



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ

**Διερεύνηση δυνατοτήτων εφαρμογής πρωτοκόλλων 6R
(Reduce, Reuse, Recycle, Remanufacture, Redesign, Recover)
σε παρωχημένο εργαστηριακό εξοπλισμό του Εργαστηρίου
Στοιχείων Μηχανών και Δυναμικής ΕΜΠ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΤΟΥ
Γεώργιου Μπούτσικου

Επιβλέπων: Βασίλειος Σπιτάς
Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2022

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	3
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	5
ABSTRACT.....	7
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	9
1.1. Ορισμός και σημασία της κυκλικής οικονομίας.....	9
1.2. Ορισμός 6R Πρωτοκόλλων	10
1.3. Ορισμός του Urcycling	11
1.4. Αποτελέσματα εφαρμογής κυκλικού μοντέλου.....	14
2. Αποθήκευση Παρωχημένου Εξοπλισμού	15
2.1. Περιγραφή Αλγόριθμου Αποθήκευσης.....	16
2.2. Είσοδοι – Metrics.....	18
2.3. Αντικειμενική συνάρτηση	22
3. Μεθοδολογία Urcycling	24
3.1. Περιγραφή μεθοδολογίας	24
3.2. 1 ^η Προσέγγιση σχεδιασμού – Σχεδιασμός βάσει διαθέσιμου εξοπλισμού 24	
3.3. 2 ^η Προσέγγιση σχεδιασμού- Σχεδιασμός βάσει ιδανικών προδιαγραφών 26	
3.4. Αλγόριθμος λήψης αποφάσεων για εφαρμογή ή μη της μεθοδολογίας urcycling 26	
3.5. Περιβαλλοντικό Κριτήριο	29
4. Καθορισμός των βαρών για την αποθήκευση ή μη τεμαχίων και διατάξεων 30	
5. Case Studies	40
5.1. Case Study 1: Urcycling παρωχημένης μηχανής έγχυσης πλαστικού σε αρθρωτό πάγκο για δοκιμές σε στοιχεία υδραυλικού κυκλώματος υψηλής πίεσης 40	
5.2. Case Study 2: Σχεδιασμός Υδραυλικού Διαφορικού	42
5.3. Case Study 3: Λειτουργική αναβάθμιση παρωχημένης διάταξης για δοκιμές σε γρανάζια 44	
5.4. Case Study 4: Ανασχεδιασμός σύγχρονης μηχανής δοκιμών φθοράς..	46
6. Συμπεράσματα & προοπτική μελλοντικής βελτιστοποίησης.....	51
7. Βιβλιογραφία	52
Παράρτημα	53

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία έχει ως σκοπό την ανάπτυξη μίας μεθοδολογίας βασισμένης στις αρχές της κυκλικής οικονομίας και τη διερεύνηση του πεδίου εφαρμογής της. Στόχος είναι, αφενός ή ελαχιστοποίηση της άκριτης απόρριψης παρωχημένου εργαστηριακού εξοπλισμού, καθώς και η βέλτιστη αξιοποίησή του ανάλογα με τις εκάστοτε ανάγκες. Θα γίνει αναφορά στον όρο “Upcycling” ή ‘Ανωκύκλωση’, ο οποίος είναι σχετικά άγνωστος για την ώρα, καθώς και στα πρωτόκολλα 6R (Reduce, Reuse, Recycle, Remanufacture, Redesign, Recover) στα οποία αυτό βασίζεται. Στη συνέχεια θα αναπτυχθεί ένας αλγόριθμος λήψης αποφάσεων που απαντά στο κατά πόσο και υπό ποιές συνθήκες παρωχημένος εργαστηριακός εξοπλισμός δύναται να αποθηκευτεί για μελλοντική χρήση και ένας δεύτερος που απαντά στο πόσο αποδοτική είναι η εφαρμογή ενός σχεδιασμού με τη μέθοδο “Upcycling” για την ανάπτυξη εφαρμογών ενός εργαστηρίου σε σύγκριση με την προμήθεια από την αγορά. Τέλος, θα περιγραφούν case studies που έχουν υλοποιηθεί βάσει του σχεδιασμού Upcycling και θα παρουσιαστούν και θα σχολιαστούν τα αποτελέσματα.

ABSTRACT

The purpose of this thesis is the development of a methodology, based on the principles of circular economy and the research into the field of its application. First, the target is the minimization of the unconsidered disposal of obsolete laboratory equipment and its optimal utilization, depending on the circumstances. A reference to the term “Upcycling” shall be given, which is relatively uncommon for the time being and the 6R protocols (Reduce, Reuse, Recycle, Remanufacture, Redesign, Recover), on which it is based. Later on, a decision-making algorithm is going to be developed, that will answer if and under what circumstances obsolete equipment could be stored for future usage. A second algorithm will be also presented, that will answer how efficient the application of an Upcycling design for manufacturing a testing machine in demand inside the laboratory will be, in comparison to buying a new one from the market. In the end, some case studies about already implemented upcycling designs and the results of them will be demonstrated and discussed.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1. Ορισμός και σημασία της κυκλικής οικονομίας

Η κυκλική οικονομία είναι ένα μοντέλο οικονομικής, κοινωνικής και περιβαλλοντικής παραγωγής και κατανάλωσης που έχει σαν στόχο τη βιωσιμότητα. Είναι ένα κυκλικό μοντέλο που έρχεται σε αντίθεση με το παραδοσιακό γραμμικό. Το γραμμικό μοντέλο βασίζεται στην αλληλουχία «Προμήθεια-Παραγωγή-Απόρριψη». Αντίθετα, το κυκλικό μοντέλο μετασχηματίζει τη διαδικασία σε έναν κλειστό βρόγχο αλληλεπίδρασης όπου τα προϊόντα ανακυκλώνονται ή επαναχρησιμοποιούνται, βελτιώνοντας έτσι το συνολικό ενεργειακό ισοζύγιο.

Το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο ορίζει την κυκλική οικονομία ως "ένα μοντέλο παραγωγής και κατανάλωσης, το οποίο περιλαμβάνει την ανταλλαγή, εκμίσθωση, επαναχρησιμοποίηση, επισκευή, ανακαίνιση και ανακύκλωση των υπαρχόντων υλικών και προϊόντων όσο το δυνατόν περισσότερο προκειμένου να παραταθεί ο κύκλος ζωής τους [1].

Στο 11ο πενταετές σχέδιο της Κίνας για την οικονομική και κοινωνική ανάπτυξη (2006-2010), η κυκλική οικονομία περιγράφεται ως συνδυασμός οικονομικής ανάπτυξης με τη διατήρηση των πόρων σύμφωνα με την «αρχή των 3R» (reduce, reuse, recycle). Το άρθρο 2 του νόμου περί προώθησης της κυκλικής οικονομίας αναφέρει: «Ο όρος κυκλική οικονομία" όπως αναφέρεται σε αυτά τα μέτρα είναι ένας γενικός όρος για τις δραστηριότητες ελαχιστοποίησης, επαναχρησιμοποίησης και ανακύκλωσης που διεξάγονται κατά τη διαδικασία παραγωγής, κυκλοφορίας και κατανάλωσης».

Η κυκλική οικονομία είναι ένα παραγωγικό και καταναλωτικό μοντέλο που αποσκοπεί στην αύξηση της αποδοτικότητας των πρώτων υλών, μέσω της χρήσης των υλικών για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, με παράλληλη ελαχιστοποίηση της χρήσης φυσικών πόρων. Στόχος της είναι, επίσης, η ανάπτυξη ανακυκλώσιμων πόρων για την προστασία της κοινωνίας και του περιβάλλοντος από τον ολοένα αυξανόμενο όγκο αποβλήτων και να δοθεί η δυνατότητα στις διάφορες οικονομίες ανά τον κόσμο να γίνουν πιο αυτόνομες, βιώσιμες και συντονισμένες με το ζήτημα των περιβαλλοντικών πόρων.



Εικόνα 1. Διαφορές γραμμικού και κυκλικού οικονομικού μοντέλου

1.2. Ορισμός 6R Πρωτοκόλλων

Η «αρχή των 3R», που αναφέρθηκε στον ορισμό της κυκλικής οικονομίας, έχει επεκτάθει σύμφωνα με πρόσφατες επιστημονικές έρευνες στην «αρχή των 6R» (reuse, recycle, redesign, remanufacture, reduce, recover).

Reuse: Επαναχρησιμοποίηση των προϊόντων.

Recycle: Ανακύκλωση προϊόντων με επαναφορά στην βασική αρχική τους μορφή. Εμπεριέχει την υποβάθμιση του προϊόντος (downcycling) και προτείνεται όταν δεν υπάρχει δυνατότητα για κάποια από τις υπόλοιπες εναλλακτικές της «αρχής 6R»

Redesign: Επανασχεδιασμός των προϊόντων που είναι στο τελικό στάδιο της ζωής τους, με στόχο τη μετατροπή τους σε νέα.

Remanufacture: Ανακατασκευή προϊόντων, που προϋποθέτει το στάδιο του επανασχεδιασμού. Αφορά τις πιθανές κατεργασίες ή τη συναρμολόγηση που απαιτούνται για τη δημιουργία του νέου προϊόντος.

Reduce: Αφορά την μείωση τόσο των αποβλήτων, όσο και της δαπανώμενης ενέργειας για τη παραγωγή νέων αγαθών.

Recover: Ανάκτηση των προϊόντων χωρίς την υποβάθμιση της αξίας τους, διατηρώντας, συνήθως, τη μορφή και τη λειτουργία τους.



Εικόνα 2. Σύμβολα για Upcycling, Recycling και Downcycling

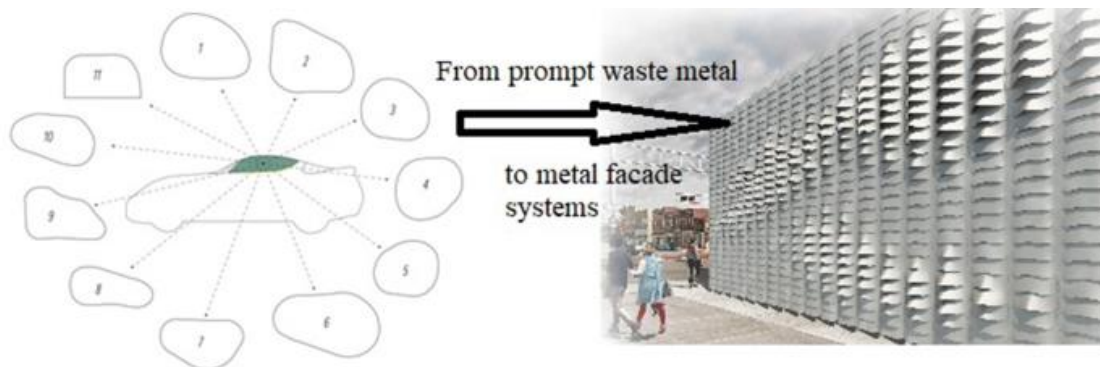
1.3. Ορισμός του Upcycling

Το upcycling είναι η δημιουργία νέων αντικειμένων, από παλιά, συνήθως μη λειτουργικά υπηρετώντας τη βασική αρχή της επιμήκυνσης του χρόνου ζωής των προϊόντων, μέσα από τη μετατροπή τους σε άλλα με νέα χρηστική αξία, αποσκοπώντας, κυρίως, στη βιωσιμότητα. Έρχεται σε αντίθεση με το recycling ή ανακύκλωση στα ελληνικά, το οποίο βασίζεται ουσιαστικά στην ελαχιστοποίηση των απορριμμάτων μέσω της επεξεργασίας τους και επαναφοράς τους στην αρχική τους κατάσταση. Η επεξεργασία, σαν διαδικασία, εμπεριέχει την υποβάθμιση (downcycling) ενός προϊόντος, αφαιρώντας από αυτό την αξία κατεργασίας του. Η επεξεργασία είναι, επίσης, μια ενεργοβόρα διαδικασία, διότι τα απόβλητα χρειάζονται ενέργεια για να επανέλθουν στην βασική τους μορφή (γυαλί, χαρτί, πλαστικό, μέταλλο) και στη συνέχεια επιπλέον ενέργεια για να τους δοθεί νέα μορφή.

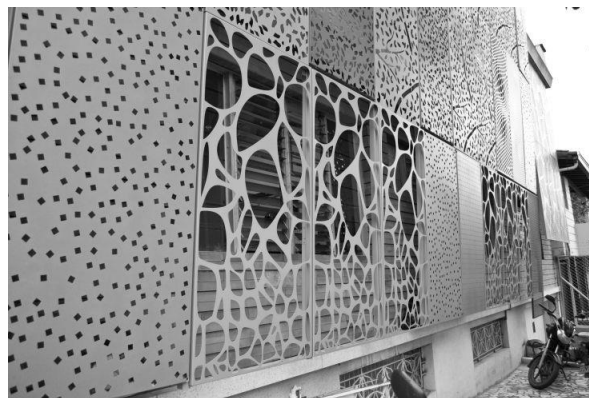
Η ιδέα του Upcycling γενήθηκε στα μέσα της δεκαετίας του 1990, χάρη στον Reiner Pilz. Ο Reiner Pilz αποφάσισε να μην καταστρέφει τα αντικείμενα, αποφεύγοντας, έτσι την παραδοσιακή ανακύκλωσή τους. Αντιθέτως, ήθελε να προσθέσει αξία σε χρησιμοποιημένα και μη λειτουργικά αντικείμενα, επαναχρησιμοποιώντας τα.

Το Upcycling είναι άμεσα συνυφασμένο με τις αρχές της κυκλικής οικονομίας και των 6R. Όταν ένα προϊόν φτάνει στο τέλος της ζωής του, τα υλικά κατασκευής του διατηρούνται μέσα στην οικονομία με οποιοδήποτε δυνατό τρόπο για να χρησιμοποιηθούν ξανά δημιουργώντας προστιθέμενη αξία στο προϊόν. Στόχος είναι να επαναφέρονται τα υλικά από τη ροή των αποβλήτων στη ροή ανάπτυξης νέων με μεγαλύτερη αξία.

Το Upcycling βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στη φαντασία του σχεδιαστή. Σήμερα, εκτός από μεμονωμένα άτομα, πολλές εταιρίες σε διάφορους τομείς έχουν υιοθετήσει τέτοιου είδους τεχνικές, κυρίως με δομικά υλικά για την ασφαλή στρωση των δρόμων, αλλά και με πολλά αντικείμενα design, όπως για παράδειγμα τσάντες φτιαγμένες από πανιά ιστιοπλοϊκών, μια ιδέα που έχει κάνει πράξη μια ελληνική εταιρεία. Ο Ali et al. (2019) μελέτησε της δημιουργία προσόψεων σε κτίρια (Voronoi Facades) από φύλλα μετάλλου, τα οποία προήλθαν από την αυτοκινητοβιομηχανία. Άλλες σχετικές εφαρμογές φαίνονται στις φωτογραφίες που ακολουθούν. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η επαναχρησιμοποίηση των φύλλων μετάλλου αντί της συμβατικής ανακύκλωσής τους θα οδηγούσε σε μείωση του κόστους της τάξης του 40% (400 \$/ton) και εξοικονόμηση της δαπανώμενης ενέργειας περίπου 67% (10 MJ/kg).



Εικόνα 3. Επαναχρησιμοποίηση φύλλων μετάλλου από την αυτοκινητοβιομηχανία για κατασκευή κτιριακών προσόψεων



Εικόνα 4. Μεταλλική πρόσοψη κτιρίου τύπου Voronoi



Εικόνα 5: Πεζογέφυρα από λεπίδα ανεμογεννήτριας



Εικόνα 6: Στέγαστρο για ποδήλατα στη Δανία από παλιά λεπίδα ανεμογεννητριας



Εικόνα 7: Ξενοδοχείο από χρησιμοποιημένα container

1.4. Αποτελέσματα εφαρμογής κυκλικού μοντέλου

Τα αποτελέσματα εφαρμογής ενός μοντέλου κυκλικής οικονομίας, βασιζόμενο στις προαναφερθείσες αρχές των 3R και κατ' επέκταση των 6R, ποικίλουν. Στον οικονομικό τομέα η επαναχρησιμοποίηση προϊόντων μειώνει σημαντικά τις δαπάνες των βιομηχανιών επιτρέποντας την επένδυση σε άλλους τομείς, όπως η έρευνα και η ανάπτυξη. Η επαναχρησιμοποίηση οδηγεί, επίσης, στην μείωση της αλόγιστης παραγωγής αγαθών, με άμεση συνέπεια τη μείωση εκπομπών επικίνδυνων ουσιών για το περιβάλλον και τη μείωση της ποσότητας αποβλήτων, τα οποία μολύνουν το υπέδαφος και το νερό. Επιπρόσθετα, αποτέλεσμα ενός κυκλικού μοντέλου είναι η εξοικονόμηση ενέργειας. Η εξοικονόμηση ενέργειας αποτελεί μείζον κοινωνικό ζήτημα, το οποίο απασχολεί την επιστημονική κοινότητα όλο και περισσότερο. Τέλος, ο συνδυασμός όλων όσων αναφέρθηκαν έχει θετικό αντίκτυπο στην ανθρώπινη υγεία και αυξάνει σαφώς το επίπεδο ζωής.

2. Αποθήκευση Παρωχημένου Εξοπλισμού

Με την πάροδο του χρόνου, καθώς η τεχνολογία εξελίσσεται ταχύτατα, η διάρκεια ζωής του εργαστηριακού εξοπλισμού ολοένα και μειώνεται, υπό την έννοια ότι σύντομα κρίνεται παρωχημένος. Ωστόσο, η άκριτη απόρριψη δημιουργεί τεράστιους όγκους αποβλήτων, καθώς και απαιτήσεις ενέργειας για την απομάκρυνσή τους. Άμεσα, προκύπτει η ανάγκη διερεύνησης των πιθανών τρόπων αξιοποίησης του παρωχημένου εξοπλισμού από εργαστήρια ή παραγωγικές μονάδες.

Η ιδέα της αξιοποίησης παρωχημένου εξοπλισμού δεν είναι καινούρια. Τόσο ερευνητικά εργαστήρια όσο και μεγάλες παραγωγικές και βιομηχανικές μονάδες έχουν κληθεί πολλές φορές να αντιμετωπίσουν ερωτήματα που αφορούν την διαχείριση μηχανημάτων και διατάξεων που δεν χρησιμοποιούνται. Ωστόσο, υπό την έλλειψη κάποιου παγιωμένου πλαισίου, οι παρωχημένες διατάξεις συχνά απλώς απομακρύνονται, με την καλύτερη περίπτωση να είναι η μετακίνησή τους σε κάποια δομή ανακύκλωσης. Ακόμα και σε αυτή την περίπτωση όμως το εργαστήριο ή η παραγωγική μονάδα απομακρύνει και τμήματα εξοπλισμού που μπορεί να είναι αξιοποιήσιμα στη συνέχεια για να μειώσει τα κόστη και να βελτιώσει το περιβαλλοντικό της αποτύπωμα. Ένα βασικό ζήτημα λοιπόν είναι η ανάπτυξη μιας αλγοριθμικής διαδικασίας λήψης αποφάσεων που θα ακολουθήσει το εργαστήριο/παραγωγική μονάδα και θα τους δίνει οδηγίες για το αν και κατά πόσον συμφέρει να αποθηκευτεί παρωχημένος εξοπλισμός ή τμήματά του σύμφωνα με κάποια σαφώς ορισμένα κριτήρια κόστους, διαθεσιμότητας, αποθήκευσης και περιβαλλοντικού αποτυπώματος.

Στην παρούσα εργασία η διερεύνηση ξεκινάει στα πλαίσια του εργαστηρίου των Στοιχείων Μηχανών και Δυναμικής του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, με σκοπό την ανάπτυξη μιας μεθοδολογίας που αργότερα μπορεί να γενικευτεί για μεγαλύτερης κλίμακας συστήματα. Η διαδικασία, αρχικά, ξεκίνησε με την καταγραφή όλων των διατάξεων του εργαστηρίου και των τμημάτων τους. Η καταγραφή αυτή κρίθηκε αναγκαία προκειμένου να δημιουργηθεί μια αρχική βάση δεδομένων του ήδη υπάρχοντος υλικού και στη συνέχεια να γίνει η διαλογή ανάμεσα σε αυτά που κρίνονται απαραίτητα για τον μακροπρόθεσμο σχεδιασμό του εργαστηρίου και θα αποθηκευτούν για μελλοντική χρήση ή θα απομακρυνθούν από το εργαστήριο προς ανακύκλωση. Ο απώτερος σκοπός είναι να αναπτυχθεί ένας αλγόριθμος που θα βοηθά το χρήστη να αποφασίζει τι θα αποθηκεύεται για μελλοντική χρήση και τι όχι.

2.1. Περιγραφή Αλγόριθμου Αποθήκευσης

Πρόκειται για έναν αλγόριθμο λήψης μίας απόφασης (decision-making algorithm). Η απόφαση που καλείται να λάβει είναι σχετικά με το αν ο παρωχημένος εργαστηριακός εξοπλισμός ή τμήματα αυτού είναι ωφέλιμο να αποθηκευτούν για μελλοντική χρήση. Όπως κάθε αλγόριθμος, έτσι και αυτός λαμβάνει από το χρήστη κάποια δεδομένα σε μορφή εισόδων (*Inputs*) και υπολογίζει μέσω δοσμένων συναρτήσεων διάφορες τιμές, τις οποίες αποδίδει σαν εξόδους (*Outputs*). Κάνοντας χρήση του λογισμικού Excel αναπτύχθηκε ένας αλγόριθμος, ο οποίος χρησιμοποιεί τις εισόδους, που περιγράφονται σε επόμενη ενότητα, για να μας δώσει μία μοναδική έξοδο, σαν απάντηση στο ερώτημα, «να αποθηκεύσω ή να μην αποθηκεύσω» το υπό εξέταση αντικείμενο. Η γενικότερη μεθοδολογία περιγράφεται σε βήματα στη συνέχεια (Σχήμα 1).

1. Μακροσκοπική Επιθεώρηση

Ο χρήστης καλείται να αξιολογήσει το υπό εξέταση αντικείμενο, έτσι ώστε να είναι σε θέση να εισάγει στον αλγόριθμο τις τιμές, που είναι απαραίτητες για τους μετέπειτα υπολογισμούς. Κάποιες τιμές, όπως η *Υπολειπόμενη Διάρκεια Ζωής* ή η *Απαίτηση Εντός του Χρονικού Ορίζοντα Σχεδιασμού* (αναλυτική περιγραφή στις επόμενες παραγράφους) βασίζονται στην εμπειρία του χρήστη-σχεδιαστή μηχανικού. Κάποιες άλλες βασίζονται σε δεδομένα που συλλέγονται από την αγορά, ενώ τιμές, όπως ο *Χρονικός Ορίζοντας Σχεδιασμού* ορίζονται αυθαίρετα από το σχεδιαστή. Στο στάδιο αυτό γίνεται ένα πρώιμο ξεσκαρτάρισμα υλικών που φαίνεται ήδη από οπτική εξέταση ότι δεν μπορούν να είναι λειτουργικά στο μέλλον (π.χ. κοχλίες που έχουν αστοχήσει, μηχανικά μέρη που έχουν ρωγμές).

2. Συλλογή Δεδομένων

Ο χρήστης συλλέγει όλες τις απαραίτητες πληροφορίες για το υπό εξέταση αντικείμενο, είτε από τον κατασκευαστή του είτε από την αγορά. Οι πληροφορίες μπορεί να περιλαμβάνουν της διάρκεια ζωής του αντικειμένου ή την πιθανή εγγύηση που το συνοδεύει, καθώς και το κόστος προμήθειάς του ή τη διαθεσιμότητά του στην αγορά. Έχουν αναπτυχθεί, επίσης, συστήματα, τα οποία βοηθούν στην ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ προϊόντων, μέσω αισθητήρων ή συστημάτων αναγνώρισης με ραδιοκύματα (RFIDs). Τέτοια παραδείγματα είναι πλατφόρμες όπως το Διαδίκτυο των Πραγμάτων ή Internet of Things (IoT), που αφορά όλων των ειδών συσκευές και το AutomationMI, που αφορά κυρίως μηχανολογικό εξοπλισμό.

3. Είσοδος Τιμών στον Αλγόριθμο

Έχοντας συγκεντρώσει τις απαραίτητες πληροφορίες ο χρήστης δίνει στον αλγόριθμο τις αντίστοιχες εισόδους, οι οποίες με κατάλληλη και ταχεία επεξεργασία οδηγούν στην έξοδο.

4. Έξοδος Αλγορίθμου

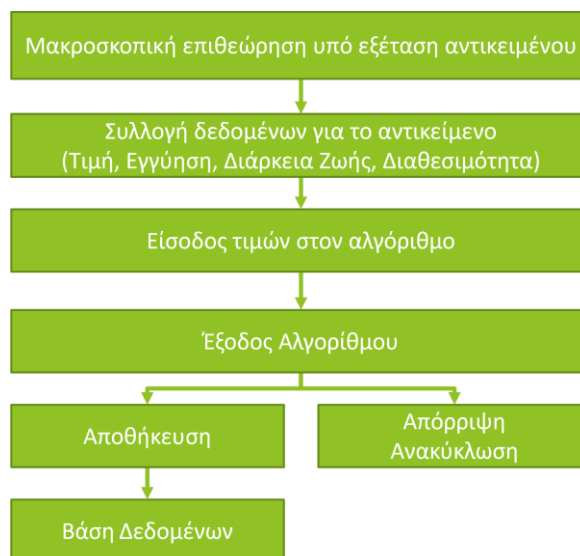
Ο αλγόριθμος, αφού επεξεργαστεί τις εισόδους που του έχει δώσει ο χρήστης, αποδίδει την έξοδο. Ανάλογα με την έξοδο ο χρήστης προχωρά είτε σε αποθήκευση του υπό εξέταση αντικειμένου είτε σε απομάκρυνσή του προς ανάκυκλωση.

4α. Αποθήκευση

Το υπό εξέταση αντικείμενο οδηγείται στην αποθήκη, αφού πρώτα γίνει η εισαγωγή του σε μία βάση δεδομένων, έτσι ώστε να είναι ταχύτερος ο εντοπισμός του σε περίπτωση ανάγκης. Ο αλγόριθμος είναι άμεσα συνδεδεμένος με τη βάση δεδομένων και σε περίπτωση αποθήκευσης αποδίδει αυτόματα έναν αύξοντα αριθμό στο υπό εξέταση αντικείμενο. Ο χρήστης καλείται, στο τέλος, να συμπληρώσει το πεδίο εφαρμογής του υπό εξέταση αντικειμένου, προκειμένου να γίνει κατηγοριοποίηση σε όμοια ή σχετικά αντικείμενα. Μία ενδεικτική βάση δεδομένων φαίνεται στην εικόνα 7.

4β. Απόρριψη

Το υπό εξέταση αντικείμενο απομακρύνεται από την εργαστηριακή ή την παραγωγική μονάδα και οδηγείται στην ανακύκλωση.



Σχήμα 1. Ενδεικτική διαδικασία αποθήκευσης παρωχημένου εξοπλισμού

ID	NAME	CATEGORY	SERIAL No.	LOCATION	QUANTITY	MARKET PRICE
1	Oil Tank	Lubrication		Sinker Type EDM	1	20
2	Work Table	Structural		Sinker Type EDM	1	tbe
3	DC Pulse Generator	Generator / Electrical		Sinker Type EDM	1	
4	Pump	Pump / Hydraulics		Sinker Type EDM	1	
5	Filter	Filter / Lubrication		Sinker Type EDM	1	
6	DC Servo Motor	Motor / Electrical		Sinker Type EDM	1	
7	Ball Screw	Actuator / Motion		Sinker Type EDM	1	
8	Power rapid ram up/down traverse motor	Motor / Electrical		Sinker Type EDM	1	
9	Rexroth Hydronorma DBDS 6	Valve / Hydraulics		Hydraulic Tester	1	
10	Rexroth Hydraulic Power Unit	Pump / Hydraulics		Hydraulic Tester	1	
11	Rexroth Hydronorma	Valve / Hydraulics		Hydraulic Tester	1	
12	Mannesmann Rexroth Directional Valve	Valve / Hydraulics		Hydraulic Tester	1	
13	HYDAC MDF Pressure Filter	Filter / Lubrication / Hydraulics		Hydraulic Tester	1	
14	Hydraulic Accumulator	Accumulator / Hydraulics		Hydraulic Tester	1	
15	Inductive eddy current distance measurement sensor	Sensor / Measurement		Wear Testing Machine	1	
16	Temperature sensor	Sensor / Measurement		Wear Testing Machine	1	10
17	Ambient temperature/humidity sensor	Sensor / Measurement		Wear Testing Machine	1	30
18	Compression Force sensors	Sensor / Measurement		Wear Testing Machine	1	60
19	Rotary Speed Encoder	Sensor / Measurement		Wear Testing Machine	1	40
20	Rotary Seal	Seal		Wear Testing Machine	1	5
21	Splined Linear Ball Bushing	Bushings		Wear Testing Machine	1	10
22	Springs	Springs		Wear Testing Machine	9	100
23	Rectangular Frame	Structural		Wear Testing Machine	1	tbe
24	Motor for rotational motion using belt system	Motor / Electrical		Wear Testing Machine	1	
25	Servo motor	Motor / Electrical		Wear Testing Machine	1	100
26	Dowel Pin	Structural		Wear Testing Machine	4	1
27	Rubber Bellow	Seal / Lubrication		Wear Testing Machine	1	1
28	Toggle Latch	Seal / Lubrication		Wear Testing Machine	2	1
29	Stepper Motor Linear Actuator	Motor / Electrical		Wear Testing Machine	7	50
30	Oil Hub	Lubrication		Wear Testing Machine	1	tbe
31	Oil Circulation Pump	Lubrication / Pump		Wear Testing Machine	1	100
32	Oil Heating Element	Heating / Transducer		Wear Testing Machine	2	
33	Round Rail Linear Guide	Guide		Wear Testing Machine	4	15
34	Rectangular Profile Rail Guide	Guide		Wear Testing Machine	8?	15
35	Stepper Motor	Motor / Electrical		Wear Testing Machine	1	20

Εικόνα 8. Ενδεικτική βάση δεδομένων αποθήκευσης παρωχημένου εξοπλισμού

2.2. Είσοδοι – Metrics

Προηγουμένως αναφερθήκαμε σε τιμές που θα δίνονται σαν είσοδοι από το χρήστη στον αλγόριθμο. Το βασικότερο στοιχείο του αλγορίθμου είναι οι τιμές αυτές, οι οποίες πρέπει να εκφράζουν τα κριτήρια σημαντικότητας (metrics) του εκάστοτε υπό εξέταση αντικειμένου. Οι είσοδοι αυτές μέσω κατάλληλων συναρτήσεων θα οδηγούν ταχύτατα και αποτελεσματικά στην εξαγωγή ενός αποτελέσματος, βοηθώντας το χρήστη να λάβει μία απόφαση. Ύστερα από έρευνα, προσπαθώντας να έχουμε ένα ρεαλιστικό και φιλικό προς το χρήστη περιβάλλον, καταλήξαμε στις παρακάτω τιμές.

Χρονικός Ορίζοντας Σχεδιασμού

Ο χρήστης καλείται να δώσει μια τιμή σχετικά με το χρονικό διάστημα για το οποίο πραγματοποιεί το σχεδιασμό του. Η τιμή αυτή μπορεί να είναι από κάποιους μήνες μέχρι πολλά χρόνια. Η γνώση του επιθυμητού ορίζοντα σχεδιασμού είναι σημαντική γιατί θα κρίνει την αποθήκευση εξοπλισμού που είναι χρησιμοποιημένος και επομένως με μειωμένο χρόνο ζωής. Η τιμή δίνεται σε μονάδες χρόνου (πχ. χρόνια).

Ετήσιος Προϋπολογισμός Εργαστηρίου

Κάθε εργαστηριακή ή παραγωγική μονάδα έχει έναν ετήσιο προϋπολογισμό στον οποίο βασίζεται το μέγεθος της δραστηριότητάς της. Ο προϋπολογισμός αποτελεί οικονομικό κριτήριο, το οποίο είναι και το βασικότερο για τη λήψη μιας απόφασης εντός της μονάδας. Η τιμή δίνεται σε χρηματικές μονάδες.

Οι δύο παραπάνω είσοδοι δίνονται, πιθανότατα, μία φορά στην αρχή του αλγορίθμου και αφορούν την εκάστοτε εργαστηριακή ή παραγωγική μονάδα εξ ολοκλήρου. Οι είσοδοι, που ακολουθούν, αφορούν τον υπό εξέταση εξοπλισμό και οι τιμές τους αλλάζουν συνεχώς από το χρήστη, αφού εξετάζεται ένα μεγάλο πλήθος διατάξεων και εξαρτημάτων.

Υπολειπόμενη Διάρκεια Ζωής

Ο χρήστης - σχεδιαστής καλείται να κάνει μία εκτίμηση της κατάστασης στην οποία βρίσκεται το υπό εξέταση αντικείμενο και να δώσει μία τιμή σχετικά με τη διάρκεια ζωής που του έχει απομείνει. Η εκτίμηση βασίζεται κυρίως σε εμπειρικά κριτήρια καθώς η διενέργεια δοκιμών για κάθε αντικείμενο κρίνεται ασύμφορη. Σε κάποιες περιπτώσεις, ο χρήστης μπορεί να κατέχει πληροφορίες σχετικά με τις μέγιστες ώρες λειτουργίας του υπό εξέταση αντικειμένου ή σχετικά με τις ονομαστικές τιμές του κατασκευαστή. Οι πληροφορίες αυτές μπορούν, σαφώς, να μειώσουν την απόκλιση της εκτιμώμενης από την πραγματική κατάσταση του αντικειμένου. Η τιμή δίνεται σε μονάδες χρόνου.

Επιθυμητή Διάρκεια Ζωής

Ο χρήστης – σχεδιαστής έχοντας γνώση των πεδίων και των εφαρμογών με τα οποία ασχολείται η εργαστηριακή μονάδα καλείται να εκτιμήσει την επιθυμητή διάρκεια ζωής του υπό εξέταση αντικειμένου, καθώς και το απαιτούμενο πλήθος. Συγκεκριμένα το εργαστήριο των Στοιχείων Μηχανών και Δυναμικής του ΕΜΠ δραστηριοποιείται στους τομείς των Στοιχείων Μηχανών (π.χ. κοχλίες, έδρανα κύλισης και ολίσθησης), των Συστημάτων Μετάδοσης Κίνησης (π.χ. μειωτήρες στροφών, συμπλέκτες, μάντες), των Υδραυλικών Συστημάτων (π.χ. αντλίες), των Προηγμένων Υλικών και του Ελέγχου Καλής Λειτουργίας και Δομικής Ακεραιότητας Στοιχείων Μηχανών. Συνεπώς, ο χρήστης οφείλει να γνωρίζει τις υλικές απαιτήσεις των εφαρμογών στους τομείς αυτούς ώστε να είναι σε θέση να εισάγει τις απαιτούμενες τιμές στον αλγόριθμο.

Διαθεσιμότητα στην αγορά

Ο χρήστης κατόπιν έρευνας στην αγορά ή βασιζόμενος στις εμπειρικές του γνώσεις δίνει μια τιμή που εκφράζει μια ποιοτική εκτίμηση για την ευκολία προμήθειας του υπό εξέταση αντικειμένου. Με τον όρο ευκολία εννοούμε τη ποσότητα στην οποία υπάρχει το αντικείμενο στην αγορά, καθώς και το χρονικό διάστημα που απαιτείται για την απόκτησή του. Είναι προφανές, ότι όσο πιο σπάνιο είναι ένα εξάρτημα, τόσο πιο χρήσιμο είναι να αποθηκευτεί. Αντίστοιχα, όσο μεγαλύτερο είναι το χρονικό διάστημα από την παραγγελία ενός νέου προϊόντος μέχρι την παραλαβή του, τόσο πιο αποδοτική είναι η αποθήκευσή ενός όμοιου, αλλά παρωχημένου, τη δεδομένη στιγμή. Ο χρήστης δίνει μία ακέραια τιμή από το 1 έως το 5, η οποία εκφράζει την ποιοτική του εκτίμηση. Ενδεικτικά, η λογική που ακολουθείται στον αλγόριθμο που υλοποιήσαμε έχει ως εξής.

Ο χρήστης πληκτρολογεί:

- 1 έαν το προϊόν δεν υπάρχει στην αγορά ή είναι αδύνατο να το προμηθευτεί.
Πχ. Ανταλλακτικό που δεν παράγεται πλέον από τον κατασκευαστή
- 2 εάν το προϊόν υπάρχει αλλά απαιτεί πολύ χρόνο για να αποκτηθεί, οίτοι μεγαλύτερο των τριών (3) μηνών
- 3 εάν το προϊόν υπάρχει αλλά απαιτεί αρκετό χρόνο για την απόκτησή του, οίτοι μεταξύ ενός (1) και τριών (3) μηνών
- 4 εάν το προϊόν υπάρχει και απαιτεί μικρή αναμονή, οίτοι μικρότερη του ενός (1) μήνα
- 5 Το προϊόν υπάρχει σε αφθονία και άμεσα.

Κόστος Προμήθειας από την Αγορά

Όπως έχουμε ήδη τονίσει, το σημαντικτερό κριτήριο είναι το οικονομικό. Ο χρήστης καλείται να δώσει σαν τιμή το κόστος του υπό εξέταση αντικειμένου στην αγορά, το οποίο όπως θα δούμε αργότερα συγκρίνεται με τον προϋπολογισμό του εργαστηρίου και δίνει την ανάλογη έξοδο. Η τιμή δίνεται σε χρηματικές μονάδες.

Εγγύηση - Τεχνική Υποστήριξη

Αρκετά προϊόντα με την αγορά τους καλύπτονται από τον κατασκευαστή με εγγύηση καλής λειτουργίας ή τεχνική υποστήριξη. Η εγγύηση ενός προϊόντος παίζει σημαντικό ρόλο, διότι ο κατασκευαστής έχει την τεχνογνωσία να καλύψει οποιοδήποτε πρόβλημα στη λειτουργία ή ελλάττωμα παρουσιάζει το προϊόν του στον ελάχιστο χρόνο. Σε αντίθετη περίπτωση, ο σχεδιαστής και κατ' επέκταση η εργαστηριακή ή παραγωγική μονάδα θα πρέπει να αναλάβει το συγκεκριμένο έργο, λαμβάνοντας υπόψη το χρόνο και τους πόρους που αυτό απαιτεί. Έτσι, κατόπιν συνεννόησης με τον κατασκευαστή, ο χρήστης δίνει μια τιμή για το διάστημα της εγγύησης ή της τεχνικής υποστήριξης για το υπό εξέταση προϊόν. Η τιμή δίνεται σε μονάδες χρόνου.

Διαθεσιμότητα στην Αποθήκη

Ανατρέχοντας στην υπάρχουσα βάση δεδομένων της αποθήκης ο χρήστης ελέγχει το μέγεθος του αποθέματος για τον εκάστοτε τύπο εξαρτήματος και δίνει μια τιμή στον αλγόριθμο. Είναι ευνόητο, ότι όσο μεγαλύτερο είναι το πλήθος ενός προϊόντος στην αποθήκη τόσο μικρότερη είναι η πιθανότητα αποθήκευσής του. Στο σημείο αυτό γίνεται ορατή η σύνδεση και η σημασία της υλοποιημένης βάσης δεδομένων.

Εκτιμώμενη Απαίτηση

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, ο σχεδιαστής, εκτός του περιεχομένου της δραστηριότητας της εκάστοτε εργαστηριακής ή παραγωγικής μονάδας, οφείλει να γνωρίζει το πλήθος των διατάξεων και των εξαρτημάτων, που θα απαιτηθούν εντός του χρονικού ορίζοντα σχεδιασμού. Για παράδειγμα, όσον αφορά το Εργαστήριο Στοιχείων και Μηχανών και Δυναμικής του ΕΜΠ, είναι απαραίτητη μία εκτίμηση για το πλήθος των κινητήρων, των αντλιών ή ακόμα και των κοχλίων που θα απαιτηθούν μέσα σε ένα δεδομένο χρονικό διάστημα.

Εκπομπές Διοξειδίου του Άνθρακα (CO₂)

Εκτός από δείκτες που αφορούν οικονομικά κριτήρια, αξίζει να αναφερθεί και ένας δείκτης, που αφορά τον περιβαλλοντικό αντίκτυπο της συγκεκριμένης μεθοδολογίας. Ένα παραγόμενο προϊόν είναι αποτέλεσμα μίας ή περισσότερων κατεργασιών. Οι κατεργασίες, συνήθως, συνοδεύονται από εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα. Οι εκπομπές αυτές είναι στο μεγαλύτερο ποσοστό υπεύθυνες για την επιβάρυνση του περιβάλλοντος και ολοένα αυξάνονται με τις διαρκώς αυξανόμενες απαιτήσεις. Οι εκπομπές προκύπτουν τόσο από την παραγωγή νέων προϊόντων, όσο και από την αξιοποίηση των παρωχημένων με μεθόδους, όπως αυτή του Upcycling. Συνεπώς, γίνεται αναφορά σε έναν δείκτη, που θα εκφράζει το λόγο των εκπομπών διοξειδίου από τη ζήτηση και κατ' επέκταση παραγωγή του υπό εξέταση προϊόντος προς τις εκπομπές που είναι πιθανό να προκύψουν από την αξιοποίησή σε άλλες εφαρμογές εντός του εργαστηρίου. Πρακτικά, οι εκπομπές που θα προκύψουν σε περίπτωση Upcycling είναι είτε μηδενικές είτε αμελητέες σε σύγκριση με αυτές της παραγωγής ενός προϊόντος εκ του μηδενός. Έτσι, ο εν λόγω δείκτης θα εκφράζει την ποσότητα διοξειδίου του άνθρακα, που αποτρέπουμε να απελευθερωθεί στο περιβάλλον. Αξίζει να σημειωθεί, ότι οι εκπομπές από ενδεχόμενη ανακύκλωση δεν θα ήταν σε καμία περίπτωση αμελητέες. Για παράδειγμα, η ανακύκλωση ατσαλιού μπορεί να αποφέρει μείωση της ενέργειας και των εκπομπών CO₂ περίπου 50% σε σχέση με την παραγωγή από παρθένα υλικά (Dunant et al., 2018; Norgare, 2007). Το κριτήριο αυτό δεν χρησιμοποιήθηκε στον αλγόριθμο που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της εργασίας, λόγω έλλειψης επαρκών δεδομένων, αλλά κρίθηκε σκόπιμη η αναφορά του.

2.3. Αντικειμενική συνάρτηση

Με βάση τις παραπάνω τιμές σχηματίζεται μια αντικειμενική συνάρτηση, η τιμή της οποίας καθορίζει το εάν ένα συγκεκριμένο εξάρτημα θα αποθηκευτεί ή θα πάει για ανακύκλωση. Η αντικειμενική συνάρτηση λαμβάνει υπόψιν όλες τις εισόδους που αναφέρθηκαν παραπάνω (*Χρονικός Ορίζοντας Σχεδιασμού, Ετήσιος Προϋπολογισμός Εργαστηρίου, Υπολειπόμενη Διάρκεια Ζωής, Επιθυμητή Διάρκεια Ζωής, Διαθεσιμότητα στην Αγορά, Κόστος Προμήθειας από την Αγορά, Εγγύηση - Τεχνική Υποστήριξη, Διαθεσιμότητα στην Αποθήκη, Εκτιμώμενη Απαίτηση*), ενώ οι *Εκπομπές Διοξειδίου του Άνθρακα (CO₂)* προς το παρών δεν λαμβάνονται υπόψιν στη λήψη αποφάσεων όπως ειπώθηκε και στην προηγούμενη ενότητα. Η αντικειμενική συνάρτηση για τη λήψη της απόφασης για αποθήκευση ή μη διαμορφώνεται ως εξής:

$$\begin{aligned}
 S = & w_1 \frac{\text{Υπολειπόμενη Διάρκεια Ζωής}}{\text{Επιθυμητή Διάρκεια Ζωής}} \\
 & + w_2 \frac{1}{\text{Διαθεσιμότητα στην αγορά}} \\
 & + w_3 \frac{\text{Εγγύηση} - \text{Τεχνική Υποστήριξη}}{\text{Επιθυμητή Διάρκεια Ζωής}} \\
 & + w_4 \frac{\text{Κόστος Προμήθειας από την Αγορά}}{\text{Συνολικό Budget}} \\
 & + w_5 \left(1 - \frac{\text{Διαθεσιμότητα στην Αποθήκη} + \text{Πλήθος υπό εξέταση αντικειμένου}}{\text{Εκτιμώμενη Απαίτηση}} \right)
 \end{aligned} \tag{1}$$

Όπως γίνεται φανερό από την Εξίσωση (1), η αντικειμενική συνάρτηση αποτελείται από ένα άθροισμα πέντε όρων που ο καθένας πολλαπλασιάζεται με ένα βάρος w_i . Όσο μεγαλύτερος γίνεται ο όρος S , δηλαδή η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης, τόσο ενισχύεται η πιθανότητα αποθήκευσης του υπό εξέτασης τεμαχίου/διάταξης.

Ο πρώτος όρος εκφράζει την Υπολειπόμενη Διάρκεια του εκάστοτε τεμαχίου/διάταξης ως ποσοστό, όμως, της διάρκειας ζωής που αναμένεται να έχει στην μελλοντική του χρήση. Έτσι, επί παραδείγματι, ακόμα και αν ένα τμήμα μίας διάταξης (π.χ. μια υδραυλική αντλία ή ένας ηλεκτρικός κινητήρας) έχει δουλέψει ένα μεγάλο ποσοστό από τις ονομαστικές ώρες λειτουργίας του, αν δεν αναμένεται να χρησιμοποιηθεί σε διάταξη με μεγάλο χρόνο ζωής (δηλαδή αν δεν ξεπερνά το υπολειπόμενο ποσοστό του χρόνου ζωής του τεμαχίου) τότε έχει μεγαλύτερη αξία η αποθήκευσή του και αυτό εκφράζεται και στην αντικειμενική συνάρτηση.

Ο δεύτερος όρος αφορά τη διαθεσιμότητα του τεμαχίου διάταξης στην αγορά. Όπως παρουσιάστηκε και προηγουμένως η μετρική *Διαθεσιμότητα στην αγορά* παίρνει τιμές από 1 έως 5, ανάλογα με το πόσο γρήγορα μπορεί το Εργαστήριο να

προμηθευτεί το αντίστοιχο τεμάχιο/διάταξη από την αγορά ή ακόμα κι αν υπάρχει αυτό στην αγορά (π.χ. ανταλλακτικό που δεν υποστηρίζεται από την κατασκευάστρια εταιρεία).

Ο τρίτος όρος αφορά την εγγύηση που μπορεί να έχει (ή δεν έχει) το τεμάχιο/διάταξη αν το προμηθευτεί το Εργαστήριο στην αγορά, σε σχέση φυσικά και με την αναμενόμενη διάρκεια ζωής που θα απαιτηθεί να έχει το τεμάχιο/διάταξη. Το μετρικό αυτό έχει σκοπό να εκτιμά αν και κατά πόσο συμφέρει να αποθηκευτεί ένα τεμάχιο με περιορισμένη διάρκεια ζωής (και επομένως αυξημένη πιθανότητα βλάβης) τη στιγμή που αν το προμηθευτεί το Εργαστήριο από την αγορά θα έχει εγγύηση ή/και τεχνική υποστήριξη.

Ο τέταρτος όρος συνεκτιμά την εμπορική αξία του τεμαχίου/διάταξης ως ποσοστό του συνολικού budget που διαθέτει το εργαστήριο για την κάλυψη των υλικών για την κατασκευή διατάξεων, που προκύπτει ως το γινόμενο του ετήσιου budget επί τον χρονικό ορίζοντα σχεδιασμού. Η μετρική αυτή έρχεται να εκτιμήσει το αν και κατά πόσον έχει νόημα να αποθηκευτεί ένα τεμάχιο που η εμπορική του αξία είναι πολύ μικρή (π.χ. κοχλίες, παξιμάδια, ρακόρ, βάνες).

Τέλος, ο πέμπτος όρος αφορά το πόσο ανάγκη υπάρχει για το εκάστοτε τεμάχιο/διάταξη χρησιμοποιώντας τις εισόδους *Διαθεσιμότητα στην Αποθήκη* και *Εκτιμώμενη Απαίτηση*. Στην *Διαθεσιμότητα στην Αποθήκη* προστίθεται + 1 με το σκεπτικό ότι εξετάζουμε την κάλυψη των αναγκών για το τεμάχιο/διάταξη θεωρώντας ότι το έχουμε αποθηκεύσει.

Οι τιμές των συντελεστών βαρύτητας για κάθε όρο παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο και ο τρόπος καθορισμού τους παρουσιάζεται σε επόμενο κεφάλαιο. Η αποθήκευση ή μη του εκάστοτε τεμαχίου/διάταξης εξαρτάται από την αντικειμενική συνάρτηση S και από το αν η τιμή της ξεπερνά κάποιο κατώφλι S_0 . Η τιμή αυτού του κατωφλιού είναι και αυτή εξαιρετικά σημαντική και ο καθορισμός της περιγράφεται αναλυτικά σε επόμενο κεφάλαιο της εργασίας.

INPUTS		
Χρονικός Ορίζοντας Σχεδιασμού	Years	5
Ετήσιος Προϋπολογισμός Εργαστηρίου	€	10000
Πλήθος Αντικειμένων υπό εξέταση	Units	1
Επιθυμητή Διάρκεια Ζωής	Years	5
Υπολειπόμενη Διάρκεια Ζωής υπό εξέταση Αντικειμένου	Years	10
Διαθεσιμότητα υπό εξέταση Αντικειμένου στην αγορά	1 to 5	4
Τιμή υπό εξέταση Αντικειμένου στην αγορά	€	500
Εγγύηση υπό εξέταση Αντικειμένου	Years	0
Διαθεσιμότητα στην αποθήκη	Units	5
Εκτιμώμενη Απαίτηση εντός του ορίζοντα σχεδιασμού	Units	10
Εκπομπές CO2	Kg	-
OUTPUTS		
CONTENT	SCORE	WEIGHT
ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΖΩΗΣ	5	7,9%
ΔΙΑΘΕΣΙΜΟΤΗΤΑ	2	12,2%
ΕΓΓΥΗΣΗ	1	4,2%
ΠΟΣΟΣΤΟ ΕΠΙ ΠΡΟΫΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ (%)	2	13,0%
ΚΑΛΥΨΗ ΑΠΑΙΤΗΣΕΩΝ (%)	2	62,7%
	S	0,44
	RESULT	STORE
	ITEM INVENTORY ID	22
	GIVE CATEGORY	Electric Motor

Εικόνα 9. Είσοδοι & έξοδοι αλγορίθμου αποθήκευσης

3. Μεθοδολογία Urcycling

3.1. Περιγραφή μεθοδολογίας

Η διαδικασία του Urcycling βασίζεται στην αξιοποίηση προϊόντων, τα οποία βρίσκονται σε τελικό στάδιο χρήσης. Η συνήθης πρακτική είναι να απορρίπτουμε στο σύνολο ένα προϊόν, όταν αυτό παύει να λειτουργεί στις επιθυμητές συνθήκες ή όταν αυτό λόγω της ραγδαίας τεχνολογικής ανάπτυξης κρίνεται παρωχημένο. Η επιστημονική κοινότητα, όμως, στα πλαίσια της κυκλικής οικονομίας, προκειμένου να μειώσει τα περιττά απόβλητα και συγχρόνως να μειώσει την αλόγιστη παραγωγή αγαθών, η οποία επιβαρύνει τον πλανήτη, έχει στραφεί με διεθνείς οδηγίες στο σχεδιασμό προϊόντων με «οικολογική συνείδηση». Η διαδικασία του Urcycling, αν και άγνωστη στο ευρύ κοινό, αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα βιώσιμου σχεδιασμού, που στόχο έχει τη μεγιστοποίηση της διάρκειας ζωής ενός προϊόντος. Στην παρούσα μελέτη εξετάζονται δύο προσεγγίσεις σχεδιασμού για το θέμα, καταλήγοντας σε συμπεράσματα για το ποια είναι πιο αποδοτική.

3.2.1^H Προσέγγιση σχεδιασμού – Σχεδιασμός βάσει διαθέσιμου εξοπλισμού

Ένας σχεδιαστής καλείται είτε να διεξάγει μία δοκιμή είτε να αναβαθμίσει μία εργαστηριακή ή παραγωγική μονάδα. Η πρώτη προσέγγιση σχεδιασμού *Urcycling* βασίζεται στα διαθέσιμα υλικά, που υπάρχουν στην αποθήκη τη δεδομένη στιγμή. Η διαδικασία περιλαμβάνει τα παρακάτω βήματα.

ΒΗΜΑ 1^ο : Καθορισμός Προδιαγραφών

Ο σχεδιαστής ανατρέχει στη βιβλιογραφία με σκοπό να καταλήξει στις τυποποιημένες προδιαγραφές της διάταξης που θέλει να κατασκευάσει, καθώς και στα πρωτόκολλα στα οποία βασίζονται οι δοκιμές, τις οποίες θα εκτελεί η εν λόγω διάταξη.

ΒΗΜΑ 2^ο : Πρώιμος Σχεδιασμός της Διάταξης

Ο σχεδιαστής κάνει έναν πρώιμο σχεδιασμό της διάταξης, προκειμένου να πληρούνται οι προδιαγραφές.

ΒΗΜΑ 3^ο : Έλεγχος Διαθέσιμου Υλικού

Σε αυτό το βήμα ο σχεδιαστής ανατρέχει στην υλοποιημένη βάση δεδομένων της αποθήκης του εργαστηρίου, προκειμένου να συγκεντρώσει όσο το δυνατόν περισσότερο εξοπλισμό, στον οποίο θα βασιστεί ο τελικός σχεδιασμός.

ΒΗΜΑ 4^ο : Τελικός σχεδιασμός της διάταξης

Έχοντας, πλέον, γνώση των προδιαγραφών και του διαθέσιμου υλικού ο σχεδιαστής καταλήγει στο τελικό μοντέλο της διάταξης. Με χρήση λογισμικών CAD/CAE δημιουργεί και ελέγχει το μοντέλο, ώστε να πληρούνται οι προδιαγραφές.

ΒΗΜΑ 5^ο : Προμήθεια Μη Διαθέσιμου Υλικού

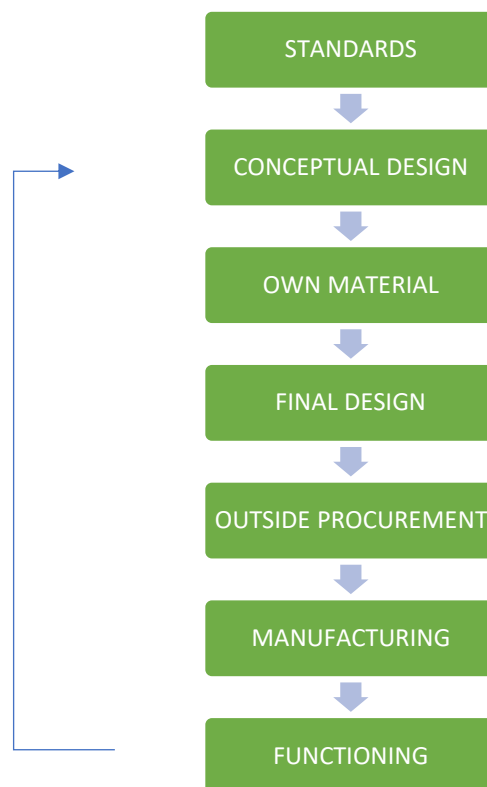
Με δεδομένο το τελικό σχέδιο δημιουργεί έναν κατάλογο υλικών, τα οποία θα προέλθουν από την αγορά και υπολογίζει το συνολικό τους κόστος.

ΒΗΜΑ 6^ο : Κατασκευή

Κατέχοντας όλα τα απαραίτητα υλικά η διάταξη κατασκευάζεται.

ΒΗΜΑ 7^ο : Έλεγχος

Τέλος, η διάταξη υπόκειται σε έλεγχο, ώστε ο σχεδιαστής να διαπιστώσει εάν πληρούνται οι προδιαγραφές ή απαιτείται επανασχεδιασμός.



Σχήμα 2. Μεθοδολογία εφαρμογής σχεδιασμού Urcycling

3.3. 2^η Προσέγγιση σχεδιασμού- Σχεδιασμός βάσει ιδανικών προδιαγραφών

Η δεύτερη προσέγγιση βασίζεται στις προδιαγραφές της τυποποιημένης δοκιμής. Η διαφορά των δύο προσεγγίσεων έγκειται, ουσιαστικά, στο γεγονός, ότι στην πρώτη προσέγγιση ο σχεδιασμός προσαρμόζεται στο διαθέσιμο αποθηκευμένο εξοπλισμό, ενώ στη δεύτερη προσέγγιση η αποθήκη καλείται να λειτουργήσει επικουρικά στο σχεδιασμό καλύπτοντας, όπου αυτό είναι δυνατό, τις δεδομένες ανάγκες. Η πρώτη προσέγγιση προκρίνεται στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, γιατί κρίνεται ως πιο ευέλικτη και αυξάνει την πιθανότητα εφαρμογής κυκλικού μοντέλου τηρώντας τα πρωτοκόλλα των 6R.

3.4. Αλγόριθμος λήψης αποφάσεων για εφαρμογή ή μη της μεθοδολογίας upcycling

Το δεύτερο θέμα, το οποίο πραγματεύεται η παρούσα εργασία, είναι η ανάπτυξη ενός αλγορίθμου ικανού να καταλήγει στο συμπέρασμα για το αν μια απαιτούμενη για το εργαστήριο πειραματική διάταξη είναι προτιμότερο να σχεδιαστεί και να κατασκευαστεί εντός του εργαστηρίου, εφαρμόζοντας τα πρωτόκολλα 6R (Reduce, Reuse, Recycle, Remanufacture, Redesign, Recover) ή να γίνει προμήθεια μίας νέας από το εμπόριο, εφόσον αυτό είναι δυνατό. Στην πρώτη περίπτωση θα γίνει χρήση του παρωχημένου εξοπλισμού που έχει αποθηκευτεί, βάσει του αλγορίθμου που αναπτύχθηκε παραπάνω. Η απόφαση προκύπτει, ουσιαστικά, συγκρίνοντας το εκτιμώμενο κόστος παραγωγής εντός του εργαστηρίου σε σχέση με το κόστος προμήθειας από την αγορά.

Το βασικότερο κριτήριο είναι σαφώς το οικονομικό και σε αυτό έχει βασιστεί ο αλγόριθμος που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της εργασίας αυτής. Ο αλγόριθμος υπολογίζει το συνολικό κόστος κατασκευής της διάταξης εντός του εργαστηρίου και συγκρίνοντας αυτό με το κόστος απόκτησης από την αγορά καταλήγει σε ένα συμπέρασμα. Ο αλγόριθμος λαμβάνει από το χρήστη κάποιες τιμές και μετά από κατάλληλη επεξεργασία εξάγει το ζητούμενο αποτέλεσμα. Κάποιες ενδεικτικές τιμές που χρησιμοποιήσαμε είναι οι ακόλουθες.

Κόστος Προμήθειας από την Αγορά

Ο σχεδιαστής ψάχνει στην αγορά αρχικά αν υπάρχει διάταξη που εξυπηρετεί το σκοπό του. Είναι πιθανό, όπως θα δούμε στη συνέχεια στο Case Study 1, ο στόχος του σχεδιαστή να εξυπηρετείται από πλέον της μίας διατάξεις, αρά οφείλει να υπολογίσει το συνολικό κόστος που απαιτείται. Σε κάθε περίπτωση, ο χρήστης εισάγει το κόστος προμήθειας στον αλγόριθμο και περνά στο επόμενο βήμα.

Απαιτούμενες Εργατώρες για Σχεδιασμό

Όπως περιγράφηκε στην προηγούμενη ενότητα, ο σχεδιαστής πρέπει να έχει γνώση των τυποποιημένων προδιαγραφών – πρωτοκόλλων για τη δοκιμή που θέλει να διεξάγει ή της αρχής λειτουργίας της διάταξης που καλείται να κατασκευάσει. Η διαδικασία απαιτεί σχεδιασμό σε δύο στάδια (Πρώιμος και Τελικός Σχεδιασμός) τα οποία συνυπολογίζονται προκειμένου ο σχεδιαστής να εκτιμήσει τις συνολικές εργατώρες που απαιτούνται για σχεδιασμό.

Ημερομίσθιο Σχεδιαστή

Ο σχεδιαστής-χρήστης εισάγει στον αλγόριθμο το εκάστοτε ημερομίσθιο για τα στάδια του σχεδιασμού.

Κόστος Υλικών

Κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού, ο σχεδιαστής ελέγχει τι υπάρχει διαθέσιμο στην αποθήκη και δημιουργεί έναν κατάλογο από υλικά (*BOM-Bill of Material*) που χρειάζεται να προμηθευτεί από την αγορά. Ο κατάλογος συνεχώς μεταβάλλεται και ανανεώνεται όσο ο σχεδιασμός εξελίσσεται από το πρώιμο στάδιο στο τελικό. Τελικά, ο χρήστης καλείται να εισάγει στον αλγόριθμο το κόστος των υλικών για το οριστικό μοντέλο της διάταξης.

Απαιτούμενες Εργατώρες για Κατασκευή

Έχοντας καταλήξει σε ένα τελικό μοντέλο της διάταξης, ο σχεδιαστής οφείλει να είναι σε θέση να εκτιμήσει τις απαιτούμενες ώρες για την κατασκευή του. Έτσι, είτε βάσει της εμπειρίας του είτε αντλώντας πληροφορίες από λογισμικά CAM, εισάγει στον αλγόριθμο έναν αριθμό ωρών για τις κατεργασίες και τη συναρμολόγηση.

Κόστος Κατασκευής

Ο σχεδιαστής-χρήστης εισάγει στον αλγόριθμο το κόστος εργατώρας για τα στάδια των κατεργασιών και της συναρμολόγησης, συνυπολογίζοντας τόσο τους μισθούς των τεχνιτών όσο και το κόστος της απαιτούμενης ενέργειας.

Αβεβαιότητα

Στα προηγούμενα βήματα είναι εμφανής η ανάγκη της εκτίμησης. Είναι ανθρωπίνως αδύνατο ένας σχεδιαστής, ανεξάρτητα από την εμπειρία του, να είναι εντελώς ακριβής στις τιμές που θα εισάγει στον αλγόριθμο. Για το λόγο αυτό, συμπεριλάβαμε στον αλγόριθμο έναν συντελεστή αβεβαιότητας, ο οποίος θα

λειτουργεί σαν συντελεστής ασφαλείας στις διάφορες προβλέψεις του χρήστη-σχεδιαστή, με σκοπό να μην ληφθεί σε καμία περίπτωση λάθος συμπέρασμα.

Ένας συντελεστής αβεβαιότητας λαμβάνεται για κάθε στάδιο υλοποίησης μίας κατασκευής, από το στάδιο της έρευνας αγοράς μέχρι το στάδιο της κατασκευής. Στα διάφορα κόστη υπεισέρχεται η μεταβολή της αξίας του χρήματος και ο κανόνας της προσφοράς και της ζήτησης, τα οποία καθιστούν την τιμή ενός προϊόντος ρευστή, ενώ οι ώρες, που απαιτούνται τόσο για το σχεδιασμό όσο και για την κατασκευή βασίζονται σε εκτιμήσεις.

Κάθε στάδιο, όμως, διαφέρει από εφαρμογή σε εφαρμογή, συνεπώς ο συντελεστής αβεβαιότητας πρέπει να μεταβάλλεται ανά περίπτωση. Είναι διαφορετικό όταν ο σχεδιαστής καλείται να σχεδιάσει κάτι για το οποίο έχει την τεχνογνωσία να το κάνει και διαφορετικό όταν είτε δεν την έχει είτε την έχει μερικώς. Έτσι, προκειμένου να γίνεται πιο ευδιάκριτη η διαφορετικότητα της κάθε εφαρμογής και ο αλγόριθμος να είναι πιο φιλικός ως προς το χρήστη και ίσως πιο ακριβής, αναλύσαμε την παραπάνω αβεβαιότητα σε επί μέρους τμήματα.

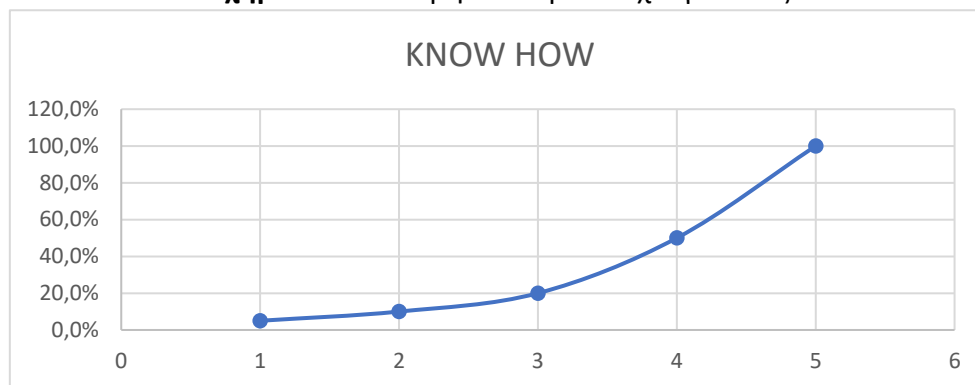
Τεχνογνωσία

Ο σχεδιαστής καλείται να εισάγει μια τιμή, η οποία αντιπροσωπεύει την εμπειρία και τις γνώσεις του στο πεδίο εφαρμογής της διάταξης που θέλει να κατασκευάσει. Οι τιμές, ύστερα από κατάλληλη διερεύνηση, καταλήξαμε ότι πρέπει να ακολουθούν εκθετική κατανομή (σχήμα 3). Το εύρος τιμών για ευκολία στη χρήση είναι από 1 έως 5, με το 1 να αντιπροσωπεύει τη μέγιστη γνώση του αντικειμένου και το 5 την ελάχιστη (πίνακας 1).

Know How		
1	5,0%	Έχω κάνει το ίδιο > 5 φορές
2	10,0%	Δεν έχω κάνει ακριβώς το ίδιο, αλλά έχω κάνει παρόμοια
3	20,0%	Αγνώ μία σημαντική τεχνολογία
4	50,0%	Αγνώ πάνω από μία τεχνολογία
5	100,0%	Δεν έχω ξανακάνει κάτι τέτοιο

Πίνακας 1. Αντιστοιχία των τιμών για την τεχνογνωσία που δίνει ο χρήστης με τιμές που λάμβανει ο αλγόριθμος

Σχήμα 3. Κατανομή των τιμών τεχνογνωσίας



Επίλυση προβλημάτων

Αντίστοιχα με τον συντελεστή τεχνογνωσίας, εισαγάγαμε έναν συντελεστή που αφορά τη συχνότητα εμφάνισης προβλημάτων, καθώς και την ικανότητα του σχεδιαστή για επίλυσή τους στο εκάστοτε πεδίο εφαρμογής. Η τιμή που λαμβάνεται αφορά το πόσες φορές αναμένεται να παρουσιαστεί πρόβλημα, το οποίο δεν είχε προβλευθεί.

Συντήρηση

Τέλος, κρίθηκε αναγκαίος και ένας συντελεστής που να αντιπροσωπεύει τη συχνότητα, στην οποία θα χρειάζεται συντήρηση μία διάταξη με δεδομένο ότι δεν υπάρχει εγγύηση κατασκευαστή.

3.5. Περιβαλλοντικό Κριτήριο

Ένα επίσης σημαντικό κριτήριο είναι το περιβαλλοντικό, το οποίο στα πλαίσια της παρούσας εργασίας δεν λήφθηκε υπόψη, αλλά κρίθηκε άξιο αναφοράς και περεταίρω διερεύνησης. Ο αλγόριθμος μπορεί μελλοντικά να δίνει πληροφορίες σχετικά με τα ποσοστά επαναχρησιμοποίησης παρωχημένου εξοπλισμού στην περίπτωση εφαρμογής της μεθόδου Upcycling, δίνοντας έναν οικολογικό δείκτη, όπως δίνεται παρακάτω [Cullen 2017].

$$\alpha = \frac{\text{recovered EOL material}}{\text{total material demand}}$$

$$\beta = 1 - \frac{\text{energy required to recover material}}{\text{energy required for primary production}}$$

$$\text{Circularity Index, CI} = \alpha\beta$$

4. Καθορισμός των βαρών για την αποθήκευση ή μη τεμαχίων και διατάξεων

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, για τον υπολογισμό των βαρών w_i ακολουθήθηκε μια διαδικασία αναλυτικού υπολογισμού με γνώμονα τη διερεύνηση των οικονομικών αποτελεσμάτων που θα επιφέρει στο Εργαστήριο η επιλογή των διαφόρων τιμών των συντελεστών. Για τον υπολογισμό, λοιπόν, των βέλτιστων βαρών άλλα και του κατωφλιού S_0 που καθορίζει την αποθήκευση ή μη του εκάστοτε τεμαχίου ή διάταξης ακολουθήθηκε η παρακάτω διαδικασία.

Με βάση τα δεδομένα που υπήρχαν στο Εργαστήριο αναπτύχθηκε η εξής μελέτη περίπτωσης. Στο Εργαστήριο κατασκευάστηκαν ή πρόκειται να κατασκευαστούν την τρέχουσα περίοδο τέσσερις (4) διατάξεις που αφορούν τις οδοντώσεις, τα υδραυλικά υψηλής ισχύος και την τριβολογία. Και για τις τέσσερις διατάξεις ακολουθήθηκε η διαδικασία του Upscycling, οπότε σχεδιάστηκαν από μέλη του Εργαστηρίου αξιοποιώντας και τμήματα (διατάξεις, κινητήρες, παρελκόμενα κ.α.) από παλαιότερο παρωχημένο εξοπλισμό. Η πρώτη διάταξη αφορούσε τον λειτουργικό έλεγχο οδοντωτών τροχών με τη μέθοδο διπλής και μονής κατατομής. Το εργαστήριο διέθετε μια παλιά μηχανή για έλεγχο διπλής κατατομής, ενώ δεν υπάρχει στην αγορά μηχανή που να επιτελεί και τους δύο ελέγχους ταυτόχρονα. Οι δύο επόμενες διατάξεις αφορούν υδραυλικά υψηλής ισχύος, με την πρώτη να μελετά τη δυνατότητα κατασκευής διαφορικού για εφαρμογή στην αυτοκινητοβιομηχανία αποκλειστικά από υδραυλικά και τη δεύτερη να αφορά μια πειραματική διάταξη για διάφορους ελέγχους πάνω σε υδραυλικά συστήματα. Η τελευταία διάταξη αφορά διάφορους τριβολογικούς ελέγχους που θα επιτελούνται σε μια μόνο μηχανή (από το εμπόριο θα έπρεπε να αγοραστούν τουλάχιστον 2 διαφορετικές μηχανές). Τα χαρακτηριστικά των διατάξεων αυτών και οι τιμές που δίνονται ως είσοδοι στον αλγόριθμο του Upscycling φαίνονται στη συνέχεια στον Πίνακα 2.

	Gear Tester	Hydraulic Differential	Power Hydraulics	Tribology
<i>Market Price (€)</i>	200,000.00	38,000.00	125,000.00	125,000.00
<i>BOM (€)</i>	25,000.00		10,000.00	10,000.00
<i>Design Manhours</i>	40	500	500	500
<i>Designer Rate</i>	20.00	20.00	20.00	20.00
<i>Manufacturing Manhours</i>	8	50	250	280
<i>Manufacturing Rate</i>	10.00	20.00	20.00	20.00
<i>Required Device Lifetime</i>	20	20	20	20
<i>Service Cost</i>	0.01%	0.01%	0.01%	1.00%
<i>Troubleshooting Cost</i>	3.5%	3.5%	3.5%	3.5%
<i>Know How</i>	1	2	2	3
<i>Service Frequency</i>	4	4	10	5
<i>Troubleshooting Frequency</i>	1	3	4	3

Πίνακας 2. Διατάξεις Εργαστηρίου Στοιχείων Μηχανών για μελέτη περίπτωσης

Από την ανάλυση που έγινε, αποδείχθηκε ότι χρησιμοποιήθηκαν τεμάχια από την αποθήκη που φαίνονται ενδεικτικά στο παρακάτω πίνακα και αναλυτικά παρατίθενται στο Παράρτημα.

	Μηχανή Goulder Mikron	Βάνα	Ρακόρ	Hydraulic Motor	Σασί – Φορτίο	Rexroth Z2DB Pressure Relief Valve	Flovex T8035-A-4	EPE Italiana Sri	Rexroth A10VSO	Chris Motors coupler	Rexroth Hydronorma DBDS 6	Rexroth Hydraulic Power Unit	Rexroth Hydronorma	Mannesmann Rexroth Directional Valve
Αριθμός	1	5	40	2	1	1	1	1	1	2	1	1	2	3
Επιθυμητή Διάρκεια Ζωής	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Υπολειπόμενη Διάρκεια Ζωής υπό εξέταση Αντικειμένου	20	8	10	8	20	10	5	10	9	15	8	3	4	10
Διαθεσιμότητα υπό εξέταση Αντικειμένου στην αγορά	1	5	5	4	4	4	4	4	4	5	5	4	4	4
Τιμή υπό εξέταση Αντικειμένου στην αγορά	70000	10	0.1	300	150	400	400	400	2200	15	70	2500	40	150
Εγγύηση υπό εξέταση Αντικειμένου	5	0	0	0	0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0	0.1	0	0
Διαθεσιμότητα στην αποθήκη	0	2	20	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1
Εκτιμώμενη Απαίτηση εντός του οριζοντα σχεδιασμού	1	8	50	3	2	5	2	1	1	5	3	2	1	2

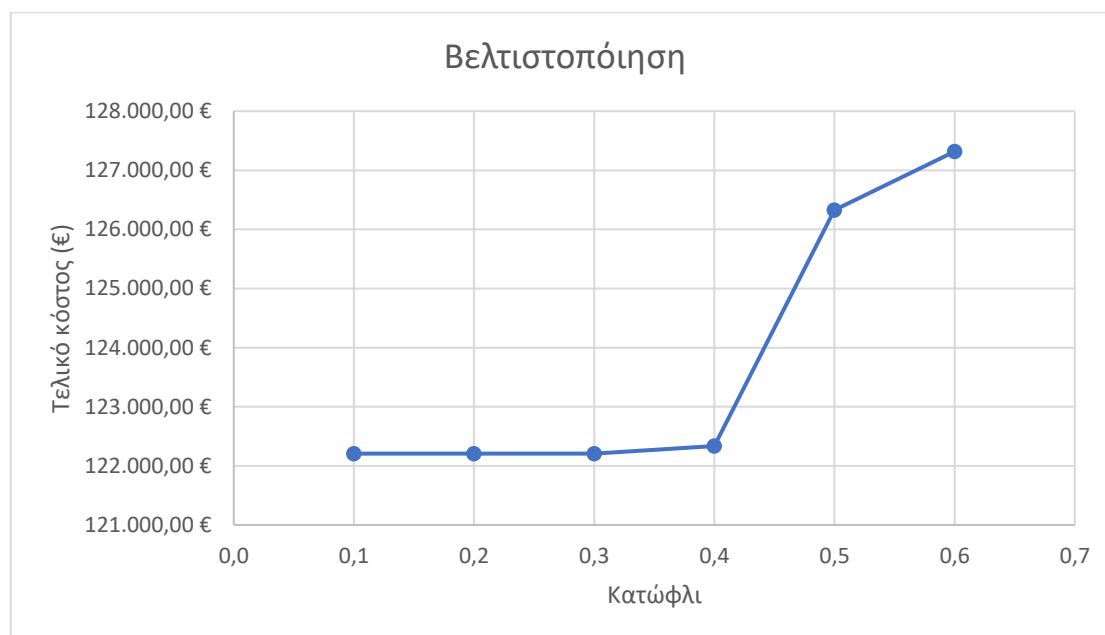
Πίνακας 3. Υλικά από παρωχημένο εξοπλισμό προς αποθήκευση ή ανακύκλωση

Η μελέτη περίπτωσης που αναλύθηκε ήταν η ακόλουθη. Το κόστος για την κατασκευή των διατάξεων εξαρτάται και από το ποσοστό των υλικών που τα πήρε κατευθείαν από την αποθήκη και δεν χρειάστηκε να δώσει επιπλέον χρήματα για να τα αγοράσει. Επομένως, ανάλογα με τις τιμές των σχετικών βαρών w_i και του κατωφλιού S_0 , κάθε φορά διαφορετικός αριθμός τεμαχίων αποθηκεύεται, αλλάζοντας το τελικό κόστος για την κατασκευή των διατάξεων. Σκοπός είναι να βρεθεί ο κατάλληλος συνδυασμός σχετικών βαρών w_i και του κατωφλιού S_0 έτσι ώστε να εξασφαλίζεται χαμηλό κόστος και απόρριψη μη χρήσιμου και μη λειτουργικού παρωχημένου εξοπλισμού.

Για την εύρεση των βέλτιστων βαρών και κατωφλιού χρησιμοποιείται ένας εξελκτικός αλγόριθμος (Matlab). Μεταβλητές του αλγορίθμου είναι τα σχετικά βάρη w_i . Ο εξελκτικός αλγόριθμος βελτιστοποίησης υπολογίζει εκείνον τον συνδυασμό βαρών που οδηγεί στο ελάχιστο τελικό κόστος και μια συγκεκριμένη τιμή κατωφλιού. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται για όλες τις τιμές κατωφλιού που επιθυμούμε να εξετάσουμε. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον ακόλουθο Πίνακα και στο Σχήμα 4.

Κατώφλι S_0	Κόστος	w_1	w_2	w_3	w_4	w_5
0.1	122,207.48 €	9.8%	0.0%	19.4%	32.7%	38.1%
0.2	122,207.48 €	16.1%	24.5%	0.0%	13.5%	45.9%
0.3	122,207.48 €	40.9%	0.0%	2.9%	25.3%	30.9%
0.4	122,339.47 €	42.5%	0.0%	0.0%	0.0%	57.5%
0.5	126,326.45 €	40.2%	16.0%	0.7%	1.1%	42.0%
0.6	127,317.99 €	34.0%	0.1%	1.2%	2.0%	62.6%

Πίνακας 4. Αποτελέσματα βελτιστοποίησης σχετικών βαρών για διάφορες τιμές κατωφλιών



Σχήμα 4. Αποτελέσματα βελτιστοποίησης σχετικών βαρών για διάφορες τιμές κατωφλιών

Σαν πρώτη παρατήρηση μπορεί να γίνει σαφές ότι για τιμές κατωφλιού έως 0.4 το συνολικό κόστος παραμένει χαμηλό, ενώ μετά αυξάνεται περίπου 4 με 5 χιλιάδες €. Για να βεβαιωθούμε ότι ο εξελικτικός αλγόριθμος δεν έχει δώσει ως λύση κάποιο τοπικό ελάχιστο, επαναλαμβάνουμε τη διαδικασία βελτιστοποίησης για κάθε κατώφλι 100 φορές, όποτε βγαίνει ένας πίνακας όπως ο παρακάτω για κατώφλι $S_0 = 0.1$. Για τις άλλες τιμές οι Πίνακες δίνονται στο Παράρτημα.

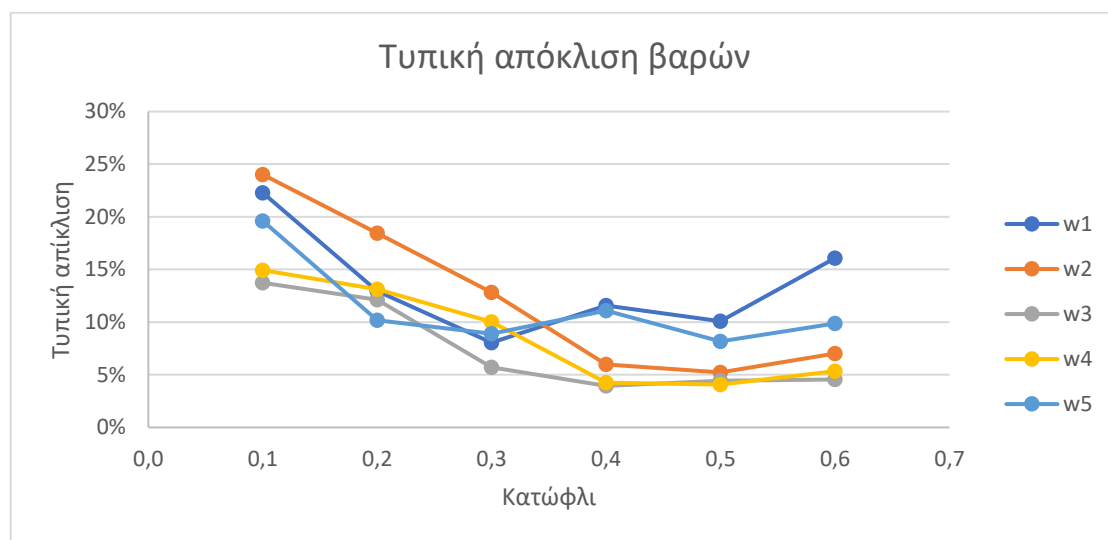
w_1	w_2	w_3	w_4	w_5	Κόστος (€)
7.6%	59.9%	32.6%	0.0%	0.0%	122,207.48
9.8%	0.0%	19.4%	32.7%	38.1%	122,207.48
17.7%	0.0%	21.4%	27.1%	33.9%	122,207.48
15.3%	27.2%	0.0%	25.6%	31.9%	122,207.48
6.3%	31.3%	31.3%	0.0%	31.3%	122,207.48
30.7%	26.0%	10.4%	0.0%	32.9%	122,207.48
68.8%	10.4%	10.4%	10.4%	0.0%	122,207.48
7.0%	32.0%	0.0%	28.9%	32.0%	122,207.48
14.8%	3.0%	51.3%	0.0%	30.9%	122,207.48
19.7%	31.3%	17.7%	31.4%	0.0%	122,207.48
10.2%	35.2%	19.5%	0.0%	35.2%	122,207.48
8.0%	85.2%	4.8%	0.0%	2.0%	122,207.48
18.8%	0.0%	31.3%	21.9%	28.1%	122,207.48
20.1%	12.2%	0.0%	22.6%	45.1%	122,207.48
10.2%	0.0%	32.0%	0.0%	57.8%	122,207.48
11.2%	57.4%	0.0%	30.0%	1.3%	122,207.48
16.7%	37.5%	18.8%	0.0%	27.1%	122,207.48
25.0%	27.4%	21.8%	25.8%	0.0%	122,207.48
79.2%	1.1%	14.6%	0.0%	5.1%	122,207.48
9.4%	21.9%	0.0%	37.5%	31.3%	122,207.48
16.7%	20.8%	0.0%	41.7%	20.8%	122,207.48
27.5%	0.0%	24.7%	33.4%	14.4%	122,207.48
81.3%	6.3%	0.0%	6.3%	6.3%	122,207.48
4.0%	31.0%	10.1%	41.3%	13.6%	122,207.48
8.6%	0.9%	0.0%	0.8%	89.7%	122,207.48
16.7%	20.8%	0.0%	20.8%	41.7%	122,207.48
8.9%	33.9%	0.0%	28.6%	28.6%	122,207.48
19.8%	38.5%	0.0%	19.3%	22.4%	122,207.48
14.6%	0.0%	31.3%	22.9%	31.3%	122,207.48
14.6%	22.8%	0.0%	25.6%	37.0%	122,207.48
11.1%	32.5%	0.0%	31.8%	24.7%	122,207.48
81.0%	0.0%	5.9%	4.0%	9.0%	122,207.48
54.1%	13.1%	14.0%	0.0%	18.8%	122,207.48
53.1%	15.6%	0.0%	15.6%	15.6%	122,207.48
48.0%	27.5%	19.2%	5.3%	0.0%	122,207.48
26.1%	0.0%	24.0%	18.7%	31.2%	122,207.48
15.1%	33.9%	17.2%	0.0%	33.9%	122,207.48
21.4%	31.5%	0.0%	15.0%	32.1%	122,207.48

21.4%	0.0%	31.0%	20.2%	27.4%	122,207.48
1.0%	36.5%	0.0%	26.0%	36.5%	122,207.48
8.6%	30.5%	27.4%	0.0%	33.6%	122,207.48
11.7%	83.5%	0.0%	2.4%	2.4%	122,207.48
68.8%	0.0%	12.5%	14.6%	4.2%	122,207.48
8.9%	33.9%	0.0%	23.4%	33.9%	122,207.48
0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	100.0%	122,207.48
39.8%	9.3%	0.0%	25.5%	25.5%	122,207.48
30.2%	15.4%	26.0%	0.0%	28.4%	122,207.48
34.9%	0.0%	7.4%	45.5%	12.2%	122,207.48
14.4%	27.0%	27.7%	0.0%	31.0%	122,207.48
2.5%	20.1%	0.0%	20.1%	57.2%	122,207.48
23.8%	34.0%	25.9%	16.2%	0.0%	122,207.48
2.6%	24.3%	0.0%	34.7%	38.4%	122,207.48
75.0%	0.0%	9.4%	9.4%	6.2%	122,207.48
22.1%	39.8%	12.9%	0.0%	25.2%	122,207.48
19.1%	9.7%	38.3%	0.0%	32.8%	122,207.48
19.8%	0.0%	29.2%	30.8%	20.2%	122,207.48
15.3%	0.0%	24.3%	35.3%	25.1%	122,207.48
16.8%	22.2%	18.5%	42.5%	0.0%	122,207.48
53.1%	0.0%	15.6%	15.6%	15.6%	122,207.48
53.1%	15.6%	15.6%	15.6%	0.0%	122,207.48
13.0%	36.0%	0.0%	30.4%	20.7%	122,207.48
11.6%	35.1%	44.7%	0.0%	8.6%	122,207.48
1.3%	93.3%	1.5%	0.0%	3.9%	122,207.48
11.0%	29.3%	0.0%	36.0%	23.7%	122,207.48
6.3%	62.5%	0.0%	0.0%	31.3%	122,207.48
68.8%	3.5%	0.0%	14.6%	13.2%	122,207.48
8.4%	35.7%	0.0%	26.7%	29.2%	122,207.48
10.8%	79.5%	0.0%	8.4%	1.3%	122,207.48
36.4%	15.1%	0.0%	35.4%	13.1%	122,207.48
3.7%	8.5%	9.4%	0.0%	78.4%	122,207.48
3.1%	93.4%	2.9%	0.6%	0.0%	122,207.48
7.8%	32.8%	0.0%	28.6%	30.7%	122,207.48
29.1%	3.3%	0.0%	64.3%	3.3%	122,207.48
21.9%	0.0%	46.9%	7.8%	23.4%	122,207.48
6.3%	53.1%	31.3%	9.4%	0.0%	122,207.48
12.3%	29.4%	0.0%	35.9%	22.4%	122,207.48
0.8%	84.7%	4.0%	0.0%	10.5%	122,207.48
0.0%	5.1%	12.9%	9.1%	72.9%	122,207.48
9.7%	79.8%	5.8%	0.0%	4.7%	122,207.48
87.2%	9.2%	0.0%	1.1%	2.5%	122,207.48
31.7%	27.5%	15.5%	25.3%	0.0%	122,207.48
10.2%	35.2%	0.0%	35.2%	19.5%	122,207.48
0.0%	90.1%	6.4%	2.4%	1.2%	122,207.48
35.0%	11.8%	23.9%	0.0%	29.3%	122,207.48

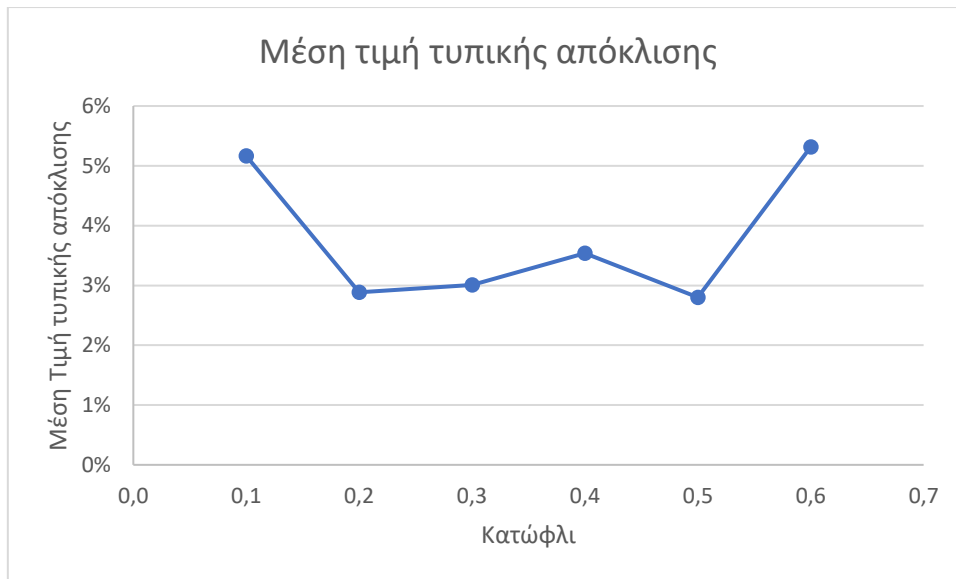
47.8%	28.8%	18.2%	5.2%	0.0%	122,207.48
44.2%	28.6%	0.0%	13.0%	14.2%	122,207.48
16.7%	20.8%	0.0%	20.8%	41.7%	122,207.48
3.5%	19.9%	38.1%	0.0%	38.5%	122,207.48
24.5%	40.8%	14.2%	0.0%	20.5%	122,207.48
78.1%	0.0%	18.8%	0.0%	3.1%	122,207.48
10.2%	0.0%	19.5%	35.2%	35.2%	122,207.48
16.7%	0.0%	41.7%	20.8%	20.8%	122,207.48
75.2%	0.0%	6.1%	2.9%	15.7%	122,207.48
67.1%	8.4%	22.6%	0.0%	1.9%	122,207.48
11.2%	29.3%	26.1%	33.5%	0.0%	122,207.48
6.5%	14.7%	38.5%	0.0%	40.4%	122,207.48
11.5%	0.0%	38.5%	13.5%	36.5%	122,207.48
8.3%	0.0%	27.1%	31.3%	33.3%	122,207.48
16.7%	20.8%	20.8%	0.0%	41.7%	122,207.48
28.1%	26.6%	12.5%	32.8%	0.0%	122,207.48

Πίνακας 5. Τιμές βαρών για 100 επαναλήψεις της βελτιστοποίησης ($S_0 = 0.1$)

Όπως γίνεται εμφανές, αν και το ελάχιστο παραμένει το ίδιο, αυτό μπορεί να επιτευχθεί με πολλούς διαφορετικούς συνδυασμούς βαρών. Για να εξετάσουμε για ποιο κατώφλι έχουμε την χαμηλότερη διακύμανση των βαρών και επομένως την πιο εύρωστη συμπεριφορά, υπολογίζουμε την τυπική απόκλιση των βαρών για κάθε τιμή κατωφλιού και για τις 100 βελτιστοποιήσεις που έγιναν για κάθε τιμή του.



Σχήμα 5. Τυπική απόκλιση βαρών για τις διάφορες τιμές του κατωφλιού



Σχήμα 6. Μέση τιμή για την τυπική απόκλιση βαρών για τις διάφορες τιμές του κατωφλιού

Από τα αποτελέσματα γίνεται εμφανές ότι οι μικρότερες διακυμάνσεις στην τυπική απόκλιση παρατηρούνται για τιμές κατωφλιού 0.2 έως 0.5. Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειωθεί πως η μελέτη περίπτωσης που εξετάζεται είναι σχετικά μικρής κλίμακας, μιας και εξετάζει την κατασκευή τεσσάρων μόλις διατάξεων. Όταν η διαδικασία αυτή γενικευτεί σε μία μεγαλύτερης κλίμακας μελέτη περίπτωσης (π.χ. παραγωγική ή βιομηχανική ομάδα) όπου τα μηχανήματα, οι διατάξεις και γενικά τα δεδομένα θα είναι τάξεις μεγέθους περισσότερα, η ανάλυση αυτή θα είναι πολύ πιο πλούσια σε πληροφορία και θα αποκτήσει αμέσως σημαντικότερο νόημα και αξία.

Από τα έως τώρα δεδομένα καταλήγουμε ότι η καταλληλότερη τιμή για το κατώφλι είναι το 0.4. Το συμπέρασμα αυτό προέκυψε από το γεγονός πως πέρα από αυτό το κόστος αυξάνεται σημαντικά, ενώ πριν από αυτό το κόστος είναι μεν λιγότερο αλλά σε πολύ μικρό ποσοστό. Επομένως με ένα τέτοιο κατώφλι δίνεται προτεραιότητα στον υγιή και ακριβό εξοπλισμό, ενώ αρκετά χρησιμοποιημένα, φθηνά και εύκολα προσβάσιμα προϊόντα πηγαίνουν για ανακύκλωση.

Την επιλογή της τιμής 0.4 για το κατώφλι ενισχύει και η παρακάτω ανάλυση. Για να διαπιστωθεί η ευρωστία του κατωφλιού επαναλήφθηκε όλη η παραπάνω διαδικασία για διαφορετικές τιμές των επιθυμητών διαρκειών ζωής των τεσσάρων διατάξεων, όπως φαίνεται στον Πίνακα.

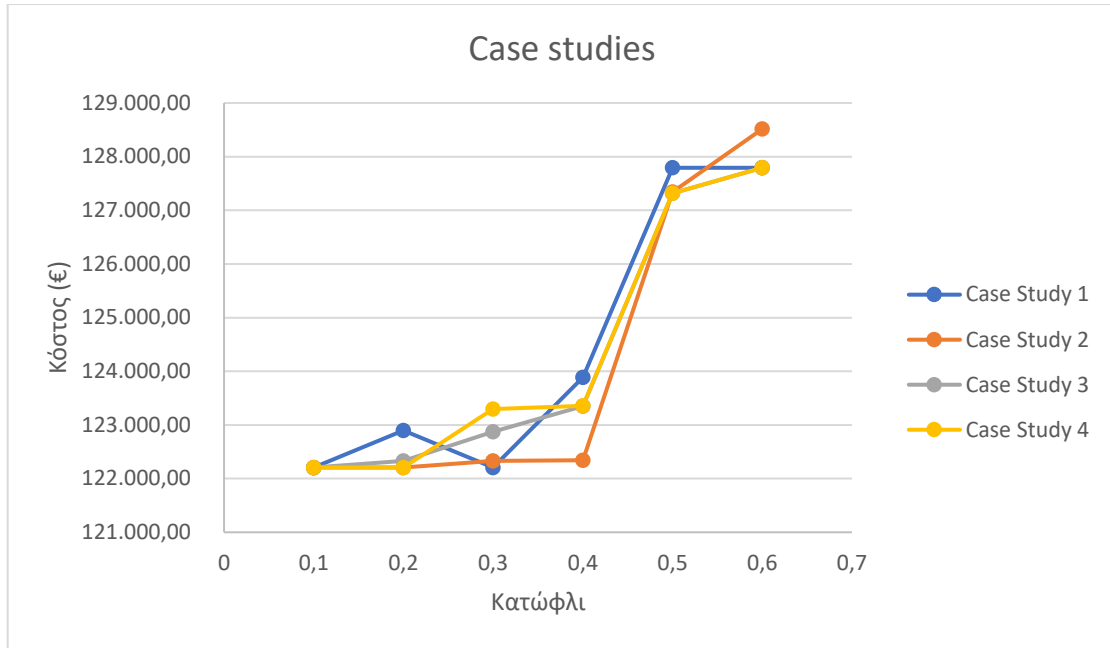
	Gear Tester	Hydraulic Differential	Power Hydraulics	Tribology
Case Study 1	20	20	20	20
Case Study 2	10	1	1	10
Case Study 3	15	0.1	5	1
Case Study 4	1	5	2	8

Πίνακας 6. Επιθυμητή διάρκεια σχεδιασμού διατάξεων σε χρόνια για 4 Case Studies

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 7 και στο Σχήμα 7. Τόσο στον Πίνακα 7 όσο και στο Σχήμα 7 οι παρατηρήσεις που έγιναν για το κατώφλι των 0.4 ισχύουν και για διαφορετικά Case studies, όταν δηλαδή αλλάζει η επιθυμητή διάρκεια ζωής των διατάξεων. Επομένως, επιλέγεται ως τελικό κατώφλι η τιμή 0.4, με σχετικά βάρη αυτά που αφορούν το Case Study 1, που εκφράζει και την πραγματική διάρκεια ζωής των διατάξεων. Τα τελικά αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα 8.

Case Study	S_0	w_1	w_2	w_3	w_4	w_5	Κόστος (€)
1	0.1	17.8%	4.0%	1.1%	6.2%	70.9%	122,207.48
1	0.2	3.3%	7.5%	4.4%	21.3%	63.6%	122,894.57
1	0.3	40.2%	1.4%	1.2%	2.6%	54.5%	122,207.48
1	0.4	7.9%	12.2%	4.2%	13.0%	62.7%	123,889.56
1	0.5	14.4%	6.5%	4.3%	11.0%	63.7%	127,792.62
1	0.6	21.9%	13.0%	0.2%	6.5%	58.4%	127,792.62
2	0.1	9.5%	5.7%	12.9%	0.7%	71.3%	122,207.48
2	0.2	31.2%	6.7%	0.0%	6.0%	56.1%	122,207.48
2	0.3	26.8%	10.2%	1.2%	0.0%	61.8%	122,332.79
2	0.4	26.5%	6.5%	4.9%	2.1%	59.9%	122,339.47
2	0.5	23.6%	4.9%	0.4%	12.5%	58.7%	127,341.51
2	0.6	48.0%	3.3%	8.8%	0.8%	39.1%	128,515.20
3	0.1	51.9%	12.6%	10.3%	2.8%	22.4%	122,207.48
3	0.2	7.2%	6.2%	5.9%	15.3%	65.4%	122,332.79
3	0.3	10.4%	11.9%	9.4%	0.0%	68.4%	122,874.51
3	0.4	5.8%	0.0%	7.7%	1.4%	85.2%	123,351.08
3	0.5	27.0%	0.6%	1.1%	5.3%	66.0%	127,317.99
3	0.6	24.3%	12.1%	1.3%	4.5%	57.8%	127,792.62
4	0.1	36.1%	4.3%	2.6%	1.1%	55.8%	122,207.48
4	0.2	31.3%	8.8%	0.5%	1.3%	58.1%	122,207.48
4	0.3	0.0%	6.0%	12.9%	2.1%	78.9%	123,295.84
4	0.4	5.4%	7.4%	9.6%	5.7%	71.9%	123,354.53
4	0.5	30.2%	12.8%	0.0%	1.3%	55.7%	127,317.99
4	0.6	23.7%	4.2%	5.6%	4.9%	61.5%	127,792.62

Πίνακας 7. Βέλτιστα σχετικά βάρη για κάθε κατώφλι και για κάθε Case Study



Σχήμα 7. Βέλτιστα σχετικά βάρη για κάθε κατώφλι και για κάθε Case Study

S_0	w_1	w_2	w_3	w_4	w_5
0.4	7.9%	12.2%	4.2%	13.0%	62.7%

Πίνακας 8. Βέλτιστες τιμές σχετικών βαρών και κατωφλιού

Σχολιάζοντας τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης παρατηρούμε ότι το μεγαλύτερο σχετικό βάρος για την παρούσα μελέτη περίπτωσης έχει η διαθεσιμότητα στην αποθήκη (w_5), ενώ το λιγότερο η εγγύηση (w_3). Αυτό ήταν αναμενόμενο στην μελέτη περίπτωσης που εξετάστηκε καθώς τα περισσότερα υλικά δεν είχαν καθόλου ή είχαν πολύ μικρή εγγύηση για να παίξει κάποιο ρόλο, ενώ ήταν και πολύ μικρής αξίας σε σχέση με το budget. Οι τιμές αυτές μπορεί να είναι πολύ διαφορετικές σε κάποια άλλη μελέτη περίπτωσης. Αυτό όμως είναι και το νόημα αυτή της διαδικασίας, ότι προσφέρει τα εργαλεία για να επιλεγούν εκείνα τα βάρη που θα φέρουν το καλύτερο αποτέλεσμα για κάθε δομή που τα χρησιμοποιεί ξεχωριστά.

5. Case Studies

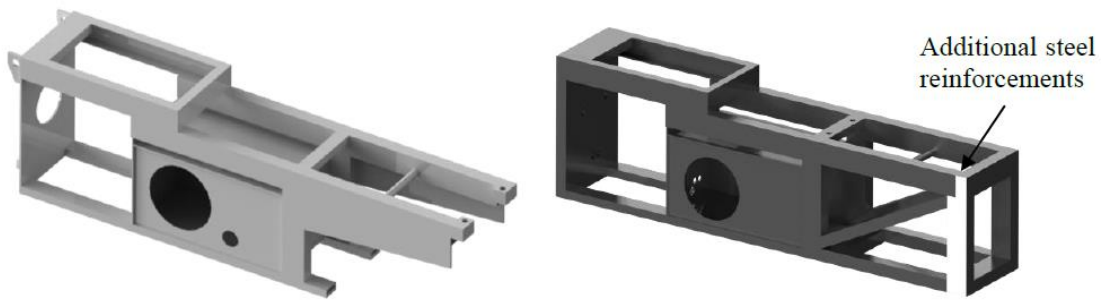
5.1. Case Study 1: Urcycling παρωχημένης μηχανής έγχυσης πλαστικού σε αρθρωτό πάγκο για δοκιμές σε στοιχεία υδραυλικού κυκλώματος υψηλής πίεσης

Στο πεδίο των υδραυλικών συστημάτων υψηλής πίεσης, η μέτρηση της απόδοσης των δομικών στοιχείων σχετίζεται με ένα πλήθος μετρήσεων, που εξαρτώνται από το υπό εξέταση αντικείμενο. Για παράδειγμα, μία μέτρηση θα μπορούσε να αφορά τη υδραυλική πτώση πίεσης μίας αντλίας, την ταχύτητα απόκρισης του ανοίγματος μίας βαλβίδας ελέγχου κατεύθυνσης της ροής, την εκτίμηση της πίεσης μίας σωλήνωσης ή τη διακύμανση των δυναμικών χαρακτηριστικών ενός κυκλώματος. Ο στόχος ήταν ο σχεδιασμός μίας ενιαίας πολυλειτουργικής διάταξης ικανής να εκτελεί όλες τις παραπάνω μετρήσεις. Παρόλα αυτά, στη προσπάθεια για ένα τέτοιο σχεδιασμό, η ανάγκη για modularity έρχεται σε αντίθεση με την ανάγκη για στιβαρότητα και διαστασιολογική ακρίβεια κατά τη λειτουργία. Με αυτά τα δεδομένα, έγινε μία σύνθετη αξιολόγηση των διαθέσιμων αποθηκευμένων πλαισίων, η οποία κατέληξε στην επιλογή μίας παλιάς μηχανής έγχυσης πλαστικού FROMAG (ηλικίας περίπου 50 ετών), η οποία χρησιμοποιήθηκε σαν βάση για το σχεδιασμό με την τεχνική του Urcycling (Εικόνα 10). Λόγω της έμφυτης υψηλής πίεσης τέτοιων συστημάτων, η λειτουργία και η δοκιμή σχετίζονται με μεγάλα φορτία (έως και 100kN) τα οποία πρέπει να αντέχει το πλαίσιο στήριξης. Η ακαμψία του πλαισίου μελετήθηκε με τη μέθοδο ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων (FEA) και παρόλο που η πρώτη ιδιοσυχνότητα ήταν αρκετά υψηλή (περίπου 40Hz), η απαίτηση για τις δυναμικές δυναμικές διεγέρσεις που προβλέπονται ήταν της τάξης των 100Hz. Μέσω διαδικασίας επανασχεδιασμού προστέθηκαν ενισχύσεις από ατσάλι και επιτεύχθηκε η αύξηση της ακαμψίας και η επιθυμητή ιδιοσυχνότητα (Εικόνα 11). Εκτός, όμως, από την ακαμψία, το υπόψη πλαίσιο επιλέχθηκε λόγω της δυνατότητάς του για προσάρτηση επιπλέον εξαρτημάτων ενισχύοντας και την επιθυμητή αρθρωτότητα.

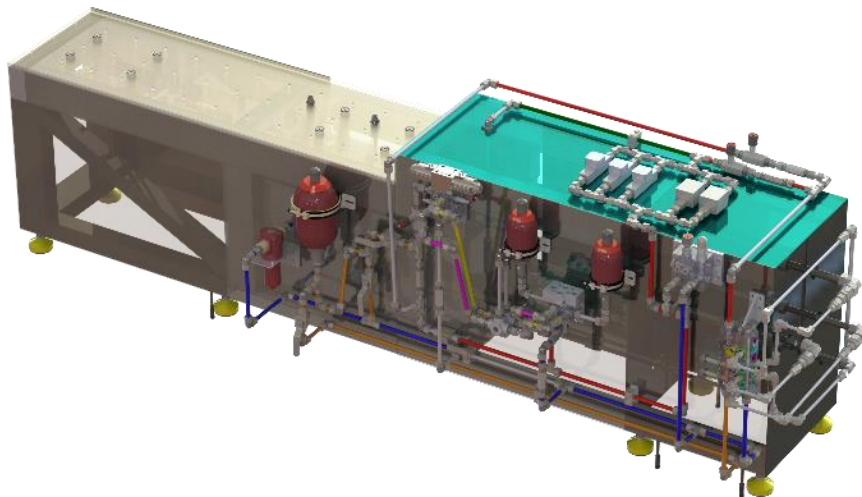
Αποτέλεσμα της συγκεκριμένης μελέτης ήταν η επαναχρησιμοποίηση ακριβών εξαρτημάτων, όπως υδραυλικές αντλίες, που προϋπήρχαν στην αποθήκη του εργαστηρίου. Συγκεκριμένα, η επαναχρησιμοποίηση και των επενεργητών υψηλής πίεσης, ύστερα από στοιχειώδη συντήρηση, οδήγησε στην εξοικονόμηση σημαντικής ποσότητας ακατέργαστου υλικού. Η εκτιμώμενη μάζα της αρχικής μηχανής ήταν περίπου 1.5 μετρικοί τόνοι και το ποσοστό επαναχρησιμοποίησης άγγιξε το 80%. Στην εικόνα 10 φαίνεται η αρχική κατάσταση της μηχανής έγχυσης, ενώ στη εικόνα 12 φαίνεται το τελικό σχέδιο της διαδικασίας του Urcycling. Στον Πίνακα 9 φαίνονται οι λεπτομέρειες από τη διαδικασία Urcycling.



Εικόνα 10. Το αρχικό πλαίσιο της παρωχημένης μηχανής έγχυσης πλαστικού FROMAG και οι υδραυλικοί επενεργήτες που ανακτήθηκαν (δεξιά)



Εικόνα 11. Μοντελοποίηση σε CAD του αρχικού πλαισίου (αριστερά) και του ενισχυμένου πλαισίου (δεξιά)



Εικόνα 12. Τελικό σχέδιο της διάταξης

INPUTS		
Market Price	€	125,000.00
BOM	€	10,000.00
Design Manhours	Hours	500
Designer Rate	€	20.00
Manufacturing Manhours	Hours	250
Manufacturing Rate	€	20.00
Required Device Lifetime	Years	20
Service Cost	%	0.01%
Troubleshooting Cost	%	3.5%
Know How	1 to 5	2
Service Frequency		10
Troubleshooting Frequency		4
OUTPUTS		
Cost of Materials	€	10,000.00
Uncertainty		1.1
Cost of Design	€	10,000.00
Uncertainty		1.1
Cost of Manufacturing	€	5,000.00
Uncertainty		1.1
Total Cost	€	35,550.86
Upcycling		YES
Savings		71.56%

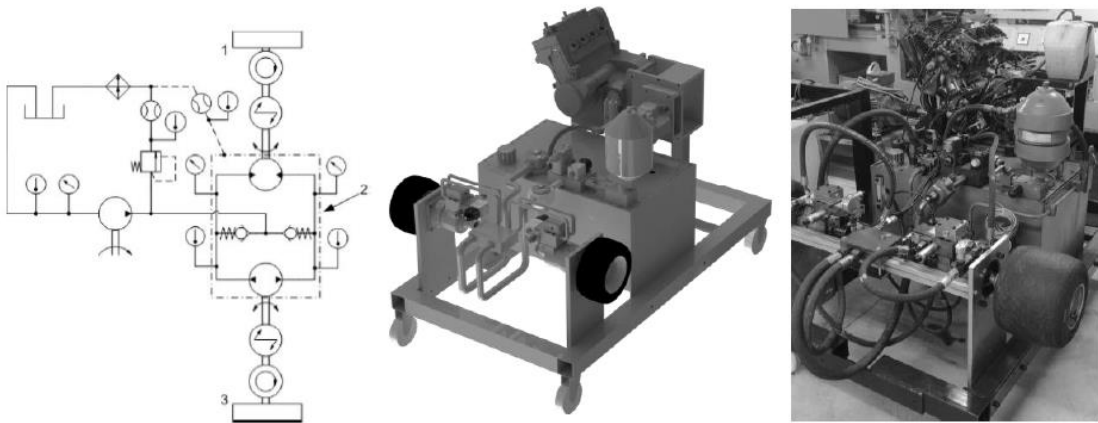
Πίνακας 9. Λεπτομέρειες αλγόριθμου Upcycling για Case study 1

5.2. Case Study 2: Σχεδιασμός Υδραυλικού Διαφορικού

Μία εναλλακτική των υβριδικών συστημάτων μετάδοσης κίνησης, που χρησιμοποιούν μηχανές εσωτερικής καύσης και ηλεκτρικούς κινητήρες είναι αυτή της χρήση υδραυλικών αντί των ηλεκτρικών. Οι υδραυλικές αντλίες και κινητήρες έχουν σαν αποτέλεσμα αυξημένο λόγο δύναμης προς βάρος. Αυτός είναι ο λόγος που καθιστά τέτοιου είδους συστήματα άξια μελέτης για ενσωμάτωση σε οχήματα, καθώς και η πιθανή αντικατάσταση του κιβωτίου ταχυτήτων και των εξαρτημάτων του. Στην πιο απλή τους μορφή, αποτελούνται από μία υδραυλική αντλία σταθερής ή μεταβλητής ροής, σωλήνες, συσσωρευτές ώστε να επιτυγχάνονται ταχείες αποκρίσεις σε ακραίες συνθήκες οδήγησης και υδραυλικούς κινητήρες στους κινητήριους τροχούς, εφαρμόζοντας λειτουργία ανοιχτού ή κλειστού διαφορικού.

Βάσει των παραπάνω, αναπτύχθηκε μία διάταξη βασισμένη στο διάγραμμα υδραυλικού κυκλώματος που φαίνεται στη εικόνα 13. Ο σχεδιασμός των δομικών στοιχείων και η επιλογή των υδραυλικών συστημάτων έγινε σύμφωνα με την αρχή της διαδικασίας του Upcycling. Όλα τα τμήματα της διάταξης κατασκευάστηκαν από το μηδέν ή ανακτήθηκαν από παρωχημένες μηχανές του εργαστηρίου (συμπεριλαμβανόμενης και της μηχανής έγχυσης, που χρησιμοποιήθηκε και για το

προηγούμενη περίπτωση). Με αυτό τον τρόπο το ποσοστό επαναχρησιμοποίησης, τηρώντας τις αρχές 6R έφτασε το 100%. Στον Πίνακα 10 φαίνονται οι λεπτομέρειες από τη διαδικασία Upcycling.



Εικόνα 13. Μονογραμμικό διάγραμμα υδραυλικού κυκλώματος (αριστερά) και τελικό σχέδιο της διάταξης

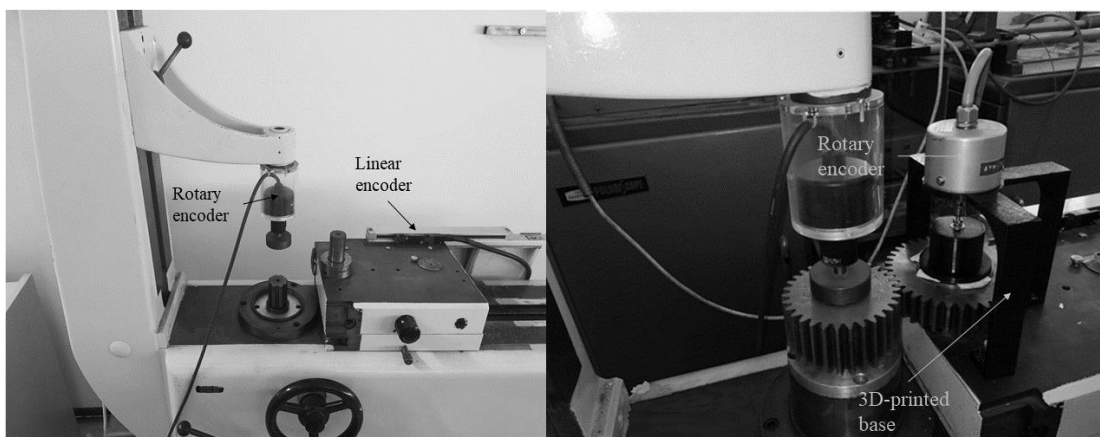
INPUTS		
Market Price	€	38,000.00
BOM	€	
Design Manhours	Hours	500
Designer Rate	€	20.00
Manufacturing Manhours	Hours	50
Manufacturing Rate	€	20.00
Required Device Lifetime	Years	20
Service Cost	%	0.01%
Troubleshooting Cost	%	3.5%
Know How	1 to 5	2
Service Frequency		4
Troubleshooting Frequency		3
OUTPUTS		
Cost of Materials	€	0.00
Uncertainty		1.1
Cost of Design	€	10,000.00
Uncertainty		1.1
Cost of Manufacturing	€	1,000.00
Uncertainty		1.1
Total Cost	€	16,423.87
Upcycling		YES
Savings		56.78%

Πίνακας 10. Λεπτομέρειες αλγόριθμου Upcycling για Case study 2

5.3 Case Study 3: Λειτουργική αναβάθμιση παρωχημένης διάταξης για δοκιμές σε γρανάζια

Ο λειτουργικός έλεγχος γραναζιών με τη μορφή μονής και διπλής κατατομής είναι μία από τις πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες μεθόδους εξέτασης της ακρίβειας των γραναζιών. Παρόλο που οι δοκιμαστικές διατάξεις διπλής κατατομής προτιμούνται από τις βιομηχανίες και τα εργαστήρια λόγω του χαμηλού κόστους και της ικανότητας να παρέχει πληροφορίες για της αποκλίσεις του πάχους της οδόντωσης, οι μονής κατατομής διατάξεις θεωρούνται πολύ πιο χρήσιμες, γιατί δίνουν πληροφορίες για τη γεωμετρία του εξεταζόμενου γραναζιού και τις αποκλίσεις του προφίλ των κατατομών του. Μία ενιαία πολυλειτουργική μετρητική διάταξη ικανή να εκτελεί τόσο μονής όσο και διπλής κατατομής δοκιμές θα μπορούσε να συνδυάζει τις μετρήσεις ώστε να ελαχιστοποιείται η αβεβαιότητα της κατηγοριοποίησής τους.

Το εργαστήριο Στοιχείων Μηχανών και Δυναμικής διαθέτει μια μετρητική διάταξη Goulder Mikron για διπλής κατατομής δοκιμές από τις αρχές της δεκαετίας του 80. Η μηχανή αυτή αποτέλεσε τη βάση της ενιαίας διάταξης, η οποία με αντικατάσταση των παλιών τμημάτων και την ενσωμάτωση νέων θα εκτελεί και των δύο ειδών δοκιμές.



Εικόνα 14. Η μηχανή Goulder Mikron για δοκιμές διπλής κατατομής (αριστερά) και η αναβαθμισμένη διάταξη (δεξιά)

Αρχικά η περιστροφή των γραναζιών γινόταν χειροκίνητα, ενώ η αξονική μετατόπιση των κέντρων του γραναζιού μετρούνταν μέσω μηχανικής συσκευής με γραφίδα που καταγράφει τα αποτελέσματα σε χαρτί χιλιοστού. Προκειμένου να ελέγχεται με ακρίβεια η γωνιακή ταχύτητα των τροχών, έχει εγκατασταθεί ένας νέος ειδικά κατασκευασμένος κύριος άξονας στη συσκευή που κινείται από ηλεκτρικό κινητήρα. Επιπλέον, οι παλιοί περιστροφικοί και γραμμικοί καταγραφείς μετατόπισης αντικαταστάθηκαν από υπερσύγχρονους περιστροφικούς και γραμμικούς encoders αντίστοιχα. Ενδεικτικά, η ακρίβεια που επιτυγχάνεται με το αρχικό σύστημα μέτρησης ήταν της τάξης των 20 μ m, ενώ ο νέος γραμμικός κωδικοποιητής έχει ονομαστική ακρίβεια 0,1 μ m για κάθε 4mm. Επιπλέον, επιτρέπει την απευθείας σύνδεση με υπολογιστή για την εκ των υστέρων επεξεργασία και αποθήκευση των μετρήσεων για κάθε δοκιμή. Επίσης, εγκαταστάθηκαν δύο

περιστροφικοί encoders για την παρακολούθηση της γωνιακής θέσης των γραναζιών σε πραγματικό χρόνο. Ο πρώτος encoder είναι τοποθετημένος στο πλαίσιο, ενώ ο δεύτερος συναρμολογείται σε μια ειδική βάση που παράγεται από 3D printing όπως φαίνεται στην Εικόνα 14. Κατά την ανακύκλωση της μηχανής επιδιώχθηκε η επαναχρησιμοποίηση της πλειοψηφίας των αρχικών συστημάτων. Η αναβαθμισμένη συσκευή που είναι εξοπλισμένη και με τους δύο περιστροφικούς encoders είναι πλέον σε θέση να εκτελεί μετρήσεις μονής κατατομής (δεν προβλέπονται στην αρχική της έκδοση) μαζί με μετρήσεις διπλής κατατομής (που προβλέπονται στην αρχική έκδοση) σύμφωνα με τα υπάρχοντα πρότυπα, επομένως επιτυγχάνοντας αύξηση λειτουργιών. Σύγχρονες μηχανές που μπορούν να εκτελούν δοκιμές κυλίνδρων γραναζιών μονής και διπλής πλευράς δεν είναι διαθέσιμες στην αγορά και η προμήθεια δύο τέτοιων μηχανών για την επίτευξη της ίδιας λειτουργικότητας θα απαιτούσε προϋπολογισμό που υπερβαίνει τα 200,000 €. Στον Πίνακα 11 φαίνονται οι λεπτομέρειες από τη διαδικασία Upcycling.

INPUTS		
Market Price	€	200,000.00
BOM	€	25,000.00
Design Manhours	Hours	40
Designer Rate	€	20.00
Manufacturing Manhours	Hours	8
Manufacturing Rate	€	10.00
Required Device Lifetime	Years	20
Service Cost	%	0.01%
Troubleshooting Cost	%	3.5%
Know How	1 to 5	1
Service Frequency		4
Troubleshooting Frequency		1
OUTPUTS		
Cost of Materials	€	25,000.00
Uncertainty		1.1
Cost of Design	€	800.00
Uncertainty		1.1
Cost of Manufacturing	€	80.00
Uncertainty		1.1
Total Cost	€	48,529.84
Upcycling		YES
Savings		75.74%

Πίνακας 11. Λεπτομέρειες αλγόριθμου Upcycling για Case study 3

5.4 Case Study 4: Ανασχεδιασμός σύγχρονης μηχανής δοκιμών φθοράς

Η συγκεκριμένη μελέτη αφορά στο σχεδιασμό μίας νέας καινοτόμου αρθρωτής πολυλειτουργικής διάταξης ικανής να εκτελεί διαφόρων ειδών δοκιμές τριβολογίας. Οι λειτουργίες της διάταξης περιλαμβάνουν κατά βάση δοκιμές φθοράς, εξετάζοντας τα μοντέλα φθοράς που περιγράφουν τη διεπαφή δειγμάτων. Επιπρόσθετα, είναι δυνατός ο έλεγχος και η ανάλυση των φαινομένων που σχετίζονται με τη ροή λαδιού σε μονούς δίσκους συμπλέκτη υγρής τριβής. Όλες οι δοκιμές εκτελούνται σύμφωνα με τυποποιημένες διεθνείς διαδικασίες. Η πρώτη κατηγορία δοκιμών πραγματοποιείται στο τμήμα της κατασκευής που παρέχει περιστροφική και γραμμική κίνηση στα δείγματα, τα οποία τοποθετούνται σε στεγανό περιβάλλον, ελεγχόμενης θερμοκρασίας και υγρασίας. Οι δοκιμές μπορούν να διεξαχθούν σε ξηρές συνθήκες ή συνθήκες λίπανσης. Δίπλα στη διάταξη ελέγχου φθοράς τοποθετείται η διάταξη μονού δίσκου υγρού συμπλέκτη, η οποία περιλαμβάνει ένα τμήμα που είναι υπεύθυνο για την περιστροφική κίνηση του δίσκου και ένα τμήμα που παλινδρομεί γραμμικά. Η αντοχή του τελικού κατασκευάσματος ελέγχεται χρησιμοποιώντας ένα συνδυασμό αναλυτικών εξισώσεων και υπολογιστικών μεθόδων πεπερασμένων στοιχείων, χρησιμοποιώντας το λογισμικό ANSYS. Τέλος, κατασκευάζονται τα διδιάστατα μηχανολογικά σχέδια των εξαρτημάτων της μηχανής (πλαίσιο στήριξης, εξαρτήματα δοκιμής φθοράς, εξαρτήματα δοκιμής μονού δίσκου συμπλέκτη, σύστημα κυκλοφορίας και λίπανσης λαδιού κ.λπ.). Ο σχεδιασμός ακολουθεί τα βήματα της πρώτης προσέγγισης, που περιγράφηκε σε προηγούμενο εδάφιο, ως εξής.

Εύρεση πρωτοκόλλων και καθορισμός προδιαγραφών για τις δοκιμές

Η διάταξη που μελετάται θα είναι ικανή να εκτελεί δοκιμές τύπου Pin-on-Disk, Ball-on-Flat, Block-on-Ring, Disk-on-Disk και μίας προσαρμοσμένης δοκιμής Single clutch – Disk. Οι τυποποιημένες μέθοδοι εκτέλεσης των δοκιμών αυτών περιγράφονται σύντομα παρακάτω.

Pin-on-Disk

Η δοκιμή Pin-on-Disk τυποποιείται βάσει του προτύπου/πρωτοκόλλου ASTM G99 – 17.

Pin-on-Disk	
Specification	Value
Pin Specimen Diameter	2mm-10mm
Disc Specimen Diameter	30mm-100mm
Disc Rotational Speed	600 rpm
Applied Force	No recommendation by standard, up to 2600N
Oil Temperature	No recommendation by standard, 150°C
Force Control	Within a maximum deviation of +/- 2.0 % of the test load, depending on the selected spring

Ball-on-Flat

Η δοκιμή Ball-on-Flat τυποποιείται βάσει του προτύπου/πρωτοκόλλου ASTM G133 – 05 (Reapproved 2016). Βάσει πρωτοκόλλου εκτελούνται δύο διαδικασίες- μία με λίπανση και μία σε ξηρές συνθήκες.

Διαδικασία A (Ξηρές Συνθήκες)

- Pin tip radius, 4.76 mm (3/16 in.),
- Normal force, 25.0 N,
- Stroke length, 10.0 mm,
- Oscillating frequency, 5.0 Hz,
- Test duration, 16 min 40 s (sliding distance 100 m),
- Ambient temperature, 22 +/- 3°C,
- Relative humidity, 40 to 60 %, and
- Lubrication, not applied

Διαδικασία B (Συνθήκες Λίπανσης)

- Pin tip radius, 4.76 mm (3/16 in.),
- Normal force, 200.0 N,
- Stroke length, 10.0 mm,
- Oscillating frequency, 10.0 Hz,
- Test duration, 33 min 20 s (sliding distance 400 m),
- Temperature, 150 +/- 2°C,
- Relative humidity, 40 to 60 %, and
- Lubrication, full immersion under the selected lubricant

Block-on-Ring

Η δοκιμή Block-on-Ring τυποποιείται βάσει του προτύπου/πρωτοκόλλου ASTM G77-17.

Disk-on-Disk

Για τη συγκεκριμένη δοκιμή δεν υπάρχει τυποποίηση. Για το λόγο αυτό οι απαιτήσεις ορίστηκαν βάσει των μέγιστων επιτρεπόμενων φορτίων και μεγεθών της διάταξης.

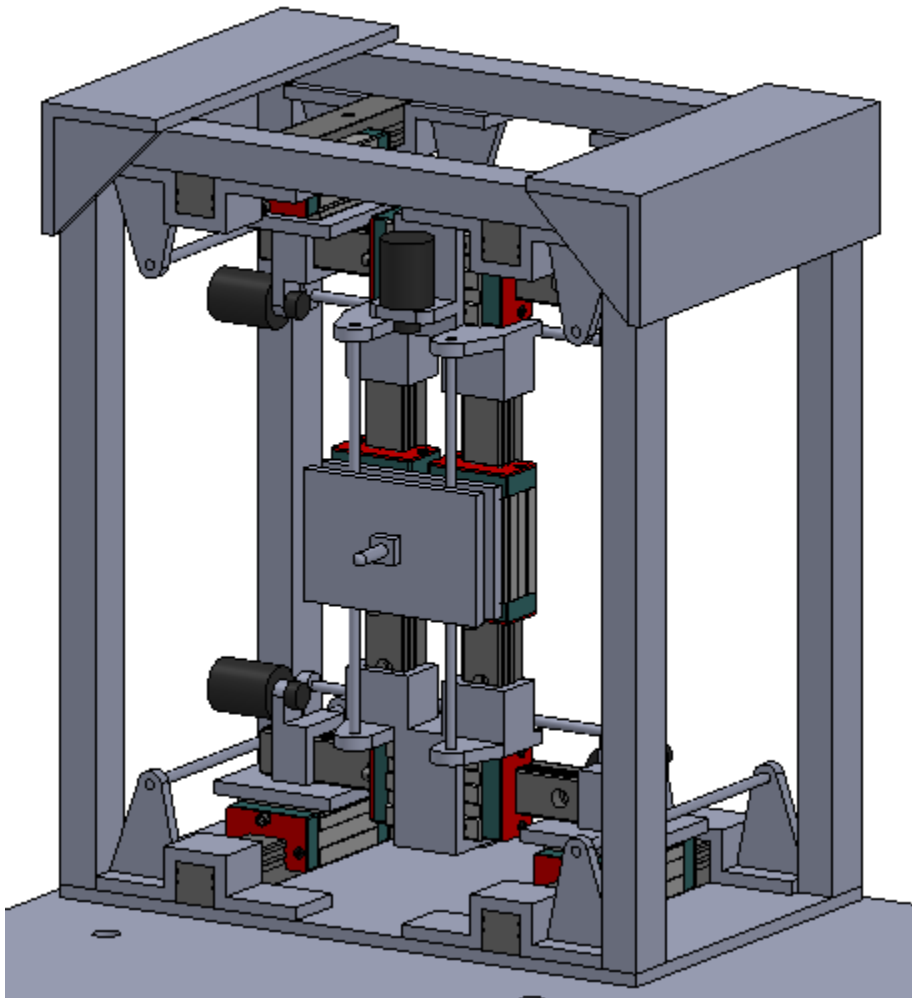
Single Clutch-Disk

Η διαφορά της δοκιμής αυτής με τις προηγούμενες είναι ότι σε αυτή δεν μετρώνται τα χαρακτηριστικά φθοράς. Εν αντιθέση, η δοκιμή αυτή προσομοιάζει φαινόμενα λίπανσης.

TEST	PROTOCOL
Pin-on-Disk	ASTM G99 – 17
Ball-on-Flat	ASTM G133 – 05 (Reapproved 2016)
Block-on-Ring	ASTM G77-17
Disk-on-Disk	-
Single clutch – Disk	-

Πρώιμος γενικός σχεδιασμός της διάταξης

Βάσει των προδιαγραφών που τέθηκαν παραπάνω, γίνεται ένας πρώιμος γενικός σχεδιασμός, κάνοντας χρήση εργαλείων CAD/CAE προκειμένου να καταλήξουμε στη σύνθεση της διάταξης σε μορφή πρωτοτύπου. Αρχικά, λοιπόν, σχεδιάστηκε χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα SolidWorks η διάταξη, όπως φαίνεται στην Εικόνα 15 και στη συνέχεια κάνοντας την απαραίτητη προσομοίωση επαληθεύτηκε η τήρηση των προδιαγραφών.

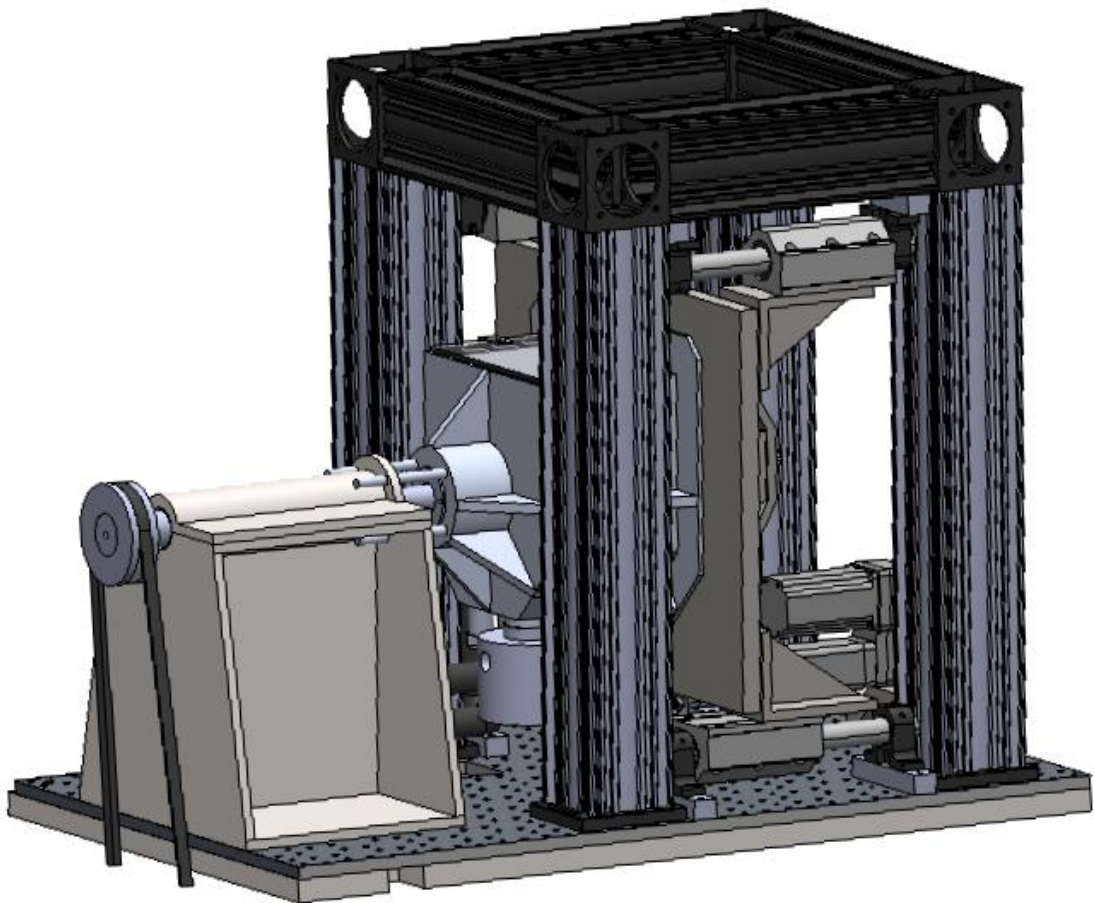


Εικόνα 15. Έλεγχος για διαθέσιμο εξοπλισμό που πληροί τις προδιαγραφές του γενικού σχεδιασμού

Στη συνέχεια βασιζόμενοι στο αρχικό σχέδιο ανατρέξαμε στην αποθήκη για να ελέγξουμε εάν και ποιά από τα διαθέσιμα υλικά ικανοποιούν τις ανάγκες του αρχικού σχεδίου. Στο σημείο αυτό καλείται ο σχεδιαστής να κρίνει κατά πόσο ο σχεδιασμός του μπορεί να προσαρμοστεί στα διαθέσιμα υλικά και αν αυτό είναι εφικτό να προχωρήσει σε επανασχεδιασμό. Είναι φανερό η αλληλεπίδραση του βήματος αυτού με το προηγούμενο, προκειμένου να αξιοποιηθούν όσο το δυνατόν περισσότερο οι ίδιοι πόροι του εργαστηρίου.

Τελικός σχεδιασμός της διάταξης

Ύστερα από τον επανασχεδιασμό της αρχικής διάταξης, προσπαθώντας να χρησιμοποιήσουμε όλο και περισσότερα υλικά από την αποθήκη, εφαρμόζοντας έτσι τις αρχές της κυκλικής οικονομίας και των πρωτοκόλλων 6R καταλήξαμε στο τελικό σχέδιο, το οποίο φαίνεται παρακάτω στην Εικόνα 16.



Εικόνα 15. Νέα διάταξη ύστερα από Upcycling

Προμήθεια μη διαθέσιμων υλικών από την αγορά

Μετά τον τελικό σχεδιασμό και αφού χρησιμοποιήσαμε όσο το δυνατόν περισσότερα υλικά και εξαρτήματα από την αποθήκη ανατρέξαμε στο διαδίκτυο και γενικότερα στην αγορά για την προμήθεια των μη διαθέσιμων αλλά απαιτούμενων για την κατασκευή υλικών, όπως ηλεκτρονικά μετρητικά, αισθητήρες και κινητήρες. Στον Πίνακα 12 φαίνονται οι λεπτομέρειες από τη διαδικασία Upcycling.

INPUTS		
Market Price	€	125,000.00
BOM	€	10,000.00
Design Manhours	Hours	500
Designer Rate	€	20.00
Manufacturing Manhours	Hours	280
Manufacturing Rate	€	20.00
Required Device Lifetime	Years	20
Service Cost	%	1.00%
Troubleshooting Cost	%	3.5%
Know How	1 to 5	3
Service Frequency		5
Troubleshooting Frequency		3
OUTPUTS		
Cost of Materials	€	10,000.00
Uncertainty		1.2
Cost of Design	€	10,000.00
Uncertainty		1.2
Cost of Manufacturing	€	5,600.00
Uncertainty		1.2
Total Cost	€	47,284.22
Upcycling		YES
Saving		62.17%

Πίνακας 12. Λεπτομέρειες αλγόριθμου Upcycling για Case study 4

6 Συμπεράσματα & προοπτική μελλοντικής βελτιστοποίησης

Στην παρούσα εργασία αναπτύχθηκε μια διαδικασία λήψης αποφάσεων σχετικά με το πια τμήματα παρωχημένου εξοπλισμού πρέπει να αποθηκεύονται στο Εργαστήριο Στοιχείων με γνώμονα τη μείωση του κόστους κατασκευής πειραματικών διατάξεων. Ταυτόχρονα αναπτύχθηκε μια μέθοδος λήψης αποφάσεων σχετικά με το ποιες διατάξεις συμφέρει οικονομικά το Εργαστήριο να αγοράζονται έτοιμες από το εμπόριο ή ποιες είναι καλύτερο να σχεδιάζονται και να κατασκευάζονται από τα μέλη του εφαρμόζοντας τη μέθοδο του Urcycling.

Από τη μελέτη περίπτωσης που αναλύθηκε και αφορούσε 4 πειραματικές διατάξεις για οδοντωτούς τροχούς, υδραυλικά υψηλής ισχύος και τριβολογία βρέθηκαν οι βέλτιστες τιμές των παραμέτρων λήψης αποφάσεων με τη χρήση εξελικτικών αλγορίθμων. Με εφαρμογή της μεθοδολογίας που αναπτύχθηκε, ενώ η αγορά των διατάξεων θα είχε ένα κόστος της τάξης των 488,000€, η κατασκευή με τις αρχές του Urcycling κόστισε στο Εργαστήριο περίπου 122,000€, οδηγώντας σε εξοικονόμηση της τάξης του 75%.

Η συνέχιση της έρευνας πάνω στην παρούσα εργασία μπορεί να κινηθεί πάνω σε δύο άξονες. Πρώτον με τον συνυπολογισμό στη λήψη των αποφάσεων πέρα από το οικονομικό σκέλος, το περιβαλλοντικό αποτύπωμα και την βελτίωσή του από τη δομή που χρησιμοποιεί τη μεθοδολογία (Εργαστήριο ή εταιρεία). Δεύτερον, την εφαρμογή του αλγόριθμου σε πιο μεγάλη κλίμακα (π.χ. βιομηχανική μονάδα) και επιλογή των σχετικών βαρών για τις λήψεις των αποφάσεων από κάποιο σύστημα τεχνητής νοημοσύνης που θα συνυπολογίζει την ιστορία της εταιρείας σε προϊόντα και παρωχημένο εξοπλισμό και θα προτείνει την καλύτερη στρατηγική αποθήκευσης ή/και Urcycling διατάξεων.

7 Βιβλιογραφία

[1]. Ahmed K. Ali, Yi Wang, Jorge L. Alvarado (2019) - Facilitating industrial symbiosis to achieve circular economy using value-added by design: A case study in transforming the automobile industry sheet metal waste-flow into Voronoi facade systems.

[2]. Cyrille F.Dunant, Michał P.Drewniok, Michael Sansom, Simon Corbey, Jonathan M.Cullen, Julian M.Allwooda (2018) - Options to make steel reuse profitable: An analysis of cost and risk distribution across the UK construction value chain.

[3] «Κυκλική οικονομία: χρησιμοποίησέ το ξανά!». Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο. 16 Φεβρουαρίου 2021

[4]. Eleni Iacovidou, Costas A. Velis, Phil Purnell, Oliver Zwirner, Andrew Brown, John Hahladakis, Joel Millward-Hopkins, Paul T. Williams (2017) - Metrics for optimising the multi-dimensional value of resources recovered from waste in a circular economy: A critical review

[5] Bendikiene, R., Ciuplys, A. and Kavaliauskiene, L. (2019), “Circular economy practice: From industrial metal waste to production of high wear resistant coatings”, *Journal of Cleaner Production*, Elsevier Ltd, Vol. 229, pp. 1225–1232.

[6] Bridgens, B., Powell, M., Farmer, G., Walsh, C., Reed, E., Royapoor, M., Gosling, P., et al. (2018), “Creative upcycling: Reconnecting people, materials and place through making”, *Journal of Cleaner Production*, Elsevier Ltd, Vol. 189, pp. 145–154.

[7] Karthik Ramani, William Z Bernstein, Devarajan Ramanujan, Fu Zhao (2010) - Integrated Sustainable Life Cycle Design: A Review

[8] Vimal K.E.K, Jayakrishna Kandasamy, Vedant Gite (2021) - A framework to assess circularity across product-life cycle stages – A case study

[9] Farazee M.A. Asif, Malvina Roci, Michael Lieder, Amir Rashid, Ales Mihelic, Simon Kotnik (2021) - A methodological approach to design products for multiple lifecycles

[10] Nicole Schmidt, Arndt Lüdera (2017) - Development of a generic model for End-of-Life scenarios of production systems

[11] Aditi D. Joshi, Surendra M. Gupta (2018) -Evaluation of design alternatives of End-Of-Life products using internet of things

[12] Jonathan M. Cullen (2017) - Circular economy: theoretical benchmark or perpetual motion machine?

Παράρτημα

w_1	w_2	w_3	w_4	w_5	Κόστος (€)
16.1%	24.5%	0.0%	13.5%	45.9%	122,207.48
30.0%	0.0%	22.0%	15.0%	33.0%	122,207.48
29.2%	21.0%	26.5%	0.0%	23.3%	122,207.48
39.2%	29.8%	0.0%	15.3%	15.7%	122,207.48
16.2%	31.3%	0.0%	31.8%	20.8%	122,207.48
13.5%	60.9%	1.0%	0.0%	24.6%	122,207.48
17.6%	23.2%	22.1%	0.0%	37.1%	122,207.48
37.5%	0.0%	31.3%	0.0%	31.3%	122,207.48
21.4%	23.5%	0.0%	14.5%	40.6%	122,207.48
16.7%	79.2%	2.1%	0.0%	2.1%	122,207.48
22.2%	24.0%	0.0%	27.7%	26.0%	122,207.48
45.0%	22.9%	9.9%	0.0%	22.3%	122,207.48
28.5%	40.3%	15.0%	0.0%	16.2%	122,207.48
19.5%	25.8%	0.0%	35.2%	19.5%	122,207.48
21.1%	49.5%	0.0%	20.6%	8.8%	122,207.48
68.8%	10.4%	0.0%	10.4%	10.4%	122,207.48
29.0%	19.8%	0.0%	23.0%	28.3%	122,207.48
20.8%	36.7%	0.0%	20.1%	22.4%	122,207.48
38.9%	0.0%	15.3%	30.6%	15.3%	122,207.48
16.7%	41.7%	20.8%	0.0%	20.8%	122,207.48
18.2%	33.5%	0.0%	27.0%	21.3%	122,207.48
19.1%	34.5%	0.0%	15.9%	30.6%	122,207.48
59.4%	15.6%	0.0%	0.0%	25.0%	122,207.48
30.2%	0.0%	31.0%	20.9%	18.0%	122,207.48
38.1%	43.1%	0.0%	8.3%	10.4%	122,207.48
30.0%	0.0%	15.8%	33.3%	21.0%	122,207.48
36.6%	0.0%	25.0%	7.0%	31.3%	122,207.48
25.9%	19.5%	0.0%	37.1%	17.4%	122,207.48
25.2%	0.0%	1.7%	50.7%	22.4%	122,207.48
26.7%	14.6%	0.0%	31.6%	27.1%	122,207.48
34.0%	0.0%	27.5%	16.2%	22.4%	122,207.48
13.9%	33.5%	14.5%	0.0%	38.1%	122,207.48
46.8%	0.0%	22.4%	5.4%	25.5%	122,207.48
30.9%	4.0%	0.8%	0.0%	64.4%	122,207.48
28.7%	15.1%	37.1%	0.0%	19.1%	122,207.48
21.1%	30.5%	0.0%	25.0%	23.3%	122,207.48
17.9%	26.6%	25.1%	0.0%	30.3%	122,207.48
53.4%	0.6%	0.0%	21.2%	24.8%	122,207.48
68.8%	0.0%	7.0%	8.7%	15.5%	122,207.48
53.1%	15.6%	15.6%	0.0%	15.6%	122,207.48
15.1%	35.5%	0.0%	25.5%	24.0%	122,207.48
40.3%	5.6%	22.3%	0.0%	31.8%	122,207.48

16.3%	25.3%	0.0%	24.9%	33.5%	122,207.48
17.9%	34.0%	0.0%	26.1%	22.0%	122,207.48
53.1%	15.6%	0.0%	15.6%	15.6%	122,207.48
49.7%	26.3%	0.0%	1.4%	22.5%	122,207.48
20.0%	29.2%	26.6%	0.0%	24.2%	122,207.48
16.0%	31.1%	0.0%	24.2%	28.7%	122,207.48
25.6%	13.5%	43.4%	0.0%	17.6%	122,207.48
40.2%	0.0%	2.2%	29.7%	27.9%	122,207.48
16.7%	20.8%	20.8%	0.0%	41.7%	122,207.48
18.7%	39.0%	0.0%	24.6%	17.7%	122,207.48
13.4%	33.5%	0.0%	20.5%	32.5%	122,207.48
16.7%	20.8%	0.0%	20.8%	41.7%	122,207.48
25.4%	17.4%	26.7%	0.0%	30.6%	122,207.48
8.7%	88.3%	0.4%	0.0%	2.6%	122,207.48
21.3%	21.6%	0.0%	28.0%	29.1%	122,207.48
24.8%	0.0%	14.4%	38.7%	22.1%	122,207.48
6.3%	62.5%	0.0%	0.0%	31.3%	122,207.48
20.3%	36.7%	21.8%	0.0%	21.2%	122,207.48
6.3%	90.1%	3.1%	0.0%	0.5%	122,207.48
14.1%	39.1%	0.0%	18.2%	28.6%	122,207.48
27.2%	0.0%	17.9%	22.4%	32.5%	122,207.48
22.9%	21.7%	17.2%	0.0%	38.2%	122,207.48
42.8%	15.8%	0.0%	18.4%	22.9%	122,207.48
53.1%	0.0%	15.6%	15.6%	15.6%	122,207.48
20.6%	31.1%	0.0%	21.7%	26.5%	122,207.48
22.6%	0.0%	17.2%	26.0%	34.2%	122,207.48
15.2%	33.4%	25.3%	0.0%	26.1%	122,207.48
23.8%	29.2%	19.0%	0.0%	28.0%	122,207.48
21.2%	24.1%	25.5%	0.0%	29.1%	122,207.48
36.1%	21.9%	0.0%	17.2%	24.8%	122,207.48
27.9%	26.2%	14.7%	0.0%	31.2%	122,207.48
16.7%	20.8%	20.8%	0.0%	41.7%	122,207.48
21.7%	3.5%	24.6%	0.0%	50.1%	122,207.48
30.1%	11.0%	34.1%	0.0%	24.8%	122,207.48
18.6%	19.7%	30.8%	0.0%	31.0%	122,207.48
17.5%	32.2%	0.0%	32.2%	18.2%	122,207.48
29.2%	22.9%	0.0%	31.3%	16.7%	122,207.48
19.4%	27.2%	28.0%	0.0%	25.5%	122,207.48
25.0%	0.0%	23.1%	18.0%	33.8%	122,207.48
33.7%	0.0%	31.6%	17.5%	17.2%	122,207.48
32.7%	19.7%	6.7%	0.0%	40.9%	122,207.48
30.9%	0.0%	18.3%	16.7%	34.1%	122,207.48
36.2%	0.0%	16.3%	18.2%	29.3%	122,207.48
16.7%	41.7%	20.8%	0.0%	20.8%	122,207.48
21.9%	26.6%	31.3%	0.0%	20.3%	122,207.48
23.8%	0.0%	20.7%	23.7%	31.7%	122,207.48

18.1%	24.2%	0.0%	38.3%	19.4%	122,207.48
21.8%	29.9%	0.0%	18.9%	29.4%	122,207.48
12.0%	27.4%	4.3%	0.0%	56.3%	122,207.48
16.7%	24.2%	0.0%	29.7%	29.4%	122,207.48
38.7%	0.0%	2.6%	31.7%	27.0%	122,207.48
16.5%	26.8%	0.0%	29.0%	27.8%	122,207.48
20.2%	34.0%	0.0%	26.5%	19.3%	122,207.48
19.0%	32.8%	24.9%	0.0%	23.3%	122,207.48
40.4%	15.1%	0.0%	23.5%	21.0%	122,207.48
47.3%	3.0%	22.3%	0.0%	27.4%	122,207.48
51.0%	20.7%	0.0%	5.7%	22.6%	122,207.48
27.2%	10.2%	22.7%	0.0%	39.9%	122,207.48

Πίνακας Α1. Τιμές βαρών για 100 επαναλήψεις της βελτιστοποίησης ($S_0 = 0.2$)

w_1	w_2	w_3	w_4	w_5	Κόστος (€)
40.9%	0.0%	2.9%	25.3%	30.9%	122,207.48
32.6%	24.8%	11.4%	2.0%	29.2%	122,207.48
56.6%	5.7%	5.5%	0.0%	32.2%	122,207.48
43.4%	1.0%	0.0%	21.1%	34.5%	122,207.48
32.1%	0.0%	0.0%	0.0%	67.9%	122,207.48
45.2%	2.5%	10.8%	10.8%	30.6%	122,207.48
33.3%	0.0%	0.0%	0.0%	66.7%	122,207.48
45.3%	1.8%	0.3%	20.9%	31.7%	122,207.48
36.6%	0.0%	16.8%	9.4%	37.1%	122,207.48
34.0%	19.2%	9.6%	13.6%	23.6%	122,207.48
36.0%	30.4%	0.0%	7.4%	26.3%	122,207.48
40.0%	6.5%	5.3%	25.1%	23.1%	122,207.48
32.5%	17.5%	14.2%	0.3%	35.6%	122,207.48
40.5%	0.0%	5.2%	22.8%	31.5%	122,207.48
43.0%	15.6%	9.5%	9.4%	22.5%	122,207.48
50.7%	1.2%	0.0%	24.4%	23.7%	122,207.48
31.0%	30.8%	0.0%	11.4%	26.8%	122,207.48
42.1%	36.2%	3.5%	0.0%	18.2%	122,207.48
56.5%	8.4%	3.2%	2.1%	29.8%	122,207.48
43.0%	3.7%	6.4%	15.0%	32.0%	122,207.48
31.9%	30.4%	5.9%	3.4%	28.4%	122,207.48
33.0%	12.5%	0.0%	9.7%	44.7%	122,207.48
44.9%	34.2%	0.0%	3.4%	17.5%	122,207.48
26.9%	46.6%	0.0%	7.3%	19.1%	122,207.48
57.9%	1.1%	9.4%	6.7%	24.8%	122,207.48
54.6%	8.2%	12.6%	1.8%	22.8%	122,207.48
33.3%	0.0%	8.3%	4.2%	54.2%	122,207.48
49.9%	15.7%	9.9%	0.0%	24.4%	122,207.48
48.6%	8.2%	13.9%	0.0%	29.3%	122,207.48
51.5%	10.1%	5.3%	0.5%	32.6%	122,207.48

38.6%	3.3%	0.9%	34.1%	23.1%	122,207.48
36.4%	0.0%	22.5%	0.1%	41.0%	122,207.48
45.6%	27.0%	4.0%	0.0%	23.4%	122,207.48
37.5%	0.0%	0.0%	31.3%	31.3%	122,207.48
44.4%	21.5%	0.0%	8.0%	26.2%	122,207.48
41.1%	0.0%	1.0%	31.0%	26.8%	122,207.48
45.9%	4.9%	10.6%	4.6%	34.0%	122,207.48
44.9%	0.0%	4.9%	21.5%	28.6%	122,207.48
47.7%	31.8%	0.0%	2.1%	18.3%	122,207.48
31.8%	11.4%	9.4%	0.0%	47.3%	122,207.48
36.4%	26.2%	11.9%	0.0%	25.5%	122,207.48
32.9%	40.4%	0.0%	10.6%	16.1%	122,207.48
43.7%	2.3%	11.6%	7.1%	35.4%	122,207.48
35.3%	17.3%	0.0%	25.2%	22.2%	122,207.48
32.6%	10.9%	7.9%	0.0%	48.6%	122,207.48
32.1%	26.2%	6.2%	8.8%	26.7%	122,207.48
38.9%	5.0%	0.0%	24.2%	31.9%	122,207.48
36.0%	25.3%	5.5%	2.1%	31.2%	122,207.48
42.9%	0.0%	4.9%	23.5%	28.7%	122,207.48
40.4%	2.7%	10.5%	11.0%	35.4%	122,207.48
37.4%	8.9%	0.0%	25.6%	28.1%	122,207.48
42.0%	8.8%	17.5%	1.1%	30.6%	122,207.48
38.1%	13.3%	1.4%	19.0%	28.2%	122,207.48
37.3%	29.8%	0.0%	4.5%	28.4%	122,207.48
39.8%	0.0%	1.9%	29.4%	28.9%	122,207.48
40.5%	27.7%	0.0%	7.1%	24.6%	122,207.48
32.5%	24.4%	0.2%	14.9%	28.0%	122,207.48
49.9%	17.1%	4.5%	0.0%	28.5%	122,207.48
34.9%	41.2%	0.0%	6.5%	17.4%	122,207.48
45.4%	29.4%	0.0%	1.5%	23.6%	122,207.48
36.1%	16.6%	7.1%	16.9%	23.3%	122,207.48
39.2%	1.6%	19.0%	4.0%	36.2%	122,207.48
34.4%	14.8%	0.0%	22.4%	28.4%	122,207.48
43.7%	14.8%	13.9%	0.4%	27.2%	122,207.48
48.6%	16.8%	3.7%	0.0%	30.9%	122,207.48
30.9%	36.9%	0.0%	12.4%	19.8%	122,207.48
35.2%	39.2%	3.2%	2.0%	20.4%	122,207.48
42.7%	6.6%	4.2%	22.3%	24.3%	122,207.48
53.7%	4.9%	4.4%	0.0%	37.1%	122,207.48
39.9%	1.7%	15.2%	7.1%	36.1%	122,207.48
49.1%	0.0%	5.0%	17.5%	28.4%	122,207.48
46.8%	0.0%	12.4%	9.0%	31.8%	122,207.48
52.8%	10.1%	9.4%	3.8%	23.9%	122,207.48
45.0%	26.5%	0.0%	7.1%	21.4%	122,207.48
51.6%	19.8%	3.7%	0.0%	24.9%	122,207.48
38.2%	9.6%	20.1%	0.0%	32.1%	122,207.48

52.9%	20.3%	0.0%	4.6%	22.2%	122,207.48
48.9%	18.9%	0.0%	8.5%	23.7%	122,207.48
51.3%	24.0%	0.2%	0.0%	24.5%	122,207.48
56.4%	12.5%	0.0%	1.4%	29.8%	122,207.48
47.4%	9.7%	0.2%	15.8%	27.0%	122,207.48
33.3%	13.8%	0.0%	16.0%	36.8%	122,207.48
46.2%	1.7%	6.0%	2.0%	44.2%	122,207.48
52.2%	0.6%	0.0%	21.6%	25.7%	122,207.48
42.7%	21.2%	5.7%	0.0%	30.3%	122,207.48
43.1%	3.9%	7.2%	22.6%	23.2%	122,207.48
46.0%	22.5%	0.0%	0.9%	30.6%	122,207.48
46.0%	16.0%	4.1%	13.2%	20.8%	122,207.48
29.3%	49.6%	0.0%	0.0%	21.1%	122,207.48
53.9%	3.4%	0.0%	14.2%	28.5%	122,207.48
43.8%	2.4%	0.0%	22.7%	31.0%	122,207.48
33.4%	21.6%	0.0%	0.0%	45.0%	122,207.48
44.4%	0.0%	1.1%	23.4%	31.1%	122,207.48
33.0%	41.2%	5.5%	0.6%	19.8%	122,207.48
67.9%	0.8%	0.0%	4.0%	27.3%	122,207.48
37.7%	7.1%	0.0%	14.7%	40.4%	122,207.48
38.3%	0.0%	1.1%	31.5%	29.0%	122,207.48
37.5%	6.7%	8.6%	22.3%	24.8%	122,207.48
25.9%	18.2%	0.0%	32.6%	23.2%	122,339.47
22.9%	18.8%	20.8%	0.0%	37.5%	122,339.47

Πίνακας Α2. Τιμές βαρών για 100 επαναλήψεις της βελτιστοποίησης ($S_0 = 0.3$)

w_1	w_2	w_3	w_4	w_5	Κόστος (€)
42.5%	0.0%	0.0%	0.0%	57.5%	122,332.79
38.3%	2.6%	0.0%	2.1%	56.9%	122,332.79
34.8%	2.1%	0.8%	1.3%	61.0%	122,332.79
35.6%	3.2%	0.9%	2.0%	58.3%	122,332.79
39.5%	0.2%	2.9%	2.3%	55.1%	122,332.79
41.5%	2.2%	0.3%	3.2%	52.8%	122,332.79
33.4%	2.7%	2.9%	4.4%	56.6%	122,339.47
27.5%	1.7%	0.7%	9.8%	60.2%	122,339.47
30.1%	7.6%	0.6%	4.7%	57.0%	122,339.47
26.1%	5.4%	5.1%	1.3%	62.1%	122,339.47
28.7%	0.0%	0.0%	15.9%	55.5%	122,339.47
26.0%	8.5%	5.1%	0.3%	60.1%	122,339.47
28.0%	3.0%	5.6%	3.1%	60.3%	122,339.47
29.8%	0.1%	2.7%	10.3%	57.1%	122,339.47
28.8%	0.0%	1.7%	5.0%	64.6%	122,339.47
27.2%	7.9%	1.2%	5.8%	58.0%	122,339.47
27.3%	5.8%	1.7%	8.3%	56.9%	122,339.47
29.4%	0.0%	6.7%	3.1%	60.9%	122,339.47

28.2%	2.6%	3.7%	1.1%	64.4%	122,339.47
26.4%	8.9%	2.2%	4.8%	57.7%	122,339.47
29.6%	0.5%	0.1%	7.2%	62.6%	122,339.47
34.0%	2.1%	2.9%	0.5%	60.5%	122,339.47
30.8%	0.0%	1.6%	1.8%	65.8%	122,339.47
28.0%	8.9%	1.9%	3.3%	57.9%	122,339.47
31.1%	0.8%	3.2%	4.2%	60.7%	122,339.47
28.0%	7.3%	0.5%	9.2%	55.0%	122,339.47
26.9%	3.6%	2.3%	4.7%	62.5%	122,339.47
31.9%	4.2%	4.1%	1.8%	58.1%	122,339.47
30.7%	0.5%	3.5%	2.3%	63.0%	122,339.47
28.7%	7.0%	1.1%	7.5%	55.6%	122,339.47
26.7%	1.8%	0.0%	6.0%	65.6%	122,339.47
26.6%	3.2%	1.3%	1.9%	67.0%	122,339.47
28.3%	6.4%	2.1%	3.4%	59.8%	122,339.47
27.8%	1.2%	0.4%	13.6%	57.0%	122,339.47
25.5%	16.2%	0.5%	0.6%	57.2%	122,339.47
20.7%	5.0%	7.4%	0.0%	67.0%	122,874.51
20.6%	0.9%	5.2%	0.0%	73.3%	122,874.51
26.4%	2.2%	4.5%	6.3%	60.5%	122,874.51
21.9%	1.8%	6.0%	2.9%	67.3%	122,874.51
21.0%	16.2%	1.8%	3.0%	58.0%	122,874.51
24.6%	0.1%	7.7%	3.0%	64.7%	122,874.51
26.3%	2.0%	5.9%	4.4%	61.3%	122,874.51
22.8%	6.1%	4.8%	5.3%	61.1%	122,874.51
22.0%	9.2%	3.6%	5.4%	59.8%	122,874.51
19.6%	5.2%	4.5%	0.9%	69.8%	122,874.51
23.4%	1.3%	5.8%	5.0%	64.5%	122,874.51
20.1%	8.6%	3.2%	2.5%	65.7%	122,874.51
23.1%	1.8%	6.7%	4.9%	63.5%	122,874.51
22.3%	13.9%	3.3%	0.9%	59.6%	122,874.51
24.2%	8.5%	0.4%	10.3%	56.6%	122,874.51
20.8%	17.9%	1.2%	3.0%	57.1%	122,874.51
23.4%	3.0%	5.5%	6.7%	61.4%	122,874.51
21.8%	1.3%	1.4%	9.6%	65.9%	122,874.51
18.9%	1.0%	9.7%	0.5%	69.9%	123,275.78
21.8%	2.7%	4.3%	9.6%	61.7%	123,275.78
23.7%	2.7%	1.1%	15.2%	57.2%	123,275.78
17.4%	22.5%	1.8%	0.0%	58.3%	123,275.78
21.7%	0.4%	4.8%	12.3%	60.7%	123,275.78
19.9%	0.4%	8.1%	7.0%	64.5%	123,275.78
21.5%	1.2%	7.8%	6.0%	63.5%	123,275.78
19.2%	1.4%	1.3%	7.9%	70.3%	123,275.78
19.3%	4.6%	2.5%	10.5%	63.1%	123,275.78
17.2%	11.8%	4.7%	0.2%	66.1%	123,275.78
22.7%	6.5%	2.3%	10.5%	58.0%	123,275.78

20.6%	6.5%	2.3%	10.6%	60.0%	123,275.78
16.9%	22.5%	0.0%	1.5%	59.1%	123,275.78
18.6%	4.9%	8.2%	2.7%	65.6%	123,275.78
13.2%	7.3%	4.4%	0.2%	75.0%	123,295.84
18.5%	8.8%	0.8%	14.3%	57.7%	123,331.01
18.6%	15.0%	0.1%	9.3%	57.0%	123,331.01
18.1%	7.7%	3.7%	10.4%	60.2%	123,331.01
21.2%	1.3%	3.2%	15.2%	59.1%	123,331.01
18.9%	6.1%	2.0%	13.1%	59.9%	123,331.01
8.8%	8.6%	8.1%	4.2%	70.2%	123,351.08
11.9%	8.5%	4.6%	9.5%	65.5%	123,351.08
12.1%	9.2%	4.5%	11.9%	62.4%	123,351.08
12.1%	2.6%	11.1%	5.9%	68.3%	123,351.08
10.4%	12.3%	6.4%	5.7%	65.1%	123,351.08
8.5%	9.1%	9.3%	1.1%	71.9%	123,351.08
17.0%	6.5%	4.1%	10.8%	61.6%	123,351.08
9.8%	6.0%	9.2%	4.4%	70.6%	123,351.08
2.6%	10.3%	11.9%	0.0%	75.2%	123,354.53
2.6%	8.3%	13.0%	3.0%	73.1%	123,354.53
0.0%	4.2%	12.2%	4.0%	79.5%	123,354.53
2.6%	0.9%	12.3%	7.8%	76.4%	123,354.53
0.0%	10.4%	12.0%	0.9%	76.6%	123,354.53
7.7%	5.3%	8.2%	8.0%	70.7%	123,354.53
8.2%	9.6%	7.4%	6.6%	68.3%	123,354.53
0.0%	2.8%	17.2%	0.4%	79.6%	123,354.53
7.2%	13.1%	2.8%	13.4%	63.5%	123,889.56
0.0%	15.8%	8.8%	6.5%	68.9%	124,541.30
49.4%	7.9%	0.0%	9.4%	33.3%	125,659.43
54.2%	0.7%	3.4%	4.0%	37.6%	125,659.43
40.8%	20.1%	2.5%	5.1%	31.5%	125,784.74
47.2%	7.4%	4.3%	8.1%	33.1%	125,784.74
44.4%	6.1%	1.4%	14.1%	34.0%	125,784.74
31.0%	14.0%	19.2%	0.0%	35.8%	126,326.45
44.3%	35.3%	1.9%	0.0%	18.6%	126,625.98
51.8%	11.1%	10.4%	2.1%	24.5%	126,625.98
50.0%	10.5%	12.2%	2.3%	25.0%	126,625.98

Πίνακας Α3. Τιμές βαρών για 100 επαναλήψεις της βελτιστοποίησης ($S_0 = 0.4$)

w_1	w_2	w_3	w_4	w_5	Κόστος (€)
40.2%	16.0%	0.7%	1.1%	42.0%	126,326.45
47.6%	2.3%	0.3%	4.1%	45.7%	126,326.45
39.9%	1.9%	3.3%	1.0%	53.8%	126,326.45
46.7%	3.1%	1.1%	3.6%	45.5%	126,326.45
42.4%	2.8%	3.8%	5.1%	45.9%	126,326.45
45.2%	0.0%	4.9%	2.2%	47.7%	126,326.45

43.2%	5.8%	3.9%	1.2%	45.9%	126,326.45
41.4%	10.4%	0.5%	4.7%	43.0%	126,326.45
40.6%	3.5%	0.1%	4.2%	51.6%	126,326.45
50.7%	0.1%	1.4%	0.7%	47.0%	126,326.45
43.7%	1.9%	4.3%	1.8%	48.2%	126,326.45
43.7%	4.2%	4.0%	3.0%	45.1%	126,326.45
41.8%	6.9%	0.0%	6.0%	45.2%	126,326.45
43.4%	6.2%	2.0%	3.8%	44.5%	126,326.45
46.9%	0.0%	4.1%	1.8%	47.3%	126,326.45
44.4%	2.1%	0.8%	4.4%	48.3%	126,326.45
46.9%	0.0%	3.8%	1.8%	47.5%	126,326.45
39.9%	0.0%	1.7%	3.5%	54.9%	126,326.45
49.8%	0.0%	3.3%	1.5%	45.4%	126,326.45
44.0%	8.4%	3.2%	0.0%	44.3%	126,326.45
40.1%	3.9%	4.8%	0.3%	50.9%	126,326.45
44.0%	2.4%	4.4%	3.9%	45.3%	126,326.45
46.4%	2.9%	4.4%	0.3%	45.9%	126,326.45
45.9%	5.0%	2.8%	1.0%	45.3%	126,326.45
47.2%	1.8%	2.5%	0.0%	48.4%	126,326.45
42.0%	6.8%	0.4%	5.3%	45.5%	126,326.45
44.0%	1.1%	5.9%	2.2%	46.7%	126,326.45
39.5%	6.6%	0.2%	3.7%	50.0%	126,326.45
44.7%	3.8%	3.9%	3.1%	44.5%	126,326.45
39.4%	10.5%	0.9%	3.7%	45.6%	126,727.73
40.1%	3.3%	1.2%	7.9%	47.5%	126,727.73
40.1%	6.4%	7.4%	1.2%	44.9%	126,727.73
41.6%	0.6%	8.6%	3.7%	45.5%	126,727.73
40.1%	4.8%	3.7%	5.5%	45.9%	126,727.73
40.3%	7.6%	4.6%	3.6%	44.0%	126,727.73
40.4%	5.6%	2.9%	6.9%	44.2%	126,727.73
38.8%	17.7%	0.0%	1.7%	41.8%	126,727.73
40.1%	3.8%	2.6%	7.5%	46.0%	126,727.73
39.8%	4.0%	1.8%	10.0%	44.4%	126,782.96
69.2%	2.3%	1.6%	4.9%	21.9%	127,186.07
69.5%	3.1%	2.1%	3.5%	21.8%	127,186.07
71.2%	0.0%	2.0%	3.8%	23.1%	127,186.07
68.3%	4.2%	4.4%	1.2%	21.9%	127,186.07
45.9%	12.0%	0.2%	7.2%	34.7%	127,293.00
47.6%	9.3%	1.9%	7.7%	33.4%	127,293.00
54.4%	2.6%	0.0%	9.1%	33.9%	127,293.00
48.0%	5.3%	4.1%	7.8%	34.8%	127,293.00
56.4%	3.1%	0.3%	7.3%	33.0%	127,293.00
46.5%	10.6%	6.5%	2.3%	34.1%	127,293.00
49.3%	16.9%	0.0%	1.5%	32.3%	127,293.00
44.8%	11.3%	2.7%	4.9%	36.3%	127,293.00
46.9%	8.1%	7.6%	3.3%	34.1%	127,293.00

43.3%	17.2%	1.3%	4.7%	33.4%	127,293.00
46.1%	4.8%	3.6%	9.8%	35.7%	127,293.00
47.2%	4.4%	7.7%	5.7%	35.0%	127,293.00
44.5%	5.9%	10.5%	0.1%	39.0%	127,293.00
45.3%	9.8%	3.1%	6.4%	35.4%	127,293.00
46.7%	1.4%	2.5%	12.8%	36.7%	127,293.00
46.0%	11.4%	0.4%	7.9%	34.3%	127,293.00
47.4%	8.4%	4.6%	5.7%	33.9%	127,293.00
50.8%	6.3%	4.2%	5.5%	33.2%	127,293.00
43.1%	18.0%	0.1%	6.2%	32.6%	127,293.00
44.9%	10.7%	5.0%	4.9%	34.5%	127,293.00
43.1%	19.4%	4.8%	0.0%	32.6%	127,293.00
44.5%	13.3%	8.4%	0.5%	33.4%	127,293.00
46.3%	6.9%	1.0%	9.1%	36.6%	127,293.00
45.6%	4.3%	4.5%	9.1%	36.6%	127,293.00
30.8%	9.4%	1.5%	5.8%	52.6%	127,317.99
28.9%	2.8%	3.5%	13.5%	51.3%	127,317.99
35.1%	6.6%	8.3%	3.4%	46.5%	127,317.99
33.7%	5.0%	7.0%	8.0%	46.3%	127,317.99
29.1%	0.0%	16.9%	1.2%	52.8%	127,317.99
29.9%	13.0%	10.5%	2.9%	43.7%	127,317.99
29.3%	4.9%	16.8%	2.1%	47.0%	127,317.99
33.3%	8.6%	6.4%	1.2%	50.5%	127,317.99
33.5%	6.1%	0.0%	16.1%	44.2%	127,317.99
27.1%	13.3%	0.0%	8.3%	51.3%	127,317.99
27.1%	8.9%	1.8%	10.2%	52.0%	127,317.99
31.2%	0.8%	3.9%	12.3%	51.8%	127,317.99
29.3%	1.9%	13.0%	5.6%	50.2%	127,317.99
26.9%	8.2%	0.0%	13.6%	51.3%	127,317.99
34.5%	2.2%	7.3%	8.3%	47.7%	127,317.99
24.6%	19.6%	3.0%	0.0%	52.7%	127,317.99
30.3%	0.2%	2.9%	19.5%	47.2%	127,317.99
29.5%	11.6%	2.0%	11.3%	45.5%	127,317.99
30.3%	15.7%	5.7%	4.7%	43.5%	127,317.99
33.0%	6.5%	5.6%	9.0%	45.8%	127,317.99
29.5%	21.1%	3.2%	1.2%	45.0%	127,317.99
31.6%	12.4%	1.8%	6.8%	47.3%	127,317.99
31.5%	0.0%	8.2%	11.6%	48.6%	127,317.99
48.1%	9.3%	11.5%	0.0%	31.2%	127,318.06
53.7%	7.6%	7.1%	3.7%	27.9%	127,318.06
56.2%	3.7%	6.6%	6.1%	27.4%	127,318.06
52.3%	11.6%	6.6%	2.4%	27.1%	127,318.06
51.1%	6.5%	10.6%	2.2%	29.6%	127,318.06
27.4%	7.9%	2.8%	17.8%	44.1%	127,321.45
27.7%	16.1%	2.9%	10.8%	42.6%	127,321.45
55.6%	8.9%	7.0%	6.3%	22.2%	127,523.66

15.9%	0.0%	26.0%	8.0%	50.0%	127,792.62
14.4%	12.4%	21.6%	2.6%	49.0%	127,792.62

Πίνακας Α4. Τιμές βαρών για 100 επαναλήψεις της βελτιστοποίησης ($S_0 = 0.5$)

w_1	w_2	w_3	w_4	w_5	Κόστος (€)
34.0%	0.1%	1.2%	2.0%	62.6%	127,317.99
36.3%	5.0%	0.0%	0.1%	58.6%	127,317.99
37.5%	4.7%	0.7%	0.4%	56.6%	127,317.99
36.8%	0.8%	3.0%	0.8%	58.5%	127,317.99
39.0%	1.1%	1.2%	2.7%	56.0%	127,317.99
39.1%	1.1%	2.7%	0.4%	56.8%	127,317.99
36.1%	0.4%	0.0%	2.5%	61.0%	127,317.99
35.7%	6.9%	1.0%	1.3%	55.1%	127,317.99
40.8%	2.1%	0.4%	0.1%	56.5%	127,317.99
36.5%	1.5%	0.0%	6.4%	55.6%	127,317.99
35.7%	6.5%	0.9%	1.6%	55.3%	127,317.99
37.1%	1.8%	0.6%	4.0%	56.6%	127,317.99
34.3%	0.0%	2.0%	2.1%	61.6%	127,317.99
36.4%	3.5%	0.2%	3.7%	56.2%	127,317.99
36.0%	8.2%	0.6%	0.9%	54.3%	127,317.99
36.1%	1.6%	1.6%	4.5%	56.2%	127,317.99
35.6%	8.0%	0.6%	1.1%	54.7%	127,317.99
36.0%	3.8%	3.6%	0.5%	56.2%	127,317.99
37.8%	1.0%	0.0%	1.5%	59.6%	127,317.99
35.2%	2.8%	0.3%	2.7%	59.1%	127,317.99
31.8%	4.4%	2.2%	2.9%	58.7%	127,321.45
31.8%	8.2%	2.8%	2.5%	54.7%	127,321.45
35.2%	0.1%	4.9%	2.4%	57.3%	127,321.45
31.8%	7.7%	1.7%	4.0%	54.8%	127,321.45
33.8%	0.0%	5.9%	2.0%	58.3%	127,321.45
33.0%	0.6%	1.1%	7.8%	57.5%	127,321.45
33.3%	0.3%	5.1%	3.7%	57.5%	127,321.45
33.3%	4.1%	4.2%	2.3%	56.0%	127,321.45
34.1%	1.7%	1.6%	6.8%	55.9%	127,321.45
34.7%	6.3%	3.4%	0.2%	55.3%	127,321.45
31.7%	7.8%	0.9%	2.6%	57.0%	127,321.45
32.0%	7.7%	2.6%	1.7%	56.0%	127,321.45
33.0%	2.2%	1.0%	6.4%	57.4%	127,321.45
29.1%	1.7%	1.0%	7.4%	61.0%	127,341.51
67.6%	3.1%	2.4%	0.0%	26.9%	127,523.66
63.9%	4.8%	4.3%	0.0%	27.0%	127,523.66
65.6%	4.8%	3.3%	0.1%	26.1%	127,523.66
61.6%	4.0%	2.2%	2.0%	30.2%	127,523.66
15.3%	10.0%	9.1%	7.3%	58.3%	127,792.62
16.6%	4.2%	10.1%	12.2%	57.0%	127,792.62

21.2%	0.0%	5.1%	11.3%	62.4%	127,792.62
14.6%	8.6%	7.3%	11.0%	58.5%	127,792.62
16.1%	8.2%	4.9%	8.2%	62.6%	127,792.62
19.8%	0.2%	12.2%	10.1%	57.7%	127,792.62
16.5%	17.3%	8.0%	2.2%	56.0%	127,792.62
19.5%	3.6%	1.2%	8.9%	66.7%	127,792.62
18.5%	7.9%	2.3%	10.7%	60.7%	127,792.62
19.0%	8.1%	16.2%	0.0%	56.6%	127,792.62
19.1%	4.6%	7.6%	5.5%	63.2%	127,792.62
19.0%	27.5%	0.7%	0.0%	52.8%	127,792.62
15.7%	8.4%	6.6%	11.4%	58.0%	127,792.62
20.3%	23.4%	0.1%	0.0%	56.1%	127,792.62
21.9%	7.7%	11.7%	0.6%	58.2%	127,792.62
13.7%	4.6%	10.0%	6.4%	65.3%	127,792.62
15.6%	14.2%	6.2%	9.6%	54.4%	127,792.62
14.4%	2.7%	1.2%	20.6%	61.1%	127,792.62
14.1%	20.1%	2.2%	7.8%	55.8%	127,792.62
18.1%	7.0%	12.1%	5.1%	57.7%	127,792.62
18.6%	7.6%	9.8%	5.9%	58.1%	127,792.62
14.8%	15.1%	6.3%	7.7%	56.1%	127,792.62
24.4%	3.2%	9.3%	5.2%	57.9%	127,792.62
25.8%	19.5%	0.0%	0.0%	54.7%	127,792.62
14.6%	12.8%	2.2%	15.4%	55.0%	127,792.62
16.0%	0.9%	6.9%	14.6%	61.5%	127,792.62
16.9%	0.8%	11.8%	0.5%	70.0%	127,792.62
19.4%	23.0%	1.0%	0.0%	56.5%	127,792.62
17.5%	9.0%	3.2%	4.3%	65.9%	127,792.62
12.1%	11.8%	2.8%	0.9%	72.5%	127,792.62
18.3%	1.4%	11.1%	6.7%	62.5%	127,792.62
19.4%	22.8%	2.3%	0.0%	55.5%	127,792.62
14.3%	7.9%	0.0%	17.5%	60.3%	127,792.62
21.8%	20.2%	1.3%	0.0%	56.8%	127,792.62
14.1%	9.9%	6.7%	8.0%	61.3%	127,792.62
16.1%	6.8%	0.0%	17.8%	59.3%	127,792.62
17.1%	9.7%	11.3%	6.5%	55.4%	127,792.62
14.3%	11.0%	2.3%	7.9%	64.6%	127,792.62
21.5%	0.2%	9.8%	3.8%	64.7%	127,792.62
16.7%	0.1%	8.1%	11.3%	63.9%	127,792.62
13.2%	0.0%	4.4%	13.5%	68.9%	127,792.62
14.8%	28.9%	0.0%	5.0%	51.3%	127,792.62
28.1%	2.4%	6.3%	6.2%	57.0%	127,792.62
21.7%	2.2%	7.1%	10.9%	58.1%	127,792.62
19.0%	8.3%	7.7%	1.6%	63.4%	127,792.62
15.7%	4.9%	2.4%	20.7%	56.3%	127,792.62
18.4%	7.4%	10.4%	0.0%	63.7%	127,792.62
18.7%	10.7%	0.3%	13.5%	57.0%	127,792.62

11.9%	24.3%	0.0%	3.7%	60.0%	127,792.62
16.1%	3.5%	6.2%	10.9%	63.3%	127,792.62
0.0%	16.1%	18.7%	8.2%	56.9%	127,993.25
0.0%	8.6%	9.1%	13.1%	69.2%	127,993.25
0.0%	7.3%	6.0%	5.5%	81.2%	127,993.25
0.0%	14.5%	13.0%	4.9%	67.6%	127,993.25
0.0%	0.8%	17.8%	14.8%	66.6%	127,993.25
0.0%	3.0%	15.7%	17.5%	63.9%	127,993.25
0.0%	15.6%	5.5%	16.2%	62.8%	127,993.25
1.8%	0.0%	10.4%	13.0%	74.8%	127,993.25
0.0%	16.7%	9.3%	14.1%	60.0%	127,993.25
0.0%	23.5%	10.7%	3.7%	62.1%	127,993.25
0.0%	16.4%	10.2%	6.4%	67.0%	127,993.25
100.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	128,001.98

Πίνακας Α5. Τιμές βαρών για 100 επαναλήψεις της βελτιστοποίησης ($S_0 = 0.6$)

	Μηχανή Goulder Mikron	Βάνα	Ρακόρ	Hydraulic Motor	Σασί - Φορτίο	Rexroth Z2DB Pressure Relief Valve	Flovex T8035 -A-4	EPE Italian a Sri	Rexroth A10VS O	Chris Motors coupler	Rexroth Hydronorm a DBDS 6	Rexroth Hydraulic Power Unit
Αριθμός	1	5	40	2	1	1	1	1	1	2	1	1
Επιθυμητή Διάρκεια Ζωής	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Υπολειπόμενη Διάρκεια Ζωής υπό εξέταση Αντικειμένου	20	8	10	8	20	10	5	10	9	15	8	3
Διαθεσιμότητα υπό εξέταση Αντικειμένου στην αγορά	1	5	5	4	4	4	4	4	4	5	5	4
Τιμή υπό εξέταση Αντικειμένου στην αγορά	70000	10	0.1	300	150	400	400	400	2200	15	70	2500
Εγγύηση υπό εξέταση Αντικειμένου	5	0	0	0	0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0	0.1
Διαθεσιμότητα στην αποθήκη	0	2	20	0	0	0	0	0	0	0	1	0
Εκτιμώμενη Απαίτηση εντός του οριζοντα σχεδιασμού	1	8	50	3	2	5	2	1	1	5	3	2

Πίνακας Α6. Υλικά από παρωχημένο εξοπλισμό προς αποθήκευση ή ανακύκλωση

Servo motor	Dowel Pin	Stepper Motor Linear Actuator	Oil Circulation/Heating System	Oil Circulation Pump	Round Rail Linear Guide	Rectangular Profile Rail Guide	Stepper Motor
1	4	1	1	1	1	5	1
10	10	10	10	10	10	10	10
15	7	10	10	5	3	7	10
4	5	4	4	4	4	5	4
100	1	50	1000	200	15	15	20
0.1	0	0.1	0	0	0	0	0.1
0	0	0	0	0	0	0	0
1	4	2	1	1	1	8	2

