

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΙΓΑΙΟΥ**  
**ΤΜΗΜΑ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΕΩΝ**



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ**  
**ΑΙΓΑΙΟΥ**

**ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ**  
**ΣΤΗΝ ΔΙΟΙΚΗΣΗ ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΕΩΝ - MBA**

**ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΖΟΝΤΑΣ ΤΟ ΚΟΣΤΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ**  
**ΜΕΣΩ ΤΗΣ ΠΡΟΣΘΕΤΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ**  
**(3D-PRINTING)**

**Βασίλης Στέφανος**

**Επιβλέπων Καθηγητής: Δρ. Μαρία Μάυρη, Επίκουρη Καθηγήτρια Ποσοτικών  
Μεθόδων**

Διπλωματική Εργασία υποβληθείσα στο Τμήμα Διοίκησης Επιχειρήσεων του Πανεπιστημίου Αιγαίου  
ως μέρος των απαιτήσεων για την απόκτηση Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης στην Διοίκηση  
Επιχειρήσεων – MBA με κατεύθυνση στην Ελεγκτική – Χρηματοοικονομική Ανάλυση.

**Χίος, Σεπτέμβριος 2016**

**UNIVERSITY OF THE AEGEAN**  
**DEPARTMENT OF BUSINESS**  
**ADMINISTRATION**



**UNIVERSITY OF THE AEGEAN**

**MASTER PROGRAM IN**  
**BUSINESS ADMINISTRATION – MBA**

**DETERMINING THE PRODUCTION COST**  
**THROUGH ADDITIVE TECHNOLOGY**  
**(3D-PRINTING)**

**By Vasilis Stefanos**

**Supervisor: Maria Mavri Assistant Professor of Quantitative Methods**

Master Thesis submitted to the Department of Business Administration of the University of Aegean in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Business Administration – MBA with direction in Auditing and Financial Analysis.

**Chios, Greece, September 2016**

## Ευχαριστίες

Πριν την παρουσίαση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, αισθάνομαι την υποχρέωση να ευχαριστήσω ορισμένους από τους ανθρώπους που γνώρισα, συνεργάστηκα μαζί τους και έπαιξαν πολύ σημαντικό ρόλο στην πραγματοποίησή της.

Αρχικά θέλω να ευχαριστήσω την επιβλέπον καθηγήτρια της διπλωματικής εργασίας, Επίκουρη Καθηγήτρια Ποσοτικών Μεθόδων Δρ. Μαρία Μαύρη για την πολύτιμη καθοδήγηση της και την εμπιστοσύνη και εκτίμηση που μου έδειξε.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες θέλω να απευθύνω στους γονείς μου Γεώργιο και Στέλλα για την συμπαράσταση που μου παρείχαν στην διάρκεια του Μεταπτυχιακού Διπλώματος.

Τέλος θέλω να ευχαριστήσω τη Τσαμπή Δήμητρα για την καθοριστική της βοήθεια, η οποία αποτέλεσε σημαντικό παράγοντα στην προσπάθειά μου και με υποστήριξε σε κάθε φάση της πορείας μου.

# Προσδιορίζοντας το κόστος παραγωγής μέσω της προσθετικής τεχνολογίας (3D-printing)

**Σημαντικοί Όροι:** 3D εκτύπωση, 3D εκτυπωτές, Προσθετική Κατασκευή, Παραδοσιακή μέθοδος παραγωγής, Αλυσίδα παραγωγής, Κόστος, Ταχεία Προτυποποίηση (RP), Ταχεία Εργαλεία (RT), Άμεση Ψηφιακή Κατασκευή (DDM) και Κατασκευή στο Σπίτι (HF), Just in time (JIT), Προγραμματισμός Απαιτούμενων Υλικών (MRP), Αποθήκευση, Απογραφή.

## Περίληψη

Η συγκεκριμένη εργασία παρουσιάζει την μελέτη σχετικά με την εξέλιξη της παραγωγικής διαδικασίας από την παραδοσιακή μέθοδο στην 3D εκτύπωση. Στο πλαίσιο αυτό της μετεξέλιξης υπάρχει μία αναδιάρθρωση του κόστους παραγωγής των προϊόντων. Θα υπάρξει λεπτομερής περιγραφή, παρουσίαση και κατασκευή μοντέλων κόστους παραγωγής. Επίσης, θα αναπτυχθεί το θέμα του 3D Printing με εκτεταμένη ανάλυση των στοιχείων που έχω συλλέξει από την υπάρχουσα βιβλιογραφία και από επιστημονικές δημοσιεύσεις. Αναλυτικά:

Στο κεφάλαιο 1, γίνεται μία εισαγωγή για το 3D Printing και την μετεξέλιξή του, την AM (Additive Manufacturing) και τις εφαρμογές τις και τα νομικά ζητήματα που θα μας απασχολήσουν.

Στο κεφάλαιο 2, παρουσιάζονται συστήματα 3D Printing που έχουν αναπτυχθεί και χρησιμοποιούνται σήμερα σε παραγωγές.

Στο κεφάλαιο 3, μελετώνται οι αλλαγές των επιχειρηματικών μοντέλων και των αλυσίδων παραγωγής, συγκρίνονται το 3D και η παραδοσιακή μέθοδος καταλήγοντας στην αναδιάρθρωση του κόστους.

Στο κεφάλαιο 4, αναλύουμε και συγκρίνουμε τέσσερα μοντέλα κόστους, που έχουν διατυπωθεί σε έρευνες άλλων συγγραφέων, με σκοπό την διεξαγωγή συμπερασμάτων για την δημιουργία ενός μοντέλου κόστους παραγωγής το οποίο θα περιγραφεί στο τελευταίο κεφάλαιο 5. Στόχος του μοντέλου αυτού είναι να προσδιοριστεί η ελάχιστη τιμή του προϊόντος ανάλογα με την μέθοδο παραγωγής που θα χρησιμοποιήσουμε, παραδοσιακή παραγωγή ή 3D Printing.

# **Determining the production cost through additive technology (3D Printing)**

**Keywords:** 3D Printing, 3D Printers, Additive Manufacturing, Traditional method of production, Production Chain, Cost. Rapid Prototyping (RP), Rapid Tooling (RT), Direct Digital Manufacturing (DDM) and Home Fabrication (HF), Just In Time (JIT), Material Requirement Planning (MRP), Inventory, Warehouse.

## **Abstract**

This paper presents a study on the evolution of the production process from the traditional method in 3D Printing. As part of this transformation there is a restructuring of the production cost. There will be a detailed description, presentation and construction of production cost models. Also, the issue of 3D Printing will be developed with extensive analysis of the data I have collected from existing literature and scientific publications. Analytically:

In chapter 1, there will be an introduction to the 3D Printing and its transformation, AM (Additive Manufacturing) and its applications and legal issues to be deal with.

In chapter 2, we present 3D Printing systems that have been developed and are currently used in productions.

In chapter 3, we study the changes in business models and production chains, 3D Printing and traditional method are compared, leading to a result of restructuring cost.

In chapter 4, we analyze and compare four cost models, which have been made by other authors' researches, in order to draw conclusions for the creation of a cost model which will be described in the last chapter 5. The aim of this model is to determine the minimum value of the product depending on the production method that will be used, traditional production or 3D Printing.

## Περιεχόμενα

Περίληψη	vii
Abstract	ix

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: 3D Printing

1.1 Εισαγωγή	1
1.2 Μέθοδοι AM ανάλογα με το υλικό βάσης	2
1.3 Εφαρμογές AM στη βιομηχανία	3
1.4 Νομικά ζητήματα	4
1.5 Η μετεξέλιξη της 3D	5

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Τεχνολογίες εκτύπωσης και προηγμένοι 3D Printers

2.1 RepRap project	9
2.2 Διαδικασία Zcast Direct Metal Casting	10
2.3 MakerBot Printer	11
2.4 Ημι-αυτόματο σύστημα σάρωσης 3D Laser	12
2.4.1 Τρόπος λειτουργίας του σαρωτή	13
2.5 Συμπέρασμα	17

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Είσοδος του 3D Printing στις επιχειρήσεις

3.1 Δείκτες Βιωσιμότητας και DDM	20
3.1.1 Επιπτώσεις της DDM στις διαστάσεις βιωσιμότητας	21
3.2 AM και η επιρροή της στην αλυσίδα παραγωγής	23
3.2.1 Παραδοσιακή αλυσίδα παραγωγής	23
3.2.2 Σχέδιο παραγωγής της 3D εκτύπωσης όπως είναι σήμερα	24

3.2.3 Σχέδιο παραγωγής της 3D εκτύπωσης στο μέλλον	24
3.3 Διαφορές 3D και παραδοσιακής μεθόδου παραγωγής	25
3.4 Αναδιάρθρωση Κόστους	27
3.5 Συμπέρασμα	29

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Μοντέλα Κόστους Παραγωγής**

4.1 AM Τεχνικές κατασκευής	32
4.1.1 Μοντέλο κόστους για υψηλή πίεση χύτευσης (Hrpd)	33
4.1.2 Μοντέλο κόστους για το επιλεκτικό λέιζερ (SLS)	35
4.1.3 Σύγκριση μεθόδων βασισμένη σε μελέτη περίπτωσης	36
4.1.3.1 Παρουσίαση κόστους για κάθε μοντέλο	37
4.1.4 EBM και DMLS	39
4.1.4.1 Κατασκευή μοντέλου κόστους	42
4.1.4.2 Παρουσίαση των πειραματικών αποτελεσμάτων	44
4.2 Ανάλυση της ταχείας κατασκευής (RP)	46
4.3 Νέο σύστημα κόστους για προηγμένα συστήματα παραγωγής	57
4.3.1 Εκτίμηση RWSC	59
4.3.2 Εκτίμηση RISC	62
4.3.2.1 Στοιχεία κόστους ποιότητας	62
4.3.2.2 Στοιχεία κόστους ευελιξίας	67
4.3.3 Απόκτηση παραμετρικών τιμών στο μοντέλο κόστους	69
4.3.4 Αποκατάσταση του «παράδοξου της παραγωγικότητας»	70
4.4 Συμπέρασμα	71

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Εκτίμηση τιμής προϊόντος με παραδοσιακή μέθοδο παραγωγής και με 3D Printing**

<b>5.1 Λειτουργίες και κόστος κάθε λειτουργίας</b>	73
<b>5.1.1 Βασικές λειτουργίες των επιχειρήσεων</b>	73
<b>5.1.2 Προσδιορισμός του κόστους ανά λειτουργία</b>	74
<b>5.2 Ανάλυση του μοντέλου</b>	76
<b>5.2.1 Ανάλυση κόστους για κάθε μέθοδο παραγωγής</b>	77
<b>5.3 Περιγραφή Παλινδρόμησης και επίλυσης</b>	80
<b>5.4 Αποτελέσματα</b>	80
<b>5.5 Συμπέρασμα</b>	81
<b>ΕΠΙΛΟΓΟΣ</b>	83
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</b>	85
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ</b>	87



# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## 3D Printing

### 1.1 Εισαγωγή

Το 3D Printing δεν είναι κάτι καινούργιο – εφευρέθηκε το 1984 από τον Chuck Hull, ο οποίος θεωρείται ο πατέρας της στερεολιθογραφίας. Κατά κύριο λόγο, η μέθοδος stereolithography χρησιμοποιήθηκε για να σκληρύνει υγρά φωτο-ευαίσθητα πολυμερή με φως λέιζερ σε μία στρώμα με στρώμα διεργασία (Gibson et al., 2010).

Σύμφωνα με τον Gutsche, 2012, «Η 3D εκτύπωση είναι έτοιμη να γίνει η κορυφαία μετασχηματιστική τεχνολογία». Στον τομέα της μεταποίησης, οι μορφές της 3D εκτύπωσης έχουν χρησιμοποιηθεί για περισσότερο από μια δεκαετία. Γνωστή ως «πρόσθετη διαδικασία παραγωγής» (AM), όπου "ένα τρισδιάστατο αντικείμενο δημιουργείται με τη θέσπιση διαδοχικών στρωμάτων του υλικού που προσκολλώνται το ένα στο άλλο, δημιουργώντας μία τρισδιάστατη έξοδο" (Kurt και Colegrove, 2012). Η AM τεχνολογία ήταν σε χρήση από τη δεκαετία του 1980. Η έγκαιρη εφαρμογή της περιορίστηκε στην παραγωγή πρωτοτύπων. Πρωταρχικός στόχος της τεχνολογίας αυτής ήταν να προσφέρει έναν γρηγορότερο και οικονομικότερο τρόπο ανάπτυξης του προϊόντος.

Για τα άτομα που δεν είναι εξοικειωμένα με το σχεδιασμό αντικειμένων με 3D εκτυπωτές υπάρχει μία αρκετά απότομη καμπύλη μάθησης. Πιο συγκεκριμένα, υπάρχει μια ποικιλία ανοικτών αρχείων, όπως το Thingiverse, όπου οι μαθητές μπορούν να κατεβάσουν προσχεδιασμένα αντικείμενα για να εκτυπώσουν χωρίς καμία γνώση για το 3D λογισμικό σχεδιασμού, αλλά για να δημιουργήσουν σχέδια από το μηδέν είναι απαραίτητη μερική εκπαίδευση. Επίσης, είναι διαθέσιμα διαφορετικά open source λογισμικά 3D σχεδιασμού, συμπεριλαμβανομένων το Google SketchUp, Solid Edge κλπ (Gillian Andrea Nowlan) . Επιπλέον, μια πληθώρα 3D modeling λογισμικών μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να δημιουργήσουμε ψηφιακά αντικείμενα. Μερικά είναι πιο εύκολα στη χρήση από άλλα. Το SolidEdge είναι ένα προηγμένο πρόγραμμα λογισμικού που επιτρέπει στους χρήστες να δημιουργήσουν πολύπλοκα 3D μοντέλα. Το FreeCAD και το OpenSCAD είναι δύο δωρεάν, computer-aided design (CAD), πακέτα λογισμικού που διατίθενται online. Όσοι είναι νέοι στο 3D modeling, μπορούν αν θέλουν να δοκιμάσουν το Sketchup. Είναι αρκετά εύκολο στη χρήση, και έχει πραγματοποιήσει εξαγωγές STL plugin (Dalhousie University, 2013). Είναι

ζωτικής σημασίας να χρησιμοποιηθεί το σωστό λογισμικό για την παρασκευή ενός αρχείου στη διαδικασία της 3D εκτύπωσης.

## **1.2 Μέθοδοι AM ανάλογα με το υλικό βάσης**

Η τρισδιάστατη εκτύπωση (3D Printing) είναι μια μέθοδος προσθετικής κατασκευής (AM) στην οποία κατασκευάζονται αντικείμενα μέσω της διαδοχικής πρόσθεσης επάλληλων στρώσεων υλικού. Στην τρισδιάστατη εκτύπωση μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφοροι τύποι υλικού, κυρίως αλουμίνιο, χάλυβας, κράματα, πολύτιμα μέταλλα, πλαστικά που χρησιμοποιούνται σε μορφή σκόνης αλλά και ξύλο, κεριά, χαρτί, πηλός, τσιμέντο, ζάχαρη και σοκολάτα είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν ως νήμα. Ο συνδυασμός υλικών είναι ακόμα σπάνιος.

Οι μέθοδοι της AM μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις διαφορετικές κατηγορίες ανάλογα με την κατάσταση του υλικού που χρησιμοποιείται ως βάση για να δημιουργηθεί το τεχνούργημα κατά τη διάρκεια της διαδικασίας, όπως σκόνη, στερεά και υγρά. (Kruth et al., 1998):

1. Όταν έχουμε ως βάση την σκόνη τότε έχουμε τρεις δυνατές επιλογές. Αρχικά έχουμε την πυροσυσσώματωση όπου επιλέγουμε το λέιζερ (SLS), στη συνέχεια έχουμε την τήξη που επιτυγχάνεται με δέσμη ηλεκτρονίων (EBM) και με λέιζερ σκόνης (LPF) η οποία ισχύει για την επισκευή των τμημάτων και, επομένως, μπορεί να παρατείνει τη διάρκεια ζωής ενός προϊόντος ακόμη περισσότερο. Τέλος υπάρχει η συνδετική ουσία, όπου χρησιμοποιούμε τον 3D εκτυπωτή και την έγχυση με δέσμη (BJ), οι τρισδιάστατοι εκτυπωτές είναι συνήθως ταχύτεροι, φθηνότεροι και ευκολότεροι στη χρήση. Οι τρισδιάστατοι εκτυπωτές χρησιμοποιούνται κυρίως για την κατασκευή φυσικών μοντέλων και πρωτοτύπων από σχεδιαστές, μηχανικούς και ομάδες ανάπτυξης νέων προϊόντων, έχουν τη δυνατότητα να εκτυπώνουν μέρη και εξαρτήματα από διάφορα υλικά, με διαφορετικές μηχανικές και φυσικές ιδιότητες και συχνά σε μια ενιαία διαδικασία κατασκευής. Η (BJ) έχει την ικανότητα να παράγει πολύπλοκα καλούπια με χύτευση άμμου και έχει τη δυνατότητα της βελτιστοποίησης του σχεδιασμού, όπου λιγότερο υλικό θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί στο καλούπι.

2. Όταν έχουμε στερεή βάση η μόνη επιλογή μας είναι η διαδικασία πλαστικοποίησης, η οποία πραγματοποιείται με δυο μεθόδους: τη μεταποίηση με Υπερήχους (UAM) και με απανωτές στρώσεις πλαστικοποιημένων αντικειμένων (LOM). Η (UAM) είναι κατάλληλο για μεταλλικά καλλιτεχνήματα, καθώς επίσης έχει την ικανότητα εναλλαγής μετάλλων κατά την διάρκεια της στρώσης, ενώ η (LOM) θεωρείται κατάλληλη για χαρτί και πλαστικά καλλιτεχνήματα, αλλά δεν χρησιμοποιείται πλέον γιατί έχει σπατάλη υλικών (φύρα). Και στις δυο επιλογές κόλλα χρησιμοποιείται μεταξύ των στρωμάτων.
3. Όταν έχουμε υγρή βάση έχουμε δύο επιλογές: την διαδικασία εξώθησης και τον πολυμερισμό. Η διαδικασία εξώθησης εφαρμόζεται κυρίως με τη συγχωνευμένη εναπόθεση μοντελοποίησης (FDM), ενώ για τον πολυμερισμό χρησιμοποιούμε τη στερεολιθογραφία (SL) και την ψηφιακή επεξεργασία φωτός (DLP). (Salonitis, 2014). Δεδομένου ότι ο εξοπλισμός για την AM ήταν συνήθως πολύ ακριβός και σπάνιος, οι τεχνολογίες αυτές χρησιμοποιούνται σχεδόν καθόλου για μη-βιομηχανικές εφαρμογές.

### 1.3 Εφαρμογές της AM στη βιομηχανία

Η AM σήμερα έχει εφαρμογές σχεδόν παντού όπως, στα τρόφιμα, στα έπιπλα, στα κοσμήματα καθώς και στις 3 βασικές βιομηχανίες (αυτοκίνητα, αεροδιαστημική και ιατρική). Η ανάπτυξη της τεχνολογίας AM όλα αυτά τα χρόνια έχει εξηγηθεί από τρεις βασικές βιομηχανίες για διάφορους λόγους:

**Αυτοκινητοβιομηχανίες:** εκμεταλλεύτηκαν την τεχνολογία, λόγω της ικανότητάς της να βοηθήσει τα νέα προϊόντα να διατίθενται στην αγορά γρήγορα και με προβλέψιμο τρόπο. Η μικρή εξοικονόμηση χρόνου και κόστους ανάπτυξης μπορεί να οδηγήσει σε μία σημαντική συνολική εξοικονόμηση ανάπτυξης του οχήματος. Ένα παράδειγμα προσέγγισης είναι η χρήση της AM, ως μέρος μιας διαδικασίας γέφυρας για να διαθέσει τα μέρη των εργαλείων πριν να είναι έτοιμο το πλήρες εργαλείο παραγωγής. Οι κατασκευαστές των high-end, αυτοκίνητα χαμηλού όγκου, χρησιμοποιούν ακόμη την AM ως προτιμώμενη μέθοδο παραγωγής για ορισμένα τμήματα, διότι είναι η πιο οικονομικά αποδοτική προσέγγιση που μπορεί να χρησιμοποιηθεί. Φυσικά, εάν όλοι οι κατασκευαστές αυτοκινήτων (όπως τώρα)

χρησιμοποιούν τις ίδιες τεχνολογίες, τα ανταγωνιστικά πλεονεκτήματα που έχουν θα χαθούν. Ωστόσο, είναι προφανές ότι η AM είναι τώρα μια βασική τεχνολογία για την ανάπτυξη προϊόντων αυτοκινητοβιομηχανίας.

**Αεροδιαστημικές εταιρείες:** ενδιαφέρονται για την τεχνολογία αυτή, λόγω της ικανότητάς της να συνειδητοποιήσει ιδιαίτερα σύνθετα και υψηλής απόδοσης προϊόντα. Οι ολοκληρωμένες μηχανικές λειτουργίες, η εξάλειψη κάποιων χαρακτηριστικών των μερών και η δυνατότητα δημιουργίας εσωτερικής λειτουργικότητας (όπως τα κανάλια ψύξης, οι εσωτερικές δομές στυλ κηρήθρας, κλπ) συνδυάζονται για να δημιουργήσουν ελαφριές δομές με υψηλή γεωμετρική και λειτουργική πολυπλοκότητα. Ενώ υπάρχει ήδη μια ακμάζουσα βιομηχανία για την κατασκευή των εξαρτημάτων από πολυμερή για στρατιωτικά αεροσκάφη υψηλών επιδόσεων, ίσως το μεγαλύτερο ενδιαφέρον σε αυτή τη βιομηχανία να είναι για τα συστήματα άμεσης κατασκευής μεταλλικών. Είναι σχετικά εύκολο για την AM να επεξεργαστεί τιτάνιο, κάτι που την καθιστά ιδανική για να ενσωματωθεί στα σχέδια αεροσκαφών σύνθετου άνθρακα.

**Ιατρικές βιομηχανίες:** ενδιαφέρονται ιδιαίτερα για την AM τεχνολογία λόγω της ευκολίας με την οποία τα 3D δεδομένα ιατρικής απεικόνισης μπορούν να μετατραπούν σε στερεά αντικείμενα. Με αυτόν τον τρόπο οι συσκευές μπορούν να προσαρμοστούν ανάλογα με τις ανάγκες του κάθε ασθενή. Ωστόσο η βιομηχανία δεν έχει απογειωθεί τόσο πολύ όσο θα μπορούσε να αναμένεται, και αυτό πιθανώς οφείλεται στο γεγονός ότι κινείται προς τα πάνω-κάτω από τους κλινικούς γιατρούς, πράγμα που καθιστά δύσκολη τη δημιουργία ενός μοντέλου κόστους. Όπου υπήρξε δυνατότητα για μεγάλη κλίμακα προσαρμογής (όπως και με τη Invisalign διαδικασία και τα ακουστικά in-the-ear), στη συνέχεια, υπήρξε καλή ανταμοιβή. Η μελλοντική ανάπτυξη της βιομηχανίας αυτής θα προχωρήσει αργά εξαιτίας της ανάγκης να εξασφαλιστεί η ασφάλεια μέσα από οργανώσεις όπως η αμερικανική Υπηρεσία Τροφίμων και Φαρμάκων (FDA). ( Ian Campbell, David Bourell, Ian Gibson)

## 1.4 Νομικά ζητήματα

Νομικές ανησυχίες υπάρχουν και θα συνεχίσουν να αποτελούν σημαντικό θέμα συζήτησης σε σχέση με την 3D εκτύπωση (Dante 2014, Schildhorn 2014). Μερικοί ερευνητές υποστηρίζουν ότι οτιδήποτε μπορεί να συμβεί, θα συμβεί,

συμπεριλαμβανομένου της εκτύπωσης των επιβλαβών αντικειμένων όπως πιστόλια ή παράκαμψη των νομικών ελέγχων κατασκευής σε μία παραδοσιακή αλυσίδα προσφοράς (Schildhorn 2014).

Είναι προφανές ότι το θέμα της πνευματικής ιδιοκτησίας είναι μια κρίσιμη συζήτηση γύρω από τη διαδικασία αυτή. Η αναπαραγωγή πνευματικών δικαιωμάτων σχεδίων και ίσως ακόμη και η πώληση 3D μοντέλων που παράγονται από σχέδια σε έναν εκτυπωτή 3D με πνευματικά δικαιώματα, αναμφίβολα θα παραβιάζει την ισχύουσα νομοθεσία περί πνευματικών δικαιωμάτων. Η 3D εκτύπωση είναι ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα από νομικής άποψης, όπως το τυπογραφείο, επειδή έχει ευρείες επιπτώσεις στο υφιστάμενο νομικό καθεστώς (συμπεριλαμβανομένων και των τριών τομέων της ΠΕ - διπλωμάτων ευρεσιτεχνίας, δικαιωμάτων πνευματικής ιδιοκτησίας, και των εμπορικών σημάτων), αλλά παρουσιάζει επίσης ζητήματα που μπορεί να δικαιολογούν την ευρεία τροποποίηση της ισχύουσας νομοθεσίας - ή απαιτούν νέους νόμους εξ ολοκλήρου (Hanna,2011).

## 1.5 Η μετεξέλιξη της 3D

Η 3D εκτύπωση είναι μια από τις μεγαλύτερες μελλοντικές επαναστάσεις. Η υιοθέτηση της 3D τεχνολογίας έχει περάσει μέσα από 4 διαδοχικές φάσεις, Rapid Prototyping (RP), Rapid Tooling (RT), Direct Digital Manufacturing (DDM) και Home Fabrication (HF) (Thierry Raynaa, , Ludmila Striukovab). Οι πρώτες 3D εκτυπώσεις ήταν η στερεολιθογραφία και το λέιζερ πυροσυσσωμάτωσης, οι οποίες ήταν αργές, δαπανηρές και περιορίζονταν σε μικρά αντικείμενα.

Η πρώτη φάση υιοθέτησης της 3D ήταν η Ταχεία Προτυποποίηση (RP), ένας όρος για τον οποίον η μεταποιητική βιομηχανία έχει αγωνιστεί για πολλά χρόνια. Επινοήθηκε στα μέσα της δεκαετίας του 1980, χρησιμοποιήθηκε για να περιγράψει μια σειρά από τεχνολογίες που κυριολεκτικά έκαναν πρωτότυπα των προϊόντων στα πρώιμα στάδια της ανάπτυξης με έναν γρήγορο και αυτοματοποιημένο τρόπο. Μια ποικιλία από διαφορετικές τεχνικές συνδυάζουν ουσιαστικά και διαδοχικά επίπεδες στρώσεις του υλικού, για να σχηματίσουν ένα 3-διαστάσεων στερεό αντικείμενο. Ωστόσο, δεν υπάρχει τίποτα στον όρο «rapid prototyping» που να παραπέμπει σε αυτή τη γενικά στρωματοποιημένη προσέγγιση. Επιπλέον, είναι σαφές ότι η σημερινή εφαρμογή της τεχνολογίας πηγαίνει πολύ πέρα από τα απλά πρωτότυπα. Μετά την

αρχική εισαγωγή των βασικών τεχνολογιών, η ανάπτυξη της RP ήταν ως επί το πλείστον στοιχειώδης. Τα πρώτα μηχανήματα περιλαμβάνουν φωτοπολυμερές σκλήρυνσης (όπως στερεολιθογραφία, ή SL από 3D συστήματα), σκόνη συσσωμάτωσης (π.χ. η επιλεκτική πυροσυσσωμάτωση με λέιζερ, ή LS από DTM), εξώθηση νήματος (όπως συγχωνευμένη μοντελοποίηση απόθεσης ή FDM από Stratasys), και πλαστικοποίηση φύλλου (όπως πλαστικοποιημένη κατασκευή αντικειμένου, ή LOM από Helisys). Όλες αυτές οι τεχνολογίες εξακολουθούν να υπάρχουν σήμερα, με την εξαίρεση του LOM, το οποίο ίσως επειδή ήταν η πιο σπάταλη σε υλικά. Σε αντίθεση με τις άλλες μεθόδους, στην LOM μία σταθερή ποσότητα υλικού ανά μονάδα ύψους απαιτείται για την κατασκευή ενός τμήματος, ανεξάρτητα από το αποτύπωμα ή τη μετατόπιση του όγκου του τμήματος. Αυτό φαίνεται να έχει αποδειχθεί ότι είναι μια κάπως περιοριστική προσέγγιση. ( Ian Campbell, David Bourell, Ian Gibson).

Το δεύτερο στάδιο υιοθέτησης της 3D ενεργοποιείται με τη χρήση πολυμερών και μεταλλικών κραμάτων, δηλαδή το ονομαζόμενο «Rapid Tooling». Οι διαδικασίες παραγωγής απαιτούν πάντοτε προσαρμοσμένα εργαλεία και καλούπια που χρησιμοποιούνται για την χύτευση με έγχυση. Αυτά τα καλούπια είναι κατασκευασμένα από χάλυβα ή αλουμίνιο, είναι ακριβά (ένα ενιαίο καλούπι μπορεί να κοστίσει πολύ παραπάνω από μερικές χιλιάδες δολάρια) και μακράς (από μία εβδομάδα έως και παραπάνω από ένα μήνα, ανάλογα με την πολυπλοκότητα του τμήματος) διαδικασίας. Στο πλαίσιο αυτό, τα λάθη μπορεί να είναι αρκετά δαπανηρά και υπάρχει μικρή ευελιξία όσον αφορά τη βελτίωση ή τις αναβαθμίσεις των κατασκευαζόμενων αντικειμένων. Σε αντίθεση, οι 3D τεχνολογίες εκτύπωσης επιτρέπουν την εκτύπωση καλουπιών σε θέμα ωρών, συχνά για ένα κλάσμα του κόστους των παραδοσιακών εργαλείων (Hiemenz, 2013. Zonder & Stella, 2013), οδηγώντας έτσι σε σημαντική εξοικονόμηση πόρων και ευκαιριών (π.χ., χαμηλό όγκο παραγωγής και συχνές αναβαθμίσεις).

Στα τέλη της δεκαετίας του 2000, το κόστος της 3D εκτύπωσης άρχισε να είναι αρκετά χαμηλό (και η ποιότητα να είναι αρκετά υψηλή) για να ξεκινήσει άμεσα η κατασκευή τελικών προϊόντων με 3D εκτυπωτές. Όπως σημειώνει ο Gibson, 2010, η ταχύτητα, η ποιότητα, η ακρίβεια και οι ιδιότητες των υλικών έχουν αναπτυχθεί σε βαθμό που τα 3D εκτυπωμένα κομμάτια μπορούν να γίνουν για τελική χρήση. Αυτό οδήγησε στην τρίτη φάση που αναφέρεται γενικά ως «Direct Digital Manufacturing» (ή DDM) ή απλά άμεση κατασκευή, και η οποία προϋποθέτει μια εντελώς ψηφιακή διαδικασία παραγωγής, με τελικά προϊόντα που παράγονται απευθείας με τη χρήση

ψηφιακών (CAD) μοντέλων και 3D εκτυπωτές, χωρίς καλούπια. Ενώ ήταν ήδη διαθέσιμη για πολλά χρόνια, η υιοθέτηση της άμεσης κατασκευής έχει αυξηθεί σημαντικά πρόσφατα, εν μέρει λόγω της ανόδου των online πλατφόρμων 3D εκτύπωσης. Ορισμένες από αυτές τις πλατφόρμες, όπως η Materialise και η 3DCreation Lab, επιτρέπει στους χρήστες να ανεβάσουν CAD αρχεία, τα οποία χρησιμοποιούνται για την παραγωγή 3D τυπωμένων αντικειμένων.

Το τέταρτο και τελευταίο στάδιο είναι το «Home Fabrication» (HF) και έχει μόλις ξεκινήσει. Περιλαμβάνει καταναλωτές που κατασκευάζουν αντικείμενα για τους εαυτούς τους, χρησιμοποιώντας τον 3D εκτυπωτή που έχουν στο σπίτι τους. Στο σημείο αυτό να πούμε ότι οι πωλήσεις 3D εκτυπωτών έχουν ετήσιο μέσο όρο αύξησης της τάξης του 346% μεταξύ του 2007 και του 2011 από το οποίο το 46% ήταν μεταξύ του 2011 και του 2012 (Wholers, 2013). Ενώ οι πωλήσεις προσωπικών 3D εκτυπωτών εξακολουθούν να παραμένουν σε χαμηλά επίπεδα (35 508 μονάδες που πωλήθηκαν το 2012) σε σύγκριση με άλλα καταναλωτικά ηλεκτρονικά προϊόντα. Όπως καταλαβαίνουμε είναι περιορισμένη και αργή η υιοθέτηση της τέταρτης και τελευταίας φάσης λόγω της ανωριμότητας της τεχνολογίας. (Thierry Raynaa, Ludmila Striukonab). Το 2011,(Bowyer et al. 2013) ίδρυσε το έργο RepRap για χαμηλού κόστους 3D εκτυπωτές, ακολούθησαν επίσης πρωτοβουλίες. Η ικανότητα να παράγει σε ένα εξαιρετικά ευέλικτο τρόπο σχεδόν οποιαδήποτε γεωμετρική μορφή σε ένα βήμα προσφέρει την ευκαιρία να εφαρμόσει η AM στο εσωτερικό των νοικοκυριών.





## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### Τεχνολογίες εκτύπωσης και προηγμένοι 3D Printers

Ορισμένοι σχολιαστές της βιομηχανίας υποστηρίζουν ότι η εξέλιξη της τεχνολογίας έχει τη δυνατότητα να δημιουργήσει ένα νέο είδος βιομηχανικής επανάστασης. Είναι προφανές ότι η τεχνολογία εκτύπωσης έχει εξελιχθεί δραματικά κυρίως μετά από τα τελευταία 25 χρόνια ανάπτυξης και χρήσης, με αποτέλεσμα από τις απλές εκτυπώσεις σε χαρτί που γνωρίζουμε να έχουμε φτάσει σε εκτυπώσεις τελικών προϊόντων σε 3D μορφή. Με τον ίδιο τρόπο που το διαδίκτυο έχει εκδημοκρατίσει τη διαθεσιμότητα και τη διανομή των πληροφοριών, η 3D εκτύπωση έχει τη δυνατότητα να κάνει το ίδιο και για τη δημιουργία φυσικών προϊόντων.

Η 3D εκτύπωση ερευνάται καθημερινά όλο και περισσότερο και εισάγει αλλαγές τόσο στις διαδικασίες εκτύπωσης, με χρήση προγραμμάτων και λογισμικών στους υπολογιστές, όσο και στους εκτυπωτές τους ίδιους. Οι πρώτοι 3D εκτυπωτές ήταν αργοί, μεγάλοι, χωρίς δυνατότητα μετακίνησης και το προϊόν που παρήγαγαν είχε περιορισμούς στον όγκο και στην ποιότητα. Παρακάτω θα αναφερθούμε στο πρόγραμμα RepRap που διευκολύνει το σχεδιασμό και την κατασκευή καταναλωτικών προϊόντων, στη διαδικασία ZCast που μας δίνει την δυνατότητα μιας εναλλακτικής μεθόδου παραγωγής βασισμένη σε μεταλλική χύτευση και στον MakerBot εκτυπωτή πέμπτης γενιάς. Όλα τα παραπάνω για να λειτουργήσουν χρειάζονται αρχεία σχεδιασμού CAD. Τέλος, παρουσιάζουμε έναν σαρωτή ο οποίος χρησιμοποιεί προηγμένα λογισμικά και λειτουργεί σχεδόν αυτόματα.

#### 2.1 RepRap project

Το πρόγραμμα RepRap, που δημιουργήθηκε από τον Adrian Bowyer το 2005, είναι μια πρωτοβουλία που έχει ως στόχο να αναπτύξει έναν 3D εκτυπωτή που να μπορεί να εκτυπώσει τα περισσότερα από τα δικά του στοιχεία, δηλαδή να παραχθεί μία καθαρά αυτό-αναπαραγόμενη συσκευή. Έτσι δίνεται η δυνατότητα, με ελάχιστη κεφαλαιουχική δαπάνη, σε οποιονδήποτε ιδιώτη να παράγει ό,τι αντικείμενο θέλει από την καθημερινή του ζωή. Το RepRap χρησιμοποιεί μια παραλλαγή της τεχνικής FDM. Όλα τα σχέδια που παράγει τίθενται υπό μια ελεύθερη άδεια χρήσης λογισμικού, την

GNU General Public License. Υπάρχουν τέσσερα τέτοια 3D εκτυπωτικά μηχανήματα: "Ο Δαρβίνος", που κυκλοφόρησε το Μάρτιο του 2007, το "Μέντελ", τον Οκτώβριο του 2009 και τα "Προύσα Μέντελ" και "Huxley", που κυκλοφόρησαν και τα δύο το 2010. Επίσης διευκολύνει το σχεδιασμό και την κατασκευή καταναλωτικών προϊόντων, π.χ. από ένα πατενταρισμένο προϊόν της παραγωγής του εργοστασίου, σε έναν μη πατενταρισμένο προϊόν της προσωπικής παραγωγής με ανοιχτές προδιαγραφές. Το άνοιγμα του σχεδιασμού των προϊόντων και των παραγωγικών δυνατοτήτων, που προσφέρει το RepRap, για τον ιδιώτη θα πρέπει να μειώσει σημαντικά το χρόνο του κύκλου βελτίωσης του προϊόντος και να υποστηρίξει μια πολύ μεγάλη ποικιλομορφία εξειδικευμένων προϊόντων από ότι μπορεί να υποστηρίξει μια παραγωγή στο εργοστάσιο.

## 2.2 Διαδικασία ZCast Direct Metal Casting

Η διαδικασία ZCast Direct Metal Casting παρέχει στους κατασκευαστές τη δυνατότητα να παράγει αλουμίνιο και άλλα μη σιδηρούχα με υψηλή ταχύτητα και χαμηλό κόστος. Δεν στοχεύει σε υψηλού όγκου παραγωγές. Βασίζεται στη 3D εκτύπωση για την παραγωγή καλουπιών από ψηφιακά δεδομένα, εξαλείφοντας τα πρότυπα και τα βασικά στάδια παραγωγής των παραδοσιακών μεθόδων χύτευσης με άμμο.

Η σύνθεσή της περιλαμβάνει τρεις μεθόδους χύτευσης:

1. Άμεση Χύτευση (Direct Pour): οι χρήστες σχεδιάζουν κοιλότητες, πυρήνες και εισέρχονται αμέσως σε ένα σετ καλουπιού που θα εκτυπωθεί μέσω 3D ως ένα ολόκληρο καλούπι.

2. Μέθοδος Κέλυφος (Shell Method): περιλαμβάνει σχεδιασμό και εκτύπωση ένθετων καλουπιών για να χρησιμοποιηθούν σε συνδυασμό με τα παραδοσιακά εργαλεία του χυτηρίου και τις διαδικασίες δημιουργίας ενός καλουπιού. Απαιτεί περισσότερη επεξεργασία αλλά είναι πιο αποδοτική, από την προηγούμενη μέθοδο, με βάση το κόστος των υλικών και ταιριάζει απόλυτα στην παραδοσιακή διαδικασία χύτευσης.

3. Πρόθεση της Παραγωγής Χύτευσης (Production Intent Casting): χρησιμοποιεί εκτυπωμένα μέρη ως πρότυπα για να φτιάξει καλούπια με άμμο, σε συνδυασμό με τα εκτυπωμένα μέρη της ZCast για πυρήνες καλουπιών. Οι χρήστες σχεδιάζουν τα εργαλεία χυτηρίου σε 3D CAD και εκτυπώνουν το πρότυπο σε ZCast 3D εκτυπωτή.

## 2.3 MakerBot Printer

Ο MakerBot είναι ένας πέμπτης γενιάς εκτυπωτής, δηλαδή ένας εκτυπωτής FDM. Αυτό το είδος της εκτύπωσης είναι η πιο δημοφιλής μέχρι σήμερα, όπου πλαστικό νήμα τήκεται και στρωματοποιείται για να δημιουργήσει ένα αντικείμενο 3D (Moorefield-Lang, 2014a). Η δημοτικότητά της οφείλεται κυρίως σε ένα πιο λογικό κόστος και στο είδος των υλικών που χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία 3D αντικείμενα.

Υπάρχουν δύο διαφορετικά είδη υλικών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να δημιουργήσουν αντικείμενα με έναν εκτυπωτή FDM: ακρυλονιτρίλιο βουταδιένιο στυρένιο (ABS) και πολυγαλακτικό οξύ (PLA). Το PLA προέρχεται από φυτικά υλικά οπότε η διαδικασία εκτύπωσης δεν παράγει τοξικά αέρια ή οσμές. Το ABS είναι ελαφρώς πιο ευέλικτο, γεγονός που επιτρέπει στα συμπλεκόμενα και συνδετικά στοιχεία να σπάσουν και να ταιριάζουν μεταξύ τους με ευκολία, αλλά το πλαστικό εκπέμπει καπνούς που είναι επικίνδυνοι για την υγεία (Jamaluddin, 2013).

Το πιο δύσκολο θέμα είναι να μάθουμε πώς να διαμορφώσουμε τις ρυθμίσεις του λογισμικού που θα επιτρέψει στο αντικείμενο να εκτυπωθεί με επιτυχία. Ο MakerBot προσφέρει ένα δωρεάν πρόγραμμα λογισμικού που επιτρέπει κάποιο επίπεδο προσαρμογής. Για παράδειγμα, τα επίπεδα πλήρωσης μπορεί να επιλεγούν, τα οποία καθορίζουν εάν το σύνολο του αντικειμένου θα γεμίσει με πλαστικό ή εάν θα χρησιμοποιηθεί μία κυψελωτή δομή ημι-πλήρωσης, καθιστώντας το εσωτερικό του αντικειμένου ημι-κούφιο. Αυτοί οι τύποι των επιλογών θα κάνουν τα αντικείμενα ισχυρότερα και θα προσδιορίζουν το τελικό βάρος. Η ανάλυση εκτύπωσης και οι ρυθμίσεις ταχύτητας καθορίζουν το επίπεδο λεπτομέρειας που ο εκτυπωτής μπορεί να συλλάβει. Μία ταχύτερη εργασία εκτύπωσης δεν θα συλλάβει τις μικρές λεπτομέρειες, τόσο καλά όσο μία πιο αργή εργασία εκτύπωσης. Η βιβλιογραφία για τη 3D εκτύπωση σημειώνει κάποια δυσκολία στον προσδιορισμό των βέλτιστων ρυθμίσεων για την ποικιλία διαφορετικών αντικειμένων που μπορεί να χρειάζονται υποστήριξη ή υψηλότερη πλήρωση για να εκτυπώσουμε με επιτυχία. Η εμπειρία, οι δοκιμές και τα λάθη είναι συνήθως αυτά που απαιτούνται προκειμένου να καθοριστούν οι βέλτιστες ρυθμίσεις για τους διαφορετικούς τύπους μοντέλων 3D.

Ο MakerBot μπορεί να εκτυπώσει αντικείμενα τόσο μεγάλα όσο  $9,59 \times 7,53 \times 5,29$  ίντσες ή 456 κυβικές ίντσες (MakerBot,2015). Το συνολικό μέγεθος ενός αντικειμένου περιορίζεται στο μέγεθος της πλάκας κατασκευής. Μεγαλύτερα μοντέλα μπορούν να σχεδιαστούν σε μέρη τα οποία μπορούν αργότερα να συναρμολογηθούν. Ο MakerBot πέμπτης γενιάς μπορεί να εκτυπώσει μόνο με ένα χρώμα του νήματος σε μια στιγμή. Υπάρχουν μερικοί 3D εκτυπωτές που έχουν διπλά ακροφύσια τα οποία μπορούν να εξωθήσουν δύο χρώματα κατά τη διάρκεια μιας εργασίας εκτύπωσης. Για να εκτυπώσουμε με διαφορετικά χρώματα με ένα μόνο ακροφύσιο τα αντικείμενα θα πρέπει να εκτυπώνονται σε τμήματα, ανταλλάζοντας τα νήματα μετά από κάθε τμήμα που τυπώνεται.

Τα έξοδα εκτύπωσης υπολογίζεται κατά βάρος (δέκα γραμμάρια νήματος κοστίζουν ένα δολάριο, το οποίο καλύπτει το κόστος του υλικού, καθώς και τη φθορά λόγω χρήσης). Όταν ανεβάσουμε το μοντέλο αυτό στο λογισμικό του MakerBot θα υπολογίσει το τελικό βάρος του αντικειμένου πριν από την εκτύπωση. Ο τύπος για το κόστος αναπτύχθηκε με τη χρήση του συνολικού βάρους της λείας του νήματος (990 γραμμάρια) διαιρούμενο με το κόστος της λείας του νήματος (\$ 55,00), η οποία ισούται με το κόστος ανά γραμμάριο που είναι \$ 0,06. Μόλις το MakerBot δώσει το τελικό βάρος του μοντέλου, αυτό πολλαπλασιάζεται με \$ 0.06 για να προσδιοριστεί το κόστος του νήματος που χρησιμοποιείται. Για παράδειγμα, ένα μοντέλο 8,5 γραμμαρίων θα κόστιζε \$ 0,51 το νήμα (8.5 πολλαπλασιασμένο επί 0,06).

## **2.4 Ημι-Αυτόματο σύστημα σάρωσης 3D Laser**

Το μοντέλο του ημι-αυτόματου χαμηλού κόστους συστήματος σάρωσης 3D Laser για την αντίστροφη μηχανική βασίζεται στην πλατφόρμα λογισμικού των DAVID LaserScanner Vision Systems GmbH. Εφαρμόζονται μηχανοκίνητες μετακινήσεις σε ένα μηχάνημα αλίευσης CNC, ελέγχοντας τα συστήματα από το λογισμικό Mach3 CNC. Εστιάζουν σε ενεργά συστήματα ελέγχου, όπου μία καλά καθορισμένη πηγή φωτός (συνήθως ένα λέιζερ, κωδικοποιημένο μοτίβο φωτός, κλπ) αλληλοεπιδρά με ένα αντικείμενο, και αυτή η αλληλεπίδραση συλλαμβάνεται από έναν αισθητήρα (web κάμερα, βιντεοκάμερα εξοπλισμένη με οπτικούς φακούς, κλπ). Τα περισσότερα από τα ενεργά συστήματα βασίζονται σε γεωμετρική τριγωνοποίηση. Αυτές οι τεχνικές

απαιτούν ότι οι γωνίες και οι αποστάσεις μεταξύ του αισθητήρα, της φωτεινής πηγής και του αντικειμένου, πρέπει να αναγνωριστούν από τη βαθμονόμηση του συστήματος.

Η Computer-aided Reverse Engineering (CARE) δημιουργεί ένα υπολογιστικό μοντέλο ενός αντικειμένου μετατρέποντας σε ψηφιακή μορφή πραγματικά γεωμετρικά αντικείμενα, και τις λεπτές επιφανειακές ιδιότητες κλίμακας μέσω μετρήσεων του αντικειμένου, καθώς υπάρχουν στον πραγματικό κόσμο (Raja, V., Fernandes, K.J., 2008). Βασική αρχή του λέιζερ σαρωτή, ως μέρος της διαδικασίας αντίστροφης μηχανικής, είναι η χρήση γρήγορων καθρεφτών σάρωσης. Ο σαρωτής σχισμής είναι ο πιο ευρέως χρησιμοποιούμενος τριγωνισμού με βάση κάμερα 3D λέιζερ, λόγω της οπτικής και μηχανικής απλότητας και του κόστους του. Για να είναι πάντα η εικόνα στο βάθος του πεδίου της φωτογραφικής μηχανής είναι απαραίτητο να διατηρείται σταθερή η απόσταση μεταξύ των καμερών και του μετρούμενου αντικειμένου και να μετακινείται το λέιζερ σε οριζόντια ή κάθετη κατεύθυνση. Για την απόκτηση ενός πλήρους μοντέλου, είναι απαραίτητο να σαρώσει το αντικείμενο από διαφορετικές οπτικές γωνίες, περιστρέφοντας το τέταρτο Α-άξονα της μηχανής CNC, ο οποίος είναι η πλατφόρμα του αντικειμένου. Οι τελευταίες εκδόσεις του λογισμικού σάρωσης David (3.9.1) δίνουν τη δυνατότητα να ευθυγραμμίζουν τις σαρώσεις (σημείο σύννεφα) αυτόματα μετά τη λήψη κάθε σάρωσης.

Η προτεινόμενη προσέγγιση επεκτείνει τη δυνατότητα του λογισμικού σάρωσης με τη δημιουργία ενός προγράμματος, γραμμένο σε γλώσσα επεξεργασίας, η οποία ελέγχει και επικοινωνεί με τον έλεγχο της κίνησης του CNC και με το σύστημα σάρωσης, όπως εξηγείται παρακάτω.

#### **2.4.1 Τρόπος λειτουργίας του σαρωτή**

Για να δημιουργηθεί ένα σύστημα ημι-αυτόματο 360°, χρησιμοποιήθηκε ένα 4 αξόνων CNC μηχανήμα (FCN 500,4 αξόνων φρέζα), με έναν ενεργό αισθητήρα (Logitech web κάμερα Orbit/Sphere AF με αισθητήρα CMOS, 2MPixel, 30fps), και μια συσκευή εντοπισμού (Opt.Power=5mW, μήκος κύματος 532nm, γραμμική πράσινη ακτίνα λέιζερ κλάσης 1).

Χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικά λογισμικά, κυρίως χαμηλού κόστους και ανοικτού κώδικα, όπως η Επεξεργασία και η οθόνη Εικονικής θύρας (έκδοση αξιολόγησης),

Mach 3 και David σάρωση με λέιζερ. Το λογισμικό λειτουργεί σε ένα desktop και Dell Precision 340 PC με επεξεργαστή Pentium 4 CPU 2.4 GHz G και 1 GB Ram.

Το σύστημα μπορεί να χαρακτηριστεί ως ημι-αυτόματο, λόγω της αναγκαιότητας ορισμένων προπαρασκευαστικών εγκαταστάσεων, που απαιτούνται πριν από την έναρξη της σάρωσης. Μόλις αυτές οι τροποποιήσεις γίνουν, το σύστημα εκτελεί μια αυτόματη σάρωση 360°, χωρίς την ανάγκη παρέμβασης του χρήστη.

Η καρδιά του συστήματος είναι ο κωδικός αλγόριθμος που χρησιμοποιείται στο λογισμικό επεξεργασίας, το οποίο επικοινωνεί (αποστέλει και λαμβάνει εντολές) με το λογισμικό David και Mach3, που ελέγχει το σύστημα σάρωσης και τις κινήσεις της μηχανής CNC από τις εικονικές θύρες που δημιουργήθηκαν νωρίτερα. Η λογική του σχήματος αυτής της διαδικασίας παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.

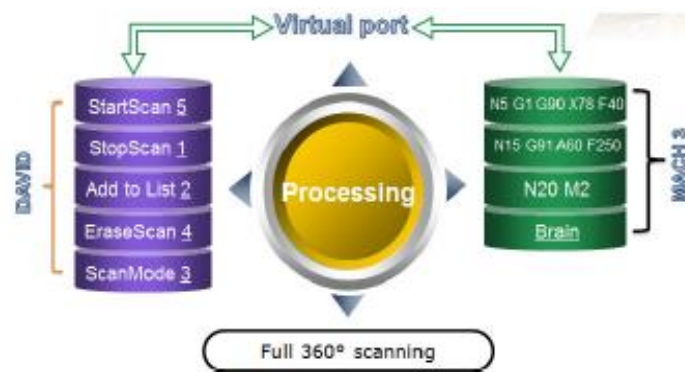


Fig. 1. Logic schema of the laser scanning system

Το David 3D λογισμικό σάρωσης έχει τη δυνατότητα να στέλνει και να λαμβάνει εντολές μέσω σειριακής θύρας με τη χρήση γραμμάτων ή αριθμών. Αυτό επιτρέπει να δημιουργηθούν απλές διαφορετικές εισόδους και εξόδους για το άλλο λογισμικό ελέγχου. Προσαρμόζοντας τις επιλογές της γραμμής εντολών, είναι δυνατόν να εκτελεστεί από το λογισμικό του David μια ενέργεια που συνδέεται με εκείνη την εντολή που στέλνει στη σειριακή θύρα μία ειδική επιστολή αναγνώρισης αυτής της εντολής (Εικόνα 2-4).

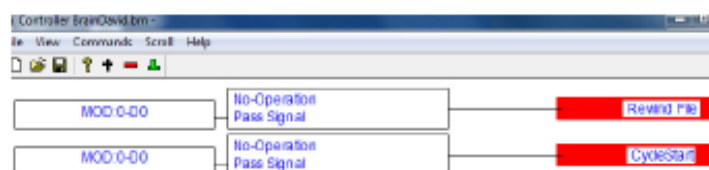


Fig. 2. Brain of Mach3

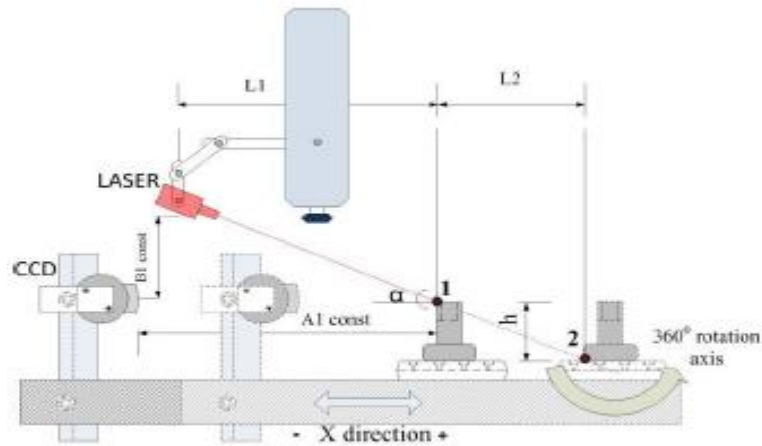


Fig. 3. Scanning in X direction

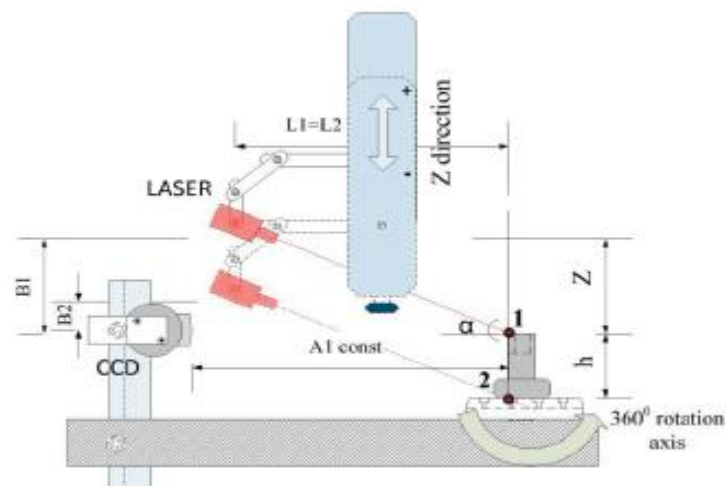


Fig. 4. Scanning in Z direction

Πηγή: L.M. Galantucci, E. Piperi, F. Lavecchia, A. Zhavo (2015)

Για αυτόν τον σαρωτή δημιουργήθηκε μια εικονική θύρα (COM4) και ο αριθμός της θύρας ήταν ενεργοποιημένη ρύθμιση εκ των προτέρων. Μετά από αυτό, το λογισμικό θα πρέπει να βαθμονομηθεί, και τότε είναι έτοιμο για σάρωση, περιμένοντας μόνο για την εντολή εκκίνησης.

Για τον αυτόματο μηχανισμό των κινήσεων του συστήματος σάρωσης, χρησιμοποιήθηκε ένα υφιστάμενο 4 αξόνων CNC μηχάνημα (3 γραμμικοί X, Y, Z άξονες, με Z ως τον κατακόρυφο άξονα, και μια A περιστροφή - Elettronica Veneta FCN 500) ελεγχόμενο από ένα 8 αξόνων ελεγκτή Ethernet Motion Controller (VITAL Systems Inc DSPMC / IP pn7761S). Το λογισμικό που ελέγχει σε πραγματικό χρόνο κάθε λειτουργία και οι παράμετροι λειτουργίας της μηχανής είναι ArtSoft Mach3.

Οι διαδικασίες που χρειάζονται για να ρυθμιστεί και να λειτουργήσει αυτό το σύστημα σάρωσης είναι οι εξής:

Πρώτον, η θύρα επικοινωνίας είναι έτοιμη για να στείλει εντολές στο μηχάνημα άλεσης.

Δεύτερον, ένα αρχείο "εγκέφαλος" δημιουργήθηκε και φορτώθηκε στον κατάλογο του εγκεφάλου του Mach3. "Εγκέφαλοι" είναι λογικές λειτουργίες που δημιουργούνται χρησιμοποιώντας το τμήμα επεξεργασίας του εγκεφάλου του λογισμικού Mach3. Αυτά τα μίνι προγράμματα, που δημιουργούνται από τους χρήστες, είναι PLCs λογισμικά, που επεκτείνουν τις δυνατότητες για να ελέγχουν και να παρακολουθούν άμεσα τις μηχανές CNC, περνώντας τον συνηθισμένο τρόπο για τον έλεγχο της μηχανής από τα κουμπιά (φυσικούς τροχούς ή ψηφιακά κουμπιά), ή από τις εισόδους γραμμής εντολών. Το αρχείο που δημιουργείται ονομάζεται ControllerBrainDavid.brn. Το αρχείο αποθηκεύεται στον κατάλογο του εγκεφάλου του Mach 3 και πρέπει να είναι ενεργοποιημένο.

Το κύριο μέρος που ελέγχει την όλη διαδικασία σάρωσης γίνεται από την "επεξεργασία" του λογισμικού, μια ανοικτή πηγή γλώσσας προγραμματισμού και ανάπτυξης περιβάλλοντος, η επεξεργασία 1.5.1 (Processing Foundation, 5 May 2013). Είναι συμβατό με όλα τα λειτουργικά συστήματα, και επιτρέπει να δημιουργήσουμε και να χτίσουμε διαφορετικούς αλγορίθμους.

Η λογική του αλγορίθμου φαίνεται στο Σχήμα 6 παρακάτω.

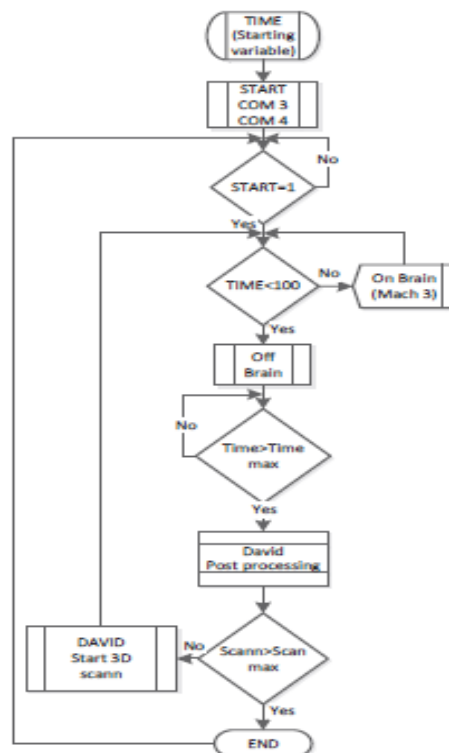


Fig. 6. Logic schema of the program developed in processing

Πηγή: L.M. Galantucci, E. Piperi, F. Lavecchia, A. Zhavo (2015)



Το πρόγραμμα χωρίζεται σε τρία κύρια μέρη.

Το πρώτο μέρος ανεβάζει τα τυποποιημένα στοιχεία της βιβλιοθήκης και ρυθμίζει τις μεταβλητές για τη διαδικασία σάρωσης, ως:

- `timemax` (`//` μέγιστος χρόνος της διαδικασίας σάρωσης, χωρίς την περιστροφή του άξονα A)
- `timescan` (`//` μεταβλητή για τη μέτρηση του αριθμού των σαρώσεων)
- `timescanmax` (`//` μέγιστος αριθμός των σαρώσεων)
- `in_buffer` [] (`//` μεταβλητή για το ρυθμιστικό υποδοχής από Mach3)

Το δεύτερο μέρος του προγράμματος, που ονομάζεται «κενή ρύθμιση», καθορίζει τη λογική των εισροών και εκροών για τις εικονικές θύρες, ως:

- `myPort` = νέο Serial (όνομα θύρας, 9600) (εκτέλεση της σειριακής θύρας ελέγχου Mach 3)
- `myPort2` = νέο Serial (όνομα θύρας 2, 9600) (εκτέλεση της σειριακής θύρας ελέγχου David σαρωτή λέιζερ)

Το τρίτο μέρος, που ονομάζεται «κενό κλήρωσης», κάνει έναν επαναλαμβανόμενο κύκλο μέχρι η μεταβλητή `timescan` να γίνει ίση με `timescanmax`. Σε αυτό το πλαίσιο οι διαδικασίες για τον έλεγχο του Mach3 και του David λογισμικού σάρωσης με λέιζερ είναι όλες πραγματοποιημένες και εκτελεσμένες, χρησιμοποιώντας κάθε εικονική θύρα που δηλώνεται στο δεύτερο μέρος του προγράμματος.

Μετά από όλες τις προκαταρκτικές προετοιμασίες σε κάθε βήμα (όπως περιγράφεται για την ρύθμιση της σειριακής θύρας οθόνης, τον εγκέφαλο Mach3, σαρωτή λέιζερ David, και αφού υπενθυμίσει τον αλγόριθμο στην Επεξεργασία) το μόνο που χρειάζεται είναι να πατήσετε το κουμπί εκκίνησης σάρωσης που έχει το μενού του σαρωτή David. Με τον τρόπο αυτό, η διαδικασία θα κάνει πλήρεις 360° σαρώσεις των αντικειμένων.

## 2.5 Συμπέρασμα

Στο κεφάλαιο αυτό βλέπουμε πως από τη φάση του rapid prototyping, του rapid tooling και του DDM έχουμε φτάσει στη χρήση εκτυπωτών παραγωγής τελικών προϊόντων. Η εύρεση καινοτόμων τεχνολογιών κάνουν τις διαδικασίες εκτύπωσης πιο εύκολες και θα μπορούσαν να επιφέρουν σημαντικά οφέλη στις επιχειρήσεις. Φανταστείτε πόσο χρόνο και χρήμα θα μπορούσε να εξοικονομήσει μία επιχείρηση με την είσοδο ενός

μηχανήματος σάρωσης για τα προϊόντα της και έναν εκτυπωτή, όπως το MakerBot, στην αλυσίδα παραγωγής της.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### Είσοδος του 3D Printing στις επιχειρήσεις

Είναι σαφές ότι η μετεξέλιξη στις τεχνολογίες 3D εκτύπωσης έχει τη δυνατότητα να είναι ιδιαίτερα αποδιοργανωτική και να οδηγήσει σε σημαντικές αλλαγές για το επιχειρηματικό μοντέλο της καινοτομίας. (Johnson et al, 2008. Abdelkafi, 2013). Καθώς η τεχνολογία ωριμάζει και γίνεται ευρύτερα αποδεκτή, νέα επιχειρηματικά μοντέλα αναδύονται (Sabatier et al., 2012). Η επιχείρηση μπορεί να μετακινηθεί από το ένα επιχειρηματικό μοντέλο στο άλλο είτε για να αυξήσει το κέρδος και να επωφεληθεί από μια ευκαιρία για ανάπτυξη (Willemstein et al., 2007), είτε για να αποφύγει δυνητικά θανατηφόρα αποτελέσματα της τεχνολογικής μετατόπισης (Tongur , Engwall, 2014).

Ο πρώτος παράγοντας για την απόδοση μιας εταιρίας είναι το επιχειρηματικό της μοντέλο. Αυτό είναι η μέθοδος που η εταιρία κατασκευάζει και χρησιμοποιεί τους πόρους της για να προσφέρει στους πελάτες της μεγαλύτερη αξία από όσο μπορούν οι ανταγωνιστές της και να κερδίσει χρήματα. Συγκεκριμένα, καθορίζει λεπτομερώς τον τρόπο που η εταιρία παράγει κέρδος τώρα και πώς σχεδιάζει να κάνει το ίδιο μακροπρόθεσμα, είναι αυτό που καθιστά μια εταιρία ικανή να αποκτήσει ένα ισχυρό ανταγωνιστικό πλεονέκτημα (Affuah & Tucci, 2001).

Οι Τεχνολογίες 3D εκτύπωσης κάνουν την μετατόπιση λιγότερο επικίνδυνη, επειδή τα προϊόντα μπορούν να κατασκευαστούν κατά παραγγελία με ελάχιστο κόστος καθώς επίσης επιτρέπουν στο επιχειρηματικό μοντέλο να γίνει ενωτικό και προσαρμόσιμο. Οι επιχειρήσεις μπορούν στη συνέχεια να αποφασίσουν, ανάλογα με το περιβάλλον, να αποκτήσουν ένα στενό (επικεντρώνονται σε μία συγκεκριμένη αγορά) ή πλατύ, (π.χ., το σχεδιασμό, την κατασκευή και τη διανομή) ή μικρό (μόνο σχεδιασμός) επιχειρηματικό μοντέλο. Επιπλέον, τα επιχειρηματικά μοντέλα είναι πλήρως «κινητά» και μπορούν να μετακινηθούν προς τα επάνω, προς τα κάτω ή προς τα πλάγια.

Η τεχνολογική καινοτομία είναι κρίσιμη, διότι μπορεί να παρέχει τους απαραίτητους πόρους για να αλλάξει το επιχειρηματικό μοντέλο και να αύξηση την ανταγωνιστικότητα. (Calia et al., 2007). Στη 3D εκτύπωση καινοτομίας το επιχειρηματικό μοντέλο μπορεί να είναι ριζοσπαστικό ή σταδιακό. Ριζοσπαστικό μοντέλο επιχειρηματικής καινοτομίας προκύπτει όταν το επιχειρηματικό μοντέλο έχει

αλλάξει ταυτόχρονα περισσότερες από μία πτυχές ή διαστάσεις. (Brink and Holmén 2009).

Η διαφορά μεταξύ των σταδιακών και ριζοσπαστικών μοντέλων καινοτομίας αφορά τόσο τον αριθμό των συστατικών του επιχειρηματικού μοντέλου όσο και το βαθμό καινοτομίας. Όταν και τα δύο είναι υψηλά τότε το επιχειρηματικό μοντέλο της καινοτομίας είναι ριζικό. Όταν και τα δύο είναι χαμηλά είναι σταδιακό. (Ho et al. 2011). Τα ριζικά καινοτόμα επιχειρηματικά μοντέλα οδηγούν στη δημιουργία νέων αγορών (Zott και Amit 2002). Τα σταδιακά καινοτόμα επιχειρηματικά μοντέλα τείνουν να διατηρούν ίδια βάση πελατών. (Koen et al. 2011).

Η ταχεία προτυποποίηση (rapid prototyping) και ο ταχείς εξοπλισμός (rapid tooling) εκ των προτέρων δεν έχουν τη δυνατότητα για πολλές και βαθιές συστατικές αλλαγές, παρ' όλα αυτά μπορούν να φέρουν μεγάλη αναστάτωση. Από την άλλη ενώ η άμεση κατασκευή (Direct digital manufacturing) και η κατασκευή στο σπίτι (home fabrication) επιτρέπουν ριζικές μεταβολές πολλών στοιχείων των επιχειρήσεων, αυτό δεν σημαίνει απαραίτητα ότι θα οδηγεί πάντα σε διασπαστική, ριζική καινοτομία.

### **3.1 Δείκτες βιωσιμότητας και DDM**

Κάθε προϊόν έχει διαφορετικές φάσεις ανάπτυξης δηλαδή, το σχεδιασμό, την κατασκευή, τη χρήση και τη διάθεση. Όλα αυτά τα στάδια έχουν διαφορετικές προοπτικές και διαφορετικούς δείκτες βιωσιμότητας. Το Εθνικό Ινστιτούτο Προτύπων και Τεχνολογίας (NIST) έχουν κατηγοριοποιήσει τις πτυχές της βιωσιμότητας σε περιβαλλοντική διαχείριση, οικονομική ανάπτυξη, κοινωνική ευημερία, τεχνολογική πρόοδος και διαχείριση επιδόσεων (Joung κ.ά., 2012). Αλλά σε γενικές γραμμές, η βιωσιμότητα έχει τρεις διαστάσεις: κοινωνική, οικονομική και περιβαλλοντική.

Επί του παρόντος, υπάρχουν πολλά εργαλεία εκτίμησης για να αξιολογήσουμε τη βιωσιμότητα (Chen et al., 2013) όπως: Dow Jones, GM Metrics, Πλαίσιο Αναφοράς GRI. Η Επιτροπή των Ηνωμένων Εθνών για την Βιώσιμη Ανάπτυξη (UNCSD) έχει επίσης αναπτύξει κάποιους δείκτες βιωσιμότητας που σκοπός τους είναι να αποτελέσουν σημείο αναφοράς για τα κράτη μέλη, στο έργο τους να αναθεωρήσουν τους υφιστάμενους ή να αναπτύξουν νέους. Οι δείκτες αυτοί, μπορούν να προσαρμοστούν σε εργοστασιακό επίπεδο και να δώσουν μία ολική άποψη για το τι

πρέπει να εξεταστεί στην κατασκευή από την προοπτική του εργοστασίου, και να είναι συμβατή με το κοινωνικό επίπεδο.

Οι περιβαλλοντικοί δείκτες που σχετίζονται με την υγεία του ανθρώπου, τα οικοσυστήματα και τις ζημιές από τη χρήση των πόρων μπορούν επίσης να ληφθούν υπόψη σε μια γενική προοπτική χρησιμοποιώντας ορισμένες μεθοδολογίες, όπως η αποτίμηση του κύκλου ζωής.

Από τη σκοπιά της ανάπτυξης του προϊόντος, οι δείκτες βιωσιμότητας κατά τη φάση της χρήσης είναι κυρίως ποιοτικοί, αντί ποσοτικοί όπως στη φάση της κατασκευής. Οι κοινωνικοί δείκτες βιωσιμότητας, όπως ο φιλικός προς τον πελάτη και η ικανοποίηση των χρηστών είναι σημαντικό να τους προσέξουμε, ακόμη και αυτούς που δεν είναι εύκολο να τους μετρήσουμε ποσοτικά.

### **3.1.1 Επιπτώσεις της DDM στις διαστάσεις βιωσιμότητας**

Η ενέργεια και οι υλικές ροές αποτελούν τη βάση για τις οικονομικές και περιβαλλοντικές διαστάσεις, οι οποίες είναι γερά συνδεδεμένες. Η DDM προκαλεί αλλαγές στην αλυσίδα αξίας της ενέργειας και των υλικών ροών. Έχει την δυνατότητα μείωσης των αποβλήτων μέσω της αύξησης της αποδοτικότητας σε αξιοποίηση των πρώτων υλών, δηλαδή αποϋλοποίηση, με αποτέλεσμα λιγότερη ρύπανση και χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας. Μειώνει επίσης την ανάγκη για καταγραφή, η οποία αντιπροσωπεύει την εξοικονόμηση ενέργειας και υλικού για αποθήκευση και μικρότερο αριθμό υποβαθμισμένων προϊόντων. Περιλαμβάνει επίσης λιγότερα ή λιγότερο πολύπλοκα εργαλεία για επεξεργασία (π.χ. καλούπι), το οποίο και πάλι οδηγεί σε εξοικονόμηση ενέργειας και υλικού.

Στην οικονομική διάσταση με την DDM έχουμε υψηλότερη αξιοποίηση υλικού, αφού οι χρήστες έχουν πρόσβαση σε μία παγκόσμια κοινότητα, και έτσι οδηγούμαστε σε πιο απλές, πιο αποτελεσματικές εφοδιαστικές αλυσίδες με λιγότερη προσπάθεια μεταφοράς. Επιπλέον, μειώνεται η απώλεια υλικών και ενέργειας λόγω λιγότερης απογραφής και δίνει τη δυνατότητα άμεσης ανακύκλωσης δηλαδή λιγότερα απόβλητα και καλύτερη διαχείρισή τους. Με την DDM η παραγωγή είναι προσανατολισμένη στον πελάτη με αποτέλεσμα να παράγουμε όσα χρειαζόμαστε, να έχουμε λιγότερα αποθέματα και υπάρχει πιθανότητα υψηλότερου κέρδους λόγω συγκεκριμένων λύσεων του πελάτη. Ο Baumers et al. (2012) χρησιμοποίησε τη μέθοδο κοστολόγησης βάσει

της δραστηριότητας (ABC) που προτείνει ο Ruffo et al. (2006) και βρήκε ότι μια ευρεία ποικιλία εξαρτημάτων είναι πιο πιθανό να βελτιώσει την οικονομία της DDM καθώς και να μειώσει την κατανάλωση ενέργειας κατά τη διερεύνηση έξι προϊόντων που είχαν διαφορετικές διαστάσεις και πολυπλοκότητα. Atzeni και Salmi (2012) διαπίστωσε ότι η DDM, όπως η DMLS, μπορεί να ανταγωνίζονται με τη διαδικασία χύτευσης υψηλής πίεσης για μια μικρή προς μέση παρτίδα των τελικών χρησιμοποιήσιμων μεταλλικών μερών. Η DMLS είναι φθηνότερα από ό, τι η παραδοσιακή διαδικασία η οποία συχνά έχει χαμηλότερο κόστος καλουπιών σε υψηλό όγκο παραγωγής. Ο Wittbrodt et al. (2013) πραγματοποίησε μια ολοκληρωμένη μελέτη για τους οικονομικούς δείκτης του DDM λαμβάνοντας υπόψη ολόκληρο τον κύκλο ζωής χρησιμοποιώντας ένα open-source εκτυπωτή 3D, RepRap ως περιπτώσιολογική μελέτη για PLA τεχνολογία και κατέληξε στο ότι υπήρχε μεγαλύτερη ειδική ζήτηση ενέργειας και περισσότερη διάρκεια κατασκευής. Τέλος, τα θέματα της ποιότητας δεν έχουν λυθεί, οπότε υπάρχει κίνδυνος κατασκευής αποτυχημένων μερών.

Όσον αφορά την περιβαλλοντική διάσταση, υπάρχουν αμφίρροπες μελέτες για τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις και την οικολογική αποδοτικότητα. Θεωρούν ότι, οι παραδοσιακές περιβαλλοντικές βλάβες στην ανθρώπινη υγεία, στην ποιότητα του οικοσυστήματος, στη χρήση πηγών από τις εκπομπές ουσιών που απελευθερώνονται και η τοξικότητα στον αέρα, στο νερό και στο έδαφος των τύπων υλικών και οι ποσότητες γενικά της ενέργειας καταναλώνονται κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας. Ο Sreenivasan et al. (2010) σύγκρινε την κατανάλωση ισχύος ανάμεσα σε διαφορετικές τεχνολογίες SLS με βάση τον οικολογικό δείκτη. Η SLS βρέθηκε να είναι 8,3 φορές υψηλότερη από άλλες DDM επεξεργασίες. Η ατομοποίηση είναι η κύρια αιτία των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, όπως αυτή χρησιμοποιείται στις διαδικασίες επεξεργασίας με σκόνη. Η DDM μπορεί να βοηθήσει στη μείωση των εκπομπών και της ενέργειας για την ανακατασκευή πολύτιμων εργαλείων και καλουπιών. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι μπορεί να ελαχιστοποιήσει την κατανάλωση ενέργειας σε χαμηλές αναλογίες στερεού προς τον όγκο κοιλότητας όταν συγκρίνεται με άλεση CNC που μπορεί να ελαχιστοποιήσει την κατανάλωση ενέργειας σε υψηλές αναλογίες (Morrow et al., 2007).

Από την κοινωνική άποψη δίνονται ίσες δυνατότητες για όλους τους συμμετέχοντες στις αγορές και στις κοινωνίες, αφού μειώνονται οι φραγμοί εισόδου νέων. Επίσης, γεφυρώνεται το κενό μεταξύ των αναπτυσσόμενων και αναπτυγμένων χωρών για τις υψηλές ανάγκες τεχνολογίας, εκπαίδευσης και κουλτούρας. Η αγορά με την DDM είναι

προσανατολισμένη στους χρήστες των προϊόντων και έτσι υπάρχει μεγαλύτερη ικανοποίηση των πελατών. Οι τεχνολογικές αλλαγές, ιδίως εκείνων που οδηγούν σε σημαντική βελτίωση της παραγωγικότητας των εργαζομένων, είναι βασικές για βελτιώσεις στον συνολικό πλούτο και την ευημερία της κοινωνίας (Krugman, 1999. Carlaw&Lipsey, 2003). Ο Haung et al. (2013) βρήκε ότι η DDM έχει πιθανό όφελος για την υγεία των ανθρώπων και των εργαζόμενων αφού αποφεύγει τη μακροχρόνια έκθεση σε επικίνδυνους θορύβους και στην ομίχλη πετρελαίου από την επεξεργασία υγρών μετάλλων. Αυτές οι επιπτώσεις μπορούν να ελαχιστοποιηθούν με τη μείωση της ποσότητας των πρώτων υλών ή ακόμα και των βοηθητικών υλικών αλλάζοντάς τα με εναλλακτικά υλικά.

### **3.2 AM και η επιρροή της στην αλυσίδα παραγωγής**

Μέχρι το 2020, το 3D printing προβλέπεται να εξελιχθεί σε παγκόσμια βιομηχανία αξίας 8 δισεκατομμυρίων δολαρίων. Αυτό σημαίνει ότι θα υπάρξουν ριζικές αλλαγές στον τομέα της βιομηχανικής παραγωγής και του διεθνούς εμπορίου. Πρόσθετη κατασκευή ή 3D εκτύπωση είναι δύο ορολογίες που αναφέρονται σε μια τεχνολογική διαδικασία. Η 3D εκτύπωση είναι μια «ταχεία τεχνολογία», βασισμένη στην ευκολία της κατασκευής ενός νέου προϊόντος ή στην παραγωγή ενός υπάρχοντος με αλλαγές (Casey 2009). Ο Alpern (2010) σημειώνει ότι «... το μόνο που έχετε να κάνετε, είναι να φορτώσετε ένα αρχείο και θα μπορείτε να αναπαράγετε σχήματα που δεν είναι κατασκευάσιμα με παραδοσιακές μεθόδους. Όλο αυτό, ονομάζεται ένα ευέλικτο εργοστάσιο στο κουτί ». Είναι ήδη γνωστό, μια αλυσίδα παραγωγής είναι η διαδικασία μετατροπής πρώτων υλών σε εμπορεύματα, η 3D εκτύπωση έχει αναδιαρθρώσει τα στάδια της αλυσίδας παραγωγής. Παρακάτω θα μελετήσουμε αναλυτικά πως διαμορφώνεται η αλυσίδα παραγωγής ανάλογα με την μέθοδο παραγωγής που υιοθετείται.

#### **3.2.1 Παραδοσιακή αλυσίδα παραγωγής**

Το πρώτο στάδιο της διαδικασίας είναι η παράδοση των πρώτων υλών από τους προμηθευτές. Ένας όγκος από τις πρώτες ύλες παραμένουν στις αποθήκες ενώ μια αρκετά μεγάλη ποσότητα μεταφέρετε στα εργοστάσια, έτσι ώστε να κατεργαστεί, να

μεταποιηθεί και να δημιουργηθεί το προϊόν. Στο δεύτερο στάδιο έχουμε τον έλεγχο του προϊόντος, το πακετάρισμα και την προώθησή του σε αποθήκες έτοιμων προϊόντων για απογραφή. Στο τελευταίο στάδιο έχουμε την αποστολή του εμπορεύματος σε καταστήματα λιανικής, όπου από τα καταστήματα αυτά ο πελάτης μπορεί να αγοράσει το προϊόν.

### **3.2.2 Σχέδιο παραγωγής της 3D εκτύπωσης όπως είναι σήμερα**

Στο πρώτο στάδιο έχουμε την δημιουργία ενός ψηφιακού αρχείου, ένα κατάστημα λιανικής διαφημίζει το προϊόν, και ένας πελάτης μπορεί να πάει να αγοράσει το συγκεκριμένο προϊόν. Στη συνέχεια, το κατάστημα εμπορεύεται τα απαραίτητα υλικά από τους προμηθευτές, εκτυπώνει το αντικείμενο, εξετάζει την ποιότητα του τυπωμένου αντικείμενου και συσκευάζει το προϊόν. Τέλος, το προϊόν αποστέλλεται στον πελάτη. Πρέπει να επισημάνουμε ότι αλλάζει και η σειρά που γίνεται η πώληση του τελικού προϊόντος, στην παραδοσιακή μέθοδο έχουμε πρώτα το προϊόν μετά τον έλεγχο, την αποστολή και τέλος την πώληση, ενώ με το 3D έχουμε πρώτα την πώληση, την εκτύπωση, τον έλεγχο και τέλος την αποστολή. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι οι καταναλωτές εξακολουθούν να αγοράζουν προϊόντα.

### **3.2.3 Σχέδιο παραγωγής της 3D εκτύπωσης στο μέλλον**

Στο μέλλον οι πελάτες θα μπορούν να κατασκευάζουν αντικείμενα για τους εαυτούς τους, χρησιμοποιώντας τον 3D εκτυπωτή που έχουν στο σπίτι τους. Συνεπώς μιλάμε για την τέταρτη φάση της τεχνολογικής εξέλιξης δηλαδή για το home fabrication. Στη φάση αυτή θα οδηγηθούμε σε ταχεία μαζική κατανάλωση 3D εκτυπωτών. Στο πρώτο στάδιο, τρεις εργασίες θα λαμβάνονται χώρα ταυτόχρονα. Ο σχεδιαστής σκιαγραφεί το αντικείμενο, αμέσως μετά ο σχεδιαστής σε εγκεκριμένη εταιρεία εκτύπωσης, εκτυπώνει το αντικείμενο και στη συνέχεια ελέγχει την εγκυρότητα και την ποιότητα του στερεού αντικείμενου, για να είμαστε σίγουροι για το τελικό αποτέλεσμα. Στο δεύτερο στάδιο ο σχεδιαστής «πουλάει» το σχέδιό του είτε σε μια εταιρεία και η εταιρεία διαφημίζει το προϊόν και πουλάει το αρχείο στους πελάτες, είτε ο σχεδιαστής πουλάει το αρχείο του μέσω online αγορών. Στο τελευταίο στάδιο ένας καταναλωτής αγοράζει το ψηφιακό αρχείο και απλά το εκτυπώνει. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι



το κατάστημα λιανικής είναι εντελώς απών και ότι οι καταναλωτές αγοράζουν όχι προϊόν αλλά ένα ψηφιακό αρχείο. (M. Mavri).

### **3.3 Διαφορές 3D και παραδοσιακής μεθόδου παραγωγής**

Σημαντικές διαφορές εντοπίζονται ανάμεσα στην παραδοσιακή μέθοδο παραγωγής και στην παραγωγή με 3D. Πριν αρχίσουμε μια παραγωγή πρέπει να σκεφτούμε πως θα την φέρουμε εις πέρας και τί προϊόν θα παράγουμε. Όσον αφορά τον προγραμματισμό της παραγωγής να πούμε ότι εδώ καθορίζονται οι στόχοι, προσδιορίζονται οι πόροι που απαιτούνται, ετοιμάζεται ένα σχέδιο για επίτευξη των στόχων, υπολογίζεται ο χρόνος, προβλέπονται τα στάδια της παραγωγικής διαδικασίας, υπολογίζονται οι κίνδυνοι και προετοιμάζονται εναλλακτικά σενάρια. Όλα τα προαναφερθέντα λαμβάνουν χώρα σε ένα παραδοσιακό σχέδιο παραγωγής. Με την παραγωγή 3D εκτύπωσης, παρόλο που οι στόχοι παραγωγής παραμένουν οι ίδιοι τα στάδια της διαδικασίας παραγωγής αλλάζουν. Στη 3D εκτύπωση, τα εκτυπωμένα αντικείμενα είναι είτε προϊόντα είτε τμήματα των τελικών προϊόντων. Ενδιάμεσες διεργασίες είναι απύσες. Και στις δύο προσεγγίσεις παραγωγής, τα βήματα, όπως προβλέψεις της ζήτησης, οι εκτιμήσεις του κινδύνου και ο εντοπισμός σεναρίων για την εξάλειψη του κινδύνου, είναι η ίδια. (M. Mavri).

Όσον αφορά το προϊόν υπάρχουν αλλαγές στην σχεδίαση αλλά και στον τρόπο μεταποίησης του. Ο σχεδιασμός του προϊόντος είναι μια διαδικασία δημιουργίας ενός νέου προϊόντος που θα πρέπει να καταναλώνεται από τους πελάτες μέσω της επιχείρησης. Σχετίζεται με το χρώμα, το σχήμα, το μέγεθος, τις διαστάσεις και την ποιότητα. Είναι πολύ σημαντικό να σημειωθεί ότι ο σχεδιαστής του προϊόντος πρέπει να εξετάσει το κοινό στο οποίο απευθύνεται το προϊόν. Με τη διαδικασία παρασκευής 3D εκτύπωσης, τα πράγματα είναι διαφορετικά. Ο σχεδιαστής σκιαγραφεί ένα μοντέλο, καθορίζει τις διαστάσεις του μοντέλου και αποφασίζεται ο βέλτιστος αριθμός των στρωμάτων που το μοντέλο πρέπει να τεμαχιστεί. Ο σχεδιαστής είναι ελεύθερος να δημιουργήσει ένα προϊόν χωρίς περιορισμούς. Στον τομέα της μεταποίησης του προϊόντος οι πολλές διαδικασίες απουσιάζουν. Στις παραδοσιακές μεταποιητικές αλυσίδες τα προϊόντα παράγονται είτε σε μικρές είτε σε μεγάλες ποσότητες. Στην παραγωγή 3D έχουμε εξατομικευμένα προϊόντα και μικρές αλλαγές στα ψηφιακά αρχεία που καταλήγουν σε νέα εξειδικευμένα προϊόντα.

Όταν τελειώσουμε με το σχεδιασμό και τον προγραμματισμό πρέπει να σκεφτούμε τα υλικά που θα χρησιμοποιήσουμε. Στις κλασικές κατασκευές, οι βιομηχανίες παρέχουν τεράστιες ποσότητες των πρώτων υλών. Οι παραγωγικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται συνήθως είναι αφαιρετικές. Από την άλλη πλευρά, οι τεχνικές κατασκευής της 3D εκτύπωσης είναι πρόσθετες, οπότε συνεπάγονται λιγότερες πρώτες ύλες. Άρα η λίστα των προμηθευτών είναι πολύ σύντομη, γιατί λιγότερα υλικά χρησιμοποιούνται από τους 3D εκτυπωτές. Υπάρχουν λιγότερα απόβλητα από τα υλικά (φύρα) με την 3D εκτύπωση και δεν υπάρχουν θραύσματα, από άλεσμα ή τρίψιμο. Το άχρηστο υλικό σε μεταλλικές εφαρμογές μειώνεται κατά 40% σε σύγκριση με την κατασκευή με αφαιρετικές τεχνολογίες ( Petrovic et al. (2011)).

Άλλη μια βασική διαφορά είναι η αλλαγή που γίνεται στην αποθήκευση και συνεπώς στην απογραφή. Η απογραφή γίνεται στο απόθεμα των υλικών που χρησιμοποιούνται για να ικανοποιήσουν τη ζήτηση των πελατών ή για να υποστηρίξουν την παραγωγή των προϊόντων. Η απογραφή είναι το τελικό αποτέλεσμα της απροσδόκητης ζήτησης. Στην παραδοσιακή μέθοδο έχουμε μεγάλες παραγγελίες για να πουλήσουμε μία ποσότητα ενός στοιχείου, και αποθηκεύουμε κάποια άλλα για μελλοντική χρήση. Τα πράγματα αλλάζουν με την τεχνολογία 3D εκτύπωσης. Ο περιορισμένος αριθμός των πρώτων υλών που είναι κατάλληλος για τους εκτυπωτές 3D μας δίνει την δυνατότητα να μην αποθηκεύουμε. Οι βιομηχανίες αποθηκεύουν μόνο ψηφιακά αρχεία. Αυτό που είναι πραγματικά απαραίτητο είναι ένας υπολογιστής ή ένα memory stick μεγάλου μεγέθους στα οποία ένας μεγάλος αριθμός των ψηφιακών αρχείων μπορεί να σωθεί. Η αποθήκευση στερεών αντικειμένων δεν είναι συνηθισμένη γιατί τα αντικείμενα παράγονται μόνο αφού παραγγελθούν. Οι αλλαγές στη λιανική αγορά είναι επίσης αξιοσημείωτες. Οι πελάτες μπορούν να αγοράσουν ένα προϊόν είτε με την επίσκεψη σε ένα σημείο πώλησης είτε χρησιμοποιώντας μια ηλεκτρονική πλατφόρμα. Δεν υπάρχει ανάγκη για λιανικά καταστήματα παρά μόνο για καταστήματα εκτύπωσης.

Δυο φιλοσοφίες έχουν μονοπωλήσει το σύστημα παραγωγής: materials requirement planning (MRP) and just in time (JIT). Την πρώτη την χρησιμοποιούν συνήθως οι Αμερικάνοι παραγωγοί ενώ την άλλη την χρησιμοποιούν οι Ιάπωνες και εισήχθη ως μια πρακτική παραγωγής η οποία έσωσε την Toyota Motor Company από πτώχευση. Σύμφωνα με τον Nahmias (1997), η καρδιά του MRP είναι το σχέδιο παραγωγής. Όπως είναι ήδη γνωστό, σε μία παραγωγή το σχέδιο είναι μία πλήρης προδιαγραφή του αριθμού του κάθε στοιχείου, το ακριβές χρονοδιάγραμμα των μεγεθών παρτίδων παραγωγής και το τελικό προϊόν. Στο επίκεντρο του σχεδίου παραγωγής είναι οι

προβλέψεις της ζήτησης για τα τελικά στοιχεία που παράγονται πάνω από τον ορίζοντα σχεδιασμού. Η φιλοσοφία JIT χρησιμοποιείται για τις παρτίδες παραγωγής των μικρών μεγεθών, και για να εξασφαλίζεται ότι παράγονται μόνο όσα προϊόντα χρειάζονται. Παρά το γεγονός ότι είναι επικίνδυνο, υποθέτουμε ότι η παραγωγή χρησιμοποιώντας 3D εκτυπωτές είναι πιο εξοικειωμένη με τη φιλοσοφία JIT απ' ό,τι με τη φιλοσοφία MRP. Αυτό γίνεται διότι στην JIT παράγουμε μόνο όσα προϊόντα χρειαζόμαστε και στο 3D έχουμε πολλά εξατομικευμένα, ενώ η MRP χρησιμοποιείται σε εταιρίες που δεν τους ενδιαφέρει η ζήτηση παρά μόνο η παραγωγή μεγάλων ποσοτήτων προϊόντων.

### **3.4 Αναδιάρθρωση Κόστους**

Μετά από τέτοιες αλλαγές ανάμεσα στην παραδοσιακή μέθοδο παραγωγής και την AM πρέπει να αναλογιστούμε και τις αλλαγές που θα προκύψουν στο κόστος παραγωγής. Βασικός στόχος κάθε βιομηχανίας, επιχείρησης, εταιρίας είναι η αύξηση των κερδών και για να γίνει αυτό προσπαθούν να μειώσουν όσο γίνεται περισσότερο το κόστος παραγωγής. Αξίζει να σημειωθεί ότι η τρέχουσα ισχύουσα τεχνολογική κατάσταση παρουσιάζει σημαντική αδράνεια. Με την υιοθέτηση της AM θα υπάρξει μια αύξηση των εσόδων τουλάχιστον 30% έως 40% (Bourell et al., 2009). Σε σύγκριση με άλλες τεχνολογίες και εξοπλισμούς προσθετικής κατασκευής, οι τρισδιάστατοι εκτυπωτές είναι συνήθως ταχύτεροι, φθηνότεροι και ευκολότεροι στη χρήση.

Οι 3D εκτυπωτές έχουν πολλά πλεονεκτήματα στην ανάπτυξη πρωτοτύπων και μακετών, συμπεριλαμβανομένων (1) ευκολία από αντιγραφή προϊόντων, (2) χαμηλού κόστους και (3) ασφάλεια και ιδιωτικότητα του προϊόντος (Berman, 2012). Το κύριο πλεονέκτημα αυτού του τύπου κατασκευής είναι η ευκολία αλλαγών. Με ελαφρές τροποποιήσεις στο αρχικό ψηφιακό αρχείο, ένα νέο αντικείμενο έχει κατασκευαστεί χωρίς κόστος και χωρίς προσπάθεια. Αυτό σημαίνει ότι με βάση το ίδιο ψηφιακό αρχείο, πολλοί πελάτες με διαφορετικά προφίλ και διαφορετικές ανάγκες μπορούν να έχουν ένα προσαρμοσμένο προϊόν που πληροί τις ανάγκες τους με έναν πιο αποτελεσματικό τρόπο. Συνεπώς η AM τεχνολογία επιτρέπει την ευέλικτη παραγωγή εξατομικευμένων προϊόντων χωρίς κυρώσεις του κόστους στον τομέα της μεταποίησης. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση απευθείας ψηφιακών διαδικασιών παραγωγής που μετατρέπουν απευθείας 3D δεδομένα σε φυσικά μέρη, χωρίς να υπάρχει ανάγκη για εργαλεία ή καλούπια. Επιπλέον, η αρχή της κατασκευής στρώμα

με στρώμα μπορεί επίσης να παράγει λειτουργικά ολοκληρωμένα τμήματα σε ένα μόνο στάδιο παραγωγής, μειώνοντας έτσι την ανάγκη για δραστηριότητες συναρμολόγησης. Έτσι, η τεχνολογία AM επηρεάζει σημαντικά το κόστος της ευελιξίας, της εξατομίκευσης, το κόστος του κεφαλαίου, και το οριακό κόστος παραγωγής (Koren, 2006, Dolgui and Proth, 2010, Berman, 2012). Τα κόστη εγκατάστασης και μετάβασης είναι αμελητέα, καθώς μόνο ένα διαφορετικό αρχείο CAD χρειάζεται να ανέβει στη μηχανή κατά την αλλαγή των προϊόντων που πρόκειται να κατασκευαστούν. (Petrovic et al.2010).

Επιπλέον, μια αύξηση στην πολυπλοκότητα του σχεδιασμού δεν σημαίνει υψηλότερο κόστος παραγωγής, σε αντίθεση με τις συμβατικές τεχνολογίες όπου το κόστος μονάδας παραγωγής συνήθως αυξάνεται με την υψηλότερη πολυπλοκότητα του σχεδιασμού του προϊόντος (Kota et al., 2000). Ορισμένες λειτουργίες, όπως κινούμενα μέρη ή συστήματα ψύξης, μπορούν να ενσωματωθούν απευθείας στα τμήματα που παράγονται χωρίς τη συμμετοχή πρόσθετων βημάτων κατασκευής ή συναρμολόγησης (Gibson et al., 2010), μειώνοντας περαιτέρω το κόστος παραγωγής λόγω της μείωσης των σταδίων παραγωγής.

Τέλος, περιπτωσιολογικές μελέτες δείχνουν ότι η τεχνολογία AM μπορεί να μειώσει σημαντικά τις απαιτούμενες πρώτες ύλες και τα απορρίμματα σε σύγκριση με τις συμβατικές τεχνολογίες κατασκευής, ιδιαίτερα για τα μεταλλικά μέρη (Petrovic et al .2010. Lipson και Kurman, 2013). Ωστόσο, η τεχνολογία AM εξακολουθεί να έχει πολλούς περιορισμούς που περιορίζουν την εφαρμογή της. Για παράδειγμα, τα διαθέσιμα υλικά και η επιλογή των χρωμάτων και οι επιφάνειες εξακολουθούν να περιορίζονται (Berman, 2012). Επιπλέον, ο χώρος κατασκευής των AM μηχανών θέτει ένα φυσικό όριο στις διαστάσεις του προϊόντος (Gebhardt, 2003). Η AM θα έχει επίσης αντίκτυπο στις αποφάσεις που λαμβάνονται σχετικά με την τοποθεσία κατασκευής. Το σχετικά χαμηλό σταθερό κόστος για τα βασικά AM μηχανήματα και τις ρυθμίσεις, σε συνδυασμό με τη σκοπιμότητα της οικονομικής παραγωγής μικρού μεγέθους της παρτίδας, πιθανώς να επιτρέψει την τοπική παραγωγή κοντά ή ακόμα και στο σημείο χρήσης (Berman, 2012). Το υψηλό κόστος μεταφοράς για την παράδοση των τελικών προϊόντων που υπερβαίνουν το κόστος μεταφοράς των πρώτων υλών, καθώς και οι κυρώσεις για καθυστερημένη παράδοση μπορούν επίσης να αλλάξουν τη θέση της μεταποίησης προς το σημείο χρήσης (Kleer και Piller, 2013). Ως αποτέλεσμα, τα πλεονεκτήματα κόστους παραγωγής σε χώρες με χαμηλό εισόδημα θα μειωθούν σε βάθος χρόνου (Petrovic et al 2010. Schuh κ.ά., 2011). Το οριακό κόστος παραγωγής

της AM παραμένει υψηλότερο από ό,τι με τη συμβατική τεχνολογία, εξαιτίας κυρίως του υψηλού κόστους των υλικών και της ενεργειακής έντασης (Gibson et al., 2010). Παρ' όλα αυτά, το κόστος των υλικών είναι πιθανό να μειωθεί διότι επιπλέον προμηθευτές θα εισέλθουν στην αγορά (Lux Research, 2013).

### **3.5 Συμπέρασμα**

Με την είσοδο της 3D εκτύπωσης στις επιχειρήσεις είναι πλέον αναγκαία η αλλαγή του επιχειρηματικού τους μοντέλου, δηλαδή η αλλαγή του τρόπου που πραγματοποιούν τις δραστηριότητές τους ώστε να αποκτούν έσοδα. Είδαμε, πώς η DDM επηρεάζει τη βιωσιμότητα του προϊόντος και τί ριζικές μεταβολές επιφέρει σε πολλά στοιχεία της επιχείρησης. Επιπλέον, μία σημαντική αλλαγή παρουσιάζεται στην αλυσίδα παραγωγής του προϊόντος. Αναλύθηκαν τα στάδια της αλυσίδας παραγωγής για την παραδοσιακή μέθοδο, την 3D όπως είναι σήμερα και την 3D στο μέλλον. Στη συνέχεια, έγινε σύγκριση ανάμεσα στις μεθόδους παραγωγής. Τέλος, υπήρξε η πρώτη αναφορά στο κόστος παραγωγής, το οποίο θα μας απασχολήσει στα επόμενα κεφάλαια.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### Μοντέλα κόστους παραγωγής

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μια παρουσίαση μοντέλων κόστους παραγωγής, από έρευνες άλλων συγγραφέων. Στόχος μας είναι η αξιολόγηση των τεχνικών προσθετικής κατασκευής, το αν θα μπορούσαν να θεωρηθούν οικονομικές και εναλλακτική λύση για τις συμβατικές διαδικασίες κατασκευής και το αν θα βελτιώσουν το σύστημα παραγωγικότητας.

Αρχικά θα ασχοληθούμε με την αξιολόγηση του όγκου της παραγωγής με AM τεχνικές κατασκευής, την τεχνική με υψηλή πίεση χύτευσης (Hpdc) και την τεχνική πρόσθεσης μετάλλου με λέιζερ πυροσυσσωμάτωσης (SLS). Για το σκοπό αυτό, παραθέτουμε μια σύγκριση με την βοήθεια μιας μελέτης περίπτωσης.

Σήμερα υπάρχουν διάφορες τεχνικές που βασίζονται σε μεταλλικές σκόνες και διατίθενται στην αγορά, κατάλληλες για την παραγωγή τελικών χρησιμοποιήσιμων μερών, όπως η Electron Beam Melting (EBM) και η Direct Metal Laser Sintering (DMLS). Θα γίνει μία σύγκριση και μεταξύ αυτών των δύο μεθόδων για την κατανόηση της απόδοσης του κόστους.

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται ευρήματα από μία ανάλυση κόστους που έγινε για να συγκρίνει μία παραδοσιακή διαδρομή κατασκευής (injection moulding) με τις διαδικασίες παραγωγής ανά επίπεδο (stereolithography, fused deposition modelling και laser sintering). Δηλαδή θα έχουμε μία άμεση σύγκριση μεταξύ της RM προσέγγισης με την injection moulding για την παραγωγή επιλεγμένων γεωμετριών σε διάφορες ποσότητες.

Τέλος, καθώς οι κατασκευαστές εξακολουθούν να αυτοματοποιούν τα εργοστάσιά τους, ανακαλύπτουν ότι πρέπει να εκσυγχρονιστούν τα υπάρχοντα μέτρα κόστους. Ένα μεγάλο μέρος της υπάρχουσας βιβλιογραφίας έχει συζητήσει το «γιατί είναι», αλλά σε πολύ μικρότερο βαθμό σχετικά με το «πώς είναι». Δυστυχώς, η παραδοσιακή κοστολόγηση δεν είναι κατάλληλη, διότι βασίζεται στην άμεση εργασία. Ως εκ τούτου, τα προβλήματα της οικονομικής αξιολόγησης των προηγμένων συστημάτων παραγωγής οφείλονται περισσότερο στην ανεπάρκεια των παραδοσιακών συστημάτων του κόστους παρά στην ανεπάρκεια των υφιστάμενων τεχνικών. Ωστόσο, η έρευνα για την ανάπτυξη αξιόπιστων συστημάτων κόστους είναι ακόμα σε εμβρυακό στάδιο, λόγω της δυσκολίας στη μέτρηση και στην πρόβλεψη των οικονομικών ωφελειών των

προηγμένων συστημάτων παραγωγής. Ο Kaplan (1983) προσδιόρισε νέους τομείς έρευνας για τη λογιστική διαχείριση και την μέτρηση των κατασκευαστικών επιδόσεων, όπως και άλλοι συγγραφείς έχουν προτείνει τρόπους για την αναθεώρηση της παραδοσιακής κοστολόγησης (Seed 1984, Brimson 1988, and Cooper and Kaplan 1988). Ωστόσο, οι συγγραφείς έχουν εργαστεί σε ακριβή τιμή κοστολόγησης (π.χ. εξεύρεση καλύτερων τρόπων κατανομής των γενικών εξόδων στα προϊόντα) και όχι σε αξιόπιστη εκτίμηση των οικονομικών ωφελειών που αναμένονται από τον αυτοματισμό εργοστασίων. Ως αποτέλεσμα, η οικονομική ανάλυση έχει περιοριστεί σε «άμεσα διαθέσιμες» ταμειακές ροές, αγνοώντας στρατηγικά σημαντικά άυλα στοιχεία όπως η ποιότητα κατασκευής και η ευελιξία.

#### **4.1 AM τεχνικές κατασκευής**

Σήμερα η ανταγωνιστικότητα για την παραγωγή με AM τεχνικές κατασκευής μικρού και μεσαίου όγκου πλαστικών εξαρτημάτων είναι καλά εδραιωμένη. Η απουσία των γεωμετρικών περιορισμών δεν είναι πλέον πρόβλημα. Ο σχεδιασμός μπορεί να βελτιστοποιηθεί ως προς την υψηλότερη αντοχή και το χαμηλότερο βάρος των προϊόντων, συνεπώς έχουμε εξοικονόμηση χρημάτων για το υλικό. Η ανάλυση εστιάζεται σε μεταλλικά μέρη με πολύπλοκο σχήμα, υψηλή ποιότητα, καλό φινίρισμα επιφάνειας και υψηλές μηχανικές ιδιότητες.

Σχεδόν όλα τα AM συστήματα για την άμεση επεξεργασία μεταλλικών μερών που διατίθενται στην αγορά χρησιμοποιούν μια πηγή δέσμης ενέργειας για τη δημιουργία των τμημάτων και επιλεκτικά τήξη πάνω σε σκόνη. Κατά την τελευταία δεκαετία, τέσσερις εταιρείες έχουν εισάγει στην Ευρωπαϊκή αγορά μηχανές που βασίζονται σε συστήματα λέιζερ για άμεση τήξη ή σύντηξη των μετάλλων, η EOS GmbH (Γερμανία), MTT Technologies Ltd (UK), Concept Laser GmbH (Γερμανία) και Phenix System (Γαλλία). Επίσης, η ARCAM AB (Σουηδία) έχει διαθέσει στο εμπόριο μια μηχανή που βασίζεται σε δέσμη ηλεκτρονίων υψηλής ενέργειας. Μεταξύ των αναφερθέντων τεχνικών, είναι γνωστό ότι η πυροσυσσωμάτωση λέιζερ είναι η πιο ευρέως διαδεδομένη τεχνική στην αγορά χάρη στην υψηλή ακρίβεια και το σχετικά χαμηλό κόστος επένδυσης σε σύγκριση με άλλες προσθετικές τεχνολογίες. Στις διεργασίες με πυροσυσσωμάτωση λέιζερ προσφέρεται μια ευρεία ποικιλία από σκόνες μετάλλων, οποίου η επιλογή σκόνης γίνεται σύμφωνα με τις ιδιότητες του προϊόντος.



Σε αυτήν την ανάλυση κόστους, μια βασική υπόθεση είναι ότι ο συνολικός όγκος κατασκευής της μηχανής AM χρησιμοποιείται για την παραγωγή αντιγράφων του ίδιου τμήματος. Συνεπώς, η παραγωγή μπορεί να θεωρηθεί σταθερού όγκου, επιπλέον, μόνο οι παράγοντες που επηρεάζουν άμεσα το κόστος του τμήματος θεωρούνται. Συγκεκριμένα, τα στοιχεία κόστους είναι το κόστος των υλικών, το κόστος επεξεργασίας και το κόστος εξοπλισμού. Πιο αναλυτικά, το κόστος επεξεργασίας περιλαμβάνει την απόσβεση του μηχανήματος, το σχεδιασμό και τις δοκιμές μερών, λαμβάνοντας υπόψη ότι το κόστος των εργαλείων υπολογίζεται μόνο για παραδοσιακές τεχνολογίες. Ως εκ τούτου, η διοικητική επιβάρυνση, η ενέργεια, η ενοικίαση χώρου και ο βοηθητικός εξοπλισμός, δεν λαμβάνονται υπόψη. Ωστόσο, μπορεί να παρατηρηθεί από προηγούμενες μελέτες ότι το κόστος αυτό μπορεί να επηρεάσει το συνολικό κόστος κατά 10%. Τέλος το κόστος εργασίας πρέπει να εξεταστεί, δεδομένου ότι επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από τη θέση της μονάδας παραγωγής, σε αυτή τη μελέτη υποθέτουμε ότι το εργοστάσιο κατασκευής βρίσκεται στη Δυτική Ευρώπη. Έτσι, το εκτιμώμενο ωριαίο κόστος για έναν χειριστή κυμαίνεται από 20,00 έως 35,00 € ανάλογα με τις δεξιότητες που απαιτούνται.

#### **4.1.1 Μοντέλο κόστους για υψηλή πίεση χύτευσης (Hrpc)**

Για την παροχή μιας εκτίμησης του κόστους, το κόστος μπορεί να είναι εύκολα κατανοητό αν το υπολογίσουμε ως άθροισμα των τεσσάρων όρων, όπως φαίνεται στον πίνακα 1.

**Table 1** Evaluation model of part cost for high-pressure die-casting

<i>Production volume</i>	(pcs)	<i>V</i>	
Material cost per kg	(EUR/kg)	<i>M</i>	
Part weight	(kg)	<i>W</i>	
<i>Material cost per part</i>	(EUR)	<i>MP</i>	$W \times M$
Standard components' cost	(EUR)	<i>SC</i>	
Mould cavities and slides cost	(EUR)	<i>K</i>	
Ancillary cost	(EUR)	<i>A</i>	
<i>Mould cost per part</i>	(EUR)	<i>KP</i>	$(SC+K+A)/V$
Machine cost per hour	(EUR/h)	<i>P</i>	
Cycle time	(h)	<i>T</i>	
Labor cost per hour processing	(EUR/h)	<i>PL</i>	
Percentage of operator time	(%)	<i>PT</i>	
<i>Processing cost per part</i>	(EUR)	<i>CP</i>	$(P+PL \times PT) \times T$
Heat treatment cost per part	(EUR)	<i>HT</i>	
Machining operations cost	(EUR)	<i>MO</i>	
Labor cost per hour post processing	(EUR/h)	<i>AL</i>	
Operator time	(h)	<i>AT</i>	
<i>Post-processing cost per part</i>	(EUR)	<i>AP</i>	$HT+MO+AL \times AT$
<b>Total cost per part</b>	<b>(EUR)</b>	<b>P</b>	<b>MP+KP+CP+AP</b>

Πηγή: Eleonora Atzeni & Alessandro Salmi (2012)

Το υλικό κόστος ανά μονάδα μπορεί να υπολογιστεί πολλαπλασιάζοντας το βάρος της μονάδας με το κόστος μιας μονάδας βάρους υλικού. Το κόστος του υλικού της φύρας δεν λαμβάνεται υπόψη επειδή ανακυκλώνεται πλήρως μετά την απομάκρυνση του.

Το κόστος για τα καλούπια ανά τμήμα δίνεται από το λόγο του κόστους καλουπιών με τον ετήσιο όγκο παραγωγής. Το κόστος των καλουπιών περιλαμβάνει τα κόστη σχεδιασμού των καλουπιών και τα λειτουργικά κόστη, το κόστος για την παραγωγή των κοιλοτήτων του καλουπιού και τα έξοδα διαφανειών που απαιτούνται.

Το κόστος επεξεργασίας ανά τμήμα σχετίζεται με τη μετατροπή της διαδικασίας. Αρχικά πολλαπλασιάζοντας το Εργατικό κόστος ανά ώρα επεξεργασίας με το ποσοστό χρόνου από την επεξεργασία και στη συνέχεια προσθέτουμε το κόστος του Μηχανήματος ανά ώρα. Τέλος πολλαπλασιάζουμε με το χρόνο του κύκλου των εργασιών.

Το κόστος μετά την επεξεργασία ανά τμήμα περιλαμβάνει το κόστος για την παραγωγή θερμότητας, το κόστος για τις μηχανικές λειτουργίες και το εργατικό κόστος. ( Eleonora Atzeni & Alessandro Salmi).

#### 4.1.2 Μοντέλο κόστους για το επιλεκτικό λέιζερ (SLS)

Τα στοιχεία που περιλαμβάνονται στο μοντέλο του συνολικού κόστους είναι το άθροισμα των τεσσάρων στοιχείων: το κόστος των υλικών, το κόστος προ-επεξεργασίας, το κόστος επεξεργασίας και το κόστος μετά την επεξεργασία. Αναλυτικά για τον υπολογισμό του κόστους των υλικών ανά τμήμα έχω:

Ο όγκος υπολογίζεται με το λογισμικό Materialise Magics RP. Ο όγκος αυξάνεται κατά 10% προκειμένου να ληφθούν υπόψη και τα απόβλητα. Η μάζα του υλικού του κάθε τμήματος υπολογίζεται πολλαπλασιάζοντας τον αυξημένο όγκο με την πυκνότητα του υλικού. Το υλικό κόστος ανά τμήμα υπολογίζεται πολλαπλασιάζοντας το κόστος ανά χιλιόγραμμο με τη μάζα του τμήματος. Ο πίνακας 2 απαριθμεί τους όρους του κόστους.

**Table 2** Evaluation model of part cost for selective laser sintering

<i>Number of parts produced per job</i>	(-)	<i>N</i>	<i>Magics RP software</i>
<i>Material cost per kg</i>	(EUR/kg)	<i>M</i>	Given by supplier
<i>Part volume</i>	(mm <sup>3</sup> )	<i>V</i>	<i>Magics RP software</i>
<i>Density of the sintered material</i>	(g/mm <sup>3</sup> )	<i>D</i>	
<i>Mass of material per part</i>	(kg)	<i>U</i>	$D \times 1.1 \cdot V$
<i>Material cost per part</i>	(EUR)	<i>MP</i>	$U \times M$
<i>Machine operator cost per hour</i>	(EUR/h)	<i>O</i>	
<i>Set-up time per build</i>	(h)	<i>A</i>	
<i>Pre-processing cost per part</i>	(EUR)	<i>AP</i>	$O \times A / N$
<i>Depreciation cost per year</i>	(EUR/year)	<i>C</i>	Given by supplier
<i>Hours per year</i>	(h/year)	<i>H</i>	5,000
<i>Machine cost per hour</i>	(EUR/h)	<i>CH</i>	$C / H$
<i>Build time</i>	(h)	<i>T</i>	<i>EOS machine software</i>
<i>Machine cost per build</i>	(EUR)	<i>CB</i>	$CH \times T$
<i>Processing cost per part</i>	(EUR)	<i>CP</i>	$CB / N$
<i>Machine operator cost per hour</i>	(EUR/h)	<i>O</i>	
<i>Post-processing time per build</i>	(h)	<i>B</i>	
<i>Heat treatment cost per build</i>	(EUR)	<i>HT</i>	
<i>Post-processing cost per part</i>	(EUR)	<i>BP</i>	$(O \times B + HT) / N$
<b>Total cost per assembly</b>	<b>(EUR)</b>	<b>P</b>	<b>MP+AP+CP+BP</b>

Πηγή: Eleonora Atzeni & Alessandro Salmi (2012)

Το κόστος προ-επεξεργασίας δίδεται από το λόγο του χρόνου κατασκευής με τον αριθμό των εξαρτημάτων που παράγονται σε μία εργασία και στη συνέχεια πολλαπλασιάζεται με το λειτουργικό κόστος του μηχανήματος. Το κόστος

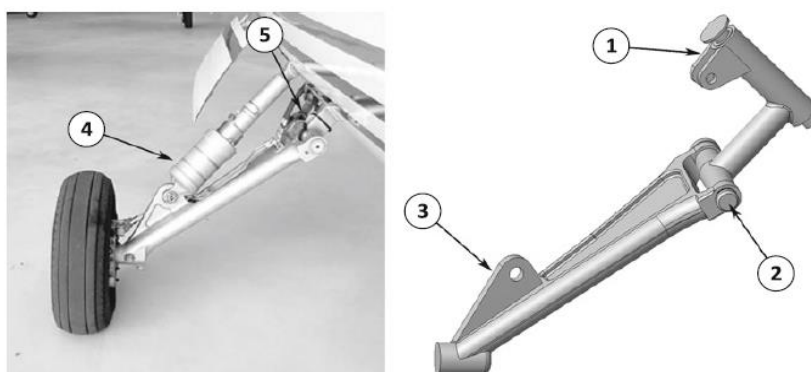
επεξεργασίας είναι ο λόγος του κόστους μηχανήματος ανά κατασκευή με τον αριθμό των μερών που παράγονται.

Το ύψος της δουλειάς και ο χρόνος για να ολοκληρωθεί η συσσώρευση υπολογίζονται από το λογισμικό του μηχανήματος με βάση το αρχείο STL και τον τύπο του μηχανήματος. Επίσης πρέπει να έχουμε πλήρη συντήρηση για να είναι αποδοτικό το μηχάνημα υποθέτοντας 5 χρόνια ωφέλιμης ζωής και σταθερή τεχνική απόσβεσης. Η EOSINT M270 είναι η μηχανή SLS που πραγματοποιεί αυτή η δουλειά. Εκτός αυτού, ο προμηθευτής προτείνει μια μέγιστη χρήση της EOSINT M270 SLS μηχανής για 7000 ώρες, η οποία είναι ισοδύναμη με 80% της συνολικής ώρες ανά έτος. Δεδομένου ότι η μηχανή λειτουργεί αυτόνομα, ο διαχειριστής είναι υπεύθυνος μόνο για τη ρύθμιση και τον έλεγχο καθώς και για τις εργασίες μετά την κατεργασία, όπως η ψύξη, ο καθαρισμός των τμημάτων. Επιπλέον, τα μεταλλικά μέρη τελικά υποβάλλονται σε θερμική θεραπεία. Άρα το κόστος μετά την επεξεργασία είναι ο λόγος του γινόμενου της λειτουργίας της μηχανής με το χρόνο, προσθέτοντας το κόστος θερμικής επεξεργασίας με τον αριθμό των μερών που παράγονται. ( Eleonora Atzeni & Alessandro Salmi)

### 4.1.3 Σύγκριση μεθόδων βασισμένη σε μελέτη περίπτωσης

Για να συγκρίνουν τα κόστη σε αυτές τις δύο μεθόδους τις AM, επιλέχθηκε ως μελέτη περίπτωσης η κατασκευή ενός τμήματος από το κύριο σύστημα προσγείωσης ενός Ιταλικού αεροσκάφους P180 Avant II Piaggio Aero με κλίμακα 1/5, όπως φαίνεται στην εικόνα 1.

Fig. 1 Main landing gear of the Italian aircraft P180 Avant II by Piaggio Aero Industries S.p.A.



Πηγή: Eleonora Atzeni & Alessandro Salmi (2012)

### 4.1.3.1 Παρουσίαση κόστους για κάθε μοντέλο

Η αξιολόγηση του κόστους του συστήματος προσγείωσης βασίζεται σε ένα καλούπι κατασκευαστής. Η εκτίμηση του κόστους λαμβάνει υπόψη τη γεωμετρία των τμημάτων και την ένδειξη του χαμηλού όγκου παραγωγής. Τα στοιχεία του κόστους συνοψίζονται στον πίνακα 3.

Table 3 Costs for high-pressure die-cast part

<i>Production volume</i>	<i>(pcs)</i>	<i>N</i>
Material cost per kg	(EUR/kg)	16.00
Part weight	(kg)	0.162
<i>Material cost per part</i>	<i>(EUR)</i>	<i>2.59</i>
Standard components' cost	(EUR)	1,900
Mould cavities and slides cost	(EUR)	15,400
Ancillary cost	(EUR)	3,700
<i>Mould cost per part</i>	<i>(EUR)</i>	<i>21,000/N</i>
Machine cost per hour	(EUR/h)	260.00
Cycle time	(h)	0.001
Labor cost per hour processing	(EUR/h)	35.00
Percentage of operator time	(%)	10%
<i>Processing cost per part</i>	<i>(EUR)</i>	<i>0.26</i>
Heat treatment cost per part	(EUR)	1.42
Machining operations cost	(EUR)	13.98
Labor cost per hour post processing	(EUR/h)	25.00
Operator time	(h)	0.100
<i>Post-processing cost per part</i>	<i>(EUR)</i>	<i>17.90</i>
<b>Total cost per part</b>	<b>(EUR)</b>	<b>20.75+21,000/N</b>

Πηγή: Eleonora Atzeni & Alessandro Salmi (2012)

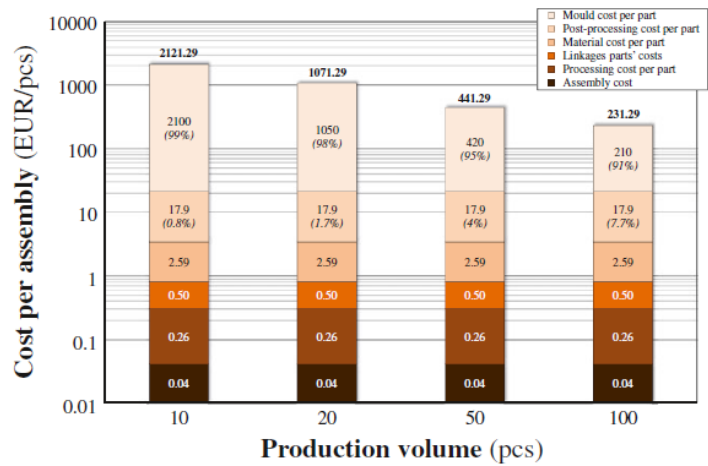
Επιπλέον, η συναρμολόγηση είναι απαραίτητη για την τελειοποίηση του συστήματος προσγείωσης και το κόστος αυτής της ενέργειας είναι 0,04 € / τεμάχιο. Συνεπώς το συνολικό κόστος του συγκροτήματος ως άθροισμα του κόστους συν το κόστος συναρμολόγησης είναι λεπτομερής στον πίνακα 4 και το Σχήμα. 4, συναρτήσσει του μεγέθους της παρτίδας N.

Table 4 Total costs per assembly of the landing gear fabricated by high-pressure die-casting

Wheel truck and major support total cost	(EUR)	20.75+21,000/N
Linkages parts' costs	(EUR)	0.50
Assembly cost	(EUR)	0.04
<b>Total cost per assembly</b>	<b>(EUR)</b>	<b>21.29+21,000/N</b>

Πηγή: Eleonora Atzeni & Alessandro Salmi (2012)

Fig. 4 Costs for high-pressure die-cast part as function of four lot sizes



Πηγή: Eleonora Atzeni & Alessandro Salmi (2012)

Μια από τις δυνατότητες τις ΑΜ, είναι ότι το σύστημα προσγείωσης παράγεται μια φορά, συνεπώς, δεν απαιτείται καμία πρόσθετη λειτουργία συναρμολόγησης. Το συνολικό κόστος παρουσιάζεται λεπτομερώς στον πίνακα 5.

Table 5 Total cost per assembly for selective laser sintering

Numbers of parts produced per job	(-)	4
Material cost per kg	(EUR/kg)	145.00
Part volume	(mm <sup>3</sup> )	0.060
Density of the sintered material	(g/mm <sup>3</sup> )	2.68
Mass of material per part	(kg)	0.178
Material cost per part	(EUR)	25.81
Machine operator cost per hour	(EUR/h)	20.00
Set-up time per build	(h)	1.2
Pre-processing cost per part	(EUR)	8.00
Machine cost per hour	(EUR/h)	35.00
Build time	(h)	54
Machine cost per build	(EUR)	1,890.00
Processing cost per part	(EUR)	472.50
Machine operator cost per hour	(EUR/h)	20.00
Post-processing time per build	(h)	3
Heat treatment cost per build	(EUR)	20.00
Post-processing cost per part	(EUR)	20.00
<b>Total cost per assembly</b>	<b>(EUR)</b>	<b>526.31</b>

Πηγή: Eleonora Atzeni & Alessandro Salmi (2012)

Τα αποτελέσματα αυτής της μελέτης αποδεικνύουν ότι ΑΜ είναι επαρκής για μικρού και μεσαίου μεγέθους παραγωγές. Από αυτή την ανάλυση φαίνεται ότι το κόστος του μηχανήματος είναι ο μεγαλύτερος όρος του κόστους, οι άλλοι παράγοντες επηρεάζουν το κόστος για ένα πολύ χαμηλό ποσοστό. Τέλος όσο μεγαλύτερος είναι ο όγκος παραγωγής τόσο μειώνετε το κόστος για την Hpdc, ενώ για την SLS το κόστος είναι σταθερό και ανεξάρτητο από τον όγκο παραγωγής.

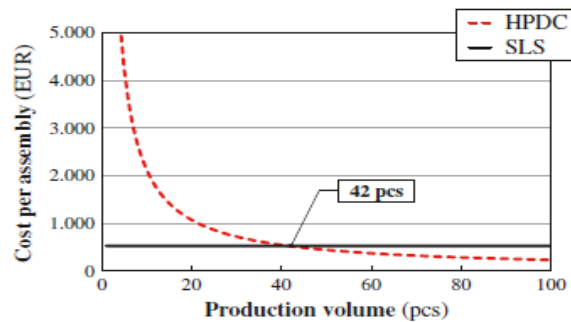


Fig. 5 Breakeven analysis comparing conventional HPDC process with SLS technique

Πηγή: Eleonora Atzeni & Alessandro Salmi (2012)

Στο διάγραμμα παραπάνω μπορούμε να κάνουμε και μια ανάλυση του νεκρού σημείου.

#### 4.1.4 EBM και DMLS

Θα αναλύσουμε την κατασκευή ενός μοντέλου κόστους παραγωγής για δύο διαφορετικές μεθόδους AM την Electron Beam Melting (EBM) και την Direct Metal Laser Sintering (DMLS). Στη συνέχεια, εκτελείται μια σύγκριση μεταξύ τους για να κατανοήσουμε τους καθοριστικούς παράγοντες των δαπανών παραγωγής.

Ο πίνακας παρακάτω συνοψίζει τις δύο πλατφόρμες.

Specifications of the analysed systems.

	Electron Beam Melting (EBM)	Direct Metal Laser Sintering (DMLS)
System model	S12	EOSINT M 270
Beam type	Electron beam	Yb-fibre laser
Beam power	3500 W	200 W
Build material used for this research	Titanium, Ti-6Al-4 V	Stainless Steel, 17-4 PH
Material density	4.43 g/cm <sup>3</sup>	7.78 g/cm <sup>3</sup>
Nominal build volume size, X × Y × Z	250 mm × 250 mm × 200 mm	250 mm × 250 mm × 215 mm
Usable build area, X × Y	200 mm × 200 mm	225 mm × 225 mm
Layer thickness	70 μm	20 μm
Process atmosphere	Vacuum (with the addition of Helium)	Nitrogen
Part retrieval	Automatic separation from steel substrate through thermal expansion	Wire erosion
Manufacturer reference	Arcam AB Arcam AB (2013)	EOS GmbH EOS GmbH (2013)

Πηγή: Martin Baumers, Phill Dickens, Chris Tuck, Richard Hague (2015)

Στο πλαίσιο της αξιολόγησης των οικονομικών επιδόσεων των AM διεργασιών, ιδιαίτερη σημασία πρέπει να δώσουμε στο γεγονός ότι η τεχνολογία είναι ικανή να παράγει πολλαπλά, ενδεχομένως άσχετα μέρη ταυτόχρονα (Ruffo και Hague, 2007). Η ελλιπής χρήση του διαθέσιμου όγκου κατασκευής μπορεί να οδηγήσει σε μη αποδοτική λειτουργία της μηχανής. (Baumers , 2011b). Για να αποφευχθούν τέτοιου είδους αναποτελεσματικότητες, οι εμπορικοί φορείς της εν λόγω τεχνολογίας, στην πράξη προσπαθούν να παρατηρούν όσο το δυνατόν σε μεμονωμένες παρτίδες (Ruffo και Hague, 2007). Ως εκ τούτου, η ανάλυση των οικονομικών επιδόσεων των εν λόγω διαδικασιών απαιτεί προσέγγιση που βασίζεται σε δεδομένα που προέρχονται από κατασκευαστικές διαμορφώσεις στις οποίες χρησιμοποιείται η διαθέσιμη χωρητικότητα πλήρως. Για να επιτευχθεί αυτό, χρησιμοποιείται ένας υπολογιστικός αλγόριθμος κατασκευής, (Baumers et al., 2013), όπως συνοψίζεται γραφικά στο Σχήμα 1.

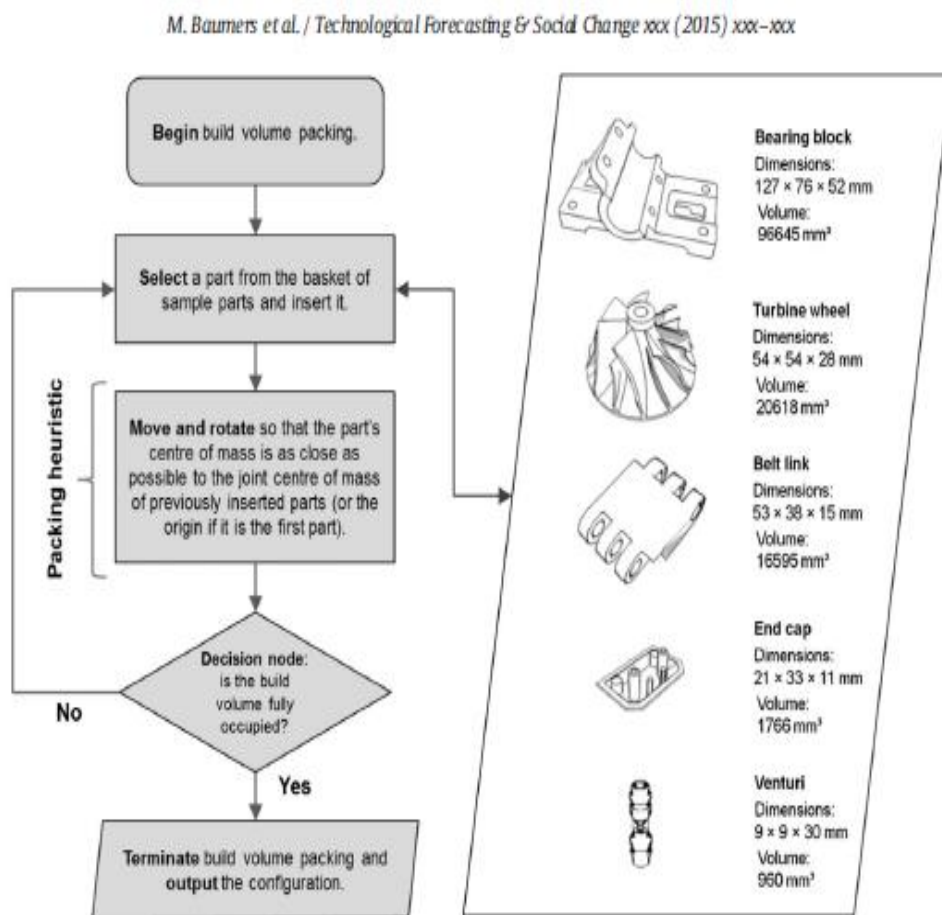


Fig. 1. Flow chart of the packing algorithm and a summary of the test parts, adapted from (Baumers et al., 2013).

Πηγή: Martin Baumers, Phill Dickens, Chris Tuck, Richard Hague (2015)



Το παρόν μοντέλο διασφαλίζει ότι οι εργασίες κατασκευής παρέχουν τα δεδομένα επαρκώς και με συνεπή βαθμό απόδοσης, ο αλγόριθμος αντλεί τα μέρη από ένα καλάθι με αντιπροσωπευτικά τμήματα της δοκιμής. Αυτές οι πέντε γεωμετρικές δοκιμές, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 1, έχουν σχεδιαστεί για να είναι αντιπροσωπευτικά των τμημάτων που κατασκευάζονται χρησιμοποιώντας μεταλλικές διαδικασίες όπως η EBM και η DMLS. Και στα δύο συστήματα σύντηξης στρώματος σκόνης που ερευνήθηκαν, τα εισαγόμενα μέρη πρέπει να συνδέονται με την πλατφόρμα κατασκευής των συστημάτων, είτε με άμεση τοποθέτηση είτε μέσω των δομών αγκίστρωσης (Mumtaz και Hopkinson, 2011). Είναι σημαντικό να επισημανθεί ότι, ενώ τα τμήματα περιέχονται στα ψηφιακά σχέδια 3D (CAD), χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικά υλικά και διαδικασίες κατά την κατασκευή. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε ανεπιθύμητες διακυμάνσεις όσον αφορά τις επιδόσεις των μηχανικών και τις γεωμετρικές ανοχές. Ως εκ τούτου, ο αλγόριθμος συσκευασίας χρησιμοποιείται ως ρυθμιστής σε μια λειτουργία τακτοποίησης εξαρτημάτων πάνω στην X / Y πλατφόρμα κατασκευής.

Το παρουσιαζόμενο μοντέλο κόστους βασίζεται στο πραγματικό βάρος των τμημάτων που δημιουργούνται κατά τη διάρκεια των πειραμάτων σχετικά με την κατασκευή DMLS. Επομένως, το υλικό που καταναλώνεται για τη δημιουργία της δομής αγκίστρωσης λαμβάνεται υπόψη. Το Σχήμα 2 δείχνει τις πλατφόρμες διαμόρφωσης που παράγονται και για τα δύο συστήματα που χρησιμοποιούν τον αλγόριθμο συσκευασίας.

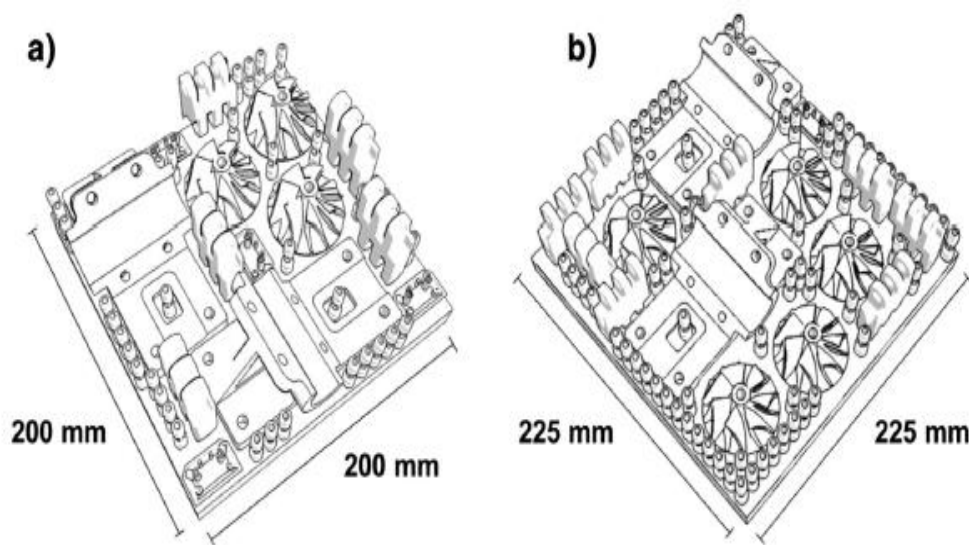


Fig. 2 Full capacity utilisation for EBM (a) and DMLS (b).

Πηγή: Martin Baumers, Phill Dickens, Chris Tuck, Richard Hague (2015)

Ο πίνακας στη συνέχεια, συνοψίζει τη σύνθεση της πλήρους κατασκευής που φαίνεται στο Σχήμα 2 και δείχνει τις επιδόσεις του αλγορίθμου συσκευασίας από την άποψη της αναλογίας των κατεχομένων με το διαθέσιμο εμβαδόν του δαπέδου του όγκου κατασκευής. Σημειώνεται ότι αυτό το δισδιάστατο μέτρο δεν αντικατοπτρίζει την αξιοποίηση του διαθέσιμου όγκου κατασκευής. Τα μέτρα όγκου κατασκευής κατοχής (93,00% έναντι 92,59%) δείχνουν ότι ο αλγόριθμος συσκευασίας όγκου κατασκευής έχει εξαντλήσει τη διαθέσιμη χωρητικότητα σχεδόν εξίσου καλά και στα δύο συστήματα.

Composition of the build experiments.

	Total parts contained	Bearing block	Turbine wheel	Belt link	End cap	Venturi	Ratio of occupied build volume floor voxels
EBM (Arcam S12)	53	2	3	5	4	39	93.00%
DMLS (EOSINT M270) (Baumers et al, 2013)	85	2	5	8	1	69	92.59%

Πηγή: Martin Baumers, Phill Dickens, Chris Tuck, Richard Hague (2015)

Βάσει αυτών των δύο διαμορφώσεων κατασκευής, συνολικού δομημένου χρόνου  $T_{Build}$  (συμπεριλαμβανομένου του συστήματος εκκίνησης και κλεισίματος) και συνολικής κατανάλωσης ενέργειας  $E_{Build}$  (συμπεριλαμβανομένης της διαδικασίας ψύξης) είναι πειραματικά μετρούμενα για το σύστημα EBM χρησιμοποιώντας ένα Yokogawa CW240 ψηφιακό σύστημα παρακολούθησης της ηλεκτρικής ενέργειας. Οι αντίστοιχες εκτιμήσεις για το σύστημα DMLS λαμβάνονται από προηγούμενη μελέτη χρησιμοποιώντας την ίδια μεθοδολογία (Baumers,2013).

#### 4.1.4.1 Κατασκευή μοντέλου κόστους

Καθώς η AM είναι ένα κεφάλαιο βαριάς κατασκευαστικής τεχνολογίας, ο χρόνος αποτελεί σημαντικό παράγοντα κόστους κατασκευής. Ως εκ τούτου, η προσέγγιση που χρησιμοποιήθηκε σε αυτή την έρευνα ήταν επαυξημένη με την προσθήκη της λειτουργικότητας συσκευασίας όγκου κατασκευής για να διαμορφώσει βιομηχανική χρήση της τεχνολογίας για την παράλληλη κατασκευή πολλαπλών και ενδεχομένως άσχετων προϊόντων. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό όταν γίνονται συγκρίσεις σχετικά με την απόδοση της διαδικασίας AM.

Το μοντέλο κόστους που χρησιμοποιήθηκε στηρίζεται σε δύο άμεσες δαπάνες της κατασκευής, το κόστος των πρώτων υλών και την κατανάλωση ενέργειας, τα οποία συνδυάζονται με το συνολικό έμμεσο (εξαρτώμενη από τον χρόνο) δαπάνες κατά τη διάρκεια της κατασκευής. Το συνολικό κόστος ( $C_{Build}$ ) της κατασκευής μπορεί να εκφραστεί ως:

$$C_{Build} = (\dot{C}_{Indirect} \times T_{Build}) + (m \times Price_{Raw\ material}) + (E_{Build} \times Price_{Energy}) \quad (1)$$

Πηγή: Martin Baumers, Phill Dickens, Chris Tuck, Richard Hague (2015)

όπου  $C_{indirect}$  είναι το συνολικό ποσοστό των έμμεσων δαπανών, το  $T_{Build}$  είναι ο χρόνος κατασκευής, όμως όσον αφορά την EBM συμπεριλαμβάνεται και ο χρόνος εκκίνησης του συστήματος αλλά και ο χρόνος που απαιτείται ώστε να κρυώσει το μηχάνημα στο τέλος. Ο χρόνος αποτελεί σημαντικό παράγοντα του κόστους παραγωγής, το  $m$  είναι η μάζα του υλικού, το  $Price_{Raw\ material}$  είναι η τιμή της μεταλλικής σκόνης, το  $E_{Build}$  είναι η κατανάλωση ενέργειας, όσον αφορά την EBM συμπεριλαμβάνεται και η διαδικασία ψύξης και τέλος το  $Price_{Energy}$  είναι η τιμή της ενέργειας.

Data used in the cost model

	EBM		DMLS	
<i>Production overhead*</i>				
Rent, building area cost	4.53		£/h	
<i>Administration overhead*</i>				
Hardware purchase	1,670.27		£	
Software purchase	1,670.27		£	
Hardware cost/year	334.05		£	
Software cost/year	334.05		£	
Consumables per year	1,113.52		£	
Total administration overhead	0.31		£/h	
<i>Production labour*</i>				
Technician annual salary	25,165.45		£	
Employer contributions	22.00		%	
Total production labour	6.14		£/h	
<i>Utilization*</i>				
Utilization rate	57.04		%	
Annual machine operating hours	5,000.00		h	
<i>Equipment depreciation*</i>				
AM equipment and wire eroder	8		Years	
Hardware and software	5		Years	
<i>Machine costs</i>				
Machine purchase	348,772.73	£	364,406.80	£
Machine purchase cost per year	43,596.59	£	45,550.85	£
Maintenance per year	27,758.69	£	22,033.90	£
Consumables per year	5,783.06	£	2,542.37	£
Wire erosion machine purchase			55,000.00	£
Total wire erosion costs per year			8,165.00	£
Total machine costs per year	77,138.34	£	78,292.12	£
Total machine costs	15.43	£/h	15.66	£/h
Total indirect costs per machine hour ( $\dot{C}_{indirect}$ )	<b>26.41</b>	<b>£/h</b>	<b>26.64</b>	<b>£/h</b>
Direct cost for build material powder ( $Price_{Raw\ material}$ )	<b>156.97</b>	<b>£/kg</b>	<b>78.81</b>	<b>£/kg</b>
Direct electricity costs ( $Price_{Energy}$ )	<b>0.018</b>	<b>£/MJ</b>	<b>0.018</b>	<b>£/MJ</b>

\*Adapted from Ruffo et al (Ruffo and Hague, 2007), converted into 2010 pounds sterling (£).

Πηγή: Martin Baumers, Phill Dickens, Chris Tuck, Richard Hague (2015)

Ο παραπάνω πίνακας συνοψίζει τα δημοσιευμένα στοιχεία που χρησιμοποιούνται σε αυτή την σύγκριση. Όπως μπορεί να φανεί, ένας αριθμός εξόδων είναι ίδιος μεταξύ των δύο συστημάτων, όπως τα γενικά έξοδα, το εργατικό δυναμικό, η περίοδος απόσβεσης και τα ποσοστά χρησιμοποίησης. Σημειώστε ότι όλα τα δεδομένα χρηματικού κόστους που χρησιμοποιούνται εκφράζονται σε λίρες (στερλίνα £) του 2010. Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι το μοντέλο κόστους αυτού του τύπου αποκλειστικά αντικατοπτρίζει αυτό που μπορεί να οριστεί ως καλά δομημένο κόστος (Son, 1991). Οι κακώς δομημένες δαπάνες που σχετίζονται με την ποιότητα, την κατασκευαστική αποτυχία και τα logistics, τα οποία μπορεί να είναι σχετικά με το πλαίσιο της AM (Bourell, 2009), εξαιρούνται από την ανάλυση.

#### 4.1.4.2 Παρουσίαση των πειραματικών αποτελεσμάτων

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του πειράματος κατασκευής σχετικά με το σύστημα EBM και τα συγκρίνει με τα στοιχεία όμοια της προηγούμενης έρευνας σχετικά με την πλατφόρμα DMLS (Baumers, 2013). Λεπτομέρειες σχετικά με τα στοιχεία που αφορούν το χρόνο κατασκευής και την κατανάλωση ενέργειας φαίνονται στον επόμενο πίνακα, μαζί με εκτιμήσεις του πλήρους κόστους των δύο χτισμάτων, που υπολογίζονται σύμφωνα με το παραπάνω μοντέλο κόστους (Εξίσωση (1)).

Build time, energy consumption and cost results.

Category	Break down	unit	EBM	DMLS Arcam (2013)
Build time	Warm up (h)	h	1.69	0.02
	Build time (h)	h	20.97	107.77
	Cool down (h)	h	2.99	N/A
	Total build time, $T_{Build}$ (h)	h	25.65	107.79
Energy	Energy consumed, $E_{Build}$ (MJ)	MJ	200.80	917.10
Indirect costs	Production overhead	£	116.19	488.27
	Administration overhead	£	7.95	33.41
	Production labour*	£	157.49	661.81
	Machine costs	£	395.78	1511.75
	Wire eroder costs	£	N/A	176.02
Direct costs	Raw material costs	£	278.78	328.40
	Electricity costs	£	3.61	16.51
Total cost of build, $C_{Build}$		£	959.81	3218.87

\*Assuming 100% operator attendance during the build process (Ruffo and Hague, 2007).

Πηγή: Martin Baumers, Phill Dickens, Chris Tuck, Richard Hague (2015)

Να σημειωθεί ότι, ενώ για την EBM είναι ουσιαστική η διαδικασία εκκίνησης και κλεισίματος του συστήματος (warm up and cool down), για την DMLS πλατφόρμα δεν απαιτείται, ο συνολικός χρόνος κατασκευής  $T_{Build}$  που μετρήθηκε στο σύστημα EBM ήταν πολύ μικρότερος (25.65 h έναντι 107,79 h). Αντίστοιχα, η συνολική ενέργεια που καταναλώνεται,  $E_{Build}$ , κατά τη διάρκεια του πειράματος πλήρης κατασκευής ήταν επίσης σημαντικά χαμηλότερη (200,80 MJ έναντι 917,10 MJ). Η EBM πλεονεκτεί και σε ταχύτητα, οπότε οδηγεί σε μια μικρότερη συσσώρευση ώρας, (20.97 h έναντι 107,77 h), και σε αποτελέσματα με ένα υψηλότερο ποσοστό κατασκευής, ( $15.63 \text{ cm}^3 / \text{h}$  έναντι  $4,83 \text{ cm}^3 / \text{h}$ ). Αυτό μπορεί να αποτελέσει και την κεντρική αιτία για χαμηλότερο συνολικό κόστος και κατανάλωση ενέργειας.

Δύο περαιτέρω παρατηρήσεις θα πρέπει να γίνουν σε αυτό το σημείο. Σε αντίθεση με το σύστημα DMLS, η EBM δεν απαιτεί βοηθητικό σύρμα διαδικασίας διάβρωσης για να αφαιρεθούν τα εξαρτήματα από το υπόστρωμα αφότου η συσσώρευση είναι πλήρης. Επιπλέον, η χαμηλή πυκνότητα του υλικού Τί-6Al-4 V που χρησιμοποιείται ( $\rho = 4,43 \text{ g} / \text{cm}^3$ ) έχει επίσης οδηγήσει σε συγκριτικά μέτριο κόστος πρώτων υλών, παρά το υψηλό ειδικό κόστος του υλικού (156,97 £ / kg).

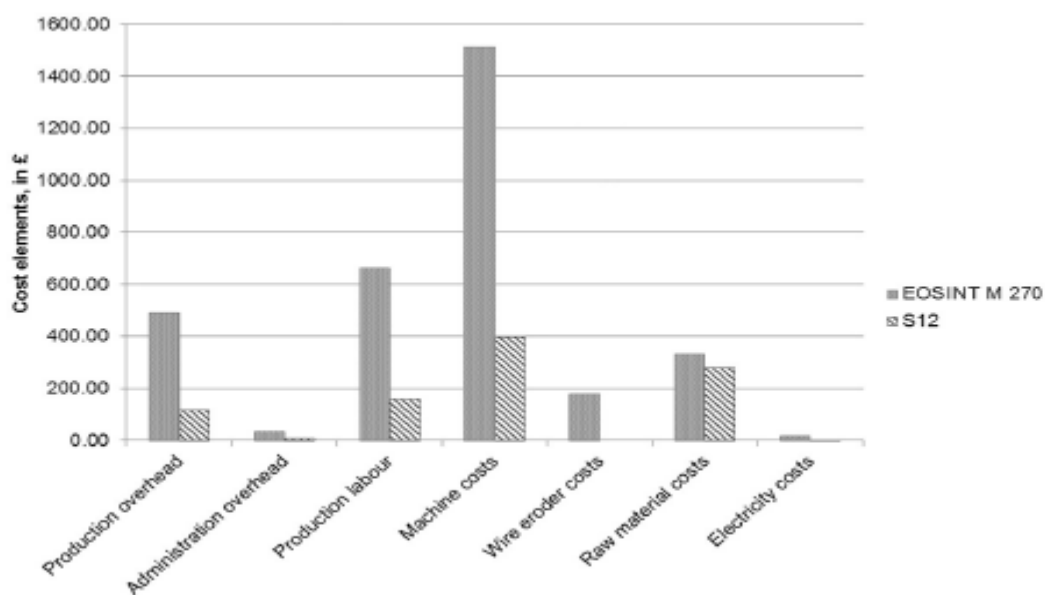


Fig. 3. Costs of EBM (S12) and DMLS (EOSINT M 270) broken down.

Πηγή: Martin Baumanns, Phill Dickens, Chris Tuck, Richard Hague (2015)

Το σχήμα 3 διαχωρίζει το συνολικό κόστος και των δύο πειραμάτων κατασκευής σε γραφική μορφή, που απεικονίζει την κυριαρχία του κόστους μηχανής για τα δύο συστήματα, τα οποία είναι εξαρτημένα από τον κατασκευαστικό χρόνο.

Το πείραμα που πραγματοποιήθηκε σε συσσώρευση του EBM συστήματος, οδήγησε σε συνολικό ειδικό κόστος 2,39 £ / cm<sup>3</sup> το οποίο είναι πολύ χαμηλότερο από το αποτέλεσμα για την DMLS 6,18 £ / cm<sup>3</sup>.

Σε αυτό το σημείο, ένα αργό, αλλά ενδιαφέρον, μέτρο επεξήγησης της αποτελεσματικότητας των δύο τεχνολογιών κατά την παραγωγή των πρώτων υλών και της ενέργειας σε προϊόντα είναι ο λόγος  $r$  όλων των άμεσων δαπανών προς το σύνολο του κόστους,  $C_{Build}$ , ο οποίος έχει την μορφή:

$$r = \frac{(w \times Price_{Raw\ material}) + (E_{Build} \times Price_{Energy})}{C_{Build}} \quad (2)$$

Πηγή: Martin Baumers, Phill Dickens, Chris Tuck, Richard Hague (2015)

Για τα πειραματικά αποτελέσματα που επιτεύχθηκαν στην EBM, έχουμε  $r = 0,42$ . Αυτή η αναλογία εμφανίζεται λιγότερο ευνοϊκή για την DMLS, με  $r = 0,12$ , γεγονός που υποδηλώνει είναι λιγότερο αποτελεσματική στη μετατροπή των πρώτων υλών και της ενέργειας σε προϊόντα.

Το μοντέλο κόστους που κατασκευάστηκε για την EBM και την DMLS καταδεικνύει την παραγωγικότητα της μηχανής ως κύρια κινητήρια δύναμη της ανά μονάδα κόστους παραγωγής. Η έρευνα αυτή έχει μετρήσει χαμηλά ποσοστά διαδικασίας, που κυμαίνονται από 37,58 g / h (DMLS) έως 69,24 g / h (EBM), τα οποία είναι σημαντικά χαμηλότερα από εκείνα που αναφέρονται στις συμβατικές τεχνολογίες παραγωγής (Gutowski, 2009).

## 4.2 Ανάλυση της ταχείας κατασκευής (RP)

Η ανάλυση κόστους πραγματοποιήθηκε σε ένα τρόπο που υποτίθεται ότι τα κριτήρια της παραγωγής μπορούν να εφαρμοστούν σε μηχανές RP. Επίσης, χρησιμοποιώντας το μηχάνημα RP για την παραγωγή σημαίνει ότι η προ-επεξεργασία χρόνου, όπως μέρος προσανατολισμού και τοποθέτηση, μειώνεται καθώς θα χρησιμοποιηθούν στάνταρ κατασκευές. Υποτίθεται ότι μια μηχανή RP θα πετύχαινε το 90% χρόνο λειτουργίας (όπως θα πετύχαινε και μια μηχανή injection moulding) εάν χρησιμοποιούνταν για την παραγωγή. Αυτή είναι μια δίκαιη υπόθεση, δεδομένου ότι σήμερα χρησιμοποιούν μηχανές RP για μεγάλες παραγωγές σε όγκο και πετυχαίνουν υψηλά επίπεδα χρόνου λειτουργίας.

Τα υψηλά κόστη που σχετίζονται με τις μηχανές, τη συντήρηση και τα υλικά για τις RP διαδικασίες αποτελούν πιθανόν προς το παρόν τα μεγαλύτερα εμπόδια στην RM. Οι οικονομίες κλίμακας σε συνδυασμό με τα υψηλά κόστη Έρευνας και Ανάπτυξης έχουν καταστήσει την RP βιομηχανία ως περιοχή υψηλού κόστους από την έναρξή της. Ωστόσο, η αύξηση της υιοθέτησης της τεχνολογίας έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του κόστους, με την είσοδο νέων μηχανημάτων στην αγορά σε χαμηλότερες τιμές. Μέχρι να γίνει πρότυπο η RP τεχνολογία, τα κόστη συντήρησης θα παραμένουν σχετικά υψηλά.

Κατά τη διάρκεια των αρχικών υπολογισμών κόστους διαπιστώθηκε ότι παράγοντες όπως η κατανάλωση ενέργειας της μηχανής και η ενοικίαση χώρου συμβάλλουν ένα μικρό μέρος στο συνολικό τελικό κόστος (λιγότερο από 1%) οπότε και δεν έχουν συμπεριληφθεί.

Τα κόστη για την παραγωγή εξαρτημάτων με διεργασίες RP αναλύονται σε:

- (α) κόστη μηχανής
- (β) κόστη εργασίας
- (γ) κόστη υλικών

Για να υπολογιστεί το κόστος παραγωγής εξαρτημάτων από την RM υπέθεσαν ότι μια μηχανή παράγει ένα μέρος με συνέπεια για 1 έτος, αν και ένα από τα πλεονεκτήματα της RM είναι η ικανότητά της να παράγει ταυτόχρονα πολλά μέρη, δηλαδή ένα πλήρες σύνολο, σε ένα μοναδικό μηχάνημα.

Παρακάτω στον πίνακα 1 παρουσιάζονται οι κατασκευαστικοί παράμετροι και τα κόστη μηχανήματος που ήταν απαραίτητα για να διατυπωθεί το συνολικό κόστος μηχανήματος ανά τμήμα που παράγεται από κάθε μία από τις διεργασίες RP. Τα κόστη για τον βοηθητικό εξοπλισμό ποικίλλουν ανάλογα με την τοποθεσία. Τα επιπλέον κόστη για τις μηχανές RP παίζουν μόνο ένα πολύ μικρό ποσοστό στη συνολική τιμή για τα μηχανήματα, για αυτό το λόγο, μόνο τα βασικά κόστη μηχανήματος έχουν χρησιμοποιηθεί.



**Table 1** Calculation of machine costs

	Source of cost	
	Variable	Obtained by
Number per platform	$N$	Maximum possible in one build
Platform build time	$T$	Hours
Production rate per hour	$R$	$N/T$
Hours per year in operation	HY	$365 \times 24 \times 90\% = 7884$
Production volume total per year	$V$	$R \times 7884$
<i>Machine costs</i>		
Machine and ancillary equipment	$E$	Machine purchase cost
Equipment depreciation per year	$D$	$E/8$
Machine maintenance per year	$M$	Most comprehensive package
Total machine cost per year	MC	$D + M$
Machine cost per part	MCP	$MC/V$

Πηγή: HOPKINSON N and DICKENS P.M. (2003)

Στη συνέχεια ο πίνακας 2 δείχνει τις κατασκευαστικές παραμέτρους και τα κόστη εργασίας που χρειάστηκαν για να διατυπωθούν οι δαπάνες εργασίας ανά τμήμα για κάθε διαδικασία RP.

**Table 2** Calculation of labour costs

	Source of cost	
	Variable	Obtained by
Number per platform	$N$	Maximum possible in one build
Platform build time	$T$	Hours
Production rate per hour	$R$	$N/T$
Hours per year in operation	HY	$365 \times 24 \times 90\% = 7884$
Production volume total per year	$V$	$R \times HY$
<i>Labour costs</i>		
Machine operator cost per hour	Op	Minimum wage 5.30 euros
Set-up time to control machine	Set	Timed
Post-processing time per build	Post	Timed
Labour cost per build	$L$	$Op \times (Set + Post)$
Labour cost per part	LCP	$L/N$

Πηγή: HOPKINSON N and DICKENS P.M. (2003)

Η μέθοδος για τον υπολογισμό του κόστους υλικών για κάθε διαδικασία παρουσιάζεται στον Πίνακα 3. Η διαφορετική φύση των τριών διαδικασιών RP



απαιτούν τη χρήση ελαφρώς διαφορετικών τρόπων υπολογισμού του κόστους υλικών. Για την SL, αρκούσε να ζυγίσουν ολοκληρωμένα μέρη συμπεριλαμβανομένου και της συντήρησης, προκειμένου να υπολογιστεί το κόστος των υλικών. Στην περίπτωση FDM αρκεί να ζυγίσουν τα μέρη και τη συντήρηση ξεχωριστά και στη συνέχεια να πολλαπλασιάσουν με το σχετικό κόστος υλικών. Για την LS απαιτείται ένα πιο πολύπλοκο σύστημα δηλαδή θεωρήθηκε ότι κανένα υλικό δεν έπρεπε να ανακυκλωθεί για να εξασφαλιστεί σταθερή ποιότητα μερών.

**Table 3** Calculation of material costs for each process

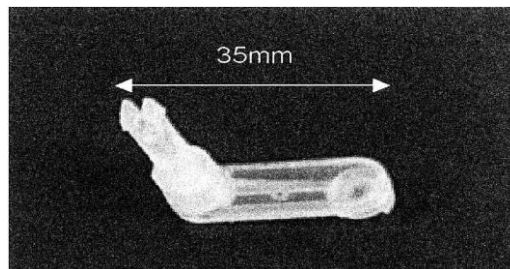
	Source of cost	
	Variable	Obtained by
Number per platform	$N$	Maximum possible in one build
<i>Material costs for SL</i>		
Material per part including support (kg)	SLMass	Weighing finished parts
Material cost per kg	SLcost	Quote = 275.20 euros
Material cost per SL part	SLMCP	SLMass $\times$ SLcost
<i>Material costs for FDM</i>		
Material per part (kg)	FDMPM	Weighing finished parts
Support material per part (kg)	FDMSM	Weighing finished supports
Build material cost per kg	FDMPC	Quote = 400.00 euros
Support material cost per kg	FDMSC	Quote = 216.00 euros
Material cost per FDM part		(FDMPM $\times$ FDMPC) + (FDMSM $\times$ FDMSC)
<i>Material costs for LS</i>		
Material cost per kg	LSC	Quote = 54.00 euros
Mass of each part	LSM	Weighing finished parts
Volume of each part	VP	Found with Magics software
Total build volume	TBV	$34 \times 34 \times 60 \text{ cm}^3$
Mass of sintered material per build	LSMS	$N \times \text{LSM}$
Mass of unsintered material per build	LSMU	$(\text{TBV} - N \times \text{VP}) \times 0.475^*$
Cost of material used in one build	LSMC	$(\text{LSMU} + \text{LSMS}) \times \text{LSC}$
Material cost per LS part	LSMCP	LSMC/ $N$

\* Published density of unsintered LS powder is  $0.45\text{--}0.5 \text{ g/cm}^3$  [11].

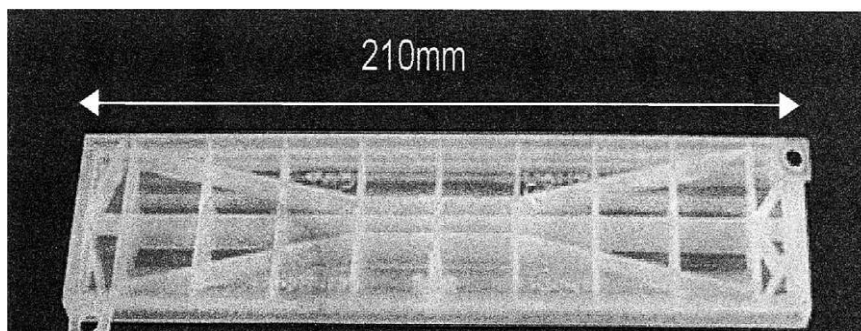
Πηγή: HOPKINSON N and DICKENS P.M. (2003)

Κατά γενικό κανόνα, οι τεχνικές RP είναι κατάλληλες για να δημιουργούν μικρά κομμάτια με πολλές γεωμετρίες και αυτό προτείνει αμέσως την εστίαση της RM για μικρούλια προϊόντα. Επιλέχθηκε ένα μέρος που ήταν μικρό και είχε σύνθετη γεωμετρία (βλ. Εικ. 1). Για λόγους σύγκρισης, το δεύτερο μέρος ήταν μεσαίου μεγέθους και σύνθετης γεωμετρίας (βλέπε Εικ. 2). Μια υπόθεση θα μπορούσε να προβλέπει ότι τα μικρότερα τμήματα θα πρέπει να είναι πιο κατάλληλα για την RM λόγω του μεγέθους τους.

Εικ. 1. Μικρό lever μέρος που επιλέχθηκε για την ανάλυση κόστους



Εικ. 2. Μεσαίου-μεγέθους cover μέρος που επιλέχθηκε για την ανάλυση κόστους



Τα αποτελέσματα του πειράματος με κάθε μέθοδο παρουσιάζονται παρακάτω:

#### A. Injection moulding (χύτευση με έγχυση)

Τα κόστη για τη χύτευση με έγχυση ελήφθησαν με παράθεση και συνοψίζονται στον Πίνακα 4. Μπορεί να φανεί ότι το κόστος του εργαλείου ξεπερνά κατά πολύ το κόστος ανά μονάδα για κάθε πρόσθετο τμήμα. Επίσης, το εργαλείο για το cover δεν είναι σημαντικά υψηλότερο από εκείνο για το lever, παρά το γεγονός ότι είναι πολύ μεγαλύτερο. Το κόστος της μονάδας για κάθε χύτευση είναι σχεδόν ίσο καθώς τα μέρη του lever ήταν φορμαρισμένα σε πολυανθρακικό, το οποίο είναι πιο ακριβό από το πολυπροπυλένιο που χυτεύθηκαν τα τμήματα του cover.

**Table 4** Costs for injection moulding

	Part name	
	Lever	Cover
Tool cost (euro)	27 360	32 100
Unit cost (euro)	0.23	0.21

Πηγή: HOPKINSON N and DICKENS P.M. (2003)

## B. Stereolithography

Ο Πίνακας 5 δείχνει τις κατασκευαστικές παραμέτρους και το κόστος που συνδέονται με την SL κατά την κατασκευή και των δύο μερών σε ένα μηχάνημα SLA7000. Μια πιο λεπτομερής ανάλυση κόστους για την SL μπορεί να φανεί στον Πίνακα 6. Το μέρος του lever κοστίζει περίπου το 1/10 του cover και στις δύο περιπτώσεις το μεγαλύτερο μέρος του κόστους (70%) αποδίδεται στο κόστος μηχανήματος. Το υλικό κόστος περιλαμβάνει περίπου 30% του κόστους για κάθε τμήμα και η εργασία είναι αμελητέα.

**Table 5** Costs for producing parts by stereolithography

	Part name	
	Lever	Cover
Number per platform	190	22
Machine cost per part (euro)	3.92	31.22
Labour cost per part (euro)	0.04	0.39
Material cost per part (euro)	1.29	15.16
Total cost per part (euro)	5.25	46.78

Πηγή: HOPKINSON N and DICKENS P.M. (2003)

**Table 6** Detailed cost breakdown for stereolithography

	Part name	
	Lever	Cover
Number per platform	190	22
Platform build time (h)	26.80	24.73
Production rate per hour ( $\text{h}^{-1}$ )	7.09	0.89
Hours per year in operation (h)	7884	7884
Production volume total per year	55 894	7014
<i>Machine costs</i>		
Machine and ancillary equipment (euro)	1 040 000	1 040 000
Equipment depreciation cost per year (euro)	130 000	130 000
Machine maintenance cost per year (euro)	89 000	89 000
Total machine cost per year (euro)	219 000	219 000
Machine cost per part (euro)	3.92	31.22
<i>Labour costs</i>		
Machine operator cost per hour (euro)	5.30	5.30
Set-up time to control machine (min)	33	30
Post-processing time per build (min)	49	68
Labour cost per build (euro)	7.24	8.65
Labour cost per part (euro)	0.04	0.39
<i>Material costs</i>		
Material per part including support (kg)	0.0047	0.0551
Material cost per kg (euro)	275.20	275.20
Material cost per part (euro)	1.29	15.16
<b>Total cost per part (euro)</b>	<b>5.25</b>	<b>46.78</b>

Πηγή: HOPKINSON N and DICKENS P.M. (2003)

### Γ. Fused deposition modelling (FDM)

Ο Πίνακας 7 δείχνει τις κατασκευαστικές παραμέτρους και το κόστος που συνδέονται με την FDM κατά την κατασκευή και των δύο μερών ABS σε FDM 2000 μηχανή. Μια πιο λεπτομερής ανάλυση κόστους για την FDM μπορεί να φανεί στον Πίνακα 8. Το συνολικό κόστος για την FDM είναι ελαφρώς χαμηλότερο από εκείνο που βρέθηκε με την SL. Όπως και με SL, το τμήμα lever κοστίζει περίπου το 1/10 του cover και στις δύο περιπτώσεις η πλειοψηφία του κόστους (50-60%) αποδίδεται στο κόστος μηχανής. Όπως και με SL, το εργατικό κόστος είναι αμελητέο. Ωστόσο, το υλικό κόστος είναι υψηλότερο από ό,τι εκείνο για την SL.

**Table 7** Costs for producing parts by fused deposition modelling

	Part name	
	Lever	Cover
Number per platform	75	4
Machine cost per part (euro)	2.64	23.12
Labour cost per part (euro)	0.08	0.33
Material cost per part (euro)	1.75	21.83
<b>Total cost per part (euro)</b>	<b>4.47</b>	<b>45.28</b>

**Table 8** Detailed cost breakdown for fused deposition modelling

	Part name	
	Lever	Cover
Number per platform	75	4
Platform build time (h)	67.27	31.40
Production rate per hour ( $h^{-1}$ )	1.11	0.13
Hours per year in operation (h)	7884	7884
Production volume total per year	8790	1004
<i>Machine costs</i>		
Machine and ancillary equipment (euro)	101 280	101 280
Equipment depreciation cost per year (euro)	12 660	12 660
Machine maintenance cost per year (euro)	10 560	10 560
Total machine cost per year (euro)	23 220	23 220
Machine cost per part (euro)	2.64	23.12
<i>Labour costs</i>		
Machine operator cost per hour (euro)	5.30	5.30
Set-up time to control machine (min)	10	10
Post-processing time per build (min)	60	5
Labour cost per build (euro)	6.18	1.32
Labour cost per part (euro)	0.08	0.33
<i>Material costs</i>		
Material per part (kg)	0.0035	0.04
Support material per part (kg)	0.0016	0.027
Build material cost per kg (euro)	400.00	400.00
Support material cost per kg (euro)	216.00	216.00
Material cost per part (euro)	1.75	21.83
<b>Total cost per part (euro)</b>	<b>4.47</b>	<b>45.28</b>

Πηγή: HOPKINSON N and DICKENS P.M. (2003)

#### Δ. Laser sintering (LS)

Ο Πίνακας 9 δείχνει τις κατασκευαστικές παραμέτρους και το κόστος που συνδέονται με το LS κατά την κατασκευή του lever μέρους σε νάιλον σε ένα μηχάνημα EOSP360. Μια πιο λεπτομερής κατανομή κόστους για την LS φαίνεται στον πίνακα 10. Τα μέρη του cover δεν φτιάχτηκαν από το LS. Τα κόστη για την LS φαίνεται να είναι αισθητά φθηνότερα από εκείνα για την SL και την FDM. Στην περίπτωση LS, το υλικό παρέχει το υψηλότερο κόστος καθώς θεωρήθηκε ότι κανένα από το μη πυροσυσσωματωμένο υλικό θα μπορούσε να ανακυκλωθεί. Η στενή επιθεώρηση του Πίνακα 10 δείχνει ότι μόνο το πυροσυσσωματωμένο υλικό περιελάμβανε 1/10 του υλικού που χρησιμοποιείται για το lever. Το κόστος του μηχανήματος για την LS είναι

χαμηλότερο από ό, τι για τις άλλες διαδικασίες, κυρίως επειδή το μηχάνημα είναι ικανό να κατασκευάσει ένα υψηλότερο αριθμό τμημάτων στοιβάζοντάς τα κάθετα και επειδή το κατασκευαστικό ποσοστό είναι υψηλότερο.

**Table 9** Costs for producing parts by laser sintering

	Part name	
	Lever	Cover
Number per platform	1056	—
Machine cost per part (euro)	0.52	—
Labour cost per part (euro)	0.04	—
Material cost per part (euro)	1.63	—
<b>Total cost per part (euro)</b>	<b>2.20</b>	<b>—</b>

Πηγή: HOPKINSON N and DICKENS P.M. (2003)

**Table 10** Detailed cost breakdown for laser sintering

	Part name	
	Lever	Cover
Number per platform	1056	—
Platform build time (h)	59.78	—
Production rate per hour ( $h^{-1}$ )	17.66	—
Hours per year in operation (h)	7884	—
Production volume total per year	139269	—
<i>Machine costs</i>		
Machine and ancillary equipment (euro)	340000	—
Equipment depreciation cost per year (euro)	42500	—
Machine maintenance cost per year (euro)	30450	—
Total machine cost per year (euro)	72950	—
Machine cost per part (euro)	0.52	—
<i>Labour costs</i>		
Machine operator cost per hour (euro)	5.30	—
Set-up time to control machine (min)	120	—
Post-processing time per build (min)	360	—
Labour cost per build (euro)	42.37	—
Labour cost per part (euro)	0.04	—
<i>Material costs</i>		
Material cost per kg (euro)	54	—
Mass of each part (kg)	0.0036	—
Volume of each part ( $cm^3$ )	4.3	—
Mass of sintered material per build (kg)	3.8016	—
Mass of unsintered material per build (kg)	32	—
Cost of material used in one build (euro)	1725.72	—
Material cost per part (euro)	1.63	—
<b>Total cost per part (euro)</b>	<b>2.20</b>	<b>—</b>

Πηγή: HOPKINSON N and DICKENS P.M. (2003)

Το Σχήμα 3 δείχνει μια σύγκριση κόστους για το lever σύμφωνα με τον όγκο παραγωγής, όταν παράγονται από κάθε μέθοδο. Όπως ήταν αναμενόμενο, η χύτευση με έγχυση είναι η ακριβότερη διαδικασία για μικρούς όγκους λόγω του κόστους εργαλείων. Οι SL και FDM φαίνεται να είναι πιο κατάλληλες μέθοδοι κατασκευής από τη χύτευση έγχυσης για όγκους έως περίπου 6000. Η LS, η οποία επιβαρύνεται με κόστος μονάδας περίπου το ήμισυ από αυτού για την SL και FDM, φαίνεται να είναι μια πιο βιώσιμη επιλογή από τη χύτευση έγχυσης για τον όγκο παραγωγής έως περίπου 14000. Η μείωση της κλίσης της γραμμής κόστους της χύτευσης με έγχυση υποδεικνύει ότι η μείωση του κόστους 25% για την LS θα πρότεινε μια οικονομική παραγωγή όγκου έως περίπου 20000 τμήματα.

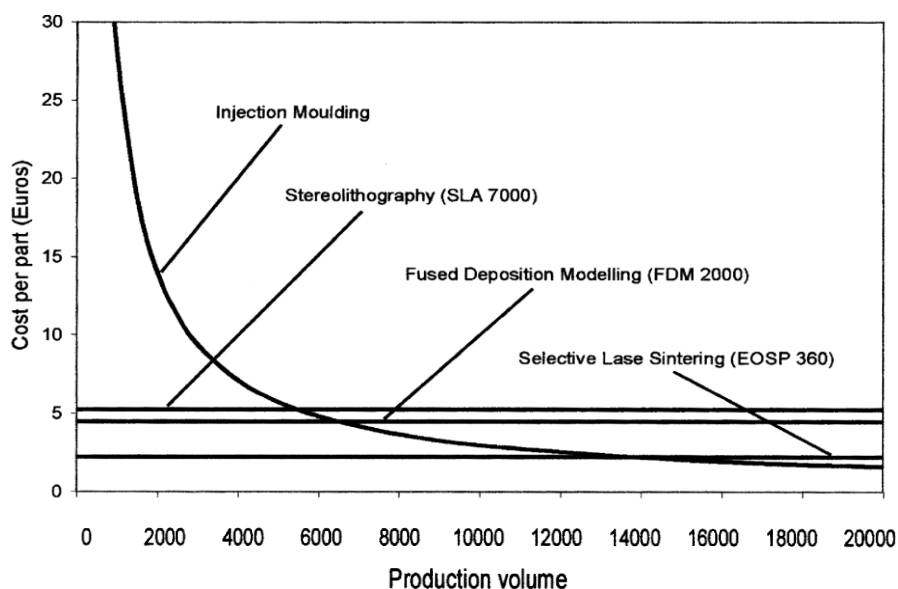


Fig. 3 Cost comparison for the lever by different processes

Πηγή: HOPKINSON N and DICKENS P.M. (2003)

Το Σχήμα 4 δείχνει μια σύγκριση κόστους για το cover ανάλογα με τον όγκο παραγωγής, όταν παράγεται από κάθε μέθοδο (εκτός από την LS). Όπως και με το lever, η χύτευση με έγχυση είναι η πιο δαπανηρή διαδικασία για τους μικρούς όγκους λόγω του κόστους εργαλείων. Οι SL και FDM εμφανίζονται να είναι κατάλληλες διεργασίες για όγκους έως περίπου 700, μετά τους οποίους η έγχυση είναι πιο βιώσιμη. Αυτή η αποκοπή όγκου είναι περίπου το 1/10 από αυτού του lever. Αυτό επιβεβαιώνει

ότι οι διαδικασίες RP που χρησιμοποιούνται σε αυτή την έρευνα είναι πιο κατάλληλες για την παραγωγή μικρότερων τμημάτων.

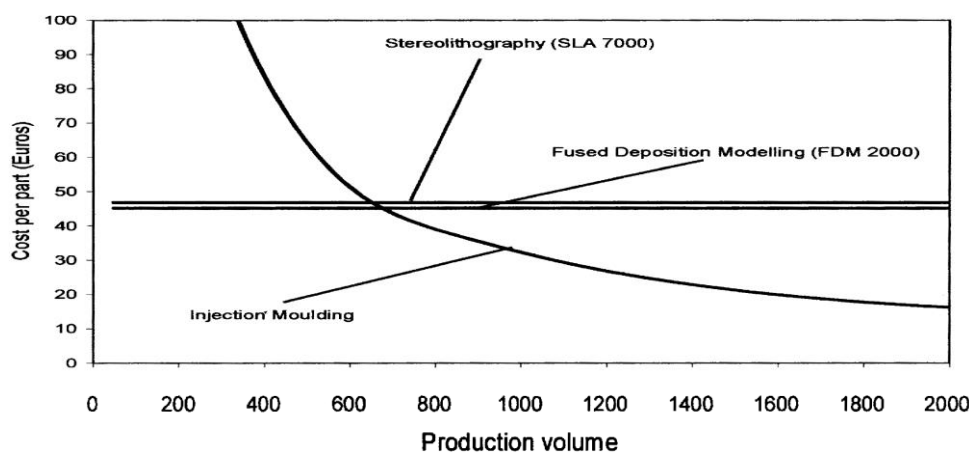


Fig. 4 Cost comparison for the cover by different processes

Πηγή: HOPKINSON N and DICKENS P.M. (2003)

Η ανάλυση κόστους βοήθησε να προσδιορίσει που βρίσκονται οι μεγαλύτερες πηγές του κόστους για την ταχεία κατασκευή (RM). Τα κόστη του μηχανήματος παίζουν ένα σημαντικό μέρος στο κόστους παραγωγής από την RM για την SL, FDM και LS. Είναι σαφές ότι, αν η RM επρόκειτο να υιοθετηθεί ευρύτερα, στη συνέχεια, οι οικονομίες κλίμακας θα έπρεπε να επιτρέπουν μείωση του κόστους του μηχανήματος και κατά συνέπεια χαμηλότερο κόστος παραγωγής. Το κόστος του βοηθητικού εξοπλισμού θα ποικίλει ανάλογα με την τοποθεσία και θα επηρεάσει το κόστος του μηχανήματος. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι ο βοηθητικός εξοπλισμός που απαιτείται για την FDM είναι σημαντικά κατώτερος από εκείνον για τις LS και SL.

Το κόστος εργασίας φαίνεται να είναι ελάχιστο για κάθε μία από τις διεργασίες, με το κόστος των υλικών να έχει μια σημαντική εισαγωγή, ειδικά για την LS. Όπως και με το κόστος του μηχανήματος, η πιο ευρεία υιοθέτηση της RM θα μειώσει το κόστος των υλικών λόγω των οικονομιών κλίμακας. Σχετικά με τα μηχανήματα και το λογισμικό τους για να βοηθήσουν την RM, όπως επιτρέποντας πιο αποτελεσματικές συσκευασίες των τμημάτων στον κατασκευαστικό όγκο, θα βοηθήσει επίσης σημαντικά να μειώσει μέρος του κόστους και να κάνει την RM μια πιο βιώσιμη πορεία παραγωγής.



### 4.3 Νέο σύστημα κόστους για προηγμένα συστήματα παραγωγής

Σήμερα υπάρχει συνεχώς αυξανόμενος ανταγωνισμός κατασκευαστών για να κάνουν κορυφαία προϊόντα που κοστίζουν λιγότερο, να έχουν καλύτερη ποιότητα, και να είναι πιο ευέλικτα στις αλλαγές των συνθηκών παραγωγής και της ζήτησης των πελατών. Η παραγωγικότητα, η ποιότητα και η ευελιξία έχει γίνει όχι μόνο τα πιο βασικά συστατικά της στρατηγικής παραγωγής, αλλά και τα πιο κρίσιμα μέτρα απόδοσης και αιτιολόγησης των προηγμένων συστημάτων παραγωγής. Ως εκ τούτου, τα τρία συστατικά πρέπει να είναι μετρήσιμα και στη συνέχεια, μετατρέψιμα σε νομισματικούς όρους, διότι τα δολάρια είναι η καλύτερη γλώσσα επικοινωνίας σε μια κερδοσκοπική οργάνωση.

Ο Son (1990) έχει καθορίσει το κόστος της παραγωγικότητας, της ποιότητας και της ευελιξίας. Το κόστος της παραγωγικότητας περιλαμβάνει τις δαπάνες που χρησιμοποιούνται ως σημεία εισόδου των συμβατικών συνολικών μέτρων παραγωγικότητας. Ομοίως, τα κόστη της ποιότητας και της ευελιξίας χρησιμοποιούνται ως στοιχεία εισόδου της (συνολικής) ποιότητας και (συνολικά) των μέτρων ευελιξίας, αντίστοιχα. Στοιχεία του κόστους ποιότητας περιλαμβάνουν κόστος ευκαιρίας που προκύπτει από τα ελαττωματικά προϊόντα και τα στοιχεία του κόστους ευελιξίας από τον μη συγχρονισμό των ροών υλικών από τους προμηθευτές προς τους πελάτες.

Εμείς ενώνουμε αυτά τα τρία κόστη σε δύο κατηγορίες, σχετικά καλά δομημένων δαπανών (RWSC) και σχετικά κακών δομημένων δαπανών (RISC), όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 1. Οι όροι «σχετικά καλά δομημένη» και «σχετικά κακά δομημένα» είναι παρόμοιοι με του (Simon 1960) «προγραμματισμένο» και «μη προγραμματισμένο», και του (Gorry και Scott Morton 1971) «δομημένο» και «αδόμητο» εκτός από την έμφαση στην 'σχετικότητα.

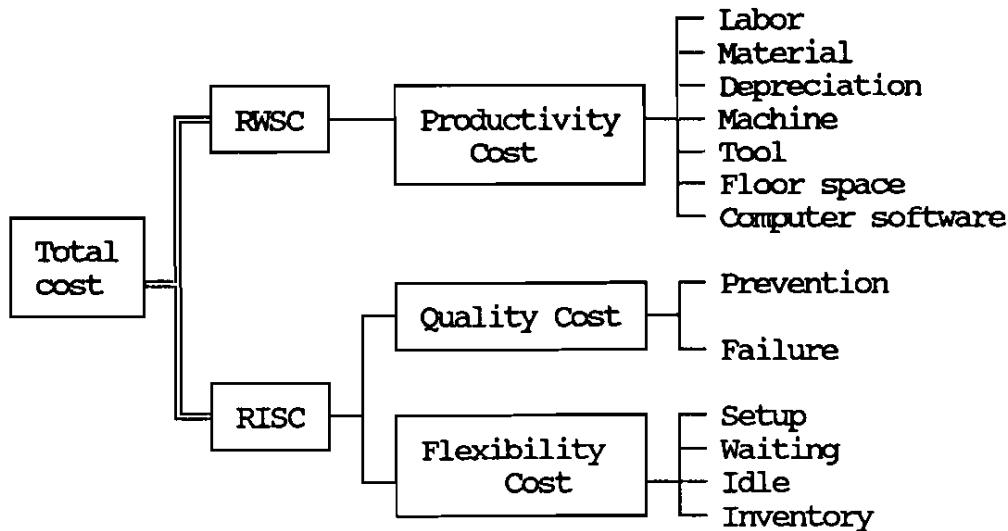


Figure 1. A cost system supporting analysis of advanced manufacturing systems.

Πηγή: YOUNG K. SON (1991)

Τα στοιχεία κόστους της παραγωγικότητας είναι RWSC, επειδή είναι πραγματικά απτά στοιχεία εισόδου που απαιτούνται για να γίνει ένα προϊόν. Σημειώστε ότι το συμβατικό κόστος κατασκευής ενός άμεσης εργασίας έχει αναδιοργανωθεί συγκεκριμένα, είναι κατανεμημένο σε ενός κατηγορίες για την ακριβή αξιολόγηση των αλλαγών λόγω αυτοματισμού εργοστασίων. Οπότε τα διαχωρισμένα γενικά στοιχεία δεν είναι πλέον επίπονο να εντοπιστούν.

Ωστόσο, το κόστος ενός ποιότητας και ενός ευελιξίας είναι RISC. Δύο λόγοι υπάρχουν για την κακή δόμηση ενός προβλήματος (Keen και Scott Morton 1978):

- (1) Η έλλειψη γνώσης.
- (2) Και η απροθυμία να διερευνήσει το πρόβλημα σε βάθος.

Το κόστος ενός ποιότητας και ενός ευελιξίας δεν έχουν ενός αναγνωριστεί από ενός περισσότερους ανθρώπους, επειδή ασαφή κόστη ευκαιρίας εμπλέκονται. Το RISC είναι σχετικά πιο δύσκολο να εκτιμηθεί από το RWSC, ακόμα και το RWSC δεν είναι εύκολο, όχι μόνο λόγω του ότι οι διαδικασίες παραγωγής είναι περίπλοκες για να παρακολουθηθούν αλλά επειδή η εκτίμηση του κόστους είναι στην καλύτερη περίπτωση εικασία για το άγνωστο μέλλον. Ως εκ τούτου, ενός διαφορετικές προσεγγίσεις μπορούν να εφαρμοστούν. Οι εξισώσεις του κόστους που απορρέουν ενός ακόλουθες ενότητες απεικονίζοντας ένα τρόπο εκτίμησης για την RWSC και ένα για την RISC.

### 4.3.1 Εκτίμηση RWSC

Το εργατικό κόστος είναι το κόστος ενός άμεσης εργασίας και ενός έμμεσης εργασίας που συμμετέχουν σε δραστηριότητες παραγωγής. Το κόστος εργασίας κατά τη διάρκεια ενός χρονικού ορίζοντα προγραμματισμού ( $C_L$ ) είναι:

$$\begin{aligned} C_L &= (\text{direct labour cost}) + (\text{indirect labour cost}) + (\text{fringes}) \\ &= \sum_{d=1}^{L1} c_d N n_d + \sum_{i=1}^{L2} c_i n_i + c_{fr} \end{aligned} \quad (1)$$

Πηγή: YOUNG K. SON (1991)

όπου L1 είναι ο αριθμός των διαφορετικών θέσεων εργασίας (άμεση εργασία),  $c_d$  είναι ο μισθός ενός εργασίας  $d$  ανά μονάδα χρόνου,  $N$  ορίζουμε ένα ορίζοντα προγραμματισμού,  $n_d$  είναι ο αριθμός των άμεσων μονάδων εργασίας για την εργασία  $d$ , L2 είναι ο αριθμός των διαφορετικών θέσεων εργασίας (έμμεση εργασία),  $c_i$  είναι ο μισθός ενός εργασίας  $i$  κατά τη διάρκεια ενός χρονικού ορίζοντα προγραμματισμού,  $n_i$  είναι ο αριθμός των έμμεσων μονάδων εργασίας για το  $i$  δουλειά και  $c_{fr}$  είναι τα μπόνους για άμεση και έμμεση εργασία κατά τη διάρκεια ενός χρονικού ορίζοντα προγραμματισμού.

Υλικό κόστος είναι το κόστος του να κατασκευάσεις όλα τα υλικά έτοιμα για παραγωγή. Ως εκ τούτου, το κόστος υλικού περιλαμβάνει το κόστος παραγγελίας, αγοράς και μεταφοράς εάν είναι αναγκαίο. Στη συνέχεια, το κόστος των υλικών κατά τη διάρκεια ενός χρονικού ορίζοντα προγραμματισμού ( $C_R$ ) είναι:

$$\begin{aligned} C_R &= (\text{direct material cost}) + (\text{indirect material cost}) + (\text{ordering cost}) \\ &= \sum_{j=1}^J C_d(j) n_d(j) + C_{id} + C_o \end{aligned} \quad (2)$$

Πηγή: YOUNG K. SON (1991)

όπου J είναι ο αριθμός των διαφορετικών τμημάτων,  $C_d(j)$  είναι η μονάδα κόστους των άμεσων υλικών για ένα μέρος  $j$ ,  $n_d(j)$  είναι το ποσό των άμεσων υλικών που χρησιμοποιούνται για μέρος  $j$ ,  $C_{id}$  είναι το έμμεσο κόστος των υλικών, εκτός από τα εργαλεία και  $C_o$  είναι το συνολικό υλικό κόστος παραγγελίας.

Το κόστος μηχανήματος περιλαμβάνει το κόστος των υπηρεσιών κοινής ωφελείας (ηλεκτρικό ρεύμα και τα καύσιμα), τη συντήρηση, την επισκευή, την ασφάλιση καθώς και τον φόρο ακίνητης περιουσίας για τον κατασκευαστικό εξοπλισμό. Στα συμβατικά συστήματα παραγωγής, το κόστος του βασίζεται ενός άμεσες ώρες εργασίας. Στο περιβάλλον αυτοματισμού εργοστασίων, ωστόσο το μέτρημα του κόστους ενός μηχανής γίνεται εύκολο, δεδομένου ότι υπάρχει άμεση σύνδεση των υπολογιστών με τα μηχανήματα οπότε οι ώρες του μηχανήματος να παρακολουθούνται γρήγορα και αξιόπιστα. Το κόστος μηχανήματος κατά τη διάρκεια ενός χρονικού ορίζοντα προγραμματισμού ( $C_M$ ) είναι:

$$C_M = \left( \begin{array}{c} \text{utility} \\ \text{cost} \end{array} \right) + \left( \begin{array}{c} \text{maintenance} \\ \text{cost} \end{array} \right) + \left( \begin{array}{c} \text{repair} \\ \text{cost} \end{array} \right) + \left( \begin{array}{c} \text{insurance} \\ \text{cost} \end{array} \right) + \left( \begin{array}{c} \text{property} \\ \text{tax} \end{array} \right) \\ = \sum_{k=1}^K \{c_u(k)T_m(k) + c_{mt}(k)T_{mt}(k) + c_r(k)T_r(k) + aF_k + bF_k\} \quad (3)$$

Πηγή: YOUNG K. SON (1991)

ως  $K$  ορίζεται ο συνολικός αριθμός των κομματιών του εξοπλισμού παραγωγής,  $c_u(k)$  είναι το κόστος χρησιμότητας του μηχανήματος  $k$  ανά μονάδα χρόνου,  $T_m(k)$  είναι ο συνολικός χρόνος μηχανής ενός μηχανής  $k$ ,  $c_{mt}(k)$  είναι το κόστος συντήρησης του μηχανήματος  $k$  ανά μονάδα χρόνου,  $T_{mt}(k)$  είναι ο συνολικός χρόνος συντήρησης ενός μηχανής  $k$ ,  $c_r(k)$  είναι το κόστος επισκευής ενός μηχανής  $k$  ανά μονάδα χρόνου,  $T_r(k)$  είναι ο συνολικός χρόνος επισκευής ενός μηχανής  $k$ ,  $a$  είναι το ποσοστό των ασφαλιστρών,  $F_k$  είναι το πρώτο κόστος (αρχική επένδυση) ενός μηχανής  $k$ , και το  $b$  είναι η τιμή του φόρου ακίνητης περιουσίας.

Κόστος εργαλείων είναι το κόστος ενός διατήρησης εργαλείων και περιλαμβάνει και το κόστος των εργαλείων που αντικαθίστανται λόγω φθοράς και θραύσης. Στα συμβατικά συστήματα, το κόστος εργαλείου υπολογίζεται βάσει ενός εξίσωσης του Taylor (DeGarmo 1984), η οποία υπολογίζει τη ζωή του εργαλείου. Το κόστος εργαλείου ( $C_T$ ) μπορεί να οριστεί ως

$$C_T = (\text{unit cost per tool}) (\text{total number of tools changed}) \\ = \sum_{m=1}^M c_{it}(m) \{n_w(m) + n_b(m)\}, \quad (4)$$

Πηγή: YOUNG K. SON (1991)

όπου  $M$  είναι ο αριθμός των διαφορετικών εργαλείων,  $c_{il}(m)$  είναι η μονάδα κόστος του τύπου εργαλείο  $m$ ,  $n_w(m)$  είναι ο αριθμός των φθαρμένων εργαλείων του τύπου  $m$ , και  $n_b(m)$  είναι ο αριθμός των σπασμένων εργαλείων του τύπου  $m$ .

Το κόστος του χώρου δείχνει το κόστος των υπηρεσιών κοινής ωφέλειας, τη συντήρηση, την επισκευή, την ασφάλιση, καθώς και τον φόρο ακίνητης περιουσίας που σχετίζονται με το χώρο που καταλαμβάνεται από εργαλειομηχανές, υπολογιστές για την διαδικασία απογραφής (WIP), εργαλεία και εξαρτήματα, παλέτες και βοηθητικές εγκαταστάσεις, ενός καφετέριας, χώρους ανάπαυσης και αποδυτήρια. Στη συνέχεια, το κόστος κενού χώρου κατά τη διάρκεια ενός χρονικού ορίζοντα προγραμματισμού ( $C_s$ ) είναι

$$C_s = c_{sp} S_M \quad (5)$$

Πηγή: YOUNG K. SON (1991)

ως  $c_{sp}$  είναι το κόστος χώρου ανά τετραγωνικό πόδι και  $S_M$  είναι ο χώρος κατασκευής.

Το κόστος του υπολογιστή-λογισμικού είναι το κόστος ενός διατήρησης του λογισμικού ηλεκτρονικών υπολογιστών, ενός το λειτουργικό σύστημα (OS), αυτόματα προγραμματισμένα εργαλεία (APTs) για μηχανές NC, το σύστημα διαχείρισης βάσης δεδομένων (DBMS), το πρωτόκολλο αυτοματοποίησης ενός κατασκευής (MAP) για ενός επικοινωνίες μεταξύ των υφιστάμενων μηχανών και υπολογιστών, το σχεδιασμό απαιτήσεων υλικών (MRP) και βελτιστοποιημένη τεχνολογία παραγωγής (OPT) για τον έλεγχο ενός απογραφής. Να σημειωθεί ότι τα άλλα έξοδα πληροφορικής ενός οι μισθοί των προγραμματιστών και των φορέων, συντήρηση, επισκευή, ασφάλιση καθώς και τον φόρο ακίνητης περιουσίας για ενός υπολογιστές έχουν ήδη εξεταστεί και συμπεριληφθεί στο κόστος χώρου και στο κόστος μηχανήματος. Ενός, σημειώστε ότι το αρχικό κόστος του λογισμικού συνήθως περιλαμβάνεται στην αρχική επένδυση για τον εξοπλισμό που ελέγχεται από υπολογιστή. Εάν υπάρχουν  $S$  διαφορετικά προγράμματα λογισμικού, το κόστος του λογισμικού υπολογιστή  $C_c$  θα είναι

$$C_c = \sum_{s=1}^S c_{ms}(s) n_{sw}(s) \quad (6)$$

Πηγή: YOUNG K. SON (1991)

ως  $c_{ms}(S)$  η αμοιβή των μελών του λογισμικού τύπου  $s$  κατά τη διάρκεια ενός χρονικού ορίζοντα προγραμματισμού και  $n_{sw}(S)$  είναι ο αριθμός του τύπου λογισμικού  $s$ . Στη συνέχεια, η συνολική αμοιβή των μελών του τύπου λογισμικού  $s$  θα είναι  $c_{ms}(s)n_{sw}(s)$ .

Τέλος, το κόστος απόσβεσης είναι το κόστος της ανάκτησης του εξοπλισμού και των εγκαταστάσεων των οποίων οι τιμές μειώνονται με τη χρήση και το χρόνο κατασκευής. Σε αντίθεση με άλλα στοιχεία κόστους, τα εκτιμώμενα στοιχεία για το κόστος απόσβεσης κατά τη διάρκεια του χρονικού ορίζοντα προγραμματισμού είναι συνήθως διαθέσιμα από τα λογιστικά βιβλία.

## 4.3.2 Εκτίμηση RISC

### 4.3.2.1 Στοιχεία κόστους ποιότητας

Με τεχνικές όπως αυτόνομες συσκευές ελέγχου έχει γίνει πιθανό πλέον να έχουμε ακριβή και γρήγορη επιθεώρηση προϊόντων. Επιθεώρηση με δειγματοληψία μπορεί να μην είναι επαρκής για τις επιχειρήσεις που ασχολούνται σοβαρά με την ποιότητα των προϊόντων τους. Ωστόσο, η 100% επιθεώρηση δεν είναι πάντα εφικτή, ειδικά στην περίπτωση των συστατικών μερών: καθώς ένας πλήρης έλεγχος ενός συστατικού μπορεί να απαιτεί το τμήμα να αφαιρεθεί από το εξάρτημα του και μετά είναι δύσκολο να επαναπροσδιορίσουμε την ίδια θέση του εξαρτήματος. Ως εκ τούτου, υποθέτουμε επιθεώρηση δειγματοληψίας για τα συστατικά μέρη, και 100% επιθεώρηση για τα τελικά τμήματα.

Το κόστος πρόληψης είναι το κόστος της πρόληψης ελαττωματικών (τελικών) προϊόντων μέσω ελέγχου και της διόρθωση των προβλημάτων ποιότητας κατά τη διαδικασία πριν από την τελική επιθεώρηση. Το κόστος της πρόληψης ασχολείται με μελέτη των διαγραμμάτων ελέγχου (CC) και ικανότητας της διαδικασίας (PC). Τα CC και PC χρησιμοποιούν το ίδιο είδος στατιστικών και αναλυτικών εργαλείων, αλλά η διαφορά είναι ότι τα αποτελέσματα των μελετών PC σε σχέση με τα ανώτατα και κατώτατα όρια προδιαγραφών (USL και LSL) κατευθύνονται στα μηχανήματα που χρησιμοποιούνται στις διαδικασίες, ενώ εκείνα των CC σε σχέση με τα άνω και κάτω όρια ελέγχου (UCL και LCL) κατευθύνονται στα προϊόντα που προέρχονται από τις διεργασίες. Το κόστος της πρόληψης μπορεί να εκτιμηθεί με την αναθεώρηση του λεγόμενου «οικονομικού σχεδιασμού των διαγραμμάτων ελέγχου» ( Montgomery

1980), το οποίο προσδιορίζει και διορθώνει ένα εκχωρηθέν αίτιο. Το οικονομικό μοντέλο του CC ασχολείται με ένα κύκλο παραγωγής ( $T_c$ ) που φαίνεται στο Σχήμα 2.

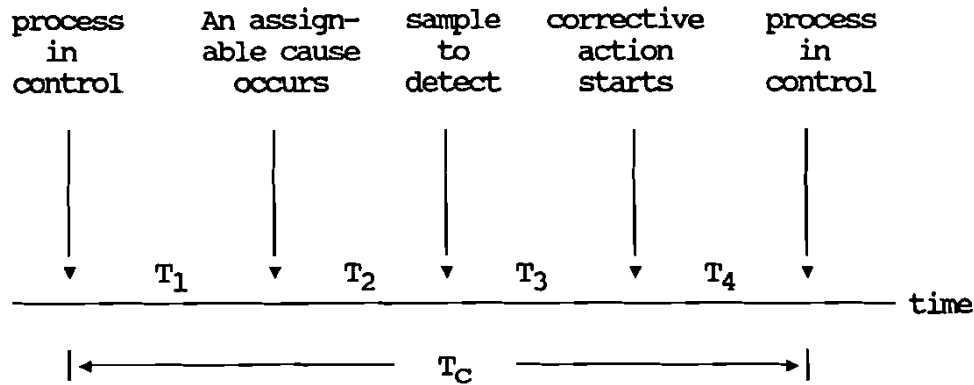


Figure 2. A cycle for in-process inspection.

Πηγή: YOUNG K. SON (1991)

Όπου  $T_1$  είναι η περίοδος κατά τον έλεγχο,  $T_2$  είναι ο χρόνος μέχρι το εκχωρηθέν αίτιο εντοπιστεί για πρώτη φορά,  $T_3$  είναι η ώρα να πάρουμε ένα δείγμα και να ερμηνεύσουμε τα αποτελέσματα και  $T_4$  είναι η ώρα για να εντοπίσει και να διορθώσει το εκχωρηθέν αίτιο. Ως εκ τούτου, η διαδικασία είναι εκτός ελέγχου κατά τη διάρκεια  $T_2 + T_3 + T_4$ .

Επιπλέον υπάρχουν και οι ακόλουθες υποθέσεις:

- (1) η διαδικασία να είναι υπό έλεγχο αν η διαδικασία είναι στο  $\mu_0$ .
- (2) Η διαδικασία να παρακολουθείται στο διάγραμμα με κεντρική γραμμή  $\mu_0$ , όπου  $UCL$  είναι  $\mu_0 + q(\sigma / \sqrt{n_1})$  και  $LCL$   $\mu_0 - q(\sigma / \sqrt{n_1})$ , όπου  $\sigma$  είναι η τυπική απόκλιση,  $n_1$  είναι το μέγεθος του δείγματος και το  $q$  είναι μία μεταβλητή απόφασης.
- (3) Μια ενιαία μεταβιβάσιμη αιτία του μεγέθους  $\delta$  συμβαίνει τυχαία, με αποτέλεσμα μια μετατόπιση από το  $\mu_0$  είτε στο  $\mu_0 + \delta_\sigma$  είτε στο  $\mu_0 - \delta_\sigma$ .
- (4) Δείγματα ελήφθησαν κατά χρονικά διαστήματα  $t$ .
- (5) Όταν το σημείο βρίσκεται εκτός των ορίων ελέγχου, θα ξεκινήσει αναζήτηση για την αιτία, αλλά η διαδικασία έχει τη δυνατότητα να συνεχίσει να λειτουργεί.
- (6) Σύμφωνα με τη κατανομή Poisson με μέσο ρυθμό  $\theta$  ανά μονάδα χρόνου, ο χρόνος μεταξύ δύο εκχωρηθέντων αιτιών είναι εκθετικός με μέση τιμή  $1/\theta$ .

Στη συνέχεια, η αναμενόμενη διάρκεια ενός κύκλου είναι (Montgomery 1980)

$$E[T_c] = E[T_1] + E[T_2] + E[T_3] + E[T_4] \\ = 1/\theta + t/(1 - \beta) - \{1 - (1 + \theta t) \exp(-\theta t)\} / [\theta \{1 - \exp(-\theta t)\}] + gn_1 + d \quad (7)$$

Πηγή: YOUNG K. SON (1991)

όπου  $g$  είναι ο χρόνος που απαιτείται για την επεξεργασία ενός δείγματος,  $d$  είναι ο χρόνος για να βρει και να διορθώσει μια μεταβιβάσιμη αιτία, και  $1 - \beta = 1 - \Phi(q - \delta\sqrt{n_1}) + \Phi(-q - \delta\sqrt{n_1})$ . Σημειώστε ότι  $\Phi(\cdot)$  είναι η αθροιστική πιθανότητα της τυποποιημένης κανονικής κατανομής. Συνήθως, τρεις κατηγορίες των αναμενόμενων εξόδων θεωρούνται στην οικονομική σχεδίαση των διαγραμμάτων ελέγχου (Montgomery 1980), το κόστος δειγματοληψίας, το κόστος της μεταβιβάσιμης αιτίας, και το κόστος ποινής που οφείλεται σε κατάσταση εκτός ελέγχου.

Πρώτον, το κόστος δειγματοληψίας ανά μονάδα χρόνου ( $c_{p1}$ ) είναι

$$c_{p1} = c_{s1}n_1/t \quad (8)$$

Πηγή: YOUNG K. SON (1991)

όπου  $c_{s1}$  είναι το κόστος δειγματοληψίας ενός αντικειμένου.

Δεύτερον, το κόστος του εκχωρηθέν αιτίου ανά μονάδα χρόνου ( $c_{p2}$ ) είναι

$$c_{p2} = [c_{fs}\alpha \exp(-\theta t) / \{1 - \exp(-\theta t)\} + c_{cr}] / E[T_c] \quad (9)$$

Πηγή: YOUNG K. SON (1991)

όπου  $c_{fs}$ , είναι το κόστος της διερεύνησης ενός ψευδούς συναγερμού,  $\alpha$  είναι η πιθανότητα ψευδούς συναγερμού, και  $c_{cr}$  είναι το κόστος της διόρθωσης ενός εκχωρηθέν αιτίου.

Ωστόσο, έχουμε αποκλείσει την τρίτη κατηγορία (κόστος ποινής), έτσι ώστε να μπορεί να θεωρηθεί το κόστος αποτυχίας από κάτω, γιατί τα ελαττώματα που βρέθηκαν σε τελικό έλεγχο εν μέρει αποδίδονται στην συνέχιση της παραγωγής κατά τη διάρκεια της κατάστασης εκτός ελέγχου. Αντ' αυτού, τα κόστη που έχουν σχέση με το PC λαμβάνονται υπόψιν. Η μελέτη PC διεξάγεται συνήθως μόνο όταν η διαδικασία είναι υπό έλεγχο. Αν το κόστος της δειγματοληψίας ενός στοιχείου είναι  $c_{s2}$  και  $n_2$  (συνήθως 50) τα στοιχεία του δείγματος, τότε το κόστος δειγματοληψίας ανά μονάδα χρόνου ( $c_{p3}$ ) θα είναι



$$c_{p3} = c_{s2}n_2/E[T_1] = \theta c_{s2}n_2 \quad (10)$$

Πηγή: YOUNG K. SON (1991)

Κατόπιν ο κόστος βελτίωσης του PC ανά μονάδα χρόνου ( $c_{p4}$ ) είναι

$$c_{p4} = C_{im}/E[T_c], \text{ if } 6\sigma > USL-LSL \\ = 0, \quad \text{otherwise} \quad (11)$$

Πηγή: YOUNG K. SON (1991)

όπου  $C_{im}$  είναι το κόστος του βελτιωμένου PC ανά κύκλο.

Τέλος λοιπόν, το κόστος πρόβλεψης του μέρους  $j$  για το μηχάνημα  $k$  ανά μονάδα χρόνου  $c_p(j,k)$  είναι

$$c_p(j, k) = c_{p1} + c_{p2} + c_{p3} + c_{p4} \quad (12)$$

Πηγή: YOUNG K. SON (1991)

Σημειώστε ότι οι τιμές στις εξισώσεις (7) έως (12) δεν είναι συνήθως οι ίδιες για κάθε τμήμα. Δεδομένου ότι υπάρχουν  $J$  διαφορετικά μέρη και μηχανουργικές κατεργασίες  $K$ , το κόστος πρόληψης κατά τη διάρκεια ενός χρονικού ορίζοντα προγραμματισμού ( $C_p$ ) είναι

$$C_p = \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K c_p(j, k)N \quad (13)$$

Πηγή: YOUNG K. SON (1991)

Το κόστος της αποτυχίας είναι η απώλεια που οφείλεται στην αποτυχία των τελικών προϊόντων να πληρούν τα πρότυπα ποιότητας που καθορίζονται από μια εταιρεία και τους πελάτες, και συνδυάζει συμβατικά την εσωτερική βλάβη και το εξωτερικό κόστος αποτυχίας. Το κόστος αποτυχίας ασχολείται με την τελική επιθεώρηση. Οπότε ορίζει ως:

$c_g$ : το κόστος της αναδιτύπωσης ενός καλού μέρους λόγω της εσφαλμένης ταξινόμησης

$c_b$ : το κόστος της αναδιτύπωσης ενός κακού (ελαττωματικού) μέρους

$c_s$ : το κόστος της διάλυσης ενός ελαττωματικού εξαρτήματος που δεν θα μπορούσε να αποκατασταθεί

$c_a$ : το κόστος της μη ικανοποίησης ενός πελάτη από την πώληση ενός ελαττωματικού μέρους

$p$ : την αναλογία ελαττωματικότητας ενός μέρους

$e_1$ : το ποσοστό σφάλματος μη ταξινόμησης ενός καλού μέρους στο κακό (σφάλμα τύπου I),

$e_2$ : το ποσοστό σφάλματος μη ταξινόμησης ενός κακού μέρους ως καλό (σφάλμα τύπου II),

$w$ : ο ρυθμός της αποκατάστασης της βλάβης σε ένα καλό μέρος.

Στην διαδικασία της επιθεώρησης 100% τότε πέντε περιπτώσεις μπορούν να θεωρηθούν για την εκτίμηση του κόστους βλάβης ενός τμήματος ( $c_{fa}$ ), όπως στον Πίνακα 1.

	Cases		Probability	Cost/unit
Internal	Identify good as good		$(1 - e_1)(1 - p)$	0
	Identify good as bad		$e_1(1 - p)$	$c_g$
	Identify bad as bad:	restored	$w(1 - e_2)p$	$c_b$
External		not restored	$(1 - w)(1 - e_2)p$	$c_b + c_s$
	Identify bad as good		$e_2p$	$c_a$
Total			1.0	

Table 1. Five cases considered for failure cost estimation.

Πηγή: YOUNG K. SON (1991)

Από τον Πίνακα 1 μπορούμε εύκολα να δούμε ότι

$$c_{fa} = e_1 c_g + p \{ (1 - e_2) c_b - e_1 c_g + (1 - e_2)(1 - w) c_s + e_2 c_a \} \quad (14)$$

Πηγή: YOUNG K. SON (1991)

Από τη στιγμή που το  $p$  είναι μία τυχαία μεταβλητή, η αναμενόμενη τιμή του κόστους αποτυχίας για ένα μέρος  $c_f$  είναι

$$c_f = e_1 c_g + E[p] \{ (1 - e_2) c_b - e_1 c_g + (1 - e_2)(1 - w) c_s + e_2 c_a \} \quad (15)$$

Πηγή: YOUNG K. SON (1991)

Εάν  $c_g=c_b$  τότε

$$c_f = e_1 c_b + E[p] \{ (1 - e_1 - e_2) c_b + (1 + e_2)(1 - w) c_s + e_2 c_a \} \quad (16)$$

Πηγή: YOUNG K. SON (1991)

Άρα το  $c_f(j)$  να είναι η  $c_f$  τιμή του μέρους  $j$ , από τη στιγμή που υπάρχουν  $J$  διαφορετικά μέρη το κόστος αποτυχίας στο διάστημα ενός προγραμματισμένου ορίζοντα  $C_f$  είναι

$$C_f = \sum_{j=1}^J c_f(j) Q_j \quad (17)$$

Πηγή: YOUNG K. SON (1991)

όπου  $Q_j$  είναι η ποσότητα  $j$  μερών που παράγονται.

#### 4.3.2.2 Στοιχεία κόστους ευελιξίας

Η εκτίμηση του κόστους ευελιξίας βασίζεται στη έρευνα του Son και Park (1990). Οι ορισμοί και οι εξισώσεις των στοιχείων τους συνοψίζονται παρακάτω.

Το κόστος Set-up ( $A$ ) είναι το κόστος της προετοιμασίας των μηχανημάτων για κάθε περίοδο παραγωγής.

$$A = \sum_{k=1}^K C_{su}(k) T_{su}(k) \quad (18)$$

Πηγή: YOUNG K. SON (1991)

όπου  $C_{su}(k)$  είναι το κόστος για τη μηχανή  $k$  ανά μονάδα χρόνου και  $T_{su}(k)$  είναι ο συνολικός χρόνος για το μηχάνημα  $k$  κατά τη διάρκεια ενός χρονικού ορίζοντα προγραμματισμού.

Κόστος αναμονής ( $C_w$ ) είναι ένα κόστος που συνδέεται με τα μέρη που βρίσκονται σε αναμονή κατά την διαδικασία παραγωγής, δηλαδή το κόστος των αποθεμάτων εργασίας κατά τη διαδικασία.

$$C_w = (\text{waiting cost per unit time}) (\text{total waiting time of parts produced}) \\ = v \left[ \sum_{j=1}^J \sum_{k=0}^{K_j+1} T_w(j, k) \{ n(j, k-1) - n(j, k) \} + \sum_{j=1}^J T_w(j, K_j+1) n(j, K_j+1) \right] \quad (19)$$

Πηγή: YOUNG K. SON (1991)

όπου  $u$  είναι το κόστος ευκαιρίας ανά μονάδα χρόνου,  $K_j$  είναι ο αριθμός των διαδικασιών που επισκέπτεται το τμήμα  $j$ ,  $T_w(j, k)$  είναι ο αθροιστικός χρόνος αναμονής του τμήματος  $j$  μέχρι να επεξεργαστεί  $k$ ,  $n(j, -1)$  είναι ο αριθμός πρώτων υλών για το μέρος  $j$  που έχουν εισέλθει στην περιοχή κατασκευής,  $n(j, k)$  είναι ο αριθμός του μέρους  $j$  που ολοκλήρωσαν τη διαδικασία  $k$ ,  $\{n(j, K-1) - n(j, k)\}$  είναι η ποσότητα του WIP μεταξύ διεργασιών  $K-1$  και  $k$ , και  $n(j, K_j + 1)$  είναι ο συνολικός αριθμός των τελικών τμημάτων  $j$ .

Σημειώστε ότι το  $n(j, -1) = W_j$  στην Εξίσωση (21) και το  $n(j, K_j + 1) = Q_j$  στην Εξίσωση (17).

Κόστος τεμπελιάς είναι ένα κόστος που συνδέεται με την ανεπαρκή αξιοποίηση του εξοπλισμού παραγωγής.

$$C_I = (\text{idle cost per unit time}) (\text{total idle time of equipment}) \\ = v \sum_{k=1}^K (1 - u_k) N \quad (20)$$

Πηγή: YOUNG K. SON (1991)

όπου  $u_k$  είναι η χρησιμοποίηση του μηχανήματος  $k$ .

Κόστος των αποθεμάτων είναι το κόστος για τη διεξαγωγή ή έλλειψη απογραφής. Απογραφή εδώ περιλαμβάνει πρώτες ύλες και έτοιμα προϊόντα μόνο.

$$C_H = (\text{warehouse space cost}) + (\text{holding cost}) + (\text{shortage cost}) \\ = c_{sp} S_I + \sum_{j=1}^J [c_{sm}(j) \{I_{om}(j) + U_j - W_j\} + c_{sf}(j) \{I_{of}(j) + Q_j - D_j\}] \\ + \sum_{j=1}^J [c_{bm}(j) \{W_j - U_j - I_{om}(j)\} + c_{bf}(j) \{D_j - Q_j - I_{of}(j)\}] \quad (21)$$

Πηγή: YOUNG K. SON (1991)

όπου  $S$  είναι ο χώρος της αποθήκης,  $c_{sm}(j)$  είναι το κόστος μιας μονάδας πρώτης ύλης του μέρους  $j$ ,  $I_{om}(j)$  είναι η αρχική απογραφή των πρώτων υλών για μέρος  $j$ ,  $U_j$  είναι η ποσότητα των πρώτων υλών που προέρχονται από τους προμηθευτές,  $c_{sf}(j)$  είναι το

κόστος για τη διεξαγωγή μιας μονάδας του προϊόντος του μέρους  $j$ ,  $I_{of}(j)$  είναι η αρχική απογραφή των τελικών μέρους  $j$ ,  $D_j$  είναι το ποσοστό της ζήτησης από την πλευρά  $j$ ,  $c_{bm}(j)$  είναι το κόστος έλλειψης μιας μονάδας της πρώτης ύλης του μέρους  $j$ , και  $C_{bf}(j)$  είναι το κόστος έλλειψης μιας μονάδας του τελικού προϊόντος του μέρους  $j$ .

### 4.3.3 Απόκτηση παραμετρικών τιμών στο μοντέλο κόστους

Πολλές από τις παραμετρικές τιμές του μοντέλου κόστους που αναπτύχθηκαν παραπάνω είναι άμεσα διαθέσιμες ή κατ' εκτίμηση στο λογιστήριο σε μια εταιρεία. Οι μισθοί ( $c_d$ ) και τα ημερομίσθια ( $c_i$ ) για παράδειγμα, είναι διαθέσιμα στο τμήμα προσωπικού, το ποσοστό της αποκατάστασης της βλάβης σε ένα καλό μέρος ( $w$ ), στο τμήμα ποιοτικού ελέγχου, ποσότητες των πρώτων υλών που προέρχονται από τους προμηθευτές ( $U_j$ ), στο τμήμα αγορών, ο συνολικός αριθμός των μηχανών ( $K$ ), στο τμήμα κατασκευής και υπηρεσία απογραφής και του κινδύνου του κόστους,  $c_{sm}(j)$  και  $c_{sf}(j)$ , στην αποθήκη. Ο ορίζοντας προγραμματισμού ( $N$ ) επιλέγεται από αυτόν που παίρνει τις αποφάσεις ή τον αναλυτή.

Παραμετρικές τιμές του κόστους ευκαιρίας δεν είναι ούτε εύκολα διαθέσιμες, ούτε εύκολο να επιτευχθούν ωστόσο δεν είναι αδύνατο να εκτιμηθούν. Για παράδειγμα, το κόστος ευκαιρίας ανά μονάδα χρόνου ( $u$ ) της αδράνειας εξοπλισμού και μέρος αναμονής μπορεί να θεωρηθεί με δύο τρόπους ανάλογα με τις συνθήκες της αγοράς:

- (1) Εάν υπάρχει αρκετή ζήτηση, μπορούν να θεωρηθούν ως διαφυγόντα κέρδη.
- (2) Εάν δεν υπάρχει αρκετή ζήτηση, μπορούν να θεωρηθούν ως κεφάλαια ισοψηφισμένα στον εξοπλισμό και στην απογραφή.

Όσο αφορά την απώλεια κερδών εκτιμώνται από τα λογιστικά βιβλία χρησιμοποιώντας μια ανάλυση παλινδρόμησης. Για τα κεφάλαια, οι εκτιμήσεις γίνονται με βάση το συντελεστή εσωτερικής απόδοσης.

Ο συνολικός χρόνος set-up για κάθε μηχανήμα κατά τη διάρκεια ενός ορίζοντα προγραμματισμού ( $T_{su}(k)$ ) συνήθως λαμβάνονται από το φύλλο δρομολόγησης. Η πολυπλοκότητα σε ένα σύστημα παραγωγής και η αβεβαιότητα μηχανημάτων και η καταστροφή εργαλείων καθιστά επίσης δύσκολο να μετρηθούν οι παραμετρικές τιμές, όπως ο συνολικός χρόνος επισκευής του μηχανήματος ( $T_r(k)$ ), η χρησιμοποίηση του εξοπλισμού ( $u_k$ ) και ο χρόνος αναμονής ενός μέρους του ( $T_w$ ). Παρά το γεγονός ότι τα

υπολογιστικά ελεγχόμενα μηχανήματα, όπως CNC και DNC μηχανές μπορούν εύκολα και με ακρίβεια να καταγράψουν τα δεδομένα αυτά, τα μηχανήματα αυτά είναι ακόμα ακριβά και δεν μπορούν να προβάλουν μελλοντικά δεδομένα. Η προσομοίωση σε υπολογιστή είναι μια χρήσιμη εναλλακτική λύση για τη συλλογή και την προβολή αυτών των δεδομένων, επειδή η προσομοίωση μπορεί εύκολα να εντοπίζει πολύπλοκες δυναμικές διαδικασίες παραγωγής και εκτιμά τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του συστήματος παραγωγής (Son and Park 1990).

#### 4.3.4 Αποκατάσταση του «παράδοξου της παραγωγικότητας»

Το «παράδοξο της παραγωγικότητας» (Skinner 1986) δείχνει ότι η παραγωγικότητα και τα κέρδη δεν πάνε πάντα χέρι-χέρι. Αυτό συμβαίνει όταν υπάρχει αύξηση της παραγωγής των προϊόντων τα οποία δεν πωλούνται, λόγω της κακής ποιότητας των προϊόντων ή της ακαμψία του συστήματος παραγωγής στην ιδιοτροπία του πελάτη. Η παραγωγικότητα δεν είναι μέτρο απόδοσης εισροών γιατί δεν εξετάζει αν τα παραγόμενα είδη αποφέρουν κέρδη από τις πωλήσεις. Το παραπάνω μοντέλο κόστους μπορεί να βοηθήσει να θεραπεύσει το παράδοξο της παραγωγικότητας. Για παράδειγμα, η ολοκληρωμένη μέτρηση των επιδόσεων της μεταποίησης (IMPM) (Son and Park το 1987, Son 1990), βασισμένο στο παραπάνω μοντέλο κόστους, δείχνει ως αποτέλεσμα αν η εταιρεία κερδίζει χρήματα.

$$IMPM = \frac{\text{Total output value}}{\text{Productivity cost} + \text{Quality cost} + \text{Flexibility cost}} \quad (22)$$

Πηγή: YOUNG K. SON (1991)

Στην Εξίσωση (22), η μείωση του κόστους των αποθεμάτων δείχνει τις αυξήσεις των πωλήσεων, επίσης εάν το κόστος απογραφής είναι μηδέν σημαίνει ότι όλα τα προϊόντα πωλούνται. Επιπλέον, η μείωση του εξωτερικού κόστους αποτυχίας σηματοδοτεί την καθοδική τάση των αποδόσεων των πωληθέντων προϊόντων, δηλαδή την αύξηση της ικανοποίησης των πελατών. Ως εκ τούτου, η μέθοδος του κόστους υποστηρίζει την IMPM για τη μέτρηση της «αποτελεσματικότητας» της κατασκευής και μπορεί να διορθώσει το παράδοξο της παραγωγικότητας.

## 4.4 Συμπέρασμα

Μετά την παράθεση των τεσσάρων μοντέλων κόστους εύκολα μπορούμε να διαπιστώσουμε ότι, στην Προσθετική Κατασκευή (AM) ο γεωμετρικός περιορισμός δεν είναι πλέον πρόβλημα αλλά είναι επαρκής για μικρού και μεσαίου μεγέθους παραγωγές. Για το λόγο αυτό η ανταγωνιστικότητα για την παραγωγή με AM τεχνικές κατασκευής μικρού και μεσαίου όγκου πλαστικών εξαρτημάτων είναι καλά εδραιωμένη. Η τεχνική με υψηλή πίεση χύτευσης (Hrdc), η τεχνική πρόσθεσης μετάλλου με επίλεκτο λέιζερ πυροσυσσωμάτωσης (SLS), η Electron Beam Melting (EBM) και η Direct Metal Laser Sintering (DMLS) είναι μέθοδοι της AM, οι οποίες ανήκουν στην κατηγορία σύντηξης με βάση σκόνη και έχουν στόχο την παραγωγή μεταλλικών τμημάτων τελικής χρήσης. Στο σημείο αυτό να πούμε ότι η μέθοδος του επίλεκτου λέιζερ πυροσυσσωμάτωσης (SLS) και η Direct Metal Laser Sintering (DMLS) είναι ουσιαστικά το ίδιο πράγμα, με την SLS να χρησιμοποιείται για διαδικασίες, όπως εφαρμογές σε μια ποικιλία πλαστικών, γυαλιών και κεραμικών, ενώ η DMLS έχει εφαρμογές σε κράματα μετάλλων.

Τα μοντέλα κόστους που παρουσιάσαμε καταδεικνύουν ότι η κύρια δύναμη της ανά μονάδας κόστους παραγωγής είναι η παραγωγικότητα και το κόστος του μηχανήματος. Συνεπώς, επειδή μιλάμε για παραγωγές μικρού και μεσαίου όγκου οι επιχειρήσεις για να προχωρήσουν σε υιοθέτηση τέτοιας παραγωγής πρέπει να γνωρίζουν ότι οι παραγγελίες τους θα είναι συνεχής. Η παραγωγικότητα και τα κέρδη δεν πάνε πάντα χέρι-χέρι. Αυτό συμβαίνει όταν υπάρχει αύξηση της παραγωγής των προϊόντων, τα οποία δεν πωλούνται λόγω της κακής ποιότητας των προϊόντων ή της ακαμψίας του συστήματος παραγωγής στην ιδιοτροπία του πελάτη. Εξαιρούνται βέβαια οι τεχνικές παραγωγής της SLS και της DMLS, στις οποίες το κόστους είναι σταθερό και ανεξάρτητο από τον όγκο παραγωγής, αλλά είναι λιγότερο αποτελεσματικές στη μετατροπή των πρώτων υλών και της ενέργειας σε προϊόντα. Όσο μεγαλύτερος είναι ο όγκος παραγωγής τόσο μειώνετε το κόστος για την Hrdc, ενώ η EBM πλεονεκτεί και σε ταχύτητα. Επομένως, η Hrdc και η EBM πλεονεκτούν σε σχέση με τις υπόλοιπες.

Όπως ήταν αναμενόμενο, η χύτευση με έγχυση (injection moulding) είναι η ακριβότερη διαδικασία για μικρούς όγκους λόγω του κόστους εργαλείων. Οι τεχνικές της RM φαίνεται να είναι πιο κατάλληλες για μικρούς όγκους παραγωγής. Για μεσαίους

όγκους παραγωγής πρέπει να διενεργείτε έρευνα. Η RM μπορεί να ανταγωνιστεί σε όρους κόστους με την χύτευση με έγχυση για σχετικά υψηλούς όγκους παραγωγής.

Η παραγωγή των εξισώσεων κόστους είναι, από τη φύση τους, σχετικά υποκειμενική. Ειδικότερα, η μέτρηση της ποιότητας και της ευελιξίας απαιτεί σημαντικό χρόνο για αναγνωρίσιμα αποτελέσματα επειδή είναι άυλα δεδομένα. Κατά συνέπεια, η κάθε επιχείρηση πρέπει να εξετάζει τα δεδομένα με προσοχή και ανάλογα τις ευκαιρίες που παρουσιάζονται να δρά.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

### Εκτίμηση τιμής προϊόντος με παραδοσιακή μέθοδο παραγωγής και με 3D Printing

Η πρόταση που πρόκειται να ελεγχθεί είναι ποια μέθοδος παραγωγής θα μας δώσει τη χαμηλότερη τιμή για το προϊόν. Το προϊόν που θα εξετάσουμε είναι μια καρέκλα και θα συγκρίνουμε την παραγωγή της με 3D printing και με παραδοσιακή μέθοδο. Σκοπός της έρευνας είναι να προσδιορίσουμε την ελάχιστη τιμή της καρέκλας για κάθε μέθοδο παραγωγής. Θα χρησιμοποιήσουμε εργαλεία γραμμικού προγραμματισμού και συγκεκριμένα θα αναπτύξουμε ένα μοντέλο ελαχιστοποίησης της τιμής του προϊόντος. Για τον προσδιορισμό των σχέσεων μεταξύ των παραγόντων που καθορίζουν το κόστος ενός προϊόντος θα χρησιμοποιήσουμε τη μέθοδο της παλινδρόμησης. Οι παράγοντες από εδώ και στο εξής θα ονομάζονται επεξηγηματικές μεταβλητές. Η γραμμική παλινδρόμηση είναι μια προσέγγιση για τη μοντελοποίηση της σχέσης μεταξύ μιας συνεχής εξαρτημένης μεταβλητής  $Y$  και μίας ή περισσότερων επεξηγηματικών μεταβλητών  $X$ . Η μεταβλητή  $Y$  στο μοντέλο μας είναι η τιμή του προϊόντος και οι επεξηγηματικές μεταβλητές  $X$  είναι τα κόστη που προκύπτουν από τις βασικές λειτουργίες των επιχειρήσεων. Στην επόμενη ενότητα γίνεται αναφορά στις βασικές λειτουργίες και στα κόστη κάθε λειτουργίας.

#### 5.1 Λειτουργίες και κόστος κάθε λειτουργίας

##### 5.1.1 Βασικές λειτουργίες των επιχειρήσεων

Όπως είπαμε παραπάνω το 3D printing έχει αλλάξει την αλυσίδα παραγωγής μιας επιχείρησης συνεπώς και την ίδια τη λειτουργία της. Κατά συνέπεια δίνουμε μεγαλύτερη έμφαση στις βασικές λειτουργίες των επιχειρήσεων και στο κόστος ανά λειτουργία για να προσδιορίσουμε τελικά το συνολικό κόστος, το οποίο είναι και αυτό που μας ενδιαφέρει. Λειτουργικό ονομάζουμε το κόστος κάθε λειτουργίας οργανωτικής ή διοικητικής υποδιαίρεσης της οικονομικής μονάδας, το οποίο προσδιορίζεται ή συγκεντρώνεται λογιστικά. Χαρακτηριστική περίπτωση

λειτουργικού κόστους είναι τα λογιστικά προσδιορισμένα κόστη των βασικών λειτουργιών των επιχειρήσεων. Έτσι έχουμε το κόστος :

1. Της λειτουργίας Παραγωγής
2. Της λειτουργίας Διοικήσεως
3. Της λειτουργίας Έρευνας- Ανάπτυξης
4. Της λειτουργίας Διαθέσεως
5. Της λειτουργίας Χρηματοδοτήσεως (Παυλάτος Οδυσσέας).

Αντικείμενο της παραγωγικής λειτουργίας είναι η παραγωγή προϊόντων και η παροχή υπηρεσιών. Τα κύρια τμήματα της λειτουργίας αυτής είναι: της παραγωγής (πχ. εργοστάσιο), που παράγονται τα τελικά προϊόντα της επιχείρησης, και τα βοηθητικά (τμήματα υποστήριξης), που παράγουν έργο το οποίο απορροφάτε από τα κύρια παραγωγικά τμήματα (πχ. τμήμα ηλεκτρικής ενέργειας, επισκευών και συντήρησης).

Η διοίκηση της επιχείρησης θέτει τους στόχους της, καθορίζει τις διαδικασίες που πρέπει να ακολουθηθούν και την οργάνωση που απαιτείται για την επίτευξη των στόχων. Τα τμήματα που ανήκουν στη διοικητική λειτουργία είναι η διεύθυνση οικονομικών υπηρεσιών, η ανώτατη διοίκηση και η διεύθυνση διοικητικών υπηρεσιών.

Στόχος της λειτουργίας έρευνας και ανάπτυξης είναι η παραγωγή νέων προϊόντων ή νέων μεθόδων παραγωγής καθώς και η βελτίωση των ήδη παραγόμενων προϊόντων ή μεθόδων παραγωγής. Τα τμήματα της επιχείρησης που συνδέονται με τη λειτουργία αυτή είναι το τμήμα Ανάπτυξης και το τμήμα Ποιότητας.

Σκοπός της λειτουργίας διαθέσεως είναι η πώληση, όσο το δυνατόν σε μεγαλύτερο βαθμό, των προϊόντων ή των υπηρεσιών της επιχείρησης. Τα τμήματα που εντάσσονται σε αυτή την λειτουργία είναι το τμήμα Πωλήσεων και το τμήμα Marketing.

Η χρηματοοικονομική λειτουργία έχει ως σκοπό την εξεύρεση και συγκέντρωση του απαραίτητου κεφαλαίου και την επένδυση του σε πάγια στοιχεία (διαρκές κεφάλαιο) και σε κυκλοφοριακά (κεφάλαιο κίνησης).

### **5.1.2 Προσδιορισμός του κόστους ανά λειτουργία**

Στη λειτουργία παραγωγής έχουμε το κόστος παραγωγής, δηλαδή το κόστος που πραγματοποιείται για την παραγωγή προϊόντων ή την παροχή υπηρεσιών. Το κόστος παραγωγής περιλαμβάνει το σύνολο των δαπανών που γίνονται για να παραχθεί το προϊόν και να πάρει τη μορφή και τη θέση που χρειάζεται ώστε να μπορεί να πουληθεί.

Τέτοιες δαπάνες είναι τα υλικά που αναλώνονται στην παραγωγή, τα εργατικά και οι μισθοί του προσωπικού, τα μηχανήματα, το ηλεκτρικό ρεύμα, οι συντηρήσεις των εγκαταστάσεων κ.τ.λ. Σχηματίζεται από τις εξής κατηγορίες κόστους: Αρχικό Κόστος και Κόστος Μετατροπής και περιλαμβάνει στοιχεία άμεσα ως προς το παραγόμενο προϊόν και έμμεσα ως προς αυτό.

Το κόστος της λειτουργίας της διοικήσεως μπορούμε να το χαρακτηρίσουμε και ως κόστος διαχείρισης. Περιλαμβάνει κάθε δαπάνη που δημιουργείται από την αναπτυσσόμενη δραστηριότητα των τμημάτων και υπηρεσιών της διοικητικής λειτουργίας, σκοπός των όποιων είναι να διοικηθεί η οικονομική μονάδα και να υποστηριχθούν οι βασικές δραστηριότητες της, όπως η παραγωγή, το λογιστήριο, οι πωλήσεις, οι δημόσιες σχέσεις κ.τ.λ. Από άποψη σύνθεσης, το κόστος της διοικητικής λειτουργίας αποτελείται από κάθε είδους δαπάνη που προκαλείται από την δραστηριότητα.

Με τον όρο κόστος έρευνας και ανάπτυξης εννοούμε το κόστος που πραγματοποιείται σε μια επιχείρηση από την αναπτυσσόμενη δραστηριότητα έρευνας για την παραγωγή νέων προϊόντων καλύτερης ποιότητας ή νέων μεθόδων παραγωγής ή από μια δραστηριότητα Ανάπτυξης και βελτίωσης ήδη παραγόμενων προϊόντων ή μεθόδων παραγωγής.

Κατόπιν, το κόστος διαθέσεως είναι το κόστος που πραγματοποιείται μετά την παραγωγή ή την αγορά και την εισαγωγή του προϊόντος ή του εμπορεύματος στην αποθήκη για την πώληση μέχρι και την είσπραξη της αξίας του πωλούμενου προϊόντος, εμπορεύματος ή της υπηρεσίας. Επίσης, μπορούμε να το αναφέρουμε και ως κόστος μάρκετινγκ και πωλήσεων και περιλαμβάνει τις ακόλουθες διακριτές υποκατηγορίες:

1. Το κόστος διανομής των πωλήσεων
2. Το κόστος αποθήκευσης
3. Το κόστος καταγραφής εμπορευμάτων
4. Το κόστος πακεταρίσματος

Τέλος, το κόστος χρηματοοικονομικής λειτουργίας είναι το κόστος του δανειακού κεφαλαίου της οικονομικής μονάδας και τα έξοδα που γίνονται για την λειτουργία αυτή.

## 5.2 Ανάλυση του μοντέλου

Στο μοντέλο που προτείνουμε εμείς θα εξετάσουμε την τιμή του προϊόντος με βάση τα λειτουργικά κόστη που αναπτύξαμε στην ενότητα 5.1.2. Υποθέτουμε ότι το κόστος χρηματοοικονομικής λειτουργίας είναι το ίδιο και για τις δύο μεθόδους παραγωγής, συνεπώς δεν το συμπεριλαμβάνουμε στην εξίσωση σαν μεταβλητή. Κατόπιν, για να δώσουμε μεγαλύτερη έμφαση στη διαφορά της παραδοσιακής μεθόδου κατασκευής και στο 3D Printing προσθέτουμε και επιπλέον μεταβλητές που αφορούν τον χρόνο όπως ο αριθμός των διαδικασιών κατά την κατασκευή του προϊόντος καθώς και τις ημέρες κατασκευής του. Η τελευταία μεταβλητή που θα μας απασχολήσει θα είναι ο αριθμός του προσωπικού. Επομένως, οι επεξηγηματικές μεταβλητές οι οποίες θα χρησιμοποιηθούν και στις δύο μεθόδους παραγωγής είναι:

1. Κόστος Παραγωγής
2. Κόστος Διαχείρισης
3. Κόστος Έρευνας και Ανάπτυξης
4. Κόστος Μάρκετινγκ και Πωλήσεων
5. Αριθμός Προσωπικού
6. Αριθμός Διαδικασιών
7. Αριθμός Ημερών Κατασκευής

Οι τρεις επεξηγηματικές μεταβλητές που αφορούν των αριθμό προσωπικού, διαδικασιών και ημερών κατασκευής επηρεάζουν έμμεσα την αντικειμενική συνάρτηση. Συνεπώς μετά το προσδιορισμό το επεξηγηματικών μεταβλητών μπορούμε να πούμε ότι

$$\text{Τιμή} = \sum_{k=1}^n W_k * C_k$$

Όπου  $w_k$  είναι η βαρύτητα του κάθε κόστους, δηλαδή πόσο σημαντικό είναι το κόστος στην τιμή του προϊόντος,  $c_k$  είναι το εκάστοτε κόστος.

Στη συνέχεια, θα αναλύσουμε κάθε κόστος.

$$C_k = \sum_{j=1}^m a_j^k * x_j + L_k$$

Όπου  $m$  είναι το πλήθος των επεξηγηματικών μεταβλητών για κάθε κόστος,  $a_j^k$  είναι ο συντελεστής παλινδρόμησης,  $x_j$  είναι οι επιμέρους μεταβλητές του κάθε κόστους και  $L_k$  είναι ο σταθερός όρος.

Τέλος, θα έχουμε και μια ανάλυση των επιμέρους μεταβλητών  $x_j$  του κάθε κόστους που θα δείχνει τη σχέση μεταξύ των επεξηγηματικών μεταβλητών για κάθε κόστος.

$$x_j = \sum_{j' \in J, j' \neq j} b_{j'} * x_{j'} + M_j$$

Όπου  $b_{j'}$  είναι ο συντελεστής παλινδρόμησης,  $x_j$  υλικοί παράγοντες,  $x_{j'}$  είναι οι άυλοι παράγοντες και  $M_j$  είναι ο σταθερός όρος.

Η αντικειμενική συνάρτηση την οποία θα επιλύσουμε με την μέθοδο γραμμικού προγραμματισμού και θα κάνουμε την ελαχιστοποίηση της θα έχει την εξής μορφή.

$$\text{Τιμή} = \sum_{k=1}^n w_k * c_k = \sum_{k=1}^n w_k * (\sum_{j=1}^m a_j^k * x_j + L_K)$$

LP-problem

$$\text{Minimize Τιμή} = \sum_{k=1}^n w_k * c_k$$

$$\text{Subject to: } c_k = \sum_{j=1}^m a_j^k * x_j + L_K \quad \forall k \in K$$

$$x_j = \sum_{j' \in J, j' \neq j} b_{j'} * x_{j'} + M_j \quad \forall j \in J$$

$$x_j \in R \quad \forall j \in J$$

Στην επόμενη ενότητα θα αναλύσουμε κάθε κόστος ανάλογα με την μέθοδο παραγωγής.

### 5.2.1 Ανάλυση κόστους για κάθε μέθοδο παραγωγής

Για την παραδοσιακή μέθοδο παραγωγής έχουμε ότι:

Το κόστος παραγωγής μπορούμε να το αναλύσουμε στα επιμέρους στοιχεία:

1. Το κόστος των Α υλών.
2. Την αμοιβή του προσωπικού (μισθοί).
3. Λοιπά έξοδα προσωπικού (ασφάλιστρα, επιδόματα και μπόνους).
4. Αξία μηχανημάτων.
5. Συντήρηση και επισκευή μηχανών.
6. Λογισμικό.
7. Περιφερειακά έξοδα (ρεύμα, φόροι, τέλη και αποσβέσεις).
8. Αριθμός μηχανών.
9. Αριθμός προσωπικού.

$$\text{Οπότε, } c_1 = \sum_{j=1}^{m=9} a_j^k * x_j + L_1$$

Στο κόστος διαχείρισης μπορούμε να συμπεριλάβουμε τα εξής:

1. Κόστος λογιστηρίου.
2. Διοικητική υποστήριξη.
3. Κόστος εσωτερικού ελέγχου.

$$\text{Οπότε, } c_2 = \sum_{j=1}^{m=3} a_j^k * x_j + L_2$$

Στην συνέχεια, το κόστος έρευνας και ανάπτυξης το αναλύουμε σε:

1. Κόστος έρευνας (κάθε επιχείρηση διαθέτει κονδύλια από τον προϋπολογισμό της για έρευνα, η οποία μπορεί να είναι είτε για νέα προϊόντα είτε για νέα παραγωγή προϊόντων).
2. Ποιότητα.
3. Κόστος ανάπτυξης (για την βελτίωση των ήδη παραγομένων προϊόντων).

$$\text{Οπότε, } c_3 = \sum_{j=1}^{m=3} a_j^k * x_j + L_3$$

Τέλος, στο κόστος μάρκετινγκ και πωλήσεων περιλαμβάνουμε τις ακόλουθες διακριτές υποκατηγορίες:

1. Το κόστος διανομής των πωλήσεων
2. Το κόστος αποθήκευσης
3. Το κόστος καταγραφής εμπορευμάτων
4. Το κόστος πακεταρίσματος

$$\text{Οπότε, } c_4 = \sum_{j=1}^{m=4} a_j^k * x_j + L_4$$

Για την 3D Printing μέθοδο παραγωγής έχουμε ότι:

Το κόστος παραγωγής μπορούμε να το αναλύσουμε στα επιμέρους στοιχεία:

1. Το κόστος των Ά υλών.
2. Την αμοιβή του προσωπικού (μισθοί).
3. Λοιπά έξοδα προσωπικού (ασφάλιστρα, επιδόματα και μπόνους).
4. Αξία εκτυπωτών.
5. Συντήρηση και επισκευή μηχανών.
6. Λογισμικό.

7. Περιφερειακά έξοδα (ρεύμα, φόροι, τέλη και αποσβέσεις).
8. Αριθμός μηχανών.
9. Αριθμός προσωπικού.

$$\text{Οπότε, } c_1 = \sum_{j=1}^{m=9} a_j^k * x_j + L_1$$

Στο κόστος διαχείρισης μπορούμε να συμπεριλάβουμε τα εξής:

1. Κόστος λογιστηρίου.
2. Διοικητική υποστήριξη.
3. Κόστος εσωτερικού ελέγχου

$$\text{Οπότε, } c_2 = \sum_{j=1}^{m=3} a_j^k * x_j + L_2$$

Στην συνέχεια, το κόστος έρευνας και ανάπτυξης το αναλύουμε σε:

1. Κόστος έρευνας (κάθε επιχείρηση διαθέτει κονδύλια από τον προϋπολογισμό της για έρευνα, η έρευνα αυτή μπορεί να είναι είτε για νέα προϊόντα είτε για νέα παραγωγή προϊόντων).
2. Ποιότητα.
3. Κόστος ανάπτυξης (για την βελτίωση των ήδη παραγομένων προϊόντων).

$$\text{Οπότε, } c_3 = \sum_{j=1}^{m=3} a_j^k * x_j + L_3$$

Τέλος, στο κόστος μάρκετινγκ και πωλήσεων περιλαμβάνουμε τις ακόλουθες διακριτές υποκατηγορίες:

1. Το κόστος διανομής των πωλήσεων.
2. Το κόστος πακεταρίσματος.

$$\text{Οπότε, } c_4 = \sum_{j=1}^{m=2} a_j^k * x_j + L_4$$

Το κόστος μάρκετινγκ και πωλήσεων περιλαμβάνει περισσότερες μεταβλητές στην παραδοσιακή μέθοδο παραγωγής γιατί είναι περισσότερα και τα στάδια στην αλυσίδα παραγωγής. Η αποθήκευση και η καταγραφή εμπορευμάτων δεν περιέχονται στην 3D παραγωγή γιατί τα προϊόντα κατασκευάζονται ανάλογα με την ζήτηση.

### 5.3 Περιγραφή Παλινδρόμησης και επίλυσης

Μετά τον πλήρη προσδιορισμό του κάθε κόστους το μοντέλο μας έχει ολοκληρωθεί. Με την μέθοδο της παλινδρόμησης ευελπιστούμε να δημιουργήσουμε την εξίσωση για κάθε κόστος και στο τέλος την εξίσωση της τιμής της καρέκλας. Για να γίνει αυτό τρέχουμε την διαδικασία της παλινδρόμησης (regression) στο excel. Οι τιμές που συμπληρώθηκαν στο excel για κάθε μεταβλητή είναι δέκα έτσι ώστε να είναι όσο το δυνατόν καλύτερη η διαδικασία. Για να είναι ικανοποιητική η παλινδρόμηση πρέπει η τιμή R Square να είναι μεγαλύτερη από 70%, εάν ισχύει αυτό τότε κοιτάμε την τιμή P-Value για κάθε μεταβλητή. Η τιμή αυτή πρέπει να είναι μικρότερη του 5% για να είναι στατιστικά σημαντική η ανεξάρτητη μεταβλητή για την εξαρτημένη μεταβλητή, εάν δεν ισχύει τότε δεν γράφεται στην εξίσωση η ανεξάρτητη μεταβλητή. Αν τώρα είναι στατιστικά σημαντική η μεταβλητή προχωράμε στη στήλη του Coefficients για να δούμε τον συντελεστή κάθε μεταβλητής και τον σταθερό όρο. Η διαδικασία αυτή θα πραγματοποιηθεί κατ' επανάληψη για όλες τις μεταβλητές εξαρτημένες και ανεξάρτητες, με σκοπό την δημιουργία εξισώσεων. Εφόσον έχουμε δημιουργήσει όλες τις εξισώσεις, με την μέθοδο της επίλυσης γραμμικού προγραμματισμού θα πραγματοποιήσουμε ελαχιστοποίηση σε κάθε εξίσωση κόστους και στο τέλος αφού θα έχουμε την ελάχιστη τιμή για κάθε κόστος, θα την αντικαταστήσουμε στην βασική εξίσωση και των δύο μεθόδων παραγωγής για την εύρεση της τιμής της καρέκλας.

### 5.4 Αποτελέσματα

Στις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν με τα στοιχεία του excel(παράρτημα σελίδα 87) για την μέθοδο της παραδοσιακής παραγωγής, όσον αφορά την μεταβλητή της τιμής του προϊόντος, ενώ το R Square είναι μεγαλύτερο από 70%, η τιμή P-Value δεν είναι σε καμία επεξηγηματική μεταβλητή μικρότερη του 5%, οπότε δεν μπορούμε να δημιουργήσουμε την εξίσωση. Για το κόστος παραγωγής, το κόστος διαχείρισης και το κόστος μάρκετινγκ και πωλήσεων η μέθοδος παλινδρόμησης απέτυχε. Όμως, για το κόστος έρευνας και ανάπτυξης βλέπουμε ότι, το R Square είναι μεγαλύτερο από 70%, η τιμή P-Value είναι μικρότερη του 5% και για τις τρεις μεταβλητές, οπότε προκύπτει η εξίσωση:

$$\text{Κ.Έρευνας \& Ανάπτυξης} = -0,79X_1 - 0,066X_2 + 0,96X_3 + 68469,37$$



Στην 3D printing μέθοδο παραγωγής βλέπουμε ότι η διαδικασία της παλινδρόμησης απέτυχε, κατά συνέπεια δεν μπορούμε να δημιουργήσουμε καμία εξίσωση.

## **5.5 Συμπέρασμα**

Η πρόταση για τη δημιουργία ενός μοντέλου προσδιορισμού της τιμής για τη μέθοδο της παραδοσιακής παραγωγής και για την 3D printing δεν έδωσε τα επιθυμητά αποτελέσματα διότι τα δεδομένα ήταν φανταστικά και όχι πραγματικά. Παρόλα αυτά έγινε μια εκτενής συζήτηση για τις βασικές λειτουργίες των επιχειρήσεων και για τα κόστη που περιλαμβάνει κάθε λειτουργία. Τέλος υπήρξε και μια σύνδεση όσο αφορά την τιμή ενός προϊόντος με τα παραπάνω κόστη στην μέθοδο 3D printing παραγωγής.



## ΕΠΙΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία παρουσίασε μία μελέτη σχετικά με την εξέλιξη της παραγωγικής διαδικασίας από την παραδοσιακή μέθοδο στην 3D εκτύπωση. Οι στόχοι της εργασίας εντοπίζονται στα εξής σημεία:

- 1) στην κατανόηση του όρου 3D Printing και στην μετεξέλιξη του τις τελευταίες δεκαετίες
- 2) στο πώς λειτουργούν οι 3D εκτυπωτές για την παραγωγή προϊόντων
- 3) στα οφέλη που μπορούν να αποκομίσουν οι επιχειρήσεις με την είσοδο του 3D Printing στην αλυσίδα παραγωγής τους
- 4) στις θετικές επιπτώσεις της τεχνολογίας αυτής στο κόστος παραγωγής και
- 5) την ανάπτυξη ενός μοντέλου κόστους παραγωγής, μέσα από τη διεξαγωγή πειράματος για την παραγωγή ενός προϊόντος συγκρίνοντας την παραδοσιακή μέθοδο παραγωγής με τη 3D, ώστε να δούμε ποια από τις δύο έχει χαμηλότερη τιμή για το προϊόν και συνεπώς μεγαλύτερη θετική επίδραση στα κέρδη της επιχείρησης.

Βασικό σημείο αποτέλεσε η παρουσίαση των μοντέλων κόστους παραγωγής. Μέσα από αυτά τα μοντέλα εξήχθησαν συμπεράσματα για το ποια μέθοδος AM είναι η καταλληλότερη για μικρού και μεσαίου όγκου παραγωγές και για το ότι η κύρια δύναμη της ανά μονάδα κόστους παραγωγής είναι η παραγωγικότητα και το κόστος του μηχανήματος. Στο μοντέλο κόστους παραγωγής που προτείναμε, εξετάσαμε την τιμή του προϊόντος με βάση τα λειτουργικά κόστη καθώς και με μεταβλητές που αφορούν το χρόνο.

Συνοψίζοντας, η πρόταση για τη δημιουργία ενός μοντέλου προσδιορισμού της τιμής για τις δύο μεθόδους παραγωγής δεν έδωσε τα επιθυμητά αποτελέσματα, ωστόσο μπορεί να αποτελέσει την αρχή για περαιτέρω έρευνα. Το 3D Printing είναι ένα ανεξάντλητο ζήτημα που θα μας απασχολήσει αρκετά σε μελλοντικές έρευνες.



# ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

## Ελληνική

Παυλάτος Οδυσσέας, 2006, Λογιστική κόστους, Χαλκίδα

## Ξένη

Daniel Günther , Bastian Heymel , Johannes Franz Günther , Ingo Ederer , (2014) "Continuous 3D-printing for additive manufacturing", Rapid Prototyping Journal, Vol. 20 Iss: 4, pp.320 – 327

Bruce E. Massis, (2013) "3D printing and the library", New Library World, Vol. 114 Iss: 7/8, pp.351 – 354

David Bak, (2003) "Rapid prototyping or rapid production? 3D printing processes move industry towards the latter", Assembly Automation, Vol. 23 Iss: 4, pp.340 – 345

Robert Bogue , (2013) "3D printing: the dawn of a new era in manufacturing?", Assembly Automation, Vol. 33 Iss: 4, pp.307 – 311

Farid Fouchal, Phill Dickens, (2007) "Adaptive screen printing for rapid manufacturing", Rapid Prototyping Journal, Vol. 13 Iss: 5, pp.284 – 290

Gillian Andrea Nowlan , (2015) "Developing and implementing 3D printing services in an academic library", Library Hi Tech, Vol. 33 Iss: 4, pp.472 – 479

Elena Bassoli, Andrea Gatto, Luca Iuliano, Maria Grazia Violante, (2007) "3D printing technique applied to rapid casting", Rapid Prototyping Journal, Vol. 13 Iss: 3, pp.148 – 155

Tomaz Brajljih, Bogdan Valentan, Joze Balic, Igor Drstvensek, (2011) "Speed and accuracy evaluation of additive manufacturing machines", Rapid Prototyping Journal, Vol. 17 Iss: 1, pp.64 – 75

Ian Campbell, David Bourell, Ian Gibson, (2012) "Additive manufacturing: rapid prototyping comes of age", Rapid Prototyping Journal, Vol. 18 Iss: 4, pp.255 – 258

Mika Salmi, Jukka Tuomi, Kaija-Stiina Paloheimo, Roy Björkstrand, Markku Paloheimo, Jari Salo, Risto Kontio, Karri Mesimäki, Antti A. Mäkitie, (2012) "Patient-specific reconstruction with 3D modeling and DMLS additive manufacturing", Rapid Prototyping Journal, Vol. 18 Iss: 3, pp.209 – 214

Guido A. O. Adam , Detmar Zimmer , (2015) "On design for additive manufacturing: evaluating geometrical limitations", Rapid Prototyping Journal, Vol. 21 Iss: 6, pp.662 – 670

Jason B. Jones , David I. Wimpenny , Greg J Gibbons , (2015) "Additive manufacturing under pressure", Rapid Prototyping Journal, Vol. 21 Iss: 1, pp.89 – 97

N.B. Crane, J. Tuckerman, G.N. Nielson, (2011) "Self-assembly in additive manufacturing: opportunities and obstacles", Rapid Prototyping Journal, Vol. 17 Iss: 3, pp.211 – 217

Jeremy Faludi , Cindy Bayley , Suraj Bhogal , Myles Iribarne , (2015) "Comparing environmental impacts of additive manufacturing vs traditional machining via life-cycle assessment", Rapid Prototyping Journal, Vol. 21 Iss: 1, pp.14 – 33

- D. Harber, D.A. Samson, A.S. Sohal, A. Wirth, (1990) "Just-in-Time: The Issue of Implementation", *International Journal of Operations & Production Management*, Vol. 10 Iss: 1, pp.21 – 30
- N. Rajam Ramaswamy, V. Selladurai, A. Gunasekaran, (2002) "Just-in-time implementation in small and medium enterprises", *Work Study*, Vol. 51 Iss: 2, pp.85 – 90
- Patrik Jonsson, Stig-Arne Mattsson, (2006) "A longitudinal study of material planning applications in manufacturing companies", *International Journal of Operations & Production Management*, Vol. 26 Iss: 9, pp.971 – 995
- Mary J. Meixell , George N. Kenyon , Peter Westfall , (2014) "The effects of production outsourcing on factory cost performance: an empirical study", *Journal of Manufacturing Technology Management*, Vol. 25 Iss: 6, pp.750 - 774
- Brian Maskell, (1987),"Just-in-time Manufacturing", *Industrial Management & Data Systems*, Vol. 87 Iss 9/10 pp. 17 – 20
- Cindy Claycomb Cornelia Dröge Richard Germain, (1999),"The Effect of Just-in-Time with Customers on Organizational Design and Performance", *The International Journal of Logistics Management*, Vol. 10 Iss 1 pp. 37 – 58
- Cary M. Wong Brian H. Kleiner, (2001),"Fundamentals of material requirements planning", *Management Research News*, Vol. 24 Iss 3/4 pp. 9 – 12
- Steven A. Melnyk Chris J. Piper, (1981),"Implementation of Material Requirements Planning: Safety Lead Times", *International Journal of Operations & Production Management*, Vol. 2 Iss 1 pp. 52 – 61
- Alan McKinnon, (1987),"Recent Trends in Warehousing Development", *Management Research News*, Vol. 10 Iss 3 pp. 8 – 11
- Thierry Rayna , Ludmila Striukova, From rapid prototyping to home fabrication: How 3D printing is changing business model innovation, *Volume 102, January 2016, Pages 214–224*
- Martin Baumers<sup>a</sup>, Phill Dickens<sup>1</sup>, Chris Tuck<sup>2</sup>, Richard Hague<sup>3</sup>, The cost of additive manufacturing: machine productivity, economies of scale and technology-push, *Volume 102, January 2016, Pages 193–201*
- Danfeng Chen<sup>a</sup>, Steffen Heyer<sup>b</sup>, Suphunnika Ibbotson<sup>c</sup>, Konstantinos Salonitis<sup>d, 1</sup>, Jón Garðar Steingrímsson<sup>b</sup>, Sebastian Thiede<sup>c</sup>, Direct digital manufacturing: definition, evolution, and sustainability implications, *Volume 107, 16 November 2015, Pages 615–625*
- Christian Weller , Robin Kleer , Frank T. Piller, Economic implications of 3D printing: Market structure models in light of additive manufacturing revisited, *Volume 164, June 2015, Pages 43–56*
- Ch. Achilles<sup>a</sup>, D. Aidonis<sup>b</sup>, E. Iakovou<sup>c</sup>, M. Thymianidis<sup>a</sup>, D. Tzetzis<sup>a</sup>, A methodological framework for the inclusion of modern additive manufacturing into the production portfolio of a focused factory, *Volume 37, Part 1, October 2015, Pages 328–339*
- Adam Szirmai<sup>a</sup>, Bart Verspagen<sup>a, b</sup>, Manufacturing and economic growth in developing countries, 1950–2005, *Volume 34, September 2015, Pages 46–59*
- Amir-Mohammad Rahmani<sup>a, b, c</sup>, Pasi Liljeberg<sup>a</sup>, Juha Plosila<sup>a</sup>, Hannu Tenhunen<sup>a</sup>, Developing a power-efficient and low-cost 3D NoC using smart GALS-based vertical channels, *Volume 79, Issue 4, June 2013, Pages 440–456*
- L.M. Galantucci<sup>a</sup>, E. Piperi<sup>b, c</sup>, F. Lavecchia<sup>a</sup>, A. Zhavo<sup>b</sup>, Semi-automatic Low Cost 3D Laser Scanning Systems for Reverse Engineering, *Volume 28, 2015, Pages 94–99*
- Maria Mavri, (2015) Redesigning a Production Chain Based on 3D Printing Technology
- Eleonora Atzeni & Alessandro Salmi (2012) Economics of additive manufacturing for end-usable metal parts
- YOUNG K. SON (1991) A cost estimation model for advanced manufacturing systems, *International Journal of Production Research*, 29:3, 441-452
- Sebastian Mohr and Omera Khan 3D Printing and Its Disruptive Impacts on Supply Chains of the Future November 2015, *Volume 5, Issue 11*

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Στους παρακάτω πίνακες βλέπουμε τα δεδομένα για κάθε παραγωγή.

Παραδοσιακή Μέθοδος Παραγωγής							
Τιμή	Κόστος Παραγωγής	Κόστος Διαχείρισης	Κόστος Έρευνας και Ανάπτυξης	Κόστος Μάρκετινγκ και Πωλήσεων	Αριθμός Προσωπικού	Αριθμός Διαδικασιών	Αριθμός Ημερών Κατασκευής
35	10000	20000	100000	300000	180	4	6
45	15000	25000	100000	320000	210	6	8
69	22000	33000	130000	400000	216	6	10
70	25000	35000	110000	410000	249	6	11
100	30000	38000	150000	450000	120	6	15
24	8000	10000	80000	200000	100	4	10
30	11000	18000	90000	240000	175	6	9
80	27000	36000	125000	360000	230	6	13
57	16200	21000	105000	420000	115	4	7
91	28300	35500	138000	480000	140	6	9

Κόστος Παραγωγής	Κόστος Α υλών	Αμοιβές προσωπικού	Λοιπά έξοδα προσωπικού	Αξία μηχανημάτων	Συντήρηση και επισκευή μηχανών	Λογισμικό	Περιφερειακά έξοδα	Αριθμός μηχανών	Αριθμός προσωπικού	
10000	320	100000	1000	300000		2500	10000	3000	3000	120
15000	450	125500	1100	250000		2100	9000	2000	2000	150
22000	220	120340	1400	160000		1400	13000	1000	4000	170
25000	240	212500	600	400000		3500	17000	4000	8000	230
30000	310	92100	850	100000		900	11000	5000	1000	90
8000	110	77900	990	120000		1000	7000	3000	3000	81
11000	99	110750	1050	350000		3000	9000	7000	2000	145
27000	360	251800	1300	260000		2400	8000	3000	1000	180
16200	520	101450	750	380000		3600	12000	2000	2000	95
28300	430	122220	1500	200000		1800	10000	3000	100	104

Κόστος Διαχείρισης	Κόστος Λογιστηρίου	Διοικητική υποστήριξη	Κόστος εσωτερικού ελέγχου
20000	10000	20000	8000
25000	20000	30000	7000
33000	30000	45000	9000
35000	25000	50000	7500
38000	18000	40000	6000
10000	20000	32000	5400
18000	24000	27500	3600
36000	17000	35200	7520
21000	34000	27000	11050
35500	13500	21000	6300

Κόστος Έρευνας και Ανάπτυξης	Κόστος έρευνας	Ποιότητα	Κόστος ανάπτυξης
100000	250000	700000	300000
100000	180000	400000	200000
130000	360000	600000	400000
110000	270000	710000	305200
150000	250000	490000	320000
80000	170000	360000	180000
90000	500000	850000	490500
125000	380000	520000	410900
105000	360000	473000	370500
138000	420000	685000	459000

Κόστος Μάρκετινγκ και Πωλήσεων	Κόστος Διανομής	Κόστος Αποθήκευσης	Κόστος Καταγραφής εμπορευμάτων	Πακετάρισμα
300000	900000	800000	1000000	300000
320000	1000000	600000	900000	400000
400000	800000	850000	1200000	350000
410000	750500	680000	950000	220000
450000	420000	570500	600000	680000
200000	350000	460000	300000	600000
240000	680000	540000	550000	530000
360000	500000	480300	860000	850000
420000	1100000	1340000	1350000	700000
480000	600000	890000	790500	400000

3D Printing Μέθοδος Παραγωγής							
Τμή	Κόστος Παραγωγής	Κόστος Διαχείριση	Κόστος Έρευνας και Ανάπτυξης	Κόστος Μάρκετινγκ και Πωλήσεων	Αριθμός Προσωπικού	Αριθμός Διαδικασιών	Αριθμός Ημερών Κατασκευής
55	8800	10000	20000	120000	21	4	1
65	10000	12000	27000	150000	25	3	3
89	12000	16000	32000	180000	34	4	4
70	9000	13500	25000	200000	41	4	2
100	15000	10000	30000	240000	24	3	1
44	6000	9500	15000	100000	38	4	3
35	6800	11000	18000	160000	43	4	4
92	13500	12000	29000	200000	30	3	2
41	24000	16000	31000	320000	56	4	2
57	18500	8600	48000	285000	20	3	4

Κόστος Παραγωγής	Κόστος Α υλών	Αμοιβές προσωπικού	Λοιπά έξοδα προσωπικού	Άξια εκτυπωτών 3D	Συντήρηση και επισκευή εκτυπωτών	Λογισμικό	Περιφερειακά έξοδα	Αριθμός εκτυπωτών	Αριθμός προσωπικού
8800	1000	99000	1000	900000	7000	10000	3000	30	12
10000	800	80000	800	1250000	6500	9000	2000	20	14
12000	600	108000	1300	2360000	4300	13000	1000	40	21
9000	1200	92000	1800	800000	8200	17000	4000	56	32
15000	450	66500	1100	1200000	9200	11000	5000	35	15
6000	830	61600	1100	710000	10500	7000	3000	32	23
6800	1000	110000	1300	880000	11300	9000	7000	27	27
13500	900	75000	800	160000	6000	8000	3000	18	24
24000	1200	54000	1500	200000	7600	12000	2000	34	34
18500	750	87500	1000	50000	3500	10000	3000	10	11

Κόστος Διαχείρισης	Κόστος Λογιστηρίου	Διοικητική υποστήριξη	Κόστος εσωτερικού ελέγχου
10000	7000	12000	3500
12000	10000	15000	2500
16000	20000	22000	2200
13500	12000	25000	1800
10000	9000	16000	4000
9500	14500	10000	5500
11000	6400	3200	3100
12000	25500	11500	2800
16000	19100	22000	4200
8600	13000	18000	3700

Κόστος Έρευνας και Ανάπτυξης	Κόστος έρευνας	Ποιότητα	Κόστος ανάπτυξης
20000	25000	300000	37500
27000	19000	250000	25000
32000	17500	150000	50000
25000	11000	100000	24000
30000	23000	200000	17000
15000	38000	480000	38000
18000	28000	360000	30000
29000	19000	240000	16500
31000	9000	180000	10000
48000	46000	410000	85000

Κόστος Μάρκετινγκ και Πωλήσεων	Κόστος Διανομής	Πακετάρισμα
120000	900000	300000
150000	1000000	400000
180000	800000	350000
200000	750500	220000
240000	420000	680000
100000	350000	600000
160000	680000	530000
200000	500000	850000
320000	1100000	700000
285000	600000	400000



Στους παρακάτω πίνακες βλέπουμε τα αποτελέσματα της παλινδρόμησης για κάθε μέθοδο παραγωγής, αρχίζοντας με την παραδοσιακή.

SUMMARY OUTPUT								
Τιμή								
Regression Statistics								
Multiple R	0,918008972							
R Square	0,842740473							
Adjusted R Square	0,292332128							
Standard Error	19,09178179							
Observations	10							
ANOVA								
	df	SS	MS	F	Significance F			
Regression	7	3906,607736	558,0868194	1,531118633	0,450549617			
Residual	2	728,9922639	364,496132					
Total	9	4635,6						
	Coefficients	Standard Error	t Stat	P-value	Lower 95%	Upper 95%	Lower 95,0%	Upper 95,0%
Intercept	257,940964	148,1606899	1,740954123	0,223818	-379,5430328	895,4249608	-379,5430328	895,4249608
X Variable 1	-0,001405959	0,004079359	-0,344651974	0,763224192	-0,018958022	0,016146104	-0,018958022	0,016146104
X Variable 2	-0,003938487	0,008901092	-0,442472282	0,701398842	-0,042236795	0,034359822	-0,042236795	0,034359822
X Variable 3	0,004919955	0,002889939	1,702442343	0,230782277	-0,00751445	0,017354359	-0,00751445	0,017354359
X Variable 4	-0,000229886	0,000331627	-0,693205713	0,55986133	-0,00165676	0,001196989	-0,00165676	0,001196989
X Variable 5	-50,25611408	43,08306995	-1,166493338	0,363692626	-235,6276026	135,1153744	-235,6276026	135,1153744
X Variable 6	-6,802449979	23,66523147	-0,287444895	0,80081845	-108,6257227	95,02082279	-108,6257227	95,02082279
X Variable 7	-34,37781563	20,39977094	-1,685205963	0,233990891	-122,1509457	53,39531448	-122,1509457	53,39531448

SUMMARY OUTPUT								
Κόστος Παραγωγής								
Regression Statistics								
Multiple R	1							
R Square	1							
Adjusted R Square	65535							
Standard Error	0							
Observations	10							
ANOVA								
	df	SS	MS	F	Significance F			
Regression	9	605705000	67300555,56	#APIO!	#APIO!			
Residual	0	0	65535					
Total	9	605705000						
	Coefficients	Standard Error	t Stat	P-value	Lower 95%	Upper 95%	Lower 95,0%	Upper 95,0%
Intercept	-25785,08155	0	65535	#APIO!	-25785,08155	-25785,0815	-25785,08155	-25785,0815
X Variable 1	32,44628957	0	65535	#APIO!	32,44628957	32,44628957	32,44628957	32,44628957
X Variable 2	0,084881751	0	65535	#APIO!	0,084881751	0,084881751	0,084881751	0,084881751
X Variable 3	9,479199898	0	65535	#APIO!	9,479199898	9,479199898	9,479199898	9,479199898
X Variable 4	-0,181289836	0	65535	#APIO!	-0,181289836	-0,18128984	-0,181289836	-0,18128984
X Variable 5	13,69662819	0	65535	#APIO!	13,69662819	13,69662819	13,69662819	13,69662819
X Variable 6	2,045283136	0	65535	#APIO!	2,045283136	2,045283136	2,045283136	2,045283136
X Variable 7	2,961966833	0	65535	#APIO!	2,961966833	2,961966833	2,961966833	2,961966833
X Variable 8	0,268227676	0	65535	#APIO!	0,268227676	0,268227676	0,268227676	0,268227676
X Variable 9	-21,35950534	0	65535	#APIO!	-21,35950534	-21,3595053	-21,35950534	-21,3595053

SUMMARY OUTPUT								
Κόστος Διαχείρισης								
Regression Statistics								
Multiple R	0,652610187							
R Square	0,425900056							
Adjusted R Square	0,138850084							
Standard Error	8927,855343							
Observations	10							
ANOVA								
	df	SS	MS	F	Significance F			
Regression	3	354785393,9	118261798	1,483713977	0,310933248			
Residual	6	478239606,1	79706601,02					
Total	9	833025000						
	Coefficients	Standard Error	t Stat	P-value	Lower 95%	Upper 95%	Lower 95,0%	Upper 95,0%
Intercept	9093,116482	13991,17356	0,649918067	0,539815402	-25142,05192	43328,28488	-25142,05192	43328,28488
X Variable 1	-0,714309829	0,508929883	-1,403552537	0,210032507	-1,959616391	0,530996734	-1,959616391	0,530996734
X Variable 2	0,6619798	0,339568753	1,949472072	0,099131494	-0,168915005	1,492874606	-0,168915005	1,492874606
X Variable 3	1,607322171	1,639577695	0,980326932	0,36478399	-2,404579921	5,619224264	-2,404579921	5,619224264

SUMMARY OUTPUT								
Κόστος Έρευνας και Ανάπτυξης								
Regression Statistics								
Multiple R	0,955088717							
R Square	0,912194457							
Adjusted R Square	0,868291685							
Standard Error	8074,923921							
Observations	10							
ANOVA								
	df	SS	MS	F	Significance F			
Regression	3	4064373622	1354791207	20,77760525	0,00143121			
Residual	6	391226378	65204396,33					
Total	9	4455600000						
	Coefficients	Standard Error	t Stat	P-value	Lower 95%	Upper 95%	Lower 95,0%	Upper 95,0%
Intercept	68469,37525	11543,00382	5,931677433	0,001024185	40224,66242	96714,08809	40224,66242	96714,08809
X Variable 1	-0,792440025	0,118978566	-6,660359509	0,000553943	-1,083570089	-0,50130996	-1,083570089	-0,50130996
X Variable 2	-0,066103958	0,023868045	-2,76955896	0,032441379	-0,124506959	-0,00770096	-0,124506959	-0,00770096
X Variable 3	0,964517224	0,12705397	7,591397745	0,000271845	0,653627358	1,275407089	0,653627358	1,275407089

SUMMARY OUTPUT								
Κόστος Μάρκετινγκ και Πωλήσεων								
Regression Statistics								
Multiple R	0,756333929							
R Square	0,572041012							
Adjusted R Square	0,229673822							
Standard Error	80313,12387							
Observations	10							
ANOVA								
	df	SS	MS	F	Significance F			
Regression	4	43109010667	10777252667	1,67084063	0,291158838			
Residual	5	32250989333	6450197867					
Total	9	75360000000						
	Coefficients	Standard Error	t Stat	P-value	Lower 95%	Upper 95%	Lower 95,0%	Upper 95,0%
Intercept	310385,6592	130236,9813	2,383237511	0,062912179	-24399,15934	645170,4777	-24399,15934	645170,4777
X Variable 1	-0,356334015	0,198747429	-1,792898743	0,132967762	-0,867230546	0,154562515	-0,867230546	0,154562515
X Variable 2	0,147641907	0,166557161	0,886433858	0,415977111	-0,280506906	0,575790719	-0,280506906	0,575790719
X Variable 3	0,273332835	0,172387557	1,585571718	0,173693418	-0,169803488	0,716469157	-0,169803488	0,716469157
X Variable 4	-0,075902373	0,146690091	-0,51743354	0,626922665	-0,452981257	0,301176511	-0,452981257	0,301176511

SUMMARY OUTPUT								
Τιμή								
Regression Statistics								
Multiple R	0,862506943							
R Square	0,743918227							
Adjusted R Square	-0,152367981							
Standard Error	24,36280638							
Observations	10							
ANOVA								
	df	SS	MS	F	Significance F			
Regression	7	3448,507331	492,6439044	0,830000753	0,6449102			
Residual	2	1187,092669	593,5463346					
Total	9	4635,6						
	Coefficients	Standard Error	t Stat	P-value	Lower 95%	Upper 95%	Lower 95,0%	Upper 95,0%
Intercept	107,7893293	92,61754592	1,163811114	0,364564564	-290,7118075	506,2904661	-290,7118075	506,2904661
X Variable 1	-0,00372575	0,004494333	-0,828988391	0,494295643	-0,023063305	0,015611805	-0,023063305	0,015611805
X Variable 2	0,006774815	0,005578318	1,214490669	0,348495299	-0,01722675	0,03077638	-0,01722675	0,03077638
X Variable 3	0,000866929	0,00518347	0,167248742	0,88255572	-0,021435743	0,023169601	-0,021435743	0,023169601
X Variable 4	0,000132184	0,000665264	0,198693583	0,860868903	-0,002730218	0,002994585	-0,002730218	0,002994585
X Variable 5	-0,817232973	3,235299531	-0,25259886	0,824168399	-14,73760333	13,10313739	-14,73760333	13,10313739
X Variable 6	-21,49068989	25,85193029	-0,831299236	0,493247595	-132,7225683	89,74118853	-132,7225683	89,74118853
X Variable 7	-8,643159513	15,82230785	-0,546264148	0,639679091	-76,72105558	59,43473655	-76,72105558	59,43473655

SUMMARY OUTPUT								
Κόστος Παραγωγής								
Regression Statistics								
Multiple R	1							
R Square	1							
Adjusted R Square	65535							
Standard Error	0							
Observations	10							
ANOVA								
	df	SS	MS	F	Significance F			
Regression	9	282484000	31387111,11	#APIΘ!	#APIΘ!			
Residual	0	0	65535					
Total	9	282484000						
	Coefficients	Standard Error	t Stat	P-value	Lower 95%	Upper 95%	Lower 95,0%	Upper 95,0%
Intercept	111754,9642	0	65535	#APIΘ!	111754,9642	111754,9642	111754,9642	111754,9642
X Variable 1	74,83999594	0	65535	#APIΘ!	74,83999594	74,83999594	74,83999594	74,83999594
X Variable 2	-1,236594167	0	65535	#APIΘ!	-1,236594167	-1,236594167	-1,236594167	-1,236594167
X Variable 3	49,08756388	0	65535	#APIΘ!	49,08756388	49,08756388	49,08756388	49,08756388
X Variable 4	0,032575745	0	65535	#APIΘ!	0,032575745	0,032575745	0,032575745	0,032575745
X Variable 5	-15,6812794	0	65535	#APIΘ!	-15,6812794	-15,6812794	-15,6812794	-15,6812794
X Variable 6	-8,773459579	0	65535	#APIΘ!	-8,773459579	-8,773459579	-8,773459579	-8,773459579
X Variable 7	17,23763385	0	65535	#APIΘ!	17,23763385	17,23763385	17,23763385	17,23763385
X Variable 8	685,9922063	0	65535	#APIΘ!	685,9922063	685,9922063	685,9922063	685,9922063
X Variable 9	-713,9156914	0	65535	#APIΘ!	-713,9156914	-713,9156914	-713,9156914	-713,9156914

SUMMARY OUTPUT								
Κόστος Διαχείρισης								
Regression Statistics								
Multiple R	0,732919367							
R Square	0,537170799							
Adjusted R Square	0,305756199							
Standard Error	2166,780887							
Observations	10							
ANOVA								
	df	SS	MS	F	Significance F			
Regression	3	32694363,52	10898121,17	2,321248522	0,174842388			
Residual	6	28169636,48	4694939,414					
Total	9	60864000						
	Coefficients	Standard Error	t Stat	P-value	Lower 95%	Upper 95%	Lower 95,0%	Upper 95,0%
Intercept	9914,844855	3609,216165	2,747090893	0,033420238	1083,411049	18746,27866	1083,411049	18746,27866
X Variable 1	0,158791966	0,123270624	1,288157391	0,2451352	-0,142840385	0,460424316	-0,142840385	0,460424316
X Variable 2	0,140338393	0,123065972	1,14035091	0,297605686	-0,160793193	0,441469979	-0,160793193	0,441469979
X Variable 3	-0,718735775	0,704956654	-1,019546053	0,347279669	-2,443702567	1,006231018	-2,443702567	1,006231018

SUMMARY OUTPUT								
Κόστος Έρευνας και Ανάπτυξης								
Regression Statistics								
Multiple R	0,739904786							
R Square	0,547459092							
Adjusted R Square	0,321188639							
Standard Error	7623,240445							
Observations	10							
ANOVA								
	df	SS	MS	F	Significance F			
Regression	3	421817230,7	140605743,6	2,419489965	0,164427056			
Residual	6	348682769,3	58113794,89					
Total	9	770500000						
	Coefficients	Standard Error	t Stat	P-value	Lower 95%	Upper 95%	Lower 95,0%	Upper 95,0%
Intercept	28143,70579	6357,551253	4,426815399	0,004438274	12587,33828	43700,0733	12587,33828	43700,0733
X Variable 1	0,683515565	0,833916587	0,819645005	0,443751066	-1,357004815	2,724035945	-1,357004815	2,724035945
X Variable 2	-0,085736888	0,059522857	-1,440402752	0,19982478	-0,231384073	0,059910298	-0,231384073	0,059910298
X Variable 3	0,184722272	0,229053154	0,806460286	0,450751502	-0,375750605	0,745195148	-0,375750605	0,745195148

SUMMARY OUTPUT								
Κόστος Μάρκετινγκ και Πωλήσεων								
Regression Statistics								
Multiple R	0,432308741							
R Square	0,186890848							
Adjusted R Square	-0,045426053							
Standard Error	71428,07244							
Observations	10							
ANOVA								
	df	SS	MS	F	Significance F			
Regression	2	8208713268	4104356634	0,80446514	0,484753522			
Residual	7	35713786732	5101969533					
Total	9	43922500000						
	Coefficients	Standard Error	t Stat	P-value	Lower 95%	Upper 95%	Lower 95,0%	Upper 95,0%
Intercept	53265,54184	115756,4936	0,460151653	0,659359391	-220455,0702	326986,1539	-220455,0702	326986,1539
X Variable 1	0,099613771	0,103293469	0,964376277	0,36698261	-0,14463647	0,343864011	-0,14463647	0,343864011
X Variable 2	0,142154474	0,126844174	1,120701639	0,299385683	-0,157784336	0,442093284	-0,157784336	0,442093284