



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΣΥΜΒΟΛΗ ΣΤΗΝ ΣΥΜΠΙΕΣΗ ΤΟΥ ΧΡΟΝΟΥ ΚΑΙ ΤΟΥ  
ΚΟΣΤΟΥΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΝΕΩΝ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ ΜΕ ΤΗ  
ΒΟΗΘΕΙΑ ΤΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΤΑΧΕΙΑΣ  
ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΠΡΩΤΟΤΥΠΩΝ ΚΑΙ ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ**

**ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ**

**ΣΤΑΜΑΤΙΟΥ Ν. ΠΟΛΥΔΩΡΑ**

Διπλωματούχου Μηχανολόγου Μηχανικού Ε.Μ.Π.

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ:**

**Μ. ΣΦΑΝΤΖΙΚΟΠΟΥΛΟΣ**

Ομ.Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, Σεπτέμβριος 2013





# ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

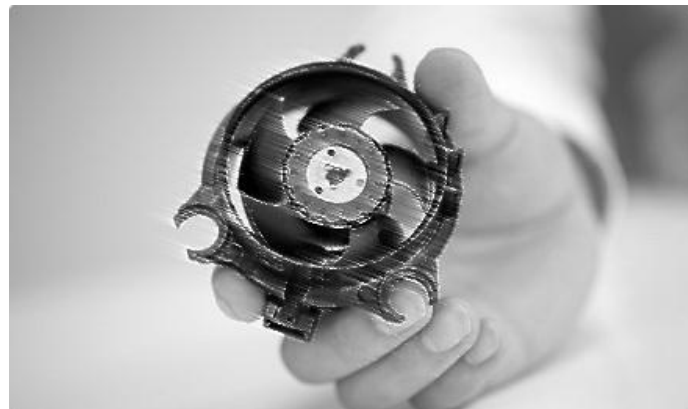
## ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

### ΣΥΜΒΟΛΗ ΣΤΗΝ ΣΥΜΠΙΕΣΗ ΤΟΥ ΧΡΟΝΟΥ ΚΑΙ ΤΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΝΕΩΝ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ ΜΕ ΤΗ ΒΟΗΘΕΙΑ ΤΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΤΑΧΕΙΑΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΠΡΩΤΟΤΥΠΩΝ ΚΑΙ ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ

#### ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

**ΣΤΑΜΑΤΙΟΥ Ν. ΠΟΛΥΔΩΡΑ**

Διπλωματούχου Μηχανολόγου Μηχανικού Ε.Μ.Π.



#### ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΣΥΜΒΟΥΛΕΥΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

1. Μ.ΣΦΑΝΤΖΙΚΟΠΟΥΛΟΣ, Ομ.Καθ. Ε.Μ.Π.
2. Θ.ΚΩΣΤΟΠΟΥΛΟΣ, Αν.Καθ. Ε.Μ.Π.
3. Σ.ΔΙΠΛΑΡΗΣ, Επίκ.Καθ.Ε.Μ.Π.

#### ΕΠΤΑΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

1. Μ.ΣΦΑΝΤΖΙΚΟΠΟΥΛΟΣ, Ομ.Καθ. Ε.Μ.Π.
2. Θ.ΚΩΣΤΟΠΟΥΛΟΣ, Αν.Καθ. Ε.Μ.Π.
3. Σ.ΔΙΠΛΑΡΗΣ, Επίκ.Καθ.Ε.Μ.Π.
4. Ι.ΑΝΤΩΝΙΑΔΗΣ, Καθ. Ε.Μ.Π.
5. Δ.ΜΑΝΩΛΑΚΟΣ, Καθ. Ε.Μ.Π.
6. Χ.ΠΡΟΒΑΤΙΔΗΣ, Καθ. Ε.Μ.Π.
7. Β.ΣΠΙΤΑΣ, Λέκ. Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, Σεπτέμβριος 2013

Copyright © Σταμάτιος Ν. Πολύδωρας, 2013.  
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματός μου. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας διατριβής, εξ'ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της διατριβής για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

*Η έγκριση της διδακτορικής διατριβής από την Ανώτατη Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ. Πολυτεχνείου δεν υποδηλώνει αποδοχή των γνώμών του συγγραφέα (Ν. 5343/ 1932, Άρθρο 202).*

*Στις μικρές μου «εμπνεύσεις»,  
τα παιδιά μου,  
Αναστασία και Μαρία-Ζωή*



## ΣΗΜΕΙΩΜΑ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ

Οι Έλληνες από τα αρχαία χρόνια είμαστε λαός ναυτικός.

Έχουμε τη θάλασσα στη μυθολογία μας, στην ιστορία μας, στην παράδοσή μας, τελικά στο ίδιο μας το DNA.

Έχουμε ζήσει σε αυτή και από αυτή, ταξιδέψει σε αυτή, πολεμήσει σε αυτή, αλλά και με αυτή.

Ο Όμηρος στην Οδύσσεια περιέγραψε τους κινδύνους της πριν από 2.700 χρόνια.

Έννοιες όπως το ταξίδι, το πέλαγο, η φουρτούνα, η ψαριά είναι σε όλους μας οικείες.

Μεγαλύτερος «αλιέας» για όλους μας, ο ίδιος ο Ιησούς Χριστός, ο μέγας αλιέας ψυχών.

Η παρούσα διατριβή, ήταν για μένα ένα ταξίδι στη «θάλασσα της γνώσης». Μπήκα σε αυτό νέος και με ορμή, με μικρή επίγνωση του μεγέθους και των «κινδύνων» της και με μεγάλες προσδοκίες.

Βρέθηκα στα «ανοικτά», πέρασα φουρτούνες και «συμπληγάδες», προσπέρασα «σειρήνες», ξανάφτιαξα τη βάρκα μου όποτε χρειάστηκε, κράτησα με πείσμα το σχοινί σαν το «γέρο» του Χέμινγκουεϊ και θεωρώ ότι επιστρέφοντας στο λιμάνι μου, φέρνω και εγώ στην «οικογένειά» μου ένα μικρό καλάθι με «αλιεύματα».

Ο «θαλασσινός» όμως, «ψημένος» στο αλάτι ... και στη στεριά όταν βγει ... πάλι τη θάλασσα κοιτάζει και αδημονεί να ξαναβρεθεί στην αγκαλιά της...





## ΠΡΟΛΟΓΟΣ - ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα Διδακτορική Διατριβή πραγματοποιήθηκε στη Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου, στον Τομέα Μηχανολογικών Κατασκευών & Αυτομάτου Ελέγχου, υπό την ακαδημαϊκή και επιστημονική επίβλεψη του Καθηγητή της Σχολής κ. Μ.Μ. Σφαντζικόπουλου.

Σημαντικό μέρος της έρευνας και των εφαρμογών της ΔΔ υλοποιήθηκαν με τα μέσα και τον υλικοτεχνικό εξοπλισμό του Εργαστηρίου Ταχείας Κατασκευής Πρωτοτύπων & Εργαλείων, που εγκαθιδρύθηκε και θεσμοθετήθηκε κατά τη διάρκεια της πορείας της παρούσας ερευνητικής προσπάθειας, παράλληλα με την εξέλιξή της. Αξιοσημείωτη επίσης είναι η, στο διάστημα της ΔΔ, στενή συνεργασία με το Τμήμα Βιομηχανικής Διοίκησης & Τεχνολογίας του Πανεπιστημίου Πειραιά και με πολλούς ακόμα ελληνικούς βιομηχανικούς και κατασκευαστικούς φορείς.

Ευχαριστώ θερμά και από καρδιάς τον επιβλέποντα της ΔΔ μου, Ομότιμο Καθηγητή Ε.Μ.Π. κ. Μ. Σφαντζικόπουλο, αναγνωρισμένο πρωτοπόρο και «σκαπανέα» του Ελληνικού ακαδημαϊκού χώρου σε θέματα Μηχανολογικού Σχεδιασμού, Καινοτομίας και Τυποποίησης, που από νεαρή ηλικία μου εμπιστεύθηκε την ανάθεση έρευνας στην καινοτόμο επιστημονική περιοχή της Ταχείας Κατασκευής Πρωτοτύπων & Εργαλείων, με υπομονή με στήριξε διαρκώς σε καλές και κυρίως σε δύσκολες στιγμές και ως αληθινός «Μέντωρ» μου άνοιξε δρόμους στην προσωπική, επιστημονική και επαγγελματική μου εξέλιξη, που σήμερα οδηγούν στην υποβολή της παρούσας διατριβής.

Ευχαριστώ με ευγνωμοσύνη τον Αν.Καθηγητή κ. Θ. Κωστόπουλο, αγαπημένο μου δάσκαλο από τα φοιτητικά μου χρόνια, που συνετέλεσε καίρια τόσο στις αρχές, όσο και στο τέλος της παρούσας ερευνητικής προσπάθειας, ως προς την εμπλοκή μου με την επιστημονική περιοχή της Ταχείας Κατασκευής Πρωτοτύπων & Εργαλείων και την επιτυχή ευόδωση της προσπάθειάς μου.

Θερμές ευχαριστίες και προς τον Επ. Καθηγητή κ. Σ.Διπλάρη, που εκτός από τις ευγενικές του παραινέσεις για την συνέχιση και προαγωγή της έρευνάς μου, μου προσέφερε πάντοτε τη βοήθειά του και με τίμησε με την απόλυτη εμπιστοσύνη του στο χειρισμό θεμάτων Ταχείας Κατασκευής Πρωτοτύπων, στο διάστημα που διετέλεσε προϊστάμενός μου και Διευθυντής του Εργαστηρίου Ταχείας Κατασκευής Πρωτοτύπων & Εργαλείων – Αντίστροφου Σχεδιασμού, της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ.

Ευχαριστίες οφείλονται και προς όλα τα μέλη της επταμελούς εξεταστικής επιτροπής για το χρόνο που διέθεσαν στη μελέτη και εξέταση της κρινόμενης ΔΔ, με ιδιαίτερη μνεία στον Καθηγητή κ. Χ. Προβατίδη με τον οποίο αρμονικά συνεργαζόμαστε επιστημονικά και επαγγελματικά τα τελευταία χρόνια, αλλά και σε όλους τους συναδέλφους εντός και εκτός Ε.Μ.Π. που η συνεργασία τους παρήγαγε αξιοποιήσιμα αποτελέσματα για την υποβαλλόμενη διατριβή.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου για όλα όσα μου προσέφεραν από παιδί ως σήμερα, την αγαπημένη μου σύζυγο Κατερίνα-Μαρία, που εκτός από μια όμορφη οικογένεια που μου έδωσε, με συνόδευε με υπομονή, αντοχή και ανοχή στο μακρύ ερευνητικό ταξίδι μου και τον Μεγαλοδύναμο Θεό που σε κρίσιμες για μένα ώρες με κράτησε στη ζωή, γερό και για να ολοκληρώσω την προσπάθειά μου.



## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....	7	
ABSTRACT.....	8	
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ .....	9	
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ .....	11	
ΣΥΝΤΜΗΣΕΙΣ - ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΙ .....	14	
ΣΥΝΤΜΗΣΕΙΣ-ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΙ ΣΤΑ ΑΓΓΛΙΚΑ (ABBREVIATIONS).....	15	
1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ, ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ ΠΕΔΙΟ, ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ.....	17
1.1	Γενικά.....	17
1.2	Μηχανολογικός Σχεδιασμός , Ανάπτυξη Νέων Προϊόντων και Σχεδιασμός Μηχανολογικών Κατασκευών .....	19
1.3	Ολοκληρωμένος Μηχανολογικός Σχεδιασμός (ΟΜΣ) .....	23
1.4	Τα Πρωτότυπα στον Ολοκληρωμένο Μηχανολογικό Σχεδιασμό & Ανάπτυξη Νέων Προϊόντων.....	26
1.5	Η έννοια του πρωτοτύπου .....	27
1.6	Κατηγορίες Πρωτοτύπων στον Μηχανολογικό Σχεδιασμό .....	30
1.7	Παραδοσιακές & Συμβατικές μέθοδοι κατασκευής πρωτοτύπων .....	32
1.8	Τεχνολογίες Συμπίεσης Χρόνου & Σύγχρονες Τεχνικές Πρωτοτυποποίησης .....	37
1.8.1	CAD – VR – VP: Ψηφιακά Πρωτότυπα – Εικονική Πραγματικότητα & Πρωτοτυποποίηση .....	39
1.8.2	CAE: Οι Προσομοιώσεις ως πρωτότυπα.....	46
1.8.3	CNC Πρωτότυπα με HSC και Desktop Milling .....	49
1.8.4	Πρωτότυπα ΤΚΠ & ΤΚΕ.....	53
1.9	Ταχεία Κατασκευή Πρωτοτύπων (ΤΚΠ) .....	54
1.9.1	Βασικές αρχές και ορισμοί .....	55
1.9.2	Ιστορική Εξέλιξη – Σημερινή Κατάσταση .....	56
1.9.3	Πρωτόκολλα Επικοινωνίας, Αρχεία STL, Λογισμικό υποστήριξης, επεξεργασίας και διαχείρισης.....	64
1.9.4	Κατάταξη, Κατηγοριοποίηση και κύριες Τεχνολογίες ΤΚΠ.....	69
1.10	Ταχεία Κατασκευή Εργαλείων (ΤΚΕ) .....	83
1.10.1	Γενικά.....	83
1.10.2	Άμεση ΤΚΕ.....	84
1.10.3	Έμμεση ΤΚΕ.....	86
1.11	Έρευνα και προοπτικές ΤΚΠ – ΤΚΕ .....	91
1.12	Πολυκριτηριακή λήψη αποφάσεων.....	107
1.12.1	Αποφάσεις σε προβλήματα πολλών μεταβλητών .....	107
1.12.2	Τεχνικές και μέθοδοι Πολυπαραμετρικής Λήψης Αποφάσεων.....	109
1.12.3	Μέθοδος Αναλυτικής Ιεράρχησης (Analytical Hierarchy Process, AHP) .....	111
1.12.4	Λογισμικό εφαρμογής μεθόδου .....	113

1.13	Οργάνωση μεγάλου όγκου πληροφοριών σε σχεσιακές βάσεις δεδομένων	115
1.13.1	Έννοιες και χαρακτηριστικά σχεσιακών βάσεων δεδομένων	116
1.14	Εργαστήριο ΤΚΠ&Ε του ΕΜΠ	120
2	ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΟ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΚΑΙ ΣΤΟΧΟΙ ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ	123
3	ΣΥΜΒΟΛΗ ΣΤΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΙΚΗ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ ΠΡΩΤΟΤΥΠΟΠΟΙΗΣΗΣ ΣΤΙΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ & ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΝΕΩΝ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ	125
3.1	Ανάγκη συστηματικής καθοδήγησης ενεργειών πρωτοτυποποίησης και πεδίο/πεδία εφαρμογής/εφαρμογών	125
3.2	Εναλλακτικές Μέθοδοι Δημιουργίας Πρωτοτύπων	127
3.3	Η μέθοδος Analytical Hierarchy Process (AHP) στην επιλογή μεθοδολογίας πρωτοτυποποίησης	129
3.4	Στόχος και ομάδες κριτηρίων επιλογής μεθοδολογίας πρωτοτυποποίησης κατά τη διαδικασία του ολοκληρωμένου μηχανολογικού σχεδιασμού βιομηχανικών προϊόντων	130
3.5	Τεχνικές παράμετροι-κριτήρια σχεδιασμού. Επιλογή, ομαδοποίηση και δένδροειδής συγκρότησή τους	131
3.6	Διοικητικές παράμετροι (Χρονικές, κοστολογικές, ρίσκο)	135
3.7	Λοιπές παράμετροι	137
3.8	Κλίμακες Βαθμολογίας – Μεταφορά της εμπειρίας των ειδικών, των πειραματικών αποτελεσμάτων και της έρευνας πεδίου στο δένδρο απόφασης	138
3.9	Επιδιώξεις σχεδιασμού & αξιολόγηση εναλλακτικών πρωτοτυποποίησης	144
3.10	Εφαρμογή 1 – Γεωμετρικό Πρωτότυπο	145
3.11	Εφαρμογή 2 – Πρωτότυπο Εργαλείο Παραγωγής	153
4	ΣΥΓΚΡΟΤΗΣΗ ΔΟΜΩΝ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ & ΠΑΡΟΧΩΝ ΤΚΠ	159
4.1	Τεχνικά χαρακτηριστικά και παράμετροι επιλογής	159
4.2	Σχεδιασμός & Δόμηση Σχεσιακής Βάσης δεδομένων τεχνολογιών και συστημάτων ΤΚΠ	160
4.2.1	Οντότητες και πεδία χαρακτηριστικών της βάσης	161
4.2.2	Δομή της βάσης – Σχέσεις και διασύνδεση Πινάκων	171
4.2.3	Εγκυρότητα τιμών – Έλεγχοι και «στοιχεία γνώσης» – Επίπεδα πρόσβασης και δικαιωμάτων χρήσης	174
4.3	Σχεδιασμός & ανάπτυξη ΣΥΑ με αναφορά στην προτεινόμενη ΣΒΔ – Μερική πιλοτική υλοποίηση και λειτουργία του ΣΥΑ	176
4.3.1	Αρχιτεκτονική Συστήματος	176
4.3.2	Εργαλεία υλοποίησης του συστήματος	177
4.3.3	Γενικά στοιχεία σχεδιασμού Διεπαφής (Interface) ΣΥΑ	178
4.3.4	Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα σχεδιαζόμενου ΣΥΑ	179
4.3.5	Διαθεσιμότητα και πρόσβαση του ΣΥΑ – Παράδειγμα επιλογής συστήματος ΤΚΠ με συνδυασμό ΣΥΑ, ΣΒΔ και αξιολόγησης εναλλακτικών λύσεων	180
5	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ & ΕΡΕΥΝΑ ΠΕΔΙΟΥ	183
5.1	Μέθοδος ΤΚΠ LOM	183

5.1.1	Εισαγωγή στη μέθοδο LOM .....	183
5.1.2	Η μονάδα LOM1015 του Εργαστηρίου ΤΚΠ του ΕΜΠ .....	185
5.1.3	Χρόνος – κόστος κατασκευής πρωτοτύπων LOM .....	187
5.1.3.1	Γενικά .....	187
5.1.3.2	Στόχευση και προγραμματισμός της εργαστηριακής έρευνας – Αναγνώριση βασικών μεταβλητών χρόνου – Συλλογή Δεδομένων .....	188
5.1.3.3	Μοντέλο προεκτίμησης χρόνου κατασκευής σε LOM και λοιπές συνιστώσες χρόνου υλοποίησης .....	194
5.1.3.4	Παράμετροι κοστολόγησης & συσχέτιση χρόνου – κόστους κατασκευής .....	197
5.1.4	Διαστασιολογική Ακρίβεια και Ποιότητα επιφάνειας πρωτοτύπων LOM .....	199
5.1.4.1	Παράγοντες διαστασιολογικών αποκλίσεων .....	200
5.1.4.2	Σχεδιασμός και κατασκευή δοκιμών έρευνας .....	201
5.1.4.3	Μέσα και συνθήκες μετροτεχνικού ελέγχου και τραχυμετρήσεων... .....	204
5.1.4.4	Ακρίβεια κατά τον άξονα Z .....	205
5.1.4.5	Ακρίβεια στο επίπεδο XY .....	209
5.1.4.6	Ανάλυση αποτελεσμάτων – Αριθμητικοί συντελεστές αντιστάθμισης .....	214
5.1.4.7	Σύγκριση με SLA & Desktop CNC .....	215
5.1.4.8	Σταθερότητα πρωτοτύπων LOM .....	217
5.1.4.9	Παράγοντες τραχύτητας & Θεωρητική τραχύτητα ΤΚΠ .....	218
5.1.4.10	Τραχύτητα δοκιμών LOM .....	220
5.1.4.11	Ανάλυση και αξιολόγηση αποτελεσμάτων ποιότητας επιφάνειας	221
5.1.5	Ιεράρχηση Κριτηρίων και κανόνες επιλογής προσανατολισμού κατασκευής πρωτοτύπων LOM .....	222
5.1.6	Ποιοτικά συμπεράσματα έρευνας & βέλτιστες πρακτικές για χρήση μεθόδου ΤΚΠ LOM .....	224
5.2	Μέθοδος ΤΚΠ FDM .....	227
5.2.1	Εισαγωγή στη μέθοδο FDM – Εστίαση σε συστήματα μικρής κλίμακας .....	227
5.2.2	Η μονάδα uPrint του Εργαστηρίου ΤΚΠ του ΕΜΠ .....	227
5.2.3	Χρόνος – κόστος κατασκευής πρωτοτύπων FDM .....	229
5.2.4	Απόδοση μορφολογικών χαρακτηριστικών και αντιστάθμιση διαστασιολογικών αποκλίσεων πρωτοτύπων FDM .....	231
5.2.5	Ποιότητα επιφανειών πρωτοτύπων FDM (Εστίαση σε uPrint) .....	240
6	ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΚΠ & ΤΚΕ ΣΤΑ ΠΛΑΙΣΙΑ ΤΗΣ ΔΔ	243
6.1	Γενικά .....	243
6.2	Πρωτότυπα Μορφής .....	245
6.2.1	Κέλυφος μηχανισμού μανδάλωσης κουφωμάτων αλουμινίου .....	245
6.2.2	Μοντέλο μορφής επίπλου Yoga .....	246
6.2.3	Ουρές ρομποτικού τόνου .....	247
6.3	Γεωμετρικά Πρωτότυπα .....	248

6.3.1	Κινηματικός μηχανισμός μανδάλωσης κουφωμάτων αλουμινίου .....	248
6.3.2	Κέλυφος αντανακλαστικού ασφάλτινου οδοστρώματος .....	249
6.3.3	Βραχίονες φορητής πτυσσόμενης πολυθρόνας.....	250
6.3.4	Σταθερό πτερύγιο διαμόρφωσης ροής αεροπορικού κινητήρα.....	251
6.3.5	Κέλυφος οπτομηχανικού συστήματος .....	252
6.4	Λειτουργικά Πρωτότυπα .....	253
6.4.1	Νεφελοποιητής αερίων .....	254
6.4.2	Εξαρτήματα Βιοϊατρικών εφαρμογών .....	255
6.5	Λοιπά Πρωτότυπα .....	256
6.5.1	Πρωτότυπα βιοϊατρικών εμφυτευμάτων.....	256
6.5.2	Τοπογραφικά πρωτότυπα γεωγραφικής τεκμηρίωσης.....	257
6.5.3	Πρωτότυπα παλαιοντολογικού ενδιαφέροντος.....	258
6.5.4	Πρωτότυπα αντικειμένων πολιτιστικής κληρονομιάς .....	259
6.6	Εφαρμογή πρωτοτύπων LOM και TKE για Εργαλεία Παραγωγής.....	260
6.6.1	Κατασκευή μητρών σιλικόνης – Μολυβοθήκη .....	261
6.6.2	Κατασκευή μητρών σιλικόνης – Χύτευση συμπαγούς μεταλλικού περυγίου με τη μέθοδο του χαμένου κεριού .....	262
6.6.3	Κατασκευή μητρών σιλικόνης – Χύτευση σύνθετου μεταλλικού εξαρτήματος με τη μέθοδο χαμένου κεριού – αναλώσιμου πυρήνα ...	263
6.6.4	Μήτρες εποξειδικής ρητίνης – Κατασκευή εργαλείων παραγωγής για χύτευση σε άμμο περωτής αρδευτικής αντλίας .....	264
6.6.5	Μήτρες σιλικόνης & αντίγραφα πολυουρεθάνης για κατασκευή βοηθητικών και παραγωγικών εργαλείων διαμόρφωσης χαρτοπολτού υπό κενό για προϊόντα συσκευασίας .....	265
6.6.6	Ψεκασμός μετάλλων – Καλούπια θερμοπλαστικών έγχυσης και ηλεκτρόδια ηλεκτροδιάβρωσης βύθισης (EDM) .....	266
6.6.7	Κατασκευή υποστρωμάτων για επένδυση με σύνθετα υλικά .....	267
7	ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΠΡΩΤΟΤΥΠΙΑΣ ΤΗΣ ΔΔ .....	269
8	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	270
9	ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ ΕΠΕΚΤΑΣΗΣ ΤΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ .....	271
	ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ .....	272
	ΑΝΑΦΟΡΕΣ – ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	273
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ .....	291
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΚΑΙ ΟΘΟΝΕΣ ΧΡΗΣΗΣ ΠΙΛΟΤΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΒΑΣΙΣΜΕΝΟΥ ΣΤΗΝ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗ ΣΒΔ ΓΙΑ ΕΞΕΥΡΕΣΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΙΚΑΝΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ & ΠΑΡΟΧΩΝ ΤΚΠ ΓΙΑ ΤΗΝ ΙΚΑΝΟΠΟΙΗΣΗ ΑΝΑΓΚΗΣ ΠΡΩΤΟΤΥΠΟΥ ΜΟΡΦΗΣ.....	291
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: ΑΡΧΕΙΑ, ΤΙΜΕΣ ΑΝ.ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ & ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟΙ ΧΡΟΝΟΙ ΑΝΑ ΣΤΡΩΣΗ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΑΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΟΛΥΩΝΥΜΙΚΗ ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΧΡΟΝΟΥ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΣΕ LOM1015 .....	294
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ: ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΠΡΟΣ ΜΕΤΡΗΣΗ ΣΤΟ ΔΟΚΙΜΙΟ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ ΕΠΙΠΕΔΟΥ ΧΥ .....	297

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ: ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΑΙ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΚΥΡΙΑΣ ΠΡΩΤΗΣ ΥΛΗΣ ABS+ ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ ΤΚΠ ΜΙΚΡΗΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ UPRINT .....	301
--	-----





## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διατριβή εντάσσεται θεματικά στην επιστημονική περιοχή του Μηχανολογικού Σχεδιασμού Βιομηχανοποιημένων Προϊόντων (Engineering Design), με έμφαση στον Ολοκληρωμένο Μηχανολογικό Σχεδιασμό (Concurrent Engineering Design).

Συμβάλλει στην περιοχή αυτή προτείνοντας μια ολοκληρωμένη, τεκμηριωμένη και συστηματική μεθοδολογία, προς χρήση ομάδων και φορέων σχεδιασμού και ανάπτυξης, για την αποτελεσματική αξιοποίηση όλων των υφισταμένων και θεωρουμένων σήμερα ως εναλλακτικών μεθόδων πρωτοτυποποίησης, κατά τη διαδικασία σχεδιασμού και ανάπτυξης νέων προϊόντων και κατασκευών, με γνώμονα τη μείωση του απαιτούμενου χρόνου και κόστους, με ταυτόχρονη εξασφάλιση ή/και άνοδο της συνολικής ποιότητας του προϊόντος. Η διενεργηθείσα έρευνα εστιάζεται στις καινοτόμες μεθόδους Ταχείας Κατασκευής Πρωτοτύπων (TKΠ) και Ταχείας Κατασκευής Εργαλείων (ΤΚΕ).

Η προτεινόμενη μεθοδολογία εισάγει ένα ευέλικτο και προσαρμόσιμο σύστημα υποστήριξης αποφάσεων πρωτοτυποποίησης κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού και ανάπτυξης, βασισμένο στην αναγνωρισμένη μεθοδολογία της Αναλυτικής Ιεράρχησης για Λήψη Αποφάσεων σε Πολυπαραμετρικά Προβλήματα. Για την περίπτωση κατεύθυνσης της πρωτοτυποποίησης προς εναλλακτικές ΤΚΠ, υιοθετεί την οργάνωση πληροφοριών σε Σχεσιακές Βάσεις Δεδομένων και προτείνει μια πλήρη δομή βάσης τεχνικών δεδομένων και πληροφοριών σχετικών τεχνολογιών και συστημάτων ΤΚΠ, προς ανεύρεση από αυτή μέσω Συστήματος Υποστήριξης Απόφασης (ΣΥΑ), των εκάστοτε συμβατών με τον υλοποιούμενο έλεγχο σχεδιασμού συστημάτων & παρόχων και την εξ'αυτών τελική συστηματική επιλογή.

Η προτεινόμενη μεθοδολογία, σε επίπεδο θεώρησης και ενσωμάτωσης σε αυτή πρωτότυπων πραγματικών δεδομένων, υποστηρίχθηκε από εκτεταμένη εντοπισμένη και συστηματική πειραματική έρευνα και έρευνα πεδίου στις τεχνολογίες ΤΚΠ, ειδικότερα στην τεχνολογία Κατασκευής με Επάλληλα Φύλλα Στερεού Υλικού (LOM), αλλά και στις τεχνολογίες της Κατασκευής με Εναπόθεση Τήγματος (FDM), της Στερεολιθογραφίας (SLA) και της κατεργασίας φρεζαρίσματος σε επιτραπέζια κλίμακα CNC μηχανές. Διερευνήθηκαν παράμετροι χρόνου-κόστους, προσανατολισμού κατασκευής, αποδιδόμενης ακρίβειας διαστάσεων, ποιότητας επιφανειών, δυνατών εφαρμογών και τεχνολογικών περιορισμών, και αξιοποίησης των παραγομένων αντικειμένων ΤΚΠ με μεθόδους ΤΚΕ.

Για την κατάδειξη των οφελών από την υιοθέτηση της προτεινόμενης συστηματικής μεθοδολογίας παρουσιάζονται χαρακτηριστικές περιπτώσεις εφαρμογής της. Για τη δε καλύτερη κατανόηση σημαντικού σκέλους της διεξαχθείσας υποστηρικτικής έρευνας, αποτελέσματα της οποίας τροφοδότησαν άμεσα την προτεινόμενη μεθοδολογία, παρατίθενται συγκεκριμένες χαρακτηριστικές πιλοτικές εφαρμογές ΤΚΠ-ΤΚΕ που διενεργήθηκαν για διάφορες ανάγκες, προϊόντα και μεθόδους παραγωγής και τα ποσοτικά – ποιοτικά τους συμπεράσματα.

## ABSTRACT

The presented dissertation is thematically attributed to the scientific area of Engineering Design of new industrialized products, emphasizing on the principles of Concurrent Engineering Design.

It contributes to this area by proposing an integrated, documented and systematic methodology to be used by design and development teams and groups for the effective utilization of all existing contemporary prototyping alternatives, during the new product design and development process, aiming to the reduction of required time and costs, with a parallel preservation or increase of overall product quality. The research conducted, focuses on the innovative Rapid Prototyping (RP) and Rapid Tooling (RT) technologies.

The proposed approach introduces a flexible and adaptable system for prototyping decision support during new product design and development, based on the proven Analytical Hierarchy Process for solving Multi Attribute Decision Making (MADM) Problems. For the case of a Rapid Prototyping-oriented prototyping alternative solution, the proposed method further adopts the Relational Database concept and proposes a full database structure for organizing technological data and information of specific RP technologies and systems, in order for the user to be -each time- able, via appropriate Decision Support System (DSS), to retrieve from the DB compatible with the design verification under scope RP systems & service providers and systematically select one among them.

The proposed methodology, in terms of original realistic data consideration and integration has been supported by extensive, focused experimental and field research on RP technologies, particularly on Laminated Object Manufacturing (LOM), but also on Fused Deposition Modeling (FDM), Stereolithography (SLA) and Desktop CNC Milling. Parameters of time & cost, build orientation, dimensional accuracy, surface quality, possible applications and processes' limitations, as well as exploitation potential by RT methods have been researched.

To demonstrate the benefits of adopting the proposed systematic methodology, typical cases of application are presented. Further, to better understand important aspects of the supporting research conducted, results of which have directly been transferred to the proposed methodology as expert knowledge, typical pilot RP-RT cases & applications conducted for various needs, products and production methods and their derived quantitative - qualitative conclusions are given.

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1.6.1:	Κατηγορίες Πρωτοτύπων στο Μηχανολογικό Σχεδιασμό
Πίνακας 1.8.2.1:	Σύγχρονα Εμπορικά Λογισμικά CAE
Πίνακας 1.9.2.1	Οι πρώτοι κατασκευαστές εξοπλισμού ΤΚΠ
Πίνακας 1.9.3.1	Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα του STL
Πίνακας 1.9.3.2:	Εναλλακτικά του STL πρωτόκολλα για την ΤΚΠ
Πίνακας 1.10.3.1:	Τεχνικοοικονομικά Στοιχεία Μεθόδων ΤΚΕ
Πίνακας 1.11.1:	Οι κύριες ευρεσιτεχνίες της ΤΚΠ χρονολογικά
Πίνακας 3.2.1:	Εναλλακτικές «πρωτοτυποποίησης» της προτεινόμενης μεθόδου υποστήριξης αποφάσεων
Πίνακας 3.5.1:	Πλήρης δομή των επιπέδων των θεωρούμενων τεχνικών παραμέτρων της προτεινόμενης μεθόδου
Πίνακας 3.6.1:	Διοικητικές Παράμετροι της προτεινόμενης μεθόδου και οι συνιστώσες τους
Πίνακας 3.7.1:	Λοιπές Παράμετροι της προτεινόμενης μεθόδου και οι συνιστώσες τους
Πίνακας 3.8.1:	Ενδεικτικές ποιοτικές και ποσοτικές κλίμακες της μεθόδου
Πίνακας 3.8.1:	Ομαδοποίηση των προτεινόμενων κλιμάκων της μεθόδου ανά υιοθετούμενα τελικά κριτήρια
Πίνακας 4.2.1.1:	Πεδία & Περιγραφή Πίνακα “RP_Tech_Nature” της ΣΔΒ
Πίνακας 4.2.1.2:	Πεδία & Περιγραφή Πίνακα “RP_Technologies” της ΣΔΒ
Πίνακας 4.2.1.3:	Πεδία & Περιγραφή Πίνακα “Vendors” της ΣΔΒ
Πίνακας 4.2.1.4:	Πεδία & Περιγραφή Πίνακα “RP_Machines” της ΣΔΒ
Πίνακας 4.2.1.5:	Πεδία & Περιγραφή Πίνακα “RP_Machine_Categories” της ΣΔΒ
Πίνακας 4.2.1.6:	Πεδία & Περιγραφή Πίνακα “RP_Materials” της ΣΔΒ
Πίνακας 4.2.1.7:	Πεδία & Περιγραφή Πίνακα “Bureaus” της ΣΔΒ
Πίνακας 4.2.1.8:	Πεδία & Περιγραφή Πίνακα “Prototypes” της ΣΔΒ
Πίνακας 4.2.1.9:	Πεδία & Περιγραφή Πίνακα “Prototipo_KrisDim” της ΣΔΒ
Πίνακας 4.2.1.10:	Πεδία & Περιγραφή Πίνακα “Users” της ΣΔΒ
Πίνακας 4.2.1.11:	Πεδία των δευτερευόντων και βοηθητικών πινάκων της ΣΔΒ
Πίνακας 4.2.3.1:	Επίπεδα πρόσβασης και δικαιώματα στην προτεινόμενη ΣΒΔ
Πίνακα 4.3.3.1:	Προδιαγεγραμμένα wizards καταχώρησης σχεδιαζόμενου ΣΥΑ
Πίνακας 5.1.1:	Βασικά Χαρακτηριστικά Μηχανής LOM 1015 και πρώτων υλών
Πίνακας 5.1.3.3.1	Αντιστοίχιση μεταβλητών συνάρτησης MTPPL με στήλες του πίνακα ταυτοποίησης «I»
Πίνακας 5.1.4.2.1:	Ρυθμίσεις και συνθήκες κατασκευής δοκιμίων ακρίβειας & τραχύτητας
Πίνακας 5.1.4.5.1:	Κύρια μεγέθη ακρίβειας κυλινδρικών στοιχείων κατά ΧΥ
Πίνακας 5.1.4.5.2:	Κύρια μεγέθη ακρίβειας γραμμικών διαστάσεων επί αξόνων Χ&Υ
Πίνακας 5.1.4.5.3:	Κύρια μεγέθη ακρίβειας διαστάσεων επί αξόνων DX & DY

Πίνακας 5.2.2.1:	Βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά μηχανής uPrint
Πίνακας 5.2.3.1:	Αναγωγή του θεωρητικού σε πραγματικό όγκο κατασκευής αντικειμένων σε FDM-uPrint
Πίνακας 5.2.4.1:	Πίνακας αξιολογούμενων διαστάσεων εξαρτημάτων
Πίνακας 5.2.4.2:	Παραλλαγές των εξαρτημάτων για κατασκευή

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1.1.1:	Μηχανολογικός Σχεδιασμός Βιομηχανοποιημένων Προϊόντων
Σχήμα 1.3.1:	“Over-the-wall” design
Σχήμα 1.3.2:	Προκαθορισμός – «δέσμευση» του κόστους από το σχεδιασμό
Σχήμα 1.3.3:	Ολοκληρωμένος Μηχανολογικός Σχεδιασμός (Concurrent Engineering)
Σχήμα 1.3.4:	Μείωση του χρόνου ανάπτυξης μέσω ΟΜΣ
Σχήμα 1.4.1:	Κύκλοι ελέγχου – ανασχεδιασμού
Σχήμα 1.5.1:	Τυπικά πρωτότυπα – προϊόντα της ανθρώπινης ιστορίας
Σχήμα 1.6.1:	Φυσικά – αναλυτικά, εκτενή – εστιασμένα πρωτότυπα
Σχήμα 1.6.2:	Το πλήρες φάσμα των πρωτοτύπων στο πλαίσιο του ΟΜΣ
Σχήμα 1.7.1:	Σκίτσα και σκαριφήματα
Σχήμα 1.7.2:	Μοντέλα Πηλού
Σχήμα 1.7.3:	Πρωτότυπα μοντέλα αφρού
Σχήμα 1.7.4:	Πρωτότυπα από ξύλο Balsa
Σχήμα 1.7.5:	Ξύλινα πρωτότυπα μοντέλα χυτηρίου
Σχήμα 1.7.6:	Συμβατικά Κατεργασμένα Πρωτότυπα
Σχήμα 1.8.1:	Ρόλος των TCTs στη διαδικασία ανάπτυξης νέου προϊόντος
Σχήμα 1.8.1.1:	Δένδρο σύνθεσης 3D CAD αντικειμένου με CGS
Σχήμα 1.8.1.2:	Προετοιμασία και αποτέλεσμα φωτοσκιασμένης αναπαράστασης
Σχήμα 1.8.1.3:	Συσκευές Στερεοσκοπικής Προβολής ΕΠ
Σχήμα 1.8.1.4:	Συσκευές Απτικού χειρισμού και ανάδρασης ΕΠ
Σχήμα 1.8.1.5:	Τυπικό VRML αρχείο
Σχήμα 1.8.1.6:	Συστοιχία H – Y για ΕΠ
Σχήμα 1.8.1.7:	Κλιμάκωση χρόνου, κόστους, εκπαίδευσης, αποτελεσματικότητας εναλλακτικών ψηφιακής πρωτοτυποποίησης
Σχήμα 1.8.2.1:	Περιπτώσεις εφαρμογών ανάλυσης CAE
Σχήμα 1.8.2.2:	Βασικά Βήματα Ανάλυσης CAE
Σχήμα 1.8.3.1:	Τα τρία βασικά στάδια για κατεργασία CNC
Σχήμα 1.8.3.2:	Περιβάλλον λογισμικού CAD/CAM
Σχήμα 1.8.3.3:	Επιτραπέζιες CNC φρέζες
Σχήμα 1.9.1.1:	Απαραίτητες φάσεις υλοποίησης ΤΚΠ
Σχήμα 1.9.2.2:	Παγκόσμιες πωλήσεις μηχανών ΤΚΠ ως το 2000.
Σχήμα 1.9.2.3:	Μερίδιο των κατασκευαστών ΤΚΠ σε εγκατεστημένα συστήματα παγκοσμίως το 1998
Σχήμα 1.9.2.4:	Πωλήσεις ΤΚΠ της κλάσεως των 3D Printers ως το 2008
Σχήμα 1.9.3.1:	Γεωμετρική μορφή αρχείων STL
Σχήμα 1.9.3.2:	Κώδικας αρχείου STL (ASCII μορφή)
Σχήμα 1.9.3.3:	Περιβάλλον λογισμικών επεξεργασίας αρχείων STL
Σχήμα 1.9.4.1:	Κατηγοριοποίηση κύριων τεχνολογιών ΤΚΠ
Σχήμα 1.9.4.2:	Στερεολιθογραφία, σχηματική αναπαράσταση και πρωτότυπα
Σχήμα 1.9.4.3:	Τεχνολογίες Επιφανειακού Φωτοπολυμερισμού
Σχήμα 1.9.4.4:	Τεχνολογία FDM

Σχήμα 1.9.4.5:	Multi Jet Modeling – 3D Systems
Σχήμα 1.9.4.6:	Τεχνολογία ΤΚΠ SLS
Σχήμα 1.9.4.7:	Τεχνολογία EBM & πρωτότυπα τιτανίου
Σχήμα 1.9.4.8:	Μέθοδος & πρωτότυπα 3DP
Σχήμα 1.9.4.9:	Τεχνολογία & Πρωτότυπα LOM
Σχήμα 1.9.4.10:	Τεχνολογία & Πρωτότυπα PLT
Σχήμα 1.10.1.1:	Βασική κατάταξη τεχνολογιών ΤΚΕ
Σχήμα 1.10.2.1:	Άμεση ΤΚΕ μεταλλικών μητρών
Σχήμα 1.10.2.2:	Μήτρες Direct AIM & γεμισμένου κελύφους SLA
Σχήμα 1.10.2.3:	Εργαλεία άμμου(SLS) και κεραμικά (DSPC)
Σχήμα 1.12.2.1:	Δένδρο Απόφασης για επιλογή μεθόδου ΠΠΛΑ
Σχήμα 1.14.1:	Ο Εξοπλισμός ΤΚΠ του Εργαστηρίου ΤΚΠ & Ε του Ε.Μ.Π.
Σχήμα 3.4.1:	Η συγκρότηση του δένδρου απόφασης κάτω από τους κύριους κλάδους
Σχήμα 3.8.1:	Ο ρόλος των ειδικών
Σχήμα 3.10.1:	Το πλήρες δένδρο κριτηρίων στο περιβάλλον Expert Choice
Σχήμα 3.10.2:	Βαθμολογήσεις των εναλλακτικών έναντι κριτηρίων τελευταίου επιπέδου σε περιβάλλον Expert Choice
Σχήμα 3.10.3:	Απόδοση χρησιμότητας στις βαθμίδες κριτηρίων τελευταίου επιπέδου σε περιβάλλον Expert Choice
Σχήμα 3.10.4:	Απόδοση βαρύτητας/προτίμησης λεκτικά και αριθμητικά σε κλάδους του δένδρου σε περιβάλλον Expert Choice
Σχήμα 3.10.5:	Το «μείγμα» βαρυτήτων του προγραμματιζόμενου ελέγχου (Περιβάλλον Expert Choice)
Σχήμα 3.10.6:	Αποτελέσματα κατάταξης εξεταζομένων εναλλακτικών πρωτοτυποποίησης
Σχήμα 3.10.7:	Επιμέρους αποτελεσματικότητα των εναλλακτικών ως προς την κάλυψη των κύριων κλάδων – παραμέτρων της απόφασης
Σχήμα 3.10.8:	Αποτελεσματικότητα εξεταζομένων εναλλακτικών μόνο ως προς τη διαπίστωση εργονομίας
Σχήμα 3.10.9:	Διάγραμμα απόδοσης εναλλακτικών έναντι κεντρικών ομάδων κριτηρίων
Σχήμα 3.10.10:	Δυναμικός χαρακτήρας – Ανατροπή τελικού αποτελέσματος με αλλαγή κεντρικών προτεραιοτήτων
Σχήμα 3.11.1:	Απόσπασμα βαθμολογιών εναλλακτικών Εφαρ.2 για λοιπά τελικά κριτήρια
Σχήμα 3.11.2:	Κατανομή προτεραιοτήτων κριτηρίου «αντοχή» Εφαρ. 2
Σχήμα 3.11.3:	Οι σημαντικότερες τοπικές και συνολικές βαρύτητες Εφαρ.2
Σχήμα 3.11.4:	Κατάταξη εναλλακτικών πρωτοτυποποίησης Εφαρ.2
Σχήμα 3.11.5:	Διάγραμμα απόδοσης & συνιστωσών αξιολογούμενων λύσεων Εφαρ.2
Σχήμα 3.11.6:	Ανατροπή λύσεων με αλλαγή προτεραιοτήτων Εφαρ.2
Σχήμα 4.2.2.1:	Σχέσεις του Πίνακα «Πρωτότυπα»
Σχήμα 4.2.2.2:	Σχέσεις του Πίνακα «Κατασκευαστές Μηχανών & Υλικών ΤΚΠ»
Σχήμα 4.2.2.3:	Σχέσεις των Πινάκων «Μηχανές ΤΚΠ» & «Τεχνολογίες ΤΚΠ»
Σχήμα 4.2.2.4:	Σχέσεις του Πίνακα «Υλικά ΤΚΠ»

Σχήμα 4.2.2.5:	Σχέσεις του Πίνακα «Πάροχοι Υπηρεσιών/ Κάτοχοι ΤΚΠ»
Σχήμα 4.3.1.1:	Αρχιτεκτονική τριών επιπέδων
Σχήμα 5.1.1:	Καθαρισμός – αποπεράτωση – λήψη πρωτοτύπου LOM
Σχήμα 5.1.3.2.1:	Υγρός υδράργυρος
Σχήμα 5.1.3.2.2:	Αύξηση της επιφάνειας ανά όγκο σε στερεά
Σχήμα 5.1.3.2.3:	Καθορισμός των CH <sub>X</sub> και CH <sub>Y</sub>
Σχήμα 5.1.3.2.4:	Χαρακτηριστικά αντικείμενα προσδιορισμού χρόνου LOM
Σχήμα 5.1.3.2.5:	Εξαρτήσεις χρόνων απόδοσης επιπέδου
Σχήμα 5.1.3.3.1:	Μητρώα συντελεστών πολυωνύμου και αντιστοίχισης με μεταβλητές
Σχήμα 5.1.4.2.1:	Δοκίμια ελέγχου ακρίβειας στον άξονα Z
Σχήμα 5.1.4.2.2:	Δοκίμια ελέγχου ακρίβειας επιπέδου XY
Σχήμα 5.1.4.2.3:	Δοκίμιο ακρίβειας XY σε SLA & Desktop CNC
Σχήμα 5.1.4.2.4:	Τα “Trunchcons” αξιολόγησης ποιότητας επιφάνειας
Σχήμα 5.1.4.4.1:	Σχετική υγρασία στο ΕΜΠ (Ζωγράφου) τις ημέρες των μετρήσεων
Σχήμα 5.1.4.4.2:	Διαστολή δοκιμίων LOM ως προς το χρόνο
Σχήμα 5.1.4.4.3:	Διαστολή σε σχέση με το ονομαστικό ύψος
Σχήμα 5.1.4.4.4:	Διαστολή σε σχέση με τις κατά XY διαστάσεις
Σχήμα 5.1.4.5.1:	Αποκλίσεις Κυλινδρικών στοιχείων
Σχήμα 5.1.4.5.2:	Αποκλίσεις διαστάσεων κατά X (α) & Y (β)
Σχήμα 5.1.4.5.3:	Αποκλίσεις διαστάσεων κατά DX (α) & DY (β)
Σχήμα 5.1.4.7.1:	Αποκλίσεις Στερεολιθογραφικής μηχανής ΠΠ
Σχήμα 5.1.4.7.2:	Αποκλίσεις SLA στους άξονες επιπέδου XY
Σχήμα 5.1.4.7.3:	Συχνότητα εμφάνισης αποκλίσεων σε Desktop CNC φρέζα
Σχήμα 5.1.4.9.1:	Το «φαινόμενο του σκαλοπατιού» ως παράγων τραχύτητας
Σχήμα 5.1.4.10.1:	Τραχύτητες Ra & Rt δοκιμίων LOM
Σχήμα 5.1.4.10.2:	Τραχύτητα Ra δοκιμίου SLA
Σχήμα 5.1.5.1:	Κατασκευασιμότητα και μείωση χρόνου κατασκευής LOM
Σχήμα 5.1.5.2:	Οικονομία υλικού LOM
Σχήμα 5.1.5.3:	Κρίσιμες διαστάσεις στο επίπεδο XY
Σχήμα 5.1.6.1:	Αντικείμενο ακατάλληλο για τεχνολογία LOM
Σχήμα 5.2.4.1:	Όψεις κατά ISO-E των εξαρτημάτων «έμβολο» και «φωλιά»
Σχήμα 5.2.4.2:	Επιθυμητή συνεργασία των εξαρτημάτων «έμβολο» και «φωλιά»
Σχήμα 5.2.4.3:	Αρχική μέτρηση των αντικειμένων «έμβολο» και «φωλιά»
Σχήμα 5.2.4.4:	Εντοπισμένο σφάλμα μορφής κυλινδρικών στοιχείων
Σχήμα 5.2.4.5:	Εμφανιζόμενες αποκλίσεις διαστάσεων στα «έμβολο» & «φωλιά»
Σχήμα 5.2.4.6:	Σκοπούμενες συναρμογές
Σχήμα 5.2.4.7:	Επιτυχώς αντισταθμισμένο λειτουργόν ζεύγος «έμβολο-φωλιά»
Σχήμα 5.2.4.8:	Ελαττώματα και αλλοιώσεις μορφής πρωτοτύπων FDM - uPrint
Σχήμα 5.2.5.1:	Τραχυμέτρηση πρωτοτύπου uPrint
Σχήμα 5.2.5.2:	Ποιότητα επιφανειών αντικειμένων FDM
Σχήμα 5.2.5.3:	Διάκενα στις επιφάνειες από FDM

## ΣΥΝΤΜΗΣΕΙΣ - ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΙ

ΑΗΗΕ	:	Απόβλητα Ηλεκτρικού και Ηλεκτρονικού Εξοπλισμού
ΒΔ	:	Βάση Δεδομένων
ΕΛΟΤ	:	Ελληνικός Οργανισμός Τυποποίησης
ΚΔ	:	Κατασκευαστική Διαμόρφωση
ΚΖ	:	Κύκλος Ζωής (Προϊόντος)
ΚΣ	:	Κατασκευαστική Σύνθεση
ΛΑΠΣ	:	Λήψη Αποφάσεων Πολλαπλών Στόχων
ΜΜΕ	:	Μικρομεσαίες Επιχειρήσεις
ΜΣ	:	Μηχανολογικός Σχεδιασμός
ΞΚ	:	Ξένο Κλειδί (Πίνακα ΣΒΔ)
ΟΜΣ	:	Ολοκληρωμένος Μηχανολογικός Σχεδιασμός
ΠΚ	:	Πρωτεύον Κλειδί (Πίνακα ΣΒΔ)
ΠΚΛΑ	:	Πολυκριτηριακή Λήψη Αποφάσεων
ΠΠΛΑ	:	Πολυπαραμετρική Λήψη Αποφάσεων
ΠΣ	:	Παράμετροι/Παράγοντες Σχεδιασμού
ΣΒΔ	:	Σχεσιακή Βάση Δεδομένων
ΣΔΒΔ	:	Σύστημα Διαχείρισης Βάσης Δεδομένων
ΣΜΚ	:	Σχεδιασμός Μηχανολογικών Κατασκευών
ΣΥΑ	:	Σύστημα Υποστήριξης Απόφασης
ΤΚΕ	:	Ταχεία Κατασκευή Εργαλείων
ΤΚΠ	:	Ταχεία Κατασκευή Πρωτοτύπων
ΤΠ	:	Ταχεία Παραγωγή
ΤΠ	:	Τεχνικές Προδιαγραφές
ΤΣΧ	:	Τεχνολογίες Συμπίεσης Χρόνου
ΦΤΠ	:	Φύλλο Τεχνικών Προδιαγραφών
ΧΣ	:	Χαρακτηριστικά Σχεδιασμού



## ΣΥΝΤΜΗΣΕΙΣ-ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΙ ΣΤΑ ΑΓΓΛΙΚΑ (ABBREVIATIONS)

3DP	:	3D Printing
ABS	:	Poly(Acrylonitrile Butadiene Styrene)
AHP	:	Analytical Hierarchy Process
ASTM	:	American Society for Testing and Materials
BS	:	British Standards
CAD	:	Computer Aided Design/Drafting
CAE	:	Computer Aided Engineering
CAM	:	Computer Aided Manufacturing
CAPP	:	Computer Aided Process Planning
CAX	:	Computer Aided/Assisted x
CE	:	Concurrent Engineering
CLI	:	Common Layer Interface
CNC	:	Computer Numerical Control
CTE	:	Coefficient of Thermal Expansion
DA	:	Design Attributes
DB	:	Data Base
DBMS	:	Data Base Management System
DDIP	:	Drop on Demand Inkjet Plotting
DF	:	Design Factors
DFx	:	Design for x (where x=Asseblly/Disassembly/Environment/Recycling)
DIN	:	Deutches Institut für Normung
DLP	:	Digital Light Processing
DMD	:	Digital Micro-mirror Device
DMU	:	Digital Mock-up
DoQ	:	Dimensions of Quality
DP	:	Design Parameters
DSS	:	Decision Support System
EBM	:	Electron Beam Melting
EDM	:	Electro Discharge Machining
EP	:	Epoxy; Epoxide
EPA	:	Environmental Protection Agency (US Government)
ETPU	:	Engineering Thermoplastic Polyurethane
FDM	:	Fused Deposition Modeling
FEA	:	Finite Element Analysis
FEM	:	Finite Element Modeling
HDT	:	Heat Deflection Temperature or Heat Distortion Temperature
HoQ	:	House of Quality
HSC	:	High Speed Cutting
HSM	:	High Speed Milling
IM	:	Injection Molded
ISO	:	International Standards Organization
LC	:	(Product) Life Cycle
LCD	:	Liquid Crystal Display
LOM	:	Laminated Object Manufacturing
MADM	:	Multi Attribute Decision Making
MCDM	:	Multi Criteria Decision Making
MEMS	:	Micro Electro-Mechanical Systems
MLM	:	Multi Jet Modelling

MODM	:	Multi Objective Decision Making
NPDD	:	New Product Design & Development
PA	:	Polyamide (Nylon) or Polyacrylate
PC	:	Polycarbonate or Personal Computer
PDM	:	Product Data Management
PDMS	:	Polydimethylsiloxane (Silicone)
PDS	:	Product Design Specification
PLM	:	Product Lifecycle Management
PLT	:	Paper Laminating Technology
PP	:	Polypropylene
PS	:	Polystyrene
PUR	:	Polyurethane
RDB	:	Relational Data Base
RoHS	:	Restriction of Hazardous Materials
RM	:	Rapid Manufacturing
RP	:	Rapid Prototyping
RT	:	Rapid Tooling
RTV	:	Room Temperature Vulcanizing (Silicone)
SI	:	Silicone & System International
SLA	:	Stereolithography
SLM	:	Selective Laser Melting
SLS	:	Selective Laser Sintering
SQL	:	Structured Query Language
STEP	:	Standard for the Exchange of Product Design Data
STL	:	Stereolithography File Format
TCTs	:	Time Compression Technologies
TYS	:	Tensile Yield Strength
UV	:	Ultraviolet
VP	:	Virtual Prototyping
VR	:	Virtual Reality
VRML	:	Virtual Reality Modeling Language
WEEE	:	Waste Electrical and Electronic Equipment

# 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ, ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ ΠΕΛΙΟ, ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ

## 1.1 Γενικά

Το σύγχρονο βιομηχανικό περιβάλλον διέπεται από χαρακτηριστικά, που όχι μόνο το διαφοροποιούν από το πρόσφατο παρελθόν, αλλά τείνουν να παγιωθούν ως μόνιμοι παράγοντες που επηρεάζουν όλες τις λειτουργίες του και καθορίζουν σημαντικά την μετεξέλιξή του.

Κορυφαία θέση στα χαρακτηριστικά αυτά έχει η λεγόμενη παγκοσμιοποίηση, [Aliber & Click, 1993; Reader, 2006; Chang, 2010], τόσο σε κοινωνικό όσο και σε οικονομικό επίπεδο, που διαμορφώνει ένα ενιαίο σχεδόν προφίλ καταναλωτών για πληθώρα βιομηχανικών προϊόντων, σε μια σχεδόν παγκόσμια αγορά με ενιαίο νόμισμα σε μεγάλες γεωγραφικές περιοχές της (π.χ. ΗΠΑ, ΕΕ κλπ.) και ελεύθερη ή απλώς εύκολη διακίνηση των αγαθών, ευρέως αποδεκτούς διεθνείς κανονισμούς και προδιαγραφές προϊόντων και διαδικασιών (π.χ. ISO), ακόμα και κοινές, παγκόσμιας κλίμακας, δεσμεύσεις και συμφωνίες, στις οποίες ο τεχνικός κόσμος καλείται να ανταποκριθεί (π.χ. πρωτόκολλο Κιότο, αγωγοί πετρελαίου και φυσικού αερίου).

Σημαντικό ρόλο παίζει και ο έντονος ανταγωνισμός εθνικών και τοπικών οικονομιών, αλλά και πολυεθνικών ομίλων μεταξύ τους, για το μερίδιο τους – σε νομισματικούς & οικονομικούς όρους – στην παγκόσμια οικονομική δραστηριότητα. Μεριδίο που αφενός καθορίζει τις παγκόσμιες ροές, μετακινήσεις και συσσωρεύσεις κεφαλαίων μεταξύ κρατών και εταιρικών ομίλων και αφετέρου διαμορφώνει κρίσιμους οικονομικούς δείκτες και καθοριστικά νομισματικά ισοζύγια (π.χ. εισαγωγών – εξαγωγών) κάθε κράτους – τοπικής οικονομίας, και την κατάταξή τους στον παγκόσμιο οικονομικό και γεωπολιτικό χάρτη. Έτσι έχουν διαμορφωθεί και αναγνωρίζονται συγκεκριμένα παγκόσμια κέντρα – πόλοι οικονομικής και βιομηχανικής δραστηριότητας, με προεξέχοντα τις ΗΠΑ, την Ε.Ε., τις χώρες της Άπω Ανατολής με κορωνίδα την Κίνα, και τις λοιπές χώρες της Ασίας (Ινδία, Πακιστάν κλπ.), που με θεμιτούς (καινοτομία, τεχνολογία), αλλά και αθέμιτους (ημερομίσθια, ωράρια, συνθήκες εργασίας) τρόπους «μάχονται» μεταξύ τους για την κατάληψη του μεγαλύτερου δυνατού μεριδίου της παγκόσμιας οικονομικής και βιομηχανικής δραστηριότητας.

Άλλο ένα χαρακτηριστικό, συνέπεια εν πολλοίς του προηγούμενου (ανταγωνισμός), είναι η ύφεση (recession) και επιβράδυνση της οικονομικής δραστηριότητας και της βιομηχανίας, που έχει ενσκήψει παγκόσμια τα πέντε τουλάχιστον τελευταία χρόνια και διαπιστώνεται εντονότερα σε ΗΠΑ και Ε.Ε., διαμορφούμενη προοδευτικά σε παγκόσμια οικονομική κρίση (Global Financial Crisis), κρίση τελικά για πολλά κράτη ισοζυγίων και χρέους, όπως και για τη χώρα μας την Ελλάδα, [Bartlett & Prica, 2012]. Σημαντικότερες συνέπειες της κρίσης αυτής για τους βιομηχανικούς-παραγωγικούς φορείς είναι η δραστική συρρίκνωση του αγοραστικού κοινού και των πωλήσεων, η αστάθεια, ρευστότητα και αβεβαιότητα του βιομηχανικού περιβάλλοντος (προμηθευτές, υποκατασκευαστές), η αύξηση τιμής για την απαραίτητη για την παραγωγή ενέργεια (πετρέλαιο, ηλεκτρική ενέργεια) και η δυσκολία εν γένει εξυπηρέτησης των επιχειρηματικών και παραγωγικών δραστηριοτήτων (προμήθεια πρώτων υλών, μεταφορές, διακίνηση) σε οικονομικό

επίπεδο (δάνεια, πιστώσεις, χρηματοροές), [Bondy & Talwar, 2011; Tong & Wei, 2011; Jobbagy & Bai, 2012].

Τέλος, ένας παράγων που καθοριστικά αναδιαμορφώνει το νέο τοπίο της παγκόσμιας βιομηχανικής δραστηριότητας είναι και το ίδιο το περιβάλλον.

Ο παγκόσμιος πληθυσμός, σύμφωνα με επίσημα στοιχεία, αριθμούσε περί τα 3 δισεκατομμύρια ανθρώπους το 1960, ενώ σήμερα φθάνει τα 7 περίπου δισεκατομμύρια, με τάση σύμφωνα με τον Ο.Η.Ε. τα 10 δισεκατομμύρια ως το 2060, [UN, 2013]. Παράλληλα, το βιοτικό επίπεδο έχει ανέβει ραγδαία σε κάθε ήπειρο και ειδικά στις λεγόμενες αναπτυσσόμενες χώρες, με τον τυπικό του δείκτη των εκπομπών CO<sub>2</sub> κατά κεφαλήν να έχει αυξηθεί στις πολυπληθείς Κίνα και Ινδία κατά 255% και 194% αντίστοιχα από 1980 έως 2008, [Pettinger, 2012; Olivier et al., 2012]. Ο φιλοξενών την ανθρωπότητα πλανήτης Γη όμως, είναι πεπερασμένος και τα φυσικά του αποθέματα λογικά αδύνατον να παρουσιάσουν ανάλογη του πληθυσμού και του βιοτικού επιπέδου αύξηση. Τουναντίον είναι βέβαιο ότι θα παρουσιάζουν μείωση, με το φόβο της άμεσης εξάντλησης τους να είναι ορατός σε βραχύ ορίζοντα. Με τα άμεσα δε μετρήσιμα και διαπιστούμενα συμπτώματα του «φαινομένου του θερμοκηπίου» λόγω εκλύσεως CO<sub>2</sub>, της αύξησης της παγκόσμιας θερμοκρασίας σε στεριά και θάλασσα (Global Warming), του λωσίματος των αρκτικών πάγων και της συνεπαγόμενης ανόδου της θαλάσσιας στάθμης – επαπειλούμενης απώλειας παράκτιων αστικών περιοχών, η λήψη άμεσων μέτρων για την επιβράδυνση της Κλιματικής Αλλαγής (Climatic Change) και την αειφορία (sustainability) – διατήρηση (preservation) του φυσικού περιβάλλοντος του πλανήτη είναι μονόδρομος. Έχει ήδη οδηγήσει στη διεθνή συνθήκη του Πρωτοκόλλου του Κιότο (1997), [United Nations, 1998], περί μείωσης εκπομπών CO<sub>2</sub>, με πρόσφατη μάλιστα συμπλήρωση της με νέους στόχους στη διάσκεψη της Ντόχα (2012), καθώς και στη σύναψη πολλών ειδικότερων νομοθετικών διατάξεων που διέπουν τα βιομηχανικά προϊόντα (παραγωγή, κύκλος ζωής, ανακύκλωση κλπ.), όπως η Ευρωπαϊκή Οδηγία περί διαχείρισης ΑΗΗΕ (WEEE Directive) 2002/96/EC, [EC, 2003a] που μαζί με την Ευρωπαϊκή Οδηγία περί Μείωσης Χρήσης Επικίνδυνων Υλικών (RoHS Directive) 2002/95/EC, [EC, 2003b], αποτελούν ήδη νόμο της ΕΕ από το Φεβρουάριο του 2003.

Η σύγχρονη εποχή βεβαίως χαρακτηρίζεται παράλληλα και από έναν παράγοντα-σύμμαχο για τη βιομηχανική δραστηριότητα, όπως και για κάθε άλλη ανθρώπινη δραστηριότητα, που δεν είναι άλλος από την αλματώδη τεχνολογική και εφαρμοσμένη πρόοδο και εξέλιξη στους τομείς των Ηλεκτρονικών Υπολογιστών, της Πληροφορικής, του Λογισμικού και του Διαδικτύου. Κοντά σε αυτά πρέπει να αναγνωρισθεί επίσης και η επίδραση της επιμέρους επιστημονικής προόδου και τεχνολογικής άνθισης που σημειώνεται μετά το 2ο μισό του 20ου αιώνα στον τομέα της χημείας και των υλικών, με τα πάσης φύσεως πλαστικά και πολυμερή υλικά και την ολοένα και μεγαλύτερη χρήση τους σε όλα τα προϊόντα, που σημαντικά επηρέασαν τη μορφή της βιομηχανικής παραγωγής τα τελευταία 50 χρόνια, με τη συμμετοχή σε αυτή περισσότερων σε σχέση με το παρελθόν μορφοποιητικών (formative) μεθόδων παραγωγής.

Έτσι λοιπόν, και ενώ διαπιστωμένα πια οι αγορές είναι συρρικνωμένες για τα νέα προϊόντα, ο ανταγωνισμός σκληρός, η τιμή πώλησης καθοριστικός παράγοντας και πάγιος στόχος μείωσης, οι κύκλοι ζωής των προϊόντων και οι χρόνοι παραμονής τους στην αγορά μικρότεροι, οι στόχοι όλων πλέον των παραγωγικών φορέων, από τους μεγάλους πολυεθνικούς ομίλους ως τις μικρομεσαίες οικογενειακές και ατομικές

επιχειρήσεις, έχουν σταδιακά μετακινηθεί από το δόγμα των παλαιότερων δεκαετιών για μεγιστοποίηση της παραγωγής, του τζίρου και των κερδών, στην εξασφάλιση της βιωσιμότητας, της διαρκούς παρουσίας στην αγορά και στη διατήρηση και επαύξηση της ποιότητας των προϊόντων και διαδικασιών τους.

Η ίδια δε η διαδικασία του Σχεδιασμού και Ανάπτυξης Νέων Προϊόντων (New Product Design & Development Process – NPDDP), έχει μετεξελιχθεί και αυτή έτσι ώστε, αξιοποιώντας κυρίως τις τεχνολογίες της πληροφορικής (IT Technologies) να εξυπηρετήσει ικανοποιητικά τους νέους πολυποίκιλους, ετερόκλητους και συχνά αντιμαχόμενους στόχους – χαρακτηριστικά του σύγχρονου βιομηχανικού περιβάλλοντος.

Σε αυτό το νέο πρίσμα, οι αποφάσεις, σε κάθε επίπεδο της βιομηχανικής δραστηριοποίησης και ειδικά σε θέματα που αφορούν την ίδια τη διαδικασία Σχεδιασμού και Ανάπτυξης Νέων Προϊόντων, είναι πια περισσότερες, πολυπαραμετρικές και χαρακτηρίζονται από βαρύνουσες έως κρίσιμες, τόσο για την τύχη-επιτυχία των νέων προϊόντων, όσο συχνά και για την ίδια την επιβίωση των παραγωγικών φορέων που τα αναπτύσσουν και τα διαθέτουν. Σημαντικές τέτοιες αποφάσεις λαμβάνονται για κάθε νέο υπό ανάπτυξη προϊόν και δια μέσου πρωτοτύπων που υλοποιούνται για αυτό, με διάφορους τρόπους και για διαφορετικούς σκοπούς. Μέσω αυτών διαπιστώνεται και αξιολογείται η πραγμάτωση συγκεκριμένων στόχων του σχεδιασμού. Η αποτελεσματικότητα δε των διαπιστώσεων αυτών από τα πρωτότυπα, επηρεάζεται σημαντικά και αυτή με τη σειρά της – σε διαφορετικό επίπεδο αποφάσεων – από την επιλεγείσα κάθε φορά μέθοδο για την πραγμάτωση τους.

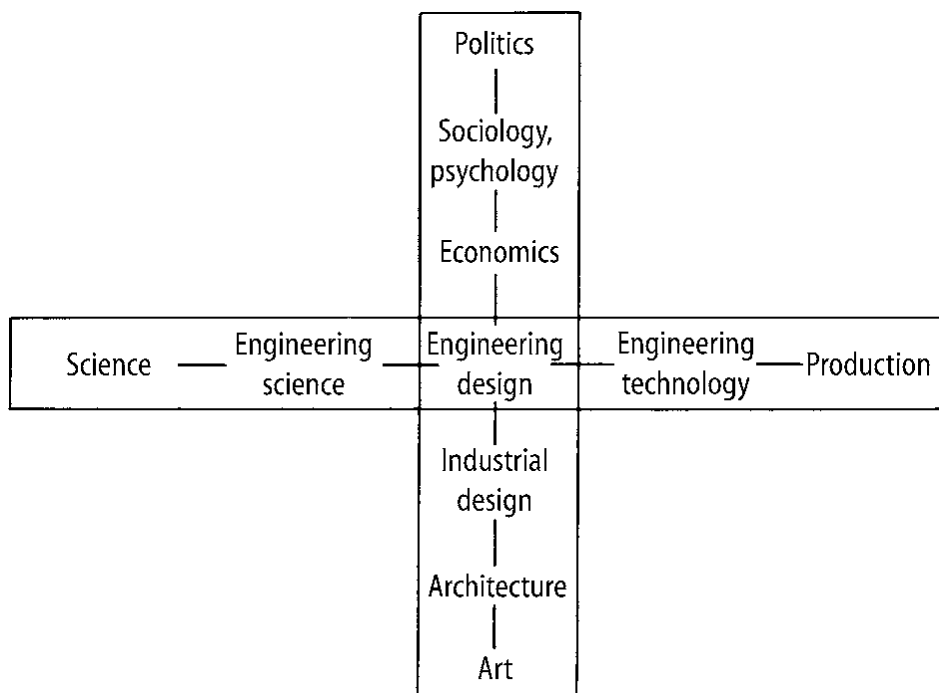
## **1.2 Μηχανολογικός Σχεδιασμός , Ανάπτυξη Νέων Προϊόντων και Σχεδιασμός Μηχανολογικών Κατασκευών**

Η διαδικασία του Μηχανολογικού Σχεδιασμού (ΜΣ) Βιομηχανοποιημένων Προϊόντων (Engineering Design), στις σύγχρονες κοινωνίες τοποθετείται σχηματικά στο κέντρο αλληλοεμπλεκόμενων, διαφορετικής αφετηρίας, συνθηκών και διαδικασιών τεχνολογικής, επιστημονικής και πολιτισμικής εξέλιξης και δραστηριότητας. Ο ΜΣ συνδυάζοντας τις επικρατούσες κοινωνικοπολιτικές, πολιτισμικές, οικονομικές συνθήκες με την επιστημονική πρόοδο και τεχνολογική εξέλιξη κάθε εποχής, καλείται να οδηγήσει και πραγματώσει με επιτυχία την δημιουργία νέων προϊόντων που θα καλύπτουν τις ανάγκες του κοινωνικού συνόλου, (βλ. Σχήμα 1.2.1).

Οι Dym & Little [Dym & Little, 2004] δίνουν για τον ΜΣ τον παρακάτω γενικό ορισμό: «ΜΣ είναι η συστηματική, ευφυής δημιουργία και ικανοποίηση προδιαγραφών για αντικείμενα των οποίων η μορφή και η λειτουργία θα επιτυγχάνει προκαθορισμένους στόχους και θα ικανοποιεί συγκεκριμένους περιορισμούς».

Οι Ertas & Jones, [Ertas & Jones, 1996], δίνουν για τον ΜΣ έναν αναλυτικότερο ορισμό: «ΜΣ είναι η διαδικασία που θα αποδώσει ένα σύστημα, εξάρτημα ή διαδικασία που θα καλύψει την επιθυμητή ανάγκη. Είναι μια διαδικασία λήψης αποφάσεων, συχνά επαναληπτική, στην οποία βασικές επιστήμες, μαθηματικά και μηχανική/μηχανολογία εφαρμόζονται ταυτόχρονα για να μετουσιώσουν διαθέσιμα μέσα και υλικά με βέλτιστο τρόπο, σε ένα αποτέλεσμα που θα ικανοποιεί συγκεκριμένο στόχο. Στα θεμελιώδη συστατικά της διαδικασίας του ΜΣ

κατατάσσονται ο ορισμός των στόχων και των κριτηρίων, η σύνθεση, η ανάλυση, η κατασκευή, η δοκιμή και η αξιολόγηση».



Σχήμα 1.2.1: Οριοθέτηση και ρόλος του Μηχανολογικού Σχεδιασμού

Σταδιακά στη διάρκεια του 20ου αιώνα, και ειδικά μετά τον 2ο Παγκόσμιο Πόλεμο, υιοθετήθηκε ένας φορμαλισμός για την περιγραφή και συστηματοποίηση του ΜΣ και των επιμέρους διαδικασιών του.

Σύμφωνα λοιπόν με κάθε επιστημονικά έγκυρη θεώρηση της διαδικασίας του ΜΣ [VDI Guideline 2222, 1977; Pahl & Beitz, 1984 & 2007; Pugh, 1990; Ullman, 1992; Ulrich & Eppinger, 2008] βιομηχανοποιημένων προϊόντων, διακρίνονται σε αυτή (με ελαφρές κατά περίπτωση παραλλαγές) συγκεκριμένα στάδια θεώρησης, μελέτης και εργασίας, μέσω των οποίων μια ανάγκη ή ιδέα καταλήγει τελικά στη δημιουργία ενός νέου ολοκληρωμένου προϊόντος, με καθορισμένο κύκλο ζωής.

Αυτά είναι:

- Διαπίστωση της ανάγκης για το νέο προϊόν (Need Identification)
- Κατάρτιση των Τεχνικών Προδιαγραφών (ΤΠ) του, αντικειμενικών στόχων του σχεδιασμού, (Definition of Design Goals & Product Design Specification Generation)
- Σύλληψη της ιδέας για την υλοποίησή του – Κατασκευαστική Σύνθεση (ΚΣ, Concept Generation, Conceptual Design)
- Κατασκευαστική Διαμόρφωση (ΚΔ) Συνόλων, Υποσυνόλων & Εξαρτημάτων (Embodiment Design)
- Αναλυτικός Σχεδιασμός Συνόλων, Υποσυνόλων & Εξαρτημάτων (Detailed Design)
- Δοκιμές πρωτοτύπου και οριστικοποίηση σχεδιασμού (Prototype Testing & Design Verification-Validation)
- Επιλογή, προετοιμασία και σχεδιασμός μεθόδων και εργαλείων-ιδιοσυσκευών παραγωγής (Manufacturing Preparation, Production Planning)
- Δοκιμαστική Παραγωγή (Production Testing)

- Κανονική Παραγωγή (Production)
- Διάθεση-λειτουργία-συντήρηση (Distribution-Operation-Servicing)
- Ανάκτηση μετά το Τέλος Κύκλου Ζωής (TKZ) του προϊόντος (EoL Recovery)
- Ανακύκλωση, επαναχρησιμοποίηση εξαρτημάτων και υλικών (Recycling & Reuse)

Ο συγκεκριμένος φορμαλισμός του ΜΣ, απαντάται σχεδόν πάντα ο ίδιος, με ελαφρές παραλλαγές ή εννοιολογικές-περιγραφικές διαφοροποιήσεις, ανάλογα κυρίως από την προέλευση της εκάστοτε θεώρησης (ΗΠΑ, Γερμανία, Ηνωμένο Βασίλειο, Ιαπωνία). Αξίζει να σημειωθεί ότι παρόμοιος σε μεγάλο βαθμό φορμαλισμός υιοθετείται, όχι μόνο για τα βιομηχανικά-βιομηχανοποιημένα προϊόντα, αλλά και για άλλες κατηγορίες προϊόντων, υλικών (π.χ. κυκλώματα & τυπωμένα ηλεκτρονικά, τρόφιμα, έργα τέχνης), ή και άυλων (λογισμικό, ιστοσελίδες, ταινίες, εκπομπές, μουσική), αλλά και για τις διεργασίες (processes).

Σε πρώτη θεώρηση, ο ΜΣ για κάποιους ίσως θα έπρεπε να τελειώνει με την έναρξη μαζικής παραγωγής των προϊόντων. Είναι σαφές όμως ότι στο σύγχρονο βιομηχανικό περιβάλλον, όπως αυτό έχει ήδη περιγραφεί και παραπάνω, ο σχεδιασμός «προβάλλεται» πλέον βαθιά στο μέλλον, στη διάρκεια ζωής – χρήσης, αλλά και πέραν του αναμενομένου Τέλους Κύκλου Ζωής (TKZ) των βιομηχανοποιημένων προϊόντων, προκαθορίζοντας και μελετώντας την συντήρησή τους κατά τη λειτουργία, την ανάκτηση τους, την επαναχρησιμοποίηση, ανακύκλωση μερών και υλικών, με γνώμονα την ελάχιστη δυνατή επιβάρυνση του περιβάλλοντος.

Στα παραπάνω στάδια θεώρησης και μελέτης του ΜΣ, που ουσιαστικά ταυτίζονται και με τα στάδια Κύκλου Ζωής (ΚΖ – Life Cycle, LC) ενός προϊόντος, εντοπίζεται και ο ειδικότερος κρίσιμος ρόλος του Σχεδιασμού & Ανάπτυξης Προϊόντων / Σχεδιασμού Μηχανολογικών Κατασκευών (εν συντομία ΣΜΚ - Product Design & Development, PDD κ' PDDP), ως τα στάδια εκείνα της διαδικασίας του ΜΣ που, ξεκινώντας από τις Τεχνικές Προδιαγραφές (ΤΠ) και μία συγκεκριμένη συστηματικά επιλεγμένη λύση – Κατασκευαστική Διαμόρφωση (ΚΔ) της Κατασκευαστικής Σύνθεσης του προϊόντος, θα την υλοποιήσουν πλήρως σε επίπεδο συνόλου-υποσυνόλων-εξαρτημάτων με οριστικό και λεπτομερή τρόπο. Η υλοποιημένη αυτή δε ΚΔ, αποτέλεσμα του ΣΜΚ, θα πρέπει να μπορεί να παραχθεί με σύντομο και οικονομικό τρόπο, στην επιθυμητή ποιότητα και με τα διαθέσιμα υλικά, τεχνικά μέσα και μεθόδους, [Σφαντζικόπουλος, 2005], πληρώνοντας στο μέγιστο βαθμό τις επιταγές των ΤΠ.

Οι ΤΠ που ο ΜΣ αρχικά καθορίζει, χαρακτηρίζονται συχνά και «Φωνή του Πελάτη» (Voice of the Customer – VOC), καθώς προκύπτουν από συστηματική επεξεργασία δεδομένων και λεκτικών περιγραφών ή χαρακτηρισμών που συχνά λαμβάνονται μέσω του marketing από τους ίδιους τους δυνητικούς καταναλωτές και πελάτες των προϊόντων και αφορούν είτε τις επιθυμίες τους από ένα νέο προϊόν, είτε τη γνώμη και την κρίση τους για το παλαιότερο, ή άλλα ανταγωνιστικά προϊόντα.

Οι ΤΠ εκφράζονται με τιμές αριθμητικών μεγεθών ή και ποιοτικών χαρακτηρισμών και βαθμολογιών επί πραγματικών μεγεθών και εννοιών. Επιμερίζονται σε υποχρεωτικές που ο σχεδιασμός σε κάθε περίπτωση πρέπει να επιτύχει στο τελικό προϊόν και σε γενικότερες – μη υποχρεωτικές, κατάλληλο «μίγμα» των οποίων ο ΣΜΚ θα ικανοποιεί στην τελική του λύση που θα τεθεί σε παραγωγή. Το «μίγμα» αυτό έχει προκύψει ως αποτέλεσμα συστηματικής αξιολόγησης εναλλακτικών

λύσεων, στις οποίες εκτός από τις βασικές αρχές και τους κανόνες του ΜΣ έχουν επίσης υιοθετηθεί συγκεκριμένα κριτήρια αξιολόγησης. Τα κριτήρια αυτά αναφέρονται ως Χαρακτηριστικά Σχεδιασμού (ΧΣ – Design Attributes, DA) και συνήθως αποτελούν γενικότερες κατευθύνσεις σχεδιασμού (π.χ. εργονομία, αισθητική). Οι δε επιμέρους συνιστώσες τους, που τα προσδιορίζουν με ακρίβεια και τα συνδέουν στη μορφή πραγματικών μεγεθών (π.χ. Αισθητική → χρώμα, συμμετρία, κλπ.) με τις επιμέρους ΤΠ, καλούνται Παράμετροι/Παράγοντες Σχεδιασμού (ΠΣ – Design Factors, DF).

Τα ΧΣ αναφέρονται επίσης βιβλιογραφικά, ειδικά στις σύγχρονες θεωρήσεις του ΜΣ υπό το πρίσμα της Ολικής Ποιότητας (Total Quality, TQ) και ως «διαστάσεις της ποιότητας» (Dimensions of Quality – DoQ, συνήθως αριθμούμενες σε οκτώ), [Garvin, 1987], ή ως δομικοί λίθοι του «οίκου της Ποιότητας» (House of Quality – HoQ), βασικής έννοιας και εργαλείου της θεωρίας της Εφαρμογής ή Ανάπτυξης Συνάρτησης Ποιότητας (Quality Function Deployment – QFD), [Jordan, 1991; Akao, 2004], που μετά τη δεκαετία του 1980 βρήκε μεγάλη εφαρμογή στον ΜΣ. Η βέλτιστη εκπλήρωσή από το σχεδιασμό, πέραν των υποχρεωτικών, και των επιμέρους ΤΠ, δια της ικανοποίησης-επιτυχίας-επαλήθευσης των ΧΣ και ΠΣ, εξασφαλίζει για τα νέα προϊόντα μετρήσιμους δείκτες ποιότητας και ικανοποίησης των επιθυμιών του πελάτη.

Ίσως είναι πέρα από το σκοπό του παρόντος πονήματος να εμβαθύνει παραπάνω στις έννοιες και τις επιμέρους διαδικασίες που υλοποιούνται στα πλαίσια του ΜΣ και του ΣΜΚ, και τα οποία καλύπτονται αναλυτικά στην προαναφερθείσα βιβλιογραφία.

Είναι μάλλον χρησιμότερο να παρατεθούν παρακάτω κάποιες σημαντικές διαπιστώσεις και επισημάνσεις και να τονισθεί ο ρόλος των τεχνολογιών της Πληροφορικής σε ΜΣ και ΣΜΚ, όσον αφορά τη μετεξέλιξή τους, ειδικά τις δυο τελευταίες δεκαετίες, μια μετεξέλιξη που για πολλούς οδηγεί και στην ίδια τη σύγκλισή τους στην ευρύτερη έννοια του Ολοκληρωμένου Μηχανολογικού Σχεδιασμού (ΟΜΣ – Concurrent Engineering, CE).

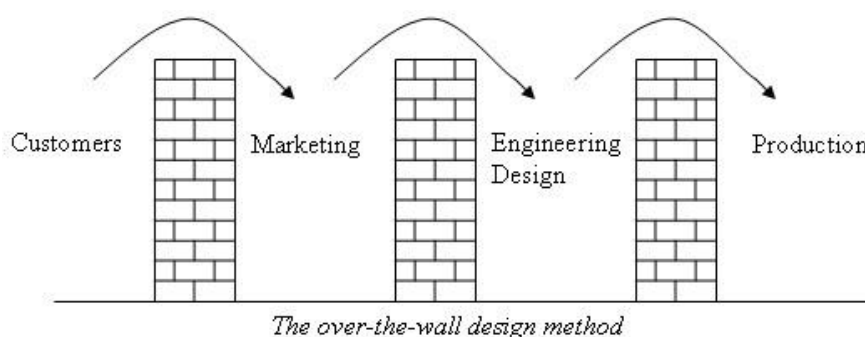
Είναι δε επίσης καθοριστικό να αναδειχθεί ο ρόλος των πρωτοτύπων σε όλα, μα ειδικά στα πρώιμα στάδια των ΜΣ και ΟΜΣ.



### 1.3 Ολοκληρωμένος Μηχανολογικός Σχεδιασμός (ΟΜΣ)

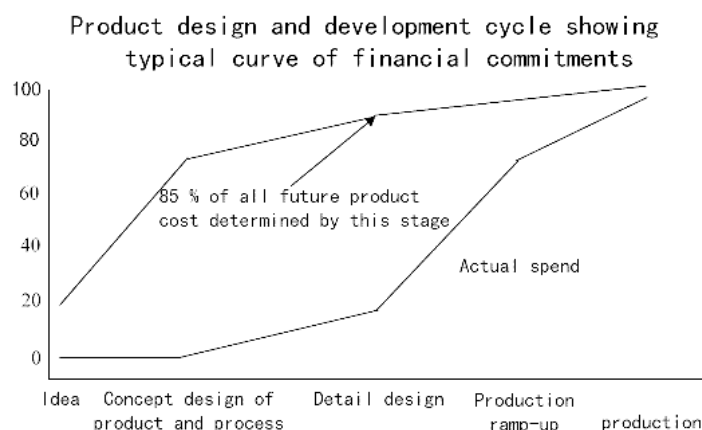
Η πραγμάτωση του ΜΣ και των διακεκριμένων σταδίων του για τη δημιουργία βιομηχανικών προϊόντων, επιτελείτο για αρκετές δεκαετίες τον 20ο αιώνα κατά τρόπο διαδοχικό, σειριακό, με την κάθε φάση πρακτικά να εκκινεί μετά το πέρας της προηγούμενης (π.χ. ο αναλυτικός σχεδιασμός, παρέδιδε τα κατασκευαστικά σχέδια στην παραγωγή) και να υλοποιείται κάθε φορά από διαφορετική ομάδα εργασίας-ευθύνης, με τις ειδικές γνώσεις και δεξιότητες που απαιτούντο για αυτή. Ο κεντρικός συντονισμός και παρακολούθηση ανήκε στον ηγέτη-συντονιστή (project leader) του ΜΣ.

Αυτό συχνά περιγράφεται, σαν διαδικασία σχεδιασμού «πάνω από τοίχους» (“over-the-wall” approach), [Malloy, 1994], καθώς οι διαφορετικές εμπλεκόμενες ομάδες εργασίας εστιασμένες μόνο στο δικό τους πεδίο, ανταλλάσσουν το «προϊόν» της δουλειάς τους με τις άλλες ομάδες χωρίς καμία σχεδόν θεώρηση του αντικειμένου εκείνων των ομάδων, σαν να τους χωρίζει ένας νοητός τοίχος.



Σχήμα 1.3.1: “Over-the-wall” Design

Αναγνωρίζεται σχεδόν από όλους τους συγγραφείς που έχουν εμβαθύνει στον ΜΣ, ότι ήδη από την οριστικοποίηση της Κατασκευαστικής Διαμόρφωσης, πριν καν την ολοκλήρωση του Αναλυτικού Σχεδιασμού, έχει ουσιαστικά προκαθοριστεί το 70-75% του συνολικού κόστους του νέου προϊόντος. Αντίστοιχα, το αναλογούν κόστος για τη διαδικασία σχεδιασμού μέχρι τα στάδια αυτά υπολογίζεται ότι δεν υπερβαίνει το 8% του συνολικού κόστους για το νέο προϊόν, [Andreasen & Olesen, 1990].



Σχήμα 1.3.2: Προκαθορισμός – «δέσμευση» του κόστους από το σχεδιασμό

Η παραπάνω διαπίστωση, εξηγεί σε μεγάλο βαθμό γιατί η σειριακή αντιμετώπιση του ΜΣ, επέφερε αναπόφευκτα πολύ σοβαρές συνέπειες από την διάδοση προβλημάτων και λαθών που δεν είχε καταστεί δυνατόν να διαγνωστούν έγκαιρα, σε ύστερα στάδια της διαδικασίας, όπως στην έναρξη της παραγωγής. Σε τέτοιες περιπτώσεις η χρονική και κυρίως η κοστολογική επιβάρυνση για την επιχείρηση, είτε αφορούσε σε απαραίτητες διορθώσεις σε εξαρτήματα και υποσυστήματα του προϊόντος, με υποχρεωτικούς κύκλους ανασχεδιασμού (*design iterations*), είτε ακόμα χειρότερα σε πλήρη αναθεώρηση της Κατασκευαστικής Διαμόρφωσης, με επιλογή διαφορετικής εναλλακτικής λύσης. Το κόστος φυσικά από τέτοιες αλλαγές μπορεί να είναι τεράστιο και ιδιαίτερα επιβαρυντικό έως καταστροφικό για το εμπορικό σκέλος ενός προϊόντος, [Safoutin & Smith, 1996; Smith & Eppinger, 1997; Ulrich & Eppinger, 2008].

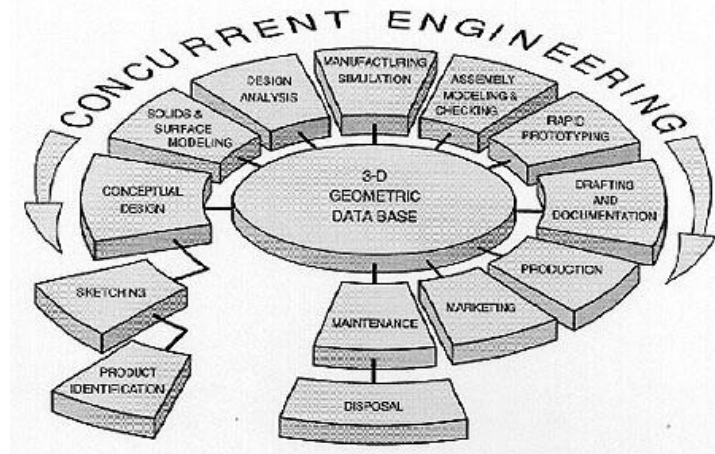
Από τη δεκαετία του 1990 και μετά, καθιερώνεται ένας νέος τρόπος αντιμετώπισης των βημάτων του ΜΣ. Καίριο ρόλο σε αυτόν έχει η σταδιακή μετάβαση από το συμβατικό τρόπο εργασίας (υπολογισμοί, σχεδίαση, συγγραφή, αρχειοθέτηση) στον ηλεκτρονικό, με χρήση Η-Υ και εξειδικευμένου προηγμένου λογισμικού. Με την εφαρμογή λογισμικών συστημάτων μηχανολογικού προσανατολισμού CAD, CAM, CAE, CAPP, ERP και τελευταία (2000 ως σήμερα) PDM, PLM στις τεχνικές διαδικασίες σχεδιασμού, σχεδίασης, ανάλυσης & κατασκευής, με τα εταιρικά δίκτυα και βάσεις δεδομένων για ανταλλαγή και συστηματική αρχειοθέτηση εγγράφων και πληροφορίας, εντός και εκτός εταιρικού περιβάλλοντος (προμηθευτές, υποκατασκευαστές, πελάτες), αλλά και για την τήρηση και λειτουργία Συστημάτων Διασφάλισης Ποιότητας (ΣΔΠ – Quality Management Systems - QMS), κατέστη δυνατόν ο ΜΣ σχεδιασμός να επιτελείται με παράλληλη, σχεδόν ταυτόχρονη και χρονικά αλληλοεπικαλυπτόμενη υλοποίηση των βασικών του σταδίων, με καθολικό έλεγχο και πραγματικού χρόνου ιχνηλασία και αντιμετώπιση των προβλημάτων.

Ο τρόπος διαδοχής των σταδίων ΜΣ δεν είναι πλέον γραμμικός σε μορφή ροής, αλλά κυκλικός και δυναμικός, με το υπό ανάπτυξη προϊόν στο κέντρο των διαδικασιών (Σχήμα 1.3.3).

Οι ομάδες εργασίες έχουν κοινές αναφορές ενσωμάτωσης των αποτελεσμάτων-παραδοτέων τους (κοινές πλατφόρμες εργασίας και αποθήκευση σε κεντρικούς εξυπηρετητές – Servers), εποπτεία και σε πραγματικό χρόνο θεώρηση της εργασίας και των επιβαλλόμενων δεσμεύσεων, αλλαγών και περιορισμών και των λοιπών ομάδων. Οι ίδιες δε οι συνεργαζόμενες ομάδες μπορούν να είναι πλέον ετερόκλητες στη σύνθεσή τους και διαφορετικού προσανατολισμού (*interdisciplinary*), περιλαμβάνοντας και μη τεχνικούς ή μηχανικούς, με ευρύτερη και συνολικότερη οπτική για το ΜΣ και τα ζητούμενα από το νέο προϊόν (π.χ. στελέχη marketing και οικονομολόγους).

Η συντονισμένη, σύγχρονη και παράλληλη αυτή μεθοδολογία έχει επικρατήσει ως Concurrent / Simultaneous Engineering (CE), στα ελληνικά Ολοκληρωμένος Μηχανολογικός Σχεδιασμός (ΟΜΣ), [Hartley, 1992; Prasad, 1996; Σφαντζικόπουλος, 2005; Στάθης, 2010].

Πρέπει να σημειωθεί ότι η θεώρηση του ΟΜΣ, αυτονόητα επεκτείνει τα όρια εκκίνησης και ολοκλήρωσης του ΣΜΚ, όπως αυτός ορίστηκε παραπάνω, αυξάνοντας παράλληλα σημαντικά την ευελιξία του ως προς την επιβολή τροποποιήσεων και αλλαγών του σχεδιασμού, κάνοντας συχνά δυσδιάκριτη τη διαφορά μεταξύ ΜΣ (υπό τη μορφή του ΟΜΣ) και ΣΜΚ.

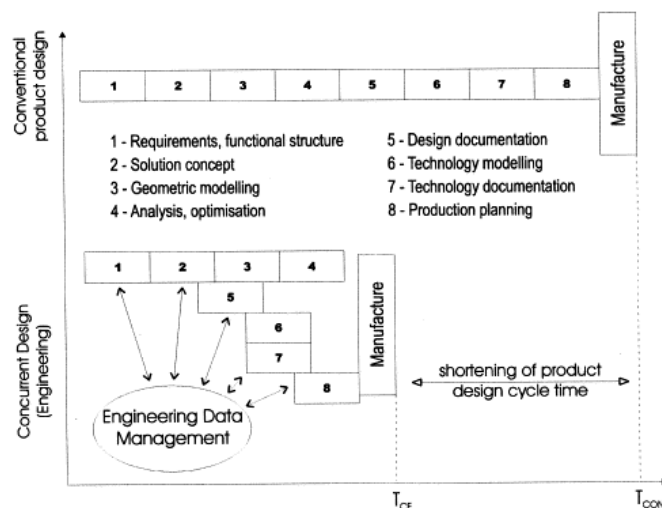


Σχήμα 1.3.3: Ολοκληρωμένος Μηχανολογικός Σχεδιασμός (Concurrent Engineering)

Η υιοθέτηση του ΟΜΣ επιτρέπει και τον εμπλουτισμό της όλης διαδικασίας σχεδιασμού με τις σύγχρονες θεωρήσεις και κατευθύνσεις, όσον αφορά τις προτεραιότητες, ειδικούς κανόνες και οδηγίες υλοποίησης της Κατασκευαστικής Διαμόρφωσης, που περιγράφονται με τον όρο Design for X (DFx), όπου x μπορεί να τεθεί η κατασκευή (manufacturing), η συναρμολόγηση (assembly), η αποσυναρμολόγηση (disassembly), το τέλος κύκλου ζωής (end-of-life), η ανακύκλωση (recycling), η ποιότητα (quality) κ.α., [Huang, 1996; Σφαντζικόπουλος, 2005].

Επίσης σημειώνεται ότι η εφαρμογή του ΟΜΣ, ενώ αποδεδειγμένα μειώνει το συνολικό ημερολογιακό χρόνο ανάπτυξης των βιομηχανικών προϊόντων (overall lead time), δεν μειώνει ωστόσο τον αθροιστικά δαπανημένο χρόνο σε ανθρωποώρες. Αντιθέτως επιτρέπει την παράλληλη και ενδεδειγμένη εκπόνηση της προσπάθειας πολλών ομάδων, προς όφελος της ποιότητας του τελικού αποτελέσματος (Σχήμα 1.3.4).

Τέλος, είναι αυτονόητο ότι για την επιτυχή εφαρμογή ΟΜΣ, ο παραγωγικός φορέας πρέπει να επενδύσει ιδιαίτερα στην εγκατάσταση υποδομών και στην μεσομακροπρόθεσμη εκπαίδευση και εξειδίκευση προσωπικού του, γεγονός που ίσως δυσκολεύει περισσότερο τις ΜΜΕ στην επιτυχή εφαρμογή του, από ότι μεγαλύτερους οργανισμούς.



Σχήμα 1.3.4: Μείωση του χρόνου ανάπτυξης μέσω ΟΜΣ

## 1.4 Τα Πρωτότυπα στον Ολοκληρωμένο Μηχανολογικό Σχεδιασμό & Ανάπτυξη Νέων Προϊόντων

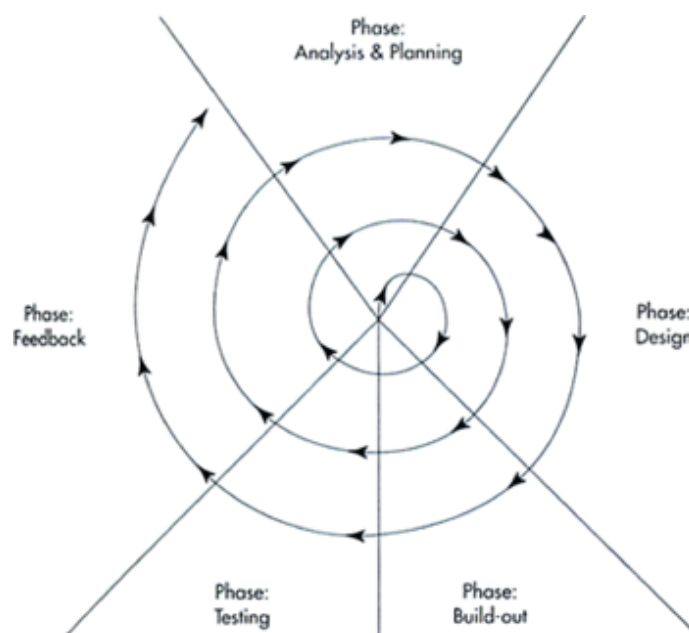
Σε κάθε διαδικασία του ΜΣ, είτε με την παλιότερη συμβατική θεώρηση, είτε με τη σύγχρονη υπό τη μορφή του ΟΜΣ, καθορίζονται συγκεκριμένα χρονικά ή διαδικαστικά σημεία (milestones), [Ulrich & Eppinger, 2008], στα οποία ελέγχεται και επιβεβαιώνεται η πρόοδος και η αρτιότητα του σχεδιασμού που έχει επιτελεσθεί ως το σημείο αυτό.

Οι έλεγχοι αυτοί, που γίνονται με συγκεκριμένους στόχους, συνήθως καταγεγραμμένους σε λίστα (checklist), είναι αυτονόητο ότι στα πρώτα στάδια εστιάζουν περισσότερο σε μορφή και γεωμετρικά χαρακτηριστικά υποψηφίων ή επιλεγείσας ΚΔ του προϊόντος, ενώ στην πορεία του ΜΣ περιλαμβάνουν και εμβαθύνουν και στη λειτουργία, εξαρτημάτων, υποσυστημάτων ή και του συνόλου της προϊόντος, όσο και στις παραγωγικές τους μεθόδους. Κορυφαία διαδικασία τέτοιου ελέγχου και διακριτό βήμα του ΜΣ, ειδικά με την παλαιότερη θεώρησή του, η δοκιμή τελικού πρωτοτύπου (prototype testing) πριν την προετοιμασία και έναρξη παραγωγής που αναφέρθηκε παραπάνω.

Όλοι οι παραπάνω έλεγχοι οδηγούν τη διαδικασία σχεδιασμού σε κρίσιμους κόμβους αποφάσεων, ως προς την συνέχιση της ή την επιβολή διορθωτικών, επαναληπτικών κύκλων ανασχεδιασμού (Design Iteration) ενός ή περισσότερων σταδίων που προηγήθηκαν.

Οι κύκλοι ανασχεδιασμού αναπόφευκτα επιμηκύνουν την όλη διαδικασία σχεδιασμού, προσθέτοντας σημαντικά σε χρόνο και σε κόστος. Μπορούν να οδηγήσουν ακόμα και στην υπέρβαση του προγραμματιζόμενου σημείου εισόδου ενός προϊόντος στην αγορά με σοβαρές εμπορικές συνέπειες.

Είναι επιτακτικό λοιπόν να ελαχιστοποιούνται και καταδεικνύουν τη αξία των δογμάτων «Προϊόν στην ώρα του» (“Just in time product”) και «Σωστό από την Αρχή» (“Right first time”) που ακολουθεί η σύγχρονη βιομηχανία και αποτελούν κεντρικούς στόχους και του ΟΜΣ.



Σχήμα 1.4.1: Κύκλοι ελέγχου – ανασχεδιασμού

Επιπλέον δε, σύμφωνα με τις αρχές του ΟΜΣ, οι διεξαγόμενοι έλεγχοι δεν πρέπει πια να είναι μονοδιάστατοι, αλλά να λαμβάνουν υπόψη και εν μέρει να επιβεβαιώνουν και παραμέτρους άλλων σταδίων της όλης, ταυτόχρονα επιτελούμενης διαδικασίας του ΜΣ.

Καθώς οι πλειονότητα των εν λόγω ελέγχων επιτελείται ως επί το πλείστον με διαφόρων ειδών πρωτότυπα (εξαρτημάτων – συστημάτων – προϊόντος), καθίσταται σαφής η αξία και η κρισιμότητά αυτών για το ΜΣ.

## 1.5 Η έννοια του πρωτοτύπου

Η λέξη *πρωτότυπος*, -η, -ο, γραμματικά είναι κατά βάση επίθετο, προσδίδοντας σε κάποιο άλλο ουσιαστικό αυτή την ιδιότητα. Απαντάται όμως και αμιγώς ως ουσιαστικό (πρακτικά ως ουσιαστικοποιημένο επίθετο), όταν εξαρχής εννοεί κάποιο αντικείμενο, όπως συνήθως ισχύει στη Μηχανολογία.

Στο λεξικό της Νεοελληνικής Γλώσσας, ο καθηγητής Γ.Μπαμπινιώτης δίνει για το πρωτότυπο, τόσο ως επίθετο, όσο και ως ουσιαστικό, τον παρακάτω ορισμό, [Μπαμπινιώτης, 2008]:

«Πρωτότυπος, -η, -ο:

- 1 (επίθ.): Αυτός που λέγεται, γράφεται, γίνεται κτλ. για πρώτη φορά, που αποκλίνει από το παλαιό και το τετριμμένο, που αποτελεί νεωτερισμό.
- 2 (επίθ.): Αυτός που τα λόγια ή τα έργα του έχουν ιδιαίτερο και πρωτοποριακό χαρακτήρα, που δεν επαναλαμβάνει προηγούμενα πρότυπα.
- 3 (επίθ.): Αυτός που έγινε πρώτος, που αποτελεί τη βάση ή το πρότυπο για άλλους.
- 4 (ουσ.): Το πρώτο που έγινε, βάσει του οποίου παράγονται άλλα όμοια ή ανάλογα»

Το διεθνώς αναγνωρισμένο λεξικό Webster, αντίστοιχα δίνει (σε μετάφραση) τον ορισμό, [Merriam-Webster, 2013]:

«Πρωτότυπος, -η, -ο:

1. Το πρώτο πράγμα ή όν του είδους του, γνήσιο, μοντέλο, πρότυπο, αρχέτυπο.
2. Ένα πρόσωπο ή πράγμα που χρησιμεύει ως μοντέλο για κάποιο άλλο ύστερης περιόδου.
3. Ένα πλήρους-κλίμακας, λειτουργικό μοντέλο, για επίδειξη ή δοκιμή, που ενσωματώνει νέο σχεδιασμό ή χαρακτηριστικά
4. Ένα άρτιο παράδειγμα ενός χαρακτηριστικού τύπου»

Για το πρωτότυπο στη μηχανολογία, είτε ως επίθετο (π.χ. «πρωτότυπο εξάρτημα/προϊόν/μοδέλο»), είτε ως ουσιαστικό, οι εκδοχές 1,3 & 4 του ορισμού Μπαμπινιώτη και οι 1 & 3 του ορισμού του Webster, κρίνονται ως οι πιο αρμόζουσες και εφαρμόσιμες, σε συνδυασμό με την ετυμολογία και τα συνθετικά της ίδιας της λέξης, ήτοι «πρώτο + τύπος», για τα οποία μπορεί να δοθεί τόσο η ερμηνεία του αντικειμένου που είναι πρώτο κατά τον τύπο=μορφή, δηλαδή του οποίου η μορφή παρουσιάζεται ή/και υλοποιείται για πρώτη φορά, όσο και η ερμηνεία πρώτο για τον τύπο=καλούπι/φόρμα, αντικειμένου δηλαδή το οποίο θα αποτελέσει τη βάση, το αρχέτυπο (master pattern) για αναπαραγωγή πολλών άλλων από αυτό ή με βάση αυτό,

κυρίως δια μέσου μορφοποιητικών (formative) μεθόδων παραγωγής που χρησιμοποιούν τύπους, καλούπια.

Είναι όντως αξιοσημείωτο, ότι με βάση τη θεώρηση του ΟΜΣ, όπως εισήχθη στις προηγούμενες παραγράφους, οι επικρατούσες αυτές δύο μηχανολογικές ερμηνείες του ορισμού του πρωτότυπου, συγκεράζονται τελικά για πολλά σύγχρονα βιομηχανικά προϊόντα σε μία ενιαία έννοια.

Σε όλη την εξέλιξη της ανθρώπινης ιστορίας καταγράφονται πρωτότυπα. Αυτό εν μέρει ερμηνεύεται και από την για χιλιάδες χρόνια απουσία της μαζικής και βιομηχανικής παραγωγής, που πρακτικά εμφανίζεται μόνο μετά την Βιομηχανική Επανάσταση τον 17ο – 18ο αιώνα μ.Χ. Ως τότε, το κάθε χρηστικό για τον άνθρωπο αντικείμενο, προϊόν αν μπορεί να ειπωθεί με σημερινά μέτρα, παραγόταν σχεδόν αποκλειστικά με το χέρι και με απλά εργαλεία και ήταν μοναδικό, σχεδόν πρωτότυπο. Η επαναληψιμότητα της κατασκευής περιοριζόταν μόνο στην επίτευξη συγκεκριμένης λειτουργικότητας, στα χρησιμοποιούμενα υλικά και στην ακολουθούμενη από τον τεχνίτη στρατηγική κατασκευής. Η μοναδικότητα της παραγωγής – κατασκευής για τα αντικείμενα αυτά, τους προσέδιδε συχνά και την υπόσταση του τεχνουργήματος, ενός αντικειμένου δηλαδή που πέραν των λειτουργικών χαρακτηριστικών που σήμερα θα το περιέγραφαν ως προϊόν, ενσωμάτωνε και στοιχεία εξατομίκευσης του (customization) για τον ιδιοκτήτη – κάτοχό του, όπως οικόσημα ή παραστάσεις συγκεκριμένων μορφών (Θεοτήτων, συμβόλων κ.α.), εκτεφρασμένα και ενσωματωμένα με μορφές εικαστικών τεχνών (χρωματισμοί, ζωγραφικές παραστάσεις, μαρκετερί, ανάγλυφα, διακοσμητικά στοιχεία).

Έτσι π.χ. ως πρωτότυπα μπορούν να θεωρηθούν από τα πρώτα λίθινα εργαλεία και όπλα της νεολιθικής περιόδου, τα κύπελλα – κρατήρες – αμφορείς, σπαθιά, ασπίδες, άρματα, μεταλλικά αγάλματα των αρχαίων χρόνων, οι πολεμικές μηχανές, όπλα, πανοπλίες, στέμματα του μεσαιώνα, έως οι περίτεχνες άμαξες, έπιπλα, μουσικά κουτιά των χρόνων της Αναγέννησης. Μοναδική εξαίρεση αποτελούσαν ενδεχομένως κάποια χυτά κυρίως αντικείμενα (π.χ. νομίσματα), των οποίων η αναπαραγωγή, λόγω υποχρεωτικά επιβαλλόμενης ομοιομορφίας, επιτυγχάνετο από εκμαγεία και εργαλεία, φτιαγμένα όμως από χειροποίητα αρχέτυπα μονέλα, όχι πάντοτε της ίδιας σταθερής μορφής. Και πάλι όμως χυτά αντικείμενα με πραγματική χρηστική και λειτουργική υπόσταση, π.χ. καμπάνες, κανόνια, τοποθετούνται ιστορικά λίγους μόνο αιώνες πριν την απαρχή της Βιομηχανικής Επανάστασης.



Σχήμα 1.5.1: Τυπικά πρωτότυπα – προϊόντα της ανθρώπινης ιστορίας

Στη σύγχρονη βιομηχανική εποχή, με την έλευση ουσιαστικά του 20ου αιώνα και την υιοθέτηση της μαζικής παραγωγής τα (βιομηχανικά) πρωτότυπα αποκτούν σταδιακά

τη σημερινή τους έννοια, που αποδίδεται με τον ευρύτερα αποδεκτό σήμερα ορισμό τους [Σφαντζικόπουλος, 2003], ως,

«τα στερεά εκείνα φυσικά αντικείμενά τα οποία αποδίδουν με ικανοποιητική ακρίβεια, τουλάχιστον την μορφή και τις βασικές γεωμετρικές διαστάσεις ενός προϊόντος, έστω και υπό κλίμακα και αξιοποιούνται κατά τη διαδικασία σχεδιασμού και ανάπτυξης για ελέγχους μορφής (form), συναρμολόγησης/συνεργασίας (fit) και κατά περίπτωση λειτουργίας (function) του υπό ανάπτυξη αντικειμένου – προϊόντος».

Εκ του ορισμού τους είναι σαφές ότι τα πρωτότυπα επαληθεύουν και επιβεβαιώνουν για λογαριασμό των ομάδων σχεδιασμού την έως το σημείο δημιουργίας τους επίτευξη των γενικών και ειδικών ΤΠ, όπως αυτές εκφράζονται από τα ΧΣ και τις ΠΣ του προϊόντος.

Σε μια ευρύτερη θεώρηση τους, [Ulrich & Eppinger, 2008; Chua et al., 2010] τα πρωτότυπα ορίζονται και ως διαφορετικές «προσεγγίσεις» των τελικών προϊόντων, για την εξέταση και διαπίστωση διαφορών υπό εξέταση παραμέτρων ή χαρακτηριστικών τους. Υπ' αυτήν την έννοια οποιαδήποτε οντότητα με την οποία είναι δυνατόν να ελεγχθεί τουλάχιστον μια από τις ΠΣ του προϊόντος μπορεί να θεωρηθεί ως πρωτότυπο. Ο ορισμός αυτός ξεφεύγοντας από τη στενή έννοια του όρου, περιλαμβάνει στα πρωτότυπα και άλλες μορφές όπως σκίτσα, μαθηματικά μοντέλα, προσομοιώσεις, δοκιμαστικά αντικείμενα καθώς και πλήρως λειτουργικά τεμάχια προ-παραγωγής των προϊόντων. Με βάση τον τελευταίο αυτό ορισμό, ως πρωτοτυποποίηση ή κατασκευή/δημιουργία πρωτότυπου με την ευρεία έννοια μπορεί να θεωρηθεί και κάθε διαδικασία που καταλήγει στην ανάπτυξη κάποιας από τις παραπάνω προσεγγίσεις.


Με τη χρήση πρωτοτύπων στον ΜΣ γενικότερα επιτυγχάνονται:

- Υλοποίηση γενικής γεωμετρίας προϊόντος ή εξαρτήματος / Έλεγχος μορφής
- Έλεγχος βασικών διαστάσεων και γεωμετρικών απαιτήσεων.
- Καλύτερη Τεχνική Επικοινωνία μεταξύ τμημάτων της επιχείρησης, φορέων και ομάδων σχεδιασμού.
- Έλεγχος αποδοχής από την αγορά – Μελέτες Marketing
- Έλεγχος και βελτιστοποίηση λειτουργικότητας
- Δοκιμή εφαρμογής – Έλεγχος Συναρμολόγησης
- Δοκιμές αντοχής, διάρκειας ζωής και άλλων ιδιοτήτων
- Καταστροφικές δοκιμές
- Έλεγχος κατασκευασιμότητας με συγκεκριμένες μεθόδους και εξοπλισμό παραγωγής
- Οργάνωση και σχεδιασμός της διαδικασίας και των φάσεων παραγωγής.
- Προετοιμασία και κατασκευή εργαλείων για την έναρξη παραγωγής.
- Βελτιστοποίηση των μεθόδων και εργαλείων της παραγωγής.

## 1.6 Κατηγορίες Πρωτοτύπων στον Μηχανολογικό Σχεδιασμό

Τα πρωτότυπα για τον ΜΣ κατηγοριοποιούνται με διάφορους τρόπους. Σύμφωνα με πιο διαδεδομένη τους κατάταξη, η οποία μάλιστα έχει υιοθετηθεί και από πρόσφατα σχετικά με ΤΚΠ πρότυπα, [VDI 3404, 2007], εμφανίζονται στον Πίνακα 1.6.1.

Η κατάταξη του Πίνακα 1.6.1, δίνει έμφαση περισσότερο στα πρωτότυπα ως φυσικά αντικείμενα και είναι πιστότερη στην συμβατική σειριακή θεώρηση του ΜΣ, χωρίς φυσικά να ακυρώνεται και για τον ΟΜΣ.

<b>ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΠΡΩΤΟΤΥΠΩΝ</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ΠΡΩΤΟΤΥΠΑ ΜΟΡΦΗΣ (Design models)</li> </ul>	Αποδίδουν τη μορφή και τις βασικές διαστάσεις. Μπορούν να κατασκευάζονται και υπό κλίμακα.	 Βαθμός Πιστότητας Πρωτοτύπων προς το τελικό Προϊόν
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ (Geometrical Prototypes)</li> </ul>	Αποδίδουν τη μορφή και όλες τις κατασκευαστικές διαστάσεις	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ΦΥΣΙΚΑ (Functional Prototypes)</li> </ul>	Έχουν επιπλέον το ίδιο ή παραπλήσιο με το τελικό υλικό και πληρούν τις λειτουργικές απαιτήσεις	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ΤΕΧΝΙΚΑ (Technical Prototypes) (3-20 τεμ.)</li> </ul>	Έχουν παραχθεί με το τελικό υλικό και με την μέθοδο παραγωγής του προϊόντος ή παραπλήσια	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ΔΟΚΙΜΑΣΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ (Pre-Production) (έως 500 τεμ.)</li> </ul>	Έχουν παραχθεί με τα εργαλεία και τις συνθήκες της κανονικής παραγωγής	

Πίνακας 1.6.1 : Κατηγορίες Πρωτοτύπων

Πιο σύγχρονες θεωρήσεις των πρωτοτύπων, [Ulrich & Eppinger, 2008; Chua et al., 2010; Maropoulos & Ceglarek, 2010], περισσότερο ευθυγραμμισμένες με τον ευρύτερο ορισμό τους που δόθηκε παραπάνω, τις αρχές και τα εργαλεία του ΟΜΣ, κατατάσσουν επίσης τα πρωτότυπα σε «φυσικά» και «αναλυτικά».

Τα πρώτα έχουν υπόσταση φυσικών χειροπιαστών αντικειμένων. Τα δεύτερα είναι προϊόντα υπολογισμών, αναλύσεων και προσομοιώσεων και χωρίς να έχουν τα ίδια κάποια φυσική υπόσταση, προσφέρουν αξιοποιήσιμα αποτελέσματα και στοιχεία αξιολόγησης για το αναπτυσσόμενο προϊόν υπό τη μορφή κυρίως πληροφορίας. Ως επί το πλείστον υλοποιούνται με Η-Υ σε περιβάλλον, λογισμικά ή και ευρύτερες υποδομές πληροφορικής (CAD – CAE). Αναφέρονται επίσης και ως Ψηφιακά Πρωτότυπα. (Digital Prototypes), Digital Mock-Ups (DMUs) και ως Εικονικά

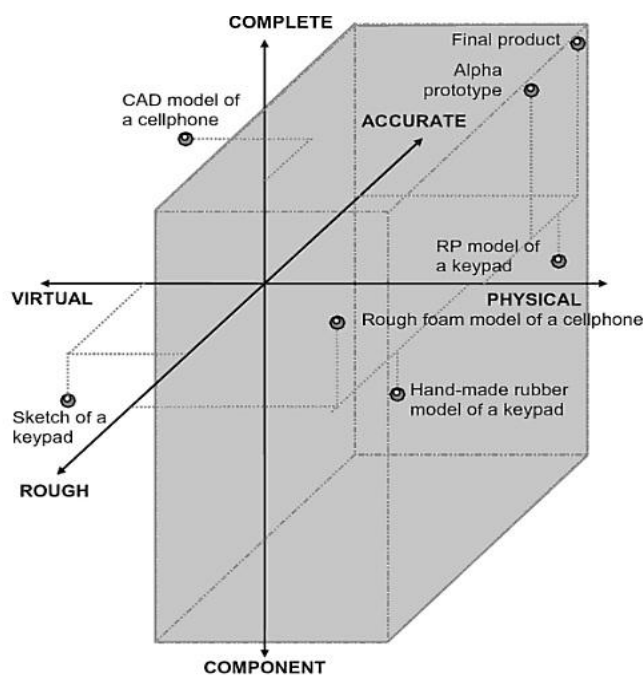


Πρωτότυπα (Virtual Prototypes), ειδικά όταν για τα τελευταία υλοποιείται ψηφιακή απεικόνιση με χαρακτηριστικά ρεαλισμού και «εμβύθισης» (Immersion) του χρήστη σε εικονικό περιβάλλον.

Πρέπει εδώ οπωσδήποτε να σημειωθεί, ότι αν και για ολόκληρες δεκαετίες, τα φυσικά πρωτότυπα έχουν χρησιμοποιηθεί χωρίς τα αναλυτικά, το αντίθετο ακόμα και σήμερα δεν είναι δυνατόν να ισχύσει, καθώς τα φυσικά αντικείμενα, έστω και μία φορά (τελική δοκιμή) στην όλη διαδικασία του ΜΣ οφείλουν να επικυρώσουν (validate), [Maropoulos & Ceglarek, 2010], τα δεδομένα και τις πληροφορίες που έχουν δώσει τα αναλυτικά, πριν τη δέσμευση προς την παραγωγή.

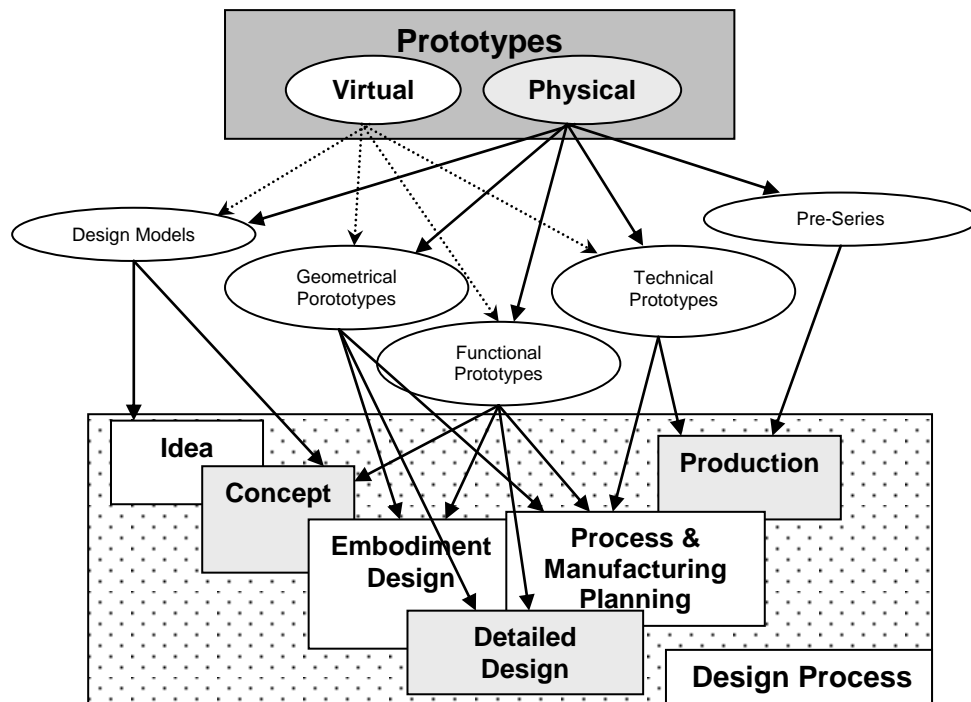
Τέλος υπάρχει και η διάκριση των πρωτοτύπων σε «εκτενούς αντίληψης» (Comprehensive, είτε πρόκειται για φυσικά, είτε για αναλυτικά) και «εστιασμένα» (focused), ανάλογα με το αν δια του πρωτοτύπου ελέγχεται συνολικά το εξάρτημα, υποσύστημα, ή προϊόν, ή αν ελέγχεται ειδικά ένα συγκεκριμένο χαρακτηριστικό ή λειτουργία του.

Οι δύο τελευταίες κατηγοριοποιήσεις πρωτοτύπων παρίστανται μαζί γραφικά και με παραδείγματα στο Σχήμα 1.6.1, [Chua et al., 2010].



Σχήμα 1.6.1: Φυσικά – αναλυτικά, εκτενή – εστιασμένα πρωτότυπα

Στην παρούσα διατριβή ο συγγραφέας υιοθετεί την κατηγοριοποίηση των πρωτοτύπων του πίνακα 1.6.1, για την κατάταξη όμως σε αυτή όχι αποκλειστικά των φυσικών, αλλά όλου του φάσματος των δυνατών σήμερα εναλλακτικών πρωτοτυποποίησης, που ο ΟΜΣ υιοθετεί και που μπορούν να αξιοποιηθούν στον ΜΣ. Την θεώρηση αυτή παριστά γραφικά το Σχήμα 1.6.2



Σχήμα 1.6.2: Το πλήρες φάσμα των πρωτοτύπων στο πλαίσιο του ΟΜΣ

## 1.7 Παραδοσιακές & Συμβατικές μέθοδοι κατασκευής πρωτοτύπων

Έχει ήδη προαναφερθεί ότι για πολλά χρόνια, ακόμα και στη βιομηχανική εποχή, οι δυνατότητες κατασκευής πρωτοτύπων σε διαδικασίες ΜΣ προϊόντων, ήταν περιορισμένες και ιδιαίτερα επιβαρυντικές σε χρόνο και σε κόστος. Όταν ακόμα ο ΜΣ και η σχεδίαση επιτελούντο αποκλειστικά στο κλασικό συμβατικό σχεδιαστήριο, τα πρωτότυπα εμφανίζονταν λίγες και συγκεκριμένες, κρίσιμες φορές στην όλη διαδικασία και ήταν κατασκευασμένα με τρόπο συμβατικό (conventional) έως παραδοσιακό (traditional), απαιτώντας εβδομάδες ως και μήνες έντονης και απαιτητικής προσπάθειας εξειδικευμένων τεχνιτών και χειροτεχνών (craftsmen), γνωστών και ως μοδελοποιών (model makers), [Hand, 1905].

Ο ανθρώπινος παράγοντας, η εμπειρία και η δεξιότητα των τεχνιτών αυτών έπαιζαν καθοριστικό ρόλο στην εμφάνιση, την ποιότητα και την ακρίβεια των πρωτοτύπων, παράλληλα δε συχνά έθεταν για τους σχεδιαστές και τα ίδια τα όρια της επιτεύξιμης μορφής και γεωμετρίας για το τελικό προϊόν.

Πρέπει ακόμα να σημειωθεί ότι τις ίδιες περίπου τεχνικές επί χρόνια χρησιμοποιούσαν και συχνά ακόμα χρησιμοποιούν και άλλες τεχνικές επιστήμες όπως η αρχιτεκτονική και η τοπογραφία, για τη δημιουργία μακετών περιοχών, κτηρίων και κατασκευών, [Knoll et al., 2007, RIAI].

Θα αναφερθούν παρακάτω οι πιο τυπικές κατηγορίες παραδοσιακών και συμβατικών πρωτοτύπων και τα κύρια χαρακτηριστικά τους, [Jung et al., 2005; Postel, 2012]:

- Σκαριφήματα, σκίτσα και λεκτικές περιγραφές (Sketches & Drawings)

Μια πρακτική που ακόμα και σήμερα ακολουθούν κάποιοι βιομηχανικοί σχεδιαστές, κυρίως για να εκφράσουν την μορφή και εμφάνιση ενός νέου προϊόντος, είναι η δημιουργία χειρόγραφων σκαριφημάτων, σκίτσων και παραστάσεων του αντικείμενου, σε διάφορες τυποποιημένες ή/και προοπτικές όψεις, πολύ συχνά με

χρωματισμούς και σκηνικό/φόντο. Τα σκίτσα αυτά συνοδευόμενα από κείμενα και κατάλληλη λεκτική περιγραφή, επιδιώκουν με στοχευμένες παρουσιάσεις να προσφέρουν στον αποδέκτη της επικοινωνίας ικανοποιητική αντίληψη για το προϊόν. Πολλές φορές φέρουν τα ίδια εντοπισμένες σημειώσεις (Annotations) περί επιθυμητών στο αντικείμενο χαρακτηριστικών και λειτουργιών.

Χαρακτηρίζονται από τον έντονο προσανατολισμό τους στην εμφάνιση και την αισθητική, πρακτικά με απουσία καθορισμένης ΚΣ και ΚΔ, την σχεδόν μηδενική κατασκευαστική τους θεώρηση και από την γενικά αμφίβολη αποτελεσματικότητά τους ως προς την συνολική αντίληψη του αντικειμένου, ενώ είναι βέβαιο ότι για να έχουν ένα minimum ποιότητας και ρεαλισμού απαιτούν χρόνο προετοιμασίας ημερών έως εβδομάδων.



Σχήμα 1.7.1: Σκίτσα και σκαριφήματα

#### • Μοντέλα πηλού (Clay Models)

Μια τεχνική που έλκει την καταγωγή της από τα αρχαία χρόνια και τους κεραμοποιούς – αγγειοπλάστες – γλύπτες, είναι η απόδοση φυσικού πρωτοτύπου αντικειμένου – μοντέλου σε πηλό (clay). Στη σύγχρονη εποχή, τα μοντέλα πηλού εξυπηρετήσαν για δεκαετίες πολλές οικογένειες προϊόντων, τη μεγαλύτερη όμως εφαρμογή τους βρήκαν και ακόμα βρίσκουν στην αυτοκινητοβιομηχανία και στην αεροναυπηγική. Ο λόγος για αυτό είναι ότι με πηλό συχνά κατασκευάζονται πρωτότυπα πλήρους κλίμακας (1:1) για αυτοκίνητα, αεροσκάφη, πτέρυγες, που λόγω μεγέθους είναι ακόμα και σήμερα δύσκολο να παραχθούν αλλιώς.

Η κατασκευή πρωτοτύπων πηλού απαιτεί υψηλή τεχνική και πολλά σχέδια και σκαριφήματα, από τα οποία ο τεχνίτης θα πρέπει πρώτα να αντιληφθεί και κατόπιν με ακρίβεια να αποδώσει τη μορφή και τουλάχιστον βασικές διαστάσεις του αντικειμένου, επιτελώντας πρακτικά γλυπτική πάνω σε πηλό. Ο σύγχρονος βιομηχανικός πηλός (industrial clay), είναι εύπλαστο και σταθερό σε θερμοκρασία περιβάλλοντος υλικό, παρόμοιο με την πλαστελίνη και κατά βάση παράγεται από πετρελαϊκά παράγωγα μαζί με ειδικά κεριά. Τυπικά περιέχει και θείο, λόγω όμως της αντιδραστικότητας του τελευταίου με RTV σιλικόνες σε περίπτωση ανάγκης δημιουργίας εκμαγείων, παράγεται και χωρίς θείο.

Ένα μοντέλο πηλού, μπορεί να βαφτεί και φινιρισθεί σε υψηλό βαθμό και να επενδυθεί με κατεργάσιμα αφρώδη (π.χ. Styrofoam) ή άλλα υλικά. Είναι όμως εξ'ορισμού στατικό και πέραν δοκιμών αεροσήραγγας, οι λοιπές εφαρμογές του υποχρεωτικά περιορίζονται σε αισθητική, μορφή και υπό περιορισμούς γεωμετρία του προϊόντος.



Σχήμα 1.7.2: Μοντέλα Πηλού

- Μοντέλα αφρώδων υλικών (Foam Models)

Σε αυτά χρησιμοποιούνται αφρώδη πολυμερή υλικά όπως πολυουρεθάνη (PUR), μικρής έως μεσαίας πυκνότητας (από 6 έως 50 Kg/m<sup>3</sup>), σε μορφή συμπαγούς (όπως τα συνήθη δομικά μονωτικά) ή χυτεύσιμης πρώτης ύλης. Με χειρονακτική αφαίρεση υλικού (γλυπτική), ή και με τη βοήθεια εργαλειομηχανών δημιουργούνται φυσικά μοντέλα προϊόντων ή εξαρτημάτων. Εναλλακτικά, με κάποιο άλλο μοντέλο ως υπόστρωμα (substrate), όπως π.χ. ένα μοντέλο πηλού, χυτεύσιμα αφρώδη πολυμερή εφαρμόζονται επί αυτού, τα οποία μετά τη στερεοποίησή τους τρίβονται και κατεργάζονται με το χέρι έως αποδόσεως της επιθυμητής τελικής μορφής και γεωμετρίας.

Τα υλικά αυτά είναι εύκολα κατεργάσιμα, επιδέχονται βαφή και μετεπεξεργασία, αλλά γενικά είναι χαμηλής αντοχής και ευαίσθητα, ικανά να εξυπηρετούν κυρίως αισθητικές αξιολογήσεις και παρουσιάσεις.



Σχήμα 1.7.3: Πρωτότυπα μοντέλα αφρού

- Ξύλινα Μοντέλα (Wooden Models)

Στην κατηγορία αυτή η κύρια διάκριση αφορά το σκοπό του πρωτοτύπου – μοντέλου του αντικειμένου.

Για το σκοπό της εξυπηρέτησης του σχεδιασμού, για χρόνια κυριάρχησε η χρήση του σχετικά πορώδους, αλλά μαλακού, ελαφρού (τυπική πυκνότητα 160 kg/m<sup>3</sup>) και εύκολα κατεργάσιμου – ακόμα και με το χέρι – ξύλου Balsa, που παράγεται από συγκεκριμένη οικογένεια δένδρων της λατινικής Αμερικής. Με το υλικό αυτό, εργαλεία και μεθόδους ξυλογλυπτικής και απλών κατεργασιών επιτυγχάνετο η δημιουργία σχετικά ανθεκτικών και παράλληλα ελαφρών ξύλινων πρωτοτύπων. Ο χαρακτήρας του συγκεκριμένου υλικού, επέτρεψε και τη χρήση του ακόμα και σε πραγματικά δομικά εξαρτήματα αεροσκαφών, όπως το πολεμικό αεροσκάφος de Havilland DH.98 Mosquito του 2<sup>ου</sup> Π.Π.



Σχήμα 1.7.4: Πρωτότυπα από ξύλο Balsa

Για το σκοπό της εξυπηρέτησης της παραγωγής, κυρίως μοντέλων τύπωσης για χυτά εξαρτήματα άμμου, χρησιμοποιούνται ανέκαθεν από τους μοντελοποιούς, σκληρότερα, βαρύτερα, λεπτότερου κόκκου και ανθεκτικότερα ξύλα, όπως η κερασιά, το μαόνι, ο σφένδαμος και το ξύλο Teak, [Hand, 1905]. Αυτά ήταν όμως αναπόφευκτα πιο δύσκολα στην κατεργασία τους, που δεν μπορούσε να γίνει αποκλειστικά ξυλογλυπτικά με το χέρι, παρά μόνο κοπιωδώς με πριόνια και άλλα ξυλουργικά εργαλεία και μηχανές.

Και στις δύο παραπάνω περιπτώσεις απαιτείται φυσικά άριστη δεξιότητα από εξειδικευμένο τεχνικό προσωπικό και εβδομάδες τουλάχιστον εξειδικευμένης εργασίας.



Σχήμα 1.7.5: Ξύλινα πρωτότυπα μονέλα χυτηρίου

- Συμβατικά Κατεργασμένα Πρωτότυπα (Conventionally Machines Prototypes)

Τα πρωτότυπα αυτής της κατηγορίας αφορούν κυρίως σε πάσης φύσεως πλαστικά (ABS, Πολυστυρένιο, Πολυπροπυλένιο) και μεταλλικά υλικά (Μπρούτζο, Αλουμίνιο, σίδηρο, χάλυβες κλπ.), που η μετατροπή τους σε πρωτότυπα αντικείμενα γίνεται κατά κύριο λόγο με συμβατικές κατεργασίες (π.χ. κοπή, συγκόλληση) και κοινές (όχι CNC) εργαλειομηχανές, όπως δράπανα, φρέζες και τόνους. Τα πρωτότυπα αυτά, ενσωματώνοντας σχεδόν τελικές γεωμετρίες και λειτουργικά χαρακτηριστικά, βασισμένα σε κατασκευαστικά σχέδια που είχαν προκύψει από Αναλυτικό Σχεδιασμό συγκεκριμένης ΚΔ, τοποθετούντο ανέκαθεν στα ύστερα στάδια της κλασικής θεώρησης του ΜΣ, είχαν σύνθετα φασεολόγια, υψηλό κόστος, υψηλό κίνδυνο από λάθη στα κατασκευαστικά σχέδια ή την απόδοσή τους από τον ανθρώπινο παράγοντα και συνήθως χρησιμοποιούντο κατ'ελάχιστον και μόνον για απαραίτητα λειτουργικά ή τεχνικά πρωτότυπα. Απαιτούσαν αρκετές εβδομάδες έως και μήνες με πολύ υψηλό κόστος.



Σχήμα 1.7.6: Συμβατικά Κατεργασμένα Πρωτότυπα

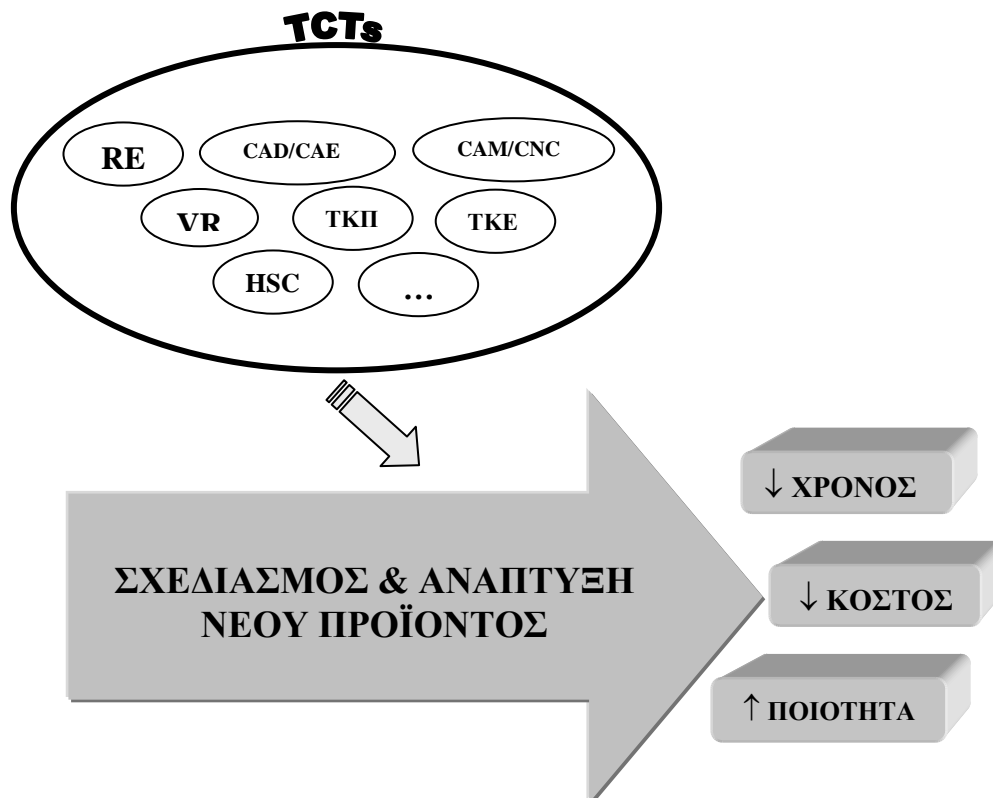
Με τα παραπάνω, πρακτικά εξαντλείται ο «πληθυσμός» των εναλλακτικών μεθόδων πρωτοτυποποίησης κατά το ΜΣ πριν την «ηλεκτρονική» εποχή που εδραιώθηκε κυρίως με τον ΟΜΣ. Ένας «πληθυσμός» που άλλαξε δραστικά σε φύση και σε αριθμούς, με τον ΟΜΣ και τις Τεχνολογίες Συμπίεσης Χρόνου (Time Compression Technologies – TCTs) ως αναπόσπαστο τμήμα του.

## 1.8 Τεχνολογίες Συμπίεσης Χρόνου & Σύγχρονες Τεχνικές Πρωτοτυποποίησης

Έχει ήδη καταδειχθεί παραπάνω ο τρόπος με τον οποίο οι τεχνολογίες και οι εφαρμογές των Η-Υ και της Πληροφορικής σταδιακά μετεξέλιξαν τη διαδικασία του ΜΣ σε αυτό που σήμερα ονομάζουμε ΟΜΣ (Concurrent Engineering).

Κύρια χαρακτηριστικά του ΟΜΣ, η ταυτόχρονη επιτέλεση των σταδίων του σχεδιασμού, οι πολυμελείς και ετερόκλητες ομάδες εργασίας, η συνολική θεώρηση του κύκλου ζωής των προϊόντων, και η εκμετάλλευση της πληροφορικής σε όλο το φάσμα της δραστηριότητας από τις προμήθειες και τη διακίνηση, το σχεδιασμό – ανάπτυξη, την παραγωγή, τη διάθεση και την ανακύκλωση. Τα βασικότερα όμως χαρακτηριστικά και στόχοι τελικά του ΟΜΣ είναι η ελαχιστοποίηση του συνολικού χρόνου και κόστους ανάπτυξης των προϊόντων με ταυτόχρονη άνοδο της ποιότητάς τους.

Σε αυτό το πλαίσιο, εισάγεται ο ορισμός των Τεχνολογιών Συμπίεσης Χρόνου (ΤΣΧ, Time Compression Technologies, TCTs) [Σφαντζικόπουλος, 2003], ως το φάσμα όλων των σύγχρονων τεχνολογιών που βασιζόμενες στους Η – Υ και τις εφαρμογές τους, εμπλέκονται στα στάδια της διαδικασίας σχεδιασμού και ανάπτυξης νέων προϊόντων με στόχο την μείωση/κατάτμηση του απαιτούμενου χρόνου για την διαδικασία αυτή, την κατ'επέκταση ελάττωση του συνεπαγόμενου κόστους, με ταυτόχρονη διατήρηση ή και επαύξηση της ολικής ποιότητας του αναπτυσσόμενου προϊόντος. Παραστατικά ο ρόλος των TCTs διαφαίνεται στο Σχήμα 1.1



Σχήμα 1.8.1: Ρόλος των TCTs στη διαδικασία ανάπτυξης νέου προϊόντος

Εκ του ορισμού τους, στις ΤΣΧ (TCTs) κατατάσσονται κατά κύριο λόγο:

- Όλες οι τεχνολογίες Computer Aided X (CAx), ήτοι:
  - CAD, σε 2 αλλά κυρίως σε 3 διαστάσεις, που υποστηρίζουν επιμέρους διαδικασίες σχεδιασμού και σχεδίασης με εξειδικευμένο λογισμικό,
  - CAE, που προσφέρουν υψηλού επιπέδου και ακρίβειας αναλυτικές προσομοιώσεις της πραγματικής συμπεριφοράς εξαρτημάτων-συστημάτων-προϊόντων σε μια σειρά από φαινόμενα (Καταπονήσεις, ροές, μεταφορά θερμότητας, διάβρωση κ.α.) και σε ποικίλες συνθήκες,
  - CAM για την πλήρη προετοιμασία και υποστήριξη κατεργασιών από CNC εργαλειομηχανές,
  - CAPP για την προετοιμασία και οργάνωση γραμμών παραγωγής, κλπ.
- Οι Τεχνολογίες και Εξοπλισμός Εικονικής Πραγματικότητας (VR, Virtual Reality) και Εικονικής Πρωτοτυποποίησης (VP, Virtual Prototyping), που φέρνοντας σε ένα άλλο επίπεδο αξιοποίησης τα γεωμετρικά δεδομένα των συστημάτων CAD, εισάγουν την έννοια του «εικονικού» τόσο για τα αντικείμενα όσο και για το περιβάλλον τους και της «εμβύθισης» (immersion) του χρήστη στο περιβάλλον αυτό, για την καλύτερη «άυλη» αντίληψη, μελέτη και αξιοποίησή τους.
- Οι Τεχνολογίες και τα λογισμικά Product Data Management (PDM) και Product Lifecycle Management (PLM), που προσφέροντας ενιαίες πλατφόρμες εργασίας και ανταλλαγής δεδομένων και πληροφοριών στους φορείς σχεδιασμού και παραγωγής των προϊόντων, υποστηρίζουν την ολοκληρωμένη και συνολική θεώρηση κάθε νέου προϊόντος και του ΚΖ του στο πνεύμα του ΟΜΣ.
- Οι Τεχνολογίες Αντίστροφου Σχεδιασμού (ΑΣ, Reverse Engineering - RE) και Ψηφιακής Αποτύπωσης (Digitization), που με μετρητικό – καταγραφικό εξοπλισμό και κατάλληλα λογισμικά μεταφέρουν υπαρκτά φυσικά αντικείμενα στο ψηφιακό περιβάλλον, για οποιαδήποτε μετέπειτα αξιοποίησή τους.
- Τεχνολογίες και λογισμικό ελεγχόμενων από Η – Υ (Computer Numerical Control – CNC) κατεργασιών και σχετικών εργαλειομηχανών, με έμφαση στις εκδοχές των κοπών και κατεργασιών υψηλής ταχύτητας (High Speed Cutting – HSC, High Speed Machining – HSM) και των κατεργασιών σε επιτραπέζια κλίμακα (Desktop CNC Milling/Machining) για την εξυπηρέτηση κατασκευής πρωτότυπων εξαρτημάτων και ιδιοσυσκευών, χωρίς επιβάρυνση του αμιγώς παραγωγικού CNC εξοπλισμού.
- Η Ταχεία Κατασκευή Πρωτοτύπων (ΤΚΠ, Rapid Prototyping - RP), που αποτελεί ένα καινοτόμο και συνεχώς εξελισσόμενο τεχνολογικό κλάδο με κύριο αντικείμενο την αποδοτική αυτοματοποιημένη δημιουργία πρωτοτύπων υψηλής ποιότητας κάθε είδους, για αξιοποίηση κατά το ΜΣ και όχι μόνο, περιοχή που αποτελεί και το κύριο επιστημονικό πεδίο και αντικείμενο της παρούσας ΔΔ.



- Η Ταχεία Κατασκευή Εργαλείων (ΤΚΕ, Rapid Tooling – RT), επέκταση σε ένα βαθμό της ΤΚΠ, που με συνδυαστική αξιοποίηση ΤΚΠ και συμβατικών – παραδοσιακών μεθόδων κάνει εφικτή την δημιουργία-αναπαραγωγή πρωτοτύπων και μικρών ως μεσαίων σειρών παραγωγής από ποικίλα υλικά, ή ακόμα υποστηρίζει καίρια και ουσιαστικά σύνθετες και απαιτητικές παραγωγικές μεθόδους με γρήγορο και οικονομικό τρόπο (π.χ. χύτευση χαμένου κεριού). Και η ΤΚΕ αποτέλεσε εν μέρει αντικείμενο έρευνας στην παρούσα ΔΔ.

Είναι σαφές ότι οι περισσότερες από τις θεωρούμενες ως ΤΣΧ, και συγκεκριμένα οι τεχνολογίες CAD – VR – VP, CAE, CNC και φυσικά κατεξοχήν οι ΤΚΠ και ΤΚΕ είναι ικανές, πέρα από οτιδήποτε άλλο, να προσφέρουν κατά τη διαδικασία του ΟΜΣ στους φορείς και τα άτομα που τον επιτελούν μεγάλο όγκο σημαντικής αξιοποιήσιμης πληροφορίας και δεδομένων για τα αναπτυσσόμενα προϊόντα, σε τρόπο ώστε να θεωρούνται και αυτές Σύγχρονες Εναλλακτικές Προσεγγίσεις Πρωτοτυποποίησης.

Προστιθέμενες στις συμβατικές και παραδοσιακές μεθόδους και τεχνικές πρωτοτυποποίησης της παραγράφου 1.7, διαμορφώνουν πλέον στα πλαίσια του ΟΜΣ ένα ριζικά νέο «οπλοστάσιο» για την δημιουργία και αξιοποίηση πρωτοτύπων, σε πλήρη ρήξη με τα ισχύοντα στο πρόσφατο παρελθόν.

Οι ΤΣΧ είναι σήμερα διαρκώς εξελισσόμενες σε πλήθος, δυνατότητες και χαρακτηριστικά, δημιουργώντας έντονα την ανάγκη της ουσιαστικής υποστήριξης των φορέων σχεδιασμού ως προς την αποτελεσματικότερη δυνατή αξιοποίησή τους για την επίτευξη των βασικών στόχων του ΟΜΣ.

Καθώς η παρούσα ΔΔ επικεντρώνεται στην ΤΚΠ και ΤΚΕ, θα αφιερωθούν για αυτές ξεχωριστές εισαγωγικές παράγραφοι. Θεωρώντας όμως και τις λοιπές σύγχρονες εναλλακτικές πρωτοτυποποίησης εκ των ΤΣΧ, θα παρατεθούν παρακάτω εν συντομία βασικά στοιχεία και χαρακτηριστικά τους.

### **1.8.1 CAD – VR – VP: Ψηφιακά Πρωτότυπα – Εικονική Πραγματικότητα & Πρωτοτυποποίηση**

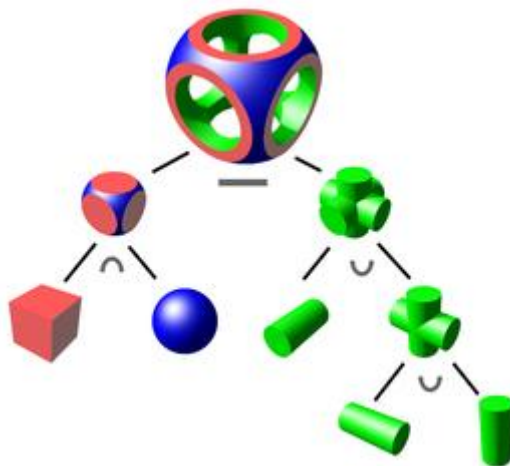
Στα λογισμικά CAD 2 Διαστάσεων, γνωστότερος εκπρόσωπος των οποίων είναι το γνωστό AutoCAD της Autodesk, επιτελείται με ευέλικτο ηλεκτρονικό τρόπο η κλασική τυποποιημένη μέθοδος σχεδίασης (π.χ. όψεις, τομές κλπ.). Αυτό δίνει στους σχεδιαστές το πλεονέκτημα της ταχείας σχεδίασης, την ευελιξία των εύκολων και γρήγορων αλλαγών, την αποδοτικότητα της ομαδοποίησης σύνθετων επαναλαμβανόμενων μορφών, την ευκολία της ανταλλαγής κατασκευαστικών σχεδίων και τεχνικών δεδομένων μέσω δικτύων και του Διαδικτύου. Τα 2D CAD συστήματα χαρακτήρισαν την εποχή τους μετά την δεκαετία του 1980 και άλλαξαν καίρια το σχεδιαστικό περιβάλλον, στην αρχιτεκτονική, τη μηχανολογία και άλλες τεχνικές επιστήμες.

Η πραγματική επανάσταση όμως για το ΜΣ συντελέστηκε με την διάδοση και εδραίωση στο ευρύ τεχνικό περιβάλλον των 3D CAD/Solid & Surface Modeling λογισμικών εργαλείων, [Toriya & Chiokura, 2012], που αν και πρωτοεμφανίστηκαν από τη δεκαετία του 1960, για τις δύο επόμενες δεκαετίες είχαν βρει κάποια εφαρμογή μόνο σε μεγάλους οργανισμούς και εταιρίες, κυρίως της αυτοκινητοβιομηχανίας και της αεροναυπηγικής. Ο λόγος για αυτό ήταν ο πολύ σοβαρός και αποκλειστικός υπολογιστικός εξοπλισμός μεγάλων κατασκευαστών (π.χ.

IBM) που απαιτείτο για αυτά και που συνήθως αποτελούσε αναπόσπαστο κομμάτι των λογισμικών 3D CAD σχεδίασης, σε ένα ζεύγος τύπου «θέση εργασίας – ηλεκτρονικός υπολογιστής». Ο ίδιος δε ο προγραμματισμός τους σε επίπεδο γλώσσας – κώδικα ήταν αλληλένδετος και προσαρμοσμένος στον συνεργαζόμενο Η – Υ.

Όλα αυτά άλλαξαν με τον προγραμματισμό τελικά των 3D CAD λογισμικών σε γλώσσες ανοικτής αρχιτεκτονικής (π.χ. C, C++) και τη μεταπήδησή τους σε ανάλογους υπολογιστές και λειτουργικές πλατφόρμες που είχαν στο μεταξύ εξελιχθεί, όπως το UNIX. Η απόκτηση μιας άδειας εργασίας 3D CAD και μόνο αρκούσε για να εγκατασταθεί και λειτουργήσει το λογισμικό σε κάποιο συμβατό Η – Υ με Λ/Σ UNIX. Όταν δε περί τα τέλη της δεκαετίας του 1990 έως αρχές δεκαετίας 2000, οι προσωπικοί υπολογιστές (Personal Computers, PCs) με MS Windows, έφθασαν ή και ξεπέρασαν σε υπολογιστική ισχύ και επιδόσεις τα συστήματα Unix, η φυσιολογική «μετανάστευση» των λογισμικών 3D CAD στο περιβάλλον αυτό εκτόξευσε τη διάδοσή τους σε εκατομμύρια παγκόσμιους χρήστες διαφορετικών ηλικιών και τεχνικού υποβάθρου για τις ποικίλες ανάγκες τους (π.χ. φοιτητές, πανεπιστημιακοί, μηχανουργοί, μηχανικοί) που μπορούσαν πλέον στον καθημερινό τους υπολογιστή να διαθέτουν λογισμικό 3D CAD.

Ο πυρήνας πίσω από την ιδέα των CAD τριών διαστάσεων, σε πλήρη αντιδιαστολή με τη συμβατική σχεδίαση και τα CAD 2 Διαστάσεων, είναι η δημιουργία ενός ψηφιακού αντικειμένου εξαρχής σε τρισδιάστατη υπόσταση με την έννοια ενός ενιαίου όγκου, δομημένου με χρήση βασικών στερεών (Primitive Solids) και πράξεων λογικής άλγεβρας (Boolean Algebra) για την ιεραρχική σύνθεση μορφολογικών δομικών στοιχείων (Design form features) μεταξύ τους (Constructive Solid Geometry, CSG) (Σχήμα 1.8.1.1).



Σχήμα 1.8.1.1: Δένδρο σύνθεσης 3D CAD αντικειμένου με CGS

Συνδυασμοί τέτοιων ψηφιακών αντικειμένων με άλλα και με τυποποιημένα αντικείμενα και στοιχεία μηχανών από ηλεκτρονικές βιβλιοθήκες, κατάλληλη εφαρμογή μεταξύ τους σχέσεων, δεσμών και περιορισμών, επέτρεψε την πλήρη αναπαράσταση σε 3 Διαστάσεις Σύνθετων Συναρμολογημάτων (Assemblies), Κινηματικών Μηχανισμών, ακόμα και ολόκληρων προϊόντων (Αυτοκίνητα, αεροπλάνα) αποτελούμενων από χιλιάδες μεμονωμένα εξαρτήματα, σε αξιοπρεπή επίπεδα αντίληψης τουλάχιστον της μορφής και της βασικής γεωμετρίας τους.

Η σταδιακή συμπλήρωση των λογισμικών CAD 3D και με νεότερους πυρήνες μοντελοποίησης (π.χ. B-Rep, Parasolid), καθώς και με τυποποιημένα ουδέτερα

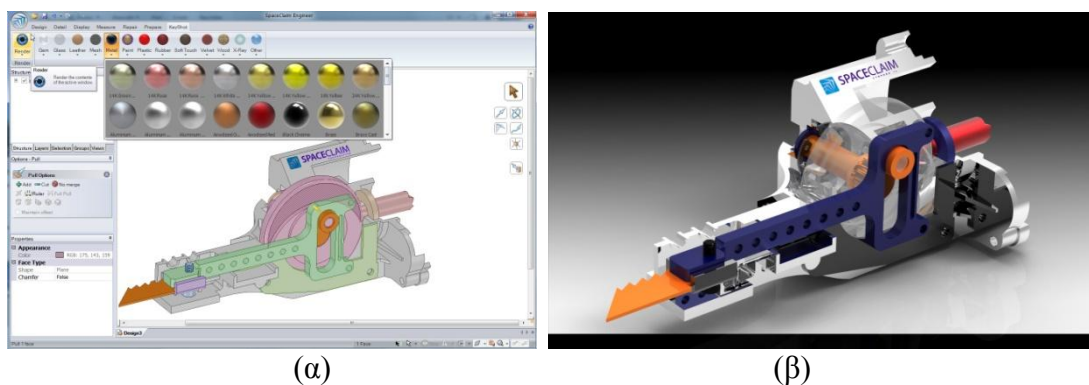
πρωτόκολλα ανταλλαγής δεδομένων όπως τα IGES, [Nagel et al., 1980; Smith et al., 1983; Reed et al., 1990], και STEP, [Anderl & Trippner, 2000; ISO 10303, 2002], έκανε εφικτή την επέκτασή τους και σε αυτό που αναφέρθηκε παραπάνω ως CAx, τη χρήση τους δηλαδή για ανάλυση, προετοιμασία παραγωγής κλπ., είτε στο ίδιο το περιβάλλον του λογισμικού 3D CAD είτε σε άλλο αυτόνομο λογισμικό (π.χ. ANSYS).

Στο ίδιο το περιβάλλον των 3D CAD λογισμικών σχεδιασμού και σχεδίασης συνηθίζεται στα αντικείμενα και στα ξεχωριστά μορφολογικά τους στοιχεία να αποδίδεται χρώμα, για να μπορεί ο χρήστης να τα χειρίζεται και αντιλαμβάνεται ευκολότερα. Πέραν αυτού, για τα 3D CAD μοντέλα όπως λέγονται, με τη σταδιακή πρόοδο των γραφικών των υπολογιστών (Computer Graphics), υπάρχει εγγενώς σε πολλά 3D CAD, ή εξωτερικά σε αυτόνομα εξειδικευμένα λογισμικά, και η δυνατότητα της φωτορεαλιστικής τους αναπαράστασης (Rendered View/Representation).

Σε μια τυπική φωτορεαλιστική αναπαράσταση για όλα τα αντικείμενα έχουν καθορισθεί υλικά με συγκεκριμένη υφή (texture), είδη και θέσεις πηγών φωτισμού στο χώρο, χρώμα και είδος του φόντου/σκηνικού (background) και αναπαράγονται όλες οι προκύπτουσες σκιάσεις, με στόχο το ρεαλιστικότερο δυνατό αποτέλεσμα για το θεατή.

Ο χρήστης συνεπώς αποκτά μια σχετική αντίληψη της πραγματικής εικόνας των αντικειμένων σε ένα υποτιθέμενο περιβάλλον, από τα ψηφιακά τους είδωλα.

Είναι μια μορφή «αναλυτικού – ψηφιακού» πρωτοτύπου όπως αυτό ορίστηκε νωρίτερα σε προηγούμενη παράγραφο. Προετοιμασία και αποτέλεσμα φωτοσκιασμένης αναπαράστασης προϊόντος δείχνει το Σχήμα 1.8.1.2.



Σχήμα 1.8.1.2: Προετοιμασία (α) και αποτέλεσμα (β) φωτοσκιασμένης αναπαράστασης

Πρέπει να τονισθεί ότι ενώ η δημιουργία 3D CAD μοντέλων είναι σχετικά εύκολη για έναν επαρκώς κατάρτιστη τεχνικό χρήστη και για απλές γεωμετρίες, η δημιουργία πειστικών φωτορεαλιστικών απεικονίσεων μπορεί να αποδειχθεί, δύσκολη και χρονοβόρα και να απαιτεί ειδικές γνώσεις, εκπαίδευση και δεξιότητες. Η δε χρήση λογισμικού φωτορεαλιστικών απεικονίσεων που δεν περιλαμβάνεται πάντοτε στα βασικά μέρη ενός λογισμικού 3D CAD, συνεπάγεται μια υπολογίσιμη επιπλέον δαπάνη, ειδικά στην περίπτωση επιλογής εξειδικευμένου για αυτό το σκοπό αυτόνομου λογισμικού.

Το Φωτορεαλιστικό 3D CAD Μοντέλο ενός εξαρτήματος ή προϊόντος αντιμετωπίζει το χρήστη ως παρατηρητή και μάλιστα από συγκεκριμένη, στατική συνήθως όψη (stationary viewpoint).

Προέκυψε λοιπόν φυσιολογικά η ανάγκη τα 3D CAD μοντέλα να μπορούν επιπλέον να αξιοποιούνται διαδραστικά και δυναμικά από έναν ή περισσότερους χρήστες, σε πραγματικό χρόνο.

Αυτό είναι το ουσιαστικό αντικείμενο, ο ορισμός της εικονικής πραγματικότητας (ΕΠ, Virtual Reality, VR), ως ένα τρισδιάστατο περιβάλλον από Η – Υ, που είναι διαισθητικό, με άμεσο χειρισμό και φυσική διαδραστικότητα με το χρήστη, με εμπύθιση (immersion) του τελευταίου σε αυτό και συμμετοχή του στα δρώμενα σε πραγματικό χρόνο (real time), [Gomes De Sá, 1999; Gutierrez et al., 2008].

Η ΕΠ, μετά από σχεδόν δύο δεκαετίες εξέλιξης, θεωρείται ξεχωριστός και μεγάλος κλάδος έρευνας και βρίσκει εφαρμογές σε εκπαίδευση, αρχιτεκτονική, αρχαιολογία, ιατρική, στρατιωτικούς σκοπούς, διασκέδαση, βιομηχανία θεάματος, παιχνίδια κλπ.

Με τα γραφικά υπολογιστών και τα 3D CAD μοντέλα η τεχνολογία της ΕΠ μεταφέρεται και στο ΜΣ για τη δημιουργία Εικονικών Πρωτοτύπων (Virtual Prototypes, VP), δηλαδή τρισδιάστατων διαδραστικών φωτορεαλιστικών απεικονίσεων εξαρτημάτων ή και προϊόντων σε ψηφιακό περιβάλλον, τα οποία ο χρήστης θα μπορεί να χειρισθεί, κινήσει, μεταφέρει, συναρμολογήσει σε πραγματικό χρόνο. Αυτά συχνά αναφέρονται και ως Ψηφιακές Μακέτες (Digital Mock-ups, DMUs), αν και ο όρος αυτός απαντάται και με άλλες εκδοχές του.

Χαρακτηριστικές εφαρμογές ΕΠ, VP και DMU για τη μηχανολογία και το ΜΣ αποτελούν [Thalmann, 1999]:

- Απομακρυσμένη εργασία και χειρισμοί για επικίνδυνο περιβάλλον (ραδιενεργό, εκρηκτικά, τοξικά κλπ.)
- Τρισδιάστατη γραφική προβολή για καλύτερη κατανόηση αναλυτικών και επιστημονικών δεδομένων, όπως ροές, τάσεις, παραμορφώσεις σε αντικείμενα – προϊόντα.
- Μελέτη, καταγραφή και βελτιστοποίηση αξόνων, ιεραρχίας, χώρου και χρόνου για συναρμολόγηση και αποσυναρμολόγηση προϊόντων.
- Καταγραφή τροχιών (trajectories) από κινήσεις του χρήστη – χειριστή ενός προϊόντος ή μηχανήματος, μελέτη και βελτιστοποίηση εργονομίας γενικά.
- Εκπαίδευση στο χειρισμό, τη συντήρηση, τη συναρμολόγηση ή την αποσυναρμολόγηση χειριστών, τεχνικών και παραγωγικού δυναμικού για οχήματα (αεροπλάνα, αυτοκίνητα) και για προϊόντα.

Κάποιες απαραίτητες βασικές έννοιες και χαρακτηριστικά της ΕΠ και των VP που πρέπει να αναφερθούν είναι:

- Η στερεοσκοπική απεικόνιση (Stereoscopic viewing): Για να είναι το εικονικό περιβάλλον πειστικό και να δημιουργεί στο χρήστη πραγματική αίσθηση εμπύθισης, είναι απαραίτητο τα προβαλλόμενα αντικείμενα να φαίνονται τρισδιάστατα. Αυτό στις εφαρμογές ΕΠ επιτυγχάνεται με «κλωβούς» προβολής τύπου CAVE [Ihren & Frisch., 1999; Thalmann, 1999; Ohno & Kageyama, 2010] σε ποικίλες μορφές και σχήματα, με οθόνες και προτζέκτορες τρισδιάστατης προβολής διαφορετικών για κάθε μάτι συχνοτήτων και πολώσεων ενεργητικού (active) ή παθητικού (passive) τύπου σε συνδυασμό με ειδικά γυαλιά, και με φορούμενα (wearable) στο κεφάλι ατομικά συστήματα στερεοσκοπικής προβολής (Head Mounted Displays, HMDs). Παραδείγματα των παραπάνω τύπων στο Σχήμα 1.8.1.3



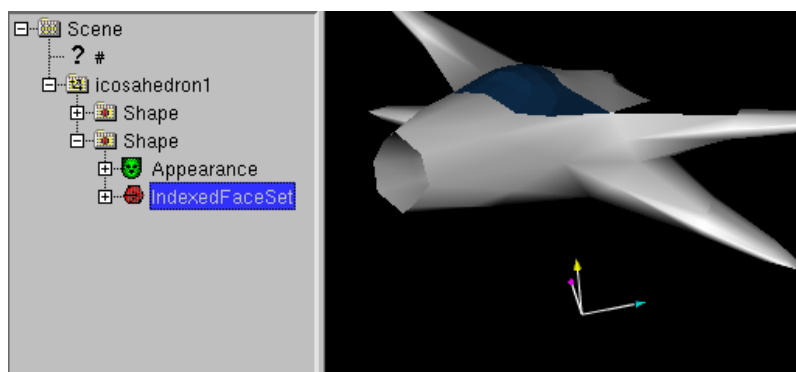
Σχήμα 1.8.1.3: Συσκευές Στερεοσκοπικής Προβολής ΕΠ

- Ο απτικός χειρισμός, αίσθηση και ανάδραση (Tactile Handling, Haptic Sense & Feedback): Η πειστική διεπαφή και διαδραστικότητα με ένα άυλο εικονικό αντικείμενο ή πρωτότυπο, μπορεί να επιτευχθεί μόνο με τη χρήση κατάλληλων συσκευών αλληλεπίδρασης και χειρισμού. Το αποτέλεσμα είναι αρτιότερο όταν οι συσκευές αυτές είναι ικανές να παράγουν επιπλέον και δυνάμεις, δονήσεις, κραδασμούς κλπ. προς τον χρήστη, ενισχύοντας την αίσθηση εμπύθισης του. Τέτοια αντικείμενα αποτελούν ραβδιά (wands) και ποντίκια (mouse) 3 διαστάσεων, γάντια ΕΠ κλπ. Ορισμένα δεικνύονται στο Σχήμα 1.8.1.4



Σχήμα 1.8.1.4: Συσκευές Απτικού χειρισμού και ανάδρασης ΕΠ

- Ο δυναμικός εντοπισμός (tracking) του χρήστη – χρηστών: Σε μια απλή φωτορεαλιστική απεικόνιση, το αποτέλεσμα είναι στατικό, σαν μια καλής ποιότητας φωτογραφία. Εξ ορισμού του όμως, ένα VP σε περιβάλλον ΕΠ είναι δυναμικό. Αν λοιπόν ο χειριστής κινείται στο χώρο, ακόμα περισσότερο αν υπάρχουν περισσότεροι από ένας, πρέπει να προσλαμβάνει, -ουν το εικονικό αντικείμενο, από την οπτική γωνία της θέσης που βρίσκεται ο καθένας. Για την προετοιμασία δε της αναπαράστασης αυτής και για την καλύτερη ακρίβεια παραμέτρων αλληλεπίδρασης το υπολογιστικό σύστημα του περιβάλλοντος ΕΠ, πρέπει να μπορεί να εντοπίσει τη θέση του καθενός. Αυτό επιτυγχάνεται με συσκευές και συστήματα εντοπισμού (tracking devices & systems) [Meyer et al., 1992; Thalmann, 1999]. Γενικά κατηγοριοποιούνται σε οπτικά, αδρανειακά και μαγνητικά και συχνά ενσωματώνονται είτε σε HMD ατομικής προβολής (Βλ. Σχήμα 1.8.1.4), είτε στις συσκευές αλληλεπίδρασης.
- Πρωτόκολλα Επικοινωνίας με συστήματα ΕΠ: Τα πρωτογενή αρχεία αποθήκευσης των σχεδιαζόμενων αντικειμένων στα συστήματα 3D CAD, εκτός του ότι διαφέρουν από λογισμικό σε λογισμικό, περιέχουν και ολόκληρη την τεχνική πληροφορία της δημιουργίας τους, του υλικού τους, παραλλαγές τους, σημειώσεις κλπ. Αυτά είναι περιττά χαρακτηριστικά για την 3D αναπαράσταση των αντικειμένων, που πρέπει να γίνεται σε πραγματικό χρόνο. Για τις εφαρμογές λοιπόν ΕΠ, αναπτύχθηκαν ήδη από τη δεκαετία του 1990, τμηματικές γεωμετρικές αναπαραστάσεις του 3D όγκου των αντικειμένων, αρκετά παρόμοιες με τα πλέγματα για ανάλυση Πεπερασμένων Στοιχείων. Βασίζονταν σε διασυνδεδεμένα μεταξύ τους πολύγωνα (συνήθως τρίγωνα), με χαρακτηριστικά χρώματος και υφής για όλα, ήχων, φωτισμών και διαδραστικής αντίδρασης σε ενέργειες του χρήστη για κάποια. Το πιο γνωστό πρωτόκολλο επικοινωνίας από αυτά, που καθιερώθηκε για εφαρμογές ΕΠ είναι το VRML (Virtual reality Modeling Language), που μάλιστα από το 1997 αποτελεί πρότυπο του ISO (ISO/IEC 14772-1:1997), [ISO/IEC, 1997 & 2002]. Σήμερα το VRML έχει μετεξελιχθεί στο πρότυπο X3D που επίσης έχει γίνει πρότυπο του ISO (ISO/IEC 19775-1). Τυπικό VRML αρχείο στο Σχήμα 1.8.1.5.



Σχήμα 1.8.1.5: Τυπικό VRML αρχείο

Όλα τα σύγχρονα λογισμικά δημιουργίας περιβάλλοντος ΕΠ χρησιμοποιούν αρχεία και βιβλιοθήκες VRML και όλα σχεδόν τα 3D CAD λογισμικά εξάγουν αρχεία του συγκεκριμένου τύπου.

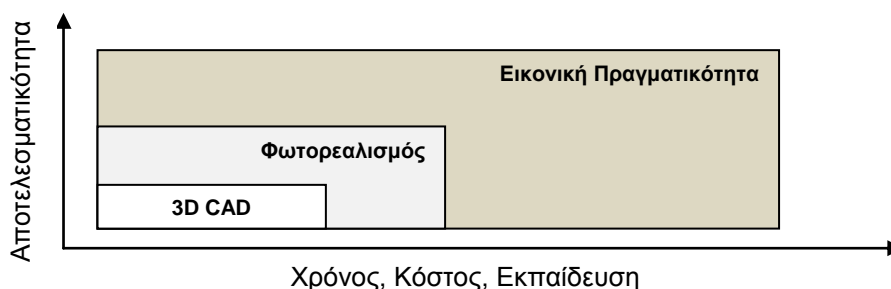
- Επίπεδο ακρίβειας (Level of Detail, LOD), υπολογιστική ισχύς, συστοιχίες υπολογιστών (computer clusters): Η δημιουργία δυναμικού ψηφιακού πρωτοτύπου μιας πολυσύνθετης κατασκευής, που θα πρέπει μάλιστα να αλληλεπιδρά με πολλούς χρήστες σε πραγματικό χρόνο, δημιουργεί την ανάγκη τεράστιας υπολογιστικής ισχύος, πολλαπλασίως μεγαλύτερης από αυτή της στατικής φωτορεαλιστικής απεικόνισης, που ακόμα και σήμερα δεν είναι εύκολο να αποδώσουν μεμονωμένοι Η – Υ.

Για την αντιμετώπιση του θέματος αυτού σε κάθε εφαρμογή ΕΠ, εισάγονται δύο έννοιες. Το Επίπεδο Ακρίβειας (Level of Detail, LOD) της αναπαράστασης, όπου ανάλογα με την απόσταση θέωρησης και θέασης των αντικειμένων απλοποιούνται και απομειώνονται κατάλληλα τα ταυτόχρονα διαχειριζόμενα VRML αρχεία στο ελάχιστο απαραίτητο επίπεδο ακρίβειας της οπτικής αναπαράστασης, προς όφελος της απαιτούμενης υπολογιστικής ισχύος. Η άλλη έννοια είναι αυτή των συστοιχιών (clusters) Η – Υ. Σε μια συστοιχία Η – Υ που συνεργάζονται σε εφαρμογή ΕΠ, οι απαιτούμενοι υπολογισμοί επιμερίζονται σε περισσότερους διασυνδεδεμένους Η – Υ που συντονίζονται από έναν κεντρικό (Σχήμα 1.8.1.6). Η κατάλληλη επιλογή LOD και η διαθεσιμότητα υψηλής ποιότητας συστοιχιών Η – Υ, κάνει σήμερα δυνατή την επιτυχή εφαρμογή ΕΠ και VP σε σοβαρού επιπέδου μηχανολογικές εφαρμογές [Angster S., 1996]



Σχήμα 1.8.1.6: Συστοιχία Η – Υ για ΕΠ

Από όλα τα παραπάνω καθίσταται σαφές ότι το τρίπτυχο 3D CAD μοντελοποιητές – Λογισμικά Φωτορεαλισμού – Εικονική πραγματικότητα, αποτελούν το κάθε ένα επιπροσθέτως του προηγούμενου, ικανές εκδοχές «ψηφιακής πρωτοτυποποίησης» για το ΜΣ, ειδικά σε ελέγχους μορφής και γεωμετρίας, αλλά κατά περιπτώσεις και σε ελέγχους λειτουργίας, προϊόντων και κατασκευών. Ο βαθμός αποτελεσματικότητας καθενός σε σχέση με τον απαιτούμενο χρόνο, κόστος εγκατάστασης, εκπαίδευσης και υλοποίησης εφαρμογών μπορεί να παρασταθεί γραφικά στο Σχήμα 1.8.1.7.



Σχήμα 1.8.1.7: Κλιμάκωση χρόνου, κόστους, εκπαίδευσης, αποτελεσματικότητας εναλλακτικών ψηφιακής πρωτοτυποποίησης

### 1.8.2 CAE: Οι Προσομοιώσεις ως πρωτότυπα

Αναφέρθηκε και παραπάνω ότι στο πλαίσιο του ΟΜΣ οι μεθοδολογίες Computer Aided Engineering (CAE), μέρος και αυτές των ΤΣΧ, θεωρούνται επίσης ως Σύγχρονες Εναλλακτικές Πρωτοτυποποίησης, εντασσόμενες μάλιστα στην κατηγορία των ψηφιακών – αναλυτικών πρωτοτύπων. Αυτό γιατί με κατάλληλη αξιοποίησή τους, προσφέρουν σημαντικό όγκο υψηλής ποιότητας και πιστότητας πληροφορίας σχετικά με παραμέτρους και χαρακτηριστικά υπό σχεδιασμό και ανάπτυξη εξαρτημάτων και προϊόντων που άπτονται περισσότερο της ίδιας τους της λειτουργίας, της ανταπόκρισης τους σε εξωτερικά επιβαλλόμενες συνθήκες, ακόμα και παραμέτρων της άρτιας χωρίς ελαττώματα παραγωγής τους.

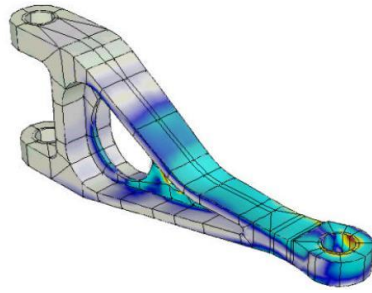
Οι κύριες δράσεις των CAE για το ΜΣ εξαρτημάτων, προϊόντων και εργαλείων παραγωγής όσον αφορά την ανάλυση περιλαμβάνουν την προσομοίωση (Simulation), την επαλήθευση (Validation) και τη βελτιστοποίηση (Optimization).

Στα πλαίσια των παραπάνω κεντρικών δράσεων για την ανάλυση με εργαλεία CAE εντάσσονται οι ακόλουθες διεργασίες:

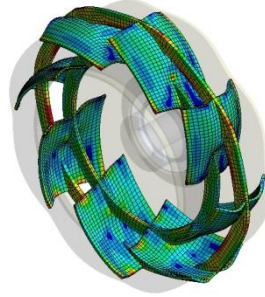
- Ανάλυση τάσεων – παραμορφώσεων αντικειμένων και συναρμολογημένων συνόλων σε στατικές και δυναμικές καταπονήσεις
- Δυναμική ανάλυση εξαρτημάτων και κατασκευών.
- Μελέτη και Ανάλυση Συμπεριφοράς Εξαρτημάτων και συνόλων σε μεταβατικά στάδια, σε υπερελαστικές και πλαστικές περιοχές των υλικών τους.
- Ανάλυση συμπεριφοράς κατασκευών σε σύγκρουση (Crash Test Analysis οχημάτων) και πτώση (Drop Test Analysis)
- Ανάλυση Μετάδοσης – Μεταφοράς Θερμότητας και Ψήξης (Thermal transfer & Cooling)
- Ανάλυση ροής συμπιεστών και ασυμπίεστων ρευστών γύρω από αντικείμενα και κατασκευές με μεθόδους Υπολογιστικής Ρευστομηχανικής (Computational Fluid Dynamics, CFD)
- Ανάλυση ροής, πλήρωσης, ψύξης και στερεοποίησης μητρών και καλουπιών για παραγωγικές μεθόδους χύτευσης μεταλλικών και πλαστικών υλικών.
- Διαστασιολογική Βελτιστοποίηση μορφής εξαρτημάτων (Dimensional Optimization)
- Ανάλυση δημιουργίας, διάδοσης, αποτροπής θορύβου (Noise).
- Ανάλυση δημιουργίας και διάδοσης διάβρωσης (Corrosion)
- Ανάλυση αστοχιών από κόπωση (Fatigue)
- Ανάλυση δημιουργίας και διάδοσης ρωγμών (Cracks).

Χαρακτηριστικά παραδείγματα εφαρμογών CAE από τις παραπάνω διεργασίες παρίστανται στο Σχήμα 1.8.2.1





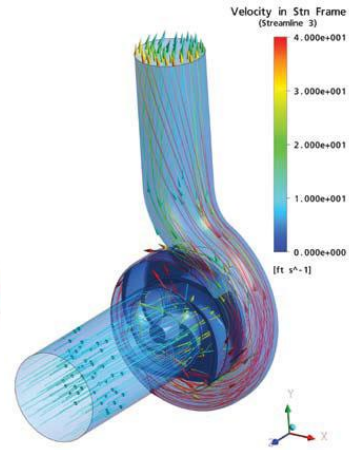
(α) Στατική



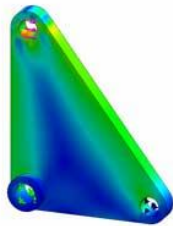
(β) Δυναμική



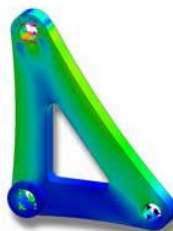
(γ) Σύγκρουσης



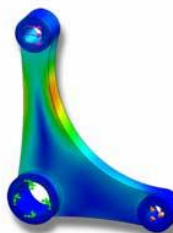
(δ) Ροής



Mass = 13 g

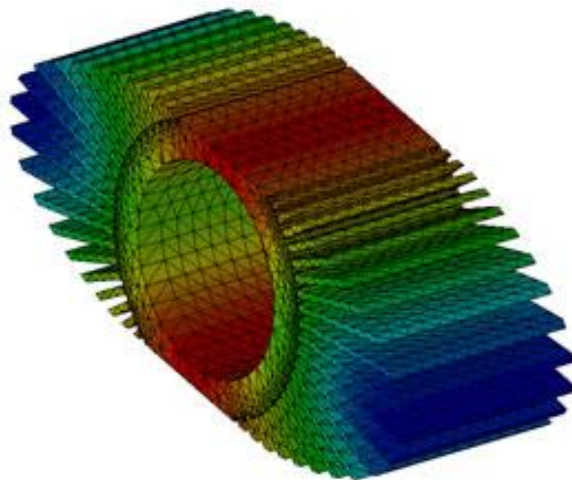


Mass = 9.7 g



Mass = 9 g

(ε) Βελτιστοποίησης



(στ) Ψύξης

Σχήμα 1.8.2.1: Περιπτώσεις εφαρμογών ανάλυσης CAE

Τα παραπάνω σήμερα υλοποιούνται με λογισμικά που εφαρμόζουν σε περιβάλλον H-Y τις αρχές των μεθόδων των Πεπερασμένων Στοιχείων (Finite Elements), των Πεπερασμένων Διαφορών, των Συνοριακών Στοιχείων (Boundary Elements) και της Υπολογιστικής Ρευστομηχανικής (Computational Fluid Dynamics), που από μόνα τους αποτελούν μεγάλο και ξεχωριστό επιστημονικό κλάδο, που βασίζεται στην Επίλυση Σύνθετων Συστημάτων Διαφορικών κατά βάση εξισώσεων με Αριθμητικές Μεθόδους (π.χ. Runge – Kutta, κ.α.). Δεν είναι σκόπιμο στα πλαίσια της παρούσας, να εμβαθύνουμε περισσότερο στις παραπάνω επιστημονικές μεθόδους που αναπτύχθηκαν ραγδαία μετά τη δεκαετία του 1960 και καλύπτονται από εκτεταμένη βιβλιογραφία [Τσαμασφύρος & Θεοτοκόγλου, 1994; Κανάραχος & Προβατίδης, 2000; Yoo et al., 2007; Jahangirian et al., 2010; Cho et al., 2011; Nosenzo et al., 2013].

Είναι χρησιμότερο να γραφτεί ότι σε κάθε τέτοια ανάλυση απαιτείται η ύπαρξη τρισδιάστατης συνεχούς γεωμετρίας του υπό μελέτη και ανάλυση αντικειμένου (που θα προσεγγισθεί από απλοποιημένα στοιχεία), προερχόμενη συνήθως από 3D CAD λογισμικό μοντελοποίησης, η απόδοση στη γεωμετρία αυτή υλικού συγκεκριμένων μηχανικών, θερμικών και άλλων χαρακτηριστικών και η ακριβής επιβολή των εξωτερικών περιορισμών και συνθηκών.

Ανεξαρτήτως της ακολουθούμενης για κάθε περίπτωση μεθόδου, γενικά αναγνωρίζονται τα παρακάτω βασικά βήματα (Σχήμα 1.8.2.2):

- Προεπεξεργασία: Ορισμός του μοντέλου και των εξωτερικών περιβαλλοντικών συνθηκών που θα του επιβληθούν
- Αναλυτική Επίλυση: Η αλγοριθμική – υπολογιστική επίλυση των εξισώσεων, συνήθως σε υψηλής ισχύος H – Y (Solver).
- Μετεπεξεργασία: Εξαγωγή και παρουσίαση των αποτελεσμάτων με εργαλεία γραφικής αναπαράστασης



Σχήμα 1.8.2.2: Βασικά Βήματα Ανάλυσης CAE

Τα βασικά αυτά βήματα συχνά επαναλαμβάνονται έως ότου επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα, ή επιβεβαιωθεί η υψηλότερη δυνατή πιστότητα του με τις συνθήκες και τους περιορισμούς που έχουν τεθεί.

Σε επίπεδο εμπορικού λογισμικού CAE, τα σχετικά λογισμικά απαντώνται είτε ως αυτόνομα εμπορικά προϊόντα, είτε ως επιμέρους σκέλη (modules) 3D CAD προγραμμάτων, που για την περίπτωση πλέον καλούνται 3D CAD/CAE. Τα τελευταία βέβαια χρόνια τα συστήματα CAD, CAM, CAE, CAPP κλπ. έχουν πια σχεδόν ενοποιηθεί κάτω από την ευρύτερη ομπρέλα των πλατφορμών συνεργασίας (Collaborative Platforms) που περιγράφονται ως PDM – PLM και που όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω υλοποιούν στο σύγχρονο βιομηχανικό περιβάλλον της έννοια του ΟΜΣ.

Κάποια τυπικά και διαδεδομένα διεθνώς εμπορικά λογισμικά για CAE, FEA, CFD, παρουσιάζονται αλφαβητικά στον Πίνακα 1.8.2.1.

<u>Abaqus</u> : Γαλλο – Αμερικανικό λογισμικό της οικογένειας <u>SIMULIA</u> , του οίκου <u>Dassault Systemes</u> .
<u>ADINA</u> : Λογισμικό Πεπερασμένων Στοιχείων για εφαρμογές δομικές, ρευστών, μετάδοσης θερμότητας, ηλεκτρομαγνητισμού κλπ.
<u>Advance Design</u> : BIM λογισμικό δομικής ανάλυσης FEM, που περιλαμβάνει διεθνείς Ευρωκώδικες σχεδιασμού, της <u>GRAITEC</u> .
<u>Simulation Multiphysics</u> (πρωην <u>ALGOR</u> ): Αμερικανικό λογισμικό από την <u>Autodesk</u>
<u>ANSYS</u> : Αμερικανικό λογισμικό FEA από τα πρωτοπόρα του είδους
<u>COMSOL Multiphysics</u> (πρώην <u>Femlab</u> ) Λογισμικό για πολλές πλατφόρμες Λειτουργικών Συστημάτων με ισχυρή διασυνδεσιμότητα με το <u>Matlab</u> .
<u>CosmosWorks</u> : Το module πεπερασμένων στοιχείων του πολύ διαδεδομένου <u>Solidworks</u> της 3Ds
<u>Femap</u> , <u>Siemens PLM Software</u> : Προεπεξεργαστής και μετεπεξεργαστής FEA για τα προϊόντα CAD της <u>Siemens</u>
<u>FEMtools</u> , της <u>Dynamic Design Solutions</u> : Πλήρες πακέτο εργαλείων στατικής και δυναμικής ανάλυσης και επαλήθευσης μέσω FEM. Περιλαμβάνει χαρακτηριστικά δομικής βελτιστοποίησης και ενσωμάτωσης πειραματικών δεδομένων αναφοράς.
<u>LS-DYNA</u> , της <u>LSTC – Livermore Software Technology Corporation</u> . Λογισμικό με ευρύτατη διάδοση στην αυτοκινητοβιομηχανία και την αεροδιαστημική βιομηχανία για ανάλυση και επίλυση σύνθετων προβλημάτων.
<u>Nastran</u> : Πρωτοπόρο και ευρέως διαδεδομένο λογισμικό FEA της <u>MSC Software</u>

Πίνακας 1.8.2.1: Σύγχρονα Εμπορικά Λογισμικά CAE

Όπως ισχύει και για τον εξοπλισμό και τα λογισμικά ΕΠ, έτσι και τα λογισμικά CAE πρέπει να αναφερθεί ότι αποτελούν σημαντικού κόστους επένδυση (της τάξεως των δεκάδων χιλιάδων ΕΥΡΩ) και απαιτούν υψηλής τεχνικής εκπαίδευσης και κατάρτισης προσωπικό για την αποτελεσματική εξαγωγή ορθών και αξιοποιήσιμων αποτελεσμάτων. Επίσης σημειώνεται ότι τα αποτελέσματα μιας ανάλυσης CAE, καθώς είναι σε κάθε περίπτωση προσεγγιστικά, είναι αδύνατον, ειδικά για πολύ σύνθετα προβλήματα και κατασκευές να είναι 100% ταυτόσημα με τα πραγματικά.

### 1.8.3 CNC Πρωτότυπα με HSC και Desktop Milling

Στις παραδοσιακές και συμβατικές μεθόδους πρωτοτυποποίησης, ανασκοπήθηκε παραπάνω και η μηχανουργική κατεργασία αντικειμένων σε συμβατικές εργαλειομηχανές.

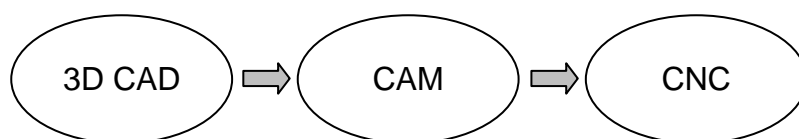
Στις σύγχρονες εναλλακτικές πρωτοτυποποίησης κατατάσσεται όμως και η κατασκευή φυσικών πρωτοτύπων αντικειμένων με μηχανουργική κατεργασία αφαίρεσης υλικού, κυριότερα με φρεζάρισμα (Milling), σε εργαλειομηχανές Αριθμητικού Ελέγχου από Η-Υ (Computer Numerical Control, CNC).

Είναι αυτονόητο ότι εφόσον όλες οι εργαλειομηχανές παράγουν πραγματικά αντικείμενα, έτσι και η συγκεκριμένη εναλλακτική θεωρείται πάντοτε ως ικανή για

δημιουργία φυσικών πρωτοτύπων αντικειμένων διαφόρων κατηγοριών (μορφής, γεωμετρικά, λειτουργικά), από ποικίλα μεταλλικά και μη υλικά, για εξαρτήματα αλλά και για πρωτότυπα εργαλεία παραγωγής.

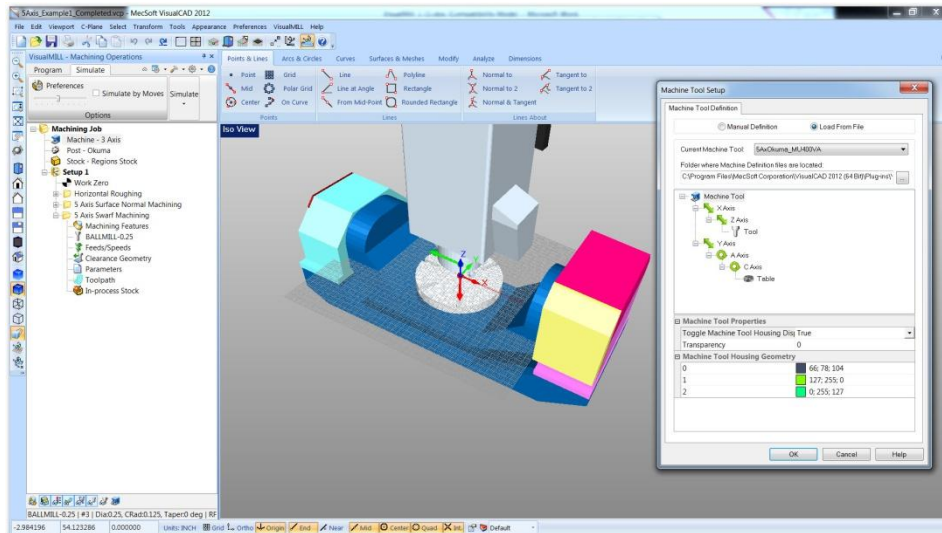
Η ανάπτυξη υπολογιστικών μεθόδων και λογισμικών εργαλείων υποστήριξης της κατασκευής και των κατεργασιών με ηλεκτρονικούς υπολογιστές (Computer Aided Manufacturing, CAM) και με αριθμητικό έλεγχο (CNC) και η ανάπτυξη και διάδοση συναφών CNC εργαλειομηχανών, έχει τις ρίζες της στη μεταπολεμική δεκαετία του 1950, όταν αναπτύχθηκαν και παρουσιάστηκαν οι πρώτες «αυτόματες» εργαλειομηχανές με αριθμητικό έλεγχο (NC) που προγραμματίζονταν μέσω διάτρητων καρτών. Η σταθερή πρόοδος των μικρο-υπολογιστών τα επόμενα χρόνια μετεξέλιξε σταδιακά τα συστήματα αυτά στις σημερινές πλήρως ελεγχόμενες από H-Y εργαλειομηχανές CNC (Τόρνους, φρέζες κλπ.) που διασυνδεδεμένες ακόμα και σε δίκτυα, τροφοδοτούνται άμεσα από κώδικες κοπής προετοιμασμένους σε λογισμικό CAM και υποστηρίζουν αξιόπιστα για τουλάχιστον τρεις δεκαετίες τη σύγχρονη κατασκευή και παραγωγή στα πλαίσια του ΟΜΣ. Η σύγχρονη βιβλιογραφία της Μηχανουργικής Τεχνολογίας, [Πετρόπουλος, 1995; Madison, 1996; Μπαλντούκας & Δημοσθένους, 2005; Groover, 2010; Overby, 2010] στην οποία ο αναγνώστης μπορεί να ανατρέξει, είναι πλούσια και καλύπτει σε μεγάλη έκταση όλο το φάσμα της εξέλιξης και της έρευνας στις CNC κατεργασίες και εργαλειομηχανές.

Για τις ανάγκες της παρούσας ΔΔ, σημειώνεται εδώ ότι η κατασκευή αντικειμένων με CNC εργαλειομηχανές, κατά τα σήμερα ισχύοντα, προϋποθέτει τόσο την πρότερη δημιουργία της τελικής γεωμετρίας σε λογισμικό μοντελοποίησης 3D CAD, όσο και την επεξεργασία και προετοιμασία όλων των παραμέτρων και του τελικού κώδικα κοπής (Φάσεις, επιλογή εργαλείων, ταχυτήτων, προώσεων, δρομολογίων κοπής κλπ.) σε περιβάλλον λογισμικού CAM, σε ένα κύκλο τριών βασικών σταδίων, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1.8.3.1



Σχήμα 1.8.3.1: Τα τρία βασικά στάδια για κατεργασία CNC

Εμπορικά, τα λογισμικά CAM, με παρόμοιο τρόπο με τα λογισμικά CAE, υπάρχουν και αυτά είτε αυτόνομα (π.χ. Delcam, Mastercam, EdgeCAM) τροφοδοτούμενα με ουδέτερα γεωμετρικά πρωτόκολλα (όπως IGES, STEP, Parasolid, STL, VRML) ή εφοδιασμένα με μεταφραστές (Translators) μορφών αποθήκευσης των πιο διαδεδομένων 3D CAD λογισμικών, είτε ως επεκτάσεις (extensions) και επιμέρους στοιχεία (modules) άλλων 3D CAD μοντελοποιητών (π.χ. SolidCAD για Solidworks, RhinoCAM για Rhinoceros) και ευρύτερων λογισμικών ΟΜΣ σε περιβάλλον PDM – PLM (π.χ. CATIA), (Σχήμα 1.8.3.2).



Σχήμα 1.8.3.2: Περιβάλλον λογισμικού CAD/CAM

Καθώς όμως οι εργαλειομηχανές CNC θεωρούνται κατά βάση παραγωγικός εξοπλισμός και η χρήση τους για κατασκευή πρωτοτύπων υποχρεωτικά – έστω και προσωρινά – αναστέλλει τον παραγωγικό τους χαρακτήρα, έμφαση στο επίπεδο πρωτοτυποποίησης δίνεται για αυτές από τη διεθνή βιβλιογραφία [ErdeI, 2003; Gebhardt, 2003; Mickelson, 2005] στην εφαρμογή κοπής / φρεζαρίσματος υψηλής ταχύτητας (High Speed Cutting/Milling, HSC/HSM) και στη χρήση CNC φρεζών και εξοπλισμού επιτραπέζιας κλίμακας (Desktop CNC Milling Machines).

- Κοπή / φρεζάρισμα υψηλής ταχύτητας (High Speed Cutting/Milling, HSC/HSM)  
 Η κατεργασία/κοπή και ο εξοπλισμός CNC υψηλής ταχύτητας διαφοροποιείται από τα συνήθη στα παρακάτω χαρακτηριστικά:
  - Υψηλή ταχύτητα περιστροφής του κοπτικού εργαλείου (από 30.000 έως 100.000 RPM, 5 έως 10 φορές δηλαδή μεγαλύτερη από τις συνήθειες)
  - Υψηλό ρυθμό δημιουργίας και μεταφοράς αποβλήτων κοπής – Καλύτερη απαγωγή θερμότητας
  - Υψηλής ταχύτητας προώσεις (Συνήθως άνω των 2 m/min)
  - Μικρά βάθη κοπής (5 με 10% της διαμέτρου του κοπτικού εργαλείου)
  - Μικρότερες δυνάμεις κοπής
  - Συνήθη εφαρμογή σε σύνθετες και λεπτές/λεπτότοιχες μορφές και γεωμετρίες
  - Ολοκλήρωση της κατεργασίας σε δραστικά συντομότερους χρόνους (έως και 90%)
  - Αποτέλεσμα χωρίς υποβάθμιση της αποδιδόμενης ακρίβειας και με βελτίωση της ποιότητας επιφανειών εν σχέση με τη συνήθη CNC κατεργασία.
  - Συνήθως γρηγορότερη φθορά του κοπτικού εργαλείου
  - Υψηλότερο κόστος εξοπλισμού σε σχέση με απλές CNC μηχανές

Η υιοθέτηση εξοπλισμού HSC/HSM για σκοπούς πρωτοτυποποίησης, εφόσον βέβαια η τελική γεωμετρία είναι εφικτή και κατασκευάσιμη από τη μηχανή, συντομεύει το χρόνο απεμπλοκής των CNC μηχανών από την αμιγώς παραγωγική διαδικασία, με συνολικά καλής ποιότητας και ακρίβειας τελικό αποτέλεσμα, σε χρόνους παραπλήσιους κάποιες φορές με μεθόδους ΤΚΠ. Απαιτεί όμως παράλληλα στη

διαδικασία της πρωτοτυποποίησης την εμπλοκή προσωπικού με εκπαίδευση και εμπειρία και σε CAM πέραν της 3D CAD μοντελοποίησης.

- Επιτραπέζιας Κλίμακας CNC φρέζες (Desktop CNC Milling Machines)

Είναι η συγγενέστερη με τις τεχνολογίες ΤΚΠ σύγχρονη εναλλακτική πρωτοτυποποίησης, τόσο σε επίπεδα κόστους κτήσης, όσο και μέγεθος, ακρίβειες, υλικά και δυνατότητες κατασκευαζομένων αντικειμένων, που όμως εκκινεί από τις Μηχανουργικές Κατεργασίες αφαίρεσης υλικού. Για αυτό και πολλές φορές καθ' υπέρβαση του ορισμού των ΤΚΠ (που θα δοθεί παρακάτω) κατατάσσεται από κάποιους συγγραφείς σε αυτές, [Gibson et al., 2009; Groover, 2010].

Πρόκειται για απλές, συνήθως 3 αξόνων εργαλειομηχανές, με τους κύριους άξονες τους οδηγούμενους από βηματικούς κινητήρες και διασύνδεση τους με Η-Υ μέσω ελεγκτή (Controller). Στις περισσότερες η κίνηση του ενός άξονα μπορεί να υποκατασταθεί και με περιστροφικό διαρέτη (optional rotational axis). Η περιστροφή του κοπτικού γίνεται με κινητήρες AC με ισχύ συνήθως έως 1KW και ρύθμιση στροφών με inverter. Υπάρχει επίσης δυνατότητα ενσωμάτωσης ψύξης του κοπτικού, συνήθως με ψεκασμό αέριων διαλυμάτων (mist cooling).

Τα κατεργαζόμενα από τις μηχανές αυτές υλικά περιλαμβάνουν ξύλα, πλαστικά, πολυμερή (Αφρώδη και σε μορφή σανίδων), μαλακά μέταλλα (χαλκός, μπρούτζος, αλουμίνιο) και για τις πιο ακριβές εκδοχές τους και κάποιους χάλυβες. Κάποιες μηχανές επίσης περιλαμβάνουν στοιχεία και δομικά μέρη προστασίας και ασφάλειας του χειριστή (π.χ. enclosures, interlocks).

Στις ακριβότερες μηχανές υπάρχει συχνά και η δυνατότητα μύλου/διάταξης αυτόματης αλλαγής κοπτικών εργαλείων.

Κοστίζουν από λίγες χιλιάδες ως δεκάδες χιλιάδων ΕΥΡΩ.

Οι κυριότερες εφαρμογές τους αφορούν:

- Κατασκευή πρωτοτύπων αντικειμένων, μητρών και ιδιοσυσκευών
- Εκπαίδευση σπουδαστών και τεχνικού προσωπικού σε χειρισμό και λειτουργία CNC εξοπλισμού.
- Δημιουργία αναγλύφων, σκαλισμάτων και χαρακτικής ( Engraving)
- Κοπή και επεξεργασία ελασμάτων και επιγραφών
- Κοπές φύλλων σε 2 διαστάσεις
- Εφαρμογές ερασιτεχνικού μοντελισμού

Τυπικοί κατασκευαστές οίκοι επιτραπέζιων CNC μηχανών είναι οι:

Roland, Techno-Isel, Emco, Boxford, CharlyRobot, Intelitek, Venture, Comagran κ.α.

Χαρακτηριστικές CNC φρέζες επιτραπέζιας κλίμακας απεικονίζονται στο Σχήμα 1.8.3.3.



Σχήμα 1.8.3.3: Επιτραπέζιας CNC φρέζες

#### **1.8.4 Πρωτότυπα ΤΚΠ & ΤΚΕ**

Αναπόσπαστο μέρος των ΤΣΧ και κατεξοχήν αντιπροσωπευτικές σύγχρονες εναλλακτικές για πρωτοτυποποίηση εξαρτημάτων, προϊόντων και κατασκευών, καθώς αναπτύχθηκαν από την αρχή για το σκοπό αυτό, αποτελούν η Ταχεία Κατασκευή Πρωτοτύπων – ΤΚΠ (Rapid Prototyping – RP) και η Ταχεία Κατασκευή Εργαλείων – ΤΚΕ (Rapid Tooling – RT). Οι ΤΚΠ και ΤΚΕ, ως βασικό ερευνητικό αντικείμενο για την παρούσα διατριβή, παρουσιάζονται και επισκοπούνται παρακάτω αναλυτικά σε ξεχωριστές παραγράφους.

## 1.9 Ταχεία Κατασκευή Πρωτοτύπων (TKΠ)

Στις αρχές της δεκαετίας του 1980 έκαναν για πρώτη φορά την εμφάνιση τους σε εργαστηριακό επίπεδο οι πρώτες διατάξεις Στερεολιθογραφίας (Stereolithography Apparatus, SLA), οι οποίες επιτελούσαν αυτοματοποιημένα κατασκευή φυσικού πρωτοτύπου, με διαδοχική διαστρωμάτωση τοπικά στερεοποιημένων με Laser επιπέδων φωτοπολυμεριζόμενης ρητίνης, [Jacobs, 1992]. Η κατασκευή σύνθετων αντικειμένων με τον τρόπο αυτό γινόταν σε κλάσμα του χρόνου και του κόστους που απαιτείτο από όλες τις ως τότε γνωστές συμβατικές μεθόδους κατασκευής πρωτοτύπων, που έχουν ήδη περιγραφεί παραπάνω. Το εν λόγω σύστημα κατοχυρώθηκε με ευρεσιτεχνία το 1986, [Hull, 1986] και το 1987 παρουσιάστηκε η πρώτη εμπορική SLA μηχανή (SLA-1) από τον νεοϊδρυθέντα τότε Αμερικανικό οίκο 3D Systems Inc., με πολύ υψηλό για την εποχή κόστος κτήσης (της τάξης των 200.000 U.S.\$). Με την SLA-1 κατασκευάζονταν φυσικά πρωτότυπα αντικειμένων με βάση 3Διάστατο CAD μοντέλο τους από H/Y. Μέχρι το 1992, τουλάχιστον πέντε ακόμα εναλλακτικές τεχνολογίες (SLS, SGC, SLS, FDM, LOM) με τον ίδιο σκοπό, όχι μόνο είχαν κατοχυρώσει τις δικές τους ευρεσιτεχνίες, αλλά είχαν βρει το δρόμο της εμπορικής αξιοποίησης τους έχοντας ήδη πουλήσει και εγκαταστήσει συστήματα. Ήταν η αρχή μιας νέας εποχής για τα πρωτότυπα στο ΜΣ. Έκτοτε και μέχρι σήμερα εμφανίστηκαν, κατοχυρώθηκαν και εξελίχθηκαν δεκάδες διαφορετικές τεχνολογίες αυτοματοποιημένης κατασκευής φυσικού πρωτοτύπου αντικειμένου, αρκετές από τις οποίες βιομηχανοποιήθηκαν, καθιερώθηκαν και εξειδικεύθηκαν στην εξυπηρέτηση συγκεκριμένων κλάδων και αγορών.

Για όλες αυτές τις τεχνολογίες έχει διεθνώς υιοθετηθεί ο όρος *Ταχεία Κατασκευή Πρωτοτύπων (TKΠ) – Rapid Prototyping (RP)*, ως ο ευρύτερα αποδεκτός και δόκιμος, ενώ βιβλιογραφικά και αλλού, [Jacobs, 1992; Hague & Reeves, 2000; Pham & Dimov, 2001; Gebhardt, 2003; Grimm, 2004; Gibson et al., 2009; Chua et al., 2010] συναντώνται και ως:

- RPT – Rapid Prototyping Technologies/Techniques
- AM – Additive/Automated Manufacturing
- LMT – Layer Manufacturing Technologies/Techniques
- SFF – Solid Freeform Fabrication
- FFF – Fast Freeform Fabrication
- GPP – Generative Production Process
- MIM – Material Ingress Manufacturing
- 3D Printing/3D Printers,

, τα δε τελευταία πέντε χρόνια, με μια μικρή εννοιολογική διαφοροποίηση που θα επεξηγηθεί και πιο κάτω, κάποιες χαρακτηρίζονται και ως

- RM – Rapid Manufacturing

Σε όλες τις τεχνολογίες TKΠ για την κατασκευή των αντικειμένων προαπαιτείται η ύπαρξη 3διάστατων γεωμετρικών δεδομένων τους σε H – Y.

Τα δεδομένα αυτά μπορούν να προέρχονται αμιγώς από 3D CAD σχεδίαση, από υπαρκτά αντικείμενα και μεθόδους Αντίστροφου Σχεδιασμού (ΑΣ, Reverse Engineering, RE), 3Δ αποτύπωσης και ψηφιοποίησης (3D Digitizing) με μηχανές CMM, 3Δ Σαρωτές Laser (3D Laser Scanners), από αξονικούς και μαγνητικούς τομογράφους (CT-MRI) και γενικά από κάθε πηγή που μπορεί να δημιουργήσει και εξάγει 3Δ πληροφορία σε μορφή ψηφιακού στερεού μοντέλου.



### 1.9.1 Βασικές αρχές και ορισμοί

Ως τεχνολογίες ΤΚΠ ορίζονται αυστηρά εκείνες οι τεχνολογίες που επιτελούν κατασκευή φυσικών πρωτοτύπων αντικειμένων με *πρόσθεση/εναπόθεση υλικού σε στρώσεις*, βασιζόμενες για την απόδοση της μορφής της κάθε στρώσης σε ψηφιακά αρχεία των υπό κατασκευή αντικειμένων, που έχουν εξαχθεί από 3Διάστατα CAD γεωμετρικά μοντέλα ή δεδομένα.

Σε μια ευρύτερη θεώρηση του ορισμού τους (όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω) οι ΤΚΠ μπορούν επίσης να περιλάβουν και κάποιες τεχνολογίες που βασίζονται σε *αφαίρεση υλικού* (π.χ. Laser 3D Milling, Laser Cutting, Water-jet Cutting κ.α.) καθώς και τεχνολογίες που αποτελούν εξέλιξη κατεργασιών μηχανουργικής κοπής (CNC Machining, HSC/M High Speed Cutting/Milling, Desktop CNC Milling), εφόσον αυτές επιτελούνται με τη βοήθεια  $H - Y$  και με βάση γεωμετρικές 3Διαστάσεων για να παράγουν πρωτότυπα αντικείμενα σε χρόνο μικρότερο των συμβατικών και παραδοσιακών μεθόδων ή της συνήθους μηχανουργικής κατεργασίας.

Οι τεχνολογίες εναπόθεσης υλικού στην πλειοψηφία τους κατασκευάζουν αντικείμενο προσθέτοντας υλικό διαδοχικά κατά στρώσεις συγκεκριμένου πάχους. Σε κάθε μια στρώση αποδίδεται η μορφή και οι εσωτερικές λεπτομέρειες του κατασκευαζόμενου αντικειμένου στο δεδομένο ύψος. Απαιτείται προς τούτο ο χωρισμός της 3Δ γεωμετρίας του μοντέλου σε επίπεδα / τομές αντιστοίχου πάχους (Slicing Procedure). Σε όλες τις τεχνολογίες ΤΚΠ κατά σύμβαση:

- Άξονας  $X$  – άξονας  $Y$  – επίπεδο  $X-Y$ , θεωρούνται οι άξονες και το επίπεδο των τομών (στρώσεων) που διαδοχικά κατασκευάζονται και
- άξονας  $Z$ , ο άξονας κτίσεως/ανάπτυξης του αντικειμένου.

Η επικοινωνία με λογισμικά 3D CAD, και γενικά η μεταφορά και είσοδος (Input) της προς κατασκευή 3Δ γεωμετρίας στις διατάξεις ΤΚΠ συντελείται ως επί το πλείστον μέσω ψηφιακών αρχείων πρωτοκόλλου STL (Stereolithography Language/StereoLithography files), [3D Systems, 1988; Jacobs, 1992; Kumar & Dutta, 1997], που θα αναλυθούν παρακάτω.

Με αλγοριθμική επεξεργασία των αρχείων αυτών δημιουργούνται στρώσεις – επίπεδες τομές, μορφής πολυγώνου (polygon sections), που θα αποδοθούν κατά την διαστρωματική κατασκευή στην κύρια διαδικασία της ΤΚΠ.

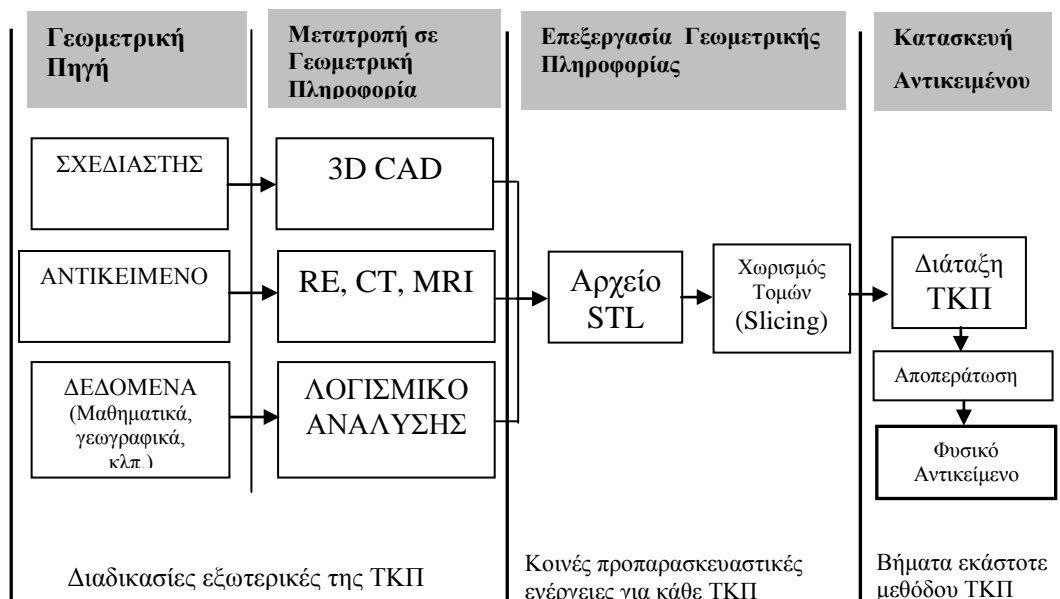
Η κατασκευή των στρώσεων επαναλαμβάνεται διαδοχικά  $N$  φορές έως ολοκλήρωσεως της κατασκευής του αντικειμένου, όπου

$$N = \lceil H/p \rceil \quad (1.1)$$

, το ακέραιο πηλίκο του ύψους  $H$  του κατασκευαζόμενου αντικειμένου δια το πάχος  $p$  της στρώσης της χρησιμοποιούμενης διάταξης ΤΚΠ.

Μετά την ολοκλήρωση όλων των  $N$  στρώσεων, ακολουθεί σχεδόν πάντοτε φάση *μετεπεξεργασίας* και *τελικής αποπεράτωσης* των αντικειμένων που ανάλογα με την εκάστοτε χρησιμοποιούμενη τεχνολογία μπορεί να είναι διαφορετική π.χ. αφαίρεση στηρίξεων, ωρίμανση αντικειμένου, εξωτερική προστασία, λείανση κλπ.

Σχηματικά η αλληλουχία των απαραίτητων βασικών φάσεων για κατασκευή αντικειμένων με κάθε τεχνολογία ΤΚΠ δεικνύεται στο Σχήμα 1.9.1.1



Σχήμα 1.9.1.1: Απαραίτητες φάσεις υλοποίησης ΤΚΠ

## 1.9.2 Ιστορική Εξέλιξη – Σημερινή Κατάσταση

Είναι ίσως δύσκολο σε λίγες σελίδες να συμπυχθούν 25 χρόνια ραγδαίας τεχνολογικής εξέλιξης. Για την καλύτερη κατανόηση των σταδίων της ως σήμερα ιστορικής διαδρομής της ΤΚΠ, είναι ίσως ωφέλιμο αυτή να εξετασθεί υπό το πρίσμα του marketing, της Έρευνας & Ανάπτυξης (E&A, Research and Technological Development, RTD) και του ΜΣ, σαν μια τυπική περίπτωση προϊόντων και αγοράς που γεννήθηκαν από συγκεκριμένη τεχνολογική εξέλιξη (Technology Driven Products). Σε συγκεκριμένες καθοριστικές χρονικές περιόδους, σημειώνονται για τη νέα αγορά της ΤΚΠ, τις τεχνολογίες και τα προϊόντα της, τα ακόλουθα:

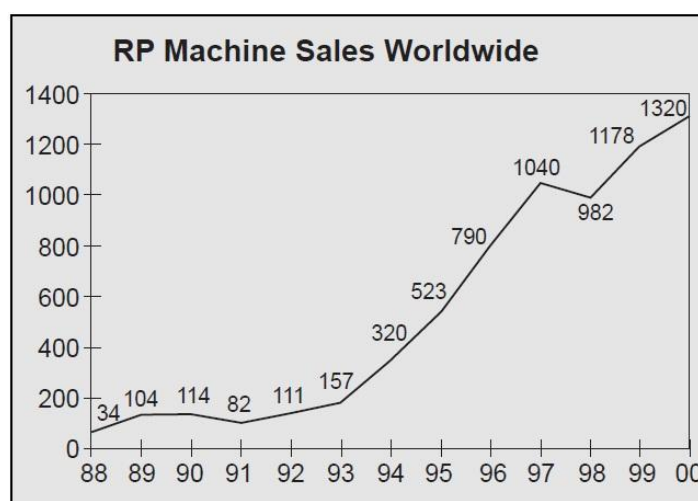
- 1985-1992, Η βρεφική περίοδος.** Η τεχνολογική εξέλιξη που κατέστη ευρέως διαθέσιμη την εποχή της πρώτης εμφάνισης των τεχνολογιών ΤΚΠ και αποτέλεσε το έναυσμα για τη δημιουργία τους είναι προφανώς εκείνη των συστημάτων 3D CAD, όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω. Σε αυτή την περίοδο, με το όραμα της εκμετάλλευσης της 3D CAD τεχνολογίας για κατασκευή πραγματικών αντικειμένων, παράλληλα διενεργούμενη E&A από διάφορους φορείς, οδήγησε στα πρώτα επιτυχημένα τεχνικά πρωτότυπα Εργαστηριακών Συστημάτων ΤΚΠ, τα οποία με Αναλυτικό Σχεδιασμό και υλοποίηση διαφορετικών Κατασκευαστικών Συνθέσεων (Concepts), (τεχνολογίες SLA, SLS, SGC, FDM, LOM), απέδειξαν την εφαρμοσιμότητα (feasibility) και την αποτελεσματικότητα της εκμετάλλευσης των 3D ψηφιακών CAD δεδομένων για διαστρωματική κατασκευή σύνθετων φυσικών αντικειμένων σε μικρό χρόνο και κόστος. Δεδομένης της πρωτοτυπίας και καινοτομίας των νέων τότε τεχνολογιών και συστημάτων ΤΚΠ, όλες κατοχυρώθηκαν άμεσα με διπλώματα ευρεσιτεχνίας (Βλ. Πίνακα 1.11.1 σε επόμενη παράγραφο) και γρήγορα ακολούθησαν το δρόμο της δημοσιοποίησης των δυνατοτήτων τους στους δυνητικούς τους χρήστες (κλαδικές εκθέσεις, επιστημονικά περιοδικά, ειδικός τύπος) και της εμπορικής τους εκμετάλλευσης. Ιδρύονται οι πρώτες εταιρίες κατασκευής και εμπορίας

συστημάτων ΤΚΠ (3D Systems, EOS, DTM, Cubital, Helisys, Stratasys), που δημιουργούν, δοκιμάζουν και εκθέτουν “Alpha” & “Beta” πρωτότυπα για τα πρώτα τους εμπορικά συστήματα. Μετά τις πρώτες παραγγελίες σύντομα τα διαθέτουν στην αγορά, ως συστήματα 1<sup>ης</sup> γενιάς, με υψηλές τιμές της τάξεως των αρκετών δεκάδων έως εκατοντάδων χιλιάδων δολαρίων Αμερικής. Οι κυριότεροι κατασκευαστές ΤΚΠ που διακρίθηκαν πρώτοι παγκοσμίως και ορισμένα στοιχεία εκείνης της περιόδου για αυτούς, [Wood, 1993], παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.9.2.1.

Κατασκευαστής	3D Systems	EOS	Cubital	Stratasys	Helisys	DTM
Χώρα	ΗΠΑ	Γερμανία	Ισραήλ	ΗΠΑ	ΗΠΑ	ΗΠΑ
Τεχνολογία	SLA	SLA	SGC	FDM	LOM	SLS
Έτος Ίδρυσης	1986	1989	1987	1988	1989	1987
Αποστολή Πρώτου Συστήματος	1988	1990	Μ.Δ.	1991	1991	1992
Γκάμα Μοντέλων 1992	3	2	1	1	2	1
Πωλήσεις ως 1992	300	~30	~10	18	15	1

Πίνακας 1.9.2.1: Οι πρώτοι κατασκευαστές εξοπλισμού ΤΚΠ

- 1993-2000, Η κύρια περίοδος άνθισης και ραγδαίας ανάπτυξης της ΤΚΠ.**  
 Δημιουργείται σταδιακά μια «αγορά» υπολογίσιμης εγκατεστημένης βάσης για τα συστήματα ΤΚΠ των πρωτοπόρων κυρίως κατασκευαστών, (Σχήμα 1.9.2.2, [Wohlers, 2000]), κυρίως σε Αμερική, Ευρώπη και Ιαπωνία, στην οποία από τους πρώτους πελάτες ήταν η αυτοκινητοβιομηχανία (π.χ. Chrysler, Ford, Mercedes, Rover κλπ.), η αεροναυπηγική βιομηχανία, οι μεγάλοι παραγωγικοί φορείς γενικά και τα μεγάλα πανεπιστημιακά ιδρύματα.



Source: Wohlers Associates, Inc.

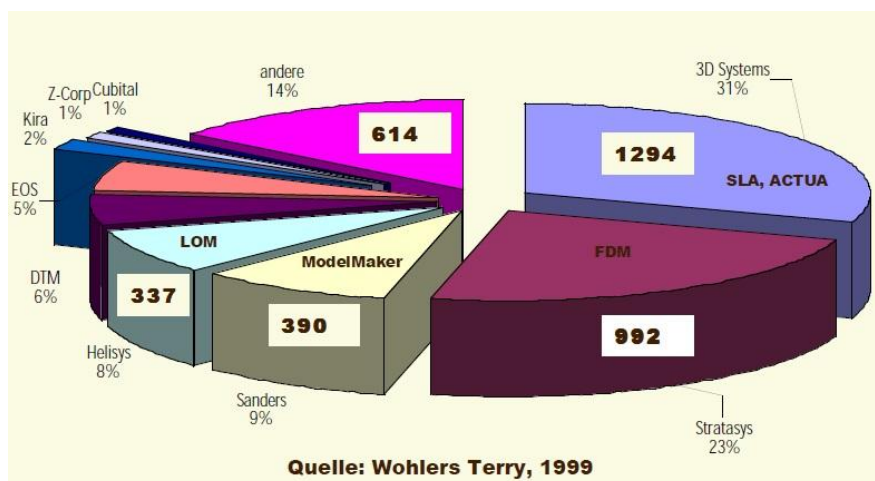
Σχήμα 1.9.2.2: Παγκόσμιες πωλήσεις μηχανών ΤΚΠ ως το 2000.

Όλοι, και ειδικά τα τελευταία, διερευνούν εκτενώς και αξιολογούν τις δυνατότητες και τους περιορισμούς των νέων τεχνολογιών και συστημάτων σε κάθε είδους εφαρμογές, αρχίζουν να διαμορφώνουν τους πρώτους κανόνες και

πρακτικές βέλτιστης αξιοποίησής τους, τα συγκρίνουν διεξοδικά και κατά μέτωπο μεταξύ τους και με άλλες εναλλακτικές μεθόδους σε κάθε επίπεδο (κόστος, ακρίβεια, αντοχή, εφαρμογές) και παράλληλα θέτουν προς τους κατασκευαστές τους βασικούς άξονες και τις κατευθύνσεις για τη βελτίωση και εξέλιξή τους στα συστήματα 2<sup>ης</sup> και 3<sup>ης</sup> γενιάς.

Ο συνδυασμός της έρευνας εφαρμογών ΤΚΠ με αξιοποίηση συμβατικών τεχνικών αντιγραφής και αναπαραγωγής, οδηγεί την ίδια περίοδο στην εισαγωγή και της έννοιας της Ταχείας Κατασκευής Εργαλείων (ΤΚΕ, Rapid Tooling, RT), ως άμεση προέκταση της ΤΚΠ. Τα συστήματα ΤΚΠ κατά πλειοψηφία εξακολουθούν να είναι πολύ υψηλού κόστους σε αγορά και σε χρήση, με χαμηλές δυνατότητες απόσβεσής τους από επιχειρήσεις της μικρο-μεσαίας κλίμακας, οπότε λογικά εμφανίζονται και εξαπλώνονται, κυρίως σε Αμερική και Ευρώπη, αρκετά γραφεία παροχής υπηρεσιών (service bureaus) ΤΚΠ και ΤΚΕ.

Σε εταιρικό και επιχειρηματικό επίπεδο οι πρωτοπόρες εταιρίες του χώρου παρουσιάζουν ραγδαία αύξηση του τζίρου και των κερδών τους, εγκαθιστούν γραφεία και αντιπροσώπους σε παγκόσμιο επίπεδο και ήδη αναπτύσσουν και διαθέτουν τα συστήματα 2<sup>ης</sup> ή και 3<sup>ης</sup> γενιάς τους, αξιοποιώντας της «φωνή του πελάτη» από τα συστήματα 1<sup>ης</sup> γενιάς, συγκροτώντας μάλιστα και τις πρώτες οικογένειες σχετικών προϊόντων τους με κλιμάκωση μεγεθών, χαρακτηριστικών και τιμών. Εμφανίζονται επίσης την ίδια περίοδο και αρκετές νέες εταιρίες κατασκευής και διάθεσης ΤΚΠ, συχνά ως “Spin-Offs” ή κάτοχοι αδειών εκμετάλλευσης (licensees) τεχνολογιών που ανέπτυξαν πανεπιστήμια (π.χ. MIT & Zcorp), που παρουσιάζουν και διαθέτουν νέα εναλλακτικά συστήματα ΤΚΠ, για την υλοποίηση με διαφορετική Κατασκευαστική Σύνθεση – μη καλυπτόμενη από τις ήδη κατατεθειμένες ευρεσιτεχνίες – της διαστρωματικής κατασκευής αντικειμένων. Η κατανομή παγκόσμια εγκατεστημένων συστημάτων παλαιών και νέων ΤΚΠ κατασκευαστών το έτος 1998, παρίσταται στο Σχήμα 1.9.2.3, [Wohlens, 2000].



Σχήμα 1.9.2.3: Μερίδιο των κατασκευαστών ΤΚΠ σε εγκατεστημένα συστήματα παγκοσμίως το 1998

Σε επίπεδο παράπλευρων τεχνολογικών και επιχειρηματικών κλάδων που αναπτύσσονται γύρω από κάθε ριζοσπαστική τεχνολογία, ιδρύονται και οι πρώτες εταιρίες ανάπτυξης και διάθεσης λογισμικού υποστήριξης διαδικασιών ΤΚΠ (π.χ. Materialise), οι πρώτοι κατασκευαστές εξοπλισμού διαδικασιών ΤΚΕ (π.χ. θαλάμων κενού, διατάξεων spray metal, spin casting κλπ.), οι δε μεγάλες εταιρίες

χημικών και πλαστικών προϊόντων (π.χ. CIBA, DuPont κ.α.) έχουν ήδη συνάψει συνεργασίες με τους μεγάλους κατασκευαστές ΤΚΠ και αναπτύξει καταλόγους υλικών αποκλειστικά για χρήση σε μηχανές ΤΚΠ και εφαρμογές ΤΚΕ.

Την περίοδο αυτή σημειώνονται και οι πρώτες δικαστικές διαμάχες και διευθετήσεις μεταξύ εταιριών για θέματα παραβίασης ευρεσιτεχνιών ΤΚΠ και εφαρμογής μονοπωλιακών τακτικών (π.χ. περίπτωση 3D Systems Inc, με Sony Corp.), οι πρώτες αποτυχίες καθιέρωσης κατασκευαστών ΤΚΠ στην αγορά και παύση εργασιών εταιριών ΤΚΠ με λύσεις χαμηλής τεχνικής αρτιότητας και αξιοπιστίας, χαμηλής οικονομοτεχνικής αποτελεσματικότητας και μικρού ρυθμού εξέλιξης, που ξεπεράστηκαν από άμεσα ανταγωνιστικά τους συστήματα [Grimm & Wohlers, 2001]. Ακόμα, ξεκινούν και οι πρώτες εξαγορές και συγχωνεύσεις μεταξύ κατασκευαστών (3D Systems & DTM), είτε για προάσπιση των βασικών τους τεχνολογιών, είτε για ισχυροποίηση της θέσης τους απέναντι στους ανταγωνιστές τους.

- **2001 – 2009 Εδραίωση, ωρίμανση και διεύρυνση.** Η περίοδος εδραίωσης και ωρίμανσης της ΤΚΠ, όπως και για κάθε τεχνολογία προϊόντα της οποίας έχουν περάσει πλέον σε 4<sup>η</sup> και παραπάνω γενιά, έχει να επιδείξει μια σειρά από ενδιαφέροντα χαρακτηριστικά.

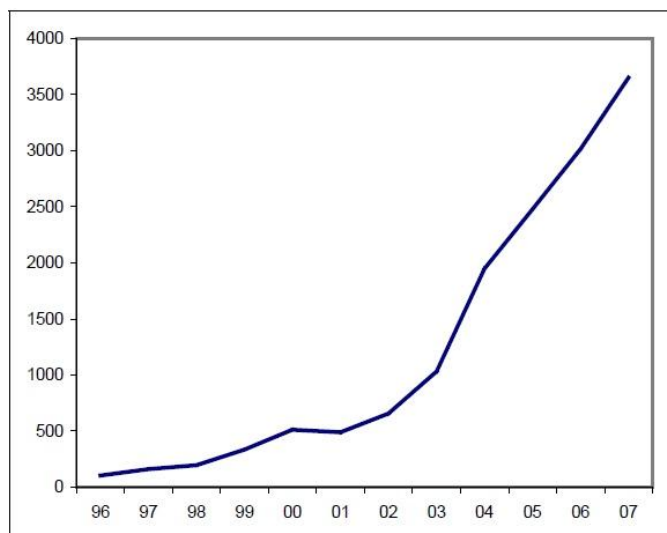
Έχουν ήδη εμφανιστεί, δημοσιευθεί και κατοχυρωθεί δεκάδες διαφορετικές παραλλαγές και εναλλακτικές υλοποιήσεις για την ιδέα της ΤΚΠ, κυρίως από πανεπιστημιακούς φορείς, [Negis, 1995; Pham & Dimov, 2001; Gebhardt, 2003]. Πολύ λίγες από αυτές είναι ικανές να ξεπεράσουν σε επιμέρους χαρακτηριστικά τις ήδη καθιερωμένες μεθόδους, ώστε να φθάσουν στο επίπεδο της κερδοφόρας εμπορικής τους εκμετάλλευσης, και έχουν παραμείνει σε εργαστηριακό επίπεδο ή σε επίπεδο παροχής υπηρεσίας από το φορέα που τις ανέπτυξε, καθώς οι πρωτοπόροι κατασκευαστές οίκοι, προηγούνται σημαντικά σε εμπειρία και τεχνολογικό υπόβαθρο. Πιο αξιοσημείωτες περιπτώσεις επιτυχημένης εξέλιξης είναι οι εφαρμογές ΤΚΠ σε αντικείμενα μικροκλίμακας (π.χ. οίκος Microtec) και σε πολύ μεγάλη κλίμακα (π.χ. Materialise Mammoth – SLA) και η απευθείας στερεοποίηση με ψηφιακά προβολικά συστήματα (Digital Light Processing, DLP της Envisiontec).

Η ΤΚΠ αρχίζει να διασυνδέεται ερευνητικά και τεχνολογικά με τις τεχνικές ψηφιοποίησης και ΑΣ, επεκτείνει δε όλο και περισσότερο το φάσμα των εφαρμογών της σε πολλές νέες κατευθύνσεις (ιατρική, αρχιτεκτονική, τοπογραφία, παλαιοντολογία, αρχαιολογία, κινηματογράφο, ιατροδικαστική, κλπ.) Σε ανταπόκριση της «φωνής» των χρηστών, οι κραταιοί κατασκευαστές αρχίζουν να κατασκευάζουν και διαθέτουν περισσότερα και διαφοροποιημένα μοντέλα μηχανών ΤΚΠ των ήδη γνωστών τεχνολογιών τους, υψηλής ανάλυσης, υψηλής ακρίβειας, μεγαλύτερων διαστάσεων αντικειμένου, διευρύνουν τη γκάμα των χρησιμοποιούμενων υλικών με περισσότερα και πιο εξειδικευμένα σε χαρακτηριστικά και αρχίζουν να εμφανίζουν τις πρώτες διαφοροποιημένες, «στοχευμένης» χρήσης μηχανές, αποκλειστικά για συγκεκριμένους κλάδους, όπως τα οδοντιατρικά βοηθήματα και εμφυτεύματα (dental applications), ακουστικά βοηθήματα (hearing aids), κοσμήματα/ αργυροχρυσοχοϊα (jewelry) και τα βιοσυμβατά υλικά (biomaterials).

Μετά τη συντελεσθείσα πρόοδο ειδικά στα θέματα των μεγεθών και των υλικών, στα μέσα της περιόδου αυτής πρωτοεμφανίζεται για την περιοχή ΤΚΠ και ο όρος Ταχεία Κατασκευή Προϊόντων / Ταχεία Παραγωγή (Rapid Manufacturing, RM), περισσότερο αρχικά ως φιλοδοξία και επιδίωξη και αργότερα σαν ρεαλιστική

προοπτική για τους βιομηχανικούς φορείς, που συνίσταται στην παραγωγή σε μικρούς αριθμούς ή σε ειδικές εφαρμογές απευθείας τελικών προϊόντων με μηχανές ΤΚΠ, υποκαθιστώντας πλήρως την συμβατική για αυτά μέθοδο παραγωγής τους, [Pham & Dimov, 2001; Hopkinson et al., 2006].

Το πιο αξιοσημείωτο γεγονός της περιόδου όμως είναι η τάση της βιομηχανίας της ΤΚΠ να επεκταθεί προς τα κάτω και να γίνει προσιτή σε μικρομεσαίες επιχειρήσεις, μικρά σχεδιαστικά γραφεία, ακόμα και σε ερασιτέχνες και χομπίστες, με μηχανές ΤΚΠ κόστους αρχικά κάτω των 20.000\$ και αργότερα των 10.000\$. Είναι η περίοδος ανάπτυξης της αγοράς των “3D Modelers/3D Printers”. Όλοι σχεδόν οι καθιερωμένοι κατασκευαστές ΤΚΠ, καθώς και πολλοί νέοι διεκδικητές μεριδίου της παγκόσμιας αγοράς θα εισάγουν, είτε ως παραλλαγή της βασικής τους τεχνολογίας, είτε με εφαρμογή νέων αρχών, τους δικούς τους «φθηνούς» 3D εκτυπωτές, όπως απλουστευμένα τους ονόμαζαν για το μη εξειδικευμένο κοινό. Η τάση αυτή καταγράφεται τόσο σε αριθμούς πωλήσεων τέτοιων συστημάτων (Σχήμα 1.9.2.4, [Wohlers, 2008]), όσο και με την κάμψη ζήτησης και πωλήσεων των μεγαλύτερων βιομηχανικής κατεύθυνσης μηχανών ΤΚΠ, αλλά και της δραστηριότητας των γραφείων παροχής υπηρεσιών ΤΚΠ.



Source: Wohlers Report 2008

Σχήμα 1.9.2.4: Πωλήσεις ΤΚΠ της κλάσεως των 3D Printers ως το 2008

Σε εταιρικό επίπεδο, και ενώ στο μεταξύ η διάδοση και χρήση των ΤΚΠ έχει φθάσει και στις πέντε ηπείρους, αφενός για λόγους «τεχνολογικής άμυνας» και ενίσχυσης των δικών τους τεχνολογιών και συστημάτων και αφετέρου λόγω της παγκόσμιας οικονομικής κρίσης και ύφεσης που ενέσκηψε προς το τέλος της περιόδου, οι μεγάλοι κατασκευαστές με προεξέχουσα την 3D Systems Inc. εξαγοράζουν και «απορροφούν» πολλές μικρότερες ανταγωνιστικές νεότευκτες εταιρίες και τα συστήματά τους, άλλοι προχωρούν σε συγχωνεύσεις, η δε Αμερικανική Stratasys Inc. διευρύνει σημαντικά ολόκληρη τη γκάμα των προϊόντων της ιδρύοντας και τη θυγατρική Dimension για συστήματα μικρής κλίμακας και καταφέρνει για πρώτη φορά να ανατρέψει υπέρ της την παγκόσμια κατάταξη των κατασκευαστών ΤΚΠ σε μερίδιο αγοράς. Αξιοσημείωτα επίσης, η εμφάνιση και εδραίωση της Ισραηλινής Objet, που εισάγοντας και αναπτύσσοντας ολόκληρη αυτή την περίοδο συστήματα πολυμερών πρωτοτύπων υπερ-υψηλής ανάλυσης και ακρίβειας και το πρώτο εμπορικό σύστημα

ταυτόχρονης χρήσης δύο διαφορετικών υλικών κατακτά και αυτή σημαντικό μερίδιο της αγοράς, εις βάρος κυρίως της κραταιής ως τότε 3D Systems· η ίδρυση της Σουηδικής ARCAM που αναπτύσσει και υλοποιεί καινοτόμο τεχνολογία και συστήματα για πρωτότυπα αντικείμενα από τιτάνιο και η εμφάνιση αρκετών κατασκευαστών από την Κίνα που αντιγράφοντας εν πολλοίς Ευρωπαϊκά και Αμερικανικά συστήματα και τεχνολογίες αρχίζουν και αυτοί να διαθέτουν στην αγορά μηχανές ΤΚΠ.

- **Σημερινή Κατάσταση (2010-2013) – Η κρίση, η λήξη των βασικών πατεντών και οι φθηνοί 3D Εκτυπωτές.**

Σήμερα οι τεχνολογίες ΤΚΠ, γνωστές, εδραιωμένες, πολυπληθείς και τεχνικά πιο ώριμες από ποτέ, αντιμετωπίζουν μια σειρά από νέες προκλήσεις.

Σε παγκόσμιο επίπεδο η οικονομία μαστίζεται από κρίση και ύφεση του συνόλου της οικονομικής και βιομηχανικής δραστηριότητας, που όμοιά της έχει να σημειωθεί από την κρίση που ξεκίνησε στις ΗΠΑ το 1929 και διήρκεσε δέκα και πλέον έτη.

Η αγορά τεχνολογικών συστημάτων ΤΚΠ, παρά την διαχρονική άνοδο και πρόοδό της, από τη φύση της απευθυνόταν πάντοτε όχι στο ευρύ κοινό (όπως π.χ. η αυτοκινητοβιομηχανία), αλλά στον τεχνικό, βιομηχανικό, παραγωγικό κυρίως κόσμο. Ο τελευταίος όμως λόγω της παγκόσμιας κρίσης βρίσκεται τελευταία μονίμως σε παθητική και αμυντική στάση και προβαίνει δύσκολα σε υψηλού κόστους επενδύσεις, όπως τα συστήματα ΤΚΠ υψηλής κλίμακας (High End Systems). Αντιθέτως, αποσκοπεί στην μέγιστη δυνατή εκμετάλλευση και απόσβεση επενδύσεων του των προηγούμενων ετών, που θα τον βοηθήσουν να παράξει νέα ελκυστικά και ποιοτικά προϊόντα, που σε ένα περιβάλλον μαρασμού και χαμηλής αγοραστικής ικανότητας των καταναλωτών, θα καταφέρουν να τονώσουν την κατανάλωση και την ανάπτυξη και θα εξασφαλίσουν έτσι την επιβίωσή του.

Παράλληλα συμπίπτει αυτό τον καιρό, λόγω παρέλευσης εικοσαετίας, να έχουν αρχίσει ήδη να λήγουν βασικές πατέντες (κυρίως Αμερικανικές) κορυφαίων κατασκευαστών ΤΚΠ (π.χ. Stratasys), οι οποίες επί χρόνια προστάτευαν τα προϊόντα τους έναντι των ανταγωνιστών.

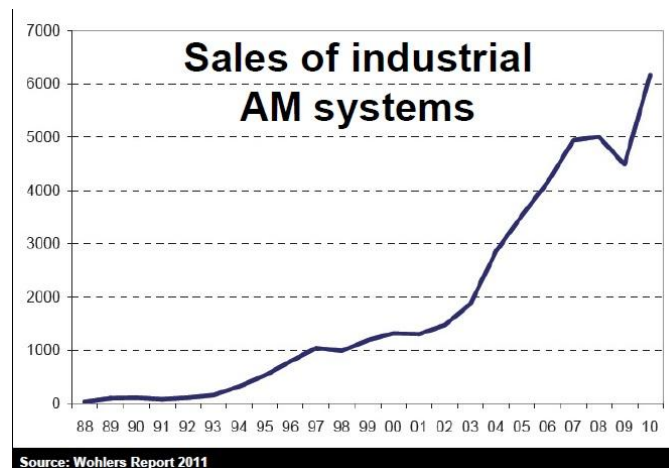
Τα δύο παραπάνω γεγονότα έχουν οδηγήσει τους παλαιούς κραταιούς, αλλά και τους νέους μεγάλους οίκους και ομίλους κατασκευής και εμπορίας συστημάτων ΤΚΠ, να επιδιώκουν τη μέγιστη δυνατή παρουσία τους στην παραδοσιακή τους αγορά, την επίτευξη οικονομικών κλίμακας και τη δημιουργία για αυτούς της πληρέστερης δυνατής γκάμας προϊόντων ΤΚΠ κάθε μεγέθους, εφαρμογής και υλικού, ακόμα και από διαφορετικές τεχνολογίες. Η τάση αυτή οδήγησε πολύ πρόσφατα σε πολύ μεγάλης κλίμακας επιχειρηματικές συμφωνίες βασικών κατασκευαστών οίκων ΤΚΠ, όπως την εξαγορά της Zcorp από την 3D Systems το 2012 και τη συγχώνευση της Stratasys με την Objet το 2013. Επιχειρηματικές κινήσεις που δημιουργούν δύο πολύ μεγάλους ομίλους – πόλους ΤΚΠ παγκοσμίως, γύρω από τους οποίους θα προσπαθήσουν πλέον να δραστηριοποιηθούν όλοι οι υπόλοιποι.

Η λήξη δε των βασικών πατεντών ΤΚΠ, οδηγεί επιπλέον τους νέους μεγάλους ομίλους σε άμεσα «επιθετικές» τοποθετήσεις νέων προϊόντων τους έναντι βασικών ανταγωνιστών τους, που βασίζονται σε πρώην αποκλειστικές πατέντες των τελευταίων, όπως το σύστημα Cube (2013) της 3D Systems, με τεχνολογία ταυτόσημη της FDM του οίκου Stratasys.

Τέλος οι παραδοσιακοί, όσο και πολλοί (πάνω από δέκα) καινούριοι κατασκευαστές ΤΚΠ που έχουν πρόσφατα εμφανισθεί λόγω της λήξης των βασικών πατεντών, επιχειρούν τα τελευταία τρία κυρίως χρόνια τη δημιουργία πρακτικά μιας νέας αγοράς, προσωπικών – οικιακών φθηνών μηχανών ΤΚΠ, με πελάτες το ευρύ κοινό και τους ιδιώτες, κόστους κτήσης κάτω των 3000 U.S.\$, για κάποια ακόμα και κάτω των 1000 U.S.\$, τα οποία θα βασίζονται για τη λειτουργία τους σε ελεύθερο, ανοικτού κώδικα λογισμικό και θα μπορούν να πωλούνται ακόμα και σε «κιτ» για συναρμολόγησή τους από τον πελάτη – τελικό χρήστη. Πολλές τέτοιες μικρές εταιρίες έχουν ήδη εξαγορασθεί από τις μεγαλύτερες, ενώ άλλες ήδη σημειώνουν σήμερα σημαντικούς αριθμούς πωλήσεων. Μερικοί τέτοιοι οικιακοί 3Δ εκτυπωτές απεικονίζονται στο Σχήμα 1.9.2.1, ενώ χαρακτηριστικά γραφήματα πωλήσεων βιομηχανικών και πρόσφατων οικιακών-προσωπικών συστημάτων ΤΚΠ δεικνύονται συγκριτικά στο Σχήμα 1.9.2.2, [Wohlers, 2011].

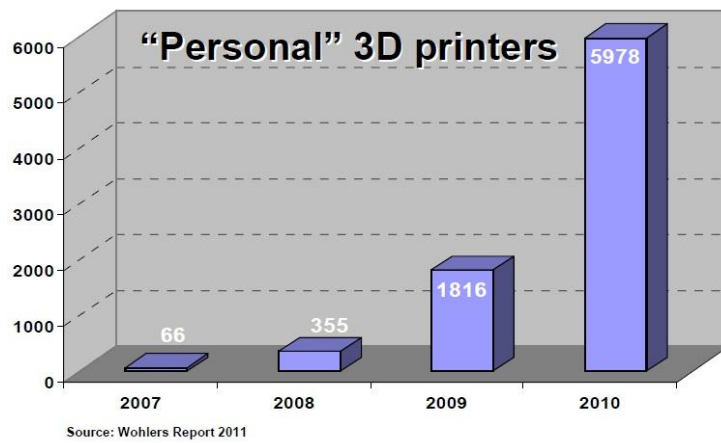


Σχήμα 1.9.2.1: Σύγχρονοι χαμηλού κόστους «προσωπικοί» 3Δ εκτυπωτές



(α) Πωλήσεις βιομηχανικών ΤΚΠ 1988-2010





(β) Πωλήσεις «προσωπικών» 3D εκτυπωτών 2007-2010

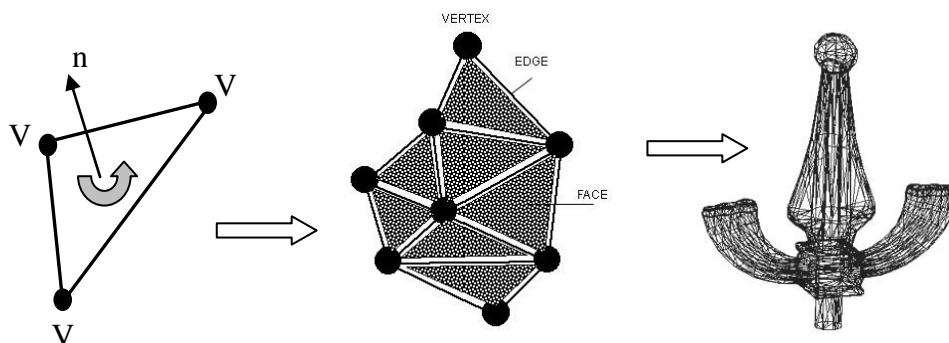
Σχήμα 1.9.2.2: Πωλήσεις βιομηχανικών και «προσωπικών» ΤΚΠ

### 1.9.3 Πρωτόκολλα Επικοινωνίας, Αρχεία STL, Λογισμικό υποστήριξης, επεξεργασίας και διαχείρισης

Αναφέρθηκε και παραπάνω ότι η επικοινωνία λογισμικών 3D CAD και άλλων πηγών γεωμετρίας 3D με διατάξεις ΤΚΠ, κατά κύριο λόγο γίνεται μέσω του κοινού ουδέτερου πρωτοκόλλου STL, [3D Systems, 1988].

Τα αρχεία STL (Stereolithography Language ή/και Standard Tessellation Language), με μορφή επέκτασης αποθήκευσης “*\*\*\*.stl*”, αναπτύχθηκαν από το “Albert Consulting Group” και κατοχυρώθηκαν το 1987 μαζί με την πρώτη μηχανή Στερεολιθογραφίας από την εταιρία 3D Systems Inc. Έχουν από την εμφάνισή τους μέχρι και σήμερα καθιερωθεί σαν το “de facto standard” για την ΤΚΠ, αν και για σκοπούς ΤΚΠ έχουν προταθεί και άλλες εναλλακτικές μορφές αρχείων, [Kumar & Dutta, 1997; Marsan et al., 1998; Jacob et al., 1999]. Εξακολουθεί να αποτελεί το μόνο ενιαίο, χρησιμοποιούμενο από όλες τις ΤΚΠ πρωτόκολλο, τουλάχιστον ως προς την είσοδο των δεδομένων σε διατάξεις ΤΚΠ και εξάγεται από όλα σχεδόν τα λογισμικά που δημιουργούν γεωμετρίες σε 3 διαστάσεις (Σχεδιαστικά, μαθηματικά, ιατρικά κ.α.).

Με τρόπο παρόμοιο με αυτόν της δημιουργίας πλεγμάτων για Ανάλυση Πεπερασμένων Στοιχείων, προσεγγίζουν και αναπαριστούν την κλειστή επιφάνεια που ορίζει το 3D στερεό μοντέλο σε Η/Υ, ως ένα σύνολο τριγωνικών εδρών (Facets). Οι έδρες αυτές διασυνδέονται μεταξύ τους και οφείλουν ανά δύο να μοιράζονται μία κοινή πλευρά (Edge) και δύο κοινές κορυφές (Vertexes). Με την τήρηση αυτού του κανόνα στο σύνολο των τριγώνων, εξασφαλίζεται η «υδατοστεγής» (watertight) όπως λέγεται, κλειστή προσέγγιση ενός 3D όγκου. Τα τρίγωνα των εδρών είναι προσανατολισμένα με χρήση «κανονικού διανύσματος» (normal,  $n$ ), ώστε να γίνεται δυνατή η διάκριση της κατεύθυνσης του υλικού στο αντικείμενο. Έτσι τελικά, μέσα σε ένα αρχείο STL κωδικοποιείται πλήρως η αναπαράσταση στερεού αντικειμένου ως πλέγμα τριγωνικών εδρών, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.9.3.1.



Σχήμα 1.9.3.1: Γεωμετρική μορφή αρχείων STL

Αρχεία STL μπορούν να υφίστανται σε ASCII ή δυαδική (Binary) μορφή, με την δυαδική να πλεονεκτεί σε όγκο δεδομένων, καθώς παράγει 5 φορές μικρότερο σε μέγεθος αρχείο, που όμως δεν μπορεί να διαβάσει και κατανοήσει ο χρήστης.

Για την συγκρότηση του κώδικα αρχείου STL σε μορφή ASCII χρησιμοποιείται οι παρακάτω βασικές εντολές:

- \* Solid -> Δίνει το όνομα του στερεού
- \* facet normal -> Δίνει την κατεύθυνση του κανονικού διανύσματος τριγωνικής έδρας
- \* outer loop -> Ξεκινά την αλληλουχία κορυφών της τρ. Έδρας
- \* vertex -> Δίνει τις συντεταγμένες κάθε κορυφής της τρ. Έδρας
- \* endloop -> Τελειώνει την αλληλουχία κορυφών της τρ. Έδρας
- \* endfacet -> Τελειώνει την περιγραφή της τρ. Έδρας
- \* endsolid -> Τελειώνει την περιγραφή του στερεού

Η σύνταξη των εντολών μέσα στο αρχείο σε μορφή κώδικα δείχνεται στο Σχήμα 1.9.3.2:

```

solid [part name]
  facet normal 0.000000e+000 1.000000e+000 2,634149e-009
    outer loop
      vertex 3.000000e+000 1.400000e+000 4.000000e+000
      vertex 4.000000e+000 1.400000e+000 4.000000e+000
      vertex 3.000000e+000 1.400000e+000 3.000000e+000
    endloop
  endfacet
.....
.....
.....
endsolid

```

Σχήμα 1.9.3.2: Κώδικας αρχείου STL (ASCII μορφή)

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα που συνετέλεσαν στην εξάπλωσή του και ορισμένα εγγενή μειονεκτήματα του πρωτοκόλλου STL για την περιγραφή και μεταφορά γεωμετρίας 3Δ, συνοψίζονται στον Πίνακα 1.9.3.1.

ΑΡΧΕΙΑ STL	
Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Απλή Διατύπωση (Μόνο τρίγωνα)	Πλεονασμός ορισμού γεωμετρίας (Επανάληψη κορυφών τριγώνων)
Ανεξάρτητο από λογισμικά CAD και μεθόδους ΤΚΠ	Προσέγγιση της γεωμετρίας – Πιθανή απώλεια ακρίβειας
Διαδεδομένο – Καθιερωμένο	Συχνά Εγγενή Σφάλματα (Κενά, αναστροφές, επικαλύψεις κλπ.)
Για ΤΚΠ απαιτείται σχετικά απλός αλγόριθμος για δημιουργία επίπεδων τομών μορφής πολυγώνων	Μεγάλο Μέγεθος Αρχείων (Κυρίως τα ASCII)
Εύκολη Στροφή και Μετατόπιση	Περιγράφει μόνο γεωμετρία – τοπολογία
Εύκολη Τομή ή Συνένωση	

Πίνακας 1.9.3.1: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα του STL

Κατά καιρούς έχουν διερευνηθεί διεθνώς και εναλλακτικά πρωτόκολλα μεταφοράς γεωμετρικών δεδομένων από συστήματα CAD προς διατάξεις ΤΚΠ, [Kumar & Dutta, 1997; Marsan et al., 1998; Jacob et al., 1999; Huang et al., 2003], στα οποία δεν θα υφίσταντο οι περιορισμοί και ατέλειες των STL. Κύριοι στόχοι, μικρότερο μέγεθος

αρχείων, πιστότερη προσέγγιση της γεωμετρίας και με χρήση καμπυλών, αποφυγή του χωρισμού σε τομές, απευθείας αξιοποίηση δεδομένων CT κ.α.

Άλλα βασίζονται σε υπάρχοντα καθιερωμένα πρότυπα (IGES, STEP κλπ.) και άλλα αποτελούν εναλλακτικές προσεγγίσεις περιγραφής και καταγραφής της γεωμετρίας που θα αποδοθεί από ΤΚΠ. Για κάποια ακολουθείται η 3Δ απεικόνιση της γεωμετρίας με αποτελεσματικότερο τρόπο έκφρασης και αποθήκευσης σε σχέση με τα STL και σε άλλα ακολουθείται η λύση της απευθείας προετοιμασίας και εξαγωγής 2Δ τομών του αντικειμένου σε διάφορα ύψη (Αρχεία 2½ Δ). Κανένα από αυτά δεν έχει καταφέρει ωστόσο ως σήμερα να υποκαταστήσει τα αρχεία STL. Αρκετά χρησιμοποιούνται ως «ενδιάμεσα» ή «εσωτερικά» αρχεία σε κάποιες μεθόδους και μηχανές ΤΚΠ, χωρίς γενικότερη ισχύ. Μια σύνοψη των σημαντικότερων εναλλακτικών του STL πρωτοκόλλων που έχουν επιχειρηθεί, πολλά μάλιστα από τα οποία εξάγονται σήμερα από λογισμικά 3Δ γεωμετρίας δίδεται στον Πίνακα 1.9.3.2.

A/A	Συμβολισμός	Ονομασία
1	SLI	SLIce format
Περιγραφή: 2 ½ Δ «εσωτερικό» αρχείο των μηχανών του οίκου 3D Systems, περιέχει τα περιγράμματα (contours) και τη χάραξη στερεοποίησης (hatching) που θα οδηγήσουν το laser στην κατασκευή με Στερεολιθογραφία καθ'όλα τα ύψη.		
2	SLC	Slice Contours
Περιγραφή: 2 ½ Δ «εσωτερικά» εταιρικά αρχεία χρησιμοποιούμενα από τους οίκους 3D Systems και Stratasys. Περιέχουν τα περιγράμματα (contours) της γεωμετρίας καθ'ύψος σε μορφή συνεχόμενων γραμμών (polylines).		
3	CFL	Cubital Facet List
Περιγραφή: 3Δ «εσωτερικά» εταιρικά αρχεία του οίκου Cubital, μέσω των οποίων η γεωμετρία περιγράφεται από τη σχετική τοπολογία εδρών και των κορυφών των εδρών που ορίζουν την επιφάνεια του στερεού. Πολύ αποτελεσματική διασύνδεση στις 3 Διαστάσεις, αλλά παρόλα αυτά όχι διαδεδομένο ή καθιερωμένο ως πρωτόκολλο για ΤΚΠ.		
4	IGES	Initial Graphics Exchange Specification
Περιγραφή: 3Δ. Καθιερωμένο και τυποποιημένο κατά ISO πρότυπο για την ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ λογισμικών CAD. Η πρώτη έκδοση δημιουργήθηκε το 1981 από το U.S. NBS (National Bureau of Standards) και η εξέλιξή του ελέγχεται από το US NCGA (National Computer Graphics Association). Κυρίως λόγω πληθώρας ρυθμίσεων των παραμέτρων του, παρουσιάζει συχνά δυσκολίες όσον αφορά την συμβατότητα μεταξύ συστημάτων CAD. Για ΤΚΠ περιέχει πλεονάζουσες πληροφορίες σε ανάλογα αρχεία μεγάλου μεγέθους.		
5	STEP	Standard for the Exchange of Product Data
Περιγραφή: 3Δ. Πρότυπο κατά ISO10303 για την ανταλλαγή δεδομένων του προϊόντος που αφορούν όχι μόνο τη γεωμετρία, αλλά και όλες τις παραμέτρους που αφορούν τον κύκλο ζωής του (κατασκευή, παραγωγή, ανακύκλωση κλπ.). Για την ΤΚΠ λόγω της πληρότητάς και της ισχύος του ως ανεξάρτητο πρότυπο έχει προοπτική να αποτελέσει πρωτόκολλο εισόδου και λειτουργίας διατάξεων ΤΚΠ, με την αίρεση όμως της πλεονάζουσας πληροφορίας που αυτό θα περιέχει σε σχέση με την γεωμετρία που κυρίως απαιτείται για ΤΚΠ.		
6	HP/GL	Hewlett-Packard Graphics Language
Περιγραφή: 2Δ Πρότυπο για την χρησιμοποιείται για την οδήγηση σχεδιογράφων (plotters) με δυνατότητα καμπυλών και κειμένου. Η εξαγωγισιμότητά του από πολλά συστήματα CAD με την επέκτασή του για τη δημιουργία τομών σε διάφορα ύψη θα μπορούσαν να το καταστήσουν ικανό να τροφοδοτήσει γεωμετρία στην ΤΚΠ.		
7	CLI	Common Layer Interface
Περιγραφή: 2 ½ Δ. Αναπτύχθηκε στα πλαίσια του προγράμματος BRITE/EURAM BE5278, με σκοπό να αποτελέσει πρωτόκολλο για όλες τις μεθόδους ΤΚΠ. Βασίζεται σε τομές (slices) και κλειστά περιγράμματα (closed contours) της μορφής του αντικειμένου σε κάθε τομή. Εξάγεται από αρκετά λογισμικά και χρησιμοποιείται σε ορισμένες ΤΚΠ ως είσοδος.		
8	LEAF	Layer Exchange ASCII Format
Περιγραφή: 2 ½ Δ. Παραγόμενο του προγράμματος BRITE/EURAM BE 3527-89 (Helsinki University of Technology) περιέχει ως αρχείο δύο τμήματα. Το τεχνικό τμήμα με ρυθμίσεις και παραμέτρους ανά χρησιμοποιούμενη ΤΚΠ και το γεωμετρικό τμήμα με τομές και περιγράμματα βασισμένα κυρίως σε γραμμές και τμήματα κύκλων. Δεν έχει αξιοποιηθεί ικανοποιητικά.		

9	RPI	Rensselaer Polytechnic Institute format
Περιγραφή: 3D. Σκοπός του πρωτοκόλλου να ενσωματώσει στοιχεία στερεού σχεδιασμού με βασικά γεωμετρικά στοιχεία (κυβοειδή, κυλίνδρους, σφαίρες κλπ.), δηλ. στοιχεία CSG (Constructive Solid Geometry), μαζί με τριγωνοποιημένη απεικόνιση, λογικές πράξεις (Boolean Operations), δυνατότητα 3D μετασχηματισμών κλπ. Σε αποτελεσματική μορφή και μέγεθος αρχείου, [Rock & Wozny, 1991]. Δεν έχει καθιερωθεί.		
10	VRML	Virtual Reality Modeling Language
Περιγραφή: 3D. Το VRML βασίζεται στο πρότυπο Open Inventor ASCII File Format της Silicon Graphics Inc., που υποστηρίζει 3D σκηνές γραφικών και εφαρμογές ΕΠ με φωτοσκιασμένα πολυγωνικά αντικείμενα. Υποστηρίζει φωτισμό, υλικό, χρώμα και διαδραστικότητα. Η «ελαφριά» σύστασή τους ως αρχεία για εφαρμογή στο Διαδίκτυο, τα καθιστά ίσως τον πιθανότερο αντικαταστάτη του STL, εισάγοντας χρώμα και υφή σε μελλοντικά συστήματα ΤΚΠ.		
11	STH	Surface Triangles Hinted Format
Περιγραφή: 3D. Αποτελεί όπως και το STL τριγωνική αναπαράσταση μοντέλου, αλλά με πιο ευέλικτη μορφή όσον αφορά τον τρόπο αποθήκευσης και διασύνδεσης των τριγώνων, με συνεπαγόμενη μείωση μεγέθους αρχείων. Αναπτύχθηκε από την Brock Rooney and Associates, αλλά χωρίς να έχει διαδοθεί ικανοποιητικά.		

Πίνακας 1.9.3.2: Εναλλακτικά του STL πρωτόκολλα για την ΤΚΠ

Τόσο κατά την διαδικασία πρωτογενούς εξαγωγής τους από λογισμικά 3D γεωμετρίας, όσο και λόγω αμιγούς μεταφοράς σε αυτά προβλημάτων της ίδιας της 3D γεωμετρίας, μπορεί στα STL αρχεία να παρουσιασθούν διάφορα σφάλματα, προβλήματα και ατέλειες, τα οποία επηρεάζουν δυσμενώς την επακόλουθη ΤΚΠ, είτε και την καθιστούν αδύνατη. Τα σημαντικότερα αναφερόμενα, [Fadel & Kirschman, 1996; Szilvsi-Nagy & Mátyási, 2003; Yau et al., 2003], είναι:

- Οπές (Holes)
- Αλληλοεπικαλύψεις (Overlaps)
- Τομές (Intersections)
- Αναστροφές (Inversion of normals)
- Χαμηλής ποιότητας προσεγγίσεις καμπύλων επιφανειών (Poor curvature approximation)
- Ακανόνιστου Σχήματος Τρίγωνα (Triangle Shape Irregularities)
- Τοπικός Πλεονασμός Τριγώνων (Local Triangle Redundancy)

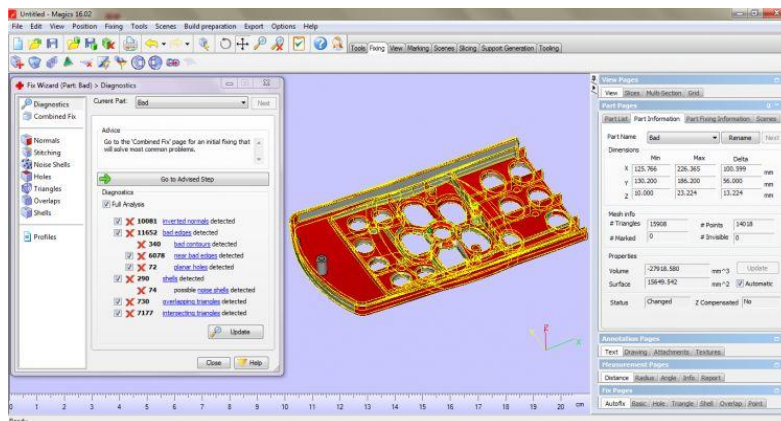
Πολλές φορές δε η πρόσβαση φορέων που θα επιτελέσουν ΤΚΠ στα πρωτογενή αρχεία (native files) της 3D γεωμετρίας για τη διόρθωση των παραπάνω σφαλμάτων, είτε δεν είναι άμεσα δυνατή, είτε σκοπίμως αποφεύγεται από τους φορείς που προσφεύγουν σε ΤΚΠ (π.χ. λόγω προστασίας διαρροής τεχνικών δεδομένων από γραφεία παροχής υπηρεσιών ΤΚΠ και προστασίας του βιομηχανικού απορρήτου γενικότερα).

Επιπλέον, για την επίτευξη αποτελεσματικότερης ΤΚΠ, την επιβολή πιθανών απαραίτητων τροποποιήσεων στη βασική γεωμετρία, τη διαίρεση της βασικής γεωμετρίας, το συνδυασμό πολλών διαφορετικών αντικειμένων σε μια φάση κατασκευής ΤΚΠ για επίτευξη οικονομικότερης κατασκευής, κλπ., συχνά προκύπτει η ανάγκη της επέμβασης επί των αρχικών αρχείων STL στη φάση των προπαρασκευαστικών ενεργειών της ΤΚΠ (Σχήμα 1.9.1.1), πριν την κύρια διαδικασία υλοποίησης της. Κάποιες από αυτές τις επεμβάσεις είναι δυνατόν να επιτελεσθούν στο ίδιο το λειτουργικό λογισμικό κάθε μηχανής ΤΚΠ, πολλές όμως όχι.

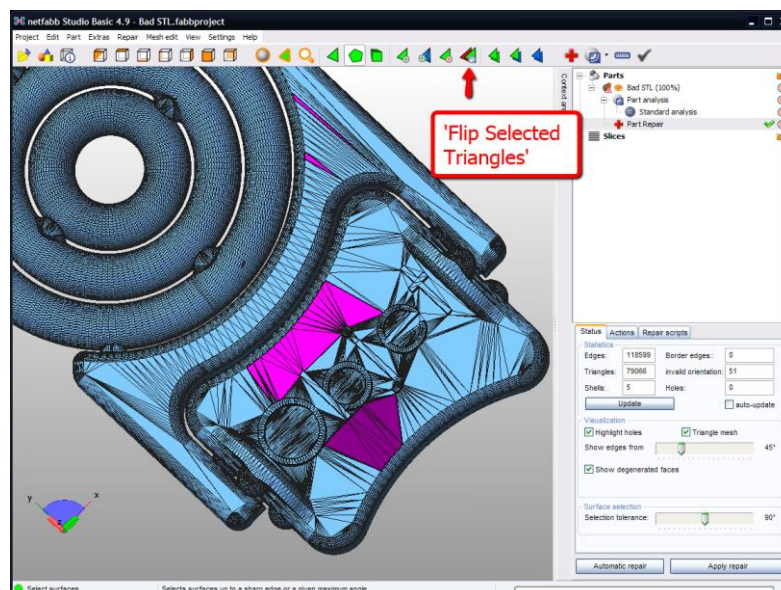
Για το σκοπό αυτό, ήδη από τα πρώτα χρόνια ανάπτυξης και εξάπλωσης της ΤΚΠ και σε παράλληλη έρευνα με αυτή, αναπτύχθηκαν και ως σήμερα έχουν εξελιχθεί σε

εμπορικό και ερευνητικό επίπεδο, αλγόριθμοι και λογισμικά, οπτικοποίησης (viewing), διαχείρισης (manipulation), τροποποίησης (modification), επεξεργασίας (editing), βελτιστοποίησης (optimization), ομαδοποίησης (packing), δημιουργίας δομών υποστήριξης (support generation) και τέλος διόρθωσης (correction/repair) των αρχείων STL, πριν τη μεταφορά τους σε διατάξεις ΤΚΠ. Τα παραπάνω, καθώς και ορισμένα λογισμικά που επίσης με τεχνικές τριγωνοποίησης (triangulation) δεδομένων (νέφους σημείων – point clouds) από 3D ψηφιοποίηση (3D digitization) υποστηρίζουν εφαρμογές ΑΣ (RE), όπως π.χ. τα RapidForm, Geomagic κ.α., δίνουν σήμερα τη δυνατότητα εκτεταμένων επεμβάσεων επί αρχείων STL, και τείνουν να καθιερωθούν ως ανεξάρτητο απαραίτητο βήμα πριν την υλοποίηση της κατασκευής στις εφαρμογές ΤΚΠ.

Τα σημαντικότερα σήμερα εμπορικά λογισμικά επεξεργασίας αρχείων STL προέρχονται από το Βέλγιο (Materialise – Magics), τη Γερμανία (Netfabb GmbH – Netfabb Studio) και το Ηνωμένο Βασίλειο (Deskartes – 3Data Expert). Χαρακτηριστικές εικόνες από το γραφικό περιβάλλον ορισμένων παριστάνται στο Σχήμα 1.9.3.3.



(α) Materialise Magics RP



(β) Netfabb Studio

Σχήμα 1.9.3.3: Περιβάλλον λογισμικών επεξεργασίας αρχείων STL

#### 1.9.4 Κατάταξη, Κατηγοριοποίηση και κύριες Τεχνολογίες ΤΚΠ

Για την κατάταξη των τεχνολογιών ΤΚΠ έχουν χρησιμοποιηθεί ως σήμερα και αναφέρονται, [Kruth, 1991; Negis, 1995; Pham & Dimov, 2001; Gebhardt, 2003; Chua et al., 2010], αρκετοί τρόποι.

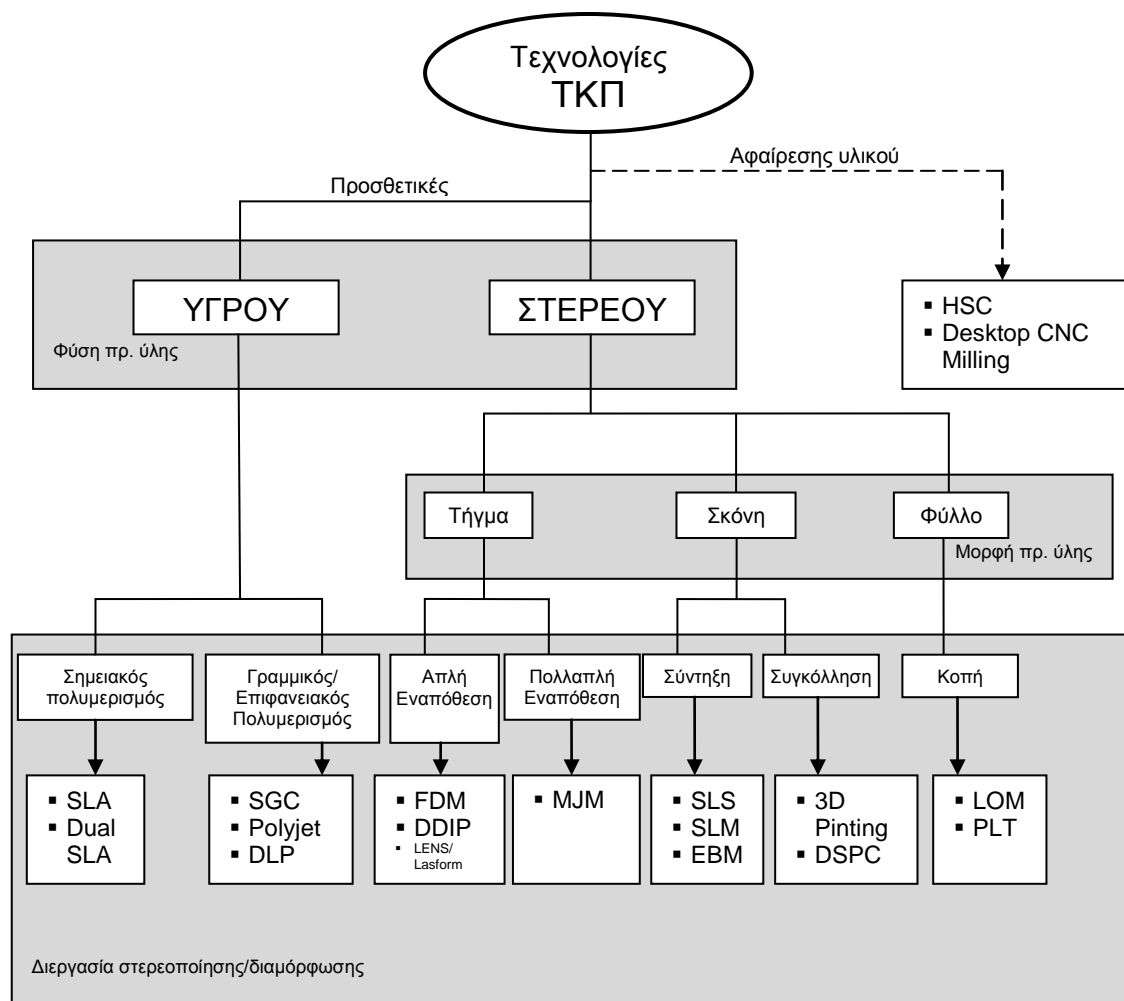
Κατά την πρώτη περίοδο εμφάνισης και βασικής εξέλιξης των τεχνολογιών, και με πρωτοπόρο και κυρίαρχη αρχικά την τεχνολογία της Στερεολιθογραφίας, η πρώτη βασική διάκριση των τεχνολογιών ΤΚΠ γινόταν με βάση το χρησιμοποιούμενο μέσο/φυσική αρχή για την κατασκευή/στερεοποίηση των πρωτοτύπων, κατατάσσοντας τις σε αυτές που χρησιμοποιούσαν lasers (laser based) και σε αυτές που δεν χρησιμοποιούσαν laser, αλλά κάποια άλλη μέθοδο (non-laser based).

Μπαίνοντας στην δεύτερη περίοδο της ραγδαίας ανάπτυξης, διερεύνησης και διάδοσης της ΤΚΠ, άρχισε να επικρατεί διεθνώς η κατάταξη των τεχνολογιών με βάση τη φύση της χρησιμοποιούμενης για τα πρωτότυπα πρώτης ύλης (στερεά, κονιοποιημένη, υγρή ή άλλη).

Με την τρίτη περίοδο της ωρίμανσης και διεύρυνσης των τεχνολογιών ΤΚΠ ως και σήμερα, αρχίζει να έχει έννοια και η κατάταξη τεχνολογιών και κυρίως συστημάτων και μηχανών και με βάση (α) το κόστος κτήσης, (β) την κλίμακα μεγεθών και την κλάση ακρίβειας, αλλά και (γ) την σκοπούμενη εφαρμογή, χρήση (γενική ή ειδική) και την εξυπηρετούμενη αγορά ή δραστηριότητα. Έτσι λοιπόν με τα σημερινά δεδομένα οι τεχνολογίες-συστήματα ΤΚΠ μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε:

- Προσωπικούς πολύ χαμηλού κόστους (<1500 US\$) 3Δ εκτυπωτές, κυρίως οικιακής και σχολικής αξιοποίησης.
- Μικρού σχετικά κόστους (1500 έως 20000 US\$) 3Δ εκτυπωτές, επαγγελματικής χρήσεως για αξιοποίηση από μηχανικούς, σχεδιαστές, μικρά γραφεία και εκπαιδευτικούς φορείς.
- Μεσαίου κόστους (15000 έως 70.000 US\$) και κλίμακας συστήματα ΤΚΠ, υψηλότερων χαρακτηριστικών, ικανά για επαγγελματική και βιομηχανική αξιοποίηση. Σε αυτά κατά πλειοψηφία κατηγοριοποιούνται και τα περισσότερα σήμερα υπάρχοντα διαφοροποιημένα-εξειδικευμένα συστήματα για την αργυροχρυσοχοΐα, την οδοντιατρική και τα χυτήρια.
- Μεγάλου κόστους (από 70.000 έως και 800.000 US\$) βιομηχανικά συστήματα, προς εξυπηρέτηση κυρίως μεγάλων βιομηχανικών φορέων που ασχολούνται με το σχεδιασμό και την παραγωγή, ορισμένα από τα οποία υποστηρίζουν και την Ταχεία Παραγωγή (Rapid Manufacturing) τελικών προϊόντων μικρής έως μεσαίας σειράς.

Σε τεχνολογικό και επιστημονικό επίπεδο όμως, ο αντιπροσωπευτικότερος και περιγραφικότερος τρόπος κατάταξης και κατηγοριοποίησης τεχνολογιών και συστημάτων ΤΚΠ (είτε πρόκειται για εμπορικές είτε για ερευνητικές τεχνολογίες), παραμένει εκείνος που βασίζεται στη φύση και στον τρόπο μετουσίωσης της πρώτης ύλης σε στερεό πρωτότυπο αντικείμενο. Ο πλήρης «χάρτης» εμπορικών και ερευνητικών τεχνολογιών ΤΚΠ με βάση τη θεώρηση αυτή, έχει δοθεί με ικανοποιητική πληρότητα από τον E.Negis [Negis, 1995]. Για τους σκοπούς της παρούσας ΔΔ, και με βάση την ίδια θεώρηση οι κυριότερες βασικές τεχνολογίες που έχουν φθάσει σε επίπεδο ικανοποιητικής εμπορικής αξιοποίησης τους και παγκοσμίου διάδοσης συνοψίζονται παραστατικά στο Σχήμα 1.9.4.1.



Σχήμα 1.9.4.1: Κατηγοριοποίηση κύριων τεχνολογιών ΤΚΠ

Με βάση την ανωτέρω κατάταξη, ακολουθεί η παράθεση βασικών στοιχείων και χαρακτηριστικών των σημαντικότερων εμπορικά αξιοποιημένων ως σήμερα τεχνολογιών ΤΚΠ.

#### ❖ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΥΓΡΟΥ

Όλες οι τεχνολογίες ΤΚΠ υγρής πρώτης ύλης, είτε σημειακής είτε γραμμικής/επιφανειακής στερεοποίησης, βασίζονται στην αρχή του φωτοπολυμερισμού (Photopolymerization). Κατά τον φωτοπολυμερισμό, [Jacobs, 1992], οργανικά μόρια μονομερούς υλικού σε υγρή ή ρευστή μορφή (πάστα), υπό την επίδραση φωτός κατάλληλου φάσματος (μήκους κύματος της τάξεως των 254 nm) και ισχύος δημιουργούν μεταξύ τους πολυμερείς αλυσίδες, οδηγώντας το υλικό σε στερεοποίηση. Η τεχνική του φωτοπολυμερισμού εκτός από την ΤΚΠ, βρίσκει και άλλες εφαρμογές όπως στην εκτυπωτική και στην οδοντιατρική για την στερεοποίηση και σκλήρυνση σφραγισμάτων.

#### ➤ Στερεολιθογραφία, Stereolithography – SLA (Σημειακή Στερεοποίηση)

Η Στερεολιθογραφία, όπως έχει προαναφερθεί είναι η πρώτη και παλαιότερη ΤΚΠ και μια από τις τεχνολογίες με μεγάλη παγκόσμια εγκατεστημένη βάση.



Παρουσιάστηκε και κατοχυρώθηκε το 1987 από τον Αμερικανικό οίκο 3D Systems Inc.

Εκτός από την 3D Systems Inc., διατάξεις τεχνολογίας Στερεολιθογραφίας ή κάποιας παραλλαγής της διέθεσαν στο παρελθόν ή διαθέτουν σήμερα και οι οίκοι:

- EOS GmbH – Γερμανία
- F&S GmbH (Fockele & Schwarze) – Γερμανία
- AAROFLEX, Inc. – Γαλλία
- SONY/D-MEC (Ιαπωνία) – Ιαπωνία
- CMET – Ιαπωνία
- DWS s.r.l – Ιταλία
- Beijing Yinhua Laser Rapid Prototypes Making and Mould Technology Co., Ltd. – Κίνα

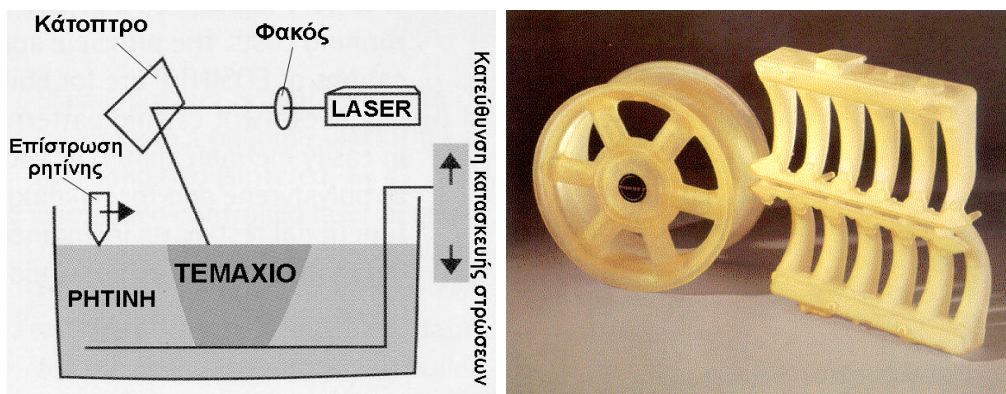
Στην SLA πραγματοποιείται κατασκευή αντικειμένων με σημειακό φωτοπολυμερισμό – στερεοποίηση υγρής ρητίνης με τη χρήση ενός ή και περισσότερων ακτίνων laser υπεριώδους (UV) ακτινοβολίας (συνήθως He-Cd ή και Solid State). Η ρητίνη περιέχεται σε υγρή μορφή σε κάδο. Μια διάταξη κατόπτρων οδηγεί την ακτίνα laser στα επιθυμητά σημεία της επιφάνειας του κάδου που πρόκειται να στερεοποιηθούν. Η ακτίνα χαράζει ένα πυκνό πλέγμα στη μορφή της επιφάνειας της εκάστοτε κατασκευαζόμενης στρώσης και καθ'όλο το εμβαδόν της τομής του υπό κατασκευή αντικειμένου. Μετά την ολοκλήρωση της στρώσης ο κάδος υποχωρεί κατά συγκεκριμένο βάθος και με νέα επίστρωση ρητίνης η επιφάνεια προετοιμάζεται για τη στερεοποίηση του επομένου επιπέδου.

Στη Στερεολιθογραφία είναι απαραίτητη η δημιουργία υποστηρικτικών δομών (supporting structures) σε θέσεις του πρωτοτύπου που η γεωμετρία του το καθιστά αναγκαίο (προεξοχές, κρεμάμενα τμήματα κλπ.)

Μετά το πέρας κατασκευής ακολουθεί καθαρισμός και αποστράγγιση του πρωτοτύπου από την ρητίνη και συνήθως αποπεράτωση του πολυμερισμού σε UV θάλαμο, όπου το αντικείμενο αποκτά την τελική του αντοχή.

Τα χρησιμοποιούμενα υλικά περιλαμβάνουν Εποξικές ρητίνες, Ακρυλικές Ρητίνες, Ρητίνες Βινυλεθαίρα κλπ., σε διάφανες και αδιάφανες μορφές, ποικίλους χρωματισμούς και ιδιότητες που μπορούν να προσομοιάσουν πλαστικά ABS, πολυπροπυλένιο, ελαστομερή κλπ.

Η μέθοδος σχηματικά και πρωτότυπα SLA απεικονίζονται στο Σχήμα 1.9.4.2



Σχήμα 1.9.4.2: Στερεολιθογραφία, σχηματική αναπαράσταση και πρωτότυπα

➤ Photocuring, SGC – Polyjet – DLP (Γραμμικός & Επιφανειακός Φωτοπολυμερισμός)

Αποτελούν διαφορετικές προσεγγίσεις για το φωτοπολυμερισμό ρητινών, με ουσιαστική διαφορά από τη στερεολιθογραφία ότι δεν χρησιμοποιούν Laser και σημειακή στερεοποίηση, αλλά επιλεκτικό και γραμμικό (με σάρωση) ή απευθείας επιφανειακό φωτισμό UV για τη στερεοποίηση των φωτοευαίσθητων ρητινών.

Η παλαιότερη τέτοια προσέγγιση, που όμως δεν κατάφερε να καθιερωθεί, ήταν η μέθοδος Solid Ground Curing (SGC), που αναπτύχθηκε από τον Ισραηλινό οίκο Cubital Ltd. ο οποίος έπαυσε τις δραστηριότητές του το έτος 2000, κυρίως λόγω τεχνικών προβλημάτων, υψηλής τιμής και μεγάλων λειτουργικών εξόδων των συστημάτων του, που οδήγησαν σε πολύ μικρό αριθμό εγκατεστημένων μονάδων (33 συστήματα σε 9 έτη). Η μέθοδος SGC διαμόρφωνε ολόκληρα επίπεδα ταυτόχρονα χωρίς δηλ. σημειακή χάραξη/σάρωση. Αρχικά φωτοευαίσθητη ρητίνη ψεκαζόταν στην τράπεζα κατασκευής. Στη συνέχεια αναπτυσσόταν σε γυάλινη πλάκα, με αρχή παρόμοια με αυτήν των οπτικών φωτοαντιγραφικών μηχανημάτων μια «μάσκα» / διαφάνεια της μορφής της στρώσης στο εκάστοτε επίπεδο κατασκευής. Η «μάσκα» τοποθετείτο πάνω από την τράπεζα και εκτίθετο σε υπεριώδη ακτινοβολία. Η ακτινοβολία διερχόμενη από τα διάφανα σημεία της «μάσκας» στερεοποιούσε επιλεκτικά και ταυτόχρονα τα σημεία της ρητίνης στα οποία προσέπιπτε επί του επιπέδου κατασκευής. Με την ολοκλήρωση της φάσης της στερεοποίησης, αναρροφότο η περίσσεια υγρής ρητίνης, στη θέση της ψεκαζόταν κερί για την στήριξη του αντικειμένου και ακολουθούσε κατεργασία επιπεδοποίησης (milling) της στρώσης που είχε μόλις κατασκευασθεί. Η κατασκευή συνεχιζόταν επαναληπτικά. Μετά την ολοκλήρωση, το κερί αφαιρείτο με εμβάπτιση σε διαλυτικό υγρό και λαμβάνετο το τελικό πρωτότυπο.

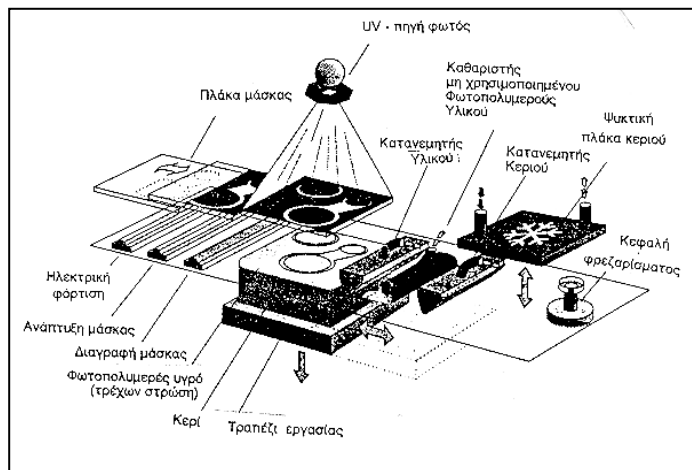
Παραλλαγή της μεθόδου SGC με την ονομασία Polyjet κατοχυρώθηκε και εν συνεχεία παρουσιάστηκε εμπορικά το έτος 2000 από τον επίσης Ισραηλινό οίκο Objet (από το 2013 στον όμιλο Stratasys) ο οποίος προσφέρει ένα μικρότερου μεγέθους και πολυπλοκότητας σύστημα, που επίσης κατασκευάζει αντικείμενα με πολυμερισμό ρητινικού υλικού δια UV ακτινοβολίας. Στη μέθοδο Polyjet ρητίνη ψεκάζεται από κεφαλή πολλών διαφορετικών εγχυτήρων (jets) μόνο στην επιφάνεια ύπαρξης υλικού του κατασκευαζομένου αντικειμένου σε κάθε επίπεδο κατασκευής. Η υπόλοιπη επιφάνεια έχει από πριν επιστρωθεί με εύτηκτο υλικό υποστήριξης. Η στερεοποίηση ακολουθεί με σάρωση της επιφάνειας από πηγή UV ακτινοβολίας χωρίς πλέον να είναι απαραίτητη η χρήση «μάσκας». Η διαδικασία επαναλαμβάνεται ως την ολοκλήρωση του αντικειμένου, το οποίο κατόπιν καθαρίζεται από το υποστηρικτικό υλικό με νερό υπό πίεση. Παρόμοια τεχνολογία παρουσίασε το 2003 και η 3D Systems, αρχικά με προϊόντα της εμπορικής ονομασίας Invision, που σήμερα διαθέτει με το εμπορικό όνομα Projet<sup>TM</sup>.

Ακόμη νεότερη (2003) παραλλαγή της μεθόδου στερεοποίησης με έκθεση σε UV φωτεινή πηγή αποτελεί η τεχνολογία Digital Light Processing (DLP) που υιοθέτησε στα συστήματα με την εμπορική ονομασία Perfactory ο Γερμανικός οίκος Envisiontec GmbH. Καρδιά του συστήματος αυτού αποτελεί ένας ψηφιακός προβολέας βασιζόμενος σε τεχνολογία “digital light processing

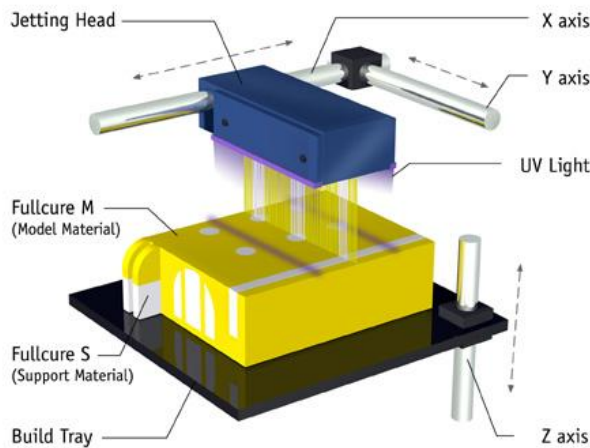
(DLP)” του οίκου Texas Instruments. Πρόκειται για ένα chip οπτικών ημιαγωγών που ελέγχουν μια πινακοποιημένη (rastered) διάταξη από 1,5 εκατομμύριο μικροσκοπικά κάτοπτρα. Τα κάτοπτρα αυτά στρέφονται αμφίπλευρα και ανεξάρτητα μέχρι και 5.000 φορές ανά δευτερόλεπτο, λειτουργώντας σαν οπτικοί διακόπτες που συνολικά συγκροτούν έναν ψηφιακό προβολέα (projector). Πηγή φωτός UV διέρχεται από τον προβολέα DLP και η εικόνα προβάλλεται με υψηλή ευκρίνεια στην επιφάνεια της ρητίνης που στερεοποιείται στην μορφή της προβαλλόμενης εικόνας. Κατά τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η απευθείας σταθερού ρυθμού κατά επίπεδο διαστρωματική κατασκευή των πρωτοτύπων.

Και οι τρεις τεχνολογίες SGC, Polyjet και DLP χρησιμοποιούν φωτοπολυμερή υλικά σε ποικιλία εμφάνισης και χαρακτηριστικών. Ο οίκος Objet (Polyjet) φημίζεται για την ιδιαίτερα μεγάλη ακρίβεια των πρωτοτύπων του (της τάξεως των λίγων δεκάδων μm), για τις πολύ λεπτές στρώσεις των 16μm που επιτυγχάνει και για την σε ορισμένα μοντέλα του ταυτόχρονη χρήση δύο (2) διαφορετικών υλικών κτίσεως. Ο οίκος Envisiontec διαφοροποιώντας την εστίαση του συστήματος DLP και τα χρησιμοποιούμενα υλικά, προσφέρει αρκετά εξειδικευμένα μοντέλα για ειδικές εφαρμογές (αργυροχρυσοχοϊά, οδοντιατρικά κλπ.)

Σχηματικά οι τεχνολογίες SGC και Polyjet απεικονίζονται στο Σχήμα 1.9.4.3



(α) SGC



(β) Polyjet™

Σχήμα 1.9.4.3: Τεχνολογίες Επιφανειακού Φωτοπολυμερισμού

## ❖ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΤΗΓΜΑΤΟΣ ΣΤΕΡΕΟΥ ΥΛΙΚΟΥ

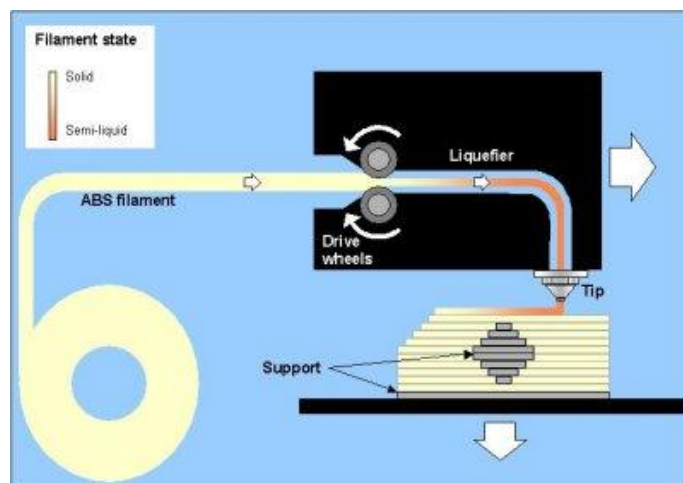
### ➤ Κατασκευή με εναπόθεση Τήγματος, Fused Deposition Modelling – FDM (Απλή Εναπόθεση)

Το πρώτο σύστημα FDM παρουσιάστηκε και κατοχυρώθηκε στην Αμερική από τον οίκο Stratasys το 1992 και βιομηχανοποιήθηκε την ίδια χρονιά. Η εταιρεία εξελίσσει έκτοτε συνεχώς μηχανές και υλικά για ΤΚΠ με FDM, έχοντας εγκαταστήσει ως σήμερα παγκοσμίως χιλιάδες συστήματα, ώστε να θεωρείται ο οίκος του χώρου της ΤΚΠ με τις περισσότερες πωλήσεις. Η πρόσφατη λήξη της βασικής πατέντας της τεχνολογίας έχει σήμερα οδηγήσει σε μια φρενήρη εφαρμογή της FDM από πολυάριθμους μικρούς ή /και μεγαλύτερους κατασκευαστές για συστήματα ΤΚΠ πολύ χαμηλού κόστους.

Η μέθοδος χρησιμοποιεί μια κινητή κατά X-Y θερμαινόμενη κεφαλή – συνήθως με δύο (2) ακροφύσια. Αυτή εναποθέτει στην τράπεζα κατασκευής τήγμα νήματος της πρώτης ύλης σε θερμοκρασία 0,5 °C πάνω από το σημείο τήξης (~240 °C για ABS θερμοπλαστικό νήμα), σε μορφή πολύ λεπτής ρευστής ίνας. Το υλικό στερεοποιείται σχεδόν αμέσως μετά την επαφή του με την τράπεζα κατασκευής. Σε κάθε στρώση πρώτα ορίζονται τα περιγράμματα και εν συνεχεία «γεμίζεται» η επιφάνεια του αντικειμένου. Κατόπιν με το 2<sup>ο</sup> ακροφύσιο προστίθεται και το απαραίτητο υποστηρικτικό υλικό. Με την ολοκλήρωση ενός στρώματος, η τράπεζα χαμηλώνει και εναποτίθεται το επόμενο στρώμα επάνω από το προηγούμενο. Μετά την ολοκλήρωση του πρωτοτύπου το υποστηρικτικό υλικό αφαιρείται είτε με μηχανικά μέσα, είτε με διάλυση σε αλκαλικό διάλυμα θερμοκρασίας 65 °C.

Η ευρεία διάδοση της μεθόδου FDM οφείλεται κυρίως στην ποικιλία και τις μηχανικές ιδιότητες των υλικών που χρησιμοποιεί και είναι κυρίως θερμοπλαστικά, ABS, πολυκαρβονικά (PC), κεριά κλπ. Με χρήση των υλικών αυτών είναι δυνατόν να κατασκευασθούν απευθείας λειτουργικά πρωτότυπα για πολλές κατηγορίες προϊόντων. Από τη φύση της ίδιας της μεθόδου όμως δεν επιτυγχάνονται ιδιαίτερα λεπτές στρώσεις ή πολύ υψηλές ακρίβειες.

Η αρχή λειτουργίας της FDM φαίνεται στο Σχήμα 1.9.4.4.

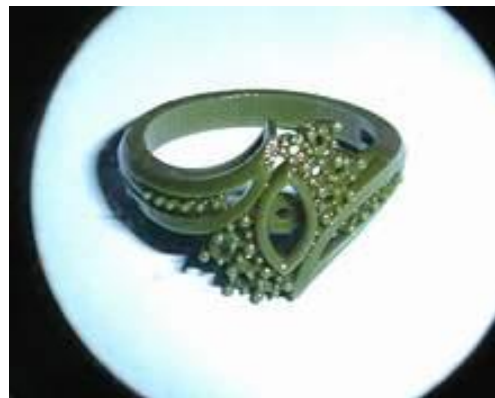
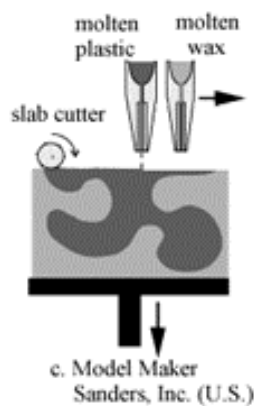


Σχήμα 1.9.4.4: Τεχνολογία FDM

➤ Drop on Demand Inkjet Plotting – DDIP (Micro droplet fabrication – mdf, Απλή Εναπόθεση)

Η εταιρεία που εισήγαγε τη συγκεκριμένη τεχνολογία είναι η Sanders Design International (SDI). Την ανέπτυξε και παρουσίασε περίπου το 1994, οπότε και ιδρύθηκε ο οίκος Sanders Prototyping Inc. (SPI), με σκοπό τη βιομηχανοποίηση της. Το 2000 η SPI μετονομάστηκε σε Solidscape της οποίας τα συστήματα είναι εξειδικευμένα κυρίως για εφαρμογές αργυροχρυσοχοΐας και χυτεύσεων χαμένου κεριού, με υψηλές ακρίβειες και πολύ λεπτές στρώσεις. Σήμερα και η Solidscape ανήκει πλέον στο όμιλο της μεγαλύτερης Stratasys.

Στην τεχνολογία DDIP λειτουργούν δύο κεφαλές δοσομετρικού ψεκασμού πρώτης ύλης. Η μια κεφαλή ψεκάζει τήγμα θερμοπλαστικού υλικού (ή κεριού χύτευσης) χαμηλού σημείου τήξεως, ενώ η δεύτερη ψεκάζει κεριό για την στήριξη του αντικειμένου. Μετά την περάτωση κάθε στρώσης, γίνεται επιπεδοποίηση (milling) της επιφάνειας για ομοιομορφία ύψους. Έτσι η μέθοδος επιτυγχάνει την πολύ καλή ακρίβεια της και το μικρό πάχος στρώματος. Πρωτότυπα της τεχνολογίας και σχεδιάγραμμά της στο Σχήμα 1.9.4.5.



Σχήμα 1.9.4.5: Τεχνολογία και πρωτότυπο DDIP

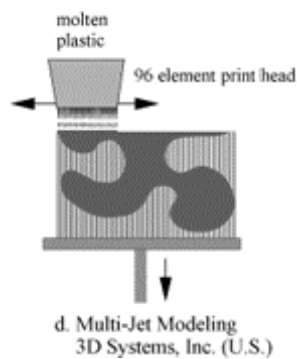
➤ Multi jet Modeling – MJM (Πολλαπλή εναπόθεση)

Ο οίκος 3D Systems επιδιώκοντας το 2000 να εισέλθει στην αγορά των χαμηλότερου κόστους συστημάτων εισήγαγε μια ακόμη παραλλαγή ΤΚΠ, κατατάσσοντάς την στην κατηγορία φθηνών και γρήγορων συστημάτων κυρίως για επιβεβαίωση σχεδιασμού (Concept Modelers, με τιμή ~50.000 US\$) συμπληρωματικά στα προϊόντα της με βάση τα φωτοπολυμερή.

Πρόκειται για τεχνολογία ψεκασμού θερμοπολυμερούς τήγματος υλικού από κατάλληλα οδηγούμενη κεφαλή 96 ψεκαστήρων για διακριτοποιημένη (rastered) εναπόθεση υλικού στο επίπεδο κατασκευής. Τα συστήματα αυτά έχουν ανάλυση ψεκασμού 300x400x600 DPI κατά XYZ και ελάχιστο πάχος επιπέδου 0,042 mm.

Τα χρησιμοποιούμενα υλικά περιελάμβαναν θερμοπολυμερή με βάση την παραφίνη και κεριό.

Σχηματικά η τεχνολογία MJM και πρωτότυπα της στο Σχήμα 1.2.8.5



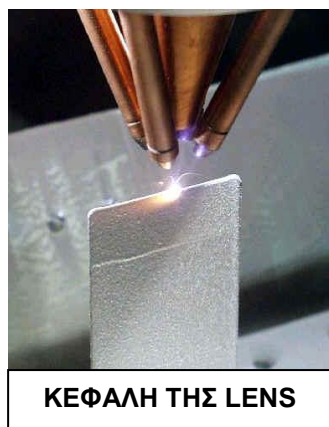
Σχήμα 1.9.4.5: Multi Jet Modeling – 3D Systems

➤ Laser Engineering Net Shaping – LENS & Laser Forming – LASFORM  
(Απλή εναπόθεση)

Η μέθοδος αναπτύχθηκε στα “Sandia National Laboratories” και κατοχυρώθηκε το 1997 από τον οίκο “Optomec”, όπου βιομηχανοποιήθηκε η μέθοδος.

Παρόμοια με την LENS είναι και η μέθοδος LASForm (Laser Forming), η οποία αναπτύχθηκε από κοινού από τα Αμερικανικά “John Hopkins University” και “Penn State University” και την “MTS Systems Corporation”, μεταξύ 1996-97. Βιομηχανοποιήθηκε από τον οίκο “Aeromet” που ιδρύθηκε ως θυγατρική της MTS το 1997.

Η μέθοδος βασίζεται στην τήξη πούδρας μεταλλικού υλικού εντός της ζώνης / πεδίου εστίασης ακτίνας Nd:YAG laser υψηλής ισχύος. Το τήγμα απορρέοντας από κατάλληλη κεφαλή επιστρώνεται κατά επίπεδα δημιουργώντας διαδοχικά μεταλλικό 3D πρωτότυπο. Κύριες εφαρμογές η κατασκευή μητρών για χύτευση με έγχυση και χύτευση μεταλλικών προϊόντων και οι επισκευές μεταλλικών εξαρτημάτων. Υλικά εφαρμογής, μείγματα μεταλλικών κόνεων, τιτάνιο, χάλυβας. Από τη φύση τους οι μέθοδοι LENS, LASFORM και οι υφιστάμενες σήμερα παραλλαγές τους έχουν χαμηλό δυναμικό εμπορικής αξιοποίησης και προσφέρονται κατά κύριο λόγο ως βιομηχανικές υπηρεσίες. Απεικόνιση και πρωτότυπο της μεθόδου LENS στο Σχήμα 1.9.4.5



**ΚΕΦΑΛΗ ΤΗΣ LENS**



**ΠΡΩΤΟΤΥΠΗ ΜΗΤΡΑ**

Σχήμα 1.9.4.5: Μέθοδος ΤΚΠ LENS

## ❖ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΚΟΝΙΟΠΟΙΗΜΕΝΟΥ ΣΤΕΡΕΟΥ ΥΛΙΚΟΥ

### ➤ Επιλεκτική Συσσωμάτωση/Τήξη με Laser, Selective Laser Sintering – SLS/ Selective Laser Melting – SLM (Σύντηξη)

Η τεχνολογία SLS αναπτύχθηκε από τον Carl Deckard στο Πανεπιστήμιο του Τέξας ως μεταπτυχιακή εργασία (Master Thesis) και κατοχυρώθηκε το 1989. Βιομηχανοποιήθηκε αρχικά από την Αμερικανική DTM Corp. και μια παραλλαγή της από την Γερμανική EOS GmbH.

Η μέθοδος SLS χρησιμοποιεί laser (ισχύος από 25-400W) για την τοπική επιλεκτική τήξη και συνένωση σωματιδίων σκόνης (διαφόρων υλικών). Η συνένωση γίνεται διαδοχικά κατά επίπεδες στρώσεις του κατασκευαζομένου αντικειμένου, μέσα σε κατάλληλο κάδο, όπου το κονιοποιημένο υλικό διατηρείται σε θερμοκρασία πλησίον του σημείου τήξης και σε ουδέτερη ατμόσφαιρα (N<sub>2</sub>). Η πλεονάζουσα σκόνη μετά τη σύντηξη υποστηρίζει το αντικείμενο, χωρίς ανάγκη άλλων υποστηρικτικών δομών. Μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής απομακρύνεται και λαμβάνεται το πρωτότυπο. Κατά την παραλλαγή της μεθόδου του οίκου EOS, χρησιμοποιείται μίγμα σκόνης και συγκολλητικής ύλης την οποία και τήκει η ακτίνα laser. Δευτερευόντως το στερεοποιημένο αντικείμενο μπαίνει σε φούρνο όπου λιώνει η συγκολλητική ύλη και συνενώνονται περαιτέρω τα σωματίδια του υλικού. Στην SLS επιτυγχάνονται πάχη στρώσεων 0,076mm.

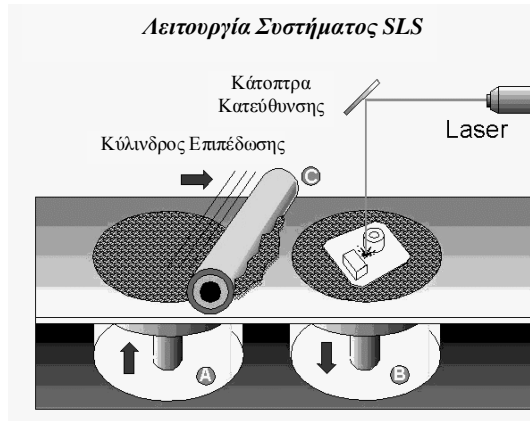
Τα χρησιμοποιούμενα υλικά έχουν μεγάλη ποικιλία περιλαμβάνοντας πολυκαρβονικά, Nylon, πολυαμιδικά, πολυμερή, ελαστομερή, χαλκό, χάλυβα, άμμο, κεριά κλπ.

Παραλλαγή της SLS αποτελεί η μέθοδος SLM, κατά την οποία με χρήση laser μεγαλύτερης ισχύος (100W έως 1KW) επιτυγχάνεται τοπικά η πλήρης τήξη και συνένωση μεταλλικών κόνεων, σε ορισμένα μάλιστα συστήματα και με πολλαπλή δέσμη laser. Τα μέταλλα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην SLM είναι ανοξείδωτοι χάλυβες, χάλυβες εργαλείων, Inconel, αλουμίνιο, κράματα Τιτανίου και κράμα Κοβαλτίου – Χρωμίου (Co212-f acc.to ASTM F45).

Σήμερα, η DTM έχει ήδη συγχωνευθεί από το έτος 2002 με την 3D Systems, ενώ αποκλειστικά συστήματα τεχνολογίας SLS διαθέτει μόνο η EOS GmbH (Γερμανία). Η εγκατεστημένη βάση μηχανών SLS και των δύο οίκων είναι αρκετά μεγάλη στα βιομηχανικής κλίμακας συστήματα, κυρίως λόγω της ποικιλίας των χρησιμοποιούμενων υλικών.

Η SLM βρήκε μεγαλύτερη διάδοση σε βιομηχανικό κυρίως επίπεδο, πιο πολύ μετά τη δεκαετία του 2000, ειδικά σε αεροδιαστημικές και βιοϊατρικές εφαρμογές, έτσι ώστε σήμερα να προσφέρεται εμπορικά από αρκετούς οίκους όπως η 3D Systems (ΗΠΑ), η Renishaw (Ηνωμένο Βασίλειο), η SLM Solutions GmbH (Γερμανία), η Realizer GmbH (Γερμανία), η Concept Laser GmbH (Γερμανία) με την παραλλαγή εμπορικής ονομασίας LaserCUSING<sup>®</sup> της ίδιας τεχνολογίας και η Phenix (Γαλλία, πρόσφατα και αυτή στον όμιλο της 3D Systems).

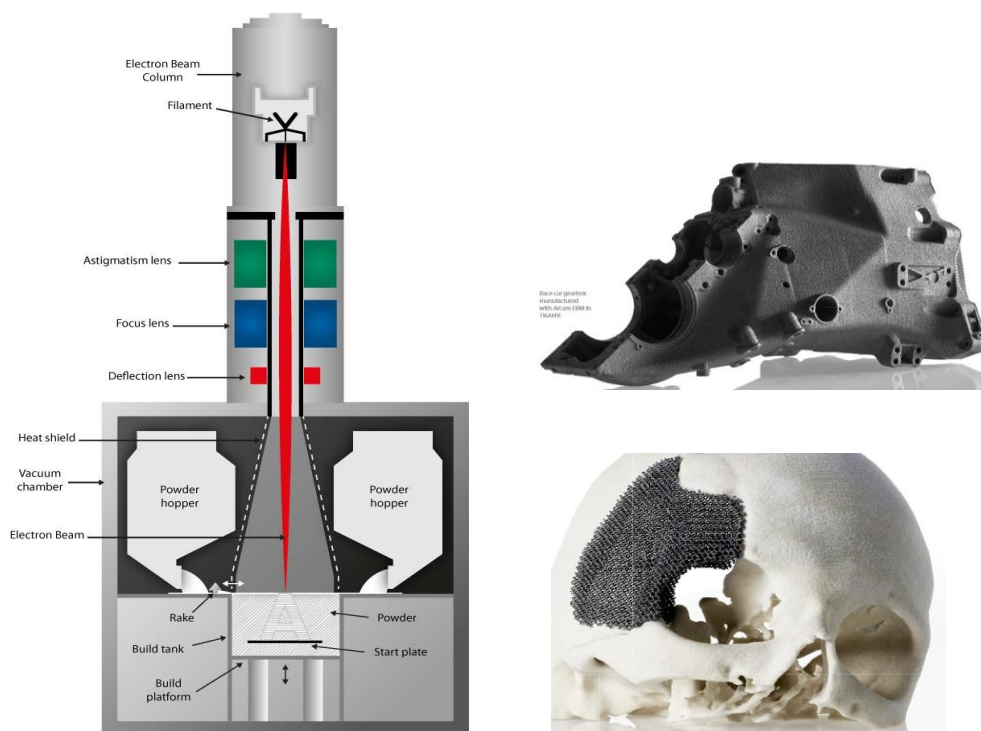
Σχηματικά η μέθοδος και πρωτότυπα SLS φαίνονται στο Σχήμα 1.9.4.6.



Σχήμα 1.9.4.6: Τεχνολογία ΤΚΠ SLS

- Τήξη με Δέσμη Ηλεκτρονίων, Electron Beam Melting – EBM (Σύντηξη)  
 Το 1993 υπεβλήθη προς κατοχύρωση μια μέθοδος ΤΚΠ για την διαστρωματική κατασκευή στερεών αντικειμένων με τήξη αγωγίμης σκόνης μέσω δέσμης ηλεκτρονίων. Ονομάστηκε Electron Beam Melting (EBM). Η μέθοδος ξεκινώντας από ερευνητικά αποτελέσματα του Πανεπιστημίου Chalmers University of Technology στο Γκέτεμποργκ της Σουηδίας, εξελίχθηκε σε εμπορική τεχνολογία από τον Σουηδικό οίκο Arcam AB που ιδρύθηκε με αυτό το σκοπό το 1997. Τα πρώτα συστήματα ΤΚΠ στερεοποίησης μεταλλικών υλικών με τεχνολογία EBM, διατέθηκαν και εγκαταστάθηκαν το 2002 και έκτοτε επεκτάθηκαν βρίσκοντας εφαρμογή κυρίως σε αεροδιαστημικές εφαρμογές και ορθοπεδικά / ιατρικά εμφυτεύματα.  
 Η μέθοδος μοιάζει αρκετά με την SLS, μόνο που εδώ χρησιμοποιούνται μείγματα σκόνης διαφόρων κραμάτων τιτανίου και Κοβαλτίου-Χρωμίου, που την τοπική τους σύντηξη επιτελεί υψηλής ισχύος (έως 3,5 KW) δέσμη ηλεκτρονίων σε περιβάλλον κενού (Πίεση  $1 \times 10^{-5}$  mbar). Πρόσφατα ο οίκος Arcam έχει εμφανίσει και μοντέλα με πολλαπλές δέσμες για τη στερεοποίηση των υλικών. Τα συστήματα EBM είναι βιομηχανικής κλάσης και υψηλού κόστους (700–800.000 €). Η μέθοδος EBM σχηματικά και πρωτότυπα τιτανίου απεικονίζονται στο Σχήμα 1.9.4.7.





Σχήμα 1.9.4.7: Τεχνολογία EBM & πρωτότυπα τιτανίου

➤ 3Δ Εκτύπωση, 3D Printing – 3DP (Συγκόλληση)

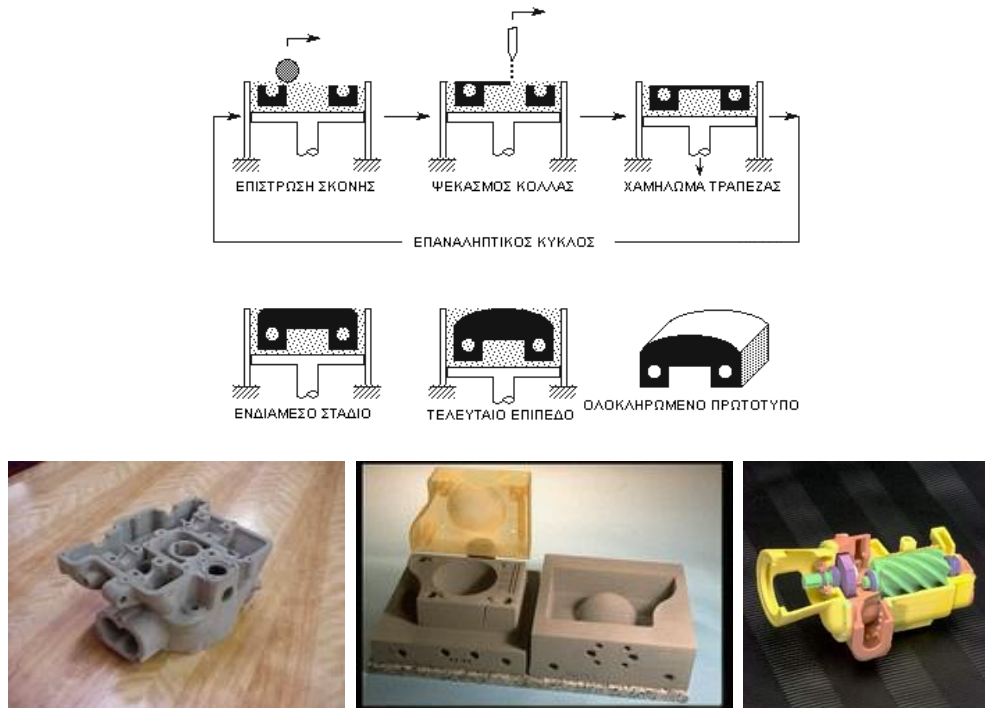
Αναπτύχθηκε και κατοχυρώθηκε από το γνωστό πανεπιστήμιο MIT (ΗΠΑ) το 1993. Άδεια χρήσεως της τεχνολογίας έχει παραχωρηθεί μέχρι σήμερα στις ακόλουθες εταιρείες:

- Z-Corporation, για πλαστικά και πολυμερή πρωτότυπα (Το 2012 εξαγοράστηκε από την 3D Systems).
- Soligen (μέθοδος DSPC – Direct Shell Production Casting), για κεραμικά πρωτότυπα μητρών χύτευσης ακριβείας
- Extrude Hone (PROMETAL), για μεταλλικά πρωτότυπα
- Specific Surface Corporation, για κατασκευή κεραμικών φίλτρων πορώδους μορφής.
- Therics, για ιατρικές εφαρμογές
- TDK Corporation.

Η μέθοδος μοιάζει στην λειτουργία της με τους απλούς εκτυπωτές ψεκασμού μελάνης (ink-jet printer). Αντί για μελάνη ψεκάζεται συγκολλητική ύλη σε καθορισμένες θέσεις της επιφάνειας στρώματος κονιοποιημένου υλικού (αμυλώδους, κυτταρινικού, θερμοπλαστικού, πολυεστερικού, κεραμικού, μεταλλικού κλπ.). Με τον ψεκασμό της συνδετικής ύλης στερεοποιείται μέρος του υλικού και η κατασκευή προχωρά επαναληπτικά. Για την επίτευξη μεγαλύτερης συνοχής και αντοχής του πρωτοτύπου (στα κεραμικά και μεταλλικά κυρίως) ακολουθεί συχνά όπως και στην SLS μετεπεξεργασία σε κλίβανο όπου συντελείται σύντηξη των κόκκων της συνδετικής ύλης και της πρώτης ύλης. Το τελικό αντικείμενο λαμβάνεται αφού καθαριστεί από την πλεονάζουσα σκόνη. Μετά το 2000 η μέθοδος εμπλουτίστηκε (σε κάποια

μοντέλα με τη χρήση χρωστικών στην συνδετική ύλη με τα οποία είναι δυνατόν λαμβάνονται έγχρωμα πρωτότυπα.

Σχηματική αναπαράσταση της μεθόδου και πρωτότυπα 3DP στο Σχήμα 1.9.4.8



Σχήμα 1.9.4.8: Μέθοδος & πρωτότυπα 3DP

#### ❖ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΦΥΛΛΩΝ ΣΤΕΡΕΟΥ ΥΛΙΚΟΥ

##### ➤ Κατασκευή Αντικειμένων με Επάλληλα Φύλλα Υλικού, Laminated Object Manufacturing – LOM (Κοπή)

Αναπτύχθηκε από τον οίκο Helisys Inc. (ΗΠΑ), και έλαβε την πρώτη πατέντα κατοχύρωσης το 1988. Βιομηχανοποιήθηκε και το πρώτο σύστημα κατασκευής πρωτοτύπων αντικειμένων από φύλλο χαρτιού επωλήθη το 1991. Με εγκατεστημένη βάση περίπου 350 μηχανών σε 36 χώρες, η εταιρεία μετονομάστηκε σε Cubic Technologies Inc. το έτος 2000. Σήμερα έχοντας υποχωρήσει σε επίπεδο εξέλιξης, ο οίκος Cubic Technologies Inc. δεν πωλεί πλέον νέα συστήματα, αλλά εξακολουθεί να συντηρεί έναν αριθμό από αυτά που ακόμα χρησιμοποιούνται από διάφορους φορείς σε πλήθος μηχανολογικών και άλλων εφαρμογών.

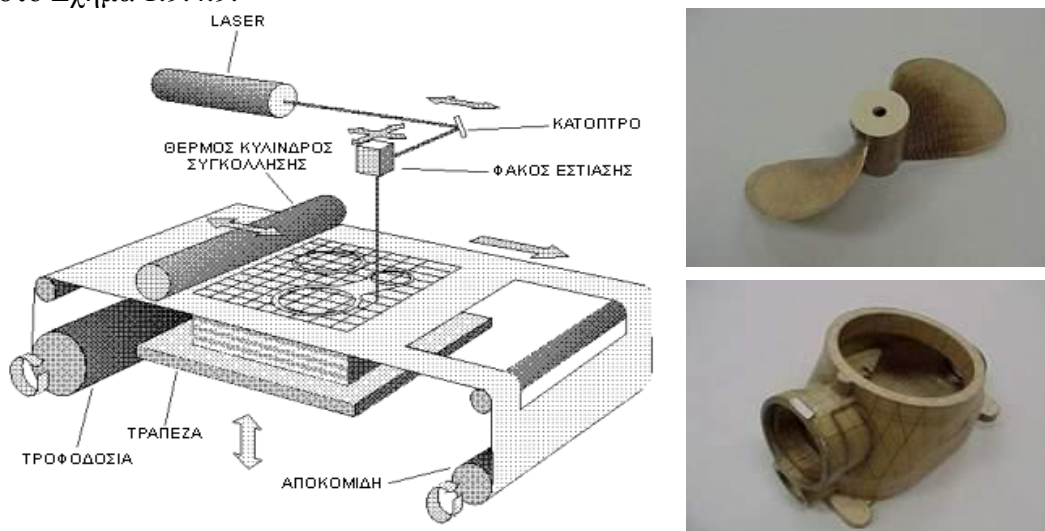
Το 1996, στα πλαίσια του Ερευνητικού Προγράμματος ΕΠΕΤ II – ΝΕΚΤΑΡ με τίτλο «Ανάπτυξη Εγκαταστάσεων για την Ταχεία Δημιουργία Πρωτοτύπων», το Ε.Μ.Π. απέκτησε και εγκατέστησε το μοντέλο LOM 1015 τεχνολογίας LOM της εταιρείας, που συνεχίζει να λειτουργεί και να αξιοποιείται μέχρι σήμερα μέσα στα πλαίσια του θεσμοθετημένου εργαστηρίου ΤΚΠ & Ε, του Τομέα ΜΚ&ΑΕ, της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών.

Καθώς η λειτουργία και οι επιδόσεις της τεχνολογίας LOM, απετέλεσαν ερευνητικό αντικείμενο της παρούσας ΔΔ, η λειτουργία της και περισσότερα

τεχνικά χαρακτηριστικά της μηχανής LOM1015 θα δοθούν αναλυτικά σε επόμενο κεφάλαιο.

Συνοπτικά εδώ θα αναφερθεί μόνο, πως η μέθοδος LOM χρησιμοποιεί ως πρώτη ύλη ρολά (rolls) φύλλου χαρτιού επικαλυμμένου με θερμοσυντηκόμενη συγκολλητική ρητίνη, και αποδίδει αντικείμενα που μοιάζουν με ξύλινα. Σε μία τυπική διάταξη LOM, το αντικείμενο κτίζεται επί κατακόρυφα κινούμενης (κατά τον Z-άξονα) τράπεζας. Ένας θερμαινόμενος και οριζοντίως κυλιόμενος επί της τράπεζας κύλινδρος συγκολλά τα επίπεδα φύλλα των στρώσεων μεταξύ τους. Μία διάταξη περιστρεφόμενων κυλίνδρων τροφοδοτεί την απαραίτητη πρώτη ύλη και απάγει την περίσσειά της. Μία μονάδα laser CO<sub>2</sub> (25 έως 50W) με την οποία επιτελείται η κοπή των φύλλων στερεής πρώτης ύλης συνδυάζεται με μία CNC διάταξη κατόπτρων και φακού εστίασης. Η τελευταία μετακινεί κατά το X-Y επίπεδο το ίχνος της ακτίνας laser επί της επιφάνειας της εκάστοτε αποδιδόμενης στρώσης. Με τον τρόπο αυτό η ακτίνα απλά περικόπτει το πλήρες (εξωτερικό και εσωτερικό) περίγραμμα της μορφής του αντικειμένου στο εκάστοτε επίπεδο κατασκευής, καθώς το υλικό είναι ήδη στερεό. Το πλεονάζον υλικό του φύλλου της πρώτης ύλης (φύρα) κόβεται από την ακτίνα σε ορθογώνιο πλέγμα, δημιουργώντας προοδευτικά ορθογωνικής διατομής στήλες που θα αφαιρεθούν μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής. Κατά την πρόοδο της κατασκευής, το πλεονάζον υλικό στηρίζει επαρκώς το κατασκευαζόμενο πρωτότυπο, χωρίς ανάγκη άλλων υποστηρικτικών δομών. Με την ολοκλήρωση μιας επίπεδης τομής τροφοδοτείται νέα στρώση πρώτης ύλης, που συγκολλάται με τη βοήθεια του θερμού κυλίνδρου επάνω στην αμέσως προηγούμενή της και ο κύκλος επαναλαμβάνεται μέχρι την ολοκλήρωση της κατασκευής του αντικειμένου. Για την παραλαβή του πρωτοτύπου απαιτείται χειρονακτική αφαίρεση των κύβων του πλεονάζοντος υλικού και ακολουθεί επιφανειακή αποπεράτωση του πρωτοτύπου.

Σχηματικό διάγραμμα της μεθόδου και ενδεικτικά πρωτότυπα LOM δίνονται στο Σχήμα 1.9.4.9.



Σχήμα 1.9.4.9: Τεχνολογία & Πρωτότυπα LOM

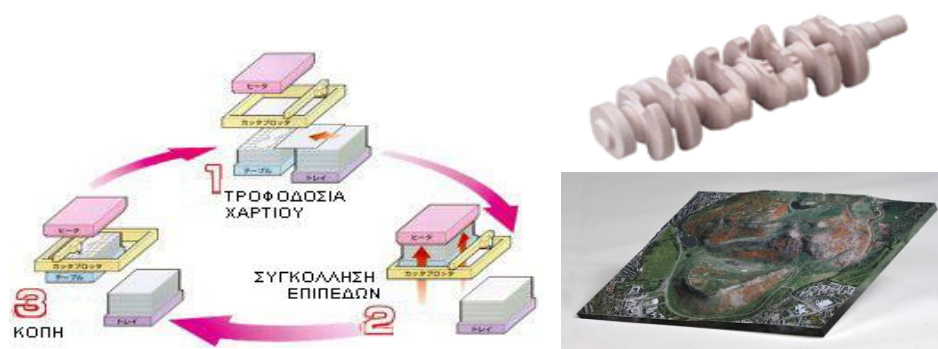
➤ Paper Laminating Technology – PLT / Plastic Sheet Lamination – PSL

Η τεχνολογία PLT αναπτύχθηκε και βιομηχανοποιήθηκε το 1994 από τον Ιαπωνικό οίκο “KIRA Corporation”, κατασκευαστή εργαλειομηχανών CNC και κοπτικών. Έχει εγκατεστημένη βάση μόνο στην Ιαπωνία. Αποτελεί παραλλαγή της μεθόδου LOM. Η διαφορά έγκειται αφενός στο ότι χρησιμοποιεί απευθείας φύλλα χαρτιού τυποποιημένης διάστασης, όπως ένα φωτοαντιγραφικό μηχάνημα, όπου το τρέχον επίπεδο συγκολλάται με τα προηγούμενα με τη βοήθεια θερμής πλάκας, και αφετέρου στο ότι οι επίπεδες τομές αποδίδονται από κατάλληλα κατευθυνόμενο (CNC) κοπτικό εργαλείο και όχι με χρήση Laser.

Περί το 2005 ιδρύθηκε στις ΗΠΑ ο οίκος Solido 3D, ο οποίος βασιζόμενος στην διαστρωματική κατασκευή αντικειμένων από φύλλα στερεού υλικού εισήγαγε μια χαμηλού κόστους διάταξη ΤΚΠ τεχνολογίας παρόμοιας με PLT την οποία ονόμασε Plastic Sheet Lamination – PSL, για την κατασκευή αντικειμένων από διάφανο φύλλο PVC και την οποία εμπορικά διαθέτει ως σήμερα.

Στην Ευρώπη ιδρύθηκε το 2007 ο Ιρλανδικός οίκος MCOR των αδελφών MacCormack, που ακολουθώντας τη μέθοδο PLT διαθέτει μηχανές ΤΚΠ που κατασκευάζουν αντικείμενα απευθείας με χρήση χαρτιού A4. Πρόσφατα δε παρουσίασαν και παραλλαγή του συστήματος τους που, με τρόπο παρόμοιο με την τεχνολογία 3DP, εφαρμόζει στις στρώσεις χρωστικές οδηγώντας τελικά σε έγχρωμο χάρτινο πρωτότυπο.

Η αρχή λειτουργίας και πρωτότυπα PLT στο Σχήμα 1.9.4.10.



Σχήμα 1.9.4.10: Τεχνολογία & Πρωτότυπα PLT

Εκτός από τις προαναφερθείσες εμπορικά αξιοποιηθείσες τεχνολογίες, καταγράφονται βιβλιογραφικά και αρκετές μέθοδοι ικανές για ΤΚΠ, παραλλαγές οι περισσότερες λίγο ως πολύ των προαναφερομένων. Εκφεύγει του σκοπού της παρούσας διατριβής να γίνει ειδικότερη αναφορά και σε αυτές, καθώς κάποιες παρέμειναν αμιγώς σε ερευνητικό – εργαστηριακό επίπεδο, άλλες δεν προσέφεραν κάποια αξιοσημείωτη καινοτομία σε σχέση με τις βασικές τεχνολογίες ΤΚΠ και δεν εξελίχθηκαν εμπορικά, ενώ ορισμένες εξαγοράστηκαν πριν την εμπορική τους εκμετάλλευση από κυρίαρχους οίκους ΤΚΠ (π.χ. 3D Systems) για λόγους τεχνολογικής και εμπορικής προστασίας των δικών τους συστημάτων. Καθίσταται δε ήδη σαφές ότι οι εμπορικές και μόνο τεχνολογίες, με χαρακτηριστικά επαγγελματικής και βιομηχανικής αξιοποίησης, είναι σήμερα ήδη πολυάριθμες, διαφορετικές μεταξύ τους, προσφέρονται σε πλήθος κλιμακούμενων συστημάτων, με έντονες διαφορές σε τιμή, εφαρμογές, υλικά, χαρακτηριστικά και επιδόσεις.

## 1.10 Ταχεία Κατασκευή Εργαλείων (ΤΚΕ)

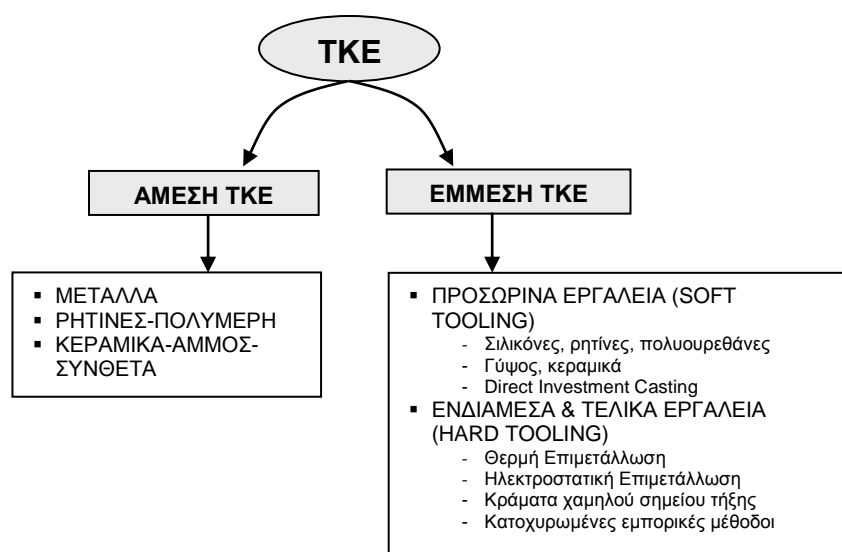
### 1.10.1 Γενικά

Η Ταχεία Κατασκευή Εργαλείων – ΤΚΕ (Rapid Tooling – RT), είναι εξορισμού της η φυσική συνέχεια, το σημαντικό «επόμενο βήμα» των Τεχνολογιών Ταχείας Κατασκευής Πρωτοτύπων, [Hague & Reeves, 2000; Pham & Dimov, 2001; Gebhardt, 2003; Σφαντζικόπουλος, 2003]. Χρησιμοποιείται προκειμένου, αντί για μεμονωμένα πρωτότυπα αντικειμένων και προϊόντων, να μπορούν να κατασκευασθούν με γρήγορο και οικονομικό τρόπο πρωτότυπα και βοηθητικά/ ενδιάμεσα εργαλεία παραγωγής (μήτρες, καλούπια κλπ.). Από τα εργαλεία αυτά, εν συνεχεία θα μπορούν να παραχθούν πολλαπλά αντίγραφα λειτουργικών ή/και τεχνικών πρωτοτύπων, μέχρι και μικρή σειρά κανονικής παραγωγής (έως μερικών χιλιάδων τεμαχίων) των ίδιων των προϊόντων.

Οι τεχνολογίες ΤΚΕ βιβλιογραφικά ορίζονται και κατατάσσονται σε:

- Άμεση ΤΚΕ (Direct Tooling): Πρόκειται για όσες αυτούσιες τεχνολογίες ΤΚΠ είναι ικανές και χρησιμοποιούνται ούτως ώστε, με την κατάλληλη πρώτη ύλη και κατά περιπτώσεις με ειδική μετεπεξεργασία του πρωτοτύπου, να παράξουν απευθείας εργαλείο (βοηθητικό ή καλούπι, έστω και μικρής σειράς) για συγκεκριμένη μέθοδο παραγωγής (π.χ. χύτευση πλαστικών με έγχυση, ηλεκτρόδια EDM, κλπ).
- Έμμεση ΤΚΕ (Indirect Tooling): Σειρά από – συμβατικές ως επί το πλείστον – δευτερεύουσες μεθόδους και αλυσίδες διαδικασιών, που εκκινούν από πρωτότυπο εκ τεχνολογίας ΤΚΠ για να καταλήξουν σε:
  - ο Προσωρινά εργαλεία παραγωγής λειτουργικών πρωτοτύπων του υπό ανάπτυξη προϊόντος σε μικρή σειρά (Soft Tooling).
  - ο Ενδιάμεσα (βοηθητικά) και τελικά εργαλεία παραγωγής (καλούπια μικρής και κανονικής σειράς) για παραγωγή του προϊόντος με την οριστική μέθοδο παραγωγής (Hard Tooling).

Η παραπάνω κύρια διάκριση και βασική κατάταξη των τεχνολογιών ΤΚΕ φαίνεται παραστατικά στο Σχήμα 1.10.1.1



Σχήμα 1.10.1.1: Βασική κατάταξη τεχνολογιών ΤΚΕ

Οι μέθοδοι παραγωγής που κατεξοχήν αξιοποιούν την ΤΚΕ είναι :

- ✓ Χύτευση πλαστικών με έγχυση – Injection Molding
- ✓ Διαμόρφωση πλαστικών-πολυμερών-ελαστομερών υπό κενό – Vacuum Forming
- ✓ Διαμόρφωση ελαστομερών με εξώθηση – Extrusion
- ✓ Χύτευση σε άμμο – Sand Casting
- ✓ Χύτευση σε μεταλλικό τύπο – Die Casting
- ✓ Χύτευση υπό πίεση – Pressure Die Casting
- ✓ Χύτευση ακριβείας – Investment/Precision Casting, Croning
- ✓ Κατεργασίες Ηλεκτροδιάβρωσης Βύθισης – Electro Discharge Machining
- ✓ Διαμόρφωση Ελασμάτων – Sheet-Metal Forming

Θα παρατεθούν παρακάτω εν συντομία οι πλέον καθιερωμένες ως σήμερα εφαρμογές και διαδικασίες ΤΚΕ που είναι κατοχυρωμένες από εμπορικούς οίκους κατασκευής και εμπορίας συστημάτων ΤΚΠ ή/και που συστηματικά εφαρμόζονται διεθνώς από γραφεία και εταιρείες παροχής αναλόγων υπηρεσιών και αναφέρονται στη διεθνή βιβλιογραφία.

### 1.10.2 Άμεση ΤΚΕ

Περιλαμβάνει διαδικασίες εμπορικών διατάξεων ΤΚΠ, που μπορούν από κατάλληλο υλικό και σε συνδυασμό με δευτερεύουσα επεξεργασία να κτίσουν πρωτότυπο που θα χρησιμοποιηθεί το ίδιο ως εργαλείο (βοηθητικό ή και μήτρα). Για τον λόγο αυτό, παρόμοια με την ΤΚΠ και η άμεση ΤΚΕ υποδιαιρείται στην παρούσα εργασία με βάση το αποδιδόμενο υλικό.

#### ΜΕΤΑΛΛΑ

- RapidTool® (RapidSteel®): Τεχνολογία SLS του οίκου 3D Systems (πρώην DTM) που επιλεκτικά συντήκει κόκκους χάλυβα (μέσου μεγέθους 45μm) επενδεδυμένους με πολυμερές για την παραγωγή μεταλλικής μήτρας. Η μήτρα δευτερευόντως τοποθετείται σε κλίβανο όπου απομακρύνεται το πολυμερές και συντελείται εμποτισμός με χαλκό. Το τελικό καλούπι αποτελείται από 55% χάλυβα – 45% χαλκό με μηχανικές ιδιότητες παρόμοιες με αυτές χάλυβα εργαλείων (P-20) και θερμικές ιδιότητες ανώτερες του αλουμινίου. Το παραγόμενο εργαλείο μπορεί να παράξει μέχρι και 100.000 πλαστικά τεμάχια με έγχυση.
- DirectTool™: Τεχνολογία SLS της EOS. Παρόμοια με την RapidTool, χωρίς όμως συνδετική ύλη (binder) κατασκευάζει μεταλλικά εργαλεία τα οποία επεξεργάζονται κατόπιν σε θάλαμο υπέρυθρης ακτινοβολίας προκειμένου να διασυνδεθούν καλύτερα οι κόκκοι του μετάλλου και να αποκτήσουν τα εργαλεία τις τελικές τους μηχανικές ιδιότητες. Είναι δυνατή η χρήση για χύτευση πλαστικών, αλουμινίου και ψευδαργυρικών κραμάτων.
- SLM & EBM: Όλες οι μηχανές τεχνολογίας SLM & EBM που αναφέρθηκαν σε προηγούμενη παράγραφο, δύνανται να κατασκευάσουν απευθείας συμπαγές μεταλλικό αντικείμενο. Ως εκ τούτου και με δεδομένη στην γκάμα των υλικών τους την ύπαρξη Αλουμινίου, χάλυβα εργαλείων (Tools Steels) και τιτανίου, θεωρούνται εναλλακτικές Άμεσης ΤΚΕ στην περίπτωση που η κατασκευαζόμενη γεωμετρία αφορά σε μήτρες, καλούπια κλπ. και όχι σε εξαρτήματα. Πρέπει όμως να τονισθεί, ότι κατά κανόνα απαιτείται πριν την εφαρμογή και χρήση των

εργαλείων κατάλληλη λείανση και γυάλισμα των επιφανειών μορφοποίησης στο επιθυμητό για την εφαρμογή επίπεδο, καθώς πρωτογενώς τα αντικείμενα είναι σχετικά τραχιά.

- **LENS/Lasform:** Όπως ήδη αναφέρθηκε κατά την περιγραφή των τεχνολογιών αυτών, οι τεχνολογίες TKPI LENS και Lasform δημιουργούν απευθείας μεταλλικά εργαλεία με τήξη σκόνης μετάλλων και μιγμάτων. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν 21 διαφορετικά υλικά μεταξύ άλλων (316 stainless steel, Inconel 625, H13 tool steel, βολφράμιο, μείγματα τιτανίου κ.α.). Τα αντικείμενα προερχόμενα από τήξη είναι απολύτως συμπαγή και με εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες αλλά η μέθοδος αποδίδει σωστά μόνο απλά αντικείμενα με ομοιόμορφες τομές και συνήθως απαιτεί μηχανουργική αποπεράτωση των μητρών.
- Ο οίκος Extrude Hone, με την τεχνολογία 3D Printing, διαθέτει το σύστημα **PROMETAL Rapid Tooling System<sup>TM</sup>**, με το οποίο κατασκευάζονται εργαλεία και προϊόντα από χάλυβα εμποτισμένο με ορείχαλκο. Ακολουθεί επί αυτών επεξεργασία σε κλίβανο για την απόκτηση των τελικών μηχανικών ιδιοτήτων.

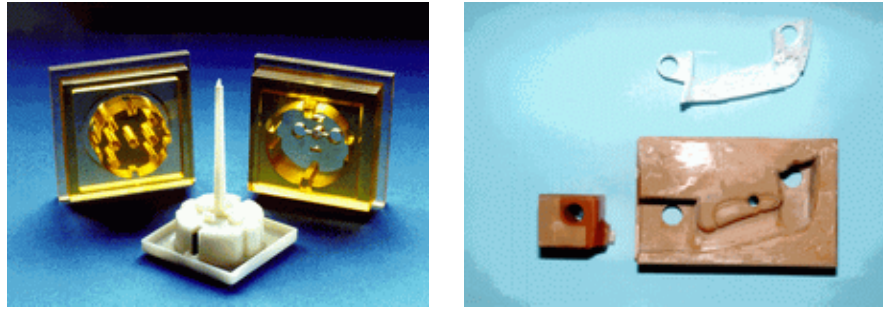
Στο Σχήμα 1.10.2.1 απεικονίζονται χαρακτηριστικά εργαλεία από Άμεση ΤΚΕ Μετάλλων.



Σχήμα 1.10.2.1: Άμεση ΤΚΕ μεταλλικών μητρών

#### ΡΗΤΙΝΕΣ – ΠΟΛΥΜΕΡΗ

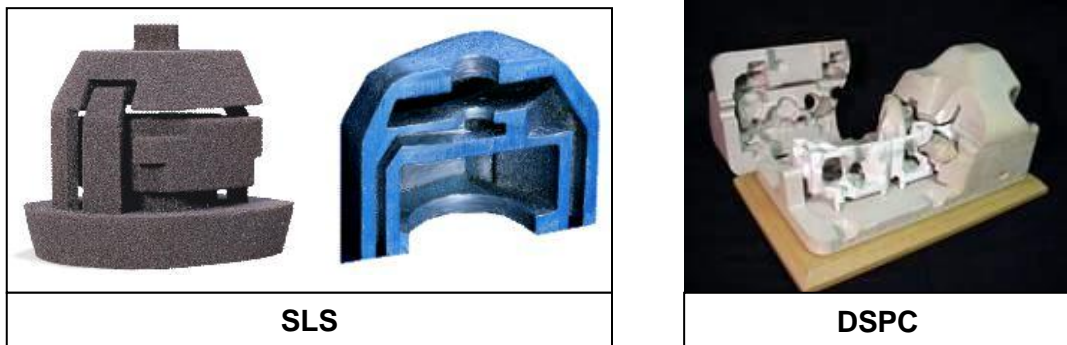
- **Direct AIM (ACES Injection Molding):** Απευθείας στερεολιθογραφική κατασκευή ρητινικών μητρών χύτευσης με έγχυση για τη χύτευση πολυαιθυλενίου, πολυστερίνης, πολυπροπυλενίου, ABS και κεριού χύτευσης. Για μέχρι και 200 χυτά αποδίδει πολύ καλή ακρίβεια. Κατά παραλλαγή της μεθόδου κατασκευάζεται μόνο ένα λεπτό κέλυφος της μήτρας, η οπίσθια επιφάνεια του οποίου πληρώνεται με εποξειδική ρητίνη (epoxy resin back-filled) αναμεμιγμένη με κόκκους και σφαιρίδια αλουμινίου για μεγαλύτερη στιβαρότητα και καλλίτερη θερμική αγωγιμότητα της μήτρας. Η λειτουργική επιφάνεια δύναται να επενδυθεί με μεταλλικό υλικό για μεγαλύτερη αντοχή σε φθορά, παράγοντας 1000-5000 πλαστικά χυτά. Μήτρες της μεθόδου Direct AIM και γεμισμένου κελύφους στο Σχήμα 1.10.2.2.



Σχήμα 1.10.2.2: Μήτρες Direct AIM & γεμισμένου κελύφους SLA

#### ΚΕΡΑΜΙΚΑ – ΑΜΜΟΣ – ΣΥΝΘΕΤΑ

- SandForm™ Zr & Si: Τεχνολογία SLS του οίκου 3D Systems (πρώην DTM). Με πρώτη ύλη μίγματα άμμου, παράγονται απευθείας μήτρες και πυρήνες χύτευσης μετάλλου σε άμμο. Αυτονόητο είναι ότι χρησιμοποιείται για πολύ μικρή σειρά προϊόντων.
- Direct Croning Process (DCP), σύστημα EOS – S: Είναι η προσέγγιση του οίκου EOS GmbH στην ίδια τεχνική για κατασκευή εργαλείων χυτών άμμου με SLS.
- DSPC: Με την τεχνολογία 3διάστατης εκτύπωσης ο οίκος Soligen παρέχει ως σήμερα απ'ευθείας τα κεραμικά κελύφη για χύτευση ακριβείας μεταλλικού προϊόντος. Φυσικά απαιτείται ένα πρωτότυπο για κάθε χυτό. Ενδεικτικά εργαλεία άμμου και κεραμικών στο Σχήμα 1.10.2.3



Σχήμα 1.10.2.3: Εργαλεία άμμου(SLS) και κεραμικά (DSPC)

### 1.10.3 Έμμεση ΤΚΕ

Για την έμμεση ΤΚΕ υιοθετείται διεθνώς η υποδιαίρεση τους σύμφωνα με την χρήση των παραγομένων εργαλείων. Ως διαδικασίες που παράγουν:

- προσωρινά εργαλεία (Soft Tools) από εναλλακτικά υλικά (κυρίως πολυμερή, ελαστομερή, κεραμικά κλπ.) για περιορισμένη παραγωγή λειτουργικών αντιγράφων του πρωτοτύπου και
- ενδιάμεσα (Bridge) ή τελικά εργαλεία (Hard Tools) από υλικά συμβατά με την εκάστοτε στοχευόμενη από το ΜΣ μέθοδο παραγωγής, προκειμένου να παραχθεί από αυτά μικρή σειρά του προϊόντος ή τεχνικά πρωτότυπα αυτού.



## ΠΡΟΣΩΡΙΝΑ ΕΡΓΑΛΕΙΑ (SOFT TOOLING)

### • Εργαλεία Σιλικόνης (RTV Silicone Tooling)

Πρωτότυπα εκ ΤΚΠ χρησιμοποιούνται ως αρχέτυπα μονέλα (Master Patterns) πάνω στα οποία χυτεύεται RTV σιλικόνη (διάφανη ή μη), σε ένα ή δύο στάδια και σε συνθήκες κενού ή ατμοσφαιρικής πίεσης. Μετά την στερεοποίησή της σιλικόνης (σε περίπου 24 ώρες με θερμοκρασία περιβάλλοντος, ή 4-5 ώρες με τη χρήση κλιβάνου θέρμανσης) η στερεοποιημένη μήτρα σιλικόνης κόβεται και αφαιρείται από αυτή το μονέλλο ΤΚΠ. Το εργαλείο (καλούπι) που προκύπτει μπορεί να χρησιμοποιηθεί για:

- Δημιουργία Πολλαπλών Λειτουργικών πρωτοτύπων πολυουρεθάνης ή εποξ.ρητίνης με χύτευση υπό κενό (Vacuum casting), βαρυτικά ή και υπό πίεση.
- Δημιουργία κέρινων αναλωσίμων μονέλλων για χύτευση ακριβείας με τη μέθοδο του χαμένου κεριού (indirect investment casting – lost wax) ή για φυγοκεντρική χύτευση (spin casting). Προκύπτουν τελικά μεταλλικά λειτουργικά πρωτότυπα ή μικρές σειρές παραγωγής μεταλλικών προϊόντων.
- Δημιουργία ενδιαμέσων εργαλείων (bridge tools) π.χ. για τύπωση και χύτευση σε άμμο, ή διαμόρφωση υπό κενό.

Με εργαλεία σιλικόνης είναι δυνατόν να παραχθούν αρκετές δεκάδες έως λίγες εκατοντάδες λειτουργικών αντιγράφων πολυουρεθάνης.

### • Εργαλεία Χυτεύσιμης Ρητίνης (Castable Epoxy Resin Tooling)

Πρωτότυπα ΤΚΠ χρησιμοποιούνται και πάλι ως μονέλλα (Master Pattern) για την χύτευση σε δύο στάδια εποξειδικής ρητίνης. Η ρητίνη συχνά αναδεύεται με κόκκους ή ρινίσματα μετάλλου προκειμένου η παραγόμενη μήτρα να εμφανίζει υψηλότερη θερμική αγωγιμότητα και αντοχή. Δυνατή είναι επίσης και η ενσωμάτωση καναλιών ψύξεως από χαλκοσωλήνα στη μήτρα. Το παραγόμενο εργαλείο (καλούπι) που προκύπτει μπορεί να χρησιμοποιηθεί για:

- Χύτευση πλαστικών με έγχυση (Μέχρι περίπου 200 τεμάχια)
- Διαμόρφωση ελασμάτων.
- Δημιουργία κέρινων αναλωσίμων μονέλλων για χύτευση ακριβείας σε μεγαλύτερους αριθμούς από τις μήτρες σιλικόνης.
- Κατασκευή παραγωγικών εργαλείων για χύτευση άμμου (μήτρες μονέλων και πυρήνων χύτευσης)
- Χύτευση μερικών δεκάδων μεταλλικών χαμηλού σημείου τήξης (π.χ. ψευδαργυρικών) προϊόντων.

### • Ελαστικά Βουλκανισμένα Εργαλεία (Vulcanised Rubber Moulds)

Προκύπτουν όπως και τα προηγούμενα, με χρήση κατάλληλων ελαστομερών υλικών και χρησιμοποιούνται στην μέθοδο της φυγοκεντρικής χύτευσης, με την οποία παράγονται κυρίως ψευδαργυρικά χυτά.

### • Γύψινες/ Κεραμικές Μήτρες (Plaster Tooling)

Με πρωτότυπα ΤΚΠ ως μονέλλα δημιουργείται γύψινη (ή κεραμική) μήτρα. Επί αυτής συντελείται βαρυτική χύτευση μεταλλικών αντικειμένων (Simulated Die Casting Process). Χυτεύονται συνήθως κράματα αλουμινίου και Zamac. Λαμβάνεται ένα πρωτότυπο χυτό ανά μήτρα. Τα παραγόμενα χυτά παρουσιάζουν μηχανικές ιδιότητες κατά 80-90% εφάμιλλες με τα κανονικά χυτά σε μεταλλικό τύπο.

- Απευθείας Χύτευση Ακριβείας (Direct Investment Casting)

Στην κατηγορία των έμμεσων και προσωρινών εργαλείων ΤΚΕ, κατατάσσεται και η απευθείας χρήση πρωτοτύπων ΤΚΕ (Τεχνολογιών: SLA-Quickcast, LOM, FDM, MJM, SLS-Trueform, DDIP κ.α.) ως αναλώσιμα μοντέλα της μεθόδου του χαμένου κεριού, υπό την προϋπόθεση ότι δεν αφήνουν κατάλοιπα μετά την καύση τους. Και αυτό διότι με αυτό τον τρόπο λαμβάνονται λειτουργικά μεταλλικά πρωτότυπα, με χρήση ΤΚΠ, αλλά σε πολύ περιορισμένους αριθμούς και χωρίς την κατασκευή παραγωγικών εργαλείων για την συγκεκριμένη μέθοδο παραγωγής (π.χ. μήτρες χύτευσης αναλωσίμων κέρινων μοντέλων).

Χαρακτηριστικά προσωρινά εργαλεία ΤΚΕ (Soft Tools) παρουσιάζονται στο Σχήμα 1.10.3.1



Σχήμα 1.10.3.1: Παραδείγματα Soft Tooling

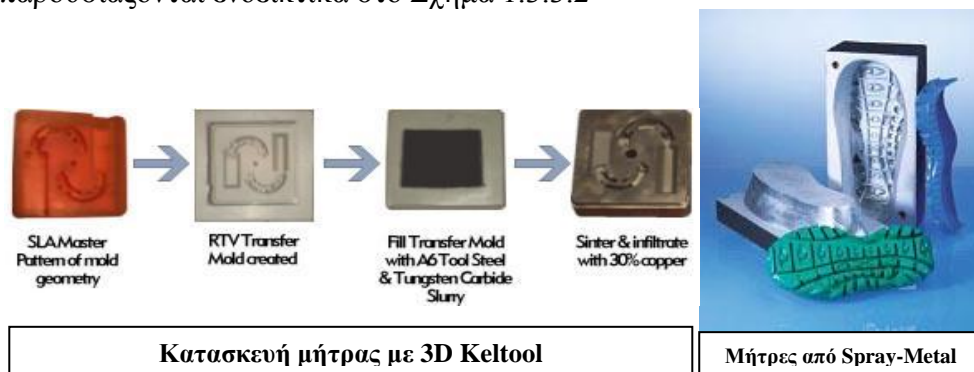
### ΕΝΔΙΑΜΕΣΑ ΚΑΙ ΤΕΛΙΚΑ ΕΡΓΑΛΕΙΑ (HARD TOOLING)

- Διαδικασία 3D Keltool (Οίκος 3D Systems)

Με τη συγκεκριμένη κατοχυρωμένη διαδικασία, επιτυγχάνεται η κατασκευή μεταλλικών μητρών από χάλυβα σε κύκλο περίπου 8 ημερών. Η μέθοδος αναπτύχθηκε και χρησιμοποιήθηκε από την 3D Systems περισσότερο τη δεκαετία του 2000, πριν την μετέπειτα ενσωμάτωση στον όμιλο και την εξέλιξη τεχνολογιών SLS και SLM απευθείας μεταλλικών αντικειμένων. Αξίζει να αναφερθεί, καθώς η εφαρμογή της μπορεί να ακολουθηθεί για πολλά μη μεταλλικά ΤΚΠ αρχέτυπα και να οδηγήσει σε μεταλλικά εργαλεία. Κατά τη μέθοδο, πρωτότυπο SLA (και γενικά οποιοδήποτε μη μεταλλικό ΤΚΠ πρωτότυπο) μετά από εκτεταμένη αποπεράτωση της επιφάνειάς του, χρησιμοποιείται ως αρχέτυπο μοντέλο για τη δημιουργία μήτρας RTV σιλικόνης (Ενδιάμεσο Βήμα). Σε αυτή τη μήτρα δημιουργείται επίσης σε σιλικόνη αντίγραφο του αρχέτυπου μοντέλου. Το αντίγραφο αυτό, περικλείεται από κατάλληλο μείγμα μεταλλικών σωματιδίων (π.χ. από χάλυβες εργαλείων) και κόλλας. Μετά τη στερεοποίηση του αφαιρείται το σιλικονούχο μοντέλο και η μήτρα υπερθερμαίνεται σε υψηλή θερμοκρασία, όπου καίγεται η κόλλα και διασυνδέονται τα μεταλλικά σωματίδια. Το εναπομείναν, κατά 30% περίπου σε όγκο, πορώδες μεταλλικό εργαλείο εμποτίζεται με χαλκό, αποδίδοντας την τελική προς χρήση μήτρα (Σκληρότητα κατα Rockwell Rc 35-55) π.χ. για χύτευση πλαστικού με έγχυση. Με εργαλείο διαδικασίας Keltool έχουν παραχθεί και 1.000.000 τεμάχια, [Chua et al., 2001; 3D Systems, 2013].

- Επιμετάλλωση δια Ψεκασμού (Arc Spray Metal tooling)  
Τα πρωτότυπα των περισσότερων τεχνολογιών ΤΚΠ, ή θερμοανθεκτικά εκμαγεία τους από μεθόδους soft tooling, μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως υπόστρωμα (substrate) για τον ψεκασμό κυρίως εύθικτων χαμηλού σημείου τήξης μεταλλικών υλικών (Al, Zn, Cu) και κραμάτων. Το αποτέλεσμα του ψεκασμού είναι λεπτό μεταλλικό κέλυφος (συνήθως 1,5-3mm), το οποίο αφού ενισχυθεί μηχανικά με πλήρωση (backfilling) του οπίσθιου μέρους του (π.χ. κόκκοι μετάλλου και ρητίνη) μπορεί να λειτουργήσει ως εργαλείο (μήτρα) για πολλές από τις μεθόδους παραγωγής και διαμόρφωσης πλαστικών και ελαστικών για αρκετές εκατοντάδες παραγομένων τεμαχίων.
- Ηλεκτροχημική Εναπόθεση (Electroplating)  
Καθιστώντας με επίστρωση, ψεκασμό ή επάλειψη αγωγίμο ένα ΤΚΠ πρωτότυπο, επιτελείται ηλεκτροστατική επιμετάλλωση σε κατάλληλο περιβάλλον (λουτρό αγωγίμου υγρού) προκειμένου να δημιουργηθεί επί αυτού μεταλλικό κέλυφος ικανού πάχους, το οποίο αφού ενισχυθεί μηχανικά (backing) με εποξ. ρητίνη και κόκκους μετάλλου (fillers) θα μπορεί να λειτουργήσει ως εργαλείο μικρής σειράς (μήτρα) ή ως ηλεκτρόδιο ηλεκτροδιάβρωσης βύθισης (EDM). Η αναπαραγωγή των επιφανειών στη διαδικασία αυτή είναι πάρα πολύ καλή και η μηχανική αντοχή ικανοποιητική. Σημαντικό μειονέκτημα ο αργός ρυθμός εναπόθεσης (Περίπου 2 εβδομάδες για πάχος 3mm).
- Μεταλλικά Εργαλεία με:
  - Χύτευση Ακριβείας (Investment Casting)  
Στην περίπτωση αυτή πρωτότυπα ΤΚΠ της μορφής του εργαλείου χρησιμοποιούνται είτε απευθείας, είτε αντίγραφα τους από κερί χύτευσης μέσω μητρών σιλικόνης, για τη χύτευση με τη μέθοδο του χαμένου κεριού μεταλλικού εργαλείου. Μηχανουργική αποπεράτωση και λείανση είναι βέβαια και εδώ απαραίτητη για το τελικό εργαλείο.
  - Χύτευση Κραμάτων Χαμηλού Σημείου Τήξης (Low Melting Alloys Cast Metal Tooling)  
Πρωτότυπα ΤΚΠ ή εκμαγεία τους μπορούν να αποτελέσουν μονέλα (master patterns) για χύτευση επί αυτών μεταλλικών κραμάτων χαμηλού σημείου τήξης (Zn) και απευθείας δημιουργία μητρών χύτευσης πλαστικών σε μικρή σειρά.

Ορισμένα τελικά εργαλεία ΤΚΕ (Hard Tooling) εκ των παραπάνω μεθόδων παρουσιάζονται ενδεικτικά στο Σχήμα 1.3.3.2



Σχήμα 1.3.3.2: Hard Tooling με ΤΚΕ

Κάποια βασικά τεχνικοοικονομικά στοιχεία για τις προαναφερόμενες άμεσες και έμμεσες ΤΚΕ, όπως αναφέρονται σε σχετική βιβλιογραφία, [Pham & Dimov, 2001], και επιβεβαιώνονται από την διεξαχθείσα στην παρούσα ΔΔ έρευνα, παρατίθενται στον ακόλουθο Πίνακα 1.10.3.1.

A/A	Μέθοδος ΤΚΕ	Υλικό Εργαλείου	Παραγόμενα Τεμάχια	Χρόνος	Κόστος (€)
<b>SOFT TOOLS</b>					
1	Εργαλεία Σιλικόνης	Σιλικόνη	10-200	1-3 μέρες	300-1.500
2	Εργαλεία Ρητίνης	Εποξ.Ρητίνες	50-500	~1 εβδομάδα	500-2.000
3	Ελαστικά Βουλκ. Εργαλεία	Ελαστικό	201-2000	~1 εβδομάδα	500-2.000
4	Γύψινα Κεραμικά Εργαλεία	Κεραμικά/ Γύψος	1	1-2 εβδομ.	500-2.000
5	Απευθείας Χύτευση Ακριβείας	Κεραμικό	1	1-2 εβδομάδες	500-2.000
6	Direct AIM	Ρητίνη	~100	~1 εβδομάδα	Ε.Γ.**
<b>HARD TOOLS</b>					
7	3D Keltool	Μέταλλο	~1.000.000	2-6 εβδομ.	>10.000
8	Επιμετάλλωση με ψεκασμό	Μέταλλο	201-2000	1-3 εβδομ.	2.000-10.000
9	Ηλεκτροχημική εναπόθεση	Μέταλλο	~500.000	3-6 εβδομ.	Μ.Δ.
10	Χύτευση Ακριβείας	Μέταλλο	1-50	1-2 εβδομάδες	1000-3000
11	RapidTool/ DirectTool	Μέταλλο	>2000	2 εβδομάδες	Ε.Γ.**

\* Μ.Δ.: Μη διαθέσιμα κοστολογικά στοιχεία

\*\* Ε.Γ.: Εξαρτάται από την κατασκευαζόμενη γεωμετρία

Πίνακας 1.10.3.1: Τεχνικοοικονομικά Στοιχεία Μεθόδων ΤΚΕ

## 1.11 Έρευνα και προοπτικές ΤΚΠ – ΤΚΕ

Η έρευνα που έχει συντελεσθεί κυρίως στην ΤΚΠ, αλλά και στην ΤΚΕ, τα τελευταία 25 χρόνια, είναι σημαντική, διαρκής και ευθυγραμμισμένη κάθε φορά στο πνεύμα και τις προτεραιότητες των βασικών ιστορικών περιόδων των τεχνολογιών που περιγράφηκαν παραπάνω. Κύριοι φορείς της σχετικής έρευνας η βιομηχανία, τα πανεπιστημιακά ιδρύματα, οι πρώτοι μεγάλοι οίκοι ανάπτυξης συστημάτων ΤΚΠ, ανεξάρτητοι ερευνητές και μελετητικοί φορείς, ακόμα και στρατιωτικοί και αμυντικοί οργανισμοί. Σε επίπεδο τυποποίησης το πρότυπο ISO 10303:1994, [ISO 10303, 1994] πρωτασχολείται με θέματα που σχετίζονται με ΤΚΠ. Τα τελευταία χρόνια με την τεχνολογική έρευνα αλλά και την τυποποίηση ορολογίας και διαδικασιών ΤΚΠ έχει ασχοληθεί και ο οργανισμός ASTM (American Society of Testing and Measurements), συγκροτώντας τη σχετική επιτροπή F42 (F42 Committee), που μόλις την τελευταία πενταετία έχει συγκροτήσει και προετοιμάζει σειρά από ενδιαφέροντα πρότυπα σχετιζόμενα με ΤΚΠ (ορολογία, δοκίμια αναφοράς, πρωτόκολλα μεταφοράς), [ASTM F2921, 2011; ASTM F2792, 2012; ISO/ASTM52915; 2013]. Το δε 2011 ο ASTM συνήψε συμφωνία συνεργασίας με την Technical Committee 261 του ISO για συνέργεια στην περιοχή της τυποποίησης της ΤΚΠ, [Scott et al., 2012].

Από πλευράς γεωγραφικής κατανομής, οι πρώτες σοβαρές ερευνητικές προσπάθειες σε ΤΚΠ εντοπίζονται σε ΗΠΑ, Γερμανία, Ηνωμένο Βασίλειο, Ισραήλ και Ιαπωνία, από τις οποίες προκύπτουν οι πρώτες βασικές τεχνολογίες και συστήματα ΤΚΠ, που χαρακτηριστικά καταγράφονται και τεκμηριώνονται στις πρώτες κατατεθείσες πατέντες των κύριων μεθόδων ΤΚΠ και σε βασικές επιστημονικές δημοσιεύσεις και συγγράμματα που αναφέρονται ως σήμερα. Στη συνέχεια κατά την εξάπλωση της ΤΚΠ η έρευνα επεκτείνεται στην υπόλοιπη Ευρώπη (και στην Ελλάδα), στη Λατινική Αμερική (κυρίως Βραζιλία) και σε λοιπές χώρες της Ασίας, με την Κίνα και την Ν.Κορέα να είναι ιδιαίτερα ενεργές. Με την εδραίωση της ΤΚΠ ως σήμερα υπάρχει παρουσία των τεχνολογιών και συντελείται έρευνα σε ΤΚΠ – ΤΚΕ και στις πέντε ηπείρους. Η πορεία της έρευνας μετά τα πρώτα αρχικά στάδια σύλληψης και υλοποίησης ΤΚΠ και μετά από διεξοδική έρευνα και πολλών άλλων σχετικών αντικειμένων και παραμέτρων έχει φθάσει σήμερα να βρίσκεται σε επίπεδα έντονης δραστηριότητας περισσότερο στις κατευθύνσεις της Ταχείας Κατασκευής Προϊόντων/Παραγωγής (Rapid Manufacturing) κυρίως με απευθείας μεταλλικά πρωτότυπα, των άμεσων βιοϊατρικών εφαρμογών της ΤΚΠ, αλλά και στο επίπεδο της βελτιστοποιημένης και συστηματικής ένταξης και αξιοποίησης των τεχνολογιών ΤΚΠ, ΤΚΕ και RM στο σύγχρονο βιομηχανικό περιβάλλον και τις επιχειρήσεις, πεδίο που υιοθετεί και την παρούσα διατριβή.

Παρακάτω, ανά βασική ερευνητική περιοχή του ευρύτερου πεδίου ΤΚΠ – ΤΚΕ, θα παρατεθούν ορισμένα αξιοσημείωτα καταγεγραμμένα τεκμήρια, ερευνητικές προσπάθειες και σχετικές βιβλιογραφικές αναφορές/συγκεντρωτικές ανασκοπήσεις (reviews).

- Ανάπτυξη βασικών Τεχνολογιών ΤΚΠ, διαφοροποιημένες και υβριδικές προσεγγίσεις

Στη βιβλιογραφία [Bourell et al., 2009], η ιδέα της διαστρωματικής κατασκευής αντικειμένων εντοπίζεται ήδη στον 19<sup>ο</sup> αιώνα (Τοπογραφία & Φωτογλυπτική), ενώ καταγράφονται και ορισμένα πρόδρομα συστήματα της ΤΚΠ από τις δεκαετίες του 1960 & '70.

Η τεκμηρίωση της βασικής έρευνας της σύγχρονης ΤΚΠ, έρχεται πρακτικά με την κατάθεση της πρώτης σχετικής ευρεσιτεχνίας (Stereolithography) από τον C.Hull το 1986. Ακολουθούν σύντομα και για τα επόμενα χρόνια και οι υπόλοιπες ευρεσιτεχνίες των βασικών ΤΚΠ που βρήκαν εμπορική εκμετάλλευση και αποδοχή. Οι κυριότερες ευρεσιτεχνίες κατατεθειμένες στον αμερικανικό οργανισμό U.S. Patent Agency, που διαμόρφωσαν ουσιαστικά την περιοχή της ΤΚΠ συνοψίζονται στον ακόλουθο Πίνακα 1.11.1

Έτος	US Patent No.	Τίτλος	Εφευρέτης	Κάτοχος ή Εμπορική Εκμετάλλευση	Τεχνολογική ή Περιοχή
1986	4575330	Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography	Hull; Charles W.	UVP, Inc. licensed to 3D Systems, Inc.	stereolithography
1987	4665492	Computer automated manufacturing process and system	Masters; William E., Easley	BPM, Inc.	ballistic particle manufacturing (BPM)
1988	4752352	Apparatus and method for forming an integral object from laminations	Feygin; Michael	Helisys, Inc. succeeded by Cubic Technologies, Inc.	laminated object manufacturing (LOM)
1989	4863538	Method and apparatus for producing parts by selective sintering	Deckard; Carl R.	Board of Regents, The University of Texas System licensed to DTM, Inc. subsequently acquired by 3D Systems	selective laser sintering (SLS)
1990	4961154	Three dimensional modelling apparatus	Pomerantz; Itzhak, Cohen-Sabban; Joseph, Bieber; Avigdor, Kamir; Josef, Katz; Mathew, Nagler; Michael	Scitex Corporation Ltd., (Israel) licensed to Cubital Inc.	solid ground curing (SGC)
1991	5059266	Apparatus and method for forming three-dimensional article	Yamane; Mitsuo, Kawaguchi; Takashi, Kagayama; Shigeru, Higashiyama; Shunichi, Suzuki; Keiko, Sakai; Jun, Imaeda; Mikio, Inaishi; Kouji, Okaza	Brother Kogyo Kabushiki Kaisha, (Japan)	jetted photopolymer

1992	5121329	Apparatus and method for creating three-dimensional objects	Crump; S. Scott	Stratasys, Inc.	fused deposition modeling (FDM)
1992	5136515	Method and means for constructing three-dimensional articles by particle deposition	Helinski; Richard	Licensed to 3D Systems, Inc., Solidscape and other companies.	inkjet with second support material
1992	5141680	Thermal stereolithography	Almquist; Thomas A., Smalley; Dennis R.	3D Systems, Inc.	multijet modeling (MJM) [wide area inkjet]
1993	5204055	Three-dimensional printing techniques	Sachs; Emanuel M., Haggerty; John S., Cima; Michael J., Williams; Paul A.	Massachusetts Institute of Technology licensed to Z Corp., Soligen, ProMetal and several other companies.	three dimensional printing (3DP) [inkjet-bonded build material]
1996	5506607	3-D model maker	Sanders, Jr.; Royden C., Forsyth; John L., Philbrook; Kempton F.	Sanders Prototypes Inc. renamed Solidscape, Inc. also licensed to Sanders Design International	inkjet with second support material
1998	5786562	Method and device for producing three-dimensional bodies	Larson; Ralf	Arcam Limited, London, (United Kingdom)	electron beam melting (EBM)
1998	5837960	Laser production of articles from powders	Lewis; Gary K. , Milewski; John O. , Cremers; David A. , Nemeck; Ronald B. , Barbe; Michael R.	Regents of the University of California	laser powder forming (LPF)
2000	6046426	Method and system for producing complex-shape objects	Jeantette; Francisco P. ; Keicher; David M. ; Romero; Joseph A. ; Schanwald; Lee P. .	Sandia Corporation licensed to Optomec	laser powder forming (LPF)
2000	6056843	Sheet lamination modeling method and sheet lamination modeling apparatus	Morita; Satoshi ; Sugiyama; Kazuo	Kira Corporation (Japan)	laminated object manufacturing (LOM) with selective bonding
2001	6253116	Method and apparatus for rapid freezing prototyping	Zhang; Wei ; Leu; Ming C. ; Ji; Zhiming ; Yan; Yongnian	New Jersey Institute of Technology	rapid freeze prototyping (RFP)

2006	6997698	Method for creating a 3-D object	Silverbrook; Kia	Silverbrook Research Pty Ltd	inkjet with multiple, wide-area heads
2007	7261542	Apparatus for three dimensional printing using image layers	Hickerson; Kevin P.; Bedal; Bryan; Diephuis; Richard J.	Desktop Factory, Inc.	powder transfer

Πίνακας 1.11.1: Οι κύριες ευρεσιτεχνίες νέας ΤΚΠ χρονολογικά

Στη σχετική βιβλιογραφία χρήζουν αναφοράς, η πρώτη επιστημονική έκδοση [Jacobs, 1992], αφιερωμένη στις βασικές αρχές της Στερεολιθογραφίας και λίγο αργότερα περισσότερες του ίδιου συγγραφέα [Jacobs, 1994; Jacobs, 1996] περί των υλικών και των εφαρμογών της μεθόδου, όπως και διάφορες εμπειριστωμένες εκδόσεις για την ΤΚΠ γενικά, τις αρχές της, την εξέλιξη και τις εφαρμογές της [Kochan, 1993; Pham & Dimov, 2001&2011; Gebhardt, 2003; Gibson et al., 2009; Chua, Leong & Lim, 2003 & 2010].

Στις ενδιαφέρουσες ερευνητικές προσπάθειες για εναλλακτικά συστήματα ΤΚΠ, αξίζει να σημειωθούν:

- η Τεχνολογία ΤΚΠ αντικειμένων από πάγο (Rapid Freeze Prototyping – RFP) που αναπτύχθηκε και κατοχυρώθηκε από το New Jersey Institute of Technology, [Zhang et al., 1999],
- η υβριδική (εναπόθεση και κατεργασία) τεχνολογία Shape Deposition Manufacturing (SDM) για ετερογενών υλικών αντικείμενα με δυνατότητα και ενθέτων (inserts) των πανεπιστημίων Carnegie Mellon και Stanford, [Weiss et al., 1997; Cooper et al. 1999],
- η τεχνολογία Selective Area Laser Deposition (SALD) για εναπόθεση σύνθετου κεραμικού υλικού με βάση το τιτάνιο, [Jakubenas et al., 1998],
- Η τεχνολογία CAM-LEM του πανεπιστημίου του Cleveland για δημιουργία αντικειμένων από παχύτερες στρώσεις μηχανολογικών υλικών, [Newman et al., 1996],
- το σύστημα M-RPMS του πανεπιστημίου Tsinghua του Πεκίνου, όπου επιχειρείται υλοποίηση διαφορετικών τεχνολογιών ΤΚΠ σε μία μηχανή, [Yan et al., 1998],
- το πλαίσιο Functional Prototype Development (FPD) για την απόδοση μηχανικών, οπτικών (χρώμα), ηλεκτρικών και χημικών ιδιοτήτων σε Στερεολιθογραφικά πρωτότυπα κατά την κατασκευή (Πολυτεχνείο Pusan – Ν.Κορέα), [Im, et al. 2002],
- η τεχνολογία Solvent Welding Freeform Fabrication (SWIFT) του North Carolina State University για απευθείας ΤΚΠ μικρής και μεσαίας σειράς μητρών, [Cormier & Taylor, 2001],
- το Κινεζικό σύστημα SSM-1600, παραλλαγή τεχνολογίας LOM για πολύ μεγάλα αντικείμενα (διαστάσεων έως 1,6 x 0,8x 0,7 m), [Song et al., 2002],
- η υβριδική προσέγγιση stepless rapid prototyping (SRP) με χρήση UV πολυμερισμού και κατεργασίας φρεζαρίσματος για πρωτότυπα χωρίς ίχνη διαστρωματικής κατασκευής, από το Nanyang Technological University στη Σιγκαπούρη, [Hong et al., 2004].
- Αρκετές παραλλαγές συστημάτων Στερεολιθογραφίας για κατασκευή αντικειμένων με φωτοπολυμερισμό ρητινών από πηγές UV μέσω MEMS, κατόπτρων DMD-DLP και προβολικών συστημάτων LCD, [Zyzalo, 2008], σε



συνήθη κλίμακα, πολύ μεγάλη κλίμακα (Materialise – Mammoth SLA), αλλά και στη μικροκλίμακα (μSLA). Γνωστότερη εμπορική εκμετάλλευση των παραλλαγών αυτών τα συστήματα Perfactory του οίκου Envisiontec GmbH.

• Πρότυπα αποθήκευσης και μεταφοράς & αλγοριθμική δημιουργία στρώσεων

Τα πρότυπα και πρωτόκολλα για μεταφορά, αποθήκευση, αλλά και η αλγοριθμική προετοιμασία των στρώσεων κατασκευής απετέλεσαν από νωρίς ερευνητικό αντικείμενο της ΤΚΠ, [Fadel & Kirschman, 1996; Kumar & Dutta, 1997]. Έχει ήδη στην παρούσα εργασία γίνει αναφορά στον Πίνακα 1.9.3.2, μαζί με άλλα πρότυπα που μπορούν να υποστηρίξουν ΤΚΠ, κάποιων βασικών προτύπων που αναπτύχθηκαν ερευνητικά για ΤΚΠ.

Ως επίσης αξιοσημείωτα, κάποια δε ως πολύ πρόσφατες εξελίξεις, αναφέρονται εδώ ακόμα:

- Εμπεριστατωμένη αποτίμηση απαιτήσεων και προτύπων ΤΚΠ του National Institute of Standards & Technology (NIST), του Υπουργείου Εμπορίου των ΗΠΑ για το έτος 1998, [Marsan et al., 1998]
- Το πρότυπο Layer Manufacturing Interface – LMI που αναπτύχθηκε και προτάθηκε ως αποτελεσματικότερο και συνοπτικότερο του STL από το Nanyang Technology University, στη Σιγκαπούρη, [Jacob et al., 1999].
- Ένα τροποποιημένο STL πρότυπο από τους Chiu & Tan, άμεσα ικανό να υποστηρίξει ΤΚΠ αντικειμένου από πολλαπλά υλικά, [Chiu & Tan, 2000].
- Διεξοδική αναφορά των προτύπων για ΤΚΠ ως το 2002 και μεθοδική καταγραφή όλων των απαιτήσεων που θα πρέπει ένα νέο τυποποιημένο πρότυπο να καλύπτει αποτελεσματικά, με την αφορμή της συμπλήρωσης του ISO 10303 όσον αφορά τη μεταφορά δεδομένων ΤΚΠ, [Pratt et al., 2002].
- Συμπίεσμένη μορφή του STL, με το όνομα Compressed Stl – CS, ως παραλλαγή με οφέλη στον όγκο αποθήκευσης των δεδομένων, ερευνητών του Huazhong University of Science and Technology (Κίνα), [Huang et al., 2003].
- Το πρότυπο ASTM F2915 και αργότερα ISO/ASTM52915 “Specification for Additive Manufacturing File (AMF) Format”, [ISO/ASTM, 2013], που αρχικά δημοσιεύθηκε το 2011 ως αποτέλεσμα των προσπαθειών της επιτροπής F42 και αφορά πρωτόκολλο για ΤΚΠ βασισμένο σε γλώσσα XML, που θα υποστηρίζει πληθώρα δεδομένων (χρώμα, υφή, καμπυλωμένα τρίγωνα κλπ.) που το STL δεν καλύπτει, με περίπου το μισό μέγεθος αρχείων από συμπίεσμένα STL.

Στο σκέλος της αλγοριθμικής δημιουργίας στρώσεων ξεχωρίζουν κάποιες πρώιμες εργασίες κυρίως σχετικά με την απευθείας δημιουργία στρώσεων από CAD μοντέλα αντικειμένων [Dolenc & Makela, 1994; Jamieson & Hacker, 1995; Kulkarni & Dutta, 1996], και μετέπειτα η ανάπτυξη διαφόρων μεθόδων για τη δημιουργία στρώσεων προσαρμοζόμενου πάχους (adaptive slicing), [Kulkarni & Dutta, 1995; Sabourin et al., 1996; Hope et al., 1997; Tata et al., 1998; Mani et al., 1999; Lee & Choi, 2000; Pandey et al., 2003; Ma et al., 2004], με κριτήριο κυρίως τη βελτίωση της επιφάνειας κεκλιμένων και καμπυλωμένων επιφανειών αλλά και την εν γένει επιτάχυνση βελτίωση των διαδικασιών ΤΚΠ. Πιο πρόσφατα απαντώνται αλγοριθμικές προσεγγίσεις για απευθείας διαχωρισμό στρώσεων από αρχεία STEP με γεωμετρίες NURBS, [Starly et al., 2005], για τη δημιουργία στρώσεων για ΤΚΠ αντικειμένων πολλαπλών υλικών, [Choi & Cheung, 2006], αλλά και για την απόδοση του χρώματος στις στρώσεις έγχρωμων πρωτοτύπων, [Wang et al., 2006]

- Ακρίβεια, ποιότητα επιφάνειας και βελτίωσή τους

Η διαστασιολογική, αλλά και η γεωμετρική ακρίβεια (ειδικά σε τεχνολογίες που η φύση της διαδικασίας και των υλικών δημιουργεί στρεβλώσεις και αλλοιώσεις των αντικειμένων), καθώς και η ποιότητα επιφανείας (τραχύτητα) έχουν διερευνηθεί αρκετά διεθνώς, αλλά και στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, τόσο ως προς τη διαπίστωση και ποσοτικοποίηση τους, όσο και ως προς τις δυνατότητες βελτίωσής τους, για κάθε σχεδόν τεχνολογία ΤΚΠ ξεχωριστά, αλλά και συγκριτικά μεταξύ τεχνολογιών.

Προσπάθεια βελτίωσης ακρίβειας και ποιότητας επιφανειών έχει μελετηθεί και δια μέσου της δημιουργίας των στρώσεων που αποδίδονται, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, αλλά και δια της επιλογής βέλτιστου προσανατολισμού κατασκευής όπως θα αναφερθεί παρακάτω.

Κυρίως όμως η σχετική έρευνα εστιάζεται στο χαρακτηρισμό και βελτίωση συγκεκριμένων τεχνολογιών και παραμέτρων τους, με χαρακτηριστικά παραδείγματα τα ακόλουθα:

- Την αξιολόγηση επιδόσεων Στερεολιθογραφίας για διαφορετικά στυλ κτισίματος, [Williams et al., 1996; Onuh & Hon, 2001]
- Την παραμετρική βελτιστοποίηση της Στερεολιθογραφίας που ερεύνησε το Drexel University της Φιλαδέλφεια των ΗΠΑ, [Zhou et al., 2000]
- Την απόπειρα προγραμματισμού μεθόδου (Process planning) παραμέτρων Στερεολιθογραφίας με γνώμονα (α) την επίτευξη γεωμετρικών ανοχών, που προτείνει το Georgia Institute of Technology (ΗΠΑ), [Lynn-Charney & Rosen, 2000] και (β) τη βελτίωση της ακρίβειας γενικά, [West et al., 2001]
- Τη βελτίωση της ακρίβειας SLA με στατιστική ανάλυση, [Campanelli et al., 2007]
- Την αντιστάθμιση σφαλμάτων κύριων αξόνων με μεθόδους Taguchi στην τεχνολογία SLS, του Pusan National University (Ν. Κορέα), [Yang et al., 2002] και παρόμοια του Indian Institute of Technology Delhi (Ινδία), [Raghunath & Pandey, 2007]
- Τη βελτίωση ακρίβειας ΤΚΠ με λογισμική αντιστάθμιση βασισμένη σε παραμετρική μοντελοποίηση των σφαλμάτων, του Penn State University (ΗΠΑ) [Tong et al., 2004]
- Την βελτίωση της διαστασιολογικής ακρίβειας με μεθόδους Taguchi σε πρωτότυπα FDM, [Sood et al., 2009]
- Το χαρακτηρισμό της τεχνολογίας LOM [Park et al., 2000] και τη συσχέτιση προσανατολισμού με ποιότητα επιφάνειας σε LOM, [Paul & Voorakarnam, 2001]
- Την οπτικοποίηση της τραχύτητας που οφείλεται στην ΤΚΠ, [Campbell et al., 2002]

Η διαπίστωση και ποσοτικοποίηση της ακρίβειας και ποιότητας επιφάνειας, αν και απαντάται και ανά συγκεκριμένη τεχνολογία (βλέπε παραπάνω), βιβλιογραφικά εντοπίζεται συχνότερα και αξιοποιείται καλύτερα στις Συγκριτικές Αξιολογήσεις τεχνολογιών και συστημάτων, όπου συνήθως αξιολογούνται ταυτόχρονα και άλλοι παράγοντες όπως ο χρόνος και το κόστος.

- Συγκριτική αξιολόγηση Τεχνολογιών & Συστημάτων (Benchmarks)

Πολύ σημαντικό κομμάτι της έρευνας επί της ΤΚΠ διαχρονικά καταλαμβάνει η συγκριτική αξιολόγηση (Benchmarking) διαφορετικών τεχνολογιών και συστημάτων/μηχανών ΤΚΠ ως προς τις επιδόσεις τους για την κατασκευή ενός ή

περισσότερων πραγματικών αντικειμένων χαρακτηριστικής μορφής και ενδιαφέροντος ή χαρακτηριστικών μη πραγματικών αντικειμένων αναφοράς (reference/test parts) που όμως ενσωματώνουν μορφολογικά χαρακτηριστικά συγκεκριμένης κλίμακας, γεωμετρίας, προσανατολισμού και διαστάσεων. Με τη βοήθεια των συγκριτικών αυτών αξιολογήσεων (benchmarks) καθίσταται δυνατή η κατά μέτωπο (head to head) ανεξάρτητη και αντικειμενική σύγκριση διαφορετικών τεχνολογιών και μηχανών σε πλήθος κριτηρίων αξιολόγησης όπως ο χρόνος-ρυθμός κατασκευής, το κόστος, η διαστασιολογική και γεωμετρική ακρίβεια, η δυνατότητα απόδοσης συγκεκριμένων χαρακτηριστικών μορφών και στοιχείων, η αποδιδόμενη ποιότητα επιφανείας και η δυνατότητα απόδοσης υφής κλπ. Ο πρακτικός αυτός χαρακτήρας των benchmarks, οδήγησε από νωρίς στη χρήση τους βιομηχανικούς φορείς (π.χ. αυτοκινητοβιομηχανίες), κυβερνητικούς και κρατικούς φορείς και υπηρεσίες (κυρίως στις ΗΠΑ και το ΗΒ), ακαδημαϊκούς ερευνητές και ανεξάρτητους μελετητές. Τα σημαντικότερα benchmarks που αναφέρονται για ΤΚΠ παρατίθενται παρακάτω:

- Ο Βέλγος καθηγητής Kruth το 1991, μαζί με μια εκτενή παρουσίαση των τεχνολογιών ΤΚΠ της εποχής, δίνει τα αποτελέσματα μιας ενδιαφέρουσας - και από τις πρώτες χρονικά - συγκριτικής αποτίμησης τους από την ολλανδική εταιρία TNO και το «Centrum voor Productietechniek», [Kruth, 1991]
- Ο Jacobs μελετώντας την ακρίβεια της τεχνολογίας SLA [Jacobs, 1992] προτείνει το γνωστό έκτοτε στη βιβλιογραφία της ΤΚΠ “user part” και ορίζει το μέγεθος  $\epsilon_{90}$  (mm), με βάση τα οποία αρκετοί επόμενοι μελετητές αξιολογούν και αυτοί τεχνολογίες ΤΚΠ.
- Η αυτοκινητοβιομηχανία Chrysler το 1993 δημοσιεύει αναφορά της για τα αποτελέσματα της σύγκρισης κύριων ΤΚΠ της εποχής σε δοκίμια αναφοράς (test parts) και αντικείμενα του κλάδου της (speedometer), [Wohlers, 1992]
- Οι Childs & Juster προτείνουν συγκεκριμένο δοκίμιο και αξιολογούν τεχνολογίες ΤΚΠ για ακρίβεια, επαναληψιμότητα και γεωμετρικές ανοχές, [Childs & Juster, 1994]
- Οι Ippolito et al. αξιολογούν συγκριτικά τεχνολογίες ως προς διαστασιολογική ακρίβεια (κατά τις ποιότητες – IT Grades του ISO) και ποιότητα επιφάνειας, χρησιμοποιώντας το “User Part” του Jacobs (3D Systems) [Ippolito et al., 1994]
- Οι Reeves & Cobb μελετούν με δικό τους δοκίμιο και αναφέρουν τη διαστασιολογική ακρίβεια διαφόρων συστημάτων, [Reeves & Cobb, 1996]
- Ο Shellabear στα πλαίσια προγράμματος Brite Euram BE-2051 με τίτλο RAPTEC, που υποστηρίχθηκε από τις αυτοκινητοβιομηχανίες Rover, BMW, Mercedes Benz, το κέντρο ερευνών της Fiat και άλλους βιομηχανικούς φορείς, παρουσιάζει το 1998 τα αποτελέσματα σύγκρισης με το δοκίμιο των Reeves & Cobb πάνω από 10 συστημάτων σε ποιότητα επιφάνειας και διαστασιολογική ακρίβεια, αντιστοιχίζοντάς τα μάλιστα και εδώ με τις ποιότητες του ISO και του DIN 16901 για θερμοπλαστικά από ABS [Shellabear, 1998&1999]
- Οι Xu [Xu, 1999] & Shi Dongping [Mahesh, 2004], προτείνουν τα δικά τους δοκίμια με έμφαση σε μορφές που θα δίνουν αποτελέσματα ικανά να υποστηρίξουν συστήματα αποφάσεων για ΤΚΠ.
- Κατά παραγγελία της VOLVO, οι Hopkinson & Hague του Rapid Manufacturing Consortium (RMC) στο Η.Β., διενεργούν και δημοσιεύουν

- αναλυτικό benchmark τεχνολογιών ΤΚΠ του 2001, σε χαρακτηριστικά αντικείμενα αυτοκινητοβιομηχανίας, [Hopkinson & Hague, 2001].
- Οι Byun & Lee, ανασκοπούν προηγούμενα test parts, προτείνουν το δικό τους για την αποτελεσματικότερη αποτίμηση ακρίβειας διαστάσεων και γεωμετρίας, ποιότητας επιφάνειας αλλά και κατασκευασιμότητας μορφολογικών στοιχείων και δοκιμάζουν σε αυτό 5 διαφορετικές τεχνολογίες, [Byun & Lee, 2003]
  - Οι Mahesh et al. από τη Σιγκαπούρη, ανασκοπώντας προηγούμενα δοκίμια αναφοράς, επίσης προτείνουν ένα νέο-πληρέστερο με επιπλέον ελεύθερες επιφάνειες, μηχανικά μορφολογικά στοιχεία κλπ., με το οποίο και προβαίνουν σε αξιολογήσεις τεσσάρων συστημάτων ΤΚΠ, με στόχο τη δημιουργία βάσης δεδομένων, [Mahesh et al., 2004]
  - Οι Gervasi et al. χρησιμοποιούν συνδυασμό περισσοτέρων δοκιμών απλών γεωμετρικών μορφών, [Gervasi et al., 2005]
  - Ο ανεξάρτητος αναλυτής Todd Grimm παρουσιάζει την πρώτη σύγκριση 3D εκτυπωτών μικρού κόστους και κλίμακας, επί πραγματικών βιομηχανικών αντικειμένων, [Grimm, 2003b], επαναλαμβάνοντας παρόμοιες συγκρίσεις και μετέπειτα, [Grimm, 2005&2010]
  - Οι Kim & Oh συγκρίνουν δέκα διαφορετικά συστήματα ΤΚΠ με συνδυασμό αρκετών δοκιμών αναφοράς και τυποποιημένων δοκιμών αντοχής, για να καταλήξουν σε συμπεράσματα όχι μόνο ως προς ακρίβεια και ποιότητα επιφάνειας, αλλά και για το κόστος, την κατασκευασιμότητα μορφών και τη μηχανική αντοχή, [Kim & Oh, 2008]
  - Οι Fahad & Hopkinson, συνεχίζοντας παλαιότερη έρευνα του δεύτερου, πρότειναν πρόσφατα ένα ακόμα νέο δοκίμιο αναφοράς που να ξεπερνά τις αδυναμίες προηγούμενων, [Fahad & Hopkinson, 2012]
  - Πρόσφατα ο Αμερικανικός οργανισμός National Institute of Standards and Technology (NIST) του Υπουργείου Εμπορίου των ΗΠΑ, δημοσιεύει έκθεση – ανασκόπηση για τα ως το 2012 υφιστάμενα δοκίμια για ΤΚΠ, [Moylan et al., 2012]
  - Ο Αμερικανικός ASTM με την ειδικευμένη επιτροπή του F42, εργάζεται σήμερα για την τυποποίηση ενός ενιαία αποδεκτού δοκιμίου σύγκρισης για όλες τις τεχνολογίες ΤΚΠ που θα ενσωματωθεί στα πρότυπά του, [ASTM WK40419, 2013]

• Προσανατολισμός κατασκευής αντικειμένων

Εξαιτίας της σοβαρής του επίδρασης τόσο σε χρόνο όσο και σε κόστος κατασκευής, αλλά και στην ακρίβεια και ποιότητα επιφανειών, ο προσανατολισμός των αντικειμένων κατά την ΤΚΠ, επίσης διερευνήθηκε από νωρίς. Η σχετική έρευνα, πέρα από τις γενικά εφαρμόσιμες αρχές της επιλογής βέλτιστου προσανατολισμού, απαντάται και ξεχωριστά για κάποιες τεχνολογίες, καθώς παρουσιάζονται θεμελιώδεις διαφορές μεταξύ τους.

Ακολουθούν οι σημαντικότερες σχετικές αναφορές:

- Οι Allen & Dutta πρωτοπαρουσιάζουν θέματα συστηματικής επιλογής προσανατολισμού για Στερεολιθογραφία, [Allen & Dutta, 1994]
- Οι Cheng et al. επιχειρούν επιλογή προσανατολισμού για Στερεολιθογραφία με πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση, [Cheng et al., 1995]
- Οι Frank & Fadel προσεγγίζουν τον προσανατολισμό σε ΤΚΠ γενικά με έμπειρα συστήματα, [Frank & Fadel, 1995]

- Οι Thompson & Crawford προτείνουν μέτρα ποιοτικής αξιολόγησης για την επιλογή προσανατολισμού ΤΚΠ, [Thompson & Crawford, 1997]
- Οι Xu et al. προτείνουν γενικό αλγόριθμο επιλογής προσανατολισμού με κριτήρια και τον εφαρμόζουν σε τέσσερεις θεμελιωδώς διαφορετικές ΤΚΠ, [Xu et al., 1999]
- Οι Pham et al. εστιάζουν στην επιλογή προσανατολισμού SLA με εργαλεία υποστήριξης απόφασης βασισμένα σε μορφολογικά στοιχεία, [Pham et al., 1999]
- Οι Masood et al. πραγματεύονται επιλογή προσανατολισμού για FDM, [Masood et al., 2000], οι Masood & Rattanawong γενικεύουν τον ίδιο αλγόριθμο για ΤΚΠ, [Masood & Rattanawong, 2002] και επίσης οι Masood et al. εξειδικεύουν για σύνθετες μορφές, [Masood et al., 2003]. Παράλληλα οι Ziemian & Crown, [Ziemian & Crown, 2001] και αργότερα οι Thrimurthulu et al. ασχολούνται επίσης με τον προσανατολισμό για FDM, [Thrimurthulu et al., 2004]
- Οι Lin et al. Επιλέγουν προσανατολισμό με βάση το ελάχιστο σφάλμα διαδικασίας, [Lin et al., 2001]
- Οι Byun & Lee από την Κορέα εφαρμόζουν μέθοδο πολυκριτηριακής λήψης αποφάσεων για επιλογή προσανατολισμού, [Byun & Lee, 2006]
- Οι Ahn, Kim & Lee επιλέγουν προσανατολισμό για SLA με βάση την ελάχιστη μετεπεξεργασία του πρωτοτύπου, [Kim & Lee, 2005; Ahn et al., 2007]
- Οι Γιαννατσής, Δεδούσης και αργότερα Κανελλίδης, σε πολυκριτηριακά συστήματα υποστήριξης απόφασης που προτείνουν για τις παραμέτρους Στερεολιθογραφίας, ασχολούνται και με τον προσανατολισμό και με το πάχος στρώσεων [Giannatsis & Dedoussis, 2007; Canellidis et al., 2009; Giannatsis et al., 2010]

- Βιοϊατρικές Εφαρμογές ΤΚΠ

Η έρευνα σχετικά με τις βιοϊατρικές εφαρμογές της ΤΚΠ εκκινεί με τα πρώτα χρόνια της διάδοσης της, εξελίσσεται γρήγορα σε αυτόνομο μη αυστηρά μηχανολογικό διεπιστημονικό ερευνητικό αντικείμενο, ενώ τελευταία λόγω της αξιοσημείωτης εξέλιξης των συστημάτων ΤΚΠ για απευθείας μεταλλικά αντικείμενα, παρατηρείται μια νέα άνθηση στον τομέα των μεταλλικών εμφυτευμάτων πάσης φύσεως. Κυριότερες σχετικές αξιοποιήσεις ΤΚΠ ως σήμερα αφορούν:

- Χειρουργική προετοιμασία και προγραμματισμό (Surgery preparation & planning)
- Κρανιοπροσωπική χειρουργική και αποκατάσταση (Craniofacial surgery & reconstruction)
- Εμφυτεύματα αποκατάστασης καταγμάτων (Bone fracture implants)
- Υποστρώματα ανάπτυξης ιστών και οστών (Bone & Tissue scaffolds)
- Μεταφορά και απελευθέρωση φαρμάκων στον οργανισμό (Drug Delivery)
- Ιατρικές Συσκευές (Medical Devices)
- Μικροσυσκευές αγγειακής και καρδιολογικής αποκατάστασης (π.χ. Stents)
- Οδοντιατρικά εμφυτεύματα, γέφυρες, προσθετικά και βοηθητικοί οδηγοί (Dental implants, prosthetics, drilling guides)
- Ακουστικά βοηθήματα (Hearing Aids)

Με την βιοϊατρική ΤΚΠ εκτός από τους ακαδημαϊκούς φορείς, έχουν ασχοληθεί αρκετά οι ίδιοι οι οίκοι κατασκευής συστημάτων ΤΚΠ, καταλήγοντας αρκετοί όπως

έχει προαναφερθεί σε εξειδικευμένες σειρές προϊόντων, ιδιωτικά ερευνητικά κέντρα και εταιρίες (π.χ. Materialise – Βέλγιο) και ανεξάρτητοι ερευνητές.

Η έντονη βιοϊατρική έρευνα ΤΚΠ τεκμηριώνεται ακαδημαϊκά ήδη από τη δεκαετία του 1990, με πληθώρα σχετικών δημοσιεύσεων που δεν είναι σκόπιμο να αναφερθούν εδώ, από αυτόνομα διεθνή συνέδρια σχετικής θεματολογίας, ( π.χ. τα “5th European Conference on Engineering and Medicine to 1999”, “22nd Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society” το 2000, “Medical Polymers” το 2006, “Medical Prototyping Conference” το 2011) και από ειδικά κεφάλαια, παραδείγματα και αναφορές στις πιο αναγνωρισμένες επιστημονικές εκδόσεις με θέμα την ΤΚΠ, [Jacobs, 1992; Gebhardt, 2003&2007; Grimm, 2004; Gibson et al., 2009; Chua et al., 2010].

Αξιοσημείωτες εδώ για την έρευνα βιοϊατρικής ΤΚΠ οι δημοσιεύσεις-ανασκοπήσεις της περιοχής από τους:

- Krishnan et al., περί προσθετικών αντικατάστασης γόνατος, [Krishnan et al., 2012]
- Peltola et al., για δημιουργία ιστών με τη βοήθεια ΤΚΠ, [Peltola et al., 2008]
- Melchels et al., περί εφαρμοσιμότητας SLA και συναφών τεχνολογιών φωτοπολυμερισμού σε βιοϊατρικές εφαρμογές, [Melchels et al., 2010]
- Azari & Nikzad, με αναλυτική ανασκόπηση της εξέλιξης της εφαρμογής ΤΚΠ στην οδοντιατρική, [Azari & Nikzad, 2009]
- Schneider et al., που εξαντλητικά ανασκοπούν δημοσιεύσεις περί ακρίβειας σε οδοντιατρικές εμφυτεύσεις, [Schneider et al., 2009]
- Γιαννατσά και Δεδούση, που επιτυχώς ανασκοπούν την εφαρμογή ΤΚΠ σε εφαρμογές ιατρικής και υγείας, [Giannatsis & Dedoussis, 2009]
- Lantada & Morgado, ανασκοπούν τεχνολογίες, δυνατότητες και εφαρμογές και εντοπίζουν μελλοντικές προκλήσεις, [Lantada & Morgado, 2012]

• ΤΚΠ για την Αυτοκινητοβιομηχανία & Αεροδιαστημική βιομηχανία

Έχει ήδη αναφερθεί και παραπάνω ότι η αυτοκινητοβιομηχανία και η αεροδιαστημική βιομηχανία, όχι μόνο έδειξαν άμεσα έντονο ενδιαφέρον στην ΤΚΠ, εγκαθιστώντας συστήματα από τις πρώτες, αλλά απετέλεσαν και αποτελούν βασικούς μοχλούς και συνεργάτες στην έρευνα και στην εξέλιξη των συστημάτων ΤΚΠ ως σήμερα.

Η φύση, η συνθετότητα, το πλήθος (άλλοτε πολύ μεγάλο και άλλοτε ιδιαίτερος μικρό) και η κρισιμότητα εξαρτημάτων και των δύο βιομηχανικών αυτών φορέων (π.χ. εισαγωγές αέρα με κοιλότητες, σύνθετα χυτά, εσωτερικώς ψυχόμενα πτερύγια, συστήματα τροφοδοσίας στροβιλομηχανών κ.α.) και η δραστική μείωση του χρόνου ανάπτυξης και του κόστους εξαρτημάτων και εργαλείων παραγωγής τους, αποτέλεσαν ιδανικό πεδίο εφαρμογής της ΤΚΠ σε αυτές και κίνητρο για να καταστεί κάποτε Ταχεία Παραγωγή (RM).

Σήμερα πια η ΤΚΠ εξελίσσεται και αξιοποιείται από όλους τους ομίλους της αυτοκινητοβιομηχανίας για την ανάπτυξη καθημερινών οχημάτων, έως τις πιο απαιτητικές αγωνιστικές εφαρμογές όπως η Formula 1 (F1), από τους κατασκευαστές αεροσκαφών (Airbus, Boeing κ.α.) και από τους αεροδιαστημικούς φορείς ESA & NASA, με την τελευταία να διαθέτει για χρόνια το δικό της εργαστήριο ΤΚΠ (στο Marshall Space Flight Center), όπου πρόσφατα εγκατέστησε μονάδα μεταλλικής ΤΚΠ, ενώ σλόντομα προγραμματίζει να εγκαταστήσει στο Διεθνή Διαστημικό Σταθμό και μελετήσει ΤΚΠ σε συνθήκες έλλειψης βαρύτητας, [Byford, 2013].

Αναφέρθηκαν παραπάνω στην παρούσα εργασία συγκριτικές αξιολογήσεις τεχνολογιών ΤΚΠ από, ή με την υποστήριξη αυτοκινητοβιομηχανιών, στις δε βασικές

επιστημονικές εκδόσεις της ΤΚΠ που αναφέρθηκαν νωρίτερα για τις βιοϊατρικές εφαρμογές υπάρχει επίσης επαρκής τεκμηρίωση και των εφαρμογών στην αυτοκινητοβιομηχανία και την αεροδιαστημική. Ειδικά ο Kidd [Kidd, 1997] αναφέρεται σε εφαρμογές των BMW, Chrysler, Daewoo, Ford, GM, Mercedes-Benz, Morgan, Porsche, Rover. Αξίζει να αναφερθεί ότι τόσο η ίδια η αυτοκινητοβιομηχανία όσο και η αεροδιαστημική βιομηχανία κατά καιρούς διοργανώνουν διεθνή συνέδρια για τις εξελίξεις και την εφαρμογή ΤΚΠ στον κλάδο τους και δημοσιεύουν οι ίδιες, ή δια μέσου συνεργαζομένων ερευνητών, αποτελέσματα της δικής της έρευνας, όπως τα ενδεικτικά παρακάτω αναφερόμενα:

- Ειδικό συνέδριο το 1995 στη Στουτγάρδη, (Dedicated Conference on Rapid Prototyping in the Automotive Industry), για την ΤΚΠ και τις εφαρμογές της στην αυτοκινητοβιομηχανία, [ISATA, 1995]
- Οι Wiedemann & Jantzen εκθέτουν αποτελέσματα εφαρμογής ΤΚΠ στην Daimler-Benz AG, [Wiedemann & Jantzen, 1999]
- Οι Mueller & Kochan, αναφέρουν οφέλη από εφαρμογή ΤΚΠ τεχνολογίας LOM, κυρίως σε μονέλα χύτευσης για αντικείμενα της αυτοκινητοβιομηχανίας, [Mueller & Kochan, 1999].
- Οι Döllner et al., δημοσιεύουν αποτελέσματα εφαρμογής DMU και ΤΚΠ στην Volkswagen, σε συνεργασία με το TU Berlin, [Döllner et al., 2000]
- Αναφορά του ερευνητικού εργαστηρίου της Πολεμικής Αεροπορίας των ΗΠΑ (AFRL) για τα εφαρμόσιμα σε αεροδιαστημικές εφαρμογές κράματα ΤΚΠ, [Kinsella, 2008]
- Αναφορά της Αμερικανικής National Academy of Engineering (NAE) για τις αεροδιαστημικές εφαρμογές και την έρευνα ΤΚΠ [Lyons, 2012]

#### • Άλλες ερευνητικές δράσεις και εφαρμογές ΤΚΠ

Εδώ κατατάσσεται έρευνα, εφαρμογές και αξιοποίηση στην τέχνη και αρχιτεκτονική [Giannatsis et al., 2002; Ryder et al., 2002; Breen et al., 2003; Modeen, 2005], την αρχαιολογία – παλαιοντολογία [Willis et al., 2007; Vialet et al., 2010; Knoll & Rohrberg, 2012] και άλλες περιπτώσεις που εκφεύγουν του σκοπού της παρούσας διατριβής και για την οικονομία του κειμένου παραλείπεται η αναφορά τους.

#### • ΤΚΕ και εφαρμογές – ΤΚΠ μεταλλικών αντικειμένων

Σημαντικό κομμάτι της έρευνας έχει αφιερωθεί και στην άμεση προέκταση της ΤΚΠ, την ΤΚΕ, τόσο ως άμεση όσο και ως έμμεση, κατά τους ορισμούς που έχουν δοθεί σε προηγούμενη παράγραφο. Η εξέλιξη και εφαρμοσιμότητα των τεχνικών, η εξέλιξη και χρήση περισσοτέρων υλικών, θέματα κόστους και χρόνων υλοποίησης των διαδικασιών ΤΚΕ και η εξυπηρέτηση ή και υποκατάσταση μεθόδων παραγωγής πλαστικών με έγχυση, μεταλλικών χυτών, διαμορφώσεων με πίεση ή υπό κενό, ηλεκτροδίων EDM κ.α., έχουν αποτελέσει αντικείμενο της έρευνας αυτής διεθνώς, αλλά και στα πλαίσια της παρούσας εργασίας. Τα τελευταία μάλιστα χρόνια παρατηρείται ερευνητικά μια τάση σύμμιξης σε ένα βαθμό της ΤΚΕ, ειδικά της άμεσης που αφορά μέταλλα, με την Ταχεία Κατασκευή Προϊόντων/Παραγωγή (Rapid Manufacturing). Σχετική τεκμηρίωση υπάρχει σε όλα τα βασικά επιστημονικά συγγράμματα ΤΚΠ που έχουν μνημονευθεί παραπάνω για άλλα ερευνητικά αντικείμενα. Παρατίθενται επίσης κάποιες αξιωματικότητες και περιεκτικές αυτόνομες επιστημονικές αναφορές για την έρευνα επί ΤΚΕ, αλλά και για την ΤΚΕ απευθείας μεταλλικών αντικειμένων & εργαλείων:

- Το Πανεπιστήμιο του Nottingham παρουσιάζει μια από τις πρώτες συστηματικές και εμπειριστατωμένες μελέτες για εφαρμογή TKE σε χύτευση ακριβείας, [Dickens et al., 1995]
- Οι Karapatis et al. ανασκοπούν εκτενώς δυνατότητες και χαρακτηριστικά άμεσης TKE με αφετηρία τις βασικότερες τεχνολογίες ΤΚΠ, [Karapatis et al., 1998]
- Οι Pham et al. επισκοπούν αναλυτικά όλες τις τότε δυνατότητες άμεσης και έμμεσης TKE, [Pham et al., 1998]
- Οι Chua et al. το 1999 σε μια εκτενή δημοσίευση σε 2 μέρη, συγκρίνουν μεταξύ τους τις τεχνικές TKE για κατασκευή εργαλείων και εμβαθύνουν στην TKE με ψεκασμό μετάλλων (Arc Spray Metal), [Chua et al., 1999a&b]
- Οι Wang et al., και αργότερα οι Bernard et al., παρουσιάζουν μετρήσιμα αποτελέσματα και συμπεράσματα από έρευνα στη χρήση TKE για χυτά άμμου, [Wang et al., 1999; Bernard et al., 2003]
- Οι Hopkinson & Dickens κάνουν μια πολύ ενδιαφέρουσα σύγκριση μητρών χύτευσης με έγχυση από SLA και από αλουμίνιο, [Hopkinson & Dickens, 2000]
- Οι Segal & Campbell σε μια πολύ ενδιαφέρουσα επισκόπηση έρευνας αναφέρουν την επίδραση της TKE στις ιδιότητες των παραγομένων αντικειμένων για μήτρες χύτευσης πλαστικών με έγχυση, [Segal & Campbell, 2001]
- Το Nanyang Technological University της Σιγκαπούρης σε δημοσίευση 2 μερών εκθέτει αναλυτικά αποτελέσματα έρευνας για εφαρμογές άμεσης και έμμεσης TKE σε εργαλεία ελασματοουργικών προϊόντων (Sheet metal), [Du et al., 2002; Cheah et al., 2002] και αργότερα και πάλι σε 2 δημοσιεύσεις τα αποτελέσματα έρευνας άμεσης και έμμεσης TKE για χύτευση ακριβείας [Lee et al, 2004; Chua et al., 2005]
- Οι Ding et al., προτείνουν ένα ολοκληρωμένο σύστημα παραγωγής μέσω TKE για πληθώρα εφαρμογών, [Ding et al., 2004]
- Ο Dolinšek παρουσιάζει ενδιαφέροντα αποτελέσματα για τη φθορά μεταλλικών μητρών από SLS, [Dolinšek, 2005]
- Αρκετοί μελετητές παρουσιάζουν αποτελέσματα δοκιμών και έρευνας για κατασκευή και αξιολόγηση ηλεκτροδίων EDM με μεθόδους ΤΚΠ-TKE, [Arthur et al., 1996; Yarlagađda et al., 1999; Rennie et al., 2001; Dimla et al., 2004]. Οι Jha et al. μεταξύ άλλων δυνατοτήτων ανασκοπούν την έρευνα ΤΚΠ-TKE για ηλεκτρόδια EDM, [Jha et al., 2011]
- Οι Chhabra & Singh, ανασκοπούν αναλυτικά όλες τις δυνατότητες και εξελίξεις σε ΤΚΠ & TKE για παραγωγή μεταλλικών χυτών, [Chhabra & Singh, 2011]
- Οι Karunakaran et al. ανασκοπούν και παρουσιάζουν σε οργανωμένη μορφή όλες τις σύγχρονες δυνατότητες κατασκευής και παραγωγής σύνθετων μεταλλικών αντικειμένων, περιλαμβανομένων ΤΚΠ, TKE και CNC, [Karunakaran et al., 2012]
- Οι Pattnaik et al., ανασκοπούν έρευνα και δυνατότητες πολλών ΤΚΠ ικανών για υποστήριξη χύτευσης ακριβείας μέσω TKE, σε μηχανολογικές και άλλες εφαρμογές (ιατρικά εμφυτεύματα, κοσμήματα, οδοντιατρικά), και αξιολογούν σχετικά αποτελέσματα, [Pattnaik et al., 2012]
- Οι Bonyár et al. σε πρόσφατη έρευνα αξιολογούν πολυμερή PDMS χυτά από μήτρες ΤΚΠ, [Bonyár et al., 2013]



- Αποφάσεις, επιλογή ΤΚΠ/ΤΚΕ και ενσωμάτωση σε ευρύτερες διαδικασίες

Καθώς από την εμφάνισή τους μέχρι και σήμερα οι τεχνολογίες ΤΚΠ – ΤΚΕ θεωρούνται καινοτόμες και σε διαρκή διάδοση και εξέλιξη, σημαντικό κομμάτι της έρευνας αφιερώνεται και σε θέματα υποστήριξης αποφάσεων, επιλογής τεχνολογιών και συστημάτων και ομαλής και αποδοτικής ενσωμάτωσης των νέων διαδικασιών ΤΚΠ σε ευρύτερες διαδικασίες σχεδιασμού και εταιρικής λειτουργίας. Στην περιοχή αυτή εντάσσεται σε μεγάλο βαθμό και η παρούσα διατριβή. Αναφέρονται παρακάτω κάποιες σημαντικές σχετικές προσπάθειες:

- Οι Campbell & Bernie επιχειρούν από τους πρώτους να αναπτύξουν βάση δεδομένων με τεχνικά χαρακτηριστικά μηχανών ΤΚΠ για την μετέπειτα αξιοποίηση της στην ανάπτυξη συστήματος απόφασης, [Campbell & Bernie, 1996]
- Στα πλαίσια του ευρωπαϊκού ερευνητικού προγράμματος RAPTEC (BE-2051) που υποστηρίχθηκε σημαντικά από την αυτοκινητοβιομηχανία, το γερμανικό ινστιτούτο BIBA (Bremer Institut für Betriebstechnik und angewandte Arbeitswissenschaft) μεταξύ άλλων, μελετά και θέματα επιλογής διαδικασιών και τεχνολογιών ΤΚΠ με μεθόδους ανάλυσης οφέλους, [Muller, 1999]
- Ο Bibb του Πανεπιστημίου της Ουαλίας, αναπτύσσει ένα από τα πρώτα συμβουλευτικά προγράμματα για μικρές κατασκευαστικές επιχειρήσεις, για επιλογή μεθόδου ΤΚΠ σε περιβάλλον H-Y με τις αρχές των εμπειρών συστημάτων, [Bibb et al., 1999]
- Οι Kulkarni et al. το 2000 κάνουν στο Πανεπιστήμιο του Michigan μια εκτενή ανάλυση της οργάνωσης διαδικασιών (Process planning) για ΤΚΠ και θίγουν τις μελλοντικές σχετικές προκλήσεις, [Kulkarni et al., 2000]
- Οι Masood & Soo, αναπτύσσουν και προτείνουν για λογαριασμό του Industrial Research Institute Swinburne (IRIS) ένα έμπειρο σύστημα με κανόνες (“IRIS Intelligent RP System Selector”) βασισμένο κυρίως σε τεχνικά μεγέθη για επιλογή συστημάτων ΤΚΠ, [Masood & Soo, 2002]
- Οι Byun & Lee εφαρμόζουν πολυκριτηριακή ανάλυση με την τροποποιημένη μέθοδο TOPSIS, για επιλογή μεταξύ συγκεκριμένων συστημάτων ΤΚΠ, [Byun and Lee, 2005]
- Ο Armillotta χρησιμοποιεί τη μέθοδο AHP για επιλογή συγκεκριμένων συστημάτων ΤΚΠ για διαφορετικές κατηγορίες πρωτοτύπων, με στενά τεχνικο-οικονομικά κριτήρια αξιολόγησης [Armillotta, 2007]
- Οι Borille & Gomes, εφαρμόζουν μεθόδους απόφασης για επιλογή μεταξύ συστημάτων ΤΚΠ με κριτήρια το κόστος, το χρόνο και την ποιότητα προσμετρούμενη σε τιμές τεχνικών μεγεθών, χωρίς ιδιαίτερη εμβάθυνση στα επιμέρους υποκριτήρια, [Borille & Gomes, 2010]
- Το Stellenbosch University αναπτύσσει ένα πρόγραμμα επιλογής μηχανών ΤΚΠ με βάση τα τεχνικά χαρακτηριστικά τους, [Shames, 2010]
- Οι Lokesh & Jain από το Πανεπιστήμιο του Ν.Δελχί στην Ινδία, εφαρμόζουν AHP για επιλογή τεχνολογιών και μηχανών ΤΚΠ με τεχνικά και άλλα κριτήρια, [Lokesh & Jain, 2010]
- Οι Munguia et al., ανασκοπούν προηγούμενη έρευνα και παρουσιάζουν ένα βασισμένο σε βάση γνώσης ενδιαφέρον σύστημα υποστήριξης απόφασης για επιλογή διαδικασιών ΤΚΠ που να μπορούν να υποστηρίξουν μικρή Ταχεία Παραγωγή, [Munguia et al., 2011]
- Το Technology Strategy Board του Η.Β., στα πλαίσια του κυβερνητικά χρηματοδοτούμενου προγράμματος Materials KTN, συντάσσει και

δημοσιεύει το 2012, εμπειρισταωμένη έκθεση για τις δυνατότητες και τις προοπτικές της σημερινής ΤΚΠ και της Διαστρωματικής Κατασκευής γενικά (Additive Manufacturing), και στο στρατηγικό ρόλο που παίζουν σήμερα και θα έχουν στο μέλλον όσον αφορά τη διαμόρφωση του κατασκευαστικού περιβάλλοντος στο Η.Β., [Quarshie et al., 2012]

- Το Institute of Defence Analyses (IDA), δια του Science and Technology Policy Institute (STPI), δημοσιεύει επίσης το 2012 στις ΗΠΑ αναλυτική έκθεση για τις δυνατότητες και προοπτικές της ΤΚΠ για το αμερικανικό βιομηχανικό περιβάλλον, [Scott et al., 2012]
- Οι Mellor et al. του Πανεπιστημίου του Exeter, εντοπίζοντας έλλειμμα κοινωνικο-τεχνικών μελετών για την εφαρμογή της ΤΚΠ, ανασκοπούν την περιοχή και προτείνουν ένα στρατηγικό πλαίσιο επιτυχούς εφαρμογής τους, [Mellor et al., 2012]

- **Rapid Manufacturing**

Έχει αναφερθεί και νωρίτερα πως μια έντονη τάση της σύγχρονης έρευνας σε ΤΚΠ και διαστρωματική κατασκευή και της κατεύθυνσης των σχετικών τεχνολογιών για το άμεσο μέλλον, αφορά την αναφερόμενη ως Ταχεία Κατασκευή Προϊόντων/Ταχεία Παραγωγή (Rapid Manufacturing – RM). Κύριες αιτίες για αυτό, η αύξηση της δυνατότητας των συστημάτων ΤΚΠ σε διαστάσεις και ακρίβεια κατασκευαζόμενων αντικειμένων, η δυνατότητα περισσότερων και πιο εξειδικευμένων υλικών και ίσως κυριότερα η πρόοδος στην απευθείας κατασκευή τελικών μεταλλικών αντικειμένων (π.χ. τεχνολογίες SLM, DSLM, EBM). Συνακόλουθα έρευνα συντελείται και στο σκέλος της οργάνωσης των σχετικών παραγωγικών διαδικασιών και στη διαμόρφωση του σύγχρονου βιομηχανικού περιβάλλοντος και των πρακτικών του με θεώρηση της RM στις ικανές του δυνατότητες.

Πέραν όσων έχουν προαναφερθεί στο σκέλος της ΤΚΠ μεταλλικών αντικειμένων, παρατίθενται πιο κάτω ορισμένα σχετικά αξιωμακρινόμενα ερευνητικά τεκμήρια:

- Το 2001 εκδίδεται το πρώτο επιστημονικό σύγγραμμα στην περιοχή της ΤΚΠ που χρησιμοποιεί – και μάλιστα στον τίτλο του – τον όρο Rapid Manufacturing, [Pham & Dimov, 2001], όχι τόσο με τη σημερινή του έννοια, όσο με την έννοια της συνδυαστικής χρήσης ΤΚΠ και ΤΚΕ για την παραγωγή μητρών και εργαλείων υποστήριξης παραγωγής μικρής και μεσαίας σειράς. Αποτελεί όμως πρόδρομο της πορείας και των στόχων της ΤΚΠ για το μέλλον. Το σύγγραμμα επανεκδίδεται σε νεότερη έκδοση και το 2011, [Pham & Dimov, 2011].
- Οι Hague et al., εντοπίζουν με ενδιαφέροντα τρόπο τις αλλαγές που δύναται να επιφέρει η RM στο σχεδιασμό των προϊόντων, κυρίως ως προς την άρση των δεσμεύσεων στις οποίες αυτός υπόκειται ως προς την κατασκευασσιμότητα τους με τις συμβατικές μεθόδους παραγωγής, αλλά και για άλλες παραμέτρους, [Hague et al., 2003]
- Οι Levy, Schindel και ο γνωστός στην ΤΚΠ Kruth παρουσιάζουν μια από τις πρώτες εξαντλητικές ανασκοπήσεις των τεχνολογιών ΤΚΠ ως ικανές τεχνολογίες για RM, δίνοντας μάλιστα και ορισμό για την τελευταία, [Levy et al., 2003]
- Ο πρωτοπόρος του benchmarking τεχνολογιών ΤΚΠ καθηγητής Kruth (βλέπε και παραπάνω), παρουσιάζει το 2005 νέα συγκριτική αξιολόγηση τεχνολογιών ΤΚΠ, ειδικά δοκιμαζόμενων και κρινόμενων ως τεχνολογιών απευθείας RM για μεταλλικά προϊόντα, [Kruth et al., 2005]

- Το 2006 εκδίδεται ένα ακόμα αξιόλογο επιστημονικό σύγγραμμα, επίσης τιτλοφορούμενο «Rapid Manufacturing», η δομή και το περιεχόμενο του οποίου είναι καθαρά προσανατολισμένο στην προοπτική της ΤΚΠ ως Ταχεία Παραγωγή, τόσο για την κατάταξη των τεχνολογιών, όσο και για τα υλικά, τις εξυπηρετούμενες εφαρμογές και τις οικονομικές παραμέτρους που περιγράφονται σε αυτό, [Hopkinson et al., 2006].
- Ο ανεξάρτητος μελετητής Grimm, παρουσιάζει βασικούς παράγοντες και προϋποθέσεις μετάβασης της ΤΚΠ σε RM, [Grimm, 2006]
- Οι Santos et al. για τα πανεπιστήμια της Osaka (Ιαπωνία) και του Wolverhampton (H.B.) εντοπίζουν την μετεξέλιξη της ΤΚΠ & ΤΚΕ σε RM, δίνουν ορισμό για την τελευταία και ανασκοπούν αναλυτικά την πρόοδο των τελευταίων ετών και τις ικανές τεχνολογίες για απευθείας διαστρωματική κατασκευή τελικών μεταλλικών εξαρτημάτων, [Santos et al., 2006]
- Ο Lan πραγματεύεται την εφαρμογή ΤΚΠ/RM στα πλαίσια του διαδικτύου και της ενάσκησης διαδικασιών βελτίωσης και υποστήριξης των διαδικασιών σχεδιασμού και παραγωγής σε αυτό το πλαίσιο, [Lan, 2009]
- Το κρατικά χρηματοδοτούμενο International Specialised Skills (ISS) Institute Inc στην Αυστραλία δημοσιεύει, εμπειρισταωμένη έκθεση για το status και τις δυνατότητες αξιοποίησης της διαστρωματικής κατασκευής ως παραγωγικής διαδικασίας, με διεθνή παραδείγματα και αναφορές, [Barnett, 2009]
- Οι Eyers & Dotchev παρουσιάζοντας δυνατότητες και περιορισμούς με πολλά παραδείγματα, διερευνούν την προοπτική και τις προκλήσεις για επέκταση της ΤΚΠ για μαζική παραγωγή, ως RM, [Eyers & Dotchev, 2010]
- Οι Huang et al., ανασκοπούν τις τεχνολογίες και μελετούν υπό τεχνολογικό πρίσμα τις επιδράσεις της διαστρωματικής κατασκευής σε κοινωνικό, οικονομικό και περιβαλλοντικό επίπεδο, στη βελτίωση της ποιότητας ζωής και στην απλοποίηση των εφοδιαστικών αλυσίδων, [Huang et al., 2012]
- Το MIT Technology Review σε πρόσφατο άρθρο του αναφέρει την πρόθεση της GE να εκκινήσει άμεσα παραγωγικές διαδικασίες εξαρτημάτων αεροπορικών κινητήρων με μεθόδους διαστρωματικής κατασκευής, [LaMonica, 2013]

Από την παραπάνω εκτενή ανασκόπηση των βασικών περιοχών έρευνας σε ΤΚΠ, ΤΚΕ και διαστρωματική κατασκευή γενικότερα, συνάγεται ότι:

- Η ΤΚΠ – ΤΚΕ – ΤΠ (RM), συνιστά μια τεχνολογική επανάσταση τα τελευταία είκοσι κυρίως χρόνια, και ως τέτοια έχει διερευνηθεί και συνεχίζει ως σήμερα να διερευνάται εκτενώς και να εξελίσσεται τόσο στο τεχνολογικό, όσο και στο επίπεδο των εφαρμογών, της οργάνωσης και της συστηματοποίησης της.
- Τα τελευταία δέκα έτη η κατεύθυνση της έρευνας προσανατολίζεται στην αξιοποίηση της διαστρωματικής κατασκευής για άμεση παραγωγή τελικών προϊόντων παραγωγής, στην κατά μέγιστο διεύρυνση των δυνατών εφαρμογών (και σε μη μηχανολογικά αντικείμενα), στην εξειδίκευση των συστημάτων και μηχανών και στην βέλτιστη οικονομοτεχνική και διαδικαστική οργάνωση, αξιοποίηση και ενσωμάτωση της διαστρωματικής κατασκευής στις διαδικασίες σχεδιασμού και παραγωγής νέων προϊόντων.
- Οι μελλοντικές προοπτικές για ΤΚΠ – ΤΚΕ – ΤΠ (RM) είναι πολλές, καθώς οι τεχνολογίες αυτές αναμένεται να επηρεάσουν ακόμη περισσότερο το σύγχρονο βιομηχανικό περιβάλλον στα επόμενα χρόνια, μπορούν δε να καταστούν σημαντικό και πολύτιμο εργαλείο ειδικά για τις ΜΜΕ που άμεσα ή έμμεσα

εμπλέκονται σε διαδικασίες σχεδιασμού, ανάπτυξης και παραγωγής βιομηχανικών προϊόντων.

- Η παρούσα διατριβή όπως θα καταδειχθεί και στη συνέχεια, εύστοχα επιχειρεί και αυτή ερευνητικά να συνεισφέρει στην περιοχή των ΤΚΠ – ΤΚΕ – ΤΠ (RM), στο μεν μηχανολογικό πεδίο για την τεκμηριωμένα βελτιστοποιημένη αξιοποίηση των συναφών τεχνολογιών και συστημάτων και για την καλύτερη δυνατή εξυπηρέτηση μεθόδων παραγωγής με αξιοποίηση τους, ευρύτερα δε για τη διερεύνηση και άλλων πιθανών πεδίων σκόπιμης και επιτυχημένης εφαρμογής τους.

## 1.12 Πολυκριτηριακή λήψη αποφάσεων

Θα παρατεθούν παρακάτω ορισμένες γενικές αρχές σχετικά με την πολυκριτηριακή λήψη αποφάσεων, που αποτελεί βασική μεθοδολογική προσέγγιση στην παρούσα διατριβή.

### 1.12.1 Αποφάσεις σε προβλήματα πολλών μεταβλητών

Στην ζωή και την ανθρώπινη δραστηριότητα εν γένει, ο άνθρωπος ανέκαθεν καλείται να λάβει αποφάσεις, για τετριμμένα έως για άκρως σημαντικά ζητήματα που αφορούν τη ζωή, τη δραστηριότητα και την εξέλιξή του. Η λήψη κάθε απόφασης, αποτελεί πρακτικά την επιλογή ενός μεταξύ δύο ή περισσότερων «δρόμων» σε έναν κόμβο, πέραν από τον οποίο η πορεία είναι συνήθως μονόδρομη και επιφέρει ανάλογα με την επιλογή διαφορετικές συνέπειες για τον αποφασίζοντα.

Οι ανθρώπινες αποφάσεις σπανίως είναι της μορφής ενός διλήμματος με ένα και μόνο κυρίαρχο παράγοντα επιλογής, όπως στο Ηράκλειο σταυροδρόμι «της αρετής και της κακίας» ή στο Σαιξπηρικό «to be, or not to be». Συνήθως επηρεάζονται από πληθώρα παραμέτρων, συχνά μάλιστα αντικρουόμενων μεταξύ τους, που λιγότερο ή περισσότερο βαρύνουν στην τελική απόφαση και τις οποίες ο αποφασίζων πρέπει να λάβει ταυτόχρονα υπόψη του, ιεραρχώντας και σταθμίζοντάς τις σύμφωνα με την κρίση και εμπειρία του, το αναμενόμενο όφελος, το αντίκτυπο των συνεπειών κάθε επιλογής, ακόμα και σύμφωνα με το ηθικό και αξιακό του υπόβαθρο. Συχνά δε παρατηρείται και τεκμηριώνεται και ιστορικά [Weir, 2005], λόγω αδυναμίας συστηματικής διαχείρισης και συνολικής θεώρησης των παραμέτρων τους, πολλές σύνθετες αποφάσεις να λαμβάνονται τελικά διαισθητικά ή και ενστικτωδώς με αρνητικές έως καταστροφικές συνέπειες (π.χ. η απερίσκεπτη αποδοχή του «Δούρειου Ίππου» από τους Τρώες, η εισβολή του Ναπολέοντα και αργότερα του Χίτλερ κατά της Ρωσίας και της Σ. Ένωσης αντίστοιχα) .

Οι ίδιες γενικές αρχές διέπουν και τις αποφάσεις τεχνικής υφής, όπως είναι π.χ. η απόφαση επιλογής γεωγραφικής τοποθέτησης/ χωροθέτησης εργοστασίων και παραγωγικών μονάδων, η επιλογή προμήθειας τεχνολογικού εξοπλισμού και συστημάτων, η επιλογή μεταξύ εναλλακτικών κατασκευαστικών λύσεων, η επιλογή προσωπικού και διαμόρφωσης της σύνθεσης τεχνικών ομάδων εργασίας κλπ.

Η κατηγοριοποίηση των αποφάσεων κατά διάφορους μελετητές τις κατατάσσει σε *προγραμματισμένες και απρογραμματίστες* (H.A.Simon ), *τακτικές και στρατηγικές* (P. Drucker) και, σε καλύτερη αντιστοιχία με τα προβλήματα του τεχνικού κόσμου, σε *Δομημένες* (αποφάσεις των οποίων η επίλυση προέρχεται από μια αυτοματοποιημένη διαδικασία και αναφέρονται σε συνηθισμένα και επαναλαμβανόμενα προβλήματα για τα οποία υπάρχουν έτοιμες λύσεις), *Ημιδομημένες* (αποφάσεις των οποίων η λύση επιδιώκεται στα πλαίσια ενός εύρους πιθανών λύσεων αφήνοντας στον ανθρώπινο παράγοντα περιθώρια επιλογής της) και *Αδόμητες* (αποφάσεις των οποίων οι λύσεις δεν μπορούν να δομηθούν ή δεν έχει διερευνηθεί σε βάθος η δυνατότητα δόμησης τους, αναφέρονται δε σε ασαφώς διατυπωμένα, περίπλοκα προβλήματα για τα οποία δεν υπάρχουν έτοιμες λύσεις), [Keen & Morton, 1978; Keen 1980].

Η ίδια η διαδικασία της λήψης μιας απόφασης κατά τον Simon χωρίζεται στις παρακάτω φάσεις:

- τη *Νοητική* (Intelligent phase), όπου αναζητούνται καταστάσεις για τις οποίες

μπορεί να ληφθούν αποφάσεις,

- το *Σχεδιασμό* (Design) όπου γίνεται έρευνα, ανάλυση και ανάπτυξη όλων των δυνατών εναλλακτικών αποφάσεων και
- την *Επιλογή* (Choice), όπου γίνεται η επιλογή της καταλληλότερης απόφασης μέσα από το σύνολο των εναλλακτικών αποφάσεων.

Όταν στη λήψη μιας απόφασης οι τρεις ανωτέρω φάσεις είναι δομημένες, το πρόβλημα θεωρείται ως πλήρως δομημένο. Αν καμιά από τις φάσεις δεν είναι δομημένη, το πρόβλημα θεωρείται πλήρως αδόμητο. Και αν ορισμένες φάσεις είναι δομημένες και κάποιες άλλες αδόμητες, τότε το πρόβλημα χαρακτηρίζεται ημιδομημένο. Σε αποφάσεις τεχνικού χαρακτήρα, κατά την άποψη του συγγραφέα της παρούσας, επικρατούν τα ημιδομημένα προβλήματα, καθώς ενώ συνήθως ακολουθούνται από τους αποφασίζοντες συστηματικές πρακτικές και υπάρχουν μετρήσιμα ποιοτικά ή/και ποσοτικά δεδομένα, σε κάθε ξεχωριστή περίπτωση εμφανίζονται ιδιαιτερότητες και καινοτομίες που χρήζουν ειδικής μελέτης, ανάλυσης και προσαρμογής πριν τη λήψη των αποφάσεων.

Για αρκετά χρόνια η αντιμετώπιση της ύπαρξης περισσότερων από μιας παραμέτρων σε μια απόφαση, υπήρξε σχετικά μονοδιάστατη. Η κλασική θεώρηση της βελτιστοποίησης (Optimization) ελάμβανε τη σημαντικότερη παράμετρο ενός προβλήματος (π.χ. κόστος, απόδοση κλπ.) ως αντικειμενική συνάρτηση (Objective function) προς βελτιστοποίηση, τις δε υπόλοιπες – δευτερεύουσες παραμέτρους ως περιορισμούς (constraints) κείμενους σε επιτρεπτά εύρη. Αυτό συχνά οδηγούσε στη μη εξεύρεση κάποιας εφικτής λύσης χωρίς χαλάρωση των περιορισμών που αρχικά είχαν τεθεί, και επίσης κάποιες φορές στην πλήρη αμέλεια κάποιας σημαντικής παραμέτρου επηρεασμού.

Η σταδιακή αναγνώριση της πολυπαραμετρικότητας του χαρακτήρα των αποφάσεων έχει συντελέσει στην ανάπτυξη, ιδιαίτερα τα τελευταία τριάντα χρόνια, του ξεχωριστού επιστημονικού κλάδου της Πολυκριτηριακής Λήψης Αποφάσεων (ΠΚΛΑ – Multi Criteria Decision Making), που κυρίως εντάσσεται στα επιστημονικά πεδία της Ψυχολογίας και της Κοινωνιολογίας (χρησιμοποιώντας όμως έντονα Μαθηματικό επιστημονικό υπόβαθρο), όσον δε αφορά τα τεχνικά και οικονομικά ζητήματα κυρίως στο πεδίο της Επιχειρησιακής Έρευνας και του Management.

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, [Sen & Yang, 1998], η Πολυκριτηριακή Λήψη Αποφάσεων περιλαμβάνει ειδικότερα την Πολυπαραμετρική Λήψη Αποφάσεων (ΠΠΛΑ – Multi Attribute Decision Making, MADM) και την Λήψη Αποφάσεων Πολλαπλών Στόχων (ΛΑΠΣ – Multi Objective Decision Making – MODM). Στην ΠΠΛΑ γίνεται επιλογή μιας λύσης από πεπερασμένο αριθμό εναλλακτικών, με ταυτόχρονη ικανοποίηση πολλών παραμέτρων – κριτηρίων σταθμισμένης προτεραιότητας, ενώ στην ΛΑΠΣ αντί για επιλογή μιας λύσης γίνεται τελικά σύνθεση – διαμόρφωση της ίδιας της λύσης από την ταυτόχρονη ικανοποίηση πολλαπλών στόχων – κριτηρίων σταθμισμένης προτεραιότητας. Είναι σαφές ότι σε προβλήματα επιλογής είναι περισσότερο εφαρμόσιμη η ΠΠΛΑ, ενώ η ΛΑΠΣ άπτεται περισσότερο των ίδιων των διαδικασιών σχεδιασμού. Για την Πολυπαραμετρική/ Πολυκριτηριακή Λήψη Αποφάσεων, έχουν προταθεί πολλές και διαφορετικές θεωρίες και μεθοδολογίες υλοποίησης, υπάρχει δε εκτενής βιβλιογραφία, [Sen & Yang, 1998; Figueira et al., 2005]. Συνολικά όμως, σε όλες σχεδόν τις μεθόδους ΠΚΛΑ η επιλογή ή απόφαση που τελικά λαμβάνεται, προκύπτει ως το αποτέλεσμα ενός βέλτιστα ικανοποιούμενου «μείγματος» παραμέτρων επηρεασμού της απόφασης, όπως αυτό

ανιχνεύεται και καταγράφεται από τις επιθυμίες και τις προτεραιότητες του αποφασίζοντος σχετικά με τις παραμέτρους αυτές.

### **1.12.2 Τεχνικές και μέθοδοι Πολυπαραμετρικής Λήψης Αποφάσεων**

Ένα πρόβλημα ΠΠΛΑ, συνίσταται συνήθως από πεπερασμένο αριθμό εναλλακτικών λύσεων και ένα αριθμό ομάδων ή μεμονωμένων παραμέτρων κρίσης – αξιολόγησης, που μπορούν να συμπεριλαμβάνουν τόσο ποσοτικά όσο και ποιοτικά δεδομένα. Ο τρόπος έκφρασης των δεδομένων αυτών και καθορισμού της μεταξύ τους σημασίας – βαρύτητας, καθορίζει και τη βασική κατηγοριοποίηση των προβλημάτων ΠΠΛΑ.

Στα λεγόμενα προβλήματα ποιοτικής αξιολόγησης, διενεργείται σχετική αξιολόγηση ανά ζεύγη των εξεταζομένων εναλλακτικών έναντι των κριτηρίων, με υποκειμενικές κρίσεις (έναντι σταθερών αναφοράς ή κλιμάκων αξιολόγησης), οδηγώντας τελικά σε ισάριθμα με τα κριτήρια μητρώα – πίνακες αξιολόγησης, όλων των εναλλακτικών για κάθε κριτήριο. Τα κριτήρια μπορούν να είναι δομημένα όλα σε ένα επίπεδο (single layer attribute structure), ή κάποια από αυτά να αναλύονται περεταίρω στις παραμέτρους που τα συγκροτούν σε περισσότερα επίπεδα χαμηλότερης τάξης, συγκροτώντας δένδροειδή δομή (multi-level attribute structure). Η συγκρότηση των μητρώων αξιολόγησης γίνεται στα κριτήρια χαμηλότερου επιπέδου.

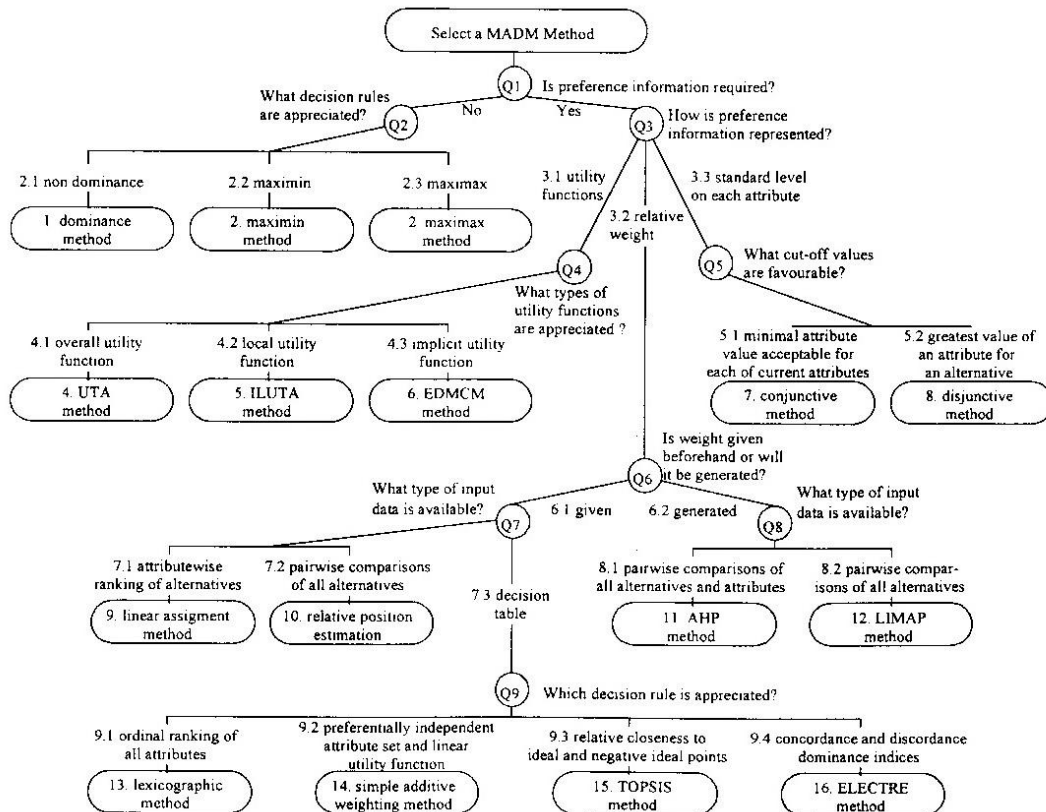
Σε ένα ποσοτικό πρόβλημα ΠΠΛΑ, όλες οι εναλλακτικές λαμβάνουν τιμές έναντι όλων των κριτηρίων τελευταίου επιπέδου, συγκροτώντας τελικά ένα μητρώο απόφασης.

Ο τρόπος καθορισμού σε κάθε περίπτωση της σχετικής βαρύτητας (relative importance) των παραμέτρων – κριτηρίων μεταξύ τους, ο οποίος και οδηγεί στην τελική κατάταξη (ranking) βάσει της οποίας επιλέγεται μια από τις εναλλακτικές, μπορεί να γίνει με διαφορετικές μεθόδους και τεχνικές.

Η επιλογή της καταλληλότερης μεθόδου γίνεται βάσει δύο κύριων ομάδων κανόνων. Αφενός βάσει του τρόπου καταγραφής και έκφρασης της προτίμησης – βαρύτητας των κριτηρίων στην ακολουθούμενη μέθοδο και αφετέρου βάσει του τύπου και του τρόπου διαχείρισης των δεδομένων αξιολόγησης που εισάγονται στη μέθοδο.

Με βάση αυτούς τους δύο βασικούς κανόνες οι κυριότερες μέθοδοι ΠΠΛΑ, μπορούν να συγκροτηθούν σε ένα δένδρο επιλογής της καταλληλότερα εφαρμόσιμης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.12.2.1.

Για τους μηχανικούς και τεχνικούς γενικότερα που καλούνται να εφαρμόσουν μεθόδους ΠΠΛΑ στην λήψη αποφάσεων για τεχνικά ζητήματα, παρατηρείται γενικά, και πρέπει να τονισθεί, ότι ο τρόπος διεπαφής και διαδραστικότητάς τους με την ακολουθούμενη μέθοδο για την μεταφορά των απαραίτητων για την ορθή κρίση δεδομένων, είναι γενικά σημαντικότερα από το ίδιο το μαθηματικό και υπολογιστικό σκέλος της μεθόδου και κατ'επέκταση συμβάλλουν δραστικά στην επιλογή μιας εξ'αυτών.



Σχήμα 1.12.2.1: Δένδρο Απόφασης για επιλογή μεθόδου ΠΠΛΑ [Sen & Yang, 1998]

Οι κυριότερες ομάδες μεθόδων ΠΠΛΑ κατηγοριοποιούνται σε:

- Μεθόδους που βασίζονται στη θεωρία της χρησιμότητας (Utility Theory), όπως οι μέθοδοι Additive Utility (UTA), [Jacquet-Lagrange & Siskos, 1982] και Multi Attribute Utility Theory (MAUT), [Dyer, 2005] και παραλλαγές της όπως η μέθοδος Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solutions (TOPSIS), [Triantaphyllou, 2000]
- Μεθόδους που βασίζονται στη δημιουργία σχέσεων υπεροχής (outranking relations) μεταξύ των εναλλακτικών, με κυριότερες τις οικογένειες μεθόδων ELECTRE και PROMETHEE.
- Μεθόδους αλληλεπίδρασης (interactive methods), βασισμένες σε διαδοχικούς υπολογισμούς και συζητήσεις που θα οδηγήσουν σε απόφαση μετά από συμβιβαστική λύση, όπως οι μέθοδοι Goal programming, STEM-STEP, ο αλγόριθμος των Zionts και Wallenius και η μέθοδος των Steuer και Choo.
- Υπόλοιπες μεθόδους ΠΠΛΑ με κατάλληλη θεωρητική και μαθηματική τεκμηρίωση, όπως η μέθοδος της Αναλυτικής Ιεράρχησης (Analytical Hierarchy Process, AHP), οι μέθοδοι NAIAD (Novel Approach to Imprecise Assessment and Decision Environments), SMAA (Stochastic Multiobjective Acceptability Analysis) [Lahdelma et al., 1998], η μέθοδος Regime [Hinloopen et al, 1983] κ.α.

Η εμβάθυνση στις παραπάνω μεθόδους και τα χαρακτηριστικά καθεμιάς ξεπερνά τους σκοπούς της παρούσας εργασίας και παραλείπεται, καθώς καλύπτεται αναλυτικά από τη σχετική βιβλιογραφία, [Figueira et al., 2005; Πολατίδης, 2003].

Θα παρατεθούν παρακάτω μόνο κάποια θεμελιώδη αξιώματα και χαρακτηριστικά της διαδεδομένης, ειδικά για τεχνικά ζητήματα ΠΠΛΑ, μεθόδου της Αναλυτικής



Ιεράρχησης (Analytical Hierarchy Process, AHP) που αποτέλεσε βασικό εργαλείο στην υλοποίηση της παρούσας διατριβής.

### 1.12.3 Μέθοδος Αναλυτικής Ιεράρχησης (Analytical Hierarchy Process, AHP)

Η Μέθοδος της Αναλυτικής Ιεράρχησης (Analytical Hierarchy Process), αποτελεί μια από τις πιο γνωστές και διαδεδομένες μεθόδους ΠΠΛΑ. Αναπτύχθηκε, τεκμηριώθηκε θεωρητικά και επιστημονικά από τον T. Saaty τη δεκαετία του 1970 και παρουσιάστηκε ολοκληρωμένα το 1980, [Saaty, 1980]. Από τότε έχει βρει εφαρμογή σε πολλές διαφορετικές επιστήμες (τεχνικές, οικονομικές, ανθρωπιστικές, κοινωνιολογικές, ιατρική) και σε πλήθος εφαρμογών και περιπτώσεων υποστήριξης αποφάσεων, διεθνώς και στην Ελλάδα, [Zahedi, 1986; Triantaphyllou & Mann, 1995]. Για τη μέθοδο AHP, το θεωρητικό της υπόβαθρο και τα αναλυτικά της βήματα υπάρχει πλούσια βιβλιογραφία, στην οποία ο αναγνώστης μπορεί να ανατρέξει για λεπτομέρειες, [Saaty & Vargas, 2001 & 2012].

Η διάδοση της AHP οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι με μεθοδολογικό και συστηματικό τρόπο επιτυγχάνει να ορίζει σε συγκεκριμένη δομή σύνθετα πολυπαραμετρικά προβλήματα απόφασης και να καταγράφει σε κλίμακες προτεραιοτήτων και βαρών και να αξιοποιεί με απλότητα και σαφήνεια την εμπειρία, τις επιθυμίες, και τη διαίσθηση του αποφασίζοντος στα δεδομένα του προβλήματος απόφασης, απομακρύνοντας τον τελικά από τις αυθαίρετες αποφάσεις. Επίσης, στο ότι χαρακτηρίζεται από ευκολία υλοποίησής της, ειδικά σε σύγκριση με άλλες μεθόδους ΠΠΛΑ. Θεωρείται μια γενικά ευέλικτη διαδικασία λήψης αποφάσεων και μπορεί να εφαρμοσθεί σε περιπτώσεις όπου εξετάζονται τόσο ποιοτικές όσο και ποσοτικές παράμετροι – κριτήρια μιας απόφασης. Φυσικά ως μέθοδος ΠΠΛΑ, χρησιμοποιείται για τη λύση προβλημάτων με πεπερασμένες – διακριτές εναλλακτικές λύσεις.

Η μέθοδος αξιοποιεί και συνδυάζει αρκετές προϋπάρχουσες και αυθύπαρκτες έννοιες και τεχνικές, όπως η ιεραρχική δόμηση της πολυπλοκότητας, οι συγκρίσεις ανά ζεύγη, οι περιττές κρίσεις και η μέθοδος ιδιοδιανύσματος για τα βάρη και τις εκτιμήσεις συνέπειας. Αν και αυτές οι έννοιες και τεχνικές ήταν γενικώς γνωστές και χρήσιμες, ο συνδυασμός τους όπως εφαρμόστηκε από τον Saaty, παρέχει τελικά μια ιδιαίτερος αποτελεσματική συνολική διαδικασία. Ένα σημαντικό προτέρημα της AHP είναι ότι η θεωρία της δεν απαιτεί τέλεια συνέπεια στις κρίσεις. Αντίθετα, όπως συμβαίνει στην πραγματική ζωή, επιτρέπει κάποιο βαθμό ασυνέπειας και παρέχει ταυτόχρονα μέτρα εκτίμησής και διόρθωσής της για κάθε ομάδα κρίσεων που περιλαμβάνεται στο πρόβλημα απόφασης. Αυτό τα μέτρα, ο Δείκτης και ο Λόγος Ασυνέπειας (Consistency Index & Consistency Ratio) είναι ένα σημαντικό υποπροϊόν της διαδικασίας παραγωγής προτεραιοτήτων βασισμένων στις ανά ζεύγη συγκρίσεις. Συνήθως ένας λόγος ασυνέπειας περίπου 10% ή και λιγότερο, θεωρείται αποδεκτός για την ασφαλή και αξιόπιστη εφαρμογή της μεθόδου.

Διαδικαστικά η AHP ακολουθεί μια προσέγγιση αποδόμησης – αποσύνθεσης (decomposition) του γενικότερου προβλήματος απόφασης σε μια πιο διαχειρίσιμη δένδροειδή ιεραρχία υπο-προβλημάτων – συνιστωσών της απόφασης, τα οποία μπορούν να κατανοηθούν, ομαδοποιηθούν και αξιολογηθούν καλύτερα. Επί της ιεραρχίας – δομής των συνιστωσών αυτών που καθορίζουν το πρόβλημα απόφασης, ερμηνεύονται και καταγράφονται συστηματικά με ζευγαρωτές συγκρίσεις οι προτιμήσεις και προτεραιότητες του/των αποφασίζοντος/-ων όσον αφορά τη

συμμετοχή και κατά συνέπεια τη βαρύτητα του καθενός εξ'αυτών στο πρόβλημα. Ακολουθώντας οι υποψήφιας εναλλακτικές εκτιμώνται έναντι των παραμέτρων – κριτηρίων τελευταίου επιπέδου (bottom level criteria), οι δε εκτιμήσεις αυτές μετατρέπονται αναλυτικά σε αριθμητικές τιμές και επεξεργάζονται έτσι ώστε να προκύψει τελικά κατάταξη κάθε εναλλακτικής σε μία αριθμητική κλίμακα. Η μέθοδος AHP αναλύεται σε τέσσερα βασικά στάδια:

α) την ιεραρχική ανάλυση του προβλήματος απόφασης, με τον καθορισμό του στόχου που τίθεται στην κορυφή της δομής του δένδρου της ιεραρχίας της απόφασης και την ανάλυσή του σε επιμέρους στοιχεία απόφασης (decision elements) και τις συνιστώσες τους, σε πολλαπλών επιπέδων κλάδους και παρακλάδια του δένδρου απόφασης. Κάτω από το τελευταίο επίπεδο συνιστωσών – κριτηρίων, τίθενται πάντοτε οι αξιολογούμενες εναλλακτικές.

Β) την συλλογή προτιμήσεων από τον λήπτη της απόφασης σχετικά με τα στοιχεία απόφασης, με ζευγαρωτές συγκρίσεις μεταξύ τους ως προς το κυρίαρχο κάθε φορά για αυτά στοιχείο – κριτήριο ανώτερου επιπέδου (Σε κλίμακες βαρύτητας ή προτίμησης από 1 έως 9). Έτσι δημιουργούνται πίνακες-μητρώα σύγκρισης ισάριθμα με τους κόμβους του δένδρου απόφασης. Τονίζεται ότι στο τελευταίο επίπεδο βαθμολογούνται οι ίδιες οι εναλλακτικές έναντι όλων των κριτηρίων του τελευταίου επιπέδου, με αντίστοιχα μητρώα ζευγαρωτής μεταξύ τους σύγκρισης. Εδώ πρέπει οπωσδήποτε να αναφερθεί μια ενδιαφέρουσα διαφοροποιημένη εφαρμογή της μεθόδου ως προς την αξιολόγηση των εναλλακτικών, που προτείνεται από τον Saaty [Saaty, 1986] για την κρίση των εναλλακτικών μιας απόφασης (Ideal Mode) και συνίσταται στην χρήση κλιμάκων (scales). Στην περίπτωση αυτή ορίζονται κατάλληλες κλίμακες κρίσης των εναλλακτικών για κάθε μέγεθος – κριτήριο τελευταίου επιπέδου. Σε κάθε εναλλακτική αποδίδεται κατόπιν μια τιμή από τις κλίμακες αυτές έναντι κάθε κριτηρίου τελευταίου επιπέδου. Οι βαθμίδες των κλιμάκων αυτών έχουν προηγουμένως κριθεί και καθορισθεί ως προς τη σημαντικότητά τους για το ανώτερο κριτήριο με ζευγαρωτές συγκρίσεις. Η χρήση του Ideal Mode της AHP, επιτρέπει να προσθαφαιρούνται εναλλακτικές στο πρόβλημα απόφασης χωρίς να διαφοροποιούνται οι βαθμολογίες των υπολοίπων εναλλακτικών και χωρίς να χρειάζεται κάθε φορά να επαναλαμβάνονται πολλαπληθείς και κοπιαστικές σχετικές ζευγαρωτές συγκρίσεις των εναλλακτικών μεταξύ τους έναντι όλων των κριτηρίων τελευταίου επιπέδου. Για να μη θιγεί η ακεραιότητα της μεθόδου, η συγκρότηση και βαθμολόγηση τέτοιων κλιμάκων προϋποθέτει από τον εφαρμόζοντα τη μέθοδο εμπειρία και πολύ καλή γνώση των μεγεθών και της φύσης των κριτηρίων τελευταίου επιπέδου, καθώς και του εύρους των επιδόσεων των πιθανώς εξεταζομένων εναλλακτικών έναντι αυτών. Τα οφέλη όμως που προκύπτουν ως προς τη λειτουργικότητα και εφαρμοσιμότητα της μεθόδου είναι μεγάλα. Για τους λόγους αυτούς στην παρούσα διατριβή υιοθετείται η συγκεκριμένη εκδοχή της μεθόδου AHP, όπως θα διαφανεί και παρακάτω.

γ) τον υπολογισμό των επιμέρους προτεραιοτήτων (βαρών) για τα στοιχεία απόφασης (μέθοδος των ιδιοδιανυσμάτων). Το βήμα αυτό είναι υπολογιστικό, βασίζεται στις αρχές της Γραμμικής Άλγεβρας και συγκεκριμένα της μεθόδου των ιδιοδιανυσμάτων (eigenvector method), εκκινεί από τα μητρώα σύγκρισης των στοιχείων απόφασης και καταλήγει σε τοπικά (Local) κανονικοποιημένα διανύσματα “w” σχετικής προτεραιότητας των στοιχείων απόφασης έναντι του στοιχείου – κριτηρίου του γονικού τους κόμβου (ανωτέρου επιπέδου). Η ίδια διαδικασία ακολουθείται και για

τις εναλλακτικές της απόφασης, έναντι όλων των κριτηρίων τελευταίου επιπέδου (bottom level criteria).

δ) την σύνθεση των επιμέρους προτεραιοτήτων σε γενικές προτεραιότητες των εναλλακτικών λύσεων. Αποτελεί το τελευταίο βήμα της διαδικασίας, ουσιαστικά έναν πολλαπλασιασμό μητρώων, δια του οποίου ακολουθώντας τη δομή του δένδρου απόφασης από κάτω προς τα πάνω (bottom – up) συνδυάζονται και συνθέτονται τα τοπικά διανύσματα αποτελεσματικότητας, προτίμησης και βαρύτητας, σε ένα συνολικό γενικό (Global) διάνυσμα “W” προτίμησης – επιλογής εναλλακτικής έναντι του κύριου στόχου, με στοιχεία ισάριθμα με τις εναλλακτικές και τιμές του καθενός από το 0 έως το 1, βάσει του οποίου λαμβάνει χώρα και η τελική απόφαση.

Τα δύο πρώτα στάδια (στάδια απόφασης) πραγματοποιούνται με τη συμμετοχή του λήπτη της απόφασης και ενδεχομένως ειδικών της περιοχής του προβλήματος απόφασης, όσον αφορά την αξιολόγηση – βαθμολόγηση των εναλλακτικών, έναντι των κριτηρίων τελευταίου επιπέδου ενώ τα δύο τελευταία είναι καθαρά υπολογιστικά. Τέλος θα πρέπει να αναφερθεί ότι η AHP είναι δυνατόν να επεκταθεί κατάλληλα και εφαρμοσθεί και για λήψη αποφάσεων από ομάδες (Group Decision Making), όχι μόνο από μεμονωμένους αποφασίζοντες.

#### 1.12.4 Λογισμικό εφαρμογής μεθόδου

Σύντομα μετά την παρουσίαση της AHP, ο «πατέρας» της μεθόδου Thomas Saaty και ο Ernest Forman, αναπτύσσουν και παρουσιάζουν το 1983 το λογισμικό εργαλείο Expert Choice σε περιβάλλον προσωπικού Η-Υ (PC), ιδρύοντας παράλληλα την εταιρία Expert Choice Inc., που εξελίσσει και διαθέτει το λογισμικό ως σήμερα.

Στόχος του λογισμικού είναι να εξυπηρετεί όσους εμπλέκονται στη λήψη σύνθετων αποφάσεων, στο να εφαρμόζουν τη μέθοδο AHP με πλήρη, αποτελεσματικό, γρήγορο και ευέλικτο τρόπο, όπως λ.χ. εξυπηρετεί έναν συγγραφέα ένας κειμενογράφος σαν το MS Word, ή κάποιον λογιστή το MS Excel.

Το Expert Choice αποτελεί ίσως το πιο διαδεδομένο λογισμικό εφαρμογής της AHP, ενώ διεθνώς διατίθενται και άλλα παρόμοια όπως τα Super Decisions της Creative Decisions Foundation, MakeItRational AHP της ομώνυμης εταιρίας, Triptych της Statistical Design Institute, AHP Decision της True North Software, καθώς και ορισμένα πρόσθετα (add-ins) στο MS Excel προγράμματα για υλοποίηση της μεθόδου, όπως το AHP Excel Template της Business Performance Management.

Με το περιβάλλον του Expert Choice ο χρήστης έχει αρκετές δυνατότητες και πλεονεκτήματα για την εφαρμογή της AHP, τα σημαντικότερα από τα οποία είναι:

- Η Ιεραρχική Δόμηση του δένδρου του προβλήματος απόφασης και η απεικόνισή και εποπτεία του, τόσο με αναλυτικό όσο και με γραφικό τρόπο.
- Η εύκολη και με ποικίλους τρόπους (λεκτικό, αριθμητικό, ποσοτικό) διενέργεια όλων των απαραίτητων ζευγαρωτών συγκρίσεων για την απόδοση προτεραιοτήτων και βαρυτήτων στα κριτήρια και τα υποκριτήρια/ συνιστώσες τους, με αυτόματο υπολογισμό των μεγεθών μέτρησης της ασυνέπειας (Consistency Index & Ratio)
- Η δυνατότητα απευθείας εισαγωγής βαρών και προτιμήσεων (direct assessment) έναντι αυτών που προκύπτουν από τις ζευγαρωτές συγκρίσεις, τα οποία μπορεί να

έχουν εξαχθεί με άλλες μεθόδους, ή για τα οποία ο αποφασίζων είναι απολύτως σίγουρος και επιθυμεί να τα επιβάλλει.

- Η δυνατότητα στο χρήστη για βαθμολόγηση των εναλλακτικών έναντι των κριτηρίων τελευταίου επιπέδου, είτε με ζευγαρωτές συγκρίσεις (Distributive Mode) , είτε με χρήση κλιμάκων για κάθε κριτήριο (Ideal Mode).
- Η πλήρως αυτοματοποιημένη διεξαγωγή όλων των απαραίτητων αλγεβρικών υπολογισμών και πράξεων επί μητρώων που απαιτεί η μέθοδος, ο υπολογισμός των σχετικών ιδιοδιανυσμάτων και η τελική σύνθεση προτιμήσεων και βαθμολογιών για την αξιολόγηση των εναλλακτικών.
- Η δυνατότητα δυναμικής ανάλυσης ευαισθησίας (μεταβολές κατανομής βαρών και προτιμήσεων) για το σύνολο της απόφασης και για μεμονωμένα κριτήρια ή υποκριτήρια και η μελέτη και απεικόνιση της επίδρασης του καθενός στην τελική κρίση.
- Παραθυρικό περιβάλλον λειτουργίας, χωρισμένο σε καρτέλες (tabs) για την κάθε βασική και απαραίτητη για τη μέθοδο διεργασία που ο χρήστης – αποφασίζων έχει να επιτελέσει (π.χ. Δόμηση ιεραρχίας, ζευγαρωτές συγκρίσεις κλπ.)
- Στις νεότερες εκδόσεις και παραλλαγές του λογισμικού δίνεται επίσης η δυνατότητα απομακρυσμένης λειτουργίας του από το Διαδίκτυο για χρήση – διενέργεια αποφάσεων και ομαδική εργασία (Comparion™ Suite, Comparion™ TeamTime™), αυτόνομου κώδικα Expert Choice για ενσωμάτωση και εφαρμογή της AHP μέσα σε ευρύτερες λογισμικές/προγραμματιστικές εφαρμογές (Expert Choice Inside) και δυνατότητες απευθείας διασύνδεσης και εισαγωγής στοιχείων από Βάσεις Δεδομένων σε περιβάλλον Oracle (Expert Choice 11.5).

Στα πλαίσια των σκοπών της παρούσας ΔΔ, επελέγη και χρησιμοποιήθηκε η έκδοση του λογισμικού Expert Choice 11, για την οποία το Εργαστήριο ΤΚΠ & Ε του ΕΜΠ, απέκτησε ακαδημαϊκή άδεια χρήσης.

### 1.13 Οργάνωση μεγάλου όγκου πληροφοριών σε σχεσιακές βάσεις δεδομένων

Η αλματώδης ανάπτυξη της πληροφορικής και των επικοινωνιών έχει καταστήσει τα τελευταία χρόνια την πληροφορία ως ένα από τα πολυτιμότερα αγαθά. Ειδικά για τον τεχνικό κόσμο η κατάλληλη αποθήκευση και μετέπειτα ανάκτηση, αξιοποίηση και εκμετάλλευση των πληροφοριών και των τεχνικών δεδομένων είναι ουσιώδους σημασίας για την προαγωγή της ίδιας της τεχνολογίας και των σχετικών με αυτή διεργασιών και διαδικασιών, όπως ο σχεδιασμός.

Ως πληροφορίες νοούνται συνήθως ειδήσεις, γεγονότα και έννοιες που αποκτάμε από την καθημερινή μας επικοινωνία και τα θεωρούμε ως αποκτηθείσα γνώση, ενώ τα δεδομένα μπορούν να είναι μη κατάλληλα επεξεργασμένα και μη ταξινομημένα σύνολα πληροφοριών. Ο στενός ορισμός για τα δεδομένα και τις πληροφορίες, όπως δίδεται κατά ANSI είναι:

- Δεδομένα (data) είναι μια παράσταση, όπως γράμματα, αριθμοί, σύμβολα κ.ά. στα οποία μπορούμε να δώσουμε κάποια σημασία (έννοια).
- Πληροφορία (information) είναι η σημασία που δίνουμε σ' ένα σύνολο από δεδομένα, τα οποία μπορούμε να επεξεργαστούμε βάσει προκαθορισμένων κανόνων και να βγάλουμε έτσι χρήσιμα συμπεράσματα. Με τις πληροφορίες περιορίζεται η αβεβαιότητα και βοηθούμαστε στην ορθότερη λήψη αποφάσεων.

Τα δεδομένα μπορούν να θεωρηθούν ως τρόποι αναπαράστασης εννοιών και γεγονότων που μπορούν να υποστούν διαχείριση και επεξεργασία. Η συλλογή και αποθήκευση ενός τεράστιου όγκου δεδομένων (όπως ισχύει ειδικά στην περίπτωση τεχνικών δεδομένων) δεν λύνει το πρόβλημα της σωστής οργάνωσης και ταξινόμησης τους. Τα δεδομένα πρέπει να οργανώνονται με τρόπο ώστε ανά πάσα στιγμή να είναι δυνατός ο εύκολος, γρήγορος και έγκαιρος εντοπισμός και να καθίσταται δυνατή η αξιοποίησή τους.

Ο παραδοσιακός – συμβατικός τρόπος αποθήκευσης δεδομένων και πληροφοριών, πριν τους Η-Υ, συνίστατο κυρίως στην καταγραφή τους σε βιβλία, φακέλους και καρτέλες, στα οποία συχνά προσαρτάτο και σχετικό συμπληρωματικό υλικό (σχέδια, μικροφίλμ κλπ.). Ο τρόπος αυτός ήταν φυσικά μονοσήμαντα προσανατολισμένος σε πρόσωπα (π.χ. πελάτης, εργαζόμενος, προμηθευτής), αντικείμενα (π.χ κτήριο, προϊόν, μηχανή) ή ευρύτερες έννοιες (π.χ. πρότζεκτ). Λάμβαναν χώρα εγγραφές (π.χ. παραγγελίες) σε σχετικές καρτέλες (π.χ. προμηθευτής), οι οποίες αποθηκεύονταν σε φακέλους, συρτάρια (π.χ προμηθευτών) κλπ. Ο τρόπος αυτός αυτονόητα έπασχε από σειρά προβλημάτων, όπως εισαγωγές λαθών, αδυναμίες, παραλείψεις και σφάλματα ενημέρωσης, κίνδυνο απώλειας, λανθασμένης τοποθέτησης και καταστροφής, ανάγκη χώρου και όγκου αποθήκευσης και πολλά άλλα.

Η έλευση των Η-Υ αρχικά βελτίωσε δραστικά το σκηνικό στην διαχείριση των δεδομένων, ειδικά σε όγκο, χώρο, υλικά και διατήρηση των δεδομένων, επειδή όμως αναπόφευκτα αρχικά ακολουθήθηκε η μετατροπή του παραδοσιακού τρόπου σε ηλεκτρονικό, παρέμειναν και πάλι αρκετά προβλήματα τα κυριότερα από τα οποία συνοψίζονται σε:

- Πλεονασμό των δεδομένων (data redundancy), επανάληψη δηλαδή των ίδιων δεδομένων σε διαφορετικά αρχεία (π.χ. κάποια ίδια στοιχεία σε ένα αρχείο πελατών και σε ένα παραγγελιών ως προς τον πελάτη)

- Ασυνέπεια των δεδομένων (data inconsistency), διαφορές δηλαδή που μπορούν να βρεθούν για το ίδιο πεδίο σε δύο διαφορετικής φύσης αρχεία (π.χ. το τηλέφωνο ενός πελάτη στο αρχείο πελατών και στο αρχείο παραγγελιών)
- Αδυναμία διαμοιρασμού δεδομένων (data sharing), όταν δηλαδή δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν από κοινού δεδομένα μεταξύ διαφορετικών αρχείων (π.χ. παραγγελίες, αποθήκη, πληρωμές πελάτη) που δημιουργεί καθυστέρηση στη λήψη αποφάσεων και στην εξυπηρέτηση των χρηστών.
- Δυσκολία ομοιομορφίας και προτυποποίησης των δεδομένων, όπου παρουσιάζεται διαφορετική αναπαράσταση και οργάνωση των δεδομένων στα διαφορετικά αρχεία των εφαρμογών, με συνέπεια προβλήματα προσαρμογής των χρηστών και προβλήματα ανταλλαγής δεδομένων μεταξύ συστημάτων

### 1.13.1 Έννοιες και χαρακτηριστικά σχεσιακών βάσεων δεδομένων

Ως λύση στα παραπάνω προβλήματα, ειδικά μετά την ραγδαία διάδοση της ηλεκτρονικής καταχώρησης και επεξεργασίας δεδομένων ήδη από τη δεκαετία του '70, προτάθηκε και άρχισε έκτοτε να εφαρμόζεται η συνένωση όλων των αρχείων μιας εφαρμογής και η σωστότερη μεταξύ τους οργάνωσή τους σε Τράπεζες Πληροφοριών ή Βάσεις Δεδομένων (Data Bases), [Maier, 1983; Abiteboul et al., 1995; Μάργαρης].

Μια *Βάση Δεδομένων (ΒΔ)* είναι ένα σύνολο αρχείων με υψηλό βαθμό οργάνωσης, συνδεδεμένων μεταξύ τους με λογικές σχέσεις ώστε να μπορούν να χρησιμοποιούνται από πολλές εφαρμογές και από πολλούς χρήστες ταυτόχρονα.

Ειδικό λογισμικό μεσολαβεί ανάμεσα στα αρχεία δεδομένων και τις εφαρμογές που χρησιμοποιούν οι χρήστες, ονομαζόμενο *Σύστημα Διαχείρισης Βάσης Δεδομένων (ΣΔΒΔ – Data Base Management System, DBMS)*. Το ΣΔΒΔ είναι στην ουσία ένα σύνολο από προγράμματα και υπορουτίνες που σχετίζονται με τον χειρισμό της βάσης δεδομένων, όσον αφορά τη δημιουργία, τροποποίηση, διαγραφή στοιχείων, με ελέγχους ασφαλείας κ.ά. Οι χρήστες των εφαρμογών αντλούν τα στοιχεία που τους ενδιαφέρουν από τη ΒΔ χωρίς να γνωρίζουν πως είναι οργανωμένα τα ίδια δεδομένα σ' αυτήν. Το ΣΔΒΔ μεσολαβεί ανάμεσα στον χρήστη και τη ΒΔ και μόνο μέσω του ΣΔΒΔ και της διεπαφής του με αυτό μπορεί ο χρήστης να αντλήσει πληροφορίες από τη ΒΔ, ευρισκόμενος όμως σε ανεξαρτησία με τα ίδια τα δεδομένα, τον τρόπο αποθήκευσης και τον όγκο τους. Ένα ΣΔΒΔ μπορεί να είναι εγκατεστημένο σ' έναν μόνο υπολογιστή ή και σ' ένα δίκτυο υπολογιστών και μπορεί να χρησιμοποιείται από έναν ή πολλούς χρήστες. Ο κλάδος της Πληροφορικής παρέχει πλούσια βιβλιογραφία για τις ΒΔ και τα ΣΔΒΔ, στις οποίες ο αναγνώστης της παρούσας μπορεί να ανατρέξει για περισσότερες λεπτομέρειες όσον αφορά την αρχιτεκτονική τους, [Maier, 1983; Kim & Lochovsky, 1989; Abiteboul et al., 1995; Μάργαρης]

Σε κάθε ΒΔ ορίζονται και πρέπει να αναφερθούν όμως εδώ, κάποιες βασικές έννοιες, που συνοψίζονται ακολούθως:

- Οντότητες (Entities): Οποιαδήποτε αυτόνομη μονάδα ή έννοια του φυσικού κόσμου (πρόσωπο, εταιρία, μηχανή, προϊόν) που προσδιορίζεται σε ανεξάρτητη ύπαρξη από επιμέρους στοιχεία. Διασυνδέονται εννοιολογικά μεταξύ τους μέσω του Μοντέλου Συσχέτισης Οντοτήτων (Entity Relationship Model, ER Model), που πρακτικά παριστά τη δομή μιας ΒΔ στη φάση του λογικού της σχεδιασμού.

- Ιδιότητες ή Χαρακτηριστικά ή Πεδία (Attributes): Είναι τα συστατικά που απαρτίζουν μια οντότητα στην πλήρη περιγραφή της μέσα σε μια ΒΔ, στο λεγόμενο Σχήμα (schema) της οντότητας.
- Στιγμιότυπα (Snapshots): Το κάθε αυτόνομο στοιχείο που εγγράφεται και περιέχεται σε μια οντότητα της ΒΔ (π.χ. συγκριμένος πελάτης, μηχανή κλπ.)
- Πρωτεύον Κλειδί (Primary Key): Το πεδίο εκείνο μιας οντότητας που έχει μοναδική και αυτόνομη τιμή για κάθε στιγμιότυπο της. Κάποιες φορές η μοναδικότητα αυτή μπορεί να προκύψει από συνδυασμό περισσότερων του ενός πεδίων (Σύνθετο Πρωτεύον Κλειδί) σε μια οντότητα.
- Συσχετίσεις ή Σχέσεις (Relationships): Είναι ο τρόπος σύνδεσης ξεχωριστών οντοτήτων μεταξύ τους δια των πεδίων τους, δια της οποίας καθίσταται δυνατή η συνδυαστική άντληση πληροφοριών από αυτές.

Η έννοια των Σχέσεων είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς δια μέσου αυτής ορίζονται το Σχεσιακό (Relational) Μοντέλο δόμησης Βάσεων Δεδομένων, σύμφωνα με το οποίο δομούνται οι λεγόμενες Σχεσιακές Βάσεις Δεδομένων (ΣΒΔ – Relational Databases, RDB) που είναι και οι επικρατέστερες σήμερα. Στο μοντέλο αυτό οι ΒΔ περιγράφονται με αυστηρές μαθηματικές έννοιες και ο χρήστης βλέπει τις οντότητες και τις συσχετίσεις με τη μορφή πινάκων (tables) και σχέσεων (relations) αντίστοιχα. Ένας πίνακας αποτελείται από γραμμές (rows) και στήλες (columns), όπου τοποθετούνται τα στοιχεία σε οριζόντια και κάθετη μορφή. Κάθε στήλη του πίνακα χαρακτηρίζει κάποια ιδιότητα της οντότητας και αποκαλείται χαρακτηριστικό (attribute) ή πεδίο (field), ενώ η κάθε γραμμή του πίνακα περιέχει όλες τις πληροφορίες (στήλες) που αφορούν ένα στοιχείο της οντότητας και αποκαλείται πλειάδα (tuple) ή εγγραφή (record).

Οι βασικοί κανόνες που ακολουθούνται κατά τον σχεδιασμό μιας ΣΒΔ είναι οι εξής :

- Κάθε οντότητα πρέπει να παριστάνεται ως ένας ξεχωριστός πίνακας.
- Κάθε στήλη του πίνακα αντιστοιχεί σε μια ιδιότητα της οντότητας.
- Κάθε γραμμή του πίνακα αντιστοιχεί σε μια εμφάνιση της οντότητας.
- Κάθε γραμμή πρέπει να είναι μοναδική, δηλ. αποκλείεται να υπάρχουν δύο ή και περισσότερες γραμμές που να περιέχουν τα ίδια ακριβώς στοιχεία.
- Η σειρά εμφάνισης των γραμμών δεν έχει καμία σημασία.
- Κάθε στήλη έχει μια δική της μοναδική ονομασία.
- Οι τιμές που ανήκουν στην ίδια στήλη πρέπει να είναι του ίδιου τύπου, δηλ. ή όλες αριθμοί ή όλες αλφαριθμητικές κοκ.
- Η στήλη που αποτελεί το πρωτεύον κλειδί (primary key) μιας οντότητας, δεν πρέπει να είναι ποτέ κενή (null).
- Αποκλείεται να υπάρχουν δύο ή και περισσότερες γραμμές που να περιέχουν την ίδια τιμή στο πρωτεύον κλειδί.
- Το πρωτεύον κλειδί μιας οντότητας αποκαλείται ξένο κλειδί (foreign key) σε μια άλλη οντότητα, με την οποία υπάρχει συσχετισμός.
- Μπορεί να υπάρχουν πολλές γραμμές που να έχουν την ίδια τιμή στο ξένο κλειδί

Οι ΣΒΔ και η εξάπλωσή τους γέννησε τα Σχεσιακά Συστήματα Διαχείρισης Βάσεων Δεδομένων (ΣΣΔΒΔ - Relational DataBase Management Systems, RBMS). Αυτά αναπτύχθηκαν με βάση το σχεσιακό μοντέλο και έχουν επικρατήσει πλήρως. Για την εγγραφή, τροποποίηση και διαγραφή στοιχείων που περιέχονται σε μια ΣΒΔ χρησιμοποιούνται ειδικές γλώσσες προγραμματισμού καλούμενες γλώσσες ερωταπαντήσεων (query languages). Η γλώσσα που αποτελεί σήμερα διεθνές

πρότυπο για την επικοινωνία των χρηστών με τα Σχεσιακά ΣΔΒΔ είναι η Δομημένη Γλώσσα Ερωτημάτων (Structured Query Language, SQL). Μπορεί να λειτουργήσει αυτόνομα αλλά και σε συνεργασία με άλλες γλώσσες προγραμματισμού.

Σήμερα, υπάρχουν εξελιγμένα εργαλεία δημιουργίας και διαχείρισης ΣΒΔ σε γραφικό περιβάλλον, αρκετά φιλικό προς τον χρήστη που επιτελούν:

- Δημιουργία πινάκων (Tables)
- Δημιουργία φορμών (Forms)
- Δημιουργία ερωτημάτων (Queries)
- Δημιουργία εκθέσεων (αναφορών, Reports)

Τα Σχεσιακά ΣΔΒΔ διακρίνονται στα μεγάλα, τα οποία αφορούν κυρίως μεγάλους οργανισμούς και επιχειρήσεις, έχουν τεράστιο όγκο δεδομένων και πολλούς χρήστες ταυτόχρονα, (όπως τα Oracle, Ingres, Informix, SQL Server κ.ά.) και στα μικρά, τα οποία αφορούν κυρίως απλούς χρήστες, όπως είναι η Microsoft Access, η Paradox, η FoxPro, MySQL κ.ά.

Δύο ακόμα έννοιες έννοιες των ΣΒΔ στις οποίες πρέπει οπωσδήποτε να γίνει αναφορά, αφορούν τον τύπο των Σχέσεων μεταξύ Οντοτήτων και την Κανονικοποίηση.

#### Σχέσεις Μεταξύ Οντοτήτων

Ο σωστός σχεδιασμός και προσδιορισμός των οντοτήτων και των ιδιοτήτων τους αποτελούν τα θεμελιώδη βήματα για τη σωστή σχεδίαση και υλοποίηση μιας βάσης δεδομένων. Οι συσχετίσεις όμως είναι απαραίτητες για να είναι δυνατή η άντληση πληροφοριών που αφορούν δύο ή και περισσότερες οντότητες. Ο βαθμός μιας συσχέτισης είναι ίσος με το πλήθος των οντοτήτων που συμμετέχουν σ' αυτήν. Έτσι, όταν οι οντότητες που συμμετέχουν σε μια συσχέτιση είναι δύο, η συσχέτιση αποκαλείται *διμελής* ή *δυναδική*, όταν τρεις, *τριμελής* κ.ο.κ..

Οι διμελείς συσχετίσεις που είναι και οι κυριότερες χωρίζονται σε:

- *Ένα-προς-ένα (1:1)*, όπου μια εμφάνιση της μιας οντότητας συνδέεται με μία και μόνο μία εμφάνιση μιας άλλης οντότητας. Στην περίπτωση των διμελών συσχετίσεων του τύπου ένα-προς-ένα, είναι δυνατή η ένωση των στοιχείων και των δύο ιδιοτήτων για τη δημιουργία μιας μοναδικής οντότητας (πίνακα).
- *Ένα-προς-πολλά (1:M)*, όπου μια εμφάνιση της μιας οντότητας συνδέεται με πολλές εμφανίσεις της άλλης οντότητας, αλλά κάθε εμφάνιση της δεύτερης οντότητας συνδέεται με μία και μόνο μία εμφάνιση της πρώτης οντότητας. Οι διμελείς συσχετίσεις του τύπου ένα-προς-πολλά είναι οι πιο συχνές και οι πιο βολικές στη διαχείριση.
- *Πολλά-προς-πολλά (M:N)*, όπου σε μια εμφάνιση της μιας οντότητας αντιστοιχούν πολλές εμφανίσεις της άλλης οντότητας και σε κάθε εμφάνιση της δεύτερης οντότητας αντιστοιχούν πολλές εμφανίσεις της πρώτης οντότητας. Για τη διαχείριση μιας διμελούς σχέσης πολλά-προς-πολλά, θα πρέπει να δημιουργηθεί ένας τρίτος συνδυαστικός πίνακας που θα περιέχει δύο μόνο ιδιότητες (πεδία), δηλ. τα πεδία κλειδιά των δύο οντοτήτων, των οποίων ο συνδυασμός θα είναι και το πεδίο κλειδί (σύνθετο κλειδί) του νέου πίνακα.

#### Κανονικοποίηση

Είναι η διαδικασία διάσπασης μεγάλων σχέσεων μεταξύ πινάκων μιας ΣΒΔ, που επιτελείται με στόχο την αποφυγή περιττών επαναλήψεων και πλεονασμών στην καταγραφή των πληροφοριών και δεδομένων. Βοηθάει στον αρτιότερο λογικό



σχεδιασμό μιας βάσης δεδομένων και είναι συμπληρωματική του μοντέλου οντοτήτων συσχετίσεων. Συνίσταται σε συνεχείς διασπάσεις των πινάκων σε πιο απλές και συμπαγείς μορφές, με στόχο να αποφεύγεται ο πλεονασμός (επανάληψη) των δεδομένων. Αφαιρούνται πεδία από τις αρχικές μεγάλες σχέσεις και τοποθετούνται σε νέες σχέσεις, έτσι ώστε να διατηρούνται οι ίδιες πληροφορίες και με τις νέες σχέσεις.

Οι παραπάνω έννοιες και αρχές υιοθετούνται και εφαρμόζονται στα πλαίσιο της παρούσας ΔΔ για τη συγκρότηση μιας δομής ΣΒΔ Τεχνολογιών, Συστημάτων, Υλικών, Παρόχων ΤΚΠ & ΤΚΕ κλπ., κατάλληλης να καταγράφει και να συντηρεί σε μια ευέλικτη «βάση γνώσης» όλα τα υπάρχοντα για αυτές συναφή τεχνικά δεδομένα και ικανής να υποστηρίξει περαιτέρω Συστήματα και Διαδικασίες Υποστήριξης Αποφάσεων και Επιλογής για εφαρμογές πρωτοτυποποίησης συγκεκριμένων απαιτήσεων. Η προτεινόμενη δομή θα αναλυθεί περαιτέρω στο αντίστοιχο κεφάλαιο.

## 1.14 Εργαστήριο ΤΚΠ&Ε του ΕΜΠ

Το Εργαστήριο Ταχείας Κατασκευής Πρωτοτύπων & Εργαλείων της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π. συγκροτήθηκε στα Πλαίσια του Ευρωπαϊκά Χρηματοδοτούμενου Ερευνητικού Προγράμματος ΕΠΕΤ ΙΙ της ΓΓΕΤ με τίτλο «ΝΕΚΤΑΡ: Ανάπτυξη Εγκαταστάσεων για την Ταχεία Δημιουργία Πρωτοτύπων». Υπήρξε ένας από τους πρώτους για τον ελληνικό χώρο φορείς που εγκατέστησαν, λειτούργησαν και διερεύνησαν, σε θεωρητικό αλλά και σε επίπεδο εφαρμογών, τεχνολογίες ΤΚΠ και ΤΚΕ. Το έτος 2001 θεσμοθετήθηκε ως επίσημο εργαστήριο της Σχολής Μ-Μ του ΕΜΠ και έως και σήμερα συνεχίζει τη δραστηριότητά του, με κύριους άξονες:

- Την εκπαίδευση και ενημέρωση των φοιτητών της Σχολής Μ-Μ του ΕΜΠ στα αντικείμενα της ΤΚΠ και ΤΚΕ και της ενάσκησης τους στα πλαίσια του Ολοκληρωμένου Μηχανολογικού Σχεδιασμού (Εκπαιδεύσεις, εργαστηριακές ασκήσεις και επιδείξεις, Διπλωματικές Εργασίες)
- Την υποστήριξη εκπόνησης σχετικών με το αντικείμενο Διπλωματικών και Πτυχιακών εργασιών σε προπτυχιακό και μεταπτυχιακό επίπεδο
- Την υποστήριξη συλλογικών φοιτητικών εργασιών (πρότζεκτ) και ευρύτερων ερευνητικών και τεχνολογικών δραστηριοτήτων άλλων Εργαστηρίων και Ομάδων Εργασίας σε επίπεδο Σχολής Μ-Μ ΕΜΠ, σε θέματα πρωτοτυποποίησης και σχεδιασμού ευρύτερα
- Τη στενή παρακολούθηση των διεθνών εξελίξεων και της έρευνας στις περιοχές της ΤΚΠ & Ε
- Τη διεξαγωγή, με τα διατιθέμενα σε αυτό μέσα υλικοτεχνικής υποδομής (λογισμικό, μηχανές, συστήματα) και σε συνεργασία με άλλα πανεπιστημιακά εργαστήρια και βιομηχανικούς φορείς, έρευνας ΤΚΠ & ΤΚΕ και εφαρμογών τους (μηχανολογικών και μη) στο ελληνικό βιομηχανικό και κατασκευαστικό περιβάλλον και τη δημοσιοποίηση των αποτελεσμάτων της
- Την ενημέρωση και υποστήριξη του ελληνικού κατασκευαστικού κλάδου και των Μικρο-Μεσαίων Επιχειρήσεων (ΜΜΕ) ιδιαίτερα, σε θέματα σχεδιασμού, πρωτοτυποποίησης, ΤΚΠ και ΤΚΕ, με διμερείς συνεργασίες και παροχή υπηρεσιών δια μέσου του ΕΔΕΙΑ ΕΜΠ.

Από Εργαστήριο ΤΚΠ & Ε του ΕΜΠ έχουν υλοποιηθεί και υλοποιούνται ως σήμερα με επιτυχία πολυάριθμα ερευνητικά έργα σχετικά με το ειδικό του αντικείμενο, όπως Προγράμματα Ανάπτυξης Βιομηχανικής Έρευνας (ΠΑΒΕ), πρόγραμμα με τον ΕΟΜΜΕΧ (ADAPT – ΕΙΝΕΤΕ 210/13: Εισαγωγή Νέων Τεχνολογιών στις ΜΜΕ), έργα ΠΕΝΕΔ και έργα στα πλαίσια του ΕΣΠΑ (Κουπόνια Καινοτομίας, Έργο «ΘΑΛΗΣ»).

Σταδιακά το Εργαστήριο ΤΚΠ & Ε έχει εξοπλισθεί και συνεχίζει ως σήμερα να συμπληρώνει τον σχετικό με ΤΚΠ & ΤΚΕ εξοπλισμό του, με:

- Λογισμικά 3D CAD/CAE/PLM (IDEAS, Solidworks, CATIA, SolidCAM)
- Εξειδικευμένο Λογισμικό προετοιμασίας και διαχείρισης αρχείων STL για ΤΚΠ (Materialize Magics)
- Λογισμικό υλοποίησης ΠΠΛΑ με τη μέθοδο AHP (Expert Choice 11)
- Μηχανή ΤΚΠ τεχνολογίας LOM, τύπου Helisys LOM 1015 (Σχήμα 1.14.1)
- Μηχανή ΤΚΠ τεχνολογίας FDM, μικρής κλίμακας, τύπου Dimension uPrint (Σχήμα 1.14.1)

- Επιτραπέζιας κλίμακας φρέζα CNC 3 αξόνων, τύπου Comagran MP-Profi
- Θάλαμο Κενού και παρελκόμενα για χύτευση υπό κενό πολυμερών υλικών



Σχήμα 1.14.1: Ο Εξοπλισμός ΤΚΠ του Εργαστηρίου ΤΚΠ & Ε του Ε.Μ.Π.

Το Εργαστήριο δραστηριοποιείται παράλληλα στο συγγενές αντικείμενο της βιομηχανικής Μετρολογίας και του Αντίστροφου Σχεδιασμού (ΑΣ – Reverse Engineering, RE), διαθέτοντας για τις δραστηριότητες αυτές:

- Μηχανή Μέτρησης Συντεταγμένων (Coordinate Measuring Machine, CMM) επαφής με γέφυρα, τύπου DEA/ Brown & Sharpe/ Mistral/ PH10M/TP200 Renishaw Head
- Μηχανή-Βραχίονα Μέτρησης Συντεταγμένων (Coordinate Measuring Machine, CMM) επαφής και μη επαφής (laser scanner), αρθρωτή 6 βαθμών ελευθερίας, τύπου Faro Arm Platinum
- Τραχύμετρο Επαφής Taylor-Hobson, τύπου Surtronic 3+
- Σειρά διακριβωμένων συμβατικών μετρητικών οργάνων (παχύμετρα, μικρόμετρα κ.α.)
- Συνοδευτικό μετρητικό λογισμικό και λογισμικό συλλογής, διαχείρισης, επεξεργασίας νέφους σημείων (PC Dimis, Geomagic κ.α.)

Ο ρόλος του Εργαστηρίου ΤΚΠ & Ε του ΕΜΠ υπήρξε ουσιώδης για την έρευνα τα αποτελέσματα της οποίας παρουσιάζονται στην παρούσα ΔΔ, χωρίς την ύπαρξη και τη φιλοξενία του οποίου δεν θα ήταν δυνατόν να διεξαχθεί. Για αυτό και εκ μέρους του γράφοντος οφείλονται πρώτα αναγνώριση και κατόπιν πολλές ευχαριστίες πρώτα στο ίδιο το Ε.Μ.Π. και κατόπιν, από τον θεμελιωτή και ιδρυτή του Εργαστηρίου Ομότιμο Καθηγητή κ. Μ. Σφαντζικόπουλο, τον αρμόδιο για Βιομηχανική Μετρολογία και ΑΣ συνάδελφο Δρ. Γ. Καΐσαρλή, το συνάδελφο και αγαπητό φίλο Θ. Βασιλόπουλο, έως το τελευταίο πρόσωπο ή φορέα που η εμπλοκή ή συνεργασία του με το Εργαστήριο και τον γράφοντα γέννησε ωφέλιμα και αξιοποιήσιμα για την εργασία αυτή αποτελέσματα.



## 2 ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΟ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΚΑΙ ΣΤΟΧΟΙ ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ

Μετά την τοποθέτηση της επιστημονικής περιοχής της εργασίας, της εκτενούς αναφοράς του ρόλου των πρωτοτύπων, των συμβατικών και σύγχρονων εναλλακτικών πρωτοτυποποίησης, των τεχνολογιών ΤΚΠ & ΤΚΕ, των σημαντικότερων σχετικών ερευνητικών προσπαθειών στις περιοχές αυτές, των αρχών της Πολυπαραμετρικής Λήψης Αποφάσεων και της Οργάνωσης Πληροφορίας σε Βάσεις Δεδομένων που έχει προηγηθεί στην εργασία, τίθενται εδώ το ακριβές αντικείμενο και οι στόχοι της ΔΔ με έμφαση:

- Στο συνεχώς αυξανόμενο πλήθος και τη διαρκή εξέλιξη όλων των σύγχρονων εναλλακτικών πρωτοτυποποίησης
- Στο ολοένα αυξανόμενο πλήθος ειδικά των τεχνολογιών ΤΚΠ, συστημάτων και μηχανών ανά τεχνολογία ΤΚΠ και διαθέσιμων υλικών για αυτές
- Στην τεκμηριωμένα περιορισμένη διεθνώς έρευνα επί τεχνολογιών ΤΚΠ που βασίζονται σε φύλλα στερεού υλικού και ειδικά της τεχνολογίας LOM και των παραλλαγών της, καθώς και σε παρατηρούμενες διαφορές και αμφισβητούμενα αποτελέσματα επί αυτής
- Στο δυσμενή χαρακτήρα της σήμερα επικρατούσας κατάστασης διεθνώς, ειδικά στις ΜΜΕ και στο ελληνικό τεχνικό – κατασκευαστικό περιβάλλον, που καθιστά αναγκαίο οι τελευταίες να υποστηρίζονται συστηματικά και τεκμηριωμένα στη λήψη καίριων αποφάσεων επιλογής μεθόδων υποστήριξης διαδικασιών σχεδιασμού, όπως είναι η επιλογή βέλτιστης στρατηγικής - κατεύθυνσης και συγκεκριμένων συστημάτων για την πρωτοτυποποίηση νέων προϊόντων και κατασκευών

Σαν βασικοί στόχοι της ΔΔ τίθενται:

- Η σε βάθος μελέτη της ΤΚΠ και ΤΚΕ, των σχετικών αντικειμένων της έρευνας και η σταχυολόγηση και καταγραφή των βασικότερων διεθνώς δημοσιευμένων αποτελεσμάτων και στοιχείων που μπορούν να αξιοποιηθούν σε υποστήριξη αποφάσεων.
- Η απόκτηση ίδιας τεχνογνωσίας και εμπειρίας σε χρήση και εφαρμογές ΤΚΠ και ΤΚΕ στο ελληνικό περιβάλλον, που να μπορεί να αξιοποιηθεί για την υποστήριξη σχετικών αποφάσεων των εγχώριων φορέων σχεδιασμού, ανάπτυξης και παραγωγής.
- Η συγκρότηση μεθοδολογικού συστήματος τεκμηριωμένης λήψης αποφάσεων βασικής κατεύθυνσης εναλλακτικής πρωτοτυποποίησης, για τους φορείς που επιτελούν σχεδιασμό και ανάπτυξη νέων μηχανολογικών προϊόντων, για χρήση και αξιοποίηση κυρίως από τις ελληνικές ΜΜΕ. Το σύστημα θα εφαρμόζει έγκυρες μεθόδους ΠΠΛΑ, με (α) θεώρηση από αυτό των ισχυόντων στο μηχανολογικό σχεδιασμό Χαρακτηριστικών Σχεδιασμού (ΧΣ) και Παραμέτρων Σχεδιασμού (ΠΣ), διαδικαστικών (κόστος, χρόνος κλπ.) και άλλων παραγόντων που επιδρούν στην απόφαση, (β) αξιοποίηση της σχετικής τεχνογνωσίας από τους ειδικούς και από την ειδικά διεξαχθείσα για το σκοπό αυτό έρευνα και (γ) με χαρακτηριστικά ευελιξίας και προσαρμοσιμότητας του σε δεδομένο κατασκευαστικό περιβάλλον.
- Η συγκρότηση της κεντρικής – βασικής δομής μιας σχεσιακής βάσης δεδομένων για την συστηματική καταγραφή τεχνολογιών ΤΚΠ, συστημάτων και υλικών ΤΚΠ και φορέων/παρόχων σχετικών υπηρεσιών, για αξιοποίηση

από το ελληνικό κατασκευαστικό περιβάλλον και η πιλοτική συγκρότηση προς επίδειξη (demo) Συστήματος Υποστήριξης Απόφασης (ΣΥΑ – Decision Support System, DSS) με αναφορά στη ΣΒΔ και με εφαρμογή αξιολόγησης εναλλακτικών κατά VDI 2225.

- Ειδικότερη έρευνα σε θέματα της τεχνολογίας LOM, ειδικά εκεί που στη διεθνή βιβλιογραφία εντοπίζονται κενά και διαφορετικά αποτελέσματα, για αξιοποίηση από το σύστημα ΠΠΛΑ και τη ΒΔ. Κύρια αντικείμενα οι επιδόσεις διαστασιολογικής ακρίβειας & ποιότητας επιφάνειας – δυνατότητες βελτίωσης, η προεκτίμηση χρόνου και κόστους κατασκευής πρωτοτύπων και η συγκρότηση βασικών κανόνων προσανατολισμού κατασκευής.
- Η διερεύνηση επιδόσεων και δυνατοτήτων συστήματος ΤΚΠ μικρής κλίμακας τεχνολογίας FDM, με έμφαση στην απευθείας επίτευξη μικρών συναρμολογημένων συνόλων.
- Η διερεύνηση της εφαρμοσιμότητας, αποτελεσματικότητας και δυνατότητας αξιοποίησης των τεχνολογιών ΤΚΠ και ΤΚΕ για πραγματικές βιομηχανικές εφαρμογές, με εστίαση στο ελληνικό κατασκευαστικό περιβάλλον.
- Η διερεύνηση οφελών από την επέκταση εφαρμογής και αξιοποίησης των τεχνολογιών ΤΚΠ και ΤΚΕ και για ορισμένες μη αμιγώς μηχανολογικές και βιομηχανικές εφαρμογές, έντονου ελληνικού ενδιαφέροντος, που απαιτούν διεπιστημονική προσέγγιση.

### **3 ΣΥΜΒΟΛΗ ΣΤΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΙΚΗ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ ΠΡΩΤΟΤΥΠΟΠΟΙΗΣΗΣ ΣΤΙΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ & ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΝΕΩΝ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ**

#### **3.1 Ανάγκη συστηματικής καθοδήγησης ενεργειών πρωτοτυποποίησης και πεδίο/πεδία εφαρμογής/εφαρμογών**

Έχει καταστεί ήδη σαφές από το προηγούμενο μέρος της εργασίας ότι:

- Οι ολιγάριθμες και έντονα διαφοροποιημένες μεταξύ τους συμβατικές και παραδοσιακές μέθοδοι πρωτοτυποποίησης έχουν τα τελευταία χρόνια εμπλουτισθεί με πολλές σύγχρονες εναλλακτικές για τη δημιουργία πρωτοτύπων, τόσο φυσικών, όσο και ψηφιακών/εικονικών.
- Η διαδικασία του Μηχανολογικού Σχεδιασμού παλιότερα επιτελούμενη με τρόπο σειριακό, επέτρεπε να είναι στην πορεία της σχετικά προκαθορισμένος έως δεσμευτικός ο χρόνος και ο τρόπος υλοποίησης πρωτοτύπων, είτε για μεμονωμένα εξαρτήματα είτε για πλήρη συναρμολογημένα σύνολα. Ο σύγχρονος τρόπος ενάσκησης του Ολοκληρωμένου Μηχανολογικού Σχεδιασμού (Concurrent Engineering) αίρει τα στερεότυπα του χρόνου εμφάνισης πρωτοτύπων διαφόρων κατηγοριών μέσα στη διαδικασία, καθώς και των απαιτήσεων από αυτά.
- Οι τεχνολογίες ΤΚΠ και ΤΚΕ έχουν καθιερωθεί ανάμεσα στις σύγχρονες εναλλακτικές πρωτοτυποποίησης και συμπίεσης χρόνου εν γένει, οι δε τρέχουσες συνθήκες συμβάλλουν στην αλματώδη αύξηση του αριθμού σχετικών προσφερομένων συστημάτων, στην επαύξηση των δυνατοτήτων τους και στη διαφοροποίηση των χαρακτηριστικών τους.
- Λοιπές σύγχρονες εναλλακτικές φυσικών και ψηφιακών πρωτοτύπων, επίσης εξελίσσουν διαρκώς τα χαρακτηριστικά τους, ειδικά δε για τα λεγόμενα «ψηφιακά», κυρίως χάρις στη διαρκή εξέλιξη των μικρο-ηλεκτρονικών, των Η-Υ και των λογισμικών εργαλείων

Είναι ακόμη γενικά παραδεκτό πως:

- Η αγορά στην οποία απευθύνονται τα συστήματα ΤΚΠ και ΤΚΕ, ιδίως τα βιομηχανικής και επαγγελματικής κλίμακας, αφορώντας καθαρά παραγωγικούς φορείς, είναι φυσιολογικά σχετικά περιορισμένη και σε κάθε περίπτωση μη συγκρίσιμη σε μέγεθος με την αγορά άλλων ευρέως διαδεδομένων βιομηχανικών προϊόντων που απευθύνονται στο ευρύ κοινό (π.χ. αυτοκίνητα, τηλεοράσεις κλπ). Το γεγονός αυτό οδηγεί σε έντονο ανταγωνισμό μεταξύ παραγωγών οίκων συστημάτων ΤΚΠ, υπερτονισμό των πλεονεκτημάτων τους και έντεχνη απόκρυψη των ελαττωμάτων ή αδυναμιών τους.
- Στο τεχνολογικό και βιομηχανικό πεδίο, καινοτόμες τεχνολογίες και οι εφαρμογές τους, κατ'επιταγήν του ίδιου του εταιρικού μάρκετινγκ, ακόμα και ως γενικότερη τάση ή «μόδα», τείνουν να προσελκύουν τους παραγωγικούς φορείς στο να τις υιοθετούν στις δραστηριότητές τους, χωρίς όμως να είναι πάντοτε σαφές ή τεκμηριωμένο ότι θα αποκομίσουν από αυτές πραγματικά οφέλη, ειδικά έναντι άλλων καθιερωμένων και τεχνολογικά ώριμων εναλλακτικών.
- Εκτός από τα αντικειμενικά και άμεσα συγκρίσιμα τεχνικά χαρακτηριστικά και μεγέθη κάθε σύγχρονου τεχνολογικού μέσου, υπάρχουν ταυτόχρονα σχεδόν πάντοτε και άλλοι παράγοντες (τοπικοί, οργανωσιακοί, κλπ.) με σημαίνουσα και ουσιαστική επίδραση ως προς την υιοθέτησή του ή μη από παράγοντες και φορείς που δραστηριοποιούνται σε δεδομένο κατασκευαστικό περιβάλλον και που πρέπει οπωσδήποτε να λαμβάνονται και αυτοί υπόψη.

Το σύγχρονο βιομηχανικό και παραγωγικό περιβάλλον και οι φορείς του, εν μέσω παγκόσμιας οικονομικής κρίσης που έντονα βιώνει και η χώρα μας, καλούνται συχνά να λάβουν αποφάσεις τεχνικού χαρακτήρα κάτω από συνθήκες έντονης πίεσης και με ισχυρό οικονομικό αντίκτυπο από τις αποφάσεις αυτές. Οι συνέπειες εσφαλμένων, ή έστω μη βέλτιστων αποφάσεων που αφορούν διαδικασίες σχεδιασμού μπορεί να οδηγήσουν σε αποτυχία νέων προϊόντων, γενικότερη εμπορική αποτυχία του παραγωγικού φορέα, ακόμη και πλήρη αδυναμία επιβιώσής του, ιδιαίτερα για τις ΜΜΕ. Η απόφαση κατάλληλης επιλογής εναλλακτικής πρωτοτυποποίησης είναι μια από αυτές τις αποφάσεις, που μάλιστα αναγνωρίζεται σαφώς ως ένα πρόβλημα πολυπαραμετρικού χαρακτήρα στο οποίο συνυπάρχουν τόσο τεχνικές όσο και μη τεχνικές παράμετροι. Από κάθε «πρωτότυπο» ζητούνται να επαληθευθούν και ελεγχθούν κάθε φορά πολλές και διαφορετικές μεταξύ τους προδιαγραφές και παράμετροι του σχεδιασμού, με διαφορετικές δεσμεύσεις και επηρεασμό από το κόστος, το διαθέσιμο χρόνο, τη δομή του φορέα, τις τοπικές, αλλά και ευρύτερες συνθήκες, καθώς και από πολλές ακόμα παραμέτρους. Λαμβανομένων δε ιδιαίτερα υπόψη των παραγόντων και συνθηκών που προαναφέρθηκαν, καθίσταται σαφής η σημαντικότητα της συστηματικής υποστήριξης των εμπλεκόμενων στο σχεδιασμό, ανάπτυξη και παραγωγή βιομηχανοποιημένων προϊόντων και μη τυποποιημένων ή ηλεκτρονικών εξαρτημάτων που τα απαρτίζουν, στην επιλογή της κατάλληλης κάθε φορά και σε δεδομένο χρόνο και φάση της διαδικασίας σχεδιασμού, μεθόδου για την πρωτοτυποποίηση τους.

Η προτεινόμενη συστηματική μέθοδος καθορισμού κατεύθυνσης πρωτοτυποποίησης, χωρίς να χάνει τη γενικότητα της εφαρμογής της, απευθύνεται κατά κύριο λόγο στις ελληνικές ΜΜΕ και βιοτεχνικές/ βιομηχανικές επιχειρήσεις.

Κύρια πεδία εφαρμογών της αποτελούν τα πρωτότυπα μηχανολογικών εξαρτημάτων και συνόλων (prototype mechanical components & assemblies), σύνθετης κατά κανόνα μορφής, που κατά κύριο λόγο στοχεύεται τελικά να παράγονται από μορφοποιητικές (formative) μεθόδους παραγωγής (χυτεύσεις πλαστικών-πολυμερών-μεταλλικών, διαμορφώσεις με πίεση ή υπό κενό, διαμορφώσεις ελασμάτων κλπ.) και δευτερευόντως από σύνθετες μηχανουργικές διαδικασίες αφαίρεσης υλικού.

Χωρίς επίσης να αίρεται η ευρύτερη θεώρηση της πρωτοτυποποίησης κατά τον ΟΜΣ, η προτεινόμενη μέθοδος είναι δόκιμο να εφαρμόζεται κατά περίπτωση για πρωτότυπα σύμφωνα με την κατηγοριοποίηση τους κατά VDI 3404, δηλαδή για:

- Πρωτότυπα μορφής
- Γεωμετρικά Πρωτότυπα
- Φυσικά/Λειτουργικά Πρωτότυπα
- Πρωτότυπα και βοηθητικά εργαλεία παραγωγής (Εκ των οποίων θα προκύψουν Τεχνικά Πρωτότυπα)

, χωρίς όμως η κατηγοριοποίηση αυτή να δεσμεύει αποκλειστικά τις απαιτήσεις διαπίστωσης – επαλήθευσης παραμέτρων του προϊόντος από το πρωτότυπο. Αυτό εξάλλου είναι και το γενικότερο πνεύμα που διέπει τον ΟΜΣ.

Για κάθε μια από τις παραπάνω περιπτώσεις πρωτοτύπου η μεθοδολογία δύναται να προσαρμόζει κατάλληλα το δένδρο αποφάσεών της και εφαρμόζει διαφορετική θεώρηση των δυνατών εναλλακτικών κατά περίπτωση. Τέλος πρέπει να αναφερθεί ότι, με κατάλληλη αναπροσαρμογή του δένδρου των κριτηρίων και υποκριτηρίων, η μέθοδος είναι δυνατόν να εφαρμοσθεί και για μη μηχανολογικές εφαρμογές (π.χ. αρχιτεκτονική, βιοϊατρική, τοπογραφία κλπ.)



Το προτεινόμενο πλαίσιο μεθοδολογίας καθορισμού κατεύθυνσης πρωτοτυποποίησης αποσκοπεί στο να βοηθήσει ουσιαστικά ομάδες και φορείς σχεδιασμού στην επιλογή της αποδοτικότερης μεθόδου πρωτοτυποποίησης, ανάλογα με τη φάση σχεδιασμού στην οποία ευρίσκονται, συμβάλλοντας έτσι ουσιαστικά σε χρονικά και κοστολογικά οφέλη, στη μείωση κινδύνου για το αναπτυσσόμενο προϊόν και στην επαναληψιμότητα και ανεξαρτησία των αποτελεσμάτων των σχετικών αποφάσεων.

Η μεθοδολογία έχει δημοσιευθεί από τον γράφοντα ως πρωτότυπη ερευνητική εργασία στο διεθνές επιστημονικό περιοδικό *International Scholarly Research Network (ISRN) Mechanical Engineering*, υπό τον τίτλο “Rational Embracing of Modern Prototyping Capable Design Technologies into the Tools Pool of Product Design Teams”, [Polydoros et al., 2011].

### 3.2 Εναλλακτικές Μέθοδοι Δημιουργίας Πρωτοτύπων

Έχουν ήδη αναλυτικά αναφερθεί στο πρώτο μέρος της εργασίας όλες οι παραδοσιακές – συμβατικές και οι σύγχρονες προσεγγίσεις εναλλακτικών πρωτοτυποποίησης. Για την εφαρμογή της προτεινόμενης μεθόδου, επιλέγονται από αυτές για αξιολόγηση κάθε φορά και σε κάθε περίπτωση εφαρμογής (πρωτοτύπου μορφής, γεωμετρικού, λειτουργικού κλπ.) εκείνες (ή ο συνδυασμός εκείνων) που συγκροτούν ή έστω βρίσκονται σε εγγύτητα με το «μέτωπο Pareto» (Pareto frontier), [Sen & Yang, 1998], του πολυπαραμετρικού προβλήματος της επιλογής βέλτιστης κατεύθυνσης πρωτοτυποποίησης.

Με αυτό εννοούνται εκείνες οι εναλλακτικές, που η αλλαγή της βαρύτητας ή προτίμησης των κριτηρίων και υποκριτηρίων μεταξύ τους στο συνολικό δένδρο απόφασης, μπορεί να οδηγήσει σε ανατροπή της μεταξύ τους σειράς κατάταξης ως προς τη συνολική αποτελεσματικότητα κάθε μιας. Είναι σαφές ότι μια παρωχημένη ή εμφανώς ελλειμματική ως προς την αποτελεσματικότητά της εναλλακτική, δεν θα είναι σε θέση να επικρατήσει των υπολοίπων σε κανένα σενάριο τοποθέτησης προτιμήσεων. Στην περίπτωση αυτή δεν θα πρέπει να θεωρείται καν ως αξιολογούμενη, εάν δε έχει συμπεριληφθεί θα πρέπει να απαλείφεται από την εξεταζόμενη εφαρμογή. Η χρήση κατάλληλων κλιμάκων (ideal method) για την βαθμολόγηση των εναλλακτικών αυτών που προτείνεται και ακολουθείται στην παρούσα μέθοδο, έναντι απευθείας ζευγαρωτών συγκρίσεων μεταξύ τους (distributive method), διευκολύνει και εξυπηρετεί προς αυτή την κατεύθυνση.

Γενικά οι εναλλακτικές που αξιολογούνται και λαμβάνονται υπόψη στην εφαρμογή τις προτεινόμενης μεθόδου επιλέγονται κατά περίπτωση από τον Πίνακα 3.2.1.

Είναι σαφές ότι οι εναλλακτικές του Πίνακα 3.2.1 δεν είναι «ονοματισμένες» και σε αντιστοιχία με συγκεκριμένα συστήματα και εξοπλισμούς, αλλά περισσότερο δίδονται ως «κλάσεις» (Classes) τεχνολογιών και συστημάτων με συναφή λίγο ως πολύ χαρακτηριστικά εντός της ίδιας κλάσης. Αυτό θεωρείται κατά την άποψη του γράφοντος και ως ορθότερο στο επίπεδο μιας «στρατηγικού» χαρακτήρα απόφασης, όπως είναι η απόφαση κατεύθυνσης πρωτοτυποποίησης. Ο βαθμολογών ειδικός που θα προσαρμόσει ή εφαρμόσει τη μέθοδο για συγκεκριμένο φορέα που δραστηριοποιείται σε συγκεκριμένο κατασκευαστικό περιβάλλον, θα προσαρμόσει τις κρίσεις του σύμφωνα με τα υφιστάμενα συστήματα μέσα σε κάθε κλάση, που μπορούν να ευρεθούν ή χρησιμοποιηθούν με ρεαλιστικό και αποτελεσματικό τρόπο στο περιβάλλον αυτό. Έχει επίσης τη δυνατότητα να δημιουργήσει και ενσωματώσει στη μέθοδο και στον Πίνακα 3.2.1 και πρόσθετες εναλλακτικές των “best in class”, που θα περιγράφουν το “state of the art” της κλάσης, ανεξαρτήτως του βαθμού

διαθεσιμότητας ή παρουσίας τους στο εξεταζόμενο κατασκευαστικό περιβάλλον εφαρμογής.

Εάν δε από την εφαρμογή της μεθόδου «προκρίνεται» συγκεκριμένη κατεύθυνση ή κλάση πρωτοτυποποίησης που εμπίπτει στο ευρύτερο φάσμα ΤΚΠ & ΤΚΕ, μπορεί να ακολουθηθεί εν συνεχεία σε επόμενο βήμα η επιλογή συγκεκριμένου συστήματος και του φορέα που μπορεί να το διαθέτει, μέσα από ΒΔ ή δομές Συστημάτων Υποστήριξης Αποφάσεων (ΣΥΑ) βασισμένες σε ΒΔ, όπως το πιλοτικά προτεινόμενο σε επόμενο κεφάλαιο (Κεφ. 4) της παρούσας εργασίας.

<b>Εναλλακτικές «πρωτοτυποποίησης» της προτεινόμενης μεθόδου</b>
Απλές 3D CAD αναπαραστάσεις
3D CAD αναπαραστάσεις σε συνδυασμό με αναλυτικά αποτελέσματα ψηφιακών προσομοιώσεων (FEA, CFD κλπ.)
Φωτοσκιασμένες απεικονίσεις σε Η-Υ
Desktop Στερεοσκοπικά μοντέλα ΕΠ (VR) των αντικειμένων ή συναρμολογημένων συνόλων
Desktop Στερεοσκοπικά μοντέλα ΕΠ (VR) των αντικειμένων ή συναρμολογημένων συνόλων σε συνδυασμό με εξοπλισμό απτικής ανάδρασης (haptic feedback)
Στερεοσκοπικά μοντέλα ΕΠ (VR) σε περιβάλλον κλωβού ΕΠ τύπου CAVE των αντικειμένων ή συναρμολογημένων συνόλων με εντοπισμό θέσης (tracking)
Στερεοσκοπικά μοντέλα ΕΠ (VR) σε περιβάλλον κλωβού ΕΠ τύπου CAVE των αντικειμένων ή συναρμολογημένων συνόλων με εντοπισμό θέσης (tracking) και σε συνδυασμό με εξοπλισμό απτικής ανάδρασης (haptic feedback)
Χειροποίητα μοντέλα
Πρωτότυπα με συμβατική αφαίρεση υλικού
Πρωτότυπα από CNC κατεργασίες αφαίρεσης υλικού
Πρωτότυπα από επιτραπέζιας κλίμακας CNC μηχανές
Πρωτότυπα από Προσωπικούς Τρισδιάστατους Εκτυπωτές
Πρωτότυπα από Μικρής Κλίμακας ΤΚΠ Μηχανές (3D Printers)
Πρωτότυπα από Επαγγελματικά συστήματα ΤΚΠ γενικά
Πρωτότυπα από Επαγγελματικά συστήματα ΤΚΠ υγρού φωτοπολυμερούς
Πρωτότυπα από Επαγγελματικά συστήματα ΤΚΠ κονιοποιημένου υλικού
Πρωτότυπα από Επαγγελματικά συστήματα ΤΚΠ φύλλων υλικού
Πρωτότυπα από Επαγγελματικά συστήματα ΤΚΠ εναπόθεσης υλικού
Πρωτότυπα από Βιομηχανικά συστήματα ΤΚΠ/ΤΠ γενικά
Πρωτότυπα από Βιομηχανικά συστήματα ΤΚΠ/ΤΠ μεταλλικών υλικών
Συνδυασμός οποιασδήποτε κατηγορίας πρωτοτύπων ΤΚΠ εκ των παραπάνω με συμβατή για την εφαρμογή μέθοδο ΤΚΕ

Πίνακας 3.2.1: Εναλλακτικές «πρωτοτυποποίησης» της προτεινόμενης μεθόδου υποστήριξης αποφάσεων

### 3.3 Η μέθοδος Analytical Hierarchy Process (AHP) στην επιλογή μεθοδολογίας πρωτοτυποποίησης

Στο πρόβλημα της επιλογής κατεύθυνσης πρωτοτυποποίησης:

- Η σχετική απόφαση συνήθως λαμβάνεται (με τη συνεργασία της ομάδας σχεδιασμού) από τον επικεφαλής του εγχειρήματος (project leader) ή από ανώτερο διοικητικό στέλεχος του φορέα, όχι απαραίτητα τεχνικής κατάρτισης.
- Συνυπάρχουν τεχνικά και μη τεχνικά κριτήρια/παράμετροι
- Συνυπάρχουν ποσοτικά και ποιοτικά κριτήρια
- Οι προτιμήσεις και βαρύτητες των κριτηρίων μεταξύ τους, όσο και των υποκριτηρίων που τα συγκροτούν, πρέπει να καθορίζονται και διαμορφώνονται κάθε φορά σε αντιστοίχιση με το χρόνο – φάση του σχεδιασμού και τις ευρύτερα επικρατούσες συνθήκες, εντός και εκτός του φορέα που τον επιτελεί και δεν πρέπει να προκαθορίζονται αυθαίρετα
- Πρέπει να αξιολογείται με αντικειμενικό τρόπο η εμπειρία και τεχνογνωσία του φορέα σχεδιασμού και η γνώση των ειδικών, εντός ή και εκτός του φορέα
- Η απόφαση πρέπει να λαμβάνεται με αντικειμενική κρίση, με ανεξαρτησία και επαναληψιμότητα, απομακρυσμένη από διαίσθηση, ένστικτο, μόδα και παρορμητισμό.

Κατά συνέπεια, με βάση όσα έχουν ήδη αναφερθεί στο πρώτο μέρος της εργασίας περί ΠΠΛΑ, αλλά και σύμφωνα με το Σχήμα 1.12.2.1, η μέθοδος της Αναλυτικής Ιεράρχησης (Analytical Hierarchy Process, AHP), κρίνεται ως ιδιαίτερα κατάλληλη για την μοντελοποίηση του συγκεκριμένου προβλήματος και υιοθετείται εφεξής.

Για την εφαρμογή της AHP στην επιλογή κατεύθυνσης – κλάσης πρωτοτυποποίησης, είναι απαραίτητο να υλοποιηθούν τα παρακάτω βήματα:

- Οριοθέτηση του Στόχου (Goal)
- Δόμηση του Δένδρου Απόφασης (Κριτήρια, υποκριτήρια) σε ικανό βάθος (επίπεδα), ώστε το πρόβλημα να καταστεί από γενικό και αφηρημένο σε αναλυτικό και συγκεκριμένο, ικανό να καταγράψει αντικειμενικά επιθυμίες, προτιμήσεις, γνώση και εμπειρία που θα υποστηρίξουν την επίτευξη του στόχου
- Καθορισμός – επιλογή των εξεταζομένων εναλλακτικών
- Δημιουργία κλιμάκων αξιολόγησης εναλλακτικών έναντι κριτηρίων τελευταίου επιπέδου για την βαθμολόγηση των εξεταζομένων εναλλακτικών στην περίπτωση απόλυτης βαθμολόγησης (Ideal method)
- Βαθμολόγηση των εξεταζομένων εναλλακτικών ως προς τα κριτήρια τελευταίου επιπέδου (Bottom level), με σχετικό (ζευγαρωτές συγκρίσεις) ή απόλυτο τρόπο (κλίμακες). Θα ακολουθηθεί εδώ ο απόλυτος τρόπος
- Καθορισμός των βαρυτήτων και προτιμήσεων των κριτηρίων και υποκριτηρίων μεταξύ τους και ως προς τον συνολικό Στόχο
- Σύνθεση προτιμήσεων, βαρυτήτων και βαθμολογιών για την εξαγωγή της τελικής κρίσης

### 3.4 Στόχος και ομάδες κριτηρίων επιλογής μεθοδολογίας πρωτοτυποποίησης κατά τη διαδικασία του ολοκληρωμένου μηχανολογικού σχεδιασμού βιομηχανικών προϊόντων.

Ο στόχος – κορυφή του δένδρου απόφασης, πρέπει να είναι σαφής για τον αποφασίζοντα, και λεκτικά διατυπωμένος με ακρίβεια, ώστε κάτω από αυτόν να μπορούν σαφώς και αντιπροσωπευτικά να συγκροτηθούν οι παράμετροι επηρεασμού του σε δενδροειδή μορφή.

Ο στόχος όπως τίθεται στο εξεταζόμενο πρόβλημα είναι:

#### *Επιλογή της αποτελεσματικότερης εναλλακτικής πρωτοτυποποίησης*

, όπου οι εναλλακτικές εννοούνται ως προσδιορίστηκαν παραπάνω, ο δε χαρακτηρισμός «αποτελεσματικότερης» αναφέρεται στην ταυτόχρονη εξυπηρέτηση τεχνικών, όσο και μη τεχνικών απαιτήσεων και περιορισμών του προβλήματος, που θα τεθούν και επεξηγηθούν παρακάτω. Στην εξειδικευμένη περίπτωση εξέτασης της αποτελεσματικότητας μόνο ως προς τα τεχνικά ζητούμενα από το πρωτότυπο, που επίσης μπορεί να υλοποιηθεί με κατάλληλη εξειδίκευση της προτεινόμενης μεθόδου δια πλήρους απάλειψης όλων των μη τεχνικών κλάδων – κριτηρίων, ο στόχος θα μπορούσε τότε να τεθεί ως:

#### *Επιλογή της τεχνικά αποτελεσματικότερης εναλλακτικής πρωτοτυποποίησης*

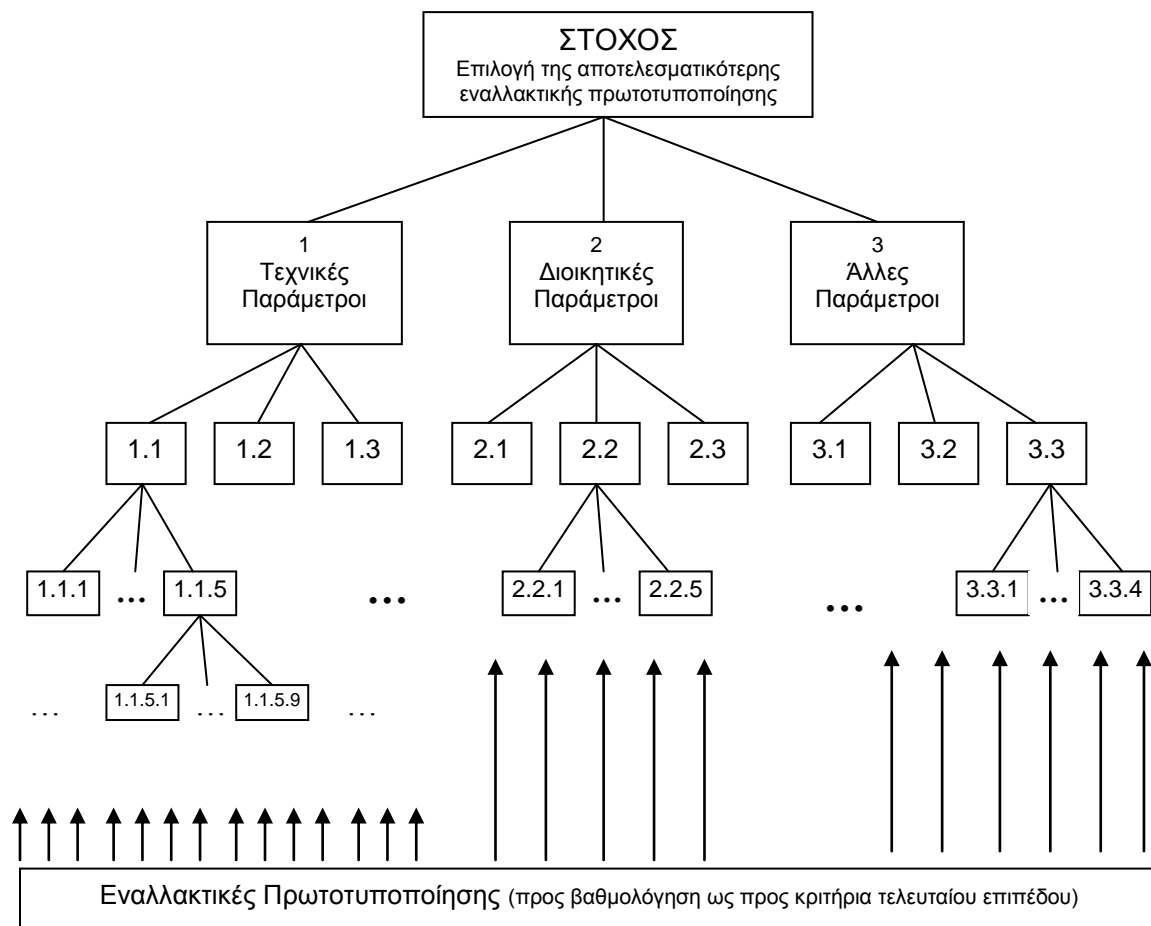
Αναγνωρίζεται ότι, η πιο δημιουργική εργασία στη λήψη μιας απόφασης, είναι ο καθορισμός και η επιλογή των παραμέτρων που είναι σημαντικές για την απόφαση αυτή, [Saaty, 1990]

Έχοντας λοιπόν καθορίσει το στόχο, αναγνωρίζονται και τοποθετούνται κάτω από αυτόν οι κύριες ομάδες παραμέτρων επηρεασμού του, που κατά τον γράφοντα είναι:

1. Τεχνικές Παράμετροι, που αφορούν τον υλοποιούμενο σχεδιασμό που εξετάζεται δια του πρωτοτύπου
2. Διοικητικές Παράμετροι, που αφορούν οικονομικά, χρονικά και οργανωτικά ζητήματα και περιορισμούς που θέτει ο φορέας για τον υλοποιούμενο σχεδιασμό
3. Άλλες Παράμετροι, που γενικά επικρατούν ή που επηρεάζουν το φορέα και το ευρύτερο κατασκευαστικό περιβάλλον στο οποίο αυτός δραστηριοποιείται και επιτελεί τον εξεταζόμενο σχεδιασμό

Σε αυτούς τους αδρούς τρεις κλάδους πρώτου επιπέδου, κατανέμεται καταρχήν η βαρύτητα που θα επηρεάσει την απόφαση επιλογής κατεύθυνσης πρωτοτυποποίησης. Κάτω από καθέναν από αυτούς, η βαρύτητα θα επιμερισθεί περαιτέρω, σε περισσότερα επίπεδα, στις ομάδες κριτηρίων και υποκριτηρίων που τους συγκροτούν, εκφραζόμενη μάλιστα κάπου και ως προτίμηση, έως ότου το πρόβλημα έχει αναλυθεί ικανοποιητικά, προκειμένου να εξαχθεί η τελική κρίση ως προς τον στόχο που έχει τεθεί.

Σχηματικά το δένδρο απόφασης διαμορφώνεται κάτω από τους τρεις κύριους κλάδους του όπως δείχνει το Σχήμα 3.4.1.



Σχήμα 3.4.1: Η συγκρότηση του δένδρου απόφασης κάτω από τους κύριους κλάδους

Οι συνιστώσες κάθε κύριου κλάδου που επιλέγονται για χρήση και εφαρμογή στην προτεινόμενη μέθοδο θα περιγραφούν και αναλυθούν ξεχωριστά παρακάτω.

### 3.5 Τεχνικές παράμετροι-κριτήρια σχεδιασμού. Επιλογή, ομαδοποίηση και δενδροειδής συγκρότησή τους.

Οι τεχνικές παράμετροι αποτελούν έναν πολύ σημαντικό κλάδο του δένδρου απόφασης. Ιδανικά, θα κατείχαν το 100% της βαρύτητας, εξετάζοντας τις εναλλακτικές μόνο ως προς την τεχνική τους αποτελεσματικότητα, όπως ίσως θα ενδιέφερε στενά τους μηχανικούς και σχεδιαστές. Ρεαλιστικά όμως, και εφόσον ο σχεδιασμός επιτελείται από φορείς που έχουν και την οικονομική και την επιχειρηματική υπόσταση, ενώ λειτουργούν σε δεδομένο περιβάλλον, ο κλάδος αυτός θα λάβει σημαντικό μεν, αλλά πάντοτε κλάσμα της συνολικής βαρύτητας – σημαντικότητας έναντι του κεντρικού στόχου.

Όπως έχει ήδη γραφεί στην παράγραφο 1.2 της παρούσας εργασίας, ο Μηχανολογικός Σχεδιασμός στοχεύει στην ικανοποίηση υποχρεωτικών και μη ΤΠ σε μια νέα κατασκευαστική διαμόρφωση, στην οποία έχουν υιοθετηθεί συγκεκριμένα Χαρακτηριστικά Σχεδιασμού (ΧΣ – Design Attributes, DA) και οι συνιστώσες τους, οι Παράμετροι Σχεδιασμού (ΠΣ – Design Factors, DF).

Η ανά πάσα στιγμή διαπίστωση της εκπλήρωσης ή επίτευξης αυτών στα πλαίσια του υλοποιούμενου σχεδιασμού, γίνεται από τις ομάδες σχεδιασμού δια των πρωτοτύπων.

Κατά συνέπεια οι τεχνικές παράμετροι του προβλήματος επιλογής κατεύθυνσης/εναλλακτικής πρωτοτυποποίησης, συναρτώνται και τελικά αποτελούνται από αυτά τα ΧΣ και τις ΠΣ που τα συγκροτούν. Για αυτές λοιπόν τις τεχνικές παραμέτρους, οι εναλλακτικές πρωτοτυποποίησης κρίνονται και βαθμολογούνται ως προς την αποτελεσματικότητα που παρέχουν στη διαπίστωση της καθεμιάς.

Στον Μηχανολογικό Σχεδιασμό, αλλά και στη Θεωρία της Ολικής Ποιότητας, όπως έχει αναφερθεί και στο πρώτο μέρος της εργασίας, τα ΧΣ και οι ΠΣ ορίζονται και ομαδοποιούνται με τρόπο σαφή και με μεγάλη πληρότητα [Pahl & Beitz, 1984; Garvin, 1987; Pugh, 1990; Σφαντζικόπουλος, 2005; Pahl et al., 2007].

Μια εκτενής λίστα των βασικών ΧΣ και ΠΣ που διέπουν την πλειοψηφία των νέων προϊόντων στο ΜΣ, δίνεται από τον Dowlatshahi, [Dowlatshahi, 1994], και υιοθετείται εν μέρει στην παρούσα εργασία για την προτεινόμενη μέθοδο. Ο συνολικός κατά Dowlatshahi αριθμός των ΠΣ που συγκροτούν τα βασικά ΧΣ, αριθμεί τις 179, με κάποιες από αυτές να απαντώνται σε αρκετά ΧΣ.

Στην προτεινόμενη προσέγγιση, για να είναι κατανοητή στον εκάστοτε εφαρμόζοντα και λειτουργική η μέθοδος, υιοθετείται η «*αρχή του Pareto*», γνωστή και ως ο «*κανόνας του 80-20*», σύμφωνα με την οποία κάθε φορά λίγες μόνο από τις παραμέτρους ενός προβλήματος, είναι υπεύθυνες για τα την πλειοψηφία της επίδρασης στο τελικό αποτέλεσμα, ενώ οι περισσότερες επιδρούν λίγο έως καθόλου [Trocine & Malone, 2000]. Γίνεται λοιπόν από το σύνολο των 179, προσεκτική επιλογή και ομαδοποίηση τόσο των ΠΣ, όσο και των ΧΣ που αυτές συγκροτούν, με θεώρηση κυρίως εκείνων που είναι δυνατόν να διαπιστωθούν από τα πάσης φύσης πρωτότυπα, ειδικά στα πρώιμα στάδια του ΜΣ. Έτσι επιλέγονται τελικά 82 ΠΣ, ομαδοποιημένες σε 17 βασικά ΧΣ, που η προτεινόμενη μέθοδος υιοθετεί.

Η ορθή εφαρμογή της ΑΗΡ υποδεικνύει σε κάθε επίπεδο κριτηρίων, υποκριτηρίων και εναλλακτικών μέγιστο αριθμό επτά συγκρινόμενων μεταξύ τους παραμέτρων και σε κάθε περίπτωση όχι παραπάνω από εννέα, [Saaty, 1980]. Πέραν του μαθηματικού υποβάθρου της μεθόδου, ο περιορισμός αυτός επιβάλλεται και από την τεκμηριωμένη ικανότητα του ανθρώπινου εγκεφάλου να διαχειρίζεται στις περισσότερες περιπτώσεις ταυτόχρονα έως επτά και σπανίως έως εννέα στοιχεία πληροφορίας χωρίς να προκύπτει σύγχυση, [Miller, 1956].

Παράλληλα, είναι γεγονός, που μάλιστα καταγράφεται σε όλη την έγκυρη βιβλιογραφία της ΤΚΠ, [Kochan, 1993; Pham & Dimov, 2001&2011; Gebhardt, 2003; Gibson et al., 2010; Chua et al., 2003 & 2010, κ.α.], ότι τα πρωτότυπα γενικά εξυπηρετούν τις διαδικασίες σχεδιασμού και ανάπτυξης ως προς τη διενέργεια ελέγχων στο βασικό τρίπτυχο – ακρογωνιαίους λίθους της πρωτοτυποποίησης:

*Μορφή – Συναρμογή/Συνεργασία – Λειτουργία*  
(*Form – Fit – Function*)

Με συνεκτίμηση λοιπόν των παραπάνω περιορισμών βέλτιστης εφαρμογής της ΑΗΡ και των τριών κύριων λειτουργιών της πρωτοτυποποίησης, τα παραπάνω 17 βασικά ΧΣ/ κύριες τεχνικές παράμετροι του προβλήματος απόφασης, ομαδοποιούνται περαιτέρω σε ένα τελευταίο βήμα, δημιουργώντας ένα ξεχωριστό ανώτερης τάξης επίπεδο του δένδρου αποφάσεων, κάτω από τους τρεις ακρογωνιαίους λίθους της πρωτοτυποποίησης. Αυτή η ομαδοποίηση και κεντρική κατάταξη των κύριων ΧΣ

γίνεται με γνώμονα την εννοιολογική και πραγματική συγγένεια τους με αυτές τις τρεις βασικές λειτουργίες.

Η πλήρης γενική δομή των επιπέδων του κλάδου των τεχνικών παραμέτρων που τελικά προκύπτει και υιοθετείται στην προτεινόμενη μέθοδο παρουσιάζεται στον Πίνακα 3.5.1.

<b>Επίπεδο 1</b> Κύριος κόμβος κλάδου	<b>Επίπεδο 2</b> Ομάδες ΧΣ	<b>Επίπεδο 3</b> ΧΣ της μεθόδου	<b>Επίπεδο 4</b> ΠΣ της μεθόδου
<b>1. Διαπίστωση Τεχνικών Παραμέτρων του προϊόντος</b>	<b>1.1</b> <b>Μορφή</b>	<b>1.1.1</b> Αισθητική	1.1.1.1 Σχήμα 1.1.1.2 Μέγεθος 1.1.1.3 Χρώμα 1.1.1.4 Συμμετρία 1.1.1.5 Ενσωμάτωση στο περιβάλλον 1.1.1.6 Επαναληψιμότητα μορφών 1.1.1.7 Κοινωνική/Πολιτισμική συσχέτιση 1.1.1.8 Κρίσιμες Διαστάσεις
		<b>1.1.2</b> Εργονομία	1.1.2.1 Ύψος Λειτουργίας 1.1.2.2 Ευκολία λειτουργίας/χρήσης 1.1.2.3 Φωτισμός 1.1.2.4 Διεπαφή με το χρήστη 1.1.2.5 Άνεση 1.1.2.6 Κόπωση χρήστη 1.1.2.7 Βαθμός Αναγνώρισης χρώματος 1.1.2.8 Ανθρωπομετρία 1.1.2.9 Λογική και αποδοτικότητα στοιχείων ελέγχου και ενδείξεων
		<b>1.1.3</b> Απλότητα	1.1.3.1 Τεχνολογία 1.1.3.2 Κατασκευή 1.1.3.3 Συντήρηση από το χρήστη 1.1.3.4 Χρήση
		<b>1.1.4</b> Μεταφερισιμότητα	1.1.4.1 Ανύψωση 1.1.4.2 Μετακίνηση/Μεταφορά 1.1.4.3 Συνολικό μέγεθος 1.1.4.4 Συσκευασία 1.1.4.5 Μέγιστη Διάσταση 1.1.4.6 Μέγιστο Βάρος 1.1.4.7 Αποθήκευση 1.1.4.8 Αποστολή/Ταξίδι
		<b>1.1.5</b> Κατασκευασιμότητα	1.1.5.1 Ανοχές 1.1.5.2 Ποιότητα επιφανείας 1.1.5.3 Διαστάσεις (κατασκευαστικές) 1.1.5.4 Υλικό 1.1.5.5 Μέθοδοι & Εξοπλισμός παραγωγής 1.1.5.6 Γεωμετρικά – Κατασκευαστικά στοιχεία 1.1.5.7 Απαιτούμενος χώρος 1.1.5.8 Δυνάμεις και κινηματική παραγωγής 1.1.5.9 Απαιτήσεις ισχύος

Πίνακας 3.5.1, συνέχεια			
Επίπεδο 1 Κύριος κόμβος κλάδου	Επίπεδο 2 Ομάδες ΧΣ	Επίπεδο 3 ΧΣ της μεθόδου	Επίπεδο 4 ΠΣ της μεθόδου
1. Διαπίστωση Τεχνικών Παραμέτρων του Προϊόντος	1.2 Συναρμογή/ Συναρμολό γηση	1.2.1 Εναλλαξιμότητα	1.2.1.1 Ταχύτητα 1.2.1.2 Ακρίβεια (Τοποθέτησης) 1.2.1.3 Ποικιλία / Πολλαπλότητα ρόλου 1.2.1.4 Σπονδυλωτή / modular δομή
		1.2.2 Συντηρησιμότητα	1.2.2.1 Επιφανειακή Προστασία 1.2.2.2 Ευκολία επιθεώρησης 1.2.2.3 Ευκολία επισκευής 1.2.2.4 Μέσος χρόνος επισκευής
		1.2.3 Ανακυκλωσιμότητα/ Επανακατασκευασιμ ότητα	1.2.3.1 Δυσκολία αποσυναρμολόγησης 1.2.3.2 Φθορά και ανοχές φθοράς κινουμένων μερών 1.2.3.3 Αδιαπέραστες/σφραγισμένες επιφάνειες 1.2.3.4 Ανακυκλωσιμότητα τελικού υλικού 1.2.3.5 Απαιτήσεις καθαρισμού 1.2.3.6 Κόστος επισκευής/ επανακατασκευής
		1.2.4 Συναρμολογησιμότη τα	1.2.4.1 Ευκολία Συναρμολόγησης 1.2.4.2 Άξονες και κατευθύνσεις συναρμολόγησης 1.2.4.3 Χρόνος συναρμολόγησης 1.2.4.4 Βάθος του δένδρου συναρμολόγησης
	1.3 Λειτουργία	1.3.1 Αντοχή	1.3.1.1 Κακή χρήση/ Κατάχρηση 1.3.1.2 Εσφαλμένη χρήση 1.3.1.3 Βανδαλισμός 1.3.1.4 Διάβρωση 1.3.1.5 Αντοχή σε υγρασία 1.3.1.6 Μηχανική Αντοχή 1.3.1.7 Αντοχή σε χημικά
		1.3.2 Ασφάλεια	1.3.2.1 Ηλεκτρική 1.3.2.2 Μηχανική 1.3.2.3 Χημική 1.3.2.4 Σταθερότητα 1.3.2.5 Ασφάλεια σε ατύχημα/ αστοχία 1.3.2.6 Αιχμηρές ακμές / προεξοχές
		1.3.3 Αξιοπιστία	1.3.3.1 Μέσος χρόνος επέλευσης πρώτης βλάβης (MTTFF) 1.3.3.2 Μέσος χρόνος μεταξύ διαδοχικών βλαβών (MTBF) 1.3.3.3 Ρυθμός Βλαβών σε μονάδα χρόνου (FR/UT) 1.3.3.4 Μέσος χρόνος λειτουργίας μεταξύ βλαβών
		1.3.4 Απόδοση	1.3.4.1 Μέγεθος 1.3.4.2 Δύναμη 1.3.4.3 Κίνηση/κινήσεις 1.3.4.4 Κατεύθυνση 1.3.4.5 Μέγιστη ταχύτητα 1.3.4.6 Πίεση 1.3.4.7 Θερμοκρασία 1.3.4.8 Ήχος / Θόρυβος 1.3.4.9 Ροή

Πίνακας 3.5.1: Πλήρης δομή των επιπέδων των θεωρούμενων τεχνικών παραμέτρων της προτεινόμενης μεθόδου

Πρέπει εδώ να σημειωθεί ότι ο Πίνακας 3.5.1 είναι γενικής ισχύος και εφαρμογής και θεωρείται στη μέθοδο ως ο γενικός – πλήρης κατά το δυνατόν κατάλογος των διαπιστώσιμων από πρωτότυπα ΠΣ που μπορεί να υιοθετηθεί για κάθε μηχανολογικό



προϊόν. Η κάθε μια ΠΣ Επιπέδου 4 του Πίνακα 3.5.1, πιθανόν να μην αφορά και να μην εξετάζεται για κάθε διαφορετικό εξάρτημα ή συναρμολογημένο σύνολο ενός νέου προϊόντος. Σε άμεση εξάρτηση από τη φύση και το ρόλο που έχει το εξεταζόμενο εξάρτημα ή συναρμολογημένο σύνολο, η συμμετοχή – βαρύτητα της διαπίστωσης της κάθε ΠΣ στο ανωτέρου επιπέδου ΧΣ, θα καθορίζεται από τη βαρύτητα που θα προκύψει για αυτή μέσω των ζευγαρωτών συγκρίσεων της με τις υπόλοιπες ιδίου κλάδου ΠΣ, έναντι του ΧΣ Επιπέδου 3 που τις «κυβερνά» και υπό το οποίο κατατάσσονται. Σε περιπτώσεις μάλιστα πλήρους αναντιστοιχίας κάποιας ΠΣ με το εξεταζόμενο αντικείμενο, εκείνη μπορεί να απαλειφθεί και πλήρως από τη δομή του δένδρου, χωρίς πρόβλημα.

Η δε συμμετοχή – βαρύτητά των ΧΣ Επιπέδου 3 ως προς την «κυβερνώσα» τους κύρια λειτουργία πρωτοτυποποίησης, εξαρτάται από τη φύση και την έκταση του διενεργούμενου ελέγχου, που κατ'επέκταση συνδέεται με τη φάση και την πρόοδο του επιτελούμενου σχεδιασμού και επίσης καθορίζεται με ζευγαρωτές συγκρίσεις. Λόγω όμως του γενικότερου χαρακτήρα των ΧΣ, έστω και αν για κάποιο ΧΣ προκύψει στο Επίπεδο 3 μικρή συμμετοχή στον έλεγχο, καλό είναι αυτό να μην απαλείφεται από τη δομή, ιδιαίτερα με γνώμονα το δυναμικό χαρακτήρα της μεθόδου και την τυχόν επιβολή αλλαγών βαρύτητας ή την τυχόν επανάληψη της εφαρμογής της μεθόδου σε διαφορετικό στάδιο σχεδιασμού και ανάπτυξης του εξεταζόμενου εξαρτήματος – προϊόντος.

Το ίδιο ισχύει κεντρικότερα και για τις βαρύτητες των τριών κύριων λειτουργιών πρωτοτυποποίησης Επιπέδου 2, ως προς τον κεντρικό κλάδο «Διαπίστωση τεχνικών παραμέτρων» ή για συντομία «Τεχνικές Παράμετροι», του δένδρου απόφασης.

Καθώς συχνά η εφαρμογή της ΑΗΡ και των συναφών ζευγαρωτών συγκρίσεων (και βαθμολογήσεων) γίνεται με τη μορφή ερωτηματολογίων, θα διατυπωθούν ως παράδειγμα παρακάτω για την καλύτερη κατανόηση της ενάσκησης της μεθόδου δύο τέτοιες ερωτήσεις, ενταγμένες σε διαφορετικό επίπεδο του δένδρου η καθεμιά:

*«Κατά τον διενεργούμενο έλεγχο, πόσο σημαντική θεωρείτε τη διαπίστωση της διεπαφής με το χρήστη (1.1.2.4) σε σχέση με τη διαπίστωση του ύψους λειτουργίας (1.1.2.1) ως προς την εργονομία (1.1.2) του εξεταζόμενου αντικειμένου?»*

και

*«Κατά τον διενεργούμενο έλεγχο, πόσο σημαντική θεωρείτε τη διαπίστωση της λειτουργίας (1.3) σε σχέση με τη διαπίστωση της μορφής (1.1) ως προς τη διαπίστωση τεχνικών παραμέτρων (1) του εξεταζόμενου αντικειμένου?»*».

### **3.6 Διοικητικές παράμετροι (Χρονικές, κοστολογικές, ρίσκο)**

Για να είναι δυνατή η ρεαλιστική υποστήριξη αποφάσεων πρωτοτυποποίησης, εκτός από τους αμιγώς τεχνικούς στόχους – κριτήρια, πρέπει καταρχήν να αναγνωρισθούν και κατόπιν να συνεκτιμηθούν και οι παράγοντες – κριτήρια, που επιβάλλονται από το διοικητικό και επιχειρηματικό σκέλος του φορέα και δεσμεύουν την εφαρμογή. Οι παράγοντες αυτοί που προτείνονται και υιοθετούνται στην παρούσα εργασία, ως δεύτερος κεντρικός κλάδος διοικητικών παραμέτρων του δένδρου απόφασης της προτεινόμενης μεθόδου, αποτελούν τα πιο κοινά και πιο συχνά «στοιχεία πίεσης» προς τους μηχανικούς και τα επιχειρηματικά στελέχη και είναι:

- Το Κόστος
- Ο Χρόνος
- Η αξιοπιστία – συνεπαγόμενο ρίσκο

Είναι αυτονόητο ότι κάθε μια από τις διοικητικές παραμέτρους – κριτήρια αποτελείται εννοιολογικά και πρακτικά από αρκετές επιμέρους συνιστώσες. Εκείνες που κρίνονται ως σημαντικότερες για τους σκοπούς της πρωτοτυποποίησης στα πλαίσια της παρούσας εργασίας και υιοθετούνται στην προτεινόμενη μέθοδο, παρατίθενται στον Πίνακα 3.6.1.

Επίπεδο 1 Κύριος κόμβος κλάδου	Επίπεδο 2 Κύριες Διοικητικές Παράμετροι	Επίπεδο 3 Συνιστώσες Διοικητικών παραμέτρων
2. Διοικητικές Παράμετροι Αποφάσεων Πρωτοτυποποίησης	2.1 Κόστος	2.1.1 Εργατικό Κόστος
		2.1.2 Πάγια και Κόστη Αποσβέσεων
		2.1.3 Κόστος κατασκευής/λειτουργίας
		2.1.4 Κόστος αναλωσίμων
		2.1.5 Κόστος επανάληψης κατασκευής του ιδίου
		2.1.6 Κόστος επανάληψης κατασκευής τροποποιημένου
	2.2 Χρόνος	2.2.1 Προετοιμασία/Προεπεξεργασία
		2.2.2 Κατασκευή/Λειτουργία/Διαχείριση-Επεξεργασία
		2.2.3 Αποπεράτωση - φινίρισμα
		2.2.4 Χρόνος επανάληψης κατασκευής του ιδίου
		2.2.5 Χρόνος επανάληψης κατασκευής τροποποιημένου
	2.3 Αξιοπιστία Μεθόδου & Συνεπαγόμενος κίνδυνος - ρίσκο	2.3.1 Επαναληψιμότητα αποτελέσματος
		2.3.2 Πιθανότητα αποτυχίας της μεθόδου
		2.3.3 Επίδραση αποτυχίας της μεθόδου
		2.3.4 Πιθανότητα βλάβης ή δυσλειτουργίας του εξοπλισμού
		2.3.5 Ευκολία αποκατάστασης λειτουργίας/επισκευής
		2.3.6 Εμπειρία του χειριστή

Πίνακας 3.6.1: Διοικητικές Παράμετροι της προτεινόμενης μεθόδου και οι συνιστώσες τους

Οι συνιστώσες διοικητικών παραμέτρων επηρεασμού αποφάσεων πρωτοτυποποίησης, άλλες έχουν ποσοτική και άλλες ποιοτική υπόσταση. Για τους σκοπούς της παρούσας εργασίας θα αξιολογούνται στις αντίστοιχες κλίμακες αξιολόγησης εναλλακτικών με ποιοτικό τρόπο. Είναι όμως δυνατόν στην εφαρμογή της μεθόδου για το σχεδιασμό συγκεκριμένων εξαρτημάτων ή προϊόντων, να καθορίζονται για τις ποσοτικού χαρακτήρα συνιστώσες συγκεκριμένα αριθμητικά όρια μεταξύ των ποιοτικών βαθμίδων αξιολόγησης, όπως γίνεται εξάλλου και για πολλές από τις ΠΣ και ΧΣ της παραγράφου 3.5.

Επίσης, κάποιες από αυτές είναι ίσως προφανείς και άμεσα κατανοητές στον αναγνώστη, ενώ άλλες πιθανώς χρήζουν κάποιας επεξήγησης που να αιτιολογεί την υιοθέτησή τους.

Έτσι λοιπόν, οι συνιστώσες «κόστος και ο χρόνος επανάληψης του ιδίου», αλλά και «τροποποιημένου» «πρωτοτύπου», συμπεριλαμβάνονται στη μέθοδο, καθώς η κτηθείσα εμπειρία του γράφοντος έχει δείξει πως μιας κατασκευής ή δημιουργίας γενικότερα ενός πρωτοτύπου, πολύ συχνά έπεται η επανάληψη και άλλων της ίδιας ή παραλλαγμένης/τροποποιημένης μορφής, που σε κάποιες περιπτώσεις (π.χ. 3D CAD, ΤΚΠ, ΤΚΕ) μάλιστα δεν επιβαρύνονται το 100% της δημιουργίας εκ του μηδενός, όπως π.χ. συμβαίνει με ένα αμιγώς χειροποίητο μοντέλο.

Ειδικά δε για τον επιμέρους κλάδο 2.3 της «αξιοπιστίας των μεθόδου – συνεπαγόμενου ρίσκου» για το σχεδιασμό, πρέπει να ειπωθεί ότι πολλές τεχνολογίες που σήμερα θεωρούνται εναλλακτικές πρωτοτυποποίησης, είτε δεν έχουν φθάσει στο ανώτατο επίπεδο ωρίμανσης τους, είτε ακόμα εξελίσσονται με ραγδαίο ρυθμό, όντας σχεδόν πρωτότυπες οι ίδιες. Τόσο στις περιπτώσεις αυτές, όσο όμως και σε συμβατικότερες ή πιο ώριμες τεχνολογικά και διαδικαστικά εκδοχές πρωτοτυποποίησης, από τη στιγμή που κάτι επιχειρείται να φτιαχτεί για πρώτη φορά, αστοχίες εξοπλισμού, εξαρτημάτων, υλικών και διαδικασιών, βλάβες και τεχνικά προβλήματα είναι από πιθανές έως συχνές και δεν μπορούν να αποκλεισθούν. Το δε αποτέλεσμα, ακόμα και η τελεσφορία του ή μη, καθώς μιλάμε για υλοποίηση πρωτοτύπου δεν πρέπει να θεωρούνται ποτέ σίγουρες. Π.χ. ακόμα και για αμιγώς χειροποίητα πρωτότυπα ή πρωτότυπα με «συμβατικές εργαλειομηχανές» κανείς δεν μπορεί να αποκλείσει την περίπτωση ενός μοντελοποιού που μετά από προσπάθεια ημερών ή εβδομάδων τελικά έρχεται να δηλώσει «Αυτό εγώ δεν μπορώ να το φτιάξω!». Κατά συνέπεια το ρίσκο και οι συνιστώσες του όπως περιλαμβάνονται στον Πίνακα 3.6.1, πρέπει να συνεκτιμώνται και αξιολογούνται για κάθε εναλλακτική που θεωρείται στην μέθοδο.

### 3.7 Λοιπές παράμετροι

Στο πρώτο μέρος της εργασίας έχει καταδειχθεί εκτενώς η εξέλιξη τόσο του ΜΣ όσο και της σύγχρονης κοινωνίας, εξέλιξη που γεννά νέες παραμέτρους που υπεισέρχονται και πρέπει να λαμβάνονται υπόψη σε κάθε μορφή μηχανολογικής δραστηριότητας, κατά συνέπεια και στην πρωτοτυποποίηση.

Η παγκοσμιοποίηση βιομηχανικής δραστηριότητας και αγορών θέτει κοινωνικές παραμέτρους, όπως π.χ. η στήριξη επιχειρήσεων και ομίλων, ή της τοπικής ή εθνικής οικονομίας.

Περιβαλλοντικοί περιορισμοί επίσης υπάρχουν, όπως η επιδίωξη της ανακυκλωσιμότητας, η ελαχιστοποίηση ανάλωσης ενέργειας και η αειφορία του φυσικού περιβάλλοντος και θα ενισχύονται όλο και περισσότερο μελλοντικά.

Τέλος δε και υπό το βάρος της οικονομικής κρίσης, περιορισμοί υπάρχουν και ως προς το που και κατά πόσον μπορεί να βρεθεί και να χρησιμοποιηθεί μια τεχνολογία, εντός ή εκτός δηλαδή συγκεκριμένης επιχείρησης ή ομίλου, και ως προς το πόσο διαδεδομένη και καθιερωμένη είναι στο δεδομένο κατασκευαστικό περιβάλλον ή αλλού.

Όλα τα παραπάνω λαμβάνονται υπόψη στην παρούσα εργασία και διαμορφώνουν τον 3<sup>ο</sup> κεντρικό κλάδο των παραμέτρων του δένδρου απόφασης επιλογής κατεύθυνσης πρωτοτυποποίησης. Οι συνιστώσες των παραπάνω λοιπών παραμέτρων επηρεασμού, δίνονται στον Πίνακα 3.7.1.

Επίπεδο 1 Κύριος κόμβος κλάδου	Επίπεδο 2 Λοιποί παράγοντες/κριτήρια επηρεασμού	Επίπεδο 3 Επιμέρους συνιστώσες
3. Λοιπές παράμετροι επηρεασμού αποφάσεων πρωτοτυποποίησης	3.1 Περιβάλλον	3.1.1 Ενεργειακή κατανάλωση
		3.1.2 Κατανάλωση υλικών
		3.1.3 Ανακυκλωσιμότητα υλικών
		3.1.4 Τοξικότητα υλικών
	3.2 Κοινωνία	3.2.1 Στήριξη Εθνικής Οικονομίας
		3.2.2 Στήριξη Τοπικής κοινωνίας/οικονομίας
		3.2.3 Στήριξη επιχείρησης/ομίλου
	3.3 Διαθεσιμότητα μεθόδων	3.3.1 Διαθεσιμότητα εντός επιχείρησης/ομίλου
		3.3.2 Καθιέρωση/διάδοση της τεχνολογίας/μεθόδου
		3.3.3 Ύπαρξη/ Παρουσία στο τοπικό Βιομηχανικό περιβάλλον
		3.3.4 Ύπαρξη στο Εθνικό Βιομηχανικό Περιβάλλον

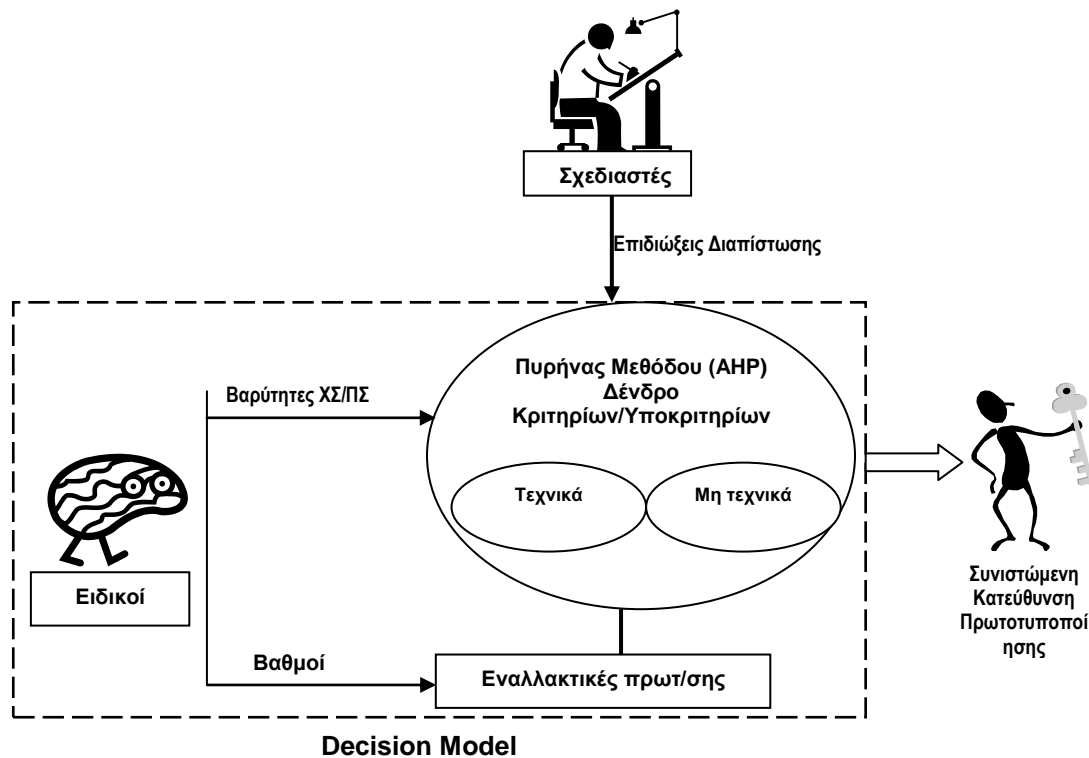
Πίνακας 3.7.1: Λοιπές Παράμετροι της προτεινόμενης μεθόδου και οι συνιστώσες τους

### 3.8 Κλίμακες Βαθμολογίας – Μεταφορά της εμπειρίας των ειδικών, των πειραματικών αποτελεσμάτων και της έρευνας πεδίου στο δένδρο απόφασης

Με την συγκρότηση των τριών κύριων κλάδων που περιγράφηκαν στις παραγράφους 3.5, 3.6 & 3.7 και που τίθενται κάτω από τον κεντρικό στόχο, το πρόβλημα απόφασης έχει μοντελοποιηθεί και αναλυτικά αποδομηθεί στα συστατικά του σε ικανοποιητικό βαθμό, έτσι ώστε να είναι κατανοητό και διαχειρίσιμο από τον εφαρμόζοντα τη μέθοδο.

Το επόμενο βήμα λοιπόν είναι να αξιοποιηθεί η εμπειρία και γνώση των ειδικών (εντός και εκτός της ομάδας σχεδιασμού), αφενός για την κατανομή προτεραιοτήτων – βαρυτήτων όλων των παραμέτρων, όλων των επιπέδων (αλλά κυρίως του τεχνικού κλάδου) στο δένδρο απόφασης για τον διενεργούμενο έλεγχο και για το συγκεκριμένο εξεταζόμενο εξάρτημα-προϊόν, και αφετέρου για την κρίση ή βαθμολόγηση των εξεταζόμενων υποψήφιων εναλλακτικών πρωτοτυποποίησης έναντι όλων των παραμέτρων και συνιστωσών τελευταίου επιπέδου (bottom level), σύμφωνα με την ήδη συγκροτηθείσα αναλυτική δομή. Τα δεδομένα αυτά, μαζί με την κεντρική κατανομή προτεραιοτήτων του ελέγχου στους κύριους τεχνικούς και μη τεχνικούς κλάδους, θα επιτρέψουν τελικά την σύνθεση – εξαγωγή τελικής αξιολόγησης των εξεταζόμενων εναλλακτικών ως προς τον στόχο, μέσω της οποίας θα μπορεί επιλεγεί η καταλληλότερη για τον διενεργούμενο έλεγχο.

Ο ρόλος των ειδικών καθίσταται σχηματικά σαφής στο Σχήμα 3.8.1.



Σχήμα 3.8.1: Ο ρόλος των ειδικών

Στην προτεινόμενη μέθοδο, η αξιολόγηση εναλλακτικών έναντι κριτηρίων τελευταίου επιπέδου υλοποιείται με την απόδοση βαθμολογιών σε κατάλληλα συγκροτηθείσες για τα κριτήρια αυτά κλίμακες (Ratings/ Rating scales). Ακολουθείται δηλαδή «απόλυτη» κρίση (absolute judgment) των εναλλακτικών και όχι «σχετική» (relative) όπως συμβαίνει με τις ζευγαρωτές συγκρίσεις. Όπως προαναφέρθηκε, αυτό προσφέρει διάφορα πλεονεκτήματα, όπως της άπαξ εξαρχής βαθμολόγηση πολλών διαφορετικών εναλλακτικών με βάση τις κλίμακες (με π.χ. διαφορετική βαθμολογία ανά τελικό κριτήριο για διαφορετικά εξαρτήματα ή προϊόντα), την προσθαφαίρεση εναλλακτικών σε περίπτωση αλλαγής συνθηκών βιομηχανικού περιβάλλοντος χωρίς αλλοίωση αυτών που παραμένουν, καθώς και την δυνατότητα ανεξάρτητης (κατά περίπτωση ελέγχου) θεώρησης και αξιολόγησης μερικών μόνο εναλλακτικών εκ του συνόλου των δυνατών, εκείνων που θεωρείται ότι συγκροτούν το «μέτωπο Pareto».

Οι κλίμακες βαθμολόγησης και οι βαθμίδες τους (Intensities) μπορούν να είναι αμιγώς ποιοτικές, ή ποσοτικές (δηλαδή με βαθμίδες ποιοτικών λεκτικών χαρακτηρισμών, σε άμεση αντιστοιχία όμως με πραγματικά αριθμητικά/ ποσοτικά μεγέθη). Για την AHP οι κλίμακες συνιστάται να αποτελούνται από 5 τουλάχιστον βαθμίδες, χωρίς να αποκλείεται ή να απαγορεύεται η χρήση λιγότερων.

Ουσιώδες είναι να ειπωθεί και γίνει εδώ κατανοητό, πως για να μπορεί να εφαρμοσθεί η AHP, η κάθε βαθμίδα (intensity) πρέπει να συνεπάγεται για τις εξεταζόμενες εναλλακτικές και για κάθε τελικό κριτήριο, μια αριθμητική βαθμολογία (grade), ή προτίμηση (preference), ή χρησιμότητα (utility), και μάλιστα σε κανονικοποιημένη μορφή, με τιμή από 0 έως 1. Αυτό εξάλλου συμβαίνει και με την «σχετική κρίση» των εναλλακτικών με τη μέθοδο των ιδιοδιανυσμάτων. Αυτές οι τιμές είναι που τελικά θα συντεθούν, κατά τη δομή του δένδρου απόφασης, για την τελική αξιολόγηση των εναλλακτικών ως προς τον στόχο. Ο τρόπος της αντιστοίχισης βαθμίδων – χρησιμότητων για κάθε κλίμακα και τελικό κριτήριο, μπορεί, α) είτε να καθορισθεί αυθαίρετα, εάν και εφόσον ο «ειδικός» διαθέτει κατάλληλη γνώση και

εμπειρία του εξεταζομένου μεγέθους που εισάγει το τελικό κριτήριο και της επίδρασής του στον έλεγχο, είτε να προκύψει με ζευγαρωτές κρίσεις των βαθμίδων που συγκροτούν την κλίμακα και εφαρμογή της μεθόδου των ιδιοδιανυσμάτων. Στην προτεινόμενη μέθοδο, με σύνολο 82 κριτηρίων τελικού επιπέδου, ακολουθούνται σε διαφορετικά τελικά κριτήρια και οι δύο παραπάνω εκδοχές.

Ένα παράδειγμα Ποιοτικής και Ποσοτικής αντίστοιχα κλίμακας και κάποιων αντίστοιχων με συγκεκριμένο προϊόν/ εφαρμογή/ έλεγχο χρησιμότητων των βαθμίδων τους, δίνεται στον Πίνακα 3.8.1.

<b>Ποιοτική κλίμακα (7 βαθμίδων) – Κριτήριο 1.1.1.1 (Διαπίστωση σχήματος)</b>							
Χαρακτηρισμός	Μη αποδεκτά	Πολύ άσχημα	Άσχημα	Μέτρια	Καλά	Πολύ καλά	Τέλεια
Χρησιμότητα	0	0,1	0,3	0,5	0,7	0,8	1
<b>Ποσοτική κλίμακα (5 Βαθμίδων) – Κριτήριο 2.2.3 (Χρόνος φινιρίσματος)</b>							
Ποσοτικά όρια	> 1 εβδομάδα	Ημέρα έως εβδομάδα	Ώρες έως ημέρα	Λεπτά έως ώρα	Άμεσο		
Χαρακτηρισμός	Πολύ εκτενές	Εκτενές	Σύνηθες	Περιορισμένο	Κανένα		
Χρησιμότητα	0	0,2	0,45	0,8	1		

Πίνακας 3.8.1: Ενδεικτικές ποιοτικές και ποσοτικές κλίμακες της μεθόδου

Καθώς πολλές κλίμακες (ποιοτικές ή ποσοτικές) είναι δυνατόν είτε να επαναλαμβάνονται για αρκετά διαφορετικά κριτήρια τελικού επιπέδου στον ίδιο έλεγχο (κυρίως οι αμιγώς ποιοτικές), είτε σε διαφορετικούς ελέγχους με διαφορετικά κάθε φορά όρια και χρησιμότητες βαθμίδων, ανάλογα με το εξεταζόμενο εξάρτημα/ προϊόν και τη φύση του, είναι βασικό ζητούμενο από τους ειδικούς καταρχήν να καταρτίσουν κλίμακες με λεκτικά και ουσιαστικά αντιπροσωπευτικές βαθμίδες για το κρινόμενο κριτήριο τελικού επιπέδου, που να διευκολύνουν στην εύκολη και αδιαμφισβήτητη κατάταξη των κρινόμενων εναλλακτικών σε μια από τις βαθμίδες αυτές. Έτσι θα μπορεί κάθε φορά η προτεινόμενη μέθοδος να εφαρμόζεται συστηματικά και με επαναληψιμότητα, για διαφορετικά προϊόντα ή εξαρτήματα και για ελέγχους διαφορετικών απαιτήσεων, χωρίς ουσιαστικές αλλαγές στη βασική δομή και συγκρότηση των κλιμάκων και των βαθμίδων τους. Αυτό που θα μπορεί όμως κάθε φορά να αλλάζει, είναι τα ποσοτικά όρια μεταξύ των βαθμίδων και η χρησιμότητα/βαθμολογία που αποδίδει η κάθε βαθμίδα στην κατατασσόμενη σε αυτή εναλλακτική. Και πάλι όμως, από τη στιγμή που καθοριστούν από τους ειδικούς συγκεκριμένα όρια βαθμίδων και χρησιμότητες για συγκεκριμένου είδους και χαρακτήρα προϊόντα ή εξαρτήματα, μπορούν και αυτά εφεξής να διατηρούνται σταθερά και καθορισμένα για οποιοδήποτε έλεγχο αφορά στο μέλλον το συγκεκριμένο προϊόν ή εξάρτημα ή ομοειδή του. (π.χ. Πλαστικοί κουβάδες, χυτοπρεσσαριστά ψαλίδια ανάρτησης, κ.ο.κ)

Στον Πίνακα 3.8.2, γίνεται παρουσίαση όλων των κλιμάκων που υιοθετούνται στην προτεινόμενη μέθοδο, της λεκτικής περιγραφής όλων των βαθμίδων τους, καθώς και η αντιστοίχιση – ομαδοποίησή τους με όλα τα κριτήρια τελικού επιπέδου που εξυπηρετούν ως προς την αξιολόγηση των εναλλακτικών. Αυτή είναι φυσικά μια προτεινόμενη πλήρης συγκρότηση κλιμάκων-βαθμίδων από τον γράφοντα, για αποτελεσματική εφαρμογή της μεθόδου. Ο εκάστοτε εφαρμόζων φορέας μπορεί, εφόσον επιθυμεί, να τις τροποποιήσει, ή συμπληρώσει (με τη βοήθεια των ειδικών) σε αντιπροσωπευτικότερη μορφή για τις δραστηριότητες και λειτουργίες του.

<b>Βαθμίδες Κλίμακας Κριτηρίων:</b> 1.1.1.1, 1.1.1.2, 1.1.3.1, 1.1.4.7, 1.1.4.8, 1.2.1.1 έως 4, 1.2.2.2 & 3, 1.2.3.1 έως 3 & 5, 1.2.4.1 & 2 & 4, 1.3.1.4 & 5, 1.3.2.1 έως 3 & 5, 1.3.4.4							
7-βάθμια	Μη αποδεκτά	Πολύ άσχημα	Άσχημα	Μέτρια	Καλά	Πολύ καλά	Τέλεια
<b>Βαθμίδες Κλίμακας Κριτηρίων:</b> 1.1.1.3 & 1.1.2.7							
5-βάθμια	Κανένα/ Διαφορετικό	Κατά περίπτωση παρόμοιο	Παρόμοιο	Σχεδόν ίδιο	Ακριβές		
<b>Βαθμίδες Κλίμακας Κριτηρίων:</b> 1.1.1.4 & 6							
4-βάθμια	Παραμορφωμένο	Ασαφές	Ικανοποιητικό	Ρεαλιστικό			
<b>Βαθμίδες Κλίμακας Κριτηρίων:</b> 1.1.1.5							
4-βάθμια	Ξένο	Αποδεκτή προσαρμογή	Καλή προσαρμογή	Τέλεια προσαρμογή			
<b>Βαθμίδες Κλίμακας Κριτηρίων:</b> 1.1.1.7, 1.1.3.2, 1.1.4.3 έως 5 & 8, 1.1.5.3 & 5 & 6, 1.3.4.1							
4-βάθμια	Καθόλου/ Ποτέ	Λίγο/ Ορισμένες Περιπτώσεις	Πολύ/ Περισσότερες Περιπτώσεις	Τέλεια/ Πάντοτε			
<b>Βαθμίδες Κλίμακας Κριτηρίων:</b> 1.1.1.8							
5-βάθμια	Καθόλου/ Καμία	Μερικές Επαρκώς, Μερικές καθόλου	Όλες επαρκώς	Κάποιες καλά, κάποιες όχι	Όλες καλά		
<b>Βαθμίδες Κλίμακας Κριτηρίων:</b> 1.1.2.1 & 8							
5-βάθμια	Καθόλου	Όχι εύκολα & όχι καλά	Εύκολα & όχι καλά	Καλά & όχι εύκολα	Εύκολα & Καλά		
<b>Βαθμίδες Κλίμακας Κριτηρίων:</b> 1.1.2.2							
6-βάθμια	Καθόλου	Πολύ λίγο	Λίγο	Μερικά	Πολύ	Πλήρως	
<b>Βαθμίδες Κλίμακας Κριτηρίων:</b> 1.1.2.3							
6-βάθμια	Καθόλου	Φτωχά	Επαρκώς	Φωτοσκίαση Η-Υ	Φωτορεαλιστικά	Φυσικά Ρεαλιστικά	
<b>Βαθμίδες Κλίμακας Κριτηρίων:</b> 1.1.2.4 & 5							
4-βάθμια	Καθόλου/ Μη ρεαλιστικά	Με προσομοίωση	Παρόμοια	Ρεαλιστικά			
<b>Βαθμίδες Κλίμακας Κριτηρίων:</b> 1.1.2.6							
4-βάθμια	Καθόλου	Φτωχή προσομοίωση/ Υπολογισμός/ Διαφορετικό	Πολύ παρόμοια	Ρεαλιστικά			
<b>Βαθμίδες Κλίμακας Κριτηρίων:</b> 1.1.2.9, 1.1.5.6 & 7, 1.1.6.9, 1.3.2.4							
5-βάθμια	Καθόλου	Φτωχή προσομοίωση/ Υπολογισμός/ Διαφορετικό	Προσομοιάζουν ή Προσομοίωση σε Η-Υ	Πολύ παρόμοιο	Ρεαλιστικό		
<b>Βαθμίδες Κλίμακας Κριτηρίων:</b> 1.1.3.3, 1.1.4.1 & 2, 1.3.2.5							
5-βάθμια	Καθόλου	Λίγο	Μερικά	Πολύ	Πλήρως		
<b>Βαθμίδες Κλίμακας Κριτηρίων:</b> 1.1.3.4							
5-βάθμια	Διαφορετικά/ Κανένα στοιχείο	Συχνά διαφορετικά	Κάπως ή συχνά παρόμοια	Πάντα παρόμοια ή σχεδόν ίδια	Ακριβώς		
<b>Βαθμίδες Κλίμακας Κριτηρίων:</b> 1.1.5.1, 1.2.3.4							
6-βάθμια	Ανεπαρκές ή καθόλου	Ως σημείωση	Με Προσομοίωση	Κάπως ή κάποιες φορές παρόμοιο	Παρόμοιο	Ακριβώς	

(Πίνακας 3.8.2 – Συνέχεια)							
<b>Βαθμίδες Κλίμακας Κριτηρίων: 1.1.5.2</b>							
6-βάθμια	Καθόλου	Σημείωση	Φτωχή προσομοίωση / Υπολογισμός/ Διαφορετικό	Προσομοίωση σε Η-Υ	Πολύ παρόμοιο	Ρεαλιστικό	
<b>Βαθμίδες Κλίμακας Κριτηρίων: 1.1.5.4</b>							
6-βάθμια	Διαφορετικά/ Κανένα στοιχείο	Συχνά διαφορετικά	Ως σημείωση/ ένδειξη	Κάπως ή συχνά παρόμοιο	Πάντα παρόμοιο ή σχεδόν ίδιο	Ακριβές	
<b>Βαθμίδες Κλίμακας Κριτηρίων: 1.2.2.1</b>							
7-βάθμια	Καθόλου ή Ανεπαρκές	Ως σημείωση	Προσομοίωση	Κάπως ή κάποιες φορές παρόμοιο	Προσομοίωση σε Η-Υ	Παρόμοιο	Ακριβές
<b>Βαθμίδες Κλίμακας Κριτηρίων: 1.2.2.4, 1.2.3.6, 1.2.4.3</b>							
6-βάθμια	Καθόλου	Αδρή υπόθεση	Προεκτίμηση	Υπολογισμός σε Η-Υ	Σχεδόν ίδιο	Ακριβές	
<b>Βαθμίδες Κλίμακας Κριτηρίων: 1.3.1.1 έως 3 &amp; 6, 1.3.4.2 &amp; 3 &amp; 6 έως 9</b>							
7-βάθμια	Καθόλου	Φτωχή προσομοίωση, προεκτίμηση, ή άλλο	Αδρά παρόμοιο	Προσομοίωση Η-Υ	Παρόμοιο	Πολύ παρόμοιο	Ρεαλιστικό
<b>Βαθμίδες Κλίμακας Κριτηρίων: 1.3.3.1 έως 4</b>							
6-βάθμια	Καθόλου	Φτωχή προσομοίωση / Προεκτίμηση ή Διαφορετικό	Προεκτίμηση	Προσομοίωση ή υπολογισμός σε Η-Υ/ Παρόμοιο	Σχεδόν ίδιο	Ρεαλιστικό	
<b>Βαθμίδες Κλίμακας Κριτηρίων: 2.1.1</b>							
5-βάθμια	Τεράστιο	Υπερβολικό	Λογικό	Λίγο/ Αμελητέο	Καθόλου		
<b>Βαθμίδες Κλίμακας Κριτηρίων: 2.1.2, 2.1.4</b>							
6-βάθμια	Πολύ υψηλό	Υψηλό	Φυσιολογικά Λογικό	Οικονομικό	Σχεδόν Αμελητέο	Καθόλου	
<b>Βαθμίδες Κλίμακας Κριτηρίων: 2.1.3</b>							
5-βάθμια	Πολύ ακριβό	Ακριβό	Φυσιολογικό/ Μέσο	Οικονομικό	Πολύ οικονομικό		
<b>Βαθμίδες Κλίμακας Κριτηρίων: 2.1.5 &amp; 6, 2.2.4, 2.2.5</b>							
6-βάθμια	Το πλήρες ή σχεδόν	Μεγάλο ποσοστό	Περίπου Μισό	Μικρό ποσοστό	Αμελητέο	Καθόλου	
<b>Βαθμίδες Κλίμακας Κριτηρίων: 2.2.1, 2.2.3</b>							
5-βάθμια	Υπερβολικός (Εβδ. έως μήνες)	Μακρύς (Ημέρες έως εβδομάδες)	Μέσος (Ωρες έως ημέρες)	Πολύ Μικρός (Λεπτά έως ώρες)	Άμεσα		
<b>Βαθμίδες Κλίμακας Κριτηρίων: 2.2.2</b>							
5-βάθμια	Πολύ αργός (Εβδ. έως μήνες)	Αργός (Ημέρες/Εβδομ.)	Ταχύς (Ωρες/Ημέρες)	Σύντομος (Λεπτά)	Άμεσος		



(Πίνακας 3.8.2 – Συνέχεια)						
<b>Βαθμίδες Κλίμακας Κριτηρίων: 2.3.1</b>						
6-βάθμια	Τυχαία	Μερικές Φορές	Συχνά	Συνήθως	Στις περισσότερες περιπτώσεις (95%)	Στο 100%
<b>Βαθμίδες Κλίμακας Κριτηρίων: 2.3.2</b>						
5-βάθμια	Σχεδόν Βέβαιο	Πολύ Πιθανόν	Πιθανόν	Όχι Πιθανό	Αδύνατον	
<b>Βαθμίδες Κλίμακας Κριτηρίων: 2.3.3</b>						
5-βάθμια	Καμία/ Αμελητέα	Ελαφριά	Ανεκτή/Αποδεκτή	Βαριά	Σοβαρή/ Κρίσιμη	
<b>Βαθμίδες Κλίμακας Κριτηρίων: 2.3.4</b>						
6-βάθμια	Σχεδόν Βέβαιο	Πολύ Πιθανόν	Πιθανόν	Όχι Πιθανό	Σχεδόν Αδύνατον	Αδύνατον
<b>Βαθμίδες Κλίμακας Κριτηρίων: 2.3.5</b>						
5-βάθμια	Αδύνατον	Με δυσκολία	Με σημαντική προσπάθεια	Με λίγη προσπάθεια	Εύκολα / Άμεσα	
<b>Βαθμίδες Κλίμακας Κριτηρίων: 2.3.6</b>						
5-βάθμια	Ξένος/ Άσχετος	Με λίγη εκπαίδευση ή άπειρος	Επαρκώς Εκπαιδευμένος	Έμπειρος	Πολύ Έμπειρος - Πιστοποιημένος	
<b>Βαθμίδες Κλίμακας Κριτηρίων: 3.1.1, 3.1.2</b>						
4-βάθμια	Μεγάλη/ Επιβαρυντική	Υπολογίσιμη	Ελαφριά/ Αμελητέα	Καθόλου		
<b>Βαθμίδες Κλίμακας Κριτηρίων: 3.1.3</b>						
5-βάθμια	Καθόλου	Χαμηλή	Μέση	Υψηλή	Πλήρης	
<b>Βαθμίδες Κλίμακας Κριτηρίων: 3.1.4</b>						
6-βάθμια	100% Τοξικό	Υψηλή	Άνω του Μ.Ο.	Μέση	Χαμηλή	Καθόλου
<b>Βαθμίδες Κλίμακας Κριτηρίων: 3.2.1 έως 3</b>						
5-βάθμια	Επικίνδυνη	Βλαπτική	Χωρίς επίδραση	Υποστηρικτική	Ουσιώδης/Κρίσιμη	
<b>Βαθμίδες Κλίμακας Κριτηρίων: 3.3.1</b>						
4-βάθμια	Μη διαθέσιμη	Διαθέσιμη με καθυστέρηση (Εκτός εγκαταστάσεων)	Διαθέσιμη κατόπιν αιτήματος και προγραμματισμού	Άμεσα Διαθέσιμη		
<b>Βαθμίδες Κλίμακας Κριτηρίων: 3.3.2</b>						
5-βάθμια	Μη διαδεδομένη (π.χ. ερευνητική)	Περιορισμένα διαδεδομένη	Κάπως διαδεδομένη	Διαδεδομένη εντός ειδικών ομάδων/ ομίλων / τμημάτων	Ευρέως διαδεδομένη / κοινή	
<b>Βαθμίδες Κλίμακας Κριτηρίων: 3.3.2</b>						
3-βάθμια	Δεν υπάρχει	Υπάρχει σε εφικτή απόσταση	Υπάρχει			
<b>Βαθμίδες Κλίμακας Κριτηρίων: 3.3.3</b>						
2-βάθμια	Δεν υπάρχει (0)			Υπάρχει (1)		

Πίνακας 3.8.2: Ομαδοποίηση των προτεινόμενων κλιμάκων της μεθόδου ανά υιοθετούμενα τελικά κριτήρια

Οι ειδικοί (της ομάδας σχεδιασμού του φορέα και οι εξωτερικοί) προσαρμόζοντας τις κλίμακες και βαθμολογώντας υποψήφιες εναλλακτικές επί αυτών μπορούν να δημιουργήσουν μια αντιπροσωπευτική «βάση γνώσης», χαρακτηριστική και

αντίστοιχη του εφαρμόζοντος τη μέθοδο φορέα, του βιομηχανικού περιβάλλοντος που δραστηριοποιείται και της γκάμας των προϊόντων που αναπτύσσει.

Στα πλαίσια της παρούσας ΔΔ, όπως θα διαφανεί και από τα παραδείγματα που θα ακολουθήσουν, για την εφαρμογή της προτεινόμενης μεθόδου ορίζονται σε όλες τις κλίμακες του Πίνακα 3.8.2 όρια βαθμίδων κλιμάκων και βαθμολογίες – χρησιμότητες κάθε βαθμίδας, ενώ οι κάθε φορά κρινόμενες εναλλακτικές κατατάσσονται – βαθμολογούνται σε αυτές με βάση την εμπειρία και τεχνογνωσία που έχει αποκτηθεί, τα αποτελέσματα των πειραματικών δοκιμών και της ειδικής έρευνας πεδίου που διενεργήθηκε και έγκυρα αποτελέσματα της σχετικής διεθνούς βιβλιογραφίας, πολλά από τα οποία αναφέρθηκαν στην Παράγραφο 1.11 της παρούσας εργασίας.

### **3.9 Επιδιώξεις σχεδιασμού & αξιολόγηση εναλλακτικών πρωτοτυποποίησης**

Έχοντας δομήσει πλήρως το πρόβλημα απόφασης, καταρτίσει κλίμακες κριτηρίων τελικού επιπέδου και βαθμολογήσει τις εναλλακτικές πρωτοτυποποίησης, το τελικό βήμα για να μπορεί να εξαχθεί η κρίση ως προς τον στόχο, είναι η καταγραφή των επιδιώξεων του διενεργουμένου ελέγχου που το στάδιο της πρωτοτυποποίησης θα εξυπηρετήσει (evaluation stage). Με άλλα λόγια, ο καθορισμός της βαρύτητας – συμμετοχής στην απόφαση, όλων των κλάδων κριτηρίων, στα πάνω από το τελικό επίπεδα κριτηρίων της ιεραρχίας. Η κατανομή αυτή μάλιστα δέον να γίνεται με προσέγγιση «από την κορυφή – στόχο προς τα κάτω» (top-to-bottom approach).

Οι κλάδοι πρώτου επιπέδου, αφορούν περισσότερο τη διοίκηση και τα ηγετικά στελέχη της ομάδας σχεδιασμού, καθώς καθορίζουν τη βαρύτητα των τεχνικών, διοικητικών και άλλων παραμέτρων μεταξύ τους, που αναπόφευκτα εισάγουν κοστολογικούς, εταιρικούς και άλλους παράγοντες, που στενά δεν ενδιαφέρουν τα τεχνικά στελέχη.

Για τα επόμενα επίπεδα, στις μεν τεχνικές παραμέτρους στελέχη εκ της ομάδας σχεδιασμού θα καθορίσουν το κατά πόσον στοχεύεται να διαπιστωθεί μορφή, συναρμογή/ συνεργασία και λειτουργία, με βάση το τρέχον στάδιο/φάση σχεδιασμού και προχωρώντας προς τα κάτω έως τα κριτήρια τελικού επιπέδου, με τη βοήθεια των ειδικών, θα καθορίσουν κατόπιν τη συμμετοχή κάθε ΧΣ και των ΠΣ εντός αυτού, με βάση εδώ το εξεταζόμενο εξάρτημα/προϊόν.

Στους δε μη τεχνικούς κλάδους, η κατανομή προτεραιοτήτων, σημαντικότητας και βαρύτητας των επιμέρους κριτηρίων θα γίνει από διοικητικά και τεχνικά στελέχη μαζί, όπου μάλιστα απαιτείται (ειδικότερα στα χαμηλού επιπέδου υποκριτήρια) με τη βοήθεια και πάλι των ειδικών.

Μια ιδιαιτερότητα που εμφανίζεται συχνά στις ΜΜΕ και ιδιαίτερα στο ελληνικό περιβάλλον, είναι οι παραπάνω ιδιότητες διοικητικών στελεχών, ηγητόρων/ μελών της ομάδας σχεδιασμού και ειδικών (από την πλευρά του φορέα) να συμπίπτουν συχνά στα ίδια, ολιγάριθμα πρόσωπα. Αυτό καθιστά ακόμα ουσιαστικότερο το ρόλο της συμμετοχής και κάποιων εξωτερικών ειδικών ως προς τις εξεταζόμενες εναλλακτικές, μη άμεσα σχετιζόμενων με το φορέα, για την επιτυχή εφαρμογή της μεθόδου.

Έτσι μπορεί τελικά να καταγραφεί πλήρως, αναλυτικά και με σαφήνεια η επιδίωξη του φορέα σχεδιασμού σχετικά με τον προγραμματιζόμενο έλεγχο που θα πρέπει να διενεργηθεί. Η δε εφαρμοζόμενη μέθοδος “συλλαμβάνει” καθαρά ένα “στιγμιότυπο” της τρέχουσας ανάγκης πρωτοτυποποίησης και αξιολογεί τις εναλλακτικές για το δεδομένο κατασκευαστικό περιβάλλον.

Όλες οι παραπάνω κατανομές βαρυτήτων επιτυγχάνονται στο πλαίσιο της ΑΗΡ με ζευγαρωτές συγκρίσεις των κριτηρίων – υποκριτηρίων μεταξύ τους, στα επίπεδα στα οποία ανήκουν. Το εξαγόμενο της διαδικασίας αυτής είναι αφενός οι τοπικές (Local weights) προτιμήσεις-σημαντικότητες-βαρύτητες των κριτηρίων ανά επίπεδο, εκπεφρασμένες σε δεκαδικούς αριθμούς με άθροισμα τη μονάδα ως προς τον ανώτερο κόμβο του κυβερνόντος κριτηρίου τους στο δένδρο απόφασης, και οι συνολικές προτιμήσεις-σημαντικότητες-βαρύτητες των μεμονωμένων κριτηρίων συνολικά ως προς τον στόχο (Global weights), που πρακτικά δείχνουν και το μέτρο της απόλυτης συμμετοχής τους ως προς το στόχο (Άθροισμα η μονάδα σε όλες τις βαρύτητες επιπέδων ίδιας τάξεως, ανεξαρτήτως κλάδου).

Κατά τις βασικές λοιπόν αρχές της ΑΗΡ ο διαδοχικός αλγεβρικός πολλαπλασιασμός όλων των μητρώων/διανυσμάτων των βαρυτήτων μεταξύ τους και της χρησιμότητας των εναλλακτικών ως προς τα κριτήρια τελικού επιπέδου, οδηγεί στο τελικό διάνυσμα προτίμησης/κατάταξης των εναλλακτικών ως προς τον στόχο, όπου κάθε αξιολογούμενη εναλλακτική λαμβάνει μια ορισμένη αριθμητική βαθμολογία - προτίμηση με τιμή από 0 έως 1, όλες δε οι βαθμολογίες - προτιμήσεις αθροίζονται με σύνολο τη μονάδα.

Με βάση την αριθμητική βαθμολογία - προτίμηση που προκύπτει για κάθε εναλλακτική, αυτούσια ή και κανονικοποιημένη (π.χ. ως προς τη μεγαλύτερη τιμή) ο αποφασίζων είναι σε θέση τελικά να επιλέξει, με αντικειμενικό και άμεσα αντίστοιχο με τις επιδιώξεις του ελέγχου τρόπο, την αποτελεσματικότερη εναλλακτική πρωτοτυποποίησης.

### 3.10 Εφαρμογή 1 – Γεωμετρικό Πρωτότυπο

#### Εξεταζόμενο Υποθετικό Σενάριο

- Φορέας Εφαρμογής: Ομάδα σχεδιασμού του Τομέα ΜΚ & ΑΕ Σχολής ΜΜ ΕΜΠ
- Αντικείμενο: Νέα σχεδιαζόμενη συσκευή χειρισμού χειρός (handheld control panel) βιομηχανικού ρομποτικού μηχανισμού – Εξωτερικό κέλυφος (παραγωγή από πλαστικό). Τυπικού μικρού-μεσαίου μεγέθους εξάρτημα
- Φάση σχεδιασμού: Πρώιμο στάδιο αναλυτικού σχεδιασμού
- Βασικότερες προτεραιότητες: Πολύ γρήγορη λύση, επιδίωξη χαμηλού κόστους, πολύ πιθανή επανακατασκευή τροποποιημένου
- Κυριότερες επιδιώξεις: Έλεγχος και εξασφάλιση εργονομίας, έλεγχος συναρμολόγησης με ολοκληρωμένα ηλεκτρονικά κυκλώματα, διαπίστωση κατασκευασιμότητας με τις δεδομένες διαστάσεις
- Κατασκευαστικό Περιβάλλον: Άμεση διαθεσιμότητα & επαρκής εκπαίδευση σε 3D CAD, ύπαρξη, άμεση διαθεσιμότητα και υψηλή εμπειρία εξοπλισμού ΤΚΠ φύλλων υλικού και εναπόθεσης τήγματος, διαθεσιμότητα κατόπιν προγραμματισμού και με μέση εμπειρία μηχανών CNC. Άλλες λύσεις πρωτοτυποποίησης δυνατόν να βρεθούν στο ευρύτερο κατασκευαστικό περιβάλλον ως εξωτερική υπηρεσία
- Δεσμεύσεις: Υποστήριξη οργανισμού (ΕΜΠ), χαμηλή επιβάρυνση περιβάλλοντος

Εξετάζονται ως εναλλακτικές πρωτοτυποποίησης τα κάτωθι:

- Μοντέλο 3D CAD (Διαθέσιμο εντός ομάδας σχεδιασμού)
- Εικονικό (ψηφιακό) πρωτότυπο σε στερεοσκοπική οθόνη H-Y (Desktop) (Διαθέσιμο εντός ομάδας σχεδιασμού, υπό προϋποθέσεις)

- Εικονικό (ψηφιακό) πρωτότυπο σε στερεοσκοπική οθόνη H-Y με απτική ανάδραση (γάντια) (Διαθέσιμο στο ευρύτερο κατασκευαστικό περιβάλλον εκτός ΕΜΠ)
- Χειροποίητο μοντέλο (τεχνίτης – Διαθέσιμο στο ευρύτερο κατασκευαστικό περιβάλλον εκτός ΕΜΠ)
- Συμβατικό πρωτότυπο αφαίρεσης υλικού (συμβατικά φρέζες, τόννοι, δράπανα – Διαθέσιμο ευρύτερα εντός ΕΜΠ υπό προϋποθέσεις)
- Πρωτότυπο από CNC μηχανή (Διαθέσιμο εντός Τομέα MK&AE και ευρύτερα στο ΕΜΠ υπό προϋποθέσεις)
- Πρωτότυπο από επιτραπέζια CNC μηχανή (Διαθέσιμο εντός Τομέα MK&AE)
- Πρωτότυπο από ΤΚΠ φωτοπολυμερούς (Περιορισμένα διαθέσιμο στο ευρύτερο κατασκευαστικό περιβάλλον εκτός ΕΜΠ)
- Πρωτότυπο από ΤΚΠ φύλλων υλικού (Διαθέσιμο εντός Τομέα MK&AE)
- Πρωτότυπο από ΤΚΠ μικρών μηχανών γραφείου γενικά, ανεξαρτήτως τεχνολογίας (Διαθέσιμο στο ευρύτερο κατασκευαστικό περιβάλλον εκτός ΕΜΠ)
- Πρωτότυπο από ΤΚΠ εναπόθεσης τήγματος (Διαθέσιμο εντός Τομέα MK&AE και ευρύτερα στο κατασκευαστικό περιβάλλον εκτός ΕΜΠ)

Τα παραπάνω δεδομένα ερμηνεύονται κατάλληλα σε υλοποιηθέν μοντέλο της προτεινόμενης μεθοδολογίας, στο περιβάλλον εφαρμογής μεθόδου *AHP Expert Choice*.

Καταρχήν έχει πλήρως διαμορφωθεί στο *Expert Choice* το δένδρο στόχου – κριτηρίων – υποκριτηρίων του Σχήματος 3.4.1 της προτεινόμενης μεθοδολογίας, όπου ομαδοποιούνται και διασυνδέονται μεταξύ τους για την μετέπειτα κατανομή βαρυτήτων και προτιμήσεων όλες οι τεχνικές και μη τεχνικές παράμετροι που συμμετέχουν στην απόφαση – κρίση (Παράγραφοι 3.5, 3.6, 3.7). Μια άποψη του δένδρου στο περιβάλλον *Expert Choice*, εκτεταμένου ως το τρίτο του επίπεδο δίνεται στο Σχήμα 3.10.1.

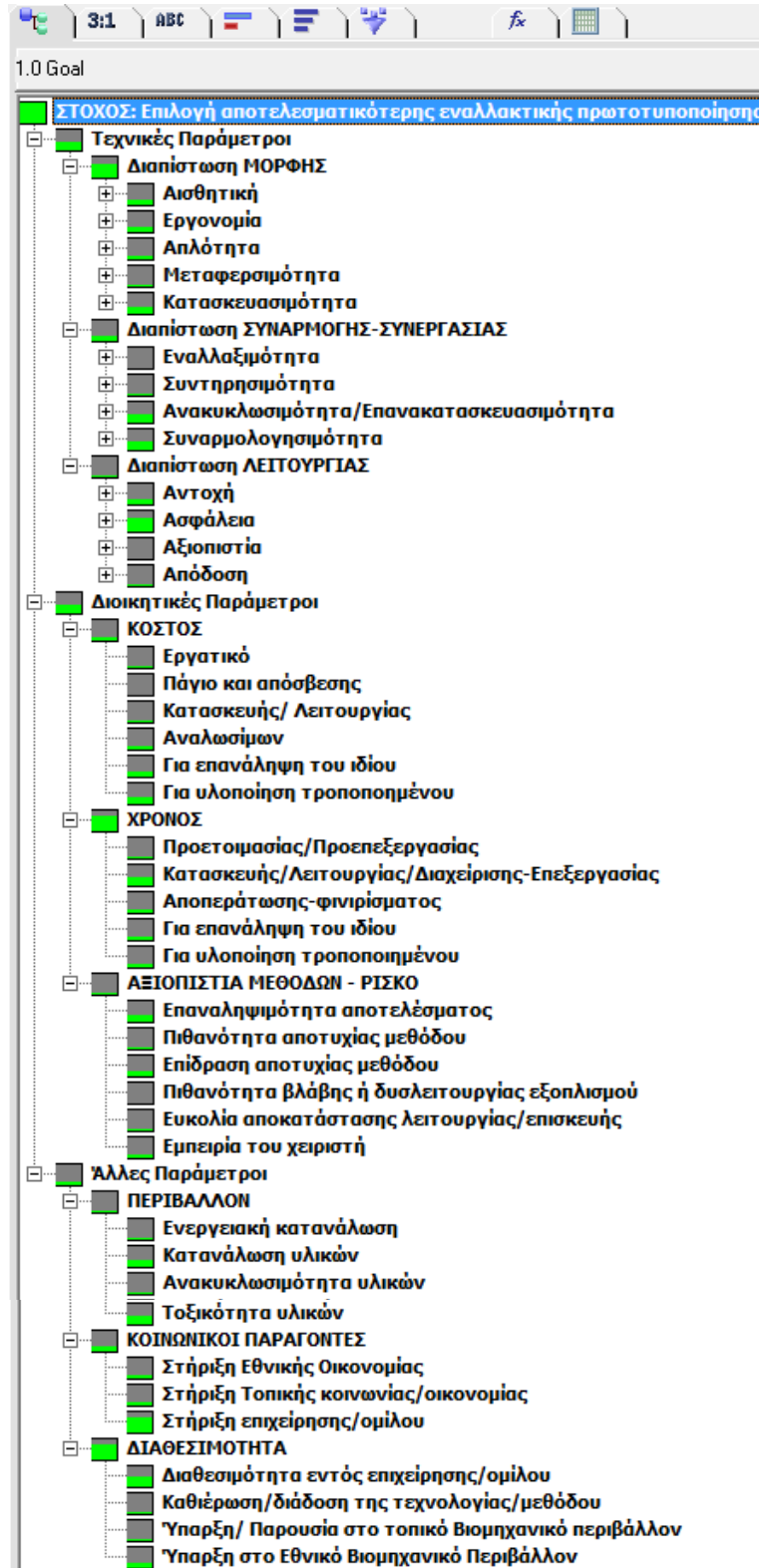
Κατόπιν διαμορφώνονται – επιβεβαιώνονται από τους ειδικούς (με απόλυτη κρίση – *ideal method*) οι βαθμολογίες όλων των εξεταζόμενων (και άλλων πιθανών) εναλλακτικών πρωτοτυποποίησης έναντι των κλιμάκων αξιολόγησης του Πίνακα 3.8.2 όλων των κριτηρίων τελευταίου επιπέδου των Πινάκων 3.5.1, 3.6.1 και 3.7.1, σε αντιστοιχία με το κατασκευαστικό περιβάλλον του φορέα (Τομέας MK & AE) και ευρύτερα του περιβάλλοντος της Αττικής.

Αποσπάσματα οθόνης (Screenshots) με βαθμολογήσεις εναλλακτικών για ορισμένα από τα κριτήρια τελευταίου επιπέδου δίνονται χαρακτηριστικά στο Σχήμα 3.10.2.

Όρια βαθμίδων και χρησιμότητες (utilities) καθενός έχουν πρώτα ορισθεί για κάθε βαθμίδα κλίμακας κριτηρίου τελευταίου επιπέδου, με βάση το είδος του αναπτυσσομένου εξαρτήματος και τους γενικότερους περιορισμούς της εφαρμογής. Ορισμένες χαρακτηριστικές στο Σχήμα 3.10.3.

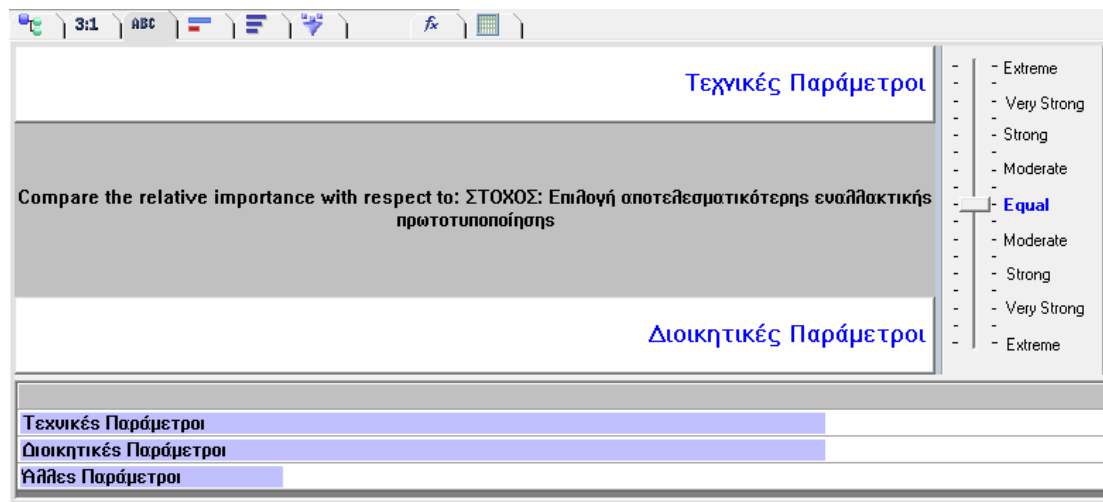
Τελευταίο βήμα εφαρμογής η «από πάνω προς τα κάτω» απόδοση των βαρυτήτων & προτιμήσεων στους κλάδους του δένδρου (evaluation stage), με εφαρμογή ζευγαρωτών συγκρίσεων, από τους επικεφαλής της ομάδας για τα ανώτερα επίπεδα και από τα μέλη για τα χαμηλότερα, στο περιβάλλον του *Expert Choice*, όπου δυναμικά εμφανίζεται στο χρήστη και ο συντελεστής ασυνέπειας των κρίσεων

(Inconsistencies), τον οποίο για την ακεραιότητα των συγκρίσεων φροντίζουν οι κρίνοντες να διατηρούν κάτω από 0,1 (10%), κατά της αρχές εφαρμογές της μεθόδου ΑΗΡ. Χαρακτηριστικά περιβάλλοντα απόδοσης προτεραιοτήτων του Expert Choice, αριθμητικά και λεκτικά, για το πρώτο και για χαμηλότερο επίπεδο, δίνονται στο Σχήμα 3.10.4.



Σχήμα 3.10.1: Το πλήρες δένδρο κριτηρίων στο περιβάλλον Expert Choice





	Ύψος Ολοίστωσης	Ευκαμία Διευτορίας/Χρήσης	Φωτισμός	Οικεπαφή με το χρήστη	Ύνεση	Κάπωση χρήση	Βαθμός Αναγνώρισης χρώματος	Ανθρομομετρία	Λογική και αποδοτικότητα στοιχείων ελέγχου και ενδείξεων
Ύψος Ολοίστωσης	1,0	3,0	1,0	8,0	4,0	1,0	1,0	7,0	4,0
Ευκαμία Διευτορίας/Χρήσης		1,0	4,0	1,0	1,0	2,0	2,0	3,0	3,0
Φωτισμός			1,0	6,0	5,0	3,0	3,0	5,0	6,0
Οικεπαφή με το χρήστη				1,0	7,0	7,0	7,0	4,0	4,0
Ύνεση					1,0	4,0	4,0	1,0	3,0
Κάπωση χρήση						1,0	5,0	3,0	3,0
Βαθμός Αναγνώρισης χρώματος							1,0	4,0	1,0
Ανθρομομετρία								1,0	2,0
Λογική και αποδοτικότητα στοιχείων ελέγχου και ενδείξεων									1,0

Pairwise Numerical Comparisons

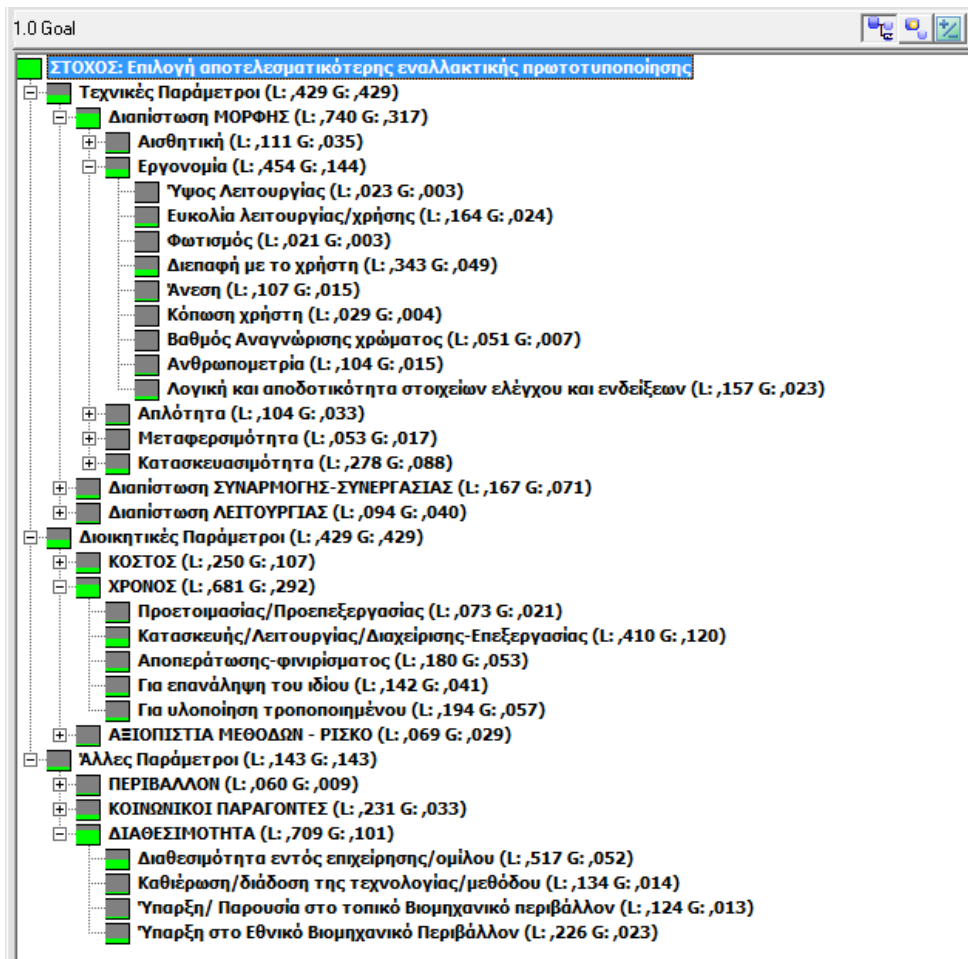
Σχήμα 3.10.4: Απόδοση βαρύτητας/προτίμησης λεκτικά και αριθμητικά σε κλάδους του δένδρου σε περιβάλλον Expert Choice

Έτσι τελικά ολοκληρώνεται η πλήρης καταγραφή – «στιγμιότυπο» προτεραιοτήτων και βαρυτήτων για το σκοπούμενο γεωμετρικό πρωτότυπο, και προκύπτουν οι τοπικές (κάτω από τον ίδιο κόμβο, local) και συνολικές (κάτω από τον στόχο, global) βαρύτητες κάθε κλάδου – κριτηρίου, σύμφωνα με τη μοντελοποιημένη δομή τους. Παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.10.5, γραφικά στο δένδρο κριτηρίων στο περιβάλλον Expert Choice, με τους σημαντικότερους κλάδους επεκτεταμένους ως το τελευταίο τους επίπεδο.

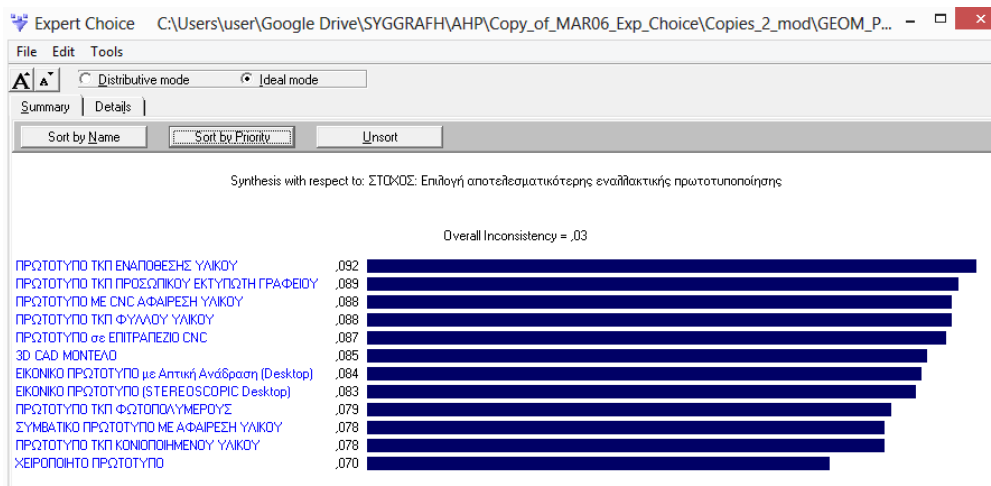
Τα ιεραρχημένα τελικά αποτελέσματα της κατάταξης των εξεταζόμενων εναλλακτικών πρωτοτυποποίησης, για το συγκεκριμένο καταγεγραμμένο «στιγμιότυπο» φάσης σχεδιασμού – προγραμματιζόμενου ελέγχου, μετά τη σύνθεση βαρυτήτων και βαθμολογιών, δίνονται στο Σχήμα 3.10.6 κατά προτεραιότητα.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει και η αναπαράστασή των αποτελεσμάτων, ως προς την επιμέρους κάλυψη των κεντρικών κλάδων του δένδρου απόφασης που αφορούν τις τεχνικές, διοικητικές και λοιπές παραμέτρους από τις εξεταζόμενες εναλλακτικές, η οποία δίνεται στο Σχήμα 3.10.7.

Υπάρχει επίσης η δυνατότητα στο περιβάλλον του Expert Choice, να εξετάζονται άμεσα οι εναλλακτικές ως προς την κατάταξη και αποτελεσματικότητά τους και για κάθε επιμέρους κλάδο – κριτήριο, σύμφωνα με την ήδη καταγεγραμμένη συγκρότηση των βαρυτήτων των υποκριτηρίων του ως το τελευταίο επίπεδο. Μια τέτοια αναπαράσταση για το κριτήριο της διαπίστωσης της εργονομίας δίνεται στο Σχήμα 3.10.8.

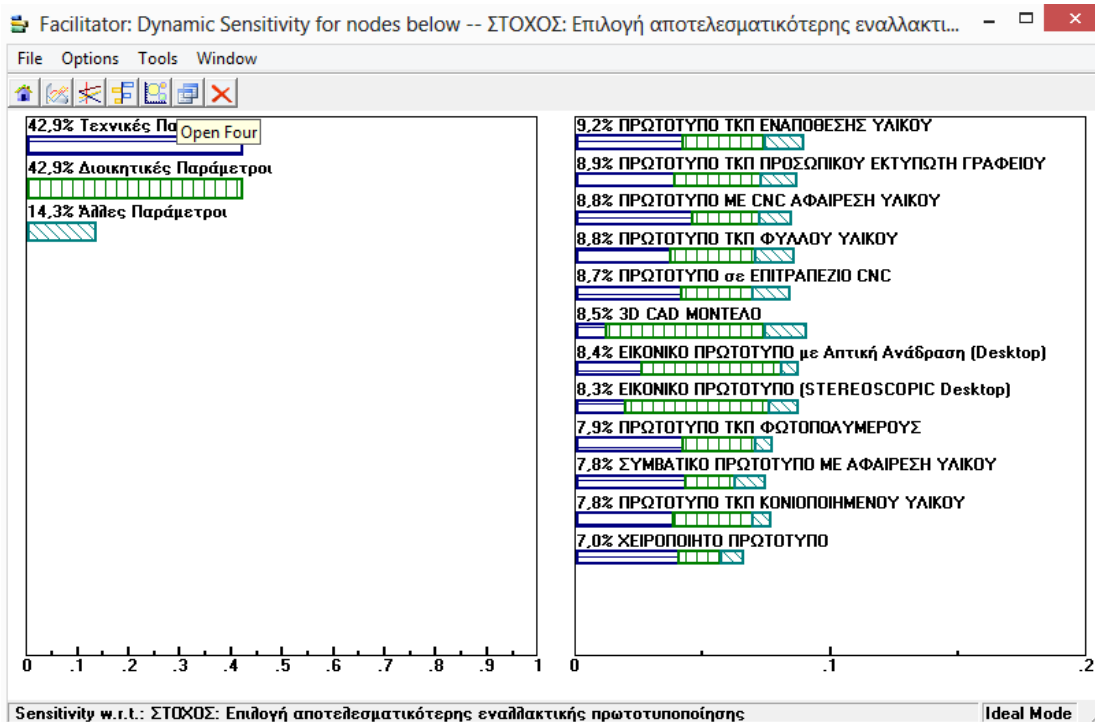


Σχήμα 3.10.5: Το «μείγμα» βαρυτήτων του προγραμματιζόμενου ελέγχου (Περιβάλλον Expert Choice)

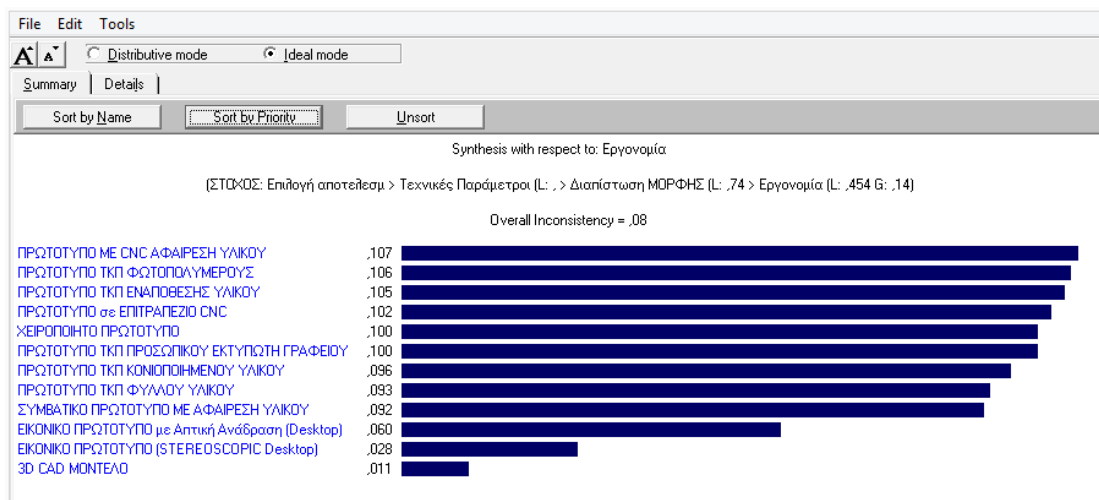


Σχήμα 3.10.6: Αποτελέσματα κατάταξης εξεταζομένων εναλλακτικών πρωτοτυποποίησης





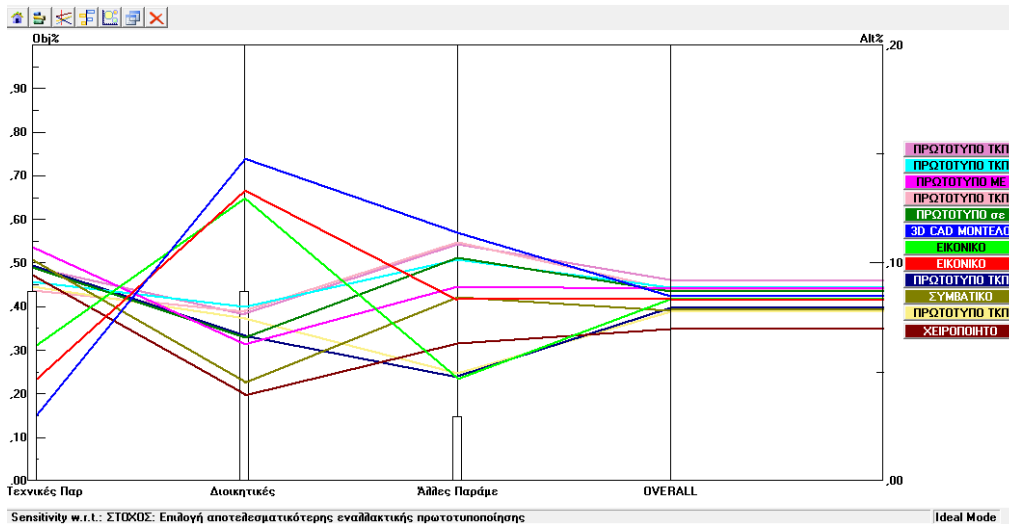
Σχήμα 3.10.7: Επιμέρους αποτελεσματικότητα των εναλλακτικών ως προς την κάλυψη των κύριων κλάδων – παραμέτρων της απόφασης



Σχήμα 3.10.8: Αποτελεσματικότητα εξεταζομένων εναλλακτικών μόνο ως προς τη διαπίστωση εργονομίας

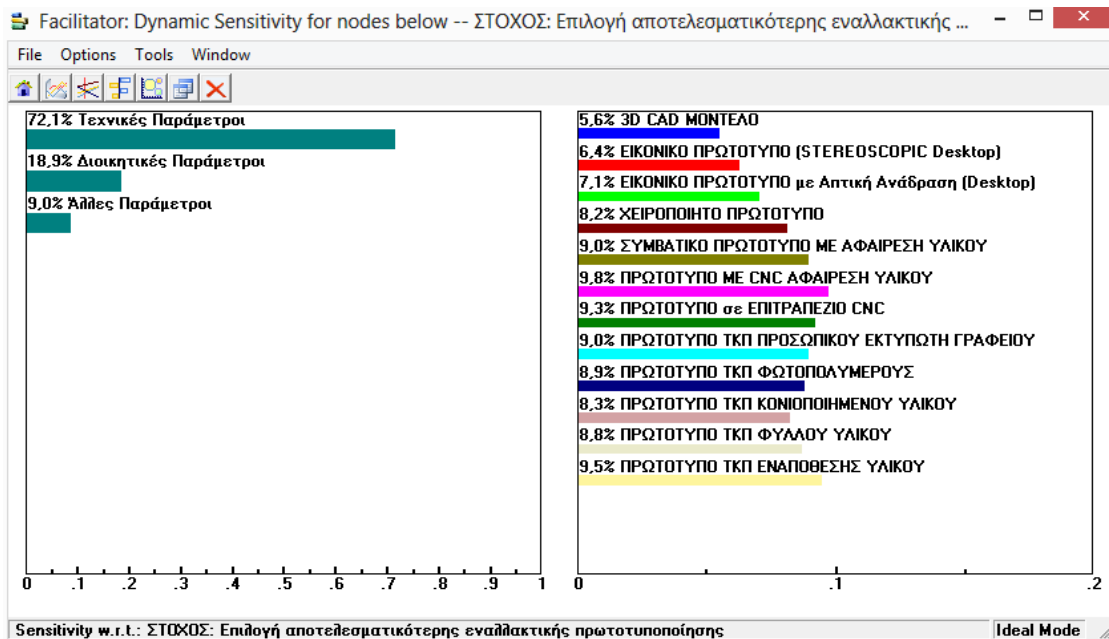
Τέλος, χρήζει αναφοράς ο δυναμικός χαρακτήρας του μοντέλου εφαρμογής της προτεινόμενης μεθοδολογίας στο περιβάλλον Expert Choice.

Αφενός δίνεται άμεσα η δυνατότητα δυναμικού γραφήματος απόδοσης (Performance chart) των εξεταζομένων εναλλακτικών, όπου καταγράφεται η επιμέρους αποτελεσματικότητα, αλλά και η «δυναμική» τους στην αλλαγή προτεραιοτήτων οποιουδήποτε κριτηρίου/ υποκριτηρίου, όπως δείχνει το Σχήμα 3.10.9. Πρέπει να σημειωθεί ότι η πεπλεγμένη μορφή των γραμμών, μαρτυρά ότι οι εξεταζόμενες εναλλακτικές όντως συγκροτούν «μέτωπο Pareto» του προβλήματος. Αν κάποια ξεχώριζε προς τα πάνω θα ήταν προφανής ή ιδανική λύση. Αν προς τα κάτω, θα έπρεπε να απορριφθεί ευθύς εξαρχής ως ανεπαρκής.



Σχήμα 3.10.9: Διάγραμμα απόδοσης εναλλακτικών έναντι κεντρικών ομάδων κριτηρίων

Αφετέρου, κάθε αλλαγή στις προτιμήσεις μεταξύ ομάδων κριτηρίων και υποκριτηρίων, οποιουδήποτε επιπέδου, συνεπάγεται το δυναμικό αυτόματο υπολογισμό της νέας κατάταξης των εξεταζομένων εναλλακτικών, εφόσον βέβαια οι βαθμολογίες τους έναντι των κριτηρίων τελευταίου επιπέδου έχουν παραμείνει σταθερές. Έτσι π.χ. για νέο «στιγμιότυπο» κεντρικών προτεραιοτήτων, με μεγαλύτερη έμφαση στα τεχνικά χαρακτηριστικά, προκύπτει ανατροπή των αποτελεσμάτων (σε σχέση με αυτά του Σχήματος 3.10.6), όπως δεικνύει το Σχήμα 3.10.10.



Σχήμα 3.10.10: Δυναμικός χαρακτήρας – Ανατροπή τελικού αποτελέσματος με αλλαγή κεντρικών προτεραιοτήτων

#### Συμπεράσματα εφαρμογής:

- Η μικρή διαφορά βαθμολογιών των τελικά αξιολογούμενων λύσεων και η ανατροπή της μεταξύ τους σειράς σε αλλαγές κεντρικών προτεραιοτήτων, μαρτυρά ότι αυτές όντως ανήκουν στο «μέτωπο Pareto» του εξεταζόμενου

προβλήματος απόφασης και είναι αναγκαίο να αξιολογούνται για την επιλογή κάποιας εξ' αυτών.

- Η επικράτηση της λύσης ΤΚΠ εναπόθεσης υλικού (υφιστάμενη στον Τομέα ΜΚ & ΑΕ) για το καταγεγραμμένο «στιγμιότυπο» προτεραιοτήτων του ελέγχου, είναι λογική και πλέον και αριθμητικά τεκμηριωμένη. Ακολουθείται από επίσης λογικές λύσεις για τις δεδομένες απαιτήσεις, οι οποίες είναι δυνατόν να καταστούν επικρατέστερες με μέσου βαθμού αλλαγές των κεντρικών προτεραιοτήτων.
- Αλλαγή προτεραιοτήτων σε χαμηλότερα επίπεδα του τεχνικού κλάδου, επίσης θα μπορούσε να ανατρέψει δραστικά τα αποτελέσματα, θα ήταν όμως αναντίστοιχη αφενός με τον εξ' ορισμού χαρακτήρα του επιδιωκόμενου πρωτοτύπου (ως γεωμετρικό) και αφετέρου με τη φύση του σχεδιαζόμενου εξαρτήματος, που υπαγορεύει σε υψηλό βαθμό τα ζητούμενα του προγραμματιζόμενου ελέγχου.

### 3.11 Εφαρμογή 2 – Πρωτότυπο Εργαλείο Παραγωγής

#### Εξεταζόμενο Υποθετικό Σενάριο

- Φορέας Εφαρμογής: Επαρχιακή βιομηχανία παραγωγής προϊόντων χαρτοπολτού με διαμόρφωση υπό κενό
- Αντικείμενο: Πρωτότυπα εργαλεία διαμόρφωσης υπό κενό (Vacuum forming) για μεσαίου μεγέθους εξάρτημα (3 διαφορετικά σετ)
- Φάση σχεδιασμού: Προχωρημένο στάδιο αναλυτικού σχεδιασμού – Ενδιάμεσο προετοιμασίας μεθόδων και μέσων παραγωγής
- Βασικότερες προτεραιότητες: Τεχνικά άρτια λύση, αποφυγή πολύ υψηλού κόστους, επανακατασκευή τροποποιημένου μόνο σε περίπτωση διαπίστωσης σοβαρών αδυναμιών σχεδιασμού και αποτυχία λειτουργίας του εργαλείου
- Κυριότερες επιδιώξεις: Έλεγχος απόδοσης γεωμετρίας προϊόντος, έλεγχος συναρμολόγησης και κινηματικής συνεργασίας εργαλείων, έλεγχος λειτουργικότητας διαμορφωτικών (καλουπιών), διαπίστωση ασφάλειας χειριστών και παραμέτρων παραγωγής – κατασκευής
- Κατασκευαστικό Περιβάλλον: Διαθεσιμότητα στο φορέα & στοιχειώδης εκπαίδευση σε 3D CAD μόνο, χωρίς επεκτάσεις σε φωτορεαλισμό, εικονική πραγματικότητα. Καμία διαθεσιμότητα και εμπειρία εξοπλισμού ΤΚΠ εντός του φορέα, διαθεσιμότητα μόνο συμβατικών εργαλειομηχανών. Λύσεις 3D CAD με FEA και εργαλειομηχανών CNC υπαρκτές εκτός του φορέα και σε εγγύτητα με αυτόν. Άλλες λύσεις πλήρους PLM περιβάλλοντος και ΤΚΠ πρωτοτυποποίησης δυνατόν να βρεθούν, άλλες στο εγχώριο ελληνικό κατασκευαστικό περιβάλλον αλλά όχι κοντά στο φορέα, και άλλες στο εξωτερικό.
- Δεσμεύσεις: Ο φορέας δεσμεύεται πρωτίστως για στήριξη του τοπικού του κατασκευαστικού περιβάλλοντος (λόγω επιχορηγήσεων) και αφετέρου της εθνικής οικονομίας.

Εξετάζονται ως εναλλακτικές πρωτοτυποποίησης τα κάτωθι:

- Full PLM (3D CAD, FEA, Κινηματικοί-μηχανισμοί, CAM/CAE)
- Συμβατικό πρωτότυπο εργαλείο αφαίρεσης υλικού (συμβατικά φρέζες, τόννοι, δράπανα – Διαθέσιμα εντός του φορέα)
- Πρωτότυπα εργαλεία από CNC μηχανή (Διαθέσιμο εκτός του φορέα σε εγγύτητα με αυτόν)
- Απευθείας Πρωτότυπο εργαλείο ΤΚΕ από ΤΚΠ φωτοπολυμερούς (Περιορισμένα διαθέσιμο στο ευρύτερο κατασκευαστικό περιβάλλον εκτός φορέα)

- Απευθείας Μεταλλικό Πρωτότυπο Εργαλείο ΤΚΕ από ΤΚΠ μεταλλικών υλικών (Διαθέσιμο μόνο στο εξωτερικό)
- Πρωτότυπο ρητινικό εργαλείο ΤΚΕ από αρχέτυπο ΤΚΠ επαγγελματικής κλίμακας (Περιορισμένα διαθέσιμο στο ευρύτερο κατασκευαστικό περιβάλλον εκτός φορέα)

Για τους σκοπούς της Εφαρμογής 2 διατηρείται η συγκροτηθείσα δομή κριτηρίων του δένδρου απόφασης που έχει μοντελοποιηθεί στην Εφαρμογή 1 σε περιβάλλον Expert Choice, σύμφωνα με την προτεινόμενη μεθοδολογία.

Ο γράφων όμως, σε ρόλο ειδικού, ελέγχει και προσαρμόζει πλέον όλες τις βαθμολογίες των εναλλακτικών ως προς τα κριτήρια τελευταίου επιπέδου, με έμφαση στις διοικητικές και λοιπές παραμέτρους, ώστε αυτές να είναι πλέον αντίστοιχες με τις επικρατούσες συνθήκες και δεσμεύσεις του φορέα της Εφαρμογής 2 (Επαρχειακή βιομηχανία).

Στα τεχνικά κριτήρια τελευταίου επιπέδου (ΠΣ), οι βαθμολογίες της διαπιστώσιμότητάς τους από τις εναλλακτικές, ελέγχονται και προσαρμόζονται ώστε να είναι αντίστοιχες πλέον για πρωτότυπο εργαλείο παραγωγής (και όχι κάποιο προϊόν).

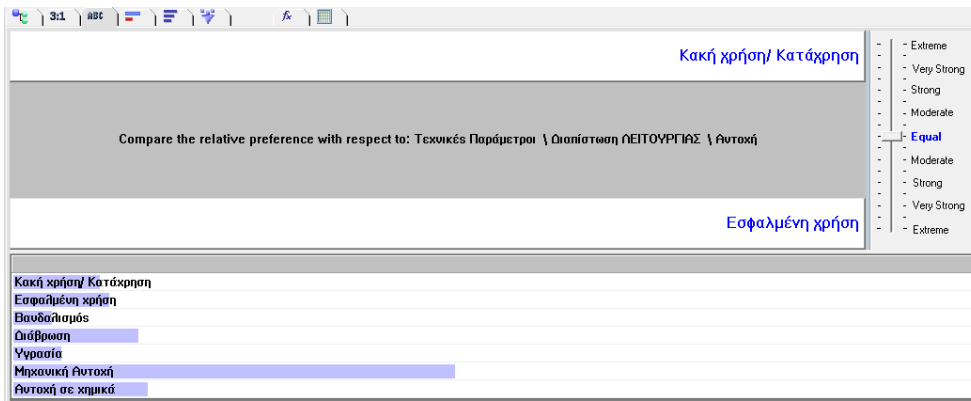
Ένα χαρακτηριστικό απόσπασμα βαθμολογιών των εναλλακτικών για λοιπές παραμέτρους (διαθεσιμότητα, ύπαρξη στο τοπικό και εθνικό βιομηχανικό περιβάλλον) δίνεται στο Σχήμα 3.11.1.

Alternative	Total	Άλλες Παράμετροι ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ Τσιξιάτητα υλικών (L..118 G..002)	Άλλες Παράμετροι ΚΟΙΝΩΝΙΚΟΙ ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ Στήριξη Εθνικής Οικονομίας (L..143 G..010)	Άλλες Παράμετροι ΚΟΙΝΩΝΙΚΟΙ ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ Στήριξη Τοπικής Κοινωνίας/οικονομίας (L..714 G..050)	Άλλες Παράμετροι ΚΟΙΝΩΝΙΚΟΙ ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ Στήριξη επισήρρησης/ομίλου (L..143 G..010)	Διαθεσιμότητα εντός επισήρρησης/ομίλου (L..360 G..060)	Καθέρωση/βιάωση ή της τεχνολογίας/μεθόδου (L..081 G..013)	Υπαρξη/Παρουσία στο τοπικό Βιομηχανικό περιβάλλον (L..399 G..066)	Άλλες Παράμετροι ΔΙΑΘΕΣΙΜΟΤΗΤΑ Υπαρξη στο Εθνικό Βιομηχανικό Περιβάλλον (L..158 G..026)
✓PLM Frame (FULL CAE ANALYSIS)	573	NONE	NOT AFFECTING	SUPPORTING	NOT AFFECTING	AVAILABLE UPON	LIMITED	EXISTS WITHIN	EXISTS
ΕΙΚΟΝΙΚΟ ΠΡΩΤΟΤΥΠΟ (STEREOSCOPIC Desktop)	635	NONE	NOT AFFECTING	SUPPORTING	SUPPORTING	AVAILABLE UPON	SOMEHOW	EXISTS WITHIN	EXISTS
ΕΙΚΟΝΙΚΟ ΠΡΩΤΟΤΥΠΟ (STEREOSCOPIC CAVE)	542	NONE	NOT AFFECTING	SUPPORTING	NOT AFFECTING	AVAILABLE WITH	LIMITED	EXISTS WITHIN	EXISTS
ΕΙΚΟΝΙΚΟ ΠΡΩΤΟΤΥΠΟ με Απτική Ανάδραση (Desktop)	559	NONE	NOT AFFECTING	NOT AFFECTING	NOT AFFECTING	NOT AVAILABLE	LIMITED	EXISTS WITHIN	EXISTS
ΕΙΚΟΝΙΚΟ ΠΡΩΤΟΤΥΠΟ με Απτική Ανάδραση (CAVE)	412	NONE	HARMING	HARMING	HARMING	NOT AVAILABLE	LIMITED	DOES NOT EXIST	DOES NOT EXIST
ΞΕΡΟΠΟΙΗΤΟ ΠΡΩΤΟΤΥΠΟ	488	MIDDLE	SUPPORTING	SUPPORTING	NOT AFFECTING	AVAILABLE WITH	SOMEHOW	EXISTS WITHIN	EXISTS
✓ΣΥΜΒΑΤΙΚΟ ΠΡΩΤΟΤΥΠΟ ΜΕ ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΥΛΙΚΟΥ	580	MIDDLE	SUPPORTING	SUPPORTING	NOT AFFECTING	AVAILABLE UPON	SPREAD WITHIN	EXISTS	EXISTS
✓ΠΡΩΤΟΤΥΠΟ ΜΕ CNC ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΥΛΙΚΟΥ	634	VERY LOW	SUPPORTING	SUPPORTING	SUPPORTING	AVAILABLE UPON	SPREAD WITHIN	EXISTS	EXISTS
ΠΡΩΤΟΤΥΠΟ σε ΕΠΙΤΡΑΠΕΖΙΟ CNC	655	MIDDLE	SUPPORTING	SUPPORTING	CRUCIAL	DIRECTLY	LIMITED	EXISTS	EXISTS
ΤΕΧΝΙΚΟ ΠΡΩΤΟΤΥΠΟ	391	ABOVE AVERAGE	NOT AFFECTING	NOT AFFECTING	NOT AFFECTING	NOT AVAILABLE	LIMITED	EXISTS WITHIN	EXISTS
ΠΡΩΤΟΤΥΠΟ ΤΚΠ ΠΡΟΣΩΠΙΚΟΥ ΕΚΤΥΠΩΤΗ ΓΡΑΦΕΙΟΥ	746	MIDDLE	SUPPORTING	SUPPORTING	SUPPORTING	DIRECTLY	SPREAD WITHIN	EXISTS	EXISTS
✓ΠΡΩΤΟΤΥΠΟ ΤΚΠ ΦΩΤΟΠΟΛΥΜΕΡΟΥΣ	601	ABOVE AVERAGE	NOT AFFECTING	SUPPORTING	HARMING	NOT AVAILABLE	SPREAD WITHIN	EXISTS	EXISTS
ΠΡΩΤΟΤΥΠΟ ΤΚΠ ΚΟΝΙΟΠΟΙΗΜΕΝΟΥ ΥΛΙΚΟΥ	635	MIDDLE	SUPPORTING	SUPPORTING	HARMING	NOT AVAILABLE	SPREAD WITHIN	EXISTS	EXISTS
✓ΜΕΤΑΛΛΙΚΟ ΤΚΠ ΠΡΩΤΟΤΥΠΟ	464	VERY LOW	HARMING	HARMING	HARMING	NOT AVAILABLE	SOMEHOW	DOES NOT EXIST	DOES NOT EXIST
ΠΡΩΤΟΤΥΠΟ ΤΚΠ ΦΥΛΛΟΥ ΥΛΙΚΟΥ	729	VERY LOW	CRUCIAL	SUPPORTING	CRUCIAL	DIRECTLY	SPREAD WITHIN	EXISTS	EXISTS
ΠΡΩΤΟΤΥΠΟ ΤΚΠ ΕΝΑΠΟΘΕΣΗΣ ΥΛΙΚΟΥ	740	MIDDLE	CRUCIAL	SUPPORTING	CRUCIAL	DIRECTLY	SPREAD WITHIN	EXISTS	EXISTS
ΠΛΗΡΗΣ ΠΛΑΜΑ ΠΡΩΤΟΤΥΠΩΝ ΤΚΠ	561	MIDDLE	NOT AFFECTING	NOT AFFECTING	HARMING	AVAILABLE WITH	SPREAD WITHIN	DOES NOT EXIST	DOES NOT EXIST
✓ΤΚΠ σε συνδυασμό με ΤΚΕ	589	ABOVE AVERAGE	NOT AFFECTING	NOT AFFECTING	HARMING	AVAILABLE WITH	SOMEHOW	EXISTS WITHIN	EXISTS

Σχήμα 3.11.1: Απόσπασμα βαθμολογιών εναλλακτικών Εφαρ.2 για λοιπά τελικά κριτήρια

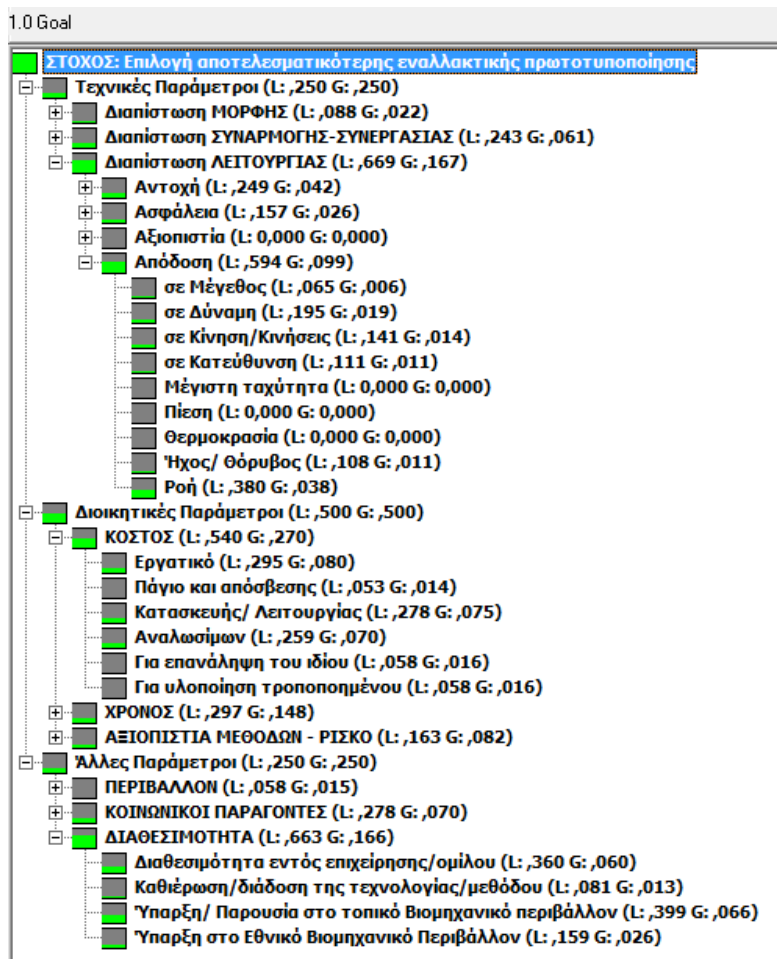
Έχοντας «ενημερώσει» τη «βάση γνώσης» του μοντέλου εφαρμογής της μεθοδολογίας επιλογής κατεύθυνσης πρωτοτυποποίησης με τα δεδομένα του παραδείγματος 2, μπορεί να υλοποιηθεί εκ νέου η «από πάνω προς τα κάτω» απόδοση των βαρυτήτων & προτιμήσεων στους κλάδους του δένδρου απόφασης (evaluation stage). Στις ζευγαρωτές συγκρίσεις, αρμόδιοι ορίζονται τα προϊστάμενα τεχνικά στελέχη της επαρχειακής βιομηχανίας με την υποστήριξη ειδικού (γράφων).

Ενδεικτικά στο Σχήμα 3.11.2 δίνεται το περιβάλλον απόδοσης προτεραιοτήτων για το ΧΣ «Αντοχή» του πρωτοτύπου εργαλείου, με τις αντίστοιχες σε αυτό ΠΣ του Πίνακα 3.5.1.



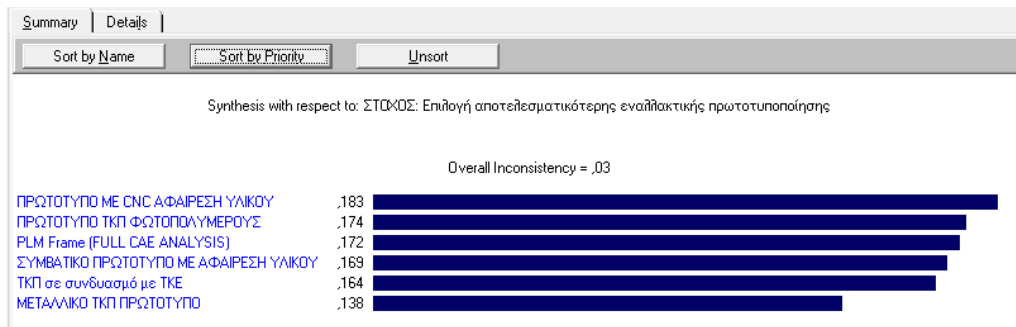
Σχήμα 3.11.2: Κατανομή προτεραιοτήτων κριτηρίου «αντοχή» Εφαρ. 2

Με την ολοκλήρωση της διαδικασίας προκύπτουν οι τοπικές & συνολικές βαρύτητες των κριτηρίων & υποκριτηρίων, που επεκτεταμένες για τους σημαντικότερους κλάδους, δίνονται στο Σχήμα 3.11.3.

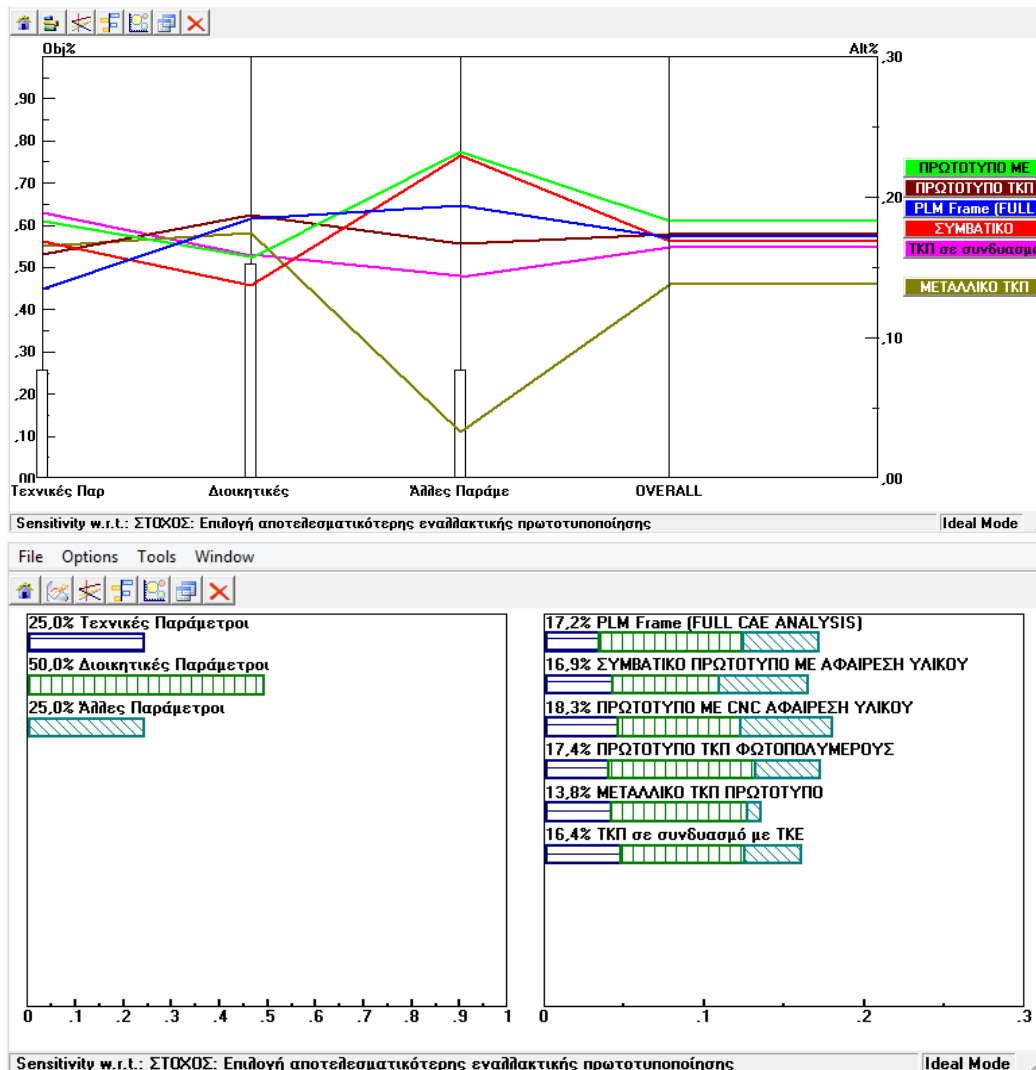


Σχήμα 3.11.3: Οι σημαντικότερες τοπικές και συνολικές βαρύτητες Εφαρ.2

Η τελική σύνθεση βαρυτήτων και βαθμολογιών, δίνει για το καταγεγραμμένο «στιγμιότυπο» αναγκών ελέγχου του φορέα την κατάταξη εναλλακτικών του Σχήματος 3.11.4, που περαιτέρω αναλύεται στα διαγράμματα απόδοσης και συνιστωσών του Σχήματος 3.11.5.



Σχήμα 3.11.4: Κατάταξη εναλλακτικών πρωτοτυποποίησης Εφαρ.2



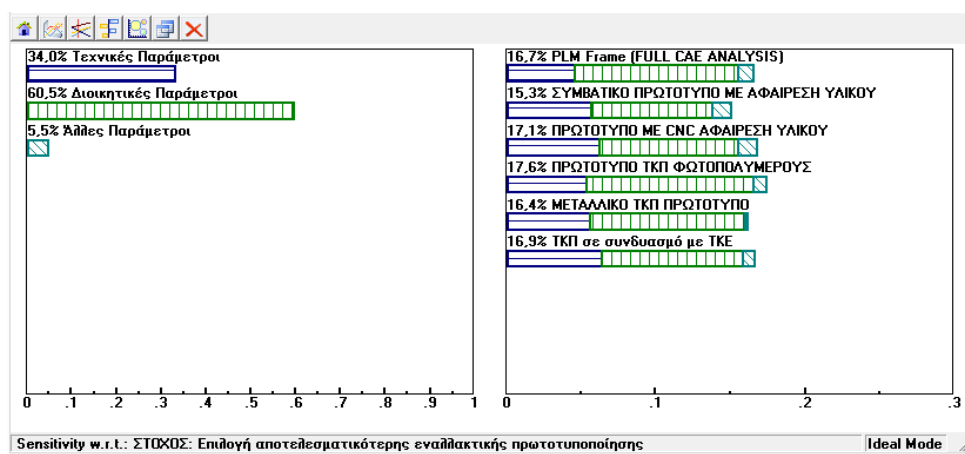
Σχήμα 3.11.5: Διάγραμμα απόδοσης & συνιστωσών αξιολογούμενων λύσεων Εφαρ.2

Βλέπει κανείς με ενδιαφέρον από τα αποτελέσματα και τα διαγράμματα, ότι ως σκοπιμότερη κατεύθυνση για την συγκεκριμένη καταγεγραμμένη ανάγκη, τις δεσμεύσεις και τους περιορισμούς της, δεν προκρίνεται κάποια ΤΚΠ ή ΤΚΕ λύση, αλλά η κατασκευή με CNC στο ευρύτερο κατασκευαστικό περιβάλλον του φορέα.

Το αποτέλεσμα είναι λογικό, καθώς ο φορέας εφαρμογής έχει δώσει μεγάλο βάρος στις διοικητικές παραμέτρους όπου η λύση αυτή έχει μέση απόδοση και επίσης ικανό βάρος στις λοιπές παραμέτρους (κοινωνικές κλπ.) όπου η λύση αυτή (εκ της παρουσίας της στο ευρύτερο περιβάλλον του φορέα) πλεονεκτεί σημαντικά. Αντίθετα

λύση για παράδειγμα απευθείας μεταλλικού ΤΚΠ εργαλείου, που τεχνικά είναι επίσης πολύ ικανή και πλεονεκτεί σε χρόνο, κατατάσσεται πολύ χαμηλά λόγω της πλήρους απουσίας της όχι μόνο από το τοπικό, αλλά και από το εθνικό κατασκευαστικό περιβάλλον.

Ακόμα πιο ενδιαφέρουσα καθίσταται η πλήρης ανατροπή των αποτελεσμάτων υπέρ λύσης ΤΚΠ φωτοπολυμερούς (για απευθείας άμεσο ρητινικό ΤΚΕ εργαλείο παραγωγής), με ανακατανομή μόνο των βασικών προτεραιοτήτων μεταξύ τεχνικών και μη τεχνικών κλάδων ανωτέρου επιπέδου, χωρίς άλλη αλλαγή στις επικρατούσες συνθήκες ή στις λεπτομέρειες του ελέγχου, όπως χαρακτηριστικά δείχνει το Σχήμα 3.11.6.



Σχήμα 3.11.6: Ανατροπή λύσεων με αλλαγή προτεραιοτήτων Εφαρ.2

Παρόμοιες ανακατανομές και εναλλαγές είναι δυνατόν να προκύψουν, αν αλλάξει η διαθεσιμότητα κάποιας από τις τεχνολογίες (π.χ. μεταλλικό ΤΚΠ) στο εθνικό και τοπικό περιβάλλον, οι γενικότερες επιδόσεις κλάσεων συστημάτων ή οι ίδιες οι απαιτήσεις του ελέγχου, δημιουργώντας τελικά πολύ μεγάλο αριθμό πιθανοτήτων και συνδυασμών, που καθιστά προφανή την αξία αφενός ύπαρξης και αφετέρου προσεκτικής εφαρμογής μεθοδολογίας επιλογής κατεύθυνσης πρωτοτυποποίησης, όπως η προτεινόμενη στην παρούσα ΔΔ.





## 4 ΣΥΓΚΡΟΤΗΣΗ ΔΟΜΩΝ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ & ΠΑΡΟΧΩΝ ΤΚΠ

Πέραν της περίπτωσης μιας γενικότερης, στρατηγικού επιπέδου υποστήριξης αποφάσεων πρωτοτυποποίησης, για την οποία στα πλαίσια της παρούσας διατριβής προτείνεται η μεθοδολογία του Κεφαλαίου 3, συχνή είναι και η περίπτωση της ανάγκης άμεσης εξεύρεσης τεχνολογίας, εξοπλισμού και παρόχων υπηρεσιών ΤΚΠ, συμβατών με δεδομένη εφαρμογή σχεδιασμού και ανάπτυξης και ανταποκρινόμενων σε συγκεκριμένες δεσμεύσεις χρόνου, κόστους και λοιπών παραμέτρων που μπορεί να επηρεάζονται ή να επιβάλλονται από το δεδομένο τοπικό κατασκευαστικό περιβάλλον.

Τέτοιες περιπτώσεις μπορούν να προκύψουν:

- Όταν η εφαρμογή της μεθοδολογίας του Κεφαλαίου 3 ξεκάθαρα υποδεικνύει ως βέλτιστη οδό πρωτοτυποποίησης κάποια από τις οικογένειες – κλάσεις τεχνολογιών ΤΚΠ, έναντι λοιπών σύγχρονων εναλλακτικών.
- Όταν για το σχεδιασμό στη δεδομένη στιγμή είναι υποχρεωτική η ύπαρξη φυσικού αντικειμένου (π.χ. Prototype validation), αποκλείοντας την πιθανότητα κάλυψης των αναγκών από κάποιου τύπου «ψηφιακό» πρωτότυπο ή προσομοίωση.
- Όταν ειδικά η χρονική πίεση είναι τέτοια που ισχυρά θα πρέπει να προτιμηθεί λύση πρωτοτυποποίησης από την περιοχή της ΤΚΠ.

### 4.1 Τεχνικά χαρακτηριστικά και παράμετροι επιλογής

Στις περιπτώσεις αυτές θα πρέπει κανείς να μπορεί να ανατρέξει σε μια «δεξαμενή» τεχνολογιών, μηχανών και υλικών ΤΚΠ, αναζητώντας μεταξύ των ικανών για την εφαρμογή του, κάποια που καλύπτοντας πλήρως τις τεχνικές απαιτήσεις του πρωτοτύπου θα παρέχει ταυτόχρονα την επιθυμητή λύση πρωτοτυποποίησης σε ικανοποιητικό χρόνο και κόστος, σύμφωνα με τις προτεραιότητες που για αυτά ή και για άλλα κριτήρια έχουν τεθεί.

Με αυτή τη θεώρηση, στο πρόβλημα αυτό διακρίνονται δύο κύριες φάσεις σε αντιστοιχία με δύο κύριες ομάδες κριτηρίων:

α) Η φάση εύρεσης με βάση τεχνικά χαρακτηριστικά/προδιαγραφές που το πρωτότυπο συγκεντρώνει και το σύστημα ΤΚΠ υποχρεωτικά θα πρέπει να μπορεί να αποδώσει, όπως είναι οι μέγιστες διαστάσεις, η ακρίβεια κρίσιμων διαστάσεων, η ποιότητα επιφάνειας, στοιχεία μηχανικής και θερμικής αντοχής κλπ., και

β) Η φάση φιλτραρίσματος και αξιολόγησης με βάση άλλες παραμέτρους επιλογής μεταξύ των εναλλακτικών, όπως ο συνολικός χρόνος, το συνολικό κόστος, η περιβαλλοντική επιβάρυνση, η εντοπιότητα, εμπειρία και αξιοπιστία του παρόχου κλπ., οι οποίες αφενός μπορεί να τίθενται ως δικλείδες ή ακρότατα όρια, για περαιτέρω συρρίκνωση του αριθμού των τεχνικά προκρινόμενων συστημάτων, αφετέρου στην περίπτωση κάλυψής τους, βαρύνουν την αξιολόγηση με διαφορετικό τρόπο για την επιλογή μιας από τις ικανές λύσεις πρωτοτυποποίησης.

Είναι σαφές ότι, σε αναλογία με τις ΤΠ προϊόντων στις διαδικασίες σχεδιασμού, τα ζητούμενα τεχνικά χαρακτηριστικά που απαιτούνται από το πρωτότυπο θα πρέπει να υπερκαλύπτονται πλήρως από οποιαδήποτε ευρεθείσα ικανή ΤΚΠ (τεχνολογία-μηχανή-πάροχο) πριν αυτή κατόπιν τεθεί σε αξιολόγηση εναλλακτικών λύσεων για την υλοποίηση της διαδικασίας πρωτοτυποποίησης. Πριν δε την ίδια την τελική αξιολόγηση, οι τεχνικά ικανές λύσεις θα πρέπει επίσης να έχουν περαιτέρω «φιλτραρισθεί» με όσες παραμέτρους λειτουργούν μόνες τους ή εν συνδυασμό ως

όρια (πλαφόν) ή αποκλειστικές δικλείδες (διακόπτες on-off). Η ίδια δε η τελική αξιολόγηση τους μπορεί να γίνεται με αναγνωρισμένο και συστηματικό τρόπο, όπως είναι η οδηγία κατά VDI2225, υιοθετώντας ως κριτήρια και πάλι τις παραμέτρους επιλογής μεταξύ των ικανών.

Το ήδη μεγάλο σήμερα και διαρκώς αυξανόμενο πλήθος τεχνολογιών, μηχανών, υλικών και παρόχων ΤΚΠ, με όλα τα επιμέρους τεχνικά δεδομένα που συγκεντρώνουν, καθιστά ιδιαίτερα δύσκολη χωρίς τη βοήθεια κάποιου εργαλείου, πρωτίστως την σε επίπεδο χρήστη ανεύρεση των ικανών ΤΚΠ, και δευτερευόντως την αξιολόγησή τους για την επιλογή της καταλληλότερης. Πρόβλημα δε αποτελούν, τόσο η συχνά ελλιπής γνώση, όσο και η διαφοροποιημένη έκφραση των τεχνικών δεδομένων διαφορετικών συστημάτων, υλικών και τεχνολογιών ΤΚΠ, όπως αυτά δίνονται από κατασκευαστές, αντιπροσώπους, προμηθευτές και παρόχους, όντας μάλιστα πολλές φορές διαφορετικά από αυτά που έχουν διαπιστωθεί και δημοσιοποιηθεί από ακαδημαϊκούς ή ανεξάρτητους μελετητές και ερευνητές.

#### **4.2 Σχεδιασμός & Δόμηση Σχεσιακής Βάσης δεδομένων τεχνολογιών και συστημάτων ΤΚΠ**

Η εφαρμογή των αρχών της οργάνωσης και διαχείρισης πληροφοριών με Σχεσιακές Βάσεις Δεδομένων (ΣΒΔ) μπορεί να συμβάλλει ουσιαστικά στην αποτελεσματική οργάνωση και αξιοποίηση όλων των παραπάνω πηγών δεδομένων ΤΚΠ. Σε συνδυασμό δε με βασισμένα σε ΣΒΔ και κανόνες Συστήματα Υποστήριξης Απόφασης (ΣΥΑ – Rule Based Decision Support Systems) μπορούν να δημιουργηθούν εύχρηστα λογισμικά εργαλεία για την αξιόπιστη επιλογή και συστηματική αξιολόγηση εξοπλισμού ΤΚΠ για πραγματικές εφαρμογές πρωτοτυποποίησης.

Η συγκεκριμένη περιοχή, όπως έχει ανασκοπηθεί και εκτεθεί στην παράγραφο 1.11 της παρούσας, αποτελεί για την ΤΚΠ ενεργό ερευνητικό αντικείμενο.

Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής επιχειρείται να προταθεί μια κατά το δυνατόν πλήρης, λιτή και περιεκτική δομή ΣΒΔ που υιοθετώντας τις επίσημες διαθέσιμες τεχνικές πληροφορίες συστημάτων ΤΚΠ, στοιχεία παρόχων υπηρεσιών ΤΚΠ, αλλά και έγκυρα αποτέλεσμα της έρευνας, θα μπορεί να υποστηρίξει αυτόνομα και μέσω ΣΥΑ τα παρακάτω:

- Την συστηματική και πλήρη καταγραφή παρόχων ΤΚΠ στο ελληνικό περιβάλλον και στην ευρύτερη περιοχή κοντινών χωρών της Ευρώπης (ΕΕ) και Μ.Ανατολής και των διαθέσιμων σε αυτούς συστημάτων και υλικών πρωτοτυποποίησης. Δευτερευόντως την καταγραφή των κατόχων συστημάτων ΤΚΠ στην Ελλάδα, ανεξαρτήτως παροχής σχετικών υπηρεσιών.
- Την ενημέρωση – μη ειδικών – δυνητικών χρηστών τεχνολογιών ΤΚΠ για τις βασικές τεχνολογίες – συναφή συστήματα και τα βασικά χαρακτηριστικά τους, ως ενημερωτικό – εκπαιδευτικό εργαλείο.
- Την εξεύρεση ικανών συστημάτων ΤΚΠ γενικά, σύμφωνα με τις τεχνικές απαιτήσεις της εφαρμογής πρωτοτυποποίησης του χρήστη.
- Την ιεραρχημένη αξιολόγηση τεχνικά ικανών συστημάτων ΤΚΠ και παρόχων τους με κριτήρια το χρόνο, το κόστος, το γεωγραφικό προσδιορισμό τους σε σχέση με τον ενδιαφερόμενο χρήστη και άλλα, με έμφαση στην εξυπηρέτηση του ελληνικού κατασκευαστικού περιβάλλοντος και των ελληνικών ΜΜΕ.

Για την εξυπηρέτηση των παραπάνω σκοπών αρχικά σχεδιάστηκε και δομήθηκε σε περιβάλλον MS Access και κατόπιν μεταφέρθηκε (migration) και αναπτύχθηκε περαιτέρω σε περιβάλλον Oracle Application Express 11G (για λόγους διαδικτυακής πρόσβασης και ανάπτυξης πιλοτικής εφαρμογής διαδικτυακού ΣΥΑ), Σχεσιακή Βάση Δεδομένων ΤΚΠ και πιλοτική διαδικτυακά προσβάσιμη demo εφαρμογή ΣΥΑ ενημέρωσης – εξεύρεσης – αξιολόγησης (για πρωτότυπα μορφής) σχετικών συστημάτων και παρόχων ΤΚΠ.

Τα βασικά χαρακτηριστικά της δομής και λειτουργίας τους παρουσιάζονται συνοπτικά στις επόμενες παραγράφους.

#### 4.2.1 Οντότητες και πεδία χαρακτηριστικών της βάσης

Οι βασικές οντότητες που έπρεπε να υιοθετηθούν για την οργάνωση των απαραίτητων πληροφοριών της βάσης υπό την μορφή Πινάκων, χωρίζονται σε τρεις βασικές ομάδες:

- Κύριοι Πίνακες: Είναι οι Πίνακες με άμεση εννοιολογική συσχέτιση με την ΤΚΠ και τα πρωτότυπα γενικά, στα πεδία των οποίων οργανώνονται όλες οι σχετικές απαραίτητες πληροφορίες, προερχόμενες πρωτογενώς από κατασκευαστές και παρόχους ΤΚΠ και δευτερογενώς από δημοσιευμένα αποτελέσματα έρευνας.
- Δευτερεύοντες και Βοηθητικοί Πίνακες: Είναι Πίνακες οι οποίοι χρησιμοποιούνται στη ΒΔ, είναι όμως γενικότερης εφαρμογής και δεν σχετίζονται απαραίτητα με την ΤΚΠ. Είτε υλοποιήθηκαν εξ αρχής, είτε προέκυψαν από τη διαδικασία απλοποίησης και βελτιστοποίησης της ΒΔ στα πλαίσια της Κανονικοποίησης της προς άρση πλεονασμών και επαναλήψεων (Βλ. και Παράγραφο 1.13).
- Συνδυαστικοί Πίνακες: Προέκυψαν από την ανάλυση Πολλαπλών Σχέσεων μεταξύ Κύριων και Δευτερευόντων/Βοηθητικών πινάκων σε Διμελείς Σχέσεις «Ένα προς Πολλά» (Βλ. και Παράγραφο 1.13).

Οι κύριοι πίνακες που συγκροτούν την προτεινόμενη ΣΒΔ, όπως προέκυψαν μετά την κανονικοποίηση της είναι (σε παρένθεση η ονομασία τους στη βάση):

- Τεχνολογίες ΤΚΠ (RP\_Technologies)
- Φύση Τεχνολογίας ΤΚΠ (RP\_Tech\_Nature)
- Κατασκευαστές Μηχανών & Υλικών ΤΚΠ (Vendors)
- Μηχανές ΤΚΠ (RP\_Machines)
- Κατηγορίες μηχανών ΤΚΠ (RP\_Machine\_Categories)
- Υλικά ΤΚΠ (RP\_Materials)
- Πάροχοι Υπηρεσιών/Κάτοχοι ΤΚΠ (Bureaus)
- Πρωτότυπα (ζητούμενο) (Prototypes)
- Πρωτότυπο – Κρίσιμες Διαστάσεις (Prototipo\_KrisDim)
- Ενδιαφερόμενος/Παραγγέλλον (Users)

Οι δευτερεύοντες και βοηθητικοί πίνακες που περιλαμβάνονται στη ΣΒΔ είναι (σε παρένθεση η ονομασία τους στη βάση):

- Ήπειροι (Continents)
- Χώρες (Countries)
- Διαμερίσματα (για την Ελλάδα) (Regions)
- Νομός (για την Ελλάδα) (Counties)
- Πόλη (για την Ελλάδα) (Towns)
- Φύση Υλικού (Fyseis\_Protis\_Ylis)

- Κατηγορίες Υλικών (Katig\_Ylikon)
- Χρώματα (Colors)
- Διαφάνειες (Diafaneia)
- Ποιότητες IT (IT\_Grades)
- Εύρη Διαστάσεων IT (IT\_Ranges)
- Κατηγορίες Πρωτοτύπων (Katigories\_Prototypon)
- Βαθμολογίες κατά VDI2225 (Grades\_VDI2225)
- Status Τεχνολογίας ΤΚΠ (Techs\_Status)
- Τύπος Κατασκευαστή (Vendor\_Types)
- Χρήσεις Πρωτοτύπων (Xriseis\_Prototypon)
- Τρόποι Μεταφοράς (Transport\_Types)
- Πάγιοι χρόνοι ανταπόκρισης & μεταφοράς (Resp&Deliv\_Times)
- Ενδεικτικά κόστη Μεταφοράς (Trasnp\_Costs)

Οι συνδυαστικοί πίνακες της ΣΒΔ είναι:

- Κατασκευαστές – Τεχνολογίες ΤΚΠ (RP\_Technolog\_Vendors)
- Τεχνολογίες – Κατηγορίες Υλικών ΤΚΠ (RP\_Texnol\_RP\_Kat\_Yl)
- Μηχανές – Υλικά ΤΚΠ (Machines\_Materials)
- Μηχανές – Πάροχοι ΤΚΠ (Bureaus\_Machines)
- Υλικά – Πάροχοι ΤΚΠ (Bureaus\_Materials)
- Πεδία ανοχών IT (Συνδυαστικός Ποιοτήτων – Ευρών διαστάσεων IT), (IT\_Ped\_Anoxon)
- Πίνακας χιλιομετρικών αποστάσεων μεγάλων πόλεων (Ελλάδας) (Apostaseis\_GR)

Η χρήση των πεδίων Πρωτεύοντων Κλειδιών (Primary Keys – ΠΚ) κύριων και δευτερευόντων πινάκων, ως πεδία εξωτερικών ή ξένων κλειδιών (Foreign Keys – ΞΚ) όπως συνηθίζεται να λέγονται σε άλλους κύριους, δευτερεύοντες, αλλά και συνδυαστικούς πίνακες της προτεινόμενης ΣΒΔ, επιτυγχάνει σημαντική βελτιστοποίησή της δομής και λειτουργίας της, προς χάριν της απλότητας έκφρασης και λιτότητας αποθήκευσης των καταγεγραμμένων δεδομένων, της αποφυγής επαναλήψεων και περιττών πλεονασμών και της χρονοβόρας καταχώρησης τους στη βάση. Στα λοιπά πεδία των πινάκων περιέχονται όλα τα δεδομένα και πληροφορίες που άμεσα μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε υπολογισμούς και ελέγχους κατά τη διαδικασία ευρέσεων από τη βάση μέσω ερωτημάτων (κυρίως τα αριθμητικά), αλλά και να εμφανίζονται ως αξιοποιήσιμη πληροφορία σε φόρμες (forms) καταχώρησης και σε οθόνες ή αναφορές παρουσίασης και εμφάνισης αποτελεσμάτων, είτε αυτόνομα στη ΣΒΔ, είτε σε ΣΥΑ με αναφορά στη βάση.

Παρακάτω δίνονται πινακοποιημένα τα πλήρη Πεδία των Κύριων Πινάκων της προτεινόμενης στην παρούσα εργασία ΣΒΔ, η περιγραφή και χρησιμότητά τους για τη ΒΔ και για ενδεχόμενα ΣΥΑ δομημένα επί αυτής.

Πίνακας “RP_Tech_Nature”		
Πεδίο	Μορφή/ Περιγραφή	Ρόλος
Φύση_TKΠ_ID	Αριθμός	PK – Κατατάσσει κάθε διακριτή φύση τεχνολογιών TKΠ ΞK στον πίνακα “RP_Technologies”
Φύση τεχνολογίας	Κείμενο	Περιγραφή της φύσης της τεχνολογίας, ενημερωτικό
Σταθερός ρυθμός κατασκευής?	Λογικό (Y/N)	Πιθανή αξιοποίηση για υπολογισμό χρόνου και κόστους πρωτοτύπου

Πίνακας 4.2.1.1: Πεδία & Περιγραφή Πίνακα “RP\_Tech\_Nature” της ΣΔΒ

Πίνακας “RP_Technologies”		
Πεδίο	Μορφή/ Περιγραφή	Ρόλος
Τεχνολογία_ID	Αριθμός	PK – Κατατάσσει κάθε διακριτή τεχνολογία TKΠ Ως ΞK σε πίνακες “RP_Technol_RP_YI”, “RP_Machines” & RP_Technolog_Vendors”
Ονομασία	Κείμενο	Η ονομασία της τεχνολογίας
Φύση τεχνολογίας	Αριθμός	ΞK – από τον Πίνακα “RP_Tech_Nature”
Χρήση Laser	Λογικό (Y/N)	Ενημερωτικό, πιθανή αξιοποίηση και για αξιολογήσεις βάσει κόστους (συντήρησης) και περιβαλλοντικής προστασίας
Απαιτεί Supports?	Λογικό (Y/N)	Ενημερωτικό
Απαιτεί Supporting Material?	Λογικό (Y/N)	Ενημερωτικό
Απαιτεί μετεπεξεργασία?	Λογικό (Y/N)	Ενημερωτικό, πιθανή αξιοποίηση και για υπολογισμό χρόνου και κόστους πρωτοτύπου
Αποδίδει κλειστές κοιλότητες χωρίς διαίρεση?	Λογικό (Y/N)	Ενημερωτικό και αξιοποίηση για εύρεση βάσει γεωμετρικών χαρακτηριστικών πρωτοτύπου
Status τεχνολογίας	Αριθμός	Ενημερωτικό, ΞK από τον Πίνακα “Techs_Status”
Διατίθεται εμπορικά?	Λογικό (Y/N)	Ενημερωτικό
Εξελίσσεται?	Λογικό (Y/N)	Ενημερωτικό
Χρονολογία εμφάνισης	Αριθμός (Έτος)	Ενημερωτικό, πιθανή αξιοποίηση και για αξιολογήσεις βάσει αξιοπιστίας κατασκευαστή
Μορφή πρώτης ύλης	Αριθμός	ΞK – από τον Πίνακα “Fyseis_Protis_Ylis”
Σχήμα λειτουργίας	Object – Image	Ενημερωτικό, Σχηματική αναπαράσταση της αρχής λειτουργίας της τεχνολογίας

Πίνακας 4.2.1.2: Πεδία & Περιγραφή Πίνακα “RP\_Technologies” της ΣΔΒ

Πίνακας “Vendors”		
Πεδίο	Μορφή/ Περιγραφή	Ρόλος
Κατασκευαστής_ID	Αριθμός	PK – Κατατάσσει κάθε κατασκευαστή τεχνολογιών και υλικών TKΠ (και μη) ΞK στους πίνακες “RP_Technologies_Vendors”, “RP_Machines” & “RP_Materials”
Τύπος Κατασκευαστή	Αριθμός	ΞK – από τον Πίνακα “Vendor_Types”
Εμπορικό Όνομα	Κείμενο	Ενημερωτικό
Χώρα προέλευσης	Αριθμός	ΞK – από τον Πίνακα “Countries”
Αντιπρόσωπος Ελλάδας	Κείμενο	Ενημερωτικό
Αντιπρόσωπος ΕΕ	Κείμενο	Ενημερωτικό
Ιστοσελίδα αντιπρ.Ελλ.	Κείμενο	Ενημερωτικό

Πίνακας 4.2.1.3: Πεδία & Περιγραφή Πίνακα “Vendors” της ΣΔΒ

Πίνακας “RP_Machines”		
Πεδίο	Μορφή/ Περιγραφή	Ρόλος
Μηχανή_ID	Αριθμός	ΠΚ – Κατατάσσει κάθε μηχανή ΤΚΠ ΞΚ στους πίνακες “Machines_Materials” & “Bureaus_Machines”
Εμπορική σήμερα	Λογικό (Y/N)	Ενημερωτικό
Κατασκευαστής	Αριθμός	ΞΚ – από τον Πίνακα “Vendors”
Τεχνολογία	Αριθμός	ΞΚ – από τον Πίνακα “RP_Technologies”
Κατηγορία Μηχανής	Αριθμός	ΞΚ – από τον Πίνακα “RP_Machine_Categories”
Όνομα (μοντέλο) μηχανής	Κείμενο	Ενημερωτικό
Χρονολογία εμφάνισης	Αριθμός (Έτος)	Ενημερωτικό, πιθανή αξιοποίηση για αξιολογήσεις βάσει αξιοπιστίας μηχανής
Τιμή	Νόμισμα	Ενημερωτικό, πιθανή αξιοποίηση για υπολογισμό χρόνου και κόστους πρωτοτύπου (απόσβεση)
Μέγιστο X	Αριθμός	Τεχνικό χαρακτηριστικό, για εύρεση βάσει διαστάσεων πρωτοτύπου
Μέγιστο Y	Αριθμός	-//-
Μέγιστο Z	Αριθμός	-//-
Ελάχιστο επιτεύξιμο πάχος τοιχώματος (mm)	Αριθμός	Τεχνικό χαρακτηριστικό, αξιοποίηση για εύρεση βάσει επιθυμητών γεωμετρικών χαρακτηριστικών πρωτοτύπου
Διάσταση ελάχιστου αποδιδόμενου μορφ/κού στοιχείου (mm)	Αριθμός	Τεχνικό χαρακτηριστικό, αξιοποίηση για εύρεση βάσει επιθυμητών γεωμετρικών χαρακτηριστικών πρωτοτύπου
Αυτόματη αφαίρεση supports?	Λογικό (Y/N)	Ενημερωτικό, πιθανή αξιοποίηση για υπολογισμό χρόνου και κόστους πρωτοτύπου
Απευθείας Στεγανό Πρωτότυπο?	Λογικό (Y/N)	Τεχνικό χαρακτηριστικό, αξιοποίηση για εύρεση βάσει επιθυμητής στεγανότητας πρωτοτύπου
Τυπικός ρυθμός κατασκευής	Αριθμός	Τεχνικό χαρακτηριστικό, αξιοποίηση για υπολογισμό χρόνου και κόστους πρωτοτύπου
Σταθερό πάχος στρώσης?	Λογικό (Y/N)	Ενημερωτικό , πιθανή αξιοποίηση για υπολογισμό χρόνου και κόστους πρωτοτύπου
Ελάχιστο πάχος στρώσης	Αριθμός	Ενημερωτικό , πιθανή αξιοποίηση για υπολογισμό χρόνου και κόστους πρωτοτύπου
Τυπικό πάχος στρώσης	Αριθμός	Ενημερωτικό , αξιοποίηση για υπολογισμό χρόνου και κόστους πρωτοτύπου
IT Grade μηχανής	Αριθμός	Τεχνικό χαρακτηριστικό (από κατασκευαστές ή αποτελέσματα έρευνας), αξιοποίηση για εύρεση βάσει επιθυμητής ακρίβειας πρωτοτύπου (μέσω κρίσιμων διαστάσεων) ΞΚ από Πίνακα “IT_Grades”
Τυπική Ποιότητα Επιφάνειας (Τραχύτητα Ra)	Αριθμός	Τεχνικό χαρακτηριστικό (από κατασκευαστές ή αποτελέσματα έρευνας), αξιοποίηση για εύρεση βάσει επιθυμητής ποιότητας επιφάνειας πρωτοτύπου
Περισσότερα από ένα κύρια υλικά ταυτόχρονα?	Λογικό (Y/N)	Τεχνικό χαρακτηριστικό, αξιοποίηση για εύρεση βάσει επιθυμητών χαρακτηριστικών πρωτοτύπου (Multimaterial)
Πολυχρωματισμός πρωτοτύπου?	Λογικό (Y/N)	Τεχνικό χαρακτηριστικό, αξιοποίηση για εύρεση βάσει επιθυμητού απευθείας χρωματισμού πρωτοτύπου
Ισχύς (KWatt)	Αριθμός	Τεχνικό χαρακτηριστικό, πιθανή αξιοποίηση για υπολογισμό ενεργειακής κατανάλωσης και αξιολόγηση βάσει περιβαλλοντικής επιβάρυνσης

Πίνακας 4.2.1.4: Πεδία & Περιγραφή Πίνακα “RP\_Machines” της ΣΔΒ

Πίνακας “RP_Machine_Categories”		
Πεδίο	Μορφή/ Περιγραφή	Ρόλος
Κατηγορία_Μηχανής_ID	Αριθμός	ΠΚ – Κατατάσσει κάθε κατηγορία μηχανών ΤΚΠ ΞΚ στον πίνακα “RP_Machines”
Κατηγορία	Κείμενο	Ενημερωτικό
Εύρος τιμής	Κείμενο	Ενημερωτικό

Πίνακας 4.2.1.5: Πεδία & Περιγραφή Πίνακα “RP\_Machine\_Categories” της ΣΔΒ

Πίνακας “RP_Materials”		
Πεδίο	Μορφή/ Περιγραφή	Ρόλος
Υλικό ΤΚΠ_ID	Αριθμός	ΠΚ – Κατατάσσει κάθε υλικό ΤΚΠ ΞΚ στους πίνακες “Machines_Materials”, “RP_Techol_RP_YI” & “Bureaus_Materials”
Κατηγορία Υλικού	Αριθμός	ΞΚ από τον Πίνακα “Katig_Ylikon”, Πιθανή αξιοποίηση για απευθείας εύρεση μηχανών ΤΚΠ βάσει επιθυμητού υλικού πρωτοτύπου.
Κατασκευαστής	Αριθμός	ΞΚ – από τον Πίνακα “Vendors”
Μοντέλο	Κείμενο	Ενημερωτικό
Αντοχή εφελκυσμού (Μρα κατά ASTM D638)	Αριθμός	Τεχνικό χαρακτηριστικό (από κατασκευαστές ή αποτελέσματα έρευνας), αξιοποίηση για εύρεση βάσει επιθυμητής αντοχής εφελκυσμού επιφάνειας πρωτοτύπου (Πολύ κοινό ζητούμενο)
Μέτρο Ελαστικότητας (Μρα)	Αριθμός	Τεχνικό χαρακτηριστικό (από κατασκευαστές ή αποτελέσματα έρευνας), αξιοποίηση για εύρεση βάσει επιθυμητής ελαστικότητας πρωτοτύπου
Επιμήκυνση Θραύσης (% κατά ASTM D638)	Αριθμός	Τεχνικό χαρακτηριστικό (από κατασκευαστές ή αποτελέσματα έρευνας), αξιοποίηση για εύρεση βάσει επιθυμητής συμπεριφοράς πρωτοτύπου
Αντοχή σε κάμψη (Μρα κατά ASTM D2240)	Αριθμός	Τεχνικό χαρακτηριστικό (από κατασκευαστές ή αποτελέσματα έρευνας), αξιοποίηση για εύρεση βάσει επιθυμητής αντοχής πρωτοτύπου σε κάμψη (Πολύ κοινό ζητούμενο)
Θερμοκρασία υαλοποίησης/τήξης (Glass Transition Temperature/Melting Point, °C)	Αριθμός	Τεχνικό χαρακτηριστικό (από κατασκευαστές ή αποτελέσματα έρευνας), αξιοποίηση για εύρεση βάσει επιθυμητής αντοχής/συμπεριφοράς πρωτοτύπου σε θερμοκρασιακές συνθήκες χρήσης του. Προτιμάται σε σχέση με το μέγεθος Θερμοκρασίας Απόκρουσης Θερμότητας (Heat Deflection Temperature) κατά ASTM D648, ως μονοσήμαντο, ίδιας τάξεως μεγέθους και πιο εφαρμόσιμο.
Δυσθραυστότητα (Notched Izod Impact, J/m, κατά ASTM D256)	Αριθμός	Τεχνικό χαρακτηριστικό (από κατασκευαστές ή αποτελέσματα έρευνας), αξιοποίηση για εύρεση βάσει επιθυμητής συμπεριφοράς πρωτοτύπου σε κρούσεις
Σκληρότητα (Rockwell ή Shore D, κατά ASTM D2240)	Αριθμός	Τεχνικό χαρακτηριστικό (από κατασκευαστές ή αποτελέσματα έρευνας), αξιοποίηση για εύρεση βάσει επιθυμητής σκληρότητας πρωτοτύπου
Βαθμός χημικής αντοχής – αντιδραστικότητας (Ποιοτική βαθμολογία από την κλίμακα του VDI225)	Αριθμός	Ποιοτική βαθμολογία, μπορεί να εξαχθεί από φύλλα χημικής αντοχής υλικών (chemical resistance charts) και τα φύλλα ασφαλείας του υλικού (Material Safety Data Sheets), πιθανή αξιοποίηση για εύρεση και αξιολόγηση βάσει επιθυμητής χημικής αντοχής και αντιδραστικότητας του πρωτοτύπου
Χρώμα	Αριθμός	ΞΚ – από τον Πίνακα “Colors”, περιλαμβάνει βασικά χρώματα και αξιοποιείται για εύρεση βάσει επιθυμητού χρώματος πρωτοτύπων
Διαφάνεια	Αριθμός	ΞΚ – από τον Πίνακα “Diafaneia” και αξιοποιείται για εύρεση βάσει επιθυμητής διαφάνειας πρωτοτύπων

Πίνακας “RP_Materials” (Συνέχεια)		
Πυκνότητα (Specific gravity)	Αριθμός	Τεχνικό χαρακτηριστικό πιθανή αξιοποίηση για εύρεση βάσει επιθυμητού/ανώτατου βάρους πρωτοτύπου (μέσω του όγκου του)
Αγωγιμότητα	Λογικό (Y/N)	Χαρακτηρίζει το υλικό ως αγωγίμο ή μονωτή, αξιοποίηση για εύρεση βάσει επιθυμητής αγωγιμότητας πρωτοτύπου
Επαναχρησιμοποιείται?	Λογικό (Y/N)	Ενημερωτικό, πιθανή αξιοποίηση για αξιολόγηση βάσει βαθμού επαναχρησιμοποίησης υλικών – περιβαλλοντικής επιβάρυνσης
Μονάδα ανάλωσης (m, cm <sup>3</sup> )	Κείμενο	Ενημερωτικό, βοηθητικό υπολογισμών κόστους
Ελάχιστη ποσότητα διάθεσης/παραγγελίας	Αριθμός	Ενημερωτικό – οικονομικό, αξιοποίηση για υπολογισμό κόστους υλικού πρωτοτύπων
Κόστος Ελάχιστης Ποσότητας	Νόμισμα	Ενημερωτικό– οικονομικό, αξιοποίηση για υπολογισμό κόστους πρωτοτύπων και αξιολόγησης βάσει κόστους.
Βαθμός Τοξικότητας & Φιλικότητας προς το περιβάλλον (Ποιοτική βαθμολογία από την κλίμακα του VDI2225)	Αριθμός	Ποιοτική βαθμολογία, μπορεί να εξαχθεί από τα φύλλα ασφαλείας του υλικού (Material Safety Data Sheets). Ενημερωτικό του βαθμού προστασίας, υγιεινής και ασφάλειας χρηστών και πιθανή αξιοποίηση για εύρεση και αξιολόγηση βάσει επιθυμητής περιβαλλοντικής επιβάρυνσης/ προστασίας.
Βαθμός ανακυκλωσιμότητας (Ποιοτική βαθμολογία από την κλίμακα του VDI2225)	Αριθμός	Ποιοτική βαθμολογία, μπορεί να εξαχθεί από τα φύλλα ασφαλείας του υλικού (Material Safety Data Sheets). Ενημερωτικό και αξιολόγηση βάσει επιθυμητής περιβαλλοντικής επιβάρυνσης/ προστασίας.
Χρόνος αποθήκευσης σφραγισμένο (Μήνες)	Αριθμός	Ενημερωτικό, πιθανή αξιοποίηση για προγραμματισμό αποθεμάτων παρόχων υπηρεσιών ΤΚΠ
Χρόνος αποθήκευσης Ανοικτό (Μήνες)	Αριθμός	Ενημερωτικό, πιθανή αξιοποίηση για προγραμματισμό ομαδοποίησης κατασκευών χρηστών και παρόχων υπηρεσιών

Πίνακας 4.2.1.6: Πεδία & Περιγραφή Πίνακα “RP\_Materials” της ΣΔΒ



Πίνακας “Bureaus”		
Πεδίο	Μορφή/ Περιγραφή	Ρόλος
Πάροχος/Κάτοχος_ID	Αριθμός	ΠΚ – Κατατάσσει κάθε πάροχο ή κάτοχο μηχανών ΤΚΠ ΞΚ στους πίνακες “Bureaus_Machines” & “Bureaus_Materials”
Όνομασία	Κείμενο	Η επωνυμία του παρόχου/ κατόχου
Παρέχει Υπηρεσίες?	Λογικό (Υ/Ν)	Ενημερωτικό, αξιοποίηση για εύρεση ικανών μηχανών σε παρόχους και μετέπειτα αξιολόγηση βάσει γεωγραφικού προσδιορισμού τους
Περιγραφή	Κείμενο	Ενημερωτικό, σύντομη περιγραφή του παρόχου/ κατόχου
Χώρα παρόχου/κατόχου	Αριθμός	ΞΚ – από Πίνακα “Countries”, αξιοποίηση για εύρεση και αξιολόγηση βάσει γεωγραφικού προσδιορισμού του ενδιαφερομένου σε σχέση με τον πάροχο
Πόλη (για Ελλάδα)	Αριθμός	ΞΚ – από Πίνακα “Towns”(έμμεση διασύνδεση με “Counties” & “Regions”), αξιοποίηση για αξιολόγηση βάσει γεωγραφικού προσδιορισμού / εντοπιότητας
Διεύθυνση	Κείμενο	Ενημερωτικό
Εκπρόσωπος	Κείμενο	Ενημερωτικό
Τηλεφωνο	Κείμενο	Ενημερωτικό
E-Mail	Κείμενο	Ενημερωτικό
Δικτυακός Τόπος	Κείμενο	Ενημερωτικό
Έτος ίδρυσης	Αριθμός (Έτος)	Ενημερωτικό, πιθανή αξιοποίηση για αξιολογήσεις βάσει εμπειρίας και αξιοπιστίας παρόχου
Συντελεστής κέρδους	Αριθμός	Οικονομικό, αξιοποίηση για τον προσδιορισμό του πραγματικού κόστους πρωτοτύπου (βάσει υπολογισμών του καθαρού του κόστους από πεδία άλλων πινάκων) και για μετέπειτα αξιολόγηση.

Πίνακας 4.2.1.7: Πεδία & Περιγραφή Πίνακα “Bureaus” της ΣΔΒ

Πίνακας “Prototypes”		
Πεδίο	Μορφή/ Περιγραφή	Ρόλος
Prototypro_ID	Αριθμός	ΠΚ – Κατατάσσει κάθε καταχωρημένη περίπτωση ανάγκης πρωτοτυποποίησης από χρήστες για εύρεση & αξιολόγηση από τη ΣΒΔ ΞΚ στον πίνακα “Prototypro_KrisDim”
Ενδιαφερόμενος	Αριθμός	ΞΚ – από τον Πίνακα “Users”
Ονομασία	Κείμενο	Ενημερωτικό
Κατηγορία πρωτοτύπου	Αριθμός	ΞΚ – από τον Πίνακα “Katigories_Prototipon”, ενημερωτικό, αξιοποίηση για ενεργοποίηση άλλων πεδίων και πιθανή αξιοποίηση για απευθείας εύρεση από κατηγορία επιθυμητού πρωτοτύπου
Σκοπούμενη χρήση	Αριθμός	ΞΚ – από τον Πίνακα “Χriseis_Prototipon”, ενημερωτικό, πιθανή αξιοποίηση για απευθείας εύρεση από επιθυμητή χρήση πρωτοτύπου
Ποσότητα N	Αριθμός	Αξιοποίηση για υπολογισμό συνολικού χρόνου και κόστους και φιλτράρισμα έναντι δεσμευτικών τιμών.
Δεσμευτικός χρόνος (μέρες)	Αριθμός	Δεσμευτική παράμετρος, αξιοποίηση για εύρεση-φιλτράρισμα και αξιολόγηση ικανών συστημάτων & παρόχων
Δεσμευτικός κόστος (ΕΥΡΩ)	Νόμισμα	Οικονομική παράμετρος, αξιοποίηση για εύρεση-φιλτράρισμα και αξιολόγηση ικανών συστημάτων & παρόχων
Κλειστές κοιλότητες	Λογικό (Y/N)	Τεχνικό χαρακτηριστικό, αξιοποίηση για εύρεση ικανών συστημάτων (με ή χωρίς διαίρεση) και υπολογισμό χρόνων κατασκευής (κατά περίπτωση)
Αποδεκτή διαίρεση/συγκόλληση	Λογικό (Y/N)	Ενημερωτικό & τεχνικό, επηρεάζει ως παράμετρος το παραπάνω πεδίο στην εύρεση
Πολύχρωμο?	Λογικό (Y/N)	Τεχνικό χαρακτηριστικό, αξιοποίηση για εύρεση ικανών συστημάτων
Βασικό χρώμα	Αριθμός	ΞΚ – από τον Πίνακα “Colors”, τεχνικό, αξιοποίηση για απευθείας εύρεση από επιθυμητό χρώμα πρωτοτύπου
Βαφή αποδεκτή	Λογικό (Y/N)	Τεχνικό χαρακτηριστικό, αξιοποίηση για εύρεση ικανών συστημάτων και υπολογισμούς χρόνου - κόστους
Διαφάνεια	Αριθμός	ΞΚ – από τον Πίνακα “Diafaneia”, τεχνικό, αξιοποίηση για απευθείας εύρεση από επιθυμητή διαφάνεια πρωτοτύπου
Διάσταση X	Αριθμός	Τεχνικό χαρακτηριστικό, αξιοποίηση για εύρεση ικανών συστημάτων (με ή χωρίς διαίρεση) και υπολογισμό χρόνων κατασκευής (κατά περίπτωση)
Διάσταση Y	Αριθμός	-//-
Διάσταση Z	Αριθμός	-//-
Ελάχιστο πάχος	Αριθμός	Τεχνικό χαρακτηριστικό, αξιοποίηση για εύρεση ικανών συστημάτων βάσει ελάχιστου πάχους
Διάσταση ελάχιστου μορφολογικού στοιχείου	Αριθμός	Τεχνικό χαρακτηριστικό, αξιοποίηση για εύρεση ικανών συστημάτων βάσει ελάχιστου μορφολογικού στοιχείου
Επιφάνεια	Αριθμός	Τεχνικό χαρακτηριστικό, αξιοποίηση για υπολογισμό χρόνων κατασκευής (κατά περίπτωση)
Όγκος	Αριθμός	Τεχνικό χαρακτηριστικό, αξιοποίηση για υπολογισμό χρόνων κατασκευής (κατά περίπτωση) και κόστους υλικών
Κατηγορία Υλικού	Αριθμός	ΞΚ – από τον Πίνακα “Katig_Ylikon”, αξιοποίηση για απευθείας εύρεση & φιλτράρισμα συστημάτων βάσει υλικών τους έναντι επιθυμητής κατηγορίας υλικού πρωτοτύπου
Υλικό	Αριθμός	ΞΚ – από τον Πίνακα “Ylika”, πιθανή αξιοποίηση για απευθείας εύρεση και φιλτράρισμα ικανών συστημάτων βάσει συγκεκριμένου επιθυμητού υλικού πρωτοτύπου

Πίνακας “Prototypes” (Συνέχεια)		
Επιθυμητή Τυπική Ποιοτητα Επιφ. (Ra)	Αριθμός	Τεχνικό χαρακτηριστικό, αξιοποίηση για εύρεση-φιλτράρισμα ικανών συστημάτων
Δεσμευτική κλάση ακρίβειας IT	Αριθμός	Τεχνικό χαρακτηριστικό, αξιοποίηση για εύρεση-φιλτράρισμα ικανών συστημάτων. Εσωτερική μεταβλητή της ΒΔ, ΔΕΝ το εισάγει ο χρήστης, προκύπτει υπολογιστικά μέσω του Πίνακα “Prototyro_KrisDim” ως η ελάχιστη τιμή IT Grade για τις καταχωρημένες κρίσιμες διαστάσεις του πρωτοτύπου
Αντοχή εφελκυσμού	Αριθμός	Τεχνικό χαρακτηριστικό, αξιοποίηση για εύρεση-φιλτράρισμα ικανών συστημάτων βάσει υλικού. Σε αναλογία με τις τιμές και μονάδες του Πίνακα “RP_Materials”
Μέτρο Ελαστικότητας	Αριθμός	-//-
Επιμήκυνση Θραύσης	Αριθμός	-//-
Αντοχή κάμψης	Αριθμός	-//-
Δυσθραυστότητα	Αριθμός	-//-
Σκληρότητα	Αριθμός	-//-
Δυσμενέστερη Θερ/σία Χρήσης	Αριθμός	-//-
Επιθ. Αγωγιμότητα?	Λογικό (Y/N)	-//-
Επιθ.Βαθμός Χημικής Αντοχής	Αριθμός	Τεχνικό χαρακτηριστικό ποιοτικής κλίμακας, αξιοποίηση για φιλτράρισμα ικανών συστημάτων βάσει αντιδραστικότητας – χημικής αντοχής.
Επιθ.Βαθμός Ανακυκλωσιμότητας	Αριθμός	Τεχνικό χαρακτηριστικό ποιοτικής κλίμακας, αξιοποίηση για φιλτράρισμα και αξιολόγηση ικανών συστημάτων βάσει ανακυκλωσιμότητας πρωτοτύπου – περιβαλλοντικής προστασίας
Χώρα υλοποίησης	Αριθμός	ΞΚ – από Πίνακα “Countries”, αξιοποίηση για φιλτράρισμα συστημάτων & παρόχων βάσει επιθυμιών & δεσμεύσεων χώρας υλοποίησης
Διαμέρισμα υλοποίησης (για Ελλάδα)	Αριθμός	ΞΚ – από Πίνακα “Regions”, αξιοποίηση για φιλτράρισμα συστημάτων & παρόχων βάσει επιθυμιών & δεσμεύσεων γεωγραφικού διαμερισματος υλοποίησης
Νομός υλοποίησης (για Ελλάδα)	Αριθμός	ΞΚ – από Πίνακα “Regions”, αξιοποίηση για φιλτράρισμα συστημάτων & παρόχων βάσει επιθυμιών & δεσμεύσεων Νομού υλοποίησης
Πόλη υλοποίησης (για Ελλάδα)	Αριθμός	ΞΚ – από Πίνακα “Regions”, αξιοποίηση για φιλτράρισμα συστημάτων & παρόχων βάσει επιθυμιών & δεσμεύσεων Πόλης υλοποίησης

Πίνακας 4.2.1.8: Πεδία & Περιγραφή Πίνακα “Prototypes” της ΣΔΒ

Πίνακας “Prototyro_KrisDim”		
Πεδίο	Μορφή/ Περιγραφή	Ρόλος
Prototyro_Krisimi_ID	Αριθμός	ΠΚ – Κατατάσσει κάθε καταχωρημένη περίπτωση κρίσιμης διάστασης επί συγκεκριμένου πρωτοτύπου του Πίνακα “Prototypes” για τον προσδιορισμό του πεδίου της δεσμευτικής κλάσης ακρίβειας IT του τελευταίου
Πρωτότυπο	Αριθμός	ΞΚ – από τον Πίνακα “ Prototypes ”
Ονομαστική τιμή (mm)	Αριθμός	Τεχνικό χαρακτηριστικό, εισάγεται από τον χρήστη , χρησιμοποιείται ως μεταβλητή προσδιορισμού
Πεδίο Ανοχής (μm)	Αριθμός	-//-
IT Grade διάστασης	Αριθμός	Μεταβλητή ευρεθείσα με τη βοήθεια του πίνακα “IT_Ped_Anoxon”. Χρησιμεύει για τον προσδιορισμό του πεδίου της δεσμευτικής κλάσης ακρίβειας IT καταχωρήσεων του Πίνακα “Prototypes”

Πίνακας 4.2.1.9: Πεδία & Περιγραφή Πίνακα “Prototyro\_KrisDim” της ΣΔΒ

Πίνακας “Users”		
Πεδίο	Μορφή/ Περιγραφή	Ρόλος
User_ID	Αριθμός	PK – Κατατάσσει κάθε καταχωρημένη περίπτωση ατόμου ή φορέα που αποκτά πρόσβαση στη ΒΔ ή σε ΣΥΑ με αναφορά στη ΒΔ. Χρησιμοποιείται στην απόδοση σχετικών δικαιωμάτων.
Επωνυμία	Κείμενο	Ενημερωτικό (ιδιώτης, ελ.επαγγελματίας, βιοτεχνία, βιομηχανία, ΑΕΙ, Δημόσιο, κλπ.)
Χώρα	Αριθμός	ΞΚ – από Πίνακα “Countries
Διεύθυνση	Κείμενο	Ενημερωτικό
Πόλη	Αριθμός	ΞΚ – από Πίνακα “Towns”, Αξιοποίηση για υπολογισμούς συνολικού χρόνου & κόστους και αξιολόγηση, χρόνου, κόστους, εντοπιότητας
Εκπρόσωπος	Κείμενο	Ενημερωτικό
Τηλεφωνο	Κείμενο	Ενημερωτικό
E-Mail	Κείμενο	Ενημερωτικό
Δικτυακός Τόπος	Κείμενο	Ενημερωτικό

Πίνακας 4.2.1.10: Πεδία & Περιγραφή Πίνακα “Users” της ΣΔΒ

Τα πεδία των δευτερευόντων και βοηθητικών πινάκων της προτεινόμενης ΣΒΔ, είναι στην πλειοψηφία τους τα συνήθη που μπορούν να ευρεθούν για παρόμοιους πίνακες γενικά σε ΒΔ και λογισμικές εφαρμογές ΒΔ. Για την οικονομία του κειμένου, στον ακόλουθο συγκεντρωτικό πίνακα δευτερευόντων και βοηθητικών πινάκων δίδονται για καθέναν σύντομη περιγραφή και τα τυχόν ιδιαίτερα πεδία που τους εμπλουτίζουν στην προτεινόμενη ΣΒΔ.

Πεδία δευτερευόντων και βοηθητικών πινάκων	
Πίνακας	Περιγραφή – Ιδιαίτερα πεδία
Continents	Πίνακας με πεδίο των ηπείρων για κατάταξη χωρών
Countries	Πίνακας με πεδίο χωρών, ιδιαίτερο λογικό πεδίο μέλους ΕΕ. ΞΚ από ηπείρους
Regions	Για Ελλάδα, πεδίο τα ελληνικά γεωγραφικά διαμερίσματα
Counties	Για Ελλάδα, πεδίο οι Νομοί, ιδιαίτερο λογικό πεδίο για τις νησιωτικές περιοχές. ΞΚ από τα γεωγραφικά διαμερίσματα
Towns	Για Ελλάδα, πεδίο οι πόλεις/δήμοι, ΞΚ οι Νομοί
Fyseis_Protis_Ylis	Πίνακας με πεδίο κατάταξης πρώτων υλών ΤΚΠ σε υγρές, κονιοποιημένες, στερεά φύλλα και τήγματα πρώτης ύλης
Katig_Ylikon	Πίνακας με πεδίο κατάταξης βασικών κατηγοριών πρώτων υλών σε πολυμερή, πλαστικά, μεταλλικά, κεραμικά κλπ. υλικά.
Ylika	Πίνακας με βασικά υλικά, με τα μηχανικά και άλλα χαρακτηριστικά τους που μπορούν να ευρεθούν από βιβλιοθήκες. Ενδεχόμενη αξιοποίηση για απευθείας απόδοση επιθυμητού υλικού πρωτοτύπου.
Colors	Πίνακας με πεδίο κατάταξης βασικών χρωμάτων. Περιλαμβάνει ως χρώμα και την επιλογή «οποιοδήποτε/αδιάφορο»
Diafaneia	Πίνακας με πεδίο κατάταξης επιπέδων διαφάνειας. Περιλαμβάνει διαφανή, ημιδιάφανα, αδιάφανα.
IT_Grades	Πίνακας με πεδίο τις κλάσεις ακρίβειας IT κατά ISO 286
IT_Ranges	Πίνακας με πεδίο τα εύρη διαστάσεων για τις κλάσεις ακρίβειας IT κατά ISO 286
Katigories_Prototypon	Πίνακας με πεδίο κατάταξης για τις κατηγορίες πρωτοτύπων κατά VDI 3404. Το πεδίο αυτό ως ΞΚ στον Πίνακα “Prototypes” καθορίζει τις «ενεργές» επιλογές καταχώρησης ζητούμενων χαρακτηριστικών στις φόρμες των καταχωρήσεων του τελευταίου.
Grades_VDI2225	Πίνακας με πεδίο την πενταβάθμια ποιοτική κλίμακα βαθμολόγησης (0 έως 4) κατά VDI2225
Techs_Status	Πίνακας με πεδίο το status τεχνολογιών ΤΚΠ (εμπορική, ερευνητική, μόνο ως υπηρεσία, ιστορική). ΞΚ στον Πίνακα “RP technologies”

Πεδία δευτερευόντων και βοηθητικών πινάκων (Συνέχεια)	
Πίνακας	Περιγραφή – Ιδιαίτερα πεδία
Vendor_Types	Πίνακας με λογικά πεδία κατάταξης κατασκευαστών σε κατασκευαστές μηχανών ΤΚΠ, υλικών ΤΚΠ, εξοπλισμού ΤΚΕ, υλικών ΤΚΕ, μηχανών CNC και μηχανών Desktop CNC. ΞΚ στον Πίνακα “Vendors”
Xriseis_Prototypon	Πίνακας με πεδίο τις πιθανές επιθυμητές χρήσεις των καταχωρήσεων (πρωτότυπων) του Πίνακα “Prototypes”, στον οποίο είναι ΞΚ
Transport_Types	Πίνακας με πεδίο τους πιθανούς τρόπους μεταφοράς πρωτοτύπων από πάροχο σε παραγγέλλοντα (οδικώς, ακτοπλοϊκώς, αεροπορικώς), αναλόγως γεωγραφικού προσδιορισμού τους.
Resp&Deliv_Times	Πίνακας με πεδίο το συνολικό χρόνο απόκρισης και μεταφοράς πρωτοτύπων από πάροχο σε παραγγέλλοντα αναλόγως γεωγραφικού προσδιορισμού και τρόπου μεταφοράς
Transp_Costs	Πίνακας με πεδίο τυπικές τιμές ταχυμεταφοράς δεμάτων έως 1kg αναλόγως προορισμού και απόστασης.

Πίνακας 4.2.1.11: Πεδία των δευτερευόντων και βοηθητικών πινάκων της ΣΔΒ

Όσον αφορά τέλος τους συνδυαστικούς πίνακες της προτεινόμενης ΣΒΔ, οι περισσότεροι από αυτούς είναι τεχνικά απαραίτητα στοιχεία της βάσης για την υλοποίηση σχέσεων «πολλά προς πολλά» μεταξύ κύριων πινάκων.

Σε αυτούς, ΠΚ είναι ο συνδυασμός των δύο ΠΚ από τους σχετικούς κύριους πίνακες, που συμμετέχουν στον συνδυαστικό ως ΞΚ (Π.χ. Πίνακες “RP\_Technolog\_Vendors” & “Machines\_Materials”). Ορισμένοι μάλιστα από αυτούς εμπλουτίζονται και με επιπλέον πεδία που αφορούν τέτοιους μονοσήμαντους συνδυασμούς, όπως π.χ. το πεδίο «Ωριαίας χρέωσης μηχανής» του Πίνακα “Bureaus\_Machines”, που μπορεί να διαφέρει για την ίδια μηχανή μεταξύ διαφορετικών παρόχων.

Ως περίπτωση σχέσης «πολλά προς πολλά» επίσης κατεξοχήν χαρακτηρίζονται και τα πεδία ανοχών ανά Κατηγορία ΙΤ και εύρος διαστάσεων, κατά το πρότυπο ISO286. Αυτά, για τις ανάγκες της ΣΒΔ, καταχωρούνται σε επιπλέον πεδίο του συνδυαστικού Πίνακα “IT\_Ped\_Anoxon” με τη συμμετοχή των ΠΚ από τους Πίνακες “IT\_Grades” και “IT\_Ranges”. Τέλος συνδυαστικός πίνακας, αλλά τυποποιημένος και γενικής χρήσης είναι και ο πίνακας χιλιομετρικών αποστάσεων μεταξύ ελληνικών πόλεων, που μπορεί να χρησιμοποιείται για προσδιορισμό τρόπου μεταφοράς, χρόνου και κόστους πρωτοτύπων από πάροχο σε παραγγέλλοντα στο προγραμματιστικό σκέλος ΣΥΑ με αναφορά στη ΣΒΔ.

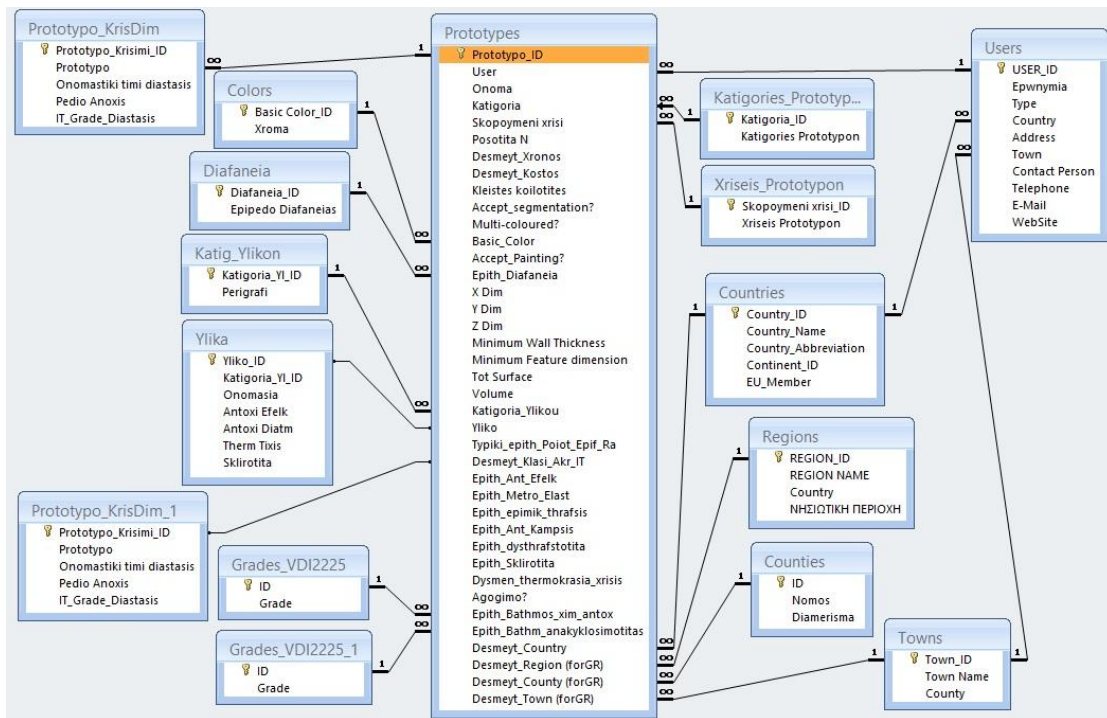
#### 4.2.2 Δομή της βάσης – Σχέσεις και διασύνδεση Πινάκων

Μετά τον ορισμό και την πλήρη συγκρότηση των κανονικοποιημένων πινάκων της, η ΣΒΔ για ΤΚΠ, στην προτεινόμενη δομή της, απαρτίζεται από δέκα (10) κύριους, είκοσι (20) δευτερευόντες και βοηθητικούς και επτά (7) συνδυαστικούς πίνακες, όλους σχετιζόμενους μεταξύ τους.

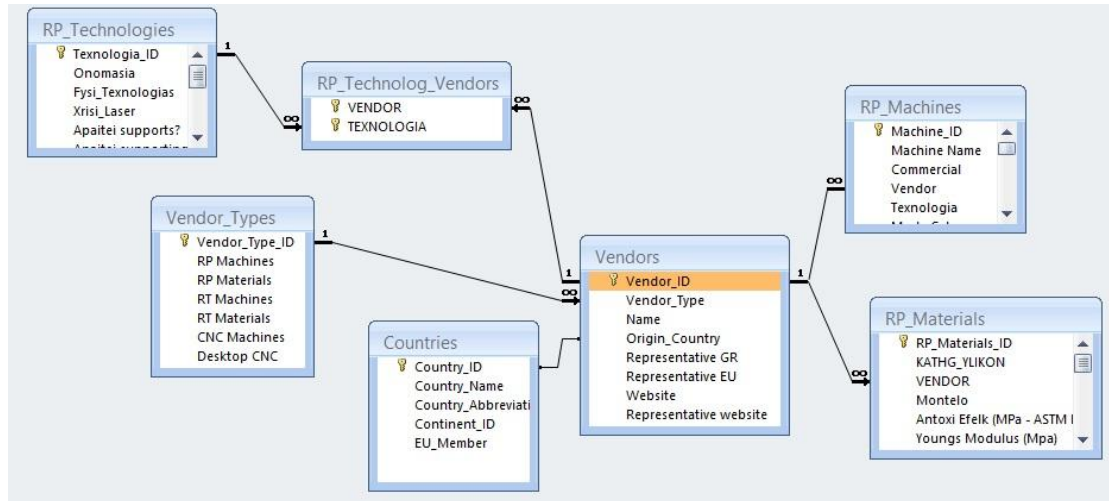
Με τη δομή αυτή και σύμφωνα με τις αρχές λειτουργίας των πληροφοριακών συστημάτων ΣΒΔ, είναι δυνατόν να συγκροτηθούν ερωτήματα (queries) και να ευρεθούν με αποτελεσματικότητα, καταχωρημένες στη βάση τεχνολογίες, συστήματα, υλικά και πάροχοι ΤΚΠ, για κάθε σχεδόν απαίτηση πρωτοτυποποίησης που ο εκάστοτε ενδιαφερόμενος/ δυνητικός χρήστης θα περιγράψει στον πίνακα «Πρωτότυπα».

Η διαδικασία της συγκρότησης των ερωτημάτων προς της ΒΔ και κατά συνεπαγωγή της εύρεσης των αποτελεσμάτων, ακολουθεί την «αλυσίδα» της διασύνδεσης των πινάκων της, μέσω των μεταξύ τους σχέσεων. Οι σχέσεις αυτές προκύπτουν για τον αναγνώστη από τη μελέτη των Πινάκων της παραγράφου 4.2.1 δια των ΞΚ που περιγράφονται σε αυτούς για κάθε οντότητα-πίνακα. Για την καλύτερη και πληρέστερη όμως κατανόηση τους, αλλά και του συνόλου των διασυνδέσεων εντός

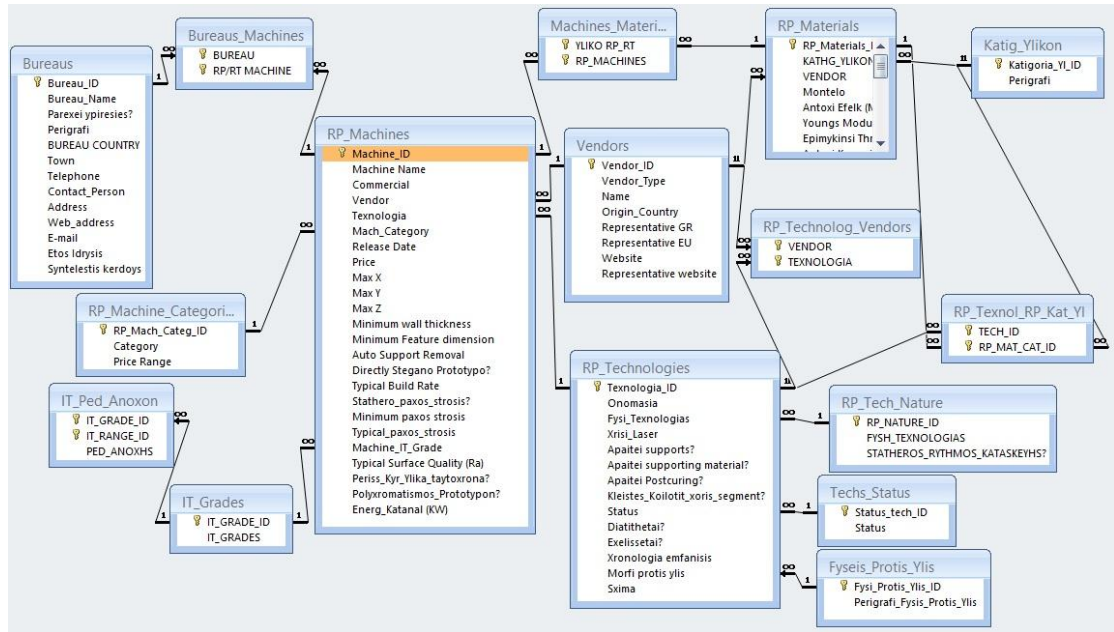
της βάσης, θα παρατεθούν σχηματικά παρακάτω τα σημαντικότερα διαγράμματα διασύνδεσης βασικών πινάκων της ΣΒΔ.



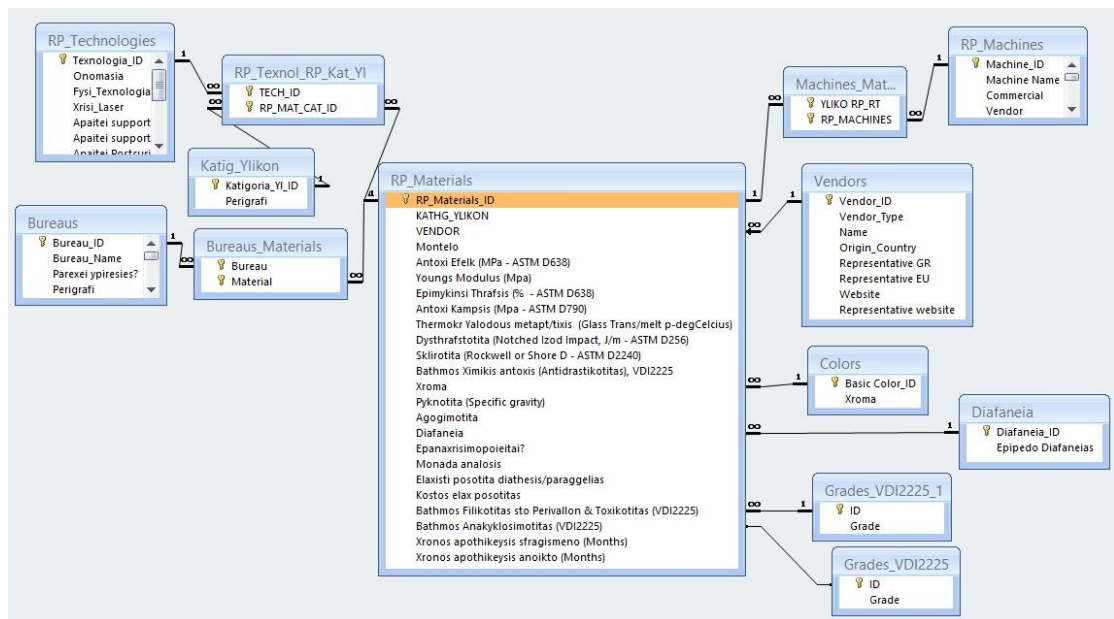
Σχήμα 4.2.2.1: Σχέσεις του Πίνακα «Πρωτότυπα»



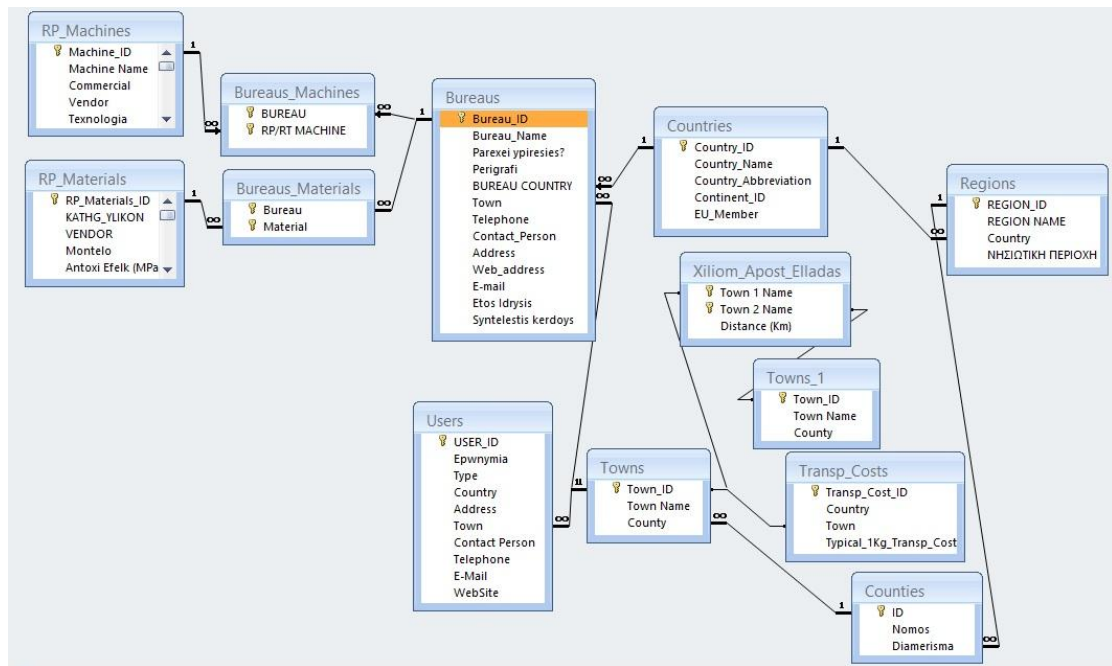
Σχήμα 4.2.2.2: Σχέσεις του Πίνακα «Κατασκευαστές Μηχανών & Υλικών ΤΚΠ»



Σχήμα 4.2.2.3: Σχέσεις των Πινάκων «Μηχανές ΤΚΠ» & «Τεχνολογίες ΤΚΠ»



Σχήμα 4.2.2.4: Σχέσεις του Πίνακα «Υλικά ΤΚΠ»



Σχήμα 4.2.2.4: Σχέσεις του Πίνακα «Πάροχοι Υπηρεσιών/ Κάτοχοι ΤΚΠ»

### 4.2.3 Εγκυρότητα τιμών – Έλεγχοι και «στοιχεία γνώσης» – Επίπεδα πρόσβασης και δικαιωμάτων χρήσης

Οι πίνακες της αναπτυχθείσας βάσης δεδομένων, όπως έχει ήδη δειχθεί, περιέχουν ποικίλα πεδία διαφορετικής φύσης (ακέραιους, φυσικούς & πραγματικούς αριθμούς, κείμενα, εικόνες, λογικές τιμές 0-1, κλπ.). Κάποια από αυτά εμφανίζονται σε φόρμες και αναφορές της βάσης προς το χρήστη, όντας ορατά από αυτόν. Κάποια άλλα δε, λειτουργούν ως εσωτερικές παράμετροι και μεταβλητές της ΣΒΔ και κατ'επέκταση εφαρμογών ΣΥΑ, για τη διενέργεια υπολογισμών, την υλοποίηση ερωταποκρίσεων (queries) και γενικά για την εξυπηρέτηση σκοπών και στόχων ΣΥΑ που είναι δυνατόν να δομηθούν επί της βάσης, όπως το πιλοτικό που περιγράφεται σε επόμενη παράγραφο.

Για την αποφυγή εσφαλμένων καταχωρήσεων από πλευράς του χρήστη, ή αδυναμίας μετέπειτα εκτέλεσης υπολογισμών σε κανόνες και τύπους, σε πολλά από αυτά τα πεδία επιβάλλονται λογικά ή συνήθη όρια διακύμανσης των τιμών των μεγεθών που καταχωρούν και σχετικοί έλεγχοι εγκυρότητας τους, ήδη κατά την καταχώρηση των τιμών αυτών στις σχετικές φόρμες εισαγωγής τους. Έτσι για παράδειγμα για τον Πίνακα Μηχανών ΤΚΠ, στα πεδία ωφέλιμων διαστάσεων X, Y, Z γίνονται δεκτές μόνο θετικές τιμές. Επίσης σε πεδία τα οποία έχουν ορισθεί ως αριθμητικά, είναι αδύνατον να καταχωρηθούν χαρακτήρες κειμένου.

Πεδία πινάκων της ΒΔ τα οποία δεν εμφανίζονται σε καμία φόρμα εισαγωγής και σε καμία ορατή από το χρήστη αναφορά, είναι επίσης δυνατόν να υπάρχουν και να περιέχουν δεδομένα τα οποία όμως έχουν προκύψει από «εσωτερικούς» της βάσης/εφαρμογής υπολογισμούς και καταχωρήσεις, βασιζόμενους σε τιμές του ίδιου ή και άλλων πινάκων που ο χρήστης έχει τροφοδοτήσει. Τέτοια πεδία και οι τιμές τους για συγκεκριμένες καταχωρήσεις, αποτελούν ειδικά «στοιχεία γνώσης» της ΒΔ που αξιοποιούνται άμεσα σε ΣΥΑ και συνακόλουθες αξιολογήσεις, όπως το πιλοτικό



που αναπτύχθηκε στην παρούσα. Παράδειγμα τέτοιας τιμής αποτελεί το πεδίο *IT\_Grade* του πίνακα *Πρωτότυπο*, στον οποίο ενώ ο χρήστης σε άλλα πεδία καταχωρεί την ονομαστική διάσταση και την επιθυμητή ανοχή των κρίσιμων διαστάσεων του ζητούμενου πρωτοτύπου, στο μη ορατό στον τελικό χρήστη πεδίο *IT\_Grade* υπολογίζεται και καταχωρείται η δυσμενέστερη ποιότητα IT για το εξεταζόμενο πρωτότυπο, με τη βοήθεια των Πινάκων *Ποιότητες IT*, *Εύρη Διαστάσεων IT* και *Πεδία ανοχών IT*. Η τιμή του *IT\_Grade* του Πίνακα *Πρωτότυπο* μπορεί να χρησιμοποιηθεί εν συνεχεία (μαζί με άλλα πεδία) άμεσα ως τιμή ερωτήματος για την εξεύρεση μηχανής με ικανές επιδόσεις ακρίβειας στην απόδοση κρίσιμων διαστάσεων.

Τέλος, με γνώμονα την υλοποίηση της βάσης και τη συμπλήρωση της με δεδομένα και σε περιβάλλον Διαδικτυακής λειτουργίας και πρόσβασης, προδιαγράφονται για αυτή διαφορετικά επίπεδα πρόσβασης και δικαιωμάτων. Ανάλογα με τα επίπεδα αυτά ο εκάστοτε χρήστης με διαδικτυακή πρόσβαση στη ΣΒΔ, θα μπορεί να καταχωρεί ή τροποποιεί δεδομένα σε αυτή, μόνο στους Πίνακες και τα πεδία που του επιτρέπει το επίπεδο πρόσβασης και δικαιωμάτων του.

Ο παρακάτω Πίνακας 4.2.3.1 συνοψίζει τα ορισμένα για την προτεινόμενη ΣΒΔ επίπεδα πρόσβασης και τα δικαιώματά τους.

<b>Επίπεδο πρόσβασης</b>	<b>Δικαιώματα</b>
Διαχειριστής	Καθολικός έλεγχος στη δόμηση και την καταχώρηση ΟΛΩΝ των Πινάκων της βάσης και των πεδίων τους
Εξουσιοδοτημένος Ειδικός ΤΚΠ	Καταχώρηση σε όλα τα πεδία πινάκων Τεχνολογιών, Κατασκευαστών, Μηχανών, Υλικών ΤΚΠ (Περιλαμβάνεται ο χαρακτηρισμός <i>IT_Grade</i> μηχανών και λοιποί ποιοτικοί χαρακτηρισμοί σε πεδία που χρήστες σε χαμηλότερα επίπεδα δεν δικαιούνται να καταχωρούν)
Κατασκευαστής/Αντιπρόσωπος ΤΚΠ	Με συγκεκριμένο <i>Vendor_ID</i> από τον Πίνακα "Vendors". Καταχώρηση νέων οίκων, τεχνολογιών που προσφέρει ο οίκος, νέων μηχανών, νέων υλικών και των πεδίων τους, πλην πεδίων αξιολογουμένων από ανωτέρου επιπέδου χρήστες.
Πάροχος Υπηρεσιών/ Κάτοχος	Συγκεκριμένο <i>Bureau_ID</i> από τον Πίνακα "Bureaus". Καταχωρεί/τροποποιεί τιμές πεδίων μόνο στον συγκεκριμένο πίνακα και επιλέγει μηχανές και υλικά που διαθέτει από τα ήδη καταχωρημένα, στους συνδυαστικούς πίνακες "Bureaus_Machines" & "Bureaus_Materials" για το δικό του <i>Bureau_ID</i> . Καταχωρεί επίσης ωριαίες χρεώσεις (άνευ υλικού) των μηχανών που διαθέτει.
Ενδιαφερόμενος/Παραγγέλων	Συγκεκριμένο <i>User_ID</i> του Πίνακα "Users". Καταχωρεί πεδία μόνο στον Πίνακα "Users" και ολοκληρωμένες καταχωρήσεις στους Πίνακες "Prototypes" και "Prototypo_KrisDim".
Guest User	Όπως ο «Ενδιαφερόμενος/Παραγγέλων», αλλά χωρίς <i>User_ID</i> και χωρίς δικαιώματα αποθήκευσης καταχωρήσεων. Μπορεί μόνο να επισκοπεί τη βάση ενημερωτικά.

Πίνακας 4.2.3.1: Επίπεδα πρόσβασης και δικαιώματα στην προτεινόμενη ΣΒΔ

### 4.3 Σχεδιασμός & ανάπτυξη ΣΥΑ με αναφορά στην προτεινόμενη ΣΒΔ – Μερική πιλοτική υλοποίηση και λειτουργία του ΣΥΑ

Αν και η προτεινόμενη ΣΒΔ συγκεντρώνει ικανοποιητικά τις προϋποθέσεις αποτελεσματικής καταχώρησης και οργάνωσης πληροφοριών και δεδομένων για ΤΚΠ, πολλά από τα οποία μάλιστα μπορεί να διαχειρίζεται και να παρουσιάζει αυτόνομα, η ουσιαστική αξιοποίησή της μπορεί πραγματικά να προκύψει σε πολλαπλάσιο βαθμό, μέσω εφαρμογών ΣΥΑ που αντλούν δεδομένα και παραμέτρους από την ίδια τη βάση. Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής σχεδιάστηκε και εν μέρει πιλοτικά υλοποιήθηκε σε μορφή demo εφαρμογή ΣΥΑ ενημέρωσης – εύρεσης – αξιολόγησης συστημάτων και παρόχων ΤΚΠ, για την κάλυψη αναγκών πρωτοτυποποίησης από χρήστες του ελληνικού κατασκευαστικού περιβάλλοντος. Βασικές αρχές και στοιχεία για αυτό παρατίθενται παρακάτω.

#### 4.3.1 Αρχιτεκτονική Συστήματος

Η προτεινόμενη εφαρμογή είναι ένα Σύστημα Υποστήριξης Αποφάσεων (ΣΥΑ) που θα απευθύνεται σε όσο το δυνατό μεγαλύτερο αριθμό χρηστών. Έτσι, προς εκμετάλλευση των δυνατοτήτων του διαδικτύου και των υπηρεσιών που αυτό προσφέρει, ως καλύτερη λύση θεωρήθηκε ο σχεδιασμός της εφαρμογής ως διαδικτυακής, βασισμένης στην αρχιτεκτονική τριών (3) επιπέδων (3-tier). Με τη χρήση αρχιτεκτονικής τριών (3) επιπέδων επιτυγχάνονται σχετικά με την ανάπτυξη της εφαρμογής, στο παρόν στάδιο αλλά και για την πλήρη μελλοντική της εξέλιξη (με πιθανές εμπορικές προεκτάσεις), τα παρακάτω τρία (3) βασικά ζητούμενα:

- Καλύτερος έλεγχος του κώδικα → **Ευελιξία**
- Ευκολία προσαρμογής νέων λειτουργιών, βιβλιοθηκών και νέων υπηρεσιών → **Επεκτασιμότητα**
- Ευκολία προσαρμογής και συνεργασία υπαρχόντων προγραμμάτων που να συνεργάζονται με την υφιστάμενη εφαρμογή → **Διαλειτουργικότητα**.

Ο ορισμός της αρχιτεκτονικής τριών (3) επιπέδων διαχωρίζει για τις εφαρμογές λογισμικού τα τρία (3) παρακάτω βασικά επίπεδα:

1. Επίπεδο δεδομένων (Database)
2. Επίπεδο λειτουργιών
3. Επίπεδο διεπαφής και παρουσίασης (Interface)

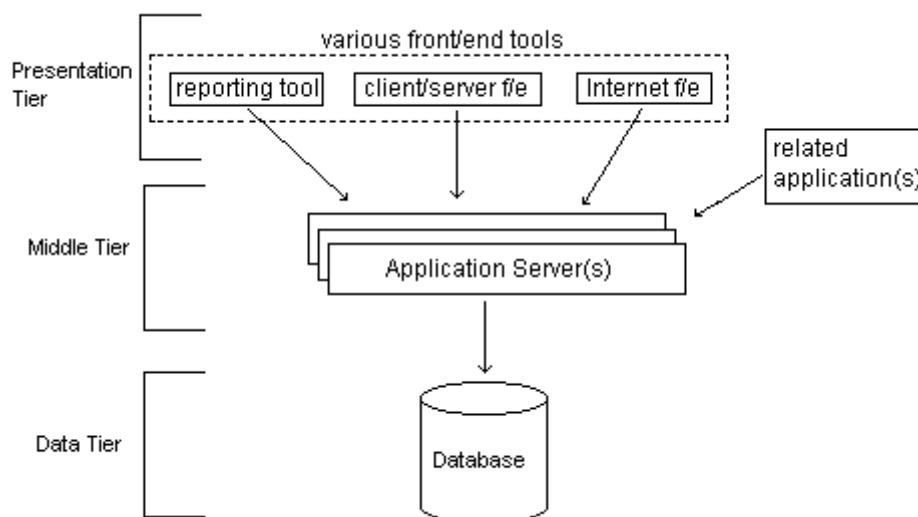
**Στο επίπεδο δεδομένων** τοποθετείται η βάση δεδομένων στην οποία αποθηκεύονται με συγκεκριμένους κανόνες όλα τα δεδομένα που λαμβάνονται από το επίπεδο παρουσίασης μέσω του επιπέδου λειτουργιών. Για την περίπτωση του προτεινόμενου ΣΥΑ, η ΣΒΔ της Παραγράφου 4.2.

**Στο επίπεδο λειτουργιών** υλοποιούνται όλες οι συναρτήσεις οι οποίες αποτελούν τον βασικό πυρήνα λειτουργίας του συστήματος. Αναπτύσσονται με κώδικα οι συναρτήσεις λήψης και αποστολής δεδομένων και ερωτημάτων στη βάση δεδομένων αλλά και οι συναρτήσεις λήψης και αποστολής δεδομένων στο επίπεδο παρουσίασης.

**Στο επίπεδο παρουσίασης** υλοποιούνται όλα τα στοιχεία του προγράμματος τα οποία λαμβάνει και βλέπει άμεσα ο τελικός χρήστης. Μπορεί να ονομαστεί και επίπεδο Διεπαφής (GUI), καθώς είναι το επίπεδο παρουσίασης της εφαρμογής προς

τον τελικό χρήστη και το μέσο επικοινωνίας και αλληλεπίδρασης της εφαρμογής με αυτόν.

Η αρχιτεκτονική τριών επιπέδων (3-tier) περιγράφεται διαγραμματικά στο Σχήμα 4.3.1.1:



Σχήμα 4.3.1.1: Αρχιτεκτονική τριών επιπέδων

### 4.3.2 Εργαλεία υλοποίησης του συστήματος

Για τις ανάγκες της παρούσας ΔΔ, το ΣΥΑ υλοποιήθηκε πιλοτικά εν μέρει για την περίπτωση εξεύρεσης και αξιολόγησης με κριτήρια συστημάτων και παρόχων ΤΚΠ, για κάλυψη αναγκών υλοποίησης πρωτοτύπων μορφής.

Αν και η περίπτωση αυτή είναι μερική, αφενός υπερκαλύπτει σε επίπεδο υλοποίησης την απλή εύρεση ικανών συστημάτων ΤΚΠ, αφού επιπρόσθετα εφαρμόζει αλγορίθμους (procedures & functions) και για αξιολόγηση των ικανών συστημάτων και παρόχων (η οποία μάλιστα γίνεται κατά VDI2225), και αφετέρου σε επίπεδο τρόπου υλοποίησης, εσωτερικής λειτουργίας και μηχανισμών της εφαρμογής δεν διαφέρει ουσιαστικά από την εύρεση και αξιολόγηση και άλλων κατηγοριών πρωτοτύπων (γεωμετρικών, λειτουργικών, πρωτότυπων εργαλείων) που απλώς υλοποιούνται με περισσότερες μεταβλητές εύρεσης (στα functions & procedures) ή και με περισσότερα κριτήρια στην τελική αξιολόγηση.

Το σύστημα πιλοτικά υλοποιήθηκε με τα εξής εργαλεία και τεχνολογίες:

Σύστημα Διαχείρισης Βάσεων Δεδομένων (ΣΔΒΔ - DBMS):

Oracle 11g Express Edition

Πλαίσιο ανάπτυξης εφαρμογών λογισμικού (Framework):

Oracle Application Express 4.2 Framework

Αξιοποιούμενες Τεχνολογίες:

Pure HTML, Javascript, PL/SQL, AJAX(Asynchronous JavaScript and XML) και CSS(Cascading Style Sheets).

Η βασική δομή της ΣΒΔ ΤΚΠ δημιουργήθηκε σε MS Access, μετεφέρθη όμως (migration) για την περαιτέρω ανάπτυξη και υλοποίηση της εφαρμογής ΣΥΑ σε

Oracle 11g Express Edition. Αξίζει να σημειωθεί ότι το ΣΔΒΔ Oracle 11g Express Edition δεν απαιτεί άδεια χρήσης για την χρησιμοποίησή του. Ουσιαστικά είναι μια προσαρμογή της αντίστοιχης εμπορικής έκδοσης του οίκου ORACLE, με περιορισμένο μέγεθος αρχείων αποθήκευσης στα 4 Gb, που είναι αρκετό για την πλήρη λειτουργία της αναπτυχθείσας στην παρούσα ΔΔ εφαρμογής ΣΥΑ.

Η βάση δεδομένων του ΣΥΑ, ως σχήμα για την εφαρμογή, ονομάζεται RP (TKΠ) και αποτελείται από τους 37 Πίνακες (tables) της Παραγράφου 4.2.1 και τρία (3) «πακέτα» (packages) όπως ονομάζονται, που περιλαμβάνουν συναρτήσεις (functions) και διαδικασίες (procedures).

Οι συγκεκριμένες συναρτήσεις χρησιμοποιούνται για την εξαγωγή αποτελεσμάτων εκτελώντας αλγόριθμους υπολογισμών, με βάση συγκεκριμένα κριτήρια που ορίζει ο χρήστης, είτε δυναμικά μέσω της διεπαφής, είτε σταθερά μέσω πεδίων των πινάκων της βάσης που λειτουργούν ως μεταβλητές.

Αντίστοιχα οι διαδικασίες χρησιμοποιούνται για την εισαγωγή δεδομένων στην ΣΒΔ, για την αποστολή δεδομένων στο επίπεδο παρουσίασης (interface), καθώς και για την εκτέλεση ροών μεταξύ των δομικών στοιχείων της βάσης.

### **4.3.3 Γενικά στοιχεία σχεδιασμού Διεπαφής (Interface) ΣΥΑ**

Η εφαρμογή ΣΥΑ γενικά στοχεύθηκε να αναφέρεται και να αφορά κυρίως χρήστες του διαδικτύου. Γι' αυτό το ΣΥΑ έπρεπε να είναι σχεδιασμένο για χρήση μέσω φυλλομετρητή (Internet browser). Βασική επιλογή στον σχεδιασμό της διεπαφής (GUI) του ήταν να υλοποιηθεί σε μια γλώσσα προγραμματισμού που να δίνει τη δυνατότητα καλής απόδοσης, να έχει άμεση σχέση με Βάσεις Δεδομένων, να έχει ενσωματωμένες βιβλιοθήκες και να παρέχει αντικειμενοστραφή (object oriented) υποστήριξη.

Με βάση τα πιο πάνω κριτήρια επιλέχθηκε η χρήση του Framework της Oracle Application Express 4.2 σε συνδυασμό με HTML, AJAX και Javascript για το σχεδιασμό της διεπαφής, με υποστήριξη μέσω του Apache Web Server.

Η διεπαφή για το αναπτυχθέν ΣΥΑ σχεδιάστηκε να απεικονίζει ένα βασικό περιβάλλον που να επιτρέπει στο χρήστη να επιλέξει αρχικά την σκοπούμενη ενέργεια – κεντρική λειτουργία της εφαρμογής, μεταξύ των παρακάτω:

- Ενημέρωση περί τεχνολογιών & Συστημάτων TKΠ
- Εύρεση ικανών συστημάτων και παρόχων TKΠ γενικά
- Εύρεση ικανών συστημάτων και παρόχων TKΠ και αξιολόγηση τους με κριτήρια (Η περίπτωση που υλοποιήθηκε πιλοτικά προς επίδειξη – demo, για πρωτότυπα μορφής)

Κατόπιν, αναλόγως της αρχικής του επιλογής, ο χρήστης θα βλέπει στοιχεία (φόρμες) τα οποία εμφανίζονται στην οθόνη δυναμικά και διαδοχικά (σε μορφή wizards) και θα καταχωρεί σε αυτά τις επιλογές του.

Για τις περιπτώσεις εύρεσης και αξιολόγησης, που είναι και το κεντρικότερο σκέλος του ΣΥΑ, τα διαδοχικά wizards καταχωρήσεων/επιλογών και τα βασικά μεγέθη που καταχωρούν ανάλογα με την επιλογή ανάγκης πρωτοτυποποίησης, συνοψίζονται στον ακόλουθο Πίνακα 4.3.3.1.

Πρωτότυπο	Διαδοχικά Wizards - Καταχωρούν			
	1ο	2ο	3ο	4ο
Μορφής	Γενικές διαστάσεις, όγκο, επιφάνεια, κλειστές κοιλότητες, κατηγορία υλικού, χρώμα, πολυχρωμία, αποδοχή διαίρεσης, αποδοχή βαφής, δεσμευτικό χρόνο & κόστος	-	-	-
Γεωμετρικό	-//-	Ελάχιστο πάχος, ελάχιστο μορφολογικό στοιχείο, κρίσιμες διαστάσεις & πεδία ανοχών τους, ποιότητα επιφάνειας	-	
Λειτουργικό	-//-	-//-	Κατηγορία υλικού, μηχανικά, θερμικά & λοιπά χαρακτηριστικά	-
Εργαλείο	-//-	-//-	-//-	Κατηγορία εργαλείου, ικανότητα παραγομένων αντιγράφων, άλλες ειδικές απαιτήσεις

Πίνακα 4.3.3.1: Προδιαγεγραμμένα wizards καταχώρησης σχεδιαζόμενου ΣΥΑ

Οι καταχωρήσεις/ επιλογές αυτές μέσω των διαδικασιών του ΣΥΑ καταχωρούνται κυρίως σε πεδία του Πίνακα “Prototypes” της ΣΒΔ και σε άλλα κατάλληλα πεδία της βάσης. Ακολούθως οι αλγόριθμοι εκτελούν όλους τους απαραίτητους υπολογισμούς και ερωτήματα (queries) προς τη βάση, μέσω των οποίων προκύπτουν τελικά τα αποτελέσματα. Αυτά εμφανίζονται στο χρήστη μέσω φορμών αναφοράς (report) στο interface της εφαρμογής. Τα ερωτήματα (Queries) που οι αλγόριθμοι απευθύνουν προς τη βάση, είναι και αυτά διαβαθμισμένα με την κλιμάκωση του Πίνακα 4.3.3.1, ανάλογα με την εξυπηρετούμενη ανάγκη πρωτοτυποποίησης για ανεύρεση και αξιολόγηση.

#### 4.3.4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα σχεδιαζόμενου ΣΥΑ

Από τις προηγούμενες παραγράφους και κυρίως από τον υλοποιηθέντα σχεδιασμό του ΣΥΑ, καταγράφονται σε αυτό τα παρακάτω πλεονεκτήματα:

- Υψηλή απόδοση: Οι τεχνολογίες ανάπτυξης εφαρμογών λογισμικού που χρησιμοποιήθηκαν εξασφαλίζουν σταθερή απόδοση και αξιοπιστία.
- Διασυνδέσεις με ισχυρό ΣΔΒΔ: Το ΣΔΒΔ Oracle θεωρείται από τα κορυφαία στον κόσμο σε απόδοση και λειτουργικότητα.

- Χαμηλό Κόστος: Το ανοικτό λογισμικό δεν είναι δωρεάν, αλλά επιτρέπει ποικίλες επιλογές, όσον αφορά τον προϋπολογισμό και τις δαπάνες ανάπτυξης εφαρμογών, σε σχέση με το εμπορικό λογισμικό με ιδιόκτητες άδειες χρήσης. Σε μία εφαρμογή ανοικτού λογισμικού τα κόστη απόκτησης άδειας χρήσης και συντήρησης είναι σε γενικές γραμμές χαμηλά ή ανύπαρκτα. Ο κάθε οργανισμός μπορεί να επενδύσει στην εμπειρία του χρήστη μέσω εκπαίδευσης, προσαρμογής και αύξησης του επιπέδου αποδοχής. Επιπλέον, ο προϋπολογισμός κόστους ιδιοκτησίας του συστήματος γίνεται πιο προβλέψιμος και ελέγξιμος. Με το εμπορικό λογισμικό αδειών χρήσης, υπάρχει συχνά έντονη εξάρτηση από μία εταιρία, υπεύθυνη τόσο για το λογισμικό όσο και για τις συναφείς με αυτό υπηρεσίες. Αντίθετα το ανοικτό λογισμικό, παρέχει στους οργανισμούς την ελευθερία να επιλέγουν το ίδιο το λογισμικό και τους παρόχους συναφών υπηρεσιών ανεξάρτητα, βασιζόμενοι στην εγνωσμένη αξία του καθενός.
- Ευκολία Χρήσης: Η σχεδίαση των διεπαφών έγινε σε μορφή wizards, με γνώμονα την απλούστερη περιήγηση στο ΣΥΑ και με βασικό κριτήριο ότι ο μέσος χρήστης είναι ένας μέτριος χρήστης web εφαρμογής.
- Διαθεσιμότητα Υποστήριξης: Στο ανοικτό λογισμικό δεν υπάρχει ένα μοναδικό σημείο αστοχίας. Το ανοικτό λογισμικό δεν εξαρτάται από τη βιωσιμότητα ενός μοναδικού οργανισμού ή εταιρίας, ο κίνδυνος κατανέμεται σε όλους όσους το χρησιμοποιούν και κερδίζουν από αυτό. Τα έργα (εφαρμογές) ανοικτού λογισμικού δεν μπορούν να αγοραστούν και πωληθούν. Δεν βρίσκονται υπό την επίδραση συγχωνεύσεων και μεταβολών στις επιχειρηματικές στρατηγικές που καθιστούν τις επενδύσεις σε λογισμικό επικίνδυνες και απρόβλεπτες. Από τη στιγμή που οι εταιρίες δεν μπορούν να στηριχθούν στην ιδιοκτησία του λογισμικού, για να διατηρήσουν τους πελάτες τους, πρέπει να συναγωνισθούν με βάση την ικανότητα και την ποιότητα υπηρεσιών τους. Οι δυνάμεις της αγοράς παρέχουν μηχανισμούς ελέγχου και ισοροπίας.

Η επιλογή ανοικτού κώδικα λογισμικού (Open Source) για το σχεδιασμό και υλοποίηση ΣΥΑ με βάση την προτεινόμενη στην παρούσα ΔΔ ΣΒΔ, θα εμφανίζει υποχρεωτικά και κάποια μειονεκτήματα. Συγκρίνοντας τεχνικά το υλοποιηθέν ΣΥΑ με διάφορα παρόμοια αρχιτεκτονικής ΣΥΑ (άλλου αντικειμένου) που υπάρχουν στην αγορά, το κυριότερο μειονέκτημα που προκύπτει είναι:

- Χρήση τελευταίων τεχνολογιών Web 2.0: Η υποστήριξη των προγραμμάτων ανοικτού κώδικα πολλές φορές είναι δύσκολη, εφόσον πίσω τους δεν υπάρχει συχνά κάποια κραταιά εταιρία με καταρτισμένους τεχνικούς. Με την χρήση state of the art τεχνολογιών προγραμματισμού και ανάπτυξης εφαρμογών υπάρχει επίσης πιθανότητα εμφάνισης άλυτων τεχνολογικών προβλημάτων. Το μηδενικό πολλές φορές κόστος εγκατάστασης ενός λογισμικού ανοικτού κώδικα, έτσι σιγά – σιγά αυξάνεται λόγω του κόστους συντήρησης / επιδιόρθωσης λαθών, από εξωτερικούς συνεργάτες. Τέλος πολλές φορές παρατηρείται ελλιπής τεκμηρίωση στα προγράμματα ανοικτού κώδικα.

#### **4.3.5 Διαθεσιμότητα και πρόσβαση του ΣΥΑ – Παράδειγμα επιλογής συστήματος ΤΚΠ με συνδυασμό ΣΥΑ, ΣΒΔ και αξιολόγησης εναλλακτικών λύσεων**

Το στην παρούσα ΔΔ πιλοτικά αναπτυχθέν για λόγους επίδειξης (demo) ΣΥΑ που βασίζεται και άμεσα αναφέρεται στην προτεινόμενη ΣΒΔ, υλοποιεί καταρχήν την εύρεση, αξιολόγηση και επιλογή λύσεων για πρωτότυπα μορφής. Ως κριτήρια προς

τούτο, λαμβάνει τις βασικές διαστάσεις, την επιφάνεια, τον όγκο και το χρώμα του επιθυμητού πρωτοτύπου, τα δεσμευτικά χρονικά και κοστολογικά όρια, επιπλέον δε για την αξιολόγηση θεωρεί το κόστος, το χρόνο και την εντοπιότητα των προκρινόμενων ικανών λύσεων.

Σήμερα είναι προσβάσιμο με πρότερη απόδοση δικαιωμάτων πρόσβασης και χρήσης από το συγγραφέα-διαχειριστή (administrator) στη διαδικτυακή διεύθυνση:

<http://apex.oracle.com/pls/apex/f?p=54553>

Στη μελλοντική του επέκταση (προγραμματιστικά), και πάλι βασιζόμενο στην σήμερα προτεινόμενη δομή ΣΒΔ, που θεωρείται από το συγγραφέα πλήρης και ικανή, θα υλοποιεί τις ίδιες διαδικασίες για κάθε κατηγορία πρωτοτύπων (και γεωμετρικά, λειτουργικά και πρωτότυπα εργαλεία), με όλα τα επιπλέον κριτήρια που οι κατηγορίες αυτές εμπλέκουν και με αξιολόγηση βάσει περισσότερων παραμέτρων (π.χ. περιβαλλοντική επιβάρυνση, ανακυκλωσιμότητα κ.α.)

Για την πιλοτική λειτουργία επίδειξης, δεν έχουν καταχωρηθεί εξαντλητικά στη ΣΒΔ όλες οι σήμερα υπάρχουσες τεχνολογίες, μηχανές, υλικά και πάροχοι/κάτοχοι ΤΚΠ που αφορούν το ελληνικό περιβάλλον, παρά μόνον ικανός αριθμός για να μπορεί να καταδειχθεί η λειτουργικότητα και αξία των προτεινόμενων δομών. Η ολοκληρωμένη συμπλήρωση της ΣΒΔ με δεδομένα, καθώς και η επέκταση και υλοποίηση του ΣΥΑ στην πλήρη του λειτουργικότητα, αφήνονται για τις μελλοντικές επεκτάσεις της παρούσας έρευνας, κατόπιν της έγκρισης των σήμερα προτεινόμενων σχετικών δομών.

Μετά την πλήρη ολοκλήρωση όλων των λειτουργιών του ΣΥΑ και την επαρκή συμπλήρωση της ΣΒΔ με δεδομένα, στοχεύεται να εγκατασταθεί και στον ιστότοπο του Εργαστηρίου ΤΚΠ & Ε του ΕΜΠ,

<http://rplab.mech.ntua.gr>

Μη αποκλεισμένης της πιθανής μελλοντικής εμπορικής του εκμετάλλευσης από το συγγραφέα της παρούσας και κάτοχο των πνευματικών δικαιωμάτων του, το ΣΥΑ θα είναι στον παραπάνω ιστότοπο του Εργαστηρίου προσβάσιμο (με κωδικό) και διαθέσιμο προς χρήση, από κατάλληλα εξουσιοδοτημένους χρήστες, που θα έχουν πρώτα αιτηθεί και λάβει σχετική έγκριση (και προσωπικό κωδικό). Φιλοδοξεί έτσι να αποτελέσει χρήσιμο εργαλείο υποστήριξης διαδικασιών πρωτοτυποποίησης για το ελληνικό κατασκευαστικό περιβάλλον.

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα εύρεσης και αξιολόγησης με το πιλοτικό ΣΥΑ ικανών συστημάτων ΤΚΠ και παρόχων για την ανάγκη ενός πρωτοτύπου μορφής, παρουσιάζεται με τα απαραίτητα αποσπάσματα οθόνης (screenshots) του ΣΥΑ και αποτελέσματα στο Παράρτημα Α.





## 5 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ & ΕΡΕΥΝΑ ΠΕΔΙΟΥ

Τόσο στην προτεινόμενη μέθοδο του Κεφαλαίου 3, όσο και στην πιλοτική ΒΔ – εφαρμογή ΣΥΑ του Κεφαλαίου 4 της παρούσας, εκτός από έγκυρα τεχνικά δεδομένα από τη διεθνή βιβλιογραφία, κατασκευαστές, το διαδίκτυο και συνεργαζόμενους βιομηχανικούς/κατασκευαστικούς φορείς, εμπεριέχονται και ενσωματώνονται επίσης ποσοτικά και ποιοτικά δεδομένα που αντικατοπτρίζουν τεχνογνωσία και εμπειρία που έχει κτηθεί για τα αντικείμενα της ΤΚΠ & ΤΚΕ στα πλαίσια της εκπόνησης της παρούσας διατριβής, αλλά και των ερευνητικών και άλλων δραστηριοτήτων του Εργαστηρίου ΤΚΠ & Ε της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ.

Για πολλά από αυτά τα δεδομένα διεξήχθη στοχευμένη πειραματική έρευνα και έρευνα πεδίου, που κρίθηκε αναγκαία είτε για την εκ του μηδενός διαπίστωση διαφόρων παραμέτρων (επιδόσεις, τεχνική εφικτότητα κλπ.) που σχετίζονται με συστήματα και εφαρμογές ΤΚΠ & ΤΚΕ, είτε για την συμπλήρωση κενών πληροφορίας σε ήδη γνωστά ή δημοσιευμένα στοιχεία, είτε τέλος για επαλήθευση και συμπλήρωση δημοσιευμένων αποτελεσμάτων άλλων ερευνητών, ειδικά σε περιπτώσεις που αυτά ήταν διφορούμενα, αμφισβητήσιμα, ή ελλιπώς τεκμηριωμένα.

Ειδικά αντικείμενα διερεύνησης αποτέλεσαν πρωτίστως η τεχνολογία ΤΚΠ LOM, μέσω της μηχανής *Helisys LOM 1015*, η τεχνολογία ΤΚΠ FDM, μέσω της μηχανής *Dimension uPrint*, που αμφότερες είναι εγκατεστημένες στο Εργαστήριο ΤΚΠ & Ε του ΕΜΠ και δευτερευόντως (συγκριτικά κυρίως με τη μέθοδο LOM) η τεχνολογία της Στερεολιθογραφίας, μέσω της μηχανής *EOS STEREOS DESKTOP S* που βρίσκεται εγκατεστημένη στο συγγενές Εργαστήριο Σύγχρονων Τεχνολογιών Παραγωγής & Ελέγχου του Πανεπιστημίου Πειραιά.

Σε αρκετές περιπτώσεις (ειδικά για την τεχνολογία LOM) η πειραματική και εφαρμοσμένη έρευνα πεδίου προηγήθηκε χρονικά αυτής των Κεφαλαίων 3 & 4, καθώς ήταν αναγκαίο να αντιμετωπισθεί η ρεαλιστική ανάγκη εξεύρεσης/εξαγωγής δεδομένων και αποτελεσμάτων για την έγκυρη και άρτια υλοποίηση εφαρμογών στα πλαίσια λειτουργίας του Εργαστηρίου ΤΚΠ & Ε του ΕΜΠ.

Παρακάτω παρουσιάζονται οι βασικότεροι τομείς της πειραματικής και υποστηρικτικής έρευνας πεδίου που διεξήχθη παράγοντας αξιοποιήσιμα αποτελέσματα.

### 5.1 Μέθοδος ΤΚΠ LOM

#### 5.1.1 Εισαγωγή στη μέθοδο LOM

Οι βασικές αρχές της τεχνολογίας ΤΚΠ με Επάλληλα Φύλλα Υλικού (Laminated Object Manufacturing, LOM), εφεξής και εδώ για συντομία LOM, έχουν δοθεί τόσο περιγραφικά όσο και σχηματικά στην παράγραφο 1.9.4 της παρούσας εργασίας. Στην ίδια παράγραφο επίσης έχει δοθεί αναλυτική περιγραφή του πλήρους κύκλου δημιουργίας ενός στρώματος κατασκευαζομένου αντικειμένου με LOM, η διαδοχική επανάληψη του οποίου οδηγεί στην ολοκληρωμένη διαστρωματική κατασκευή όλου του αντικειμένου.

Οι Sonmez & Hahn, σε μια από τις ελάχιστες εργασίες για την τεχνολογία LOM και τα φαινόμενα που τη διέπουν, παρουσιάζουν με επάρκεια και μοντελοποιούν αναλυτικά τα θερμομηχανικά φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα κατά τη συνένωση των στρώσεων για την κατασκευή του αντικειμένου, αναγνωρίζουν τους παράγοντες που τα επηρεάζουν και εν μέρει επιβεβαιώνουν προϋποθέσεις και οριακές τιμές παραμέτρων για κατασκευή αντικειμένων σε μηχανές LOM, [Sonmez & Hahn, 1998].

Οι Park, Tari & Hahn, επίσης διερευνούν τη μέθοδο LOM, κυρίως σε σχέση με τις επιδόσεις διαστασιολογικής ακρίβειας της, τη διαστασιολογική σταθερότητα των παραγομένων αντικειμένων και την επίδραση διαφόρων παραμέτρων και ρυθμίσεων στο τελικό αποτέλεσμα, με κύριο στόχο το χαρακτηρισμό της μεθόδου, [Park et al., 2000]. Τα αποτελέσματα της σχετικής με την υποβαλλόμενη ΔΔ έρευνας, που χρονικά διενεργήθηκε παράλληλα, εν μέρει επαληθεύουν ή συγκρίνονται άμεσα με αυτά των Park, Tari & Hahn.

Για την καλύτερη όμως κατανόηση της μεθόδου LOM, των εγγενών περιορισμών και προβλημάτων της και των αφορμών που δίνει για διεξαγωγή έρευνας, θα πρέπει εδώ να αναφερθούν και να γίνουν σαφή τα παρακάτω:

- Από τη φύση της, η τεχνολογία LOM εγκιβωτίζει την περίσσεια της μη ανήκουσας στο κατασκευαζόμενο αντικείμενο πρώτης ύλης εντός της γεωμετρίας και της περιοχής κατασκευής του αντικειμένου. Η περίσσεια αυτή έχοντας κατακερματισθεί κατά την κατασκευή σε στήλες ορθογωνικής διατομής, πρέπει κάθε φορά να αφαιρείται χειρονακτικά και με χρήση ειδικών εργαλείων, σε μια κοπιώδη και απαιτητική για σύνθετες γεωμετρίες διαδικασία καθαρισμού/ αποπεράτωσης του αντικειμένου, (Σχήμα 5.1.1), που συνήθως απαιτεί επιδεξιότητα και εμπειρία από πλευράς του χειριστή/τεχνίτη, ενώ δεν αποκλείεται και ο «τραυματισμός» του κατασκευαζόμενου αντικειμένου ή η αποκόλληση τμημάτων του. Εσφαλμένη δε επιλογή και χρήση της LOM για ακατάλληλες για αυτή γεωμετρίες μπορεί να οδηγήσει σε αποτυχία της μεθόδου, με ταυτόχρονη κοστολογική επιβάρυνση.



Σχήμα 5.1.1: Καθαρισμός – αποπεράτωση – λήψη πρωτοτύπου LOM

- Και πάλι λόγω της εξαρχής χρησιμοποίησης στερεών φύλλων υλικού, στην LOM είναι ανέφικτη η χωρίς διαχωρισμό του αντικειμένου κατασκευή κλειστών κοιλοτήτων, όπως π.χ. τα μπουκάλια. Είναι δε γενικά προβληματική η κατασκευή αντικειμένων με βαθιές κοιλότητες, ιδιαίτερος αν αυτές παρουσιάζουν κλίση σε σχέση με τον άξονα κατασκευής «Z», προσομοιάζοντας σε εσοχές.
- Στην LOM κατά βάση πρώτη ύλη αποτελεί το χαρτί (σε διάφορα πάχη και πλάτη). Άλλες προσπάθειες για κεραμικά, πλαστικά και σύνθετα υλικά, παρέμειναν αμιγώς ερευνητικές – εργαστηριακές, χωρίς εμπορική διάθεση και αξιοποίηση. Το χαρτί είναι εκ φύσεως υλικό πορώδες, που χωρίς επιφανειακή προστασία-σφράγιση αλληλεπιδρά ωσμωτικά με τον ατμοσφαιρικό αέρα και την υγρασία του. Το φαινόμενο μπορεί να οδηγήσει σε σοβαρές αλλοιώσεις διαστάσεων, που διερευνώνται στην παρούσα εργασία και πρέπει να αντιμετωπίζεται με ξεχωριστό βήμα, τη λεγόμενη διαδικασία σφράγισης και αποπεράτωσης (φινιρίσμα), που και πάλι είναι εν πολλοίς χειρονακτική και απαιτεί εμπειρία. Η διαδικασία φινιρίσματος και η έκτασή της, αναπόφευκτα επηρεάζει τόσο την ακρίβεια διαστάσεων, όσο και την ποιότητα επιφάνειας των αντικειμένων, τοπικά και

συνολικά. Προσθέτει δε πάντοτε κάποιους πάγιους χρόνους (εξαρτώμενους από τη γεωμετρία και το βαθμό του φινιρίσματος) στη συνολική διαδικασία κατασκευής.

- Ο διαχωρισμός, από το φύλλο πρώτης ύλης, του χαρτιού που συγκροτεί το αντικείμενο από την περίσσεια γίνεται με «κοπή» με δέσμη laser. Στην πραγματικότητα όμως ο διαχωρισμός αυτός είναι μια τοπικής κλίμακας καύση του χαρτιού. Λόγω της καύσης δημιουργείται στο χώρο κατασκευής της μηχανής LOM καπνός και τέφρα, που πρέπει να απάγονται με αναρρόφηση, καθώς επικαθιμένα στα κινούμενα μέρη υποβαθμίζουν την ακρίβεια τους. Επίσης, η ίδια η καύση ως φαινόμενο χαρακτηρίζεται από ένα βαθμό στοχαστικότητας/ τυχαιότητας, ως προς την απόδοση της κατασκευαζόμενης γεωμετρίας (π.χ. απόδοση ευθ.τμημάτων κλπ.). Η επίδραση της καύσης αποτελεί και αυτή λοιπόν παράγοντα ανακρίβειας και αντικείμενο διερεύνησης.
- Τέλος, καθώς η μορφοποίηση στερεών αντικειμένων γίνεται με θερμοσυγκόλληση στρώσεων φύλλων υλικού, υπάρχουν εγγενείς περιορισμοί και ως προς τις ελάχιστες επιφάνειες και γραμμικές διαστάσεις διατομών που συγκολλούνται μεταξύ τους, ώστε να εξασφαλίζονται στιβαρά πρωτότυπα, με επαρκή δύναμη συγκόλλησης τοπικά στο αντικείμενο και χωρίς αποκολλήσεις, ιδιαίτερα των προεξεχόντων ή λεπτότοιχων γεωμετρικών στοιχείων, κατά τον καθαρισμό ή τη χρήση των αντικειμένων.

Οι παραπάνω ιδιαιτερότητες της LOM σε σχέση με άλλες τεχνολογίες ΤΚΠ, αποτελούν από μόνες τους αφορμές δοκιμών και έρευνας. Για τις περισσότερες δε απ' αυτές έγιναν στα πλαίσια της παρούσας ΔΔ και τα δύο.

### **5.1.2 Η μονάδα LOM1015 του Εργαστηρίου ΤΚΠ του ΕΜΠ**

Η μηχανή Helisys LOM 1015 που είναι εγκατεστημένη στο Εργαστήριο ΤΚΠ & Ε και απεικονίζεται στο Σχήμα 1.14.1 της παραγράφου 1.14, αποτελεί ένα πρώτης γενιάς και μέσης κλίμακας επαγγελματικό – βιομηχανικό σύστημα ΤΚΠ, ορισμένα βασικά χαρακτηριστικά του οποίου και των κύριων πρώτων υλικών του, δίνονται σύμφωνα με τον κατασκευαστή του στον Πίνακα 5.1.1.

Δέχεται ως «είσοδο» μόνο αρχεία STL, λειτουργεί δε με την οδήγηση προσωπικού Η-Υ (PC), μέσω του αποκλειστικού για αυτή λειτουργικού προγράμματος LOMSlice (v.1.42 για το ΕΜΠ), σε λειτουργικό σύστημα Windows NT 3.51.

Σε μηχανολογικό επίπεδο, λειτουργεί κατά βάση χάρις σε βηματικούς κινητήρες, ηλεκτρονικά ισχύος, καταγραφικά θέσης και κίνησης (encoders), τερματικούς διακόπτες και διακόπτες ασφαλείας, κάτοπτρα, φακό και μια μονάδα laser CO<sub>2</sub> ισχύος 25W του οίκου SYNRAD, μέσω του οποίου διενεργείται η «κοπή» του υλικού. Η δέσμη της ακτίνας οδηγείται στις προβλεπόμενες θέσεις με καρτεσιανό (X-Y) plotter βηματικών κινητήρων του οίκου Roland.

Η μηχανή εγκαταστάθηκε και λειτούργησε στο ΕΜΠ με κονδύλια του Ευρωπαϊκά Χρηματοδοτούμενου Ερευνητικού Προγράμματος ΕΠΕΤ II της ΓΓΕΤ με τίτλο «NEKTAR: Ανάπτυξη Εγκαταστάσεων για την Ταχεία Δημιουργία Πρωτοτύπων» και αποτελεί ως σήμερα βασικό εξοπλισμό του Εργαστηρίου ΤΚΠ & Ε για τις εκπαιδευτικές, ερευνητικές και λοιπές δραστηριότητές του.

<b>Helisys LOM-1015</b>			
Μέγιστο Κατασκευαζόμενο Αντικείμενο	370x240x350mm Μήκ*Πλ*Υψ		
Ταχύτητα Κατασκευής	1,5 έως 12 mm/hour		
Αποδιδόμενη ακρίβεια	Dim ± 0,3mm		
Χρησιμοποιούμενο Laser	CO <sub>2</sub> , Ισχύος 25 Watt		
Διάμετρος ακτίνας Laser	0,254 -0,381 mm		
Οδήγηση ίχνους ακτίνας Laser	XY-Plotter με βηματικούς κινητήρες		
Χρησιμοποιούμενα Υλικά	Χαρτί (LPS,LPH), πλαστικό (LXP), (κεραμικά)		
Μορφή πρώτης ύλης	Φύλλο σε Ρολό		
Μέθοδος συνένωσης	Θερμοκόλληση με κυλιόμενο κύλινδρο		
Πάχος πρώτης ύλης	Συνήθως 0,1mm (Υπάρχουν από 0,051 έως 0,381 mm)		
Αρχεία που δέχεται	STL		
Χρησιμοποιούμενο Λογισμικό	LOMSlice		
Λειτουργικό Σύστημα	Windows NT 3.51		
Συνολικές Διαστάσεις Μηχανής	Μήκ*Πλ*Υψ : 1,25 x 1,0 x 1,30m		
Απαιτήσεις Ηλεκτρικής Παροχής	220V, 60Hz, 20A		
Απαιτούμενη Παροχή Απορροφητήρα	800m <sup>3</sup> /h		
<b>ΒΑΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΠΡΩΤΩΝ ΥΛΩΝ ΧΑΡΤΙΟΥ</b>			
	<b>LPS 038</b>	<b>LPH042</b>	<b>LPH080</b>
Πάχος Υλικού (mm)	0,0965	0,1067	0,2032
Πυκνότητα (g/cc)	0,893	0,9	~1
Θερμική Αγωγιμότητα (W/mK)			~ως LPH042
- Εγκάρσια	0,07	0,07	
- Κατά ΧΥ	0,23	0,23	
Θερμική Διαστολή (10 <sup>-5</sup> cm)			~ως LPH042
- Εγκάρσια	149*10 <sup>-6</sup> /°C	185,2*10 <sup>-6</sup> /°C	
- Κατά ΧΥ	13,1*10 <sup>-6</sup> /°C	4*10 <sup>-6</sup> /°C	
Αντοχή σε Εφελκυσμό (MPa)	66	26	~ως LPH042
Θερμοκρασία Θερμικής Εκτροπής/Παραμόρφωσης (°C) (Deflection Temperature)	138	77	~ως LPH042

Πίνακας 5.1.1: Βασικά Χαρακτηριστικά Μηχανής LOM 1015 και πρώτων υλών

Ως σύστημα ΤΚΠ 1<sup>ης</sup> γενιάς, η LOM 1015 δεν χαρακτηρίζεται από πολύ υψηλό βαθμό αυτοματοποίησης και αξιοπιστίας, η δε λειτουργία και η ποιότητα του αποτελέσματος που παράγει εξαρτάται και επηρεάζεται σημαντικά, όπως επισημαίνει έγκυρη σχετική βιβλιογραφία [Ippolito et al., 1995] από την εμπειρία του χειριστή/χρήστη, τις ρυθμίσεις και τις πρακτικές που ακολουθεί ο φορέας που την χρησιμοποιεί. Αυτό διαπιστώθηκε και στο Εργαστήριο ΤΚΠ & Ε του ΕΜΠ από τους πρώτους κύκλους μήνες χρήσης της LOM 1015, οδηγώντας σε άμεση έρευνα και πλήθος δοκιμών που θα βελτιστοποιούσαν τη χρήση του εν λόγω εξοπλισμού και της

ποιότητας των παραγομένων αντικειμένων της. Αποτελέσματα της έρευνας και των δοκιμών αυτών αφενός παρουσιάζονται παρακάτω και αφετέρου κατέστησαν την LOM 1015 του ΕΜΠ ένα κατά μέγιστο αξιοποιηθέν τεχνολογικό εργαλείο, του οποίου οι δυνατότητες και επιδόσεις χρησιμοποιούνται ως σήμερα στο έπακρο.

### 5.1.3 Χρόνος – κόστος κατασκευής πρωτοτύπων LOM

Θα παρουσιαστεί με συντομία η έρευνα που διεξήχθη για την προεκτίμηση χρόνου – κόστους κατασκευής σε LOM 1015.

#### 5.1.3.1 Γενικά

Ένα βασικό πρόβλημα για την τεχνολογία LOM και τη μηχανή LOM1015 είναι καταρχήν ο προσδιορισμός του χρόνου και κατ'επέκταση του κόστους κατασκευής αντικειμένων, πριν την υλοποίησή τους. Το πρόβλημα αυτό είναι διττό.

Αφενός, το λογισμικό LOMSlice της μηχανής κατά την κατασκευή πρωτοτύπων προεκτιμά ανά πάσα στιγμή τον υπολειπόμενο χρόνο με εντελώς απλοϊκό τρόπο, λαμβάνοντας υπόψη το χρόνο που έχει απαιτηθεί για τα στρώματα που έχουν προηγηθεί και με γραμμική αναγωγή ως προς το υπολειπόμενο ύψος ολοκλήρωσης. Έτσι υπολογίζει και δίδει χρόνο ολοκλήρωσης που ειδικά στην αρχή της κατασκευής αποκλίνει έντονα από τον πραγματικό, ενώ ειδικά για αντικείμενα που η γεωμετρία καθ' ύψος μεταβάλλεται σημαντικά δεν είναι σχεδόν ποτέ αντιπροσωπευτικός. Επίσης στην φάση προεπεξεργασίας αρχείων STL με το λογισμικό LOMSlice και τη μηχανή εκτός σύνδεσης (offline mode) η παραπάνω προεκτίμηση χρόνου είναι εντελώς λανθασμένη, βασιζόμενη καθαρά στο χρόνο επεξεργασίας των στρώσεων (και όχι πραγματικής κατασκευής τους). Δυστυχώς η κατασκευάστρια εταιρία Helisys δεν αντιμετώπισε ποτέ το πρόβλημα αυτό.

Αφετέρου, είναι συχνά αναγκαίο, όπως π.χ. σε περιπτώσεις ανάγκης υποβολής οικονομικής προσφοράς για παροχές σχετικών υπηρεσιών, να μπορεί κανείς να προεκτιμά τον χρόνο και κόστος κατασκευής ενός πρωτοτύπου LOM, μη διαθέτοντας το ίδιο το αρχείο STL του αντικειμένου, καθώς ο φορέας που επιθυμεί να κατασκευάσει το πρωτότυπο, για λόγους βιομηχανικού απορρήτου, πιθανόν να μην προτίθεται να το διαθέσει πριν από την οριστική ανάθεση κατασκευής, καθώς αυτό αποκαλύπτει πλήρως την πραγματική γεωμετρία του αντικειμένου. Αντ'αυτού πιθανώς να επιθυμεί να παρέχει μόνο βασικές πληροφορίες ως προς τις κύριες διαστάσεις, τον όγκο, την επιφάνεια την καμπυλότητα και τη συνθετότητα του αντικειμένου, βάσει των οποίων και θα πρέπει να είναι δυνατόν να δοθεί μια ρεαλιστική και αντιπροσωπευτική προεκτίμηση του απαιτούμενου χρόνου και κόστους.

Καθώς το πρόβλημα προεκτίμησης και υπολογισμού του χρόνου κατασκευής LOM με βάση το ίδιο το αρχείο STL ουσιαστικά μπορεί να επιλυθεί μόνο με κάποιου βαθμού προσομοίωση (simulation) της πραγματικής λειτουργίας της μηχανής, όπως έχουν ήδη κάνει σε εργασία τους οι Κεχαγιάς, Μαρόπουλος και Καραγιάννης, [Kechagias et al., 2004], χωρίς και πάλι να αντιμετωπίζει το γενικότερο θέμα της προεκτίμησης χρόνου άνευ αρχείου STL, η παρούσα διενεργηθείσα έρευνα κινήθηκε προς την κατεύθυνση αυτή, αφενός για την αναγνώριση των βασικών παραμέτρων επηρεασμού του χρόνου και αφετέρου για τη μοντελοποίηση της επίδρασής τους με μεθόδους «εκμάθησης», βασισμένες σε στατιστική επεξεργασία και αριθμητικές μεθόδους 2<sup>ου</sup> βαθμού πολυωνυμικής προσαρμογής πολλών μεταβλητών (2<sup>nd</sup> degree Multi Variable Regression).

### 5.1.3.2 Στόχευση και προγραμματισμός της εργαστηριακής έρευνας – Αναγνώριση βασικών μεταβλητών χρόνου – Συλλογή Δεδομένων

Τόσο εκτεταμένες πειραματικές δοκιμές, όσο και η σταδιακά κτηθείσα εμπειρία και τεχνογνωσία επί της LOM, κατέδειξαν τους ακόλουθους ξεχωριστούς και ανεξάρτητους μεταξύ τους παράγοντες επίδρασης στο χρόνο κατασκευής των αντικειμένων:

- Το ύψος Z: Το ύψος του αντικειμένου επηρεάζει άμεσα το χρόνο κατασκευής, καθώς άμεσα καθορίζει τον αριθμό N των απαιτούμενων στρώσεων, σύμφωνα με τη σχέση:

$$N = \left\lfloor \frac{Z}{p} \right\rfloor \quad (5.1)$$

, όπου p το πάχος της χρησιμοποιούμενης πρώτης ύλης.

Κάθε στρώση απαιτεί χρόνο επίστρωσης χαρτιού, χρόνο συγκόλλησης του, χρόνο ανόδου και καθόδου της τράπεζας κατασκευής και χρόνο κοπής του εξωτερικού και εσωτερικού περιγράμματος του τοιχώματος υποστήριξης του αντικειμένου, που σε κάθε κατασκευή, αναλόγως του μεγέθους της επίπεδης προβολής XY του αντικειμένου αποτελούν πάγιο συνολικό χρόνο ανά στρώση της τάξεως των 10 με 15 sec.

- Τις βασικές συνολικές διαστάσεις X και Y: Είναι ένα μέτρο του πραγματικού μεγέθους του κατασκευαζομένου αντικειμένου. Για την τεχνολογία LOM που εκκινεί από στερεή πρώτη ύλη, λαμβάνουν τιμές στις παρακάτω περιοχές:

X: Από 50mm έως X<sub>max</sub> (=370mm για LOM1015)

Y: Από 50mm έως Y<sub>max</sub>(=240mm για LOM1015)

Σημειώνεται ότι οι τιμές X και Y, για τεχνικούς λόγους οφειλόμενους στην αρχιτεκτονική μηχανικών μερών της LOM1015, αλλά κυρίως για λόγους οικονομίας του υλικού, που αναλώνεται στο πλήρες πλάτος του ανεξαρτήτως της τιμής του Y, σπανίως επιλέγονται προς τα κάτω όρια. Αντίθετα συνήθως επιδιώκεται η πλήρης εκμετάλλευση του υλικού στην πλατφόρμα κατασκευής, ακόμα και αν αυτό συνεπάγεται κατασκευή περισσοτέρων αντικειμένων μαζί.

Τα μεγέθη X και Y επηρεάζουν ανεξάρτητα μεταξύ τους αρκετές χρονικές παραμέτρους όπως το χρόνο κοπής του αντικειμένου, το χρόνο κοπής του εξωτερικού και εσωτερικού περιγράμματος του τοιχώματος υποστήριξης, το χρόνο κοπών περίσσειας υλικού και το χρόνο τροφοδοσίας πρώτης ύλης ανά στρώση.

- Τον όγκο V του αντικειμένου, εκπεφρασμένο ως πυκνότητα πλατφόρμας ρ<sub>pl</sub> σύμφωνα με τη σχέση:

$$\rho_{pl} = \frac{V}{V_e} \quad (5.2)$$

, όπου V<sub>e</sub>=X\*Y\*Z.

Το προτεινόμενο από τον γράφοντα μέγεθος της πυκνότητας πλατφόρμας, λαμβάνοντας τιμές από 0 έως 1, υποδηλώνει πόσο «γεμάτος» ή «άδειος» από αντικείμενο είναι ο συνολικός χώρος κατασκευής, ενώ παράλληλα δίνει ένα βαθμό κατανομής του όγκου του αντικειμένου στο χώρο και της ομοιομορφίας του γενικά. Και δεδομένου ότι, αντίθετα με άλλες τεχνολογίες ΤΚΠ

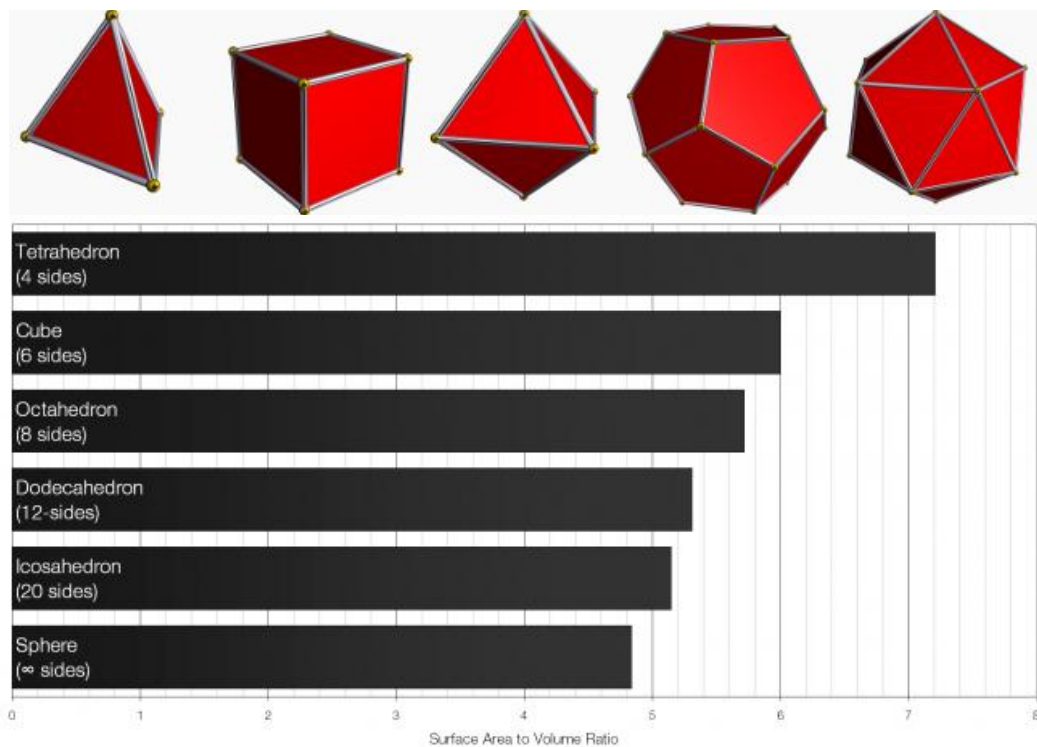
στερεοποίησης ή εναπόθεσης υλικού, στην LOM το υλικό είναι εξαρχής στερεό , οπότε για τη διαμόρφωση των στρώσεων κόβονται μόνο περίμετροι (εσωτερικές και εξωτερικές) και περίσσεια πρώτης ύλης, η πυκνότητα πλατφόρμας αποτελεί μέτρο επηρεασμού και για τα δύο αυτά μεγέθη σε ότι αφορά το χρόνο.

- Τη συνολική επιφάνεια S του αντικειμένου: Είναι σαφές πως στερεά του ίδιου όγκου, αναλόγως του σχήματος και της πολυπλοκότητάς τους δύνανται να παρουσιάζουν μεγάλη διαφορά στην επιφάνεια τους. Η συμπαγέστερη μορφή σε σχέση με τον όγκο και την επιφάνειά της είναι η σφαίρα, για αυτό εξάλλου και ο ρευστός υδράργυρος με τις μεγάλες δυνάμεις συνοχής του τείνει να λαμβάνει το σχήμα αυτό (Σχήμα 5.1.3.2.1).



Σχήμα 5.1.3.2.1: Υγρός υδράργυρος

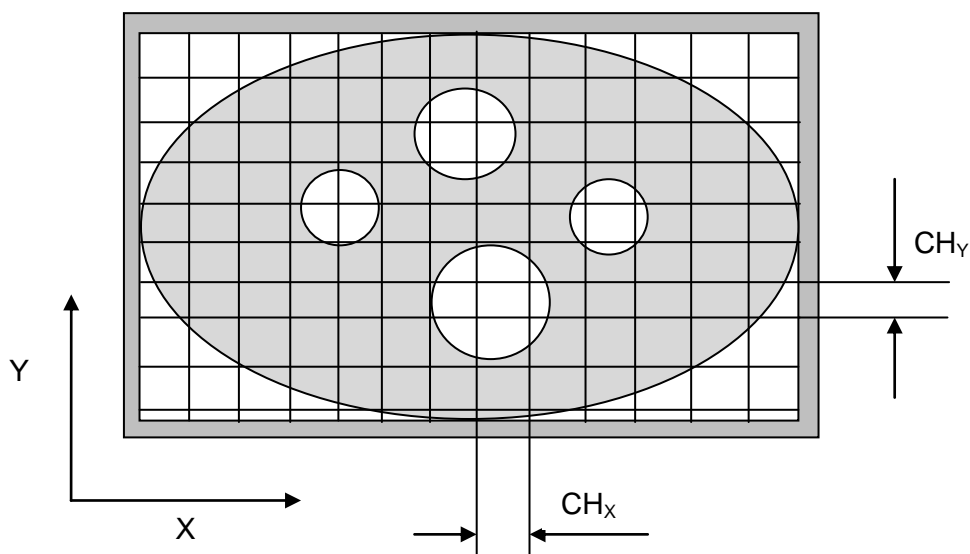
Καθώς όμως ένα σχήμα καθίσταται πιο περίπλοκο, λεπτότοιχο ή σύνθετο, η επιφάνεια του (για δεδομένο όγκο) πάντοτε αυξάνεται, όπως αυξάνεται και ο λόγος  $S/V$  (Σχήμα 5.1.3.2.2).



Σχήμα 5.1.3.2.2: Αύξηση της επιφάνειας ανά όγκο σε στερεά

Καθώς στη διαστρωματική κατασκευή η διαίρεση σε τομές μιας συνολικά κλειστής επιφάνειας που ορίζει ένα στερεό, γεννά τελικά περιγράμματα, δηλαδή γραμμές, για την περίπτωση της LOM αυτό συνεπάγεται ότι όσο μεγαλύτερη η επιφάνεια/συνθετότητα (για δεδομένο όγκο) του αντικειμένου, τόσο μεγαλύτερα σε μήκος τα περιγράμματα ανά στρώση που θα πρέπει να «κοπούν» και κατά συνέπεια μεγαλύτεροι οι αντίστοιχοι χρόνοι κοπής.

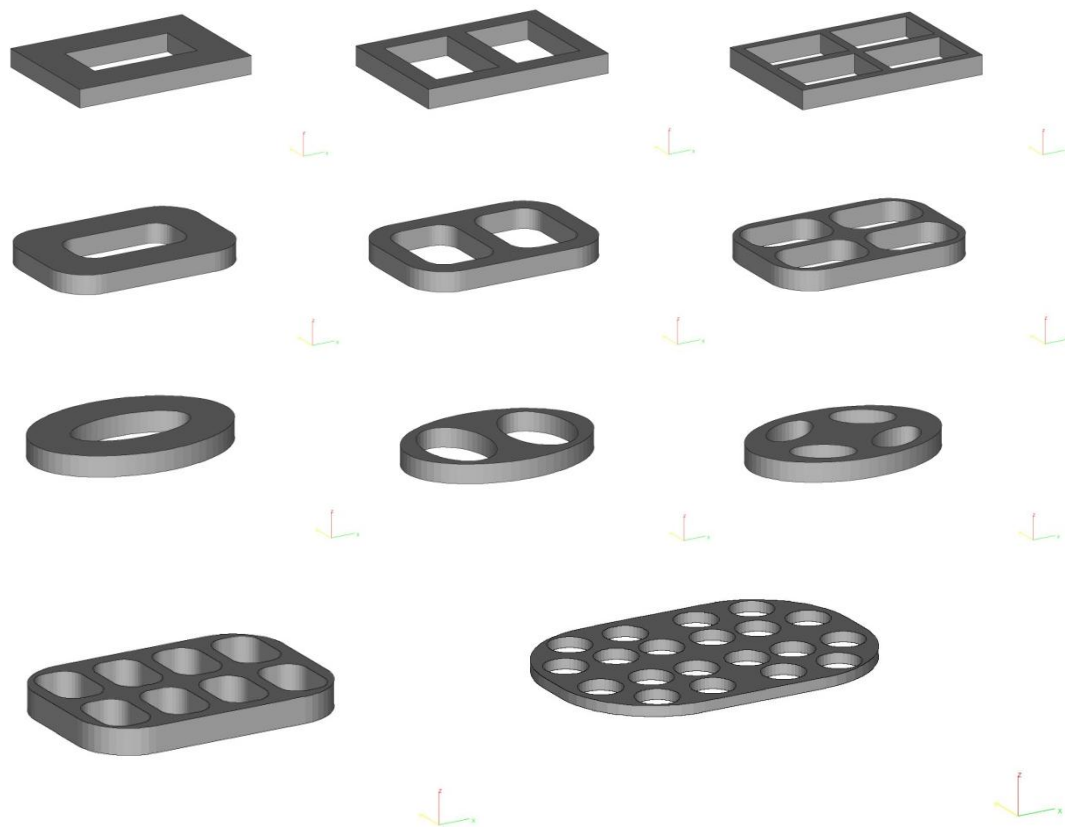
- Τη μέση καμπυλότητα επιπέδων  $C_{av}$ : Μπορεί να ορισθεί ως ο λόγος των επιφανειών με καμπυλότητα τομών XY προς τις συνολικές τεμνόμενες στο επίπεδο XY επιφάνειες του αντικειμένου. Δηλώνει χαρακτηριστικά το μέσο ποσοστό των καμπυλών επί των συνολικών κλειστών περιγραμμάτων που αποδίδονται στις στρώσεις κατά την κατασκευή του αντικειμένου. Το μέγεθος αυτό, επίσης με τιμές από 0 έως 1, δίδεται κάθε φορά προσεγγιστικά από τον χρήστη με βάση την εικόνα που έχει για το αντικείμενο και τον προσανατολισμό κατασκευής του και επηρεάζει το χρόνο «κοπής» στα επίπεδα, καθώς λόγω της φύσης των αρχείων STL (τριγωνικές έδρες), όλα τα περιγράμματα που αποδίδονται στις στρώσεις προσεγγίζονται με διαδοχές ευθυγράμμων τμημάτων σε διάφορα μήκη. Το XY plotter της LOM1015, κινούμενο από βηματικούς κινητήρες δεν διαγράφει συνεχείς κινήσεις επί των καμπυλών, αλλά ξεχωριστές διαδοχές μικρών ευθυγράμμων τμημάτων, με μικροκαθυστέρηση ορισμένων msec μεταξύ τους. Μακροσκοπικά αυτό συνεπάγεται οι καμπύλες να «κόβονται» σε αργότερο ρυθμό από τις ευθείες.
- Τις βασικές διαστάσεις κατά X και Y των ορθογωνίων διαχωρισμού περίσσειας υλικού,  $CH_x$  και  $CH_y$ : Είναι παράμετροι ρύθμισης της μηχανής και μεταξύ τους ανεξάρτητες καθώς μπορούν να λαμβάνουν διαφορετικές τιμές, μορφώνοντας ορθογώνια και όχι υποχρεωτικά τετράγωνα. Οι τιμές αυτές όμως παραμένουν σταθερές σε κάθε κατασκευή αντικειμένου. Η εμπειρία από τη χρήση LOM για κατασκευή πρωτοτύπων έχει δείξει ότι η αφαίρεση της περίσσειας του υλικού από το αποπερατωθέν πρωτότυπο είναι εφικτή και αποδοτική, όταν τα  $CH_x$  και  $CH_y$  λαμβάνουν τιμές μικρότερες ή ίσες από το 1/2 της ελάχιστης «θηλυκής» διάστασης – κοιλότητας του αντικειμένου και από 25 έως 5mm κατ'ελάχιστον. Σχηματικά αυτό παρίσταται στο Σχήμα 5.1.3.2.3.



Σχήμα 5.1.3.2.3: Καθορισμός των  $CH_x$  και  $CH_y$



Λαμβάνοντας ως ανεξάρτητες παραμέτρους – μεταβλητές όλα τα παραπάνω μεγέθη, καταρχήν σχεδιάστηκαν 3 σειρές, κλιμακούμενου μεγέθους (μικρά – μεσαία – μεγάλα), πρότυπων αντικειμένων σταθερής διατομής κατά Z, με ποικιλία συνθετότητας και καμπυλότητας των περιγραμμάτων που ορίζουν τη διατομή τους. Ορισμένα από αυτά δεικνύονται στο Σχήμα 5.1.3.2.4.

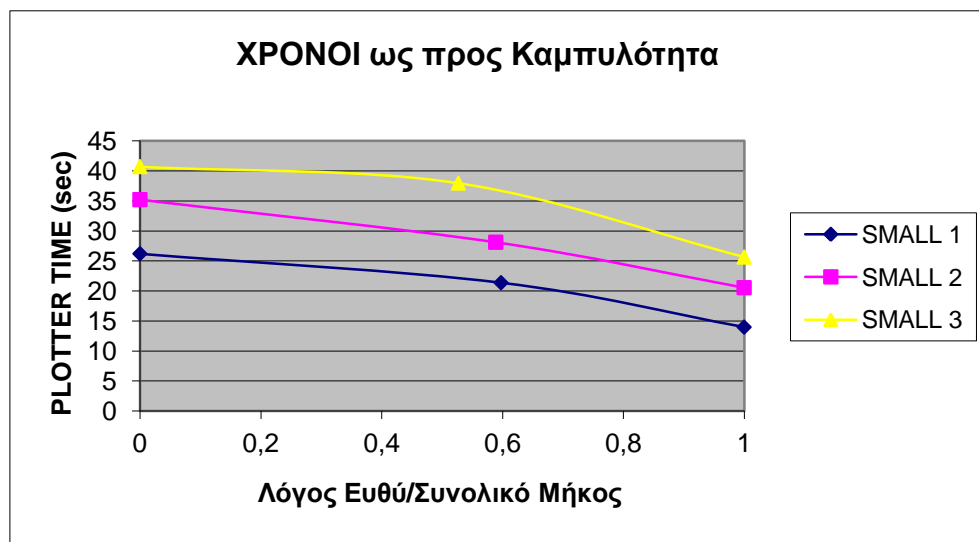
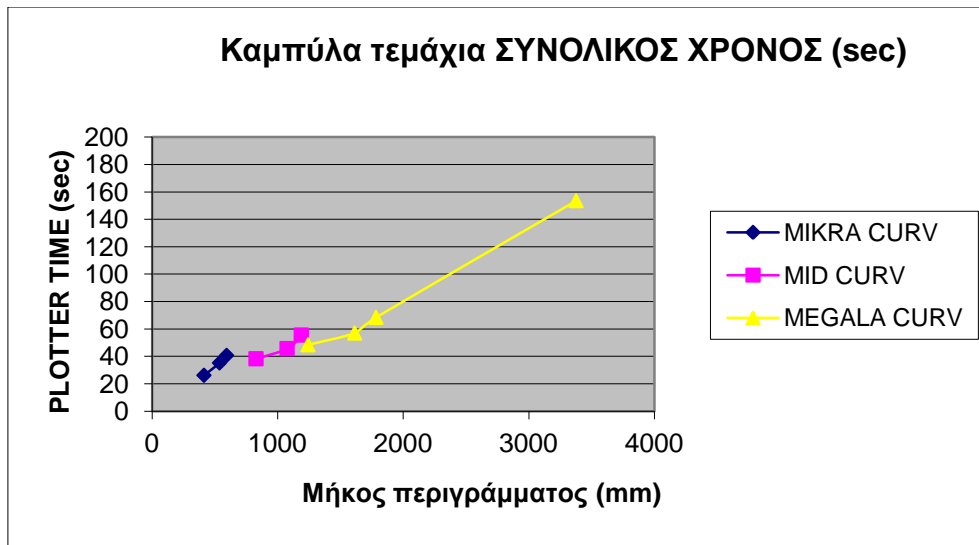


Σχήμα 5.1.3.2.4 Πρότυπα δοκίμια εκτίμησης χρόνου

Τα πρότυπα αυτά αντικείμενα, 39 συνολικά, τέθηκαν προς κατασκευή στη LOM1015 και μετρήθηκαν αναλυτικά ως προς τους χρόνους πραγματικής απόδοσης των στρώσεων τους στη μηχανή, τόσο όσον αφορά το σύνολο του χρόνου κοπής των στρώσεων, όσο και για τους επιμέρους χρόνους κοπής κύριας γεωμετρίας, κοπής περίσσειας και προετοιμασίας των στρώσεων.

Οι μετρήσεις αυτές επιβεβαίωσαν την εξάρτηση του μέσου χρόνου απόδοσης στρώσης (σταθερού για κάθε στρώση στα αντικείμενα αυτά) από όλες τις οκτώ (8) ανεξάρτητες μεταβλητές που αναγνωρίστηκαν νωρίτερα στην παρούσα παράγραφο. Χαρακτηριστικά γραφήματα εξάρτησης χρόνου απόδοσης στρώσεων (περίγραμμα και χάραξη της περίσσειας) των δοκιμίων σε σχέση με την περίμετρο των στρώσεων και με τη μέση καμπυλότητα τους δίνονται στο Σχήμα 5.1.3.2.5.

Όλα τα δεδομένα χρόνου απόδοσης στρώσεων στη LOM 1015 καταγράφησαν αναλυτικά και για τα 39 δοκίμια, μαζί με τις τιμές των οκτώ (8) ανεξάρτητων μεταβλητών που τις επηρεάζουν.



Σχήμα 5.1.3.2.5: Εξαρτήσεις χρόνων απόδοσης επιπέδου

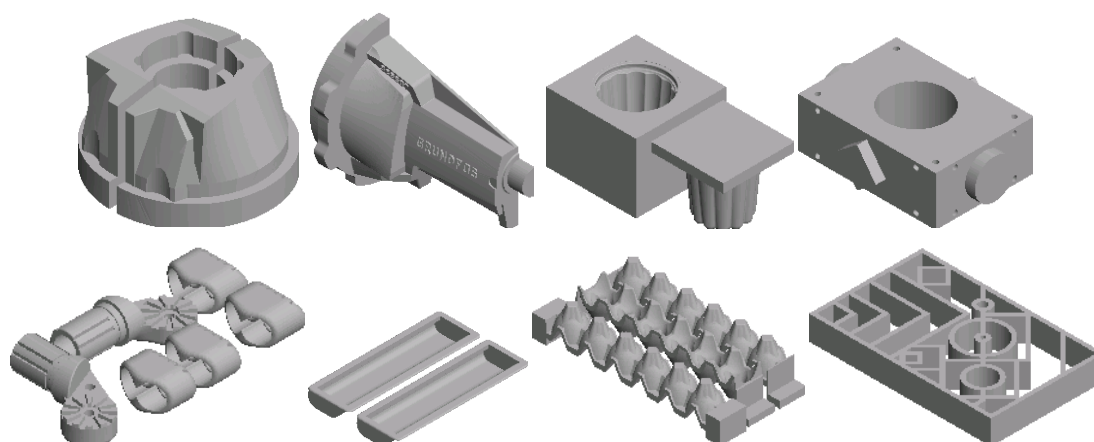
Για να μπορεί να προσδιορισθεί στατιστικά μια αντιπροσωπευτική συνάρτηση προσδιορισμού του μέσου χρόνου απόδοσης επιπέδου σε κατασκευές πρωτοτύπων LOM με LOM1015, τα δεδομένα των 39 δοκιμών πρότυπης μορφής ήταν αναγκαίο να συνδυασθούν και με αντίστοιχα δεδομένα τιμών, των οκτώ παραπάνω ανεξάρτητων παραμέτρων και των χρόνων κατασκευής σε LOM1015, πραγματικών αντικειμένων (που δεν θα είχαν σταθερή κατά Z διατομή). Για το σκοπό αυτό επιλέχθηκαν και καταγράφηκαν τιμές ανεξάρτητων παραμέτρων – μεταβλητών και συνολικοί χρόνοι κατασκευής στη LOM1015 του Εργαστηρίου ΤΚΠ &Ε, για ακόμα 36 χαρακτηριστικά πραγματικά αντικείμενα που είχαν κατασκευασθεί στο Εργαστήριο, με ποικιλία ως προς τη μορφή, το μέγεθος, το πάχος, τη συνθετότητα και την καμπυλότητα τους. Ορισμένα δε από αυτά ήταν ομάδες επιμέρους διατεταγμένων αντικειμένων για ταυτόχρονη κατασκευή, περίπτωση πολύ συχνή στην τεχνολογία LOM για οικονομοτεχνικούς λόγους. Τα αντικείμενα κατασκευάστηκαν από χαρτί LPH042, πάχους 0,1067mm, την κοινότερη πρώτη ύλη της μηχανής LOM 1015 και αυτή που παρουσιάζει τα καλύτερα ποιοτικά αποτελέσματα, με βάση τη σχετική εμπειρία του Εργαστηρίου. Οι παράμετροι ρύθμισης της μηχανής LOM 1015 για την

κατασκευή των αντικειμένων αυτών, καθορίστηκαν με βάση τις συνιστώμενες τιμές από τον κατασκευαστή της, με προσαρμογή ορισμένων από αυτές στις βέλτιστες τιμές που έχει καταδείξει η εμπειρία χρήσης της από τον γράφοντα. Γενικά μπορούν να θεωρηθούν ως σταθερές ή με ελάχιστη και αμελητέα μεταβολή και συνοπτικά δίνονται στον Πίνακα 5.1.3.2.1.

Παράμετροι ρύθμισης LOM 1015	Τιμές παραμέτρων
Feeder Speed (mm/s)	110
Material Advancing Margin (mm)	34
Heater Speed Forw/Back (mm/s)	125/110
Platform Speed (mm/s)	50
Platform Movement (mm)	60 – 80
Platform Retract (mm)	0.35
Bounding Box Width (mm)	5
Bounding Box Corner Radius (mm)	10
Cutting Speed (mm/s)	160-180
Laser Power	8-10
Tiles Size	20-30

Πίνακας 5.1.3.2.1: Τιμές ρύθμισης παραμέτρων κατασκευής LOM1015

Ορισμένα από τα 36 χαρακτηριστικά αντικείμενα που επελέγησαν για τη μοντελοποίηση του χρόνου κατασκευής σε LOM 1015 απεικονίζονται στο Σχήμα 5.1.3.2.4.



Σχήμα 5.1.3.2.4: Χαρακτηριστικά αντικείμενα προσδιορισμού χρόνου LOM

Για την εκμετάλλευση όλων μαζί των δεδομένων χρόνου κατασκευής, από τα 39 πρότυπα δοκίμια και από τα 36 πραγματικά αντικείμενα, καθώς και για την παραστατικότερη συγκριτική αποτίμηση του χρόνου κατασκευής ανεξαρτήτως του ύψους του εκάστοτε αντικειμένου, αποφασίστηκε ο χρόνος κατασκευής σε LOM να υπολογισθεί από τους συνολικούς χρόνους κατασκευής και να εκφράζεται μέσω της υπό προσδιορισμό συνάρτησης ως μέσος χρόνος κατασκευής ανά στρώση MTPL (sec), κατά τον τύπο:

$$MTPL = \frac{T_t}{\left| \frac{Z}{p} \right|} * 60 \quad (5.3)$$

, όπου, MTPL: Ο μέσος χρόνος ανά στρώση σε λεπτά (min)

$T_t$  : Ο συνολικός χρόνος κατασκευής σε ώρες (h)

Z: Το ύψος σε mm

p: Το πάχος του χαρτιού σε mm (0,1067mm για το LPH042)

Με χρήση του μεγέθους MTPL θα είναι δυνατόν κανείς να προεκτιμά το συνολικό χρόνο κατασκευής ενός LOM πρωτοτύπου σύμφωνα με τη σχέση:

$$T_t = 0,5 + \frac{MTPL * N}{60} \quad (h) \quad (5.4)$$

, όπου ο σταθερός παράγων 0,5h αντιστοιχεί στον απαραίτητο πάντοτε χρόνο δημιουργίας υποστρώματος/βάσης για την κατασκευή του αντικειμένου στη μηχανή LOM, που η εμπειρία έχει δείξει ότι ανέρχεται σε αυτό το μέγεθος.

Ο δε συνολικός χρόνος λήψης ενός τελικού πρωτοτύπου LOM θα είναι:

$$T_{\Lambda} = T_{\pi} + T_t + T_{\alpha} \quad (5.5)$$

όπου:

$T_{\pi}$ , ο χρόνος προεπεξεργασίας και προετοιμασίας των προς κατασκευή αρχείων. Είναι της τάξεως της 1 ώρας και στην πλειοψηφία των περιπτώσεων σχεδόν σταθερός

$T_{\alpha}$ , ο χρόνος αποπεράτωσης και φινιρίσματος του πρωτοτύπου, εξαρτώμενος από τη δυσκολία καθαρισμού και τον επιθυμητό βαθμό προστασίας αλλά και βελτίωσης των επιφανειών του πρωτοτύπου. Ο χρόνος αυτός μπορεί να κυμαίνεται από 45 λεπτά ως και 24 ώρες, ο καταγεγραμμένος μέσος όρος του όμως κατά τις δραστηριότητες του Εργαστηρίου ΤΚΠ & Ε είναι περίπου 4 ώρες.

Λαμβάνοντας τους συνήθεις μέσους όρους για  $T_{\pi}$  και  $T_{\alpha}$ , ο απαιτούμενος τελικός χρόνος λήψης από LOM1015 ενός πρωτοτύπου LOM αποπερατωμένης επιφάνειας, μπορεί τελικά να γραφεί:

$$T_{\Lambda} = 5,5 + \frac{MTPL * N}{60} \quad (h) \quad (5.6)$$

### 5.1.3.3 Μοντέλο προεκτίμησης χρόνου κατασκευής σε LOM και λοιπές συνιστώσες χρόνου υλοποίησης

Όπως έχει ήδη γραφεί, ο προσδιορισμός της συνάρτησης MTPL θα γίνει με  $2^{00}$  βαθμού πολυωνυμική προσαρμογή πολλών μεταβλητών, με θεωρούμενες μεταβλητές τα X, Y, Z,  $\rho_{pl}$ , S,  $C_{av}$ ,  $CH_X$  και  $CH_Y$ , οκτώ σε αριθμό. Η συγκεκριμένη μοντελοποίηση επελέγη καθώς όπως είναι γνωστό, κάθε συνάρτηση ανεξαρτήτως της μορφής της είναι δυνατόν να αναλυθεί και εκφρασθεί επαρκώς με πολυώνυμο  $2^{00}$  βαθμού (στις περισσότερες περιπτώσεις) ή και ανώτερης τάξεως (Θεώρημα Taylor).

Σύμφωνα με τη θεωρία της πολυωνυμικής προσαρμογής πολλών μεταβλητών [Kleinbaum, 2007], ο ελάχιστος απαραίτητος αριθμός δειγμάτων «τιμών μεταβλητών

– τιμών συνάρτησης» που είναι απαραίτητος για τον ασφαλή προσδιορισμό του πολυωνύμου δίνονται από τη σχέση:

$$\frac{(n+k-1)!}{k!(n-1)!} * \frac{(n+k)}{n} \quad (5.7)$$

, όπου n: η τάξη του πολυωνύμου

k: ο αριθμός των θεωρούμενων ανεξάρτητων μεταβλητών.

Για την εφαρμοζόμενη περίπτωση n=2 και k=8. Οπότε τα απαραίτητα δείγματα για τον προσδιορισμό της συνάρτησης μέσου χρόνου κατασκευής LOM ανά επίπεδο/στρώση (MTPL) προκύπτει ότι είναι 45. Ο ελάχιστος αυτός αριθμός δειγμάτων υπερκαλύπτεται ικανοποιητικά από τις 39+36= 75 χρησιμοποιούμενες τιμές μέσου χρόνου κατασκευής στρώσης των πρότυπης μορφής δοκιμίων και των πραγματικών αντικειμένων μαζί, για τα οποία συνελέγησαν στοιχεία για μοντελοποίηση.

Τα συλλεχθέντα στοιχεία ανά τεμάχιο, παράμετρο και μέση τιμή χρόνου ανά στρώση που χρησιμοποιούνται στην πολυωνυμική προσαρμογή παρατίθενται στον Παράρτημα Β, μετά το τέλος της Εργασίας.

Ο προσδιορισμός πολυωνύμου προσαρμογής σε συνάρτηση πολλών μεταβλητών υλοποιείται με μεθόδους Αριθμητικής Ανάλυσης και αλγορίθμους προσέγγισης.

Η διαδικασία σήμερα έχει αυτοματοποιηθεί και είναι διαθέσιμη σε εξειδικευμένα πακέτα λογισμικού π.χ. Excel, Matlab, Mathcad, τα οποία διαθέτουν ενσωματωμένες ρουτίνες και συναρτήσεις, είτε στατιστικά πρόσθετα (add-ins) προσαρτήματα για το σκοπό αυτό. Στην παρούσα εργασία επελέγη η ανάλυση να γίνει σε περιβάλλον PTC-Mathcad v.14, που προσφέρει την εμφάνιση και την ευελιξία απλού γραπτού φύλλου εργασίας.

Έχοντας ορίσει έναν πίνακα πεδίου τιμών του MTPL, διαστάσεων 1x75 και έναν πίνακα τιμών των ανεξάρτητων μεταβλητών διαστάσεων 8x75, η συνάρτηση regress του Mathcad χρησιμοποιήθηκε ώστε να εξαχθούν δύο μητρώα.

Το μητρώο συντελεστών/πολλαπλασιαστών “Coeffs” και το μητρώο ταυτοποίησης (identification) “I” των συντελεστών του πίνακα “Coeffs” με τις ανεξάρτητες μεταβλητές.

Η αντιστοίχιση των ανεξάρτητων μεταβλητών της υπό προσδιορισμό συνάρτησης MTPL με τις στήλες του Πίνακα “I”, γίνεται κατά τον ακόλουθο Πίνακα 5.1.3.3.1

Μεταβλητή	X	Y	Z	S	C <sub>av</sub>	CH <sub>x</sub>	CH <sub>y</sub>	ρ <sub>pl</sub>
Στήλη Πίνακα «I»	0	1	2	3	4	5	6	7

Πίνακας 5.1.3.3.1: Αντιστοίχιση μεταβλητών συνάρτησης MTPL με στήλες του πίνακα ταυτοποίησης «I»

Τα δύο αυτά μητρώα “coeff” και “I”, παρατίθενται στο Σχήμα 5.1.3.3.1

	0		0	1	2	3	4	5	6	7
	-2.636·10 <sup>-3</sup>		0	1	0	0	0	0	0	1
1	-4.807·10 <sup>-3</sup>		1	0	1	0	0	0	0	1
2	0.024		0	0	0	1	0	0	0	1
3	-4.63·10 <sup>-6</sup>		0	0	0	0	1	0	0	1
4	0.013		0	0	0	0	0	1	0	1
5	-0.08		0	0	0	0	0	0	1	1
6	0.095		0	0	0	0	0	0	0	1
7	2.183		0	0	0	0	0	0	0	2
8	-2.48		0	0	0	0	0	0	0	1
9	-8.401·10 <sup>-4</sup>		1	0	0	0	0	0	1	0
10	2.833·10 <sup>-3</sup>		0	1	0	0	0	0	1	0
11	2.446·10 <sup>-4</sup>		0	0	1	0	0	0	1	0
12	1.235·10 <sup>-6</sup>		0	0	0	1	0	0	1	0
13	-0.49		0	0	0	0	1	0	1	0
14	0.011		0	0	0	0	0	1	1	0
15	4.875·10 <sup>-4</sup>		0	0	0	0	0	0	2	0
16	-0.771		0	0	0	0	0	0	1	0
17	8.386·10 <sup>-4</sup>		1	0	0	0	0	1	0	0
18	-3.381·10 <sup>-3</sup>		0	1	0	0	0	1	0	0
19	1.396·10 <sup>-4</sup>		0	0	1	0	0	1	0	0
20	-1.54·10 <sup>-6</sup>		0	0	0	1	0	1	0	0
21	0.442	■	0	0	0	0	1	1	0	0
22	-8.309·10 <sup>-3</sup>		0	0	0	0	0	2	0	0
23	0.731		0	0	0	0	0	1	0	0
24	2.973·10 <sup>-3</sup>		1	0	0	0	1	0	0	0
25	-2.874·10 <sup>-3</sup>		0	1	0	0	1	0	0	0
26	-2.033·10 <sup>-3</sup>		0	0	1	0	1	0	0	0
27	9.75·10 <sup>-6</sup>		0	0	0	1	1	0	0	0
28	-0.054		0	0	0	0	2	0	0	0
29	0.744		0	0	0	0	1	0	0	0
30	-3.083·10 <sup>-9</sup>		1	0	0	1	0	0	0	0
31	-3.084·10 <sup>-8</sup>		0	1	0	1	0	0	0	0
32	-9.982·10 <sup>-8</sup>		0	0	1	1	0	0	0	0
33	4.571·10 <sup>-12</sup>		0	0	0	2	0	0	0	0
34	2.182·10 <sup>-5</sup>		0	0	0	1	0	0	0	0
35	-3.172·10 <sup>-5</sup>		1	0	1	0	0	0	0	0
36	5.499·10 <sup>-5</sup>		0	1	1	0	0	0	0	0
37	9.179·10 <sup>-5</sup>		0	0	2	0	0	0	0	0
38	-0.026		0	0	1	0	0	0	0	0
39	1.665·10 <sup>-5</sup>		1	1	0	0	0	0	0	0
40	3.028·10 <sup>-5</sup>		0	2	0	0	0	0	0	0
41	3.532·10 <sup>-4</sup>		0	1	0	0	0	0	0	0
42	1.114		0	0	0	0	0	0	0	0
43	4.921·10 <sup>-3</sup>		1	0	0	0	0	0	0	0
44	-7.205·10 <sup>-6</sup>		2	0	0	0	0	0	0	0

Σχήμα 5.1.3.3.1: Μητρώα συντελεστών πολωνύμου και αντιστοίχισης με μεταβλητές

Ο πολλαπλασιασμός των δύο μητρώων “coeff” και “I” μας παρέχει τελικά και τη μορφή του πολυωνύμου υπολογισμού του μέσου χρόνου κατασκευής στρώσης σε LOM1015, MTPL, σύμφωνα με τη σχέση:

$$MTPL(X, Y, Z, S, Cav, CHX, CHY, ppl) := \sum_{i=0}^{\text{last(coeff)}} \left( \text{coeff}_i \cdot X^{I_i,0} \cdot Y^{I_i,1} \cdot Z^{I_i,2} \cdot S^{I_i,3} \cdot Cav^{I_i,4} \cdot CHX^{I_i,5} \cdot CHY^{I_i,6} \cdot ppl^{I_i,7} \right) \quad (5.8)$$

Το πολυώνυμο της συνάρτησης MTPL είναι εύκολο να προγραμματισθεί σε Mathcad, ή και απλούστερα σε Excel, δίνοντας ανά πάσα στιγμή την προεκτίμηση του μέσου χρόνου κατασκευής στρώσης σε LOM1015.

Όσον αφορά την ποιότητα της παραπάνω πολυωνυμικής προσαρμογής αρκεί να αναφερθεί ότι η μέση επί τοις εκατόν απόκλιση πραγματικών από προϋπολογισμένες τιμές που προκύπτει για τις 75 τιμές που χρησιμοποιήθηκαν για τη συγκρότηση του είναι μόλις 0,045%, μεγαλύτερη δε του 10% διαφορά παρουσιάζεται σε 3 μόνο από τις 75 τιμές. Παρόμοιες ερευνητικές προσπάθειες για την προεκτίμηση χρόνων κατασκευής σε διάφορες μεθόδους ΤΚΠ θεωρούν τα μοντέλα τους ικανοποιητικά όταν αποκλίνουν λιγότερο του 20%. Η δε χρησιμοποίηση του μοντέλου προεκτίμησης χρόνου στα πλαίσια των δραστηριοτήτων του Εργαστηρίου ΤΚΠ & Ε του ΕΜΠ, έχει καταδείξει ότι αυτό, με τις συνήθεις συνθήκες και βέλτιστες ρυθμίσεις επί της LOM1015, σπανίως αποκλίνει πάνω από 4% του πραγματικού χρόνου κατασκευής. Τέλος, θα πρέπει να τονισθεί ότι καθώς το μοντέλο είναι στατιστικό – προσαρμογής, ο συνεχής εμπλουτισμός των αρχικών δεδομένων παραμέτρων και μέσων χρόνων ανά στρώση και με περισσότερα, νέα δεδομένα αυξάνει διαρκώς την ακρίβεια προσδιορισμού των συντελεστών του πολυωνύμου MTPL.

#### 5.1.3.4 Παράμετροι κοστολόγησης & συσχέτιση χρόνου – κόστους κατασκευής

Έχοντας καταρτίσει ένα ικανοποιητικά αξιόπιστο μοντέλο προσδιορισμού χρόνου κατασκευής σε LOM (1015), είναι σχετικά εύκολο να συντεθεί και ο τύπος προσδιορισμού του κόστους κατασκευής πρωτοτύπων με την τεχνολογία LOM. Γενικά το συνολικό καθαρό κόστος K κατασκευής πρωτοτύπων LOM, όπως εξάλλου και για τις περισσότερες τεχνολογίες ΤΚΠ, συντίθεται από τις εξής συνιστώσες:

$$K = K_{\pi} + K_{\kappa} + K_{\alpha} \quad (5.9)$$

, όπου:  $K_{\pi}$ , το κόστος προεπεξεργασίας και προετοιμασίας

$K_{\kappa}$ , το κόστος πραγματικής κατασκευής επί της μηχανής LOM

$K_{\alpha}$ , το κόστος καθαρισμού και αποπεράτωσης (φινιρίσματος)

Το μεν  $K_{\pi}$  περιλαμβάνει συνήθως την τοποθέτηση των υπό κατασκευή αντικειμένων στον επιθυμητό προσανατολισμό και σύνθεση κατασκευής τους, την έναρξη της μηχανής και τις ενέργειες προετοιμασίας λειτουργίας της, τη ρύθμιση των επιθυμητών παραμέτρων κατασκευής και την κατασκευή βάσης. Κατά μέσο όρο οι ενέργειες αυτές απαιτούν περί την 1 ώρα (περισσότερο μόνο για σύνθετα και πολλά αντικείμενα σε μια κατασκευή) και συνηθίζεται διεθνώς σε γραφεία παροχής υπηρεσιών να κοστολογούνται κατ’αποκοπήν (περί τα 50 €) με βάση τα ωρομίσθια

εξειδικευμένης τεχνικής εργασίας προσωπικού επιστημονικής/τεχνολογικής κατάρτισης.

Το δε  $K_a$ , σε άμεση συνάρτηση με το αντίστοιχο μέγεθος του  $X_a$ , κοστολογείται με βάση ωρομίσθια εξειδικευμένου τεχνίτη και τις απαιτούμενες ώρες καθαρισμού και αποπεράτωσης, που η εμπειρία δείχνει ότι κυμαίνονται από 45 λεπτά για απλά συμπαγή αντικείμενα με ελάχιστο φινίρισμα, έως ένα πλήρες 24ωρο για πολλά ή σύνθετα αντικείμενα με εκτεταμένο ή ιδιαίτερο (π.χ. φαβή συγκεκριμένου χρώματος) φινίρισμα. Η πλειοψηφία των περιπτώσεων όμως έχει καταδείξει ότι ο καθαρισμός και το μέσο αποδεκτό φινίρισμα με βερνίκι συνήθων πρωτοτύπων LOM απαιτούν περί τις 4 ώρες με επίσης κατ'αποκοπήν χρέωση που δεν ξεπερνά τα 50-80 €.

Ο σημαντικότερος προσθετός του κόστους υλοποίησης πρωτοτύπων LOM, είναι το κόστος κατασκευής επί της μηχανής LOM,  $K_K$ .

Αυτό περεταίρω μπορεί να αναλυθεί σε:

$$K_K = K_X + K_L + K_E + K_A \quad (5.10)$$

, όπου:  $K_X$ , το κόστος του χαρτιού που αναλώνεται

$K_L$ , το κόστος αναγόμωσης/αντικατάστασης της μονάδας Laser που αναλώνεται

$K_E$ , το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας που καταναλώνει η μηχανή

$K_{A-\Sigma}$ , το κόστος απόσβεσης και συντήρησης του εξοπλισμού (πλην laser)

Κατόπιν σχετικών υπολογισμών με βάση τις τεχνικές προδιαγραφές της μονάδας LOM, της τιμής αγοράς της και των ακόλουθων παραδοχών:

- Ορίζοντας απόσβεσης μηχανής τα 15 έτη, με 250 εργάσιμες ημέρες λειτουργίας ανά έτος και λειτουργία της στο 1/3 των ενεργών ημερών (όπως θα συνέβαινε σε ένα μέσο γραφείο παροχής υπηρεσιών)
- Χρέωση της Ηλ. Ενέργειας με επαγγελματική τιμολόγηση (~ 0,1 €/KWh)
- Κόστος αναγόμωσης Laser 3000€, ανά 2500 ώρες, αντικατάστασης 5000€ μετά τρεις αναγομώσεις
- Σημερινό κόστος 1 ρολού χαρτιού μήκους 750m περίπου (κατά X), 450 €,

, είναι έγκυρο να θεωρηθεί ότι οι σημαντικότεροι κοστολογικοί παράγοντες είναι η πρώτη ύλη και η ανάλωση του laser. Δεδομένου μάλιστα ότι το laser δεν ενεργοποιείται καθ'όλη τη διάρκεια της δημιουργίας ενός στρώματος καθώς μεσολαβούν πάγοι χρόνοι επίστρωσης και συγκόλλησης πρ.ύλης, χρόνοι μετακίνησης του plotter κλπ., οι παράγοντες  $K_E$  και  $K_{A-\Sigma}$  καλύπτονται επαρκώς και μπορούν να παραλειφθούν, αν γίνει η απλοποιητική παραδοχή ο παράγων  $K_L$  να υπολογισθεί για το σύνολο του μέσου χρόνου απόδοσης των επιπέδων κατασκευής πρωτοτύπων LOM.

Έτσι για το  $K_K$ , ισχύει τελικά η σχέση:

$$K_K = 1,1 * \frac{\left| \frac{Z}{0,1067} \right| * (X+44)}{750000} * 450€ + \frac{\left| \frac{Z}{0,1067} \right| * MTPL}{2500*60} * 3000€ \quad (5.11)$$

, απλοποιούμενη σε:



$$K_k = \left| \frac{Z}{0,1067} \right| * \left( \frac{(X+44)}{1515,15} + \frac{MTPL}{50} \right) \text{ €} \quad (5.12)$$

Έτσι π.χ. αν για ένα μέσου μεγέθους και συνθετότητας αντικείμενο LOM, με διαστάσεις  $X=180\text{mm}$ ,  $Y=160\text{mm}$ ,  $Z=80\text{mm}$ , για το οποίο απαιτείται το σύνηθες φινίρισμα, έχει υπολογισθεί από τη συνάρτηση της παραγράφου 5.1.3.3.  $MTPL=2,1$  min, τότε για αυτό θα προκύψει:

- Κόστος κατασκευής  $K_k = 142,40 \text{ €}$
- Συνολικό καθαρό κόστος  $K = 242,40 \text{ €}$

Βέβαια, ειδικά για τις περιπτώσεις των ιδιωτικών γραφείων παροχής υπηρεσιών, πρέπει να τονισθεί πως το κόστος αυτό προσαυξάνεται πάντοτε με το περιθώριο κέρδους τους και με τους ανεξάρτητους και χωριστά επιβαλλόμενους φόρους (π.χ. ΦΠΑ).

#### 5.1.4 Διαστασιολογική Ακρίβεια και Ποιότητα επιφάνειας πρωτοτύπων LOM

Στην ΤΚΠ ένα κεφαλαιώδες ζήτημα είναι πάντοτε η διαστασιολογική ακρίβεια και η ποιότητα επιφανειών των κατασκευαζόμενων αντικειμένων. Και οι δύο αυτοί παράγοντες είναι σημαντικοί τόσο για τη συνολική ποιότητα των ίδιων των πρωτοτύπων, όσο και για επόμενα βήματα στα οποία αυτά τυχόν χρησιμοποιούνται, όπως δοκιμές συναρμολόγησης, λειτουργία μηχανισμών και φυσικά διαδικασίες ΤΚΕ. Καθώς συχνά διαδικασίες βελτίωσης της ποιότητας επιφάνειας (π.χ. λείανση, επικαλύψεις, επιστρώσεις) επηρεάζουν την ακρίβεια, στη διεθνή βιβλιογραφία της ΤΚΠ συνηθίζεται να εξετάζονται από κοινού.

Παρά το γεγονός ότι υπάρχει σχετική βιβλιογραφία, που αναφέρεται και στην τεχνολογία LOM, [Childs & Juster, 1994; Ippolito et al., 1995; Jacobs, 1992; Kruth, 1991; Park et al., 2000; Reeves & Cobb, 1996; Shellabear, 1999], εν τούτοις αυτή προσφέρει ελάχιστα χρήσιμα και αξιοποιήσιμα αποτελέσματα σχετικά με την τεχνολογία LOM, για τους παρακάτω λόγους:

- Η κατ'ισχυρισμόν του κατασκευαστή Helisys Inc. διαστασιολογική ακρίβεια του συστήματος LOM1015 των συνολικά  $\pm 0,25\text{mm}$  και 2% διαστολής στην κατεύθυνση του άξονα Z, στις περισσότερες δημοσιευμένες εργασίες δεν επιβεβαιώνονται πάντα, ούτε και από τη χρήση της LOM 1015 στο Εργαστήριο ΤΚΠ & Ε του ΕΜΠ.
- Οι διάφορες συγκριτικές μελέτες (benchmarks) μεθόδων ΤΚΠ που έχουν αναφερθεί και παραπάνω στην παρούσα εργασία, δεν αναφέρονται πάντοτε με σαφήνεια στις αξιολογούμενες ως προς την ακρίβεια γεωμετρικές και διαστάσεις και τις προκύπτουσες αποκλίσεις.
- Σε πολλές από τις μελέτες αυτές είναι επίσης σύνηθες η ακρίβεια των τεχνολογιών και συστημάτων ΤΚΠ να υπολογίζεται και εκφράζεται με το συνολικό μέσο όρο τους «και στους τρεις άξονες». Είναι όμως σαφές ότι η ΤΚΠ ως διαστρωματική διαδικασία από τη φύση της συχνά είναι ανισότροπη, με αξιοσημείωτες διαφορές στη φύση και το μέγεθος της ακρίβειας στις διάφορες κατευθύνσεις.
- Στις περισσότερες μελέτες, λίγα ή καθόλου στοιχεία παρέχονται για τις ρυθμίσεις των μηχανών ΤΚΠ, τις επικρατούσες συνθήκες περιβάλλοντος κατά την κατασκευή και κατά τις μετρήσεις και το βαθμό αποπεράτωσης και φινιρίσματος των πρωτοτύπων. Κατά συνέπεια είναι δύσκολο τα αποτελέσματα αυτά να

υιοθετηθούν και να αξιοποιηθούν σε πραγματική βάση για την ενάσκηση ΤΚΠ με LOM.

- Τέλος, σημαντικές διαφορές παρατηρούνται στα ίδια τα αποτελέσματα για τις ίδιες τεχνολογίες ΤΚΠ και ειδικά στην περίπτωση της LOM μεταξύ διαφορετικών μελετών, αλλά και στον τρόπο με τον οποίο η ακρίβεια εκφράζεται και παρουσιάζεται (π.χ. μέσος όρος σφάλματος, σφάλμα ε90, RMS αποκλίσεις, εύρος σφαλμάτων, ποιότητες IT).

Για όλα τα παραπάνω, και καθώς επίσης οι Ippolito, Iulliano & Gatto [Ippolito et al., 1995] σαφώς αναφέρουν πως «ειδικά για την περίπτωση της LOM το αποτέλεσμα επηρεάζεται σημαντικά από την εμπειρία και τις επιβαλλόμενες συνθήκες από το χρήστη/χειριστή», αποφασίστηκε να μελετηθούν πειραματικά και να αξιολογηθούν η αποδιδόμενη διαστασιολογική ακρίβεια, και ποιότητα επιφανειών του συστήματος LOM 1015, προκειμένου να διερευνηθούν σχετικοί παράγοντες επίδρασης και ανευρεθούν πιθανοί τρόποι βελτίωσης τους για την κατασκευή πρωτοτύπων στο ΕΜΠ με τον εν λόγω εξοπλισμό. Η σχετική προσπάθεια στοχεύθηκε να γίνει με τρόπο σαφή, συστηματικό, αλλά και οικονομικό. Τα σχετικά αποτελέσματα ενσωματώνονται ως «στοιχεία γνώσης» τόσο στη μεθοδολογία υποστήριξης απόφασης, όσο και στη ΒΔ που προτάθηκαν σε προηγούμενα κεφάλαια. Πέραν αυτού είναι δυνατόν γενικά να αξιοποιηθούν, όπως και γίνεται ήδη στο Εργαστήριο ΤΚΠ & Ε, και, α) ως Οδηγίες σχεδιασμού (Design Guidelines) για τελικούς χρήστες LOM ως προς την αντιστάθμιση συστηματικών σφαλμάτων (error compensation) σε κρίσιμες διαστάσεις, β) ως Βοηθήματα/Κριτήρια στην απόφαση προσανατολισμού κατασκευής τεμαχίων LOM και του βαθμού φινιρίσματός τους, και γ) για τον χαρακτηρισμό και αξιολόγηση της ποιότητας κατασκευής και λειτουργίας της μονάδας LOM1015 και των μηχανισμών οδήγησης των κινούμενων μερών της.

Τα αποτελέσματα αυτά έχουν δημοσιευθεί από το συγγραφέα της παρούσας σε διεθνές συνέδριο (Euro RP/10<sup>th</sup> European Conference on RP&M), στην εργασία με τίτλο “On the accuracy performance of the Laminated Object Manufacturing Technology”, [Polydoras & Sfantsikopoulos, 2001].

#### **5.1.4.1 Παράγοντες διαστασιολογικών αποκλίσεων**

Πολλοί είναι οι παράγοντες που μπορεί να υποβαθμίζουν την ακρίβεια πρωτοτύπων ΤΚΠ γενικά, και τεχνολογίας LOM ειδικότερα. Ορισμένοι έχουν αναφερθεί και στο πρώτο μέρος της παρούσας εργασίας, οι δε σημαντικότεροι γενικά συνοψίζονται παρακάτω:

- Η ποιότητα και αρτιότητα της 3D ψηφιακής γεωμετρίας και των αρχείων STL που την μεταφέρουν προς κατασκευή στις διατάξεις ΤΚΠ.
- Η ίδια η φύση της τεχνολογίας ΤΚΠ που χρησιμοποιείται (π.χ. σημειακή ή επιφανειακή στερεοποίηση φωτοπολυμερών, εναπόθεση τηγμάτων, κοπή φύλλων κλπ.) και η ένταση των σχετικών φαινομένων που διέπουν τη στερεοποίηση ή γενικά τη διαστρωματική κατασκευή (π.χ. υψηλές θερμοκρασίες, έντονη ψύξη, καύση, τήξη κλπ.)
- Το χρησιμοποιούμενο υλικό, η συμπεριφορά του και η σταθερότητά του στην επίδραση εξωτερικών συνθηκών και παραγόντων (π.χ. φως, υγρασία, καθαριστικά κλπ.)
- Το πάχος της χρησιμοποιούμενης στρώσης υλικού
- Ο απαιτούμενος ή μη καθαρισμός, και για κάποιες τεχνολογίες αποπεράτωση (post-curing) του πρωτοτύπου.

- Το απαιτούμενο ή μη φινίρισμα, η ένταση και η έκτασή του.
- Η ποιότητα και ακρίβεια των μηχανικών και κινηματικών μερών της εκάστοτε χρησιμοποιούμενης μηχανής ΤΚΠ και του λογισμικού λειτουργίας της και τα συστηματικά σφάλματα που αυτά τυχόν εισάγουν.

Η παρούσα έρευνα, για να εστιάσει κυρίως στα εγγενή χαρακτηριστικά της τεχνολογίας LOM, στα συστηματικά σφάλματα της μηχανής LOM 1015 και στη συμπεριφορά των κυριότερων πρώτων υλών της (LPH042 & LPH080), διενεργήθηκε με απλής γεωμετρίας και επαληθευμένα ως προς την αρτιότητά τους 3D CAD μοντέλα και αρχεία STL και με διαδικασίες φινιρίσματος μόνο στα δοκίμια αξιολόγησης της ποιότητας επιφάνειας και όχι σε αυτά της διαστασιολογικής ακρίβειας. Για τα τελευταία θεωρήθηκε και τηρήθηκε η αληθής παραδοχή ότι στην περίπτωση γεωμετρικών πρωτοτύπων, όπου και ενδιαφέρει η μέγιστη ακρίβεια διαστάσεων, το φινίρισμα σε LOM περιορίζεται στο ελάχιστο και μόνο σε μη κρίσιμες ή λειτουργικές επιφάνειες.

#### 5.1.4.2 Σχεδιασμός και κατασκευή δοκιμών έρευνας

Τα πρότυπα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν στην έρευνα σχεδιάστηκαν με βάση τους παρακάτω κανόνες και στόχους:

- Να διερευνηθούν με διαφορετικά δοκίμια ξεχωριστά οι αποκλίσεις διαστάσεων στο «επίπεδο XY» και «στον άξονα Z» (κατεύθυνσης κτίσεως).
- Καθώς αναφέρεται, αλλά και έχει παρατηρηθεί στα πρωτότυπα LOM διαστολή στην κατεύθυνση Z, σχεδιάστηκαν και εξετάστηκαν για την ακρίβεια τους σε αυτόν τον άξονα δοκίμια διαφορετικών παχών, για να διερευνηθεί τυχόν διαφοροποίηση του βαθμού διαστολής με το πάχος.
- Χρησιμοποίηση διαφορετικών ανεξάρτητων δοκιμών για μετρήσεις διαπίστωσης της ποιότητας επιφάνειας.
- Τα δοκίμια ακρίβειας στο επίπεδο XY να περιλαμβάνουν ταυτόσημης κλίμακας ζεύγη εξωτερικών και εσωτερικών διαστάσεων.
- Τα μεγέθη των μετρούμενων διαστάσεων στα δοκίμια επιπέδου XY και άξονα Z να παρουσιάζουν κλιμάκωση, για τη διαπίστωση πιθανής συσχέτισης αποκλίσεων με την ονομαστική διάσταση.
- Ποσοτικοποίηση αποκλίσεων επιπέδου XY σε διαστάσεις που αποδίδονται τόσο με κίνηση ενός κύριου άξονα μόνο, όσο και με συνδυασμό κινήσεων των δύο κύριων αξόνων X και Y (Κύκλοι και διαγώνιες γραμμικές διαστάσεις).

Κατά τον τρόπο αυτό, για τον έλεγχο διαστασιολογικών αποκλίσεων δημιουργήθηκαν 3 σειρές δοκιμών:

##### A) Δοκίμια ελέγχου ακρίβειας στον άξονα Z

Κύλινδροι ύψους 20-40-80-140mm, συμπαγείς, και πάχους 10mm και 2,5mm. Οι κύλινδροι επελέγησαν σε αυτές τις εκδοχές πάχους, αντιπροσωπεύοντας τυπικά πάχη των πιο διαδεδομένων εφαρμογών πρωτοτύπων LOM, δηλαδή για συμπαγή μοντέλα (π.χ. ως μοντέλα τύπωσης σε άμμο), για μεταλλικά χυτά αντικείμενα και για πλαστικά αντικείμενα. Επιπλέον, στο ύψος των 80mm δημιουργήθηκαν τρεις διαφορετικές διάμετροι δοκιμών για να διερευνηθεί η επίδραση της φαινομενικά ανεξάρτητης αυτής τιμής στο καθ' ύψος σφάλμα.

Τα δοκίμια ελέγχου ακρίβειας στον άξονα Z, απεικονίζονται στο Σχήμα 5.1.4.2.1



Σχήμα 5.1.4.2.1: Δοκίμια ελέγχου ακρίβειας στον άξονα Z

#### B) Δοκίμια ελέγχου ακρίβειας επιπέδου XY

Αποτελούνται από ομοιόμορφη ως προς τον άξονα Z διατομή, στην οποία συνδυάζονται ζεύγη εσωτερικών και εξωτερικών, κυκλικών και γραμμικών διαστάσεων.

Εύρος κλιμάκωσης διαστάσεων κατά X: 30-225mm

Εύρος κλιμάκωσης διαστάσεων κατά Y: 30-140mm

Διαγώνιες γραμμικές διαστάσεις σε γωνία 45 ° και ως προς τον X και ως προς τον Y άξονα.

Τα δοκίμια ελέγχου ακρίβειας επιπέδου XY που τέθηκαν προς κατασκευή στη LOM1015 απεικονίζονται στο Σχήμα 5.1.4.2.2, οι δε αναλυτικές διαστάσεις τους που μετρήθηκαν δίνονται στο Παράρτημα Γ.



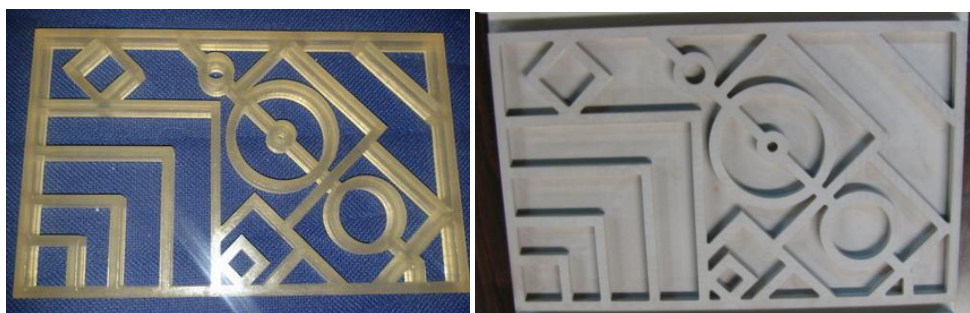
Σχήμα 5.1.4.2.2: Δοκίμια LOM ελέγχου ακρίβειας επιπέδου XY

Τα δοκίμια κατασκευάστηκαν στη LOM1015 συνολικά 3 φορές, 2 σε χαρτί LPH042 πάχους 0,1067mm, με ύψος 30 και 10mm αντίστοιχα και 1 φορά σε χαρτί LPH080 πάχους 0,2023mm σε ύψος 15mm.

Το ίδιο δοκίμιο για λόγους σύγκρισης της LOM με διαφορετικές τεχνολογίες ΤΚΠ, κατασκευάστηκε επίσης με τη μηχανή EOS STEREOS DESKTOP S, τεχνολογίας SLA, του Εργαστηρίου Σύγχρονων Τεχνολογιών Παραγωγής & Ελέγχου του Πανεπιστημίου Πειραιά, σε φωτοπολυμεριζόμενη εποξειδική ρητίνη DSM – Somos 7110 και μετρήθηκε στο ΕΜΠ με τα ίδια μέσα και συνθήκες όπως τα δοκίμια της LOM. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων αυτών πέραν της άμεσης σύγκρισης των δύο τεχνολογιών που θα εκτεθεί παρακάτω, αξιοποιήθηκαν και έχουν δημοσιευθεί σε παράλληλη συναφή έρευνα που διεξήχθη στο Πανεπιστήμιο Πειραιά, [Γιαννατοής, 2004], με αντικείμενο την τεχνολογία της Στερεολιθογραφίας.

Αργότερα και αφού ο εξοπλισμός του Εργαστηρίου ΤΚΠ & Ε συμπληρώθηκε με επιτραπέζια κλίμακας CNC φρέζα 3 αξόνων, το ίδιο δοκίμιο ακρίβειας XY, κόπηκε από κατεργάσιμη σανίδα PUR Cibatool 25x500x1500 4ST (PUR modeling board – CIBA Chemicals/Huntsman) και σε αυτήν και επίσης μετρήθηκε για λόγους

εκτίμησης επιδόσεων της φρέζας και σύγκρισης με την LOM. Τα δοκίμια SLA και κοπής σε Desktop CNC απεικονίζονται στο Σχήμα 5.1.4.2.3



Σχήμα 5.1.4.2.3: Δοκίμιο ακρίβειας XY σε SLA & Desktop CNC

Γ) Δοκίμια ελέγχου ποιότητας επιφάνειας – τραχύτητας

Για τις δοκιμές ελέγχου αποδιδόμενης ποιότητας επιφάνειας στα πρωτότυπα LOM, όπως αυτά προκύπτουν αμέσως μετά τη λήψη τους από τη μηχανή, αλλά και μετά από διάφορων επιπέδων διαδικασία σφράγισης επιφάνειας – φινιρίσματος, σχεδιάστηκε και χρησιμοποιήθηκε παραλλαγή του αναφερομένου στη βιβλιογραφία δοκιμίου “Truncheon”, [Reeves & Cobb, 1997; Campbell & Martorelli, 2002] που κρίθηκε ως ιδιαίτερα κατάλληλο. Το δοκίμιο, που απεικονίζεται στο Σχήμα 5.1.4.2.4, διαθέτει παραλληλεπίπεδα με έδρες επαρκούς επιφάνειας και με διαδοχική αλλαγή της κλίσης τους ανά  $10^\circ$ , που καλύπτουν όλες τις γωνίες από  $0^\circ$  έως  $180^\circ$  ως προς το επίπεδο κατασκευής. Στα άκρα του διαθέτει κυλινδρικές απολήξεις για την εύκολη έδραση του (π.χ. σε V-Shaped holders) ή την πρόσδεσή του σε περιστροφικό διαιρέτη για εύκολη και γρήγορη τραχυμέτρηση όλων των εδρών του. Κατασκευάστηκε σε τρία τεμάχια για να μπορεί σε καθένα να αξιολογηθεί διαφορετικής έκτασης φινιρίσμα. Για λόγους παράλληλης έρευνας και σύγκρισης το παρόμοιο δοκίμιο κατασκευάστηκε και από το ΠΠ σε SLA EOS Stereos Desktop, από ρητίνη DSM Somos 7110 και τραχυμετρήθηκε με τον εξοπλισμό του ΕΜΠ, [Γιαννατσής, 2004]



Σχήμα 5.1.4.2.4: Τα “Truncheons” αξιολόγησης ποιότητας επιφάνειας

Οι ρυθμίσεις μηχανής LOM1015 που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή όλων των δοκιμίων διαπίστωσης της αποδιδόμενης ακρίβειας κατά Z και XY, καθώς και των δοκιμίων τραχύτητας και οι συνθήκες που τηρήθηκαν δίδονται στον Πίνακα 5.1.4.2.1

Υλικό	Παράμετρος	Τιμή
LPH042 (0.1067mm Thickness)	Laser Power (% * 25W)	9
	Cutting Speed (mm/sec)	180
	Heater Temp. (°C)	200
	Heater Speed (mm/sec)	115-175
	Platform Retract (mm)	0.35
	Part Surface Temp. (°C)	35-50
	Room Temp. (°C)	20-23
LPH080 (0.2023mm Thickness)	Laser Power (% * 25W)	13
	Cutting Speed (mm/sec)	150
	Heater Temp. (°C)	200
	Heater Speed (mm/sec)	110-130
	Platform Retract (mm)	0.35
	Part Surface Temp. (°C)	30-50
	Room Temp. (°C)	20-23

Πίνακας 5.1.4.2.1: Ρυθμίσεις και συνθήκες κατασκευής δοκιμίων ακρίβειας & τραχύτητας

### 5.1.4.3 Μέσα και συνθήκες μετροτεχνικού ελέγχου και τραχυμετρήσεων

Οι διαστασιολογικές μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση σταθερής μηχανής μέτρησης συντεταγμένων (Coordinate Measuring Machine – CMM) DEA – B&S Mistral 070705 τύπου γέφυρας, που είναι εγκατεστημένη στο Εργαστήριο ΤΚΠ & Ε.

Η εν λόγω μηχανή, σύμφωνα με το πρότυπο ISO 10360–2, έχει αβεβαιότητα μέτρησης:

$$U3 (\mu m) = MPEE = 3 + L (\text{mm})/250 \text{ (Volumetric length measuring uncertainty)}$$

$$R (\mu m) = MPEP = 3 \text{ (Volumetric probing uncertainty)}$$

, όπου L (σε mm) η μετρούμενη διάσταση και U3, R (σε  $\mu\text{m}$ ) η αβεβαιότητα στο χώρο μέτρησης, ανεξαρτήτως διεύθυνσης, κατά τη μέτρηση διαστάσεων και σφάλματος μορφής αντίστοιχα. (Πιστοποιητικό διακρίβωσης MI808070705297 – DEA spa).

Για την καταγραφή των σημείων χρησιμοποιήθηκε κεφαλή Renishaw PH10M (s/n L96618) σε συνδυασμό με εργαλείο αποτελούμενο από στέλεχος τύπου TP2 (s/n M50597) του οίκου Renishaw Ltd., επέκταση μήκους 10 mm και απολήξη (tip) τύπου “ruby–ball tip” μήκους 20 mm και διαμέτρου 2 mm (tip2 by 20).

Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε ειδικά διαμορφωμένο χώρο του εργαστηρίου ΤΚΠ&Ε, ο οποίος είναι θερμοκρασιακά σταθερός (θερμοκρασία χώρου:  $20 \pm 1.5^\circ\text{C}/12\text{h}$ , καταγραφικά ελέγχου: TESTO 175H2, ακρίβεια ένδειξης  $\pm 0.2^\circ\text{C}$  και LT Lutron TM 916, (s/n P842776)  $\pm [1\% + 1^\circ\text{C}]$ ). Ο χώρος είναι επίσης ελεγχόμενος από πλευράς δονήσεων, υγρασίας, σκόνης κ.α. παραγόντων που επηρεάζουν την διευρυμένη αβεβαιότητα των μετρητικών αποτελεσμάτων .

Κατά τη συνολική διεξαγωγή και επεξεργασία των μετρήσεων με την παραπάνω μηχανή CMM χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό PC – DMIS v. 3.7 MR2 του οίκου Wilcox Assoc. Inc. στο οποίο οι αλγόριθμοι μαθηματικής προσαρμογής των μετρούμενων σημείων σε γεωμετρικά στοιχεία (features) είναι πιστοποιημένοι σύμφωνα με το πρότυπο ISO 10360-5 από το ινστιτούτο PTB (Physicalish-Technische Bundesanstalt).

Για την εξασφάλιση της απαιτούμενης σταθερότητας και επαναληψιμότητας κατά τις μετρήσεις, η τοποθέτηση, στήριξη και πρόσδεση του εξαρτήματος στην τράπεζα εργασίας της μηχανής CMM έγινε με ειδικά εξαρτήματα – ιδιοσυσκευές συγκράτησης που το Εργαστήριο διαθέτει για το σκοπό αυτό.

Ειδικά για τα δοκίμια ακρίβειας κατά Z, οι μετρήσεις επιβεβαιώθηκαν και με διακριβωμένα μικρόμετρα κατάλληλου μεγέθους, ακρίβειας μέτρησης 0,01mm.

Για τις τραχυμετρήσεις χρησιμοποιήθηκε τραχύμετρο επαφής (profilometer) Taylor Hobson Surtronic 3+, που διαθέτει το εργαστήριο ΤΚΠ & Ε του ΕΜΠ.

Για την αποτίμηση της ποιότητας επιφανειών, επελέγη να μετρηθούν στα αντικείμενα σε διάφορες θέσεις και προσανατολισμούς τα ευρέως διαδεδομένα μεγέθη της μέσης τραχύτητας Ra και μέγιστης τραχύτητας Rt.

#### 5.1.4.4 Ακρίβεια κατά τον άξονα Z

Το ύψος όλων των LOM δοκιμίων ακρίβειας κατά Z μετρήθηκε ακτινικά σε τέσσερις θέσεις για κάθε δοκίμιο (στις 0, 90, 180 και 270 μοίρες) και ως μετρηθέν ύψος υπολογίστηκε και θεωρήθηκε ο μέσος όρος των τεσσάρων αυτών τιμών.

Οι μετρήσεις αρχικά ελήφθησαν αμέσως μετά την απομάκρυνση των στηλών περίσσειας υλικού για τη λήψη των δοκιμίων και επαναλήφθηκαν διαδοχικά και με την ίδια σειρά αρκετές φορές τις επόμενες ώρες και ημέρες. Ως μονάδα αναφοράς χρησιμοποιήθηκαν οι ώρες μετά τη διαδικασία καθαρισμού – λήψης. Παρά το γεγονός ότι οι μετρήσεις έγιναν σε εσωτερικό χώρο, ελήφθησαν μετεωρολογικά δεδομένα εξωτερικής θερμοκρασίας και υγρασίας ατμόσφαιρας για τις μέρες και ώρες των μετρήσεων από τον εγκατεστημένο στο ΕΜΠ μετεωρολογικό σταθμό, προκειμένου να μελετηθεί η επίδραση κυρίως της υγρασίας στη μεταβολή του ύψους των δοκιμίων (Σχήμα 5.1.4.4.1). Σημειώνεται επίσης ότι τα δοκίμια κατά Z διατηρήθηκαν χωρίς σφράγιση επιφανειών – φινίρισμα.

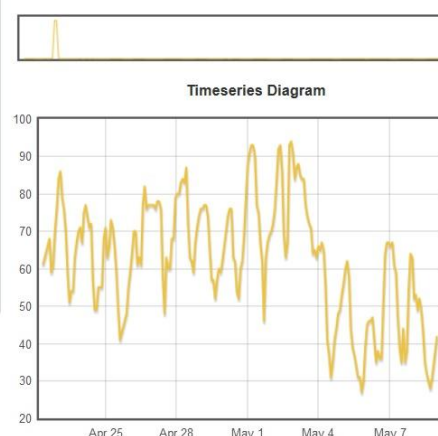
#### Timeseries Details

Download Timeseries in plain text from here

ID	233
Related Station	NTUA Campus
Name	2-Hum_Raw
Variable	Humidity
Unit Of Measurement	%
Precision	0
Time Zone	EET (UTC+0200)
Remarks	Type: Raw data
Instrument	Temperature & humidity sensor
Start Date	1998/12/10 16:30
End Date	2013/06/19 13:30
<b>Time stamps properties</b>	
Time scale	Ten-minute - 10 minute(s)
Time stamps regularity	Time step is not strict
Time stamps reference	Instantaneous values
Actual offset of reference	0 minutes, 0 months

Station "NTUA University Campus of Zografou", Copyright (c) 1993-2011, National Technical University of Athens.

Drag over the **overview** diagram and zoom to a specific period of time.

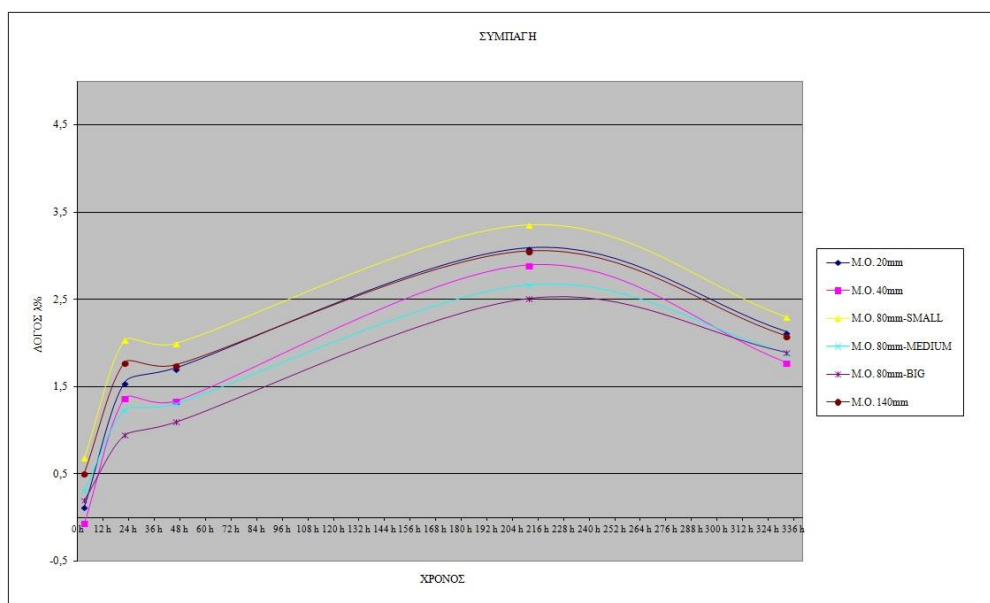


Σχήμα 5.1.4.4.1: Σχετική υγρασία στο ΕΜΠ (Ζωγράφου) τις ημέρες των μετρήσεων

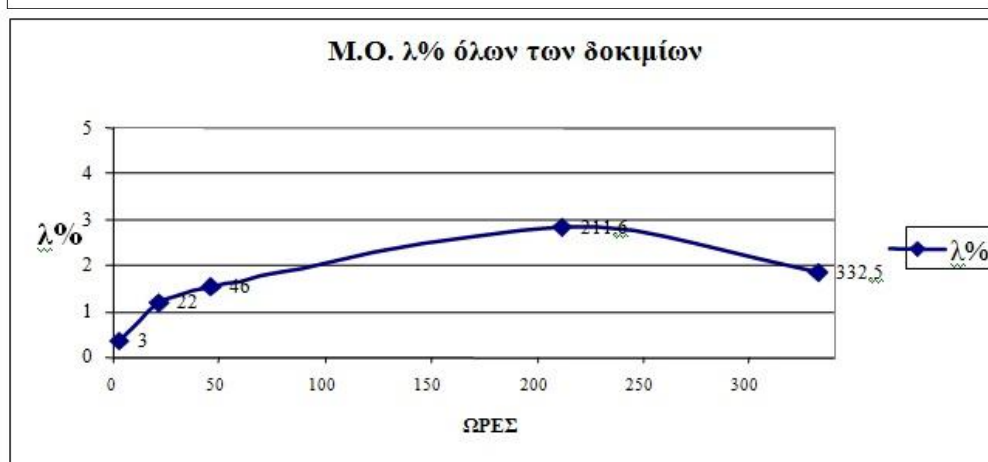
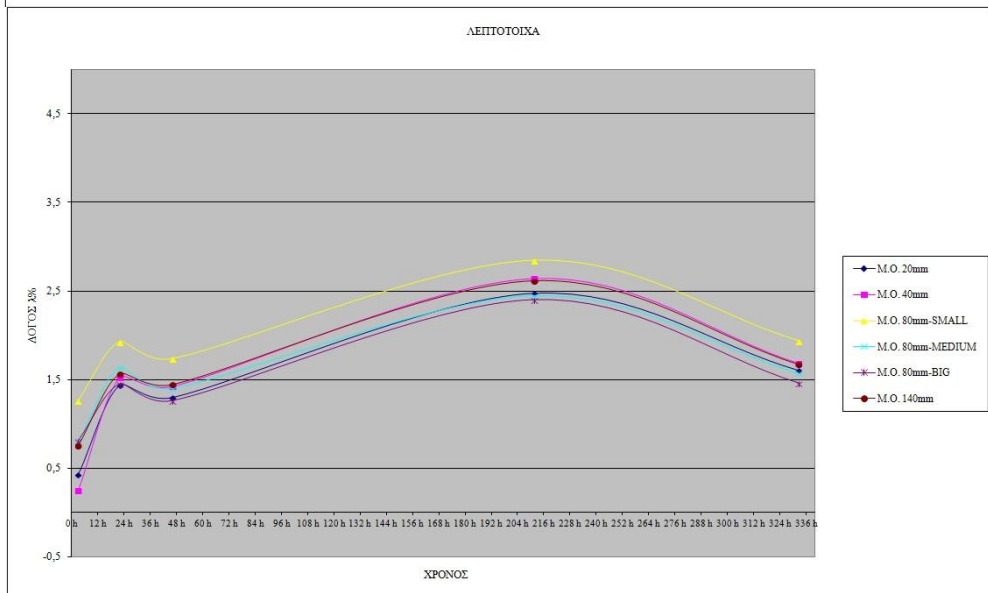
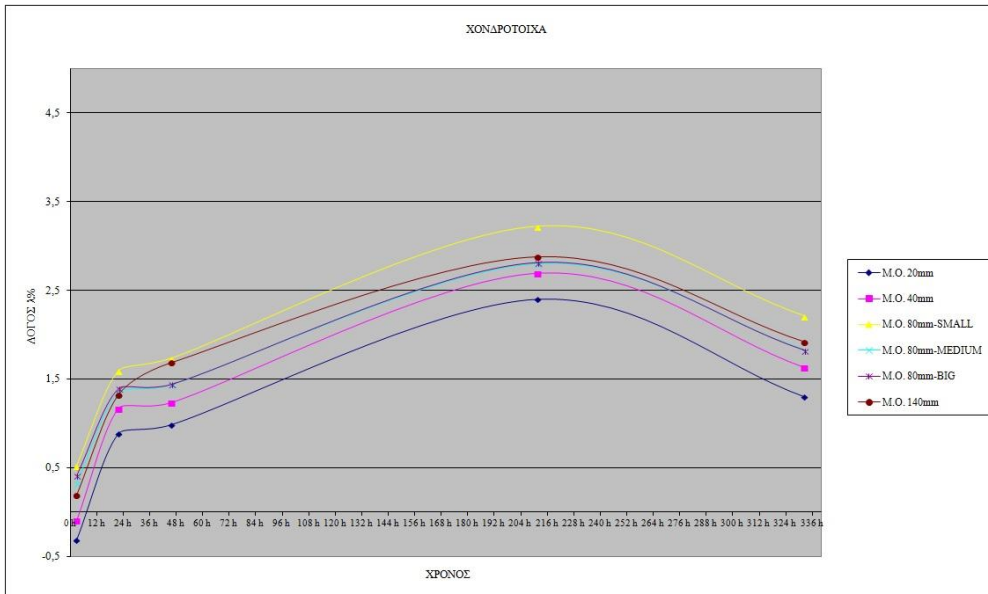
Αμέσως μετά την αφαίρεση της περίσσειας υλικού και την «απελευθέρωση» των πρωτοτύπων LOM, α) Εκτονώνονται εσωτερικές τάσεις που έχουν προκύψει στην κατασκευή των αντικειμένων για θερμομηχανικούς λόγους και λόγω απόψυξης τους από τους περίπου 35-40°C της κατασκευής, στη θερμοκρασία περιβάλλοντος (20-23 °C), β) Δημιουργούνται και γίνονται άμεσα ενεργές επιφάνειες συναλλαγής με την ατμόσφαιρα (κυρίως αυτές που είναι 0 έως 90 ° από τον άξονα Z). Δια των επιφανειών αυτών προσροφάται υγρασία από τον ατμοσφαιρικό αέρα προς τη μάζα των τεμαχίων, ωσμωτικά, έως ότου επιτευχθεί ένας βαθμός ισορροπίας.

Από τις μετρήσεις και την επεξεργασία τους προέκυψε ότι:

- Τα δοκίμια εκκινούν από την ονομαστική τους κατά Z τιμή ύψους και σε γοργό ρυθμό αυξάνονται καθ' ύψος για περίπου 24 ώρες.
- Από το χρονικό ορόσημο των 24 ωρών και έπειτα οι διακυμάνσεις του ύψους είναι σε άμεση συσχέτιση με την επικρατούσα εξωτερική υγρασία. Μάλιστα σε ιδιαίτερα ξηρές συνθήκες είναι δυνατόν να παρατηρηθεί ακόμα και μείωση του ύψους από αυτό του σημείου ισορροπίας. Χαρακτηριστικά διαγράμματα του ποσοστού διαστολής λ% κατά Z, ως προς το χρόνο δίνονται στο Σχήμα 5.1.4.4.1 για τα δοκίμια διαφόρων παχών και για το συνολικό τους Μ.Ο.



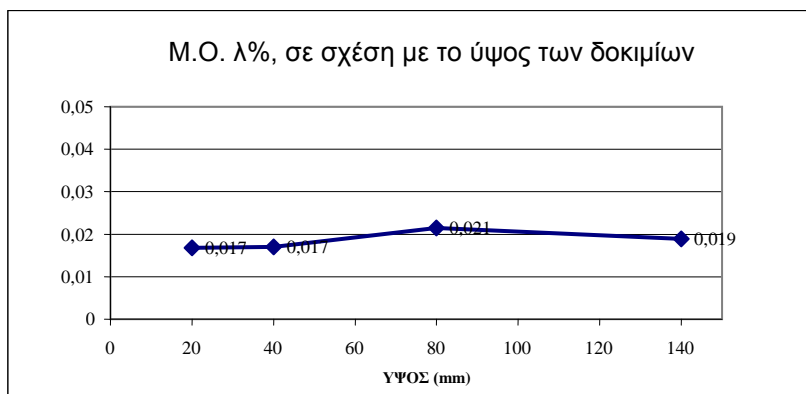




Σχήμα 5.1.4.4.2: Διαστολή δοκιμίων LOM ως προς το χρόνο

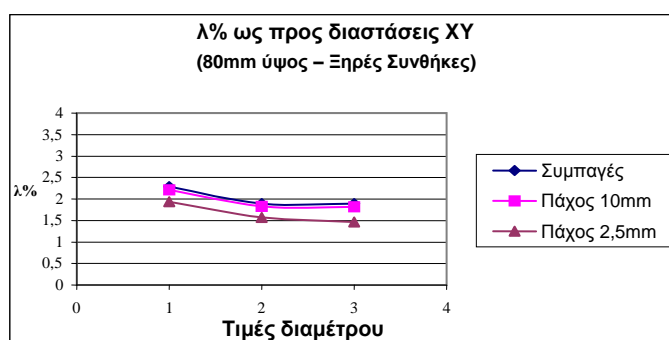
- Η μέγιστη τιμή ποσοστού αύξησης του ύψους που καταγράφηκε μετά την επίτευξη του σημείου ισορροπίας ήταν 3,35%, για το συμπαγές δοκίμιο ύψους 80mm στις 212 ώρες από την «απελευθέρωσή» του και με σχετική υγρασία 75%.

- Η ελάχιστη τιμή ποσοστού αύξησης του ύψους αντίστοιχα που καταγράφηκε ήταν 1,3%, για το δοκίμιο πάχους 10mm και ύψους 20mm, στις 335 ώρες και με σχετική υγρασία 59%.
- Από τα παραπάνω προκύπτει ένα εύρος διακύμανσης διαστάσεων κατά Z των πρωτοτύπων LOM της τάξης του 2% από το τελικό ύψος του μετά την επίτευξη του χρονικού σημείου ισορροπίας, ή αλλιώς «ωρίμανσης», των πρωτοτύπων LOM.
- Ο μέσος όρος της ποσοστιαίας αύξησης του ύψους των δοκιμίων LOM, συνολικά για όλα τα μετρηθέντα δοκίμια υπολογίστηκε σε περίπου 2% υπό φυσιολογικές συνθήκες περιβάλλοντος.
- Ο ισχυρισμός της κατασκευάστριας εταιρίας Helisys , περί διαστολής καθ' ύψος 2% συνεπώς, επιβεβαιώνεται μόνο εν μέρει και μόνο ως συνολικός μέσος όρος για πρωτότυπα LOM διαφόρων παχών. Μπορεί να χρησιμοποιείται ως γενικό μέγεθος αντιστάθμισης των αρχείων STL κατά Z, θα πρέπει όμως να εφαρμόζεται όταν στο χώρο εργασίας έχουν τηρηθεί οι λεγόμενες «κανονικές» συνθήκες περιβάλλοντος και με την προϋπόθεση ότι τα κατασκευαζόμενα αντικείμενα θα αφεθούν να «ωριμάσουν» ιδανικά για 24 ώρες και κατ'ελάχιστον για 12 ώρες. Μετά το χρονικό διάστημα ωρίμανσης είναι πρέπον να σφραγίζονται οι επιφάνειες από τις εξωτερικές επιδράσεις με βερνίκι ή αστάρι βαφής, πριν τις όποιες διαδικασίες φινιρίσματος ακολουθήσουν για βελτίωση της ποιότητας επιφάνειας.
- Τα συμπαγή και τα «χονδρότοιχα» πάχους 10mm δοκίμια συμπεριφέρθηκαν παρόμοια τόσο ως προς το χρόνο «ωρίμανσης» τους και ως προς το εύρος των διακυμάνσεών τους έναντι της εξωτερικής υγρασίας.
- Τα «λεπτότοιχα» δοκίμια πάχους 2,5mm ανταποκρίνονται γρηγορότερα στις αλλαγές εξωτερικών συνθηκών και φθάνουν νωρίτερα στο σημείο ισορροπίας τους. Το δε εύρος της διακύμανσης τους είναι στενότερο, της τάξης του 1,5%. Αυτό εξηγείται από την αυξημένη επιφάνεια συναλλαγής τους έναντι του μικρότερου όγκου τους που τα περιορίζει ως προς την υγρασία που μπορούν να απορροφούν.
- Καλύτερα αποτελέσματα ως προς την ακρίβεια κατά Z για τα πρωτότυπα LOM είναι δυνατόν να επιτευχθούν με γνώμονα το μέσο πάχος των διατομών των εκάστοτε κατασκευαζομένων αντικειμένων (συμπαγή – λεπτότοιχα – χονδρότοιχα) και εφαρμογή ειδικών συντελεστών αντιστάθμισης, σύμφωνα με το πάχος αυτό (π.χ. 1,7% για λεπτότοιχα)
- Η επίδραση του ονομαστικού ύψους των κατασκευαζομένων αντικειμένων στην εμφανιζόμενη απόκλιση είναι σχεδόν γραμμική. Αυτό ερμηνεύεται με την υπόθεση ότι η αύξηση κατά Z των πρωτοτύπων LOM οφείλεται κυρίως στη φύση του υλικού ως σύνθετου (χαρτί και στρώμα κόλλας) και στα φαινόμενα που συμβαίνουν ανά φύλλο, που πολλαπλασιάζονται γραμμικά με το ύψος. Οπότε η εμφανιζόμενη κατ' απόλυτη τιμή τελική απόκλιση στον άξονα Z προσομοιάζει στη λειτουργία ενός «ακορντεόν», όπου το ύψος αυξάνει ομοιόμορφα εφόσον η διατομή παραμένει σταθερή. Παραστατικά αυτό φαίνεται στο Σχήμα 5.1.4.4.2 με το γράφημα του μέσου όρου της ποσοστιαίας μεταβολής λ όλων των δοκιμίων σε σχέση με το ύψος τους.



Σχήμα 5.1.4.4.3: Διαστολή σε σχέση με το ονομαστικό ύψος

- Η επίδραση των κατά XY διαστάσεων των δοκιμίων ως προς το ύψος τους για το λ, είναι μικρή μεν αλλά υπαρκτή. Όσο ο λόγος διαστάσεων XY προς ύψος Z μεγαλώνει το ποσοστό διαστολής λ ελαττώνεται, κατά μέγιστο από όλες τις διενεργηθείσες μετρήσεις 0,5%. Το γεγονός αυτό που γραφικά παρίσταται στο Σχήμα 5.1.4.4.3 για τους διαφορετικών παχών τρεις κυλίνδρους ύψους 80mm, ερμηνεύεται από την μείωση του λόγου όγκου προς επιφάνειες που παρατηρείται με την αύξηση των διαστάσεων κατά XY και καθιστά τα αντικείμενα κατά αναλογία πιο λεπτότοιχα.



Σχήμα 5.1.4.4.4: Διαστολή σε σχέση με τις κατά XY διαστάσεις

#### 5.1.4.5 Ακρίβεια στο επίπεδο XY

Για τον προσδιορισμό της επιτυγχανόμενης ακρίβειας στο επίπεδο XY κατασκευάστηκαν στη LOM1015 3 δοκίμια σταθερής διατομής, που έχουν ήδη περιγραφεί στην παράγραφο 5.1.4.2. Με την παραδοχή ότι στην ΤΚΠ τα αντικείμενα κατασκευάζονται διαστρωματικά, πολλαπλές μετρήσεις γραμμικών διαστάσεων σε διαφορετικό ύψος στο επίπεδο XY στα 3 αυτά δοκίμια θεωρήθηκαν ισοδύναμες με μετρήσεις σε ισάριθμα ξεχωριστά αντικείμενα. Έγιναν συνολικά μετρήσεις σε N=15 επίπεδα των τριών δοκιμίων με τη χρήση του εξοπλισμού CMM που έχει περιγραφεί παραπάνω. Με τη βοήθεια του λογισμικού της CMM υπολογίσθηκαν μέσες, ελάχιστες, μέγιστες, χειρίστες και βέλτιστες αποκλίσεις και εύρη αποκλίσεων διαστάσεων για κάθε μετρούμενη διάσταση, για ομάδες διαστάσεων που χωρίστηκαν σε:

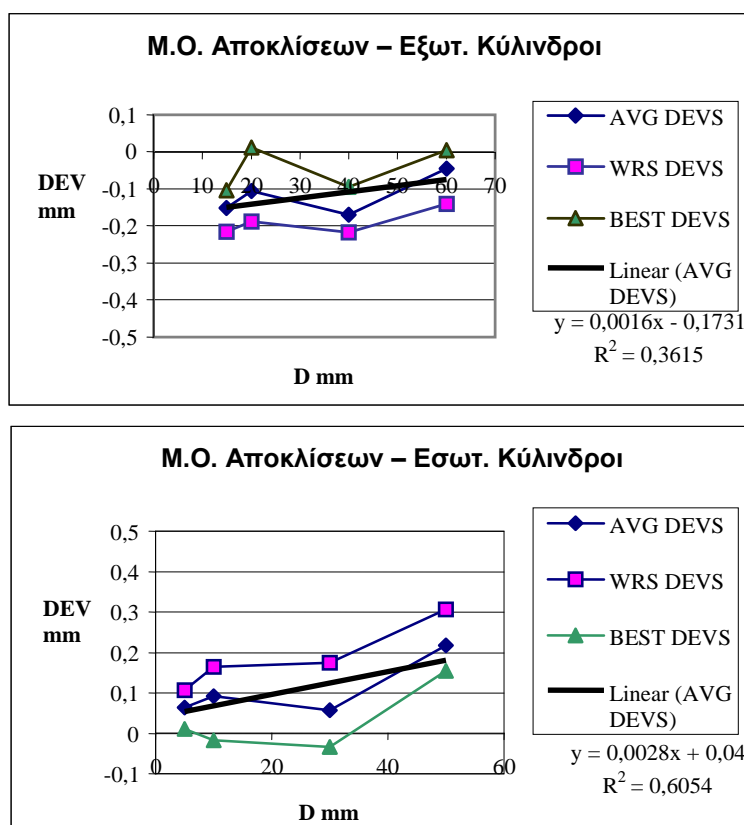
- Εξωτερικές και εσωτερικές
- Γραμμικές και Κυκλικές
- Κατά X και Y άξονες
- Κατά διαγώνιες (45°) των X και Y αξόνων

Οι μετρήσεις που προέκυψαν ανήλθαν σε περίπου 900. Τα αποτελέσματα της επεξεργασίας τους που προέκυψαν περιγράφονται παρακάτω ανά κατηγορία:

• Κύκλοι – Συνδυασμένη κίνηση κύριων αξόνων

Όπως έχει γραφεί ήδη, καμπύλες και κυκλικοί τομείς, προσεγγιζόμενοι από πολυάριθμα ευθύγραμμα τμήματα, αποδίδονται από τον κινηματικό μηχανισμό των συστημάτων LOM σε αργότερο ρυθμό από τα αμιγώς ευθύγραμμα τμήματα με συνδυασμένη κίνηση των κύριων αξόνων X, Y.

Στο Σχήμα 5.1.4.5.1 δείχνονται για εξωτερικά και εσωτερικά κυλινδρικά στοιχεία αντίστοιχα, οι μέσες, χειρότερες και καλύτερες μετρηθείσες αποκλίσεις έναντι της ονομαστικής τους τιμής, καθώς και η γραμμική συνάρτηση που παρεμβάλλει τις μέσες αποκλίσεις.



Σχήμα 5.1.4.5.1: Αποκλίσεις Κυλινδρικών στοιχείων

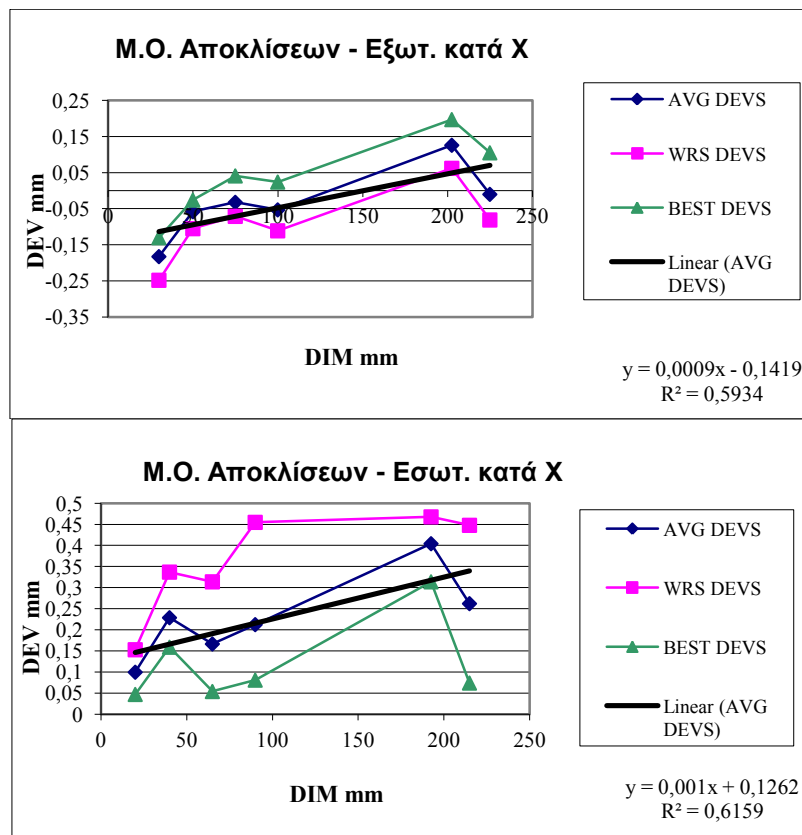
Τα κύρια μεγέθη ακρίβειας που προέκυψαν για τα κυλινδρικά στοιχεία συνοψίζονται στον Πίνακα 5.1.4.5.1.

Κύρια μεγέθη ακρίβειας κυλινδρ. Στοιχείων	Εξωτερικά	Εσωτερικά
Κλίση των μέσων αποκλίσεων % (Γραμμική κλίση – Συσχέτιση με το μέγεθος της διάστασης)	0.16	0.28
Σταθερός παράγοντας απόκλισης, $y(0)$	Περ. -0,17	Περ. +0,04
Μέγιστο εύρος αποκλίσεων ανά διάμετρο (mm)	Περ. 0,2	Περ. 0,2
Μέσο εύρος σε όλες τις διαμέτρους	Περ. 0,145	App. 0,16
Αλγεβρικά μέγιστη απόκλιση (mm)	0,012	0,306
Αλγεβρικά ελάχιστη απόκλιση (mm)	-0,218	-0,034

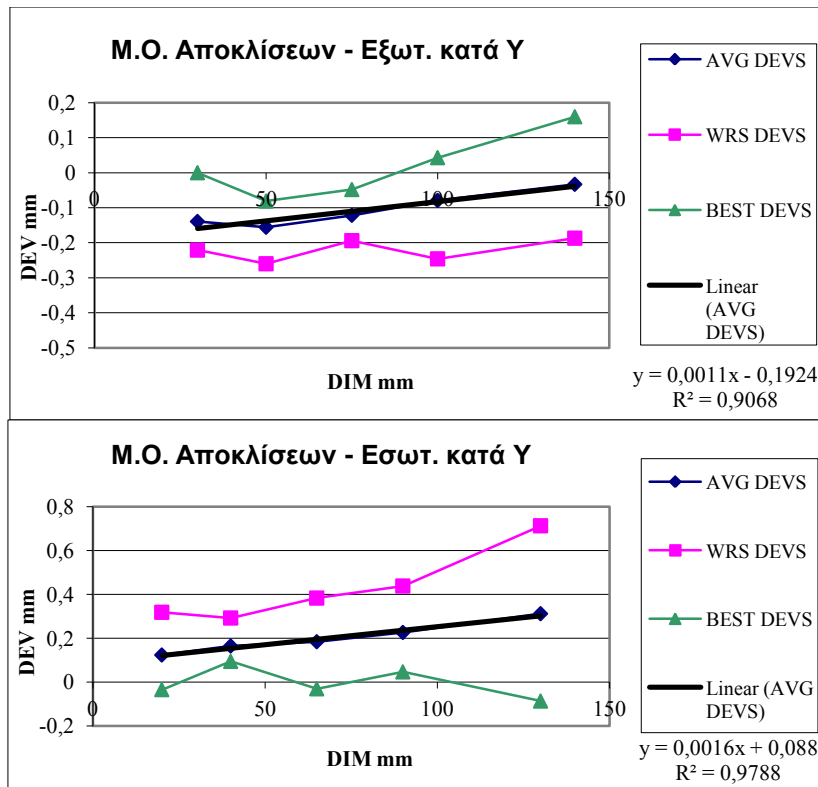
Πίνακας 5.1.4.5.1: Κύρια μεγέθη ακρίβειας κυλινδρικών στοιχείων κατά XY

• Γραμμικές διαστάσεις επί των κυρίων αξόνων X & Y

Οι γραμμικές διαστάσεις που είναι ευθυγραμμισμένες με τους κύριους άξονες X & Y του επιπέδου απόδοσης στρώσεων, αποδίδονται με μεμονωμένες ξεχωριστές κινήσεις των αξόνων αυτών, με τη μέγιστη μάλιστα ταχύτητα «κοπής» του συστήματος (180mm/sec). Τα εμφανιζόμενα αποτελέσματα από τις μετρήσεις σε τέτοιες διαστάσεις επί των δοκιμών βοηθούν στην εκτίμηση της ποιότητας τοποθέτησης και κίνησης κάθε άξονα του κινηματικού μηχανισμού του επιπέδου XY και στη διάγνωση τυχόν εγγενών συστηματικών παραγόντων εισαγωγής ανακρίβειας που τον χαρακτηρίζουν. Ενδεικτικά τέτοια γραφήματα μέσων, καλύτερων και χειρότερων εμφανιζόμενων αποκλίσεων και γραμμικών συναρτήσεων παρεμβολής των μέσων αποκλίσεων δίνονται στο Σχήμα 5.1.4.5.2(α & β) και συνεκτιμώνται με τα αποτελέσματα βασικών μεγεθών ακρίβειας του Πίνακα 5.1.4.5.2 για γραμμικές διαστάσεις επί κύριων αξόνων X & Y.



Σχήμα 5.1.4.5.2α: Αποκλίσεις διαστάσεων κατά X



Σχήμα 5.1.4.5.2β: Αποκλίσεις διαστάσεων κατά Υ

Κύρια μεγέθη ακρίβειας γραμμ.διαστάσεων κατά X & Y	Εξωτερικές	Εσωτερικές
<b>κατά X-Άξονα</b>		
Κλίση των μέσων αποκλίσεων % (Γραμμική κλίση – Συσχέτιση με το μέγεθος της διάστασης)	0,1	0,1
Σταθερός παράγοντας απόκλισης, y(0)	Περ. -0,14	Περ. +0,13
Μέγιστο εύρος αποκλίσεων ανά διάσταση (mm)	Περ. 0,2	Περ. 0,35
Μέσο εύρος σε όλες τις διαστάσεις	Περ. 0,13	Περ. 0,24
Αλγεβρικά μέγιστη απόκλιση (mm)	0,197	0,468
Αλγεβρικά ελάχιστη απόκλιση (mm)	-0,248	0,047
<b>κατά Υ-Άξονα</b>		
Κλίση των μέσων αποκλίσεων % (Γραμμική κλίση – Συσχέτιση με το μέγεθος της διάστασης)	0,11	0,16
Σταθερός παράγοντας απόκλισης, y(0)	Περ. -0,19	Περ. +0,09
Μέγιστο εύρος αποκλίσεων ανά διάσταση (mm)	Περ. 0,34	Περ. 0,4 – 0,8
Μέσο εύρος σε όλες τις διαστάσεις	Περ. 0,24	Περ. 0,43
Αλγεβρικά μέγιστη απόκλιση (mm)	0,16	0,713
Αλγεβρικά ελάχιστη απόκλιση (mm)	-0,26	-0,087

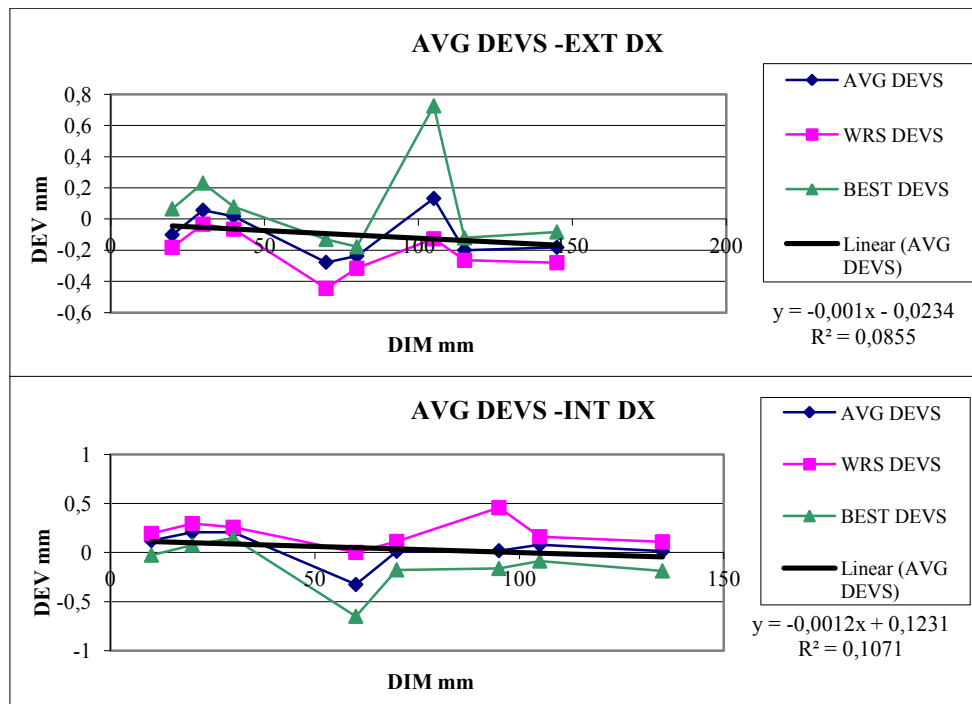
Πίνακας 5.1.4.5.2: Κύρια μεγέθη ακρίβειας γραμμικών διαστάσεων επί αξόνων X & Y

• Γραμμικές διαστάσεις επί διαγωνίων αξόνων των X & Y

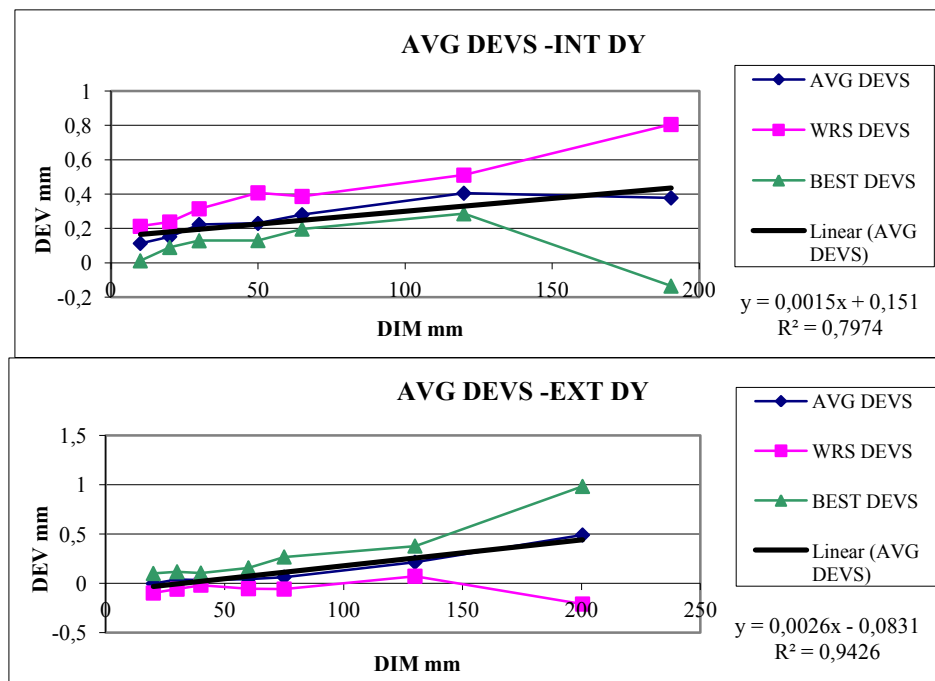
Οι διαγώνιες των κύριων αξόνων X & Y, DX & DY αντίστοιχα, ορίστηκαν με στροφή 45° κατά Z των κύριων, σύμφωνα με δεξιόστροφο τρισσορθογώνιο σύστημα. Γραμμικές διαστάσεις των δοκιμίων κατά του DX & DY αποδίδονται από το μηχανισμό οδήγησης και κίνησης με ταχείες συνδυασμένες κινήσεις των κύριων αξόνων, τη θεωρητικά δυσμενέστερη περίπτωση για την αποδιδόμενη ακρίβεια.

Κατόπιν της ανάλυσης των μετρήσεων και επί των γραμμικών διαστάσεων επί DX & DY, παρατίθενται επίσης γραφήματα μέσων, καλύτερων και χειρότερων αποκλίσεων

και γραμμικών συναρτήσεων παρεμβολής μέσω αποκλίσεων στο Σχήμα 5.1.4.5.3(α & β). Αντίστοιχα αποτελέσματα βασικών μεγεθών ακρίβειας για τους διαγώνιους άξονες στον Πίνακα 5.1.4.5.3.



Σχήμα 5.1.4.5.3α: Αποκλίσεις διαστάσεων κατά DX



Σχήμα 5.1.4.5.3β: Αποκλίσεις διαστάσεων κατά DY

Κύρια μεγέθη ακρίβειας γραμμ.διαστάσεων κατά DX & DY	Εξωτερικές	Εσωτερικές
<b>κατά DX-Άξονα</b>		
Κλίση των μέσων αποκλίσεων % (Γραμμική κλίση – Συσχέτιση με το μέγεθος της διάστασης)	-0.1	-0.12
Σταθερός παράγοντας απόκλισης, $y(0)$	Περ. -0.023	Περ. +0.123
Μέγιστο εύρος αποκλίσεων ανά διάσταση (mm)	Περ. 0.85	Περ. 0.65
Μέσο εύρος σε όλες τις διαστάσεις	Περ. 0.29	Περ. 0.33
Αλγεβρικά μέγιστη απόκλιση (mm)	0.726	0.457
Αλγεβρικά ελάχιστη απόκλιση (mm)	-0.445	0.65
<b>κατά DY-Άξονα</b>		
Κλίση των μέσων αποκλίσεων % (Γραμμική κλίση – Συσχέτιση με το μέγεθος της διάστασης)	0.26	0.15
Σταθερός παράγοντας απόκλισης, $y(0)$	Περ. -0.08	Περ. +0.15
Μέγιστο εύρος αποκλίσεων ανά διάσταση (mm)	Περ. 1.19	Περ. 0.94
Μέσο εύρος σε όλες τις διαστάσεις	Περ. 0.36	Περ. 0.31
Αλγεβρικά μέγιστη απόκλιση (mm)	0.982	0.806
Αλγεβρικά ελάχιστη απόκλιση (mm)	-0.21	-0.135

Πίνακας 5.1.4.5.3: Κύρια μεγέθη ακρίβειας διαστάσεων επί αξόνων DX & DY

#### 5.1.4.6 Ανάλυση αποτελεσμάτων – Αριθμητικοί συντελεστές αντιστάθμισης

Τα κυριότερα συμπεράσματα που προκύπτουν από την επισκόπηση των αποτελεσμάτων της αποδιδόμενης ακρίβειας από τη μηχανή LOM1015 είναι:

- Το κλειστού κώδικα λογισμικό “*LOMSlice*” λειτουργίας της μηχανής δεν επιτελεί, τουλάχιστον όχι πλήρως, ορθή αντιστάθμιση της διαμέτρου της ακτίνας laser CO2 που χρησιμοποιείται για τις κοπές. Συνεπώς κατά πλειοψηφία τα εξωτερικά στοιχεία και διαστάσεις εμφανίζονται μικρότερα, ενώ αντίστοιχα τα εσωτερικά είναι μεγαλύτερα των ονομαστικών τους τιμών. Ωστόσο, οι εμφανιζόμενες αυτές αποκλίσεις δεν είναι συμμετρικά κατανομημένες μεταξύ εσωτερικών και εξωτερικών μορφών και εξαρτώνται από το είδος και τον προσανατολισμό του μορφολογικού στοιχείου. Κατάλληλη «διόρθωση» (offsetting) κρίσιμων διαστάσεων σε επίπεδο CAD πριν την εξαγωγή του αρχείου STL μπορεί να αυξήσει σημαντικά την ακρίβεια, αντισταθμίζοντας αυτόν τον παράγοντα.
- Διαπιστώνεται σαφής συσχέτιση των εμφανιζόμενων αποκλίσεων με το μέγεθος της μετρούμενης διάστασης, στην πλειονότητα των κατευθύνσεων επιπέδου XY. Το μέγεθος της διάστασης επηρεάζει εμφανώς και το μέγεθος της εμφανιζόμενης απόκλισης. Το σφάλμα αυτό είναι συστηματικό και οφειλόμενο στην κλάση ακρίβειας και την ποιότητα των μηχανικών μερών που υλοποιούν τις κινήσεις κοπής. Για τα εξωτερικά στοιχεία αυτό τείνει αλγεβρικά τελικά να μειώνει τις συνολικές αποκλίσεις, για τα εσωτερικά όμως εν συνόλω τις αυξάνει. Τουλάχιστον για τα κρίσιμα κυλινδρικά μορφολογικά στοιχεία και για τις ευθυγραμμισμένες με τους κύριους άξονες X & Y κρίσιμες διαστάσεις, το σφάλμα αυτό είναι δυνατόν κατά περίπτωση να αντισταθμισθεί σε επίπεδο CAD πριν την κατασκευή των αντικειμένων σε LOM, με τη χρήση του γραμμικού παράγοντα (κλίσης) των αντίστοιχων εξισώσεων παρεμβολής των μέσων τιμών απόκλισης των Πινάκων 5.1.4.5.1 & 2.
- Το μέσο εύρος των εμφανιζόμενων αποκλίσεων ανά συγκεκριμένη θέση μέτρησης αυξάνεται, όταν κατά την απόδοση της διάστασης αυξάνονται οι ταχύτητες του μηχανισμού κίνησης του laser κοπής και συνδυάζονται οι κινήσεις των κύριων αξόνων. Αυτό είναι σαφές στοιχείο και χαρακτηριστικό για την απόδοση και την ποιότητα του ίδιου του μηχανισμού κίνησης κατά XY (XY



plotter assembly) υποδηλώνοντας γενικά την μέση προς χαμηλή ποιότητά του, με συνέπεια την εμφάνιση ταλαντώσεων και λοιπών διαταραχών των μερών του (π.χ. ιμάντες, ράγες ολίσθησης και κύλισης) σε υψηλότερες ταχύτητες και σε συνδυασμένες κινήσεις. Επιπλέον, το μη ομοιόμορφο μοτίβο καύσης του χαρτιού κατά την κοπή του, που έχει σημειωθεί και παραπάνω, συμμετέχει και αυτό κατά ένα ποσοστό στο εύρος εμφανιζόμενων αποκλίσεων, με σταθερό όμως τρόπο όπως εκτιμάται.

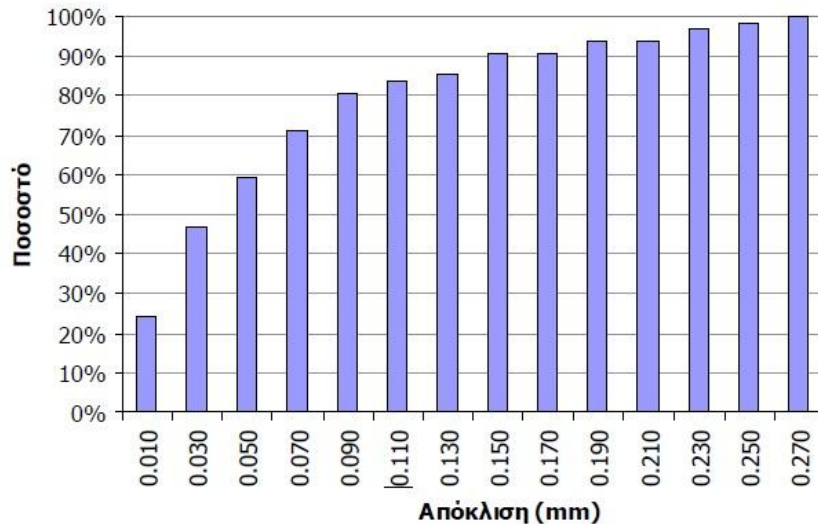
- Γενικά η εξεταζόμενη μηχανή LOM1015, λειτουργούσα με τις συνιστώμενες βέλτιστες ρυθμίσεις και υλικά, συχνά δεν επιτυγχάνει την δηλούμενη από τον κατασκευαστή της ακρίβεια του  $\pm 0,25\text{mm}$ . Στις χειρότερες περιπτώσεις μετρήθηκαν στο επίπεδο XY αποκλίσεις μεγαλύτερες από  $0,5\text{mm}$  έως και  $0,9\text{mm}$ . Ο συνολικός δε μέσος όρος αποκλίσεων σε εξωτερικές και εσωτερικές διαστάσεις όλων των τύπων, ενώ ήταν αντίστοιχα  $-0,06$  και  $0,16\text{mm}$ , βρέθηκε παρόλα αυτά σε μια κατανομή με εύρος  $\pm 3\sigma$  της τάξεως του  $\pm 0,45\text{mm}$ .
- Οι παραπάνω διαπιστούμενες επιδόσεις διαστασιολογικής ακρίβειας κατατάσσουν την LOM1015 για τις περισσότερες περιπτώσεις στην κατά ISO 286 / DIN 7151 ποιότητα IT13 (ισοδύναμη επίδοση της ψυχρής διαμόρφωσης) και για λίγες μεμονωμένες περιπτώσεις σε IT14, σε αντίθεση όμως με ορισμένα δημοσιευμένα αποτελέσματα που την αξιολογούσαν σε χειρότερες κατηγορίες [Kruth, 1991; Ippolito et al., 1995; Shellabear, 1999]. Έρχονται δε σε περισσότερη συμφωνία με δημοσιευμένα αποτελέσματα της παράλληλης χρονικά έρευνας των Park, Tari & Hahn, [Park et al., 2000]
- Η βελτίωση της αποδιδόμενης ακρίβειας κρίσιμων διαστάσεων τόσο στο επίπεδο XY όσο και κατά Z, μέσω αντιστάθμισης (compensation) δια των σταθερών παραγόντων και των αναλογικών της διάστασης συντελεστών που προσδιορίστηκαν παραπάνω, μπορεί να οδηγήσει για αυτές τη διαδικασία LOM σε IT11 με συνολικό εύρος διακυμάνσεων απόκλισης διαστάσεων μικρότερο του  $\pm 0,25\text{mm}$  και για την πλειονότητα των περιπτώσεων των  $\pm 0,15\text{mm}$  από τις ονομαστικές τιμές. Η πρακτική αυτή εφαρμόζεται με επιτυχία στο Εργαστήριο ΤΚΠ & Ε του ΕΜΠ.

#### 5.1.4.7 Σύγκριση με SLA & Desktop CNC

Όπως προαναφέρθηκε (Παράγραφος 5.1.4.2), για την πληρότητα της έρευνας τα αποτελέσματα ακρίβειας συγκρίθηκαν και με αντίστοιχες μετρήσεις των ιδίων δοκιμίων από εναλλακτικά συστήματα πρωτοτυποποίησης, τεχνολογίας Στερεολιθογραφίας στο ΠΠ, [Giannatsis, 2004], και κοπής με επιτραπέζια CNC φρέζα στο Εργαστήριο ΤΚΠ & Ε του ΕΜΠ, [Βάρελης, 2009].

Προέκυψε ότι:

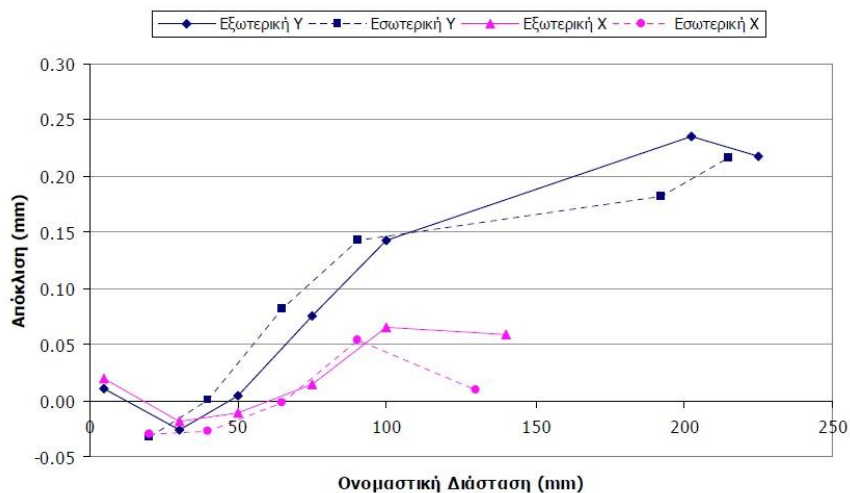
- Η Στερεολιθογραφική μηχανή EOS Stereos Desktop S του ΠΠ, πέτυχε συνολικά καλύτερες επιδόσεις, έχοντας το 90% όλων των διαστάσεων με απόκλιση σε απόλυτη τιμή μικρότερη του  $0,15\text{mm}$ , Σχήμα 5.1.4.7.1, κατατασσόμενη έτσι σε IT10 έως IT11.



Πηγή: [Γιαννατσής, 2004]

Σχήμα 5.1.4.7.1: Αποκλίσεις Στερεολιθογραφικής μηχανής ΠΠ

- Και στη Στερεολιθογραφία υπάρχει εξάρτηση των αποκλίσεων με τις γραμμικές διαστάσεις, Σχήμα 5.1.4.7.2, οφειλόμενη όμως εδώ στην ρητινική πρώτη ύλη που παρουσιάζει διαστολή κατ'όγκον μετά την τελική στερεοποίηση (post curing).

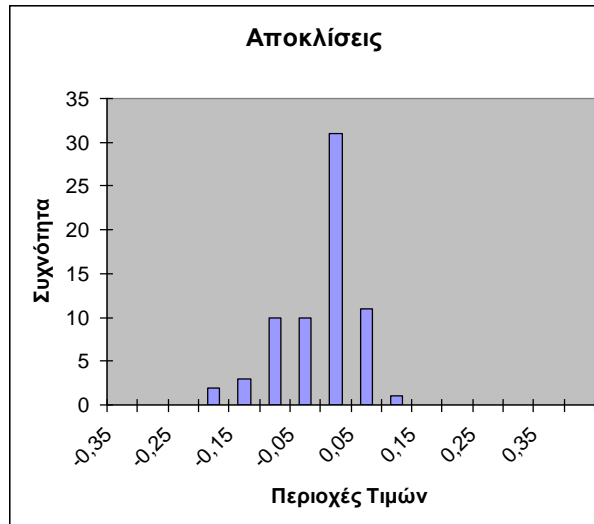


Πηγή: [Γιαννατσής, 2004]

Σχήμα 5.1.4.7.2: Αποκλίσεις SLA στους άξονες επιπέδου XY

- Το στερεολιθογραφικό σύστημα διαθέτει υψηλότερης ποιότητας μηχανικά μέρη οδήγησης της ακτίνας στερεοποίησης έναντι της LOM, καθώς εμφανίζει συνολικά εύρη εμφανιζόμενων αποκλίσεων τάξεως  $\pm 0,25$ mm.
- Η επιτραπέζια CNC φρέζα σε επίπεδο ακρίβειας πέτυχε στο ίδιο δοκίμιο ακόμα καλύτερα αποτελέσματα και από τα δύο συγκρινόμενα συστήματα ΤΚΠ, με τις εμφανιζόμενες αποκλίσεις να είναι εφάμιλλες της Στερεολιθογραφίας και κατά μέγιστο 0,24 mm, αλλά για μία μόνο διάσταση που αποδόθηκε με συνδυασμένη κίνηση κύριων αξόνων.

- Η συνολική κατανομή αποκλίσεων στο επιτραπέζιο CNC είναι ανά συχνότητα εμφάνισης σαφώς καλύτερη της SLA (Σχήμα 5.1.4.7.3). Για δε διαστάσεις έως 100mm καμία απόκλιση δεν ξεπέρασε τα 0,15mm.



Σχήμα 5.1.4.7.3: Συχνότητα εμφάνισης αποκλίσεων σε Desktop CNC φρέζα

- Σύμφωνα με το ISO 286 / DIN 7151 και τις παρατηρούμενες επί του δοκιμίου αποκλίσεις, στην επιτραπέζια CNC φρέζα COMAGRAV MT-Profi αποδίδεται ποιότητα IT12 για την μία και μόνη χειρότερα παρατηρημένη περίπτωση. Αν όμως αξιολογηθεί σύμφωνα με τη στατιστικά τεκμηριωμένη συμπεριφορά της θα πρέπει να της αποδοθεί IT 9 με IT10, τιμή καλύτερη τόσο από τη μονάδα LOM, όσο και από το Στερεολιθογραφικό σύστημα EOS Stereos Desktop . Όπως και να έχει οι τιμές αυτές είναι εντός των γενικά παραδεκτών τιμών για φρεζάρισμα (milling – IT 7 έως 14) και κρίνεται ικανοποιητική ειδικά για χρήσεις κατασκευής πρωτοτύπων.

#### 5.1.4.8 Σταθερότητα πρωτοτύπων LOM

Η σταθερότητα των πρωτοτύπων σε βάθος χρόνου, τόσο ως προς τις τιμές των διαστάσεων τους, όσο και ως προς τη διατήρηση της μορφής τους γενικότερα και την τυχόν εμφάνιση αλλοιώσεων και ελαττωμάτων (όπως φουσκώματα, στρεβλώσεις, κυρτώσεις), είναι σημαντική, καθώς τα πρωτότυπα αντικείμενα συχνά παραμένουν ως πρότυπα αντικείμενα αναφοράς (reference parts) ή και ως αρχέτυπα αναπαραγωγής των μορφών (master patterns) σε διαδικασίες ΤΚΠ και υποβοήθησης μεθόδων παραγωγής γενικότερα.

Σε ότι αφορά την συμπεριφορά των πρωτοτύπων LOM, έχουν ήδη γραφεί παραπάνω τα όσα προέκυψαν για την συμπεριφορά τους έναντι του χρόνου και των εξωτερικών περιβαλλοντικών συνθηκών στην κατεύθυνση του άξονα Z. Μετά την επίτευξη σημείου ισορροπίας (12-24 ώρες από τον αποχωρισμό τους) είναι ήδη ικανοποιητικά σταθερά ακόμα και χωρίς διαδικασίες σφράγισης (sealing) και φινιρίσματος (finishing) επιφανειών, καθώς για λόγους που θα επεξηγηθούν και μετέπειτα, συνηθίζεται να τοποθετείται κατά Z η μικρότερη διάσταση του κατασκευαζόμενου αντικείμενου. Για τα δε συνήθη πρωτότυπα μηχανολογικού ενδιαφέροντος η

διάσταση αυτή όπως έχει δείξει η πράξη και η εμπειρία στο Εργαστήριο ΤΚΠ & Ε, στατιστικά είναι περίπου 60mm. Κατά συνέπεια μια διακύμανση κατά Z της τάξεως του 0,5% σε αυτή τη διάσταση ενός ασφράγιστου και αφινίριστου πρωτοτύπου LOM, λόγω φυσιολογικών μεταβολών υγρασίας ατμόσφαιρας, θα οδηγούσε σε συνολική μεταβολή της κατά Z διάστασης κατά 0,3mm, τιμή γενικά αποδεκτή και άμεσα συγκρίσιμη με την αποδιδόμενη ακρίβεια στο επίπεδο XY.

Στο επίπεδο XY η διενεργηθείσα έρευνα έχει καταδείξει πως οι γεωμετρίες και η ακρίβεια τους παραμένει σχεδόν σταθερή, ανεξαρτήτως σφράγισης και φινιρίσματος.

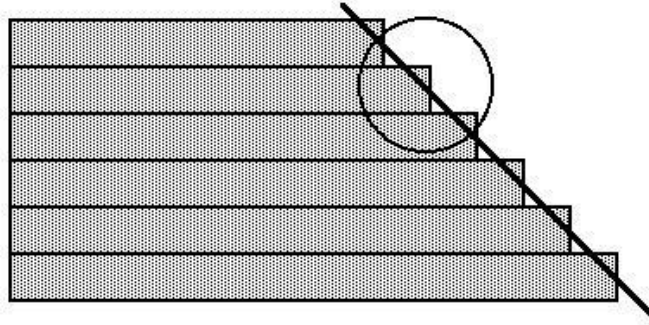
Η συνήθης όμως πρακτική – και αυτή που ακολουθείται και στο Εργαστήριο ΤΚΠ & Ε – είναι τα πρωτότυπα LOM να σφραγίζονται και αποπερατώνονται, με ανάλογες του όγκου, της γεωμετρίας και της επιθυμητής τελικής ποιότητας επιφανείας εφαρμογές, επαλείψεις, εμποτισμούς και ψεκασμούς βερνικιού, ασταριού ή και βαφής. Η εφαρμογή αυτή δημιουργεί ένα στερεό υαλώδες στρώμα σφράγισης και αποκλεισμού των εξωτερικών επιδράσεων που καταλαμβάνοντας τον κενό χώρο των πόρων του χαρτιού εμποτίζει το σώμα των πρωτοτύπων σε βάθος από 0,5 έως 2mm αναλόγως της γεωμετρίας και της φύσης της επιφάνειας εφαρμογής. Περισσότερο δε απορροφούν οι κεκλιμένες επιφάνειες από τις οποίες διέρχεται και η υγρασία. Τα σφραγισμένα και αποπερατωμένα πρωτότυπα LOM, όπως έχουν δείξει πολλαπλές μετρήσεις τους στα πλαίσια της έρευνας που διεξήχθη, μπορούν να θεωρηθούν ως διαστασιολογικά και σε γεωμετρική μορφή απολύτως σταθερά επί πολλά έτη. Το γεγονός αυτό τα καθιστά σχεδόν ιδανικά για τη δημιουργία αρχετύπων μοντέλων, ειδικά σε διαδικασίες χύτευσης μεταλλικών προϊόντων (π.χ. χυτά άμμου και χυτά γύψου) όπου ούτως ή άλλως οι επιδόσεις και κατά συνέπεια οι απαιτήσεις ακρίβειας δεν είναι ιδιαίτερα υψηλές (από IT14 και άνω).

Σε σύγκριση με πρωτότυπα LOM τις ίδιες και ίσως καλύτερες επιδόσεις (ανάλογα με την επιλεγείσα σανίδα PUR) παρουσιάζουν και τα πρωτότυπα σε Desktop CNC από πολυμερή υλικά τα οποία είναι εξαιρετικά σταθερά.

Το ίδιο δεν μπορεί να ειπωθεί για τα Στερεολιθογραφικά πρωτότυπα. Σε αυτά έχουν μετρηθεί και διαπιστωθεί στην άροδο του χρόνου τόσο διαφορές και μεταβολές στις διαστάσεις τους, όσο και άλλου τύπου γεωμετρικές αλλοιώσεις και μεταβολές μορφής (κυρτώσεις, καμπυλώσεις, στρεβλώσεις), [Jacobs, 1993& 1996; Chua et al. 2010], ειδικά όταν αυτά εκτίθενται στο ηλιακό φως. Οι μεταβολές και αλλοιώσεις αυτές αποδίδονται κατά κύριο λόγο στις ίδιες τις χρησιμοποιούμενες ρητίνες, στον αέριο χαρακτήρα του φωτοπολυμερισμού που συμβαίνει κατά τη στερεοποίησή τους και στις εσωτερικές τάσεις που τα φαινόμενα αυτά δημιουργούν. Ως εκ τούτου, συνηθίζεται SLA πρωτότυπα να μην χρησιμοποιούνται ιδιαίτερα ως σταθερά αντικείμενα αναφοράς, φυλάσσονται δε κατά κανόνα σε χώρους με απουσία φωτός.

#### **5.1.4.9 Παράγοντες τραχύτητας & Θεωρητική τραχύτητα ΤΚΠ**

Η ΤΚΠ είναι διαστρωματική διαδικασία. Ως εκ τούτου τα υλοποιούμενα σε αυτή αντικείμενα, τόσο κατ'όγκον όσο και στις εξωτερικές τους επιφάνειες, είναι πρακτικά «προσεγγίσεις» των πραγματικών, από διαδοχικές επίπεδες διατομές σταθερού πάχους ίσου με το πάχος της χρησιμοποιούμενη στρώσης. Τα κενά που δημιουργούνται μεταξύ πραγματικών επιφανειών και στρώσεων, αλλά και των διαδοχικών στρώσεων μεταξύ τους, βιβλιογραφικά γνωστά ως το «φαινόμενο του σκαλοπατιού» (stair-stepping effect), είναι ο σημαντικότερος παράγων τραχύτητας για την ΤΚΠ. Τον παράγοντα αυτό περιγράφει χαρακτηριστικά το Σχήμα 5.1.4.9.1.



Σχήμα 5.1.4.9.1: Το «φαινόμενο του σκαλοπατιού» ως παράγων τραχύτητας

Προσεγγίσεις επίσης (χονδρές-μέσες-λεπτές) των πραγματικών επιφανειών είναι και οι επιφάνειες που τα STL αρχεία μεταφέρουν στις διατάξεις ΤΚΠ προς κατασκευή, (Σχήμα 1.9.3.1). Η προσέγγιση δε των καμπύλων επιφανειών εντός των STL, λιγότερο ή περισσότερο αποτελείται από διαδοχές τριγωνικών εδρών, με ακμές μεταξύ τους. Ως εκ τούτου, ειδικά για τις περιπτώσεις χονδροειδούς προσεγγίσεως αρχείων STL, και αυτός ο παράγων μπορεί να εισάγει τραχύτητα στα ΤΚΠ πρωτότυπα.

Τέλος η φύση της κάθε τεχνολογίας ΤΚΠ, και ο τρόπος απόδοσης των σημειακών ή επιφανειακών στερεών στοιχείων που απαρτίζουν τις στρώσεις, επίσης δύναται να επηρεάσει την τραχύτητα και ποιότητα επιφάνειας στις εξωτερικές επιφάνειες των πρωτοτύπων. Π.χ. η SLA στερεοποιεί σταγονοειδή γραμμικά στοιχεία (“voxels”), η FDM επιστρώνει κυκλικής/ελειψοειδούς διατομής τήγματα, η LOM “κόβει” αδρώς ευθείας μορφής τομές, με τυχαιότητα λόγω κοπής laser και ινών σχισμένου χαρτιού μετά την αποπεράτωση και λήψη των πρωτοτύπων. Τα δε συστήματα κόνεων όλα σχεδόν έχουν πορώδη υφή επιφάνειας λόγω της ύπαρξης των κόκκων.

Όλοι οι παραπάνω παράγοντες, υποτίθεται ότι αντιμετωπίζονται με τις διαδικασίες αποπεράτωσης και φινιρίσματος των πρωτοτύπων ΤΚΠ, δια των οποίων επιτυγχάνεται η βελτίωση της ποιότητας επιφάνειας. Αναγνωρισμένα στην τεχνολογία LOM ο σημαντικότερος όλων των παραπάνω παραγόντων τραχύτητας ΤΚΠ είναι το «φαινόμενο του σκαλοπατιού», το οποίο θεωρητικά και βάσει του ορισμού των εν λόγω μεγεθών τραχύτητας δίδει στα ΤΚΠ πρωτότυπα «θεωρητική τραχύτητα» κεκλιμένων επιφανειών σύμφωνα με τις σχέσεις:

$$\text{Μέση Τραχύτητα : } Ra = \frac{p \cdot \sin \theta}{4} \quad (5.13)$$

και

$$\text{Μέγιστη Τραχύτητα: } Rt = p \cdot \sin \theta \quad (5.14)$$

, όπου  $p$ : το πάχος της στρώσης (σε  $\mu\text{m}$ )

$\theta$ : η γωνία κλίσης της επιφάνειας ως προς τον άξονα Z

Η μορφή του γραφήματος των θεωρητικών  $Ra$  &  $Rt$  είναι ως προς τη γωνία  $\theta$  είναι ημιτονοειδής και θα χρησιμοποιηθεί ως αναφορά στην αξιολόγηση των πραγματικών αποτελεσμάτων από τα δοκίμια LOM μορφής “truncheon” που διερευνήθηκαν.

#### 5.1.4.10 Τραχύτητα δοκιμίων LOM

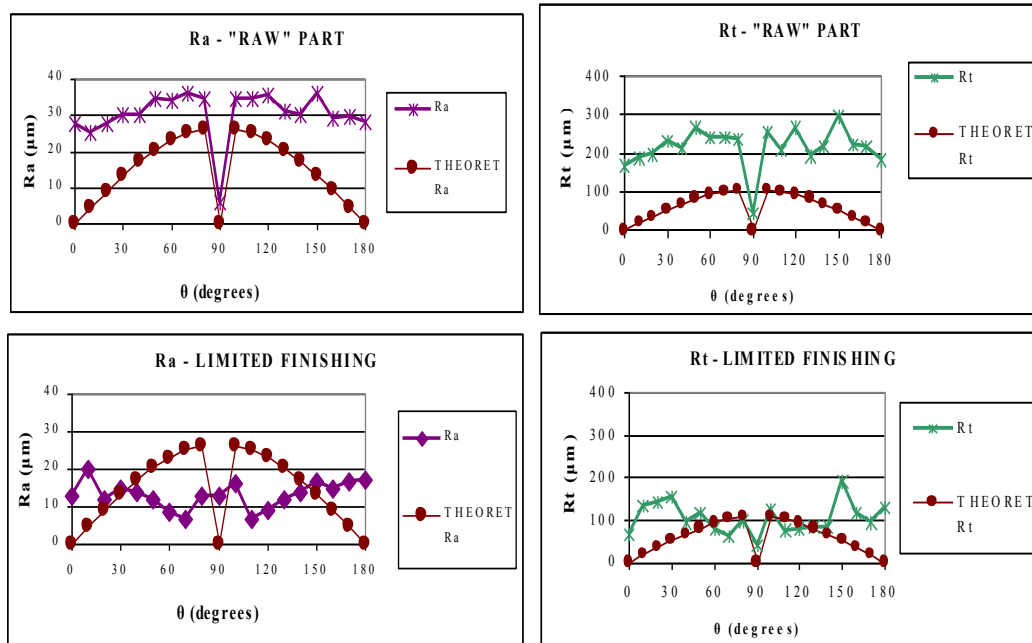
Για την διαπίστωση της αποδιδόμενης πραγματικής τραχύτητας – ποιότητας επιφανειών πρωτοτύπων LOM σε μηχανή LOM1015, σχεδιάστηκαν και κατασκευάστηκαν τρεις φορές τα δοκίμια “truncheon” της παραγράφου 5.1.4.2.

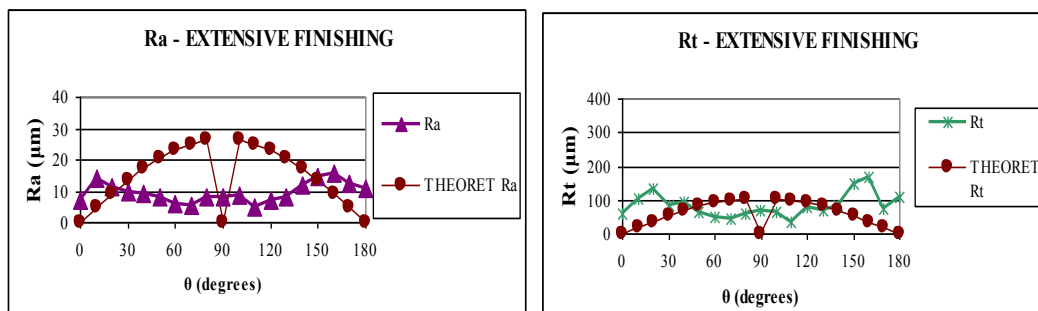
Το πρώτο δοκίμιο (“raw”) παρέμεινε και τραχυμετρήθηκε χωρίς φινίρισμα, όπως θα ίσχυε στην περίπτωση ενός απαιτούμενου πρωτοτύπου μορφής χωρίς γεωμετρικές και διαστασιολογικές απαιτήσεις που θα έπρεπε να υλοποιηθεί στον ελάχιστο χρόνο.

Στο δεύτερο δοκίμιο επιβλήθηκε περιορισμένο φινίρισμα (“limited finishing”), όπως θα απαιτείτο π.χ. σε μια περίπτωση τυπικού «γεωμετρικού πρωτοτύπου», συνιστάμενο από 2 στάδια επίστρωσης με κλειστικό (sealer) – βερνίκι, ακολουθούμενα διαδοχικά από χειρονακτική λείανση με κατάλληλης κοκκομετρίας γυαλόχαρτο. Η διαδικασία αυτή απαιτήσε περίπου 45 λεπτά.

Στο τρίτο δοκίμιο εφαρμόστηκε εκτεταμένο φινίρισμα (“extensive finishing”), αντίστοιχο με την περίπτωση προετοιμασίας αντικειμένου ως αρχέτυπο για αναπαραγωγή της μορφής τους σε μήτρες σιλικόνης, ρητίνης ή άλλης ΤΚΕ. Περιελάμβανε επιπλέον 2 εφαρμογές βερνικιού (και με σπρέυ) και αντίστοιχα στάδια χειρονακτικής λείανσης με αύξουσας κοκκομετρίας γυαλόχαρτα. Εδώ απαιτήθηκαν περίπου 1 ½ ώρες.

Και τα τρία δοκίμια τραχυμετρήθηκαν με το τραχύμετρο Taylor Hobson Surtronic 3+, ως περιγράφεται στην παράγραφο 5.1.4.3. Από κάθε έδρα τους ελήφθησαν, με το κατάλληλο συνιστώμενο από τον κατασκευαστή μήκος αποκοπής (Lc), τουλάχιστον 3 τιμές τραχύτητας σε κάθε κατεύθυνση των πλευρών του, ώστε να καταγραφούν οι μέγιστες τιμές ανά έδρα. Όπως ήταν φυσιολογικό αυτές εμφανίσθηκαν στην κατεύθυνση των «σκαλοπατιών». Η γραφική αναπαράσταση των τιμών Ra & Rt που μετρήθηκαν και στα τρία δοκίμια σε αντιπαραβολή με την θεωρητική τιμή, παρίστανται στο Σχήμα 5.1.4.10.1





Σχήμα 5.1.4.10.1: Τραχύτητες Ra & Rt δοκιμίων LOM

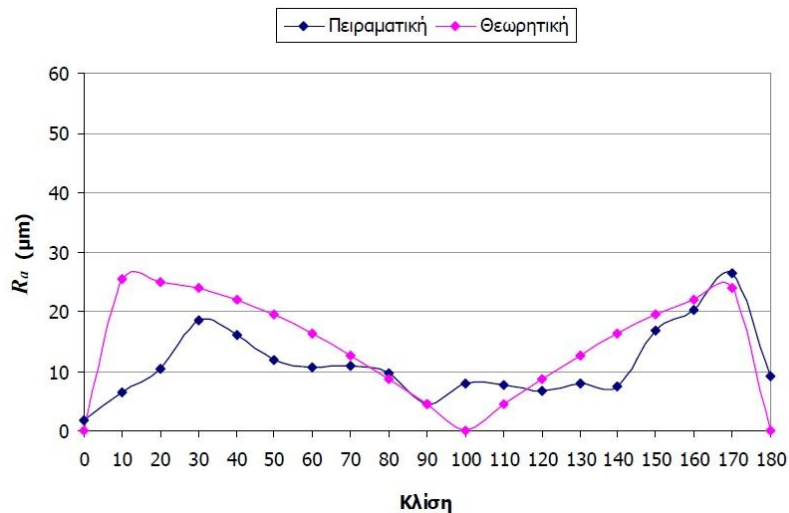
#### 5.1.4.11 Ανάλυση και αξιολόγηση αποτελεσμάτων ποιότητας επιφάνειας

Όσον αφορά την αξιολόγηση της ποιότητας επιφανειών των πρωτοτύπων LOM, από τη μελέτη των αποτελεσμάτων των δοκιμών “truncheon” και όπως επιβεβαιώνεται και από πλήθος πρωτοτύπων LOM πραγματικών αντικειμένων, διαφορετικών απαιτήσεων, που κατασκευάστηκαν στα πλαίσια της παρούσας διατριβής, προκύπτει ότι:

- Για τα αφινιρίστα αντικείμενα, παρά το ότι η τραχύτητα ακολουθεί τη μορφή της θεωρητικής της τιμής, είναι σε μέγεθος σημαντικά και σταθερά υψηλότερη. Αυτό αποδίδεται στην υφή του χαρτιού στις επιφάνειες του αντικειμένου, όπως εμφανίζεται μετά από τη διαδικασία αποχωρισμού και λήψης του πρωτοτύπου (με ίνες, σχισίματα και τριχίδια). Η καλύτερη τιμή  $Ra \approx 6\mu m$  παρατηρείται σε οριζόντιες ταυτισμένες με το επίπεδο XY επιφάνειες (όπου  $\theta=90^\circ$ ) και στις επιφάνειες με  $\theta$  από  $0-30^\circ$  και  $160-180^\circ$ . Γενικά στα αφινιρίστα LOM αντικείμενα παρατηρείται πλην οριζοντίων επιφανειών Ra από 25 έως 35 $\mu m$ .
- Για τα περιορισμένου φινιρίσματος αντικείμενα, η μορφή της πραγματικής τραχύτητας γίνεται αναντίστοιχη της θεωρητικής και κυμαίνεται για το Ra μεταξύ 6,8 και 19,9 $\mu m$ , 50% και παραπάνω καλύτερη από τα αφινιρίστα. Οι περιοχές βέλτιστων επιδόσεων εδώ είναι για τιμές του  $\theta$  από  $40-70^\circ$  και  $110-140^\circ$ , μετατοπισμένες επίσης από εκείνες των αφινιρίστων.
- Για τα εκτενούς φινιρίσματος αντικείμενα, η μορφή και οι τιμές της τραχύτητας είναι σχεδόν σταθερές, δείχνοντας την πλήρη αποξένωση του μεγέθους από τις θεωρητικές τιμές και τη σαφώς κυρίαρχη επίδραση της διαδικασίας και της έκτασης του φινιρίσματος. Το Ra κυμαίνεται μεταξύ 4,8 έως 15,5 $\mu m$ , σχεδόν στο 25% της τιμής του αφινιρίστου, με βέλτιστες σταθερές σχεδόν τιμές στις γωνίες  $\theta$  από  $30$  έως  $150^\circ$ .
- Οι ποιότητα επιφανειών πρωτοτύπων LOM είναι δυνατόν για ειδικές εφαρμογές να βελτιωθεί και παραπάνω, επιτυγχάνοντας τιμές Ra σταθερά  $< 10\mu m$ , με την εφαρμογή όμως αρκετών διαδοχικών κύκλων επικάλυψης και λείανσης και τη χρήση εξειδικευμένου εξοπλισμού λείανσης και ψεκασμού (π.χ. αερογράφοι), απαιτώντας επίσης εξειδικευμένο στο αντικείμενο τεχνικό προσωπικό και επιβαρύνοντας επιπλέον με τουλάχιστον 1 εργάσιμη ημέρα το χρόνο ολοκλήρωσης των τελικών πρωτοτύπων.

Η σύγκριση των δοκιμίων LOM με την τραχύτητα παρόμοιου Στερεολιθογραφικού δοκιμίου “truncheon” από μηχανή EOS Stereos Desktop S του ΠΠ, από ρητίνη DSM Somos 7110, το οποίο φτιάχτηκε με στρώσεις πάχους 0,1mm (Σχήμα 5.1.4.10.2), [Γιαννατσής, 2004], μαρτυρά ότι:

- Εφόσον το τεμάχιο παραμείνει αφινίριστο η ποιότητα επιφανειών από SLA είναι καλύτερη σε σχέση με την LOM.
- Τα πρωτότυπα LOM με φινίρισμα επιφανειών που γίνεται εύκολα και με κοινά υλικά επεξεργασίας ξύλου, μπορεί να καταστούν πολύ καλύτερα σε ποιότητα επιφανειών από τα SLA ιδίου πάχους στρώσης, τα οποία επιδέχονται φινίρισμα δυσκολότερα και με χρήση εξειδικευμένων υλικών και μεθόδων.



Πηγή: [Giannatsis, 2004]

Σχήμα 5.1.4.10.2: Τραχύτητα Ra δοκιμίου SLA

Τέλος συγκριτικά με τις επιδόσεις σε ποιότητα επιφανειών επιτραπέζιας CNC φρέζας, δοκιμές τραχυμέτρησης και σχετική έρευνα σε υλικά της οικογένειας CIBATOOL στο Εργαστήριο ΤΚΠ & Ε, [Βάρελης, 2009], κατέδειξαν ότι με χρήση των κατάλληλων (ball end) κοπτικών εργαλείων, σε κεκλιμένες επιφάνειες δεν προκύπτει πουθενά τραχύτητα Ra μεγαλύτερη από 5,2μm, αποδεικνύοντας την ανωτερότητα της συμβατικής κοπής στην απόδοση ποιότητας επιφανειών (έστω και ελεύθερων σύνθετης μορφής) σε σχέση με την οπωσδήποτε προσεγγιστική διαστρωματική κατασκευή τους.

### 5.1.5 Ιεράρχηση Κριτηρίων και κανόνες επιλογής προσανατολισμού κατασκευής πρωτοτύπων LOM

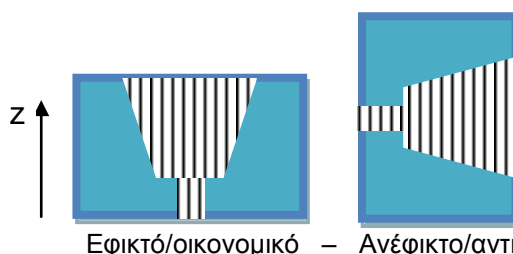
Έχοντας διεξοδικά καλύψει τα θέματα της αποδιδόμενης ακρίβειας και ποιότητας επιφανειών σε πρωτότυπα LOM, σε συνεκτίμηση και με τα όσα έχουν αναλυθεί περί χρόνου και κόστους κατασκευής είναι πλέον ασφαλές να ιεραρχηθούν οι βασικοί παράγοντες και να εξαχθούν οι κύριοι κανόνες επιλογής προσανατολισμού κατασκευής πρωτοτύπων με την εν λόγω τεχνολογία, κανόνες που επί μακρόν ακολουθούνται για τις σχετικές εργασίες στο Εργαστήριο ΤΚΠ & Ε του ΕΜΠ.

Εν αντιθέσει λοιπόν με άλλες τεχνολογίες ΤΚΠ, όπου ο προσανατολισμός είναι βασικό αντικείμενο μελέτης και βελτιστοποίησης, είτε γιατί οι διαδικασίες φινιρίσματος σπανίζουν ή απουσιάζουν πλήρως, είτε γιατί ο χρόνος υλοποίησης εξαρτάται περισσότερο από τον συνολικό όγκο και όχι τις βασικές X-Y-Z διαστάσεις του αντικειμένου, είτε τέλος γιατί οι διαδικασίες καθαρισμού και λήψης των πρωτοτύπων είναι εύκολες και χωρίς τεχνικές δυσκολίες, στην LOM αντίθετα η



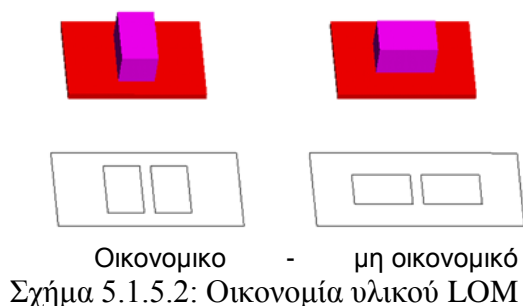
διαδικασία τοποθέτησης και προσανατολισμού των αντικειμένων για την κατασκευή τους, είναι ιεραρχική και σταδιακή. Σε αδρές γραμμές επηρεάζεται κατά προτεραιότητα από:

- 1<sup>ov</sup> : Την εφικτότητα κατασκευής του αντικειμένου με LOM. Είναι εύλογο ότι ένα συμπαγές αντικείμενο μπορεί εύκολα να κατασκευασθεί σε εξοπλισμό LOM εφόσον χωρά στον ωφέλιμο όγκο κατασκευής. Αντικείμενα όμως με κοιλότητες και εσωτερικές διαμορφώσεις μορφής φρέατος, ιδιαίτερα αν αυτές έχουν διαστάσεις των ανοιγμάτων τους μικρότερες από το βάθος τους, είναι ιδιαίτερος δύσκολο ως ανέφικτο να κατασκευασθούν σε LOM σε κατεύθυνση άλλη εκτός από εκείνη που ευθυγραμμίζει το κάθετο διάνυσμα του ανοίγματος της κοιλότητας με τον άξονα Z, καθώς οι στήλες της πλεονάζουσας πρώτης ύλης είναι δύσκολο έως αδύνατο να αφαιρεθούν από το πρωτότυπο για τη λήψη του. Επίσης αντικείμενα των οποίων η μία διάσταση κυριαρχεί απόλυτα έναντι των δύο υπολοίπων (π.χ. μορφή μολυβιού) θα πρέπει να προσανατολίζεται έτσι ώστε να προκύπτουν για αυτό επαρκείς συγκόλλησης μεταξύ τους στρώσεις, δηλαδή με τη μεγάλη διάσταση στο επίπεδο XY.
- 2<sup>ov</sup> : Την οικονομία του χρόνου και κόστους κατασκευής: Έχει καταδειχθεί από τα παραπάνω γραφόμενα, ότι τόσο για λόγους οικονομίας χρόνου και κόστους κατασκευής και δευτερευόντως για τον περιορισμό της διαστολής κατά Z (ακόμα και κατόπιν αντιστάθμισης της), συνήθως επιλέγεται εφόσον είναι κατασκευάσιμο με αυτόν τον προσανατολισμό το αντικείμενο, στον άξονα Z να τοποθετείται η μικρότερη κύρια διάστασή του. Τα συνολικά στρώματα που θα απαιτηθούν τότε για αυτό είναι τα ελάχιστα, με συνολικά μεγάλο χρονικό και κοστολογικό όφελος, καθώς οι πάγιοι χρόνοι που απαιτούνται για κάθε στρώση πάντοτε επαναλαμβάνονται. Οι δύο παραπάνω παράγοντες φαίνονται στο Σχήμα 5.1.5.1.



Σχήμα 5.1.5.1: Κατασκευαστικότητα και μείωση χρόνου κατασκευής LOM

- 3<sup>ov</sup>: Την οικονομία υλικού: Η τεχνολογία LOM ως γνωστόν εκκινεί από στερεό φύλλο υλικού. Ως αποτέλεσμα, υλικό που δεν καταλαμβάνεται από το αντικείμενο στον άξονα του πλάτους (άξονας Y) της πρώτης ύλης, μένει αχρησιμοποίητο και απορρίπτεται ως απόβλητο. Το ίδιο δεν συμβαίνει σε δοσομετρικής φύσης τεχνολογίες (π.χ. DDIP, FDM, Polyjet) ή σε τεχνολογίες σημειακής/γραμμικής/επιφανειακής στερεοποίησης (SLA, 3DP), όπου το πλεονάζον υλικό στο χώρο κατασκευής συλλέγεται και επαναχρησιμοποιείται. Αν και η πρώτη ύλη της τεχνολογίας LOM θεωρείται από τις πιο οικονομικές, για κοστολογικούς αλλά και περιβαλλοντικούς λόγους αποτελεί προτεραιότητα η κατά μέγιστο κάλυψη με αντικείμενο του πλάτους Y της πλατφόρμας κατασκευής, γεγονός που επηρεάζει ως 3<sup>o</sup> κριτήριο τον προσανατολισμό (Σχήμα 5.1.5.2).



- 4<sup>ov</sup> : Την απόδοση κρίσιμων διαστάσεων: Εφόσον έχουν καλυφθεί τα τρία προηγούμενα προαπαιτούμενα ή είναι δυνατόν να καλυφθούν σε μεγάλο βαθμό, τότε είναι δυνατόν συγκεκριμένες κρίσιμες διαστάσεις του αντικειμένου, για την καλύτερη δυνατή απόδοσή τους και σε συνδυασμό με εφαρμοσθείσα σε επίπεδο CAD αντιστάθμιση, να ευθυγραμμισθούν με τους κύριους άξονες X και Y του συστήματος για την ακριβέστερη δυνατή απόδοσή τους. Η δε ποιότητα επιφανειών έχει ήδη καταδειχθεί πως ήδη με την εφαρμογή περιορισμένου βαθμού φινιρίσματος αποσυνδέεται πλήρως από τον προσανατολισμό.



Τα παραπάνω ιεραρχημένα τέσσερα διαδοχικά βήματα προτείνονται στα πλαίσια της παρούσας ως βέλτιστη προσέγγιση επιλογής προσανατολισμού LOM, έχουν δοκιμασθεί επιτυχώς και εφαρμόζονται ως σήμερα στο Εργαστήριο ΤΚΠ & Ε του ΕΜΠ με ικανοποιητικά αποτελέσματα. Έναντι διαδικασιών βελτιστοποίησης με αντικειμενικές συναρτήσεις, ή άλλους τρόπους που βιβλιογραφικά προτείνονται για άλλες μεθόδους, ειδικά για τη LOM θεωρούνται ως η πιο ενδεδειγμένη μέθοδος. Σε περίπτωση δε μη ταυτόχρονης ικανοποίησης κάποιων από αυτά σε ένα αντικείμενο, αντί άλλου προσανατολισμού, αντιπροτείνεται ο κατακερματισμός του αντικειμένου σε μικρότερα τεμάχια που επιμέρους θα ικανοποιούν τη μέθοδο των 4 βημάτων και η μετέπειτα συνένωση/συγκόλλησή τους.

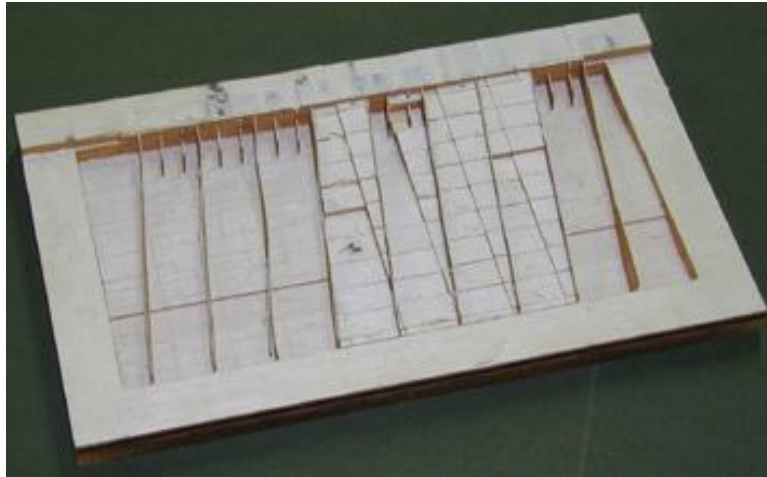
### 5.1.6 Ποιοτικά συμπεράσματα έρευνας & βέλτιστες πρακτικές για χρήση μεθόδου ΤΚΠ LOM

Πολλά ακόμα αξιοποιήσιμα ποιοτικά συμπεράσματα εξήχθησαν κατά τη διεξαγωγή της έρευνας για πρωτότυπα από τη μέθοδο LOM, όχι μόνο από τις επιτυχείς αλλά ακόμα και από τις αποτυχημένες εφαρμογές της. Τα συμπεράσματα αυτά τελούν εν ισχύ ως και σήμερα και αποτελούν οδηγίες και βέλτιστες πρακτικές εφαρμογής για τη μέθοδο LOM όχι μόνο στη μηχανή LOM1015, αλλά και για τις νεότερες και πιο σύγχρονες παραλλαγές της που βασίζονται σε διαστρωματική κατασκευή αντικειμένων από στερεά φύλλα χάρτινου ή άλλου υλικού και που έχουν αναφερθεί στην παράγραφο 1.9.4 της παρούσας εργασίας.

Οι σημαντικότερες από αυτές είναι:

- Να αποφεύγονται σε τεχνολογία LOM αντικείμενα με μορφολογικά στοιχεία (π.χ. νεύρα, μορφές ελάσματος) πάχους μικρότερου από 1,2mm, ειδικά αν το πάχος

αυτό ταυτίζεται με το επίπεδο κατασκευής XY. Παρουσιάζουν ελλiptή συνοχή στρώσεων μεταξύ τους, αστάθεια και υψηλή πιθανότητα αποκόλλησης τους και κατά συνέπεια καταστροφής του πρωτοτύπου, ειδικά κατά τη διαδικασία καθαρισμού. Ως εκ τούτου παρόμοια αντικείμενα κρίνονται ακατάλληλα για πρωτοτυποποίηση με τη μέθοδο LOM (Σχήμα 5.1.6.1).



Σχήμα 5.1.6.1: Αντικείμενο ακατάλληλο για τεχνολογία LOM

- Να αποφεύγονται αντικείμενα με πρόβoλα μορφολογικά στοιχεία σταθερής καθ' ύψος διατομής μικρότερης των  $10\text{mm}^2$  στο επίπεδο XY. Κατά κανόνα αποκολλώνται κατά τη διαδικασία καθαρισμού και λήψης του αντικειμένου από τις ασκούμενες δυνάμεις αφαίρεσης της πλεονάζουσας πρ. ύλης.
- Γενικά για τα πρόβoλα στοιχεία και επιμήκη αντικείμενα στον άξονα Z, να τηρείται πάντοτε αναλογία ελάχιστης κατά XY διάστασης της διατομής τους ως προς το κατά Z ύψος τους τουλάχιστον  $1/3$  και όχι μικρότερη, καθώς για μικρότερες τιμές υπάρχει ισχυρός κίνδυνος αποκόλλησης επιπέδων/ θραύσης του στοιχείου/αντικειμένου λόγω καμπτικών τάσεων στις διατομές από δυνάμεις που ασκεί ο χρήστης στο αντικείμενο. Κατά προτίμηση οι επιμήκεις μορφές να τοποθετούνται οριζόντια στο επίπεδο XY με μεγαλύτερης επιφάνειας διατομές.
- Για την δημιουργία εκμαγείων και μητρών από πρωτότυπα LOM συνιστάται η εφαρμογή κατάλληλου αποκολλητικού (π.χ. παραφίνης) με πινέλο ή σπρέι, δια τον οποίον επιτυγχάνεται η εύκολη αφαίρεση του πρωτοτύπου LOM χωρίς αποκολλήσεις των στρώσεών του.
- Σε περιπτώσεις όπου η διαίρεση των αντικειμένων για κατασκευή τους με τεχνολογία LOM είναι απαραίτητη, είτε γιατί α) δεν χωρούν στον ωφέλιμο χώρο, β) φιλοξενούν εσωτερικές κοιλότητες και μορφές που δεν είναι δυνατόν να καθαριστούν διαφορετικά από την περίσσεια του υλικού, γ) δεν μπορούν διαφορετικά να επιτευχθούν ταυτόχρονα οι 4 ιεραρχημένοι στόχοι του προσανατολισμού κατασκευής του αντικειμένου, τότε:
  - Η διαίρεση αυτή συνιστάται να γίνεται με διαχωριστική επιφάνεια από συνδυασμό τεθλασμένων επιπέδων ή με διπλά καμπυλωμένη επιφάνεια, ώστε σε κάθε περίπτωση να προκύπτει μονοσήμαντη τοποθέτηση των διηρημένων κομματιών χωρίς βαθμούς ελευθερίας κίνησης μεταξύ τους
  - Να μετατοπίζεται κάθε διαχωριστική επιφάνεια σε επίπεδο CAD (offset) πριν την κατασκευή  $0,1 - 0,2\text{mm}$  προς τη μεριά του υλικού για κάθε επιμέρους τεμάχιο, ώστε να δημιουργείται μεταξύ των τεμαχίων ο απαραίτητος χώρος για τη συγκολλητική ύλη (κόλλα) που θα συνδέει τα

τεμάχια, χωρίς αλλοίωση των συνολικών διαστάσεων και υποβάθμιση της ακρίβειας.

- Σε ικανού πάχους (>10mm) ή συμπαγή διηρημένα αντικείμενα μπορεί επίσης να ακολουθηθεί η μέθοδος επίπεδων ή απλής μορφής επιφανειών διαχωρισμού του αντικειμένου, σε συνδυασμό με κατάλληλο αριθμό εγκάρσιων σε αυτές επιμερισμένων κατάλληλης διαμέτρου (π.χ. Ø6mm, Ø8mm) τρυμάτων μεταξύ των διηρημένων τεμαχίων, ώστε σε αυτά κατόπιν μπορούν να εντεθούν ξυλουργικού τύπου (ξύλινες ή μεταλλικές) τυποποιημένες «καβίλιες» ή πείροι, δια των οποίων επιτυγχάνεται άμεση και ακριβής ευθυγράμμιση των επιμέρους τεμαχίων και καλού επιπέδου αντοχή στο μετέπειτα συγκολλημένο πλήρες αντικείμενο.
- Για τη συγκόλληση διηρημένων τεμαχίων LOM, γενικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν όλες οι συμβατές με το χαρτί και το ξύλο κόλλες (π.χ. Ατλακολ, Ρευστή τύπου UHU κλπ.) Αν όμως για τη συγκόλληση δεν έχει ληφθεί μέριμνα συγκράτησης των τεμαχίων με ακριβεία μέχρι την πλήρη πήξη της κόλλας, αλλά και για λόγους ισχυρότερης συνοχής τους είναι προτιμότερες εποξειδικές κόλλες 2 συστατικών που σταθεροποιούνται ικανοποιητικά μετά από 20 λεπτά και είναι πλήρως στερεοποιημένες σε 8-24 ώρες, δημιουργώντας μάλιστα ισχυρούς συνεκτικούς δεσμούς καθώς εισχωρούν μέσα από τους πόρους του χαρτιού, και σαρκώδεις (gel) κυανοακρυλικές κόλλες ταχείας δράσεως (π.χ. LOGO, LOCTITE, BISON).
- Οποιαδήποτε διαδικασία συγκόλλησης διηρημένων τεμαχίων LOM πρέπει να γίνεται πριν από οποιαδήποτε διαδικασία φινιρίσματος (λείανση, βαφή) και αφού πρώτα έχει ελεγχθεί η χημική συμβατότητα των υλικών αποπεράτωσης με τα υλικά συγκόλλησης (Διαφορετικά είναι δυνατόν να συμβούν αλλοιώσεις του πρωτοτύπου, ακόμα και αποκόλλήσεις των στρώσεων και ολική καταστροφή του). Έτσι επιτυγχάνεται η πλήρης εξάλειψη των ιχνών από τη συγκόλληση των επιμέρους τεμαχίων και καλής ποιότητας τελική επιφάνεια.

## 5.2 Μέθοδος ΤΚΠ FDM

Θα παρατεθούν παρακάτω συνοπτικά, ποιοτικά και ποσοτικά ερευνητικά αποτελέσματα και συμπεράσματα που συγκεντρώθηκαν εντατικά τα τελευταία τρία χρόνια και αξιοποιήθηκαν για τους σκοπούς της παρούσας διατριβής σχετικά με την τεχνολογία ΤΚΠ εναπόθεσης τήγματος υλικού που είναι γνωστή ως FDM. Ορισμένα μάλιστα από αυτά έχουν δημοσιευθεί από τον συγγραφέα της παρούσας στο διεθνές συνέδριο του CIRP, “DET2011 – 7<sup>th</sup> International Conference on Digital Enterprize Technology”, με εργασία υπό τον τίτλο “Evaluation of geometrical uncertainty factors during integrated utilization of reverse engineering & rapid prototyping technologies”, [Kaisarlis et al., 2011].

### 5.2.1 Εισαγωγή στη μέθοδο FDM – Εστίαση σε συστήματα μικρής κλίμακας

Η μέθοδος FDM, όπως έχει αναφερθεί και στο Κεφάλαιο 1, είναι μια από τις πέντε πρώτες ιστορικά τεχνολογίες ΤΚΠ που καταγράφηκαν, κάνοντάς την εμφάνισή της στις αρχές της δεκαετίας του 1990. Η αρχή λειτουργίας της, που πρακτικά δεν έχει από τότε υποστεί σημαντικές αλλαγές, έχει περιγραφεί ήδη στην παράγραφο 1.9.4 και βασίζεται στην εναπόθεση ρευστού τήγματος θερμοπλαστικών υλικών, τα οποία επαναστεροποιούνται αμέσως μετά την επαφή τους με το υπό κατασκευή αντικείμενο.

Πρόκειται για ιδιαίτερα διαδεδομένη διεθνώς τεχνολογία με πολύ ευρεία παγκόσμια εγκατεστημένη βάση. Ο δε οίκος Stratasys Inc. που την εισήγαγε, εκτός από τα αμιγώς βιομηχανικής κατεύθυνσης και κλίμακας συστήματα ΤΚΠ που ανέπτυξε, τη χρησιμοποίησε επίσης μετά το 2000 σε μικρότερης κλίμακας απλούστερα συστήματα (Stratasys Genisys), εγκαθιδρύοντας από τους πρώτους την κατηγορία των μικρής κλίμακας – χαμηλού κόστους συστημάτων 3Δ εκτύπωσης, με στόχο την εμπορική διάδοση της διαστρωματικής κατασκευής σε ευρύτερες αγορές. Πλέον ως μεγάλος όμιλος τεχνολογιών ΤΚΠ σήμερα, διαθέτει την τεχνολογία FDM σε ποικιλία συστημάτων διαφορετικών τεχνικών χαρακτηριστικών και δυνατοτήτων, δια μέσου τριών υπο-εταιριών του ευρύτερου ομίλου, Stratasys – Dimension – uPrint.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον δε έχει το γεγονός ότι η βασική πατέντα της τεχνολογίας FDM έχει πλέον καταπέσει λόγω 20ετίας, με αποτέλεσμα σήμερα να έχουν ήδη εμφανισθεί πολυάριθμοι «προσωπικοί» 3Δ εκτυπωτές οικιακής και σχολικής χρήσης, διαφόρων παλαιών και νέων κατασκευαστών που βασίζονται στην ίδια αρχή και χρησιμοποιούν παρόμοια υλικά. Η μελέτη και η έρευνα της FDM και των εφαρμογών της λοιπόν, ιδιαίτερα για τα μικρής κλίμακας – ευρείας αξιοποίησης συστήματα, παρουσίαζε πάντα και παρουσιάζει και σήμερα ιδιαίτερο ενδιαφέρον, όπως δείχνει και η σχετική πλούσια βιβλιογραφία, σημαντικά κομμάτια της οποίας έχουν ήδη αναφερθεί στην παράγραφο 1.11 της παρούσας.

### 5.2.2 Η μονάδα uPrint του Εργαστηρίου ΤΚΠ του ΕΜΠ

Το Εργαστήριο ΤΚΠ & Ε της Σχολής ΜΜ του ΕΜΠ συμπλήρωσε τον ΤΚΠ εξοπλισμό του το 2009 με την προμήθεια μιας μονάδας FDM 4<sup>ης</sup> γενιάς, τύπου *uPrint*, η οποία εγκαταστάθηκε και τέθηκε σε λειτουργία στο Εργαστήριο το 2010, (Σχήμα 1.14.1). Η μηχανή *uPrint* είναι απόγονος των προηγούμενης γενιάς συστημάτων FDM μικρής κλίμακας *Genisys & Prodigy* της Stratasys Inc. Σήμερα η γκάμα των μηχανών *uPrint* έχει εμπλουτισθεί με τα μοντέλα *uPrint SE & uPrint SE Plus*, με ελαφρώς μεγαλύτερο ωφέλιμο χώρο κατασκευής και δυνατότητα πρώτων

υλών από ποικιλία εννεά χρωμάτων, αλλά και με τη μικρότερη (entry level) μηχανή τεχνολογίας FDM με την εμπορική ονομασία *Mojo*. Είναι δε αξιοσημείωτο ότι κατόπιν εμπορικής συμφωνίας του οίκου Stratasys με την γνωστή εταιρία ηλεκτρονικών και μηχανών γραφείου Hewlett Packard (HP), η μηχανή *uPrint* διατίθεται διεθνώς από την τελευταία, από τον Απρίλιο του 2010 έως το τέλος του 2012, με το σήμα της HP και με εμπορικό όνομα *Designjet 3D Printer* ως εκτυπωτής 3 διαστάσεων.

Η επιλογή της συγκεκριμένης μηχανής έγινε κυρίως με τα παρακάτω κριτήρια:

- Κατατάσσεται στα χαμηλού κόστους κτήσης συστήματα γραφείου / εργαστηρίου, με τότε (2009) συνολικό κόστος κτήσης μηχανής και παρελκομένων της τάξεως των 17.000 €.
- Έχει χαμηλό κόστος κατασκευής των αντικειμένων που την καθιστά συμβατή με τις ανάγκες και σημερινές δυνατότητες του ελληνικού βιομηχανικού και κατασκευαστικού περιβάλλοντος και των ελληνικών MME.
- Χρησιμοποιεί πρώτη ύλη από θερμοπλαστικό υλικό ABS+, τεχνικά χαρακτηριστικά του οποίου δίνονται στο Παράρτημα Δ, υλικό που για πολλές κατηγορίες μηχανολογικών εξαρτημάτων, προϊόντων και εφαρμογών μπορεί να αποδώσει με επιτυχία απευθείας λειτουργικά αντικείμενα, με χαρακτηριστικά ικανοποιητικής αντοχής και ευκαμψίας (μηχανικές ιδιότητες της τάξης του 70% των κανονικών θερμοπλαστικών από χύτευση), αντίθετα με τα πρωτότυπα περιορισμένης λειτουργικότητας από χαρτί της προϋπάρχουσας στο Εργαστήριο τεχνολογίας LOM.
- Η αφαίρεση του υλικού υποστήριξης της κατασκευής μπορεί να γίνει και με υδατοδιάλυση σε θερμό αλκαλικό διάλυμα (65° C), χωρίς ιδιαίτερα κοπιώδη χειρονακτική εργασία.
- Αντίθετα με την LOM, αποδίδει εύκολα, με ικανοποιητική ταχύτητα και αντοχή λεπτότοιχες και σύνθετες γεωμετρίες και μικρά εξαρτήματα.
- Συνδέεται απευθείας σε τοπικό δίκτυο H-Y, για την τροφοδοσία της με τα δεδομένα κατασκευής, που μπορούν να προέρχονται από πολλαπλούς χρήστες.
- Αντιπροσωπεύεται και υποστηρίζεται τεχνικά από εν Ελλάδι αντιπρόσωπο.

Τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά της *uPrint* δίνονται στον Πίνακα 5.2.2.1

<b>Πρώτη ύλη:</b>	ABSplus σε λευκό (ivory) χρώμα
<b>Ωφέλιμες διαστάσεις:</b>	203 x 152 x 152 mm (8 x 6 x 6 in)
<b>Πάχος στρώσης:</b>	0,254 mm (0,010 in), σταθερό
<b>Workstation compatibility:</b>	Windows® XP to Windows 8®
<b>Network connectivity:</b>	Ethernet TCP/IP 10/100 base T
<b>Μέγεθος και βάρος:</b>	610(w) x 660(d) x 800(h) mm (24 x 26 x 31.5 in); 76 kg (168 lbs)
<b>Απαιτήσεις ηλεκτρικής παροχής:</b>	220–240 VAC 50/60Hz, minimum 7A σε αυτόνομη γραμμή, 1200W
<b>Συμμόρφωση με:</b>	CE / ETL / RoHS / WEEE
<b>Ειδικές απαιτήσεις:</b>	Καμία

Πίνακας 5.2.2.1: Βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά μηχανής *uPrint*

Η *uPrint* του Εργαστηρίου ΤΚΠ&Ε λειτουργεί με το αποκλειστικό λογισμικό λειτουργίας και προετοιμασίας αρχείων *STL Dimension Catalyst*, (Αρχικά σε v.4.2 και σήμερα αναβαθμισμένο σε v.4.4).

Στην *uPrint* του Εργαστηρίου, σε ιδιαίτερα δύσκολες μάλιστα οικονομικά εποχές (2010 – 2013), έχουν για τις εκπαιδευτικές και ερευνητικές ανάγκες της Σχολής Μ-Μ του ΕΜΠ, αλλά και για τις ευρύτερες δραστηριότητες του Εργαστηρίου ήδη κατασκευασθεί με επιτυχία δεκάδες αντικείμενα, μέσω των οποίων έχει συμπληρωθεί η έρευνα της παρούσας διατριβής και με δεδομένα της τεχνολογίας FDM σε μηχανές μικρής κλίμακας. Σχετικά αποτελέσματα έχουν ήδη δημοσιευθεί, [Kaisarlis et al., 2011], συγκριθεί με παρόμοια διεθνώς δημοσιευμένα, συμπεριληφθεί και αξιοποιηθεί στους κεντρικούς σκοπούς της ΔΔ των Κεφαλαίων 3 και 4 της παρούσας, και παρουσιάζονται συνοπτικά παρακάτω.

### 5.2.3 Χρόνος – κόστος κατασκευής πρωτοτύπων FDM

Η φύση της τεχνολογίας FDM, ως ροή και εναπόθεση υλικού από ένα ακροφύσιο, είναι δοσομετρική και μάλιστα «γραμμικά» (Εν αντιθέσει με τεχνολογίες ψεκασμού πολλαπλών κεφαλών που είναι «επιφανειακά» δοσομετρικές. Για την FDM αυτό σημαίνει ότι ο συνολικός όγκος (κατασκευαζομένου αντικειμένου και υλικού υποστήριξης αστήρικτων και προς τα κάτω κεκλιμένων επιφανειών) θα πρέπει να τροφοδοτηθεί με σταθερή παροχή από την εκάστοτε διατομή του ακροφυσίου εναπόθεσης (κύριου ή υποστηρικτικού υλικού αντίστοιχα). Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι το κυρίαρχο μέγεθος επηρεασμού του χρόνου κατασκευής για την FDM είναι ο όγκος (πρωτοτύπου και απαραίτητης υποστήριξης) και δευτερευόντως ο προσανατολισμός ή η συνθετότητα του αντικειμένου. Για αυτό εξάλλου στην τεχνολογία FDM και συναφείς δοσομετρικές τεχνολογίες η ταχύτητα/ ρυθμός κατασκευής συνηθίζεται να εκφράζεται σε  $\text{cm}^3/\text{h}$  ή  $\text{cm}^3/\text{min}$ .

Για τον ίδιο λόγο δε, και ανάλογα με τις απαιτήσεις χρήσης του κατασκευαζομένου πρωτοτύπου (π.χ. ταχύτητα, αντοχή), επίσης πολύ περισσότερο από τον προσανατολισμό ή τη συνθετότητα του, επηρεάζει το χρόνο κατασκευής η επιλογή του τρόπου απόδοσης των συγκεντρωμένου όγκου τμημάτων του (συμπαγής – solid, πυκνά κυψελωτή – sparse high density, αραιά κυψελωτή – sparse low density), που αποτελεί παράμετρο ρύθμισης της μηχανής *uPrint*.

Γενικά πάντως, έγκυρες συγκριτικές αξιολογήσεις τεχνολογιών ΤΚΠ μικρής κλίμακας [Grimm, 2010], και μελέτες αποτίμησης και αξιολόγησης της FDM ευρύτερα, [Grimm, 2003a; Brajlilh et al., 2011], την τοποθετούν στις αργού ρυθμού τεχνολογίες ΤΚΠ.

Η ύπαρξη των παραπάνω και άλλων έγκυρων δημοσιευμένων στοιχείων για την τεχνολογία FDM γενικά και τη μηχανή *uPrint* (και τους παρόμοιας λειτουργίας προκατόχους της Genisys & Prodigy) ειδικότερα, σε συνδυασμό με την δυνατότητα ρεαλιστικής προεκτίμησης χρόνου κατασκευής από αρχεία STL δια του λογισμικού *Catalyst*, διευκόλυνε την παρούσα έρευνα στο να περιορισθεί στον ποσοτικό τους προσδιορισμό και στην επιβεβαίωση των δημοσιευμένων καταγεγραμμένων επιδόσεων της *uPrint* μέσω κατασκευών πρωτοτύπων FDM στο ΕΜΠ, τόσο μεμονωμένων αντικειμένων όσο και ταυτόχρονα κατασκευαζόμενων ομάδων πολλαπλών διατεταγμένων αντικειμένων. Σε κάθε περίπτωση, τα συμπεράσματα ως προς το ρυθμό κατασκευής των αντικειμένων, λόγω του δοσομετρικού χαρακτήρα της μεθόδου FDM, δεν διαφοροποιούνται για τις ομάδες πολλαπλών διατεταγμένων αντικειμένων, που μπορούν να θεωρηθούν για την κατασκευή ως ένα, συνθετότερης γεωμετρίας αντικείμενο, όγκου ίσου με το άθροισμα των επιμέρους.

Σε σύνολο 24 διακριτών περιπτώσεων κατασκευής μεμονωμένων και ομάδων πρωτοτύπων FDM στη *uPrint* του Εργαστηρίου ΤΚΠ & Ε, προσδιορίσθηκε ρυθμός

κατασκευής/ εναπόθεσης από **9 έως 12 cm<sup>3</sup>/h**, με τυπικό μέσο όρο τα **11 cm<sup>3</sup>/h**. Τα αποτελέσματα επιβεβαιώνονται και από τους χρόνους κατασκευής των δοκιμίων του Grimm, [Grimm, 2010] και εν μέρει των Brajliah et al., [Brajliah et al., 2011], που όμως αξιολογούν τον 3<sup>ης</sup> γενιάς προκάτοχο της uPrint , Prodigy Plus.

Σημειώνεται ότι ο ρυθμός κατασκευής αυτός αναφέρεται στο σύνολο  $V_t$  του όγκου του πραγματικά εναποτιθέμενου υλικού (κύριου και υποστηρίξης) των αντικειμένων, περιλαμβάνοντας και το απαραίτητο αραιής δομής υπόστρωμα κατασκευής τους ύψους 3mm.

Για την αναγωγή του θεωρητικού όγκου  $V$  του/των υπό κατασκευή πρωτότυπου/-ων σε πραγματικό όγκο εναπόθεσης κύριου υλικού  $V_\pi$ , στα πλαίσια της παρούσας προτείνεται για τη μηχανή uPrint να χρησιμοποιείται ο παρακάτω εμπειρικός Πίνακας 5.2.3.1, ανάλογα με τη ρύθμιση της πυκνότητας εναπόθεσης.

Συντελεστής μετατροπής σε όγκο εναπόθεσης	Συμπαγής Εναπόθεση	Πυκνή Εναπόθεση	Αραιή Εναπόθεση
Συμπαγή ή Χονδρά >10mm	1	0,75	0,64
Πάχους 3 έως 10mm	1	0,80	0,70
Λεπτότοιχα 1 έως 3mm	1	0,85	0,75
Λεπτότοιχα 0,5 έως 1mm	1	1	1

Πίνακας 5.2.3.1: Αναγωγή του θεωρητικού σε πραγματικό όγκο κατασκευής αντικειμένων σε FDM-uPrint

Για τον προσδιορισμό δε του συνολικού όγκου υλικού  $V_t$  που θα εναποτεθεί, επιπροσθέτως του όγκου του κύριου υλικού κατασκευής, που μπορεί να προεκτιμηθεί με τη χρήση του παραπάνω Πίνακα, ο χρήστης της uPrint θα πρέπει να προσδιορίσει και τον αναλογούντα όγκο απαραίτητου υποστηρικτικού υλικού  $V_v$ , που εξαρτάται από την κατασκευαζόμενη γεωμετρία και τον προσανατολισμό της στη μηχανή. Αυτός σε κάθε περίπτωση κυμαίνεται από 10 έως 100% του όγκου του πραγματικού όγκου με μέση στατιστικά τιμή, όπως προκύπτει από την εμπειρία και τις δοκιμές στα πλαίσια της διενεργηθείσας έρευνας το **40%** του πραγματικού όγκου, με την προϋπόθεση της βέλτιστης για τη δεδομένη τεχνολογία επιλογής παραμέτρων και προσανατολισμού κατασκευής.

Κατά συνέπεια ένας ρεαλιστικός ενδεικτικός χρόνος κατασκευής σε uPrint μπορεί να δοθεί ως:

$$T_K (h) = V_t (cm^3)/11 (cm^3/h) = 1,4*V_\pi (cm^3)/11 (cm^3/h) = 0,127*V_\pi (h) \quad (5.15)$$

Ο πάγιος χρόνος προετοιμασίας αρχείων και έναρξης κατασκευής αντικειμένων στη uPrint,  $T_\Pi$ , προέκυψε ότι είναι της τάξεως των **45min**.

Τέλος ο χρόνος αποπεράτωσης και λήψης των τελικών πρωτοτύπων,  $T_\Lambda$ , που συνήθως γίνεται με υδατοδιάλυση των υποστηρικτικών δομών σε θερμό αλκαλικό διάλυμα (65° C) διαρκεί από **1 έως 3 ώρες** ανάλογα με την ποσότητα και έκτασή τους στο κατασκευαζόμενο αντικείμενο. Τυπικός μέσος όρος η **1 ½ ώρα**.

Τελικά λοιπόν ένας ρεαλιστικός ενδεικτικός χρόνος λήψης πρωτοτύπου FDM – uPrint μπορεί να δοθεί ως:

$$T_\Lambda = 0,127*V_\pi + 2,25 (h) \quad (5.16)$$



Το καθαρό κόστος κατασκευής  $K_k$  των αντικειμένων σε uPrint, είναι εύκολο να προεκτιμηθεί εφόσον έχει προσδιοριστεί ως ανωτέρω το σύνολο του πραγματικού όγκου  $V_t$  του κύριου και υποστηρικτικού υλικού που θα απαιτηθεί, ως:

$$K_k = 1,1 * V_t * (K_m / V_m), \quad (5.17)$$

, όπου:  $K_m$ , το κόστος προμήθειας μιας μονάδας υλικού  
 $V_m$ , η περιεχόμενη ποσότητα υλικού ανά μονάδα.

Το δε συνολικό καθαρό κόστος  $K = K_\pi + K_k + K_a$  για πρωτότυπα uPrint μπορεί επίσης να προσδιορισθεί με τις προϋποθέσεις και όρους που ακολουθήθηκαν και για την τεχνολογία LOM, στην παράγραφο 5.1.3.4.

Σημειώνεται ότι:

- Τόσο για την κύρια όσο και για την υποστηρικτική πρώτη ύλη περιέχεται ίδια ποσότητα ανά μονάδα υλικού (425cc) που διατίθεται με την ίδια τιμή (Σήμερα 170 €/μονάδα). Αυτό επιτρέπει και τον προσδιορισμό του  $K_k$  βάσει του  $V_t$ .
- Εφαρμόζεται πολλαπλασιαστής 1,1 που έχει προσδιορισθεί ότι κοστολογικά καλύπτει επαρκώς την απόσβεση, τακτική συντήρηση και ηλεκτρική κατανάλωση της μονάδας uPrint, με συνθήκες και προϋποθέσεις λειτουργίας της μηχανής παρόμοιες με αυτές που θεωρήθηκαν για την LOM1015 στην παράγραφο 5.1.3.4

#### **5.2.4 Απόδοση μορφολογικών χαρακτηριστικών και αντιστάθμιση διαστασιολογικών αποκλίσεων πρωτοτύπων FDM**

Η μηχανή uPrint, όπως και άλλες συναφείς χαμηλού κόστους και περιβάλλοντος γραφείου εναλλακτικές μηχανές ΤΚΠ που προσδιορίζονται με τον όρο 3D εκτυπωτές, αποτελούν για τον κατασκευαστικό κόσμο κατά βάση συστήματα άμεσης σε πρόσβαση και σχετικά φθηνής πρωτοτυποποίησης. Ως τέτοια, στην αρχιτεκτονική τους δεν εξαντλούν πάντα τις εφικτές τεχνολογικές δυνατότητες των κατασκευαστών τους και δεν συγκρίνονται άμεσα με τις επιδόσεις, ρυθμού κατασκευής και ακρίβειας (διαστασιολογικής και γεωμετρικής) ανώτερων, βιομηχανικού προσανατολισμού, συστημάτων ΤΚΠ. Αντίθετα, μάλλον περιορίζονται στις ελάχιστα αποδεκτές επιδόσεις ακρίβειας και ποιότητας επιφάνειας για την άμεση, γρήγορη και συχνά επαναλαμβανόμενη πρωτοτυποποίηση αντικειμένων της συνήθους γκάμας μηχανολογικών εφαρμογών. Με την διάδοση τους όμως να αυξάνεται ραγδαία μετά τα μέσα της δεκαετίας του 2000 (βλ. και Παράγραφο 1.9.2), δεν παύουν αυτά να είναι εφάμιλλα και άμεσα συγκρίσιμα σε ακρίβεια με παλαιότερα βιομηχανικά συστήματα ΤΚΠ 1<sup>ης</sup> και 2<sup>ης</sup> γενιάς, όπως επιβεβαιώθηκε και από την παρούσα έρευνα και θα καταδειχθεί παρακάτω.

Τα παραπάνω καταγράφουν χαρακτηριστικά και αρκετές συγκριτικές μελέτες, τόσο 3D εκτυπωτών μεταξύ τους [Grimm, 2005 & 2010; Helmer & Mobbs, 2011], όσο και FDM 3D εκτυπωτών με ανώτερων δυνατοτήτων βιομηχανικά ΤΚΠ συστήματα, [Grimm, 2002; Brajliah et al., 2011].

Μετρήσεις χαρακτηριστικών διαστάσεων από ποικίλα μορφολογικά στοιχεία (πρισματικά, κυλινδρικά, εσωτερικά, εξωτερικά) πραγματικών αντικειμένων που συστηματικά ελήφθησαν μεταξύ 2010 και 2013 από αντικείμενα που κατασκευάστηκαν στην uPrint του Εργαστηρίου ΤΚΠ & Ε, σε πολύ μεγάλο βαθμό επιβεβαίωσαν τα αποτελέσματα του Grimm στην μελέτη του το 2010, [Grimm,

2010], που καταγράφουν 85 % των διαστάσεων να αποκλίνουν κατά μέγιστο ως 0,15mm ( $\pm 1 \sigma$ ) και 96% αυτών κατά μέγιστο 0,25mm ( $\pm 2 \sigma$ ). Μόνο σποραδικά και σε μεμονωμένες περιπτώσεις μετρήθηκαν διαστάσεις με απόκλιση ως 0,5mm. Συνεπώς η μηχανή *uPrint*, σε επίπεδο αποδιδόμενης ακρίβειας για τις συνήθεις διαστάσεις που μπορεί να αποδώσει, με ασφάλεια κατατάσσεται κατά ISO σε ποιότητα **IT 12 – IT 13**. Σημειώνεται ότι οι επιδόσεις αυτές είναι ταυτόσημες με τις επιδόσεις της LOM1015 που προέκυψαν από την παρούσα έρευνα για τη LOM 1015 (Παράγραφος 5.1.4.6), βιομηχανικής κλίμακας μηχανή TKΠ παλαιότερης γενιάς.

Αυτό όμως που τόσο η βιβλιογραφία, όσο και η εμπειρία από πρωτότυπα FDM στο ΕΜΠ καταδεικνύει και πρέπει εδώ να επισημανθεί, είναι οι εμφανιζόμενες αστοχίες και αποκλίσεις απόδοσης μορφής (γεωμετρικά σφάλματα) που οι μικρής κλίμακας μηχανές FDM *uPrint* εμφανίζουν, ειδικά στα μορφολογικά στοιχεία μικρών διαστάσεων έως 5mm και οδηγούν τελικά είτε στην παραμόρφωση, είτε στην πλήρη εξάλειψη συγκεκριμένων μορφών από το κατασκευαζόμενο πρωτότυπο. Οι αστοχίες και αποκλίσεις αυτές αποδίδονται κυρίως σε δύο αιτίες:

- Στη φύση της εναπόθεσης τήγματος, κατά την οποία: (α) απαιτείται ακριβής έναρξη και διακοπή της παροχής υλικού στο σημείο εισόδου-εξόδου της κεφαλής στα κλειστά περιγράμματα ορισμού των επιφανειών που αποδίδονται στις στρώσεις, και (β) το πάχος του τετηγμένου υλικού που εξέρχεται από την κεφαλή και που για την περίπτωση της *uPrint* (κεφαλή τύπου T16) μετά την επίστρωση στο επίπεδο XY είναι ελλειψοειδούς διατομής με την μεγάλη διάμετρο **0,45mm** (visible raster) να βρίσκεται επί του επιπέδου XY.
- Στο σχετικά υψηλό σε σύγκριση με εναλλακτικές μικρής ή μεγαλύτερης κλίμακας μηχανές TKΠ πάχος στρώσης της *uPrint*, ίσο με **0,25mm** (μικρή διάμετρος της ελλειψοειδούς διατομής μετά την εναπόθεση), πάχος που αναπόφευκτα επηρεάζει την ακριβή απόδοση διαστάσεων στον άξονα Z.

Σε μεγαλύτερες, βιομηχανικής κλίμακας μηχανές FDM (π.χ. Stratasys Fortus) τόσο οι κεφαλές είναι εναλλάξιμες με άλλες μικρότερης διαμέτρου, όσο και οι διαδρομές και τα πάχη εναπόθεσης και στρώσεων είναι ρυθμιζόμενες παράμετροι, [Stratasys/BP-TIPSELECT 03/09, 2009; Stratasys/TAG 30-01, 2011] επιτρέποντάς στις μηχανές αυτές σαφώς καλύτερες επιδόσεις ακρίβειας και απόδοσης γεωμετριών από τα μικρής κλίμακας συστήματα *uPrint*, [Hanssen, 2008]. Στα μικρής κλίμακας *uPrint* όμως η κεφαλή εναπόθεσης είναι συγκεκριμένη και σταθερή (Tip T-16) και δεν υπάρχει δυνατότητα ελέγχου και ρύθμισης του τρόπου και του πάχους επίστρωσης υλικού πέραν των βασικών ρυθμίσεων συμπαγούς, πυκνής και αραιής επίστρωσης που έχουν αναφερθεί παραπάνω.

Με γνώμονα τα παραπάνω και δεδομένου ότι οι μηχανές *uPrint* κατά κόρον χρησιμοποιούνται:

- Από ΜΜΕ και μικρά γραφεία και φορείς σχεδιασμού
- Για μικρά (το πολύ έως 250x150x150mm) αντικείμενα με σημαντικά μικρότερα των κύριων διαστάσεων τους μορφολογικά στοιχεία και γεωμετρίες επί αυτών
- Για γεωμετρικά και κάποιες έκτασης λειτουργικά πρωτότυπα στα οποία συχνά επιβεβαιώνονται η συναρμολόγηση, η συνεργασία και η λειτουργία συναρμολογημένων συνόλων και μηχανισμών

, στα πλαίσια της παρούσας έρευνας στοχεύθηκε να διερευνηθούν καταρχήν οι δυνατότητες προσδιορισμού των πηγών και του βαθμού επίδρασής και σε δεύτερο

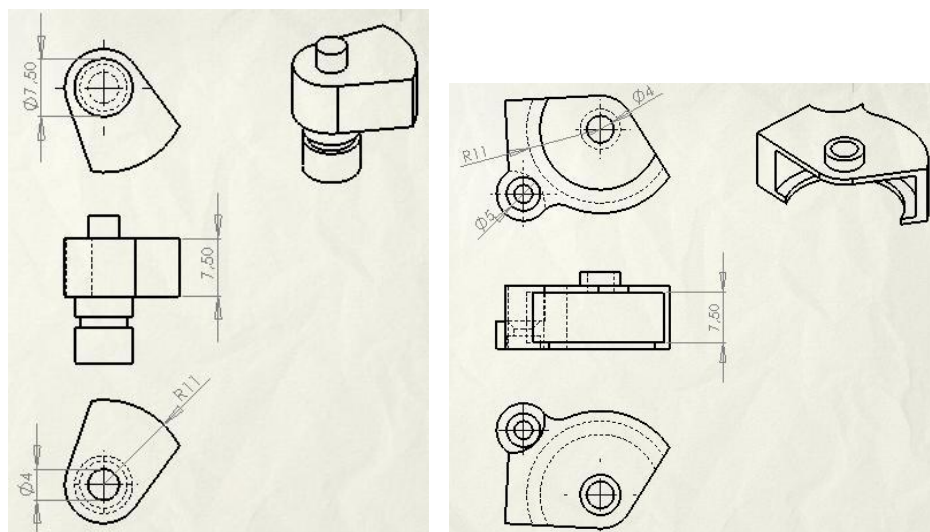
χρόνο αντιστάθμισης συγκεκριμένων διαστασιολογικών αποκλίσεων και γεωμετρικών σφαλμάτων που εμφανίζονται σε χαρακτηριστικά σύνθετα μικρά αντικείμενα των οποίων απαιτείται συναρμολόγηση και συνεργασία, προκειμένου τα σφάλματα αυτά να ελέγχονται και περιορίζονται στο μέγιστο βαθμό πριν την κατασκευή των uPrint πρωτοτύπων τους, η δε συναρμολόγηση να καθίσταται άμεσα εφικτή χωρίς δευτερεύουσες διαδικασίες τροποποίησης και διόρθωσης των κρίσιμων διαστάσεων. Το όφελος από μια τέτοια προσέγγιση σε χρόνο και κόστος θα ήταν προφανώς σημαντικό, όπως και το όφελος της αυξημένης εφαρμοσιμότητας των πρωτοτύπων uPrint, καθώς συχνά σε μικρά γραφεία και φορείς σχεδιασμού δεν υπάρχει κατάλληλα εκπαιδευμένο τεχνικό προσωπικό, ικανό να αναλάβει χειρονακτικές διαδικασίες διόρθωσης και αποκατάστασης διαστάσεων και συναρμολογών.

Για το σκοπό αυτό επελέγη ένα ζεύγος χαρακτηριστικών εξαρτημάτων από πραγματικό κινηματικό μηχανισμό οπτικού οργάνου, τα οποία θα κατασκευάζονταν στην uPrint με ποικίλες ρυθμίσεις και διαφοροποιήσεις και θα ελέγχονταν κατόπιν διαστασιολογικά ως προς την επίδραση σε αυτά:

- Της ακρίβειας προσέγγισης της ψηφιακής CAD γεωμετρίας τους από τα αρχεία STL κατά την εξαγωγή τους.
- Της χρήσης αρχείων STL μετά από επεξεργασία τους με λογισμικό διαχείρισης και βελτίωσης για ΤΚΠ (Magics RP)
- Του τρόπου επίστρωσης – πλήρωσης του όγκου τους κατά την εναπόθεση (συμπαγής-πυκνή-αραιή)
- Της απομάκρυνσης από αυτά του υλικού υποστήριξης με τη διαδικασία της διάλυσης σε αλκαλικό διάλυμα.

Τα εξαρτήματα αυτά, ονομαζόμενα εφεξής «έμβολο» και «φωλιά» και εικονιζόμενα στο Σχήμα 5.2.41, πρέπει να συνεργάζονται σε τρεις διαδοχικές συναρμογές διαφορετικής φύσης και κατεύθυνσης:

- Άξονα – τρύματος, μικρών διαστάσεων με πλήρεις κυλινδρικές διατομές κείμενες επί του επιπέδου XY
- Εσωτερικής – εξωτερικής γραμμικής διάστασης, κατά τον άξονα Z
- Κυλινδρικού τομέα μερική ακτινική συναρμογή, στο επίπεδο XY, σε μεγαλύτερη διάμετρο από την πλήρους άξονα – τρύματος.



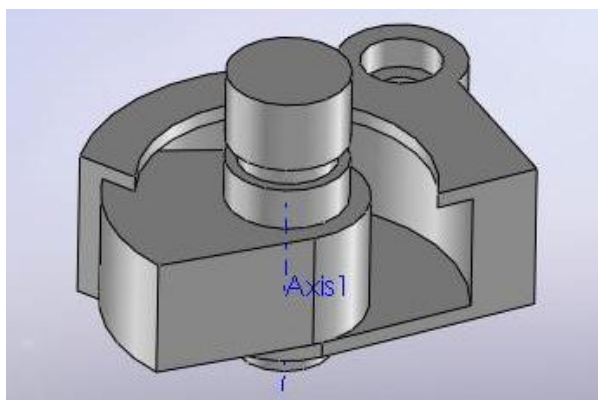
Σχήμα 5.2.4.1: Όψεις κατά ISO-E των εξαρτημάτων «έμβολο» και «φωλιά»

Οι κύριες συναρμολζόμενες και μη διαστάσεις τους που αποτέλεσαν αντικείμενο αξιολόγησης και η περιγραφή τους δίνονται στον Πίνακα 5.2.4.1.

Εξάρτημα	Περιγραφή	Nominal (mm)	Όνομα διάστασης	Συναρμζοξει με
Έμβολο	Άξονας (Εξωτερικός Κύλινδρος)	Ø7,5	A	-
Έμβολο	Άξονας	Ø4	B	C'
Έμβολο	Τομέας Άξονα	Ø22	C	D'
Έμβολο	Εξωτερικό Πάχος Τομέα Άξονα	7,5	D	E'
Φωλιά	Τρύμα (Εσωτερικός Κύλινδρος)	Ø 2,7	A'	-
Φωλιά	Τρύμα	Ø 5	B'	-
Φωλιά	Τρύμα	Ø4	C'	B
Φωλιά	Τομέας Τρύματος	Ø22	D'	C
Φωλιά	Εσωτερικό Πάχος Τομέα Τρύματος	7,5	E'	D

Πίνακας 5.2.4.1: Πίνακας αξιολογούμενων διαστάσεων εξαρτημάτων

Τα εξαρτήματα στην επιθυμητή τους συναρμογή και συνεργασία φαίνονται στο Σχήμα 5.2.4.2.



Σχήμα 5.2.4.2: Επιθυμητή συνεργασία των εξαρτημάτων «έμβολο» και «φωλιά»

Επελέγησαν προς κατασκευή στη uPrint τέσσερα (4) ζεύγη των εξαρτημάτων προς αξιολόγηση, με συνδυασμό παραμέτρων, σύμφωνα με τον Πίνακα 5.2.4.2.

Εξάρτημα	No	Αρχείο STL	Τρόπος Εναπόθεσης
Έμβολο	1	Χαμηλής πιστότητας (coarse)	Κυψελωτό – Χαμηλής Πυκνότητας
Έμβολο	2	Χαμηλής πιστότητας	Συμπαγές
Έμβολο	3	Υψηλής πιστότητας, επεξεργασμένο σε Magics (Μείωση τριγώνων)	Κυψελωτό – Υψηλής Πυκνότητας
Έμβολο	4	Υψηλής πιστότητας	Συμπαγές
Φωλιά	1	Χαμηλής πιστότητας	Κυψελωτό – Χαμηλής Πυκνότητας
Φωλιά	2	Χαμηλής πιστότητας	Συμπαγές
Φωλιά	3	Υψηλής πιστότητας, επεξεργασμένο σε Magics (Μείωση τριγώνων)	Κυψελωτό – Υψηλής Πυκνότητας
Φωλιά	4	Υψηλής πιστότητας	Συμπαγές

Πίνακας 5.2.4.2: Παραλλαγές των εξαρτημάτων για κατασκευή

Για τη διατήρηση ίδιων συνθηκών κατασκευής, τα 4 ζεύγη τέθηκαν ταυτόχρονα σε κατασκευή, τοποθετημένα στην ίδια πλατφόρμα (βάση) και με τον ίδιο προσανατολισμό (όλοι οι κύλινδροι κατά XY). Για τις δομές υποστήριξης χρησιμοποιήθηκε για όλα η επιλογή SMART του λογισμικού Catalyst EX v.4.2. Η δε κατασκευή έγινε στη μηχανή uPrint του Εργαστηρίου ΤΚΠ & Ε με την έκδοση του λειτουργικού της συστήματος Version 9.1 Build 3550 System Software (Released May 2011).

Μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής ελήφθησαν από τα προσβάσιμα μορφολογικά στοιχεία όλων των αντικειμένων, πριν τον καθαρισμό τους, αρχικές μετρήσεις με τη χρήση της CMM Brown & Sharpe – DEA Mistral 070705, (Σχήμα 5.2.4.3), προκειμένου να είναι δυνατή η σύγκριση με μετρήσεις των ίδιων στοιχείων μετά την αφαίρεση του υποστηρικτικού υλικού με αλκαλικό διάλυμα.

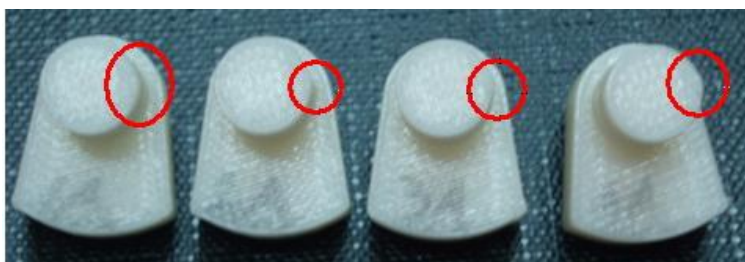


Σχήμα 5.2.4.3: Αρχική μέτρηση των αντικειμένων «έμβολο» και «φωλιά»

Μετά την αποπεράτωση των αντικειμένων ακολούθησε και πάλι με τη CMM αναλυτική μέτρηση όλων των αξιολογούμενων διαστάσεων, σε όλα τα αντικείμενα. Σε όλα τα κυλινδρικά στοιχεία που μετρήθηκαν παρατηρήθηκε εντοπισμένο σφάλμα – απόκλιση της μορφής της διατομής τους από τον ιδανικό κύκλο, προσδίδοντάς τους σταγονοειδή μορφή, για κάποια στοιχεία εμφανές και με γυμνό μάτι, που έφθανε:

- Για τα εξωτερικά κυλινδρικά στοιχεία έως 0,2mm, με μέσο όρο τα **0,1mm**.
- Για τα εσωτερικά κυλινδρικά στοιχεία έως 0,45mm με μέσο όρο τα **0,15mm**.

Το εν λόγω σφάλμα μορφής απεικονίζεται στο Σχήμα 5.2.4.4.



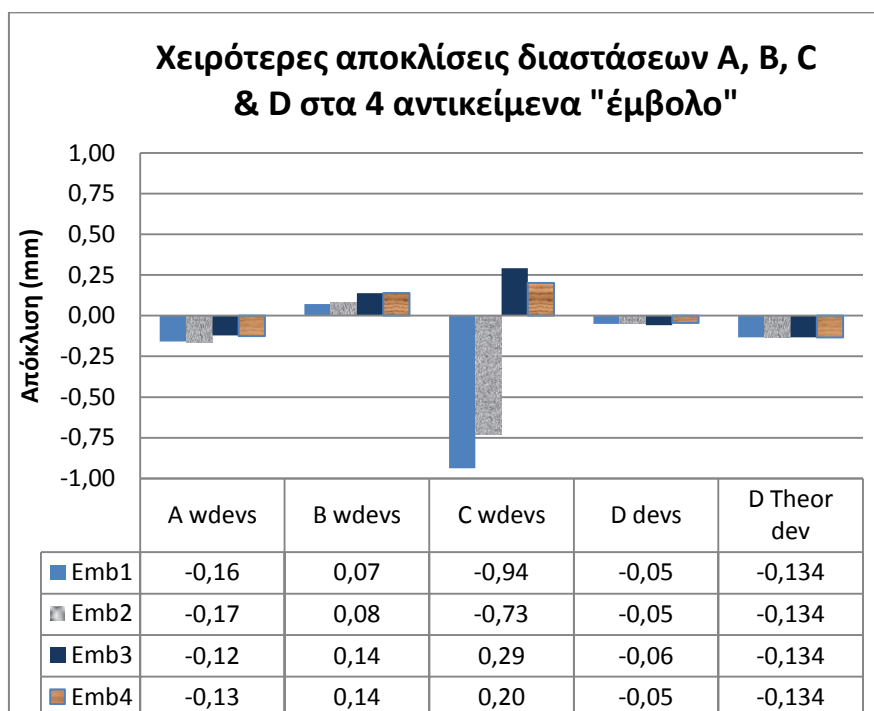
Σχήμα 5.2.4.4: Εντοπισμένο σφάλμα μορφής κυλινδρικών στοιχείων

Κατόπιν τούτου, και δεδομένου ότι τα κατασκευαζόμενα αντικείμενα προορίζονταν για μεταξύ τους συναρμολόγηση, οι βασιζόμενες σε υπολογισμό με τη μέθοδο των

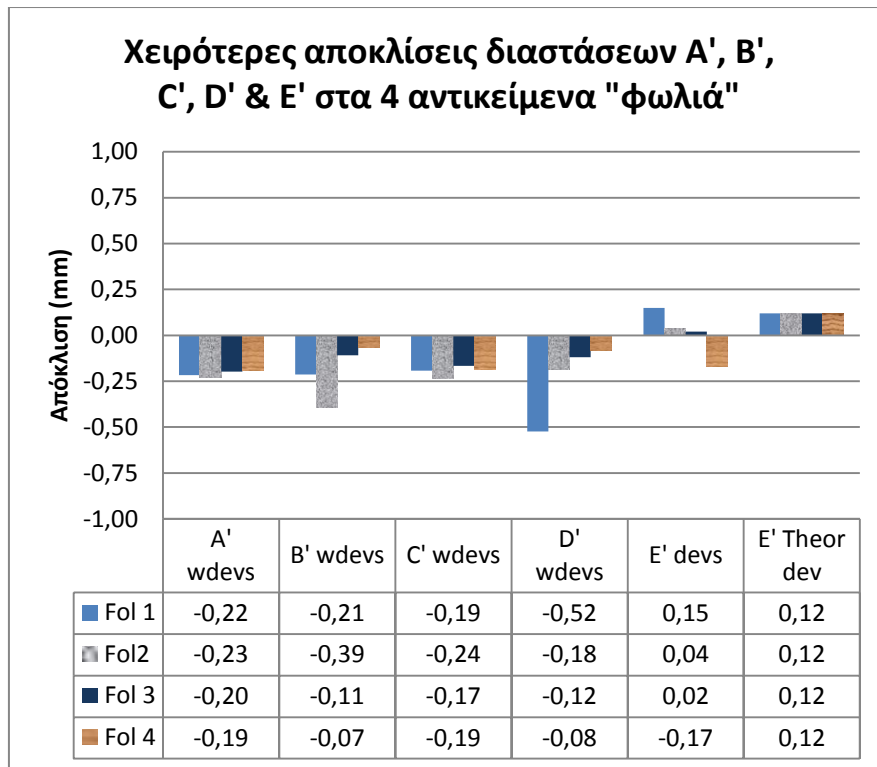
ελαχίστων τετραγώνων μετρηθείσες από τη μηχανή CMM τιμές διαστάσεων και οι συναφείς αποκλίσεις (Devs) από τις ονομαστικές τιμές, αποφασίσθηκε να τροποποιηθούν – επαυξηθούν σε «χειρότερες» εμφανιζόμενες διαστάσεις και αποκλίσεις (wDevs), ανταποκρινόμενες στις διαμέτρους μέγιστου περιγεγραμμένου κύκλου για τους άξονες και ελάχιστου εγγεγραμμένου για τα τρύματα. Η θεώρηση αυτή σύμφωνη με την αρχή «ελάχιστου άξονα – μέγιστου τρύματος» κατά ASME Y14.5M, θα οδηγούσε σε ασφαλέστερα συμπεράσματα ως προς τις στοχευόμενες συναρμογές.

Το ίδιο δεν ίσχυσε για τις προσανατολισμένες κατά τον άξονα Z διαστάσεις D & E' (Πίνακας 5.2.4.1) των αντικειμένων. Για αυτές όμως, που λόγω της διαστρωματικής κατασκευής κατεξοχήν υπόκεινται στον περιορισμό της απόδοσής τους από στρώσεις πεπερασμένου πάχους, επιβάλλεται να ληφθεί υπόψιν ότι για την κατασκευή τους στη uPrint η θεωρητική ονομαστική τους τιμή τροποποιείται αυτόματα σε επίπεδο λογισμικού μηχανής στο «κβαντισμένο», εγγύτερο σε αυτές ακέραιο πολλαπλάσιο του σταθερού για τη uPrint πάχους στρώσης των 0,254mm. Με τη βοήθεια του λογισμικού Catalyst, αυτή η «τροποποιημένη ονομαστική» τιμή προσδιορίσθηκε για τη διάσταση D σε 7,366mm και για την C' σε 7,62mm.

Με τις παραπάνω θεωρήσεις σε ισχύ, προσδιορίσθηκαν αναλυτικά όλες οι εμφανιζόμενες αποκλίσεις των αξιολογούμενων διαστάσεων στα αντικείμενα «έμβολο» και «φωλιά», οι οποίες συγκριτικά παρίστανται γραφικά στο Σχήμα 5.2.4.5<sup>α</sup> & β.

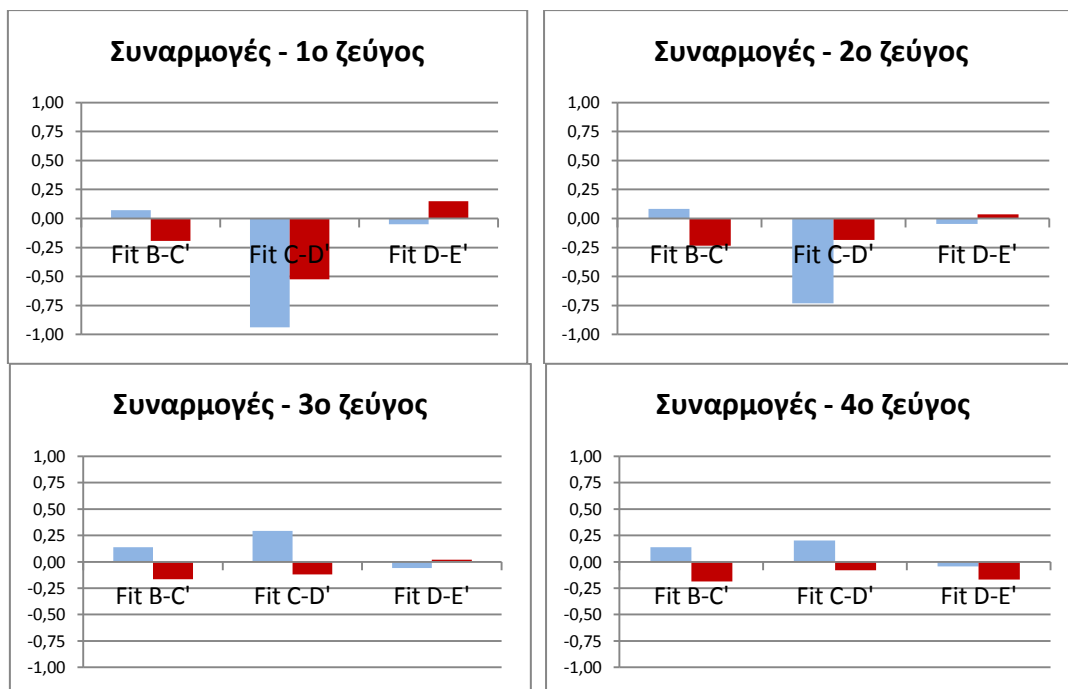


Σχήμα 5.2.4.5α: Εμφανιζόμενες αποκλίσεις διαστάσεων στο «έμβολο»



Σχήμα 5.2.4.5β: Εμφανιζόμενες αποκλίσεις διαστάσεων στο «φωλιά»

Στο επίπεδο της επίτευξης των επιθυμητών συναρμογών για τη λειτουργία ως μηχανισμού του ζεύγους των πρωτότυπων εξαρτημάτων, κατεδείχθη ότι με τη δεδομένη ιεραρχία συναρμολόγησης, λόγω των εμφανιζόμενων αποκλίσεων κατά κύριο λόγο στις διαστάσεις B-C', αυτή δεν κατέστη τελικά δυνατή για κανένα από τα 4 ζεύγη. Αυτό φαίνεται χαρακτηριστικά και στα γραφήματα του Σχήματος 5.2.4.6 και επιβεβαιώνεται και στα ίδια τα πρωτότυπα.



Σχήμα 5.2.4.6: Σκοπούμενες συναρμογές

Τα συμπεράσματα της αξιολόγησης των 4 ζευγών συνεργαζομένων αντικειμένων είναι:

- Σημαντική υποβάθμιση της αποδιδόμενης ακρίβειας (μεγαλύτερες αποκλίσεις) από την μηχανή uPrint εμφανίζεται στα αντικείμενα που προέρχονται από STL αρχεία χαμηλής πιστότητας (coarse). Αυτή αποδίδεται κατά κύριο λόγο στα ίδια τα αρχεία και όχι στην μηχανή. Συνεπώς δεν χαρακτηρίζουν την uPrint ως προς τις επιδόσεις της και ως εκ τούτου σε περιπτώσεις απαιτήσεων της υψηλότερης δυνατής ακρίβειας πρέπει να προτιμώνται υψηλής πιστότητας (fine) αρχεία STL. Αντίθετα αμελητέα ήταν η επίδραση στην ακρίβεια διαδικασιών επεξεργασίας και βελτίωσης των STL (π.χ. Μείωση τριγώνων) με εξειδικευμένο λογισμικό (π.χ. Magics RP), εφόσον αυτή επιτελείται σε αρχεία υψηλής πιστότητας.
- Η συνολική ακρίβεια της uPrint είναι γενικά σε αποδεκτά επίπεδα για μικρής κλίμακας διάταξη ΤΚΠ, εφάμιλλη με παλαιότερων βιομηχανικού προσανατολισμού συστημάτων. Ο μέσος όρος όλων των τροποποιημένων «χειρότερων» αποκλίσεων που θεωρήθηκαν για τη συναρμολόγηση είναι της τάξης των 0,25mm. Χωρίς τη σχετική διόρθωση, ο συνολικός μέσος όρος των αποκλίσεων διαστάσεων είναι της τάξης των **0,15mm**, σε συμφωνία με τα αποτελέσματα άλλων μελετών [Grimm, 2010] και λοιπών μετρήσεων από άλλα πραγματικά αντικείμενα FDM-uPrint που κατασκευάστηκαν στο ΕΜΠ.
- Το τοπικού χαρακτήρα σφάλμα μορφής που παρατηρήθηκε ιδίως σε κυλινδρικά στοιχεία επιπέδου XY, με μέση τιμή τα 0,1mm και μέγιστη τα 0,45mm, είναι συστηματικό και οφειλόμενο στην τοπική υπερτροφοδότηση με υλικό και κατά συνέπεια παραμόρφωση του σημείου έναρξης και λήξης της εναπόθεσης υλικού. Εύλογο είναι ότι επηρεάζει εντονότερα μικρές διαστάσεις (<10mm). Επιτείνεται δε αν η πρώτη ύλη έχει αποσφραγισθεί και εκτεθεί σε ατμοσφαιρική υγρασία πάνω από 6 μήνες. Μπορεί να αντιμετωπισθεί είτε με (α) αντιστάθμιση διαστάσεων, είτε με (β) τοπική λείανση – εξομάλυνση (όχι πάντοτε εφικτή).
- Τα εξωτερικά μορφολογικά στοιχεία αποκλίνουν κατά απόλυτη τιμή λιγότερο από παρόμοιας κλίμακας εσωτερικά.
- Τα εξωτερικά μορφολογικά στοιχεία με διαστάσεις μικρότερες των 5mm υπερβαίνουν την ονομαστική τους διάσταση. Όταν όμως η ονομαστική τους διάσταση είναι μεγαλύτερη από 5mm υπολείπονται αυτής. Τα δε εσωτερικά μορφολογικά στοιχεία γενικά εμφανίζονται συνεπώς μικρότερα των ονομαστικών τους τιμών. Οι διαπιστούμενες τιμές αποκλίσεων καθιστούν εφικτή τη δυνατότητα αντιστάθμισης τους σε επίπεδο CAD πριν την κατασκευή του αντικειμένου σε uPrint.
- Στις κατά Z διαστάσεις, με τη θεώρηση της de facto τροποποίησης των ονομαστικών τιμών σε αντίστοιχες «κβαντισμένες» λόγω διαστρωματικής κατασκευής, οι πραγματικά μετρηθείσες τιμές τους έναντι των τελευταίων προκύπτουν μεγαλύτερες για τις εξωτερικές και μικρότερες για τις εσωτερικές διαστάσεις. Αυτή είναι μια ξεκάθαρη ένδειξη ελαφράς διόγκωσης του υλικού στον άξονα προόδου Z της κατασκευής. Και αυτή είναι δυνατόν να αντιμετωπιστεί σε ένα βαθμό, με ταυτόχρονη αντιστάθμιση αντίστοιχων συνεργαζόμενων διαστάσεων.
- Όσον αφορά τον τρόπο επίστρωσης υλικού, η διαστασιολογικά δυσμενέστερη περίπτωση είναι η συμπαγής πλήρωση (προφανώς λόγω αλλοιώσεων του υλικού κατ'όγκον). Η δε πυκνή κυψελωτή εμφανίζεται ελαφρώς καλύτερη της αραιά κυψελωτής και πρέπει να προτιμάται για πρωτότυπα μέγιστης απαιτούμενης ακρίβειας.



- Η διαδικασία αφαίρεσης του υποστηρικτικού υλικού με αλκαλικό διάλυμα μετρήθηκε να επιδρά στις διαστάσεις κατά μέγιστον 50 $\mu$ m, απομειώνοντας τα εξωτερικά στοιχεία και προσαυξάνοντας τα εσωτερικά. Έχει συνεπώς ελάσσονα επίδραση, σημειώνεται όμως καθώς ο παραπάνω καθαρισμός είναι απαραίτητος στην πλειονότητα των περιπτώσεων.
- Η επίτευξη συναρμολόγησης και συναρμογών μεταξύ συνεργαζομένων αντικειμένων συγκεκριμένης διάστασης, χωρίς μετέπειτα χειρονακτικές επεμβάσεις, δείχνει δυνατή με αντιστάθμιση της τάξεως των 0,3mm (Απομείωση εξωτερικών – Προσαύξηση εσωτερικών) σε επίπεδο CAD πριν την κατασκευή.

Προς επιβεβαίωση των παραπάνω συμπερασμάτων τα εξαρτήματα «έμβολο» και «φωλιά», επανακατασκευάστηκαν σε uPrint υπό τις κάτωθι συνθήκες:

- Προερχόμενα από υψηλής πιστότητας STL αρχεία
- Με υψηλής πυκνότητας κυψελωτή πλήρωση των στρώσεων
- Με προσαρμοσμένες αντισταθμίσεις από **0,1 έως 0,3mm** των ονομαστικών συνεργαζόμενων διαστάσεων στα CAD αρχεία τους πριν την εξαγωγή των νέων STL.

Το νέο αντισταθμισμένο ζεύγος «έμβολο-φωλιά» που προέκυψε κατασκευάστηκε υπό τον ίδιο προσανατολισμό, αποπερατώθηκε και μετρήθηκε και πάλι σε όλες τις κρίσιμες διαστάσεις με μέγιστη αυτή τη φορά εμφανιζόμενη «χειρότερη» απόκλιση **0,12mm**. Πρέπει όμως να σημειωθεί ότι, μετά την αντιστάθμιση, οι αποκλίσεις αυτές για τις συνεργαζόμενες διαστάσεις σημειώθηκαν πλέον με πρόσημο (κατεύθυνση) που καθιστούσε δυνατή την επίτευξη των απαραίτητων συναρμογών.

Το νέο ζεύγος κατέστη λοιπόν δυνατόν να συναρμολογηθεί και εργασθεί άμεσα ως μηχανισμός, χωρίς καμία δευτερεύουσα μετεπεξεργασία, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5.2.4.7.



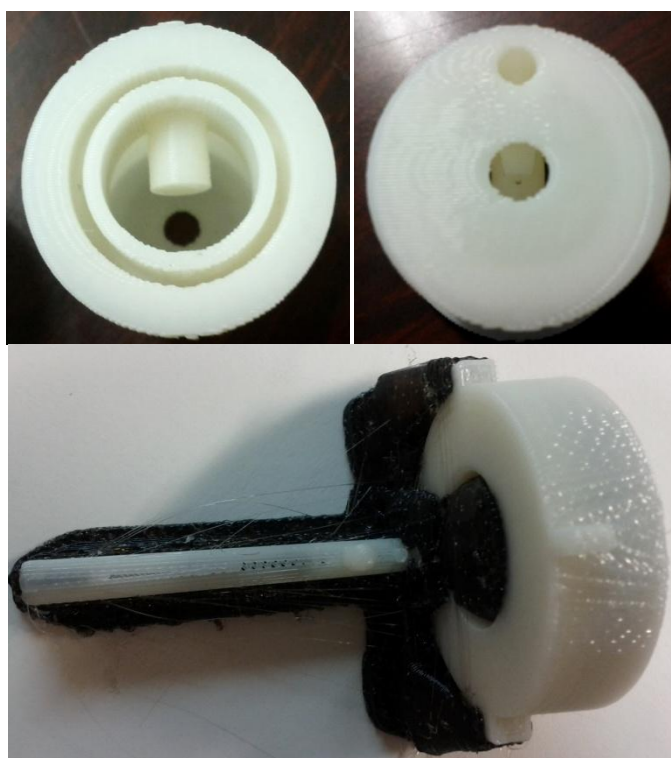
Σχήμα 5.2.4.7: Επιτυχώς αντισταθμισμένο λειτουργόν ζεύγος «έμβολο-φωλιά»

Τέλος, όσον αφορά ελαττώματα γεωμετρικής αλλοίωσης ή και πλήρους εξάλειψης μορφών και χαρακτηριστικών μικρών και πολύ μικρών διαστάσεων (<1mm) σε πρωτότυπα FDM – uPrint που σημειώνονται βιβλιογραφικά, [Grimm, 2010], επαληθεύονται σε μεγάλο βαθμό από τις ως σήμερα δοκιμές και περιπτώσεις κατασκευής πρωτοτύπων στη uPrint του ΕΜΠ. Συνοψίζονται σε:

- Επιπεδοποίηση κυκλικών/κυλινδρικών τομέων κυλινδρικών στοιχείων, προσανατολισμένων με τον άξονα Z να κείται επί της διατομής τους (Εντονότερα στις περιοχές τιμών  $\varnothing 2$  έως  $\varnothing 10$ mm).

- Εξάλειψη οπών με διάμετρο μικρότερη από  $\varnothing 0,5\text{mm}$
- Παραμόρφωση ή και εκφυλισμός πολύ μικρών κυκλικών διατομών ( $< 2\text{mm}$ ) προς ρομβοειδείς ή ορθογώνιες μορφές.
- Κενά και αδυναμία πλήρους πλήρωσης της κατασκευαζόμενης γεωμετρίας με υλικό σε πολύ μικρών διαστάσεων γεωμετρικά στοιχεία.
- Αδυναμία πλήρους απόδοσης εγχαραξέων (π.χ. γράμματα, αριθμοί) βάθους μικρότερου από  $0,5\text{mm}$
- Αδυναμία πλήρους απόδοσης υφής επιφανειών (texture).

Ορισμένα από αυτά τα ελαττώματα σε αντικείμενα που κατασκευάστηκαν στο ΕΜΠ δείχνονται στο Σχήμα 5.2.4.8



Σχήμα 5.2.4.8: Ελαττώματα και αλλοιώσεις μορφής πρωτοτύπων FDM – uPrint

Η κατασκευή με FDM-uPrint αντικειμένων με τέτοιες γεωμετρίες δεν είναι πάντοτε απαγορευτική, η δε ορθή απόδοσή τους ή μη, πολλές φορές συναρτάται με τον επιλεγέντα προσανατολισμό κατασκευής. Κάποιες δε γεωμετρίες (π.χ. πολύ μικρές οπές) είναι δυνατόν να δημιουργηθούν και εκ των υστέρων επί των πρωτοτύπων, με δευτερεύουσες φάσεις αφαίρεσης υλικού (π.χ. διάτρηση, εισχώρηση καυτηριασμένης βελόνης κατάλληλης διαμέτρου κλπ.). Απαιτούν όμως εμπειρία, ακρίβεια και κατάλληλα εκπαιδευμένο προσωπικό.

### 5.2.5 Ποιότητα επιφανειών πρωτοτύπων FDM (Εστίαση σε uPrint)

Όσον αφορά την αποδιδόμενη από την μηχανή uPrint ποιότητα επιφανειών, όπως προέκυψε από τα αποτελέσματα της διεξαχθείσας έρευνας έχει δύο βασικές συνιστώσες.

Την τραχύτητα που χαρακτηρίζει τις επιφάνειες των αντικειμένων, αλλά και τα διάκενα σε αυτές που τις καθιστούν περατές.

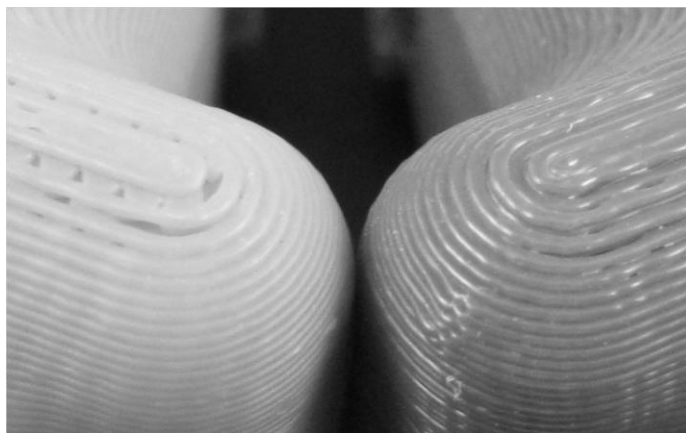
Για την μεν τραχύτητα, όπως διαπιστώθηκε τόσο από μετρήσεις με το τραχύμερο επαφής Taylor Hobson Surtronic 3+, επί πολλών αντικειμένων σε επιφάνειες διαφόρων κλίσεων, (Σχήμα 5.2.5.1), όσο και από συγκρίσεις με πρότυπα πλακίδια καθορισμού τραχύτητας επιφανειών, διαπιστώθηκε ότι για τη μηχανή uPrint της Stratasys που λειτουργεί με σταθερό πάχος στρώσης 0,254mm χρησιμοποιώντας σκληρό σχετικά υλικό ABS, η τραχύτητα **Ra** των επιφανειών, αναλόγως προσανατολισμού, κυμαίνεται στις περισσότερες περιπτώσεις μεταξύ **16 και 25μm**, με τις μεγαλύτερες τιμές να εμφανίζονται σε κεκλιμένες επιφάνειες με γωνία μεγαλύτερη των 45° ως προς την κατακόρυφο (άξονας Z).



Σχήμα 5.2.5.1: Τραχυμέτρηση πρωτοτύπου uPrint

Ενδιαφέρον είναι το γεγονός ότι αξιοσημείωτη αυξημένη τραχύτητα (της τάξεως των 20μm), πέραν των κεκλιμένων επιφανειών, εμφανίζουν ακόμα και οι οριζόντιες επιφάνειες που αποδίδονται με μια στρώση, καθώς και σε αυτές – όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω – η επιφάνεια αποδίδεται από διαδοχικά εναποτιθέμενα νήματα τήγματος υλικού ελλειψοειδούς διατομής με διάκενα μεταξύ τους, που «γεμίζουν», επίσης με τήγμα, το οριοθετημένο εσωτερικό και εξωτερικό περίγραμμα της αποδιδόμενης στρώσης. Παρατηρείται τέλος, επίπεδες επιφάνειες με προσανατολισμό προς τα κάτω που κατά την κατασκευή υποστηρίζονται από το δευτερεύον υλικό να εμφανίζουν περίπου 15% καλύτερη ποιότητα επιφάνειας από αντίστοιχες επίπεδες επιφάνειες με προσανατολισμό προς τα πάνω.

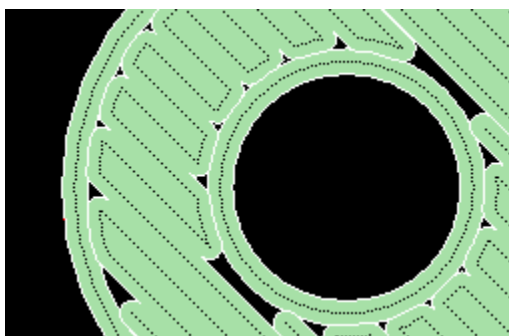
Τα αποτελέσματα αυτά, όσο και η πραγματική ποιοτική εικόνα και αξιολόγηση των επιφανειών, που είναι εμφανώς τραχείες στην αφή, (Σχήμα 5.2.5.2), συμφωνούν με τα αποτελέσματα άλλων δημοσιευμένων εργασιών επί συναφών παλαιότερων αλλά και νέων FDM συστημάτων, για πρωτότυπα του αυτού πάχους στρώσης, [Campbell et al., 2002; Kim & Oh, 2008; Grimm, 2010], που χαρακτηρίζουν τα FDM πρωτότυπα γενικά ως τραχειά και σχετικά δύσκολα στην βελτίωση της επιφάνειάς τους. Σε τάξη μεγέθους δε η τραχύτητα των πρωτοτύπων FDM-uPrint, που συνήθως είναι και η τελική, είναι σχεδόν ταυτόσημη με των πλήρως αφινιριστων πρωτοτύπων LOM, που όμως σπανίως παραμένουν έτσι. Σε σύγκριση δε με τα εύκολα και σχετικά γρήγορα μετρίως αποπερατωμένα LOM (Βλ. Παράγραφο 5.1.4.11) τα uPrint πρωτότυπα είναι σαφώς τραχύτερα.



Σχήμα 5.2.5.2: Ποιότητα επιφανειών αντικειμένων FDM

Πρέπει δε να σημειωθεί ότι για το χαρακτήρα της συγκριμένης μηχανής που στοχεύει σε άμεση και γρήγορη πρωτοτυποποίηση μικρών λειτουργικών εξαρτημάτων στην πλειονότητα των περιπτώσεων η τραχύτητα αυτή πρέπει να θεωρείται τελική. Σε περίπτωση απαίτησης καλύτερων επιφανειών, αυτές είναι επιτεύξιμες μόνο μετά από χρονοβόρο δευτερεύουσα μετεπεξεργασία των πρωτοτύπων με συμβατό με τα θερμοπολυμερή υλικά αστάρι ή εποξειδικές ρητίνες και με προσεκτική χρήση λειαντικών μέσων, ώστε να μην επέρχεται αλλοίωση των κύριων διαστάσεων, [Stratasys/SSYS-ACS-PDS-Painting, 2011].

Όσον αφορά την διαπερατότητα από τα διάκενα, παρατηρείται εντονότερα στις επίπεδες οριζόντιες επιφάνειες και λιγότερο στις κεκλιμένες και είναι απότοκο του τρόπου λειτουργίας της μεθόδου FDM (Γέμισμα με διαδοχική γραμμική εναπόθεση), (Σχήματα 5.2.5.2 & 5.2.5.3).



Σχήμα 5.2.5.3: Διάκενα στις επιφάνειες από FDM

Εν δυνάμει η διαπερατότητα μπορεί να αποτελέσει πρόβλημα για το πρωτότυπο, αν απαιτείται στεγανότητα του, αλλά και πλεονέκτημα (απευθείας χρήση ως εργαλείο διαμόρφωσης υπό κενό – vacuum forming). Όπως και για την αντιμετώπιση της τραχύτητας και πάλι με χρήση υλικών γεμίσματος επιφανειών (sealers), ασταριών, εποξειδικών υλικών με επάλειψη (coating) ή εμποτισμό (impregnation) τα πρωτότυπα είναι δυνατόν να στεγανωθούν και οι επιφάνειές τους να καταστούν συνεχείς [Stratasys-SSYS-AB-Sealing, 2011; Mireles et al., 2011]. Οι διαδικασίες αυτές όμως πάντοτε απαιτούν εξειδικευμένο εξοπλισμό και προσωπικό και προσθέτουν σε χρόνο και σε κόστος, απομειώνοντας τα πραγματικά οφέλη της ΤΚΠ.

## 6 ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΚΠ & ΤΚΕ ΣΤΑ ΠΛΑΙΣΙΑ ΤΗΣ ΔΔ

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρατεθούν με συντομία και σε πινακοποιημένη μορφή για την οικονομία κειμένου, επιλεγμένες – βιομηχανικές και μη – ερευνητικές εφαρμογές ΤΚΠ (με μεθόδους LOM και FDM-uPrint) και ΤΚΕ διαφόρων βασικών κατηγοριών πρωτοτυποποίησης, που υλοποιήθηκαν ή συντονίστηκαν από τον γράφοντα στο Εργαστήριο ΤΚΠ & Ε και είτε:

(α) συνεισέφεραν στην αξιοποιούμενη τεχνογνωσία και εμπειρία για τους κεντρικούς στόχους της διατριβής (υποστήριξη απόφασης πρωτοτυποποίησης και επιλογή ΤΚΠ). Εδώ κατατάσσονται κυρίως οι πρώιμες χρονικά εφαρμογές

(β) προέκυψαν ως σκοπιμότερες οδοί πρωτοτυποποίησης, κατόπιν εφαρμογής της προτεινόμενης στο Κεφάλαιο 3 μεθοδολογίας υποστήριξης απόφασης πρωτοτυποποίησης. Εδώ εντάσσονται κυρίως οι ύστερες.

### 6.1 Γενικά

Οι εφαρμογές που παρουσιάζονται, και αρκετές άλλες σχετικές, απετέλεσαν για την παρούσα ΔΔ έρευνα πεδίου, που προήλθε από:

- εσωτερικές δράσεις και δραστηριότητες του Εργαστηρίου ΤΚΠ & Ε και του ΕΜΠ γενικά (θέματα σπουδαστών, διπλωματικές και πτυχιακές εργασίες),
- βιομηχανικές και άλλες εφαρμογές σε συνεργασία με φορείς από το ελληνικό μελετητικό και κατασκευαστικό περιβάλλον (διμερείς συνεργασίες, παροχές υπηρεσιών),
- και
- ερευνητικά προγράμματα της ΓΓΕΤ με αντικείμενο στενά συνδεδεμένο με τις ΤΚΠ & ΤΚΕ (πρόγραμμα ΕΠΕΤ II «ΝΕΚΤΑΡ», δύο προγράμματα ΠΑΒΕ).

Τα αποτελέσματά ορισμένων μάλιστα οδήγησαν στην υποβολή, έγκριση και υλοποίηση σήμερα και νέων ερευνητικών έργων στα πλαίσια του ΕΣΠΑ (Εργο ΘΑΛΗΣ – Mechanical: «Ανάδειξη της φυσικής μας κληρονομιάς: Αξιοποίηση τεχνολογιών αιχμής για την ακριβή ψηφιακή αποτύπωση και αναδημιουργία σκελετικών τμημάτων των τελευταίων ευρωπαϊκών ελεφάντων», κωδικός MIS 380135).

Επιστημονικές εργασίες και αποτελέσματα από την υλοποίηση των εφαρμογών αυτών έχουν δημοσιευθεί από τον γράφοντα στα παρακάτω εθνικά και διεθνή συνέδρια και ημερίδες:

- 9<sup>th</sup> European Conference on RP&M, με τον τίτλο: “Applying LOM and Silicone Rubber Tooling for recycled paper pulp molded packaging products”, [Polydoras et al., 2000]
- ICMEN 2002, με τον τίτλο: “Rapid Prototyping: Industrial Case Studies in Greece”, [Polydoras et al., 2002]
- Ελληνικές Ημέρες Ε & Τ – Ευρωπαϊκής Συνεργασίας 2006 – ΤΕΕ, σε πόστερ με τίτλο: «Σύγχρονες Μέθοδοι Υποστήριξης Ανάπτυξης και Κατασκευής Βιομηχανικών Προϊόντων στα πλαίσια του Ολοκληρωμένου Μηχανολογικού Σχεδιασμού», [Σφαντζικόπουλος et al., 2006]
- 6ο Συμπόσιο της Ελληνικής Αρχαιομετρικής Εταιρίας, σε πόστερ με τίτλο: «Τρισδιάστατη Ψηφιακή Αποτύπωση Αρχαίων Αντικειμένων και Εκτύπωση

Αντιγράφων με τη Βοήθεια Προηγμένων Υπολογιστικών Συστημάτων», [Καϊσαρλής et al., 2013]

και στο διεθνές επιστημονικό περιοδικό *International Journal of Heritage in the Digital Era* (Vol.2, N.2, 2013), με τίτλο “3D Digital Terrestrial Model Creation Using Image Assisted Total Station and Rapid Prototyping Technology”, [Pantazis et al., 2013].

Οι εφαρμογές που παρουσιάζονται στην παρούσα εντάσσονται στις ακόλουθες κατηγορίες:

- Πρωτότυπα μορφής (Design Models)
- Γεωμετρικά Πρωτότυπα
- Λειτουργικά Πρωτότυπα (έστω εν μέρει)
- Άλλες περιπτώσεις πρωτοτύπων ΤΚΠ (Διεπιστημονικές προσεγγίσεις)
- Πρωτότυπα και βοηθητικά εργαλεία παραγωγής

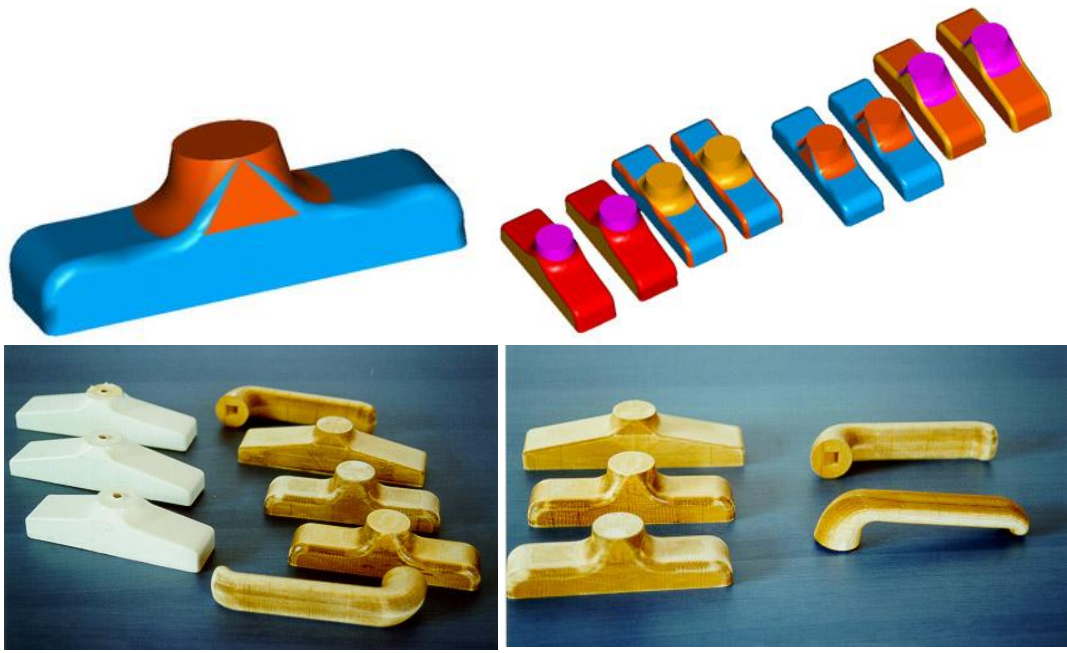
Για κάθε μια περίπτωση παρουσιάζονται συγκεντρωτικά σε Πίνακα:

- Οι εμπλεκόμενοι φορείς και η φύση της εφαρμογής
- Απαραίτητα τεχνικά δεδομένα και απαιτήσεις
- Φωτογραφίες αποτελεσμάτων
- Δεδομένα χρόνου ή/και κόστους κατασκευής (Σε ορισμένες περιπτώσεις)
- Ποιοτικά και ποσοτικά αποτελέσματα και συμπεράσματα που προέκυψαν ή/και αξιοποιήθηκαν στη ΔΔ

## 6.2 Πρωτότυπα Μορφής

Αφορούν αντικείμενα όπου το κύριο ζητούμενο ήταν η ύπαρξη φυσικού αντικειμένου που να αποδίδει κυρίως τη μορφή του υπό σχεδιασμό αντικειμένου. Σε μερικές περιπτώσεις κρίθηκε σκόπιμη και εφαρμόστηκε κατασκευή των πρωτοτύπων υπό κλίμακα.

### 6.2.1 Κέλυφος μηχανισμού μανδάλωσης κουφωμάτων αλουμινίου

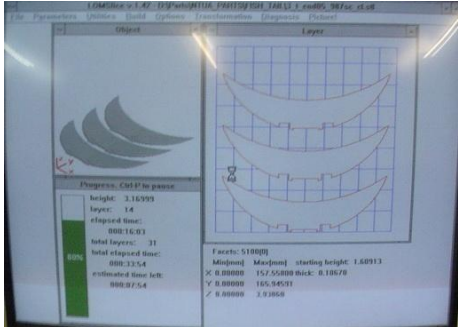


<b>Φορείς:</b>	Εργ. ΤΚΠ&Ε ΕΜΠ – ΚΛΕΙΘΡΟΠΟΙΪΑ DOMUS (Διμερής συνεργασία)
<b>Απαιτήσεις / Δεδομένα:</b>	Αξιολόγηση και επιλογή μορφής νέου κελύφους μηχανισμού μανδάλωσης κουφωμάτων αλουμινίου
	
<b>Υλοποίηση:</b>	Κατασκευή πολλαπλών πρωτοτύπων LOM εξωτερικής μορφής κελύφους και χειρολαβών σε κλίμακα 1:1
<b>Χρόνος:</b>	Μια εργάσιμη εβδομάδα μαζί με φινίρισμα/βαφές
<b>Συμπεράσματα:</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Πληρέστερη και ρεαλιστικότερη αντίληψη κλίμακας και μορφών των αντικειμένων μέσω των φυσικών πρωτοτύπων LOM σε σχέση με τα 3D CAD μοντέλα τους. Η εταιρία επέλεξε και προώθησε προς παραγωγή διαφορετική εναλλακτική από αυτή που είχε επιλεγεί αρχικά στον Η-Υ από τια CAD μοντέλα.</li><li>• Καλή σταθερότητα και ικανοποιητική στιβαρότητα πρωτοτύπων LOM</li><li>• Σχετικά γρήγορη κατασκευή LOM αντικειμένων συμπαγούς μορφής</li></ul>

## 6.2.2 Μοντέλο μορφής επίπλου Yoga

<b>Φορείς:</b>	Εργ. ΤΚΠ&Ε ΕΜΠ – Σχολή ΑΜ ΕΜΠ (Εξυπηρέτηση Διπλωματικής Εργασίας Σχολής ΑΜ)
<b>Απαιτήσεις / Δεδομένα:</b>	Κατασκευή πρωτότυπου μορφής φορητού καθίσματος YOGA που αναπτύχθηκε με τεχνικές βιομηχανικού σχεδιασμού (industrial design). Το πρωτότυπο θα χρησιμοποιείτο ως μέσο επικοινωνίας του σχεδιασμού και παρουσίασης του σε ευρύτερη ομάδα ανθρώπων.
	
<b>Υλοποίηση:</b>	Κατασκευή πρωτοτύπων LOM του καθίσματος σε κλίμακα 1:2
<b>Χρόνος:</b>	Τρεις εργάσιμες ημέρες για την ολοκλήρωση τριών αντικειμένων που απαρτίζουν το πρωτότυπο μορφής
<b>Συμπεράσματα:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Πολύ ικανοποιητική απόδοση μορφής από τα πρωτότυπα LOM</li> <li>• Εύκολη – άμεση επικοινωνία και πλήρης κατανόηση του εξεταζόμενου σχεδιασμού από το κοινό της παρουσίασης</li> <li>• Ιδιαίτερα γρήγορη κατασκευή των πρωτοτύπων έναντι εναλλακτικών χειρονακτικών ή άλλων μεθόδων</li> </ul>



### 6.2.3 Ουρές ρομποτικού τόνου

<b>Φορείς:</b>	Εργ. ΤΚΠ&Ε ΕΜΠ – Εργαστήριο Ρομποτικής Τομέα ΜΚ & ΑΕ Σχ.ΜΜ (Ανάγκες έρευνας ρομποτικού τόνου – Υπ/νος Καθ. Ε.Παπαδόπουλος)
<b>Απαιτήσεις / Δεδομένα:</b>	Απαιτήθηκε η σε πραγματικές συνθήκες αξιολόγηση δύο διαφορετικών μορφών της ουράς ρομποτικού τόνου ως προς την πρόωση που επιτυγχάνουν.
  	
<b>Υλοποίηση:</b>	Κατασκευή πρωτοτύπων LOM των δύο εναλλακτικών μορφών σε δύο τεμάχια ανά εναλλακτική και σε κλίμακα 1:1. Εκτεταμένη στεγάνωση και αποπεράτωση επιφανειών με βερνίκι για την υλοποίηση πραγματικών δοκιμών απευθείας με τα πρωτότυπα σε δεξαμενή ύδατος.
<b>Χρόνος:</b>	Δύο εργάσιμες ημέρες για την ολοκλήρωση των τεσσάρων συνολικά αντικειμένων.
<b>Συμπεράσματα:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Πολύ ικανοποιητική απόδοση μορφής από τα πρωτότυπα LOM</li> <li>• Πολύ γρήγορη υλοποίηση των πρωτοτύπων στην LOM (περίπου 40min για καθένα εναλλακτική)</li> <li>• Επίτευξη πολύ καλής ποιότητας επιφανειών (<math>R_a &lt; 10\mu m</math>)</li> <li>• Ικανοποιητική στεγανότητα των πρωτοτύπων μετά από το εκτεταμένο φινίρισμα επέτρεψε την απρόσκοπτη διενέργεια των δοκιμών χωρίς αλλοίωση των πρωτοτύπων</li> </ul>

### 6.3 Γεωμετρικά Πρωτότυπα

Αφορούν αντικείμενα όπου πέραν της απόδοσης μορφής απαιτείτο και η ακριβής απόδοση τουλάχιστον των κύριων και κρίσιμων κατασκευαστικών διαστάσεων. Τα αντικείμενα θα χρησιμοποιούνταν για:

- Έλεγχο συναρμολόγησης και αρτιότητας κινηματικής λειτουργίας μηχανισμών (χωρίς πραγματικές φορτίσεις)
- Φυσική τεκμηρίωση της ακριβούς μορφής και γεωμετρίας των αντικειμένων
- Χρήση αντικειμένων της ακριβούς γεωμετρίας για περαιτέρω μελέτες και δοκιμές
- Αρχική εκτίμηση κατασκευασιμότητας και επιλογή μεθόδων και μέσων παραγωγής
- Ενίσχυση της κατανόησης της γεωμετρίας για την υποβοήθηση κατασκευής εργαλείων παραγωγής (π.χ. καλούπια)



#### 6.3.1 Κινηματικός μηχανισμός μανδάλωσης κουφωμάτων αλουμινίου

<b>Φορείς:</b>	Εργ. ΤΚΠ&Ε ΕΜΠ – ΚΛΕΙΘΡΟΠΟΙΪΑ DOMUS (Διμερής συνεργασία)
<b>Απαιτήσεις / Δεδομένα:</b>	Έλεγχος ιεραρχίας συναρμολόγησης και απρόσκοπτης κινηματικής λειτουργίας μηχανισμού μανδάλωσης κουφωμάτων αλουμινίου
<b>Υλοποίηση:</b>	Κατασκευή σε κλίμακα 1:1 πρωτοτύπων LOM λεπτών και σύνθετων εξαρτημάτων και συνεργασία τους στο μηχανισμό με έτοιμα και τυποποιημένα στοιχεία μηχανών (π.χ. ελατήρια, σφήνες κλπ) που χρησιμοποιούνται στο συναρμολογημένο σύνολο του μηχανισμού μανδάλωσης
<b>Χρόνος:</b>	Δύο εργάσιμες ημέρες
<b>Συμπεράσματα:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Επιτυχής επιβεβαίωση της κινηματικής λειτουργίας του μηχανισμού</li> <li>• Επίτευξη των επιθυμητών συναρμογών και συναρμολογήσεων με μικρές επεμβάσεις σε λίγα μόνο εξαρτήματα LOM</li> <li>• Εμφάνιση αδυναμιών (περιορισμένη αντοχή) και αποκολλήσεων των εξαρτημάτων LOM σε ιδιαίτερα λεπτότοιχες γεωμετρίες και διατομές</li> <li>• Ιδιαίτερα γρήγορη κατασκευή των εξαρτημάτων σε σύγκριση με μηχανουργικές κατεργασίες</li> </ul>

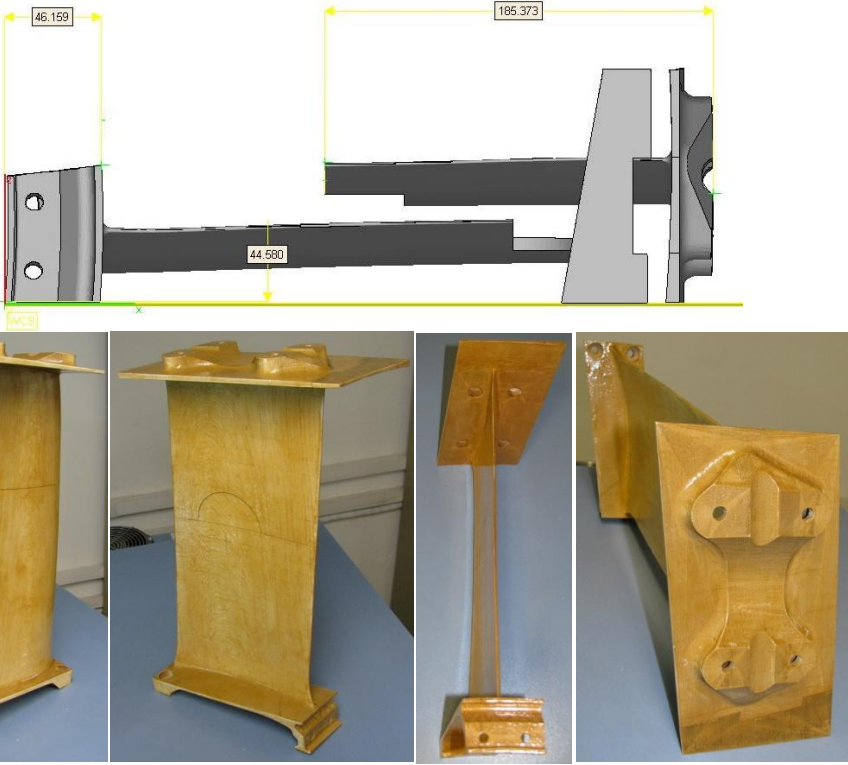
### 6.3.2 Κέλυφος αντανακλαστικού ασφάλτινου οδοστρώματος

<b>Φορείς:</b>	Εργ. ΤΚΠ&Ε ΕΜΠ – Γ. Πριόβολος, Είδη Οδικής Ασφάλειας ΕΠΕ (Διμερής συνεργασία)
<b>Απαιτήσεις / Δεδομένα:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Υποστήριξη επανασχεδιασμού/ βελτίωσης υπάρχοντος προβληματικού χυτοπρεσσαριστού αλουμινένιου προϊόντος</li> <li>Πρωτότυπα που να συναρμολογούνται με προϋπάρχοντα εξαρτήματα</li> <li>Δημιουργία φυσικού γεωμετρικού πρωτοτύπου για τεκμηρίωση στον ΕΛΟΤ και έγκριση τύπου κατά ΕΛΟΤ- EN 1463-1 : 1997</li> <li>Υποβοήθηση μηχανουργείου στην κατασκευαστή καλουπιού για χύτευση υπό πίεση</li> </ul>
	
<b>Υλοποίηση:</b>	Σχεδιασμός 3D CAD και κατασκευή πρωτοτύπων LOM (σε 2 κύκλους ανασχεδιασμού) συναρμολογημένων συνόλων του νέου χυτοπρεσσαριστού προϊόντος
<b>Χρόνος / Κόστος:</b>	Δύο εργάσιμες ημέρες για τα πρωτότυπα κάθε κύκλου σχεδιασμού. Συνολικό κόστος 250 €.
<b>Συμπεράσματα:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Συνοτόματη επίτευξη βελτιωμένου σχεδιασμού (15 ημέρες), απαλλαγμένου από τα προβλήματα του αρχικού (νέα ιεραρχία συναρμολόγησης)</li> <li>Έγκαιρος εντοπισμός πιθανών προβλημάτων της γεωμετρίας για τη χύτευση υπό πίεση και έγκαιρη γρήγορη αντιμετώπιση με κύκλο ανασχεδιασμού</li> <li>Απρόσκοπτη συναρμολόγηση των πρωτοτύπων LOM με τα προϋπάρχοντα εξαρτήματα (πλαστικά αντανακλαστικά)</li> <li>Πολύ γρήγορη κατασκευή των εξαρτημάτων LOM σε σύγκριση με μηχανουργικές κατεργασίες</li> <li>Επιτυχής χρήση των τελικών πρωτοτύπων για την έγκριση τύπου από τον ΕΛΟΤ</li> <li>Επίτευξη συνολικού χρόνου ανάπτυξης μόλις δύο ημερολογιακών μηνών έως την παραγωγή και διάθεση των εξαρτημάτων (Προϊόν P3A της εταιρίας)</li> <li>Δημοσίευση αποτελεσμάτων στο διεθνές συνέδριο ICMEN 2002 και στις Ημέρες E &amp; T 2006 του ΤΕΕ</li> </ul>

### 6.3.3 Βραχίονες φορητής πτυσσόμενης πολυθρόνας

<b>Φορείς:</b>	Εργ. ΤΚΠ&Ε ΕΜΠ – ΦΟΡΜΑ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΙ ΣΚΑΦΩΝ ΕΠΕ (Διμερής συνεργασία)
<b>Απαιτήσεις / Δεδομένα:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Δημιουργία γεωμετρικού πρωτοτύπου θερμοπλαστικού προϊόντος σε κλίμακα 1:1</li> <li>• Χρήση του πρωτοτύπου για έλεγχο συναρμολόγησης με τα σωληνωτά μέρη του καθίσματος</li> <li>• Χρήση ως φυσικό δείγμα για τον κατασκευαστή καλουπιών για την κατανόηση της γεωμετρίας</li> <li>• Διαστάσεις αντικειμένου εκτός ωφέλιμων εξοπλισμού LOM1015</li> <li>• Σύνθετες λεπτότοιχες γεωμετρίες και βαθιές κοιλότητες (Νευρώσεις)</li> </ul>
	
<b>Υλοποίηση:</b>	Διαχωρισμός 3D CAD αντικειμένου σε 4 επιμέρους και κατασκευή πρωτοτύπων LOM. Συναρμολόγηση – Συγκόλληση – Φινιρίσμα – Βαφή.
<b>Χρόνος / Κόστος:</b>	Συνολικά 3 εργάσιμες ημέρες περιλαμβανομένης της μετεπεξεργασίας. Συνολικό Κόστος 300 €.
<b>Συμπεράσματα:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Επίτευξη του πρωτοτύπου στις τελικές διαστάσεις με κατάλληλη διαίρεση σε επιμέρους</li> <li>• Αντιμετώπιση προβληματικών σε LOM για καθαρισμό αποβλήτου μορφών επίσης με διαίρεση</li> <li>• Χρήση ιδιοσυσκευών και πείρων για την ευθυγράμμιση &amp; συγκόλληση των επιμέρους τεμαχίων – Απόκτηση τεχνογνωσίας</li> <li>• Απόκτηση τεχνογνωσίας για μετεπεξεργασία βαφής με χρώμα πρωτοτύπων LOM</li> <li>• Αδυναμία απόδοσης στο πρωτότυπο σήμανσης πολύ μικρού πάχους (0,2mm –λογότυπο εταιρίας)</li> <li>• Επιτυχία του πρωτοτύπου σε όλες τις σκοπούμενες χρήσεις με συντριπτικά μικρό κόστος</li> </ul>

### 6.3.4 Σταθερό πτερύγιο διαμόρφωσης ροής αεροπορικού κινητήρα

<b>Φορείς:</b>	Εργ. ΤΚΠ&Ε ΕΜΠ – INASCO Hellas (Διμερής συνεργασία)
<b>Απαιτήσεις / Δεδομένα:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Δημιουργία γεωμετρικού πρωτοτύπου διαμορφωτή ροής μεγάλων διαστάσεων (&gt;80cm) σε κλίμακα 1:1</li> <li>• Χρήση του πρωτοτύπου για αξιολόγηση σχεδιασμού και περιορισμένη δοκιμή ροής</li> <li>• Διαστάσεις αντικειμένου εκτός ωφέλιμων εξοπλισμού LOM1015</li> <li>• Απαίτηση πολύ καλής ποιότητας αξιολογούμενων επιφανειών</li> </ul>
	
<b>Υλοποίηση:</b>	Διαχωρισμός 3D CAD αντικειμένου σε 3 επιμέρους και κατασκευή πρωτοτύπων LOM. Συναρμολόγηση – Συγκόλληση – Εκτεταμένο φινίρισμα επιφανειών.
<b>Χρόνος / Κόστος:</b>	Συνολικά 3 εργάσιμες ημέρες για κατασκευή επί LOM1015 και 3 Εργάσιμες για συγκόλληση και αποπεράτωση τελικού πρωτοτύπου. Συνολικό Κόστος 800 €.
<b>Συμπεράσματα:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Επίτευξη οικονομικής κατασκευής του πρωτοτύπου στις τελικές διαστάσεις σε έναν κύκλο κατασκευής, με κατάλληλη διαίρεση του</li> <li>• Επίτευξη μονοσήμαντης εύκολης τοποθέτησης επιμέρους τεμαχίων για τη συγκρότηση του τελικού με τεχνικές διαίρεσης με σύνθετες γεωμετρικές μορφές</li> <li>• Επίτευξη ποιότητας επιφανειών με Ra &lt;10μm</li> <li>• Επιτυχία του πρωτοτύπου στις σκοπούμενες χρήσεις με πολύ μικρό κόστος συγκριτικά με άλλες εναλλακτικές</li> </ul>

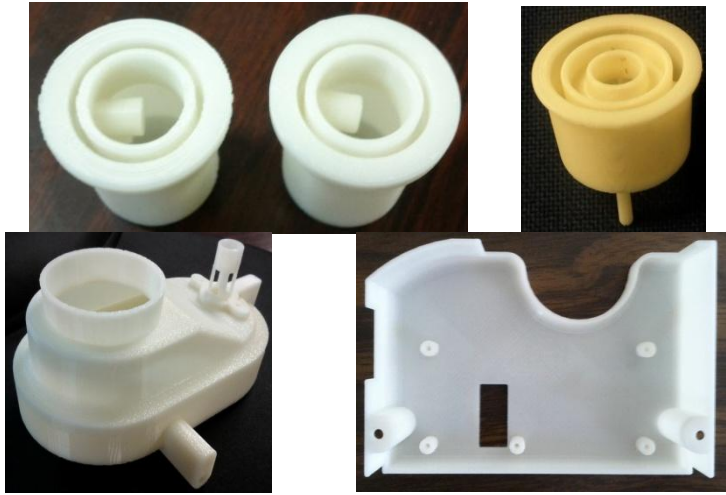
### 6.3.5 Κέλυφος οπτομηχανικού συστήματος

<b>Φορείς:</b>	Εργ. ΤΚΠ&Ε ΕΜΠ – Theon Sensors S.A. (Διμερής συνεργασία)
<b>Απαιτήσεις / Δεδομένα:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Δημιουργία γεωμετρικού πρωτοτύπου του πλαστικού κελύφους σύνθετης γεωμετρίας νυκτοσκοπικής διόπτρας σε κλίμακα 1:1</li> <li>• Χρήση του πρωτοτύπου για επιβεβαίωση σχεδιασμού, δοκιμή συναρμολόγησης με λοιπά προϋπάρχοντα οπτικά, ηλεκτρονικά και μηχανικά εξαρτήματα του συναρμολογημένου συνόλου του προϊόντος</li> <li>• Απαίτηση ιδιαίτερως ταχείας πρωτοτυποποίησης</li> </ul>
	
<b>Υλοποίηση:</b>	Ανάλυση επιλογής κατεύθυνσης πρωτοτυποποίησης με την αναπτυχθείσα στα πλαίσια της ΔΔ μεθοδολογία. Κατασκευή από ABS+ στη μηχανή uPrint τεχνολογίας FDM του Εργαστηρίου ΤΚΠ
<b>Χρόνος / Κόστος:</b>	Μία (1) εργάσιμη ημέρα για την ολοκλήρωση και παράδοση του πρωτοτύπου. Συνολικό Κόστος 170 €.
<b>Συμπεράσματα:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Πολύ καλές επιδόσεις της uPrint για πλαστικά σύνθετης γεωμετρίας εξαρτήματα κοινών διαστάσεων.</li> <li>• Αυξημένη αντοχή πρωτοτύπων FDM (uPrint) ικανή να ανταπεξέλθει σε συνήθεις δοκιμές συναρμολόγησης συνόλων</li> <li>• Μέση ποιότητα επιφανειών δεν αποτελεί πρόβλημα όταν δεν αποτελεί κριτήριο αξιολόγησης και κύριο ζητούμενο.</li> <li>• Επιτυχία του πρωτοτύπου στις σκοπούμενες χρήσεις με πολύ μικρό κόστος συγκριτικά με άλλες εναλλακτικές</li> </ul>

#### **6.4 Λειτουργικά Πρωτότυπα**

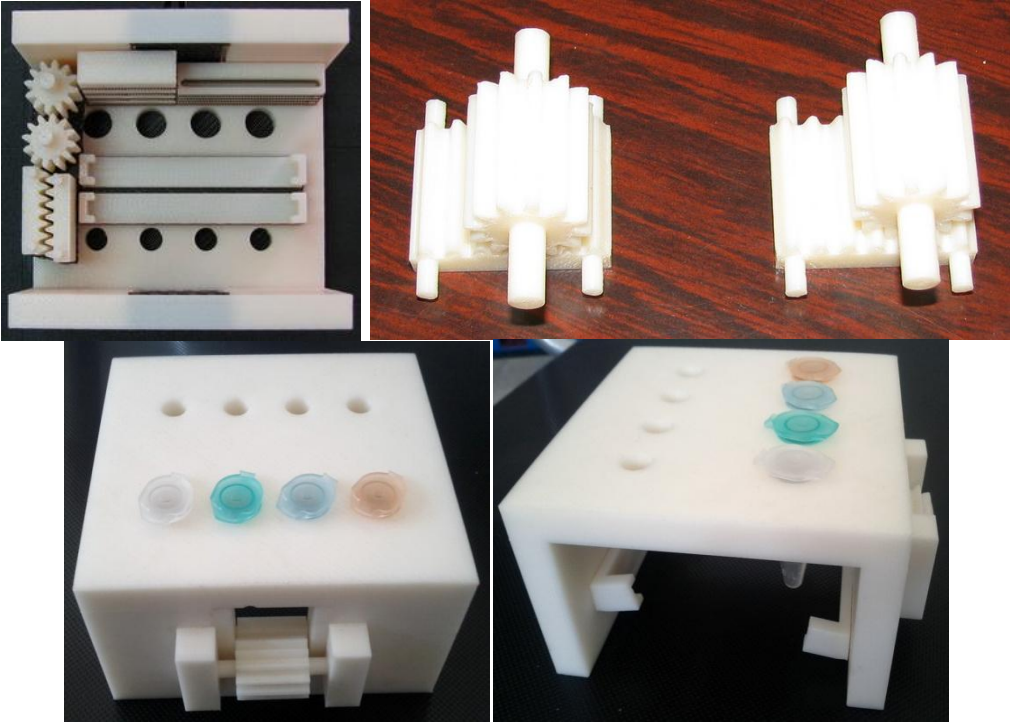
Οι περιπτώσεις της παρούσας παραγράφου εντάσσονται στην κατηγορία των λειτουργικών πρωτοτύπων, καθώς τα πρωτότυπα αντικείμενα που κατασκευάστηκαν ζητείτο να λειτουργήσουν ως τελικά προϊόντα, επιβεβαιώνοντας και υλοποιώντας τον σκοπό και τη λειτουργία τους. Ως εκ τούτου πέραν των όποιων γεωμετρικών δεσμεύσεων και απαιτήσεων, το υλικό των πρωτοτύπων έπρεπε να είναι παραπλήσιο με αυτό των προς παραγωγή προϊόντων ή να θεωρηθεί ως τελικό το ίδιο.

### 6.4.1 Νεφελοποιητής αερίων

<b>Φορείς:</b>	Εργ. ΤΚΠ&Ε ΕΜΠ – Megasystems AEBE (Διμερής συνεργασία)
<b>Απαιτήσεις / Δεδομένα:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Δημιουργία επτά (7) διαφορετικών συνεργαζόμενων μεταξύ τους δοκιμαστικών εξαρτημάτων σύνθετου προϊόντος για τη νεφελοποίηση αρωματικών μιγμάτων</li> <li>• Υποβοήθηση και οριστικοποίηση παραμέτρων σχεδιασμού με βάση δοκιμές πραγματικής λειτουργίας των εξαρτημάτων</li> <li>• Κατασκευή των εξαρτημάτων σε κλίμακα 1:1</li> <li>• Παρουσία οριακών για διαστρωματική κατασκευή μορφολογικών και γεωμετρικών στοιχείων (π.χ. οπές μικρότερες των 0,5mm, πάχη μικρότερα του 1mm)</li> <li>• Στοχευόμενη παραγωγή των εξαρτημάτων με χύτευση θερμοπλαστικών με έγχυση (injection Molding)</li> </ul>
	
<b>Υλοποίηση:</b>	Χρήση της μεθοδολογίας επιλογής κατεύθυνσης πρωτοτυποποίησης για την επιβεβαίωση της σκοπιμότητας κατασκευής των εξαρτημάτων με ΤΚΠ (uPrint). Κατασκευή από ABS+ στη μηχανή uPrint τεχνολογίας FDM του Εργαστηρίου ΤΚΠ επτά (7) διαφορετικών εξαρτημάτων σε τέσσερις κύκλους κατασκευής Δύο εναλλακτικοί προσανατολισμοί κατασκευής στο εξάρτημα με τις πολύ μικρές οπές.
<b>Χρόνος / Κόστος:</b>	Συνολικό καθαρός χρόνος κατασκευής όλων των εξαρτημάτων σε uPrint 14 ώρες Μία (1) εργάσιμη ημέρα για την ολοκλήρωση και παράδοση των πρωτότυπων κάθε κατασκευής. (4 μέρες συνολικά) Συνολικό Κόστος όλων των εξαρτημάτων 375 €.
<b>Συμπεράσματα:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Εξάλειψη ή εκφυλισμός σε τετραγωνικής μορφής παραμόρφωση (αναλόγως προσανατολισμού) κυλινδρικών οπών <math>\varnothing</math> 0,4mm .</li> <li>• Προβληματική επίστρωση υλικού σε ιδιαίτερα λεπτά μορφολογικά στοιχεία (Μεγάλα διάκενα)</li> <li>• Χειρονακτική απόδοση των μικρών οπών</li> <li>• Εφαρμογή τεχνικών κάλυψης και σφράγισης των διακένων με δευτερεύον υλικό για την επίτευξη της απαιτούμενης στεγανότητας για τη διεξαγωγή των λειτουργικών δοκιμών.</li> <li>• Δραστικά μικρός χρόνος για την υποστήριξη του σχεδιασμού μέσω των πρωτότυπων</li> </ul>




## 6.4.2 Εξαρτήματα Βιοϊατρικών εφαρμογών

<b>Φορείς:</b>	Εργ. ΤΚΠ&Ε ΕΜΠ – Εργαστήριο Συστημάτων Βιοϊατρικής Τεχνολογίας Τομέα ΜΚ & ΑΕ Σχ.ΜΜ (Υπ/νος Επ. Καθ. Λ. Αλεξόπουλος) (Ερευνητική ανάγκη ανάπτυξης βιοϊατρικών συστημάτων)
<b>Απαιτήσεις / Δεδομένα:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Δημιουργία δεκαπέντε (15) πρωτοτύπων λειτουργικών εξαρτημάτων για πειραματική κινηματική διάταξη βιοϊατρικού ενδιαφέροντος σε κλίμακα 1:1</li> <li>• Απευθείας συναρμολόγηση των εξαρτημάτων και χρήση της διάταξης για πειραματικές δοκιμές</li> <li>• Απαίτηση ταχείας και οικονομικής κατασκευής των πρωτοτύπων εξαρτημάτων από επαρκώς ανθεκτικό υλικό και με συνθήκες ανοχές.</li> </ul>
	
<b>Υλοποίηση:</b>	Επιβεβαίωση της σκοπιμότητας κατασκευής των εξαρτημάτων με ΤΚΠ (uPrint) κατ'εφαρμογήν της μεθοδολογίας επιλογής κατεύθυνσης πρωτοτυποποίησης. Χρήση εξειδικευμένου λογισμικού για STL files για την ομαδοποίηση των εξαρτημάτων σε μια κατασκευή. Κατασκευή από ABS+ στη μηχανή uPrint τεχνολογίας FDM του Εργαστηρίου ΤΚΠ
<b>Χρόνος / Κόστος:</b>	Κατασκευή και πλήρης αποπεράτωση όλων των εξαρτημάτων σε δύο (2) εργάσιμες ημέρες. Ενδεικτικό καθαρό κόστος 130 €.
<b>Συμπεράσματα:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Πολύ ικανοποιητική συναρμολόγηση και λειτουργία των εξαρτημάτων στο μηχανισμό (π.χ. γρανάζια με τους οδοντωτούς κανόνες).</li> <li>• Επιτυχής λειτουργία της πειραματικής διάταξης</li> <li>• Πολύ γρήγορη και με μικρό κόστος υλοποίηση των εξαρτημάτων έναντι εναλλακτικών μεθόδων κατασκευής.</li> <li>• Ωφέλεια σε υλικό υποστήριξης και χρόνο κατασκευής από την ομαδοποιημένη διάταξη των εξαρτημάτων κατά την κατασκευή τους.</li> </ul>


## 6.5 Λοιπά Πρωτότυπα

Παρουσιάζονται χαρακτηριστικές περιπτώσεις εφαρμογών ΤΚΠ, μη αυστηρώς μηχανολογικού αντικειμένου, που εντάχθηκαν στα πλαίσια της ΔΔ και αφενός παρείχαν πολύτιμη τεχνογνωσία και αξιοποιήσιμα αποτελέσματα, αφετέρου κατέδειξαν τις αυξημένες δυνατότητες αξιοποίησης της ΤΚΠ και σε άλλους επιστημονικούς κλάδους με διεπιστημονική προσέγγιση.

### 6.5.1 Πρωτότυπα βιοϊατρικών εμφυτευμάτων

<b>Φορείς:</b>	Εργ. ΤΚΠ&Ε ΕΜΠ – ΒΙΟΗΕΧΑΓΟΝ (Μαγνήσαλης Ε.) (Διμερής Συνεργασία)
<b>Απαιτήσεις / Δεδομένα:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Κατασκευή πρωτοτύπων δώδεκα (12) κύριων και βοηθητικών εξαρτημάτων εμφυτευμάτων αποκατάστασης γόνατος</li> <li>Αξιολόγηση σχεδιασμού, συνεργασίας και διαδικασιών τοποθέτησης των εμφυτευμάτων</li> </ul>
	
<b>Υλοποίηση:</b>	Χρήση εξειδικευμένου λογισμικού για STL files για την ομαδοποίηση των εξαρτημάτων σε μια κατασκευή. Κατασκευή στη μηχανή LOM1015 σε ένα κύκλο λειτουργίας
<b>Χρόνος / Κόστος:</b>	Κατασκευή και πλήρης αποπεράτωση όλων των 12 εξαρτημάτων σε μόλις έξι (6) εργάσιμες ημέρες. Συνολικό κόστος 425 €.
<b>Συμπεράσματα:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Έγκαιρος εντοπισμός σφαλμάτων σχεδιασμού μέσω των πρωτοτύπων πριν τη δρομολόγηση της οριστικής κατασκευής</li> <li>Επίτευξη σημαντικών χρονικών και κοστολογικών οφελών για τα πρωτότυπα από την ταυτόχρονη κατασκευή τους.</li> <li>Συντριπτικά χαμηλό κόστος ανά εξάρτημα</li> <li>Οριακή εκμετάλλευση δυνατοτήτων μηχανής LOM1015 για τις λεπτότοιχες γεωμετρίες</li> <li>Σημαντική συρρίκνωση του χρόνου και κόστους ανάπτυξης των εμφυτευμάτων και βοηθητικών τους εξαρτημάτων</li> </ul>

### 6.5.2 Τοπογραφικά πρωτότυπα γεωγραφικής τεκμηρίωσης

<b>Φορείς:</b>	Εργ. ΤΚΠ&Ε ΕΜΠ – Σχολή Τοπογράφων Μηχανικών ΕΜΠ (Υπ/νοι Επ.Καθ/τές Λάμπρου Ε. & Πανταζής Γ. – Διμερής Συνεργασία)
<b>Απαιτήσεις / Δεδομένα:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Κατασκευή φυσικού μοντέλου γεωγραφικής τεκμηρίωσης κρατήρα ηφαιστείου Ν. Νισύρου (μνημείο φυσικής κληρονομιάς)</li> <li>• Αξιοποίηση ψηφιακών δεδομένων από τοπογραφικό εξοπλισμό για το 3D ψηφιακό μοντέλο και εφαρμογή τεχνικών ψηφιακής βελτίωσης επιφανειών</li> <li>• Κατασκευή δοκιμαστικών και του πλήρους μοντέλου σε κλίμακες 1:1500 και 1:2000</li> </ul>
	
<b>Υλοποίηση:</b>	Χρήση εξειδικευμένου λογισμικού για επεξεργασία και βελτίωση επιφανειών, συγκρότηση 3D μοντέλου και εξαγωγή STL files (Geomagic Studio). Κατασκευή ΤΚΠ στη μηχανή LOM1015 σε 3 κύκλους Αποπεράτωση με βερνίκι.
<b>Χρόνος / Κόστος:</b>	Κατασκευή και πλήρης αποπεράτωση δοκιμαστικών και τελικών μοντέλων σε συνολικά έξι (6) εργάσιμες ημέρες. Συνολικό καθαρό κόστος 460 €.
<b>Συμπεράσματα:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Άρτια και πιστή απόδοση του φυσικού τοπίου στη μακέτα από την τεχνολογία LOM – Φυσική εμφάνιση</li> <li>• Επιτυχής εξάλειψη από τα μοντέλα δευτερευόντων παραγόντων αλλοίωσης της κύριας γεωμετρίας (π.χ. βράχοι, πέτρες) με τεχνικές ψηφιακής εξομάλυνσης της επιφάνειας του κρατήρα (smoothing) πριν την κατασκευή.</li> <li>• Πολύ μικρός χρόνος υλοποίησης με ικανοποιητικό κόστος</li> <li>• Ανωτερότητα πιστότητας των μακετών σε σχέση με χειροποίητες – Πιστοποίηση μοντέλου στον ΟΒΙ</li> <li>• Δημοσίευση αποτελεσμάτων στο διεθνές περιοδικό <i>International Journal of Heritage in the Digital Era</i></li> </ul>

### 6.5.3 Πρωτότυπα παλαιοντολογικού ενδιαφέροντος

<b>Φορείς:</b>	Εργ. ΤΚΠ&Ε ΕΜΠ – Μουσείο Παλαιοντολογίας, Τμήμα Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος ΕΚΠΑ (Υπ/νος Καθ. Θεοδώρου Γ. – Διμερής Συνεργασία)
<b>Απαιτήσεις / Δεδομένα:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ανακατασκευή οστού παλαιοντολογικού ευρήματος</li> <li>• Αξιοποίηση ψηφιακών δεδομένων από ψηφιακή αποτύπωση με εξοπλισμό ΑΣ (laser camera) και εφαρμογή τεχνικών ψηφιακής ανασύστασης (3D reconstruction)</li> <li>• Κατασκευή οστού με εναλλακτικές ΤΚΠ (LOM &amp; FDM) σε κλίμακα 1:2 και 1:4</li> </ul>
	
<b>Υλοποίηση:</b>	Χρήση εξειδικευμένου λογισμικού Geomagic Studio για την ψηφιακή ανασύσταση 3D μοντέλου και εξαγωγή STL files. Χρήση εξειδικευμένου λογισμικού για STL files για την απομείωση των τριγώνων του STL σε κατασκευάσιμο πλήθος. Κατασκευή ΤΚΠ στη μηχανή LOM1015 (1:2) και στη μηχανή uPrint (1:4)
<b>Χρόνος:</b>	1 ημέρα για το πρωτότυπο LOM <1 ημέρα για το πρωτότυπο FDM – uPrint
<b>Συμπεράσματα:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ικανοποιητική απόδοση της οργανικής μορφής των οστών (συμπαγείς μορφές), ιδιαίτερα από την τεχνολογία LOM, με ταχείς ρυθμούς κατασκευής</li> <li>• Δεκτικότητα των πρωτοτύπων για μετεπεξεργασία απόδοσης συγκεκριμένης εμφάνισης (βαφή)</li> <li>• Εύκολη ανακατασκευή πρωτοτύπου και συμμετρικού οστού με αξιοποίηση ψηφιακών τεχνικών</li> <li>• Υποβολή και έγκριση ερευνητικού έργου ΕΣΠΑ – ΘΑΛΗΣ (Mechanical) ΕΚΠΑ &amp; ΕΜΠ, για την ανακατασκευή με τεχνικές ψηφιακής ανασύστασης και ΤΚΠ πλήρους σκελετού ελληνικού προϊστορικού ελέφαντα σε κλίμακα 1:1</li> </ul>

#### 6.5.4 Πρωτότυπα αντικειμένων πολιτιστικής κληρονομιάς

<b>Φορείς:</b>	Εργ. ΤΚΠ&Ε ΕΜΠ – Εθνικό Αρχαιολογικό Μουσείο (Διπλ. Εργασία & Διμερής Συνεργασία)
<b>Απαιτήσεις / Δεδομένα:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ψηφιακή καταγραφή και ανασύνθεση μορφών τριών (3) αρχαιολογικών αντικειμένων (δύο κυκλαδίτικων ειδωλίων και μιας ορειχάλκινης αχιβάδας από το ναυάγιο των Αντικυθήρων)</li> <li>Διερεύνηση αναπαραγωγής πιστών αντιγράφων με ΤΚΠ και δυνατοτήτων αξιοποίησής τους</li> </ul>
	
<b>Υλοποίηση:</b>	Ψηφιοποίηση με εξοπλισμό ΑΣ (laser camera) και εφαρμογή τεχνικών ψηφιακής ανασύστασης (3D reconstruction) σε περιβάλλον Geomagic Studio και εξαγωγή αρχείων STL Κατασκευή στις μηχανές ΤΚΠ LOM 1015 και uPrint του Εργαστηρίου ΤΚΠ & Ε
<b>Χρόνος:</b>	Κατασκευή όλων των πρωτοτύπων αντικειμένων συνολικά σε μία (1) εργάσιμη ημέρα.
<b>Συμπεράσματα:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ικανοποιητικού επιπέδου απόδοση της απαιτούμενης πιστότητας των αρχικών αντικειμένων</li> <li>Απαραίτητη η δευτερεύουσα μετεπεξεργασία: (α) προς άρση των ιχνών της διαστρωματικής κατασκευής (ιδίως για τα πρωτότυπα από τεχνολογία FDM), (β) για την απόδοση ειδικών χαρακτηριστικών εμφάνισης επί των πρωτοτύπων (χρώμα, παλαίωση), (γ) προκειμένου να χρησιμοποιούνται ως αρχέτυπα για αναπαραγωγή πολλαπλών πιστών αντιγράφων – Χρήζει περαιτέρω διερεύνησης κατάλληλων τεχνικών και υλικών σε συνεργασία με συντηρητές.</li> <li>Δυνατότητα άμεσης αξιοποίησης από μουσεία και πολιτιστικούς φορείς για την εξυπηρέτηση ΑΜΕΑ με προβλήματα όρασης, μεταφορά ευαίσθητων εκθεμάτων, αποκατάσταση φθαρμένων και ελλιπών εκθεμάτων, ψηφιακές βιβλιοθήκες και περιβάλλοντα Εικονικής Πραγματικότητας</li> <li>Δημοσιοποίηση αποτελεσμάτων με πόστερ σε συμπόσιο της Ελληνικής Αρχαιομετρικής Εταιρίας (ΕΑΕ)</li> </ul>

## 6.6 Εφαρμογή πρωτοτύπων LOM και ΤΚΕ για Εργαλεία Παραγωγής

Πολύ σημαντικό μέρος της παρούσας έρευνας αποτέλεσε και η χρήση πρωτοτύπων ΤΚΠ, τόσο για άμεση όσο κυρίως για έμμεση ΤΚΕ (Βλ. Παράγραφο 1.10).

Ειδικά η τεχνολογία και τα πρωτότυπα LOM, λόγω της πολύ μεγάλης ομοιότητάς τους με παραδοσιακά – συμβατικά ξύλινα αντικείμενα, χαρακτηρίζονταν από πολύ νωρίς ως ιδιαίτερα κατάλληλα για αξιοποίηση με αλυσίδες διαδικασιών ΤΚΕ, για τη δημιουργία ενδιάμεσων, βοηθητικών, προσωρινών (μικρής & μεσαίας σειράς), αλλά και κανονικών εργαλείων παραγωγής (μητρών, καλουπιών, διαμορφωτικών) για αρκετές μεθόδους παραγωγής.




Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής, τα παραπάνω και ειδικά οι δυνατότητες πρωτοτύπων LOM για ΤΚΕ όφειλαν να επιβεβαιωθούν στο μέτρο του δυνατού, καθώς συχνά από πλευράς κατασκευαστών εξοπλισμού ΤΚΠ συνηθίζεται να υπερτονίζονται τα πλεονεκτήματα και οι δυνατότητες τους, ενώ εντέχνως αποκρύπτονται προβλήματα και ελαττώματα. Ήταν επίσης αναγκαίο να παραχθεί τεχνογνωσία και εμπειρία από χρήση ΤΚΠ και ΤΚΕ και από το ελληνικό κατασκευαστικό περιβάλλον, που θα αξιοποιείτο μετέπειτα με συστηματικό τρόπο σε διαδικασίες ένταξης και επιλογής και των ΤΚΕ (σε συνδυασμό με πρωτότυπα ΤΚΠ) ως εναλλακτικές πρωτοτυπώσεως, κυρίως για την περίπτωση των πρωτοτύπων εργαλείων παραγωγής.

Για το σκοπό αυτό διεξήχθη εκτεταμένη έρευνα ΤΚΕ στα πλαίσια:

- Του ερευνητικού προγράμματος της ΓΓΕΤ ΕΠΕΤ II – ΝΕΚΤΑΡ «Ανάπτυξη Εγκαταστάσεων για την Ταχεία Δημιουργία Πρωτοτύπων», με τη συμμετοχή του ΠΠ, του ΕΜΠ και πολλών ελληνικών βιομηχανικών επιχειρήσεων (ΒΙΟΡΑΛ, ΜΙΚΡΟΝ ΕΠΕ, ΕΛΑΪΣ, FA CAD'ORO, Χυτήρια Ηπείρου, κλπ.)
- Του ερευνητικού προγράμματος της ΓΓΕΤ – ΠΑΒΕ «Ανάπτυξη συστήματος σχεδιασμού και κατασκευής εργαλείων χύτευσης χυτοσιδηρών στοιχείων αντλιών, σε περιβάλλον CAD/CAM/Rapid Prototyping/Rapid Tooling», Έργο 97BE99 της εταιρίας ΚΑΖΗΣ ΑΒΕΕ με το Εργαστήριο ΤΚΠ & Ε του ΕΜΠ
- Του ερευνητικού προγράμματος της ΓΓΕΤ – ΠΑΒΕ «Ανάπτυξη συστήματος σχεδιασμού και κατασκευής των εργαλείων διαμόρφωσης (μητρών) για την παραγωγή προϊόντων συσκευασίας από ανακυκλώσιμο χαρτοπολτό» της εταιρίας ΗΡΑΚΛΗΣ ΣΥΣΚΕΥΑΣΙΑ Α.Ε. με το Εργαστήριο ΤΚΠ & Ε του ΕΜΠ
- Αρκετών σχετικών αυτόνομων ερευνητικών προσπαθειών του Εργαστηρίου ΤΚΠ & Ε, στα πλαίσια διμερούς συνεργασίας του σε πιλοτικού χαρακτήρα εφαρμογές ΤΚΠ-ΤΚΕ με ελληνικές βιομηχανικές και κατασκευαστικές επιχειρήσεις, όπως οι TURBOMED S.A.– Αφοί Παρασκευόπουλοι (Χυτεύσεις ακριβείας), ΒΟΥΛΓΑΡΕΛΗΣ ΑΘ. (Μηχανουργείο Κατασκευής Καλουπιών), Χυτήρια ΔΟΥΚΑ (Θεσσαλονίκη), ΜΕΡΚΟΥΡΗΣ ΕΠΕ (Πολυμερή υλικά, Σιλκόνες & Πολυουρεθάνες) κλπ., δια των οποίων επίσης υποστηρίχθηκε και η εκπόνηση Διπλωματικών Εργασιών φοιτητών της Σχολής ΜΜ του ΕΜΠ (Γ.Ιορδάνης, Γ. Πολίτης, Π.Μουστάκας).

Αποτελέσματα των ερευνητικών αυτών προσπαθειών, επιβεβαιώνουν εν μέρει σχετική διεθνή βιβλιογραφία, αναδεικνύουν θέματα και προβλήματα για περαιτέρω έρευνα, παρέχουν πολύτιμα αξιοποιήσιμα ποσοτικά (χρονικά, κοστολογικά, ακρίβεια) και ποιοτικά δεδομένα για την ΤΚΕ. Έχουν δημοσιευθεί από το συγγραφέα της παρούσας σε διεθνή συνέδρια και ημερίδες, [Polydoras et al., 2000b; Polydoras et al., 2002; Sfantsikoroulos et al., 2006] και εκτίθενται εν συντομία στις επόμενες παραγράφους.

### 6.6.1 Κατασκευή μητρών σιλικόνης – Μολυβοθήκη

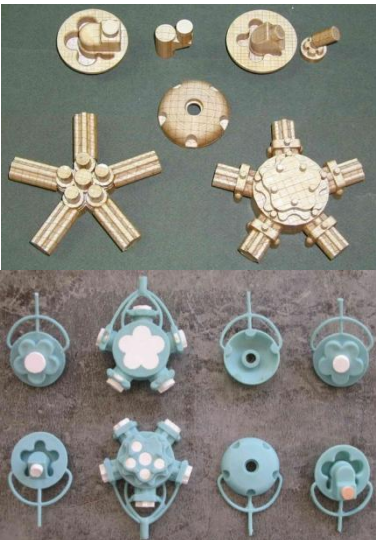
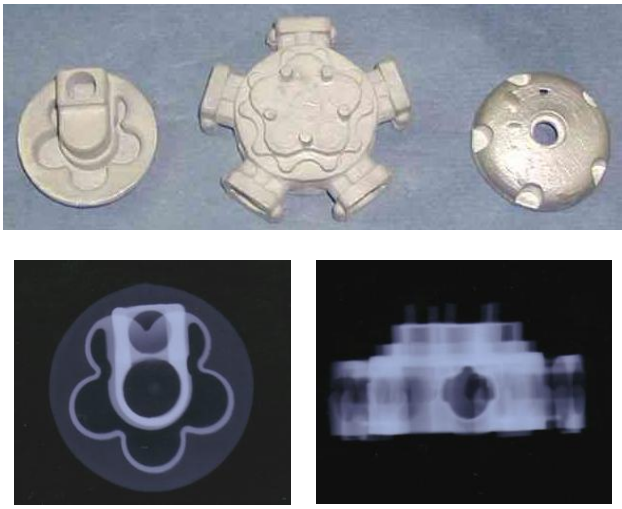
<b>Φορείς:</b>	Εργ. ΤΚΠ&Ε ΕΜΠ – ΜΕΡΚΟΥΡΗΣ ΕΠΕ (Διπλ. Εργασία & Διμερής Συνεργασία)
<b>Απαιτήσεις / Δεδομένα:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Χρήση πρωτοτύπων LOM για αναπαραγωγή σε μικρή σειρά αντιγράφων από PUR δια RTV μητρών σιλικόνης</li> <li>Κατασκευή μητρών σε 1 και 2 στάδια και χυτεύσεις PUR βαρυτικά και υπό κενό, σε ποικιλία πολυμερών υλικών</li> <li>Αξιολόγηση χρόνων, κόστους, ακρίβειας και διαδικασίας γενικά</li> </ul>
 	  
<b>Υλοποίηση:</b>	Κατασκευή απλής μολυβοθήκης 2 μερών σε LOM1015 Χρήση σιλικονών της GE για κατασκευή μητρών Χύτευση PUR “Parts in Minutes” UREOL 5217, 5202 & 5219 της CIBA Chemicals, βαρυτικά, υπό κενό (97 % = 25 mmHg) και με συσκευή έγχυσης (για την PUR γρήγορης ωρίμανσης)
<b>Χρόνος/Κόστος:</b>	Δύο (2) ημέρες για μια τυπική μήτρα σιλικόνης. Ένα έως δώδεκα αντίγραφα PUR ανά μήτρα, ανά 8ωρο, αναλόγως της επιλεγείσας PUR. Κόστη πολυμερών υλικών περίπου 25€/kg Τυπικό κόστος εφαρμογής 300€.
<b>Συμπεράσματα:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Χαμηλός ως μέσος ρυθμός παραγωγής της διαδικασίας, επαρκής για την κάλυψη μικρής σειράς παραγωγής</li> <li>Επαρκής αντοχή των μητρών σιλικόνης στη χύτευση PUR (Αλλοιώσεις συνήθως μετά από 50 αντίγραφα)</li> <li>Καλύτερα αποτελέσματα στις υπό κενό χυτεύσεις</li> <li>Σημαντικός ο ρόλος του τεχνικού εφαρμογής στη σφράγιση των μητρών, χύτευση των PUR για αποφυγή ελαττωμάτων (Flashes, μη πλήρωση κλπ.)</li> <li>Οι πολύ γρήγορης ωρίμανσης PUR δεν ικανοποιούν επαρκώς τη διαδικασία</li> <li>Διαστασιολογικές αλλοιώσεις από τον κύκλο σιλικόνης – PUR αμελητέες, 0,1% max. Κρίσιμη η ακρίβεια των πρωτοτύπων.</li> <li>100% αναπαραγωγή της ποιότητας επιφανειών των πρωτοτύπων</li> </ul>

### 6.6.2 Κατασκευή μητρών σιλικόνης – Χύτευση συμπαγούς μεταλλικού πτερυγίου με τη μέθοδο του χαμένου κεριού

<b>Φορείς:</b>	Εργ. ΤΚΠ&Ε ΕΜΠ – TURBOMED S.A. (Διπλ. Εργασία & Διμερής Συνεργασία)
<b>Απαιτήσεις / Δεδομένα:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Χρήση πρωτοτύπων LOM &amp; μητρών σιλικόνης για παραγωγή μεταλλικού πτερυγίου με χαμένο κεριό</li> <li>• Εκτίμηση χρόνων – κόστους διαδικασίας</li> <li>• Αξιολόγηση κύκλου και εντοπισμός αδυναμιών διαδικασίας</li> </ul>
 	  
<b>Υλοποίηση:</b>	Κατασκευή μοντέλου χύτευσης (υπερδιαστασιολογημένου) πτερυγίου σε LOM1015 Χρήση σιλικονών της GE για κατασκευή μήτρας σιλικόνης και βαρυντική αναπαραγωγή αναλωσίμων σε κεριό χύτευσης Δόμηση δένδρου χύτευσης και δημιουργία κεραμικού κελύφους Χύτευση σε αλουμίνιο με τη μέθοδο του χαμένου κεριού
<b>Χρόνος/Κόστος:</b>	Μία (1) εβδομάδα για τον τυπικό κύκλο του χαμένου κεριού με αφετηρία πρωτότυπα ΤΚΠ (Περιλαμβάνονται δύο ημέρες για τις μήτρες σιλικόνης). Κόστος πρωτοτύπων – μητρών σιλικόνης περίπου 10% του συνολικού για τη χύτευση χαμένου κεριού Τυπικό κόστος εφαρμογής 2000€.
<b>Συμπεράσματα:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Εφικτή η μείωση χρόνου και επαύξηση ακρίβειας της διαδικασίας χαμένου κεριού με υιοθέτηση πρωτοτύπων ΤΚΠ &amp; μητρών σιλικόνης ΤΚΕ για τα κέρνα αναλώσιμα</li> <li>• Κρισιμότερος παράγοντας ακρίβειας της διαδικασίας η ορθή αντιστάθμιση των συρρικνώσεων κεριού χύτευσης και μετάλλου στο CAD μοντέλο και στα πρωτότυπα.</li> <li>• Πάγιοι χρόνοι της διαδικασίας χαμένου κεριού δύσκολο να συρρικνωθούν περαιτέρω</li> <li>• Η τεχνογνωσία και ικανότητα του χυτηρίου επίσης κρίσιμη για το τελικό αποτέλεσμα</li> <li>• Δημοσίευση αποτελεσμάτων στις Ελληνικές Ημέρες E&amp;T – Ευρωπαϊκής Συνεργασίας 2006 του ΤΕΕ</li> </ul>



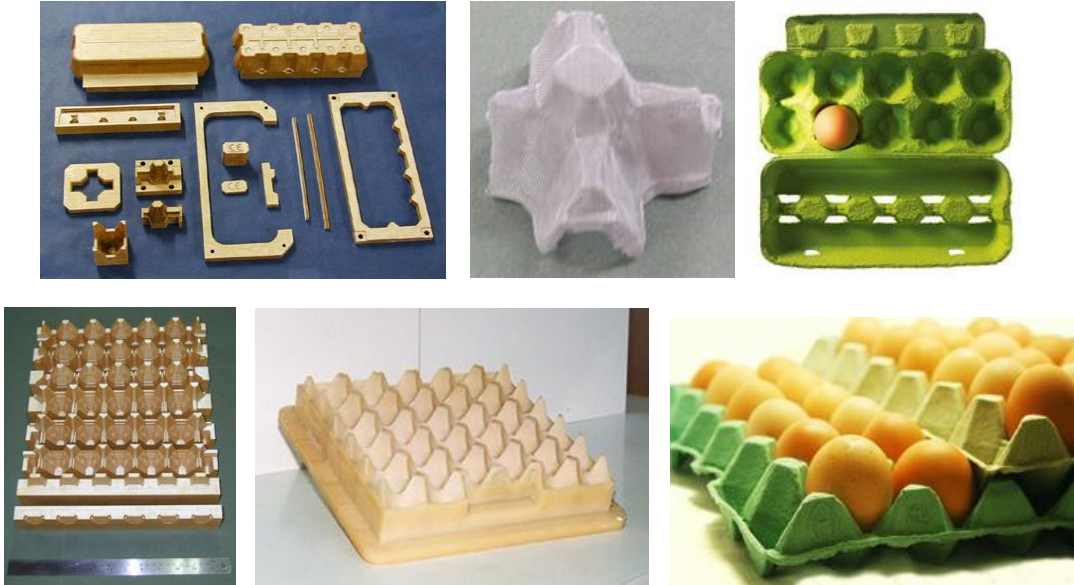
### 6.6.3 Κατασκευή μητρών σιλικόνης – Χύτευση σύνθετου μεταλλικού εξαρτήματος με τη μέθοδο χαμένου κεριού – αναλώσιμου πυρήνα

<b>Φορείς:</b>	Εργ. ΤΚΠ&Ε ΕΜΠ – Βουλγαρέλης Αθ.& ΣΙΑ Ο.Ε. – Χυτήρια Δούκα, (Διπλ. Εργασία ΔΠΜΣ & Τριμερής Συνεργασία)
<b>Απαιτήσεις / Δεδομένα:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Χρήση πρωτοτύπων LOM &amp; μητρών σιλικόνης για παραγωγή σύνθετων εξαρτημάτων αστεροειδούς κινητήρα MEK μοντελισμού (“Daedalus”), με διαδικασία χαμένου κεριού – χαμένου πυρήνα (Lost wax – Lost Core)</li> <li>Αξιολόγηση πρωτοτύπων LOM για τη διαδικασία Lost Wax – Lost Core</li> </ul>
	
<b>Υλοποίηση:</b>	<p>Κατασκευή εξωτερικών μοντέλων και πυρήνων χύτευσης των εξαρτημάτων σε LOM1015          Χρήση σιλικονών CASTALDO για κατασκευή μητρών σιλικόνης σε 2 στάδια (Πυρήνες και συνολικά)          Αναπαραγωγή πυρήνων σε κεραμικά, ένθεση τους στις μήτρες 2<sup>ου</sup> σταδίου και χύτευση κεριού χύτευσης          Χύτευση σε αλουμίνιο A356 με τη μέθοδο του χαμένου κεριού (βαρυτικά και φυγοκεντρικά)          Ραδιογραφικός έλεγχος χυτών</p>
<b>Χρόνος/Κόστος:</b>	<p>Επτά εργάσιμες για τον τυπικό κύκλο φυγοκεντρικής χύτευσης χαμένου κεριού με αφητηρία πρωτότυπα ΤΚΠ (Περιλαμβάνονται 2 ημέρες για τις μήτρες σιλικόνης).          Κόστος πρωτοτύπων – μητρών σιλικόνης περίπου 30% του συνολικού για τη χύτευση χαμένου κεριού          Τυπικό κόστος εφαρμογής 1000€.</p>
<b>Συμπεράσματα:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Οριακή εκμετάλλευση των δυνατοτήτων της τεχνολογίας LOM στις γεωμετρίες τις εν λόγω εφαρμογής</li> <li>Πολύ καλή αναπαραγωγή όλων των μορφών στις μήτρες σιλικόνης με το υλικό CASTALDO (αργυροχρυσοχοΐας)</li> <li>Επαρκής ποιότητα τελικού αποτελέσματος μόνο με τη φυγοκεντρική χύτευση (Στη βαρυτική πολλά ελαττώματα)</li> <li>Απαραίτητα περιθώρια κατεργασίας για τις διαστάσεις των χυτών με συναρμογή</li> <li>Για τυπικό δείγμα 10 αντιγράφων κόστος διαδικασίας ΤΚΠ – ΤΚΕ 25% του αντίστοιχου από CNC κατεργασία των εξαρτημάτων.</li> <li>Η τεχνογνωσία και ικανότητα του χυτηρίου επίσης κρίσιμη για το τελικό αποτέλεσμα</li> </ul>

#### 6.6.4 Μήτρες εποξειδικής ρητίνης – Κατασκευή εργαλείων παραγωγής για χύτευση σε άμμο πτερωτής αρδευτικής αντλίας

<b>Φορείς:</b>	Εργ. ΤΚΠ&Ε ΕΜΠ – ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ Ν. ΚΑΖΗΣ ΑΒΕΕ (Ερευνητικό Έργο ΠΑΒΕ – ΓΓΕΤ)
<b>Απαιτήσεις / Δεδομένα:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Χρήση πρωτοτύπων LOM &amp; πολυμερών εποξειδικών υλικών για την κατασκευή εργαλείων παραγωγής χυτοσιδηρών στοιχείων αντλιών σύνθετης μορφής (εσωτερικές κοιλότητες) με χύτευση άμμου</li> <li>Αξιολόγηση πρωτοτύπων LOM για την υποστήριξη της διαδικασίας χύτευσης άμμου</li> </ul>
<b>Υλοποίηση:</b>	<p>Δημιουργία 3D CAD των απαραίτητων αρχέτυπων μορφών μοντέλων και πυρήνων χύτευσης</p> <p>Κατασκευή αρχέτυπων (master patterns) των μοντέλων και πυρήνων χύτευσης του εξαρτήματος σε LOM1015</p> <p>Χρήση εποξειδικών ρητινών ARALDITE SV410 για τη δημιουργία από τα αρχέτυπα, των μητρών αναπαραγωγής απαραίτητων παραγωγικών μοντέλων τύπωσης άμμου σε ARALDITE SW404 και πυρήνων χύτευσης (καρδιές)</p> <p>Χύτευση άμμου σε χυτοσίδηρο</p>
<b>Χρόνος/Κόστος:</b>	<p>Τρεις (3) ημέρες για πλήρως αποπερατωμένα αρχέτυπα LOM (max Ra = 8μm)</p> <p>Δέκα (10) ημέρες για την πλήρη παραγωγή 12 πιλοτικών χυτών με αφαιτηρία πρωτότυπα ΤΚΠ.</p> <p>Χρόνος και κόστος δημιουργίας εργαλείων παραγωγής με αξιοποίηση πρωτοτύπων LOM, 40% του συμβατικού (χειροποίητα μονέλα από μονελοποιούς).</p>
<b>Συμπεράσματα:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Πολύ καλή συμβατότητα ΤΚΠ – LOM για χυτά άμμου</li> <li>Απαραίτητες κλίσεις και ράδια στα αρχέτυπα και εφαρμογή αποκολλητικών κατά τη χύτευση των μητρών επ.ρητίνης για την αφαίρεση των αρχετύπων. Παρόλα αυτά δυνατόν να εμφανίζονται αποκολλήσεις στρώσεων</li> <li>Απαραίτητη η πολύ καλή λείανση και αποπεράτωση επιφανειών των αρχετύπων – Αναπαράγονται 100% στις μήτρες εποξειδικής ρητίνης</li> <li>Επαρκής ακρίβεια πρωτότυπων LOM για τις ανάγκες χύτευσης άμμου. Καλή εφαρμογή των πυρήνων χύτευσης μεταξύ τους.</li> <li>Απαραίτητα περιθώρια κατεργασίας για τις διαστάσεις των χυτών με συναρμογή</li> <li>Η τεχνογνωσία των μονελοποιών και ικανότητα του χυτηρίου επίσης κρίσιμη για το τελικό αποτέλεσμα</li> <li>Δημοσίευση αποτελεσμάτων στο διεθνές συνέδριο ICMEN 2002</li> </ul>


### 6.6.5 Μήτρες σιλικόνης & αντίγραφα πολυουρεθάνης για κατασκευή βοηθητικών και παραγωγικών εργαλείων διαμόρφωσης χαρτοπολτού υπό κενό για προϊόντα συσκευασίας

<b>Φορείς:</b>	Εργ. ΤΚΠ&Ε ΕΜΠ – ΗΡΑΚΛΗΣ ΣΥΣΚΕΥΑΣΙΑ ΑΕ (Ερευνητικό Έργο ΠΑΒΕ – ΓΓΕΤ)
<b>Απαιτήσεις / Δεδομένα:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Χρήση πρωτοτύπων LOM, μητρών σιλικόνης/ελαστικού &amp; πολυμερών εποξειδικών υλικών για την κατασκευή διαμορφωτικών και εργαλείων παραγωγής για διαμόρφωση χαρτοπολτού υπό κενό προϊόντων συσκευασίας (Ανοικτές &amp; Κλειστές Αυγοθήκες)</li> <li>Συρρίνωση χρόνου &amp; κόστους/ Υποκατάσταση χυτών ορειχάλκινων εργαλείων / Modular Σχεδιασμός</li> </ul>
	
<b>Υλοποίηση:</b>	<p>Δημιουργία 3D CAD όλων των απαραίτητων στοιχείων Κατασκευή αρχέτυπων (master patterns) των στοιχείων των εργαλείων σε LOM1015 Χρήση ελαστομερών και σιλικόνης για τη δημιουργία μητρών αναπαραγωγής των βοηθητικών και συναρμολογούμενων τελικών εργαλείων παραγωγής από ρητίνες ARALDITE Χρήση των εργαλείων για παραγωγή νέων προϊόντων συσκευασίας από χαρτοπολτό</p>
<b>Χρόνος/Κόστος:</b>	<p>Συρρίκνωση χρόνου πλήρους προετοιμασίας καλούπιών σε 2-3 εβδομάδες Κόστος δημιουργίας εργαλείων παραγωγής με modular σχεδιασμό και αξιοποίηση πρωτοτύπων LOM, 10% σε σχέση με χυτά ορειχάλκινα καλούπια.</p>
<b>Συμπεράσματα:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Πολύ καλή συμβατότητα ΤΚΠ–LOM για εργαλεία διαμόρφωσης χαρτοπολτού υπό κενό (χαμηλές ακρίβειες τελικού προϊόντος)</li> <li>Επιτυχές modular design – Εύκολη και φθηνή αποκατάσταση φθαρμένων στοιχείων εργαλείων</li> <li>Το πλήθος των απαιτούμενων εργαλείων (Forming – Pressing – Transfer) και οι συνθήκες της παραγωγικής διαδικασίας καθιστούν πολύ χρήσιμη την κατασκευή τους με μεθόδους ΤΚΠ – ΤΚΕ (Soft Tooling)</li> <li>Δημοσίευση αποτελεσμάτων στα διεθνή συνέδρια 9<sup>th</sup> European Conference on RP &amp; M και ICMEN 2002 και στις Ελληνικές Ημέρες E&amp;T – Ευρωπαϊκής Συνεργασίας 2006 του ΤΕΕ.</li> </ul>

### 6.6.6 Ψεκασμός μετάλλων – Καλούπια θερμοπλαστικών έγχυσης και ηλεκτρόδια ηλεκτροδιάβρωσης βύθισης (EDM)

<b>Φορείς:</b>	Εργ. ΤΚΠ&Ε ΕΜΠ – ΜΙΚΡΟΝ ΕΠΕ (Ερευνητικό Έργο ΕΠΕΤ II – ΓΓΕΤ «ΝΕΚΤΑΡ»)
<b>Απαιτήσεις / Δεδομένα:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Χρήση πρωτοτύπων LOM ως υπόστρωμα ψεκασμού μετάλλου εν ψυχρώ (Spray Metal Process) για τη δημιουργία βοηθητικών (EDM electrodes) &amp; εργαλείων παραγωγής μικρής σειράς για χύτευσης πλαστικών με έγχυση</li> <li>Δοκιμές ψεκασμού κραμάτων χαλκού &amp; ψευδαργύρου</li> </ul>
	
<b>Υλοποίηση:</b>	<p>Χρήση δοκιμών LOM πρότυπων μορφών για τον ψεκασμό χαλκού. Χρήση πρωτοτύπου LOM πραγματικού αντικειμένου για τον ψεκασμό ψευδαργύρου</p> <p>Ψεκασμός με Miller Thermal EASI 150 Arc Spray System</p> <p>Οπίσθια πλήρωση χάλκινου ψεκασμένου κελύφους με κράμα χαμηλού σημείου τήξης &amp; δοκιμαστική ηλεκτροδιάβρωση βύθισης</p> <p>Οπίσθια πλήρωση ψευδαργυρικού ψεκασμένου κελύφους με εποξ. ρητίνη &amp; μεταλλικά σφαιρίδια. Ένθεση χαλκοσωλήνων ψύξης.</p>
<b>Χρόνος/Κόστος:</b>	<p>Συρρίκνωση χρόνου πλήρους προετοιμασίας ηλεκτροδίων και καλουπιών για injection molding (core &amp; cavity) σε 2 με 3 ημέρες</p> <p>Κόστος δημιουργίας εργαλείων παραγωγής με ψεκασμό μετάλλου σε μορφές άμεσα ή έμμεσα από ΤΚΠ, περίπου 15% σε σχέση με τη CNC κατεργασία τους.</p>
<b>Συμπεράσματα:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Κακό αποτέλεσμα άμεσου ψεκασμού με χαλκό των πρωτοτύπων LOM. Θερμοκρασιακές αλλοιώσεις μορφών. Συνίσταται η αναπαραγωγή και ο ψεκασμός θερμοανθεκτικού αντιγράφου τους από ΤΚΕ.</li> <li>Ψεκασμένα ηλεκτρόδια EDM λειτουργούν ικανοποιητικά σε EDM βύθισης</li> <li>Αρκετά αποδοτικός ο ψεκασμός χαμηλότερου σημείου τήξης κραμάτων (Zn) επί πρωτοτύπων LOM για πρωτότυπες μήτρες injection. Ικανοποιητική απόδοση γεωμετρίας για εφαρμογές πρωτότυπης μήτρας ή παραγωγής πολύ μικρής σειράς</li> <li>Η διαδικασία είναι απαιτητική σε συνθήκες και προσωπικό και μπορεί να επιτελεσθεί μόνο σε βιομηχανικό / κατασκευαστικό περιβάλλον</li> <li>Απαραίτητη για την αντοχή των εργαλείων η οπίσθια πλήρωση των κελυφών με δευτερεύον υλικό.</li> </ul>

### 6.6.7 Κατασκευή υποστρωμάτων για επένδυση με σύνθετα υλικά

<b>Φορείς:</b>	Εργ. ΤΚΠ&Ε ΕΜΠ – Εργαστήριο Οχημάτων Τομέα ΜΚ & ΑΕ Σχολής ΜΜ ΕΜΠ (Υπ/νος Καθηγ. Κ. Σπέντζας – Φοιτητική Εργασία για το Διαγωνισμό Formula Student)
<b>Απαιτήσεις / Δεδομένα:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Χρήση πρωτοτύπων LOM μορφών φίλτρου αέρα – πολλαπλής εισαγωγής ως υπόστρωμα επένδυσης ανθρακονήματος για την κατασκευή τους από σύνθετα υλικά</li> <li>Εφάπαξ (one-off) χαμηλού κόστους κατασκευή</li> </ul>
	
<b>Υλοποίηση:</b>	Διαιρετή κατασκευή υποστρώματος σε LOM1015 Συναρμολόγηση, αποπεράτωση και βελτίωση επιφανειών του πρωτοτύπου Εφαρμογή υφάσματος με ανθρακονήματα και διαδοχική επάλειψη – εμποτισμός με επ.ρητίνες
<b>Χρόνος/Κόστος:</b>	Καθαρός χρόνος κατασκευής στη μονάδα LOM1015, 5 ώρες Πλήρης ολοκλήρωση των αποπερατωμένων πρωτοτύπων LOM του υποστρώματος σε 2 εργάσιμες ημέρες Ολοκλήρωση του φίλτρου αέρα – πολλαπλής εισαγωγής από σύνθετα υλικά σε επιπλέον 2 ημέρες. Ενδεικτικό κόστος εφαρμογής 160 € (για τα πρωτότυπα)
<b>Συμπεράσματα:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ουδέτερη συμπεριφορά του πρωτοτύπου LOM στην επίδραση των σύνθετων υλικών</li> <li>Σταθερότητα διαστάσεων του υποστρώματος</li> <li>Επισκευάσιμη ελαφρά αποκόλληση λεπτότοιχων στρώσεων (φλάντζα)</li> <li>Πολύ γρήγορος χρόνος ολοκλήρωσης του τελικού παραδοτέου</li> </ul>



## 7 ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΠΡΩΤΟΤΥΠΙΑΣ ΤΗΣ ΔΔ

Η υποβαλλόμενη Διδακτορική Διατριβή εισάγει τα ακόλουθα στοιχεία πρωτοτυπίας:

- Με τεκμηριωμένο τρόπο τοποθετεί επακριβώς την πρωτοτυποποίηση, τη διαστρωματική κατασκευή γενικά και τις ΤΚΠ & ΤΚΕ ειδικότερα, στο πλαίσιο του Μηχανολογικού Σχεδιασμού (ΜΣ) υπό την τρέχουσα σύγχρονη εκδοχή του Ολοκληρωμένου Μηχανολογικού Σχεδιασμού, συνδέοντας τα με έγκυρα Χαρακτηριστικά και Παραμέτρους Σχεδιασμού που υπόκεινται σε έλεγχο μέσω διαδικασιών πρωτοτυποποίησης.
- Ανασκοπεί με πληρότητα την επιστημονική και τεχνολογική περιοχή της ΤΚΠ – ΤΚΕ, την ιστορική της εξέλιξη, τις ερευνητικές της πτυχές και κατευθύνσεις και τις μελλοντικές προοπτικές της σε επίπεδο έρευνας – εφαρμογών – αξιοποίησης.
- Προτείνει τεκμηριωμένη και συστηματική μέθοδο, βασισμένη σε μεθόδους Πολυπαραμετρικής Λήψης Αποφάσεων, για τη βέλτιστη επιλογή της αποτελεσματικότερης κατεύθυνσης πρωτοτυποποίησης μεταξύ ΤΚΠ – ΤΚΕ και άλλων σύγχρονων εναλλακτικών, με τεχνικά, οικονομικά και άλλα κριτήρια, που μπορεί να αξιοποιηθεί από βιομηχανικούς και κατασκευαστικούς φορείς και ιδιαίτερα από ΜΜΕ στο ελληνικό περιβάλλον, για την υλοποίηση διαδικασιών πρωτοτυποποίησης με ασφαλή, αξιόπιστο, ανεξάρτητο και επαναλήψιμο τρόπο και να συμβάλλει έτσι στη μείωση του απαιτούμενου κόστους και χρόνου ανάπτυξης των νέων προϊόντων.
- Προτείνει πλήρη δομή Σχεσιακής Βάσης Δεδομένων για καταγραφή τεχνολογιών, συστημάτων ΤΚΠ, επιδόσεών τους, κατασκευαστών, υλικών, κατόχων και φορέων παροχής υπηρεσιών ΤΚΠ – ΤΚΕ, που ενσωματώνει αποτελέσματα της παρούσας έρευνας και της διεθνούς έρευνας και μπορεί να αξιοποιηθεί για εκπαίδευση & ενημέρωση, εξεύρεση συμβατών με τις σκοπούμενες εφαρμογές πρωτοτυποποίησης μηχανών, υλικών και παρόχων υπηρεσιών και για αξιολόγησή τους με τεχνικοοικονομικά κριτήρια και διαδικασίες αξιολόγησης εναλλακτικών λύσεων, στη μορφή Συστήματος Υποστήριξης Απόφασης (ΣΥΑ). Τέτοιο πρωτότυπο και διαδικτυακά προσβάσιμο πιλοτικό ΣΥΑ βασισμένο στην ΣΒΔ, με αξιολόγηση και ιεράρχηση συμβατών συστημάτων κατά VDI2225, αναπτύχθηκε ως demo και επιδεινύεται για την περίπτωση πρωτοτύπων μορφής.
- Προτείνει μεθοδολογία προεκτίμησης χρόνου και κόστους κατασκευής πρωτοτύπων ΤΚΠ τεχνολογίας LOM σε σύστημα LOM1015 ανεξαρτήτως ύπαρξης αρχείου STL, με παραμέτρους γεωμετρικά στοιχεία του υπό κατασκευή πρωτοτύπου.
- Εισφέρει πρωτότυπα αποτελέσματα συστηματικής έρευνας επιδόσεων διαστασιολογικής ακρίβειας, σταθερότητας και ποιότητας επιφανειών πρωτοτύπων ΤΚΠ τεχνολογίας LOM, καθώς και δυνατοτήτων και τεχνικών για τη βελτίωσή τους.
- Προτείνει κανόνες και οδηγίες βέλτιστης εφαρμογής και αξιοποίησης της τεχνολογίας ΤΚΠ LOM για την κατασκευή πρωτοτύπων αντικειμένων.
- Παρέχει αποτελέσματα έρευνας επιδόσεων ρυθμού κατασκευής, διαστασιολογικής – γεωμετρικής ακρίβειας, ποιότητας επιφάνειας και αντιστάθμισης σφαλμάτων για την απευθείας επίτευξη συναρμολογήσεων σε πρωτότυπα από μικρής κλίμακας μηχανές ΤΚΠ τεχνολογίας FDM.
- Παρουσιάζει πρωτότυπα αξιοποιήσιμα αποτελέσματα έρευνας πεδίου για σειρά εφαρμογών από το πλήρες φάσμα της ΤΚΠ για μηχανολογικές και μη εφαρμογές έως την ΤΚΕ για την υποστήριξη μεθόδων παραγωγής, που αξιοποιήθηκαν ως κτηθείσα τεχνογνωσία στις προτεινόμενες μεθοδολογίες υποστήριξης αποφάσεων.

## 8 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Οι τεχνολογίες διαστρωματικής κατασκευής αντικειμένων, ευρύτερα γνωστές υπό τους όρους Ταχεία Κατασκευή Πρωτοτύπων, Προσθετική Κατασκευή & 3Δ Εκτύπωση και οι προεκτάσεις τους για την Ταχεία Κατασκευή Εργαλείων, συνιστούν μια τεχνολογική επανάσταση των δύο τελευταίων δεκαετιών. Η τάση τους είναι σήμερα αύξουσα σε πλήθος και δυνατότητες και με παγκόσμια διάδοση.

Συνιστούν ένα ισχυρό εργαλείο στη διάθεση των μηχανικών και των φορέων που επιτελούν σχεδιασμό και ανάπτυξη νέων βιομηχανοποιημένων και μηχανολογικών προϊόντων, όπου πραγματικά μειώνουν δραστικά το χρόνο και το κόστος των σχετικών διαδικασιών, ενώ ταυτόχρονα εξυπηρετούν τη συνολική άνοδο της ποιότητας των τελικών προϊόντων. Σε ορισμένες δε περιπτώσεις είναι δυνατόν στο άμεσο μέλλον να υποκαταστήσουν τις συμβατικές εδραιωμένες διαδικασίες και μεθόδους παραγωγής (ως πλέον Rapid Manufacturing), ιδιαίτερα των προϊόντων μικρής και μεσαίας σειράς, εξαρτημάτων και προϊόντων ιδιαίτερα σύνθετης γεωμετρίας, καθώς και σε περιπτώσεις εξατομικευμένης ή και προσωπικής κατασκευής (Customized & Personal Fabrication).

Βρίσκουν ήδη έδαφος και πέραν των στενών ορίων των μηχανολογικών εφαρμογών, αξιοποιούμενες ευρύτερα για την εξυπηρέτηση της ανόδου της ποιότητας ζωής των ανθρώπων ως έμβιων οργανισμών (ιατρικές & βιοϊατρικές εφαρμογές), της προαγωγής του πνευματικού και πολιτιστικού επιπέδου (εκπαίδευση, τεκμηρίωση πολιτιστικής & φυσικής κληρονομιάς, βιομηχανία θεάματος) και της προόδου λοιπών επιστημονικών κλάδων (Αρχιτεκτονική, οπτικοποίηση βιολογικών δομών & μαθηματικών παραστάσεων, παλαιοντολογικές και αρχαιολογικές αναδομήσεις, ιατροδικαστική έρευνα κλπ.).

Η ορθή αξιοποίησή τους απαιτεί καλή γνώση της φύσης, της λειτουργίας τους, των επιδόσεων και των ορίων των δυνατοτήτων τους, του χρόνου και κόστους που απαιτούν τόσο οι ίδιες, όσο και οι απαραίτητες για αυτές προπαρασκευαστικές και επακόλουθες διαδικασίες, και διαρκή παρακολούθηση της εξέλιξής τους. Πάντοτε όμως η αξιοποίηση αυτή θα συναρτάται και από τοπικούς παράγοντες και συνθήκες που επιβάλλονται, ισχύουν ή δεσμεύουν τους δυνητικούς τους χρήστες. Για όλα αυτά, είναι απαραίτητη η δημιουργία, εξέλιξη και προαγωγή μεθόδων και χρηστικών εργαλείων προς τους ενδιαφερόμενους φορείς, που να τους δίνουν τη δυνατότητα να τις επιλέγουν και αξιοποιούν ικανοποιητικά και αποτελεσματικά, χωρίς να χρειάζεται να εμβαθύνουν σε αυτές σε επίπεδο ειδικού.

Η παρούσα Διδακτορική Διατριβή προσπάθησε να συμβάλλει με επιτυχία προς την κατεύθυνση αυτή.



## 9 ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ ΕΠΕΚΤΑΣΗΣ ΤΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ

Η διενεργηθείσα έρευνα είναι μια ικανή βάση για ορθή αξιοποίηση ΤΚΠ – ΤΚΕ, κυρίως από το ελληνικό περιβάλλον, στις δυσμενείς σήμερα επικρατούσες συνθήκες. Μπορεί μελλοντικά να βελτιστοποιηθεί και επεκταθεί προς:

- Τη συμπλήρωση της μεθοδολογίας επιλογής κατεύθυνσης πρωτοτυποποίησης και με άλλες ομάδες κριτηρίων και υποκριτηρίων που η παρούσα τυχόν δεν συμπεριλαμβάνει και που μπορεί για κάποιους φορείς να κρίνονται σημαντικά.
- Την προγραμματιστική υλοποίηση της μεθοδολογίας επιλογής κατεύθυνσης πρωτοτυποποίησης του Κεφαλαίου 3 σε ανεξάρτητο προγραμματιστικά περιβάλλον/ προϊόν, με ενδεχομένως διαδικτυακή πρόσβαση, με συγκεκριμένα δικαιώματα και επίπεδα ελέγχου και προσαρμογής της από άτομα και ομάδες ευθύνης του φορέα εφαρμογής της.
- Τη χρήση της μεθοδολογίας του Κεφαλαίου 3 για συστηματική «χαρτογράφηση» συγκεκριμένων ελεγχόμενων χαρακτηριστικών και απαιτήσεων σε συγκεκριμένα προϊόντα συγκεκριμένων φορέων που τα αναπτύσσουν και παράγουν κατ'επανάληψιν, ώστε να προτυποποιηθεί τελικά η χρήση της εντός του εκάστοτε φορέα εφαρμογής.
- Την επέκταση και συμπλήρωση με πλήρη δεδομένα, ανταποκρινόμενα κυρίως στο ελληνικό και ευρωπαϊκό κατασκευαστικό περιβάλλον, της προτεινόμενης στο Κεφάλαιο 4 ΣΒΔ τεχνολογιών – συστημάτων – παρόχων υπηρεσιών ΤΚΠ & ΤΚΕ, δημιουργώντας τις προϋποθέσεις μιας ενοποιημένης καταγραφής των δυνατοτήτων του ελληνικού και κατ'επέκταση ευρωπαϊκού περιβάλλοντος στις τεχνολογίες αυτές.
- Την δόμηση πλήρους προγραμματιστικά ανεξάρτητου συστήματος υποστήριξης απόφασης (ΣΥΑ) επιλογής και αξιολόγησης φορέων παροχής υπηρεσιών ΤΚΠ – ΤΚΕ, που θα βασίζεται στην προτεινόμενη στην παρούσα διατριβή ΣΒΔ, θα είναι διαδικτυακά προσβάσιμο και θα δύναται να εξάγει βαθμολογημένη κατάταξη των ικανών εγκατεστημένων συστημάτων και φορέων ΤΚΠ, πλησίον ή άπω του δεδομένου κατασκευαστικού περιβάλλοντος, που ανταποκρίνονται σε απαιτήσεις πρωτοτύπων μορφής, γεωμετρικών, λειτουργικών ή πρωτότυπων εργαλείων παραγωγής που επιθυμεί κάποιος φορέας να αναπτύξει. Το ΣΥΑ αυτό δυνητικά θα μπορούσε να αποτελέσει και αυτόνομο εμπορικό προϊόν λογισμικού.
- Την επέκταση και σύγκριση των αποτελεσμάτων της ειδικής έρευνας του Κεφαλαίου 5 που διεξήχθη επί της τεχνολογίας LOM και με άλλες σύγχρονες εκδοχές συστημάτων ΤΚΠ που βασίζονται σε επάλληλα φύλλα στερεού υλικού, όπως τα συστήματα Solido 3D (Φύλλο πολυμερούς) και Mcor (Φύλλα χαρτιού) που διατίθενται εμπορικά σήμερα.
- Τη σύγκριση των αποτελεσμάτων της ειδικής έρευνας συστήματος μικρής κλίμακας uPrint τεχνολογίας FDM του Κεφαλαίου 5 και με άλλα ανταγωνιστικά συστήματα 3D εκτυπωτών ΤΚΠ μικρής κλίμακας, αλλά και με μεγαλύτερα βιομηχανικής κατεύθυνσης συστήματα τεχνολογίας FDM (π.χ. συστήματα Fortus).
- Την επέκταση της έρευνας ΤΚΕ (έμμεσης και άμεσης) με γνώμονα την πλήρη υποκατάσταση συμβατικών παραγωγικών μεθόδων από συνδυασμό ΤΚΠ & ΤΚΕ για συγκεκριμένους κλάδους της ελληνικής βιομηχανίας.
- Την αξιοποίηση των ΤΚΠ και ΤΚΕ για την ανάδειξη και προαγωγή της ελληνικής πολιτιστικής κληρονομιάς, με περεταίρω διερεύνηση των δυνατοτήτων συντήρησης, αποκατάστασης, πιστής αναπαραγωγής, ασφαλούς μεταφοράς και έκθεσης αρχαιολογικών αντικειμένων.

## ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ

Παρατίθενται παρακάτω οι σχετικές με την παρούσα Διδακτορική Διατριβή δημοσιεύσεις και ανακοινώσεις σε επιστημονικά περιοδικά, διεθνή συνέδρια, τεχνικά περιοδικά και άλλες ανοικτές εκδηλώσεις δημοσιότητας, με τον γράφοντα ως συγγραφέα ή συμμετέχοντα.

- Παπανδρέου, Γ., Πολύδωρας, Σ. (1996). Τεχνολογίες Rapid Prototyping. *Περιοδικό CAD/CAM & Graphics Guide, Ειδική Ετήσια Έκδοση 1996*. σ. 58-63.
- Diplaris, S., Sfantsikopoulos, M., Polydoros, S., and Lytras, D. (2000). Evaluation of the Geometric Effectiveness of Modern Prototyping. In *Proceedings of the Third World Congress on Intelligent Manufacturing Processes & Systems*. Cambridge, MA.
- Polydoros, S., Sfantsikopoulos, M., Papacharalambous, G. (2000). Applying LOM and Silicone Rubber Tooling for Recycled Paper Pulp Molded Packaging Products. In *Proceedings of the 9th European Conference on Rapid Prototyping & Manufacturing*, Athens.
- Polydoros, S. N., & Sfantsikopoulos, M. M. (2001). On the Accuracy Performance of the Laminated Object Manufacturing Technology. *Proceedings. Of Euro RP/10<sup>th</sup> European Conference on RP&M*, Paris.
- Polydoros, S., Sfantsikopoulos, M., Giannatsis, J. and Dedoussis, V. (2002). Rapid Prototyping: Industrial case studies in Greece. In *Proc. of, K.D. Bouzakis (ed.), of the 1st ICMEN – International Conference on Manufacturing Engineering*, pp.405-414, Cassandra, Greece.
- Σφαντζικόπουλος, Μ., Διπλάρης, Σ., Πολύδωρας, Σ., Καϊσαρλής, Γ., Δημητρέλλου, Σ., Τσακατίκας, Δ., Δημόπουλος, Π. (2006). Σύγχρονες Μέθοδοι Υποστήριξης Ανάπτυξης και Κατασκευής Βιομηχανικών Προϊόντων στα πλαίσια του Ολοκληρωμένου Μηχανολογικού Σχεδιασμού. *Ελληνικές Ημέρες Έρευνας & Τεχνολογίας – Ευρωπαϊκής Συνεργασίας, Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδος (TEE)*. Αθήνα, Μάιος, 10-11.
- Polydoros, S., Sfantsikopoulos, M., & Provatidis, C. (2011). Rational Embracing of Modern Prototyping Capable Design Technologies into the Tools Pool of Product Design Teams. *ISRN Mechanical Engineering, 2011*.
- Kaisarlis, G., Polydoros, S., Provatidis, C. (2011). Evaluation of Geometrical Uncertainty Factors during Integrated Utilization of Reverse Engineering and Rapid Prototyping Technologies. In *Proceedings of (DET 2011) 7<sup>th</sup> International Conference on Digital Enterprise Technology*, pp. 532-541. Athens, September.
- Καϊσαρλής, Γ., Λάζαρης, Π., Πολύδωρας, Σ., Προβατίδης, Χ. (2013). Τρισδιάστατη Ψηφιακή Αποτύπωση Αρχαίων Αντικειμένων και Εκτύπωση Αντιγράφων με τη Βοήθεια Προηγμένων Υπολογιστικών Συστημάτων. *6<sup>ο</sup> Συμπόσιο της Ελληνικής Αρχαιομετρικής Εταιρίας*. Αθήνα – Μουσείο Ακρόπολης, Μάιος, 16-18.
- Pantazis, G., Lambrou, E., Polydoros, S., & Gotsis, V. (2013). 3D Digital Terrestrial Model Creation Using Image Assisted Total Station and Rapid Prototyping Technology. *International Journal of Heritage in the Digital Era*, 2(2), 245-262.

## ΑΝΑΦΟΡΕΣ – ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. 3D Systems. (1988). *StereoLithography Interface Specification*. 3D Systems Inc., July
2. 3D Systems. (2013). *3D KELTOOL Description*. Retrieved 15-3-2013 from <http://www.3dsystems.ru/products/productiontooling/3dkeltool/index.asp.htm>
3. Abiteboul, S., Hull, R., & Vianu, V. (1995). *Foundations of databases* (Vol. 8). Reading: Addison-Wesley.
4. Ahn, D., Kim, H., & Lee, S. (2007). Fabrication direction optimization to minimize post-machining in layered manufacturing. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 47(3), 593-606.
5. Akao, Y. (2004). *Quality Function Deployment: Integrating Customer Requirements Into Product Design*. Productivity Press.
6. Aliber, R. Z., & Click, R. W. (Eds.). (1993). *Readings in international business: a decision approach*. Mit Press.
7. Allen, S., & Dutta, D. (1994, September). On the computation of part orientation using support structures in layered manufacturing. In *Solid Freeform Fabrication Symposium 1994* (pp. 259-269). University of Texas, Austin.
8. Anderl, R., & Trippner, D. (2000). STEP—Standard for the Exchange of Product model data. *Stuttgart-Leipzig: Teubner*.
9. Andreasen, M. M., & Olesen, J. (1990). The Concept of Dispositions. *Journal of Engineering Design*, 1(1), 17–36. Doi:10.1080/09544829008901640
10. Angster, S., Gowda, S., Jayaram, S. (1996). Using VR for Design & Manufacturing Applications – A Feasibility Study. In *Proc. Of DETC '96, ASME Design Engineering Technical Conferences/Computers on Engineering Conference, Irvine, California, USA, August*.
11. Armillotta, A. (2008). Selection of layered manufacturing techniques by an adaptive AHP decision model. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 24(3), 450-461.
12. Arthur, A., Dickens, P. M., & Cobb, R. C. (1996). Using rapid prototyping to produce electrical discharge machining electrodes. *Rapid Prototyping Journal*, 2(1), 4-12.
13. ASTM. (2011). *ASTM F2921 – 11e3 Standard Terminology for Additive Manufacturing—Coordinate Systems and Test Methodologies*. Retrieved from <http://www.astm.org/Standards/F2921.htm>
14. ASTM. (2013). *ASTM F2792 – 12a Standard terminology for additive manufacturing technologies*. Retrieved from <http://www.ASTM.org/Standards/F2792.htm>
15. ASTM. (2013). *Work Item: ASTM WK40419 – New Test Methods for Performance evaluation of additive manufacturing systems through measurement of a manufactured test piece*. Retrieved from <http://www.astm.org/DATABASE.CART/WORKITEMS/WK40419.htm>
16. Azari, A., & Nikzad, S. (2009). The evolution of rapid prototyping in dentistry: a review. *Rapid Prototyping Journal*, 15(3), 216-225.
17. Barnett, K. (2009). *RAPID MANUFACTURING Techniques and Applications for the Australian Manufacturing Industry*. International Specialised Skills Institute, Melbourne, September. Retrieved from: <http://issinstitute.org.au/wp-content/media/2011/05/ISS-FEL-REPORT-K-BARNETT-Low-Res.pdf>

18. Bartlett, W., & Prica, I. (2012). The variable impact of the global economic crisis in South East Europe.
19. Bernard, A., Delplace, J. C., Perry, N., & Gabriel, S. (2003). Integration of CAD and rapid manufacturing for sand casting 274ustomizatio. *Rapid Prototyping Journal*, 9(5), 327-333.
20. Bibb, R., Taha, Z., Brown, R., & Wright, D. (1999). Development of a rapid prototyping design advice system. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 10(3-4), 331-339.
21. Bondy, T., & Talwar, V. (2011). Through thick and thin: How fair trade consumers have reacted to the global economic recession. *Journal of business ethics*, 101(3), 365-383.
22. Bonyár, A., Sántha, H., Varga, M., Ring, B., Vitéz, A., & Harsányi, G. (2012). Characterization of rapid PDMS casting technique utilizing molding forms fabricated by 3D rapid prototyping technology (RPT). *International Journal of Material Forming*. Doi:10.1007/s12289-012-1119-2
23. Borille, A., Gomes, J., Meyer, R., & Grote, K. (2010). Applying decision methods to select rapid prototyping technologies. *Rapid Prototyping Journal*, 16(1), 50-62.
24. Bourell, D. L., Beaman, J. J., Leu, M. C., & Rosen, D. W. (2009). A Brief History of Additive Manufacturing and the 2009 Roadmap for Additive Manufacturing : Looking Back and Looking Ahead.
25. Brajljih, T., Valentan, B., Balic, J., & Drstvensek, I. (2011). Speed and accuracy evaluation of additive manufacturing machines. *Rapid prototyping journal*, 17(1), 64-75.
26. Breen, J., Nottrot, R., & Stellingwerff, M. (2003). Tangible virtuality—perceptions of computer-aided and physical 274ustomiz. *Automation in Construction*, 12(6), 649-653.
27. Byford, S. (2013). Here's How NASA Will Use a 3D Printer on the ISS. In *The verge*. Retrieved 15-8-2013 from: <http://www.theverge.com/2013/8/13/4616780/nasa-3d-printing-in-space-video>
28. Byun, H. S., & Lee, K. H. (2003). Design of a new test part for benchmarking the accuracy and surface finish of rapid prototyping processes. In *Computational Science and Its Applications—ICCSA 2003* (pp. 731-740). Springer Berlin Heidelberg.
29. Byun, H. S., & Lee, K. H. (2005). A decision support system for the selection of a rapid prototyping process using the modified TOPSIS method. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 26(11-12), 1338-1347.
30. Byun, H. S., & Lee, K. H. (2006). Determination of the optimal build direction for different rapid prototyping processes using multi-criterion decision making. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 22(1), 69-80.
31. Campanelli, S. L., Cardano, G., Giannoccaro, R., Ludovico, A. D., & Bohez, E. L. (2007). Statistical analysis of the stereolithographic process to improve the accuracy. *Computer-Aided Design*, 39(1), 80-86.
32. Campbell, R. I., & Bernie, M. R. N. (1996). Creating a database of rapid prototyping system capabilities. *Journal of Materials Processing Technology*, 61(1), 163-167.
33. Campbell, R. I., Martorelli, M., & Lee, H. S. (2002). Surface roughness 274ustomization for rapid prototyping models. *Computer-Aided Design*, 34(10), 717-725.

34. Canellidis, V., Giannatsis, J., & Dedoussis, V. (2009). Genetic-algorithm-based multi-objective optimization of the build orientation in stereolithography. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 45(7-8), 714-730.
35. Chang, C. M. (2010). Globalization. In *Service Systems Management and Engineering* (pp. 599–660). John Wiley & Sons, Inc.  
doi:10.1002/9780470900208.ch1
36. Cheah, C. M., Chua, C. K., Lee, C. W., Lim, S. T., Eu, K. H., & Lin, L. T. (2002). Rapid sheet metal manufacturing. Part 2: Direct rapid tooling. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 19(7), 510-515.
37. Cheng, W., Fuh, J. Y. H., Nee, A. Y. C., Wong, Y. S., Loh, H. T., & Miyazawa, T. (1995). Multi-objective optimization of part-building orientation in stereolithography. *Rapid Prototyping Journal*, 1(4), 12-23.
38. Chhabra, M., & Singh, R. (2011). Rapid casting solutions: a review. *Rapid Prototyping Journal*, 17(5), 328-350.
39. Childs, T. H. C., & Juster, N. P. (1994). Linear and geometric accuracies from layer manufacturing. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 43(1), 163-166.
40. Chiu, W. K., & Tan, S. T. (2000). Multiple material objects: from CAD representation to data format for rapid prototyping. *Computer-aided design*, 32(12), 707-717.
41. Cho, S., Kim, S., Park, J.-P., Yang, S., & Choi, Y. (2011). Engineering collaboration framework with CAE analysis data. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 12(4), 635–641.  
Doi:10.1007/s12541-011-0082-z
42. Choi, S. H., & Cheung, H. H. (2006). A topological hierarchy-based approach to toolpath planning for multi-material layered manufacturing. *Computer-Aided Design*, 38(2), 143-156.
43. Chua, C. K., Feng, C., Lee, C. W., & Ang, G. Q. (2005). Rapid investment casting: direct and indirect approaches via model maker II. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 25(1-2), 26-32.
44. Chua, C. K., Hong, K. H., & Ho, S. L. (1999a). Rapid tooling technology. Part 1. A comparative study. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 15(8), 604–608. Doi:10.1007/s001700050108
45. Chua, C. K., Hong, K. H., & Ho, S. L. (1999b). Rapid tooling technology. Part 2. A case study using arc spray metal tooling. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 15(8), 609-614.
46. Chua, C. K., Leong, K. F., & Lim, C. S. (2010). *Rapid Prototyping: Principles and Applications (3d Edition)*. World Scientific.
47. Cooper, A. G., Kang, S., Kietzman, J. W., Prinz, F. B., Lombardi, J. L., & Weiss, L. E. (1999). Automated fabrication of complex molded parts using mold shape deposition manufacturing. *Materials & design*, 20(2), 83-89.
48. Cormier, D., & Taylor, J. (2001). A process for solvent welded rapid prototype tooling. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 17(1), 151-157.
49. Dickens, P. M., Stangroom, R., Greul, M., Holmer, B., Hon, K. K. B., Hovtun, R., ... & Wimpenny, D. (1995). Conversion of RP models to investment castings. *Rapid Prototyping Journal*, 1(4), 4-11.
50. Dimla, D. E., Hopkinson, N., & Rothe, H. (2004). Investigation of complex rapid EDM electrodes for rapid tooling applications. *The international journal of advanced manufacturing technology*, 23(3-4), 249-255.

51. Ding, Y., Lan, H., Hong, J., & Wu, D. (2004). An integrated manufacturing system for rapid tooling based on rapid prototyping. *Robotics and computer-integrated manufacturing*, 20(4), 281-288.
52. Dolenc, A., & Mäkelä, I. (1994). Slicing procedures for layered manufacturing techniques. *Computer-Aided Design*, 26(2), 119-126.
53. Dolinšek, S. (2005). Wear characteristics of laser sintered moulding tools. *Wear*, 259, 1241–1247.
54. Döllner, G., Kellner, P., & Tegel, O. (2000). Digital Mock-Up and Rapid Prototyping in Automotive Product Development. *Journal of Integrated Design and Process Science*, 4(1), 55-66.
55. Dowlatshahi, S. (1994). A morphological approach to product design in a concurrent engineering environment. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 9(5), 324-332.
56. Du, Z. H., Chua, C. K., Chua, Y. S., Loh-Lee, K. G., & Lim, S. T. (2002). Rapid sheet metal manufacturing. Part 1: Indirect rapid tooling. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 19(6), 411-417.
57. Dyer, J. S. (2005). MAUT—multiattribute utility theory. In *Multiple criteria decision analysis: state of the art surveys* (pp. 265-292). Springer New York.
58. Dym, C.L. & Little, P. (2004). *Engineering design: a project-based introduction*, 2<sup>nd</sup> edn. Wiley, New York
59. Erdel, B. P. (2003). *High-speed Machining*. Society of Manufacturing Engineers.
60. Ertas, A. & Jones, J. (1996). *The Engineering Design Process*. 2<sup>nd</sup> ed. New York, N.Y., John Wiley & Sons, Inc
61. European Commission. (2012). *RoHS directive*. Directive 2002/95/EC. Online available: [http:// http://ec.europa.eu/environment/waste/rohs\\_eee/](http://ec.europa.eu/environment/waste/rohs_eee/), checked on 13.08.2013
62. European Commission. (2012). *WEEE directive*. Directive 2002/96/EC. Online available: [http://ec.europa.eu/environment/waste/weee/index\\_en.htm](http://ec.europa.eu/environment/waste/weee/index_en.htm), checked on 13.08.2013
63. Eyers, D., & Dotchev, K. (2010). Technology review for mass 276customization using rapid manufacturing. *Assembly Automation*, 30(1), 39-46.
64. Fadel, G. M., & Kirschman, C. (1996). Accuracy issues in CAD to RP translations. *Rapid Prototyping Journal*, 2(2), 4–17.  
Doi:10.1108/13552549610128189
65. Fahad, M., Hopkinson, N. (2012). *A new benchmarking part for evaluating the accuracy and repeatability of Additive Manufacturing (AM) processes*. 2<sup>nd</sup> International Conference on Mechanical, Production and Automobile Engineering (ICMPAE'2012), Singapore, April 28-29.
66. Figueira, J., Greco, S., & Ehrgott, M. (Eds.). (2005). *Multiple criteria decision analysis: state of the art surveys* (Vol. 78). Springer.
67. Frank, D., & Fadel, G. (1995). Expert system-based selection of the preferred direction of build for rapid prototyping processes. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 6(5), 339-345.
68. Garvin, D. A. (1987). Competing on the Eight Dimensions of Quality HBR. *Harvard Business Review*, (November-December), 100–109.
69. Gebhardt, A. (2003). *Rapid Prototyping*. Hanser Gardner Publications.

70. Gervasi, V. R., Schneider, A., & Rocholl, J. (2005). Geometry and procedure for benchmarking SFF and hybrid fabrication process resolution. *Rapid Prototyping Journal*, 11(1), 4-8.
71. Giannatsis, J., & Dedoussis, V. (2007). Decision support tool for selecting fabrication parameters in stereolithography. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 33(7-8), 706-718.
72. Giannatsis, J., & Dedoussis, V. (2009). Additive fabrication technologies applied to medicine and health care: a review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 40(1-2), 116-127.
73. Giannatsis, J., Canellidis, V., & Dedoussis, V. (2010, December). Determination of the Pareto-optimal build orientations in Stereolithography. In *Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM), 2010 IEEE International Conference on* (pp. 281-285). IEEE.
74. Giannatsis, J., Dedoussis, V., & Karalekas, D. (2002). Architectural scale modelling using stereolithography. *Rapid Prototyping Journal*, 8(3), 200-207.
75. Gibson, I., Rosen, D. W., & Stucker, B. (2009). *Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing*. Springer.
76. Gomes De Sá, A. (1999). Virtual reality as a tool for verification of assembly and maintenance processes. *Computers & Graphics*, 23(3), 389-403.  
Doi:10.1016/S0097-8493(99)00047-3
77. Grimm, T. (2002). *Stereolithography, Selective Laser Sintering and Polyjet™: Evaluating and Applying the Right Technology*. Accelerated Technologies Inc.
78. Grimm, T. (2003a). *Fused Deposition Modelling: A Technology Evaluation*. Time-Compression Technologies Magazin, 11/2, April.
79. Grimm, T. (2003b). *Rapid Prototyping Benchmark: 3d Printers*. T. A. Grimm & Associates, Inc
80. Grimm, T. (2004). *User's Guide to Rapid Prototyping*. Society of Manufacturing Engineers.
81. Grimm, T. (2005). 3D printer dimensional accuracy benchmark. *Time Comprehension Technologies*, 1-4.
82. Grimm, T. (2006). *Rapid Manufacturing – Near-term Solution or Future Promise?* Time-Compression Technologies Magazin, pp. 45-46. January/February.
83. Grimm, T. A. (2010). *3D Printer Benchmark : European Edition*. T. A. Grimm & Associates, Inc., (June).
84. Grimm, T., Wohlers, T. (2001). *Here Lies... Obituaries of RP Manufacturers*. Time-Compression Technologies Magazine, March.
85. Groover, M. P. (2010). *Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems*. John Wiley & Sons.
86. Gutiérrez, M. A., Alonso, M. A. G., Vexo, F., & Thalmann, D. (2008). *Stepping into Virtual Reality*. Springer.
87. Hague, R. J. M., & Reeves, P. E. (2000). *Rapid Prototyping, Tooling and Manufacturing*. Rapra Technology.
88. Hague, R., Campbell, I., & Dickens, P. (2003). Implications on design of rapid manufacturing. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 217(1), 25-30.
89. Hand, L. H. (1905). *Pattern Making and Foundry Practice: A Plain Statement of the Methods of Wood Pattern Making, as Practiced in Modern Pattern Shops*. FJ Drake & Company.

90. Hanssen, J. (2008). *FDM 400mc Accuracy Assessment*. WP\_ACCURACY 01/08, Stratasys\_Inc.
91. Hartley, J. R. (1992). *Concurrent engineering: shortening lead times, raising quality, and lowering costs*. Cambridge, MA: Productivity Press.
92. Helmer, W., & Mobbs, D. (2011). An Evaluation of Some Low-cost Rapid Prototyping Systems for Educational Use. In *Proceedings of the 2011 Midwest Section Conference of the American Society for Engineering Education*.
93. Hinloopen, E., Nijkamp, P., & Rietveld, P. (1983). The regime method: A new multicriteria technique. In *Essays and surveys on multiple criteria decision making* (pp. 146-155). Springer Berlin Heidelberg.
94. Hong, W., Lee, Y. T., & Gong, H. (2004). Thermal analysis of layer formation in a stepless rapid prototyping process. *Applied thermal engineering*, 24(2), 255-268.
95. Hope, R. L., Roth, R. N., & Jacobs, P. A. (1997). Adaptive slicing with sloping layer surfaces. *Rapid Prototyping Journal*, 3(3), 89-98.
96. Hopkinson, N., & Dickens, P. (2000). A comparison between stereolithography and aluminium injection moulding tooling. *Rapid prototyping journal*, 6(4), 253-258.
97. Hopkinson, N., Hague, R. (2001). *3D Printer Benchmarking Project, Final Report*. Neil Hopkinson & Richard Hague Rapid Prototyping Consortium
98. Hopkinson, N., Hague, R., & Dickens, P. (2006). *Rapid Manufacturing: An Industrial Revolution for the Digital Age*. Wiley.
99. Huang, G. Q. (Ed.). (1996). *Design for X: concurrent engineering imperatives*. Springer.
100. Huang, S. H., Liu, P., Mokasdar, A., & Hou, L. (2012). Additive manufacturing and its societal impact: a literature review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1-13.
101. Huang, S.-H., Zhang, L.-C., & Han, M. (2003). CS File – An Improved Interface Between CAD and Rapid Prototyping Systems. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 21(1), 15–19.  
Doi:10.1007/s001700300002
102. Hull, C. W. (1986). *U.S. Patent No. 4,575,330*. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
103. Ihren, J., & Frisch, K. J. (1999). The Fully Immersive CAVE. In *IN H.-J. BULLINGER & O. RIEDEL, EDS, `3. INTERNATIONAL IMMERSIVE PROJECTION TECHNOLOGY WORKSHOP, 10./11. MAY 1999, CENTER OF THE FRAUNHOFER SOCIETY STUTTGART IZS* (pp. 59–63). Springer.
104. Im, Y. G., Chung, S. I., Son, J. H., Jung, Y. D., Jo, J. G., & Jeong, H. D. (2002). Functional prototype development: inner visible multi-color prototype fabrication process using stereo lithography. *Journal of materials processing technology*, 130, 372-377.
105. Ippolito, R., Iuliano, L., & Gatto, A. (1995). Benchmarking of rapid prototyping techniques in terms of dimensional accuracy and surface finish. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 44(1), 157-160.
106. ISATA (28<sup>th</sup>). (1995). *Dedicated Conference on. Rapid Prototyping in the Automotive Industries*,. Stuttgart, Germany , Sep.
107. ISO / ASTM52921 – 13. (2013). *Standard Terminology for Additive Manufacturing-Coordinate Systems and Test Methodologies*. Retrieved from <http://www.astm.org/Standards/ISOASTM52921.htm>



108. ISO 10303, (2002). *Industrial automation systems and integration — Product data representation and exchange (STEP)*
109. ISO/IEC 14772-1, (1997) and ISO/IEC 14772-2 (2004). *Virtual Reality Modeling Language (VRML)*
110. Jacob, G. G. , Kai, C. C., & Mei, T. (1999). Development of a new rapid prototyping interface. *Computers in Industry*, 39(1), 61–70.  
Doi:10.1016/S0166-3615(98)00124-9
111. Jacobs, P. (1994, March). Stereolithography 1993: epoxy resins, improved accuracy, and investment casting. In *Coupling Technology to National Need* (pp. 41-52). International Society for Optics and Photonics.
112. Jacobs, P. F. (1996). Stereolithography and other RP&M technology from rapid prototyping to rapid tooling. *Society of Manufacturing engineers*.
113. Jacobs, P. F., Reid, D. T., Computer, & of SME., A. S. A. (1992). *Rapid Prototyping & Manufacturing: Fundamentals of Stereolithography*. Society of Manufacturing Engineers.
114. Jacquet-Lagrange, E., & Siskos, J. (1982). Assessing a set of additive utility functions for multicriteria decision-making, the UTA method. *European journal of operational research*, 10(2), 151-164.
115. Jahangirian, M., Eldabi, T., Naseer, A., Stergioulas, L. K., & Young, T. (2010). Simulation in manufacturing and business: A review. *European Journal of Operational Research*, 203(1), 1–13.  
Doi:10.1016/j.ejor.2009.06.004
116. Jakubenas, K. J., Sanchez, J. M., & Marcus, H. L. (1998). Multiple material solid free-form fabrication by selective area laser deposition. *Materials & design*, 19(1), 11-18.
117. Jamieson, R., & Hacker, H. (1995). Direct slicing of CAD models for rapid prototyping. *Rapid Prototyping Journal*, 1(2), 4-12.
118. Jha, B., Ram, K., & Rao, M. (2011). An overview of technology and research in electrode design and manufacturing in sinking electrical discharge machining. *Journal of Engineering Science and Technology Review*, 4(2), 118-130.
119. Jobbagy, P., & Bai, A. (2012). The Effects Of The Global Economic Crisis On The Markets For Fossil And Renewable Fuels. *APSTRACT: Applied Studies in Agribusiness and Commerce*, 6.
120. Jordan, P. E. (1991). Quality Function Deployment. *Manufacturing Engineer*.  
Doi:10.1049/me:19910144
121. Jung, H. K., Nam, T. J., & Lee, H. S. (2005). 3d modeling interface with air spray: Field study of 3d model making and prototype development. In *Conference On Human Factors In Computing Systems*.
122. Kaisarlis, G., Polydoros, S., Provatidis, C. (2011). Evaluation of Geometrical Uncertainty Factors during Integrated Utilization of Reverse Engineering and Rapid Prototyping Technologies. In *Proceedings of (DET 2011) 7<sup>th</sup> International Conference on Digital Enterprise Technology*, pp. 532-541. Athens, September.
123. Karapatis, N. P., Van Griethuysen, J. P. S., & Glardon, R. (1998). Direct rapid tooling: a review of current research. *Rapid Prototyping Journal*, 4(2), 77-89.
124. Karunakaran, K. P., Bernard, A., Suryakumar, S., Dembinski, L., & Taillandier, G. (2012). Rapid manufacturing of metallic objects. *Rapid Prototyping Journal*, 18(4), 264-280.

125. Kechagias, J., Maropoulos, S., & Karagiannis, S. (2004). Process build-time estimator algorithm for laminated object manufacturing. *Rapid Prototyping Journal*, 10(5), 297-304.
126. Keen, P. G. (1980). Adaptive design for decision support systems. *ACM SIGOA Newsletter*, 1(4-5), 15-25.
127. Keen, P. G., & Morton, M. S. S. (1978). *Decision support systems: an organizational perspective* (Vol. 35). Reading, MA: Addison-Wesley.
128. Kidd, P. T., & (Firm), C. H. (1997). *Rapid Prototyping for Competitive Advantage: Technologies, Applications and Implementation for Market Success*. Cheshire Henbury.
129. Kim, G. D., & Oh, Y. T. (2008). A benchmark study on rapid prototyping processes and machines: quantitative comparisons of mechanical properties, accuracy, roughness, speed, and material cost. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 222(2), 201-215.
130. Kim, W., & Lochovsky, F. H. (1989). *Object-oriented concepts, databases, and applications*. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co..
131. Kinsella, M. E. (2008). *Additive Manufacturing of Superalloys for Aerospace Applications (Preprint)* (No. AFRL-RX-WP-TP-2008-4318). AIR FORCE RESEARCH LAB WRIGHT-PATTERSON AFB OH MATERIALS AND MANUFACTURING DIRECTORATE.
132. Kleinbaum, D. G. (2007). *Applied Regression Analysis and Multivariable Methods*. Brooks/Cole.
133. Knoll, F., & Rohrberg, K. (2012). CT scanning, rapid prototyping and re-examination of a partial skull of a basal crocodylomorph from the Late Triassic of Germany. *Swiss Journal of Geosciences*, 105(1), 109-115.
134. Knoll, W., Hechinger, M., & Heyer, H. J. (2007). *Architectural Models: Construction Techniques*. J. Ross Pub. Retrieved from <http://www.google.gr/books?id=wx8gudxqW60C>
135. Krishnan, S. P., Dawood, A., Richards, R., Henckel, J., & Hart, A. J. (2012). A review of rapid prototyped surgical guides for patient-specific total knee replacement. *Journal of Bone & Joint Surgery, British Volume*, 94(11), 1457-1461.
136. Kruth, J. P. (1991). Material in-process manufacturing by rapid prototyping techniques. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 40(2), 603-614.
137. Kruth, J. P., Vandenbroucke, B., Vaerenbergh, V. J., & Mercelis, P. (2005). Benchmarking of different SLS/SLM processes as rapid manufacturing techniques.
138. Kulkarni, P., & Dutta, D. (1995). Adaptive slicing of parametrizable algebraic surfaces for layered manufacturing. In *Proceedings of the ASME Design Engineering Technical Conferences* (Vol. 1, pp. 211-217), September. Elsevier.
139. Kulkarni, P., & Dutta, D. (1996). An accurate slicing procedure for layered manufacturing. *Computer-Aided Design*, 28(9), 683-697.
140. Kulkarni, P., Marsan, A., & Dutta, D. (2000). A review of process planning techniques in layered manufacturing. *Rapid Prototyping Journal*, 6(1), 18-35.
141. Kumar, V., & Dutta, D. (1997). An assessment of data formats for layered manufacturing. *Advances in Engineering Software*, 28(3), 151-164.

142. Lahdelma, R., Hokkanen, J., & Salminen, P. (1998). SMAA-stochastic multiobjective acceptability analysis. *European Journal of Operational Research*, 106(1), 137-143.
143. LaMonica, M. (2013). Additive Manufacturing, GE, the world's largest manufacture, is on the verge of using 3-D printing to make jet parts. *MIT Technology Review*, April, 23. Retrieved from: <http://www.technologyreview.com/featuredstory/513716/additive-manufacturing/>
144. Lan, H. (2009). Web-based rapid prototyping and manufacturing systems: a review. *Computers in Industry*, 60(9), 643-656.
145. Lantada, A. D., & Morgado, P. L. (2012). Rapid prototyping for biomedical engineering: current capabilities and challenges. *Annual Review of Biomedical Engineering*, 14, 73-96.
146. Lee, C. W., Chua, C. K., Cheah, C. M., Tan, L. H., & Feng, C. (2004). Rapid investment casting: direct and indirect approaches via fused deposition 281ustomiz. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 23(1-2), 93-101.
147. Lee, K. H., & Choi, K. (2000). Generating optimal slice data for layered manufacturing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 16(4), 277-284.
148. Levy, G. N., Schindel, R., & Kruth, J. P. (2003). Rapid manufacturing and rapid tooling with layer manufacturing (LM) technologies, state of the art and future perspectives. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 52(2), 589-609.
149. Lin, F., Sun, W., & Yan, Y. (2001). Optimization with minimum process error for layered manufacturing fabrication. *Rapid Prototyping Journal*, 7(2), 73-82.
150. Lokesh, K., & Jain, P. K. (2010). Selection of rapid prototyping technology. *Advances in Production Engineering & Management*, 5(2), 75-84.
151. Lynn-Charney, C., & Rosen, D. W. (2000). Usage of accuracy models in stereolithography process planning. *Rapid Prototyping Journal*, 6(2), 77-87.
152. Lyons, B. (2012). Additive manufacturing in aerospace: examples and research outlook, *The Bridge: Linking Engineering and society*, pp.13-19, Spring.
153. Ma, W., But, W. C., & He, P. (2004). NURBS-based adaptive slicing for efficient rapid prototyping. *Computer-Aided Design*, 36(13), 1309-1325.
154. Madison, J. (1996). *CNC Machining Handbook: Basic Theory, Production Data, and Machining Procedures*. Industrial Press.
155. Mahesh, M. (2004). *Rapid Prototyping & Manufacturing Benchmarking*. Ph.D. Thesis, National University of Singapore
156. Mahesh, M., Wong, Y. S., Fuh, J. Y. H., & Loh, H. T. (2004). Benchmarking for comparative evaluation of RP systems and processes. *Rapid Prototyping Journal*, 10(2), 123-135.
157. Maier, D. (1983). *The theory of relational databases* (Vol. 11). Rockville: Computer science press.
158. Malloy, R. A. (1994). *Plastic Part Design for Injection Molding: An Introduction*. Hanser Publishers.
159. Mani, K., Kulkarni, P., & Dutta, D. (1999). Region-based adaptive slicing. *Computer-Aided Design*, 31(5), 317-333.
160. Maropoulos, P. G., & Ceglarek, D. (2010). Design verification and validation in product lifecycle. *Cirp Ann Manuf Technol*, 59(2), 740-759. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2010.05.005>

161. Marsan, A., Kumar, V., Dutta, D., & Pratt, M. J. (1998). An assessment of data requirements and data transfer formats for layered manufacturing. *NIST, US department of Commerce*.
162. Masood, S. H., & Rattanawong, W. (2002). A generic part orientation system based on volumetric error in rapid prototyping. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 19(3), 209-216.
163. Masood, S. H., & Soo, A. (2002). A rule based expert system for rapid prototyping system selection. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 18(3), 267-274.
164. Masood, S. H., Rattanawong, W., & Iovenitti, P. (2000). Part build orientations based on volumetric error in fused deposition 282ustomiz. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 16(3), 162-168.
165. Masood, S. H., Rattanawong, W., & Iovenitti, P. (2003). A generic algorithm for a best part orientation system for complex parts in rapid prototyping. *Journal of materials processing technology*, 139(1), 110-116.
166. Melchels, F. P., Feijen, J., & Grijpma, D. W. (2010). A review on stereolithography and its applications in biomedical engineering. *Biomaterials*, 31(24), 6121-6130.
167. Mellor, S., Hao, L., & Zhang, D. (2012). Additive Manufacturing: A Framework for Implementation. *Exeter, UK. Available at: www.Medifas.Net*.
168. Merriam-Webster Dictionary Online. In Merriam – Webster. Retrieved 20-3-2013, from <http://www.merriam-webster.com/dictionary/prototype>.
169. Meyer, K., Applewhite, H. L., & Biocca, F. A. (1992). A survey of position trackers. In *Presence: Teleoperators and Virtual Environments (ISSN 1054-7460), vol. 1, no. 2, p. 173-200*. (Vol. 1, pp. 173-200).
170. Mickelson, D. (2005). *Hard Milling and High Speed Machining: Tools of Change*. Hanser Gardner Publications. Retrieved from
171. Miller, G. A. (1956). The magical number seven, plus or minus two: some limits on our capacity for processing information. *Psychological review*, 63(2), 81.
172. Mireles, J., Adame, A., Espalin, D., Medina, F., Winker, R., Hoppe, T., ... & Wicker, R. (2011). Analysis of sealing methods for FDM-fabricated parts. *University Of TEXAS-El PASO*.
173. Modeen, T. (2005). CAD/CAMing: The use of rapid prototyping for the conceptualization and fabrication of architecture. *Automation in construction*, 14(2), 215-224.
174. Moylan, S., Cooke, A., Jurens, K., Slotwinski, J., & Donmez, M. A. (2012). A Review of Test Artifacts for Additive Manufacturing. NISTIR 7858, May
175. Mueller, B., & Kochan, D. (1999). Laminated object manufacturing for rapid tooling and patternmaking in foundry industry. *Computers in Industry*, 39(1), 47-53.
176. Muller, H., & Schimmel, A. (1999). The decision dilemma assessment and selection of rapid prototyping process chains. In *Proceedings of the 8<sup>th</sup> European Conference on Rapid Prototyping and Manufacturing, Nottingham* (pp. 177-192).
177. Munguia, J., Bernard, A., & Erdal, M. (2011). Proposal and evaluation of a KBE-RM selection system. *Rapid Prototyping Journal*, 17(4), 236-246.
178. Nagel, R. N., Braithwaite, W. W., & Kennicott, P. R. (1980). Initial graphics exchange specification IGES, version 1.0. *National Bureau of Standards*.

179. Negis, E. (1995). *Classification of the Major Additive Automated Fabrication Technologies according to Applied Fabrication Technique and Raw Phase and/or Form of Build Material*. Retrieved 23-2-2013 from <http://www.turkcadcam.net/erkutnegis/projeler/automated-fabrication-tech-classification-1995.pdf>
180. Newman, W. S., Mathewson, B. B., Zheng, Y., & Choi, S. (1996). A novel selective-area gripper for layered assembly of laminated objects. *Robotics and computer-integrated manufacturing*, 12(4), 293-302.
181. Nosenzo, V., Tornincasa, S., Bonisoli, E., & Brino, M. (2013). Open questions on Product Lifecycle Management (PLM) with CAD /CAE integration. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 1–17. Doi:10.1007/s12008-013-0184-1
182. Ohno, N., & Kageyama, A. (2010). Region-of-interest visualization by CAVE VR system with automatic control of level-of-detail. *Computer Physics Communications*, 181(4), 720–725. Doi:10.1016/j.cpc.2009.12.002
183. Olivier, J. G., Peters, J. A., & Janssens-Maenhout, G. (2012). *Trends in global Co2 emissions 2012 report*. PBL Netherlands Environmental Assessment Agency
184. Onuh, S. O., & Hon, K. K. B. (2001). Improving stereolithography part accuracy for industrial applications. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 17(1), 61-68.
185. Overby, A. (2010). *CNC Machining Handbook: Building, Programming, and Implementation*. Mcgraw-hill. Retrieved from
186. Pahl, G., & Beitz, W. (2007). *Engineering design: a systematic approach*. (K. Wallace, Ed.) (p. 617). Springer. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1007/978-1-84628-319-2>
187. Pahl, G., Beitz, W. (1984). *Engineering Design*, transl. by Wallace K., Springer-Verlag
188. Pandey, P. M., Reddy, N. V., & Dhande, S. G. (2003). Real time adaptive slicing for fused deposition 283customiz. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 43(1), 61-71.
189. Pantazis, G., Lambrou, E., Polydoros, S., & Gotsis, V. (2013). 3D Digital Terrestrial Model Creation Using Image Assisted Total Station and Rapid Prototyping Technology. *International Journal of Heritage in the Digital Era*, 2(2), 245-262.
190. Park, J., Tari, M. J., & Hahn, H. T. (2000). Characterization of the laminated object manufacturing (LOM) process. *Rapid Prototyping Journal*, 6(1), 36-50.
191. Pattnaik, S., Jha, P. K., & Karunakar, D. B. (2013). A review of rapid prototyping integrated investment casting processes. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials Design and Applications*.
192. Paul, B. K., & Voorakarnam, V. (2001). Effect of layer thickness and orientation angle on surface roughness in laminated object manufacturing. *Journal of manufacturing processes*, 3(2), 94-101.
193. Peltola, S. M., Melchels, F. P., Grijpma, D. W., & Kellomäki, M. (2008). A review of rapid prototyping techniques for tissue engineering purposes. *Annals of medicine*, 40(4), 268-280.

194. Pettinger, T. (November 3, 2012). List of CO2 Emissions per Capita. In Economics.help. Retrieved Feb 1 2013, from <http://www.economicshelp.org/blog/6131/economics/list-of-co2-emissions-per-capita/>
195. Pham, D. T., & Dimov, S. S. (2001). *Rapid Manufacturing: The technologies & applications of Rapid Prototyping and Rapid Tooling*. Springer-Verlag.
196. Pham, D. T., & Dimov, S. S. (2011). *Rapid Manufacturing: The Technologies and Applications of Rapid Prototyping and Rapid Tooling*. Springer London, Limited. Retrieved from <http://books.google.gr/books?id=SvPhMAEACAAJ>
197. Pham, D. T., Dimov, S. S., & Gault, R. S. (1999). Part orientation in stereolithography. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 15(9), 674-682.
198. Pham, D. T., Dimov, S., & Lacan, F. (1998). Techniques for firm tooling using rapid prototyping. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 212(4), 269-277.
199. Polydoros, S. N., & Sfantsikopoulos, M. M. (2001). On the Accuracy Performance of the Laminated Object Manufacturing Technology. *Proceedings. Of Euro RP/10<sup>th</sup> European Conference on RP&M*, Paris.
200. Polydoros, S., Sfantsikopoulos, M., & Provatidis, C. (2011). Rational Embracing of Modern Prototyping Capable Design Technologies into the Tools Pool of Product Design Teams. *ISRN Mechanical Engineering, 2011*
201. Polydoros, S., Sfantsikopoulos, M., Giannatsis, J. and Dedoussis, V. (2002). Rapid Prototyping: Industrial case studies in Greece. In *Proc. of, K.D. Bouzakis (ed.), of the 1st ICMEN – International Conference on Manufacturing Engineering*, pp.405-414, Cassandra, Greece.
202. Polydoros, S., Sfantsikopoulos, M., Papacharalambous, G. (2000). Applying LOM and Silicone Rubber Tooling for Recycled Paper Pulp Molded Packaging Products. In *Proceedings of the 9th European Conference on Rapid Prototyping & Manufacturing*, Athens.
203. Postell, J. (2012). *Furniture Design*. Wiley.
204. Prasad, B. (1996). *Concurrent engineering fundamentals* (Vol. 1). Prentice Hall PTR.
205. Pratt, M. J., Bhatt, A. D., Dutta, D., Lyons, K. W., Patil, L., & Sriram, R. D. (2002). Progress towards an international standard for data transfer in rapid prototyping and layered manufacturing. *Computer-Aided Design*, 34(14), 1111-1121.
206. Pugh, S. (1990), *Total Design – Integrated Methods for Successful Product Engineering*, Addison Wesley Publishing, UK.
207. Quarshie, R., Maclachlan, S., Reeves, P., Whittaker, D. & Blake, R. (2012). *Shaping our National Competency in Additive Manufacturing*. The Additive Manufacturing Special Interest Group for the Technology Strategy Board, UK. September.
208. Raghunath, N., & Pandey, P. M. (2007). Improving accuracy through shrinkage customization by using Taguchi method in selective laser sintering. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 47(6), 985-995.
209. Reader, J. (2006). Globalization, engineering, and creativity. *Synthesis Lectures on Engineering, Technology and Society*, 1(1), 1-64.
210. Reed, K., Harrod, D., & Conroy, W. (1990). *The Initial Graphics Exchange Specification (IGES) Version 5.0*. US Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology.

211. Reeves, P.E., Cobb, R.C. (1996), *Surface deviation 285ustomiz of LMT processes – a comparative analysis*. Proceedings of the 5<sup>th</sup> European conference on Rapid Prototyping and Manufacturing, Helsinki, 4-6 June, pp.59-75
212. Rennie, A. E., Bocking, C. E., & Bennett, G. R. (2001). Electroforming of rapid prototyping mandrels for electro-discharge machining electrodes. *Journal of Materials Processing Technology*, 110(2), 186-196.
213. RIAI (Royal Institute of Architects of Ireland). (Unspecified). *Model –Making Guidelines*. Shaping space. Retrieved from [http://www.riai.ie/downloads/education/pdf/ss\\_guidelines/model\\_making\\_guidelines.pdf](http://www.riai.ie/downloads/education/pdf/ss_guidelines/model_making_guidelines.pdf)
214. Rock, S. J., & Wozny, M. J. (1991). A flexible file format for solid freeform fabrication. In *Solid Freeform Fabrication Symposium Proceedings, University of Texas, Austin, TX* (pp. 1-12), August.
215. Ryder, G., Ion, B., Green, G., Harrison, D., & Wood, B. (2002). Rapid design and manufacture tools in architecture. *Automation in construction*, 11(3), 279-290.
216. Saaty, T. L. (1980). The analytic hierarchy process: planning, priority setting, resources allocation. *McGraw-Hill*.
217. Saaty, T. L. (1986). Absolute and relative measurement with the AHP. The most livable cities in the United States. *Socio-Economic Planning Sciences*, 20(6), 327–331. Doi:10.1016/0038-0121(86)90043-1
218. Saaty, T. L. (1990). How to make a decision: the analytic hierarchy process. *European journal of operational research*, 48(1), 9-26.
219. Saaty, T. L., & Vargas, L. G. (2001). The seven pillars of the analytic hierarchy process. In *Models, methods, concepts & applications of the analytic hierarchy process* (pp. 27-46). Springer US.
220. Saaty, T. L., & Vargas, L. G. (2012). How to Make a Decision. In *Models, Methods, Concepts & Applications of the Analytic Hierarchy Process* (pp. 1-21). Springer US.
221. Sabourin, E., Houser, S. A., & Bøhn, J. H. (1996). Adaptive slicing using stepwise uniform refinement. *Rapid Prototyping Journal*, 2(4), 20-26.
222. Safoutin, M. J., & Smith, R. P. The iterative component of design. , IEMC 96 Proceedings International Conference on Engineering and Technology Management Managing Virtual Enterprises A Convergence of Communications Computing and Energy Technologies (1996). Doi:10.1109/IEMC.1996.547881
223. Santos, E. C., Shiomi, M., Osakada, K., & Laoui, T. (2006). Rapid manufacturing of metal components by laser forming. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 46(12), 1459-1468.
224. Schneider, D., Marquardt, P., Zwahlen, M., & Jung, R. E. (2009). A systematic review on the accuracy and the clinical outcome of computer-guided template-based implant dentistry. *Clinical Oral Implants Research*, 20(s4), 73-86.
225. Scott, J., Gupta, N., Weber, C. L., Newsome, S., Wohlers, T., & Caffrey, T. (2012). Additive Manufacturing: Status and Opportunities. *Science and Technology Policy Institute*, 1-29.
226. Segal, J. I., & Campbell, R. I. (2001). A review of research into the effects of rapid tooling on part properties. *Rapid prototyping journal*, 7(2), 90-99.

227. Sen, P., & Yang, J. B. (1998). *Multiple criteria decision support in engineering design* (Vol. 4). London: Springer.
228. Shames, H. (2010). Development of a selection program for additive manufacturing systems. In *Masters completed*. Stellenbosch University.
229. Shellabear, M. (1998). Model manufacturing processes—state-of-the-art in rapid prototyping. *RAPTEC, Task 4.2 Report 1*.
230. Shellabear, M. (1999). Process chains for rapid technical prototypes (RAPTEC), benchmark study of accuracy and surface quality in RP models. *Final report for EU project, EOS GmbH, Germany*.
231. Smith, B., Brauner, K., Kennicott, P., Liewald, M., & Wellington, J. (1983). Initial graphics exchange specification(IGES) Version 2. 0. *NTIS, SPRINGFIELD, VA(USA), 1983, 341*.
232. Smith, R. P., & Eppinger, S. D. (1997). Identifying controlling features of engineering design iteration. *Management Science*, 43(3), 276-293.
233. Song, Y., Yan, Y., Zhang, R., Xu, D., & Wang, F. (2002). Manufacture of the die of an automobile deck part based on rapid prototyping and rapid tooling technology. *Journal of materials processing technology*, 120(1), 237-242.
234. Sonmez, F. O., & Hahn, H. T. (1998). Thermomechanical analysis of the laminated object manufacturing (LOM) process. *Rapid Prototyping Journal*, 4(1), 26-36.
235. Sood, A. K., Ohdar, R. K., & Mahapatra, S. S. (2009). Improving dimensional accuracy of fused deposition 286customiz processed part using grey Taguchi method. *Materials & Design*, 30(10), 4243-4252.
236. Starly, B., Lau, A., Sun, W., Lau, W., & Bradbury, T. (2005). Direct slicing of STEP based NURBS models for layered manufacturing. *Computer-Aided Design*, 37(4), 387-397.
237. Stratasys/BP-TIPSELECT 03/09. (2009). *Tip Selection.Fortus 3D Production Systems*. Stratasys Inc.
238. Stratasys/SSYS-AB-Sealing. (2011). *Application Brief: Sealing FDM Parts*. SSYS-AB-Sealing-04-11, Stratasys Inc.
239. Stratasys/SSYS-ACS-PDS-Painting. (2011). *Application Brief: Painting FDM Parts*. SSYS-AB-Painting-04-11, Stratasys Inc.
240. Stratasys/TAG 30-01. (2011). *Technical Application Guide:FDM for End-Use Parts: Tips and Techniques for Optimization*. Stratasys Inc.
241. Szilvsi-Nagy, M., & Mátyási, G. (2003). Analysis of STL files. *Mathematical and Computer Modelling*, 38(7-9), 945–960. Doi:10.1016/S0895-7177(03)90079-3
242. Tata, K., Fadel, G., Bagchi, A., & Aziz, N. (1998). Efficient slicing for layered manufacturing. *Rapid Prototyping Journal*, 4(4), 151-167.
243. Thalmann, N. M., & Thalmann, D. (2003). Virtual reality software and technology. In *Proc. Of the ACM Symposium on Virtual Reality, Software and Technology*.
244. Thompson, D. C., & Crawford, R. H. (1997). Computational quality measures for evaluation of part orientation in freeform fabrication. *Journal of Manufacturing Systems*, 16(4), 273-289.
245. Thrimurthulu, K., Pandey, P. M., & Venkata Reddy, N. (2004). Optimum part deposition orientation in fused deposition modeling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 44(6), 585-594.



246. Tong, H., & Wei, S. J. (2011). The composition matters: capital inflows and liquidity crunch during a global economic crisis. *Review of Financial Studies*, 24(6), 2023-2052.
247. Tong, K., Lehtihet, E., & Joshi, S. (2004). Software compensation of rapid prototyping machines. *Precision Engineering*, 28(3), 280-292.
248. Toriya, H., & Chiyokura, H. (2012). *3D CAD: Principles and Applications*. Springer Publishing Company, Incorporated.
249. Triantaphyllou, E. (2000). *Multi-criteria decision making methods* (pp. 5-21). Springer US.
250. Triantaphyllou, E., & Mann, S. H. (1995). Using the analytic hierarchy process for decision making in engineering applications: some challenges. *International Journal of Industrial Engineering: Applications and Practice*, 2(1), 35-44.
251. Trocine, L., & Malone, L. C. (2000). Finding important independent variables through screening designs: a comparison of methods. *Proceedings of the 2000 Winter Simulation Conference*. J. A. Joines, R. R. Barton, K. Kang, and P. A. Fishwick, eds. *Simulation*, 749-754.
252. Ullman, D. G. (1992). *The Mechanical Design Process*. *Maelabsucsdedu* (Vol. 3. Ed, p. 432). McGraw-Hill. Retrieved from <http://www.amazon.com/Mechanical-Design-Process-Mcgraw-Hill-Engineering/dp/0072975741>
253. Ulrich, K. T., & Eppinger, S. D. (2008). *Product Design and Development 4<sup>th</sup> Edition*, McGraw Hill international edition
254. United Nations (1998), *Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change*
255. United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division (2013). *World Population Prospects: The 2012 Revision, Press Release* (13 June 2013): “World Population to reach 9.6 billion by 2050 with most growth in developing regions, especially Africa”
256. VDI 3404. (2007), *Generative Fertigungsverfahren: Rapid-Technologien (Rapid Prototyping) Grundlagen, Begriffe, Qualitätskenngrößen, Liefervereinbarungen*, Verein Deutscher Ingenieure, Berlin, December.
257. VDI. (1997). *Methodic development of solution principles ({VDI} 2222)*. VDI-Gesellschaft Produkt- und Prozessgestaltung.
258. Vialet, A., Guipert, G., Jianing, H., Xiaobo, F., Zune, L., Youping, W., ... & de Lumley, H. (2010). *Homo erectus* from the Yunxian and Nankin Chinese sites: Anthropological insights using 3D virtual imaging techniques. *Comptes Rendus Palevol*, 9(6), 331-339.
259. Wang, D. X., Guo, D. M., Jia, Z. Y., & Leng, H. W. (2006). Slicing of CAD models in color STL format. *Computers in industry*, 57(1), 3-10.
260. Wang, W., Conley, J. G., & Stoll, H. W. (1999). Rapid tooling for sand casting using laminated object manufacturing process. *Rapid Prototyping Journal*, 5(3), 134-141.
261. Weir, S. (2005). *History's Worst Decisions: And the People who Made Them*. Murdoch Books.
262. Weiss, L. E., Merz, R., Prinz, F. B., Neplotnik, G., Padmanabhan, P., Schultz, L., & Ramaswami, K. (1997). Shape deposition manufacturing of heterogeneous structures. *Journal of Manufacturing Systems*, 16(4), 239-248.

263. West, A. P., Sambu, S. P., & Rosen, D. W. (2001). A process planning method for improving build performance in stereolithography. *Computer-Aided Design*, 33(1), 65-79.
264. Wiedemann, B., & Jantzen, H. A. (1999). Strategies and applications for rapid product and process development in Daimler-Benz AG. *Computers in Industry*, 39(1), 11-25.
265. Williams, R. E., Komaragiri, S. N., Melton, V. L., & Bishu, R. R. (1996). Investigation of the effect of various build methods on the performance of rapid prototyping (stereolithography). *Journal of Materials Processing Technology*, 61(1), 173-178.
266. Willis, A., Speicher, J., & Cooper, D. B. (2007). Rapid prototyping 3D objects from scanned measurement data. *Image and Vision Computing*, 25(7), 1174-1184.
267. Wohlers, T. (1992). Chrysler compares rapid prototyping systems. *Computer-Aided Engineering*, 11(10), 84-91.
268. Wohlers, T. (2000). Rapid prototyping and tooling state of the industry annual worldwide progress report. *Wohlers Associates Inc., Colorado*.
269. Wohlers, T. (2008). State of the industry, annual worldwide progress report, Wohlers Associates.
270. Wohlers, T. T. (2011). *Wohlers Report 2011: Additive Manufacturing and 3D Printing State of the Industry Annual Worldwide Progress Report*. Wohlers Associates.
271. Wood, L. (1993). *Rapid automated prototyping*. Industrial Press, Inc..
272. Xu, F. (1999). *Integrated Decision Support for Part Fabrication with Rapid Prototyping & Manufacturing Systems*. Ph.D. Thesis, National University of Singapore
273. Xu, F., Loh, H. T., & Wong, Y. S. (1999). Considerations and selection of optimal orientation for different rapid prototyping systems. *Rapid Prototyping Journal*, 5(2), 54-60.
274. Yan, Y., Zhang, R., Lu, Q., & Du, Z. (1998). Study on multifunctional rapid prototyping manufacturing system. *Integrated Manufacturing Systems*, 9(4), 236-241.
275. Yang, H. J., Hwang, P. J., & Lee, S. H. (2002). A study on shrinkage compensation of the SLS process by using the Taguchi method. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 42(11), 1203-1212.
276. Yarlagadda, P. K., Christodoulou, P., & Subramanian, V. S. (1999). Feasibility studies on the production of electro-discharge machining electrodes with rapid prototyping and the electroforming process. *Journal of Materials Processing Technology*, 89, 231-237.
277. Yau, H.-T., Kuo, C.-C., & Yeh, C.-H. (2003). Extension of surface reconstruction algorithm to the global stitching and repairing of STL models. *Computer-Aided Design*, 35(5), 477-486. Doi:10.1016/S0010-4485(02)00078-7
278. Yoo, S.-H., Park, E.-J., Lee, J.-S., Song, J.-H., Oh, D.-J., Chung, W.-R., ... Mishra, D. (2007). Future of CAE and Implication on Engineering Education. In N. León-Rovira (Ed.), *Trends in Computer Aided Innovation SE - 22* (Vol. 250, pp. 221-229). Springer US. Doi:10.1007/978-0-387-75456-7\_22
279. Zahedi, F. (1986). The analytic hierarchy process—a survey of the method and its applications. *Interfaces*, 16(4), 96-108.

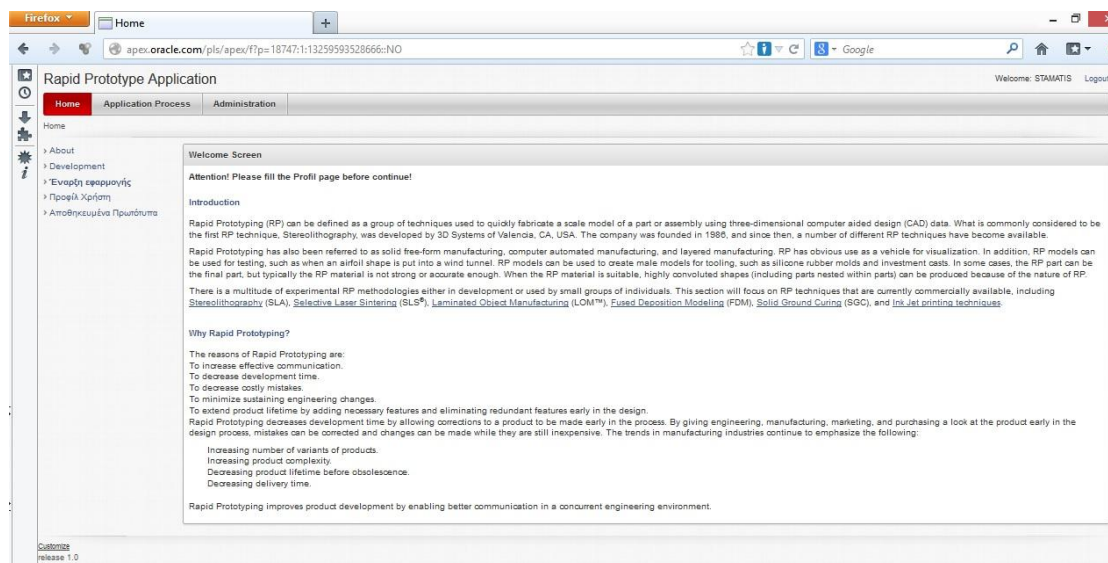
280. Zhang, W., Leu, M. C., Ji, Z., & Yan, Y. (1999). Rapid freezing prototyping with water. *Materials & design*, 20(2), 139-145.
281. Zhou, J. G., Herscovici, D., & Chen, C. C. (2000). Parametric process optimization to improve the accuracy of rapid prototyped stereolithography parts. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 40(3), 363-379.
282. Ziemian, C. W., & Crawn III, P. M. (2001). Computer aided decision support for fused deposition modeling. *Rapid Prototyping Journal*, 7(3), 138-147.
283. Zyzalo, J. R. (2008). Masked projection stereolithography: improvement of the Limaye model for curing single layer medium sized parts: a thesis presented in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy in Engineering (School of Engineering and Advanced Technology) at Massey University, Albany, New Zealand.
284. Βάρελης, Χ. (2009). *Κατασκευή Πρωτοτύπων με Τριαξονική Επιτραπέζια Φρέζα CNC*. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή ΜΜ.
285. Γιαννατσής, Ι. (2004). *Ανάπτυξη Συστήματος Επιλογής Κατασκευαστικών Παραμέτρων στη Μέθοδο της Στερεολιθογραφίας*. Διδακτορική Διατριβή. Πανεπιστήμιο Πειραιά.
286. Καϊσαρλής, Γ., Λάζαρης, Π., Πολύδωρας, Σ., Προβατίδης, Χ. (2013). Τρισδιάστατη Ψηφιακή Αποτύπωση Αρχαίων Αντικειμένων και Εκτύπωση Αντιγράφων με τη Βοήθεια Προηγμένων Υπολογιστικών Συστημάτων. 6<sup>ο</sup> Συμπόσιο της Ελληνικής Αρχαιομετρικής Εταιρείας. Αθήνα – Μουσείο Ακρόπολης, Μάιος, 16-18.
287. Κανάραχος, Α., Προβατίδης, Χ. (2000). *Πεπερασμένα Στοιχεία στη Μηχανολογία*, Παπασωτηρίου, Αθήνα
288. Μάργαρης, Α. (unspecified). Βάσεις Δεδομένων – Σημειώσεις εργαστηρίου. ΤΕΙ Θεσσαλονίκης, Retrieved from: <http://aetos.it.teithe.gr/~amarg/databases.htm>
289. Μπαλντούκας, Α. Κ., Δημοσθένους, Γ.Α. (2005). *Μηχανουργική Τεχνολογία: Διαμόρφωση με αποβολή υλικού, χύτευση, συγκόλληση και πλαστική παραμόρφωση*, Εκδ. Πατάκη, Αθήνα
290. Μπαμπινιώτης, Γ. (2008). *Λεξικό νέας Νέας Ελληνικής Γλώσσας (Γ' Έκδοση)*. Αθήνα, Εκδόσεις Πατάκη
291. Πετρόπουλος, Π. (1995). *Μηχανουργική Τεχνολογία: Τεχνολογία Κατεργασιών Κοπής των Μετάλλων*, Εκδ. Ζήτη, Αθήνα
292. Πολατιδής, Η. (2003). *Ενεργειακή Ανάλυση και Λήψη Αποφάσεων: Ένα Πολυκριτηριακό Μεθοδολογικό Πλαίσιο*. Διδακτορική Διατριβή. Πανεπιστήμιο Αιγαίου, Οκτώβριος
293. Στάθης, Α. (2010). *Η μεθοδολογία εργασίας Simultaneous Engineering*. Μεταπτυχιακή Εργασία, ΔΠΜΣ Συστήματα Αυτοματισμού. ΕΜΠ
294. Σφαντζικόπουλος, Μ. (2003). *Σχεδιασμός Μηχανολογικών Κατασκευών II*. Εκδόσεις ΕΜΠ
295. Σφαντζικόπουλος, Μ. (2005). *Σχεδιασμός Μηχανολογικών Κατασκευών I*. Εκδόσεις ΕΜΠ
296. Σφαντζικόπουλος, Μ., Διπλάρης, Σ., Πολύδωρας, Σ., Καϊσαρλής, Γ., Δημητρέλλου, Σ., Τσακατίκας, Δ., Δημόπουλος, Π. (2006). Σύγχρονες Μέθοδοι Υποστήριξης Ανάπτυξης και Κατασκευής Βιομηχανικών Προϊόντων στα πλαίσια του Ολοκληρωμένου Μηχανολογικού Σχεδιασμού. *Ελληνικές Ημέρες Έρευνας & Τεχνολογίας – Ευρωπαϊκής Συνεργασίας, Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδος (ΤΕΕ)*. Αθήνα, Μάιος, 10-11.

297. Τσαμασφύρος, Γ. Ι., Θεοδοκόγλου Ε.Ε. (1994). *Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων*, Αθήνα

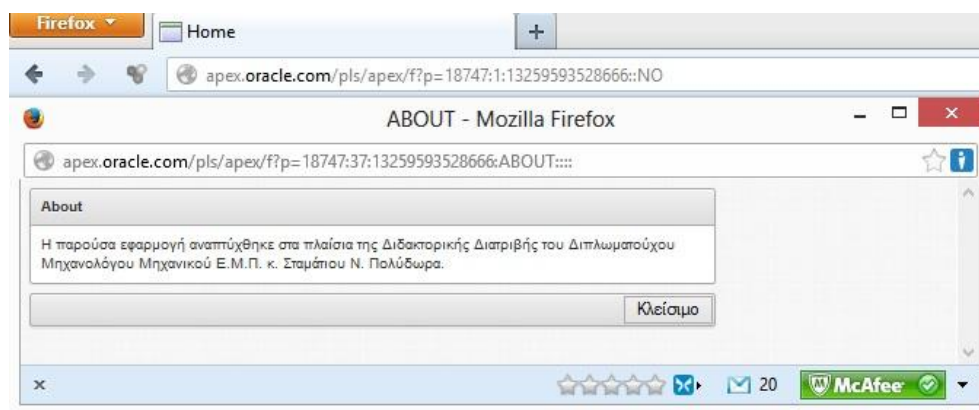
## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

### ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΚΑΙ ΟΘΟΝΕΣ ΧΡΗΣΗΣ ΠΙΛΟΤΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΒΑΣΙΣΜΕΝΟΥ ΣΤΗΝ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗ ΣΒΔ ΓΙΑ ΕΞΕΥΡΕΣΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΙΚΑΝΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ & ΠΑΡΟΧΩΝ ΤΚΠ ΓΙΑ ΤΗΝ ΙΚΑΝΟΠΟΙΗΣΗ ΑΝΑΓΚΗΣ ΠΡΩΤΟΤΥΠΟΥ ΜΟΡΦΗΣ

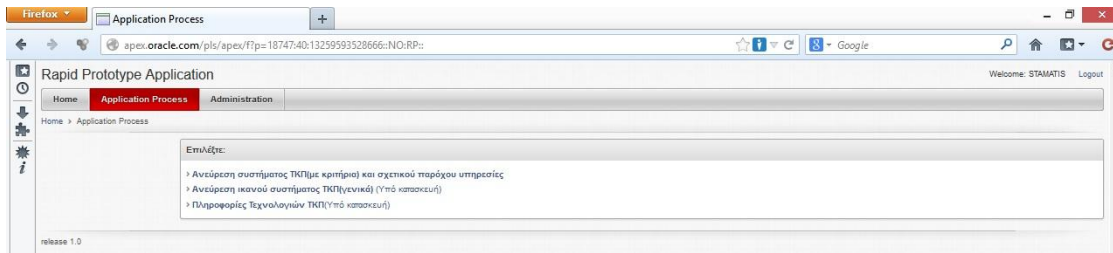
Παρουσιάζεται εδώ υπό τη μορφή λογισμικού επίδειξης (demo) και με τη βοήθεια χαρακτηριστικών οθονών του (screenshots), η λειτουργία διαδικτυακά προσβάσιμου ΣΥΑ που σχεδιάστηκε και δομήθηκε πιλοτικά με τα μέσα και τεχνικές που περιγράφονται στο Κεφάλαιο 4 της παρούσας ΔΔ και το οποίο άμεσα αναφέρεται και αξιοποιεί την προτεινόμενη στην παρούσα διατριβή δομή ΣΒΔ για την οργάνωση και αξιοποίηση τεχνολογιών, συστημάτων και παρόχων ΤΚΠ.



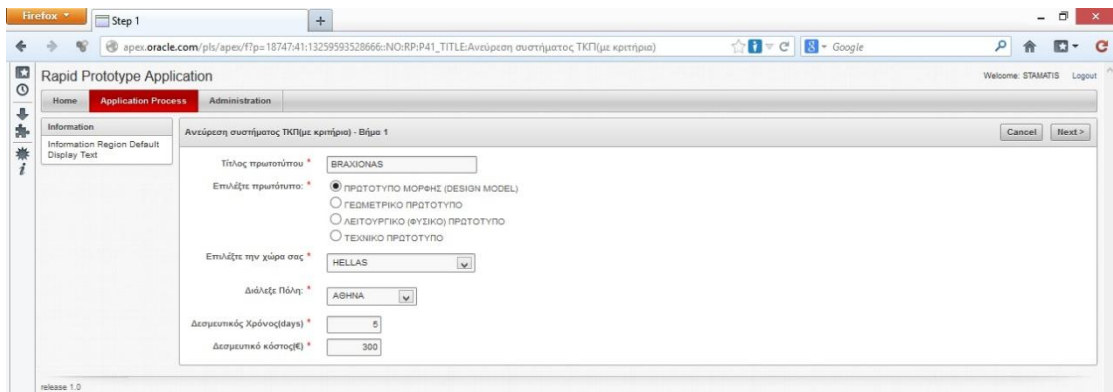
Κεντρική οθόνη



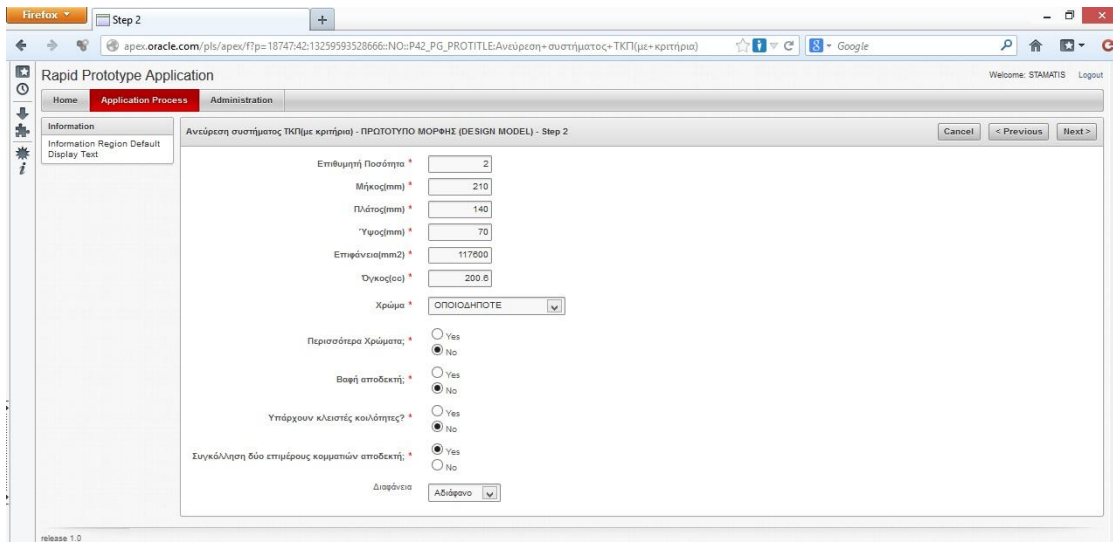
Οθόνη "About"



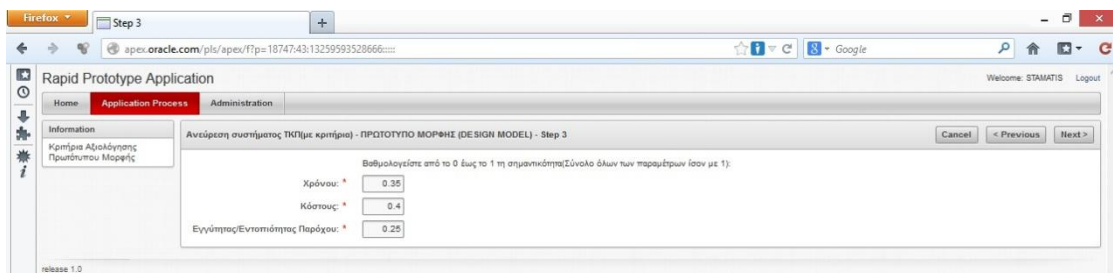
*Βασικές Λειτουργίες της εφαρμογής (ΣΥΑ)*



*Βήμα 1 περίπτωσης πρωτοτύπου μορφής (Βασικές αρχικές επιλογές)*



*Βήμα 2 περίπτωσης πρωτοτύπου μορφής (Δεδομένα πρωτοτύπου)*



*Βήμα 3 περίπτωσης πρωτοτύπου μορφής (Βαρύτητες κριτηρίων αξιολόγησης)*

με κριτήριο) - ΠΡΟΤΟΤΥΠΟ ΜΟΡΦΗΣ (DESIGN MODEL) - Step 4 Cancel < Previous Next >

Μηχανή	Ενδ. Χρόνος Κατασκευής(Όρες)	Ενδ. Χρόνος Παραπομπής(Όρες)	Ενδ. Συν. χρόνος	Ενδ. Κόστος(Μπασφαιρικά)	Ενδ. Συν. Κόστος	Vendor	Χώρα	Πάροχος - Bureau Name	Web Address	Bureau Country Name	Εντοπισμός(VDI)	Κόστος(VDI)	Χρόνος(VDI)	Βελή Ηλεκτρίση
uPrint	2.63	24.00	26.63	50.00	195.80	STRATASYS	USA	ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ Τεχνολογίας Κατασκευής Πρωτοτύπων & Εργαλείων Ε.Μ.Π.	<a href="http://rplab.mech.ntua.gr">http://rplab.mech.ntua.gr</a>	HELLAS	4	4	3	3.65
Elite	2.63	24.00	26.63	50.00	218.19	STRATASYS	USA	Κέντρο Ανάπτυξης Προϊόντων και ΤΚΠ, Laboratory of Adv. Manufacturing Technologies&Testing (LAMA&T)	<a href="http://www2.unipi.gr/greek/departments/industrial/tekex/">http://www2.unipi.gr/greek/departments/industrial/tekex/</a>	HELLAS	4	3	3	3.25
EOS - Stereos Desktop S	2.10	24.00	26.10	50.00	251.50	EOS GmbH	GERMANY	Κέντρο Ανάπτυξης Προϊόντων και ΤΚΠ, Laboratory of Adv. Manufacturing Technologies&Testing (LAMA&T)	<a href="http://www2.unipi.gr/greek/departments/industrial/tekex/">http://www2.unipi.gr/greek/departments/industrial/tekex/</a>	HELLAS	4	2	4	3.20
LOM 1015	5.25	24.00	29.25	50.00	252.50	Cubic Technologies Inc (former Hellisy)	USA	ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ Τεχνολογίας Κατασκευής Πρωτοτύπων & Εργαλείων Ε.Μ.Π.	<a href="http://rplab.mech.ntua.gr">http://rplab.mech.ntua.gr</a>	HELLAS	4	2	3	2.85
uPrint SE	2.63	24.00	26.63	50.00	257.01	STRATASYS	USA	4th Dimension Technologies	<a href="http://4thdimension.gr/">http://4thdimension.gr/</a>	HELLAS	4	2	3	2.85
uPrint	2.63	24.00	26.63	50.00	232.25	STRATASYS	USA	ARCHIMODELS	<a href="http://www.archimodels.gr">www.archimodels.gr</a>	HELLAS	4	0	3	2.05
BluePrinter	5.25	24.00	29.25	50.00	294.80	BluePrinter	DENMARK	PV Engineering Co.	<a href="http://www.pv-e.com/">http://www.pv-e.com/</a>	HELLAS	4	0	3	2.05
Elite	2.63	24.00	26.63	50.00	244.07	STRATASYS	USA	Hellas Prototyping	<a href="http://www.hellasprototyping.com/">http://www.hellasprototyping.com/</a>	HELLAS	4	0	3	2.05
EOSINT P700	0.84	48.00	48.84	100.00	246.16	EOS GmbH	GERMANY	MATERIALISE	<a href="http://www.materialise.be#">http://www.materialise.be#</a>	BELGIUM	0	2	1	1.15
Mammoth SLA	1.40	48.00	49.40	100.00	265.00	MATERIALISE	BELGIUM	MATERIALISE	<a href="http://www.materialise.be#">http://www.materialise.be#</a>	BELGIUM	0	2	1	1.15
LOM 1015	5.25	48.00	53.25	50.00	280.25	Cubic Technologies Inc (former Hellisy)	USA	Εργαστήριο Συστημάτων Παραγωγής, Laboratory for Manufacturing Systems & Automation (LMS)	<a href="http://lms.mech.upatras.gr/">http://lms.mech.upatras.gr/</a>	HELLAS	2	1	0	0.90
FDM1650	2.63	48.00	50.63	50.00	231.13	STRATASYS	USA	Εργαστήριο	<a href="http://lms.mech.upatras.gr/">http://lms.mech.upatras.gr/</a>	HELLAS	2	0	1	0.85

*Βήμα 4 περίπτωσης πρωτοτύπου μορφής (Αποτελέσματα)*

**ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: ΑΡΧΕΙΑ, ΤΙΜΕΣ ΑΝ.ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ & ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟΙ ΧΡΟΝΟΙ ΑΝΑ ΣΤΡΩΣΗ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΑΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΟΛΥΩΝΥΜΙΚΗ ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΧΡΟΝΟΥ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΣΕ LOM1015**

Όνομα αρχείου	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	S (mm <sup>2</sup> )	C <sub>av</sub>	CH <sub>x</sub> (mm)	CH <sub>y</sub> (mm)	ρ <sub>pl</sub>	Πραγματικό MTPL (min)
1 1 1	100	70	10	15600	0	15	15	0,74	0,450
1 1 2	100	70	10	13800	0	10	10	0,50	0,559
1 1 3	100	70	10	13650	0	10	10	0,33	0,644
1 2 1	100	70	10	14569,91	0,4	15	15	0,71	0,573
1 2 2	100	70	10	12769,91	0,41	10	10	0,48	0,685
1 2 3	100	70	10	12619,91	0,47	10	10	0,33	0,850
1 3 1	100	70	10	12311,48	1	15	15	0,58	0,653
1 3 2	100	70	10	10880,64	1	10	10	0,39	0,804
1 3 3	100	70	10	13126,9	1	10	10	0,51	0,895
1 3 3b	100	70	10	12370,54	0,61	10	10	0,33	0,872
2 1 1	200	140	10	52000	0	25	25	0,74	0,668
2 1 2	200	140	10	41600	0	25	25	0,50	0,774
2 1 3	200	140	10	36600	0	20	20	0,33	0,950
2 1 4	200	140	10	44600	0	15	15	0,41	1,134
2 2 1	200	140	20	58279,64	0,4	25	25	0,71	0,799
2 2 2	200	140	20	51079,64	0,41	25	25	0,48	0,941
2 2 3	200	140	20	50479,64	0,47	20	20	0,33	1,173
2 2 4	200	140	20	61049,56	0,53	15	15	0,42	1,542
2 3 1	200	140	20	49245,93	1	25	25	0,58	0,897
2 3 2	200	140	20	43522,56	1	25	25	0,39	1,020
2 3 3	200	140	20	52507,6	1	20	20	0,51	1,185
2 3 3b	200	140	20	49482,18	0,61	20	20	0,33	1,183
2 3 4b	200	140	20	61049,56	0,53	15	15	0,42	1,541
3 1 1	300	210	30	140400	0	40	40	0,74	0,853
3 1 2	300	210	30	124200	0	40	40	0,50	1,006
3 1 3	300	210	30	122850	0	30	30	0,33	1,254
3 1 4	300	210	15	100350	0	25	25	0,41	1,396
3 1 5	300	210	10	89000	0	15	15	0,37	2,032
3 2 1	300	210	30	131129,2	0,57	40	40	0,71	1,015
3 2 2	300	210	30	114929,2	0,41	40	40	0,48	1,190
3 2 3	300	210	30	113579,2	0,47	30	30	0,33	1,470
3 2 4	300	210	30	137361,5	0,53	25	25	0,42	1,795
3 2 5	300	210	10	91637,03	0,56	15	15	0,43	2,672
3 3 1	300	210	30	110803,3 4	1	40	40	0,58	1,109
3 3 2	300	210	30	97925,77	1	40	40	0,39	1,252
3 3 3	300	210	30	118142,1 1	1	30	30	0,51	1,443
3 3 3b	300	210	30	111334,8 9	0,61	30	30	0,33	1,468
3 3 4b	300	210	30	137361,5	0,53	25	25	0,42	1,797
3 3 5b	300	210	10	95615,93	0,91	15	15	0,49	2,861

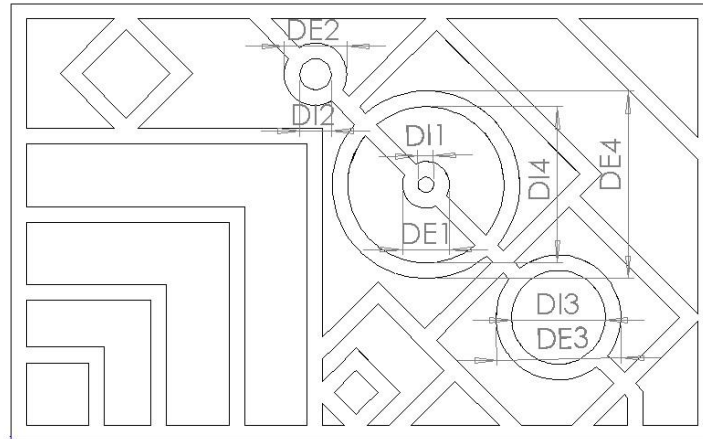


Allmigadis 2_sc	106,23	164,5 3	57,58	60721	0,1	12	12	0,39	0,885
All_stool_c on	178,79	105	101,38	47082	0,9 7	18	18	0,14	0,927
xeroulia	119,5	170	22	69210	0,1	13	16	0,19	0,979
blad1&2_n ew	149,63	139,4	59,05	45494	0,7 5	20	20	0,13	0,868
Priobolos2 _sc_con	90	240,6	17,64	42265	0,2 5	11,6	13	0,25	1,530
egg&refl	103	215	57,3	74455	0,1 5	18	18	0,65	0,775
heart_s23 607_top	263	89,33	80,73	73915	0,0 5	25	25	0,60	1,107
Nea Priobovou _sc_con	107	228,6 6	19,06	47661	0,3 2	13,8	13,2	0,24	1,523
Forma_all	126	239	41	108535	0,5	12	12	0,25	2,311
4 kapakia_s caled	174,44	174,5 6	27	76222	0,9 5	15,7	15,7	0,12	2,407
rotmod4 edraseisE MP	260	118	118	110730	0,2 5	20	20	0,13	0,952
std HELISYS PART	203,2	152,4	63,5	108475	0,0 4	25,4	22	0,62	0,956
Dokimio_a kr_XY- correct	225	140	30	146577	0,2	18	18	0,35	2,056
Dokimio_a kr_XY- correct_co n	225	140	30	146577	0,2	18	18	0,35	2,020
4big&mikr o_0976co n	341,3	106,8	62,53	199389	0,4 5	15	16	0,27	2,254
kardia2_T ELEIA2sc _con	193,82	193,8 2	51,88	94211	0,0 2	15	15	0,30	1,238
models&k ard1&migd _sc_con	199,73	193,8 2	111,86	155000	0,2 5	25	25	0,25	1,079
potntua_2	280	150	114,6	210858	0,5	27	25	0,57	1,745
casetina	202,99	211	15,5	100540	0,0 3	14	15	0,43	1,675
model_s2 3607_r	336,37	128,8 4	269,33	181255	0,0 7	27	30	0,26	1,012
model_s2 3607_left	336,37	128,8 4	269,33	183674	0,0 7	27	30	0,26	0,986
Traxs&wir ehlid_098s c&con	237,13	190	41,42	85505	0,0 1	20	20	0,26	1,349
heart_s23 607_t+St	263	174,4 5	80,73	92961	0,0 7	15,8	16	0,31	1,102
Top_lom4	272	173	47	129578	0,2	30	35	0,70	0,851

dok_new MIKRON	225	220	35	140449	0,1 5	23	23	0,63	1,047
Top_lom3	287	173	47	129463	0,2	30	35	0,66	0,895
heart_s23 607_inter	228	218	130,5	200518	0,7	38	37	0,52	1,078
heart_s23 607_left&ri ght	229,04	218,0 8	130,5	200245	0,7	23,3	25	0,52	1,539
edm_1o2_ com	300	168,4	20	148163	0	24	13	0,61	1,540
Top_lom2	272	188	47	131818	0,2	31	24	0,72	0,771
F2_s&P2_ m_s&T2_s	362	159,3 7	82	260802	0,2 5	15	15	0,22	2,378
F1&P1&T 1	362	170,7 4	82	264306	0,7 5	15	15	0,17	4,150
merged_2 nd_BUNCH _con_sc	299	227,2 5	107,94	365681	0,1 5	16	14	0,42	1,085
all_attalus	352	212	175,6	520636	0,6	14	14	0,06	2,535
ola_ta9ma zi097sc&c on	307,84	243,7 1	69,84	426607	0,1 5	19,5	21	0,55	2,570

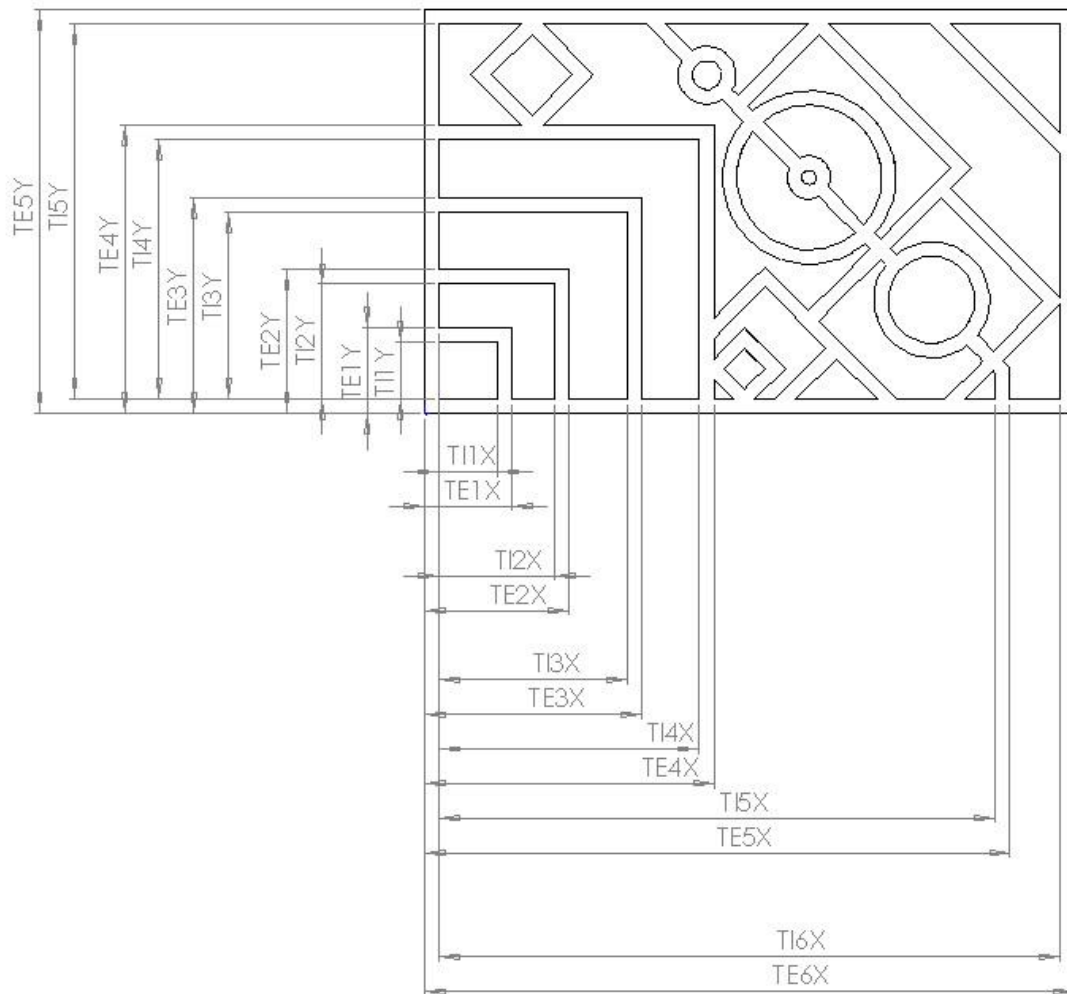
**ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ: ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΠΡΟΣ ΜΕΤΡΗΣΗ ΣΤΟ ΔΟΚΙΜΙΟ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ ΕΠΙΠΕΔΟΥ ΧΥ**

- Διαστάσεις κυλινδρικών στοιχείων



	D11	DE1	D12	DE2	D13	DE3	D14	DE4
Εσωτερική	*		*		*		*	
Εξωτερική		*		*		*		*
Ονομαστική Τιμή (mm)	5	15	10	20	30	40	50	60

- Γραμμικές διαστάσεις επί των κυρίων αξόνων X & Y



	T11X	T12X	T13X	T14X	T15X	T16X
Ονομαστική Τιμή (mm)	20	40	65	90	193	215

**Εσωτερικές κατά X**

	T11Y	T12Y	T13Y	T14Y	T15Y
Ονομαστική Τιμή (mm)	20	40	65	90	130

**Εσωτερικές κατά Y**

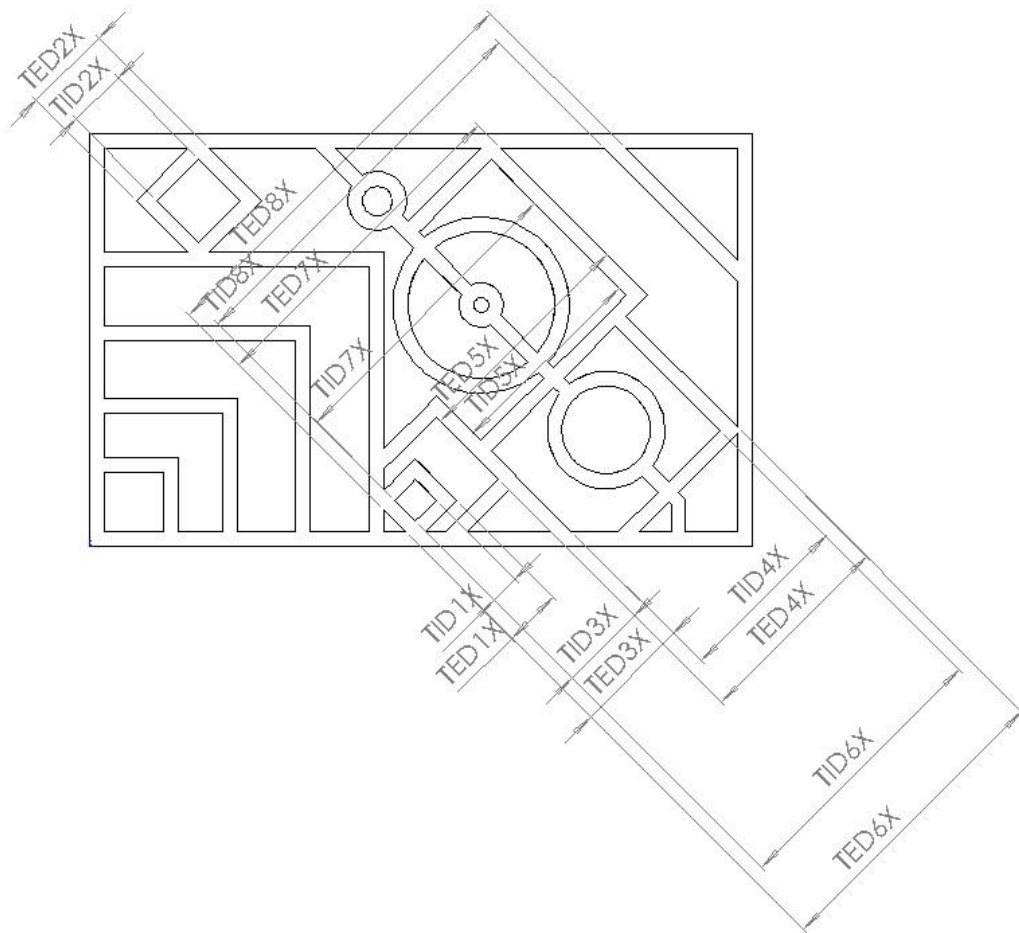
	TE1X	TE2X	TE3X	TE4X	TE5X	TE6X
Ονομαστική Τιμή (mm)	30	50	75	100	203	225

**Εξωτερικές κατά X**

	TE1Y	TE2Y	TE3Y	TE4Y	TE5Y
Ονομαστική Τιμή (mm)	30	50	75	100	140

**Εξωτερικές κατά Y**

- Γραμμικές διαστάσεις επί του άξονα X' (Διαγώνιος του X)



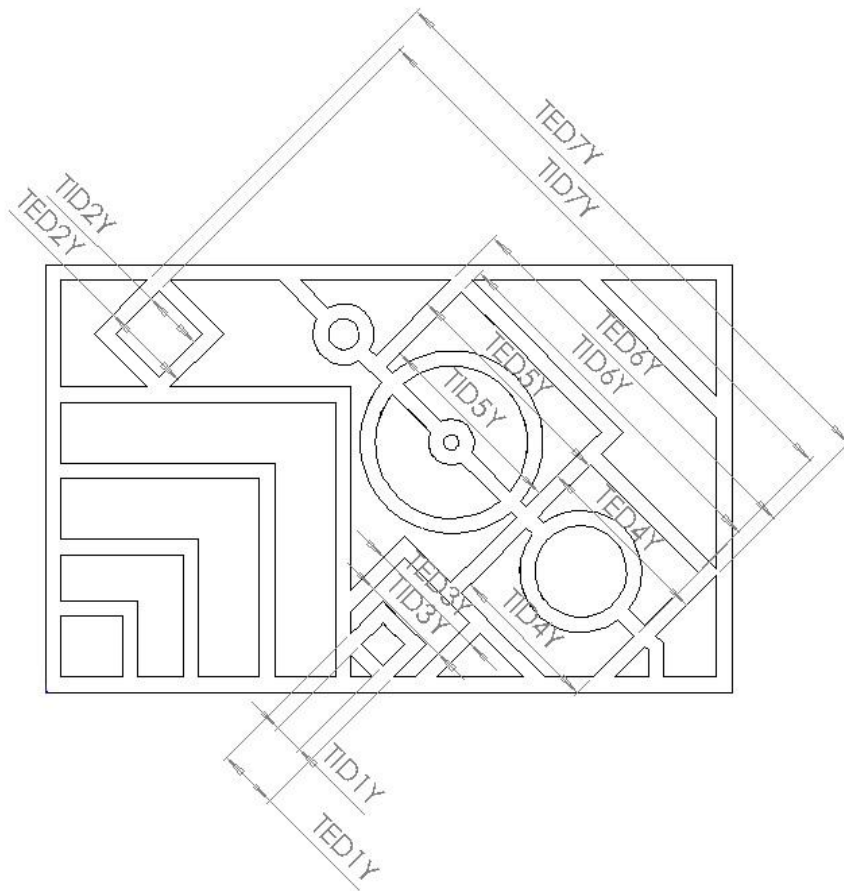
	TID1X	TID2X	TID3X	TID4X	TID5X	TID6X	TID7X
Ονομαστική Τιμή (mm)	10	20	30	60	70	95	135

**Εσωτερικές κατά X'**

	TED1X	TED2X	TED3X	TED4X	TED5X	TED6X	TED7X
Ονομαστική Τιμή (mm)	20	30	40	70	80	105	145

**Εξωτερικές κατά X'**

- Γραμμικές διαστάσεις επί του άξονα Y' (Διαγώνιος του Y)



	TID1Y	TID2Y	TID3Y	TID4Y	TID5Y	TID6Y	TID7Y
Ονομαστική Τιμή (mm)	10	20	30	50	65	120	190,437

**Εσωτερικές κατά Y'**

	TED1Y	TE2DY	TED3Y	TED4Y	TED5Y	TED6Y	TED7Y
Ονομαστική Τιμή (mm)	20	30	40	60	75	130	200,437

**Εξωτερικές κατά Y'**

**ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ: ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΑΙ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΚΥΡΙΑΣ ΠΡΩΤΗΣ ΥΛΗΣ ABS+ ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ ΤΚΠ ΜΙΚΡΗΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ UPRINT**

**uPrint Model Material (ABS-P430)**

Material spools for the Dimension uPrint 3D Printer

- 5 spools per package
- 490cc (30 cubic inches) of material per spool
- uPrint uses durable ABS+

<b>Mechanical Properties</b>		<b>Test Method</b>	<b>English</b>	<b>Metric</b>
Tensile Strength (Type 1, 0.125", 0.2"/min)		ASTM D638	5,300 psi	37 Mpa
Tensile Modulus (Type 1, 0.125", 0.2"/min)		ASTM D638	330,000 psi	2,320 Mpa
Tensile Elongation (Type 1, 0.125", 0.2"/min)		ASTM D638	3%	3%
Flexural Delamination		ASTM D790	4,500 psi	31 Mpa
Flexural Strength (Method 1, 0.05"/min)		ASTM D790	7,600 psi	53 Mpa
Flexural Modulus (Method 1, 0.05"/min)		ASTM D790	320,000 psi	2,250 Mpa
IZOD Impact, notched (Method A, 20°C)		ASTM D256	2.0 ft-lb/in	106 J/m
<b>Thermal Properties</b>		<b>Test Method</b>	<b>English</b>	<b>Metric</b>
Heat Deflection (HDT) @ 66 psi		ASTM D648	204°F	96°C
Heat Deflection (HDT) @ 264 psi		ASTM D648	180°F	82°C
Glass Transition Temperature (Tg)		DMA (SSYS)	226°F	108°C
Melt Point		-----	Not Applicable	Not Applicable
Coefficient of Thermal Expansion		ASTM E831	4.90E-05 in/in°F	-----
<b>Other</b>		<b>Test Method</b>	<b>Value</b>	
Specific Gravity		ASTM D792	1.04	
Vertical Burn		UL94	HB	
<b>System Availability</b>	<b>Layer Thickness Capability</b>	<b>Support Structure</b>	<b>Available Colors</b>	
uPrint	0.010 inch (0.254 mm)	Soluble Supports Breakaway Supports (BST 1200es Only)	Ivory	