]. Κατά συνέπεια, η μαθηματική προσδοκία σε αυτή την περίπτωση θα είναι ο μέσος όρος των παρατηρούμενων τιμών.

$$E(q_i) = \left(\frac{1}{N}\right) \sum_t q_{it} \quad \forall i \in V_1 \quad \text{Εξ. 3.2.1}$$

όπου N = ο συνολικός αριθμός των καταγεγραμμένων ημερήσιων ποσοτήτων απορριμμάτων.

3.2.2 Εκτίμηση τριών σημείων

Η τεχνική εκτίμησης τριών σημείων χρησιμοποιείται στις επιστήμες αποφάσεων για την κατασκευή μίας προσέγγισης κατανομής πιθανότητας που αναπαριστά την έκβαση μελλοντικών αποτελεσμάτων, βασιζόμενη σε ελάχιστη πληροφορία. Στην τεχνική εκτίμησης τριών σημείων χρησιμοποιούνται τρεις διαφορετικές εκτιμήσεις:

q_{min} = η «αισιόδοξη» εκτίμηση (ελάχιστη τιμή)

q_m = η «πιο πιθανή» εκτίμηση (μέση τιμή)

q_{max} = η «απαισιόδοξη» εκτίμηση (μέγιστη τιμή)

Στην περίπτωση μας θεωρούμε τα ακόλουθα:

$$q_{min} = \min_t q_{it} \quad \forall i \in V_1 \quad \text{Εξ. 3.2.2}$$

$$q_m = \left(\frac{1}{N}\right) \sum_t q_{it} \quad \forall i \in V_1 \quad \text{Εξ. 3.2.3}$$

$$q_{max} = \max_t q_{it} \quad \forall i \in V_1 \quad \text{Εξ. 3.2.4}$$

ενώ η εκτιμώμενη μαθηματική προσδοκία είναι

$$E(q_i) = \frac{(q_{\min} + 4 \cdot q_m + q_{\max})}{6} \quad \forall i \in V_1 \quad \text{Εξ. 3.2.5}$$

και κατά συνέπεια

$$E(q_i) = \frac{(\min_t q_{it} + 4 \cdot \left(\frac{1}{N}\right) \sum_t q_{it} + \max_t q_{it})}{6} \quad \forall i \in V_1 \quad \text{Εξ. 3.2.6}$$

3.3 Εκτίμηση αρχικής κατάστασης

Αρχικά, στο υπό εξέταση σύστημά είναι τοποθετημένοι B κάδοι, κατανεμημένοι σε i σημεία, καθένα από τα οποία περιλαμβάνει K_i κάδους. Στο αρχικό σύστημα έχουμε υπερχειλίσεις κάδων, αφού για κάποιες περιπτώσεις έχουμε $E(q_i) > Q$. Στην αρχική κατάσταση, το περιθώριο μεταξύ της ποσότητας πλήρωσης του σημείου και της εκτιμώμενης ημερήσιας ποσότητας πλήρωσης θα είναι:

$$\sum_i |K_i \cdot Q - E(q_i)| \quad \forall i \in V_1$$

Προκειμένου να υπολογιστεί η παραπάνω ποσότητα, θεωρούμε τις συνεχείς μεταβλητές C_i^+ και C_i^- , όπου η ποσότητα C_i^+ υποδηλώνει το περιθώριο πλήρωσης του κάδου i σε περίπτωση που αυτός δεν γεμίζει, ενώ η ποσότητα C_i^- υποδηλώνει το περιθώριο πλήρωσης του κάδου σε περίπτωση που έχουμε υπερχειλίση, για τις οποίες:

$$C_i^+ = \begin{cases} K_i \cdot Q - E(q_i), & \text{αν } K_i \cdot Q - E(q_i) \geq 0 \\ 0, & \text{αλλιώς} \end{cases} \quad \forall i \in V_1 \quad (3.3.1)$$

$$C_i^- = \begin{cases} E(q_i) - K_i \cdot Q, & \text{αν } K_i \cdot Q - E(q_i) < 0 \\ 0, & \text{αλλιώς} \end{cases} \quad \forall i \in V_1 \quad (3.3.2)$$

$$C_i^+, C_i^- \geq 0 \quad \forall i \in V_1 \quad (3.3.3)$$

$$K_i \cdot Q - E(q_i) = C_i^+ - C_i^- \quad \forall i \in V_1 \quad (3.3.4)$$

Το περιθώριο μεταξύ της ποσότητας πλήρωσης του κάδου που είναι τοποθετημένος στο σημείο και της εκτιμώμενης ημερήσιας πλήρωσης υπολογίζεται από την εξίσωση (3.3.5):

$$|K_i \cdot Q - E(q_i)| = C_i^+ + C_i^- \quad \forall i \in V_1 \quad (3.3.5)$$

3.4 Γραμμικό μοντέλο

Θέλουμε οι ποσότητες που διοχετεύονται σε κάθε ενεργοποιημένο σημείο, δηλαδή σε κάθε σημείο όπου θα υπάρχει κάδος και κατά συνέπεια $z_j = 1$, να γεμίζουν όσο το δυνατόν περισσότερο τη χωρητικότητα του σημείου. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνουμε καλύτερη κατανομή των απορριμμάτων, ελαχιστοποίηση των απαιτούμενων κάδων και καλύτερη δρομολόγηση απορριμματοφόρων οχημάτων. Επίσης, δεν επιτρέπονται οι υπερχειλίσεις.

Το βασικό μοντέλο θα είναι το ακόλουθο:

Μοντέλο 3.Α Γραμμική μορφοποίηση προβλήματος

$$\text{minimize } \sum_j \left(K_j \cdot Q_{\max} - \sum_i X_{ij} \cdot E(q_i) \right)$$

$$X_{ij} = z_j \quad \begin{array}{l} \forall i = j, \\ i \in V_1, j \in V_2 \end{array} \quad (3.4.1)$$

$$(D - d_{ij}) \cdot X_{ij} \geq 0 \quad \forall i \in V_1, j \in V_2 \quad (3.4.2)$$

$$\sum_j X_{ij} = 1 \quad j \in V_2 \quad (3.4.3)$$

$$M \cdot z_j \geq K_j \quad j \in V_2 \quad (3.4.4)$$

$$K_j \cdot Q_{\min} \leq \sum_i X_{ij} \cdot E(q_i) \leq K_j \cdot Q_{\max} \quad j \in V_2 \quad (3.4.5)$$

$$\sum_j K_j \leq B \quad (3.4.6)$$

$$z_j \in \{0,1\} \quad j \in V_2 \quad (3.4.7)$$

$$0 \leq X_{ij} \leq 1 \quad \forall i \in V_1, j \in V_2 \quad (3.4.8)$$

$$0 \leq K_j \leq K_j^{\max} \quad K_j \text{ integer}, \forall j \quad (3.4.9)$$

Με τον περιορισμό (3.4.1) διασφαλίζεται πως αν το σημείο j είναι ενεργοποιημένο τότε τα απορρίμματα που παράγονταν στο συγκεκριμένο σημείο θα εξακολουθούν να καταλήγουν αποκλειστικά σε αυτό. Σημειώνουμε πως το μοντέλο δεν λαμβάνει υπόψη την πληροφορία αν προηγουμένως στο σημείο υπήρχαν ένας ή περισσότεροι κάδοι. Αυτό, πρακτικά, συμβαίνει επειδή αν, για παράδειγμα, στο σημείο i υπήρχαν δύο κάδοι και το σημείο έχει παραμείνει ενεργοποιημένο, αλλά πλέον υπάρχει ένας κάδος, οι κάτοικοι που εξυπηρετούνταν από το συγκεκριμένο σημείο, θα εξακολουθούν να εξυπηρετούνται από αυτό, άσχετα αν έχει έναν ή δύο κάδους. Στην πράξη, ένας πολίτης που θα δει έναν κάδο γεμάτο, δεν θα μπει στη διαδικασία να πάει σε άλλον κάδο. Κατά συνέπεια, μας ενδιαφέρει μόνο αν το σημείο i θα παραμείνει ενεργοποιημένο και πόσους κάδους πλέον θα έχει και όχι πόσους είχε αρχικά.

Με τον περιορισμό (3.4.2) επιτυγχάνουμε να μην γίνεται ανάθεση σημείου i σε σημείο j αν η μεταξύ τους απόσταση είναι μεγάλη. Αν η απόσταση ανάμεσα στους κάδους στο σημείο i και στο σημείο j είναι μεγαλύτερη από την οριακή απόσταση D , τότε τα απορρίμματα που βρίσκονται στο σημείο i δεν μπορούν να διοχετευθούν στο σημείο j .

Επίσης, η ποσότητα απορριμμάτων που παράγεται σε ένα σημείο i θα καταμεριστεί ολόκληρη σε ένα ή περισσότερα σημεία j που θα ενεργοποιηθούν (περιορισμός (3.4.3)).

Με τον περιορισμό (3.4.4) διασφαλίζεται πως το σημείο j είναι ενεργοποιημένο αν υπάρχουν κάδοι σε αυτό ($K_j > 0$).

Προκειμένου να έχουμε καλύτερη κατανομή των απορριμμάτων στους κάδους, θέλουμε οι κάδοι να γεμίζουν μεταξύ κάποιων ορίων. Έτσι, εισάγουμε τις έννοιες της ελάχιστης και

μέγιστης ποσότητας πλήρωσης Q_{min} και Q_{max} αντίστοιχα. Όπως αναφέραμε παραπάνω, οι δύο αυτές τιμές εξαρτώνται από το ελάχιστο και μέγιστο ποσοστό πλήρωσης q_{min} και q_{max} αντίστοιχα. Με τον περιορισμό (3.4.5) η ποσότητα απορριμμάτων που θα διοχετευθεί στο σημείο j θα πρέπει να είναι μεταξύ μιας ελάχιστης και μιας μέγιστης τιμής. Για παράδειγμα, αν η ελάχιστη τιμή p_{min} είναι 0 και η μέγιστη τιμή p_{max} είναι 1, τότε η ποσότητα απορριμμάτων που μπορεί να διοχετευθεί είναι μέσα στα όρια της χωρητικότητας του κάδου. Αν ωστόσο το ποσοστό μέγιστης χωρητικότητας p_{max} μπορούσε να υπερβαίνει την μονάδα, τότε το μοντέλο θα επέτρεπε υπερχειλίσεις κάδων, κάτι που ωστόσο δεν είναι εφαρμόσιμο στη συγκεκριμένη προτεινόμενη μοντελοποίηση, αφού έχουμε θεωρήσει πως $p_{max} \leq 1$.

Με τον περιορισμό (3.4.6) διασφαλίζεται πως ο αριθμός των κάδων που θα τοποθετηθούν δεν θα ξεπερνά τον αριθμό κάδων που είναι διαθέσιμοι και, τέλος, με τους περιορισμούς (3.4.7) έως (3.4.9) καθορίζεται το εύρος των μεταβλητών απόφασης.

Στην παρούσα ενότητα αναπτύξαμε ένα μοντέλο επιλογής τοποθεσιών σημείων απόρριψης απορριμμάτων σε κατοικημένη περιοχή. Στόχος του μοντέλου είναι η επίτευξη όσο το δυνατόν μεγαλύτερης ημερήσιας πλήρωσης των διαθέσιμων σημείων απόρριψης απορριμμάτων, επιλέγοντας από τις ήδη υπάρχουσες τοποθεσίες. Η συγκεκριμένη μεθοδολογία διασφαλίζει τόσο τη μείωση της όχλησης των κατοίκων, όσο και τη μείωση του συνολικού κόστους συλλογής απορριμμάτων, καθώς γίνεται ανακατανομή των σημείων τοποθέτησης κάδων και επιλογή τέτοιων σημείων ώστε ημερησίως να είναι όσο το δυνατόν πιο πλήρεις, χωρίς όμως να επιτρέπεται η υπερχειλίση τους.

3.5 Γραμμικό μοντέλο με εκτίμηση σεναρίων

Μία άλλη προσέγγιση, αντίστοιχη με αυτή που πραγματοποιήθηκε από τους Toso E.A.V. και Alem D. [24], είναι να θεωρήσουμε πως η ημερήσια παραγωγή απορριμμάτων αποτελεί στοχαστική διαδικασία με γνωστή κατανομή η οποία μπορεί να προσεγγιστεί ικανοποιητικά από ένα διακριτό και πεπερασμένο σύνολο $W = \{1, 2, \dots, W\}$ που περιλαμβάνει πιθανές πραγματοποιήσεις ή σεσάρια. Για το σκοπό αυτό θεωρούμε την μεταβλητή $E(q_{i\omega})$, $\forall i \in V_1$, $\omega \in W$, ως την εκτιμώμενη ημερήσια παραγωγή απορριμμάτων του κάδου i για το σεσάριο ω με αντίστοιχη πιθανότητα εμφάνισης π_ω , που εκφράζει την σημαντικότητα της στο πρόβλημα, έτσι ώστε $\pi_\omega > 0$ και $\sum_{\omega \in W} \pi_\omega = 1$.

Θεωρούμε πως έχουμε τρία σεσάρια:

Σεσάριο ω_1 : Η παραγωγή απορριμμάτων μειώνεται σε σχέση με την εκτιμημένη παραγωγή στο μέλλον με πιθανότητα π_{ω_1} ,

Σεσάριο ω_2 : Η παραγωγή απορριμμάτων θα παραμείνει στα ίδια επίπεδα με πιθανότητα π_{ω_2}

Σεσάριο ω_3 : Η παραγωγή απορριμμάτων θα αυξηθεί σε σχέση με το μέσο όρο με πιθανότητα π_{ω_3}

Σε αυτή την περίπτωση η προσδοκώμενη τιμή για την παραγωγή απορριμμάτων θα είναι:

$$E(q_{i\omega}) = \pi_{\omega} \cdot E(q_{it}) \quad \forall i \in V_1, \omega \in W \quad \text{Εξ. 3.5.1}$$

όπου ως εκτιμώμενη ημερήσια παραγωγή απορριμμάτων θεωρούμε αυτή που προέκυψε από την κανονική κατανομή, όπως παρουσιάστηκε στην ενότητα 3.2.1.

Στόχος μας είναι να επιλέξουμε το καλύτερο χειρότερο σενάριο ανάμεσα στα σύνολα των εφικτών αποφάσεων για όλα τα σενάρια (προσέγγιση minimax).

Για αυτό το λόγο θεωρούμε στο παραπάνω πρόβλημα τη θετική βοηθητική μεταβλητή R^{max} , που εκφράζει τη χειρότερη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης που προκύπτει αν επιλύσουμε το πρόβλημα για κάθε ένα σενάριο χωριστά (Παράρτημα-1), και το πρόβλημα διαμορφώνεται ως εξής:

Μοντέλο 3.B Γραμμική μορφοποίηση με εκτίμηση σεναρίων

$$\text{minimize } R^{max} \quad (3.5.1)$$

$$X_{ij} = z_j \quad \forall i \in V_1, j \in V_2 \quad (3.5.2)$$

$$(D - d_{ij}) \cdot X_{ij} \geq 0 \quad \forall i \in V_1, j \in V_2 \quad (3.5.3)$$

$$\sum_j X_{ij} = 1 \quad \forall i \in V_1 \quad (3.5.4)$$

$$M \cdot z_j \geq K_j \quad \forall j \in V_2 \quad (3.5.5)$$

$$K_j \cdot Q_{\min} \leq \sum_i X_{ij} \cdot E(q_{i\omega}) \leq K_j \cdot Q_{\max} \quad \forall j \in V_2, \omega \in W \quad (3.5.6)$$

$$\sum_j K_j \leq B \quad (3.5.7)$$

$$R^{\max} \geq \sum_j \left(K_j \cdot Q - \sum_i X_{ij} \cdot E(q_{i\omega}) \right) \quad \forall \omega \in W \quad (3.5.8)$$

$$R^{\max} \geq 0 \quad (3.5.9)$$

$$z_j \in \{0,1\} \quad \forall j \in V_2 \quad (3.5.10)$$

$$0 \leq X_{ij} \leq 1 \quad \forall i \in V_1, j \in V_2 \quad (3.5.11)$$

$$0 \leq K_j \leq K_j^{\max} \quad K_j \text{ integer}, \forall j \quad (3.5.12)$$

Οι προσεγγίσεις minimax θεωρούνται ιδιαίτερα χρήσιμες όταν δεν υπάρχει αρκετή πληροφορία για την κατανομή που ακολουθεί η υπό εξέταση διαδικασία.

3.6 Μη γραμμικό μοντέλο

Στην ενότητα 3.4 αναπτύξαμε ένα γραμμικό μοντέλο τοποθέτησης κάδων απορριμμάτων. Το βασικό μειονέκτημα του συγκεκριμένου μοντέλου είναι πως στις περιπτώσεις όπου η μεταβλητή ανάθεσης X_{ij} είναι δεκαδική, δηλαδή εκφράζει το ποσοστό ανάθεσης σε κάποιον

κάδο ή εναλλακτικά την πιθανότητα οι κάτοικοι που εξυπηρετούνταν από το κάδο i σε περιπτώσεις κατάργησής του να μετακινηθούν προς κάποιον άλλο κάδο j , η τιμή της είναι τυχαία και εξαρτάται καθαρά από τη βελτιστοποίηση του μοντέλου.

Στην πραγματικότητα όμως, αν ένα σημείο, που αρχικά είναι ενεργοποιημένο, καταργηθεί, οι χρήστες του σημείου θα αναζητήσουν το πλησιέστερο σημείο. Δεδομένου πως κάθε σημείο εξυπηρετεί ένα συγκεκριμένο εύρος, το πρόβλημα γίνεται ακόμα πιο πολύπλοκο, καθώς μπορεί να υπάρχουν περισσότερα του ενός σημεία που να εξυπηρετούν τους χρήστες του συγκεκριμένου σημείου μετά την κατάργησή του.

Στην ενότητα αυτή θα θεωρήσουμε πως αν το σημείο i παραμείνει ενεργοποιημένο τότε οι χρήστες τους θα εξακολουθούν να πηγαίνουν σε αυτό, διαφορετικά θα μετακινηθούν στα ενεργοποιημένα σημεία j αντιστρόφως ανάλογα με την απόσταση. Δηλαδή, όσο μικρότερη είναι η απόσταση μεταξύ των σημείων i και j , τόσο μεγαλύτερο θα είναι το ποσοστό των χρηστών που θα μετακινηθούν στο σημείο j .

Αυτό μαθηματικά εκφράζεται ως ακολούθως:

$$X_{ij} \geq \left(1 - \frac{d_{ij}}{\sum_j d_{ij} \cdot z_j}\right) \cdot z_j \quad \forall i \in V_1, j \in V_2, \quad \text{Εξ. 3.6.1}$$
$$d_{ij} \leq D$$

με την προϋπόθεση πως

$$\sum_j d_{ij} \cdot z_j > 0 \quad \forall i \in V_1, j \in V_2, \quad \text{Εξ. 3.6.2}$$

$$d_{ij} \leq D$$

Η παραπάνω εξίσωση διασφαλίζει την ανάθεση του σημείου i στο σημείο j αν αυτό ενεργοποιηθεί για $i = j$, διαφορετικά την ανάθεση σε άλλα σημεία που έχουν ενεργοποιηθεί αντιστρόφως ανάλογα με την απόσταση. Δηλαδή όσο πιο κοντά θα βρίσκεται ο κάδος j στο σημείο i , το οποίο με την επανατοποθέτηση δεν ενεργοποιήθηκε, τόσο περισσότεροι κάτοικοι που εξυπηρετούνταν από αυτό θα κατευθυνθούν προς το σημείο j .

Με την προσθήκη των Εξ. 3.6.1 και Εξ. 3.6.2 το μοντέλο της ενότητας 3.4 διαμορφώνεται ως εξής:

Μοντέλο 3.C Μη γραμμική μορφοποίηση προβλήματος

$$\text{minimize } \sum_j \left(K_j \cdot Q_{\max} - \sum_i X_{ij} \cdot E(q_i) \right)$$

$$X_{ij} \geq \left(1 - \frac{d_{ij}}{\sum_j d_{ij} \cdot z_j} \right) \cdot z_j \quad \forall i \in V_1, j \in V_2, \quad (3.6.1)$$

$$d_{ij} \leq D$$

$$\sum_j d_{ij} \cdot z_j > 0 \quad \forall i \in V_1, j \in V_2, \quad (3.6.2)$$

$$d_{ij} \leq D$$

Διαχείριση απορριμμάτων

Μεταπτυχιακή εργασία για την εκπλήρωση μέρους των απαιτήσεων του
Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης

$$(D - d_{ij}) \cdot X_{ij} \geq 0 \quad \forall i \in V_1, j \in V_2 \quad (3.6.3)$$

$$\sum_j X_{ij} = 1 \quad \forall j \in V_2 \quad (3.6.4)$$

$$M \cdot z_j \geq K_j \quad \forall j \in V_2 \quad (3.6.5)$$

$$K_j \cdot Q_{min} \leq \sum_i X_{ij} \cdot E(q_i) \leq K_j \cdot Q_{max} \quad \forall j \in V_2 \quad (3.6.6)$$

$$\sum_j K_j \leq B \quad (3.6.7)$$

$$z_j \in \{0,1\} \quad \forall j \in V_2 \quad (3.6.8)$$

$$0 \leq X_{ij} \leq 1 \quad \forall i \in V_1, j \in V_2 \quad (3.6.9)$$

$$0 \leq K_j \leq K_j^{max} \quad \begin{array}{l} K_j \text{ integer,} \\ \forall j \in V_2 \end{array} \quad (3.6.10)$$

Ο περιορισμός (3.6.1) είναι μη γραμμικός, αφού περιλαμβάνει πηλίκo μεταβλητών.

Δεδομένου πως

$$\sum_j d_{ij} \cdot z_j > 0 \quad \forall i \neq j, d_{ij} \leq D$$

ο περιορισμός (3.6.1) γράφεται:

$$\begin{aligned} X_{ij} \cdot \sum_j d_{ij} \cdot z_j &\geq z_j \cdot \sum_j d_{ij} \cdot z_j - d_{ij} \cdot z_j \Rightarrow \\ \sum_h d_{ih} \cdot X_{ij} \cdot z_h &\geq \sum_h d_{ih} \cdot z_h \cdot z_j - d_{ij} \cdot z_j \end{aligned} \quad \text{Εξ. 3.6.3}$$

όπου z_h είναι βοηθητική μεταβλητή για την οποία

$$z_h = z_j \quad \forall i = j \quad (3.6.11)$$

Η Εξ. 3.6.3 περιλαμβάνει δύο μη γραμμικούς όρους, ένα γινόμενο συνεχούς και δυαδικής μεταβλητής και ένα γινόμενο δυαδικών μεταβλητών.

Θεωρούμε την συνεχή μεταβλητή (βλ. Παράρτημα 2.2)

$$H_{ijh}^1 = X_{ij} \cdot z_h \quad \forall i, j, h$$

για την οποία

$$H_{ijh}^1 \leq z_h \quad \forall i, j, h \quad (3.6.12)$$

$$H_{ijh}^1 \leq X_{ij} \quad \forall i, j, h \quad (3.6.13)$$

$$H_{ijh}^1 \geq X_{ij} - (1 - z_h) \quad \forall i, j, h \quad (3.6.14)$$

$$H_{ijh}^1 \geq 0 \quad \forall i, j, h \quad (3.6.15)$$

και τη δυαδική μεταβλητή (βλ. Παράρτημα 2.1)

$$H_{ijh}^2 = z_j \cdot z_h \quad \forall i, j, h$$

για την οποία

$$H_{ijh}^2 \leq z_h \quad \forall j, h \quad (3.6.16)$$

$$H_{ijh}^2 \leq z_j \quad \forall j, h \quad (3.6.17)$$

$$H_{ijh}^2 \geq z_h + z_j - 1 \quad \forall j, h \quad (3.6.18)$$

$$H_{ijh}^2 \text{ binary} \quad \forall j, h \quad (3.6.19)$$

Το πρόβλημα επιλύεται με την αντικατάσταση στον περιορισμό (3.6.1) των γινομένων συνεχούς με δυαδική μεταβλητή και δυαδικών με τις μεταβλητές H_{ijh}^1 και H_{jh}^2 αντίστοιχα και την προσθήκη στο πρόβλημα των περιορισμών (3.6.11)- (3.6.19).

3.7 Μοντέλο όπου επιτρέπεται η υπερχειλίση κάδων

Στη μορφοποίηση του προβλήματος που περιγράψαμε, παρά το γεγονός πως για $p_{max} > 1$ θεωρητικά θα μπορούσαμε να επιτρέπουμε υπερχειλίση κάδων, ωστόσο, λόγω της δομής της αντικειμενικής συνάρτησης, αυτό δεν θα έδινε ορθά αποτελέσματα. Πιο συγκεκριμένα, αν υποθέσουμε πως επιτρέπουμε υπερχειλίσεις κάδων, τότε, με τη μορφοποίηση που προτάθηκε στις παραπάνω ενότητες, για τα σημεία εκείνα στα οποία θα έχουμε υπερχειλίση, η ποσότητα πλήρωσης του κάδου θα ήταν αρνητική, επιδρώντας θετικά στην επίτευξη βελτιστοποίησης

της αντικειμενικής συνάρτησης και κατά συνέπεια θα επιτυγχάναμε το αντίθετο αποτέλεσμα από αυτό που προσδοκούμε. Επομένως, το μοντέλο που περιγράφηκε έως τώρα δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε περιπτώσεις όπου επιτρέπεται η υπερχειλίση και θα δίνει ορθά αποτελέσματα μόνο όταν $p_{max} \leq 1$.

Από την άλλη πλευρά, η θέσπιση ορίων στην επιτρεπόμενη χωρητικότητα των κάδων μέσω των ποσοστών p_{min} και p_{max} δημιουργεί μια αυστηρότητα στο πρόβλημα, που πολλές φορές δεν επιτρέπει την επίτευξη βέλτιστης λύσης.

Για τους παραπάνω λόγους, παρόλο που ιδανικά θα έπρεπε να μην επιτρέπεται η υπερχειλίση κάδων, αναπτύξαμε ένα δεύτερο μοντέλο όπου επιτρέπεται η υπερχειλίση. Προκειμένου να την αποφύγουμε και να είναι όσο το δυνατόν μικρότερη, υιοθετούμε τη λογική των «ποινών» (*penalty*) τόσο για τις περιπτώσεις όπου έχουμε υπερχειλίση, όσο και για τις περιπτώσεις που ο κάδος δεν γεμίζει. Ορίζουμε τις ακόλουθες παραμέτρους

P_1 = «ποινή» στην περίπτωση που ο κάδος δεν γεμίζει

P_2 = «ποινή» στην περίπτωση που ο κάδος υπερχειλίζει.

και τις ακόλουθες συνεχείς μεταβλητές:

S_j^+ = ποσότητα που απομένει για να γεμίσει ο κάδος j , και

S_j^- = ποσότητα υπερχειλίσης του κάδου j

για τις οποίες

$$S_j^+ \geq K_j \cdot Q - \sum_i X_{ij} \cdot E(q_i) \quad \forall j \in V_2 \quad \text{Εξ. 3.7.1}$$

$$S_j^- \geq \sum_i X_{ij} \cdot E(q_i) - K_j \cdot Q \quad \forall j \in V_2 \quad \text{Εξ. 3.7.2}$$

$$K_j \cdot Q - \sum_i X_{ij} \cdot E(q_i) = S_j^+ - S_j^- \quad \forall j \in V_2 \quad \text{Εξ. 3.7.3}$$

$$S_j^+ \geq 0 \quad \forall j \in V_2 \quad \text{Εξ. 3.7.4}$$

$$S_j^- \geq 0 \quad \forall j \in V_2 \quad \text{Εξ. 3.7.5}$$

Είναι προφανές πως όταν για κάποιο σημείο j $S_j^+ > 0$, τότε $S_j^- = 0$ και αντίστροφα.

Επίσης, δεδομένου πως πλέον επιτρέπονται οι υπερχειλίσσεις, ένα μη ενεργοποιημένο σημείο, όπου δεν υπάρχει κάδος, μπορεί να θεωρηθεί ως ένα σημείο με χωρητικότητα μηδέν. Σε αυτό το σημείο θα μπορούσαν να δρομολογηθούν απορρίμματα και αυτά να θεωρηθούν ως υπερχείλιση. Τα απορρίμματα αυτά στην πραγματικότητα όμως θα είναι ανεξέλεγκτα στο περιβάλλον. Για να το αποφύγουμε αυτό θα πρέπει να διασφαλίσουμε πως δεν θα δρομολογηθούν απορρίμματα σε σημεία όπου δεν τοποθετήθηκαν κάδοι. Αυτό επιτυγχάνεται με την εισαγωγή στο μοντέλο του περιορισμού:

$$X_{ij} \leq z_j \quad \forall i \in V_1, j \in V_2 \quad \text{Εξ. 3.7.6}$$

Με το σκεπτικό που αναπτύξαμε, το πρόβλημα πλέον διαμορφώνεται ως ακολούθως:

Μοντέλο 3.D Μη γραμμική μορφοποίηση προβλήματος όπου επιτρέπεται η υπερχειλίση κάδων

$$\text{minimize } \sum_j (P_1 \cdot S_j^+ + P_2 \cdot S_j^-)$$

$$S_j^+ \geq K_j \cdot Q - \sum_i X_{ij} \cdot E(q_i) \quad \forall j \in V_2 \quad (3.7.1)$$

$$S_j^- \geq \sum_i X_{ij} \cdot E(q_i) - K_j \cdot Q \quad \forall j \in V_2 \quad (3.7.2)$$

$$K_j \cdot Q - \sum_i X_{ij} \cdot E(q_i) = S_j^+ - S_j^- \quad \forall j \in V_2 \quad (3.7.3)$$

$$X_{ij} \leq z_j \quad \forall i \in V_1, j \in V_2 \quad (3.7.4)$$

$$X_{ij} \geq \left(1 - \frac{d_{ij}}{\sum_j d_{ij} \cdot z_j}\right) \cdot z_j \quad \forall i \in V_1, j \in V_2, \quad d_{ij} \leq D \quad (3.7.5)$$

$$\sum_j d_{ij} \cdot z_j > 0 \quad \forall i \in V_1, j \in V_2, \quad d_{ij} \leq D \quad (3.7.6)$$

Διαχείριση απορριμμάτων

Μεταπτυχιακή εργασία για την εκπλήρωση μέρους των απαιτήσεων του

Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης

$$(D - d_{ij}) \cdot X_{ij} \geq 0 \quad \forall i \in V_1, j \in V_2 \quad (3.7.7)$$

$$\sum_j X_{ij} = 1 \quad \forall j \in V_2 \quad (3.7.8)$$

$$M \cdot z_j \geq K_j \quad \forall j \in V_2 \quad (3.7.9)$$

$$\sum_j K_j \leq B \quad (3.7.10)$$

$$S_j^+ \geq 0 \quad \forall j \in V_2 \quad (3.7.11)$$

$$S_j^- \geq 0 \quad \forall j \in V_2 \quad (3.7.12)$$

$$z_j \in \{0,1\} \quad \forall j \in V_2 \quad (3.7.13)$$

$$0 \leq X_{ij} \leq 1 \quad \forall i \in V_1, j \in V_2 \quad (3.7.14)$$

$$0 \leq K_j \leq K_j^{\max} \quad \begin{array}{l} K_j \text{ integer,} \\ \forall j \in V_2 \end{array} \quad (3.7.15)$$

Κεφάλαιο 4 Εφαρμογή της μεθοδολογίας

Στο παρόν κεφάλαιο θα αναλύσουμε τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την εφαρμογή της μεθοδολογίας που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 3. Για το σκοπό αυτό, και λόγω έλλειψης δεδομένων από τον ελλαδικό χώρο, κατασκευάσαμε μία βάση δεδομένων η οποία περιλαμβάνει 40 κάδους οι οποίοι είναι τοποθετημένοι στα αρχικά σημεία i . Υποθέσαμε πως έχει καταγραφεί η ημερήσια ποσότητα πλήρωσης του κάθε κάδου q_{it} για ένα χρονικό διάστημα 6 μηνών (180 ημερών), όπως γίνεται στις περιπτώσεις συστημάτων ΠΟΠ.

Για κάθε κάδο ήταν γνωστές οι συντεταγμένες του. Με βάση τις συντεταγμένες του κάθε κάδου υπολογίσαμε τις ευκλείδειες αποστάσεις μεταξύ των κάδων και δημιουργήσαμε έναν τετραγωνικό πίνακα αποστάσεων.

Επίσης υποθέσαμε πως αρχικά σε κάθε ένα από τα 40 σημεία ήταν τοποθετημένος 1 κάδος, δηλαδή $K_i = 1, \forall i$. Ασφαλώς στην πραγματικότητα, μπορεί να έχουμε περισσότερους του ενός κάδους στην αρχική τοποθέτηση, κάτι το οποίο μπορεί να καταχωρηθεί στο μοντέλο που αναπτύχθηκε.

Στην συνέχεια εφαρμόσαμε το κάθε μοντέλο και εξετάσαμε τα αποτελέσματα για μέγιστη απόσταση μεταξύ των κάδων $D = 30, 40, 50$ μέτρα, που είναι μια ρεαλιστική προσέγγιση, καθώς ένας πολίτης θα ήταν διατεθειμένος να περπατήσει έως 50 μέτρα για να αφήσει τα απορρίμματά του, χωρίς να υπάρχει ενδεχόμενο να τα αφήσει ανεξέλεγκτα στο περιβάλλον.

Επίσης εφαρμόσαμε το μοντέλο για μέγιστο αριθμό κάδων σε κάθε σημείο $K_j^{max} = 2$ κάδους. Ωστόσο, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, από το μοντέλο που αναπτύχθηκε υπάρχει η δυνατότητα να εξεταστεί και η χωρητικότητα των σημείων μεμονωμένα.

Ως ελάχιστο επιτρεπόμενο ποσοστό πλήρωσης των κάδων ορίσαμε $p_{min} = 0,5$ και ως μέγιστο $p_{max} = 1$ (δηλαδή όσο και η χωρητικότητα του κάδου).

Επίσης, όσον αφορά τη δημιουργία σεναρίων που περιγράφηκε στην ενότητα 3.5 θεωρήσαμε τρία σενάρια, ένα όπου η ποσότητα απορριμμάτων θα μειωνόταν κατά 30%, ένα όπου θα μειωνόταν κατά 10% και ένα όπου θα αυξανόταν κατά 10%, θεωρώντας πως γενικά σε περιπτώσεις όπου οι πολίτες ελέγχονται τείνουν να παράγουν λιγότερα απορρίμματα (και για αυτό τον λόγο θεωρήσαμε δύο σενάρια μείωσης), αλλά και ένα σενάριο μιας σχετικής αύξησης, καθώς δεν μπορούμε να παραβλέψουμε το γεγονός πως τα τελευταία χρόνια στην Ελλάδα οι ποσότητες παραγωγής απορριμμάτων είχαν γενικότερα αυξητική τάση [35].

Προκειμένου να συγκρίνουμε τα αποτελέσματα, για κάθε μία από τις λύσεις που προέκυψαν υπολογίσαμε το μέσο ποσοστό υπερχειλίσσης των κάδων και τη μέση πλήρωση του κάθε κάδου.

Η μέση υπερχειλίση σε σχέση με τη χωρητικότητα υπολογίζεται ως εξής:

$$\text{Μέση υπερχειλίση σε σχέση με τη χωρητικότητα} = \frac{\text{Μέση ποσότητα υπερχειλίσσης}}{\text{Χωρητικότητα κάδου } Q}$$

όπου

$$\text{Μέση ποσότητα υπερχειλίσσης} = \frac{\text{Συνολική ποσότητα υπερχειλίσσης}}{\text{Αριθμός κάδων που υπερχειλίζουν}}$$

Η μέση πλήρωση του κάθε κάδου είναι:

$$\text{Μέση πλήρωση κάδου} = \frac{\text{Περιθώριο πλήρωσης του κάδου}}{\text{Αριθμός κάδων που δεν υπερχειλίζουν}}$$

4.1 Εκτίμηση αρχικής κατάστασης

4.1.1 Κανονική κατανομή

Στην αρχική κατάσταση με εκτίμηση ημερήσιας πλήρωσης κάδων με την κανονική κατανομή, είναι ενεργοποιημένα 40 σημεία, στα οποία είναι τοποθετημένοι 40 κάδοι ενώ η διαφορά μεταξύ χωρητικότητας του κάδου και πλήρωσης συνολικά ανέρχεται σε 13.822,29 λίτρα. Να σημειώσουμε πως στη συγκεκριμένη περίπτωση έχουμε υπερχειλίση σε 3 κάδους και συγκεκριμένα η ποσότητα της υπερχειλίσης φτάνει τα 112,41 λίτρα. Στο σύστημα υπάρχουν υπερχειλίσεις σε ποσοστό 3,41%, ενώ η μέση πληρότητα του συστήματος είναι 66,31%. Τα αποτελέσματα συνοψίζονται στον Πίνακα 4.1.A και στο Δίκτυο 4.1.1.

Πίνακας 4.1.A Αρχική κατάσταση στην περίπτωση εκτίμησης ημερήσιας πλήρωσης με κανονική κατανομή

Αντικ. Συνάρτηση	13.822,29
Αριθμός ενεργοποιημένων σημείων	40

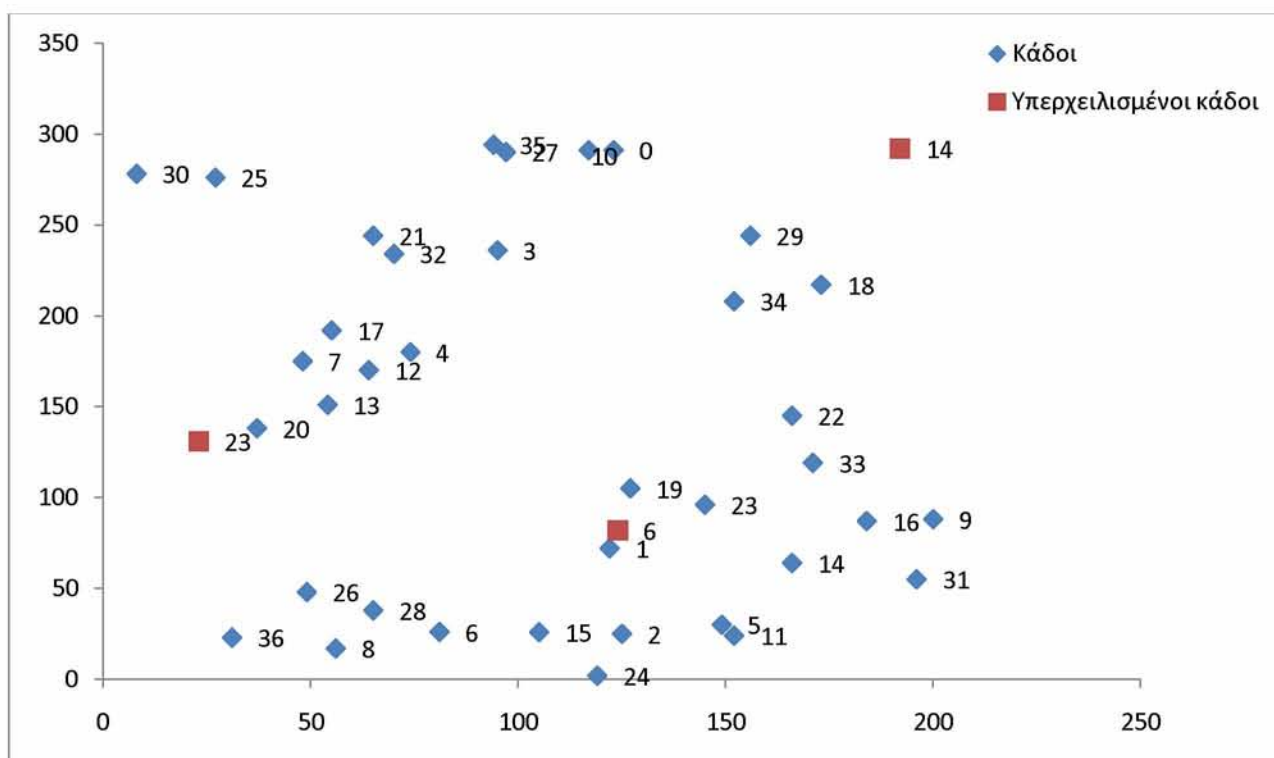
Διαχείριση απορριμμάτων

*Μεταπτυχιακή εργασία για την εκπλήρωση μέρους των απαιτήσεων του
Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης*

Αριθμός τοποθετημένων κάδων	40
Αριθμός υπερχειλίσεων	3
Ποσότητα υπερχείλισης	112,41
Μέση υπερχείλιση σε σχέση με τη χωρητικότητα	3,41%
Μέση πληρότητα των σημείων (εξαιρούνται οι υπερχειλίσεις)	66,31%

Δίκτυο 4.1.1

Αρχική χωροθέτηση κάδων με εκτίμηση ημερήσιας πλήρωσης με την κανονική κατανομή



4.1.2 Εκτίμηση τριών σημείων

Στην αρχική κατάσταση με εκτίμηση ημερήσιας πλήρωσης κάδων με την εκτίμηση τριών σημείων είναι ενεργοποιημένα και πάλι 40 σημεία, στα οποία είναι τοποθετημένοι 40 κάδοι ενώ η διαφορά μεταξύ χωρητικότητας του κάδου και πλήρωσης συνολικά ανέρχεται σε 13.725,11 λίτρα. Στη συγκεκριμένη περίπτωση έχουμε υπερχείλιση σε 4 κάδους και συγκεκριμένα η ποσότητα της υπερχείλισης φτάνει τα 135,06 λίτρα. Στο σύστημα υπάρχουν

Διαχείριση απορριμμάτων

Μεταπτυχιακή εργασία για την εκπλήρωση μέρους των απαιτήσεων του

Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης

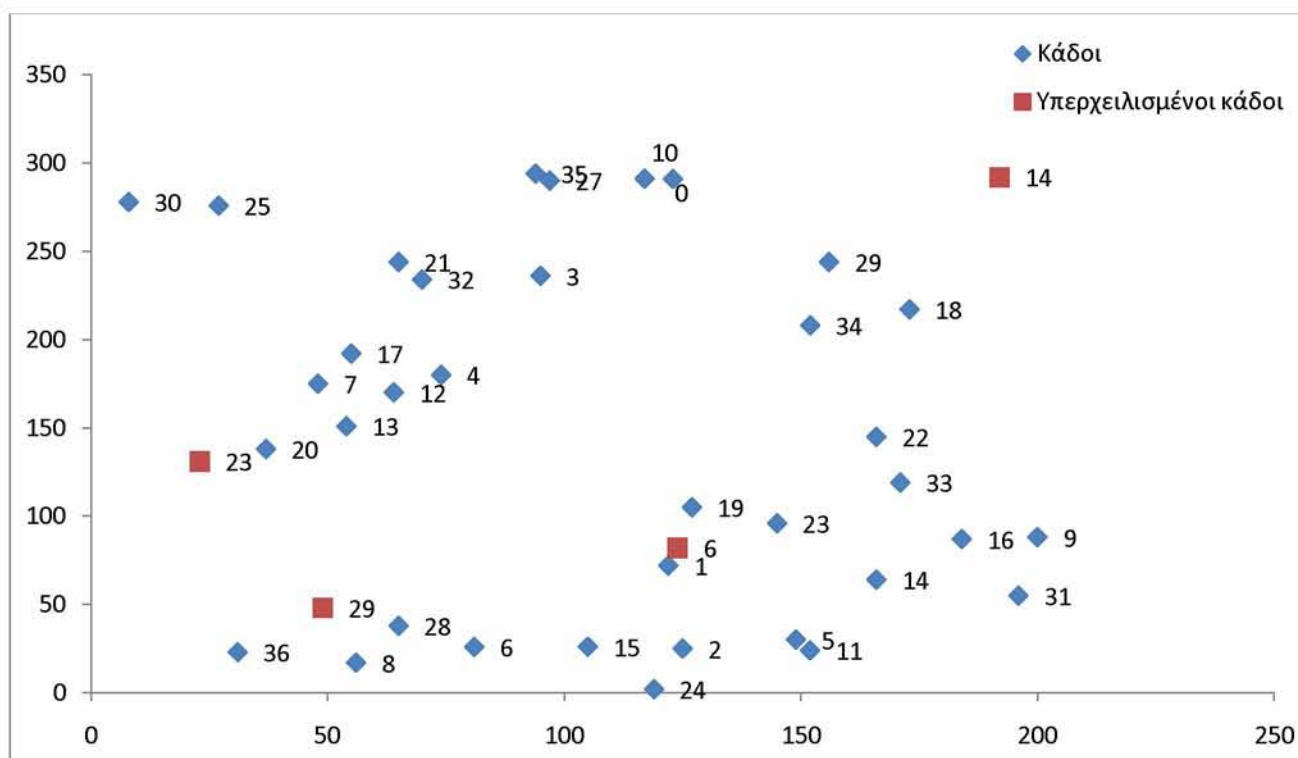
υπερχειλίσσεις σε ποσοστό 3,07%, ενώ η μέση πληρότητα του συστήματος είναι 65,68%. Τα αποτελέσματα συνοψίζονται στον Πίνακα 4.1.B και στο Δίκτυο 4.1.2.

Πίνακας 4.1.B Αρχική κατάσταση στην περίπτωση εκτίμησης ημερήσιας πλήρωσης με εκτίμηση τριών σημείων

Αντικ. Συνάρτηση (σε λίτρα)	13.725,11
Αριθμός ενεργοποιημένων σημείων	40
Αριθμός τοποθετημένων κάδων	40
Αριθμός υπερχειλίσεων	4
Ποσότητα υπερχείλισης (σε λίτρα)	135,06
Μέση υπερχείλιση σε σχέση με τη χωρητικότητα	3,07%
Μέση πληρότητα των σημείων (εξαιρούνται οι υπερχειλίσσεις)	65,68%

Δίκτυο 4.1.2

Αρχική χωροθέτηση κάδων με εκτίμηση ημερήσιας πλήρωσης με την μέθοδο εκτίμησης τριών σημείων



4.1.3 Μοντέλο με εκτίμηση σεναρίων

Στην αρχική κατάσταση με εκτίμηση με βάση τη δημιουργία σεναρίων και χρήση του κριτηρίου minimax είναι ενεργοποιημένα και πάλι 40 σημεία, στα οποία είναι τοποθετημένοι 40 κάδοι ενώ η διαφορά μεταξύ χωρητικότητας του κάδου και πλήρωσης συνολικά ανέρχεται σε 22.718,24 λίτρα, που αντιστοιχεί στην περίπτωση του σεναρίου όπου μειώνεται η ποσότητα παραγωγής απορριμμάτων κατά 30%. Στη συγκεκριμένη περίπτωση δεν έχουμε

Διαχείριση απορριμμάτων

Μεταπτυχιακή εργασία για την εκπλήρωση μέρους των απαιτήσεων του

Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης

υπερχείλιση σε κάποιον κάδο. Η μέση πληρότητα του συστήματος είναι 48,37%. Τα αποτελέσματα συνοψίζονται στον Πίνακα 4.1.C και στο Δίκτυο 4.1.3.

Πίνακας 4.1.C Αρχική κατάσταση στην περίπτωση εκτίμησης ημερήσιας πλήρωσης με εκτίμηση σεναρίων

	Σενάριο w_1 $p_w^1 = 0,7$	Σενάριο w_2 $p_w^2 = 0,9$	Σενάριο w_3 $p_w^3 = 1,1$	R^{max}
Αντικ. Συνάρτηση (σε λίτρα)	22.718,24	16.637,73	11.710,17	22.718,24
Αριθμός ενεργοποιημένων σημείων	40	40	40	40
Αριθμός τοποθετημένων κάδων	40	40	40	40
Αριθμός υπερχειλίσεων	0	0	5	0
Ποσότητα υπερχείλισης (σε λίτρα)	0	0	576,47	0
Μέση υπερχείλιση σε σχέση με τη χωρητικότητα	0,00 %	0,00 %	10,48%	0

Διαχείριση απορριμμάτων

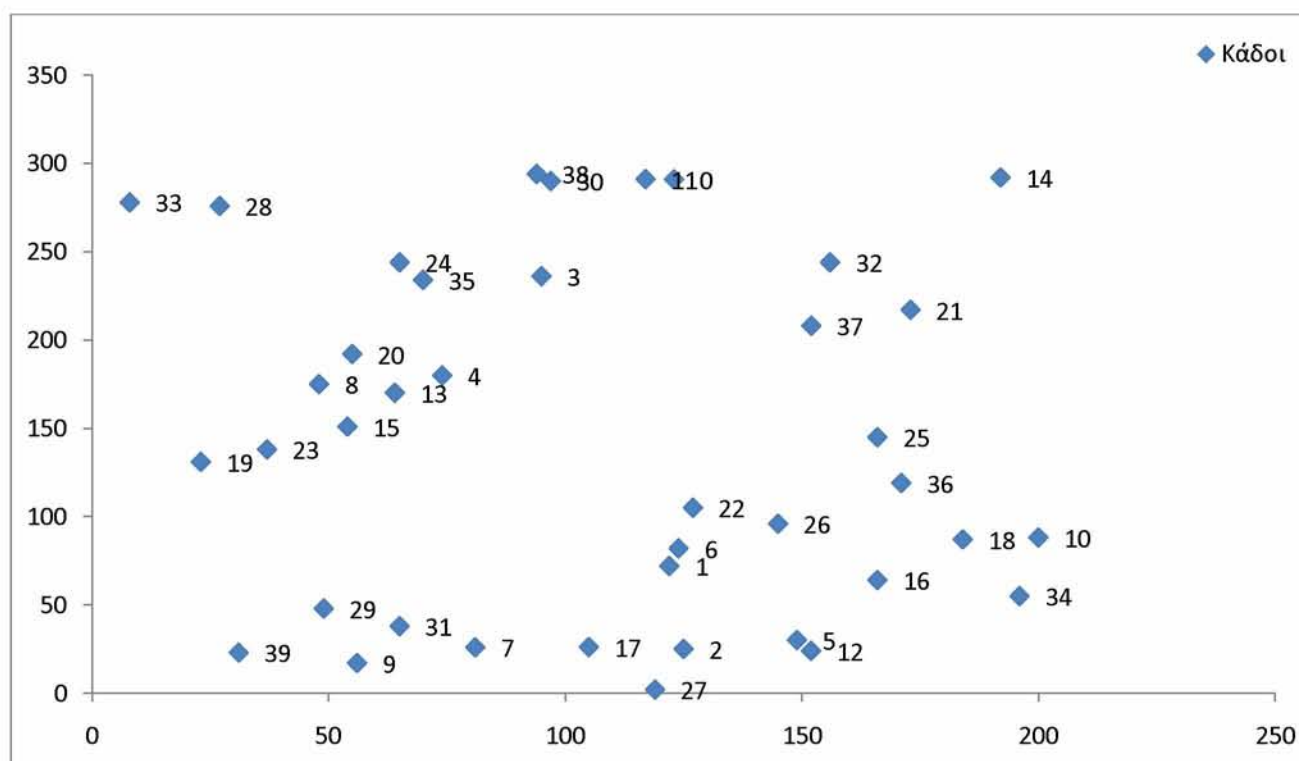
Μεταπτυχιακή εργασία για την εκπλήρωση μέρους των απαιτήσεων του

Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης

	Σενάριο w_1	Σενάριο w_2	Σενάριο w_3	R^{max}
	$p_w^1 = 0,7$	$p_w^2 = 0,9$	$p_w^3 = 1,1$	
Μέση πληρότητα των σημείων (εξαιρούνται οι υπερχειλίσεις)	48,37%	62,19%	71,08%	48,37%

Δίκτυο 4.1.3

Αρχική χωροθέτηση κάδων με εκτίμηση ημερήσιας πλήρωσης με την δημιουργία σεναρίων



4.2 Αποτελέσματα γραμμικού μοντέλου

4.2.1 Κανονική κατανομή

Στο γραμμικό μοντέλο με εκτίμηση με τη βοήθεια της κανονικής κατανομής η βέλτιστη λύση επιτυγχάνεται για μέγιστη επιτρεπόμενη απόσταση ανάθεσης των κάδων ίση με 50 μέτρα. Παραμένουν ενεργοποιημένα 20 σημεία, στα οποία είναι τοποθετημένοι 32 κάδοι, ενώ η διαφορά μεταξύ χωρητικότητας του κάδου και πλήρωσης συνολικά ανέρχεται σε 3.697,48 λίτρα. Στη συγκεκριμένη περίπτωση δεν έχουμε υπερχειλίση σε κάποιον κάδο, εφόσον εξάλλου δεν επιτρέπεται από το μοντέλο. Η μέση πληρότητα του συστήματος είναι 89,50%. Τα αποτελέσματα συνοψίζονται στον Πίνακα 4.2.A και στο Δίκτυο 4.2.1.

Πίνακας 4.2.A Αποτελέσματα γραμμικού μοντέλου με εκτίμηση ημερήσιας πλήρωσης κάδου με κανονική κατανομή

<i>D</i>	30	40	50
Πλήθος λύσεων	2	2	3
Είδος λύσης	Βέλτιστη	Βέλτιστη	Βέλτιστη
Αντικειμενική Συνάρτηση (λίτρα)	5.897,48	4.797,48	3.697,48
Αριθμός ενεργοποιημένων σημείων	25	22	20
Αριθμός τοποθετημένων κάδων	33	32	32
Χρόνος επίλυσης (sec)	0,36	0,86	0,75
Επαναλήψεις	6.902	14.551	8.834

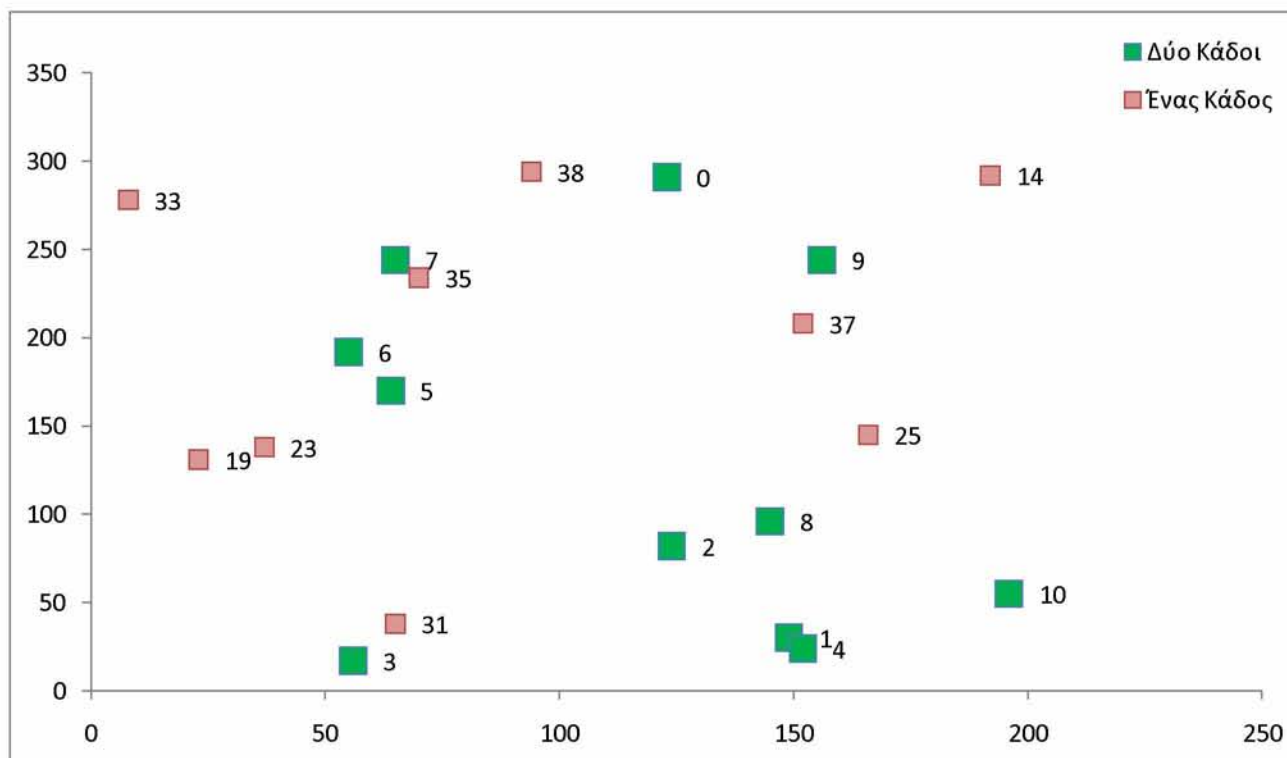
Διαχείριση απορριμμάτων

Μεταπτυχιακή εργασία για την εκπλήρωση μέρους των απαιτήσεων του

Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης

Μέση υπερχειλίση σε σχέση με τη χωρητικότητα	0,00 %	0,00 %	0,00 %
Μέση πληρότητα κάδων (εξαιρούνται οι υπερχειλίσεις)	83,75%	86,37%%	89,50%

Δίκτυο 4.2.1 Χωροθέτηση κάδων γραμμικού μοντέλου με εκτίμηση ημερήσιας πλήρωσης με την κανονική κατανομή



4.2.2 Εκτίμηση τριών σημείων

Στο γραμμικό μοντέλο με εκτίμηση με τη βοήθεια της μεθόδου των τριών σημείων η βέλτιστη λύση επιτυγχάνεται για μέγιστη επιτρεπόμενη απόσταση ανάθεσης των κάδων ίση με 50 μέτρα. Παραμένουν ενεργοποιημένα 20 σημεία, στα οποία είναι τοποθετημένοι 31 κάδοι, ενώ η διαφορά μεταξύ χωρητικότητας του κάδου και πλήρωσης συνολικά ανέρχεται σε 3.554,99 λίτρα. Η μέση πληρότητα του συστήματος είναι 89,57%. Τα αποτελέσματα συνοψίζονται στον Πίνακα 4.2.B και στο Δίκτυο 4.2.2.

Πίνακας 4.2.B Αποτελέσματα γραμμικού μοντέλου με εκτίμηση ημερήσιας πλήρωσης κάδου με εκτίμηση τριών σημείων

<i>D</i>	30	40	50
Πλήθος λύσεων	2	2	3
Είδος λύσης	Βέλτιστη	Βέλτιστη	Βέλτιστη
Αντικειμενική Συνάρτηση (λίτρα)	5.754,99	4.654,99	3.554,99
Αριθμός ενεργοποιημένων σημείων	26	22	20
Αριθμός τοποθετημένων κάδων	33	32	31
Χρόνος επίλυσης (sec)	0,08	0,23	0,61
Επαναλήψεις	148	2.654	11.358
Μέση υπερχειλίση σε σχέση με τη χωρητικότητα	0,00 %	0,00 %	0,00 %

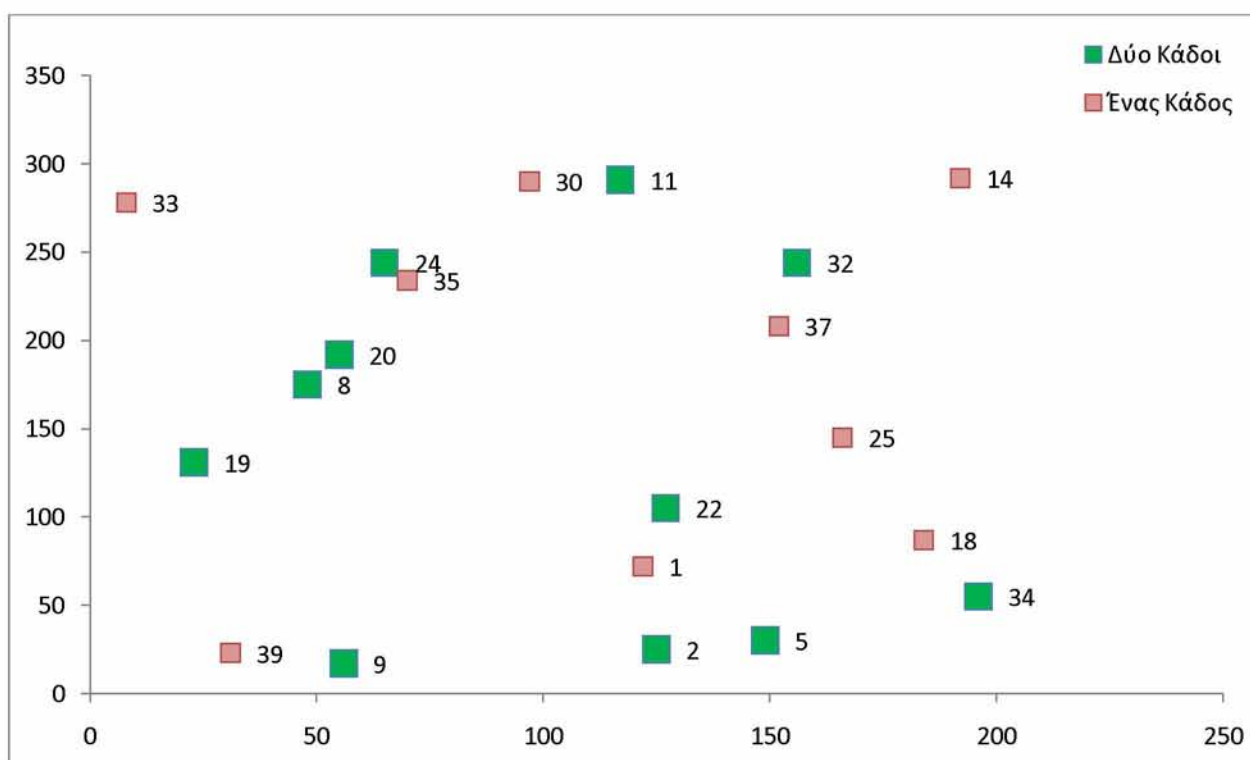
Διαχείριση απορριμμάτων

Μεταπτυχιακή εργασία για την εκπλήρωση μέρους των απαιτήσεων του

Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης

Μέση πληρότητα κάδων (εξαιρούνται οι υπερχειλίσσεις)	84,15%	86,78%	89,57%
------------------------------------------------------	--------	--------	--------

Δίκτυο 4.2.2 Χωροθέτηση κάδων γραμμικού μοντέλου με εκτίμηση ημερήσιας πλήρωσης με την μέθοδο των τριών σημείων



4.3 Εκτίμηση σεναρίων

Στο γραμμικό μοντέλο με εκτίμηση με τη μέθοδο των σεναρίων δεν επιτυγχάνεται βέλτιστη λύση. Το πρόβλημα είναι ανέφικτο.

Ωστόσο έγινε μια απόπειρα καταγραφής μιας υποβέλτιστης λύσης με χαλάρωση των περιορισμών, για μέγιστη επιτρεπόμενη απόσταση μεταξύ των σημείων D ίση με 50 μέτρα. Πιο συγκεκριμένα έγινε ανάλυση των αντικρουόμενων περιορισμών και διαγράφηκαν οι περιορισμοί εκείνοι εξαιτίας των οποίων δεν υπήρχε εφικτότητα. Οι περιορισμοί που δεν επέτρεπαν την εύρεση λύσης ανήκαν όλες στην ομάδα περιορισμών (3.5.6), δηλαδή

$$K_j \cdot Q_{min} \leq \sum_i X_{ij} \cdot E(q_{i\omega}) \leq K_j \cdot Q_{max} \quad \forall j \in V_2, \omega \in W$$

Με τη λύση που προέκυψε παραμένουν ενεργοποιημένα 19 σημεία, στα οποία είναι τοποθετημένοι 31 κάδοι, ενώ η διαφορά μεταξύ χωρητικότητας του κάδου και πλήρωσης συνολικά ανέρχεται σε 12.818,24 λίτρα. Η μέση πληρότητα του συστήματος είναι 62,41%. Τα αποτελέσματα συνοψίζονται στον Πίνακα 4.3.A και στο Δίκτυο 4.3.1.

Πίνακας 4.3.A Αποτελέσματα γραμμικού μοντέλου με εκτίμηση ημερήσιας πλήρωσης κάδου με εκτίμηση σεναρίων

D	30	40	50
Πλήθος λύσεων	-	-	1
Είδος λύσης	Μη εφικτή	Μη εφικτή	Χαλαρωμένη
Αντικειμενική Συνάρτηση (λίτρα)	-	-	12.818,24
Αριθμός ενεργοποιημένων σημείων	-	-	19

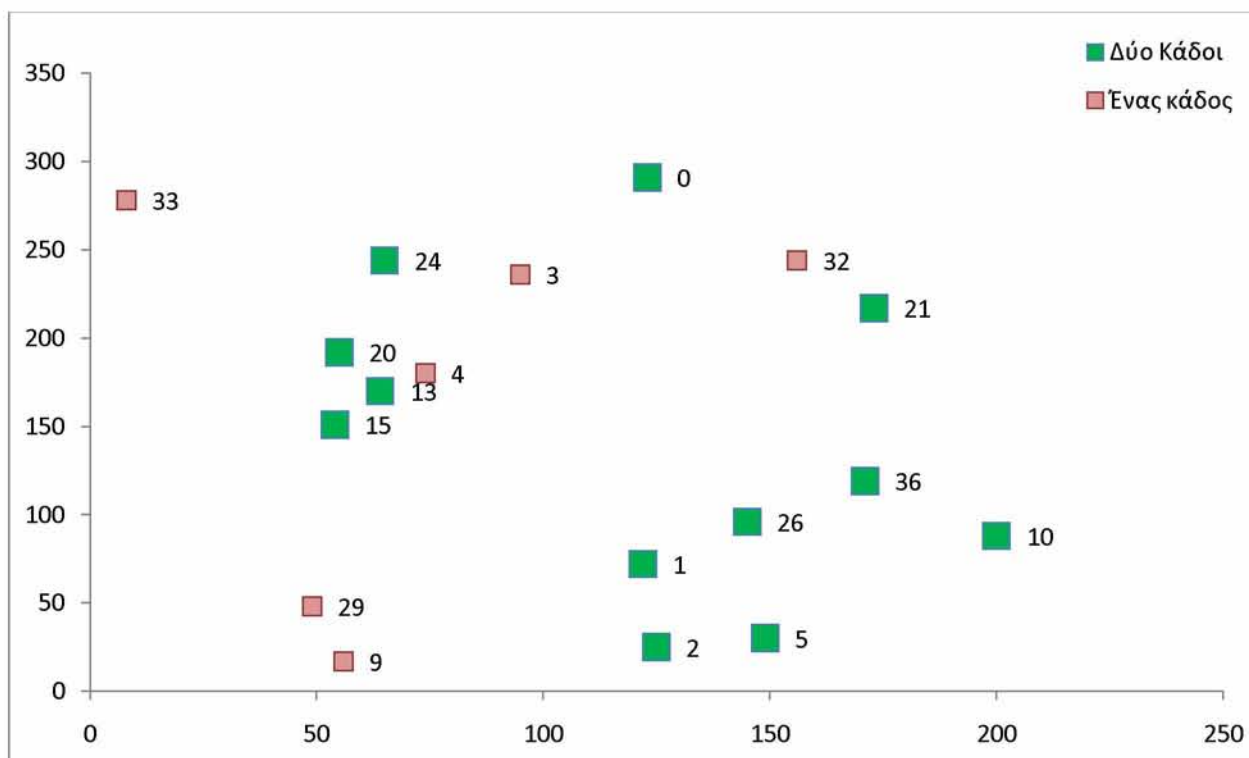
Διαχείριση απορριμμάτων

Μεταπτυχιακή εργασία για την εκπλήρωση μέρους των απαιτήσεων του

Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης

Αριθμός τοποθετημένων κάδων	-	-	31
Χρόνος επίλυσης (sec)	-	-	1,00
Επαναλήψεις	-	-	13.552
Μέση υπερχειλίση σε σχέση με τη χωρητικότητα	-	-	0,00 %
Μέση πληρότητα κάδων (εξαιρούνται οι υπερχειλίσεις)	-	-	62,41%

Δίκτυο 4.3.1 Χωροθέτηση κάδων γραμμικού μοντέλου με εκτίμηση ημερήσιας πλήρωσης κάδου με εκτίμηση σεναρίων



4.4 Αποτελέσματα μη γραμμικού μοντέλου

4.4.1 Κανονική κατανομή

Στο μη γραμμικό μοντέλο με εκτίμηση με τη βοήθεια της κανονικής κατανομής η βέλτιστη λύση επιτυγχάνεται για μέγιστη επιτρεπόμενη απόσταση ανάθεσης των κάδων ίση με 30 μέτρα. Για άλλες τιμές της παραμέτρου της μέγιστης επιτρεπόμενης απόστασης δεν ήταν εφικτή η επίτευξη βέλτιστης λύσης. Παραμένουν ενεργοποιημένα 23 σημεία, στα οποία είναι τοποθετημένοι 37 κάδοι, ενώ η διαφορά μεταξύ χωρητικότητας του κάδου και πλήρωσης ανέρχεται συνολικά σε 10.297,48 λίτρα. Η μέση πληρότητα του συστήματος είναι 74,70%. Τα αποτελέσματα συνοψίζονται στον Πίνακα 4.4.A και στο Δίκτυο 4.4.1.

Πίνακας 4.4.A Αποτελέσματα μη γραμμικού μοντέλου με εκτίμηση ημερήσιας πλήρωσης κάδου με κανονική κατανομή

<i>D</i>	30	40	50
Πλήθος λύσεων	2	-	-
Είδος λύσης	Βέλτιστη	Μη εφικτή	Μη εφικτή
Αντικειμενική Συνάρτηση (λίτρα)	10.297,48	-	-
Αριθμός ενεργοποιημένων σημείων	23	-	-
Αριθμός τοποθετημένων κάδων	37	-	-

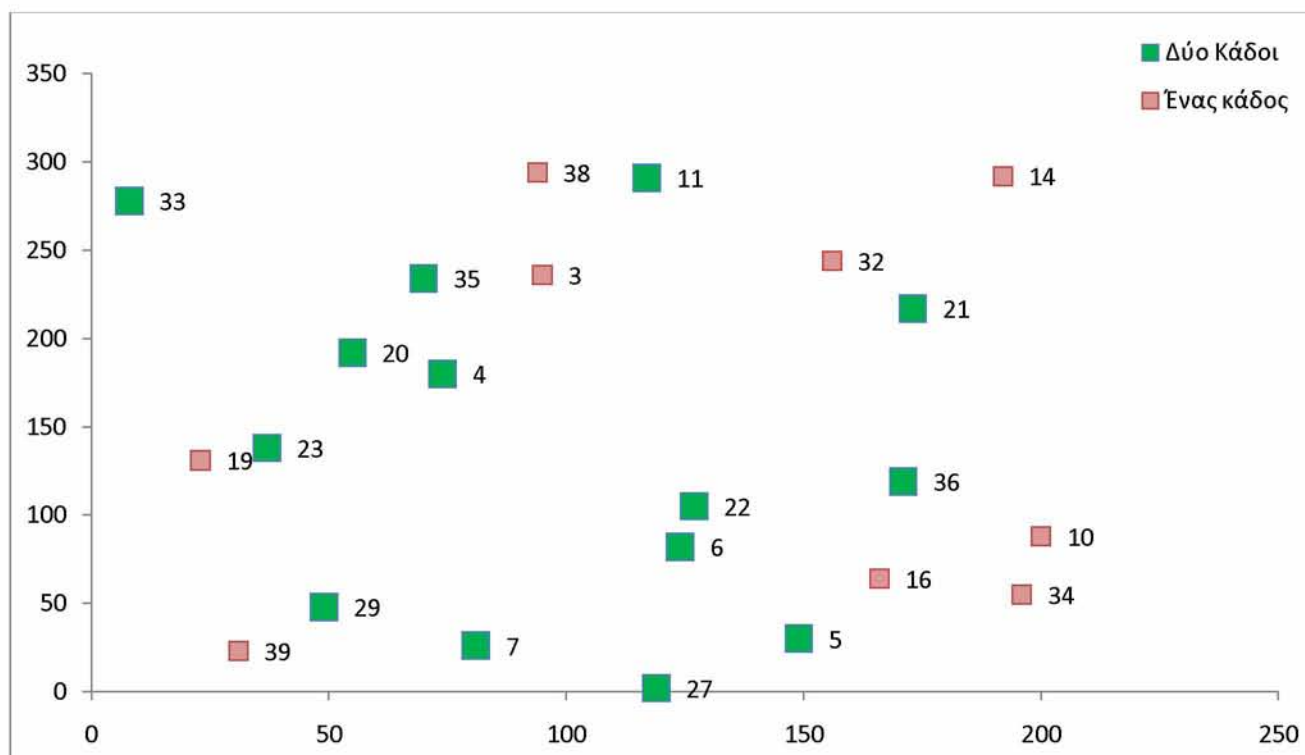
Διαχείριση απορριμμάτων

Μεταπτυχιακή εργασία για την εκπλήρωση μέρους των απαιτήσεων του

Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης

Χρόνος επίλυσης (sec)	1.489,48	-	-
Επαναλήψεις	1.128.572	-	-
Μέση υπερχειλίση σε σχέση με τη χωρητικότητα	0,00 %	-	-
Μέση πληρότητα κάδων (εξαιρούνται οι υπερχειλίσεις)	74,70%	-	-

Δίκτυο 4.4.1 Χωροθέτηση κάδων μη γραμμικού μοντέλου με εκτίμηση ημερήσιας πλήρωσης με την κανονική κατανομή



4.4.2 Εκτίμηση τριών σημείων

Στο μη γραμμικό μοντέλο με εκτίμηση με τη βοήθεια της μεθόδου των τριών σημείων η βέλτιστη λύση επιτυγχάνεται για μέγιστη επιτρεπόμενη απόσταση ανάθεσης των κάδων D ίση με 40 μέτρα. Για τιμή της παραμέτρου της μέγιστης επιτρεπόμενης απόστασης ίση με 50 μέτρα δεν ήταν εφικτή η επίτευξη βέλτιστης λύσης. Παραμένουν ενεργοποιημένα 20 σημεία, στα οποία είναι τοποθετημένοι 36 κάδοι, ενώ η διαφορά μεταξύ χωρητικότητας του κάδου και πλήρωσης ανέρχεται συνολικά σε 9.054,98 λίτρα. Η μέση πληρότητα του συστήματος είναι 77,13%. Τα αποτελέσματα συνοψίζονται στον Πίνακα 4.4.B και στο Δίκτυο 4.4.2.

Πίνακας 4.4.B Αποτελέσματα μη γραμμικού μοντέλου με εκτίμηση ημερήσιας πλήρωσης κάδου με τη μέθοδο των τριών σημείων

D	30	40	50
Πλήθος λύσεων	1	7	-
Είδος λύσης	Βέλτιστη	Βέλτιστη	Μη εφικτή
Αντικειμενική Συνάρτηση (λίτρα)	10.154,99	9.054,98	-
Αριθμός ενεργοποιημένων σημείων	23	20	-
Αριθμός τοποθετημένων κάδων	37	36	-
Χρόνος επίλυσης (sec)	776,53	8.769,28	-
Επαναλήψεις	675.573	3.914.268	-

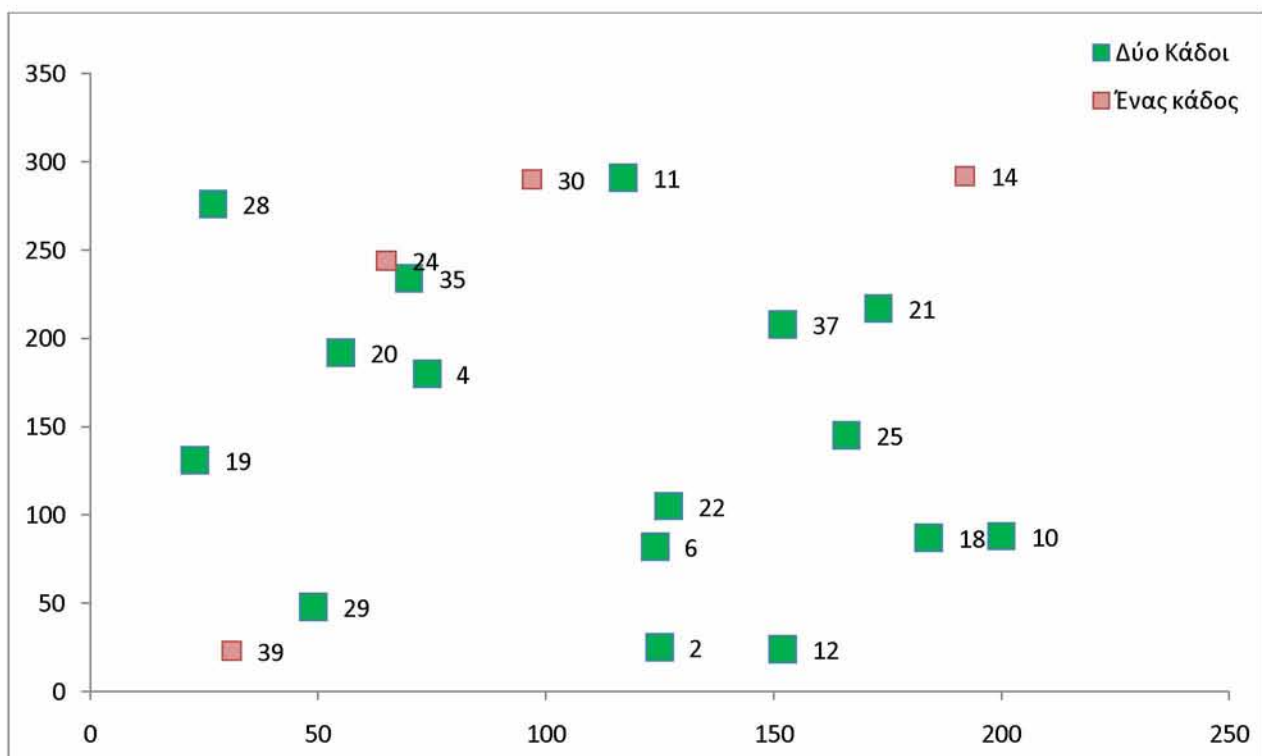
Διαχείριση απορριμμάτων

Μεταπτυχιακή εργασία για την εκπλήρωση μέρους των απαιτήσεων του

Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης

Μέση υπερχειλίση σε σχέση με τη χωρητικότητα	0,00 %	0,00%	-
Μέση πληρότητα κάδων (εξαιρούνται οι υπερχειλίσεις)	75,05%	77,13%	-

Δίκτυο 4.4.2 Χωροθέτηση κάδων μη γραμμικού μοντέλου με εκτίμηση ημερήσιας πλήρωσης με την μέθοδο των τριών σημείων



4.5 Αποτελέσματα μη γραμμικού μοντέλου όπου επιτρέπεται η υπερχείλιση κάδων

Για την εφαρμογή του μοντέλου που περιγράφηκε στην ενότητα 3.7 ορίζουμε ως παραμέτρους των «ποινών» $P_1 = 1$ για τις περιπτώσεις που ο κάδος δεν γεμίζει και $P_2 = 10$ για τις περιπτώσεις όπου ο κάδος υπερχειλίζει. Ασφαλώς, είναι στην κρίση του αποφασίζοντα το πόσο αυστηρός θέλει να είναι στο μοντέλο του όσον αφορά τις υπερχειλίσεις με τον ορισμό της ποινής P_2 σε σχέση με την P_1 .

Επίσης, για λόγους υπολογιστικού χρόνου και επειδή σε αντίθεση με τα υπόλοιπα μοντέλα οι λύσεις που προκύπτουν είναι πολύ περισσότερες, σταματάμε τη διαδικασία βελτιστοποίησης στις 1.000.000 επαναλήψεις και θεωρούμε ως καλύτερη λύση αυτή που θα προκύψει έως εκείνη τη στιγμή.

4.5.1 Κανονική κατανομή

Στο μη γραμμικό μοντέλο με εκτίμηση με τη βοήθεια της κανονικής κατανομής η καλύτερη λύση επιτυγχάνεται για μέγιστη επιτρεπόμενη απόσταση ανάθεσης των κάδων ίση με 40 μέτρα. Για μέγιστη επιτρεπόμενη απόσταση ίση με 30 μέτρα επιτυγχάνεται βέλτιστη λύση στο πρόβλημα, αλλά όχι τόσο καλή όσο αυτή που επιτεύχθηκε με παράμετρο D ίση με 40 μέτρα, ενώ για μέγιστη επιτρεπόμενη απόσταση D ίση με 50 μέτρα η λύση που επιτεύχθηκε δεν είναι ιδιαίτερα ικανοποιητική, κάτι που οφείλεται στο ότι σταματήσαμε τη διαδικασία βελτιστοποίησης μόλις ξεπεράστηκαν οι 1.000.000 επαναλήψεις, αλλά

Διαχείριση απορριμμάτων

Μεταπτυχιακή εργασία για την εκπλήρωση μέρους των απαιτήσεων του

Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης

πιστεύουμε πως αν είχε συνεχίσει η διαδικασία βελτιστοποίησης θα προσεγγιζόταν πολύ ικανοποιητικές λύσεις. Τα σημεία που ενεργοποιούνται είναι 19, στα οποία είναι τοποθετημένοι 31 κάδοι, ενώ η διαφορά μεταξύ χωρητικότητας του κάδου και πλήρωσης ανέρχεται συνολικά σε 4.840,90 λίτρα. Ωστόσο, στο 1,58% του συστήματος υπάρχουν υπερχειλίσσεις. Η μέση πληρότητα του συστήματος είναι 89,20%. Τα αποτελέσματα συνοψίζονται στον Πίνακα 4.5.A και στο Δίκτυο 4.5.1.

Το συγκεκριμένο μοντέλο, παρόλο που δεν κατέληξε σε βέλτιστη λύση και παρά το γεγονός πως δημιουργεί υπερχειλίσσεις, είναι πολύ καλύτερο από την αρχική χωροθέτηση, αφού όχι μόνο μειώνει τον αριθμό των κάδων κατά 52,50%, αλλά μειώνει και τις υπερχειλίσσεις και επιπλέον αυξάνει την πληρότητα του συστήματος κατά 34,52%.

Πίνακας 4.5.A Αποτελέσματα μη γραμμικού μοντέλου με υπερχειλίσσεις κάδων και εκτίμηση ημερήσιας πλήρωσης κάδου με κανονική κατανομή

<i>D</i>	30	40	50
Πλήθος λύσεων	22	15	5
Είδος λύσης	Βέλτιστη	Καλύτερη	Εφικτή
Αντικειμενική Συνάρτηση	5.428,21	4.840,90	40.987,33
Αριθμός ενεργοποιημένων σημείων	21	19	13
Αριθμός τοποθετημένων κάδων	32	31	25
Χρόνος επίλυσης (sec)	3.336,00	5.870,07	3.264,10
Επαναλήψεις	1.057.805	1.022.036	1.027.236

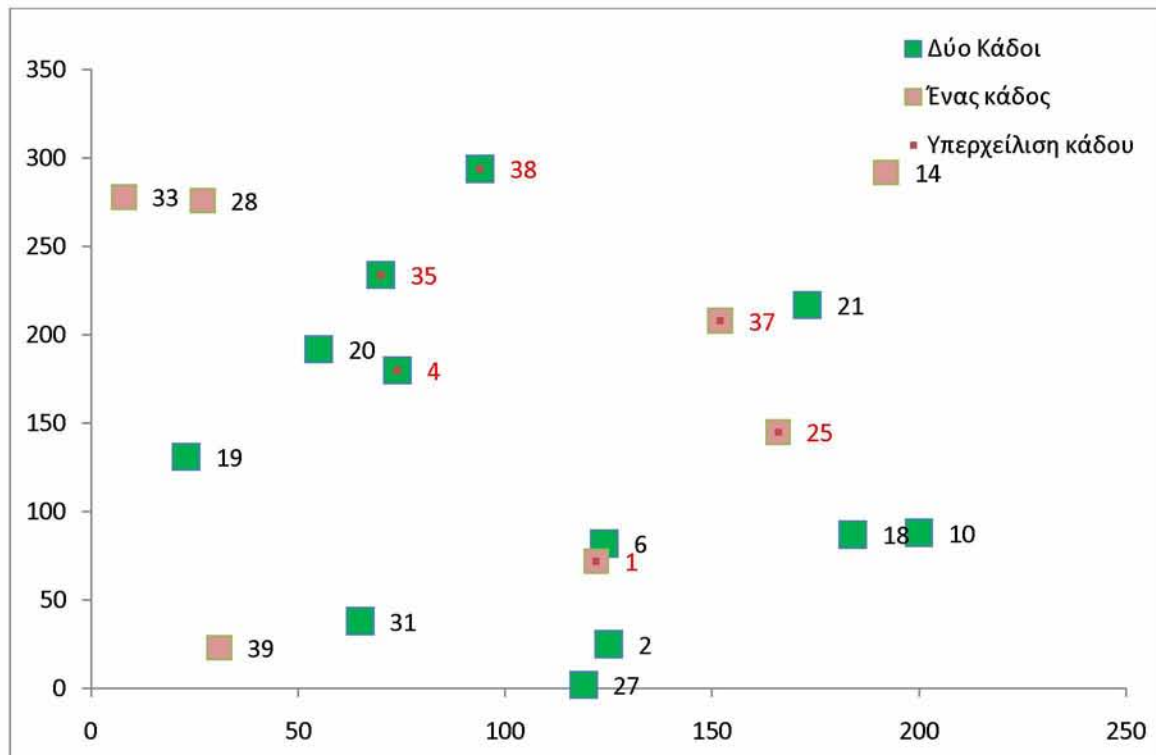
Διαχείριση απορριμμάτων

Μεταπτυχιακή εργασία για την εκπλήρωση μέρους των απαιτήσεων του

Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης

Αριθμός υπερχειλίσεων	5	6	11
Ποσότητα υπερχειλίσης (σε λίτρα)	57,34	103,95	3.989,99
Υπολειπόμενη ποσότητα πλήρωσης (σε περιπτώσεις που δεν έχουμε υπερχείλιση)	4.854,81	3.801,40	1.087,43
Μέση υπερχείλιση σε σχέση με τη χωρητικότητα	1,04%	1,58%	32,98%
Μέση πληρότητα κάδων (εξαιρούνται οι υπερχειλίσεις)	86,21%	89,20%	96,91%

Δίκτυο 4.5.1 Χωροθέτηση κάδων μη γραμμικού μοντέλου με υπερχειλίσσεις με εκτίμηση ημερήσιας πλήρωσης με την κανονική κατανομή



4.5.2 Εκτίμηση τριών σημείων

Στο μη γραμμικό μοντέλο με εκτίμηση με τη βοήθεια της κανονικής κατανομής η καλύτερη λύση επιτυγχάνεται για μέγιστη επιτρεπόμενη απόσταση ανάθεσης των κάδων ίση με 40 μέτρα. Για μέγιστη επιτρεπόμενη απόσταση ίση με 30 μέτρα επιτυγχάνεται μια αρκετά καλή λύση στο πρόβλημα, αλλά όχι τόσο καλή όσο αυτή που επιτεύχθηκε με παράμετρο D ίση με 40 μέτρα, ενώ για μέγιστη επιτρεπόμενη απόσταση D ίση με 50 μέτρα η λύση που επιτεύχθηκε δεν είναι ιδιαίτερα ικανοποιητική, κάτι που οφείλεται στο ότι σταματήσαμε τη

Διαχείριση απορριμμάτων

Μεταπτυχιακή εργασία για την εκπλήρωση μέρους των απαιτήσεων του

Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης

διαδικασία βελτιστοποίησης μόλις ξεπεράστηκαν οι 1.000.000 επαναλήψεις. Τα σημεία που ενεργοποιούνται είναι 18, στα οποία είναι τοποθετημένοι 31 κάδοι, ενώ η διαφορά μεταξύ χωρητικότητας του κάδου και πλήρωσης ανέρχεται συνολικά σε 4.571,20 λίτρα. Στο 1,68% του συστήματος υπάρχουν υπερχειλίσσεις. Η μέση πληρότητα του συστήματος είναι 89,30%. Τα αποτελέσματα συνοψίζονται στον Πίνακα 4.5.B και στο Δίκτυο 4.5.2.

Πίνακας 4.5.B Αποτελέσματα μη γραμμικού μοντέλου με υπερχειλίσσεις κάδων και εκτίμηση ημερήσιας πλήρωσης κάδου με μέθοδο τριών σημείων

<i>D</i>	30	40	50
Πλήθος λύσεων	17	22	17
Είδος λύσης	Καλύτερη	Βέλτιστη	Καλύτερη
Αντικειμενική Συνάρτηση	6.018,12	4.571,20	34.857,56
Αριθμός ενεργοποιημένων σημείων	20	18	16
Αριθμός τοποθετημένων κάδων	32	31	28
Χρόνος επίλυσης (sec)	4.067,12	11.655,87	22.605,26
Επαναλήψεις	1.019.309	3.205.763	4.524.728
Αριθμός υπερχειλίσσεων	4	5	7
Ποσότητα υπερχειλίσσης (σε λίτρα)	123,92	92,38	3.145,69
Υπολειπόμενη ποσότητα πλήρωσης (σε περιπτώσεις που δεν έχουμε υπερχειλίση)	4.778,92	3.647,40	3.400,66

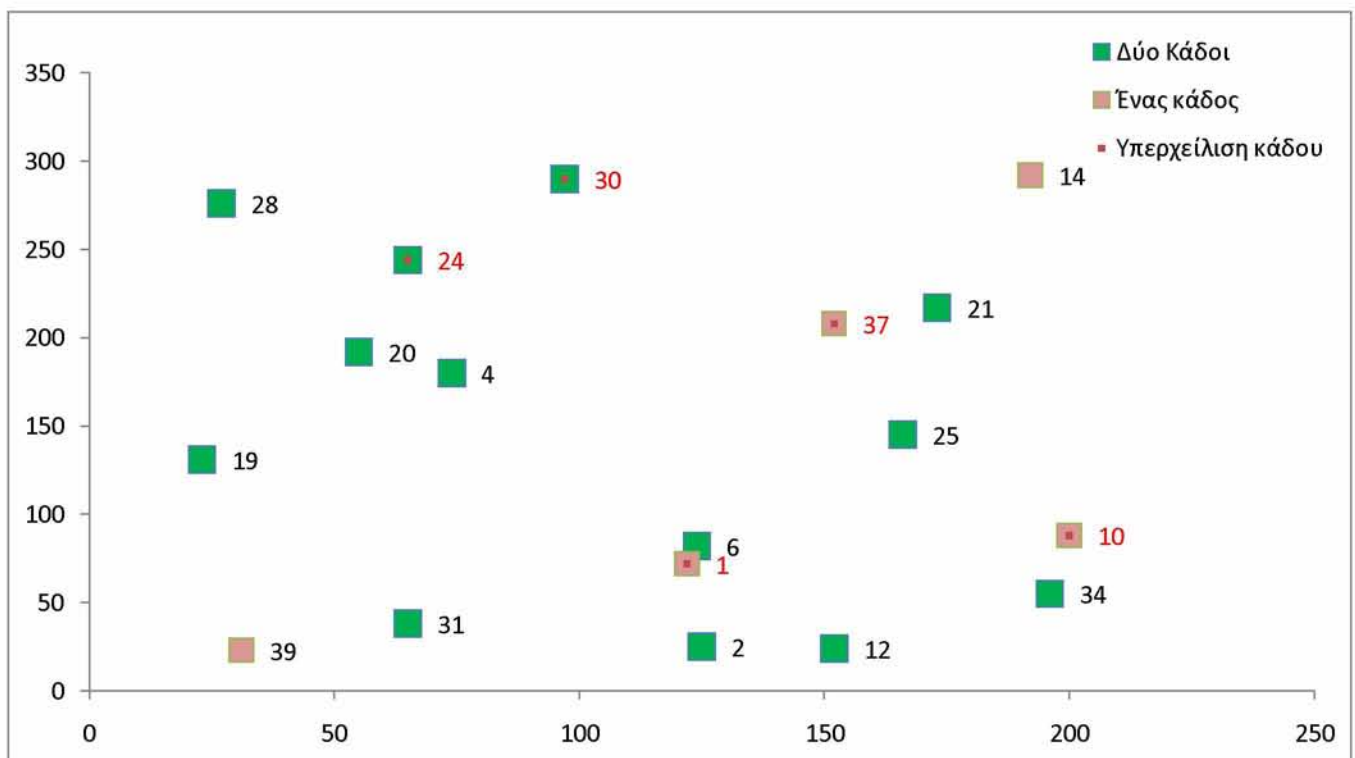
Διαχείριση απορριμμάτων

Μεταπτυχιακή εργασία για την εκπλήρωση μέρους των απαιτήσεων του

Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης

Μέση υπερχειλίση σε σχέση με τη χωρητικότητα	2,82%	1,68%	40,85%
Μέση πληρότητα κάδων (εξαιρούνται οι υπερχειλίσεις)	86,42%	89,30%	90,03%

Δίκτυο 4.5.2 Χωροθέτηση κάδων μη γραμμικού μοντέλου με υπερχειλίσεις με εκτίμηση ημερήσιας πλήρωσης με την μέθοδο των τριών σημείων



Κεφάλαιο 5 Συμπεράσματα

Ο στόχος της παρούσας διατριβής είναι η ανάλυση χωροθέτησης κάδων απορριμμάτων σε μια αστική περιοχή. Η τοποθέτηση των κάδων μέσα σε μια πόλη είναι ένα σημαντικό θέμα του χωροθετικού σχεδιασμού.

Για το σκοπό αυτό αναπτύχθηκαν μοντέλα μικτού ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού για τη βελτιστοποίηση του συστήματος τοποθέτησης των κάδων.

Ένα από τα βασικότερα κριτήρια που λήφθηκαν υπόψη είναι να μην υπάρχουν υπερχειλίσσεις στο σύστημα. Αυτό αποτελεί πολύ σημαντικό παράγοντα, καθώς αυξάνει την ικανοποίηση των κατοίκων. Επίσης, με τις προτεινόμενες μεθοδολογίες μειώθηκε σημαντικά τόσο ο αριθμός των ενεργοποιημένων σημείων όσο και ο αριθμός των κάδων που τοποθετήθηκαν, αφού έγινε καλύτερη αναδιανομή των κάδων, κάτι που είναι προς όφελος και των κατοίκων, αλλά και της πολιτείας, καθώς λιγότεροι κάδοι σημαίνουν λιγότερα έξοδα καθαριότητας και για τον δήμο, αφού μειώνεται το κόστος λειτουργίας, αλλά και για τα νοικοκυριά, αφού μειώνονται τα τέλη καθαριότητας.

Ωστόσο, η απαίτηση από το μοντέλο να μην επιτρέπονται υπερχειλίσσεις, περιόρισε πολύ τις δυνατότητές του να δώσει επιλογές λύσεων, ενώ σε κάποιες περιπτώσεις δεν επιτεύχθηκε καν μία βέλτιστη λύση (περίπτωση μοντέλου με σενάρια).

Για αυτό το λόγο, προτείνεται ακόμα μία μεθοδολογία όπου επιτρέπονται οι υπερχειλίσσεις κάδων, έτσι ώστε να λυθεί το πρόβλημα της μη εφικτότητας λύσης. Με το συγκεκριμένο

μοντέλο διασφαλίζεται η μέγιστη πληρότητα του συστήματος, δηλαδή η μέγιστη δυνατή πλήρωση των κάδων, ενώ ταυτόχρονα δίδεται η δυνατότητα στον αποφασίζων να θέσει ο ίδιος το βαθμό στον οποίο θα επιτρέπει υπερχειλίσσεις στο σύστημα.

Γενικότερα, η διαχείριση προβλημάτων χωροθέτησης κάδων είναι αρκετά δύσκολο στην επίλυση πρόβλημα. Το πρώτο με το οποίο έρχεται αντιμέτωπος ο μελετητής είναι η παντελής έλλειψη δεδομένων. Στις περισσότερες μελέτες που έχουν διενεργηθεί η παραγωγή απορριμμάτων θεωρείται δεδομένη, μια παραδοχή που στην πραγματικότητα δεν είναι δυνατόν να επιτευχθεί [21]. Σε άλλες μελέτες γίνεται προσπάθεια μέσω ερωτηματολογίων να διαπιστωθεί μία τάση για την παραγωγή απορριμμάτων ανά νοικοκυριό [29], που ωστόσο και πάλι δεν μπορεί να δώσει ακρίβεια στην πρόβλεψή της.

Επίσης η αντιστοίχιση πολιτών σε συγκεκριμένους κάδους, δεν είναι ιδιαίτερα ρεαλιστική, καθώς δεν διασφαλίζεται πουθενά πως αυτή η αντιστοίχιση θα τηρείται.

Για τους παραπάνω λόγους, πιστεύουμε πως η προτεινόμενη μεθοδολογία είναι εφαρμόσιμη, καθώς δεν λαμβάνει υπόψη τόσο αβέβαιες παραμέτρους, αφού βασίζεται στην ημερήσια πλήρωση των κάδων, που είναι μετρήσιμη δίδοντας πολύ αναλυτικά και διαχειρίσιμα αποτελέσματα.

Παράρτημα

Παράρτημα-1. Κριτήριο *minimax*

Έστω το μοντέλο

$$\text{Minimize } \max_j \sum_j c_{kj} \cdot x_j$$

$$\sum_j a_{ij} \cdot x_j \leq b_i \quad \forall i$$

$$x_j \geq 0 \quad \forall j$$

Το κριτήριο *minimax* μπορεί να μετατραπεί εισάγοντας μία επιπλέον μεταβλητή απόφασης z , που αντιπροσωπεύει το μέγιστο κόστος [36]:

$$z = \max_j \sum_j c_{kj} \cdot x_j$$

Προκειμένου να επιβληθεί η παραπάνω σχέση, πρέπει να προστεθεί ο ακόλουθος περιορισμός:

$$\sum_j c_{kj} \cdot x_j \leq z \quad \forall k$$

Όταν η μεταβλητή z ελαχιστοποιείται, ο παραπάνω περιορισμός διασφαλίζει πως η z θα είναι μεγαλύτερη ή ίση με $\sum_j c_{kj} \cdot x_j$ για κάθε k . Ταυτόχρονα η βέλτιστη τιμή της z δεν θα είναι μεγαλύτερη από το μέγιστο των $\sum_j c_{kj} \cdot x_j$, επειδή η z έχει ελαχιστοποιηθεί με αυτό τον τρόπο, η βέλτιστη τιμή της z θα είναι όσο το δυνατόν μικρότερη και ακριβώς ίση με τη μέγιστη τιμή της.

Το ισοδύναμο γραμμικό πρόβλημα είναι:

Minimize z

$$\sum_j a_{ij} \cdot x_j \geq b_i \quad \forall i$$

$$\sum_j c_{kj} \cdot x_j \leq z \quad \forall k$$

$$x_j \geq 0 \quad \forall j$$

Παράρτημα-2. Γραμμικοποίηση γινομένου μεταβλητών

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζεται η μέθοδος γραμμικοποίησης περιορισμών και αντικειμενικών συναρτήσεων στις οποίες περιλαμβάνονται γινόμενα μεταβλητών [36]. Υπάρχουν πολλές εφαρμογές στις οποίες προκύπτουν μη γραμμικοί περιορισμοί σε συνδυασμό με ακέραιες μεταβλητές. Αυτά τα προβλήματα μπορεί να εξελιχθούν αρκετά δύσκολα, αν όχι αδύνατα να επιλυθούν.

Γενικά, ένα γινόμενο δύο μεταβλητών μπορεί να αντικατασταθεί από μία καινούρια μεταβλητή, στην οποία επιβάλλεται ένας αριθμός περιορισμών.

2.1. Δύο δυαδικές μεταβλητές

Έστω δύο δυαδικές μεταβλητές x_1 και x_2 . Το γινόμενό τους $x_1 \cdot x_2$ μπορεί να αντικατασταθεί από μία επιπρόσθετη δυαδική μεταβλητή y . Οι ακόλουθοι περιορισμοί αναγκάζουν την y να πάρει την τιμή του γινομένου $x_1 \cdot x_2$:

$$y \leq x_1$$

$$y \leq x_2$$

$$y \geq x_1 + x_2 - 1$$

$$y \text{ binary}$$

2.2. Μία δυαδική και μία συνεχής μεταβλητή

Έστω x_1 δυαδική μεταβλητή και x_2 μια συνεχής μεταβλητή για την οποία ισχύει $0 \leq x_2 \leq u$. Τώρα εισάγεται μια συνεχής μεταβλητή y για να αντικαταστήσει το γινόμενο $y = x_1 \cdot x_2$. Οι ακόλουθοι περιορισμοί πρέπει να συμπεριληφθούν για να αναγκάσουν την μεταβλητή y να πάρει την τιμή του $x_1 \cdot x_2$:

$$y \leq u \cdot x_1$$

$$y \leq x_2$$

Διαχείριση απορριμμάτων

*Μεταπτυχιακή εργασία για την εκπλήρωση μέρους των απαιτήσεων του
Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης*

$$y \geq x_2 - u \cdot (1 - x_1)$$

$$y \geq 0$$

Βιβλιογραφία

1. Γαβριλάκης, Κ., *Απορρίμματα: Προβλήματα και η αντιμετώπισή τους [Οδηγός Εκπαιδευτικών]*. 2000, Αθήνα: Υπουργείο Εθνικής Παιδείας και Θρησκευμάτων.
2. Canterbury, J.L., *Pay-as-you-throw*. Public works, 1999. **130**(6).
3. Δήμος, Ελευσίνας, et al., *Ανάπτυξη των συστημάτων "Πληρώνω Όσο Πετάω" σε Ελλάδα, Εσθονία και Κύπρο*, in *Life + Environment Policy and Governance LIFE07/ENV/GR/000271*. 2009. p. 9.
4. Οικολογική Εταιρεία Ανακύκλωσης, *Η εφαρμογή των συστημάτων Πληρώνω Όσο Πετάω στην Ελλάδα*, in *Μελέτη στα πλαίσια του προγράμματος Life 07/ENV/GR/000271 Δράση 2.2.2.1*. 2011: Αθήνα.
5. Καραγιαννίδης, Α., Α. Ξηρογιαννοπούλου, and Π. Αδηλενίδου, *Διαχείριση απορριμμάτων και αστικό περιβάλλον*. 2006, Technical Chamber of Greece: Θεσσαλονίκη.
6. Aspinwall, E., *Local Authority Waste Charging Scheme. Best Practice Evaluation Study*, in *Final Report No SR (00) F*. 2000: Edinburgh.
7. Miranda, M.L. and E.J. Aldy, *Recycling jumps when communities use unit pricing for residential garbage*. Duke University Research Project, Resource Recycling, 1996: p. 27-31.

8. Hong, S., *The effects of unit pricing system upon household solid waste management: The Korean experience*. Journal of Environmental Management, 1999. **57**(1): p. 1-10.
9. Αμπατζόγλου, Γ., Α. Αναστασίου, and Ε. Μακρή, *Δήμος Ελευσίνας: Μελέτη στα πλαίσια του προγράμματος "Πληρώνω όσο Πετάω" στην Ελλάδα, Εσθονία και Κύπρο LIFE+07ENV/GR/000271*. 2011.
10. Aremu, A., O. Adeleke, and B. Sule, *A GIS-Based Optimization Technique for Spatial Location of Municipal Waste Bins in a Developing City*. Ethiopian Journal of Environmental Studies and Management, 2011. **4**(3): p. 65-72.
11. Vijay, R., et al., *Estimation and allocation of solid waste to bin through geographical information systems*. Waste management & research, 2005. **23**(5): p. 479-484.
12. Chalkias, C. and K. Lasaridi, *A GIS based model for the optimisation of municipal solid waste collection: The case study of Nikea, Athens, Greece*. WSEAS Transactions on Environment on and Development, 2009. **1**: p. 11-15.
13. Erkut, E., et al., *A multicriteria facility location model for municipal solid waste management in North Greece*. European Journal of Operational Research, 2008. **187**(3): p. 1402-1421.
14. Karadimas, N.V. and V.G. Loumos, *GIS-based modelling for the estimation of municipal solid waste generation and collection*. Waste Management & Research, 2008. **26**(4): p. 337-346.

15. Chang, N.-B. and S. Wang, *A fuzzy goal programming approach for the optimal planning of metropolitan solid waste management systems*. European journal of operational research, 1997. **99**(2): p. 303-321.
16. Clark, R.M. and J.C. Lee, *Systems planning for solid waste collection*. Computers & Operations Research, 1976. **3**(2): p. 157-173.
17. Gottinger, H.W., *A computational model for solid waste management with application*. European Journal of Operational Research, 1988. **35**(3): p. 350-364.
18. Badran, M.F. and S.M. El-Haggag, *Optimization of municipal solid waste management in Port Said – Egypt*. Waste Management, 2006. **26**(5): p. 534-545.
19. Coutinho-Rodrigues, J., L. Tralhão, and L. Alçada-Almeida, *A bi-objective modeling approach applied to an urban semi-desirable facility location problem*. European Journal of Operational Research, 2012. **223**(1): p. 203-213.
20. Bautista, J. and J. Pereira, *Modeling the problem of locating collection areas for urban waste management. An application to the metropolitan area of Barcelona*. Omega, 2006. **34**(6): p. 617-629.
21. Ghiani, G., et al., *Capacitated location of collection sites in an urban waste management system*. Waste Management, 2012. **32**(7): p. 1291-1296.
22. Ghiani, G., et al., *The impact of an efficient collection sites location on the zoning phase in municipal solid waste management*. Waste Management, 2014. **34**(11): p. 1949-1956.

23. Tralhão, L., J. Coutinho-Rodrigues, and L. Alçada-Almeida, *A multiobjective modeling approach to locate multi-compartment containers for urban-sorted waste*. Waste Management, 2010. **30**(12): p. 2418-2429.
24. Toso, E.A.V. and D. Alem, *Effective location models for sorting recyclables in public management*. European Journal of Operational Research, 2014. **234**(3): p. 839-860.
25. Chen, H.-W. and N.-B. Chang, *Prediction analysis of solid waste generation based on grey fuzzy dynamic modeling*. Resources, Conservation and Recycling, 2000. **29**(1): p. 1-18.
26. Matsuto, T. and N. Tanaka, *Data analysis of daily collection tonnage of residential solid waste in Japan*. Waste management & research, 1993. **11**(4): p. 333-343.
27. Navarro-Esbrí, J., E. Diamadopoulos, and D. Ginestar, *Time series analysis and forecasting techniques for municipal solid waste management*. Resources, Conservation and Recycling, 2002. **35**(3): p. 201-214.
28. Beigl, P., et al. *Forecasting municipal solid waste generation in major European cities*. in *iEMSs 2004 International Congress: Complexity and Integrated Resources Management, Osnabrueck, Germany*. 2004.
29. Benítez, S.O., et al., *Mathematical modeling to predict residential solid waste generation*. Waste Management, 2008. **28**: p. S7-S13.
30. Lebersorger, S. and P. Beigl, *Municipal solid waste generation in municipalities: Quantifying impacts of household structure, commercial waste and domestic fuel*. Waste management, 2011. **31**(9): p. 1907-1915.

31. Beigl, P., S. Lebersorger, and S. Salhofer, *Modelling municipal solid waste generation: A review*. Waste management, 2008. **28**(1): p. 200-214.
32. Katsamaki, A., S. Willems, and E. Diamadopoulos, *Time series analysis of municipal solid waste generation rates*. Journal of Environmental Engineering, 1998. **124**(2): p. 178-183.
33. Fazar, W., *Program Evaluation and Review Technique*. The American Statistician, 1959. **13**(2): p. 10.
34. Casella, G. and R.L. Berger, *Statistical inference*. Vol. 2. 2002: Duxbury Pacific Grove, CA.
35. OECD, *Municipal waste*. OECD Environment Statistics (database). 2014, OECDiLibrary.
36. Williams, H.P., *Model building in mathematical programming*. 1999.