



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΠΕΙΡΑΙΩΣ**



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ

«ΟΡΓΑΝΩΣΗ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ»

ΕΙΔΙΚΕΥΣΗ: ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΔΙΑΚΙΝΗΣΗΣ & ΔΙΑΝΟΜΗΣ / LOGISTICS

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μελέτη προβλήματος βέλτιστης φόρτωσης εμπορευματοκιβωτίων

ΣΤΥΛΙΑΝΟΣ ΑΝΤΩΝΗΣ

Επιβλέπων Καθηγητής: Γιαννατσής Ιωάννης

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ

ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2014

Περίληψη

Η διαδικασία φόρτωσης κιβωτίων σε εμπορευματοκιβώτια/κοντέινερ (*container*) αποτελεί μια λειτουργία καίριας σημασίας για την ορθότερη και οικονομικότερη εξέλιξη ολόκληρης της εφοδιαστικής αλυσίδας. Η βελτίωση της αξιοποίησης του διαθέσιμου χώρου αποτελεί πλέον ένα πολύ σημαντικό πεδίο έρευνας και μελέτης καθώς η παγκόσμια οικονομία και οι μεταφορές γίνονται ολοένα και πιο ανταγωνιστικές. Η εύρεση αποτελεσματικών μεθόδων επίλυσης προβλημάτων φόρτωσης πέραν της οικονομικής σημασίας που έχει για την εφοδιαστική αλυσίδα και τις διαδικασίες μεταφοράς, έχει επίσης πολύ σημαντικό αντίκτυπο στη προστασία του περιβάλλοντος, καθώς συντελεί στην μείωση της κατανάλωσης καυσίμων και επομένως της ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Σφάλματα κατά την διαδικασία αυτή μπορεί να οδηγήσουν σε επιπλέον κόστη και μη τήρηση χρονοδιαγραμμάτων με σημαντικές επιπτώσεις. Επομένως, δεν αποτελεί έκπληξη ότι το πρόβλημα της βέλτιστης φόρτωσης εμπορευματοκιβωτίων έχει μελετηθεί διεξοδικά και με πολλές προσεγγίσεις στην βιβλιογραφία. Καθώς η βέλτιστη τοποθέτηση και στοίβαξη κιβωτίων σε εμπορευματοκιβώτια αποτελεί ένα εξαιρετικά δύσκολο πρόβλημα στην επίλυση του με συμβατικούς τρόπους υπολογισμού, λόγω του όγκου των πιθανών λύσεων, έχει προταθεί στην βιβλιογραφία η χρήση ειδικών ευρετικών αλγόριθμων όπου καθιστούν την επίλυση σαφώς γρηγορότερη και εγκυρότερη. Η επίλυση με γενετικούς αλγόριθμους, βασίζεται στην θεωρία της εξέλιξης έως ότου βρεθεί η βέλτιστη δυνατή λύση. Στην παρούσα εργασία, εξετάζεται η αποδοτικότητα του σχετικά νέου γενετικού αλγορίθμου *I-DBLF* ο οποίος χρησιμοποιήθηκε ως βάση για την ανάπτυξη μιας αντίστοιχης εφαρμογής σε περιβάλλον *MATLAB*. Η αναπτυχθείσα εφαρμογή δοκιμάστηκε σε μια σειρά επιλεγμένων προβλημάτων από τη διεθνή βιβλιογραφία, τα αποτελέσματα από την επίλυση των οποίων παρουσιάζονται αναλυτικά.

Λέξεις κλειδιά: πρόβλημα φόρτωσης εμπορευματοκιβωτίων, γενετικός αλγόριθμος, βελτιστοποίηση με ευρετικές μεθόδους

Abstract

Loading boxes inside a container is a procedure of great importance for the proper and economic function of the entire supply chain. Improving the efficiency and utilization of the available space has become a very important field of research as the global economy and transportation are becoming increasingly competitive. Finding effective methods of solving three-dimensional loading problems, is not only economically important in logistics and transport processes, but also has a significant impact on the environment, since it affects fuel consumption and therefore air pollution. Errors in this process can lead to additional costs and non-compliance schedules. Not surprisingly, therefore, the problem of optimal loading of containers has been extensively studied and various approaches have been proposed in the relevant literature. Since the optimal placement and stacking of boxes inside the containers is an extremely difficult problem to solve with conventional methods of calculation, due to the amount of possible solutions, several heuristic algorithms, which make solving of these problems clearly faster and more reliable, have been proposed. Genetic algorithms, which are a class of heuristic algorithms follow an evolutionary process in order to find the optimal solution. In the present study, the efficiency of the relatively new algorithm I-DBLF, as developed in *MATLAB*, is studied. Detailed test results of the developed instance of the algorithm, in selected problems from the relevant literature, are presented.

Keywords: container loading problem, genetic algorithm, heuristic optimization

Πίνακας περιεχομένων

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	II
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ	VII
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	VIII
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1 ΣΚΟΠΟΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	1
1.2 ΔΟΜΗ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	3
2 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ	4
2.1 ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΦΟΡΤΩΣΗΣ	4
2.2 ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ	7
2.3 ΕΙΔΗ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ	8
2.3.1 Ακριβείς αλγόριθμοι	10
2.3.2 Προσεγγιστικοί αλγόριθμοι	11
2.3.3 Μεταερευνητικοί αλγόριθμοι	11
2.4 Η ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΑΠΟ ΔΙΑΦΟΡΟΥΣ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥΣ	13
2.5 ΓΕΝΕΤΙΚΟΙ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ	14
2.6 ΟΡΟΛΟΓΙΑ	16
2.7 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΓΕΝΕΤΙΚΩΝ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ	18
2.8 ΕΞΕΛΙΞΗ ΓΕΝΕΤΙΚΩΝ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ	19
2.9 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΓΕΝΕΤΙΚΩΝ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ	20
3 ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ	22
3.1 ΟΡΙΣΜΟΣ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ CONTAINER ΚΑΙ ΚΙΒΩΤΙΩΝ	22
3.2 ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΗ ΚΙΒΩΤΙΩΝ	23
3.3 ΟΡΙΣΜΟΣ ΔΙΑΘΕΣΙΜΟΥ ΧΩΡΟΥ	25
3.4 Ο ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ I-DBLF	27
3.4.1 Εισαγωγικά	27
3.4.2 Στάδια λειτουργίας του αλγόριθμου	27
3.4.3 Επιλογή	30
3.4.4 Επιλογές Αναπαραγωγής	30
3.4.5 Mutation και Crossover	30
3.4.6 Κριτήρια τερματισμού	31
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ	32
3.5 ΔΕΔΟΜΕΝΑ (DATASETS)	32
3.6 ΕΠΙΛΟΓΕΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ	33
3.7 ΕΝΤΟΛΕΣ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ (INPUT)	34

3.8 ΈΞΟΔΟΣ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ (OUTPUT)	35
4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	37
4.1 ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ.....	37
4.2 ΤΕΛΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	41
4.2.1 Ελαφρώς ετερογενή κιβώτια	43
4.2.2 Έντονα ετερογενή κιβώτια	47
4.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	50
5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	53
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	55
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ	59

Πανεπιστήμιο Πειραιώς

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Γιαννασή Ιωάννη για την στήριξη και συνεχή καθοδήγηση του καθόλη τη διάρκεια της διπλωματικής μου εργασίας και τον Δρ. Καννελίδη Βασίλη για την πολύτιμη βοήθεια και προτάσεις του στην χρήση του προγράμματος *MATLAB*. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου Δρ. Αλεξόπουλο Νικόλαο, του τμήματος Μηχανικών Οικονομίας και Διοίκησης του Πανεπιστημίου Αιγαίου, για όσα μου δίδαξε τόσο σε θέματα εκπαίδευσης όσο και της καθημερινότητας. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω πάνω από όλα τους γονείς μου, για την ευκαιρία που μου έδωσαν να παρακολουθήσω το Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών και να εμπλουτίσω περαιτέρω τις γνώσεις μου.

Πανεπιστήμιο Πειραιώς

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1 : Κατηγοριοποίηση και ομαδοποίηση είδη αλγορίθμων.....	9
Εικόνα 2 : Βασικές κατηγορίες μεθόδων βελτιστοποίησης	9
Εικόνα 3 : Γραφική αναπαράσταση δομής πληθυσμού γενετικού αλγορίθμου.....	16
Εικόνα 4 : Διαδικασία διασταύρωση.....	17
Εικόνα 5 : Διαδικασία μετάλλαξης	18
Εικόνα 6 : Τριδιάστατη απεικόνιση container στον άξονα των συντεταγμένων	23
Εικόνα 7 : Οι έξι περιπτώσεις περιστροφών. (i) καμία περιστροφή (ii) περιστροφή στον x άξονα κατά 90° (iii) περιστροφή στον z άξονα κατά 90° (iv) περιστροφή στον y άξονα κατά 90° (v) περιστροφή στον x άξονα κατά 90° και έπειτα στον z κατά 90° (vi) περιστροφή στον z άξονα κατά 90° και έπειτα στον x κατά 90°.....	24
Εικόνα 8 : Τοποθέτηση κιβωτίου στην DBLF θέση του container.....	25
Εικόνα 9 : (α) πλάγιος, (β) μπροστά και (γ) πάνω διαθέσιμος χώρος.....	26
Εικόνα 10 : Αναλυτική διαδικασία και στάδια λειτουργίας αλγόριθμου <i>I-DBLF</i>	29
Εικόνα 11: Δεδομένα αρχείου output.in.....	36
Εικόνα 12 : Παράδειγμα γραφικής απεικόνισης τοποθέτησης κιβωτίων	36
Εικόνα 13 : Γραφική απεικόνιση αποτελεσμάτων πειραμάτων 1, 2, 5 και 6 του dataset thpack8-2	38
Εικόνα 14 : Γραφική απεικόνιση αποτελεσμάτων πειραμάτων 7, 8, 9 και 10 του dataset thpack8-5	39
Εικόνα 15 : Γραφική απεικόνιση αποτελεσμάτων πειραμάτων 16 και 17 του dataset thpack8-12	40
Εικόνα 16 : Διάρκεια εκτέλεσης πειραμάτων ανά dataset.....	42
Εικόνα 17 : Γραφική απεικόνιση τοποθέτησης κιβωτίων για το dataset thpack8-5.....	44
Εικόνα 18 : Γραφική απεικόνιση τοποθέτησης κιβωτίων για το dataset thpack8-4	45
Εικόνα 19 : Γραφική απεικόνιση τοποθέτησης κιβωτίων για το dataset thpack8-12	46
Εικόνα 20 : Σύγκριση μεταξύ αρχικής τιμής για τυχαία τοποθέτηση και μ.ο. αποτελεσμάτων αλγόριθμου	47
Εικόνα 21 : Γραφική απεικόνιση τοποθέτησης κιβωτίων για το dataset thpack8-2	48
Εικόνα 22 : Γραφική απεικόνιση τοποθέτησης κιβωτίων για το dataset thpack8-15	49
Εικόνα 23 : Σύγκριση μεταξύ αρχικής τιμής για τυχαία τοποθέτηση και μ.ο. αποτελεσμάτων αλγόριθμου.....	50
Εικόνα 24 : Γραφική απεικόνιση μ.ο αποτελεσμάτων αλγόριθμου με μ.ο. βιβλιογραφίας.....	51

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1 : Αποτελέσματα αρχικών πειραμάτων	37
Πίνακας 2 : Συνολικός αριθμός πειραμάτων και διάρκεια εκτέλεσης τους.....	42
Πίνακας 3 : Τελικά αποτελέσματα ελαφρώς ετερογενών κιβωτίων	43
Πίνακας 4 : Τελικά αποτελέσματα έντονα ετερογενών κιβωτίων	47
Πίνακας 5 : Σύγκριση μ.ο αποτελεσμάτων αλγορίθμου με μ.ο. βιβλιογραφίας	51

Πανεπιστήμιο Πειραιώς

1 Εισαγωγή

1.1 Σκοπός εργασίας

Το κόστος μεταφοράς ενός εμπορευματοκιβωτίου (*freight rate*) υπολογίζεται από το άθροισμα του σταθερού κόστους χρήσης του εμπορευματοκιβωτίου/κοντέινερ (*container*) και του μεταβλητού κόστους, το οποίο εξαρτάται από το συνολικό βάρος και όγκο των μεταφερόμενων αντικειμένων εντός του κοντέινερ. Επομένως, είναι εμφανές ότι το κόστος μεταφοράς επηρεάζει άμεσα το συνολικό κόστος των προϊόντων. Λανθασμένη τοποθέτηση των αντικειμένων εντός του κοντέινερ μπορεί να οδηγήσει στην δημιουργία αχρησιμοποίητου χώρου και κενών ανάμεσα στα κιβώτια (Dyckhoff, 1990). Αυτός ο κενός χώρος μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα διάφορα προβλήματα όπως: αστάθεια των αντικειμένων, απαίτηση επιπλέον κοντέινερ για την μεταφορά των προϊόντων, αναγκαστική χρήση αερόσακων για την ακινητοποίηση των αντικειμένων κλπ. Όλα αυτά τελικώς οδηγούν σε αύξηση του τελικού κόστους των προϊόντων, με αποτέλεσμα η βέλτιστη φόρτωση να αποτελεί μια διαδικασία ιδιαίτερα κρίσιμη και καίριας σημασίας (Rajesh & Saravana, 2012).

Η αποτελεσματική χρήση των υλικών και η σωστή μεταφορά τους αποτελεί συγκριτικό πλεονέκτημα για τις επιχειρήσεις. Η σύγχρονη οικονομία στηρίζεται σε μεγάλες πολυεθνικές επιχειρήσεις, όπου το πλεονέκτημα τους στηρίζεται στην απρόσκοπτη διηπειρωτική μεταφορά μεγάλων ποσοτήτων υλικών και προϊόντων. Αυτό έχει οδηγήσει στην συνεχή έρευνα για αποτελεσματικότερους τρόπους διαχείρισης της εφοδιαστικής αλυσίδας, με απώτερο σκοπό την μείωση του κόστους και του χρόνου μεταφοράς. Οι μεγάλης κλίμακας επιδράσεις, ακόμα και με μικρές αλλαγές βελτίωσης της χρησιμοποίησης υλικών και του εκμεταλλευόμενου χώρου στις σύγχρονες διαδικασίες παραγωγής και διανομής, είναι δυνατόν να αποφέρουν σημαντικά πλεονεκτήματα στην εφοδιαστική αλυσίδα. Τέλος, ένα άλλο σημαντικό πλεονέκτημα αποτελεί ότι η σωστή φόρτωση κιβωτίων σε ένα χώρο μεταφοράς, μειώνει δραστικά την πιθανότητα

μετακινήσεων, προβλημάτων σταθερότητας και θραύσης των μεταφερόμενων αντικειμένων (Kang et al., 2012).

Για το λόγο αυτό, η εύρεση μιας αποτελεσματικής και εύχρηστης μεθόδου υπολογισμού της βέλτιστης φόρτωσης παραμένει σημαντικό πεδίο μελέτης στον ακαδημαϊκό χώρο, λόγω των εκτεταμένων πραγματικών εφαρμογών της σε καθημερινό επίπεδο. Συγκεκριμένα, Το τριδιάστατο πρόβλημα φόρτωσης και στοίβαξης κιβωτίων (*3D-BPP*) βρίσκει πολλές εφαρμογές κατά την διαδικασία του σχεδιασμού της παραγωγής και της μεταφοράς. Μερικά χαρακτηριστικά παραδείγματα πεδίων χρήσης είναι η φόρτωση εμπορευματοκιβωτίων σε πλοία, στοίβαξη παλετών, διαχείριση φορτίων αεροπλάνων και γενικότερα στη αποτελεσματική διαχείριση αποθηκευτικού χώρου.

Λόγω της πολυπλοκότητας υπολογισμού, για την επίλυση τέτοιου είδους προβλημάτων απαιτούνται εξελεγμένοι αλγόριθμοι¹ οι οποίοι αναλαμβάνουν την εκτέλεση όλων των υπολογισμών για την εξαγωγή αποτελεσμάτων. Υπάρχουν πολλά είδη αλγορίθμων για την επίλυση τέτοιου είδους προβλημάτων, με τον καθένα να έχει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα ανάλογα με τον τύπο προβλήματος προς επίλυση. Ένα από τα είδη αλγορίθμων, που έχουν προσελκύσει το ενδιαφέρον των επιστημόνων, είναι οι γενετικοί αλγόριθμοι οι οποίοι αποτελούν ένα τύπο αλγορίθμου εύρεσης βέλτιστων λύσεων. Οι γενετικοί αλγόριθμοι είναι εμπνευσμένοι από τη Δαρβινική θεωρία της εξέλιξης και μιμούνται την διαδικασία της επιλογής όπως γίνεται και στην φύση.

¹ Ως αλγόριθμος ορίζεται μια πεπερασμένη σειρά ενεργειών, αυστηρά καθορισμένων και εκτελέσιμων σε πεπερασμένο χρόνο, που στοχεύουν στην επίλυση ενός προβλήματος. Πιο απλά αλγόριθμο ονομάζουμε μία σειρά από εντολές που έχουν αρχή και τέλος, είναι σαφείς και εκτελέσιμες που σκοπό έχουν την επίλυση κάποιου προβλήματος. (Κωσταρέλου & Κοζανίδης, 2012)

1.2 Δομή εργασίας

Στο **Κεφάλαιο 2** παρουσιάζεται το πρόβλημα φόρτωσης, γίνεται βιβλιογραφική ανασκόπηση στα είδη αλγορίθμων που υπάρχουν και που έχουν χρησιμοποιηθεί στο παρελθόν για την επίλυση του. Στην συνέχεια περιγράφονται οι γενετικοί αλγόριθμοι, τα πλεονεκτήματα και η εξέλιξή τους τα τελευταία χρόνια. Τέλος, αναλύεται ο τρόπος λειτουργίας των γενετικών αλγορίθμων προκειμένου να γίνει κατανοητός ο τρόπος επίλυσης του προβλήματος.

Στο **Κεφάλαιο 3** ορίζεται το πρόβλημα και το επιθυμητό αποτέλεσμα, ενώ παράλληλα παρουσιάζονται οι έννοιες του βαθύτερου, χαμηλότερου και αριστερότερου σημείου καθώς και του διαθέσιμου χώρου. Τέλος, παρουσιάζονται αναλυτικά οι διαδικασίες και τα στάδια του αλγορίθμου *I-DBLF*.

Στο **Κεφάλαιο 4** γίνεται παρουσίαση του αλγορίθμου που κατασκευάστηκε, των διαθέσιμων επιλογών του, καθώς και αναλυτική περιγραφή των εντολών για την εκτέλεσή του. Επίσης παρουσιάζονται τα σετ δεδομένων (*datasets*) που χρησιμοποιήθηκαν για την εκτέλεση των πειραμάτων.

Στο **Κεφάλαιο 5** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την εκτέλεση του αλγορίθμου για δύο διαφορετικές περιπτώσεις φορτίων, φορτίων με ελαφρώς ετερογενή κιβώτια και άλλων έντονα ετερογενή κιβώτια. Επίσης γίνεται παρουσίαση των αποτελεσμάτων σε διαγράμματα και ο σχολιασμός τους. Τέλος, πραγματοποιείται σύγκριση με αντίστοιχα αποτελέσματα της βιβλιογραφίας.

Στο **Κεφάλαιο 6** παρουσιάζονται τα τελικά συμπεράσματα που εξήχθησαν από την εκτέλεση των πειραμάτων και την ανάλυσή τους, και αναφέρονται ενδεικτικά θέματα προς διερεύνηση σε μελλοντική μελέτη.

2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

2.1 Το πρόβλημα φόρτωσης

Σύμφωνα με την βιβλιογραφία, ως πρόβλημα φόρτωσης ενός εμπορευματοκιβωτίου ορίζεται η διαδικασία βέλτιστης τοποθέτησης κιβωτίων στον χώρο ενός κοντέινερ. Το πρόβλημα φόρτωσης, είναι ένα τριδιάστατο πρόβλημα φόρτωσης όπου ένα μεγάλο παραλληλεπίπεδο (εμπορευματοκιβώτιο) πρέπει να γεμίσει με μικρότερα παραλληλεπίπεδα (κιβώτια). Ο σκοπός είναι η μεγιστοποίηση του συνολικού όγκου των κιβωτίων που έχουν φορτωθεί και η βέλτιστη αξιοποίηση του διαθέσιμου χώρου.

Το είδος του προβλήματος μπορεί να χωριστεί ανάλογα με τον αριθμό διαφορετικών τύπων κιβωτίων προς φόρτωση, σε τρεις βασικές κατηγορίες:

- α) έντονα ετερογενές, όπου υπάρχουν πολλά είδη κιβωτίων με διαφορετικές διαστάσεις,
- β) ελαφρώς ετερογενές, με λίγα διαφορετικά είδη κιβωτίων και στα
- γ) ομοιογενή, όπου όλα τα κιβώτια έχουν ίδιο σχήμα και διαστάσεις (Araya & Riff, 2014).

Στην βιβλιογραφία οι περισσότερες αναφορές ασχολούνται με περιπτώσεις ελαφρώς ετερογενών φορτίων (Ngoi, et al., 1994), (Bischoff & Marriott, 1990) και (Pisinger, 1997) λόγω κυρίως της πολυπλοκότητας των προβλημάτων με έντονα ετερογενή κιβώτια.

Ένας άλλος βασικός διαχωρισμός σύμφωνα με τους Wäscher et al. (2007) γίνεται βάση του αριθμού των κοντέινερ προς φόρτωση. Εάν δηλαδή υπάρχουν άπειρα διαθέσιμα κοντέινερ, όπου μπορούν να φορτωθούν τα κιβώτια, εάν μόνο ένας συγκεκριμένος αριθμός κιβωτίων μπορεί να φορτωθεί και τέλος την περίπτωση ενός μόνο κοντέινερ, όπου πρέπει να φορτωθούν όσο το δυνατόν περισσότερα κιβώτια. Η πρώτη περίπτωση αποτελεί την κατηγορία προβλημάτων ελαχιστοποίησης εισόδου (*input minimization type*), η δεύτερη της μεγιστοποίησης εξόδου (*output maximization type*) και η τελευταία της βελτιστοποίησης χρήσης (*utilization maximization type*).

Οι παραλλαγές της πρώτης περίπτωσης (*input minimization type*) που συναντώνται στην βιβλιογραφία είναι:

- *Single Stock-Size Cutting Stock Problem (SSSCSP)*
Τοποθέτηση ελαφρώς ετερογενών κιβωτίων στον ελάχιστο δυνατό αριθμό κοντέινερ ίδιων διαστάσεων.
- *Multiple Stock-Size Cutting Stock Problem (MSSCSP)*
Τοποθέτηση ελαφρώς ετερογενών κιβωτίων σε ελαφρώς ετερογενή κοντέινερ με σκοπό την ελαχιστοποίηση του αριθμού των κοντέινερ.
- *Residual Cutting Stock Problem (RCSP)*
Τοποθέτηση ελαφρώς ετερογενών κιβωτίων σε έντονα ετερογενή κοντέινερ με σκοπό την ελαχιστοποίηση του αριθμού των κοντέινερ.
- *Single Bin-Size Bin Packing Problem (SBSBPP)*
Τοποθέτηση έντονα ετερογενών κιβωτίων στον ελάχιστο δυνατό αριθμό κοντέινερ ίδιων διαστάσεων.
- *Multiple Bin-Size Bin Packing Problem (MBSBPP)*
Τοποθέτηση έντονα ετερογενών κιβωτίων σε ελαφρώς ετερογενή κοντέινερ με σκοπό την ελαχιστοποίηση του αριθμού των κοντέινερ.
- *Residual Bin Packing Problem (RBPP)*
Τοποθέτηση έντονα ετερογενών κιβωτίων σε έντονα ετερογενή κοντέινερ με σκοπό την ελαχιστοποίηση του αριθμού των κοντέινερ.
- *Open Dimension Problem (ODP)*
Τοποθέτηση των κιβωτίων σε ένα μόνο κοντέινερ με μια ή περισσότερες μεταβλητές διαστάσεις ώστε να ελαχιστοποιηθεί ο όγκος του κοντέινερ.

Αντίστοιχα, οι παραλλαγές της δεύτερης περίπτωσης (*output maximization type*) είναι οι εξής:

- *Identical Item Packing Problem (IIPP)*
Φόρτωση ενός κοντέινερ με τον μέγιστο αριθμό ίδιων μικρών κιβωτίων.
- *Multiple Identical Large Object Placement Problem (MILOPP)*
Φόρτωση συγκεκριμένου αριθμού κοντέινερ ίδιων διαστάσεων με ελαφρώς ετερογενή κιβώτια, ώστε ο συνολικός όγκος των τοποθετημένων κιβωτίων να μεγιστοποιηθεί.
- *Multiple Heterogeneous Large Object Placement Problem (MHLOPP)*
Φόρτωση συγκεκριμένου αριθμού κοντέινερ με ελαφρώς διαφορετικές διαστάσεις, με ελαφρώς ετερογενή κιβώτια.
- *Multiple Identical Knapsack Problem (MIKP)*
Φόρτωση ενός συγκεκριμένου αριθμού κοντέινερ ίδιων διαστάσεων με έντονα ετερογενή κιβώτια.
- *Multiple Heterogeneous Knapsack Problem (MHKP)*
Φόρτωση συγκεκριμένου αριθμού κοντέινερ με ελαφρώς διαφορετικές διαστάσεις, με έντονα ετερογενή κιβώτια.

Τέλος, οι παραλλαγές της τελευταίας περίπτωσης (*utilization maximization type*) όπου αναφέρεται ως φόρτωση ενός μόνο κοντέινερ (*SCLP*), οι οποίες αποτελούν τις δύο περιπτώσεις που μελετήθηκαν στην παρούσα εργασία, είναι οι εξής:

- Φόρτωση ενός κοντέινερ με συγκεκριμένες διαστάσεις με ελαφρώς ετερογενή κιβώτια
- Φόρτωση ενός κοντέινερ με συγκεκριμένες διαστάσεις με έντονα ετερογενή κιβώτια.

2.2 Περιορισμοί προβλήματος

Οι περισσότερες έρευνες, για να επιτύχουν ακόμα καλύτερα αποτελέσματα και να καλύψουν όσο το δυνατόν περισσότερες εκδοχές καθημερινής χρήσης, προσπαθούν να χρησιμοποιήσουν πιθανούς περιορισμούς. Οι βασικότεροι και συνηθέστεροι περιορισμοί, οι οποίοι περιλαμβάνονται στο 70.6% των περιπτώσεων της βιβλιογραφίας, είναι:

- α) να μην υπάρχει υπερκάλυψη (*overlap*) μεταξύ των κιβωτίων μέσα στο κοντέινερ και
- β) ως προς τις περιστροφές που είναι δυνατόν να δεχτούν τα κιβώτια πριν την τοποθέτηση

Άλλοι πιθανοί περιορισμοί που μπορούν να χρησιμοποιηθούν είναι ως προς το βάρος των κιβωτίων αλλά και το συνολικό βάρος του εμπορευματοκιβωτίου, καθώς και τον κατάλληλο διαμοιρασμό του βάρους για την εξάλειψη προβλημάτων σταθερότητας. Οι Bischoff και Ratcliff (1995) έλαβαν υπόψη τους έναν επιπλέον περιορισμό, όπου θέτει συγκεκριμένο όριο στην πίεση που επιτρέπεται να ασκείται από τα κιβώτια στις υψηλότερες θέσεις. Η χρήση περιορισμών πέραν αυτών της υπερκάλυψης και των περιστροφών, όπως ο τελευταίος, αποτελούν μια άλλη κατηγορία προβλημάτων αυξημένης πολυπλοκότητας, η οποία ονομάζεται *Container Loading Problem (CLP)*. Στα προβλήματα *CLP*, όλα τα εμπορευματοκιβώτια έχουν συγκεκριμένες διαστάσεις και όλα τα κιβώτια πρέπει να τοποθετηθούν στον μικρότερο αριθμό κοντέινερ.

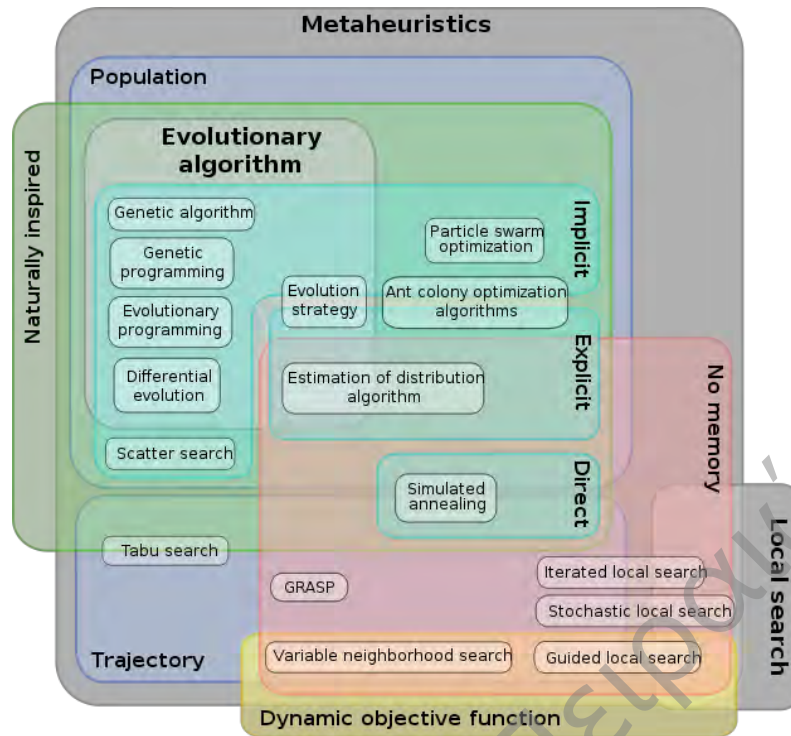
Η πολυπλοκότητα επίλυσης των προβλημάτων με την χρήση περιορισμών πέραν των βασικών, αποτελεί τον λόγο ύπαρξης σχετικά λιγότερων ερευνών στη βιβλιογραφία που να έχουν ασχοληθεί με περιορισμούς όπως το βάρος, η προτεραιότητα φόρτωσης των κιβωτίων, η σταθερότητα του κοντέινερ κλπ. Πιο συγκεκριμένα, από την αναζήτηση στη βιβλιογραφία (Bortfeldt & Wäscher, 2013) παρατηρήθηκε ότι:

- Το 22.1% των ερευνών δεν χρησιμοποιεί περιορισμούς,
- Το 14.1% χρησιμοποιεί περιορισμούς ως προς το βάρος,
- Το 11.7% χρησιμοποιεί περιορισμούς σχετικά με την κατανομή του βάρους, και
- Το 1.8% εξετάζει την προτεραιότητας φόρτωσης των κιβωτίων

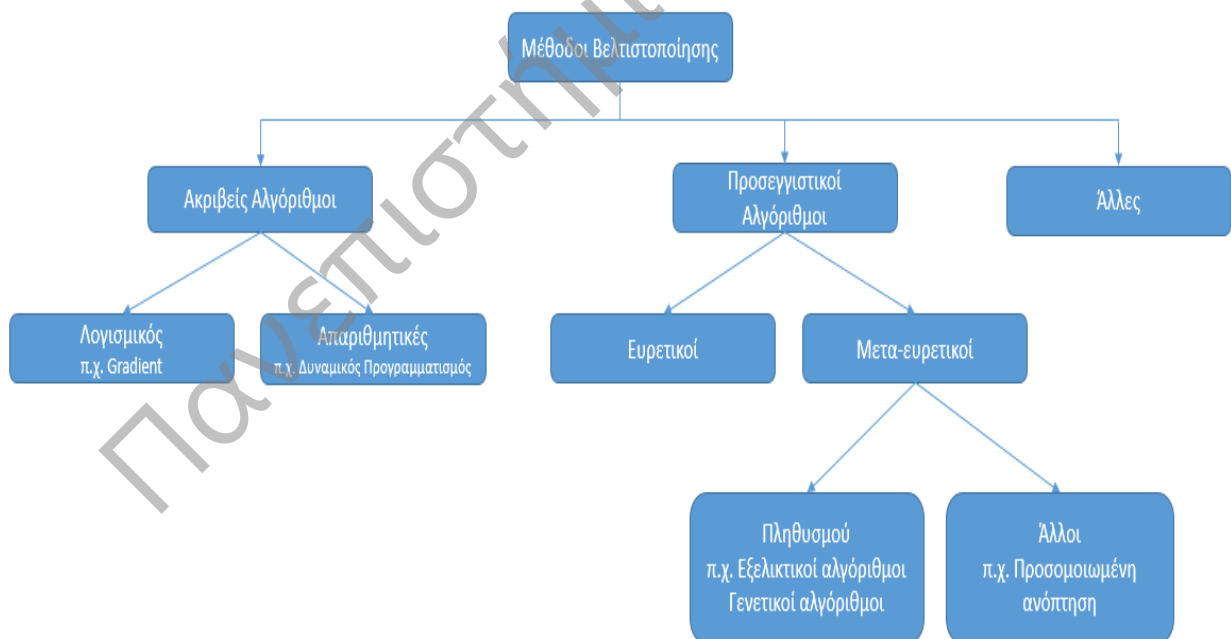
2.3 Είδη αλγόριθμων

Το πρόβλημα φόρτωσης του εμπορευματοκιβωτίου είναι ένα τυπικό *NP-hard* πρόβλημα². Τα προβλήματα της κλάσης αυτής είναι ιδιαίτερα πολύπλοκα στην επίλυση τους, απαιτούν μεγάλη υπολογιστική ισχύ και χρόνο επίλυσης. Οι κλασσικές τεχνικές της Επιχειρησιακής Έρευνας (γραμμικός και ακέραιος προγραμματισμός) αδυνατούν να επιλύσουν τέτοιου είδους ρεαλιστικά προβλήματα εξαιτίας του μεγάλου όγκου πράξεων και υπολογισμών που απαιτούνται για την εύρεση της βέλτιστης λύσης. Για αυτό το λόγο χρησιμοποιούνται συχνά ειδικοί μεταερευτικοί αλγόριθμοι (metaheuristics) οι οποίοι διευκολύνουν και επισπεύδουν την εύρεση της βέλτιστης λύσης. Υπάρχουν διάφορα είδη αλγόριθμων και κατηγοριοποιήσεις, όπου παρουσιάζονται στην Εικόνα 1 : (Wikipedia, 2014), εκ των οποίων οι βασικότερες παρουσιάζονται στην Εικόνα 2 (Καννελίδης, 2010).

² Ένα πρόβλημα π είναι NP-hard εάν δεδομένου οποιουδήποτε προβλήματος π' στο NP, υπάρχει πολυωνυμικός μετασχηματισμός του κάθε στιγμιότυπου του π' σε ένα στιγμιότυπο του π . Αυτό σημαίνει, ότι εάν μπορούμε να λύσουμε το π σε πολυωνυμικό χρόνο, τότε μπορούμε να λύσουμε το π' πολυωνυμικά επίσης. Εάν, επιπροσθέτως, το πρόβλημα π ανήκει στο NP, λέμε ότι το π είναι NP- complete (NP-πλήρες). Είναι σαν να λέμε ότι είναι το «δυσκολότερο» πρόβλημα στο NP (Plummer, 1993).



Εικόνα 1 : Κατηγοριοποίηση και ομαδοποίηση είδη αλγορίθμων.



Εικόνα 2 : Βασικές κατηγορίες μεθόδων βελτιστοποίησης.

Οι δύο βασικές κατηγορίες των αλγόριθμων βελτιστοποίησης είναι οι εξής:

- (i) Ακριβείς αλγόριθμοι³
- (ii) Προσεγγιστικοί αλγόριθμοι

2.3.1 Ακριβείς αλγόριθμοι

Υπάρχουν ελάχιστοι ακριβείς αλγόριθμοι στην βιβλιογραφία που ασχολούνται με το πρόβλημα φόρτωσης και αυτοί μπορούν να δεχτούν ελάχιστους ή ακόμα και καθόλου περιορισμούς. Το 2000 οι Martello et al., παρουσίασαν έναν ακριβή αλγόριθμο με την δυνατότητα χρήσης ενός περιορισμού μόνο, αυτόν της περιστροφής και ως μέγιστο αριθμό κιβωτίων προς φόρτωση μόνο 20 κιβώτια. Το 2004 ο Hifi παρουσίασε ένα ακριβή αλγόριθμο, χωρίς χρήση περιορισμών με δυνατότητα υπολογισμού για έως 50 κιβώτια προς φόρτωση, αλλά τα αποτελέσματα δεν ήταν πάντα το ίδιο ικανοποιητικά. Οι ακριβείς αλγόριθμοι αντιμετωπίζουν συχνά το φαινόμενο της «συνδυαστικής έκρηξης»⁴ καθώς αυξάνεται το μέγεθος του προβλήματος. Μελέτες για τους ακριβείς αλγόριθμους δείχνουν ότι λύνουν προβλήματα μόνο περιορισμένου μεγέθους, για αυτό τον λόγο έχουν περιορισμούς ως προς τον αριθμό των φορτίων.

³ Ο ακριβής αλγόριθμος βασίζεται σε μια διαδικασία που περιλαμβάνει την επαναμορφοποίηση του προβλήματος μέσω των συνθηκών βελτιστότητας KKT, και την παραγωγή τομών που αποκόπτουν λύσεις οι οποίες δεν είναι εφικτές. Η σημασία του ευρετικού αλγόριθμου έγκειται στο γεγονός ότι εκτός από τη δυνατότητα απευθείας εύρεσης ικανοποιητικών λύσεων για το πρόβλημα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή των τομών αυτών. (Κωσταρέλου & Κοζανίδης, 2012)

⁴ Συνδυαστική έκρηξη είναι το φαινόμενο κατά το οποίο στην πορεία επίλυσης ενός προβλήματος εμφανίζεται ένα εκρηκτικά αυξανόμενο πλήθος από ενδεχόμενα, τα οποία πρέπει να εξετασθούν διεξοδικά. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την μεγάλη σπατάλη χρόνου ή ακόμα και την αδυναμία εύρεσης λύσεως. (Οικονόμου, 2005)

2.3.2 Προσεγγιστικοί αλγόριθμοι

Εκτός από τους ακριβείς αλγόριθμους υπάρχουν και οι προσεγγιστικοί αλγόριθμοι, οι οποίοι δεν δίνουν απαραίτητα τη βέλτιστη λύση αλλά εγγυώνται μια συγκεκριμένη απόδοση (Vazirani, 2003). Στην βιβλιογραφία υπάρχουν αρκετοί προσεγγιστικοί αλγόριθμοι για επίλυση προβλημάτων τύπου *ODP* (Li & Cheng, 1990 - Miyazawa & Wakabayashi, 2007 - Frederickson & Solis-Oba, 2006 - Bansal, et al., 2007) όπως επίσης και για προβλήματα τύπου *SSSBPP* από τους Miyazawa και Wakabayashi (1999, 2007, 2009). Το κυριότερο μειονέκτημα τους είναι ότι οι αλγόριθμοι αυτοί δεν έχουν δοκιμασθεί με κάποιο περιορισμό.

Η σημαντικότερη κατηγορία των προσεγγιστικών αλγορίθμων είναι οι ευρετικοί αλγόριθμοι (*heuristic algorithms*). Οι ευρετικοί αλγόριθμοι διαχωρίζονται στις ακόλουθες κατηγορίες:

- (i) Κλασικοί ευρετικοί αλγόριθμοι
- (ii) Μεταευρετικοί αλγόριθμοι (αλγόριθμοι υπολογιστικής ευφυΐας)

Ένας κλασικός ευρετικός αποτελεί έναν αποτελεσματικό αλγόριθμο (εύρεση λύσεων εντός αποδεκτού χρονικού διαστήματος) που παράγει λύσεις, όχι απαραίτητα βέλτιστες, σε προβλήματα συνδυαστικής βελτιστοποίησης και του οποίου η αποδοτικότητα εξαρτάται κάθε φορά από το βαθμό ενσωμάτωσης των ιδιοτήτων του υπό εξέταση προβλήματος στον μηχανισμό λειτουργίας του.

2.3.3 Μεταευρετικοί αλγόριθμοι

Ο όρος μεταευρετικός (*metaheuristics*) επινοήθηκε από τους Glover και Kochenberger (2003) θέλοντας να περιγράψει μία ανώτερη στρατηγική, η οποία τροποποιεί άλλους ευρετικούς στο να παράγουν λύσεις πέρα από αυτές που παράγονται κατά την έρευνα της ευνοϊκότερης τοπικής συνθήκης, πέρα δηλαδή από τη λογική του αλγορίθμου επαναληπτικής βελτίωσης.

Η κατηγορία των μεταευρετικών αλγορίθμων περιέχει μια μεγάλη ποικιλία αλγορίθμων και διάφορους τρόπους για την κατηγοριοποίηση τους (Bianchi et al., 2009). Ένας από τους τρόπους κατηγοριοποίησης τους είναι ανάλογα με την στρατηγική αναζήτησης της λύσης. Ένας τύπος αναζήτησης της λύσης είναι βάσει απλά της βελτίωσης της λύσης. Σε αυτό το είδος μεταευρετικών αλγορίθμων συγκαταλέγονται οι αλγόριθμοι προσομοιωμένης απόπτωσης (*simulated annealing*), περιορισμένης έρευνας (*tabu search*), επαναληπτικής τοπικής αναζήτησης (*iterated local search*), μεταβλητής γειτονιάς αναζήτησης (*variable neighborhood search-VNS*) και η διαδικασία άπληστης τυχαιοποιημένης προσαρμοστικής αναζήτησης (*GRASP*) (Μαρινάκης et al., 2011).

Ο άλλος τύπος αναζήτησης της λύσης εμπεριέχει το στοιχείο της συνεχούς βελτίωσης μέσω της εκμάθησης σε κάθε αναζήτηση για τη λύση. Οι αλγόριθμοι που περιλαμβάνονται σε αυτή την κατηγορία είναι ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης αποικίας μυρμηγκιών (*ant colony optimization*), οι εξελικτικοί αλγόριθμοι (*evolutionary computation*) και οι γενετικοί αλγόριθμοι (*genetic algorithms*).

Ένας μεταευρετικός αλγόριθμος αποτελεί μία ευφυή διαδικασία επαναληπτικής βελτίωσης η οποία χρησιμοποιεί μη-εξαρτημένους από το εξεταζόμενο πρόβλημα μηχανισμούς καθοδήγησης υποδεέστερων ευρετικών, με σκοπό την επίτευξη ευρωστίας (*robustness*), της ισορροπίας δηλαδή ανάμεσα στην ικανότητα παραγωγής υψηλής ποιότητας λύσεων σε συγκεκριμένα προβλήματα από την μια μεριά, και στην ευελιξία που απαιτείται για την εφαρμογή σε πολλά διαφορετικά περιβάλλοντα από την άλλη (διαφορετικοί περιορισμοί, πόροι κτλ.).

Ως εκ τούτου, οι ευρετικές μέθοδοι και ιδιαίτερα οι μεταευρετικοί αλγόριθμοι αποτελούν την καλύτερη επιλογή για την επίλυση αυτού τους είδους των προβλημάτων. Μόνο οι ευρετικοί αλγόριθμοι έχουν την δυνατότητα να παρέχουν λύσεις ικανοποιητικής απόδοσης σε ικανοποιητικό χρόνο για ρεαλιστικές περιπτώσεις προβλημάτων και κυρίως όταν υπάρχουν περιορισμοί που πρέπει να ληφθούν υπόψη.

2.4 Η προσέγγιση του προβλήματος από διάφορους αλγόριθμους

Η πρώτη ουσιαστική προσέγγιση του προβλήματος φόρτωσης εμπορευματοκιβωτίου, πραγματοποιήθηκε από τους Christofides et al. το 1979 και αφορούσε το πρόβλημα φόρτωσης υγρών (Dowsland & Herbet, 2006). Το 1980 οι George και Robinson παρουσίασαν για πρώτη φορά ένα ευρετικό αλγόριθμο τύπου «χτισίματος τοίχου» (wall-building). Το 1990 οι Bischoff και Marriott, σύγκριναν 14 είδη αλγορίθμων που βασίζονται στην επίλυση ανά επίπεδα και κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η απόδοση των αλγορίθμων διαφέρει ανάλογα με τον αριθμό διαφορετικών κιβωτίων προς φόρτωση. Το 1995 οι Bischoff et al. παρουσίασαν ένα ευρετικό αλγόριθμο για το πρόβλημα φόρτωσης με ετερογενή κιβώτια με βάση την προσέγγιση του κενού χώρου. Εξελικτικοί αλγόριθμοι έχουν επίσης αναπτυχθεί από τους Bischoff και Ratcliff, στις εργασίες του Bischoff το 1995 και 2006 αντίστοιχα, καθώς επίσης και από τους Lim et al., οι οποίοι το 2005 ανέπτυξαν ένα νέο ευρετικό αλγόριθμο.

Στην συνέχεια, με το συνδυασμό κατασκευαστικών αλγορίθμων, άρχισαν να αναπτύσσονται οι μεταευρετικοί αλγόριθμοι. Μια σειρά από ερευνητικά αποτελέσματα έχουν δημοσιευθεί, χρησιμοποιώντας αλγορίθμους περιορισμένης έρευνας (*tabu search*) (Bortfeldt & Gehring, 1998), γενετικών αλγορίθμων (Gehring & Bortfeldt, 1997) και τέλος από το 2001 νέων υβριδικών αλγορίθμων (Bortfeldt & Gehring, 2001). Προκειμένου να βελτιωθεί η απόδοση των μετα-ευρετικών αλγορίθμων, χρησιμοποιήθηκε η τεχνική παραλληλοποίησης από τους Gehring και Bortfeldt (2002), Bortfeldt et al. (2003) και Mack et al. (2004). Με βάση την προσέγγιση του ελεύθερου χώρου, οι Moura και Oliveira (2005) πρότειναν έναν «άπληστο» (*greedy*)⁵ αλγόριθμο τυχαίας προσαρμοστικής αναζήτησης (*GRASP*). Το 2007 οι Parreño et al. βελτίωσαν περαιτέρω τον *GRASP* εφαρμόζοντας την προσέγγιση του μέγιστου χώρου. Πρόσφατα, οι Parreño et al. (2010) παρουσίασαν ένα νέο αλγόριθμο, τύπου μεταβλητής γειτονιάς αναζήτησης (*VNS*), που

⁵ Ένας άπληστος αλγόριθμος (*greedy algorithm*) πάντα κάνει την επιλογή που φαίνεται καλύτερη τη δεδομένη στιγμή.

χρησιμοποιεί έναν εξελικτικό αλγόριθμο ο οποίος βασίζεται στην έννοια του μέγιστου χώρου. Οι He και Huang (2011) ανέπτυξαν έναν εξελεγκτικό αλγόριθμο, συνδυάζοντας τον κατασκευαστικό αλγόριθμο με την τοπική αναζήτηση για το πρόβλημα της φόρτωσης κοντέινερ.

Επιπλέον, μέθοδοι επίλυσης με την μέθοδο του δέντρου αναζήτησης ή γραφημάτων έχουν επίσης δοκιμαστεί με επιτυχία στο πρόβλημα φόρτωσης. Για παράδειγμα οι Morabito και Arenales το 1994 παρουσίασαν μια μέθοδο αναζήτησης βασισμένη σε γραφήματα *AND/OR*. Αντίστοιχα ο Hifi το 2006 πρότεινε μια μέθοδο βασισμένη στην επίλυση με δέντρο αναζήτησης. Το 2002 ο Pisinger παρουσίασε έναν αλγόριθμο που χωρίζει πρώτα ολόκληρο το χώρο του κοντέινερ σε διάφορες κάθετες στρώσεις, κατόπιν διαιρεί τα στρώματα σε έναν αριθμό από οριζόντιες ή κάθετες λωρίδες και στη συνέχεια χρησιμοποιεί έναν αλγόριθμο τύπου *knapsack* για το πρόβλημα. Τέλος, το 2010 οι Fanslau και Bortfeldt πρότειναν μια αποτελεσματική μέθοδο με αλγόριθμο δέντρου με βάση την ιδέα του σύνθετου μπλοκ, ο οποίος αποτελεί και τον καλύτερο αλγόριθμο στη διαθέσιμη βιβλιογραφία.

Κατά τα τελευταία 10 χρόνια, οι νεότεροι αποδοτικότεροι μεταερευνητικοί αλγόριθμοι έχουν αντικαταστήσει πλέον τους συμβατικούς αλγόριθμους με κυριότερους των Bortfeldt και Gehring (2001), Hemmink (1994) και Karabulut και Mustafa (2004) με την μέθοδο του *Deepest Bottom Left with Fill (DBLF)*, πάνω στην οποία βασίστηκε και η κατασκευή του γενετικού αλγόριθμου της παρούσας εργασίας με κάποιες περαιτέρω προσθήκες.

2.5 Γενετικοί αλγόριθμοι

Η κύρια ιδέα πίσω από την λειτουργία των γενετικών αλγόριθμων είναι η εξέλιξη των οργανισμών στην ίδια τη φύση. Η πρώτη τους ολοκληρωμένη παρουσίαση πραγματοποιήθηκε το 1975 από τον Holland. Οι γενετικοί αλγόριθμοι ανήκουν στο κλάδο της επιστήμης υπολογιστών και αποτελούν μια μέθοδο αναζήτησης βέλτιστων λύσεων σε συστήματα που μπορούν να περιγραφούν μαθηματικά. Είναι χρήσιμοι σε προβλήματα που περιέχουν πολλές παραμέτρους /

διαστάσεις και για τα οποία δεν υπάρχει αναλυτική μέθοδος ικανή να βρει το βέλτιστο συνδυασμό τιμών για τις μεταβλητές, ώστε το υπό εξέταση σύστημα να αντιδρά κατά το βέλτιστο επιθυμητό τρόπο. Ο τρόπος λειτουργίας των γενετικών αλγορίθμων είναι εμπνευσμένος από τη βιολογία και χρησιμοποιεί την ιδέα της εξέλιξης μέσω της φυσικής επιλογής, της διασταύρωσης και της γενετικής μετάλλαξης.

Η βασική ιδέα της φυσικής επιλογής στην οποία στηρίζονται οι γενετικοί αλγόριθμοι περιγράφεται από τον Michalewicz (1996) με το ακόλουθο παράδειγμα:

«Ας υποθέσουμε ότι μελετάμε έναν πληθυσμό από κουνέλια. Κάποια από αυτά είναι γρηγορότερα και εξυπνότερα από τα υπόλοιπα. Αυτά τα ταχύτερα και ευφυέστερα κουνέλια είναι πολύ πιθανό να επιζήσουν σε μια επιδρομή από αλεπούδες και να μπορέσουν έτσι να συνεχίσουν το έργο που γνωρίζουν καλύτερα από κάθε άλλο, να κάνουν κουνέλια. Αντίθετα, τα πιο αργά και λιγότερο έξυπνα κουνέλια κατά πάσα πιθανότητα θα αφανιστούν ύστερα από μια τέτοια επιδρομή, χωρίς βέβαια να αποκλείσουμε και το ενδεχόμενο ότι ορισμένα από αυτά θα επιζήσουν επειδή, απλά, στάθηκαν τυχερά. Ο πληθυσμός, λοιπόν, που θα επιζήσει της επιδρομής θα αρχίσει κάποτε να αναπαράγεται. Το γενετικό υλικό που θα χρησιμοποιηθεί για το νέο πληθυσμό κουνελιών θα προέρχεται από τη μείξη κάποιων αργών με κάποια γρήγορα κουνέλια, κάποιων γρήγορων με γρήγορα, κάποιων έξυπνων με κάποια χαζά κ.ο.κ. Και στην κορυφή αυτών, η φύση κατά καιρούς παράγει και κάποιο κουνέλι - φαινόμενο (γένους *lepus*) μεταλλάσσοντας κατά κάποιο τρόπο το ήδη υπάρχον γενετικό υλικό. Είναι προφανές ότι οι απόγονοι θα είναι κατά μέσο όρο γρηγορότερα και εξυπνότερα κουνέλια από τα προηγούμενα. Φυσικά το ίδιο συμβαίνει και για τις αλεπούδες, γιατί διαφορετικά τα κουνέλια θα γίνονταν κάποια στιγμή εξυπνότερα από τις αλεπούδες με αποτέλεσμα να χαλάσει ο βιολογικός κύκλος. Οι Γενετικοί Αλγόριθμοι ακολουθούν βήμα προς βήμα μια διαδικασία όμοια με της παραπάνω ιστορίας.»

2.6 Ορολογία

Οι γενετικοί αλγόριθμοι χρησιμοποιούν ορολογία δανεισμένη από το χώρο της Γενετικής. Κάθε πληθυσμός (*population*) αποτελείται από άτομα (*individuals*) ή γονότυπους (*genotypes*) και κάθε γονότυπος αποτελείται από χρωμοσώματα (*chromosomes*). Με την σειρά τους τα χρωμοσώματα αποτελούνται από γονίδια (*genes*) που είναι διατεταγμένα σε γραμμική ακολουθία. Κάθε γονίδιο επηρεάζει την κληρονομικότητα ενός ή περισσότερων χαρακτηριστικών. Το σύνολο του γενετικού υλικού, δηλαδή όλα τα χρωμοσώματα μαζί, ονομάζεται γονιδίωμα (*genome*). Ο όρος γονότυπος (*genotype*) αναφέρεται σε ένα συγκεκριμένο σύνολο γονιδίων που περιέχονται εντός ενός γονιδιώματος. Προκειμένου να γίνει κατανοητή η δομή ενός πληθυσμού, η παραπάνω ορολογία παρουσιάζεται γραφικά στην Εικόνα 3.



Εικόνα 3 : Γραφική αναπαράσταση δομής πληθυσμού γενετικού αλγορίθμου.

Τα γονίδια αποτελούν μόνιμες δομές (χαρακτηριστικά) ενώ αντίθετα τα χρωμοσώματα μπορούν να κατακερματιστούν και τα τμήματά τους να συνδυαστούν με διαφορετικούς τρόπους προκειμένου να δώσουν νέες ομάδες γονιδίων.

Συγκεκριμένα, στο πρόβλημα φόρτωσης ως γονιδιώματα ορίζονται οι πιθανές λύσεις, τα κιβώτια αποτελούν τα χρωμοσώματα, ενώ τέλος τα γονίδια είναι οι πληροφορίες - χαρακτηριστικά των κιβωτίων για την τοποθέτησή τους εντός του κοντέινερ.

Οι βασικές λειτουργίες των γενετικών αλγορίθμων, όπως συμβαίνει και στη φύση, είναι η αναπαραγωγή και η μετάλλαξη (*mutation*). Κατά τη διαδικασία της αναπαραγωγής δύο χρωμοσώματα ανταλλάσσουν γονίδια ώστε να παραχθεί ένα νέο σύνολο χρωμοσωμάτων που θα αποτελεί το νέο γονιδίωμα - λύση. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται διασταύρωση ή επιχιασμός (*crossover*). Η διαδικασία της διασταύρωσης, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 4, πραγματοποιείται με ανταλλαγή των γονιδίων ανάμεσα σε δύο απλοειδείς γονείς, δηλαδή ανάμεσα στα χρωμοσώματα δύο λύσεων της ίδιας γενιάς, όπου τα δύο χρωμοσώματα χωρίζονται στην ίδια τυχαία θέση και το πρώτο τμήμα του πρώτου χρωμοσώματος ενώνεται με το δεύτερο τμήμα του δεύτερου χρωμοσώματος και αντίστροφα, οπότε προκύπτουν δύο νέες λύσεις.



Εικόνα 4 : Διαδικασία διασταύρωσης.

Η διαδικασία της μετάλλαξης πραγματοποιείται με αλλαγή τιμής σε κάποιο γονίδιο σε μια τυχαία επιλεγμένη θέση του χρωμοσώματος. Η νέα τιμή λαμβάνεται από τα αλληλόμορφα (τις διαφορετικές τιμές που μπορεί να πάρει ένα γονίδιο) του συγκεκριμένου γονιδίου. Για παράδειγμα εάν η κωδικοποίηση γίνεται με δυαδικούς αριθμούς (όπως τις περισσότερες φορές), εάν το στοιχείο που επιλέχθηκε έχει τιμή 0 μετατρέπεται σε 1, ενώ αντίστοιχα εάν έχει τιμή 1 μετατρέπεται σε 0, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.



Εικόνα 5 : Διαδικασία μετάλλαξης.

2.7 Πλεονεκτήματα γενετικών αλγορίθμων

Μερικά από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα που έχει η χρήση γενετικών αλγορίθμων για την επίλυση προβλημάτων σύμφωνα με την βιβλιογραφία (Γεωργόπουλος & Λυκοθανάσης, 2008) είναι τα εξής:

1. Μπορούν να επιλύουν δύσκολα προβλήματα γρήγορα και αξιόπιστα.
2. Μπορούν εύκολα να συνεργαστούν με τα υπάρχοντα μοντέλα και συστήματα.
3. Είναι εύκολα επεκτάσιμοι και εξελίξιμοι.
4. Μπορούν να συμμετέχουν σε υβριδικές μορφές με άλλες μεθόδους.
5. Εφαρμόζονται σε πολύ περισσότερα πεδία από κάθε άλλη μέθοδο.
6. Δεν απαιτούν περιορισμούς στις συναρτήσεις που επεξεργάζονται.
7. Δεν ενδιαφέρει η σημασία της υπό εξέταση πληροφορίας.
8. Έχουν από τη φύση τους το στοιχείο του παραλληλισμού.
9. Είναι μία μέθοδος που κάνει ταυτόχρονα εξερεύνηση του χώρου αναζήτησης και εκμετάλλευση της ήδη επεξεργασμένης πληροφορίας.
10. Επιδέχονται παράλληλη υλοποίηση.

2.8 Εξέλιξη γενετικών αλγόριθμων

Στην βιβλιογραφία, οι περισσότερες έρευνες σχετικά με το πρόβλημα φόρτωσης κοντέινερ που χρησιμοποιούν γενετικούς αλγόριθμους βασίζονται σε μια τεχνική όπου ένα εμπορευματοκιβώτιο φορτώνεται ανά επίπεδο. Οι αλγόριθμοι όμως που χρησιμοποιούν αυτού του είδους την τεχνική, έχουν το μειονέκτημα της μειωμένης απόδοσης εάν απαιτείται κατακερματισμός του κιβωτίου προς φόρτωση στα αρχικά στάδια, λόγω μη εφαρμογής του εντός του διαθέσιμου χώρου. Ο ευρετικός αλγόριθμος που προτάθηκε από τους Karabulut και Mustafa το 2004, ακολουθεί την τεχνική της κάτω-αριστερά γωνίας (*Bottom Left - BL*) και της κάτω-αριστερά γωνίας με γέμισμα (*Bottom Left with Fill - BLF*), οι οποίες αρχικά χρησιμοποιήθηκαν για επίλυση προβλημάτων δύο διαστάσεων. Η τεχνική *BL* που πρωτοπαρουσιάστηκε το 1980 από τους Baker et al. περιγράφει την τοποθέτηση των αντικειμένων ένα-προς-ένα, κατά την οποία το τρέχον αντικείμενο τοποθετείται στην χαμηλότερη, πιο αριστερή διαθέσιμη θέση όπου είναι δυνατόν να τοποθετηθεί. Στην πορεία των χρόνων, αυτοί οι αλγόριθμοι επίλυσης διδιάστατων προβλημάτων δέχθηκαν πολλές βελτιώσεις από τις οποίες προέκυψε η τεχνική *BLF*, όπου διδιάστατα αντικείμενα τοποθετούνται στην χαμηλότερη δυνατή περιοχή του χώρου, προκειμένου να καλύψουν τους κενούς χώρους. Το 2004 οι Karabulut και Mustafa πρότειναν την τεχνική *Deepest Bottom Left with Fill (DBLF)*, όπου στην ουσία πρόκειται για μια εξέλιξη της τεχνικής *BLF* για τριδιάστατα προβλήματα, βάσει της οποίας ένα αντικείμενο μετακινείται και τοποθετείται στην βαθύτερη διαθέσιμη θέση (στον άξονα z) του χώρου, στην συνέχεια όσο πιο χαμηλά είναι δυνατό (στον άξονα y) και τέλος όσο το δυνατό πιο αριστερά (στον άξονα x). Το μειονέκτημα αυτής της τεχνικής αποτελεί ο βαθμός πολυπλοκότητας υπολογισμού της βέλτιστης λύσης και επομένως και ο χρόνος εύρεσης της. Έως σήμερα, οι αλγόριθμοι λαμβάνουν υπόψη μόνο ορθογώνια αντικείμενα, αλλά ήδη έχουν ξεκινήσει μελέτες για χρήση πολυγωνικών αντικειμένων, εφαρμογή που έχει αντίκρισμα σε επιχειρήσεις μετάλλων και υφασμάτων.

2.9 Λειτουργία γενετικών αλγόριθμων

Στην πράξη ο αλγόριθμος ξεκινάει με ένα σύνολο τυχαίων λύσεων, τα γονιδιώματα, οι οποίες συνιστούν τον αρχικό πληθυσμό. Κατόπιν ζητείται από τον αλγόριθμο να δημιουργήσει μια σειρά τυχαίων ανασυνδυασμών και μεταλλάξεων των γονιδιωμάτων. Οι πιο ικανές λύσεις για ένα συγκεκριμένο πρόβλημα συνεχίζουν να εξελίσσονται και ανασυνδυάζονται τυχαία, μέχρις ότου «επιβιώσουν» οι καλύτερες. Ο γενετικός αλγόριθμος εξελίσσεται βάσει μιας επαναλαμβανόμενης διαδικασίας, όπου σε κάθε μοναδικό γονιδίωμα δίνεται μια πιθανότητα να αναπαραχθεί. Η πιθανότητα αυτή αντιστοιχεί στο βαθμό καταλληλότητας (*fitness score*) του γονιδιώματος, που υπολογίζεται από μια συνάρτηση καταλληλότητας (*fitness function*).

Όλα τα γονιδιώματα έχουν πιθανότητα να αναπαραχθούν, όμως εκείνα με τους καλύτερους βαθμούς καταλληλότητας έχουν και τις μεγαλύτερες πιθανότητες αναπαραγωγής. Η αναπαραγωγή πραγματοποιείται στον πληθυσμό μέσω της διασταύρωσης, κατά την οποία δημιουργείται ένα νέο «παιδί - λύση» που αποκτάει κάποια από τα χαρακτηριστικά από τον κάθε «γονέα - λύση». Καθώς, τα γονιδιώματα με το χαμηλότερο βαθμό καταλληλότητας έχουν μικρότερες πιθανότητες αναπαραγωγής, εξαλείφονται σταδιακά κατά την διαδικασία της εξέλιξης. Για την παραγωγή νέων λύσεων, χρησιμοποιείται μια τεχνική διασταύρωσης όπου τα καλύτερα χαρακτηριστικά των δύο γονικών λύσεων συνδυάζονται για την παραγωγή δυο νέων λύσεων, που προστίθενται στον πληθυσμό των πιθανών λύσεων.

Για ακόμα καλύτερα αποτελέσματα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σαν επόμενο βήμα η διαδικασία της μετάλλαξης, όπου κάποιες λύσεις αντικαθίστανται με άλλες χαμηλότερης αποδοτικότητας βάσει μιας πιθανότητας που ορίζεται από τον χρήστη. Κατά την διαδικασία της μετάλλαξης, ένα χαρακτηριστικό μιας λύσης αντικαθίσταται με ένα νέο που πιθανώς να είναι καλύτερο. Ο σκοπός της αναπαραγωγής και της μετάλλαξης είναι η εισαγωγή παραλλαγών στον πληθυσμό, ώστε να παραχθεί τελικώς η καλύτερη δυνατή λύση. Αυτή η διαδικασία

επαναλαμβάνεται έως ότου ικανοποιηθεί μια συνθήκη τερματισμού του αλγόριθμου, συνήθως ένας αριθμός επαναλήψεων.

Συνήθως, όσο περισσότερες γενιές περνούν, τόσο καλύτερες λύσεις βρίσκονται, μπορεί όμως ο αλγόριθμος να βρεθεί σε σημείο του πεδίου των λύσεων από όπου και δεν μπορεί να προχωρήσει λόγω του ότι βρίσκεται σε τοπικό μέγιστο. Για το λόγο αυτό υπάρχουν διαφορετικές εκδοχές του αλγόριθμου ανάλογα με τη μορφή του προβλήματος.

Η επαναλαμβανόμενη διαδικασία αυτή του αλγόριθμου θα αποδώσει την βέλτιστη λύση στο πρόβλημα μετά από ορισμένες επαναλήψεις. Με τη χρήση ενός γενετικού αλγόριθμου δεν είναι εγγυημένη η εύρεση της βέλτιστης δυνατής λύσης σε ένα πρόβλημα, αλλά οι γενετικοί αλγόριθμοι δίνουν συνήθως ικανοποιητικά αποτελέσματα σε ικανοποιητικά σύντομο διάστημα.

Συνοπτικά τα βήματα ενός γενετικού αλγόριθμου μπορούν να περιγραφούν ως εξής:

- Δημιουργία τυχαίου αρχικού πληθυσμού P , με N υποψήφιες λύσεις
- Βαθμολόγηση χρησιμοποιώντας μια συνάρτηση καταλληλότητας
- Δημιουργία $N/2$ ζευγαριών γονέων
- Δημιουργία από τα ζευγάρια γονείς, δυο νέων λύσεων παιδιών
- Ο νέος πληθυσμός P' αποτελείται από το σύνολο των λύσεων παιδιών
- Επανάληψη διαδικασίας για το νέο πληθυσμό P'
- Έλεγχος του κριτηρίου τερματισμού

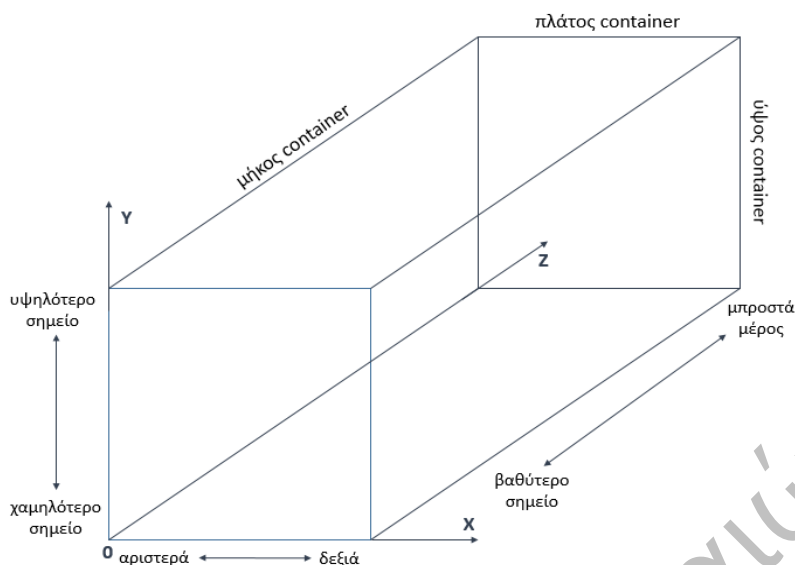
3 Ορισμός του προβλήματος

Στην παρούσα εργασία, ορθογώνια κιβώτια με συγκεκριμένες διαστάσεις πρέπει να τοποθετηθούν σε ένα κοντέινερ συγκεκριμένων επίσης διαστάσεων. Ο σκοπός είναι η εύρεση της βέλτιστης δυνατής λύσης φόρτωσης, όπου όλα τα κιβώτια ή όσο το δυνατόν περισσότερα τοποθετούνται στο κοντέινερ. Οι απαραίτητοι περιορισμοί που τέθηκαν ήταν οι εξής:

- κάθε κιβώτιο να έχει μια του πλευρά παράλληλη προς το οριζόντιο επίπεδο του κοντέινερ,
- κάθε κιβώτιο να στηρίζεται είτε από το οριζόντιο επίπεδο του κοντέινερ ή από άλλο κιβώτιο,
- κάθε κιβώτιο πρέπει να εμπεριέχεται πλήρως (να μην προεξέχει) στο κοντέινερ και
- δεν επιτρέπεται επικάλυψη μεταξύ των κιβωτίων.

3.1 Ορισμός διαστάσεων κοντέινερ και κιβωτίων

Κάθε σημείο εντός του χώρου του κοντέινερ αντιστοιχεί σε ένα διάνυσμα συντεταγμένων (x,y,z) όπως παρουσιάζεται και στην Εικόνα 6 :, όπου παρουσιάζονται και οι έννοιες του βαθύτερου, χαμηλότερου και αριστερότερου σημείου στο σημείο της αρχής των αξόνων.



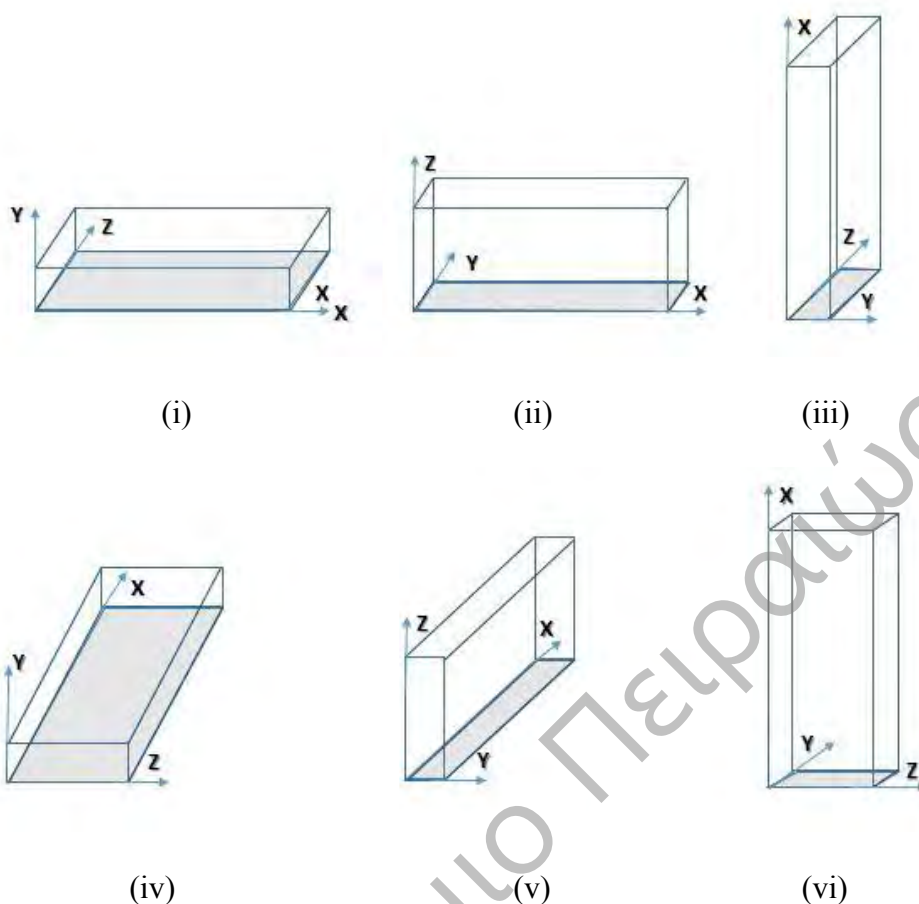
Εικόνα 6 : Τριδιάστατη απεικόνιση κοντέινερ στον άξονα των συντεταγμένων.

Κάθε κιβώτιο προσδιορίζεται από τρεις τιμές για τις διαστάσεις του, πλάτος, ύψος, μήκος. Ένα κιβώτιο τοποθετημένο στο κοντέινερ, αποκτάει τρεις τιμές ανάλογα με την θέση του στο χώρο και παραμένει αμετακίνητο καθ' όλη τη διάρκεια της διαδικασίας από την στιγμή της τοποθέτησής του.

3.2 Περιστροφή κιβωτίων

Για την αποφυγή των περιπτώσεων, όπου δεν χωράει κάποιο κιβώτιο στον εναπομείναντα χώρο, με αποτέλεσμα την μη βέλτιστη αξιοποίηση του χώρου, λήφθηκε υπόψη η δυνατότητα περιστροφής των κιβωτίων πριν την τοποθέτησή τους εντός του κοντέινερ. Στην Εικόνα 7 : παρουσιάζονται οι έξι εκδοχές περιστροφής, με την 1^η περίπτωση να αναπαριστά το κιβώτιο χωρίς περιστροφή και τις υπόλοιπες με περιστροφή ως προς τους άξονες. Στην παρούσα εργασία, εξετάστηκαν τρεις περιπτώσεις περιστροφής:

- Καθόλου περιστροφή των κιβωτίων
- Περιστροφή μόνο ως προς τον άξονα x (περιστροφή 2 διαστάσεων)
- Περιστροφή και ως προς τους τρεις άξονες x, y, z (περιστροφή 6 διαστάσεων)

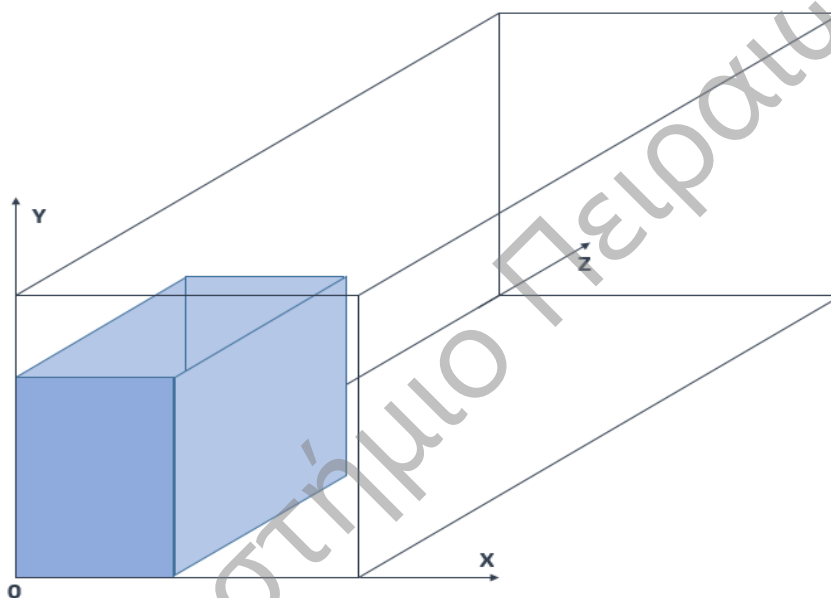


Εικόνα 7 : Οι έξι περιπτώσεις περιστροφών. (i) καμία περιστροφή (ii) περιστροφή στον x άξονα κατά 90° (iii) περιστροφή στον z άξονα κατά 90° (iv) περιστροφή στον y άξονα κατά 90° (v) περιστροφή στον x άξονα κατά 90° και έπειτα στον z κατά 90° (vi) περιστροφή στον z άξονα κατά 90° και έπειτα στον x κατά 90° .

Η δυνατότητα μελέτης και των τριών αυτών περιπτώσεων από την εφαρμογή που αναπτύχθηκε στην παρούσα εργασία, κρίθηκε απαραίτητη προκειμένου να μπορεί ο αλγόριθμος να εφαρμοστεί εύκολα σε διάφορες παραλλαγές του προβλήματος και να εξεταστεί η επίδραση αυτής της παραμέτρου στην καλύτερη αξιοποίηση του διαθέσιμου χώρου.

3.3 Ορισμός διαθέσιμου χώρου

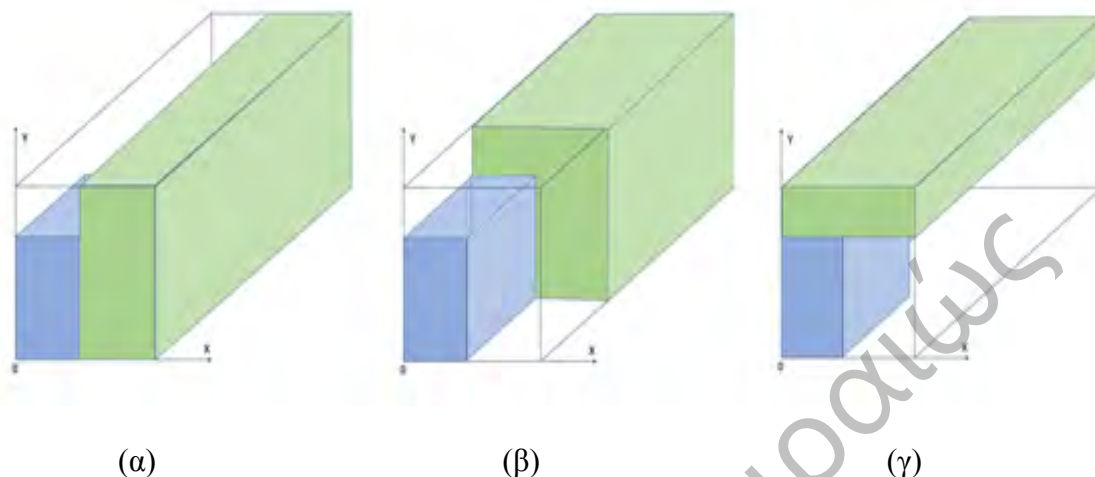
Ως διαθέσιμος χώρος του κοντέινερ ορίζεται ο εναπομείναντας χώρος όπου το επόμενο κιβώτιο είναι δυνατόν να τοποθετηθεί, ύστερα από την τοποθέτηση του τρέχοντος κιβωτίου. Η Εικόνα 8 παρουσιάζει ένα κιβώτιο τοποθετημένο στην βαθύτερη, χαμηλότερη και αριστερότερη δυνατή θέση του κοντέινερ βάσει του αρχικού εναπομείναντα χώρου, που ουσιαστικά είναι όλο το κοντέινερ.



Εικόνα 8 : Τοποθέτηση κιβωτίου στην DBLF θέση του κοντέινερ.

Στην αρχή της διαδικασίας, ένα διάνυσμα συντεταγμένων (λίστα χώρου) δημιουργείται με ένα μόνο διαθέσιμο χώρο, αρχικά, αυτόν του κοντέινερ. Ο αρχικός χώρος έχει διαστάσεις ίδιες με αυτές του κοντέινερ, το οποίο είναι αρχικά κενό, και τοποθετείται στην αρχή του συστήματος αξόνων. Κατά την διαδικασία της τοποθέτησης των κιβωτίων, και αφού τοποθετηθεί το πρώτο κιβώτιο, ένας νέος διαθέσιμος χώρος δημιουργείται με μικρότερες διαστάσεις από τον προηγούμενο. Ο μέγιστος αριθμός διαθέσιμων χώρων που μπορούν να δημιουργηθούν και να απεικονισθούν ως ορθογώνια, είναι τρεις. Η Εικόνα 9 παρουσιάζει αυτούς τους 3 διαθέσιμους χώρους, οι οποίοι ορίζονται ως μπροστά, πάνω και πλάγιος διαθέσιμος χώρος. Ένας διαθέσιμος

χώρος αφαιρείται από την λίστα των διαθέσιμων χώρων όταν χρησιμοποιηθεί πλήρως από κιβώτια ή είναι αδύνατη η τοποθέτηση κάποιου άλλου κιβωτίου.



Εικόνα 9 : (α) πλάγιος, (β) μπροστά και (γ) πάνω διαθέσιμος χώρος.

Η λίστα με τα μη τοποθετημένα κιβώτια, περιέχει όλα τα κιβώτια που δεν έχουν τοποθετηθεί στο κοντέινερ και κάθε κιβώτιο σε αυτή τη λίστα έχει αρνητικές συντεταγμένες θέσης. Η χρησιμότητα της λίστας αυτής έγκειται στην διευκόλυνση της εύρεσης του κιβωτίου με τον μικρότερο όγκο και όσων δεν είναι δυνατόν να τοποθετηθούν. Όταν ένα κιβώτιο τοποθετηθεί στο κοντέινερ, λαμβάνει τις συντεταγμένες της θέσης του και αφαιρείται από αυτή την λίστα και τοποθετείται στην λίστα με τα ήδη τοποθετημένα κιβώτια.

Μια λύση θεωρείται ολοκληρωμένη όταν όλα τα κιβώτια της λίστας με τα μη τοποθετημένα κιβώτια έχουν δοκιμαστεί να τοποθετηθούν στους εναπομείναντες διαθέσιμους χώρους του κοντέινερ και δεν ήταν δυνατόν να τοποθετηθούν ή όταν είναι η λίστα είναι κενή. Κάθε κιβώτιο επιλέγεται διαδοχικά από την λίστα και ο αλγόριθμος προσπαθεί να το τοποθετήσει στην *DBLF* θέση εντός του εναπομείναντα διαθέσιμου χώρου. Για να μπορεί να τοποθετηθεί ένα κιβώτιο μέσα σε ένα χώρο πρέπει να τηρούνται δύο απαραίτητες συνθήκες:

- α) ο χώρος πρέπει να έχει όγκο μεγαλύτερο από αυτόν του κιβωτίου και
- β) οι διαστάσεις του χώρου να είναι μεγαλύτερες από αυτές του κιβωτίου.

Εάν δεν τηρούνται αυτές οι δύο απαραίτητες συνθήκες, ο συγκεκριμένος διαθέσιμος χώρος απορρίπτεται και δοκιμάζονται οι άλλοι δύο διαθέσιμοι χώροι. Στην συνέχεια αφού πραγματοποιηθεί ο έλεγχος για τυχόν υπερκαλύψεις, το κιβώτιο τοποθετείται στην θέση του.

3.4 Ο Αλγόριθμος *I-DBLF*

3.4.1 Εισαγωγικά

Ο γενετικός αλγόριθμος που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία, βασίστηκε στον αλγόριθμο που προτάθηκε από τους Kang et al. (2012) *I-DBLF*, ο οποίος αποτελεί μια βελτιωμένη έκδοση του αρχικού αλγόριθμου *BLF* του Hopper (2000) και του *DBLF* των Karabulut και Mustafa (2004). Σύμφωνα με τον αλγόριθμο του Hopper το κιβώτιο τοποθετείται στην βαθύτερη διαθέσιμη θέση του χώρου, στη συνέχεια μετακινείται όσο το δυνατόν χαμηλότερα και τέλος όσο πιο αριστερά είναι δυνατόν. Η βασική διαφορά είναι ότι η μέθοδος *I-DBLF* εισάγει την έννοια και την χρήση του εναπομείναντα διαθέσιμου χώρου για την καλύτερη εύρεση των δυνατών λύσεων. Οι εναπομείναντες διαθέσιμοι χώροι χρησιμοποιούνται για την σύγκριση της δυνατότητας εισαγωγής ενός κιβωτίου στον χώρο προτού ξεκινήσουν οι απαιτητικές διαδικασίες υπολογισμού, όπως ο έλεγχος υπερκαλύψεων και εύρεσης λύσεων.

3.4.2 Στάδια λειτουργίας του αλγόριθμου

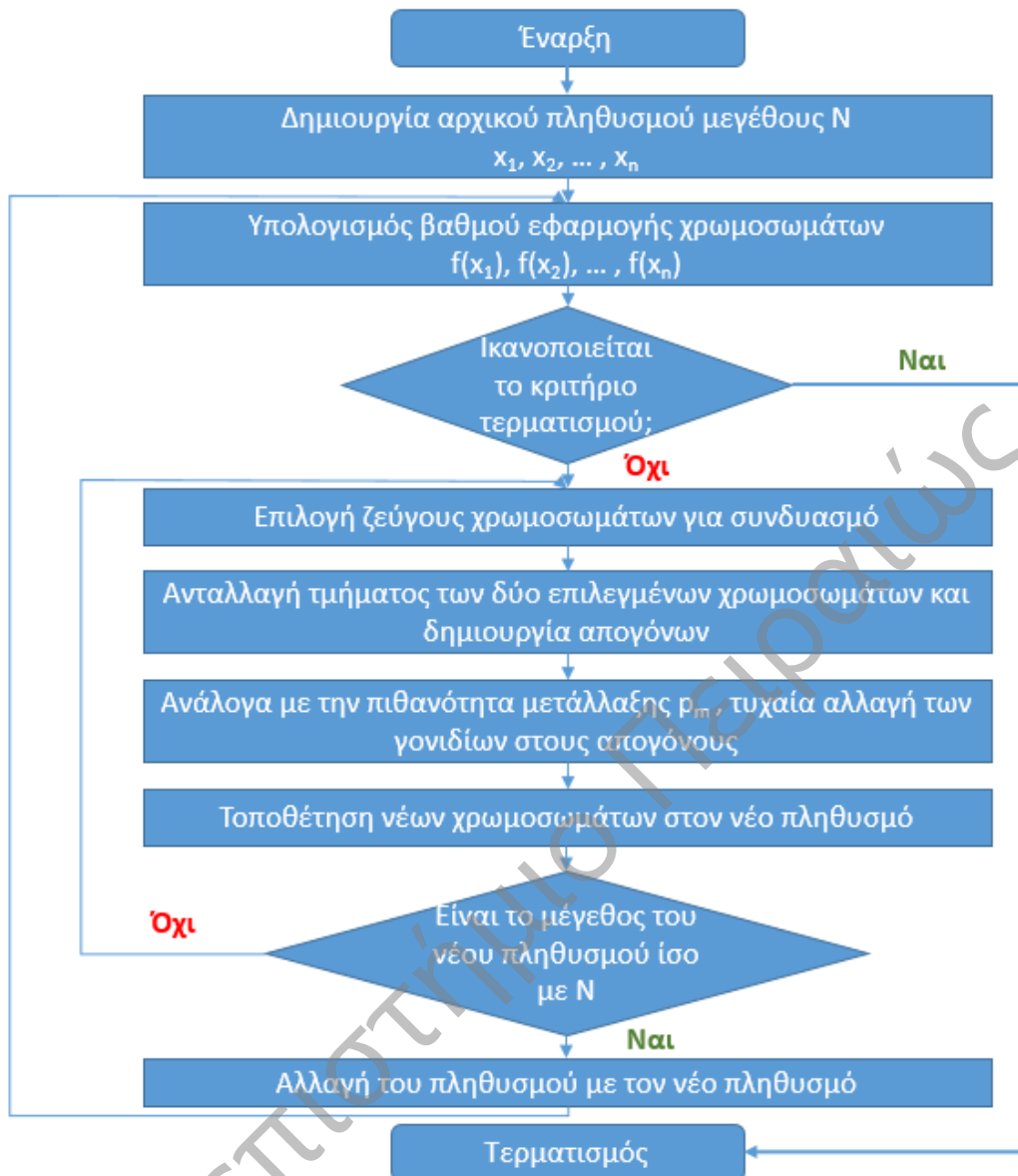
Η λειτουργία του αλγόριθμου συντελείται σε μια σειρά από διαδοχικά βήματα τα οποία συνοψίζονται ως εξής:

1. Ο αλγόριθμος ξεκινάει δημιουργώντας ένα τυχαίο αρχικό πληθυσμό.
2. Στην συνέχεια ο αλγόριθμος δημιουργεί νέους πληθυσμούς (*populations*). Σε κάθε βήμα (*generation*), ο αλγόριθμος χρησιμοποιεί λύσεις από την τρέχουσα γενιά για τους επόμενους

πληθυσμούς λύσεων. Για την δημιουργία ενός νέου πληθυσμού, οι λύσεις περνάνε από τα εξής συγκεκριμένα στάδια:

- Κάθε λύση του τρέχοντος πληθυσμού λαμβάνει ένα βαθμό καταλληλότητας (*fitness score*)
 - Επιλέγονται οι λύσεις με το υψηλότερο βαθμό
 - Κάποιες λύσεις από τον τρέχοντα πληθυσμό με υψηλό βαθμό, επιλέγονται ως οι εκλεκτές (*elite*) και χρησιμοποιούνται και στον επόμενο πληθυσμό
 - Δημιουργούνται λύσεις – παιδιά, είτε πραγματοποιώντας τυχαίες αλλαγές στις αρχικές λύσεις – γονείς (διαδικασία μετάλλαξης) ή με τον συνδυασμό δύο λύσεων – γονέων (διαδικασία αναπαραγωγής)
 - Αντικαθίσταται ο τρέχων πληθυσμός με τις νέες λύσεις – παιδιά για να δημιουργηθεί ο νέος πληθυσμός.
3. Ο αλγόριθμος σταματά να εκτελείται όταν ικανοποιηθούν συγκεκριμένα κριτήρια τερματισμού, που έχουν οριστεί από τον χρήστη (χρόνου εκτέλεσης, γενεών, κλπ.).

Σχηματικά ολόκληρη η διαδικασία αναπαρίσταται στην Εικόνα 10.



Εικόνα 10 : Αναλυτική διαδικασία και στάδια λειτουργίας αλγόριθμου I-DBLF.

3.4.3 Επιλογή

Η συνάρτηση της επιλογής (*selection*), επιλέγει ποιες λύσεις – γονείς θα συνεχίσουν στον επόμενο πληθυσμό λύσεων βασιζόμενη στον βαθμό καταλληλότητάς τους. Μια λύση είναι πιθανό να επιλεγθεί παραπάνω από μια φορά και επομένως να μεταφέρει τα χαρακτηριστικά της σε παραπάνω από μια λύση – παιδί.

3.4.4 Παράμετροι Αναπαραγωγής

Οι παράμετροι αναπαραγωγής ελέγχουν τον τρόπο με τον οποίο ο αλγόριθμος δημιουργεί τους επόμενους πληθυσμούς. Οι επιλογές αυτές είναι:

- Αριθμών εκλεκτών λύσεων (*Elite count*) – Ο αριθμός των λύσεων του τρέχοντος πληθυσμού με το υψηλότερο βαθμό καταλληλότητας που θα μεταφερθούν εγγυημένα στον επόμενο πληθυσμό (*εκλεκτοί απόγονοι - elite children*). Όσο υψηλότερη η τιμή του *Elite count* τόσο μεγαλύτερο το ποσοστό λύσεων που περνάνε αυτούσιες στον επόμενο πληθυσμό, με αποτέλεσμα ο αλγόριθμος να γίνεται λιγότερο αποτελεσματικός. Μια τιμή του *elite count* ίση με 1, αποτελεί την ιδανική επιλογή (Mathworks, 2014).
- Ποσοστό Αναπαραγωγής (*Crossover fraction*) – Το ποσοστό των λύσεων στον επόμενο πληθυσμό, εκτός από τους εκλεκτούς απόγονους, που δημιουργούνται με τη διαδικασία της αναπαραγωγής.

3.4.5 Μετάλλαξη και Αναπαραγωγή

Ο αλγόριθμος χρησιμοποιεί τις λύσεις – γονείς στον τρέχον πληθυσμό για να δημιουργήσει τις λύσεις – παιδιά στον επόμενο πληθυσμό. Πέρα από τους εκλεκτούς απόγονους, ο αλγόριθμος δημιουργεί:

- Απόγονους μέσω αναπαραγωγής (*Crossover children*), επιλέγοντας χαρακτηριστικά από ένα ζευγάρι λύσεων του τρέχοντος πληθυσμού και συνδυάζοντάς τα σε μια νέα λύση – παιδί.
- Απόγονους μέσω μετάλλαξης (*Mutation children*), εφαρμόζοντας τυχαίες αλλαγές σε μια λύση του τρέχοντος πληθυσμού, δημιουργώντας μια νέα λύση – παιδί.

Και οι δύο διαδικασίες είναι κρίσιμες για την αποτελεσματικότητα του αλγόριθμου, καθώς η μεν αναπαραγωγή επιτρέπει στον αλγόριθμο να εξάγει τα καλύτερα χαρακτηριστικά από διαφορετικές λύσεις δημιουργώντας μια νέα, πιθανώς ακόμα καλύτερη, λύση η δε μετάλλαξη προσθέτει ποικιλία στις λύσεις ενός πληθυσμού, αυξάνοντας την πιθανότητα να δημιουργηθούν λύσεις με καλύτερους βαθμούς καταλληλότητας (αποφυγή τοπικών ελάχιστων).

3.4.6 Κριτήρια τερματισμού

Για να τερματιστεί η διαδικασία αναζήτησης της βέλτιστης λύσης πρέπει να ικανοποιηθούν κάποια κριτήρια. Τα κριτήρια αυτά ορίζονται από τον χρήστη και σε κάθε περίπτωση μπορεί να είναι διαφορετικά, ανάλογα με το είδος του προβλήματος ή το επιθυμητό αποτέλεσμα. Μερικά από αυτά τα κριτήρια μπορεί να είναι τα εξής:

- Το κοντέινερ έχει φορτωθεί πλήρως.
- Όλα τα διαθέσιμα κιβώτια έχουν φορτωθεί.
- Ο διαθέσιμος χώρος του κοντέινερ δεν επαρκεί για τα κιβώτια που απομένουν.
- Ολοκληρώθηκε ο αριθμός των γενεών που ορίστηκε.
- Ο αλγόριθμος δεν βελτιώνει την λύση για μεγάλο αριθμό γενεών.
- Εξαντλήθηκε ο χρόνος εκτέλεσης του αλγόριθμου (εάν έχει οριστεί).

4 Πειραματική Διαδικασία

Για την δημιουργία του προγράμματος χρησιμοποιήθηκε το μαθηματικό πρόγραμμα υπολογισμών *MATLAB R2013a*. Ο κώδικας του προγράμματος, αναπτύχθηκε εξολοκλήρου κατά την διάρκεια της παρούσας εργασίας και βασίστηκε στην λογική του αλγόριθμου *I-DBLF*. Συνολικά το πρόγραμμα αποτελείται από 13 επιμέρους αρχεία και συνολικά 535 γραμμών κώδικα.

4.1 Δεδομένα (Datasets)

Προκειμένου να είναι δυνατή η σύγκριση των αποτελεσμάτων του προγράμματος που αναπτύχθηκε στην παρούσα εργασία και η εξαγωγή συμπερασμάτων για την αποτελεσματικότητά του, χρησιμοποιήθηκαν έτοιμα δοκιμαστικά σετ δεδομένων (benchmark datasets), που περιέχουν τις διαστάσεις κιβωτίων και κοντέινερ, που έχουν χρησιμοποιηθεί και σε παλαιότερες μελέτες του προβλήματος.

Τα εξετασθέντα σετ δεδομένων επιλέχθηκαν σύμφωνα με την μεθοδολογία που προτείνουν οι Bischoff και Ratcliff (1995). Συγκεκριμένα επιλέχθηκαν πέντε διαφορετικά σετ:

1. Τρία με ελαφρώς ετερογενή κιβώτια, τα οποία περιελάμβαναν 6 έως 7 διαφορετικά κιβώτια και
2. Δύο με έντονα ετερογενή κιβώτια, όπου περιελάμβαναν 8 έως 10 διαφορετικά κιβώτια.

Τα σετ που χρησιμοποιήθηκαν, είναι διαθέσιμα ελεύθερα στη σελίδα <https://files.nyu.edu/jeb21/public/jeb/orlib/files/thpack8.txt> και παρουσιάζονται αναλυτικά στο Παράρτημα Β. Τα διαθέσιμα στοιχεία για κάθε σετ είναι: α) στην πρώτη γραμμή οι διαστάσεις του κοντέινερ (μήκος, πλάτος, ύψος), β) στην δεύτερη γραμμή ο αριθμός των διαφορετικών τύπων κιβωτίων που πρέπει να στοιβαχθούν και γ) σε κάθε επόμενη γραμμή οι διαστάσεις ενός κιβωτίου, καθώς και ο αριθμός κιβωτίων από κάθε τύπο (τελευταίος αριθμός σε κάθε γραμμή).

4.2 Παράμετροι Προγράμματος

Κατά την δημιουργία του κώδικα του αλγόριθμου και την υλοποίηση του προγράμματος λήφθηκαν υπόψη οι παρακάτω παράμετροι, ώστε να υπάρχουν όσο το δυνατόν περισσότερες δυνατότητες στο πρόγραμμα και να καλυφθούν περισσότερες περιπτώσεις:

1. Αριθμός επιτρεπόμενων περιστροφών των κιβωτίων (καθόλου, σε 2 διαστάσεις, σε 6 διαστάσεις).
2. Ταξινόμηση των κιβωτίων πριν την έναρξη παραγωγής λύσεων, ως προς:
 - Μήκος κιβωτίου,
 - Πλάτος κιβωτίου,
 - Ύψος κιβωτίου,
 - Όγκο κιβωτίου,
 - Τυχαία ταξινόμηση, και
 - Χωρίς αλλαγή, όπως δόθηκε από το συγκεκριμένο σετ.
3. Αριθμός γενεών (επαναλήψεων) μέχρι την λήξη εκτέλεσης του αλγόριθμου (κριτήριο τερματισμού).
4. Ποσοστό μετάλλαξης (*mutation rate*) σε κάθε επόμενη γενιά
5. Μέγεθος νέων πληθυσμών (πιθανών λύσεων) ανά γενιά (επανάληψη).
6. Αριθμός εκλεκτών λύσεων ανά γενιά (*elite count*).
7. Επιλογή εμφάνισης ή όχι γραφικής απεικόνισης των τοποθετημένων κιβωτίων εντός του κοντέινερ.

4.3 Εντολές αλγόριθμου (Input)

Για να γίνει η εκκίνηση του αλγόριθμου, απαιτείται μια εντολή όπου περιλαμβάνει τις παραμέτρους εκτέλεσης του τρέχοντος πειράματος. Η εντολή στην γενική της μορφή είναι:

```
genetic3Dbpp('input.in', 'output', a, b, 'r', 'true')
```

Το *genetic3Dbpp* δηλώνει στο πρόγραμμα *MATLAB*, ποιο αρχείο που περιλαμβάνει τον κώδικα να εκτελέσει, το *input.in* είναι το όνομα του αρχείου με τις διαστάσεις του κοντέινερ και των κιβωτίων, ενώ το *output* είναι το αρχείο όπου θα εγγραφούν τα αποτελέσματα του αλγόριθμου όταν ολοκληρωθεί. Το επόμενο στοιχείο, *a*, αναφέρεται στον αριθμό των περιστροφών που επιτρέπεται να εκτελέσουν τα κιβώτια πριν την τοποθέτησή τους και οι τιμές που μπορεί να λάβει είναι 0, 2 ή 6. Το στοιχείο *b* αναφέρεται στον αριθμό των γενεών - επαναλήψεων που θα εκτελεστεί ο αλγόριθμος έως ότου τερματιστεί και οι τιμές που μπορεί να λάβει είναι από 1 έως οποιονδήποτε αριθμό - όσο μεγαλύτερος αυτός ο αριθμός τόσο μεγαλύτερη η διάρκεια που θα εκτελείται ο αλγόριθμος. Η παράμετρος *r* αναφέρεται στον τύπο αρχικής ταξινόμησης των κιβωτίων πριν την τοποθέτησή τους και οι τιμές που μπορεί να λάβει είναι *l* (*length* - κατά μήκος), *w* (*width* - κατά πλάτος), *h* (*height* - κατά ύψος), *v* (*volume* - κατά όγκο), *r* (*random* - τυχαία), *u* (*unchanged* - όπως βρίσκονται στην λίστα), καθώς επίσης και οποιονδήποτε συνδυασμό τους, για παράδειγμα “*nwh*” όπου σε αυτή την περίπτωση το 33.333% θα γίνει κατά όγκο, το 33.333% κατά πλάτος και το υπόλοιπο 33.333% κατά ύψος. Τέλος, η μεταβλητή *'true'* αναφέρεται στο αν θα δοθεί το αποτέλεσμα της λύσης και με γραφική απεικόνιση.

4.4 Έξοδος αλγόριθμου (Output)

Καθόλη τη διάρκεια που εκτελείται ο αλγόριθμος, για κάθε νέα γενιά που ολοκληρώνεται, εμφανίζεται στην οθόνη το νέο ποσοστό όγκου που καταλαμβάνουν τα κιβώτια εντός του κοντέινερ. Το ποσοστό αυτό μπορεί να είναι κάθε φορά υψηλότερο του προηγούμενου ή να παραμείνει το ίδιο, εάν δεν βελτιώθηκε σε σχέση με την προηγούμενη γενιά.

Όταν ολοκληρωθεί ο αλγόριθμος σύμφωνα με το κριτήριο τερματισμού που έχει τεθεί - στην παρούσα εργασία ως κριτήριο τερματισμού ορίστηκε ο αριθμός γενεών - τότε το πρόγραμμα εμφανίζει στην οθόνη τα εξής:

1. Την εξέλιξη των αποτελεσμάτων με το πέρασμα των γενεών,
2. Η σειρά με την οποία τοποθετήθηκαν τα κιβώτια,
3. Ο όγκος που καταλαμβάνουν εντός του κοντέινερ,
4. Η θέση του κάθε κιβωτίου (συντεταγμένες κάτω αριστερά γωνίας) μέσα στον χώρο του κοντέινερ,
5. Το αν περιστράφηκαν τα κιβώτια και ως προς ποιο άξονα, και
6. Το τελικό αποτέλεσμα, δηλαδή το ποσοστό φόρτωσης του κοντέινερ.

Στο Παράρτημα Α παρουσιάζονται ενδεικτικά τα αποτελέσματα ενός πειράματος με 120 κιβώτια προς φόρτωση, δυνατότητα ορθογώνιας περιστροφής προς όλους τους άξονες και αριθμό γενεών 100. Η πρώτη στήλη δηλώνει τον αριθμό του κιβωτίου από την αρχική λίστα με τα κιβώτια που περιείχε το dataset, οι επόμενες τρεις στήλες (w , h , l) εμφανίζουν τις διαστάσεις του κιβωτίου, οι επόμενες τρεις στήλες (x , y , z) εμφανίζουν την θέση που τοποθετήθηκε το κιβώτιο εντός του κοντέινερ, η στήλη R δηλώνει τον τρόπο που περιστράφηκε το κιβώτιο ώστε να τοποθετηθεί, και η τελευταία στήλη (*volume*) εμφανίζει τον όγκο σε κυβικά χιλιοστά που καταλαμβάνει το κάθε κιβώτιο.

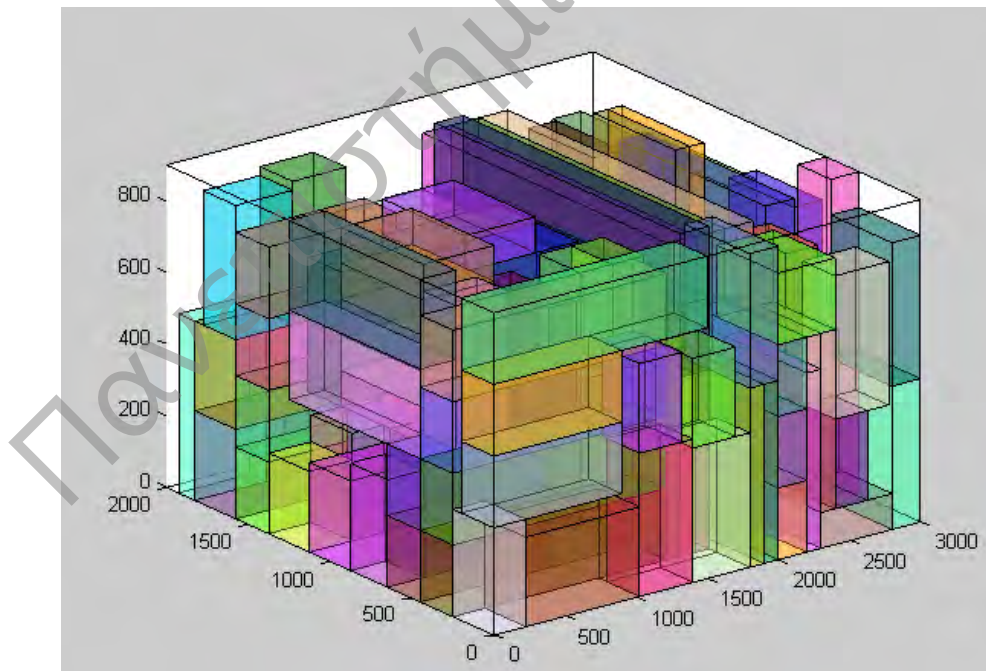
Επίσης δημιουργείται ένα αρχείο (*output.in*), Εικόνα 11, που περιέχει τα εξής:

1. Τελική λύση – Ποσοστό όγκου που καταλαμβάνουν τα κιβώτια στο κοντέινερ.
2. Σε ποια γενιά βρέθηκε η βέλτιστη λύση.
3. Ο συνολικός αριθμός κιβωτίων που τοποθετήθηκαν.

Μέγιστος όγκος: 0.731875
Βρέθηκε στην γενιά: 94
Αριθμός κουτιών που τοποθετήθηκαν: 116

Εικόνα 11: Δεδομένα αρχείου *output.in*

Τέλος, δημιουργείται από το πρόγραμμα ένα αρχείο (*figure.fig*) που περιέχει την γραφική απεικόνιση της τοποθέτησης των κιβωτίων (Εικόνα 12 :). Στην γραφική απεικόνιση είναι δυνατόν να ελεγχθεί ο τρόπος τοποθέτησης των κιβωτίων και τυχόν υπερκαλύψεις μεταξύ αυτών.



Εικόνα 12 : Παράδειγμα γραφικής απεικόνισης τοποθέτησης κιβωτίων.

5 Αποτελέσματα

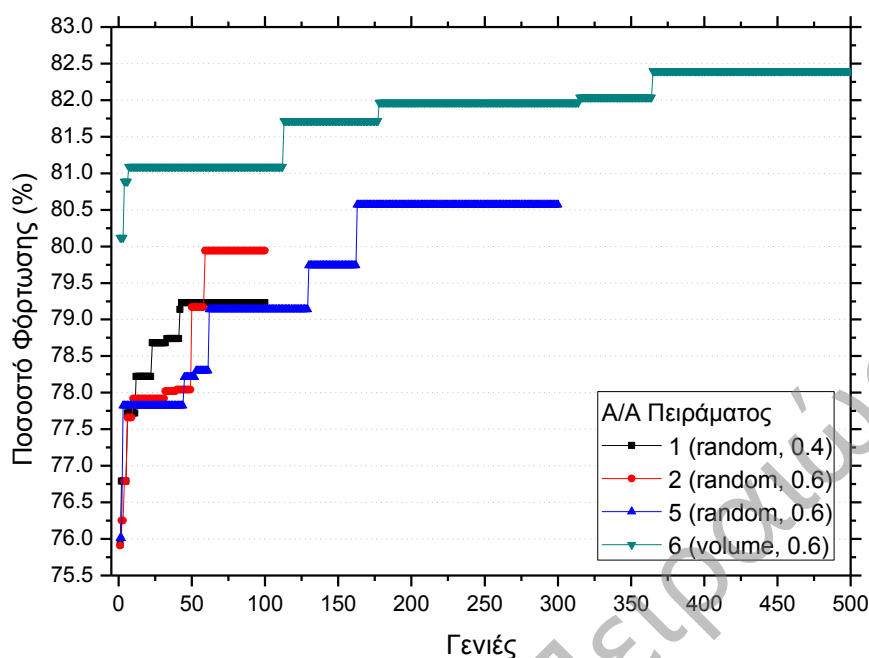
5.1 Αρχική διερεύνηση παραμέτρων

Αρχικά, εκτελέστηκαν 17 προκαταρκτικά πειράματα με διάφορες τιμές στις μεταβλητές των επιτρεπόμενων περιστροφών, στον αριθμό των γενεών, στην αρχική ταξινόμηση των κιβωτίων και στο ποσοστό μετάλλαξης. Η εκτέλεση αυτών των δοκιμαστικών πειραμάτων κρίθηκε απαραίτητη ώστε να καλυφθούν όσο το δυνατόν περισσότερες περιπτώσεις και να γίνει ευκολότερη η εξαγωγή συμπερασμάτων όσον αφορά το ποιες μεταβλητές επηρεάζουν περισσότερο τα αποτελέσματα και πάνω σε ποιες θα βασιστεί η περαιτέρω μελέτη συγκεκριμένων πλέον περιπτώσεων.

Στον Πίνακα 1 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των 17 αρχικών πειραμάτων για διάφορους αριθμούς γενεών από 100 έως 500, διάφορα είδη ταξινόμησης (random, length και volume) και διαφορετικών ποσοστών μετάλλαξης από 0.4 έως 0.7. Οι αναλύσεις που ακολουθούν έγιναν ανά σετ δεδομένων, έτσι ώστε να είναι δυνατή η σύγκριση των αποτελεσμάτων.

Πίνακας 1 : Αποτελέσματα αρχικών πειραμάτων με διάφορες παραμέτρους.

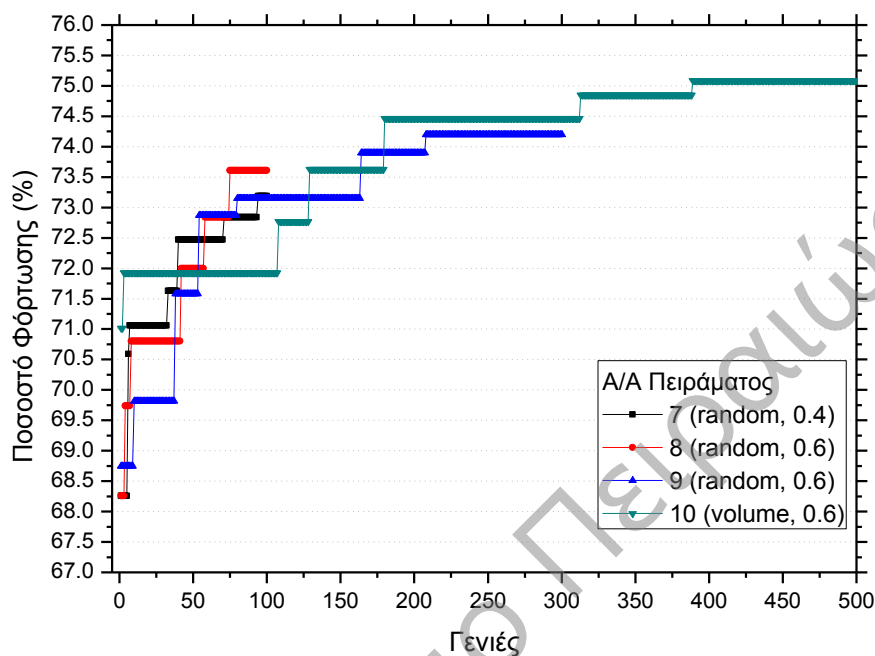
A/A	Σετ δεδομένων	Αριθμός Κιβωτίων	Διαφορετικά	Περιστροφές	Γενιές	Ταξινόμηση	% μετάλλαξης	Αρχική τιμή	Τελική Τιμή
1	thpack8-2	200	8	6	100	random	0.4	75.92%	79.23%
2	thpack8-2	200	8	6	100	random	0.6	75.91%	79.94%
3	thpack8-2	200	8	6	100	volume	0.4	80.89%	81.09%
4	thpack8-2	200	8	6	300	length	0.7	78.72%	82.40%
5	thpack8-2	200	8	6	300	random	0.6	76.01%	80.57%
6	thpack8-2	200	8	6	500	volume	0.6	80.12%	83.95%
7	thpack8-5	120	6	6	100	random	0.4	68.26%	73.19%
8	thpack8-5	120	6	6	100	random	0.6	68.26%	73.61%
9	thpack8-5	120	6	6	300	random	0.6	68.75%	74.20%
10	thpack8-5	120	6	6	500	volume	0.6	71.02%	75.09%
11	thpack8-4	100	7	6	100	random	0.4	54.96%	54.96%
12	thpack8-4	100	7	6	100	volume	0.4	54.96%	54.96%
13	thpack8-4	100	7	6	300	volume	0.7	54.96%	54.96%
14	thpack8-15	250	10	6	100	random	0.4	56.90%	58.82%
15	thpack8-15	250	10	6	300	volume	0.7	58.02%	59.17%
16	thpack8-12	120	6	6	100	random	0.4	66.50%	70.00%
17	thpack8-12	120	6	6	500	random	0.7	67.78%	72.13%



Εικόνα 13 : Γραφική απεικόνιση αποτελεσμάτων πειραμάτων 1, 2, 5 και 6 του dataset thpack8-2.

Στην Εικόνα 13 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των τεσσάρων πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν για το σετ δεδομένων thpack8-2 με διαφορετικές μεθόδους ταξινόμησης, ποσοστά μετάλλαξης και αριθμό γενεών. Στη σύγκριση μεταξύ του πειράματος 1 και 2, όπου η μόνη διαφορά τους είναι η αύξηση στην τιμή του ποσοστού μετάλλαξης κατά 0.2, παρατηρείται μια μικρή βελτίωση του τελικού αποτελέσματος στον ίδιο αριθμό γενεών, από 79.23% σε 79.94%. Διατηρώντας σταθερό το ποσοστό μετάλλαξης σε 0.6 και αυξάνοντας τον αριθμό των γενεών, στο πείραμα 5, παρατηρείται περαιτέρω βελτίωση του τελικού αποτελέσματος σε 80.57%, το οποίο όμως δεν μεταβάλλεται για περίπου 140 γενιές έως το τέλος του πειράματος, κάτι το οποίο μπορεί να υποδηλώνει ότι ο αλγόριθμος πιθανώς έφτασε σε κάποια μέγιστη τιμή την οποία δεν μπορεί να υπερβεί. Τέλος για στο πείραμα 6, πραγματοποιήθηκε αρχική ταξινόμηση των κιβωτίων κατά όγκο, και όχι τυχαία όπως στα προηγούμενα πειράματα, διατηρώντας το ποσοστό μετάλλαξης στην τιμή 0.6. Με αυτά τα δεδομένα, παρατηρείται μια μεγάλη διαφορά στην αρχική τιμή (λόγω της ταξινόμησης κατά όγκο), 80.7% έναντι του μέσου

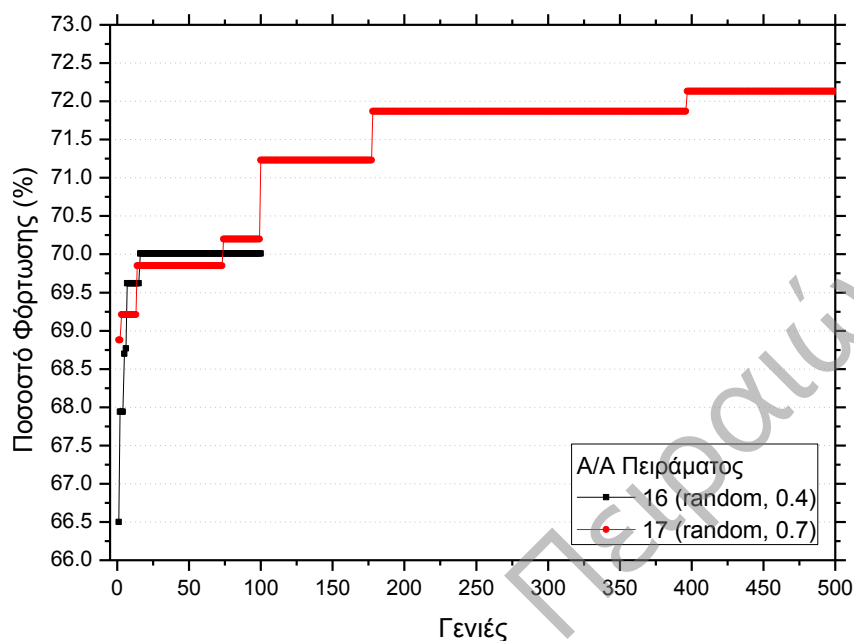
όρου 75.94% που είχαν τα άλλα πειράματα με την τυχαία τοποθέτηση, καθώς επίσης η τελική τιμή αυξήθηκε στο 83.95% σε αντίθεση με τον μέσο όρο 79.9% των άλλων πειραμάτων.



Εικόνα 14 : Γραφική απεικόνιση αποτελεσμάτων πειραμάτων 7, 8, 9 και 10 του dataset thpack8-5.

Στην Εικόνα 14 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν για το dataset thpack8-5, για διαφορετικές τιμές ταξινόμησης (random ή volume), ποσοστά μετάλλαξης (0.4 ή 0.6) και αριθμού γενεών (από 100 έως 500). Όπως παρατηρήθηκε και στο προηγούμενο σετ πειραμάτων, η αύξηση της τιμής του ποσοστού μετάλλαξης από 0.4 σε 0.6, που πραγματοποιήθηκε στο πείραμα 8 σε σχέση με το πείραμα 7, είχε ως αποτέλεσμα μικρή αύξηση του τελικού αποτελέσματος από 73.19% σε 73.61%. Προκειμένου να γίνει πιο αντιληπτή η επιρροή της αύξησης του ποσοστού μετάλλαξης, στο πείραμα 9 παρέμειναν όλες οι μεταβλητές σταθερές και αυξήθηκε μόνο ο αριθμός των γενεών, έχοντας ως αποτέλεσμα την περαιτέρω αύξηση του τελικού αποτελέσματος σε 74.20%. Η αρχική τιμή και των τριών πειραμάτων (7, 8 και 9) με τυχαία αρχική ταξινόμηση, κυμάνθηκε στο 68.5%. Τέλος, στο πείραμα 10 πραγματοποιήθηκε αρχική ταξινόμηση ως προς τον όγκο των κιβωτίων, δίνοντας όπως ήταν αναμενόμενο βελτιωμένο αρχικό αποτέλεσμα έναντι των προηγούμενων πειραμάτων,

71.02%. Επίσης, το τελικό αποτέλεσμα αυξήθηκε στο 75.09% στις 360 γενιές έως το τέλος του πειράματος.



Εικόνα 15 : Γραφική απεικόνιση αποτελεσμάτων πειραμάτων 16 και 17 του dataset thpack8-12.

Στην Εικόνα 15 παρουσιάζεται το τελευταίο σετ προκαταρκτικών πειραμάτων που πραγματοποιήθηκε για το σετ δεδομένων thpack8-12. Στο πείραμα 17, αυξήθηκε ταυτόχρονα το ποσοστό μετάλλαξης σε 0.7 από 0.4 του πειράματος 16 και οι γενιές σε 500 από 100, διατηρώντας σταθερή την αρχική ταξινόμηση σε random, προκειμένου να γίνει εμφανής η επιρροή αύξησης του ποσοστού μετάλλαξης στην βελτίωση των αποτελεσμάτων. Όπως παρατηρείται και από το γράφημα υπάρχει σημαντική αύξηση του τελικού αποτελέσματος από 70.01% σε 72.13%.

Όπως γίνεται αντιληπτό από τα παραπάνω αποτελέσματα, η αρχική ταξινόμηση κατά όγκο παράγει βελτιωμένα αποτελέσματα σε σχέση με την τυχαία αρχική τοποθέτηση των κιβωτίων. Επίσης παρατηρήθηκε, όπως ήταν αναμενόμενο, ότι η αύξηση του αριθμού των γενεών και ο ορισμός της τιμής του ποσοστού μετάλλαξης σε υψηλότερη τιμή συντελούν στην εξαγωγή βελτιωμένου τελικού αποτελέσματος. Τέλος, θεωρείται ότι περαιτέρω αύξηση του αριθμού των

γενεών πιθανώς να αποδίδει ακόμα πιο βελτιωμένα αποτελέσματα, καθώς, γενικά όπως παρατηρήθηκε στα αρχικά δοκιμαστικά πειράματα, όσο αυξανόταν ο αριθμός των γενεών τόσο βελτιωνόταν το τελικό αποτέλεσμα κάθε πειράματος. Καθότι ο χρόνος εκτέλεσης του κάθε πειράματος για έως 500 γενιές ξεπερνάει τις 48 ώρες και φτάνει έως τις 120 ώρες, κρίθηκε μη απαραίτητη στα χρονικά πλαίσια της παρούσας εργασίας η περαιτέρω αύξηση του αριθμού γενεών, άνω των 500.

Επομένως, για την εκτέλεση των τελικών πειραμάτων, ορίστηκαν για όλα οι εξής παράμετροι:

- Εκτέλεση 3 πειραμάτων ανά σετ δεδομένων ώστε να εξαχθεί ένας ασφαλής μέσος όρος για τα αποτελέσματα.
- Επιτράπηκαν έως 6 περιστροφές στα κιβώτια.
- Ορίστηκε ο μέγιστος αριθμός των γενεών σε 500.
- Το μέγεθος του πληθυσμού ορίστηκε σε 100.
- Ορίστηκε η τιμή του ποσοστού μετάλλαξης σε 0.7.
- Η τιμή των εκλεκτών λύσεων ορίστηκε σε 1.
- Έγινε αρχική ταξινόμηση των κιβωτίων κατά όγκο.

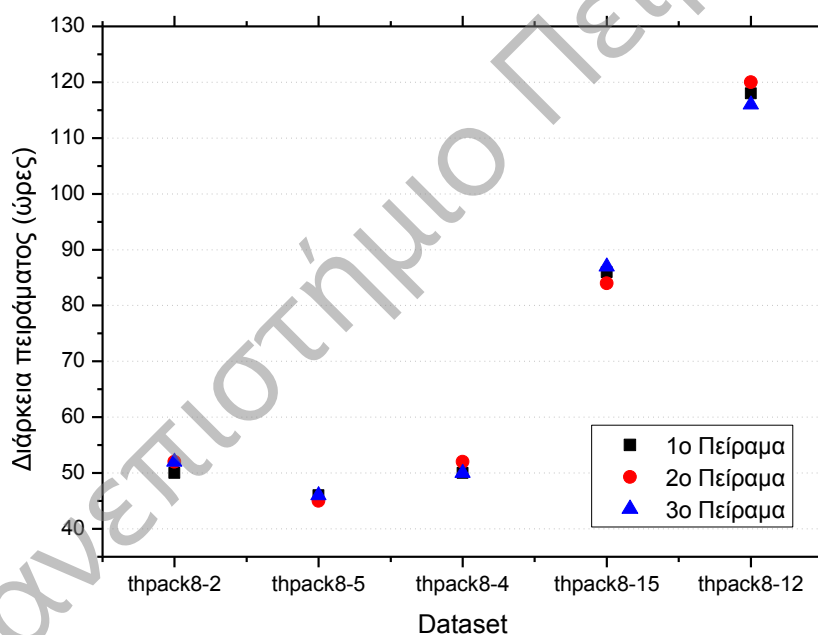
5.2 Τελικά αποτελέσματα

Συνολικά εκτελέστηκαν 15 τελικά πειράματα, 9 πειράματα για ελαφρώς ετερογενή κιβώτια (3 πειράματα x 3 διαφορετικά σετ δεδομένων) και 6 για έντονα ετερογενή κιβώτια (3 πειράματα x 2 διαφορετικά σετ δεδομένων). Η εκτέλεση όλων των dataset από 3 φορές κρίθηκε απαραίτητη για την ασφαλή εξαγωγή ενός ορθότερου μέσου όρου για κάθε σετ δεδομένων. Ο συνολικός χρόνος εκτέλεσης των πειραμάτων ξεπέρασε τις 1000 ώρες, που αντιστοιχούν σε περισσότερες από 40 ημέρες.

Πίνακας 2 : Συνολικός αριθμός πειραμάτων και διάρκεια εκτέλεσης τους.

Πειράματα	Επαναλήψεις	Σύνολο	Διάρκεια (ώρες)
3 dataset για ελαφρώς ετερογενή κιβώτια	3	9	442
2 dataset για έντονα ετερογενή κιβώτια	3	6	611
Σύνολο		15	1053

Στον Πίνακα 2 παρουσιάζεται το σύνολο των πειραμάτων που εκτελέστηκαν καθώς και η διάρκεια των πειραμάτων συνολικά. Στην Εικόνα 16 παρουσιάζεται η διάρκεια εκτέλεσης των πειραμάτων ανά σετ δεδομένων και όπως παρατηρείται όσο περισσότερα είναι τα κιβώτια που πρέπει να τοποθετηθούν, τόσο αυξάνεται η διάρκεια εκτέλεσης του πειράματος έως την εξαγωγή του τελικού αποτελέσματος.



Εικόνα 16 : Διάρκεια εκτέλεσης πειραμάτων ανά dataset.

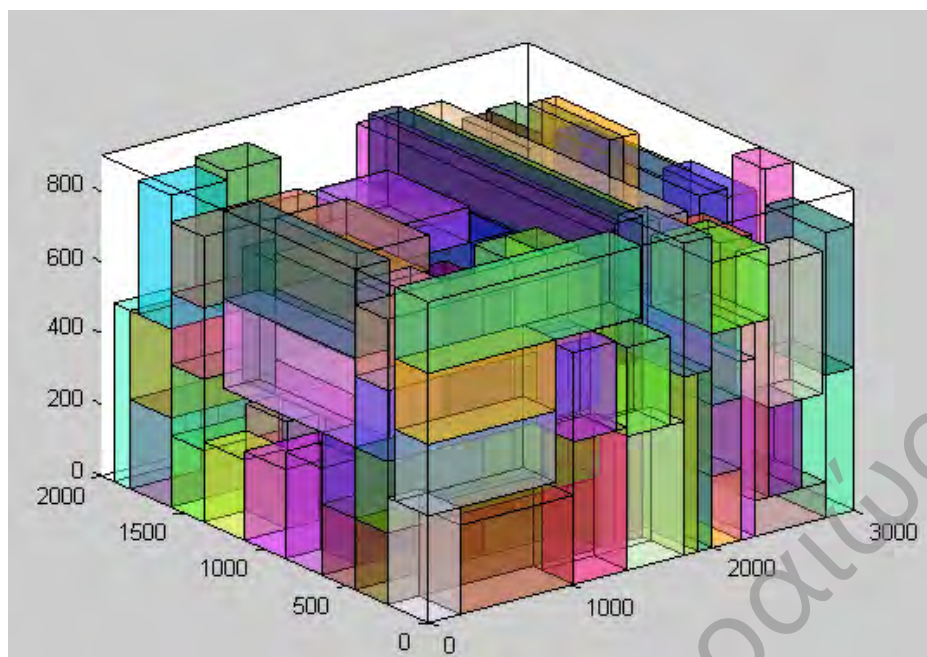
5.2.1 Ελαφρώς ετερογενή κιβώτια

Στον Πίνακα 3 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα τελικά αποτελέσματα των πειραμάτων που εκτελέστηκαν για τα ελαφρώς ετερογενή σετ δεδομένων, ο μέσος όρος των αρχικών και τελικών τιμών για κάθε σετ και η διάρκεια των πειραμάτων. Η διάρκεια εκτέλεσης του κάθε πειράματος κυμάνθηκε μεταξύ 45 και 52 ωρών, για την εξαγωγή του τελικού αποτελέσματος στις 500 γενιές. Στην πρώτη στήλη αναφέρεται το όνομα του σετ, στην δεύτερη ο αριθμός των κιβωτίων προς τοποθέτηση και στην τρίτη το πλήθος των διαφορετικών διαστάσεων των κιβωτίων.

Πίνακας 3 : Τελικά αποτελέσματα ελαφρώς ετερογενών κιβωτίων.

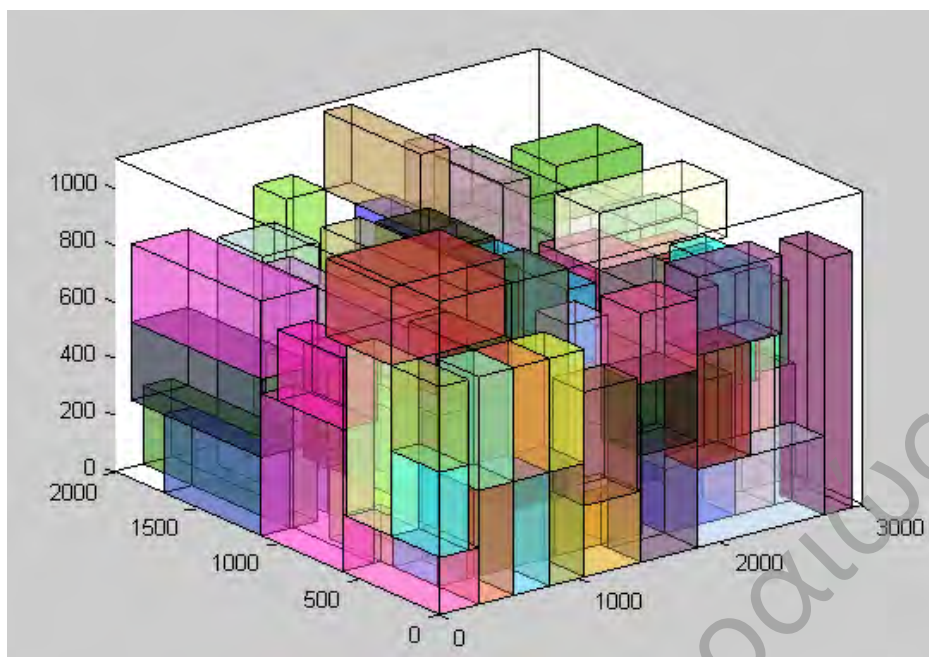
Σετ δεδομένων	Αριθμός Κιβωτίων	Διαφορετικά	Αρχική τιμή (%)	Μέσος Όρος	Τελικό Αποτέλεσμα (%)	Μέσος Όρος	Διάρκεια (ώρες)
thpack8-5	120	6	70.89	70.97	74.04	75.02	50
thpack8-5	120	6	71.02		75.09		52
thpack8-5	120	6	71.02		75.94		52
thpack8-4	100	7	54.96	54.89	54.96	54.90	46
thpack8-4	100	7	54.77		54.77		45
thpack8-4	100	7	54.96		54.96		46
thpack8-12	120	6	68.88	68.10	72.13	72.08	51
thpack8-12	120	6	68.79		71.98		50
thpack8-12	120	6	67.30		72.13		51

Από τα αποτελέσματα για το πρώτο σετ δεδομένων thpack8-5, υπολογίστηκε ότι η διαφορά μεταξύ του μέσου όρου της αρχικής (70.97%) και της τελικής τιμής (75.02%) του ποσοστού φόρτωσης, είναι 4.05 μονάδες, επομένως ο αλγόριθμος βελτίωσε το τελικό αποτέλεσμα κατά 5.7%. Ο μέσος όρος του τελικού αποτελέσματος που έδωσε ο αλγόριθμος σε σχέση με τον μέσο όρο της αρχικής τιμής (68.42%) που είχε υπολογιστεί για τυχαία τοποθέτηση των κιβωτίων (Πίνακας 1), παρατηρείται διαφορά 6.6 μονάδων, δηλαδή 9.65% βελτίωση στο ποσοστό φόρτωσης του κοντέινερ. Στην Εικόνα 17 παρουσιάζεται γραφικά η τοποθέτηση των κιβωτίων όπως υπολογίστηκε από τον αλγόριθμο.



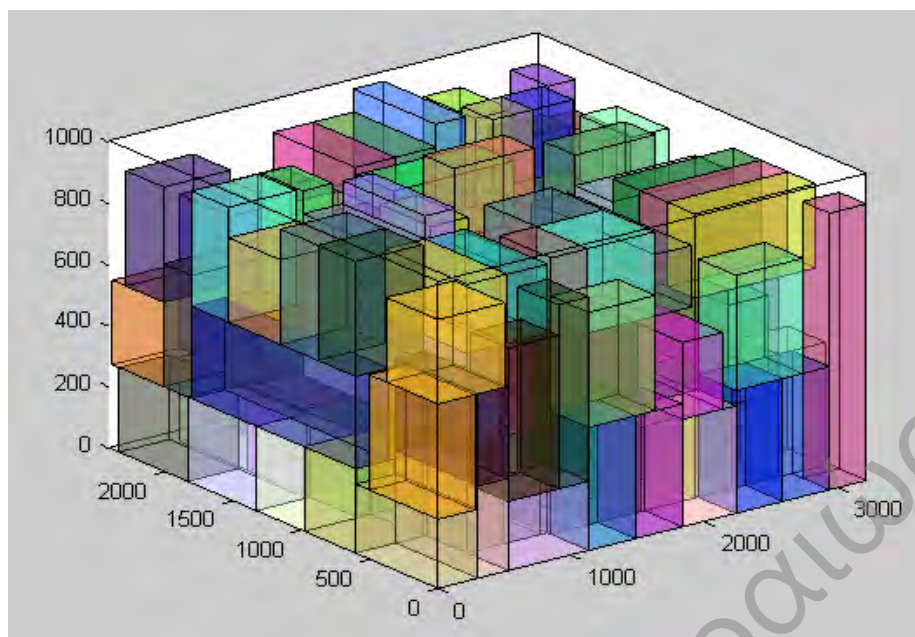
Εικόνα 17 : Γραφική απεικόνιση τοποθέτησης κιβωτίων για το dataset thpack8-5.

Αντιθέτως, για το σετ δεδομένων thpack8-4, δεν παρατηρήθηκε καθόλου αύξηση μεταξύ του μέσου όρου της αρχικής τιμής του πειράματος (54.89%) και της τελικής λύσης του αλγόριθμου (54.90%). Το συγκεκριμένο αποτέλεσμα θα μπορούσε να αποτελεί ένδειξη μη σωστής λειτουργίας του αλγόριθμου, όμως όπως θα αναλυθεί και στη συνέχεια, αντίστοιχες δοκιμές στη βιβλιογραφία, δίνουν για το συγκεκριμένο σετ μέγιστο ποσοστό φόρτωσης ίσο με 55%. Επομένως το αποτέλεσμα που έδωσε ο αλγόριθμος κρίνεται ικανοποιητικό. Στην Εικόνα 18 παρουσιάζεται γραφικά η τοποθέτηση των κιβωτίων όπως υπολογίσθηκε από τον αλγόριθμο και εξήχθηκε από το πρόγραμμα.



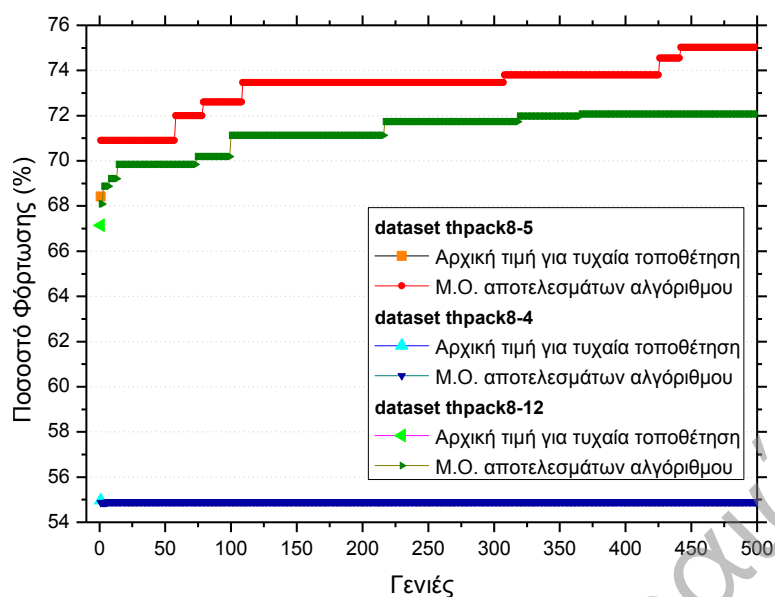
Εικόνα 18 : Γραφική απεικόνιση τοποθέτησης κιβωτίων για το dataset thpack8-4.

Τέλος, για το σετ δεδομένων thpack8-12, η διαφορά μεταξύ του μέσου όρου της αρχικής (68.10%) και της τελικής τιμής (72.08%) του ποσοστού φόρτωσης, είναι 3.98 μονάδες, επομένως ο αλγόριθμος βελτίωσε το τελικό αποτέλεσμα φόρτωσης κατά 5.8%. Σημαντική διαφορά παρατηρήθηκε επίσης στην τιμή του μέσου όρου του τελικού αποτελέσματος που έδωσε ο αλγόριθμος, σε σχέση με τον μέσο όρο της αρχικής τιμής (67.14%) που είχε υπολογιστεί για τυχαία τοποθέτηση των κιβωτίων (Πίνακας 1). Η διαφορά υπολογίστηκε στις 4.94 μονάδες, δηλαδή αύξηση 7.35% του ποσοστού φόρτωσης του κοντέινερ. Στην Εικόνα 19 παρουσιάζεται γραφικά η τοποθέτηση των κιβωτίων όπως υπολογίστηκε από τον αλγόριθμο.



Εικόνα 19 : Γραφική απεικόνιση τοποθέτησης κιβωτίων για το dataset thpack8-12.

Στην Εικόνα 20 παρουσιάζονται οι διαφορές μεταξύ των αρχικών τιμών του ποσοστού φόρτωσης με τυχαία τοποθέτηση των κιβωτίων όπως υπολογίστηκαν από τον Πίνακα 1 και των μέσων όρων των τιμών που παρουσίασε ο αλγόριθμος για κάθε σετ δεδομένων έως και την τελική τιμή του ποσοστού φόρτωσης. Όπως παρατηρείται, για τα σετ thpack8-5 και thpack8-12 η βελτίωση στο ποσοστό φόρτωσης του κοντέινερ που πέτυχε ο αλγόριθμος είναι αρκετά μεγάλη, όπως αναλύθηκε παραπάνω.



Εικόνα 20 : Σύγκριση μεταξύ αρχικής τιμής για τυχαία τοποθέτηση και μ.ο. αποτελεσμάτων αλγόριθμου.

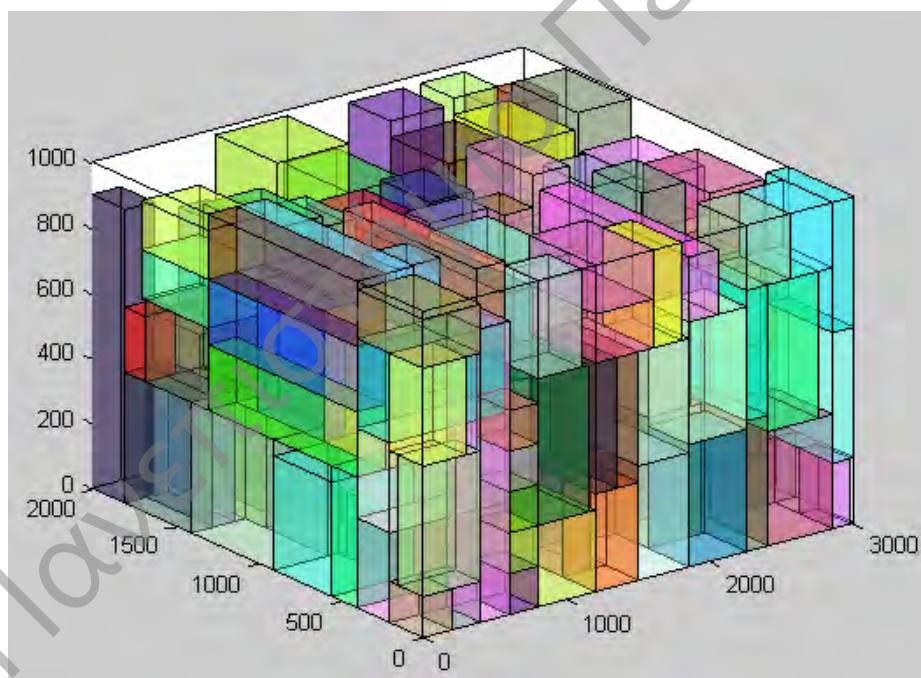
5.2.2 Έντονα ετερογενή κιβώτια

Στον Πίνακα 4 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα τελικά αποτελέσματα των πειραμάτων που εκτελέστηκαν για τα έντονα ετερογενή σετ δεδομένων, καθώς και ο μέσος όρος για κάθε σετ και ο χρόνος εκτέλεσης (διάρκεια) των πειραμάτων. Η διάρκεια εκτέλεσης του κάθε πειράματος κυμάνθηκε μεταξύ 84 και 120 ωρών για την εξαγωγή του τελικού αποτελέσματος στις 500 γενιές. Όπως ήταν αναμενόμενο, τα πειράματα με τα έντονα ετερογενή κιβώτια διήρκεσαν περισσότερη ώρα λόγω της αυξημένης ποσότητας των κιβωτίων (200 - 250 κιβώτια έναντι 100 - 120 στα ελαφρώς ετερογενή σετ δεδομένων) αλλά κυρίως λόγω του αυξημένου υπολογιστικού φόρτου που οφείλεται στους περισσότερους διαφορετικούς τύπους κιβωτίων προς τοποθέτηση.

Πίνακας 4 : Τελικά αποτελέσματα έντονα ετερογενών κιβωτίων.

Dataset	Αριθμός Κιβωτίων	Διαφορετικά	Αρχική τιμή (%)	Μέσος Όρος	Τελικό Αποτέλεσμα (%)	Μέσος Όρος	Διάρκεια (ώρες)
thpack8-2	200	8	80.12	80.12	84.45	84.52	86
thpack8-2	200	8	80.12		84.58		84
thpack8-2	200	8	80.12		84.52		87
thpack8-15	250	10	58.02	58.02	59.47	59.40	118
thpack8-15	250	10	58.02		59.27		120
thpack8-15	250	10	58.02		59.47		116

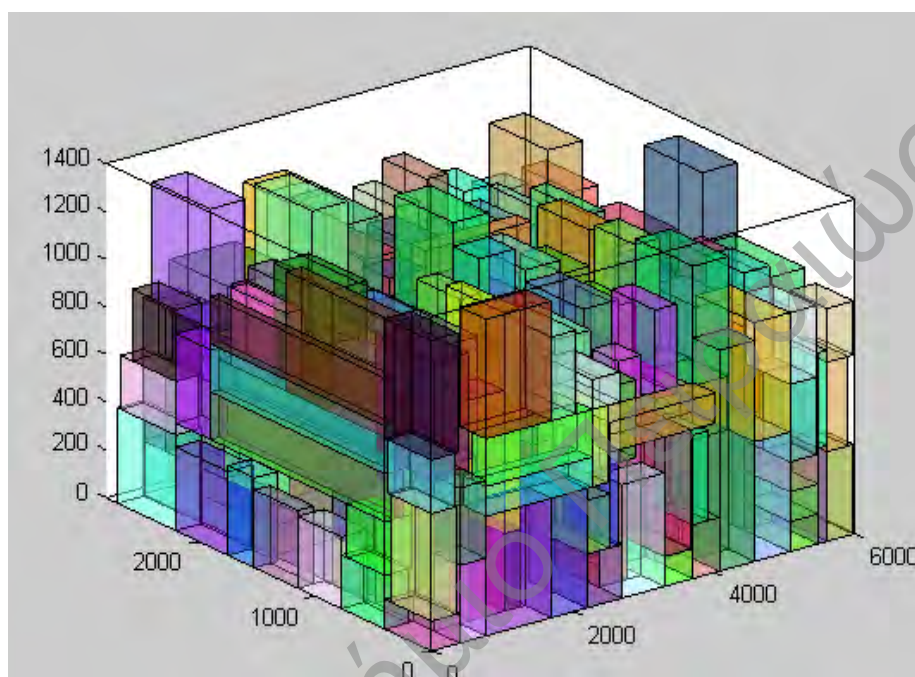
Από τα αποτελέσματα του σετ thpack8-2, παρατηρείται ότι η διαφορά μεταξύ του μέσου όρου της αρχικής τιμής (80.12%) και της τελικής τιμής (84.52%) του ποσοστού φόρτωσης είναι 4.4 μονάδες, που σημαίνει ότι ο αλγόριθμος βελτίωσε το αποτέλεσμα κατά 5.5%. Η σημαντικότερη διαφορά όμως παρατηρείται μεταξύ του μ.ο. της τελικής τιμής του ποσοστού φόρτωσης (84.52%) που έδωσε ο αλγόριθμος και του μ.ο. της αρχικής τιμής που είχε υπολογιστεί με τυχαία τοποθέτηση των κιβωτίων (76.28%), όπου η διαφορά κυμάνθηκε στις 8.24 μονάδες, δηλαδή 10.8% βελτίωση του ποσοστού φόρτωσης του κοντέινερ. Στην Εικόνα 21 παρουσιάζεται γραφικά η τοποθέτηση των κιβωτίων εντός του κοντέινερ όπως υπολογίσθηκε από τον αλγόριθμο.



Εικόνα 21 : Γραφική απεικόνιση τοποθέτησης κιβωτίων για το dataset thpack8-2.

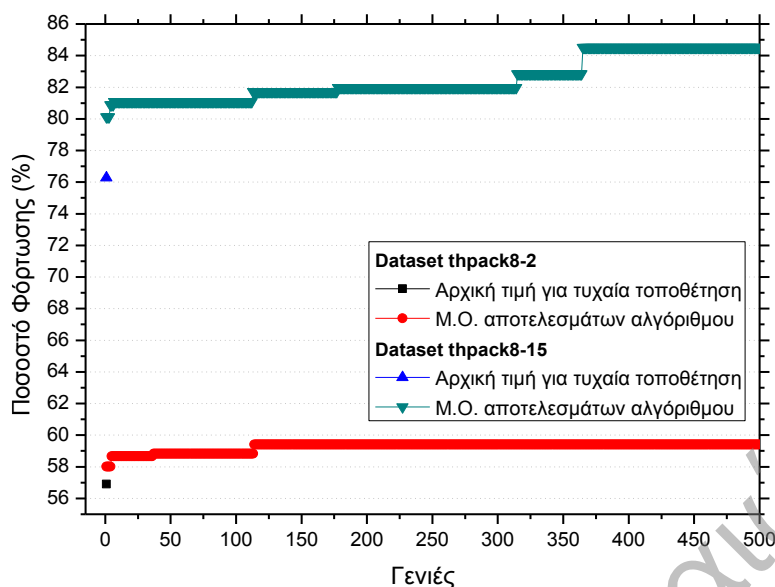
Αντίστοιχα, για το σετ thpack8-15 παρατηρήθηκε αύξηση από τον μέσο όρο της αρχικής τιμής 58.02% σε 59.40% στην τελική τιμή, που αντιστοιχεί σε μια μικρή βελτίωση 2.37% του ποσοστού φόρτωσης εντός του κοντέινερ. Η μεγαλύτερη βελτίωση (2.5 μονάδες ή 4.4%) από την αρχική τιμή για την τυχαία τοποθέτηση των κιβωτίων (56.90%), εντοπίστηκε όταν

εφαρμόστηκε ταξινόμηση κατά όγκο (59.40%). Στην Εικόνα 22 παρουσιάζεται η γραφική απεικόνιση που εξήγαγε το πρόγραμμα για την τοποθέτηση των κιβωτίων του σετ thpack8-15.



Εικόνα 22 : Γραφική απεικόνιση τοποθέτησης κιβωτίων για το dataset thpack8-15.

Στην Εικόνα 23 παρουσιάζονται οι διαφορές μεταξύ των αρχικών τιμών του ποσοστού φόρτωσης του κοντέινερ με τυχαία τοποθέτηση των κιβωτίων και των μέσων όρων των ποσοστών φόρτωσης που πέτυχε ο αλγόριθμος για κάθε σετ έως και την τελική τιμή του ποσοστού φόρτωσης. Όπως παρατηρείται, ειδικά για την περίπτωση του σετ thpack8-15 η βελτίωση στο ποσοστό φόρτωσης του κοντέινερ που πετυχαίνει ο αλγόριθμος είναι μεγάλη.



Εικόνα 23 : Σύγκριση μεταξύ αρχικής τιμής για τυχαία τοποθέτηση και μ.ο. αποτελεσμάτων αλγόριθμου.

5.3 Σύγκριση με βιβλιογραφία

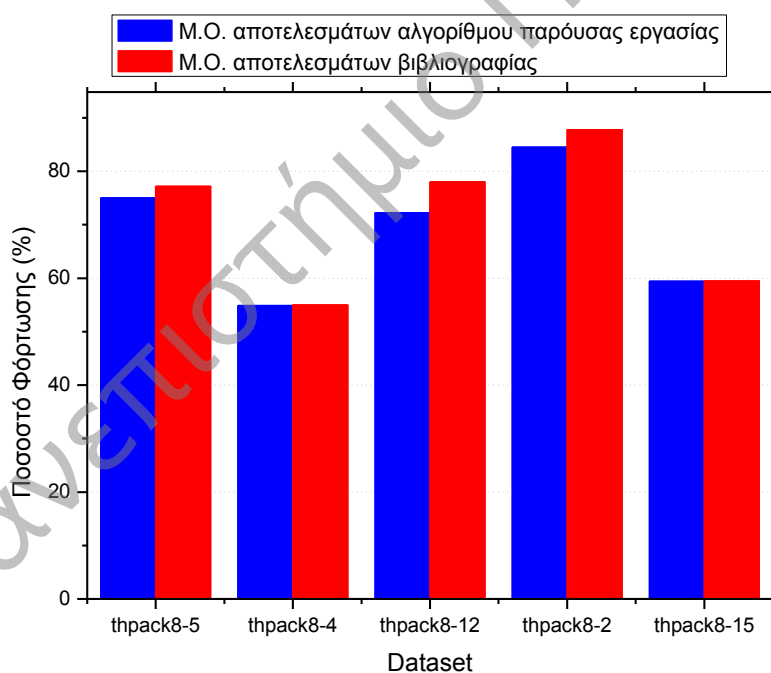
Προκειμένου να είναι δυνατή η σύγκριση των αποτελεσμάτων της εφαρμογής που αναπτύχθηκε στην παρούσα εργασία, με άλλους αλγόριθμους της βιβλιογραφίας επιλέχθηκαν σετ τα οποία έχουν χρησιμοποιηθεί σε προηγούμενες μελέτες (Loh & Nee, 1992 - Eley, 2002 - Bischoff & Ratcliff, 1995 - Ngoi, et al., 1994).

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 5 :τα αποτελέσματα του αλγόριθμου της παρούσας εργασίας είναι ίδια ή πλησιάζουν ικανοποιητικά τα αποτελέσματα άλλων εργασιών που υπάρχουν στην βιβλιογραφία για τα συγκεκριμένα σετ, με εξαίρεση μόνο τα αποτελέσματα του σετ thpack8-12. Συγκεκριμένα, στα σετ thpack8-4 και thpack8-15 η διαφορά είναι αμελητέα, της τάξεως των 0.10 μονάδων, ενώ για τα υπόλοιπα dataset οι διαφορές θεωρούνται μικρές. Αναλυτικότερα, για το dataset thpack8-5 η διαφορά είναι 2.18 μονάδες (-1.01%), ενώ για το thpack8-2 η διαφορά είναι 3,28 μονάδες (-3.88%). Τέλος το dataset thpack8-12 αποτελεί την μοναδική περίπτωση από τα πειράματα όπου η διαφορά σε σχέση με τα αποτελέσματα της βιβλιογραφίας ήταν μεγαλύτερη, συγκεκριμένα 5.92 μονάδες (-7.59%).

Πίνακας 5 : Σύγκριση μ.ο αποτελεσμάτων αλγορίθμου με μ.ο. βιβλιογραφίας.

Dataset	Αριθμός Κιβωτίων	Διαφορετικά	Μέσος Όρος αρχικής τιμής (%)	Μέσος Όρος τελικής τιμής (%)	Μέσος Όρος Αποτελεσμάτων Βιβλιογραφίας (%)
thpack8-5	120	6	70.97	75.02	77.2
thpack8-4	100	7	54.89	54.90	55
thpack8-12	120	6	67.14	72.08	78
thpack8-2	200	8	80.12	84.52	87.8
thpack8-15	250	10	58.02	59.40	59.5

Στην Εικόνα 24 παρουσιάζονται γραφικά τα τελικά αποτελέσματα των μέσω όρων του αλγορίθμου της παρούσας εργασίας για όλα τα σετ που εξετάστηκαν, καθώς και αυτά άλλων μελετών της βιβλιογραφίας. Είναι εμφανές και από το διάγραμμα ότι οι διαφορές που παρουσιάζονται είναι μικρές και εντός αποδεκτών ορίων.



Εικόνα 24 : Γραφική απεικόνιση μ.ο αποτελεσμάτων αλγορίθμου με μ.ο. βιβλιογραφίας.

Οι διαφορές που παρουσιάζονται μεταξύ των αποτελεσμάτων του αλγορίθμου της παρούσας εργασίας και των υπόλοιπων εργασιών ενδεχομένως να οφείλονται σε κάποια από τα παρακάτω:

- Σε κάποιες εργασίες ο αριθμός των γενεών για τις οποίες εκτελούνταν οι αλγόριθμοι ήταν πάνω από 1000 γενιές ενώ σε κάποιες άλλες δεν είναι γνωστός, επομένως πιθανώς με μεγαλύτερο αριθμό γενεών να υπήρχε μεγαλύτερη βελτίωση των τελικών αποτελεσμάτων.
- Καθώς η εφαρμογή αναπτύχθηκε εξολοκλήρου στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, πιθανότατα να υπάρχουν τμήματα του τα οποία επιδέχονται περαιτέρω βελτίωσης.
- Οι άλλες εργασίες χρησιμοποιούν διαφορετικούς αλγόριθμους, οι οποίοι μπορεί ενδεχομένως να είναι καλύτεροι και αποδοτικότεροι σε όλες τις περιπτώσεις ή σε συγκεκριμένα σετ.
- Η εκτέλεση των πειραμάτων πραγματοποιήθηκε σε προσωπικό υπολογιστή μειωμένης απόδοσης σε σύγκριση με τους υπολογιστές των άλλων εργασιών που διέθεταν σαφώς υψηλότερη υπολογιστική ισχύ και πόρους.
- Η ανάπτυξη επίσης της εφαρμογής σε περιβάλλον *Matlab* πιθανόν να συνεισφέρει αρνητικά στην αύξηση του υπολογιστικού χρόνου.

6 Συμπεράσματα

Από την μελέτη του προβλήματος βέλτιστης φόρτωσης εμπορευματοκιβωτίων και έπειτα από την εκτέλεση των πειραματικών δοκιμών, εξήχθησαν ορισμένα χρήσιμα συμπεράσματα σχετικά με την χρήση γενετικών αλγορίθμων για την επίλυση του προβλήματος. Η χρήση γενετικού αλγόριθμου για το πρόβλημα φόρτωσης κοντέινερ μπορεί να δώσει ικανοποιητικά αποτελέσματα σε εύλογο χρονικό διάστημα, τα οποία μπορούν να βελτιωθούν με περαιτέρω εξέλιξη του αλγόριθμου και χρήση περισσότερων υπολογιστικών πόρων. Επίσης, εξήχθησαν χρήσιμα συμπεράσματα για την αποτελεσματικότητα και την ορθή χρήση του αλγόριθμου που χρησιμοποιήθηκε. Συγκεκριμένα, αποδείχθηκε ότι η αρχική ταξινόμηση των κιβωτίων κατά όγκο πριν την έναρξη του αλγόριθμου συντελεί στην βελτίωση του τελικού ποσοστού φόρτωσης του κοντέινερ. Επίσης, παρατηρήθηκε ότι η εκτέλεση του αλγόριθμου για όσο το δυνατόν περισσότερες γενιές βελτιώνει περαιτέρω τα τελικά αποτελέσματα, έως κάποιο μέγιστο σημείο, το οποίο δεν εντοπίστηκε στην παρούσα εργασία έως τις 500 γενιές που διερευνήθηκαν. Τέλος, σε σύγκριση με άλλες μελέτες της βιβλιογραφίας αποδείχθηκε ότι ο γενετικός αλγόριθμος που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της παρούσας εργασίας έδωσε ικανοποιητικά αποτελέσματα που πλησιάζουν τις τιμές που αναφέρονται σε άλλες εργασίες ή ακόμα και ταυτίζονται με αυτές σε κάποιες περιπτώσεις.

Όπως γίνεται αντιληπτό, υπάρχουν πολλά περιθώρια και ανάγκη για περαιτέρω έρευνα στο πρόβλημα. Συγκεκριμένα προτείνεται η εκτέλεση του αλγόριθμου για περισσότερες γενιές, ενδεικτικά έως 1000, για να αποδειχθεί εάν όντως οι λύσεις βελτιώνονται περαιτέρω με αύξηση των γενεών και έως ποιο σημείο. Προτείνεται επίσης να γίνει εισαγωγή περισσότερων περιορισμών στο πρόβλημα, όπως για παράδειγμα η τοποθέτηση των ελαφρύτερων κιβωτίων στο πάνω μέρος του κοντέινερ και η ισομερής κατανομή του βάρους μέσα στο κοντέινερ, ώστε το πρόβλημα να πλησιάσει περισσότερο τις πραγματικές συνθήκες της καθημερινής χρήσης. Τέλος,

προτείνεται η δοκιμή του αλγόριθμου σε προβλήματα φόρτωσης πολλαπλών κοντέινερ, ώστε να αποδειχθεί η αποτελεσματικότητά του και σε άλλες πολυπλοκότερες περιπτώσεις.

Πανεπιστήμιο Πειραιώς

Βιβλιογραφία

- Araya, I. & Riff, C., 2014. A beam search approach to the container loading problem. *Computers & Operations Research*, Τόμος 43, pp. 100-107.
- Baker, B. S., Coffman, E. G. & Rivest, R. L., 1980. Orthogonal packing in two dimensions. *SIAM Journal on Computing*, 9(4), pp. 846-855.
- Bansal, N., Han, X., Iwama, K. & Sviridenko, M. & Z., 2007. *Harmonic algorithm for 3-Dimensional Strip Packing Problem. SODA '07 - Proceedings of the 18th Annual ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms*. Philadelphia: Society for Industrial Mathematics, s.n.
- Bianchi, L., Dorigo, M., Gambardella, M. & Gutjahr, W., 2009. A survey on metaheuristics for stochastic combinatorial optimization. *Natural Computing: an international journal*, 8(2), p. 239–287.
- Bischoff, E., Janetz, F. & Ratcliff, M., 1995. Loading pallets with non-identical items. *European Journal of Operational Research*, Τόμος 84, pp. 681-692.
- Bischoff, E. & Marriott, M., 1990. A comparative evaluation of heuristics for container loading. *European Journal of Operational Research*, Τόμος 44, pp. 267-276.
- Bischoff, E. & Ratcliff, M., 1995. Issues in the development of Approaches to Container Loading. *OMEGA*, 23(4), pp. 377-390.
- Bischoff, E., 2006. Three-dimensional packing of items with limited load bearing strength. *European Journal of Operational Research*, Τόμος 168, p. 952–966.
- Bortfeldt, A. & Gehring, H., 1998. A tabu search algorithm for weakly heterogeneous container loading problems. *OR Spectrum*, Τόμος 20, p. 237–250.
- Bortfeldt, A. & Gehring, H., 2001. A hybrid genetic algorithm for the container loading problem. *European Journal of Operational Research*, Τόμος 131, pp. 143-161.
- Bortfeldt, A., Gehring, H. & Mack, D., 2003. A parallel tabu search algorithm for solving the container loading problem. *Parallel Computing*, Τόμος 29, p. 641–662.
- Bortfeldt, A. & Wäscher, G., 2013. Constraints in container loading – A state-of-the-art review. *European Journal of Operational Research*, Τόμος 229, pp. 1-20.
- Dowland, K. & Herbet, E., 2006. Using Tree Search Bounds to Enhance a Genetic Algorithm Approach Two Rectangle Packing Problems.. *European Journal of Operation Research*. 168, 390-402., Τόμος 168, pp. 390-402.
- Dyckhoff, H., 1990. A typology of cutting and packing problems. *European Journal of Operation Research*, 44(2), pp. 145-159.

- Eley, M., 2002. Solving container loading problems by block arrangement. *European Journal of Operational Research*, 141(9), pp. 393-409.
- Fanslau, T. & Bortfeldt, A., 2010. A tree search algorithm for solving the container loading problem. *INFORMS Journal on Computing*, Τόμος 22, pp. 222-235.
- Frederickson, G. & Solis-Oba, R., 2006. Efficient algorithms for robustness in resource allocation and scheduling problems. *Theoretical Computer Science*, Τόμος 352, pp. 250-265.
- Gehring, H. & Bortfeldt, A., 1997. A genetic algorithm for solving the container loading problem. *International Transactions in Operational Research*, Τόμος 4, pp. 401-418.
- Gehring, H. & Bortfeldt, A., 2002. A parallel genetic algorithm for solving the container loading problem. *International Transactions in Operational Research*, Τόμος 9, pp. 497-511.
- George, J. & Robinson, D., 1980. A heuristic for packing boxes into a container. *Computers and Operations Research*, Τόμος 7, p. 147-156.
- Glover, F. & Kochenberger, G., 2003. *Handbook of Metaheuristics*. USA: Kluwer Editions.
- He, K. & Huang, W., 2011. An efficient placement heuristic for three-dimensional rectangular packing. *Computers & Operations Research*, 38(1), pp. 227-233.
- Hemminki, J., 1994. *Container loading with variable strategies in each layer, Presented at ESI-X, EURO Summer Institute*. France, s.n., pp. 2-15.
- Hifi, M., 2002. Approximate algorithms for the container loading problem. *International Transactions in Operational Research*, 9(6), pp. 747-774.
- Hifi, M., 2004. Exact algorithms for unconstrained three-dimensional cutting problems: a comparative study. *Computers & Operations Research*, 31(5), p. 657-674 Mhand Hifi.
- Holland, J. H., 1975. *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. First Edition επιμ. Massachusetts: University of Michigan Press.
- Hopper, E., 2000. Two-dimensional packing utilising evolutionary algorithms and other metaheuristic methods. Στο: *A Thesis submitted for the Degree of Doctor of Philosophy*. London: University of Wales, Cardiff.
- Kang, K., Moon, I. & Wang, H., 2012. A hybrid genetic algorithm with a new packing strategy for the three-dimensional bin packing problem. *Applied Mathematics and Computation*, 219(3), pp. 1287-1299.
- Karabulut, K. & Mustafa, M. M., 2004. A hybrid genetic algorithm for packing in 3D with deepest bottom left with fill method. *ADVIS 2004: Advances in Information Systems*, pp. 441-450.
- Li, K. & Cheng, K. H., 1990. On Three-Dimensional Packing. *SIAM Journal on Computing*, Τόμος 19, pp. 847-867.

Lim, A., B., R. & Yang, Y., 2005. 3-D container packing heuristics. *Applied Intelligence*, Τόμος 22, pp. 125-134.

Loh, H. T. & Nee, A. Y. C., 1992. *A Packing Algorithm for Hexahedral Boxes*. s.l., Proceedings of the Conference of Industrial Automation.

Mack, D., Bortfeldt, A. & Gehring, H., 2004. A parallel hybrid local search algorithm for the container loading problem. *International Transactions in Operational Research*, Τόμος 11, pp. 511-533.

Martello, S., Pisinger, D. & Vigo, D., 2000. The three dimensional bin packing problem. *Operations Research*, Τόμος 48, p. 256 – 267.

Mathworks, 2014. *How the Genetic Algorithm Works*. Available at: <http://www.mathworks.com/help/gads/how-the-genetic-algorithm-works.html> [Πρόσβαση 12 Αυγούστου 2014].

Michalewicz, Z., 1996. *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs*. First Edition επιμ. New York: Springer-Verlag.

Miyazawa, F. K. & Wakabayashi, Y., 1999. Approximation algorithms for the orthogonal z-oriented three-dimensional packing. *SIAM Journal on Computing*, Τόμος 29, pp. 1008-1029.

Miyazawa, F. K. & Wakabayashi, Y., 2007. Two- and three-dimensional parametric packing. *Computers & Operations Research*, Τόμος 9, pp. 2589-2603.

Miyazawa, F. K. & Wakabayashi, Y., 2009. Three-dimensional packings with rotations. *Computers & Operations Research*, Τόμος 36, pp. 2801-2815.

Morabito, R. & Arenales, M., 1994. An AND/OR-graph approach to the container loading problem. *International Transactions in Operational Research*, Τόμος 1, pp. 59-73.

Moura, A. & Oliveira, J., 2005. A GRASP approach to the container-loading problem. *IEEE Intelligent Systems*, Τόμος 20, pp. 50-57.

Ngoi, B. K. A., Tay, M. L. & Chua, E. S., 1994. Applying spatial representation techniques to the container packing problem. *International Journal of Production Research*, Τόμος 32, pp. 111-123.

Parreño, F., Alvarez-Valdes, R., Oliveira, J. & Tamarit, J., 2007. A maximal-space algorithm for the container loading problem. *INFORMS Journal on Computing*, 20(3), pp. 412-422.

Parreño, F., Alvarez-Valdes, R., Oliveira, J. & Tamarit, J., 2010. Neighborhood structures for the container loading problem: a VNS implementation. *Journal of Heuristics*, Τόμος 16, pp. 1-22.

Pisinger, D., 1997. *The container loading problem*. Copenhagen, Nordic Operations Research Conference.

Pisinger, D., 2002. Heuristics for the container loading problem. *European Journal of Operational Research*, Τόμος 141, pp. 143-143.

Plummer, M. D., 1993. Matching and Vertex Packing: How “hard” are They?. *Annals of Discrete Mathematics*, Τόμος 55, pp. 275-312.

Rajesh, S. & Saravana, M., 2012. 3d Arbitrary Sized Bin Packing Optimization Using 2pdc Heuristic: A Adaptive Genetic Approach. *ARN Journal of Science and Technology*, 2(2), pp. 26-31.

Vazirani, V., 2003. *Approximation Algorithms*. Second Edition επιμ. Atlanta: Georgia Institute of Technology.

Wäscher, G., Haußner, H. & Schumann, H., 2007. An improved typology of cutting and packing problems. *European Journal of Operational Research*, 183(3), pp. 1109-1130.

Wikipedia, 2014. *Metaheuristic*. Available at: <http://en.wikipedia.org/wiki/Metaheuristic> [Πρόσβαση 18 Αυγούστου 2014].

Zhang, D., Peng, Y., Zhu, W. & Chen, H., 2009. A hybrid simulated annealing algorithm for the three-dimensional packing problem. *Chinese Journal of Computers*, 32(11), pp. 2147-2156.

Zhang, D., Wei, L., Chen, Q. & Chen, H., 2007. A combinational heuristic algorithm for the three-dimensional packing problem. *Journal of software*, 18(9), p. 2083–2089.

Γεωργόπουλος, Ε. & Λυκοθανάσης, Σ., 2008. *Εισαγωγή στους Γενετικούς Αλγορίθμους*. Πάτρα: Πανεπιστήμιο Πατρών-Πολυτεχνική Σχολή, Εργαστήριο Αναγνώρισης Προτύπων.

Δρ. Σάββας, Η. Κ., 2005. *Σημειώσεις για το μάθημα Αλγόριθμοι & Πολυπλοκότητα*. Δρ. Ηλίας Κ. Σάββας. Λάρισα: Τεχνολογικό Ίδρυμα Λάρισας.

Καννελίδης, Β. Ι., 2010. Ανάπτυξη υπολογιστικών εργαλείων για την βελτιστοποίηση των διαδικασιών στρωματικής κατασκευής. *Διδακτορική διατριβή, Πανεπιστήμιο Πειραιώς*.

Κωσταρέλου, Ε. & Κοζανίδης, Γ., 2012. *Ακριβείς και ευρετικοί αλγόριθμοι μεικτού ακέραιου διεπίπεδου προγραμματισμού για βέλτιστη υποβολή προσφορών σε αγορές ημερήσιου προγραμματισμού ηλεκτρικής ενέργειας*. Αθήνα, 23ο Εθνικό Συνέδριο Ελληνικής Εταιρείας Επιχειρησιακών Ερευνών.

Μαρινάκης, Ι., Μαρινάκη, Μ., Ματσατσίνης, Ν. & Ζοπουνίδης, Κ., 2011. *Μεθευρετικοί και εξελικτικοί αλγόριθμοι σε προβλήματα Διοίκησης Επιστήμης*. Αθήνα: Εκδόσεις Κλειδάριθμος.

Οικονόμου, Θ., 2005. *Συστήματα διαχείρισης γνώσης στην ηλεκτρονική διακυβέρνηση*. Αθήνα, Τμήμα Πολιτικής Επιστήμης και Δημόσιας Διοίκησης.

Παραρτήματα

Παράρτημα Α - Ενδεικτικά αποτελέσματα ενός πειράματος από τον αλγόριθμο

'Box'	'w'	'h'	'l'	'x'	'y'	'z'	'R'	'Volume'
'42'	'225'	'250'	'300'	'0'	'0'	'0'	'2'	16,875,000
'85'	'800'	'250'	'250'	'225'	'0'	'0'	'0'	50,000,000
'15'	'375'	'200'	'400'	'1025'	'0'	'0'	'4'	30,000,000
'29'	'400'	'200'	'375'	'1400'	'0'	'0'	'1'	30,000,000
'57'	'100'	'500'	'500'	'1800'	'0'	'0'	'5'	25,000,000
'53'	'100'	'500'	'500'	'1900'	'0'	'0'	'5'	25,000,000
'105'	'200'	'1500'	'200'	'2000'	'0'	'0'	'3'	60,000,000
'64'	'100'	'500'	'500'	'2200'	'0'	'0'	'5'	25,000,000
'100'	'1500'	'200'	'200'	'0'	'250'	'0'	'0'	60,000,000
'65'	'500'	'500'	'100'	'2300'	'0'	'0'	'3'	25,000,000
'32'	'200'	'375'	'400'	'2800'	'0'	'0'	'2'	30,000,000
'112'	'900'	'200'	'200'	'0'	'450'	'0'	'1'	36,000,000
'67'	'100'	'500'	'500'	'1500'	'250'	'0'	'5'	25,000,000
'68'	'500'	'500'	'100'	'900'	'450'	'0'	'0'	25,000,000
'73'	'100'	'500'	'500'	'1600'	'250'	'0'	'2'	25,000,000
'61'	'500'	'100'	'500'	'2200'	'500'	'0'	'4'	25,000,000
'10'	'400'	'375'	'200'	'2200'	'600'	'0'	'0'	30,000,000
'11'	'375'	'200'	'400'	'2600'	'600'	'0'	'4'	30,000,000
'45'	'250'	'225'	'300'	'0'	'650'	'0'	'4'	16,875,000
'77'	'800'	'250'	'250'	'0'	'875'	'0'	'0'	50,000,000
'107'	'200'	'900'	'200'	'1800'	'500'	'0'	'5'	36,000,000
'12'	'400'	'200'	'375'	'250'	'650'	'0'	'1'	30,000,000
'9'	'400'	'200'	'375'	'2600'	'800'	'0'	'1'	30,000,000
'18'	'200'	'375'	'400'	'1600'	'750'	'0'	'2'	30,000,000
'72'	'100'	'500'	'500'	'1700'	'250'	'0'	'2'	25,000,000
'4'	'200'	'400'	'375'	'900'	'950'	'0'	'5'	30,000,000
'88'	'200'	'1500'	'200'	'1800'	'500'	'200'	'3'	60,000,000
'44'	'225'	'300'	'250'	'1100'	'950'	'0'	'5'	16,875,000
'2'	'200'	'375'	'400'	'1325'	'950'	'0'	'2'	30,000,000
'111'	'200'	'900'	'200'	'2600'	'1000'	'0'	'5'	36,000,000
'97'	'1500'	'200'	'200'	'0'	'250'	'200'	'0'	60,000,000
'69'	'100'	'500'	'500'	'1400'	'450'	'0'	'5'	25,000,000
'99'	'1500'	'200'	'200'	'0'	'250'	'400'	'1'	60,000,000
'26'	'200'	'400'	'375'	'2200'	'975'	'0'	'5'	30,000,000
'46'	'300'	'250'	'225'	'0'	'1125'	'0'	'0'	16,875,000
'94'	'1500'	'200'	'200'	'0'	'1375'	'0'	'0'	60,000,000

'79'	'800'	'250'	'250'	'0'	'1575'	'0'	'1'	50,000,000
'27'	'200'	'375'	'400'	'2400'	'975'	'0'	'2'	30,000,000
'31'	'200'	'400'	'375'	'2800'	'1000'	'0'	'5'	30,000,000
'30'	'375'	'400'	'200'	'2200'	'1375'	'0'	'3'	30,000,000
'71'	'100'	'500'	'500'	'800'	'875'	'0'	'2'	25,000,000
'116'	'200'	'200'	'900'	'2800'	'375'	'0'	'4'	36,000,000
'28'	'375'	'400'	'200'	'800'	'1575'	'0'	'3'	30,000,000
'114'	'200'	'900'	'200'	'2000'	'0'	'200'	'5'	36,000,000
'101'	'1500'	'200'	'200'	'0'	'1375'	'200'	'1'	60,000,000
'104'	'200'	'1500'	'200'	'2000'	'0'	'400'	'5'	60,000,000
'117'	'200'	'900'	'200'	'2600'	'1000'	'200'	'3'	36,000,000
'82'	'800'	'250'	'250'	'800'	'1575'	'200'	'0'	50,000,000
'37'	'225'	'250'	'300'	'300'	'1125'	'0'	'2'	16,875,000
'62'	'100'	'500'	'500'	'1600'	'1125'	'0'	'5'	25,000,000
'41'	'250'	'225'	'300'	'650'	'650'	'0'	'4'	16,875,000
'60'	'100'	'500'	'500'	'1700'	'1125'	'0'	'2'	25,000,000
'74'	'100'	'500'	'500'	'2800'	'1400'	'0'	'2'	25,000,000
'108'	'200'	'900'	'200'	'2000'	'900'	'200'	'3'	36,000,000
'3'	'200'	'375'	'400'	'1600'	'1625'	'0'	'2'	30,000,000
'63'	'100'	'500'	'500'	'2900'	'1400'	'0'	'5'	25,000,000
'84'	'250'	'800'	'250'	'0'	'450'	'400'	'5'	50,000,000
'95'	'1500'	'200'	'200'	'0'	'1375'	'400'	'0'	60,000,000
'75'	'100'	'500'	'500'	'2300'	'0'	'100'	'2'	25,000,000
'89'	'200'	'1500'	'200'	'1800'	'500'	'400'	'5'	60,000,000
'5'	'400'	'200'	'375'	'2200'	'1775'	'0'	'1'	30,000,000
'39'	'225'	'300'	'250'	'2400'	'0'	'100'	'5'	16,875,000
'120'	'200'	'900'	'200'	'2200'	'975'	'375'	'5'	36,000,000
'7'	'375'	'200'	'400'	'2400'	'300'	'100'	'4'	30,000,000
'115'	'900'	'200'	'200'	'0'	'450'	'200'	'0'	36,000,000
'49'	'225'	'300'	'250'	'900'	'450'	'100'	'5'	16,875,000
'33'	'200'	'375'	'400'	'1125'	'450'	'100'	'2'	30,000,000
'118'	'900'	'200'	'200'	'0'	'0'	'300'	'0'	36,000,000
'55'	'500'	'100'	'500'	'0'	'1825'	'0'	'4'	25,000,000
'119'	'900'	'200'	'200'	'0'	'0'	'500'	'1'	36,000,000
'24'	'400'	'200'	'375'	'2200'	'600'	'200'	'1'	30,000,000
'8'	'400'	'375'	'200'	'1175'	'1575'	'0'	'0'	30,000,000
'66'	'500'	'500'	'100'	'250'	'650'	'375'	'0'	25,000,000
'47'	'225'	'300'	'250'	'1100'	'950'	'250'	'5'	16,875,000
'81'	'800'	'250'	'250'	'0'	'1575'	'250'	'0'	50,000,000
'23'	'375'	'200'	'400'	'2400'	'0'	'350'	'4'	30,000,000
'21'	'200'	'400'	'375'	'900'	'450'	'350'	'5'	30,000,000

'48'	'300'	'225'	'250'	'1400'	'0'	'375'	'1'	16,875,000
'83'	'800'	'250'	'250'	'800'	'1575'	'450'	'0'	50,000,000
'40'	'250'	'225'	'300'	'525'	'1125'	'0'	'4'	16,875,000
'102'	'200'	'1500'	'200'	'1600'	'250'	'500'	'3'	60,000,000
'113'	'200'	'900'	'200'	'2600'	'600'	'400'	'5'	36,000,000
'98'	'200'	'1500'	'200'	'1800'	'500'	'600'	'5'	60,000,000
'34'	'400'	'200'	'375'	'250'	'1150'	'375'	'1'	30,000,000
'80'	'800'	'250'	'250'	'800'	'875'	'500'	'1'	50,000,000
'38'	'300'	'225'	'250'	'1025'	'0'	'400'	'1'	16,875,000
'22'	'200'	'400'	'375'	'2800'	'1000'	'375'	'5'	30,000,000
'110'	'900'	'200'	'200'	'0'	'1375'	'600'	'1'	36,000,000
'16'	'200'	'400'	'375'	'2800'	'600'	'400'	'5'	30,000,000
'35'	'200'	'375'	'400'	'2800'	'0'	'400'	'2'	30,000,000
'90'	'200'	'1500'	'200'	'2000'	'500'	'600'	'3'	60,000,000
'56'	'100'	'500'	'500'	'2400'	'975'	'400'	'5'	25,000,000
'93'	'1500'	'200'	'200'	'0'	'250'	'600'	'0'	60,000,000
'58'	'100'	'500'	'500'	'2500'	'975'	'400'	'2'	25,000,000
'17'	'375'	'200'	'400'	'250'	'450'	'400'	'4'	30,000,000
'91'	'200'	'1500'	'200'	'2200'	'500'	'600'	'5'	60,000,000
'51'	'500'	'500'	'100'	'250'	'650'	'475'	'3'	25,000,000
'70'	'500'	'500'	'100'	'250'	'650'	'575'	'0'	25,000,000
'50'	'225'	'250'	'300'	'1125'	'450'	'500'	'2'	16,875,000
'36'	'225'	'300'	'250'	'2400'	'300'	'500'	'5'	16,875,000
'96'	'200'	'1500'	'200'	'1600'	'250'	'700'	'5'	60,000,000
'13'	'400'	'375'	'200'	'1800'	'1625'	'0'	'0'	30,000,000
'76'	'800'	'250'	'250'	'800'	'1125'	'500'	'1'	50,000,000
'106'	'200'	'900'	'200'	'2600'	'600'	'600'	'3'	36,000,000
'1'	'400'	'200'	'375'	'0'	'1575'	'500'	'1'	30,000,000
'43'	'225'	'250'	'300'	'1350'	'450'	'500'	'2'	16,875,000
'52'	'500'	'500'	'100'	'250'	'650'	'675'	'3'	25,000,000
'19'	'375'	'200'	'400'	'400'	'1575'	'500'	'4'	30,000,000
'6'	'200'	'400'	'375'	'2400'	'1475'	'400'	'5'	30,000,000
'54'	'500'	'500'	'100'	'800'	'875'	'750'	'3'	25,000,000
'14'	'200'	'400'	'375'	'2600'	'1500'	'400'	'5'	30,000,000
'20'	'400'	'375'	'200'	'2000'	'0'	'600'	'0'	30,000,000
'25'	'200'	'400'	'375'	'1800'	'0'	'500'	'5'	30,000,000
'103'	'1500'	'200'	'200'	'0'	'0'	'700'	'1'	60,000,000
'59'	'500'	'500'	'100'	'250'	'650'	'775'	'0'	25,000,000
'78'	'250'	'800'	'250'	'0'	'450'	'650'	'3'	50,000,000

Παράρτημα Β – Σετ δεδομένων

Ελαφρώς ετερογενή κιβώτια		
thpack-4 3000 2000 1100 7 1 400 0 375 0 200 1 16 2 400 0 250 0 250 1 23 3 300 0 300 0 200 1 17 4 500 0 500 0 225 1 9 5 800 0 400 0 275 1 8 6 600 0 200 0 275 1 17 7 900 0 200 0 275 1 10	thpack-12 3200 2400 1000 6 1 900 0 275 0 200 1 10 2 400 0 350 0 275 1 33 3 1200 0 300 0 250 1 10 4 500 0 375 0 275 1 27 5 800 0 400 0 200 1 15 6 600 0 300 0 225 1 25	thpack-5 3000 2000 900 6 1 400 0 375 0 200 1 35 2 300 0 250 0 225 1 15 3 500 0 500 0 100 1 25 4 800 0 250 0 250 1 10 5 1500 0 200 0 200 1 20 6 900 0 200 0 200 1 15
Έντονα ετερογενή κιβώτια		
thpack-2 3000 2000 1000 8 1 400 0 375 0 250 1 29 2 400 0 400 0 150 1 37 3 300 0 300 0 200 1 34 4 500 0 375 0 400 1 19 5 800 0 275 0 200 1 16 6 450 0 350 0 350 1 17 7 900 0 200 0 200 1 25 8 200 0 200 0 125 1 23	thpack-15 6000 2800 1400 10 1 925 0 500 0 225 1 21 2 500 0 500 0 500 1 30 3 475 0 225 0 325 1 28 4 450 0 350 0 350 1 19 5 375 0 225 0 325 1 41 6 1500 0 125 0 200 1 26 7 600 0 475 0 200 1 23 8 400 0 400 0 125 1 25 9 375 0 375 0 300 1 20 10 500 0 375 0 400 1 17	