ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΚ&ΑΕ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΑΧΕΙΑΣ ΚΑΤ. ΠΡΩΤΟΤΥΠΩΝ & ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ – ΑΝΤ. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

Η Εφαρμογή της Αρχής του Πλήρους Υλικού (MMC) ως Παράγοντας Διαμόρφωσης του Κόστους Παραγωγής Μηχανολογικών Κατασκευών

Διπλωματική Εργασία

Φαέθοντας Καραγιαννόπουλος

Επιβλέπων: Δρ. Χριστόφορος Προβατίδης
Καθηγητής ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ 2016

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η Αρχή του Πλήρους Υλικού - ΑΠΥ *(MMC-Maximum Material Condition, ISO 2692:2014)* εφαρμόζεται ευρύτατα στη φάση διαστασιολόγησης σε μεγάλο πλήθος βιομηχανικά παραγόμενων εξαρτημάτων και μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική αύξηση της ζώνης γεωμετρικής ανοχής *(θέσης, μορφής, προσανατολισμού)* και κατά συνέπεια αποδοχής του εξαρτήματος/ προϊόντος χωρίς να επηρεάζεται η ποιότητα του. Αν και η ΑΠΥ λαμβάνεται –αναπόφευκτα- υπόψη κατά τον διαστατικό ποιοτικό έλεγχο, η διευρυμένη ανοχή που προκύπτει από την εφαρμογή της *δεν λαμβάνεται κατά κανόνα υπόψη στη φάση σχεδιασμού των διαδικασιών παραγωγής* κι ειδικότερα στον υπολογισμό των δεικτών επάρκειας κατεργασίας (Cp, Cpk κ.α.), γεγονός που έχει αρνητικές συνέπειες στο κόστος παραγωγής.

Αντικείμενο της Διπλωματικής Εργασίας (ΔΕ) αποτελεί η ανάπτυξη μεθοδολογίας προκειμένου να δειχτεί πως η εφαρμογή της Αρχής του Πλήρους Υλικού (MMC) σε στοιχείο αναφοράς *(datum)* μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση του συντελεστού επάρκειας κατεργασίας Cp και συνεπακόλουθα σε αύξηση του ποσοστού αποδεκτών τεμαχίων. Στο πλαίσιο της ΔΕ πραγματοποιείται διερεύνηση, συστηματική ανάλυση των γεωμετρικών συνθηκών και διατύπωση των μαθηματικών σχέσεων που οδηγούν *στον υπολογισμό της νέας, επαυξημένης ανοχής αληθούς θέσης* όπως αυτή διαμορφώνεται όταν ληφθεί υπόψη η εφαρμογή της ΑΠΥ στο/-α στοιχείο/-α αναφοράς.

Στις αρχικές ενότητες της ΔΕ *(Κεφ. 1-4)* πραγματοποιείται καταρχήν σύντομη παρουσίαση/ ανασκόπηση της εξέλιξης, τυποποίησης κι ερμηνείας των γεωμετρικών και διαστασιολογικών προδιαγραφών ακρίβειας που εφαρμόζονται στις μηχανολογικές κατασκευές. Εν συνεχεία παρουσιάζεται βιβλιογραφική επισκόπηση/ αναφορά στο πρόβλημα του καθορισμού των ανοχών στις μηχανολογικές κατασκευές. Αναλύονται συνοπτικά οι σύγχρονοι τρόποι καθορισμού των γεωμετρικών ανοχών με τη χρήση συγκεκριμένου εξαρτήματος ως παράδειγμα. Η ΔΕ εστιάζεται στην παρουσίαση των επικρατέστερων πέντε μοντέλων ανάλυσης γεωμετρικών ανοχών που εντοπίστηκαν στη σχετική βιβλιογραφία *(Vector Loop Model, Variational Model, Matrix Model, Jacobian Model, Torsor Model).*

Στις επόμενες ενότητες της ΔΕ *(Κεφ. 5-6)* γίνεται συνοπτική παρουσίαση και ανάλυση των στατιστικών εργαλείων που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο μιας παρτίδας τεμαχίων στο κατά πόσο πληροί τα όρια ανοχών *(statistic process capability)*. Έπειτα παρουσιάζεται η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε κι εφαρμόστηκε σχετικά με τις προοπτικές που παρέχει η χρήση της συνθήκης της Αρχής του Πλήρους Υλικού (MMC) σε στοιχείο αναφοράς, όσον αφορά στον δείκτη Cp. Γίνεται εφαρμογή της μεθοδολογίας τόσο σε αριθμητικό παράδειγμα σε απλό μηχανολογικό τεμάχιο, όσο κι εφαρμογή σε πραγματικό βιομηχανικό εξάρτημα.

Τέλος, *(Κεφ. 7)*, εξάγονται συμπεράσματα και αναφέρονται προοπτικές συνέχισης της Εργασίας. Στο παράρτημα της ΔΕ δίδεται ο κώδικας προγράμματος σε MATLAB που αναπτύχθηκε προκειμένου να ελέγχουμε αν ένα τεμάχιο βρίσκεται εντός των καθορισμένων ορίων της προδιαγραφής αληθούς θέσεως με εφαρμογή ΑΠΥ σε στοιχείο αναφοράς.

ABSTRACT

One of the most frequently used geometrical tolerances, due to its economic advantages, is the True Position Tolerance (TPT). When assigned at the Maximum Material Condition (MMC, ISO 2692:2014) an increase in the TPT is allowed, equal to the departure of the particular feature from the MMC size. Assignment of TPT reduces in this way the number of rejects without affecting the product quality. Process planning involves the selection of machine tools and processes which economically yield products within the designated specifications. However, the MMC benefits are not directly taken into consideration in the process planning stage in order to control the overall process cost. The MMC tolerance bonus is thus taken into account mainly during part inspection in order to reduce rejects.

The main subject of this thesis is the development of a methodology that provides the mathematical formulation for the calculation of the increase on the True Position tolerance by the assignment of the Maximum Material Condition (MMC) principle on a datum feature that consequently leads to increased manufacturing Process Coefficient Cp (increase in the percentage of acceptable workpieces).

In the initial chapters *(Ch. 1-4)* of the thesis a short overview of the development, standardization and interpretation of geometric and dimensional tolerance standards applied in mechanical engineering design is presented. Then, a brief literature review in the field of tolerance assignment/analysis/ synthesis in mechanical components is performed. The modern ways of determining the geometric tolerances using a benchmark component as an example are briefly analyzed. Analysis of the geometric tolerances can be accomplished by several models; however the main five existing in the relevant literature are here presented *(Vector Loop Model, Variational Model, Matrix Model, Jacobian Model, Torsor Model)*.

Next, *(Ch. 5-6)* a summary and analysis of statistical tools used to control whether a batch of workpieces satisfies the tolerance's specification (statistic process capability) is given. Furthermore, the developed methodology on components using the Maximum Material Condition (MMC) to datum features resulting in an increase of Cp coefficient is presented. The methodology is initially applied as a numerical example in a simple mechanical part and then its application is illustrated in a real industrial component.

The final chapter of the thesis indicates certain prospects on the continuation of this scientific analysis. On the Annex, the developed the MATLAB code in order to check if an item is within the desired TPT limits when MMC principle is assigned on a datum feature is provided.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα καταρχήν να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα Καθηγητή Ε.Μ.Π. Δρ. Χριστόφορο Προβατίδη για την ανάθεση αλλά και για την καθοδήγησή του κατά την εκπόνηση της Διπλωματικής μου Εργασίας. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρ. Γ. Καϊσαρλή για την πολύτιμη βοήθεια που μου παρείχε κατά την ενασχόλησή μου με την παρούσα Εργασία.

Επίσης, νοιώθω την υποχρέωση να ευχαριστήσω όλους τους ανθρώπους στον Τομέα Μηχανολογικών Κατασκευών και Αυτομάτου Ελέγχου της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π. που συμβάλουν καθημερινά με τη δουλειά τους στη διατήρηση μιας υψηλού επιπέδου εκπαιδευτικής διαδικασίας που οδηγεί στην επιστημονική κατάρτιση που απαιτείται να έχει ένας ανταγωνιστικός κατασκευαστής μηχανολόγος μηχανικός στη σύγχρονη αγορά εργασίας.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου, η στήριξη της οποίας υπήρξε βασικός παράγοντας για την εκπλήρωση των σπουδών.

Πίνακας Περιεχομένων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 - Εισαγωγή

1.1 Αναγκαιότητα Ανοχών 7

1.2 Μετάβαση από Διαστασιολογικές σε Γεωμετρικές Ανοχές 7

1.3 Επιπτώσεις Ανοχών επί του Σχεδιασμού, του Ελέγχου Ποιότητας και επί της Στατιστικής Διαδικασίας Ελέγχου 9

1.4 Συνοπτική Παρουσίαση του Προβλήματος που Πραγματεύεται η ΔΕ 9

1.5 Δομή και Οργάνωση της Διπλωματικής Εργασίας 10

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 - Γεωμετρικές και Διαστασιολογικές Προδιαγραφές Ακρίβειας στις Μηχανολογικές Κατασκευές

2.1 Ακρίβεια Κατασκευής και Κόστος Παραγωγής στο πλαίσιο του Ολοκληρωμένου Μηχανολογικού Σχεδιασμού 11

2.2 Ακρίβεια Μηχανολογικών Κατασκευών 13

2.3 Διαστασιολογικές Ανοχές κατά το Σύστημα Ανοχών – Συναρμογών ISO 286 16

2.4 Γεωμετρικές Ανοχές – Τύποι 18

2.4.1 Ορισμοί και Έννοιες 21

2.4.2 Εφαρμογή Γεωμετρικών Ανοχών σε Μηχανολογικά Σχέδια 22

2.4.3 Το Γενικευμένο Αξίωμα της Αρχής της Εναλλαξιμότητας του Taylor 25

2.4.4 Ενεργός Διάσταση Συναρμογής 26

2.5 Αρχή του Πλήρους Υλικού (MMC) 30

2.6 Αρχή της Περιβάλλουσας Επιφάνειας 35

2.7 Εικονικά Όρια - Virtual & Resultant Condition Boundaries 36

2.8 Πολλαπλός έλεγχος χαρακτηριστικών ως προς πλαίσια αναφοράς (Composite Feature Control Frame) 47

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – Καθορισμός Γεωμετρικών Ανοχών και Ανάλυση Αυτών

3.1 Εισαγωγή 51

3.2 Μετάβαση από Γραμμικές σε Γεωμετρικές Ανοχές 53

3.3 Περιγραφή Προϊόντος 56

3.3.1 Γεωμετρικά Δεδομένα 56

3.3.2 Σχεδιαστικές Απαιτήσεις 58

3.4 Εμπειρικές Μέθοδοι Καθορισμού Ανοχών 62

3.5 Ταξινόμηση Περιπτώσεων Διαστασιολόγησης 63

3.6 Γενικές Μέθοδοι Προδιαγραφών 68

3.6.1 Technologically and Topologically Related Surfaces (TTRS) 69

3.6.2 Βαθμοί Ελευθερίας 70

3.6.3 Mirrors (Κατοπτρικά Χαρακτηριστικά) 72

3.6.4 Καταμερισμός Λειτουργίας (function decomposition) 73

3.6.5 Πίνακας θέσεων 75

3.6.6 Μεταβλητά Διαγράμματα Βρόχου 76

3.7 Συμπεράσματα 77

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 - Εφαρμογή Μοντέλων Ανάλυσης Ανοχών

4.1 Εισαγωγή 79

4.2 Καθορισμός Ανοχών Τεμαχίου (case study) 81

4.3 Μοντέλο Διανυσμάτων Βρόχου 83

4.3.1 Αποτελέσματα Μεθόδου με Χρήση Ανοχών Διαστάσεων 86

4.3.2 Αποτελέσματα Μεθόδου με Χρήση Γεωμετρικών Ανοχών 89

4.4 Επιπλέον Μοντέλα Ανάλυσης Ανοχών 93

4.4.1 Μεταβολικό Μοντέλο (Variational model) 93

4.4.2 Μοντέλο Μήτρας (Matrix Model) 95

4.4.3 Ιακωβιανό Μοντέλο 96

4.4.4 Μοντέλο Στροφέα (torsor model) 96

4.5 Σύγκριση Μοντέλων 97

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 - Στατιστικά εργαλεία αξιολόγησης επάρκειας της κατεργασίας

5.1 Εισαγωγή 101

5.2 Ορισμοί 103

5.3 Δείκτες επάρκειας κατεργασίας 104

5.3.1 Ανάλυση Επάρκειας Κατεργασίας μέσω Διαγραμμάτων Ελέγχου 107

5.4 Υπολογισμός του C_{pk} σε Συνθήκες Μεταβλητών Ανοχών 108

5.5 Αποδεκτές Τιμές Δεικτών Επάρκειας 114

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6- Χρήση ΑΠΥ για Αύξηση Ανοχών και Μείωση Απορριπτόμενων Τεμαχίων

6.1 Εισαγωγή 116

6.2 Βιβλιογραφική Επισκόπηση 117

6.3 ΑΠΥ - Μετρητικές Μέθοδοι 119

6.4 Θεωρητική Ανάλυση 120

6.5 Εφαρμογή σε Θεωρητικό Εξάρτημα – Αριθμητικό Παράδειγμα 126

6.6 Γενίκευση Προβλήματος σε Σύστημα Οπών 128

6.7 Συντελεστής Επάρκειας (C_P) 131

6.8 Εφαρμογή σε Βιομηχανικό Εξάρτημα 131

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 - Συμπεράσματα & Προοπτικές Διπλωματικής Εργασίας

7.1 Συμπεράσματα Δ.Ε- Κατευθύνσεις/ Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα 143

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ- Έλεγχος τεμαχίων με χρήση MATLAB 145

Βιβλιογραφικές Αναφορές 148

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Αναγκαιότητα Ανοχών

Στο πεδίο την μηχανολογικών κατασκευών, αποτελεί προϋπόθεση η παραδοχή ότι τόσο οι διαστάσεις όσο και οι γεωμετρικές μορφές που θα προκύψουν από τη μηχανουργική κατεργασία είναι αποδεκτές εάν βρεθούν εντός καθορισμένων αριθμητικών ορίων που γενικά ονομάζονται ***«διαστασιολογικές και γεωμετρικές ανοχές».*** Είναι γεγονός ότι κατά την κατασκευή οποιουδήποτε εξαρτήματος/ προϊόντος/ συναρμολογημένου συνόλου είναι τεχνολογικά αδύνατο να επιτευχθούν οι προβλεπόμενες ονομαστικές διαστάσεις και γεωμετρικές μορφές, όπως αυτές προδιαγράφονται στα μηχανολογικά κατασκευαστικά σχέδια, με απόλυτη μαθηματική ακρίβεια. Το γεγονός αυτό αποδίδεται σε ένα σύνολο παραγόντων, όπως π.χ. τα αναπόφευκτα σφάλματα των μεθόδων παραγωγής *(σφάλματα εργαλειομηχανών που είναι υπεύθυνες για την κατεργασία αποβολής υλικού και την απόδοση τελικών διαστάσεων, φθορά μητρών, καλουπιών, εργαλείων παραγωγής κ.α.)*, την ανισοτροπία που χαρακτηρίζει τις ιδιότητες των υλικών *(σκληρότητα, μέτρο ελαστικότητας κ.α),* την αστάθεια των συνθηκών που επικρατούν στο βιομηχανικό κατασκευαστικό περιβάλλον *(διακυμάνσεις θερμοκρασίας και υγρασίας, δονήσεις, κραδασμοί κ.α.)*.

Όσο αυστηρότερα είναι τα παραπάνω αριθμητικά όρια τόσο υψηλότερη είναι η ***γεωμετρική και διαστασιολογική ακρίβεια*** των εξαρτημάτων ενός μηχανολογικού προϊόντος και κατ' επέκταση τόσο υψηλότερο είναι το επίπεδο της ποιότητας του. Η ακρίβεια αυτή καθορίζεται στα μηχανολογικά σχέδια με τις διαστασιολογικές και γεωμετρικές ανοχές και αποτελεί συνήθως σημείο έντονου προβληματισμού τόσο για τους μελετητές όσο και για τους κατασκευαστές, κι ειδικότερα για αυτούς που εμπλέκονται με το σχεδιασμό της διαδικασίας παραγωγής *(process planning)*. Αυστηρότερα όρια ανοχών οδηγούν κατά κανόνα σε εκθετική αύξηση του κόστους παραγωγής. Η αποδοτικότερη χρήση και αξιοποίηση καθορισμένων ανοχών όπως π.χ. μέσω της εφαρμογής της **Α**ρχής του **Π**λήρους **Υ**λικού (ΑΠΥ), έχει κατά συνέπεια ιδιαίτερη σημασία προκειμένου να διατηρηθεί το κόστος παραγωγής όσο το δυνατόν χαμηλότερο.

Οι προδιαγραφές ακρίβειας που αφορούν στις διαστάσεις, στη μορφή, στη θέση και στον προσανατολισμό των επιμέρους γεωμετρικών στοιχείων/ χαρακτηριστικών *(form/ design features)* που συνθέτουν ένα τυπικό μηχανολογικό εξάρτημα έχουν άμεσο αντίκτυπο στη δυνατότητα κατασκευής, στις επιδόσεις, στο κόστος και στην ποιότητα τόσο του ίδιου του εξαρτήματος όσο και του συναρμολογημένου συνόλου στο οποίο αυτό εντάσσεται. Ο μετροτεχνικός έλεγχος των αναπόφευκτων κατασκευαστικών αποκλίσεων των εν λόγω προδιαγραφών ακρίβειας με σύγχρονες μεθόδους και εργαλεία αποτελεί το αντικείμενο της βιομηχανικής μετρολογίας διαστάσεων και γεωμετρίας.

1.2 Μετάβαση από Διαστασιολογικές σε Γεωμετρικές Ανοχές

Η συνεχώς αυξανόμενη ανταγωνιστικότητα στην παγκόσμια αγορά αναγκάζει τους κατασκευαστές που εμπλέκονται στην ανάπτυξη και κατασκευή βιομηχανικών προϊόντων να

προσπαθούν να παράγουν όσο το δυνατόν ελκυστικότερα προϊόντα, στον συντομότερο δυνατό χρόνο και με όσο το δυνατόν μικρότερο κόστος *(better-faster-cheaper)*. Η ικανότητα κάθε κατασκευαστή να διατηρεί όσο το δυνατόν υψηλότερη ποιότητα προϊόντος καθ'όλη τη διάρκεια ζωής του *(total life-cycle)* είναι ζωτικής σημασίας για την επιτυχημένη πορεία και θέση του στην παγκόσμια αγορά.

Η πραγματική γεωμετρία του κατασκευασμένου προϊόντος παρουσιάζει μεταβλητότητα σε σύγκριση με την ονομαστική γεωμετρία του μηχανολογικού σχεδίου. Οι διαφορές αυτές που προκύπτουν ανάμεσα στο αρχικό σχέδιο του μηχανολογικού τεμαχίου και στο τελικώς παραχθέν προϊόν επηρεάζουν τη λειτουργική του απόδοση και συνδέονται άμεσα με την ποιότητα του. Ο κάθε κατασκευαστής προσπαθεί να αποκτήσει συνολική εικόνα για τις κατασκευαστικές αποκλίσεις του προϊόντος του, γεγονός το οποίο θα του προσδώσει σημαντικό ανταγωνιστικό πλεονέκτημα. Ο κατάλληλος καθορισμός των επιτρεπτών ορίων μέσα στα οποία πρέπει να κυμαίνεται η γεωμετρία του προϊόντος αποτελεί μια επίπονη και εξαιρετικά σημαντική διαδικασία κατά την ανάπτυξη/ σχεδιασμό του προϊόντος *(mechanical engineering design)*. Ουσιαστικά πρόκειται για τον προσδιορισμό της χρυσής τομής ανάμεσα στο τι είναι εφικτό να παραχθεί με τις διαθέσιμες μεθόδους παραγωγής, στο τι είναι δυνατό να μετρηθεί με επαρκή ακρίβεια και επαναληψιμότητα κατά τον ποιοτικό έλεγχο του προϊόντος και στα εν λόγω όρια που είναι απαραίτητα να τηρηθούν ώστε να εξασφαλιστεί η συναρμολόγηση και η λειτουργική απόδοση του τεμαχίου.

Τα τελευταία χρόνια, η διαρκής προσπάθεια για αύξηση της απόδοσης και μείωση του κόστους, σε συνδυασμό με τις συνεχείς προσπάθειες για επίτευξη νέων τεχνολογικών ανακαλύψεων, έχουν οδηγήσει σε αυξανόμενη ανάγκη για καλύτερη κατανόηση, μέτρηση και έλεγχο της γεωμετρικής μεταβλητότητας σε σύγκριση με τα παραδοσιακά μέσα.

Οι γεωμετρικές ανοχές εισήχθησαν σταδιακά παράλληλα με τις «παραδοσιακές» ανοχές διαστάσεων στα τεχνικά σχέδια, με στόχο την παροχή μιας πιο ολοκληρωμένης εικόνας για τη δεδομένη γεωμετρία του προϊόντος. Έτσι, ενώ με τις διαστασιολογικές ανοχές η γεωμετρική διακύμανση των διαστάσεων συνοψίζεται σε ορισμένους δείκτες που σχετίζονται με τις γραμμικές διαστάσεις, με τις γεωμετρικές ανοχές είναι δυνατόν να απεικονίσουμε ένα ευρύτερο φάσμα διακυμάνσεων που σχετίζονται με τη μορφή, τη θέση και τον προσανατολισμό των γεωμετρικών χαρακτηριστικών. Οι διακυμάνσεις αυτές μπορούν να αντιμετωπιστούν με πιο ολοκληρωμένο και συστηματικό τρόπο και είναι δυνατόν να ορίζουν πιο αποτελεσματικούς περιορισμούς για τον έλεγχο των επιτρεπομένων γεωμετρικών αποκλίσεων.

Οι γεωμετρικές ανοχές αποτελούν βασικό χαρακτηριστικό για τη διασφάλιση ενός ορισμένου επιπέδου ποιότητας που πρέπει να ικανοποιεί το προϊόν, είτε αυτό είναι ένα σύνθετο συναρμολόγημα ή ακόμη και ένα απλό γεωμετρικό χαρακτηριστικό *(feature)*. Κατά συνέπεια οι **γεωμετρικές ανοχές αποτελούν πλέον κοινή πρακτική** για την ποσοτική έκφραση των προδιαγραφών γεωμετρικής ακρίβειας στον σχεδιασμό μηχανολογικών κατασκευών.

1.3 Επιπτώσεις Ανοχών επί του Σχεδιασμού, του Ελέγχου Ποιότητας και επί της Στατιστικής Διαδικασίας Ελέγχου

Η εισαγωγή ολοένα και πιο ολοκληρωμένων και λεπτομερών προσεγγίσεων για τον καθορισμό της γεωμετρικής μεταβλητότητας έχει σημαντικές συνέπειες σε όλες τις πτυχές ανάπτυξης του προϊόντος. Ενώ οι γεωμετρικές ανοχές εισάγουν μια ευρύτερη γκάμα επιλογών στους σχεδιαστές-μηχανικούς για τον καθορισμό των επιτρεπόμενων γεωμετρικών μεταβολών, παράλληλα εγείρονται και πολλά τεχνικά ζητήματα. Ο σχεδιαστής έχει πλέον μεγαλύτερη ποικιλία επιλογών και επομένως πρέπει να λάβει περισσότερες αποφάσεις. Για να λάβει τις αποφάσεις αυτές αποτελεσματικά, πρέπει να πραγματοποιήσει εμπεριστατωμένες έρευνες με σκοπό την καλύτερη κατανόηση της επίδρασης που θα έχουν αυτές στο τελικό προϊόν, είτε άμεση ή έμμεση *(όπως π.χ. ο κάθε περιορισμός σχετικά με τη μορφή / θέση / προσανατολισμό ενός γεωμετρικού στοιχείου)* σε ένα τμήμα ή σε ένα ολόκληρο συγκρότημα, πως μπορούν να μεταβάλλουν τη λειτουργική του απόδοση, ή τη βιομηχανική του χρήση και τελικά το συνολικό κόστος του προϊόντος.

Παρομοίως, νέα προβλήματα προκύπτουν κατά τον έλεγχο ποιότητας. Δεδομένου ότι η ποιότητα συνδέεται με μια πιο ολοκληρωμένη και σύνθετη αναπαράσταση των γεωμετρικών διακυμάνσεων είναι σαφές ότι η επιθεώρηση ποιότητας θα πρέπει να προσαρμοστεί αναλόγως και πιθανόν οι παραδοσιακές προσεγγίσεις μπορεί να μην είναι ικανές να ελέγξουν επιτυχώς τις νέες απαιτήσεις. Η επαλήθευση του αν μια γραμμική διάσταση είναι εντός των ορίων ανοχών είναι σαφώς πιο απλή απ' ό, τι είναι για παράδειγμα η επαλήθευση του αν η απόκλιση κάποιας επιφάνειας ελεύθερης μορφής είναι εντός των προδιαγραφών. Αυξημένες απαιτήσεις αντιμετωπίζουν και οι ερευνητές που δραστηριοποιούνται στο στατιστικό έλεγχο των μεθόδων παραγωγής. Στον τομέα αυτό επίσης εξετάζεται πώς μπορεί να εξελιχθεί ο στατιστικός έλεγχος ώστε να ελέγχεται η γεωμετρική μεταβλητότητα επιφανειών που δεν παρουσιάζουν αποκλειστικά διακυμάνσεις στο μέγεθος των γραμμικών διαστάσεων. Συμπερασματικά η μετάβαση από απαιτήσεις διαστάσεων σε γεωμετρικές απαιτήσεις δημιουργεί σημαντικά θέματα, που χρήζουν μελέτης και περαιτέρω ανάλυσης.

1.4 Συνοπτική Παρουσίαση του Προβλήματος που Πραγματεύεται η ΔΕ

Η Αρχή του Πλήρους Υλικού - ΑΠΥ *(MMC-Maximum Material Condition, ISO 2692:2014)* είναι μια συνήθης πρακτική που εφαρμόζεται ευρύτατα στη φάση διαστασιολόγησης σε μεγάλο πλήθος βιομηχανικά παραγόμενων εξαρτημάτων και μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική αύξηση της ζώνης γεωμετρικής ανοχής και κατά συνέπεια αποδοχής του εξαρτήματος/ προϊόντος χωρίς να επηρεάζεται η ποιότητα του. Αν και η ΑΠΥ λαμβάνεται –αναπόφευκτα- υπόψη κατά τον διαστατικό ποιοτικό έλεγχο, η διευρυμένη ανοχή που προκύπτει από την εφαρμογή της ***δεν λαμβάνεται κατά κανόνα υπόψη στη φάση σχεδιασμού των διαδικασιών παραγωγής*** κι ειδικότερα στον υπολογισμό των δεικτών επάρκειας κατεργασίας (Cp, Cpk κ.α.), γεγονός που έχει αρνητικές συνέπειες στο κόστος παραγωγής.

Βασικός σκοπός της Διπλωματικής Εργασίας (ΔΕ) είναι η ποσοτική διερεύνηση του κατά πόσο και υπό ποιες συνθήκες μπορούν να διευρυνθούν τα όρια καθορισμένης ανοχής αληθούς θέσεως *(True Position tolerance)* - και κατά συνέπεια ο βαθμός αποδοχής των τεμαχίων- στην περίπτωση που έχουμε ***εφαρμογή της Αρχής του Πλήρους Υλικού - ΑΠΥ στα στοιχεία αναφοράς (datum)***

ενός τεμαχίου. Αντικείμενο της ΔΕ είναι η συστηματική ανάλυση των γεωμετρικών συνθηκών και η διατύπωση των μαθηματικών σχέσεων που οδηγούν ***στον υπολογισμό της νέας, επαυξημένης ανοχής αληθούς θέσης*** όπως αυτή διαμορφώνεται όταν ληφθεί υπόψη η εφαρμογή της ΑΠΥ στο/-α στοιχείο/-α αναφοράς. Στόχος της ΔΕ είναι η διερεύνηση της επιρροής των παραπάνω στον ***υπολογισμό των δεικτών επάρκειας κατεργασίας*** (***Cp, Cpk)*** και τελικά στο κόστος παραγωγής των μηχανολογικών εξαρτημάτων και κατασκευών.

Η παραπάνω διερεύνηση καθώς και η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων πραγματοποιούνται μέσω ανάλυσης απλών /θεωρητικών τεμαχίων *(benchmarks)* αλλά και μέσω συγκεκριμένου παραδείγματος από τη βιομηχανική πράξη, εξετάζοντας δύο ίδια τεμάχια όπου στο ένα έχει γίνει εφαρμογή της ΑΠΥ στο στοιχείο αναφοράς ενώ στο άλλο όχι.

1.5 Δομή και οργάνωση της Διπλωματικής Εργασίας

Στις ενότητες που ακολουθούν, η ΔΕ ακολουθεί την παρακάτω δομή και οργάνωση:

Στο δεύτερο κεφάλαιο επιχειρείται σύντομη παρουσίαση/ ανασκόπηση της εξέλιξης, τυποποίησης και ερμηνείας των γεωμετρικών και διαστασιολογικών προδιαγραφών ακρίβειας που εφαρμόζονται στις μηχανολογικές κατασκευές.

Στο τρίτο κεφάλαιο πραγματοποιείται γενική βιβλιογραφική επισκόπηση/ αναφορά για τους τρόπους καθορισμού ανοχών στις μηχανολογικές κατασκευές. Η διαδικασία καθορισμού των επιφανειών των τεμαχίων στα οποία θα εφαρμοσθούν οι ανοχές είναι μια δύσκολη διαδικασία και απαιτεί τόσο εμπειρία όσο και εξειδικευμένες γνώσεις.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται συνοπτικά οι σύγχρονοι τρόποι ανάλυσης των γεωμετρικών ανοχών με τη χρήση συγκεκριμένου βιομηχανικού παραδείγματος κι ειδικότερα τα κυριότερα πέντε μοντέλα ανάλυσης που εντοπίστηκαν στη σχετική βιβλιογραφία *(Vector Loop Model- Variational Model- Matrix Model-The Jacobian Model- Torsor Model).*

Στο πέμπτο κεφάλαιο γίνεται συνοπτική παρουσίαση και ανάλυση των στατιστικών εργαλείων που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο μιας παρτίδας τεμαχίων στο κατά πόσο πληροί τα όρια ανοχών *(statistic process capability).*

Στο έκτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε κι εφαρμόστηκε προκειμένου να δείξουμε πως η χρήση της συνθήκης της Αρχής του Πλήρους Υλικού (MMC) μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση του Cp και συνεπακόλουθα σε αύξηση του ποσοστού αποδεκτών τεμαχίων. Η εφαρμογή της μεθοδολογίας γίνεται καταρχήν με τη μορφή αριθμητικού παραδείγματος σε απλό μηχανολογικό τεμάχιο και ακολουθεί η εφαρμογή σε πραγματικό βιομηχανικό εξάρτημα. Τέλος, σ**το έβδομο κεφάλαιο** εξάγονται συμπεράσματα και αναφέρονται προοπτικές συνέχισης της εργασίας αυτής.

Στο παράρτημα της ΔΕ δίδεται ο κώδικας προγράμματος σε MATLAB που αναπτύχθηκε προκειμένου να ελέγχουμε αν ένα τεμάχιο βρίσκεται εντός των καθορισμένων ορίων της προδιαγραφής αληθούς θέσεως με εφαρμογή ΑΠΥ σε στοιχείο αναφοράς.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΕΣ ΚΑΙ ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΙΚΕΣ ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ ΣΤΙΣ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ

2.1 Ακρίβεια Κατασκευής και Κόστος Παραγωγής στο πλαίσιο του Ολοκληρωμένου Μηχανολογικού Σχεδιασμού

Η ταχεία κι επιτυχής ανάπτυξη νέων προϊόντων τα οποία ανταποκρίνονται με τον πληρέστερο δυνατό τρόπο στις απαιτήσεις του χρήστη, έχουν σταθερή απόδοση καθ' όλη τη διάρκεια ζωής τους και έχουν κατασκευαστεί με τον οικονομικότερο δυνατό τρόπο στην επιθυμητή ποιότητα, αποτελεί βασικό στόχο της Μηχανολογίας ο οποίος τα τελευταία χρόνια επιδιώκεται με την εφαρμογή των αρχών του *Ολοκληρωμένου Μηχανολογικού Σχεδιασμού (Concurrent Engineering).*

Μέχρι και τα μέσα της δεκαετίας του 1980 ο σχεδιασμός ενός προϊόντος εξακολουθούσε, στην πλειοψηφία των περιπτώσεων, να γίνεται δίχως να λαμβάνονται ταυτόχρονα υπόψη όλες οι παράμετροι σχεδιασμού και παραγωγής που συμβάλλουν στην ποιότητα, ακρίβεια λειτουργίας και στο κόστος παραγωγής. Συνήθως τα κατασκευαστικά σχέδια παραδίδονταν στα Τμήματα Παραγωγής, δίχως να έχει αντιμετωπισθεί μία συστηματική θεώρηση εναλλακτικών λύσεων που πιθανώς θα απέφεραν χαμηλότερο κόστος ή/και χρόνο παραγωγής και δίχως να έχει πραγματοποιηθεί ουσιαστική ανάλυση όλων των κρίσιμων παραμέτρων σχεδιασμού. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα την καθυστερημένη ανακάλυψη κατασκευαστικών αδυναμιών του σχεδιασμού, την αδυναμία ανταπόκρισης των μεθόδων ή/και μέσων παραγωγής ή/και των υλικών στις απαιτήσεις της κατασκευής, την υποβάθμιση της ποιότητας του τελικού προϊόντος, την πρόκληση σημαντικού ποσοστού απορρίψεων, και, κατ' ακολουθία, το σημαντικά αυξημένο έναντι του προϋπολογισμένου, τελικό χρόνο και κόστος παραγωγής.

Σήμερα ο Ολοκληρωμένος Μηχανολογικός Σχεδιασμός προϋποθέτει τη συγχρονισμένη και συντονισμένη συνεργασία όλων των εμπλεκόμενων στην ανάπτυξη, σχεδιασμό και παραγωγή ενός βιομηχανικού προϊόντος, ενσωματώνει σύγχρονες διαδικασίες ανάλυσης και βελτιστοποίησης κρίσιμων παραμέτρων σχεδιασμού, παραγωγής, υλικών καθώς και συστηματική αντιμετώπιση δυνητικών αστοχιών παραγωγής και συναρμολόγησης που, συνολικά όλα τους, συντελούν στον προσδιορισμό της καλύτερης εφικτής κατασκευαστικής *λύσης*. Ταυτόχρονα αναπτύσσονται κι εξελίσσονται ολοένα και περισσότερα λογισμικά CAE (CAD/CAM//CAPP/CAQ/FEA/VR κ.α.) που τον υποστηρίζουν με στόχο την πλήρη συμμόρφωση στις τεχνικές προδιαγραφές αμέσως με την παραγωγή του πρώτου προϊόντος. Η χρήση τεχνικών Ταχείας Κατασκευής Πρωτοτύπων (RP/RP) συμβάλει επίσης προς την κατεύθυνση αυτή.

Τα τρία βασικά στάδια σχεδιασμού ενός προϊόντος, στα πλαίσια του Ολοκληρωμένου Μηχανολογικού Σχεδιασμού, είναι η κατασκευαστική σύνθεση, η κατασκευαστική διαμόρφωση και ο λεπτομερής σχεδιασμός.

Κατά το στάδιο της *κατασκευαστικής σύνθεσης* αναγνωρίζονται και αναλύονται οι απαιτήσεις για το νέο προϊόν και καθορίζονται οι *ειδικές και τεχνικές προδιαγραφές σχεδιασμού*. Αναπτύσσονται εναλλακτικές κατασκευαστικές λύσεις σε συμμόρφωση με τις προδιαγραφές που αξιολογούμενες συγκλίνουν στην επιλεκτέα λύση. Το στάδιο της κατασκευαστικής σύνθεσης προϋποθέτει δημιουργικότητα, περιέχει την περισσότερη αβεβαιότητα, απαιτεί συνεργασία μεταξύ διαφόρων τμημάτων του οργανισμού καθώς και συλλογή δεδομένων σχετικών με τον ανταγωνισμό, δικαιώματα ευρεσιτεχνιών, έρευνα και ανάπτυξη, κλπ. Με την κατασκευαστική σύνθεση το γενικό σύνολο διαχωρίζεται στα επιμέρους υποσύνολα και στοιχεία που το αποτελούν, ενώ οι σχέσεις μεταξύ των υποσυνόλων και εξαρτημάτων καθορίζονται με τέτοιο τρόπο ώστε να εξασφαλίζουν τις λειτουργίες του σχεδιασμού. Σε πρώτη φάση προσδιορίζονται τα στοιχεία γεωμετρίας που συγκροτούν κάθε εξάρτημα και η θέση τους στο χώρο, καθορίζονται ονομαστικά οι διαστάσεις κάθε στοιχείου, ενώ με διαδικασίες μοντελοποίησης και προσομοίωσης ελέγχεται η λειτουργία του προϊόντος και η ικανοποίηση των προδιαγραφών.

Στο στάδιο της *κατασκευαστικής διαμόρφωσης* η επιλεχθείσα λύση εξελίσσεται σε ένα συγκροτημένο προϊόν. Σε αυτό καθορίζονται *πλήρως οι κρίσιμες παράμετροι σχεδιασμού* δηλ. τα υλικά, οι γεωμετρικές μορφές, ***οι διαστάσεις, οι γεωμετρικές και διαστασιολογικές ανοχές,*** οι ποιότητες και ιδιότητες επιφανειών, κλπ. Ο παραμετρικός σχεδιασμός έχει ενσωματωθεί στο σχεδιασμό προϊόντος τα τελευταία χρόνια εξαιτίας της ολοένα αυξανόμενης απαίτησης για βελτίωση ποιότητας και εξασφάλιση υψηλής ακρίβειας λειτουργίας κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής των προϊόντων. Στόχος του παραμετρικού σχεδιασμού είναι ο καθορισμός εκείνων των τιμών παραμέτρων που ελαχιστοποιούν την ευαισθησία του προϊόντος σε διάφορες πηγές θορύβων, εξασφαλίζουν τις προδιαγραφές λειτουργίας και αποδίδονται με το μικρότερο κόστος κατασκευής.

Κατά το στάδιο της κατασκευαστικής διαμόρφωσης συνυπολογίζονται επίσης τεχνολογικές πληροφορίες που αφορούν στις μεθόδους και τα μέσα παραγωγής και συναρμολόγησης και το κόστος παραγωγής. Στην περίπτωση υψηλού κόστους προτείνονται αλλαγές στο υλικό ή/και στη μέθοδο παραγωγής ή/και στις τιμές των κρίσιμων παραμέτρων σχεδιασμού. Προφανώς, η συντονισμένη συνεργασία εξειδικευμένων μηχανικών διαφορετικών ειδικοτήτων *(κατασκευαστών, υλικών, μεθόδων και μέσων παραγωγής, προγραμματισμού και ελέγχου παραγωγής, κοστολόγων)* επιβάλλεται σε αυτό το στάδιο.

Στο τελευταίο βασικό στάδιο σχεδιασμού πριν την έναρξη της παραγωγής, στο στάδιο του *λεπτομερούς σχεδιασμού*, παράγεται η ολοκληρωμένη και αναλυτική περιγραφή του προϊόντος σε λεπτομερή κατασκευαστικά σχέδια. Κάθε κατασκευαστικό σχέδιο εξαρτήματος περιέχει πληροφορίες σχετικά με τη μορφή, τις διαστάσεις, τις ανοχές, τις ιδιότητες επιφανειών, το υλικό, τη διαδικασία παραγωγής, κ.α. Τα δισδιάστατα και τρισδιάστατα σχέδια εξαρτημάτων και συναρμολογημένων συνόλων δημιουργούνται συνήθως σε σχεδιαστικά προγράμματα 3D-CAD και αναφέρονται σε ηλεκτρονικό κοινό αρχείο με το τρισδιάστατο στερεό μοντέλο της κατασκευής.

Ο καθορισμός ***κατασκευαστικών ανοχών*** στο τρίτο βασικό στάδιο του σχεδιασμού ελαχιστοποιεί την πιθανότητα αποτυχίας συναρμολόγησης ή μη εξασφάλισης των προδιαγραφών λειτουργίας, ενώ εξοικονομείται χρόνος και κόστος που θα καταβαλλόταν για τη διόρθωση αποκλίσεων που θα γινόντουσαν αντιληπτές κατά την παραγωγή ή/και τη χρήση και, ασφαλώς, περιορισμός των απορρίψεων στο ελάχιστο. Αυστηρότερες ανοχές κατασκευής για καλλίτερη ποιότητα προϊόντος συνεπάγονται όμως, σχεδόν πάντοτε, εκθετική αύξηση του κόστους παραγωγής. Καθώς το κόστος αποτελεί σήμερα καθοριστική ανταγωνιστική παράμετρο αγοράς, *ο καθορισμός βέλτιστων ανοχών στα πλαίσια του Ολοκληρωμένου Μηχανολογικού Σχεδιασμού επικεντρώνεται στην εξασφάλιση των προδιαγραφών ποιότητας και ακρίβειας λειτουργίας του προϊόντος με το χαμηλότερο δυνατό κόστος παραγωγής.* Υιοθετώντας την παραπάνω αρχή επιτυγχάνεται η ανάπτυξη/ σχεδιασμός βέλτιστων – κατασκευαστικά και κοστολογικά – προϊόντων, τα οποία τελικά θα μπορούν να παραχθούν με υπάρχοντα υλικά και εφικτά τεχνικά μέσα κατά τον οικονομικότερο και συντομότερο τρόπο στην επιθυμητή ποιότητα.

Με αφετηρία τη σύγχρονη αυτή τάση βέλτιστου σχεδιασμού προϊόντων, ένας σημαντικός αριθμός μεθοδολογιών για καθορισμό κατασκευαστικών ανοχών με έμφαση στην ελαχιστοποίηση του κόστους έχουν αναπτυχθεί και γίνεται προσπάθεια για την ενσωμάτωσή τους σε υπολογιστικά προγράμματα. Ωστόσο ο αριθμός των λογισμικών που υποστηρίζουν καθορισμό βέλτιστων ανοχών και ανήκουν στην κατηγορία αυτή είναι μέχρι σήμερα εξαιρετικά περιορισμένος, ενώ παράλληλα διαπιστώνεται σε αυτά η αδυναμία για συστηματικό καθορισμό της σχέσης κόστους – ακρίβειας κατασκευής και εξασφάλιση της πραγματικά βέλτιστης λύσης.

2.2 Ακρίβεια Μηχανολογικών Κατασκευών

Βασικά χαρακτηριστικά της ποιότητας μιας μηχανολογικής κατασκευής είναι η ακρίβεια με την οποία έχουν κατασκευαστεί τα στοιχεία που την αποτελούν καθώς και η ακρίβεια συναρμολόγησή τους σε ένα ενιαίο λειτουργικό προϊόν. Η **ακρίβεια κατασκευής ενός μηχανολογικού στοιχείου** αναφέρεται στη διαστασιολογική και γεωμετρική πιστότητα με την οποία έχουν αποδοθεί από την εφαρμοζόμενη μέθοδο παραγωγής οι διαστάσεις και επιφάνειές του. Η απόλυτη ακρίβεια παραγωγής συνιστά μια από τις πιο βασικές προϋποθέσεις για μηχανολογική κατασκευή ιδανική ποιότητας. Ωστόσο, όπως προαναφέρθηκε, είναι πρακτικά αδύνατο να αποδοθούν ακόμα και με τη χρήση των τελειότερων και πιο σύγχρονων μεθόδων παραγωγής οι θεωρητικές/ονομαστικές διαστάσεις και επιφάνειες όπως προδιαγράφονται στα κατασκευαστικά σχέδια. Το ίδιο ισχύει και για την ιδανική διαστασιολογική και γεωμετρική ακρίβεια και λειτουργικότητα συναρμογής ενός μηχανολογικού συνόλου που αποτελείται από δύο ή περισσότερα στοιχεία.

Γενικά υπάρχουν δύο ομάδες ανεπιθύμητων και εκτός ελέγχου παραγόντων που προκαλούν αποκλίσεις από τις ονομαστικές δηλ. ιδανικές καταστάσεις μεγέθους, γεωμετρίας και λειτουργίας: *οι εξωτερικοί και εσωτερικοί θόρυβοι.*

Τυπικοί **εξωτερικοί θόρυβοι** είναι οι επιρροές του περιβάλλοντος στο οποίο χρησιμοποιείται και λειτουργεί η κατασκευή (θερμοκρασία, ατμοσφαιρική πίεση, υγρασία, μόλυνση, κραδασμοί), οι συνθήκες καταχρηστικής ή λανθασμένης χρήσης, η ατελής συντήρηση καθώς και η ηλικία (φθορές τριβής, απώλεια ελαστικότητας, αλλοίωση/γήρανση υλικών, κλπ.)

Οι **εσωτερικοί θόρυβοι ακρίβειας κατασκευής** είναι αυτοί που προέρχονται από τις αναπόφευκτες αδυναμίες ή/και ατέλειες της παραγωγής. Η μηχανουργική κατεργασία ενός στοιχείου πραγματοποιείται σε μία ή περισσότερες διαδοχικές φάσεις στην ίδια ή σε διαφορετικές εργαλειομηχανές. Τα σφάλματα κατεργασίας μιας ενδιάμεσης φάσης επηρεάζουν την ακρίβεια κατεργασίας της φάσης που ακολουθεί και στη συνέχεια την τελική ακρίβεια της κατεργασίας που αποδίδει η (οι) φάσης (φάσεις) αποπεράτωσης. Ένα σφάλμα κατεργασίας αντιπροσωπεύει την αναπόφευκτη απόκλιση από την ονομαστική τιμή, που όμως δεν οφείλεται σε συστηματική αιτία τεχνολογικής ή ανθρώπινης προέλευσης αλλά σε αμιγώς τεχνολογικά επιβαλλόμενα αίτια όπως π.χ. ελαττωματική λειτουργία των εργαλειομηχανών, ελαστικές παραμορφώσεις κατά την κατεργασία, φθορά του κοπτικού εργαλείου ή της εργαλειομηχανής, σφάλματα από μετρήσεις και ρυθμίσεις, δυνάμεις ροπής και μετατοπίσεις κατά την πρόσδεση, κλπ.

Οι αποκλίσεις που προκύπτουν ως συνέπεια των θορύβων παραγωγής διαχωρίζονται στις **διαστασιολογικές και γεωμετρικές αποκλίσεις**. Η αναγνώριση της πραγματικότητας, ότι δηλ. οι αναπόφευκτες πρακτικά αποκλίσεις και τα σφάλματα παραγωγής καθιστούν ανέφικτη την επίτευξη της απόλυτης ακρίβειας παραγωγής, επέβαλλε τον **καθορισμό ορίων στις ανεκτές ή αναγκαίες αποκλίσεις γεωμετρίας και διαστάσεων, δηλαδή την προδιαγραφή γεωμετρικών και διαστασιολογικών ανοχών στα κατασκευαστικά σχέδια.**

Ο όρος **ανοχή** γενικά αναφέρεται στη διαφορά μεταξύ μιας μέγιστης και μιας ελάχιστης επιτρεπόμενης τιμής ενός τεχνικού χαρακτηριστικού που μπορεί να μετρηθεί, όπως π.χ. μιας διάστασης μηχανολογικού στοιχείου.

Γενικά οι διαστάσεις και οι επιφάνειες μιας κατασκευής διακρίνονται σε:

- **Άμεσα λειτουργικές διαστάσεις ή επιφάνειες** που είναι βασικής σημασίας για την ακρίβεια και ποιότητα της κατασκευής (π.χ. διάμετρος έδρασης άξονα κίνησης / εσωτερική επιφάνεια υδραυλικού κυλίνδρου)
- **Έμμεσα λειτουργικές διαστάσεις ή επιφάνειες** που δεν έχουν πρωτεύοντα ρόλο στη λειτουργία της κατασκευής (π.χ. μήκος άξονα κίνησης / εξωτερική επιφάνεια υδραυλικού κυλίνδρου)

Είναι προφανές ότι ο καθορισμός **λειτουργικών ανοχών** αφορά στις άμεσα λειτουργικές διαστάσεις και επιφάνειες αφού αυτές έχουν εξ ορισμού περιορισμένα περιθώρια επιτρεπτών αποκλίσεων δηλαδή μικρά πεδία ανοχών. Προορισμός των λειτουργικών ανοχών είναι η εξασφάλιση της προβλεπόμενης από το σχεδιασμό λειτουργίας της συγκεκριμένης κατασκευής. Για την κατασκευή όμως ενός στοιχείου οι λειτουργικές ανοχές δεν είναι πάντοτε άμεσα χρησιμοποιήσιμες από τη μέθοδο, τα μέσα και τον προγραμματισμό των διαδικασιών της παραγωγής του. Συχνά απαιτείται κατάλληλος **μετασχηματισμός τους σε κατασκευαστικές ανοχές,** οι οποίες μπορούν να υλοποιηθούν από τη μέθοδο παραγωγής και στη συνέχεια να αποτελέσουν θέσεις ποιοτικού ελέγχου. Λειτουργικές ανοχές και κατασκευαστικές ανοχές είναι δυνατό να συμπίπτουν, αλλά συνήθως ο μετασχηματισμός αυτός είναι αναγκαίος.

Ο όρος καθορισμός ανοχών αναφέρεται σε μια διαδικασία κατά την οποία προδιαγράφονται οι λειτουργικές ή/και κατασκευαστικές ανοχές ενός εξαρτήματος ή συναρμολογημένου συνόλου με

κυρίαρχο στόχο την ικανοποίηση των απαιτήσεων λειτουργίας και ποιότητας του συγκεκριμένου μηχανολογικού προϊόντος.

Αρχική προϋπόθεση για τον επιτυχή προσδιορισμό των ανοχών είναι η γνώση των προδιαγραφών λειτουργίας του προϊόντος. Οι προδιαγραφές λειτουργίας υποδεικνύουν τις **κρίσιμες/καταληκτικές διαστάσεις ή/και γεωμετρίες** μιας κατασκευής και καθορίζουν την ονομαστική τιμή και τις ανεκτές αποκλίσεις τους. Σε ένα συναρμολογημένο σύνολο η κρίσιμη διάσταση μπορεί να είναι μια αθροιστική εξωτερική ή εσωτερική, γραμμική ή ακτινική διάσταση του συνόλου, συναρμογή, διάκενο, διαδρομή κατεργασίας, γωνία μεταξύ επιφανειών κλπ. Ένα σύνολο εξαρτημάτων μπορεί να έχει περισσότερες από μία κρίσιμες διαστάσεις όπως πιθανόν να υποδεικνύουν οι τεχνικές προδιαγραφές συναρμολόγησης του προϊόντος.

Ο καθορισμός λειτουργικών ή/και κατασκευαστικών ανοχών και η καταχώρησή τους στα μηχανολογικά σχέδια εμφανίζεται για πρώτη φορά στις αρχές του 20^{ου} αιώνα και απορρέει κυρίως από την ανάγκη για ελεγχόμενη παραγωγή κομματιών με συγκεκριμένη ακρίβεια και επίτευξη εναλλαξιμότητας κατά τη συναρμολόγηση. Ερευνητικές εργασίες για συστηματικό καθορισμό βέλτιστων ανοχών αρχίζουν να εμφανίζονται κυρίως από τη δεκαετία του 1970 ενώ από τη δεκαετία 1980 και εντεύθεν σχετικές προσεγγίσεις ενάγονται στο πλαίσιο του Ολοκληρωμένου Μηχανολογικού Σχεδιασμού. Οι βασικές τεχνικές που χρησιμοποιούνται για αυτό το σκοπό είναι η **Ανάλυση Ανοχών** και η **Σύνθεση Ανοχών.**

Στην **Ανάλυση Ανοχών** υπολογίζονται οι *ανοχές των κρίσιμων/καταληκτικών διαστάσεων ενός μηχανολογικού συνόλου* βάσει γνωστών επιμέρους ανοχών του συνόλου χρησιμοποιώντας διάφορες μεθόδους ανάλυσης, π.χ. Δυσμενέστερης Περίπτωσης, Στατιστική, Quadrature, Προσομοίωση Monte Carlo. Στη συνέχεια, τα υπολογισμένα πεδία ανοχών των κρίσιμων διαστάσεων συγκρίνονται με τα προδιαγραφόμενα, όπως αυτά υποδεικνύονται από τις προδιαγραφές του προϊόντος, και υπολογίζεται το πιθανό ποσοστό απορρίψεων. Στην περίπτωση που το ποσοστό απορρίψεων είναι μεγαλύτερο από το επιθυμητό μεταβάλλονται κατάλληλα μερικές ή όλες από τις επιμέρους ανοχές μέχρι να ικανοποιηθούν κατά τον επιθυμητό βαθμό οι προδιαγραφόμενες τιμές. Η Ανάλυση Ανοχών καθορίζει ανοχές που εγγυώνται τη συναρμολόγηση και λειτουργία ενός προϊόντος, ωστόσο δεν λαμβάνει υπόψη την επίδραση των ανοχών στο κόστος παραγωγής με αποτέλεσμα οι επιμέρους ανοχές να μην αποτελούν κατ' ανάγκη βέλτιστη κοστολογικά κατασκευαστική λύση.

Ως εναλλακτική λύση, η **Σύνθεση Ανοχών** – ονομάζεται επίσης **Καθορισμός Βέλτιστων Ανοχών** – υπολογίζει *τις βέλτιστες ανοχές των επιμέρους διαστάσεων ενός μηχανολογικού συνόλου* οι οποίες ικανοποιούν τις ανοχές των κρίσιμων διαστάσεων και ταυτόχρονα παράγονται με το ελάχιστο κόστος επίτευξης ακρίβειας. Η βιομηχανική πράξη έχει καταδείξει ότι ο καθορισμός μικρών ανοχών συνεπάγεται εκθετική αύξηση του κόστους κατασκευής, ενώ ο καθορισμός μεγάλων ανοχών μπορεί να επηρεάσει αρνητικά την ποιότητα και απόδοση του συνόλου. Για τον υπολογισμό του βέλτιστου κοστολογικά συνδυασμού ανοχών χρησιμοποιούνται κατάλληλοι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης οι οποίοι μεταβάλλουν τις επιμέρους ανοχές μέχρι την εύρεση εκείνου του συνδυασμού που ελαχιστοποιεί το συνολικό κόστος επίτευξης ακρίβειας και ταυτόχρονα ικανοποιεί τους περιορισμούς λειτουργίας. Η Σύνθεση Ανοχών χαρακτηρίζεται ως η καταλληλότερη τεχνική για βέλτιστο σχεδιασμό ενός προϊόντος, καθώς αποβλέπει στη βέλτιστη απόδοση κύκλου – ζωής με το μικρότερο δυνατό κόστος.

2.3 Διαστασιολογικές Ανοχές κατά το Σύστημα Ανοχών – Συναρμογών ISO 286

Βασικές έννοιες και ορισμοί

Όροι και έννοιες που χρησιμοποιούνται κατά το σχεδιασμό μηχανολογικών συναρμογών δύο στοιχείων είναι οι παρακάτω :

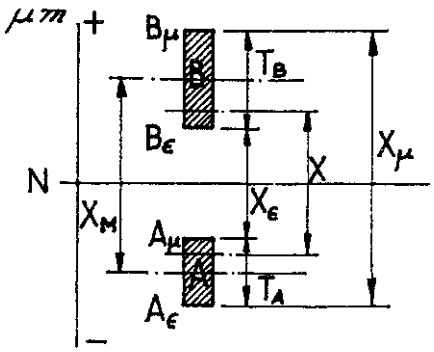
Ανοχή συναρμογής : Είναι το άθροισμα των (διαστασιολογικών) ανοχών άξονα και τρύματος,
$T = T_A + T_B$

Χάρη – Σύσφιγξη: Οι έννοιες της χάρης και της σύσφιγξης αναφέρονται *αποκλειστικά και μόνο* στη συναρμολόγηση ενός άξονα με ένα τρύμα. και προσδιορίζουν *το είδος της συναρμογής* που προκύπτει.

Χάρη είναι η διαφορά της πραγματικής διάστασης του άξονα από την πραγματική διάσταση του τρύματος εφόσον η τελευταία είναι μεγαλύτερη από την πρώτη. Συμβολίζεται με το γράμμα Χ,
$X = B - A$
Η *μέγιστη χάρη της συναρμογής* προκύπτει ως η διαφορά του ελάχιστου άξονα από το μέγιστο τρύμα, **Σχ.2.1,**

$X_\mu = B_\mu - A_\varepsilon$
όπου,
μέγιστο τρύμα $B_\mu = B_\varepsilon + T_B$
ελάχιστος άξονας $A_\varepsilon = A_\mu - T_A$

και η *ελάχιστη χάρη της συναρμογής* ως η διαφορά του μέγιστου άξονα από το ελάχιστο τρύμα,
$X_\varepsilon = B_\varepsilon - A_\mu$
όπου,
ελάχιστο τρύμα $B_\varepsilon = B_\mu - T_B$
μέγιστος άξονας $A_\mu = A_\varepsilon + T_A$



Σχ.2.1 Ελεύθερη συναρμογή – μεγέθη

Μέση χάρη X_M μιας συναρμογής άξονα – τρύματος είναι η χάρη που προκύπτει από τις διαστάσεις άξονα και τρύματος που βρίσκονται στο μέσο των αντίστοιχων πεδίων ανοχών τους. Από το **Σχ.2.1** η μέση χάρη υπολογίζεται ως ίση προς,

$$X_M = (X_\varepsilon + X_\mu) / 2$$

καθώς επίσης και ως,

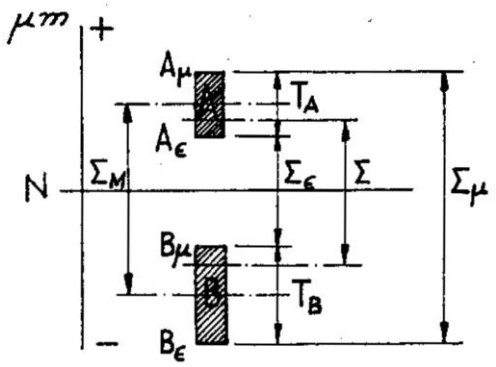
$$X_M = X_\varepsilon + (T_A + T_B) / 2$$

Σύσφιγξη είναι η διαφορά της πραγματικής διάστασης του τρύματος από την πραγματική διάσταση του άξονα εφόσον η τελευταία είναι μεγαλύτερη από την πρώτη. Συμβολίζεται με το γράμμα Σ,

$\Sigma = A - B$

Κατ' αναλογία προς τα της χάρης, **Σχ.2.2**,

μέγιστη σύσφιγξη $\Sigma_\mu = A_\mu - B_\varepsilon$



Σχ.2.2 Σφικτή συναρμογή – μεγέθη

ελάχιστη σύσφιγξη $\Sigma_\varepsilon = A_\varepsilon - B_\mu$

μέση σύσφιγξη $\Sigma_M = (\Sigma_\varepsilon + \Sigma_\mu) / 2$

ή και,

$$\Sigma_M = \Sigma_\varepsilon + (T_A + T_B) / 2$$

Συνήθως η σύσφιγξη ονομάζεται και *αρνητική χάρη* ($\Sigma = -X$) και στις εφαρμογές στις περισσότερες περιπτώσεις γίνεται χρήση μόνο του συμβόλου Χ με πρόσημο.

Είδη και τύποι συναρμογών

Το μέγεθος και το πρόσημο της χάρης καθορίζουν *το είδος της συναρμογής* και επομένως την ελευθερία σχετικής κίνησης μεταξύ άξονα και τρύματος *κατά και μετά τη συναρμολόγησή* τους. Η ελευθερία αυτή της σχετικής κίνησης μεταξύ άξονα και τρύματος στο συναρμολογημένο πλέον σύνολο είναι και δηλωτική του χαρακτήρα της συναρμογής, με **τ**ον όρο δηλ. **χαρακτήρας συναρμογής** εννοείται το πώς εμφανίζεται αυτή κρινόμενη από την άποψη του βαθμού ελευθερίας της . Ο χαρακτήρας μιας συναρμογής καθορίζεται από την τιμή και το πρόσημο της μέσης χάρης X_M.

Διακρίνονται τα παρακάτω τρία είδη συναρμογών :

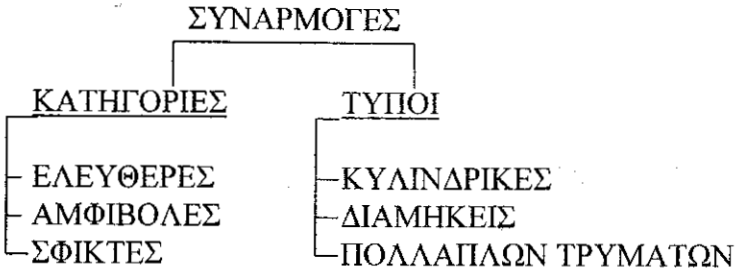
Ελεύθερες συναρμογές είναι οι συναρμογές εκείνες στις οποίες ακόμα και ο μέγιστος αποδεκτός άξονας είναι μικρότερος και από το ελάχιστο αποδεκτό τρύμα. Δηλ. και στην πλέον οριακή περίπτωση *το συναρμολογημένο σύνολο έχει (θετική) χάρη,*

Σφικτές συναρμογές είναι οι συναρμογές εκείνες στις οποίες ακόμα και ο ελάχιστος αποδεκτός άξονας είναι μεγαλύτερος και από το μέγιστο αποδεκτό τρύμα. Δηλ. και στην πλέον οριακή περίπτωση *το συναρμολογημένο σύνολο έχει σύσφιγξη (αρνητική χάρη),*

Συναρμογές αμφίβολης σύσφιγξης είναι οι συναρμογές εκείνες που στα πεδία ανοχών τους είναι δυνατό να υπάρχουν ζεύγη αξόνων – τρυμάτων που να δίνουν ελεύθερη συναρμογή, καθώς επίσης και ζεύγη αξόνων – τρυμάτων που να δίνουν σφικτή συναρμογή

Στις συναρμογές αμφίβολης σύσφιγξης *η μέγιστη τιμή της χάρης* $X_\mu = B_\mu - A_\varepsilon$ είναι *θετική* (γι'αυτό άλλωστε γίνεται λόγος για «χάρη»), ενώ *η ελάχιστη χάρη* $X_\varepsilon = B_\varepsilon - A_\mu$ είναι *αρνητική*, δηλ. σύσφιγξη και μάλιστα η μέγιστη Σ_μ.

Στη *συναρμολογημένα μηχανολογικά σύνολα* διακρίνονται επίσης και τρεις *τύποι συναρμογών: κυλινδρική, διαμήκης, πολλαπλών τρυμάτων*. Εξ αυτών οι δύο τελευταίοι αφορούν στις ελεύθερες κυρίως συναρμογές, **Σχ.2.3**



Σχ.2.3

2.4 Γεωμετρικές Ανοχές – Τύποι

Στις μηχανολογικές κατασκευές, ένα συναρμολογημένο σύνολο ή ένα μηχανολογικό εξάρτημα καθορίζονται στο χώρο τόσο από τις διαστάσεις και τις ανοχές τους, όσο και από τις επιφάνειές τους. Οι επιφάνειες αυτές μπορούν να *συνεργάζονται* με αντίστοιχες επιφάνειες άλλων συνόλων ή εξαρτημάτων και να δέχονται φυσικές, χημικές και βιολογικές επιδράσεις από το περιβάλλον. Η καταλληλότητα των επιφανειών στις κομματιού, για το σκοπό που το κομμάτι αυτό προορίζεται, προσδιορίζεται από χαρακτηριστικά που διακρίνονται σε:

- Χημικά π.χ. χημική σύνθεση, δυνατότητα αντιδράσεων, αντοχή στη διάβρωση κ.α.
- Φυσικά, π.χ. υφή, σκληρότητα, επιφανειακές τάσεις, θερμική αντοχή, κ.α.
- Γεωμετρικά, (μακρο– και μικρο-) π.χ. κρυσταλλική δομή, τραχύτητα, κυμάτωση, ρωγμές, αποκλίσεις μορφής, θέσης, προσανατολισμού, κ.α.

Για το σχεδιασμό της κατασκευαστικής διαμόρφωσης των μηχανολογικών κατασκευών ενδιαφέρουν μόνο *τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των επιφανειών* λαμβανομένων στις επιπροσθέτως υπόψη των παρακάτω:

- Κάθε εξάρτημα με όσο μεγάλη ακρίβεια και αν έχει κατασκευασθεί παρουσιάζει πάντοτε αποκλίσεις από την ιδανική του γεωμετρική μορφή.
- *Οι γεωμετρικές αποκλίσεις* διακρίνονται σε : *Μακροσκοπικές* οι οποίες είναι οι αποκλίσεις των διαστάσεων, της μορφής, της θέσης και του προσανατολισμού, και σε *μικροσκοπικές* στις η κυμάτωση και τραχύτητα των επιφανειών.
- Κατά κανόνα η σχέση μεταξύ των αποστάσεων των μακροσκοπικών αποκλίσεων μορφής και του βάθους τους είναι της τάξης >1000:1.

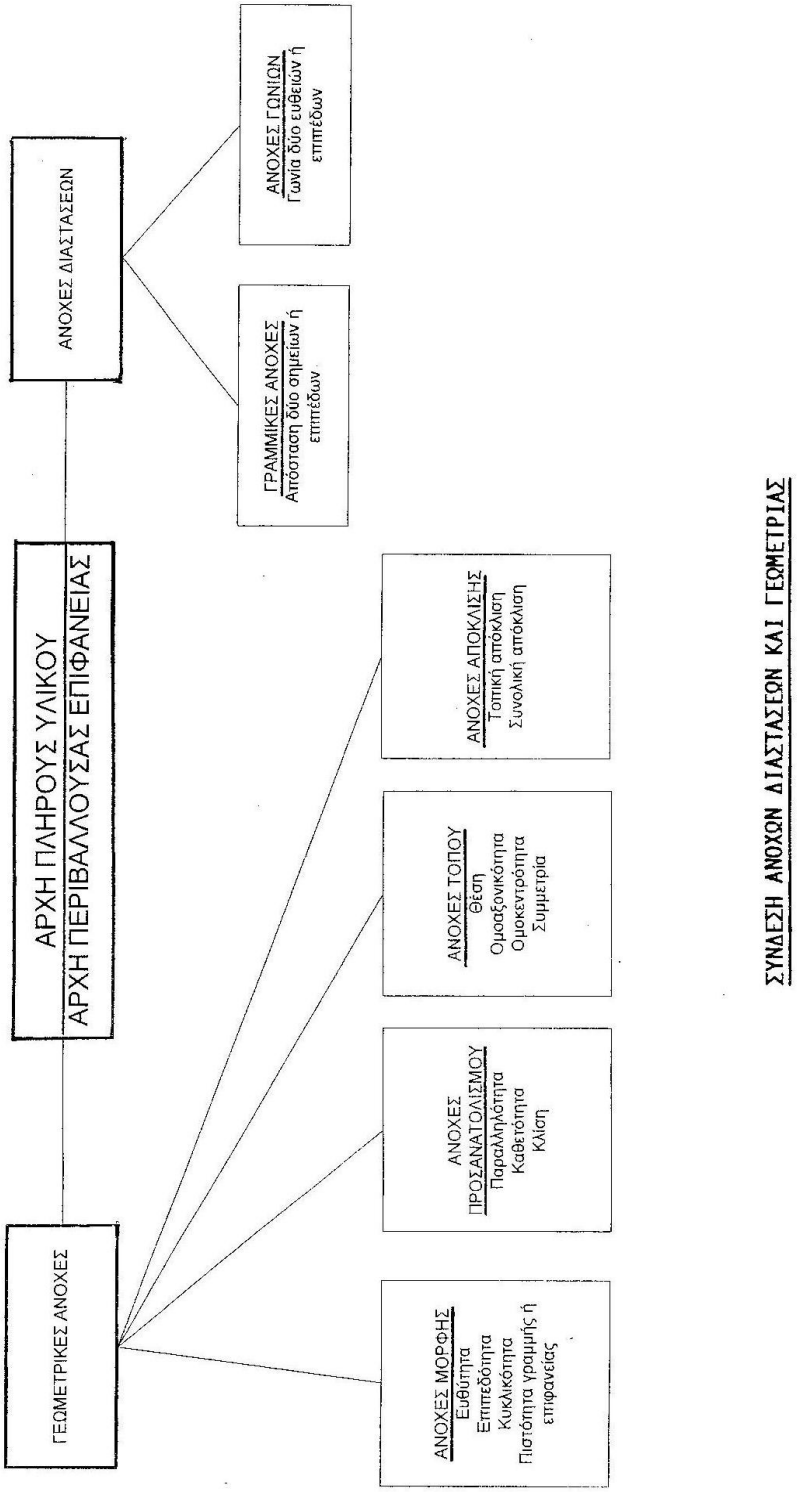
- Οι κυματώσεις είναι κανονικά ή ακανόνιστα επαναλαμβανόμενες επιφανειακές αποκλίσεις, όχι πάντοτε κατ'ανάγκη κυματικής μορφής. Ανάλογα με το μέγεθός τους μπορούν να ανήκουν στις μικρο-ή και στις μακροσκοπικές αποκλίσεις. Η σχέση του μήκους των κυμάτων προς το βάθος τους είναι κατά κανόνα της τάξης 1000:1 μέχρι 100:1.
- Οι τραχύτητες είναι κανονικά ή ακανόνιστα επαναλαμβανόμενες αυλακώσεις των επιφανειών που οι αποστάσεις μεταξύ τους ισοδυναμούν με ένα σχετικά μικρό πολλαπλάσιο του βάθους τους. Ανήκουν στις *λεπτοσκοπικές αποκλίσεις*.

Η ραγδαία τεχνολογική εξέλιξη της εποχής τόσο σε προϊόντα όσο και σε μεθόδους και μέσα παραγωγής έχει καταστήσει, όπως ήδη αναφέρθηκε, επιτακτικό τον καθορισμό και *γεωμετρικών ανοχών κατασκευής παράλληλα με τις ανοχές διαστάσεων και τις ποιότητες των επιφανειών*. Η ανάγκη αυτή έχει γίνει πιεστικότερη τα τελευταία χρόνια λόγω των συνεχώς αυξανόμενων απαιτήσεων για λειτουργική ακρίβεια και απόδοση και για χαμηλό κόστος παραγωγής. Εκ των πραγμάτων συνεπώς σήμερα και για στις περισσότερες εφαρμογές, σε αντίθεση με ότι συνέβαινε πριν από λίγα σχετικά χρόνια, η χρησιμοποίηση μόνο ανοχών διαστάσεων δεν είναι ανεκτή τόσο στα μηχανολογικά κατασκευαστικά σχέδια όσο και στην παραγωγή και στον ποιοτικό έλεγχο. Σε κάθε περίπτωση απεναντίας, κρίνεται εάν είναι αναπόφευκτη η προδιαγραφή μιας αυστηρής ανοχής διάστασης, είτε εάν οι λειτουργικές απαιτήσεις δίνουν *προτεραιότητα* στην ακρίβεια της γεωμετρίας της κατασκευής και κατά ποιο τρόπο ανοχή διάστασης, επιτρεπόμενες γεωμετρικές αποκλίσεις, κόστος παραγωγής συνδυάζονται κατά τον ποιοτικά και κοστολογικά καλύτερο τρόπο μεταξύ στις. *Παραδείγματα* : (α) Κυκλικότητα της κυλινδρικής επιφάνειας τορνευτού κομματιού - Διάμετρος τόρνευσης - Ανοχές διαμέτρου τόρνευσης (β) Παραλληλότητα μεταξύ δύο επιφανειών- Απόσταση μεταξύ των επιφανειών αυτών - Ανοχές της απόστασης.
Σε πολλές εφαρμογές επιδιώκεται προβάδισμα στον καθορισμό γεωμετρικών ανοχών, διότι έχει αποδειχθεί στην πράξη ότι έτσι μπορεί να επιτευχθεί χαμηλότερο τελικό κόστος παραγωγής. *Παράδειγμα* : Καθορισμός μιας διάταξης οπών με σπείρωμα μέσω θεωρητικών διαστάσεων και γεωμετρικών ανοχών θέσης αντί μέσω καρτεσιανών συντεταγμένων και αντίστοιχων καρτεσιανών ανοχών.

Γεωμετρικές ανοχές και η συναφής με αυτές μεθοδολογία και τυποποίηση άρχισαν να γίνονται αντικείμενο μελέτης και σποραδικά να χρησιμοποιούνται στις μηχανολογικές κατασκευές κατά την δεκαετία 1940-1950. Η συστηματική εισαγωγή στις στην βιομηχανία προωθήθηκε με στις πρώτους συναφείς κανονισμούς ISO την περίοδο 1969-1972 και με στις αντίστοιχους εθνικούς κανονισμούς που έκτοτε ακολούθησαν. Η καθολική στις εφαρμογή στις στον σχεδιασμό, την παραγωγή και τον ποιοτικό έλεγχο καθιερώθηκε σταδιακά συμπίπτοντας χρονικά με την ανάπτυξη και την διάδοση των εργαλειομηχανών NC/CNC καθώς και με την τεχνολογική έκρηξη στις τελευταίας εικοσιπενταετίας. Σημειώνεται ότι οι αναπτυχθέντες και χρησιμοποιούμενοι μέχρι σήμερα για στις Γεωμετρικές Ανοχές κανονισμοί και μεθοδολογία έχουν αναπτυχθεί για και αφορούν κυρίως στην συναρμολόγηση των μηχανολογικών συνόλων. Ορίζονται για τον σκοπό αυτό *τέσσερα είδη γεωμετρικών ανοχών* : Μορφής – προσανατολισμού – τόπου – απόκλισης εκ περιστροφής. Οι τελευταίες αν και ουσιαστικά είναι ανοχές μορφής, διαχωρίζονται από στις λοιπές γιατί αναφέρονται στην μεγάλη οικογένεια των εκ περιστροφής συμμετρικών κομματιών.

Για την τεχνική και κοστολογική βελτιστοποίηση μιας κατασκευής η ανεξαρτησία μεταξύ των ανοχών διαστάσεων και των γεωμετρικών ανοχών μπορεί μόνο να αρθεί με την εφαρμογή στις *Αρχής του Πλήρους Υλικού (ΑΠΥ)* ή στις *Αρχής στις Περιβάλλουσας Επιφάνειας (ΑΠΕ)*.

Στο παρακάτω **Σχ.2.4** φαίνονται παραστατικά τα είδη των ανοχών διαστάσεων και γεωμετρίας καθώς και τη διασύνδεσή στις με στις αρχές ΑΠΥ και ΑΠΕ.



Σχ.2.4

2.4.1 Ορισμοί και Έννοιες

- Οι τιμές των γεωμετρικών ανοχών, σε αντίθεση με τις τιμές των ανοχών διαστάσεων, είναι πάντοτε οι *μέγιστες επιτρεπόμενες*.
- *Πεδίο γεωμετρικής ανοχής* είναι το πεδίο που μέσα του πρέπει να βρίσκονται όλα τα σημεία ενός γεωμετρικού στοιχείου. Το πεδίο γεωμετρικής ανοχής μπορεί να είναι δύο ή τριών διαστάσεων, Προσδιορίζεται από γεωμετρικά ιδανικά γραμμικά ή επιφανειακά στοιχεία. Π.χ.: Το εσωτερικό ενός κύκλου, η επιφάνεια που περιέχεται μεταξύ δύο ομόκεντρων κύκλων, η επιφάνεια που περιέχεται μεταξύ δύο ισαπεχουσών γραμμών ή δύο παραλλήλων ευθειών, ο χώρος εντός ενός κυλίνδρου, ο χώρος μεταξύ δύο ομοαξονικών κυλίνδρων, ο χώρος εντός ορθογωνίου παραλληλεπίπεδου κ.ο.κ.
- *Απόκλιση μορφής* είναι η τιμή της μέγιστης απόκλισης ενός γεωμετρικού στοιχείου από την ιδανική γεωμετρική του μορφή.
- *Ανοχή μορφής* είναι η μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή των αποκλίσεων μορφής. Καθορίζει το πεδίο ανοχής μέσα στο οποίο μπορεί να έχει το γεωμετρικό στοιχείο οιαδήποτε μορφή.
- *Απόκλιση θέσης* είναι η απόκλιση θέσης ενός γεωμετρικού στοιχείου από την δεδομένη και/η θεωρητική θέση του σε σχέση με ένα ή περισσότερα άλλα γεωμετρικά στοιχεία. Διακρίνεται σε *: τοπική απόκλιση* (τοποθέτηση), *απόκλιση εκ περιστροφής* (τοπική ή συνολική), *απόκλιση διεύθυνσης* (προσανατολισμός).
- *Ανοχή θέσης* είναι η επιτρεπόμενη απόκλιση θέσης και καθορίζει το πεδίο ανοχής που μέσα του πρέπει να βρίσκεται το αντίστοιχο γεωμετρικό στοιχείο. Υπάρχουν ανοχές τοποθέτησης, ανοχές προσανατολισμού, ανοχές εκ περιστροφής.
- *Στοιχείο αναφοράς* είναι το γεωμετρικό στοιχείο που χρησιμεύει ως βάση-αφετηρία αναφοράς για μια ανοχή θέσης.
- *Ονομαστικό στοιχείο αναφοράς* είναι το *γεωμετρικά ιδανικό* στοιχείο αναφοράς που δίνεται σε ένα μηχανολογικό κατασκευαστικό σχέδιο, π.χ. άξονας συμμετρίας, επίπεδο συμμετρίας, ιδανική επιφάνεια.
- *Πραγματικό στοιχείο αναφοράς* είναι ένα πραγματικό στοιχείο στις πραγματικού κομματιού με γεωμετρικές αποκλίσεις σαφώς περιορισμένες, ώστε να έχει νόημα να μπορούν να αναφέρονται σε αυτό οι ανοχές θέσης άλλων στοιχείων, π.χ. επίπεδος πλευρά, ευθύγραμμος ακμή, κορυφή, κυλινδρική εσωτερική επιφάνεια οπής κ.α.
- *Θεωρητική διάσταση* σε ένα σχέδιο είναι η διάσταση που δίνει, σε συνδυασμό με γεωμετρικές ανοχές θέσης, τη γεωμετρικά ιδανική περιοχή του πεδίου ανοχής. Θεωρητικές διαστάσεις χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό πάντοτε με γεωμετρικές ανοχές θέσης. Οι θεωρητικές διαστάσεις δεν έχουν προφανώς ανοχές. Στα σχέδια τοποθετούνται εντός ορθογωνικού πλαισίου, **βλ. Σχ.2.5**

Με τις ανοχές εκ περιστροφής ελέγχεται η γεωμετρική απόκλιση κάθε διατομής (*τοπική απόκλιση*) ή όλης της επιφάνειας ενός γεωμετρικού στοιχείου εκ περιστροφής (*συνολική απόκλιση*) καθώς αυτό περιστρέφεται περί τον άξονά του, που αποτελεί επίσης και τον άξονα αναφοράς. Οι ανοχές συνολικής απόκλισης αφορούν μόνο σε κυλινδρικές επιφάνειες, ενώ οι ανοχές τοπικής απόκλισης εφαρμόζονται για οποιαδήποτε εκ περιστροφής επιφάνεια. Οι τελευταίες διακρίνονται πάλι σε *ακτινικές* (κάθετες στις άξονα περιστροφής) και σε *αξονικές* (παράλληλες στις τον άξονα περιστροφής) *ανοχές απόκλισης*. Στην πραγματικότητα είναι φανερό ότι με τις ανοχές εκ περιστροφής ελέγχονται σύνθετες αποκλίσεις κυκλικότητας, ευθύτητας, ομοαξονικότητας, κλίσης, περιγράμματος διατομής, καθετότητας, επιπεδότητας.

Στοιχείο εφαρμογής γεωμετρικής ανοχής	Αμεσα	
	Με γράμμα	A
Στοιχείο αναφοράς	Αμεσα	
	Με γράμμα	A A
Θέση στοιχείου αναφοράς		ø2 A1
Θεωρητικές διαστάσεις		50
Επεκτεινόμενο πεδίο ανοχής		P
Αρχή Πλήρους Υλικού (ΑΠΥ)		M

Σχ.2.5

2.4.2 Εφαρμογή Γεωμετρικών Ανοχών σε Μηχανολογικά Σχέδια.

Στο **σχήμα 2.6** δίνονται τα σύμβολα των γεωμετρικών ανοχών που χρησιμοποιούνται στα κατασκευαστικά μηχανολογικά σχέδια καθώς και συναφείς άλλες έννοιες και συμβολισμοί, όπως αυτά καθορίζονται στο πρότυπο ISO 1101. Οι γεωμετρικές ανοχές τοποθετούνται μέσα στο *πλαίσιο εγγραφής γεωμετρικών ανοχών* όπως φαίνεται στα **Σχ.2.7 (α), (β), (γ)**. Το πλαίσιο αυτό αποτελείται από δύο ή περισσότερα ξεχωριστά τμήματα.

Στο πρώτο τμήμα εγγράφεται το σύμβολο του χαρακτηριστικού που ελέγχει η ανοχή, δηλαδή το σύμβολο της ευθύτητας, της παραλληλότητας, της θέσης, κ.ο.κ.

Στο δεύτερο τμήμα εγγράφεται η τιμή της ανοχής, το μέγεθος δηλ. του πεδίου ανοχής σε μονάδες που χρησιμοποιούνται για τη σχεδίαση (mm στα συγκεκριμένα παραδείγματα). Σε περίπτωση που το πεδίο ανοχής είναι κυκλικό ή κυλινδρικό προηγείται το σύμβολο ∅.

Στα υπόλοιπα τμήματα αναγράφεται, όταν είναι απαραίτητο, το γράμμα ή τα γράμματα που συμβολίζουν τα στοιχεία αναφοράς. Εξάλλου είναι δυνατόν να σημειωθούν άλλα σχετικά σχόλια, πάνω από το πλαίσιο ανοχών όπως φαίνεται στο **Σχ.2.7 (δ)**, όπου δηλώνεται ο αριθμός επαναλήψεων της σχετικής ανοχής σε ισάριθμα στοιχεία. Για καταχώρηση περισσοτέρων από μιας ανοχών στο ίδιο στοιχείο, τα πλαίσια εγγραφής πρέπει να βρίσκονται το ένα πάνω στο άλλο, όπως φαίνεται στο **Σχ. 2.7 (ε).**

Το πλαίσιο εγγραφής ανοχών συνδέεται με το στοιχείο στο οποίο αφορά η ανοχή μέσω μιας γραμμής που τελειώνει σε βέλος με ένα από τους εξής τρόπους:

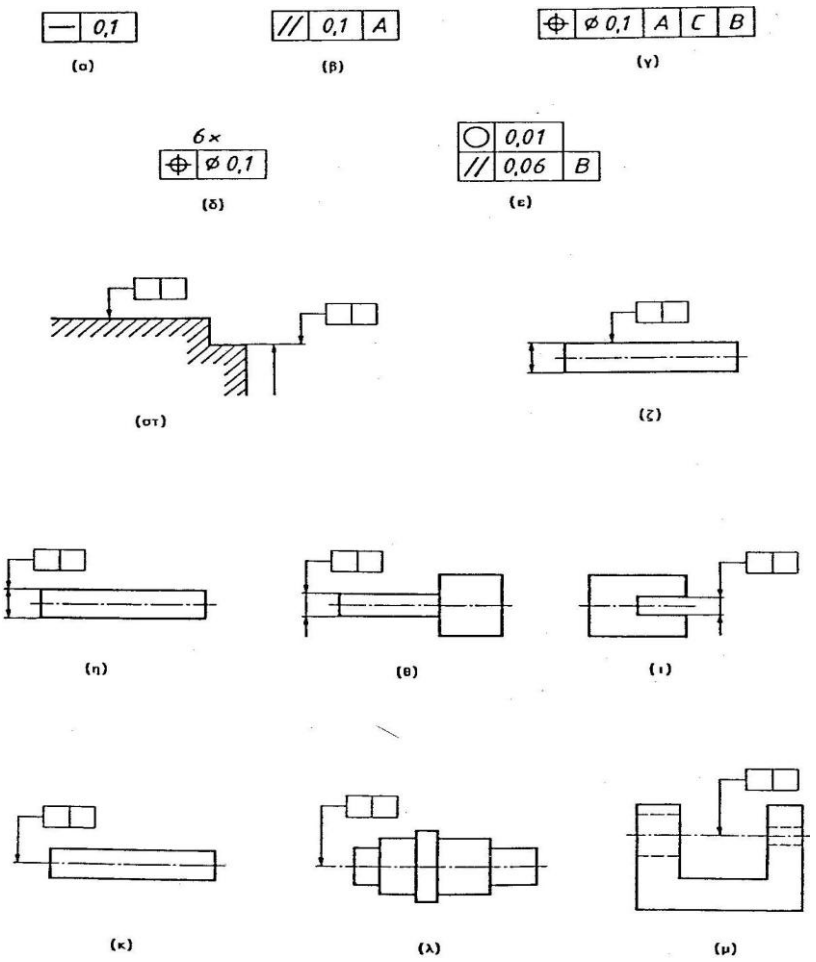
- Στο περίγραμμα του στοιχείου ή μια προέκταση αυτού χωρίς να ευθυγραμμίζεται με την γραμμή διάστασης, όταν η ανοχή αφορά σ'αυτή καθ'αυτή την γραμμή ή την επιφάνεια που απεικονίζει το περίγραμμα, όπως φαίνεται στα **Σχ. 2.7 (στ), (ζ).**
- Σαν προέκταση της γραμμής διάστασης όταν η ανοχή αφορά στον άξονα ή στο επίπεδο συμμετρίας του στοιχείου, όπως στα **Σχ. 2.7 (η), (θ), (ι).**
- Στον άξονα, όταν η ανοχή αφορά στον κοινό άξονα ή το κοινό επίπεδο συμμετρίας περισσοτέρων του ενός στοιχείων όπως στα **Σχ. 2.7 (κ), (λ), (μ).**

Οπωσδήποτε, την επιλογή της εφαρμογής γεωμετρικών ανοχών στην περιφέρεια ή τον άξονα μιας κυλινδρικής επιφάνειας, επηρεάζουν οι εκάστοτε λειτουργικές απαιτήσεις και πρέπει να αποφασίζεται κατά περίπτωση. Το ίδιο ισχύει και για τις λοιπές συμμετρικές επιφάνειες.

Αν το πεδίο που καθορίζεται από τη γεωμετρική ανοχή δεν είναι κυλινδρικό, η τιμή που αναγράφεται στο πλαίσιο εγγραφής ανοχών αφορά στη διάστασή του κατά την διεύθυνση της γραμμής σύνδεσης του πλαισίου ανοχών με το στοιχείο.

Είδος ανοχής		Χαρακτηριστικό	Σύμβολο
Χωρίς στοιχείο αναφοράς	Ανοχές μορφής	Ευθύτητα	—
		Επιπεδότητα	▱
		Κυκλικότητα	○
		Κυλινδρικότητα	⌭
Με ή χωρίς στοιχείο αναφοράς		Πιστότητα γραμμής	⌒
		Πιστότητα επιφανείας	⌓
Με στοιχείο αναφοράς	Ανοχές προσανατολισμού	Παραλληλότητα	//
		Καθετότητα	⊥
		Κλίση	∠
	Ανοχές τόπου	Θέση	⌖
		Ομοκεντρότητα , Ομοαξονικότητα	◎
		Συμμετρία	⌯
	Ανοχές απόκλισης	Τοπική απόκλιση	↗
		Συνολική απόκλιση	⌰

Σχ.2.6

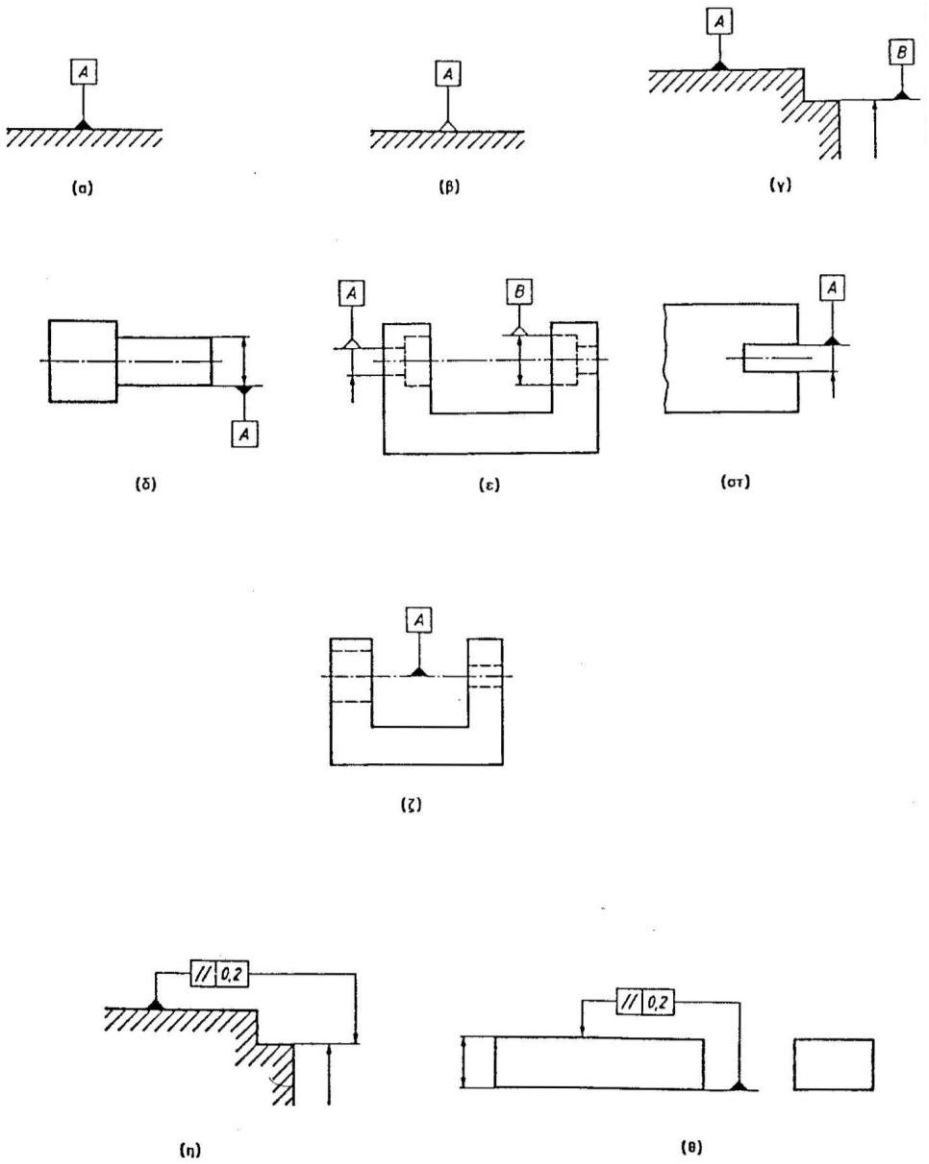


Σχ.2.7

Όταν ορίζεται άξονας ή επιφάνεια αναφοράς αυτό καταδεικνύεται από ένα κεφαλαίο γράμμα που εγγράφεται μέσα σ' ένα πλαίσιο που συνδέεται με το αντίστοιχο στοιχείο αναφοράς μέσω μιας γραμμής. Η γραμμή αυτή καταλήγει σε – γραμμοσκιασμένο ή μη – τρίγωνο, όπως φαίνεται στα **Σχ.2.8 (α), (β)**. Το γράμμα της αναφοράς πρέπει να επαναλαμβάνεται στο τρίτο τμήμα του πλαισίου εγγραφής ανοχών. Η τοποθέτηση του συμβόλου αναφοράς μπορεί να γίνει με έναν από τους παρακάτω τρόπους:

- Στο περίγραμμα του στοιχείου ή μια προέκταση αυτού, χωρίς να ευθυγραμμίζεται με την γραμμή διάστασης, όταν στοιχείο αναφοράς είναι αυτή καθαυτή η γραμμή ή η επιφάνεια που απεικονίζει το περίγραμμα, όπως στο **Σχ.2.8 (γ).**
- Σε προέκταση της γραμμής διάστασης όταν το στοιχείο αναφοράς είναι ο άξονας ή το επίπεδο συμμετρίας του στοιχείου. Αν δεν υπάρχει αρκετός χώρος, επιτρέπεται η αντικατάσταση του βέλους της γραμμής διάστασης με το τρίγωνο του πλαισίου εγγραφής αναφοράς, **Σχ.2.8 (δ), (ε), (στ).**
- Στον άξονα ή το επίπεδο συμμετρίας όταν στοιχείο αναφοράς είναι ο κοινός άξονας ή το κοινό επίπεδο συμμετρίας περισσοτέρων του ενός στοιχείων όπως στο **Σχ.2.8(ζ).**

Σε περιπτώσεις που το πλαίσιο εγγραφής ανοχών μπορεί να συνδεθεί απ' ευθείας με το στοιχείο αναφοράς όπως στα **Σχ.2.8 (η), (θ),** το σύμβολο αναφοράς και το τρίτο τμήμα του πλαισίου εγγραφής ανοχών παραλείπονται.



Σχ.2.8

2.4.3 Το γενικευμένο αξίωμα της αρχής της εναλλαξιμότητας του Taylor.

Οι ανοχές διαστάσεων πρέπει προφανώς να εξασφαλίζουν τον επιδιωκόμενο χαρακτήρα μιας συναρμογής για τα πραγματικά κομμάτια που οπωσδήποτε έχουν και κατασκευαστικά αναπόφευκτες γεωμετρικές αποκλίσεις μορφής, θέσης, προσανατολισμού. Για τον αναγκαίο από την πραγματικότητα αυτή συνδυασμό αποκλίσεων διαστάσεων και γεωμετρίας χρησιμοποιείται το *γενικευμένο αξίωμα της αρχής της εναλλαξιμότητας του W. Taylor*. Σύμφωνα με το αξίωμα αυτό: *Ο μετροτεχνικός έλεγχος για την αποδοχή ενός κομματιού πρέπει να διεξάγεται μέσα στην περιοχή των διαστάσεων που επιτρέπουν διορθωτική επέμβαση. Αντίστοιχα, ο μετροτεχνικός έλεγχος για την απόρριψη ενός κομματιού πρέπει να διεξάγεται ξεχωριστά για όλες ανεξαιρέτως τις πραγματικές και ανεξάρτητες μεταξύ τους διαστάσεις*. Το παραπάνω αξίωμα αποτελεί στην ουσία επέκταση της τεχνικής ανοχών που για πρώτη φορά εφαρμόσθηκε από τον W.Taylor (1905) για την κατασκευαστική διαμόρφωση ελεγκτήρων για το μετροτεχνικό έλεγχο της γεωμετρικής ακρίβειας και των διαστάσεων των σπειρωμάτων

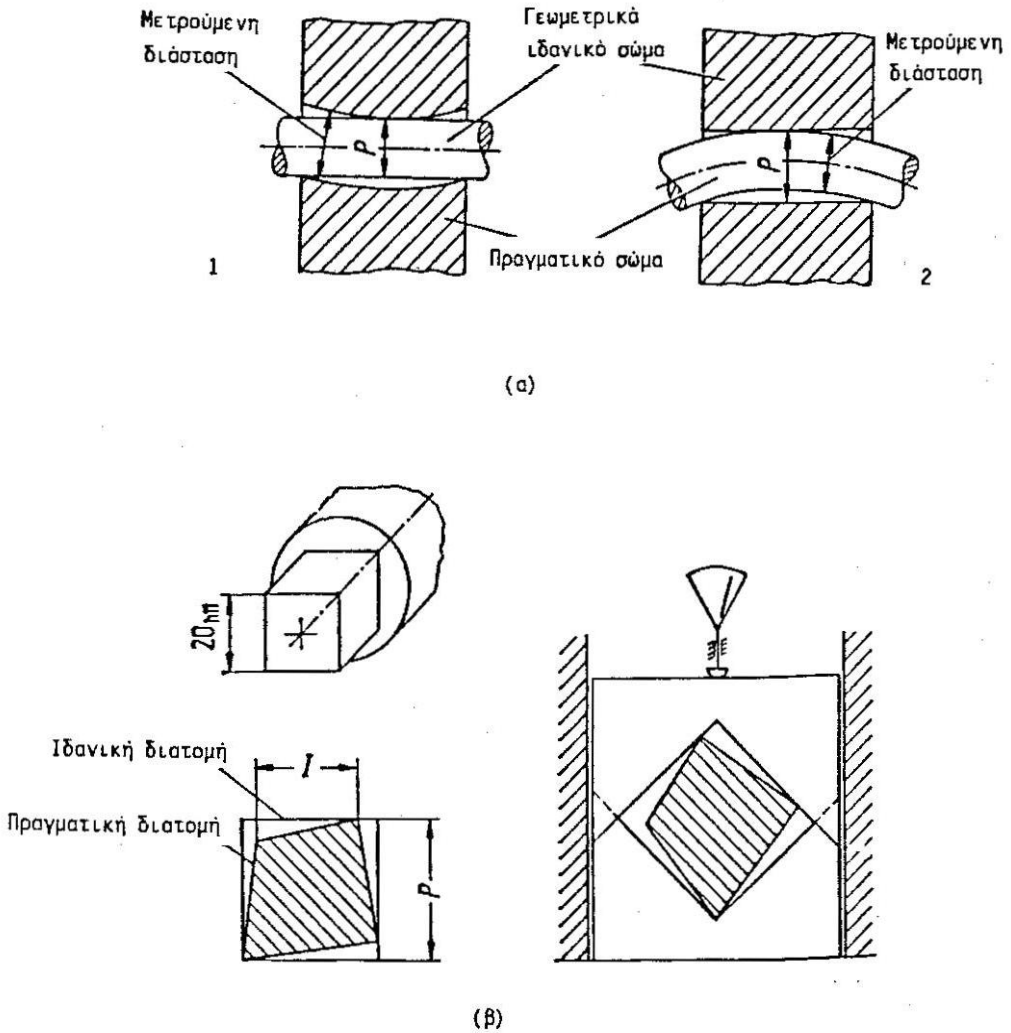
Η περιοχή των διαστάσεων που επιτρέπουν διορθωτική επέμβαση για αποκατάσταση διαστασιολογικών ή/και γεωμετρικών σφαλμάτων κατασκευής οριοθετείται από την *Ανοχή Πλήρους Υλικού*, πρβλ. *Διάσταση Πλήρους Υλικού*. Η περιοχή των διαστάσεων απόρριψης του κομματιού ως μη επιδεκτικού καμιάς διορθωτικής επέμβασης οριοθετείται από την *Ανοχή Οριακού Υλικού*, πρβλ. *Διάσταση Οριακού Υλικού*. Ανοχή πλήρους υλικού κατ' αυτόν τον τρόπο είναι εκείνη που εξασφαλίζει το *περισσότερο* υλικό στο κομμάτι π.χ. για έναν άξονα ∅50±0,1 η ανοχή +0,1 που προσδιορίζει την *μεγαλύτερη* διάμετρό του (δηλ. άξονας Ø50,1), ενώ για ένα τρύμα ∅50±0,1 η ανοχή –0,1 που προσδιορίζει την *μικρότερη* διάμετρό του (δηλ. τρύμα ∅49,9). Κατ' αναλογία ανοχή οριακού υλικού είναι εκείνη που αποδίδει κομμάτι με το *λιγότερο* υλικό δηλ. για την περίπτωση του παραδείγματος άξονα ∅ 49,9 και τρύμα ∅ 50,1.

2.4.4 Ενεργός Διάσταση Συναρμογής.

Από το αξίωμα του Taylor συνάγεται ότι τα όρια του *διαστασιολογικού πεδίου ανοχών* έχουν μονοσήμαντο χαρακτήρα *μόνο* για ιδανικής γεωμετρικής μορφής κομμάτια. *Για πραγματικά κομμάτια με διαστασιολογικά και γεωμετρικά σφάλματα* η *ανοχή αποδοχής* πρακτικά αφορά σε μια *ενεργό διάσταση συναρμογής P*, ενώ η *ανοχή απόρριψης* σε όλες τις πραγματικές και προς έλεγχο τιμές διαστάσεων.

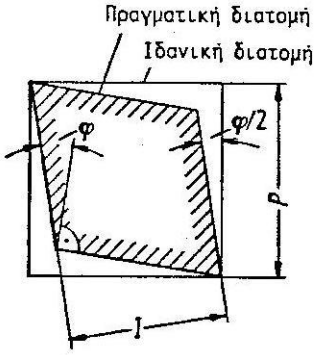
*Ενεργός Διάσταση Συναρμογής P είναι η διάσταση της ιδανικής γεωμετρικής διατομής που περιβάλλει την ή περιβάλλεται από την προς συναρμολόγηση πραγματική διατομή και εφάπτεται με αυτή σε ένα ή περισσότερα ση*μεία. Σύμφωνα με τον ορισμό αυτό για ένα τρύμα η ενεργός διάσταση συναρμογής P είναι η διάμετρος του γεωμετρικά ιδανικού και ίσου μήκους κυλίνδρου που η επιφάνειά του εφάπτεται στα προεξέχοντα σημεία της πραγματικής επιφάνειας του τρύματος, **Σχ.2.9 (α.1).** Για έναν άξονα η ενεργός του διάσταση συναρμογής P είναι η διάμετρος ενός γεωμετρικά ιδανικού κυλινδρικού τρύματος ίσου μήκους που η επιφάνειά του εφάπτεται στα προεξέχοντα σημεία της επιφάνειας του άξονα, **Σχ.2.9 (α.2).**

Η ενεργός διάσταση συναρμογής P ενός πραγματικού κομματιού είναι τις περισσότερες φορές μονοσήμαντη. Από την άλλη όμως πλευρά δεν μπορεί συνήθως να μετρηθεί απ'ευθείας με συνήθη μετρητικά μέσα, **βλ. Σχ.2.9 (α) και Σχ.2.9 (β).**



Σχ.2.9

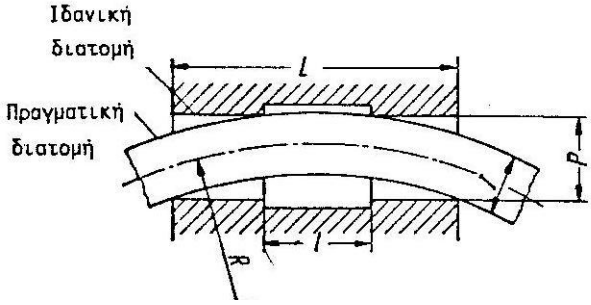
Είναι εξαιρετικά λίγες και πολύ απλές οι περιπτώσεις που η P μπορεί να υπολογισθεί μαθηματικά, **βλ. Σχ.2.17.** Οι πραγματικές τιμές των διαστάσεων αντίθετα μετρούνται με σχετικά απλά όργανα, συσκευές και/η μηχανές, αλλά προφανώς δεν είναι *μονοσήμαντα* αντιπροσωπευτικές : Ανάλογα με τον τρόπο, τη θέση και τη διεύθυνση της μέτρησης προκύπτουν διαφορετικά αποτελέσματα.



$$P = \frac{I}{\sqrt{2}\cos\left(45^\circ + \frac{\varphi}{2}\right)} \approx I\left(1 + \frac{\varphi}{2}\right)$$

$$a = I\frac{\varphi}{2}$$

(γ)



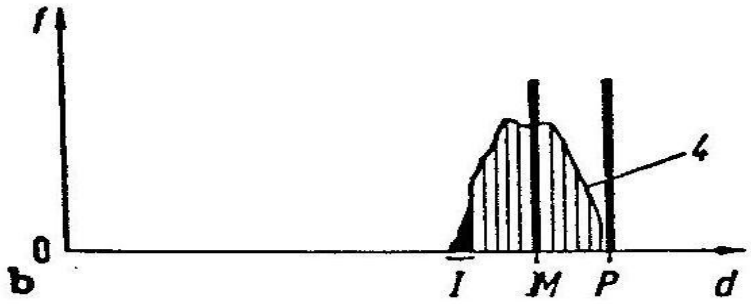
$$P = I + \sqrt{R^2 - (L/2)^2} - \sqrt{R^2 - (l/2)^2}$$

$$\approx I + \frac{L^2 - l^2}{8R}$$

$$a \approx \frac{L^2 - l^2}{8R}$$

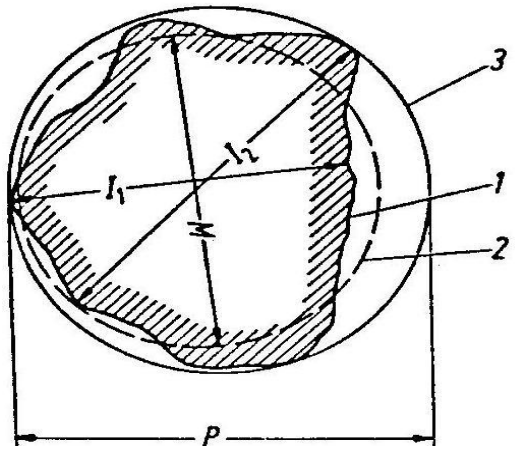
Σχ.2.9

Όλες οι δυνατές μετρήσεις διαστάσεων ενός πραγματικού κομματιού γενικά σχηματίζουν μια κατανομή όπως αυτή του **Σχ.2.10.** Κατά τον έλεγχο ακριβείας, την μέτρηση δηλ. της απόκλισης από την ονομαστική διάσταση, ως πραγματική διάσταση I λαμβάνεται πάντοτε εκείνη που αντιστοιχεί στο *λιγότερο* υλικό.

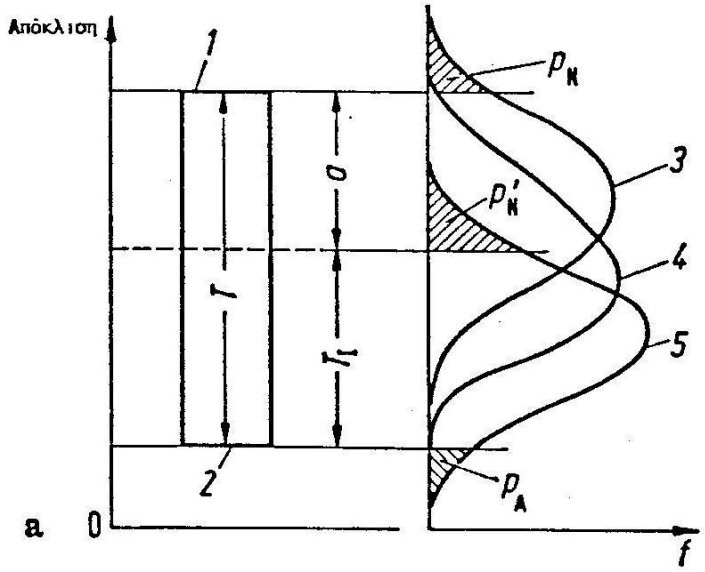


Σχ.2.10

Μια εξ ίσου αντιπροσωπευτική και μονοσήμαντη διάσταση ενός πραγματικού κομματιού είναι η *μέση διάσταση M*, **Σχ.2.11**. Η μέση διάσταση M πάντοτε βρίσκεται μεταξύ της *πραγματικής τιμής I* και της *ενεργού διάστασης P*. Καθένα συνεπώς κομμάτι έχει ενσωματωμένες τρείς διαστάσεις (I, M, P) που για μια δεδομένη μερίδα κομματιών ανήκουν αντίστοιχα σε τρείς διαφορετικές στατιστικές κατανομές, **Σχ.2.12** Οι τρείς αυτές κατανομές είναι προφανές ότι συμπίπτουν μόνο στην περίπτωση ενός γεωμετρικά ιδανικού κομματιού. Κατά την μέτρηση των κομματιών μιας ελεύθερης συναρμογής είναι φανερό από το **Σχ.2.12** ότι πρέπει να εξασφαλίζεται η αναγνώριση και διαλογή των κομματιών που αντιστοιχούν στα ποσοστά p_N αυτών που υπερβαίνουν την διάσταση του πλήρους υλικού και p_A αυτών που βρίσκονται κάτω από την διάσταση του οριακού υλικού.



Σχ.2.11



Σχ.2.12

Από τα προηγούμενα προκύπτει τελικά η αναλυτική διατύπωση του γενικευμένου αξιώματος εναλλαξιμότητας Taylor –για την περιοχή διαστάσεων που επιτρέπουν διορθωτική επέμβαση –ως *ικανή συνθήκη* για ελεύθερες συναρμογές άξονα –τρύματος,*

$$P_B \geq P_A \tag{2.1}$$

Η αντίστοιχη της (1) τότε πραγματική χάρη X_Π θα κυμαίνεται μεταξύ των τιμών,

$$I_B - I_A = X_I \geq X_\Pi \geq X_P = P_B - P_A \tag{2.2}$$

όπου,

$$X_P = X_I - (\alpha_B + \alpha_A) \tag{2.3}$$

* Στις επόμενες σχέσεις (1)-(4) οι δείκτες Α και Β αναφέρονται στον άξονα και το τρύμα αντίστοιχα.

και,

$$\alpha_A = P_A - I_A \quad , \quad \alpha_B = I_B - P_B \tag{2.4}$$

Η διαφορά $|\alpha|$ μεταξύ της ενεργού διάστασης συναρμογής P και της πραγματικής τιμής I αντιπροσωπεύει προφανώς *τα γεωμετρικά σφάλματα μορφής* του κομματιού που είναι υπεύθυνα για την παρεμπόδιση της συναρμολόγησης και ονομάζεται *γεωμετρική απόκλιση*, (α_A γεωμετρική απόκλιση άξονα, α_B γεωμετρική απόκλιση τρύματος). Θεωρητικά η διαφορά αυτή, για άξονα ή για τρύμα, πρέπει για γεωμετρικά ιδανικά κομμάτια $|P - I| \to 0$, πρακτικά όμως είναι αρκετό η κατανομή της, για μια μερίδα παραγωγής, να αποκλίνει ασύμμετρα από την κανονική. Είναι σαφές ότι οι ίδιες σχέσεις ισχύουν και για άλλα συναρμολογούμενα, μη κυκλικής διατομής, στοιχεία μηχανολογικών κατασκευών.

2.5 Αρχή του Πλήρους Υλικού (MMC)

Η ενεργός διάσταση συναρμογής P και η γεωμετρική απόκλιση α μπορεί γενικά να υπολογισθούν, όπως ήδη αναφέρθηκε, μόνο για πολύ απλές περιπτώσεις.
Για πολύπλοκα κομμάτια με πολλές επιφάνειες συνεργασίας δεν προσδιορίζεται ενεργός διάσταση συναρμογής P. Η εφαρμογή τότε του αξιώματος Taylor ισοδυναμεί με την απαίτηση το πραγματικό περίγραμμα να κείται πλήρως μέσα ή το πολύ να ταυτίζεται με ένα γεωμετρικά ιδανικό ενεργό περίγραμμα συναρμογής στην πλευρά που υπάρχει υλικό του κομματιού και συνεπώς επιτρέπεται διορθωτική επέμβαση. Ο καθορισμός του γεωμετρικά ιδανικού αυτού περιγράμματος γίνεται με την εφαρμογή της *Αρχής του Πλήρους Υλικού, (ΑΠΥ)*[*]. Σύμφωνα με την αρχή αυτή : *Οι διαστάσεις του γεωμετρικά ιδανικού ενεργού περιγράμματος συναρμογής ενός κομματιού υπολογίζονται από τις διαστάσεις πλήρους υλικού των επιμέρους στοιχείων του με συνυπολογισμό και των επιτρεπομένων γεωμετρικών αποκλίσεων*.

Η εφαρμογή της ΑΠΥ προσφέρει στην παραγωγή το πλεονέκτημα του συνδυασμού των ανοχών διαστάσεων και γεωμετρίας μεταξύ τους κατά τον τεχνικά και κοστολογικά επωφελέστερο τρόπο, αίροντας, κατά περίπτωση, τη θεσμοθετημένη ανεξαρτησία των ανοχών. Κατ'αυτόν τον τρόπο, με την εφαρμογή δηλ. της ΑΠΥ, κομμάτια με γεωμετρικές αποκλίσεις πέραν των επιτρεπομένων, που συνήθως είναι ασύμφορο ή και αδύνατο να διορθωθούν, είναι δυνατό να γίνονται αποδεκτά και να χρησιμοποιούνται εφόσον οι διαστάσεις τους είναι επαρκώς απομακρυσμένες από την διάσταση πλήρους υλικού. Αντίστοιχα, κομμάτια που παράγονται με διαστάσεις κοντά στην κατάσταση πλήρους υλικού, όπως γενικά επιδιώκεται, μπορούν, αν δεν βρίσκονται εντός των γεωμετρικών ανοχών, να επανακατεργασθούν προς την κατεύθυνση της διάστασης του οριακού υλικού.

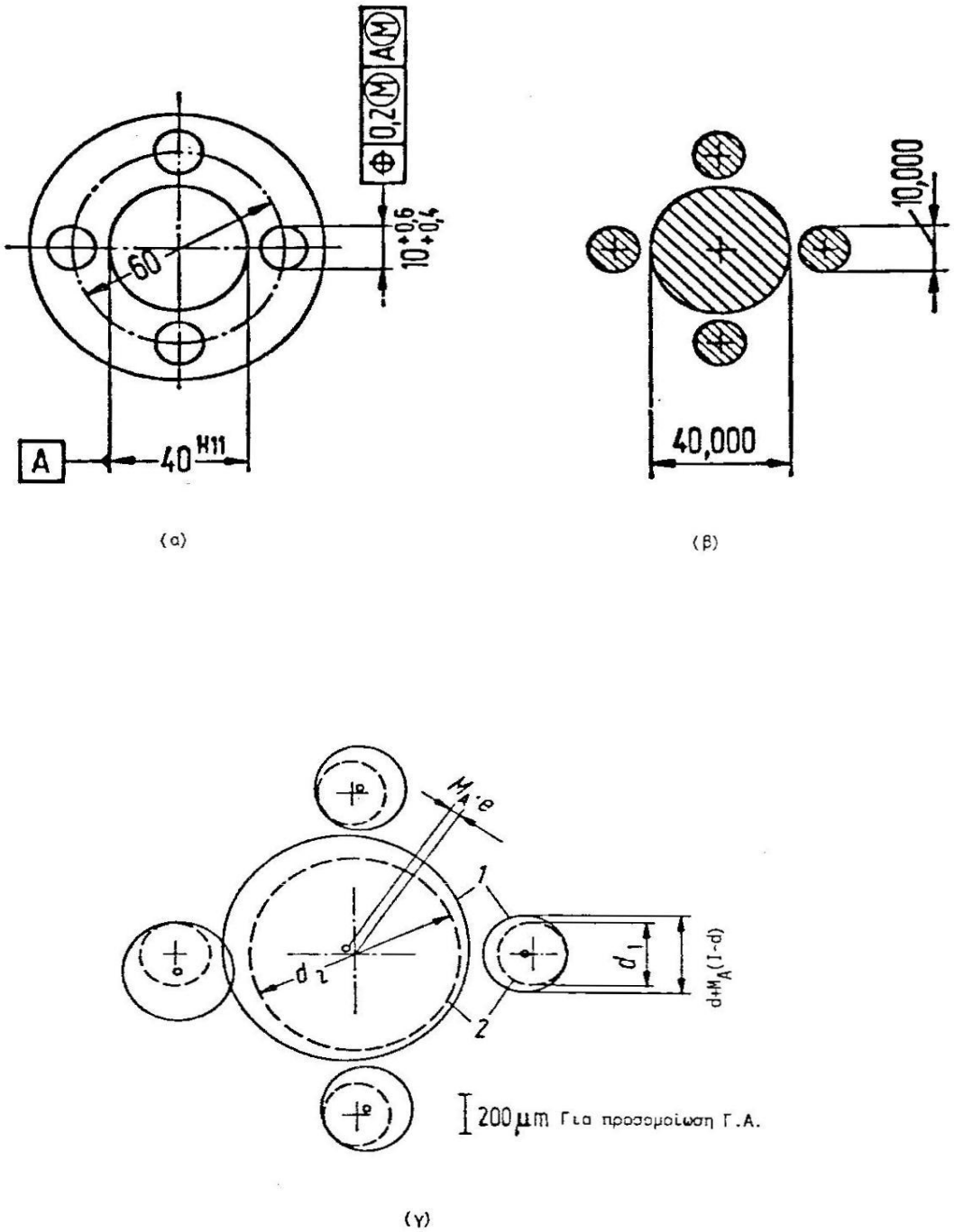
Στα μηχανολογικά κατασκευαστικά σχέδια η εφαρμογή της ΑΠΥ δηλώνεται με το σύμβολο M αμέσως μετά την τιμή της γεωμετρικής ανοχής,

[*] Maximum Material Principle (MMP) ISO 2692.

Για *σφικτές συναρμογές* η ενεργός διάσταση συναρμογής και κατ'επέκταση η ΑΠΥ έχουν δευτερεύουσα σημασία, διότι στην περίπτωση αυτή καθοριστικό ρόλο παίζουν για την εξασφάλιση του χαρακτήρα της συναρμογής αυτές καθ'αυτές οι γεωμετρικές αποκλίσεις μορφής. Λαμβανομένων υπόψη των ελαστικών –ή και πλαστικών- παραμορφώσεων των γεωμετρικών αποκλίσεων κατά την σύσφιγξη, αρκεί για τις περιπτώσεις αυτές η χρήση ως διάστασης αναφοράς της μέσης διάστασης M, **Σχ.2.11**, της διάστασης δηλ. του μέσου γεωμετρικού ιδανικού περιγράμματος.

Η ΑΠΥ εφαρμόζεται τόσο σε γεωμετρικά στοιχεία όσο και σε στοιχεία αναφοράς. Στην δεύτερη περίπτωση επιτρέπει μια μετατόπιση του άξονα ή του επιπέδου αναφοράς κατά ίση ποσότητα με την απομάκρυνση του στοιχείου αναφοράς, που καθορίζει τον άξονα ή το επίπεδο, από την αντίστοιχη διάσταση πλήρους υλικού. Χρησιμοποιείται κυρίως στις ανοχές τόπου (θέση, ομοκεντρότητα/ομοαξονικότητα, συμμετρία) και προσανατολισμού (παραλληλότητα, καθετότητα, κλίση).

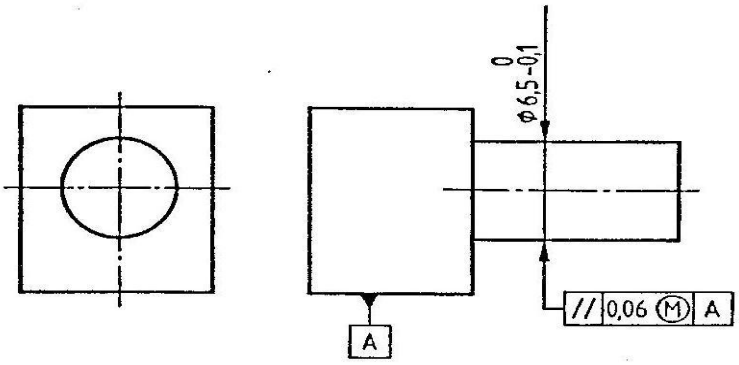
Από τις ανοχές μορφής, η ΑΠΥ εφαρμόζεται κυρίως στην ανοχή ευθύτητας. Η εφαρμογή της ΑΠΥ σε ανοχές θέσης είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για την εξασφάλιση της δυνατότητας συναρμολόγησης κομματιών χωρίς ιδιαίτερες απαιτήσεις ακριβείας, όπως π.χ. συμβαίνει με τις οπές σύνδεσης μιας φλάντζας. Σε τέτοιες περιπτώσεις, που τα στοιχεία εμφανίζονται σε ομάδες και όχι μεμονωμένα **(βλ. Σχ.2.13),** η επιτυχία της σύνδεσης εξαρτάται από τον συνδυασμό των γεωμετρικών αποκλίσεων των στοιχείων αυτών, γεγονός που ουσιαστικά μειώνει την πιθανότητα αποδοχής του κομματιού. Η διεύρυνση του πεδίου ανοχών που προκαλεί η ΑΠΥ, αποκτά γι'αυτό το λόγο ακόμα μεγαλύτερη πρακτική σημασία όπως θα δούμε και στα κεφάλαια 5 και 6.



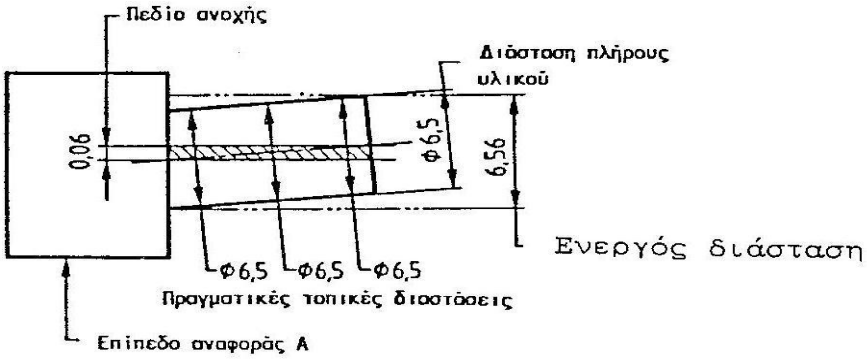
Προσομοίωση ελέγχου γεωμετρικών ανοχών

Σχ.2.13

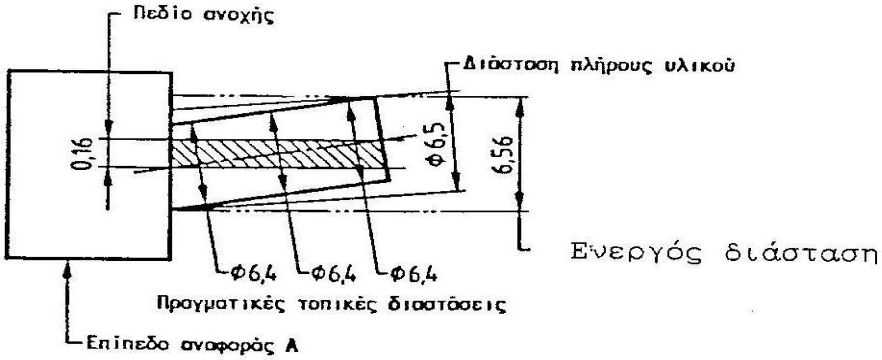
Τα Σχ. **2.14** και **2.15** παρουσιάζουν την κατά ISO εφαρμογή της ΑΠΥ σε γεωμετρικές ανοχές παραλληλότητας και ομοαξονικότητας αντίστοιχα.



(α) Εφαρμογή της Α.Π.Υ. σε ανοχή παραλληλότητας

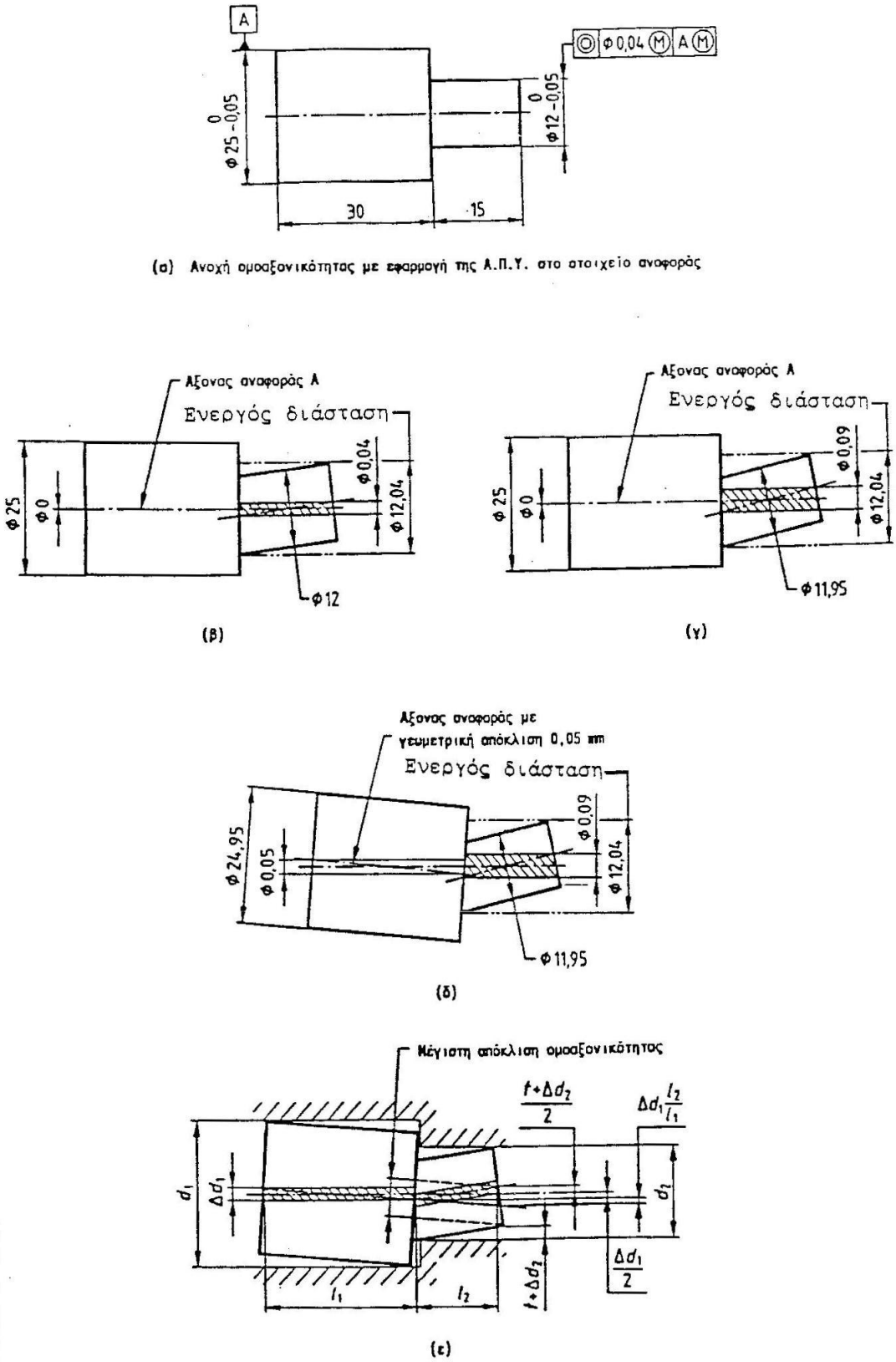


(β)



(γ)

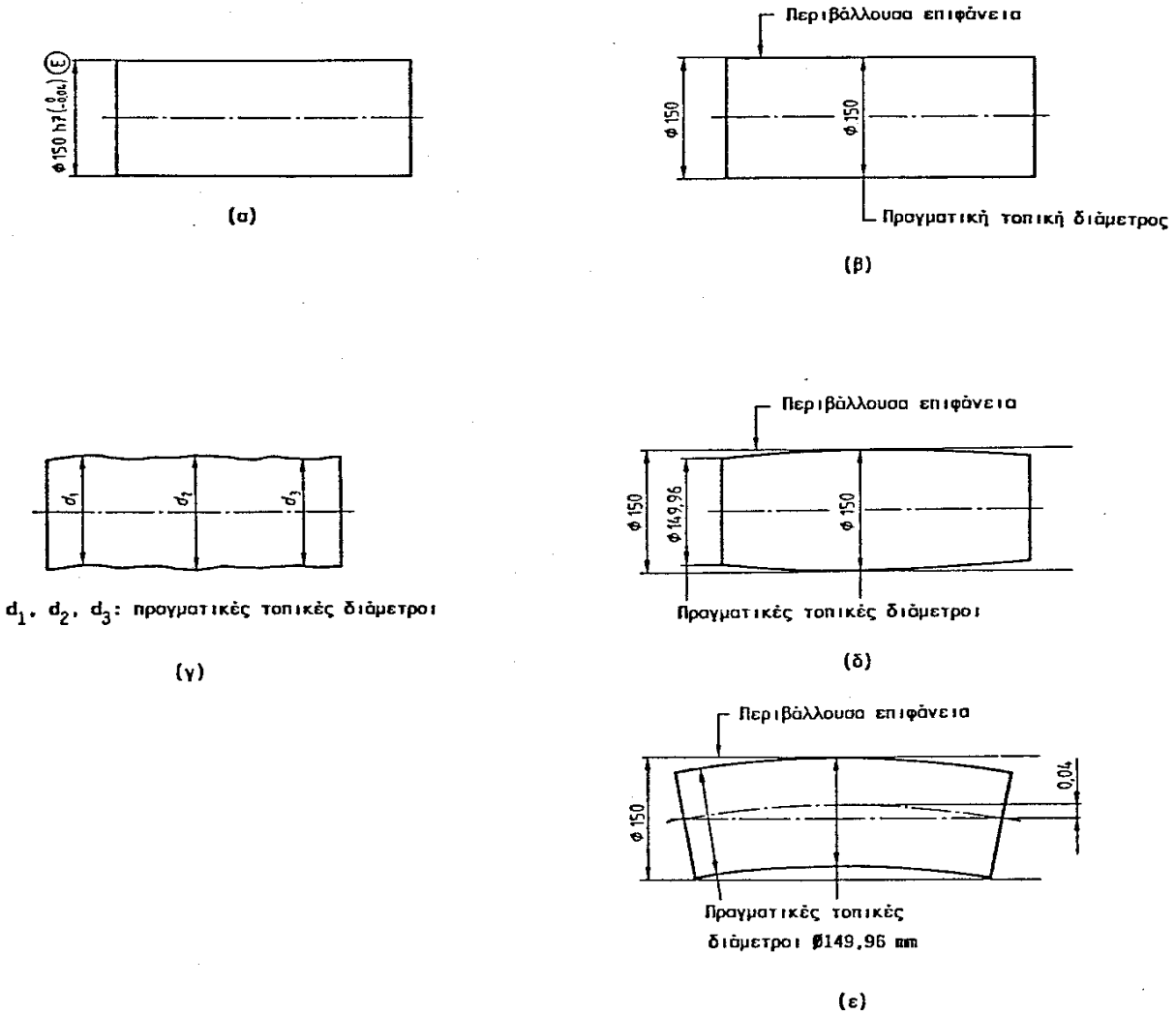
Σχ.2.14


A
Φ0,04 M A M
Φ25 0 -0,05
Φ12 0 -0,05
30
15
(α) Ανοχή ομοαξονικότητας με εφαρμογή της Α.Π.Υ. στο στοιχείο αναφοράς
Αξονας αναφοράς Α
Ενεργός διάσταση
Φ25
Φ0
Φ0,04
Φ12,04
Φ12
(β)
Αξονας αναφοράς Α
Ενεργός διάσταση
Φ25
Φ0
Φ0,09
Φ12,04
Φ11,95
(γ)
Αξονας αναφοράς με γεωμετρική απόκλιση 0,05 mm
Ενεργός διάσταση
Φ24,95
Φ0,05
Φ0,09
Φ12,04
Φ11,95
(δ)
Μέγιστη απόκλιση ομοαξονικότητος
$\frac{t+\Delta d_2}{2}$
$\Delta d_1 \frac{l_2}{l_1}$
d_1
Δd_1
d_2
$\frac{\Delta d_1}{2}$
$t+\Delta d_2$
l_1
l_2
(ε)

Σχ.2.15

2.6 Αρχή της Περιβάλλουσας Επιφάνειας.

Η αρχή της *Περιβάλλουσας Επιφάνειας (ΑΠΕ)*, σε αντίθεση με την ΑΠΥ, δεν συνδέεται με μια δεδομένη τιμή γεωμετρικής ανοχής. Απλά και μόνον *επιβάλλει τον περιορισμό των επιτρεπομένων γεωμετρικών αποκλίσεων μέσα στη γεωμετρικά ιδανική επιφάνεια υλικού που καθορίζει η Διάσταση Πλήρους Υλικού*. Στα μηχανολογικά κατασκευαστικά σχέδια η εφαρμογή της ΑΠΕ δηλώνεται με το σύμβολο Ε (Envelope Requirement) παρά τη διάσταση. Στο **Σχ.2.16** δίνεται ένα παράδειγμα εφαρμογής της ΑΠΕ και των συνεπειών της στη διαστασιολογική και γεωμετρική ακρίβεια ενός κομματιού, **Σχ.2.16(α), (β), (γ), (δ).** Από το **Σχ.2.16 (ε)** προκύπτει επίσης ότι *έμμεσα* η εφαρμογή της συνεπάγεται και ένα μέγιστο αποδεκτό όριο απόκλισης ευθύτητας του άξονα του κυλίνδρου 0.04 mm.



Σχ.2.16

Κύριο πλεονέκτημα της ΑΠΕ είναι η απλότητά της για την εξασφάλιση ενός συνοπτικού ελέγχου διαστασιολογικών και γεωμετρικών αποκλίσεων. Δεν εφαρμόζεται σε άξονες ή επίπεδα συμμετρίας. Η κύρια εφαρμογή της αφορά σε κυλινδρικές επιφάνειες. Δεν αποκλείεται επίσης ο συνδυασμός της με άλλες γεωμετρικές ανοχές

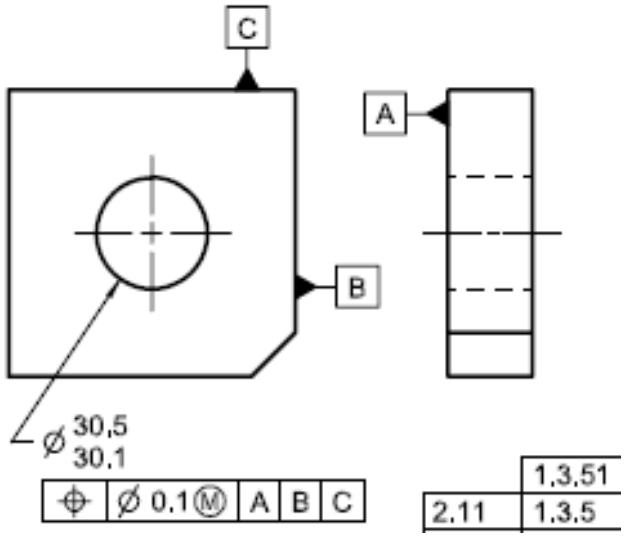
Επισημαίνεται εδώ ότι το πρότυπο DIN 7167 θεωρεί αυτονόητη την εφαρμογή της ΑΠΕ, χωρίς δηλ. χρήση του συμβόλου Ε, για απλά γεωμετρικά στοιχεία (κυλινδρικές επιφάνειες, στοιχεία που καθορίζονται από δύο παράλληλα επίπεδα, κύβοι, παραλληλεπίπεδα), στα μηχανολογικά σχέδια πρέπει να αναγράφονται στο υπόμνημα οι αντίστοιχες κατά περίπτωση ενδείξεις : *Ανοχές ISO 8015* ή *Ανοχές DIN 7167*.

2.7 Εικονικά Όρια - Virtual & Resultant Condition Boundaries

Εικονικό όριο για μια εσωτερική κυλινδρική επιφάνεια (τρύμα)

Virtual condition boundary (VC): εκφράζει ένα σταθερό όριο, για ένα συγκεκριμένο γεωμετρικό χαρακτηριστικό στη MMC ή LMC το οποίο εμπεριέχει και τη γεωμετρική ανοχή, για την εν λόγω κατάσταση του υλικού.

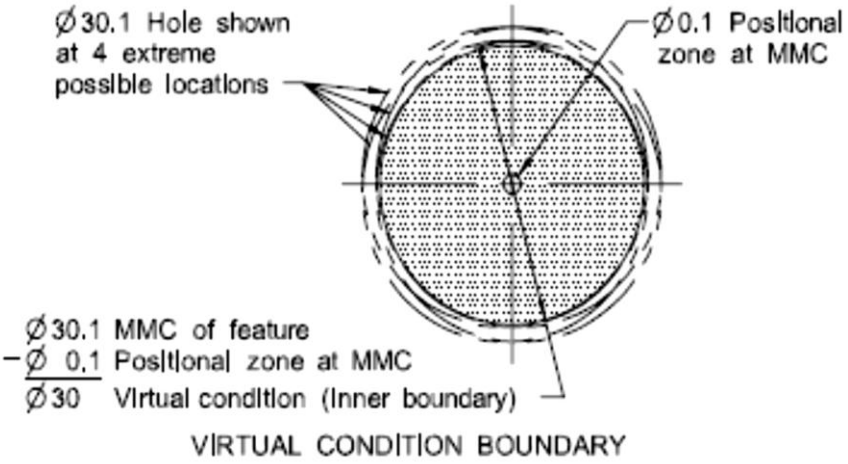
Στο παρακάτω παράδειγμα απλού μηχανολογικού εξαρτήματος η κεντρική κυλινδρική οπή (Ø30) θα βρίσκεται στο πλήρες υλικό όταν η διάμετρος της θα έχει την τιμή 30.1 mm δηλαδή για την μικρότερη δυνατή τιμή που μπορεί να πάρει ,σύμφωνα με τη τιμή της διαστασιολογικής ανοχής που δίνεται στο σχέδιο. Επίσης στο σχέδιο μας δίνεται η ανοχή αληθούς γεωμετρικής θέσης που είναι 0.1 στην κατάσταση του πλήρους υλικού.



	Ø HOLE	Ø TOL
LMC	30,5	0,5
	30,4	0,4
	30,3	0,3
	30,2	0,2
MMC	30,1	0,1

Σχ.2.17

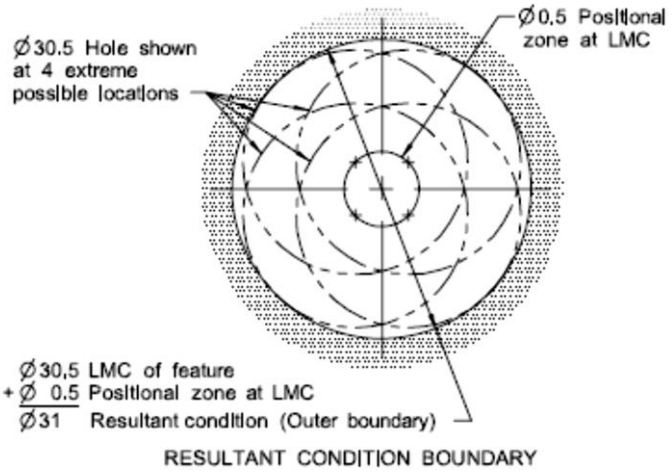
Όταν η διάμετρος της οπής αυξάνει , αυξάνει αντίστοιχα και η τιμή της ανοχής θέσης. Δηλαδή όταν η τιμή της διαμέτρου γίνει 30.2mm η τιμή της ανοχής θέσης θα αυξηθεί αντίστοιχα κατά 0.1 και θα γίνει 0.2. Έτσι, βλέπουμε από το **σχήμα 2.17** πως μεταβάλλεται η γεωμετρική ανοχή αληθούς θέσης σε σχέση με την μεταβολή της κατασκευαστικής διαμέτρου.
Το εικονικό όριο για την οπή προκύπτει από την τιμή της διαμέτρου όταν η τρύπα βρίσκεται στο πλήρες υλικό αφαιρώντας την αντίστοιχη τιμή της γεωμετρικής ανοχής. Προκύπτει έτσι ότι το σύνορο αυτό θα είναι 30.1 – 0.1=30. Οπότε έχουμε ότι VC=30



Σχ.2.18

Από αυτό καταλαβαίνουμε ότι οι τιμές που παίρνει η διάμετρος σε συνδυασμό με την τιμή της γεωμετρικής ανοχής δεν θα πρέπει να παραβιάζουν αυτό το όριο.

Ένα άλλο σύνορο το οποίο συνδυάζει την μεγίστη δυνατή τιμή της διαμέτρου της τρύπας και την τιμή της γεωμετρικής ανοχής, ονομάζετε Resultant Condition Boundaries (RC).Το σύνορο αυτό προκύπτει αν προσθέσουμε την μέγιστη τιμή της διαμέτρου κα την μέγιστη τιμή της γεωμετρικής ανοχής θέσης. Οπότε έχουμε ότι για την προκειμένη περίπτωση θα είναι 30,5 +0,5 =31

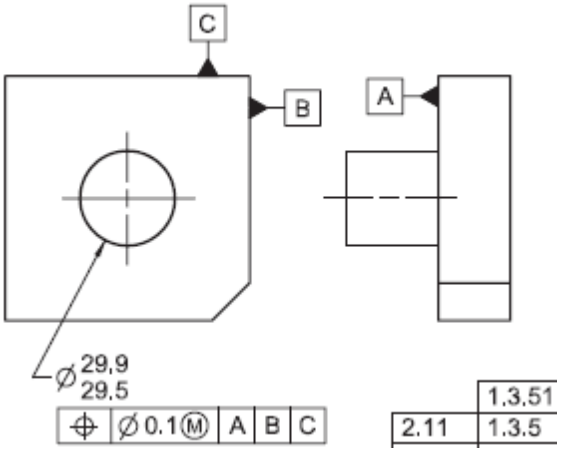


Σχ.2.19

Έτσι γίνεται αντιληπτό ότι η οπή θα πρέπει να περιοριστεί σε αυτά τα δύο σύνορα όταν εφαρμόζουμε την ΑΠΥ. Συμπεραίνουμε ότι μπορούμε να έχουμε μια γενική εποπτεία του συνδυασμού της διαστασιολογικής και της γεωμετρικής ανοχής.

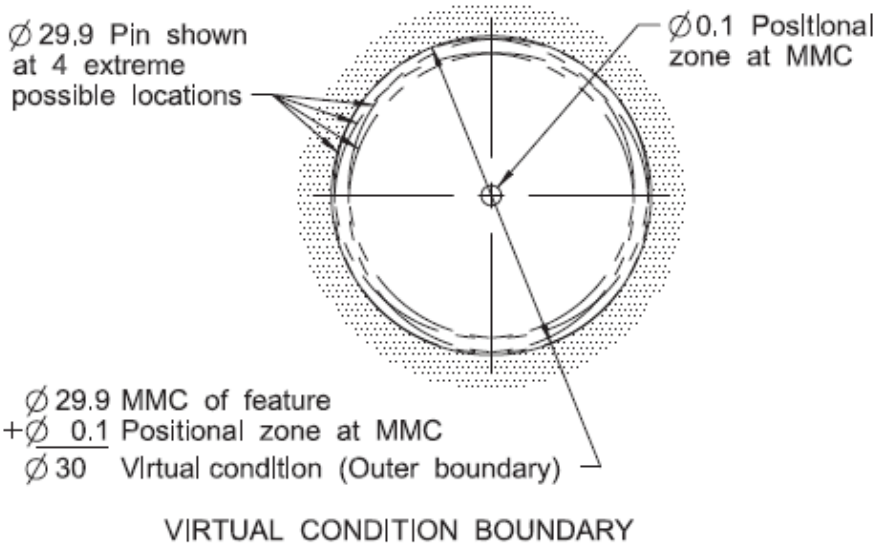
Εικονικό όριο για μια εσωτερική κυλινδρική επιφάνεια (άξονας)

Θα υπολογίσουμε πάλι τα σύνορα που συνδυάζουν την διαστασιολογική και την γεωμετρική ανοχή σε ένα άξονα όταν αυτός βρίσκεται στη κατάσταση του πλήρες υλικού.



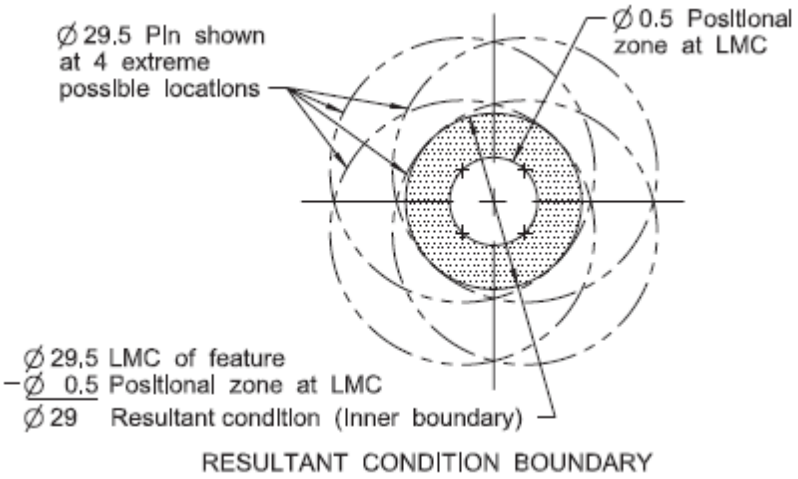
Σχ.2.20

Όπως βλέπουμε από το σχέδιο ο άξονας βρίσκεται στη κατάσταση του πλήρους υλικού όταν η τιμή της διαμέτρου είναι 29.9 mm.Επιπλέον η τιμή της ανοχής θέσης στη κατάσταση αυτή είναι 0.1. Το σύνορο (VC) προκύπτει αν προσθέσουμε την διαστασιολογική και την γεωμετρική ανοχή στη κατάσταση του πλήρους υλικού. Έτσι προκύπτει ότι θα είναι 30mm.



Σχ.2.21

Το σύνορο (RC) για τον άξονα στη κατάσταση του πλήρες υλικού προκύπτει άμα αφαιρέσουμε από την ελάχιστη δυνατή τιμή της διαμέτρου την αντίστοιχη τιμή της γεωμετρικής ανοχής. Έτσι θα είναι 29.5 - 0.5 = 29mm.

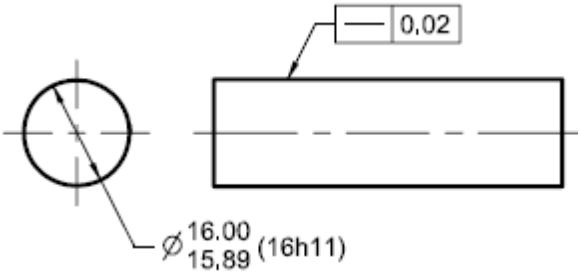


	Ø PIN	Ø TOL	VC	RC
MMC	29,9	0,1		
	29,8	0,2		
	29,7	0,3	30	
	29,6	0,4		
LMC	29,5	0,5		29

Σχ.2.22

Γεωμετρική ανοχή ευθύτητας

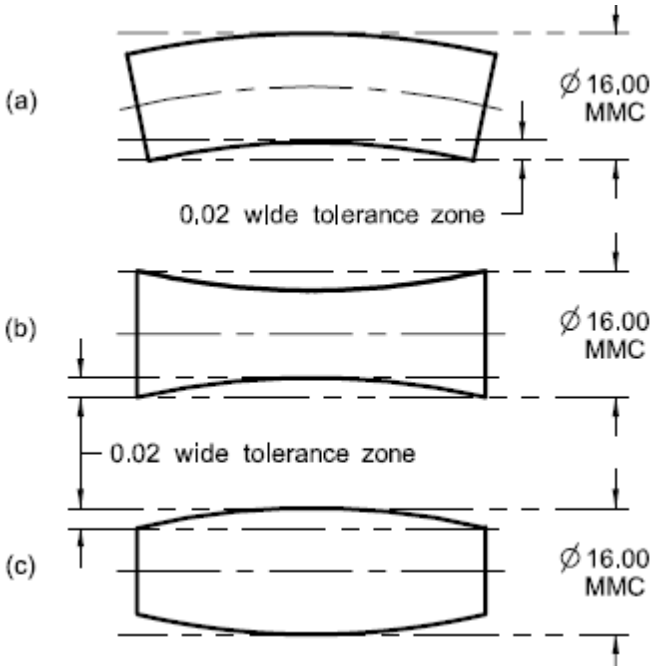
Για να μπορέσουμε να υπολογίσουμε το όριο το οποίο συνδυάζει τη διαστασιολογική και την γεωμετρική ανοχή της ευθύτητας θα πρέπει να λάβουμε υπόψη τον τρόπο με τον οποίο έχει τοποθετηθεί η ανοχή κατά τη φάση του μηχανολογικού σχεδιασμού. Έτσι, όταν η γεωμετρική ανοχή της ευθύτητας τοποθετείται σε ένα κυλινδρικό άξονα και τοποθετείται ανεξάρτητα από την διάσταση, τότε ως σύνορο θεωρούμε ένα κύλινδρο με τη διάμετρο στην οποία βρίσκεται ο κύλινδρος στην κατάσταση του πλήρους υλικού. Ο συνδυασμός της γεωμετρικής ανοχής και της διαστασιολογικής ανοχής ***δεν θα πρέπει να παραβιάζουν αυτό το σύνορο***. Παρακάτω δίδεται το σχέδιο ενός άξονα με την τη διαστασιολογική ανοχή της διαμέτρου (Ø16) και τη γεωμετρική ανοχή της ευθύτητας (0.02).



Σχ.2.23

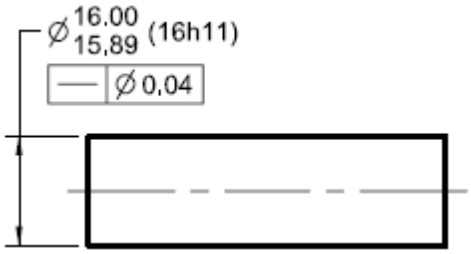
Η ανοχή της ευθύτητας η οποία τοποθετείται πάνω στον κύλινδρο δεν ελέγχει τον άξονα του κυλίνδρου αλλά την επιφάνειά του. Έτσι, αυτός ο κύλινδρος βρίσκεται στην κατάσταση του πλήρους υλικού του όταν η διάμετρος του έχει την τιμή 16mm. Άρα το σύνορο αυτό θα έχει αυτή την αντίστοιχη διάμετρο. Επομένως αυτός ο κύλινδρος θα θεωρείται αποδεκτός όταν βρίσκεται εντός του συνόρου και η εξωτερική του επιφάνεια είναι εντός δύο παράλληλων γραμμών οι

οποίες έχουν απόσταση 0,02mm. Φαίνονται στα παρακάτω σχήματα κάποιες πιθανές μορφές που μπορεί να έχει ο κύλινδρος και τα επιτρεπτά τους σύνορα.



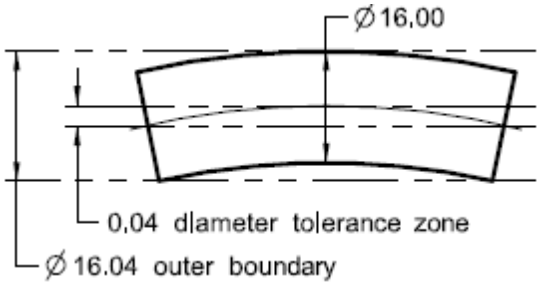
Σχ.2.24

Όταν ο κατασκευαστής έχει τοποθετήσει την ανοχή της ευθύτητας μαζί με την διαστασιολογική ανοχή τότε η γεωμετρική αυτή ανοχή δεν περιέχεται στο σύνορο του πλήρους υλικού αλλά είναι ανεξάρτητο αυτού. Το σύνορο θα είναι το άθροισμα της διαμέτρου όταν ο κύλινδρος βρίσκεται στο πλήρες υλικό και της γεωμετρικής ανοχής. Παρακάτω φαίνεται το ίδιο σχέδιο με το προηγούμενο αλλά με διαφορετική τοποθέτηση των ανοχών πάνω στο σχέδιο από το κατασκευαστή.



Σχ.2.25

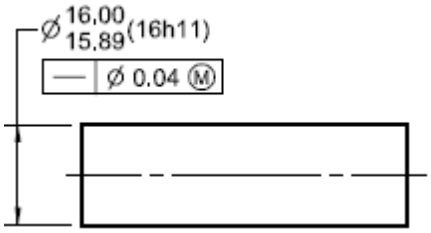
Έτσι, το σύνορο στο οποίο θα περιορίζεται ο κύλινδρος δεν θα είναι με διάμετρό 16mm όπως στη προηγούμενη περίπτωση, που αντιστοιχούσε με το σύνορο του πλήρους υλικού, αλλά θα είναι 16.04 καθώς προσθέτουμε και την γεωμετρική ανοχή. Ο έλεγχος της ευθύτητας θα γίνεται για τον άξονα του κυλίνδρου όπου η ζώνη της γεωμετρικής ανοχής θα είναι μία κυλινδρική ζώνη με διάμετρο 0.04 και μήκος όσο το μήκος του κυλίνδρου. Βλέπουμε παρακάτω το εξωτερικό σύνορο που αφορά την διαστασιολογική αλλά και την γεωμετρική ανοχή και επίσης το σύνορο στο οποίο πρέπει να βρίσκεται ο άξονας έτσι ώστε να γίνεται αποδεκτός κατά τον ποιοτικό έλεγχο.



Σχ.2.26

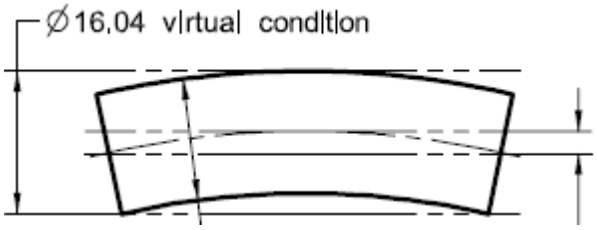
Θα πρέπει να αναφέρουμε ότι στη προκειμένη περίπτωση δεν εξετάζουμε την αρχή του πλήρους υλικού , αλλά την κατάσταση RFS (Regardless of Feature Size) δηλαδή την κατάσταση στην οποία η γεωμετρική ανοχή παραμένει σταθερή ανεξαρτήτως της μεταβολής της διαμέτρου του άξονα.

Στη συνέχεια θα υπολογίσουμε το σύνορο (VC) όταν εφαρμόζουμε την αρχή του πλήρους υλικού σε συνδυασμό με την ανοχή ευθύτητας.



Σχ.2.27

Το σύνορο (VC) θα είναι όπως και στο προηγούμενο παράδειγμα ίσο με το άθροισμα της διαμέτρου του κυλίνδρου όταν αυτό βρίσκεται στο πλήρες υλικό και την αντίστοιχη ανοχή. Άρα έχουμε ότι το VC θα είναι 16,04 το οποίο μας ενδύει τη δυσμενέστερη περίπτωση που μπορεί να υπάρξει ο κύλινδρος αν συνδυάσουμε και τα δύο είδη ανοχών μαζί. Παρακάτω βλέπουμε το (VC) για το κύλινδρο που εξετάζουμε.



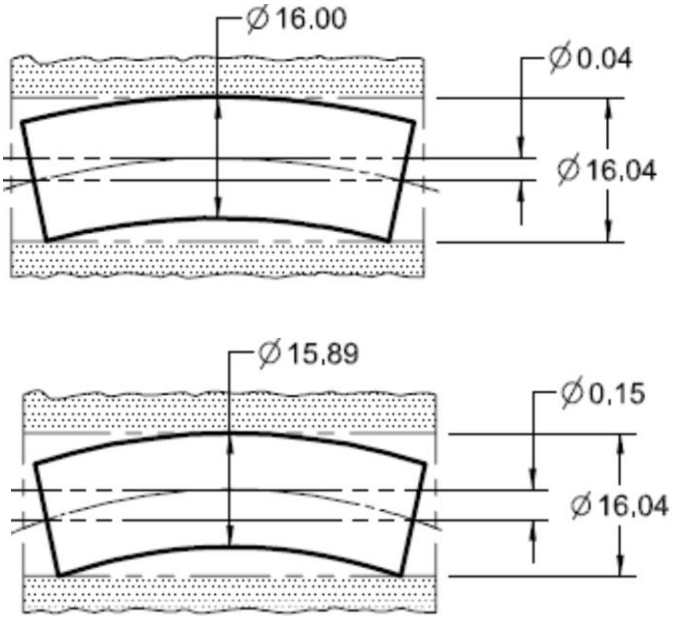
Σχ.2.28

Παρατηρούμε ότι δίπλα στην ανοχή της ευθύτητας υπάρχει το σύμβολο Ⓜ που σημαίνει ότι θα εφαρμόσουμε την αρχή του πλήρες υλικού. Αυτό συνεπάγεται ότι όσο απομακρυνόμαστε από το πλήρες υλικό τόσο αυξάνεται η ανοχή της ευθύτητας. Από το παρακάτω πίνακα βλέπουμε πώς μεταβάλλεται η ανοχή της ευθύτητας σε σχέση με τη διάμετρο του κυλίνδρου.

Feature size	Diameter tolerance zone allowed
16.00	0.04
15.99	0.05
15.98	0.06
↓	↓
15,90	0,14
15,89	0,15

Σχ.2.29

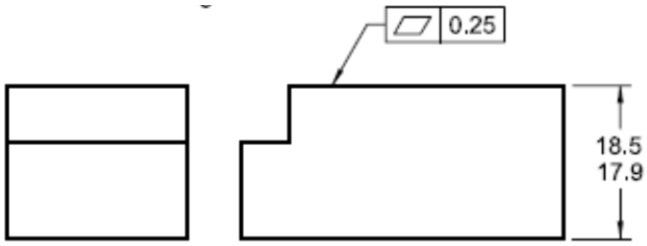
Έτσι, όταν ο άξονας βρίσκεται στο πλήρες υλικό τότε έχει και την ελάχιστη ανοχή της ευθύτητας όπως βλέπουμε και παρακάτω. Ενώ όταν η διάμετρος του άξονα πάρει την μικρότερη δυνατή τιμή τότε η ανοχή της ευθύτητας θα έχει τη μέγιστη δυνατή τιμή του.



Σχ.2.30

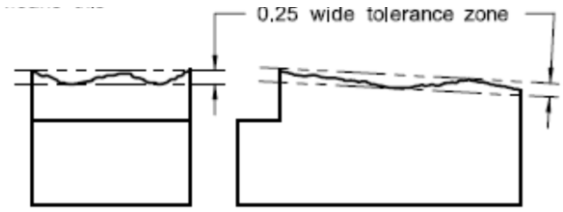
Γεωμετρική ανοχή Επιπεδότητας

Όπως στην ευθύτητα έτσι και στην επιπεδότητα ο προσδιοιρισμός των ορίων γίνεται με βάση την τοποθέτηση της γεωμετρικής ανοχής πάνω στην επιφάνεια. Επομένως όταν η ανοχή της επιπεδότητας είναι τοποθετημένη ξεχωριστά απο την διάσταση τότε δεν μπορουμε να συνδυάσουμε τη γεωμετρική ανοχή με την διαστασιολογική ανοχή. Έτσι εξετάζεται μόνο η επιφάνεια ως προς την επιπεδότητά της και η ανοχη της διάστασης ξεχωριστά απο τη γεωμετρική ανοχή. Παρακάτω, Σχ2.31ενδεικτικό σχέδιο μαζί με τις ανοχές που έχουν τοποθετηθεί.



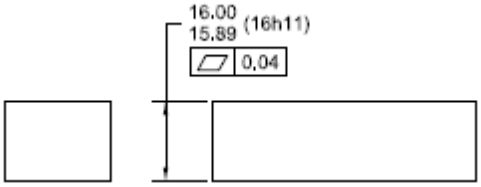
Σχ.2.31

Βλέπουμε ότι η ανοχή της επιπεδότητας έχει τοποθετηθεί ξεχωριστά από τη διάσταση. Έτσι, η επιφάνεια στην οποία έχει τοποθετηθεί η ανοχή αυτή θα πρέπει να βρίσκεται μεταξύ δύο επίπεδων συνόρων τα οποία να έχουν απόσταση μεταξύ τους 0.25mm και η διάσταση δεν θα πρέπει να ξεπερνάει τα 18.5mm που σημαίνει ότι το πάνω επίπεδο της δεν θα πρέπει να υπερβαίνει αυτό το όριο.



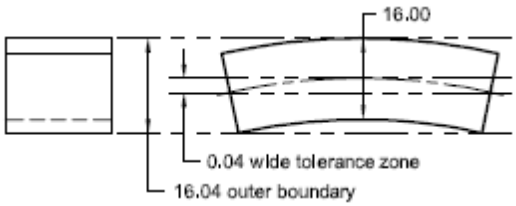
Σχ.2.32

Όταν εξετάζουμε το κομμάτι στην κατάσταση RFS και η τοποθέτηση της ανοχής είναι μαζί με τη διάσταση και όχι ξεχωριστά τότε το επιτρεπόμενο σύνορο θα είναι το άθροισμα της γεωμετρικής ανοχής και της μέγιστης δυνατής διάστασης όπως φαίνεται παρακάτω.



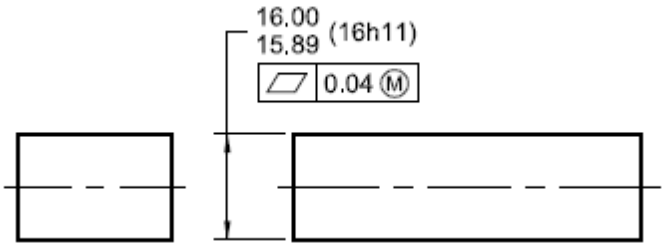
Σχ.2.33

Βλέπουμε ότι στο σχέδιο η ανοχή είναι τοποθετημένη κάτω από την διάστασή. Έτσι, το σύνορο θα είναι το άθροισμα της μέγιστης δυνατής διάστασης, που στη προκειμένη περίπτωση είναι 16 και της τιμής της γεωμετρικής ανοχής που είναι 0.04. Οπότε καταλαβαίνουμε ότι το αντικείμενο το οποίο εξετάζουμε θα πρέπει να βρίσκεται μεταξύ δύο παράλληλων επιπέδων τα οποία θα έχουν μεταξύ τους απόσταση 16.04 mm. Η επιπεδοκυρτότητα ελέγχεται στο μεσαίο επίπεδο του αντικειμένου το οποίο πρέπει να βρίσκεται μεταξύ δύο παράλληλων επιπέδων τα οποία να έχουν μεταξύ τους απόσταση 0.04 mm. Στο παρακάτω σχήμα βλέπουμε πως έχουν τοποθετηθεί τα σύνορα για το σχέδιο που αναφέραμε προηγουμένως.



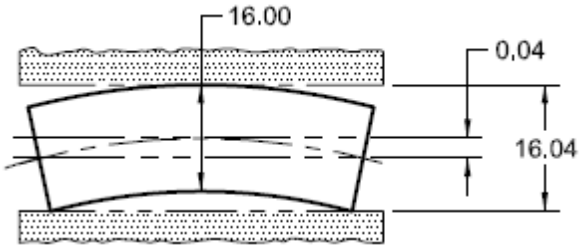
Σχ.2.34

Εξετάζοντας την επιπεδοκυρτότητα σύμφωνα με την αρχή του πλήρους υλικού μπορούμε να πούμε ότι το σύνορο VC που επιτρέπεται να βρίσκεται το αντικείμενο είναι το άθροισμα της διάστασης του πλήρους υλικού και της γεωμετρικής ανοχής της επιπεδότητας στην αντίστοιχη τιμή της διάστασης. Αυτό το σύνορο παραμένει σταθερό ανεξαρτήτως της μεταβολής της τιμής της διάστασης, καθώς όσο μειώνεται η τιμή αυτή τόσο αυξάνεται αντίστοιχα η τιμή της ανοχής της επιπεδότητας, επομένως το άθροισμα της διάστασης και της ανοχής παρμένη σταθερό. Παρακάτω βλέπουμε πως τοποθετείται στο σχέδιο η διαστασιολογική ανοχή και η ανοχή της επιπεδότητας, όταν εξετάζουμε την αρχή του πλήρες υλικού για την επιπεδότητα.



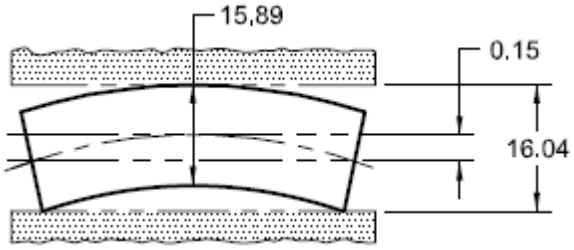
Σχ.2.35

Άρα σύμφωνα με τις ανοχές που μας δίνονται στο σχέδιο έχουμε ότι το VC σύνορο θα είναι δύο επίπεδα με απόσταση μεταξύ τους 16,04. Επίσης το μέσο επίπεδο της πλάκας όταν αυτή βρίσκεται στο πλήρες υλικό θα πρέπει να περιορίζεται μεταξύ δύο επίπεδων πλακών με μεταξύ τους απόσταση 0,04 mm.



Σχ.2.36

Εδώ θα πρέπει να επισημάνουμε ότι το πάχος της πλάκας θα πρέπει να είναι το πολύ 16 mm και όχι 16.04 που είναι τα όρια VC τα οποία αφορούν και την ανοχή της επιπεδότητας. Έτσι, όταν το τεμάχιο είναι στο πλήρες υλικό τότε η διάσταση είναι 16 mm και η ανοχή έχει την ελάχιστη τιμή της και είναι 0.04 mm ενώ όταν είναι στο ελάχιστο υλικό η διάσταση είναι 15.89 και η ανοχή της επιπεδοτητας είναι στο μέγιστο της τιμής της και είναι 0.15 mm.

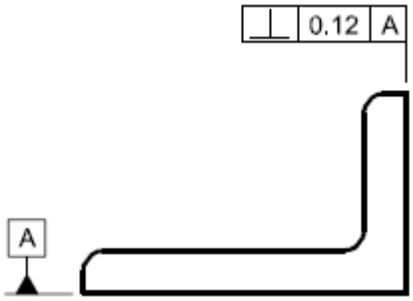


Feature size	Parallel planes tolerance allowed
16,00	0,04
15.99	0.05
15.98	0.06
↓	↓
15.90	0.14
15,89	0,15

Σχ.2.37

Γεωμετρική ανοχή Καθετότητας

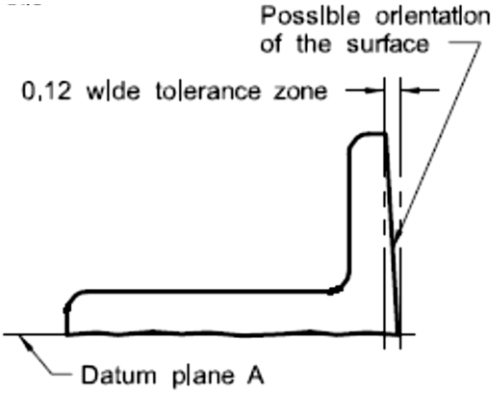
Ένα είδος ανοχής προσανατολισμού είναι και η καθετότητα. Στην συνέχει παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίο δημιουργούνται τα όρια, τα οποία καθορίζουν ουσιαστικα αν δύο επιφάνειες είναι κάθετες ή όχι. Έτσι στο **Σχήμα 2.38** βλέπουμε ένα τυπικό μηχανολογικό σχέδιο εξαρτήματος στο οποίο έχει οριστεί η ανοχή της καθετότητας.



Σχ.2.38

Η επιφάνεια στην οποία έχει τοποθετηθεί η ανοχή της καθετότητας θα πρέπει να είναι κάθετη με το επίπεδο αναφοράς που φαίνεται δεξιά από την τιμή της ανοχή προσανατολισμού, με μια απόκλιση η οποία δίνεται από την ανοχή.

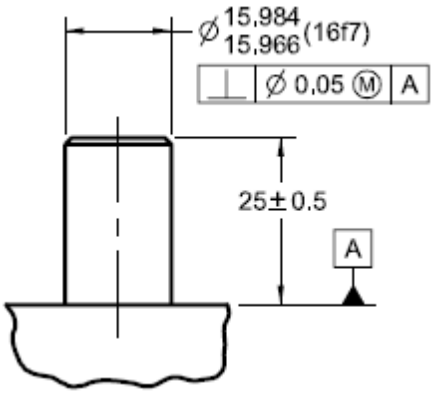
Από το **Σχήμα 2.39** βλέπουμε ποία είναι τα όρια στα οποία μπορεί να βρίσκεται η επιφάνεια που εξετάζουμε για την καθετότητά της. Θα πρέπει να τονιστεί ότι η τιμή της ανοχής δεν εκφράζει μοίρες αλλά την απόσταση δύο παράλληλων επιπέδων μέσα στα οποία πρέπει να βρίσκεται η επιφάνεια έτσι ώστε να θεωρείται κάθετη με το επίπεδο αναφοράς.



Σχ.2.39

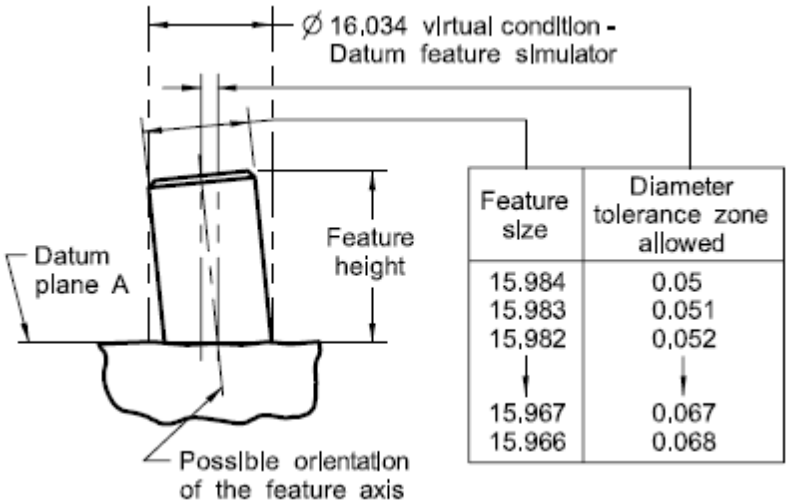
Από το σχέδιο βλέπουμε ότι η ανοχή της καθετότητας είναι 0.12 mm. Αυτό σημαίνει ότι η επιφάνεια αυτή θα πρέπει να βρίσκεται μεταξύ δύο επιπέδων με απόσταση 0.12 mm και είναι κάθετα με το επίπεδο αναφοράς

Στη συνέχεια παρατίθεται το σχέδιο ενός άξονα στον οποίο έχουν τοποθετηθεί οι ανοχές της διάστασης και της καθετότητας. Όπως βλέπουμε από το σχέδιο ο κύλινδρος θα πρέπει να είναι κάθετος με το επίπεδο αναφοράς Α. Το όριο το οποίο περιορίζει τη κλίση του άξονα είναι κύλινδρος με διάμετρο 0.05 mm.



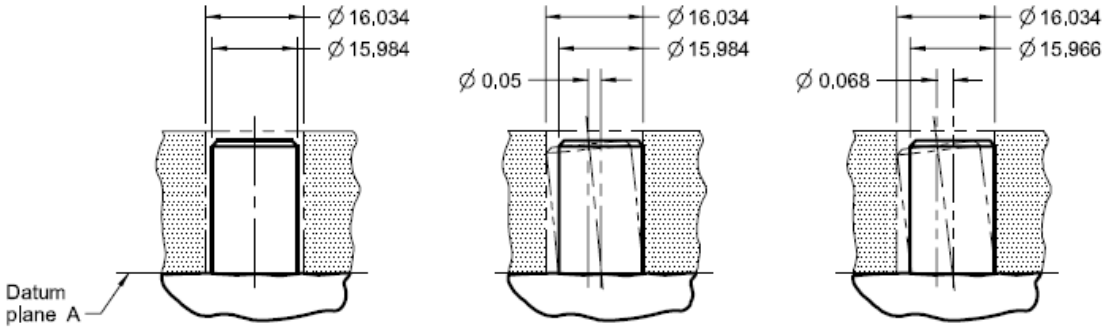
Σχ.2.40

Επίσης παρατηρούμε ότι δίπλα στην ανοχή της καθετότητας έχει τοποθετηθεί το σύμβολο της αρχής του πλήρους υλικού. Επομένως καταλαβαίνουμε ότι η ανοχή της καθετότητας σχετίζεται με την τιμή που έχει η διάμετρος του άξονα. Γίνεται αντιληπτό ότι εκτός από το όριο του άξονα θα υπάρχει και το όριο VC που θα είναι το άθροισμα της διαμέτρου του κυλίνδρου όταν αυτός βρίσκεται στο πήρες υλικό και της αντίστοιχης ανοχής της καθετότητας. Έτσι, έχουμε ότι το όριο VC θα είναι 16.034 mm. Στο **σχήμα 2.41** παρουσιάζεται σε πίνακα ο τρόπος που μεταβάλλεται η τιμή της διαμέτρου σε σχέση με την γεωμετρική ανοχή της καθετότητας.



Σχ.2.41

Από το **Σχήμα 2.42** βλέπουμε ότι σε αυτή την περίπτωση Α) βρίσκεται ο κύλινδρος στη κατάσταση του πλήρους υλικού με την κλίση του άξονα να είναι κάθετη με το επίπεδο αναφοράς χωρίς καμία απόκλιση. Στη περίπτωση Β) βρίσκεται ο κύλινδρος στη κατάσταση του πλήρες υλικού και με την μέγιστη δυνατή τιμή της ανοχής προσανατολισμού και στη Γ) περίπτωση βρίσκεται στη κατάσταση του ελάχιστου υλικού και πάλι με τη μέγιστη δυνατή τιμή της ανοχής προσανατολισμού

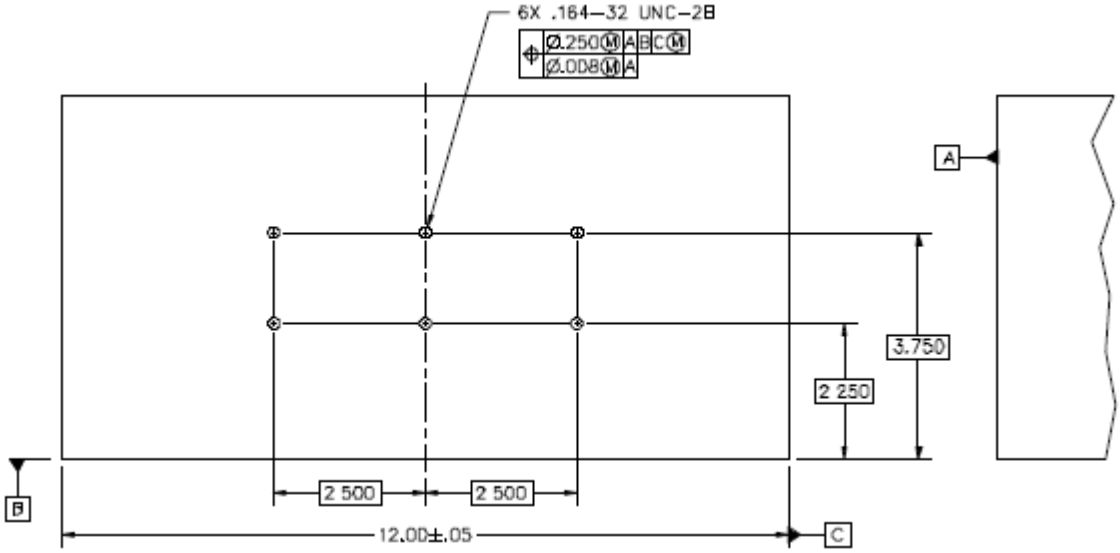


A) B) Γ)

Σχ.2.42

2.8 Πολλαπλός έλεγχος χαρακτηριστικών ως προς πλαίσια αναφοράς (Composite Feature Control Frame)

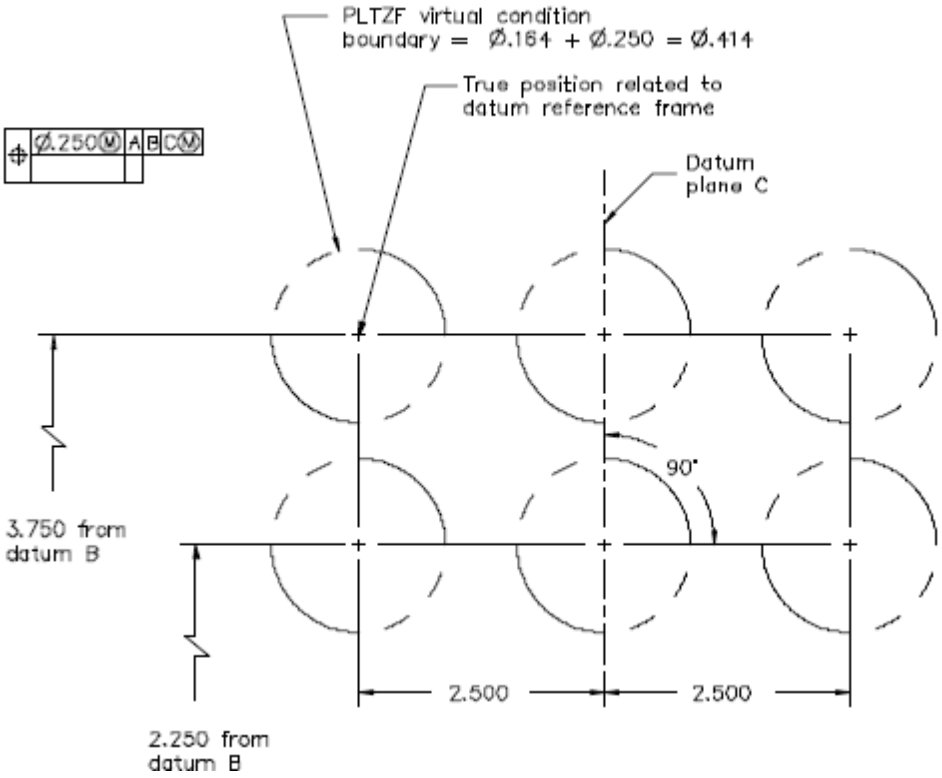
Στο **Σχ.2.43** εφαρμόζουμε πολλαπλό έλεγχο χαρακτηριστικών του συνόλου των οπών ως προς ένα καθορισμένο πλαίσιο επιπέδων αναφοράς. Ο πολλαπλός έλεγχος χαρακτηριστικών του συνόλου των οπών αποτελεί προέκταση του απλού ελέγχου ως προς ένα πλαίσιο αναφοράς και το σύμβολό του στο σχέδιο αποτελείται από δύο ή ακόμα και τρία τμήματα στο καθένα εκ των οποίων καθορίζεται μια ζώνη ανοχής για το κάθε χαρακτηριστικό. Το πάνω τμήμα καθορίζει ένα γενικό έλεγχο θέσης ενώ το κατώτερο καθορίζει μια πιο στενά καθορισμένη ζώνη ανοχής προσανατολισμού η οποία σαφώς δεν αποκλίνει από τα οριζόμενα στο πάνω τμήμα.



Σχ.2.43

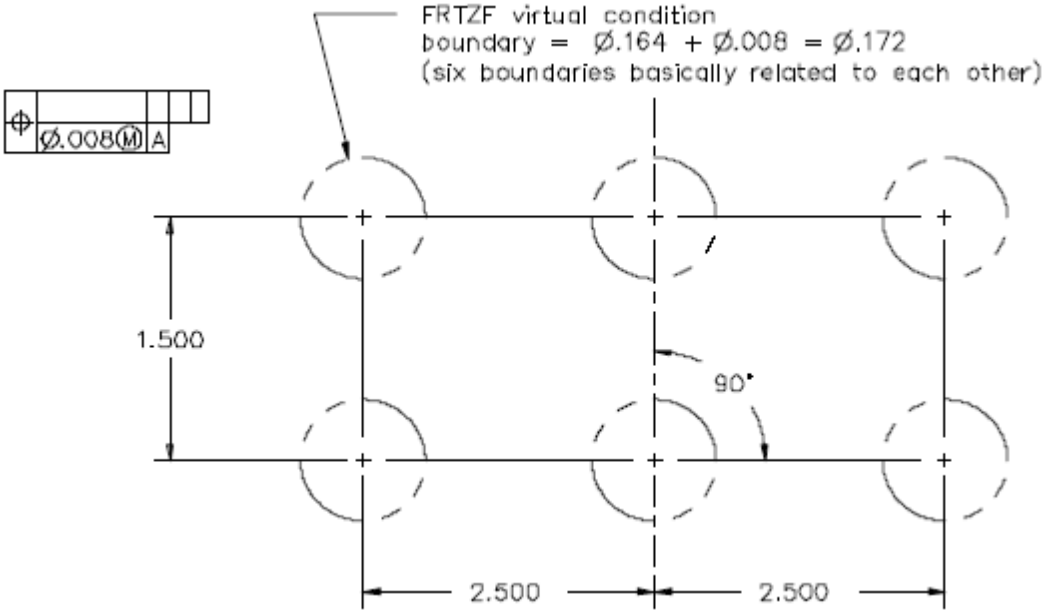
Το άνω τμήμα του πολλαπλού ελέγχου θέσης καθορίζει έναν απλό έλεγχο θέσης ως προς το συγκεκριμένο πλαίσιο αναφοράς. Στο **Σχ. 2.44** η ανοχή θέσης που καθορίζεται για κάθε οπή σχετίζεται με το πλαίσιο αναφοράς A/B/C. Η συνθήκη αυτή καθορίζει μια ζώνη ανοχής της απόλυτης θέσης του συνόλου των οπών (Pattern Locating Tolerance Zone Framework –PLTZF,

“Plahtz”) η οποία περιλαμβάνει συνολικά έξι οριακές συνθήκες όπως φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα **Σχ.2.52**



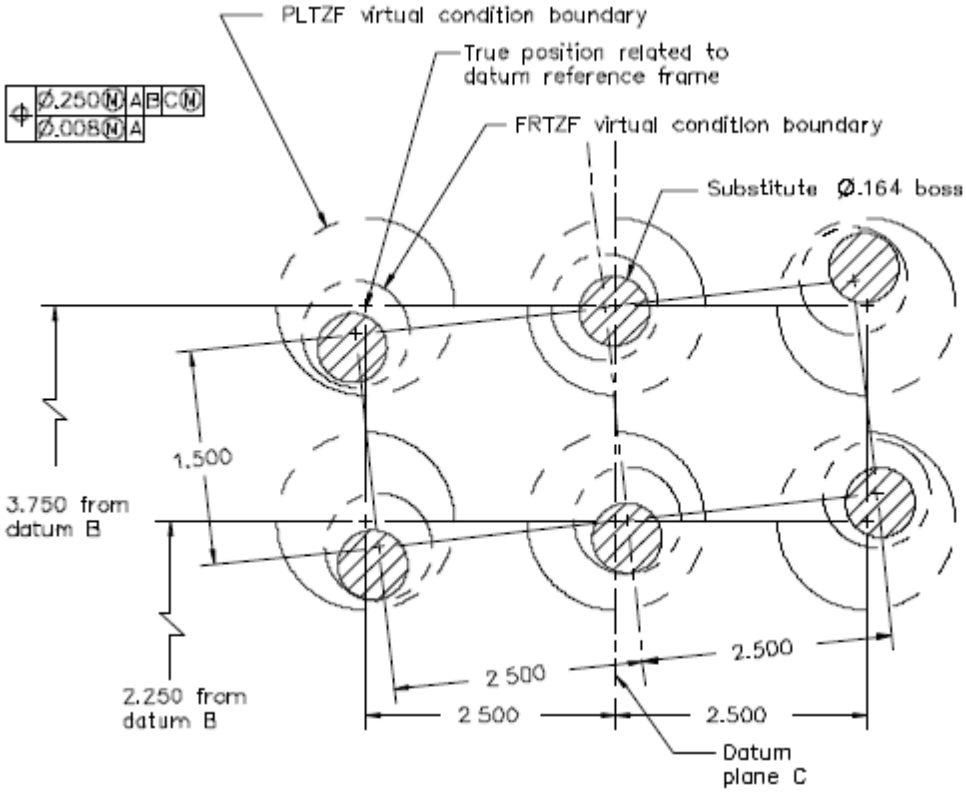
Σχ.2.44 Εικονικές οριακές ζώνες ανοχών PLTZF κάθετες στο πρωταρχικό επίπεδο A

Το κάτω τμήμα του πολλαπλού ελέγχου θέσης καθορίζει μια ζώνη ανοχής της σχετικής θέσης του συνόλου των οπών (Feature Relating Tolerance Zone Framework – FRTZF, “Fritz”) και μπορεί να περιέχει ένα, δύο ή ακόμα και τρία επίπεδα αναφοράς. Τα επίπεδα αυτά δεν περιορίζουν τη θέση του συνόλου των οπών παρά μόνο την κατεύθυνση τους όπως φαίνεται στο σχήμα **2.53**



Σχ.2.45 Εικονικές οριακές ζώνες ανοχών FRTZF κάθετες στο πρωταρχικό επίπεδο A

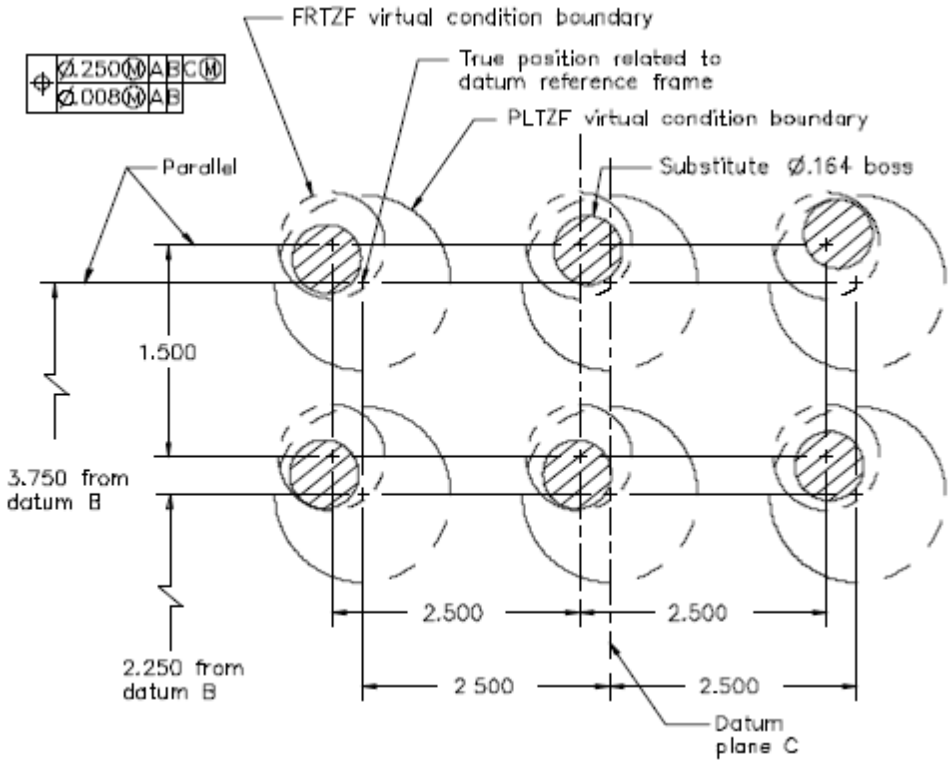
Στο ανωτέρω σχήμα γίνεται κατανοητό πως το FRTZF καθορίζει την κατεύθυνση του συνόλου των οπών και όχι τη θέση τους όπως το PLTZF. Αν θέλαμε να τοποθετήσουμε τις δύο αυτές οριακές ζώνες σε ένα κοινό σχήμα στο οποίο θα προέκυπτε η συνολική θέση (απόλυτη και σχετική) των οπών που θα ήταν όπως στο **Σχ. 2.46**



Σχ. 2.46 Πιθανή θέση ζωνών ανοχής FRTZF και PLTZF κάθετες στο πρωταρχικό επίπεδο A

Παρατηρούμε πως οι εικονικές ζώνες ανοχής PLTZF είναι μεγαλύτερες από τις εικονικές ζώνες ανοχής FRTZF και εντός αυτών οι FRTZF μπορούν να μετατοπιστούν και να περιστραφούν με μεγάλους βαθμούς ελευθερίας.

Στο **Σχ. 2.47** στο δεύτερο τμήμα του πολλαπλού ελέγχου χαρακτηριστικών έχουμε προσθέσει ένα ακόμα επίπεδο ελέγχου το δευτερεύον B. Με την προσθήκη του επιπέδου B ουσιαστικά το σύνολο των οπών πρέπει να είναι τόσο κάθετο στο επίπεδο A όσο και στο επίπεδο B. Μια πιθανή θέση των ζωνών FRTZF και PLTZF δίνεται στο **Σχ. 2.47.** Παρατηρούμε πως υπάρχει διαφορά σε σύγκριση με το **Σχ. 2.46** αφού οι οπές είναι κάθετες πλέον ως προς το επίπεδο B ωστόσο υφίσταται αρκετός χώρος μετατόπισης εντός του PLTZF.



Σχ. 2.47 Πιθανή θέση ζωνών ανοχής FRTZF και PLTZF κάθετες σε επίπεδα A και B

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΩΝ ΑΝΟΧΩΝ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΥΤΩΝ

3.1. Εισαγωγή

Στο παρελθόν, η διαστασιολόγηση των τεμαχίων ήταν σχεδόν αποκλειστικά καθήκον του σχεδιαστή. Ο σχεδιαστής επίσης είχε την ευθύνη για τον καθορισμό γραμμικών περιθωρίων ανοχής σε ορισμένες διαστάσεις των τεμαχίων, σύμφωνα με τις απαιτήσεις ακρίβειας που απαιτούνταν για το προϊόν αυτό. Τα πράγματα ωστόσο έχουν αλλάξει σημαντικά κατά τη διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών. Τα τεχνικά πρότυπα έχουν ενθαρρύνει την υιοθέτηση των γεωμετρικών ανοχών, έτσι ώστε ο σχεδιαστής να έχει περισσότερα εργαλεία για τη διασφάλιση της συναρμογής και της σωστής λειτουργίας του προϊόντος. Η στατιστική προσέγγιση του ελέγχου της ποιότητας παραγωγής έχει καταστήσει τη διαστασιολόγηση μια πολύπλοκη δραστηριότητα η οποία περιλαμβάνει τη συνεργασία τόσο του προσωπικού που ασχολείται με τη σχεδίαση όσο και του προσωπικού που ασχολείται με την παραγωγή.

Λόγω της αύξησης της πολυπλοκότητας των γεωμετρικών ανοχών έχουν αναπτυχθεί μέθοδοι που υποβοηθούν το καθορισμό των γεωμετρικών ανοχών στα μηχανολογικά τεμάχια. Οι μέθοδοι αυτοί μπορούν να αναλυθούν στα επόμενα τρία βήματα (**Σχ. 3.1**):

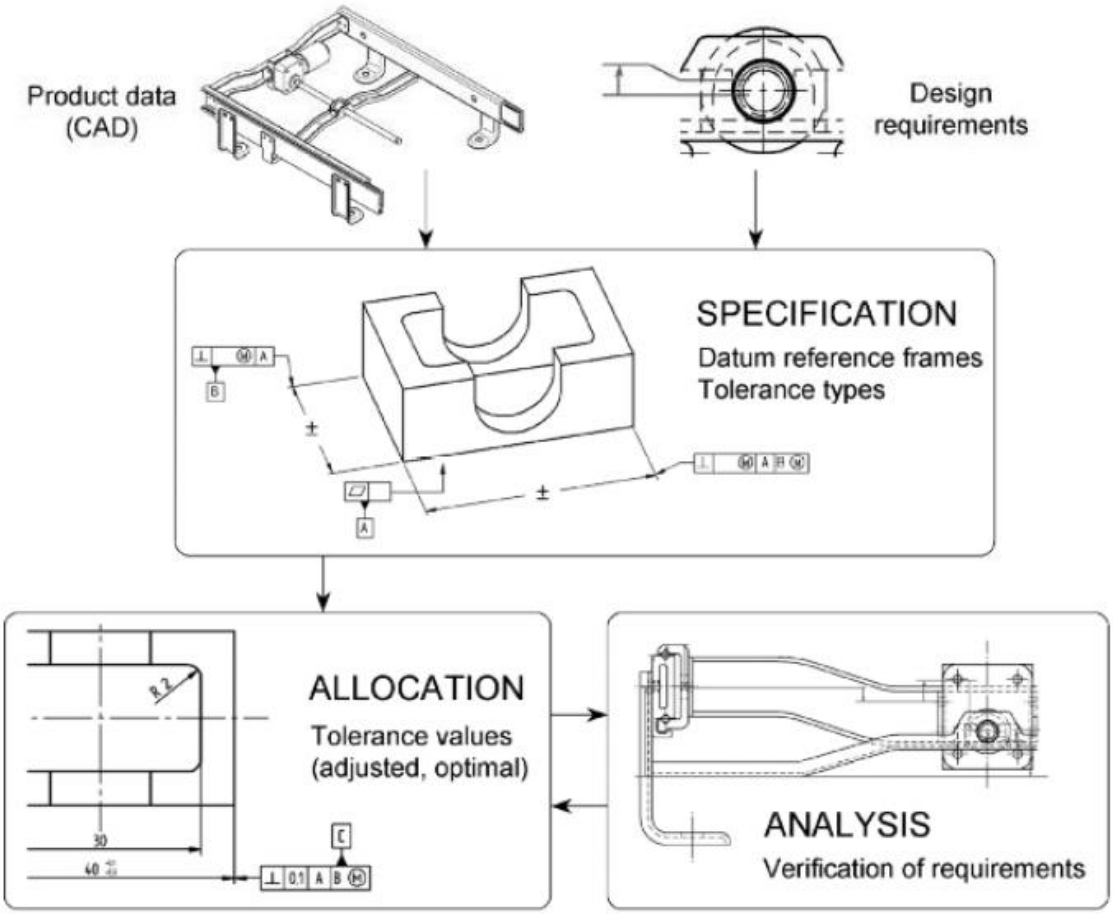
1. Προσδιορισμός στοιχείων προς διαστασιολόγηση (Tolerance Specification): Αρχικά εντοπίζονται όλα τα στοιχεία της μηχανολογικής συναρμογής τα οποία πρέπει να διαστασιολογηθούν. Μερικά στοιχεία τα οποία έχουν τη μεγαλύτερη σημασία για τη διάταξη επιλέγονται ως στοιχεία αναφοράς (datum references) για τα υπόλοιπα. Εν συνεχεία για το κάθε στοιχείο επιλέγεται ένα σύνολο διαφορετικών τύπων ανοχής προκειμένου να προσδιοριστεί η μεταβολή του σε σχέση με την ονομαστική γεωμετρία και τα στοιχεία αναφοράς του.
2. Καθορισμός ανοχών (Tolerance Allocation): Σε κάθε στοιχείο της συναρμογής καθορίζονται συγκεκριμένες τιμές ορίων ανοχής οι οποίες προκύπτουν είτε από προσαρμογή (δηλαδή, βελτίωση των αρχικών εμπειρικών τιμών) είτε από βελτιστοποίηση (δηλαδή, ελαχιστοποίηση της συνάρτησης κόστους που υπόκεινται σε περιορισμούς παραγωγής).
3. Ανάλυση Ανοχών (Tolerance Analysis): Κάθε φορά που απαιτείται, στο πλαίσιο μιας διαδικασίας καθορισμού ανοχών, οι σχεδιαστικές απαιτήσεις επαληθεύονται μέσω του υπολογισμού των γεωμετρικών οντοτήτων όπως είναι τα διάκενα, οι γωνίες, καθώς και οι διαστάσεις που αφορούν διάφορα τμήματα της συναρμογής (stackup ανοχή).

Οι διαδικασίες αυτές έχουν καθορισθεί στο παρελθόν από ερευνητές σαν ένα τυπικό διάγραμμα ενεργειών (Farmer and Gladman 1986). Όπως αναφέρθηκε μπορούν να χρησιμοποιηθούν διαφορετικές μέθοδοι για τον καθορισμό των ανοχών (εμπειρικές μέθοδοι, μέθοδοι βελτιστοποίησης) με την κάθε μια από αυτές να απαιτεί διαφορετικές προσεγγίσεις. Οποιαδήποτε βέβαια μέθοδος και να χρησιμοποιείται ο σχεδιαστής πρέπει να δίνει ιδιαίτερη προσοχή στις

προδιαγραφές των ανοχών καθώς η λάθος επιλογή τύπου ανοχής καθώς και στοιχείου αναφοράς (datum reference) θα επηρεάσει τα αποτελέσματα των υπόλοιπων σχεδιαστικών επιλογών.

Στο κεφάλαιο αυτό εξετάζουμε το πρόβλημα του καθορισμού των ποιοτικών προδιαγραφών των ανοχών των τεμαχίων *(χωρίς τη χρήση συγκεκριμένων τιμών)* με βάση τις πληροφορίες που έχουμε για το προϊόν. Τα στοιχεία τα οποία πρέπει να λαμβάνονται υπόψη για τη διαδικασία αυτή είναι τα γεωμετρικά δεδομένα του τεμαχίου σε λογισμικό 3D-CAD. Επιπρόσθετα κατά τη διαδικασία αυτή λαμβάνονται υπόψη ορισμένα στοιχεία για τα τεμάχια τα οποία δεν περιλαμβάνονται στα γεωμετρικά τους μοντέλα, όπως είναι οι σχεδιαστικές απαιτήσεις για τη συναρμογή αυτών και τη λειτουργία τους.

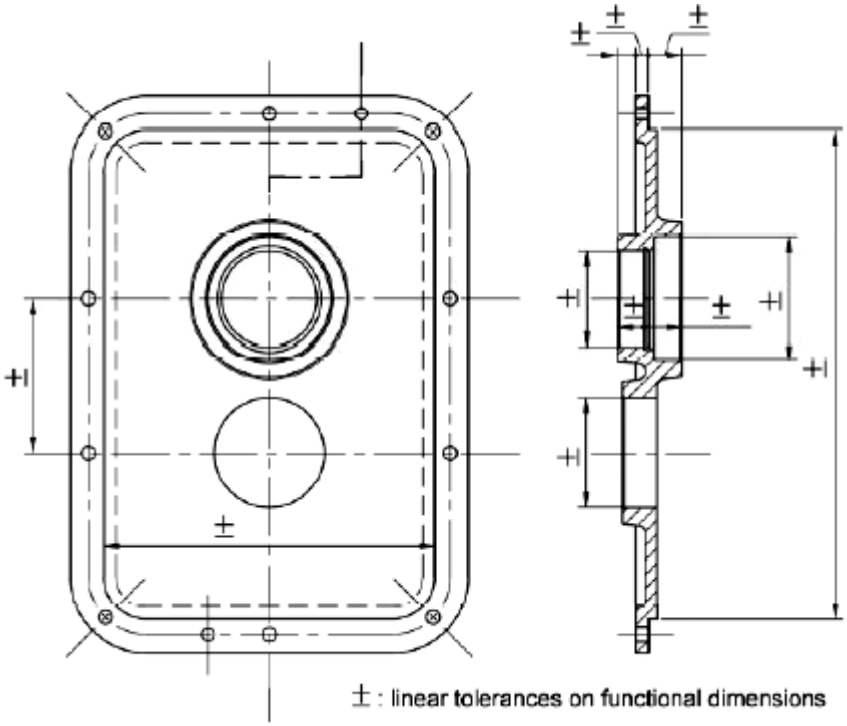
Όπως σε όλα τα προβλήματα καθορισμού ανοχών, οι προδιαγραφές μπορούν να εξεταστούν σε δύο διαφορετικά επίπεδα: το εμπειρικό και το γενικό. Με τον εμπειρικό προσδιορισμό των ανοχών δημιουργούνται κάποιες τυποποιημένες συστηματικές διαδικασίες οι οποίες μπορούν να εφαρμοστούν στη συνήθη βιομηχανική πρακτική, ενώ με το γενικό τρόπο προσπαθούν να αναπτυχθούν επιστημονικά τεκμηριωμένοι μέθοδοι και να εισαχθούν σε λογισμικά σχεδίασης (computer-aided support tools). Εν συνεχεία περιγράφονται και οι δύο αυτές ακολουθούμενες μέθοδοι που περιγράφουν τις διαφορετικές πτυχές του προβλήματος όπως προκύπτουν από την τεχνική και επιστημονική βιβλιογραφία.



Σχ. 3.1: Βήματα προσδιορισμού ανοχών

3.2. Μετάβαση από Γραμμικές σε Γεωμετρικές Ανοχές

Με τη χρήση γραμμικών ανοχών, το πρόβλημα του προσδιορισμού των ανοχών απλοποιείται ιδιαίτερα και ανάγεται στην επιλογή των κατάλληλων λειτουργικών διαστάσεων των τεμαχίων στα οποία πρέπει να εφαρμοσθούν οι ανοχές αυτές. Αυτό πραγματοποιείται σχετικά εύκολα αναλύοντας τις δομικές σχέσεις της συναρμογής. Η κάθε λειτουργική διάσταση είναι η απόσταση ανάμεσα σε δύο επιφάνειες ή άλλες γεωμετρικές οντότητες (π.χ. άξονες, ακμές ,σημεία) στις οποίες καθορίζονται σχέσεις ανάμεσα στα συνδεόμενα τεμάχια. Όταν υφίστανται εναλλακτικές επιλογές για το προσδιορισμό των ανοχών τότε χρησιμοποιούνται κριτήρια κατασκευής και επιθεώρησης *(manufacturing and inspection criteria)* προκειμένου να καθορισθούν οι κατάλληλες διαστάσεις στις οποίες πρέπει να εφαρμοσθούν οι ανοχές. Στο **Σχ. 3.2** π.χ. δίνονται κάποιες λειτουργικές διαστάσεις που έχουν επιλεγεί σαν παράδειγμα σε ένα τεμάχιο (κέλυφος μειωτήρα).

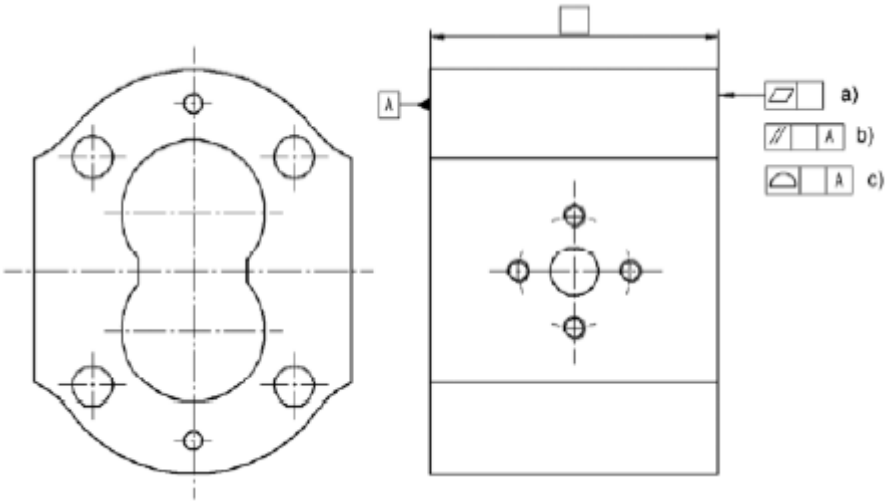


Σχ. 3.2: Καθορισμός των γραμμικών ανοχών (παλαιά πρακτική)

Όμως η χρήση γραμμικών διαστασιολογικών ανοχών έχει πάρα πολλούς περιορισμούς όσον αφορά την ερμηνεία, την αποτελεσματικότητα και τη δυνατότητα επιθεώρησης αυτών. Έτσι είναι απαραίτητη η χρησιμοποίηση γεωμετρικών ανοχών με σκοπό να επιτραπεί ο πλήρης έλεγχος των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των τεμαχίων (μορφή, προσανατολισμός, θέση, προφίλ) με βάση τα ισχύοντα σχετικά πρότυπα ASME και ISO (ASME Y14.5: 2009, ISO 1101:2012). Η διαδικασία αυτή είναι ιδιαίτερα δύσκολη και έτσι δεν είναι εύκολο να δημιουργηθούν πλήρως καθορισμένοι μέθοδοι διαστασιολόγησης που να μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε κάθε περίπτωση.

Είναι συνήθως βολικό να αναλύουμε τη γενικότερη επιδίωξη για εναρμόνιση με τις προδιαγραφές του προϊόντος σε απλούστερες συνθήκες των επιμέρους τεμαχίων/διαστάσεων. Ένα σετ γεωμετρικών ανοχών θεωρείται συνήθως αποδεκτό όταν καθορίζει σαφώς τη θέση του κάθε χαρακτηριστικού του τεμαχίου μέσα στις ελεγχόμενες αποκλίσεις. Ο βαθμός στον οποίο πρέπει να

καθορίσουμε τα χαρακτηριστικά ενός τεμαχίου εξαρτάται από τη λειτουργία του τεμαχίου. Όπως φαίνεται στο **Σχ. 3.3** υπάρχουν τρεις διαφορετικοί τρόποι με τους οποίους μπορεί να γίνει ο καθορισμός των ανοχών της επιφάνειας του κελύφους της αντλίας σε σχέση με την απέναντι επιφάνεια αυτής. Με τον πρώτο τρόπο (a) δεν περιορίζεται η κατεύθυνση του χαρακτηριστικού ως προς την επιφάνεια αναφοράς. Με τη δεύτερη επιλογή (b) περιορίζεται η κατεύθυνση του χαρακτηριστικού αλλά δεν περιορίζεται η απόσταση του από το επίπεδο. Η επιλογή (c) είναι εκείνη η οποία επιλέγεται καθώς μας παρέχει επιπρόσθετο έλεγχο θέσης ο οποίος μπορεί να απαιτείται από κάποια τεχνική λειτουργία του τεμαχίου.



Σχ. 3.3: Εναλλακτικές προδιαγραφές ανοχών για ένα στοιχείο

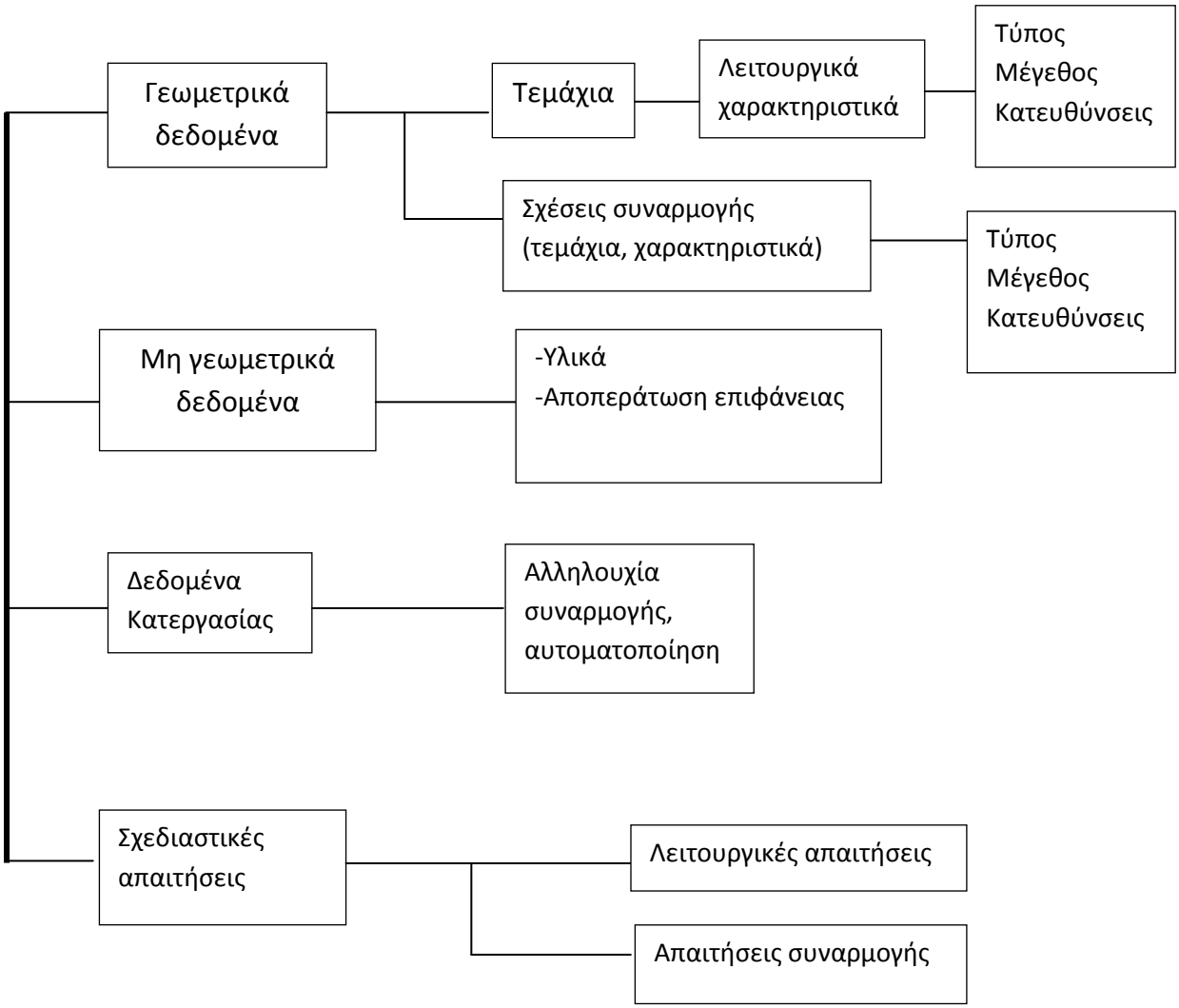
Το κριτήριο αποδοχής μιας γεωμετρικής ανοχής μπορεί να κατατμηθεί σε τρεις επιμέρους διαφορετικές συνθήκες: εγκυρότητα, επάρκεια και συνοχή (Willhelm και Lu 1992). Μια ανοχή μπορεί να μην είναι έγκυρη αν είναι αδύνατο να ικανοποιηθεί στην πράξη λόγω της λάθος επιλογής τιμών (δεν αντιπροσωπεύει τις προδιαγραφές ανοχών). Η συνθήκη της επάρκειας συζητήθηκε ανωτέρω στο παράδειγμα του **Σχ. 3.3**. Έλλειψη συνοχής σε μια ανοχή εννοούμε τον ελλειπή έλεγχο ενός στοιχείου ως προς ένα στοιχείο αναφοράς, για παράδειγμα στο **Σχ. 3.3** η μη χρησιμοποίηση του ελέγχου επιπεδότητας για το επίπεδο Α θα είχε σαν αποτέλεσμα το μη σαφή καθορισμό της θέσης του επιπέδου.

Σε μια διαδικασία προσδιορισμού των ανοχών ενός μηχανολογικού τεμαχίου πρέπει να γίνουν ορισμένες παραδοχές αναφορικά με τον επιδιωκόμενο τομέα εφαρμογής του. Στις περισσότερες περιπτώσεις οι προτεινόμενες μέθοδοι της βιβλιογραφίας αφορούν τον τομέα των περιστρεφόμενων μηχανών και άλλου είδους συναρμογών με τυπικές μηχανικές διατάξεις (στεγανοποίηση, άρθρωση, μετάδοση ισχύος). Τα προϊόντα αυτά στην πλειοψηφία τους αποτελούνται από κατεργασμένα τεμάχια και δεν καλύπτουν το γενικό τομέα ενδιαφέροντος για το καθορισμό των ανοχών. Για παράδειγμα, διαφορετικά κριτήρια ανοχών εφαρμόζονται στα σύνθετα υλικά στα οποία δεν μπορούν να προσδιορισθούν ακριβή επίπεδα αναφοράς και καθορίζεται η θέση τους με ειδικά εργαλεία (Wang *et al.* 2003).

Μεγάλη προσοχή πρέπει να δίνεται επίσης και στο πως καθορίζονται ποσοτικά οι ανοχές. Όπως αναφέρθηκε ανωτέρω αρχικά προσδιορίζονται τα στοιχεία στα οποία θα εφαρμοσθούν οι ανοχές ενώ ο συγκεκριμένος ποσοτικός καθορισμός αυτών εναπόκεινται σε μετέπειτα φάση της

διαδικασίας. Ωστόσο τόσο το είδος των ανοχών όσο και τα στοιχεία αναφοράς πρέπει να βελτιστοποιούνται (Nassef and El Maraghy 1997). Έτσι σύμφωνα με την προσέγγιση αυτή μια πιο σωστή επιδίωξη κατά το καθορισμό των ανοχών θα ήταν η δημιουργία ενός σετ εναλλακτικών επιλογών ανοχής για μετέπειτα επιλογή λαμβάνοντας υπόψη τα οικονομικά κριτήρια.

Ένα άλλο στοιχείο που σχετίζεται με τη βελτιστοποίηση των ανοχών έχει να κάνει και με την επιλογή της φάσης της παραγωγής του υλικού κατά την οποία οι ανοχές πρέπει να καθορισθούν. Συνήθως στη βιβλιογραφία αναφέρεται πως η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται στις τελευταίες φάσεις σχεδιασμού του προϊόντος καθώς απαιτούνται λεπτομερή γεωμετρικά μοντέλα 3D-CAD. Ωστόσο έχει αναφερθεί επίσης στη βιβλιογραφία (Sudarsan *et al.* 1998; Naraharı *et al.* 1999) πως ο καθορισμός των ανοχών πρέπει να γίνεται στα αρχικά στάδια σχεδιασμού του προϊόντος (design for tolerance). Ο σκοπός αυτός μπορεί να επιτευχθεί με μια προσεκτική αξιολόγηση των επιλογών σχετικά με το καθορισμό της συναρμογής, σχεδιασμό των επιφανειών επαφής των τεμαχίων και προγραμματισμό της συναρμογής του. Αν και η πρακτική αυτή αρχικά εφαρμοζόταν στις γραμμικές ανοχές, αναθεωρήθηκε πρόσφατα από τον Pérez *et al.* (2006) όπου δόθηκε μια πιθανή επέκταση της και στις γεωμετρικές ανοχές.



Σχ. 3.4: Εισαγωγή δεδομένων για προσδιορισμό των ανοχών

3.3 Περιγραφή Προϊόντος

Στο ανωτέρω **Σχ. 3.4** παρουσιάζονται τα δεδομένα τα οποία ο σχεδιαστής πρέπει να συλλέξει με σκοπό τον καθορισμό των γεωμετρικών ανοχών των τεμαχίων. Τα δεδομένα αυτά είναι σε γενικές γραμμές ίδια με τα δεδομένα εκείνα που απαιτούνται για καθορισμό των γραμμικών ανοχών. Συνολικά, δύο είδη δεδομένων είναι απαραίτητα για τον καθορισμό των ανοχών τόσο με τον εμπειρικό τρόπο όσο και με τη βοήθεια ηλεκτρονικών υπολογιστών:

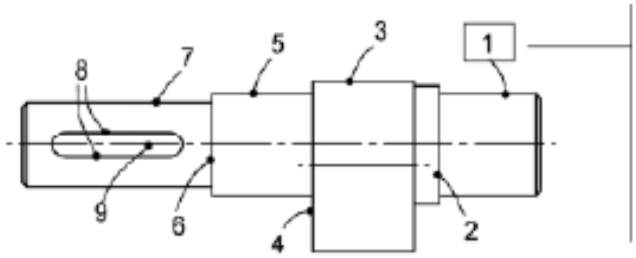
- Η γεωμετρική αναπαράσταση (προτιμητέα σε λογισμικό 3D-CAD) των τεμαχίων και των σχέσεων συναρμογής τους.
- Μια συνολική λίστα με τις σχεδιαστικές απαιτήσεις που επιβάλλονται τόσο λόγω της λειτουργίας του προϊόντος όσο και λόγω των απαιτήσεων για σωστή συναρμογή με τα υπόλοιπα τεμάχια.

Τα υπόλοιπα είδη δεδομένων (μη γεωμετρικά δεδομένα και δεδομένα σχετικά με την κατεργασία) ίσως να μην είναι αυστηρώς απαραίτητα για το ποσοτικό καθορισμό των ανοχών των τεμαχίων, αν και πιθανόν να είναι σημαντικά για τα υπόλοιπα στάδια ανάπτυξης του προϊόντος (ποσοτικό καθορισμό και ανάλυση των ανοχών). Για παράδειγμα τα υλικά και οι εργασίες αποπεράτωσης που χρησιμοποιούνται στα τεμάχια καθορίζουν την επιλογή των κατεργασιών παρασκευής, η οποία μπορεί να επηρεάζει τις αποδιδόμενες ανοχές. Κατά τον ίδιο τρόπο κάθε άλλη πληροφορία που μπορεί να είναι διαθέσιμη για τη διαδικασία συναρμογής (σειρά διεργασιών συναρμολόγησης, επίπεδο αυτοματισμού, τρόπος συγκράτησης τεμαχίων) μπορεί να επιβάλλει ειδικές απαιτήσεις ακρίβειας σε χαρακτηριστικά τα οποία εμφανίζονται ως μη λειτουργικά (Roy and Bharadwaj 1996). Η απόκτηση των δεδομένων αυτών εκ των προτέρων μπορεί να καθορίσει τις αρχικές αποφάσεις ανάμεσα στις προτεινόμενες εναλλακτικές προδιαγραφές. Η πολυπλοκότητα του προϊόντος και το είδος του λογισμικού υποστήριξης που επιθυμείται για το καθορισμό των προδιαγραφών των ανοχών υποδεικνύουν τη δομή που πρέπει να έχουν τα δεδομένα εισόδου.

3.3.1. Γεωμετρικά Δεδομένα

Κάθε τεμάχιο έχει μια συγκεκριμένη ονομαστική γεωμετρία, επί της οποίας επιτρέπονται ορισμένες μεταβολές οι οποίες ορίζονται μέσω των ανοχών. Τα γεωμετρικά δεδομένα περιγράφουν τα επιμέρους μεμονωμένα τμήματα καθώς και τις αμοιβαίες σχέσεις τους στη συναρμογή.

Κάθε γεωμετρικό τεμάχιο φέρει κάποιες γενικές ιδιότητες, όπως το υλικό κατασκευής τους και η πιθανή ύπαρξη όμοιων τμημάτων του στη συναρμογή. Η λεπτομερής περιγραφή του τεμαχίου αποτελείται από ένα κατάλογο λειτουργικών χαρακτηριστικών του, δηλαδή τις επιφάνειες ή τα χαρακτηριστικά μεγέθους που έχουν γεωμετρικές σχέσεις με χαρακτηριστικά που βρίσκονται σε επαφή. Ο κατάλογος αυτός μπορεί να επεκταθεί και σε άλλα μη λειτουργικά χαρακτηριστικά του, εάν αυτά πρόκειται να ελεγχθούν, όπως υποστηρίζεται από ορισμένους κατασκευαστές στο βιομηχανικό τομέα σύμφωνα με τα πρότυπα ASME.



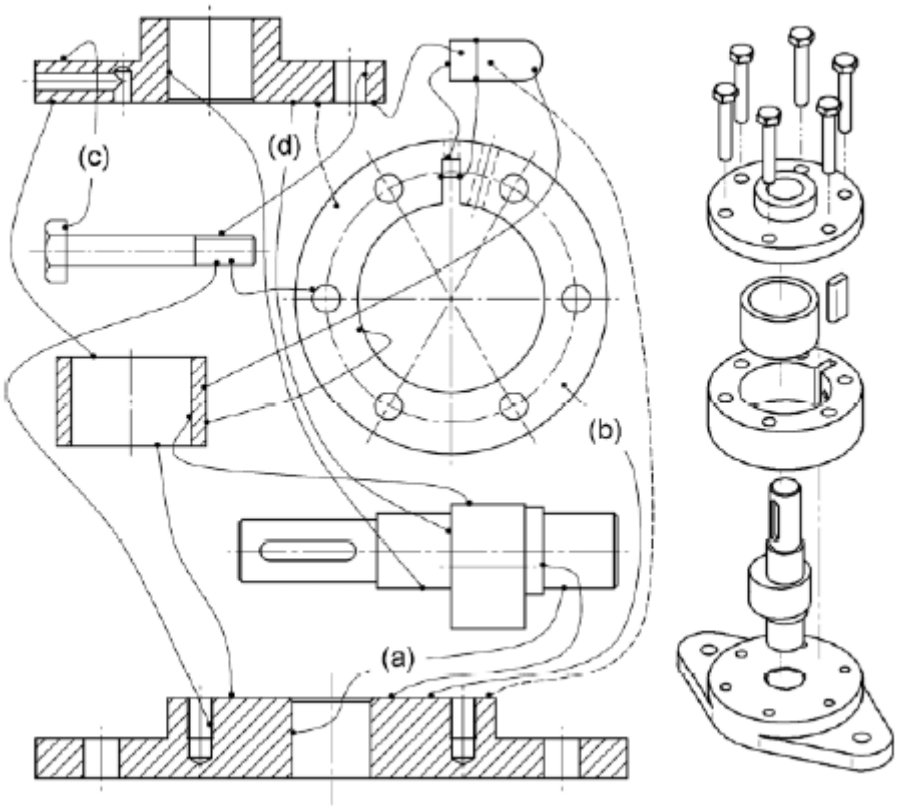
Τεμάχιο 1
-Σχήμα κυλινδρικό
-Κατεύθυνση x άξονας
-Επιφάνεια: 3215 mm^2
-Συμμετρική με εύκολη πρόσβαση

Σχ. 3.5: Περιγραφή χαρακτηριστικών ανοχών τεμαχίου

Στο **Σχ. 3.5** παρουσιάζονται τα λειτουργικά χαρακτηριστικά του τεμαχίου (στροφαλοφόρου άξονα) μαζί με μια πιθανή περιγραφή τους. Οι βασικές πληροφορίες που απαιτούνται για οποιαδήποτε διαδικασία καθορισμού ανοχών τεμαχίων περιλαμβάνει το σχήμα τους, το χωρικό προσανατολισμό τους, την αντιπροσωπευτική γεωμετρική τους οντότητα καθώς και τον αριθμό των ίδιων χαρακτηριστικών στο τεμάχιο. Επιπρόσθετες πληροφορίες θα μπορούσαν να βοηθήσουν στην επιλογή του χαρακτηριστικού που πρέπει να τεθεί σα χαρακτηριστικό στοιχείο αναφοράς (Datum Reference Frame -DRF) του τεμαχίου. Ανάλογα με τη προδιαγραφή, η επιλογή αυτή θα μπορούσε να αφορά χαρακτηριστικά με ευνοϊκές ιδιότητες, όπως π.χ. με μεγάλο μέγεθος, με συμμετρία, η άλλα που διαθέτουν ευκολία πρόσβασης στις επιφάνειες αναφοράς προκειμένου να γίνει ο έλεγχος αυτών (μετρητικά συστήματα).

Τα δεδομένα αυτά από τη συναρμογή περιγράφουν όλα τα ζεύγη σχέσεων μεταξύ των χαρακτηριστικών του τμημάτων. Το **Σχ. 3.6** δείχνει τις σχέσεις συναρμογής που προσδιορίζονται για ένα προϊόν (περιστροφικός συμπιεστής), το οποίο περιλαμβάνει το τμήμα που φαίνεται στο **Σχ. 3.5**. Κάθε συναρμογή συνήθως σχετίζεται με μια ή περισσότερες απαιτήσεις σχεδιασμού και μπορεί έτσι να επηρεάσει την επιλογή των τύπων ανοχής για τα εμπλεκόμενα χαρακτηριστικά.

Οι σχέσεις συναρμογής μπορούν να θεωρηθούν ως απλές επαφές μεταξύ των τεμαχίων, χωρίς να απαιτείται περαιτέρω ανάλυση. Για μια αναλυτική διαδικασία καθορισμού των προδιαγραφών, ωστόσο, είναι καλύτερα να διακρίνουμε τις σχέσεις συναρμογής σε σχέση με τις πραγματικές σχέσεις επαφής που καθορίζονται μεταξύ των τμημάτων. Μια πιθανή ταξινόμηση από τις πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες φαίνεται στο **Σχ. 3.6**. Περιλαμβάνει ταίριασμα μεταξύ χαρακτηριστικών μεγέθους (a), σχέσεις επαφής με τουλάχιστον τρία σημεία πραγματικής επαφής (κάτω φλάντζα με ενδιάμεσο δακτύλιο) (b), απλές επαφές με τουλάχιστον ένα σημείο επαφής (κεφαλή οπής με πρόσωπο άνω φλάντζας) (c), και ονομαστικές σχέσεις που δεν αποτελούν κάποια συναρμογή αλλά απλά απαιτούνται για σύμπτωση των ιδανικών επιφανειών (d). Παρόμοιες ταξινομήσεις έχουν προταθεί με έμφαση στους βαθμούς ελευθερίας που αφαιρούνται από τη σχετική κίνηση των τμημάτων που βρίσκονται σε συναρμογή (Wang et al., 2003).



Σχ. 3.6: Σχέσεις συναρμογής σε περιστροφικό συμπιεστή

3.3.2 Σχεδιαστικές απαιτήσεις

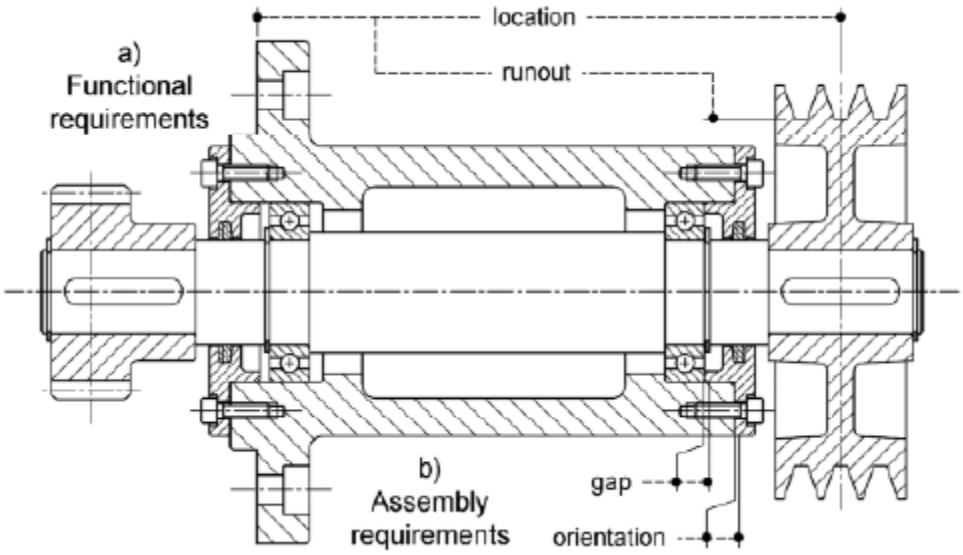
Εκτός από τα γεωμετρικά δεδομένα που απαιτούνται, η πλήρης περιγραφή του προϊόντος περιλαμβάνει και τις σχεδιαστικές απαιτήσεις που πρέπει να πληρούνται μέσω του καθορισμού των ανοχών του κάθε τεμαχίου. Οι σχεδιαστικές απαιτήσεις αυτές αποτελούν τις τεχνικές προδιαγραφές του προϊόντος και πρέπει να συλλεχθούν να ταξινομηθούν και να εισαχθούν είτε στο εμπειρικό είτε στο υπολογιστικό λογισμικό με το οποίο θα καθορισθούν οι ανοχές.

Συναρμολόγηση και Λειτουργία (Fit and Function)

Ποιος είναι ο λόγος για τον οποίο απαιτούμε ακρίβεια σε ένα μηχανολογικό τεμάχιο; Η πρώτη απάντηση που μπορεί να δοθεί έχει να κάνει με τη διασφάλιση της λειτουργικότητας του προϊόντος, η οποία επιβάλλει την ακριβή κατασκευή των τεμαχίων ώστε να διατηρούν τους κινηματικούς μηχανισμούς τους ή τη θέση των επιμέρους τεμαχίων τους. Ορισμένες απαιτήσεις του τύπου αυτού τις οποίες και θα ονομάσουμε <u>λειτουργικές απαιτήσεις</u> (functional requirements) φαίνονται στην ακόλουθη **Σχ. 3.7**.(a), σύστημα μετάδοσης κίνησης με ιμάντα. Οι αυλακώσεις της τροχαλίας πρέπει να είναι τοποθετημένες με ακρίβεια σε σχέση με ένα εξωτερικό στοιχείο συναρμογής (ιμάντας) έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η ευθυγράμμιση με την αντίστοιχη τροχαλία του ηλεκτρικού κινητήρα. Εάν η προδιαγραφή αυτή δεν ικανοποιείται οι ιμάντες θα ολισθαίνουν ακανόνιστα και θα προκαλούν φθορά, θόρυβο και απώλεια ισχύος. Παρομοίως οι βάσεις στήριξης των αυλακώσεων της τροχαλίας πρέπει να εμφανίζουν περιορισμένη ελευθερία ταλάντωσης έτσι ώστε να αποφεύγεται η έκκεντρη φόρτιση του άξονα.

Ένα άλλο ζήτημα το οποίο πρέπει να αντιμετωπιστεί είναι η συναρμολόγηση του προϊόντος, η οποία απαιτεί επαρκή ακρίβεια των τεμαχίων ώστε να διασφαλιστεί ότι τα επιμέρους τεμάχια μπορούν να συνδεθούν κανονικά. Οι απαιτήσεις αυτές αναφέρονται ως απαιτήσεις συναρμολόγησης (assembly requirements) των τεμαχίων και φαίνονται αναλυτικά στο **Σχ. 3.7** (b). Η πλευρά του καλύμματος της τροχαλίας δε θα εφαρμόσει σωστά στο κέλυφος της τροχαλίας αν είτε δεν υφίσταται ένα μικρό κενό ανάμεσα στο κέλυφος και στο σφαιρεοτριβέα είτε ο πλευρικός βραχίονας δεν είναι κατάλληλα τοποθετημένος σε σχέση με το κύριο σώμα.

Στις αρχικές επιστημονικές εργασίες δεν υπήρχε καμία διάκριση μεταξύ των δύο αυτών διαφορετικών σχεδιαστικών απαιτήσεων και ονομάζονταν γενικά λειτουργικές απαιτήσεις (Weill 1988). Ωστόσο έχει αναφερθεί πως ο καθορισμός λειτουργικών ανοχών (functional tolerancing) είναι πιο πολύπλοκο πρόβλημα σε σύγκριση με το καθορισμό ανοχών συναρμολόγησης (Voelcker 1998). Αυτό είναι λογικό καθώς κατά τη λειτουργία των τεμαχίων προκύπτουν μεταβολές στις φυσικές και μηχανικές ιδιότητες των υλικών που δεν είναι εύκολο να προσδιοριστούν στο γενικό μοντέλο. Επιπρόσθετα οι λειτουργικές απαιτήσεις πρέπει να τεθούν αναλυτικά από το σχεδιαστή σύμφωνα με τον τύπο του προϊόντος και τη σχέση του με τον έξω κόσμο. Αντίθετα οι απαιτήσεις συναρμολόγησης σχετίζονται με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά τα οποία μπορούν να αναπαραχθούν από τα σχεδιαστικά δεδομένα του προϊόντος. Για παράδειγμα το κενό που απαιτείται ανάμεσα στο κάλυμμα και στο σφαιρεοτριβέα όπως φαίνεται στο Σχ. 3.7 (b) μπορεί να αναγνωρισθεί αυτόματα από την ύπαρξη μιας ονομαστικής σχέσης μεταξύ των επίπεδων επιφανειών των δύο τεμαχίων.



Σχ. 3.7: Λειτουργικές απαιτήσεις και απαιτήσεις συναρμολόγησης τεμαχίων

Ανεξάρτητα με τον τρόπο τον οποίο συλλέγονται τα δεδομένα (διαδραστικά, ή μέσω προγραμμάτων) πρέπει να λαμβάνονται σοβαρά υπόψη καθώς σχετίζονται άμεσα με τις καθοριζόμενες ανοχές. Κάθε μέθοδος πρέπει να συμπεριλαμβάνει ένα κατακόρυφο διάγραμμα στο οποίο περιγράφεται συνολικά η διαδικασία από τις απαιτήσεις ως τις ανοχές. Αν και δεν υπάρχουν συνολικά κατακόρυφα διαγράμματα που μεταβαίνουν από τις απαιτήσεις στις προσδιοριζόμενες ανοχές έχουν προταθεί ορισμένα εργαλεία προς την κατεύθυνση αυτή. Σε ένα από αυτά (Wang et al. 2003) ορισμένοι τύποι λειτουργικών απαιτήσεων που προκύπτουν από

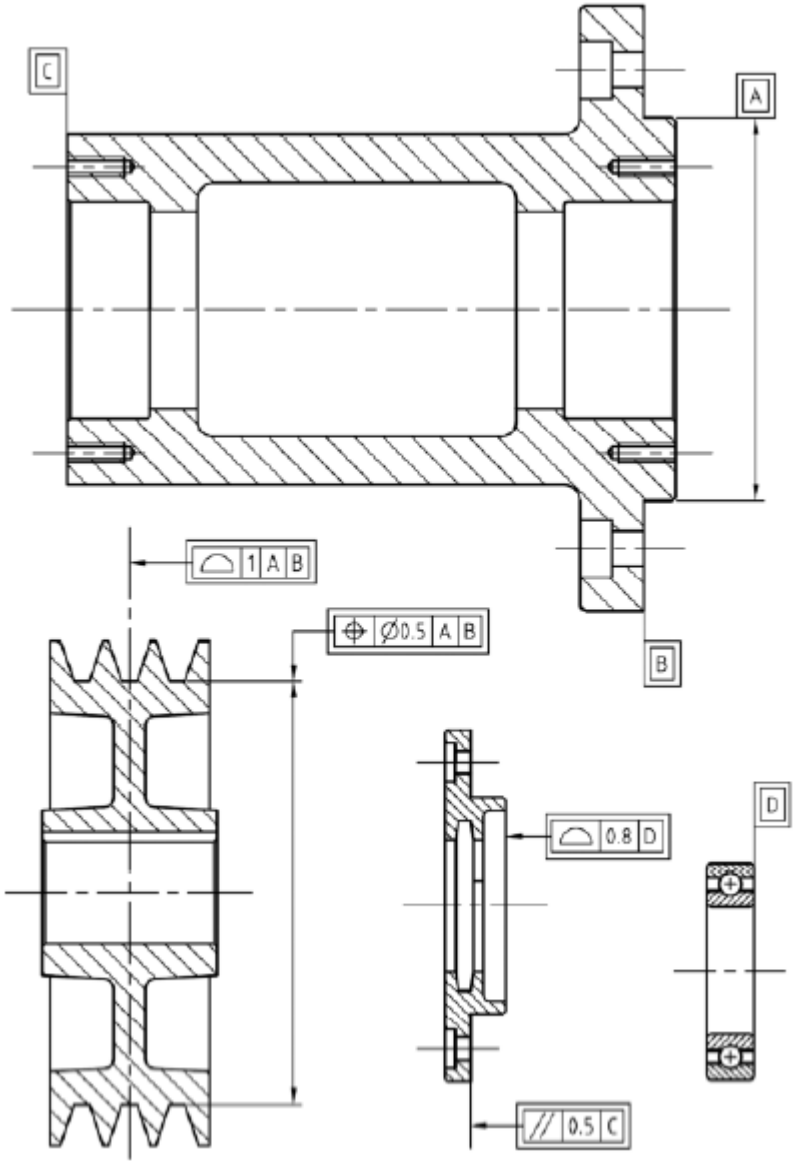
μηχανικές λειτουργίες (στεγανοποίηση, περιστροφή, ζυγοστάθμισμα, μετάδοση ισχύος, στερέωση, ολίσθηση, ψυχρή πίεση, όρια ανοχών) ταξινομούνται και συσχετίζονται με τυπικές επιλογές για ανοχές και επίπεδα αναφοράς.

Ταξινόμηση και μοντελοποίηση των απαιτήσεων

Στη βιβλιογραφία που αφορά τις ανοχές, οι απαιτήσεις συναρμολόγησης συσχετίζονται με αλυσίδες γραμμικών ανοχών. Διάκενα, γωνίες και θέσεις οι οποίες εμπλέκουν διαφορετικά τεμάχια υπολογίζονται σα συνολικές ανοχές των επιμέρους τεμαχίων. Μια κλασσική προσέγγιση στην ανάλυση και σύνθεση των στατιστικών ανοχών (Bjørke 1989) είναι ο προσδιορισμός των ιδιοτήτων του αθροίσματος των ανοχών στις διαφορετικού είδους αλυσίδες. Καθορίζει επίσης τη μορφή ειδικών χαρακτηριστικών των ανοχών (κατανεμημένες ή συσσωρευμένες) σχετικά με την κατεύθυνση και την τιμή τους. Ένας τρόπος για να ορίσουμε πιο αποτελεσματικά τις σχεδιαστικές απαιτήσεις τόσο μεμονωμένα όσο και στα πλαίσια συναρμογής είναι μέσω της χρησιμοποίησης βασικών χαρακτηριστικών (Whitney 1996; Whitney et al. 1999). Τα βασικά χαρακτηριστικά ορίζονται σαν ένα υποσύνολο των εφαρμοζόμενων σχεδιαστικών απαιτήσεων το οποίο περιλαμβάνει όλες τις συνθήκες που θεωρούνται απαραίτητες και βασικές από το σχεδιαστή. Τα βασικά χαρακτηριστικά καθορίζονται από το σχεδιαστή και ταξινομούνται κατά σειρά προτεραιότητας.

Η ανάγκη εφαρμογής γεωμετρικών ανοχών, πέρα από τις γραμμικές ανοχές έχει εισάγει διαφορετικούς τρόπους για καθορισμό των σχεδιαστικών απαιτήσεων. Σύμφωνα με αυτούς οι τυπικές ανοχές που καθορίζονται στα τεμάχια επεκτείνονται κατευθείαν στις συναρμογές. Αυτό οδηγεί στον καθορισμό των γραμμικών ανοχών συναρμογής (διάκενα, αποστάσεις, γωνίες) και στις γεωμετρικές ανοχές συναρμογής (παραλληλότητα, καθετότητα, γωνιακή ανοχή, ομοκεντρικότητα και θέση) οι οποίες περιλαμβάνουν χαρακτηριστικά από διαφορετικά τεμάχια (Carr,1993). Οι προδιαγραφές αυτές εισάγονται στα μηχανολογικά σχέδια με ειδικά σύμβολα όπως φαίνεται στο Σχ. 3.8 για τις απαιτήσεις που συζητήθηκαν ανωτέρω στο **Σχ. 3.7**.

Ένα άλλο μοντέλο απεικόνισης συνδέει τις γεωμετρικές σχέσεις, την ακρίβεια των απαιτήσεων και τις ανοχές σε μια μοναδική ιεραρχία από γράφους. Το μοντέλο αυτό περιγράφει όλα τα αντικείμενα τα οποία αναφέρθηκαν ανωτέρω με διαφορετικά επίπεδα λεπτομέρειας από απλούς κινηματικούς μηχανισμούς έως μια πλήρη γεωμετρική περιγραφή των αντικειμένων. Ο απώτερος σκοπός είναι η δημιουργία ενός αυτόματου μοντέλου που θα αποτελεί τη βάση για το προσδιορισμό των ανοχών.



Σχ. 3.8: Σχεδιαστικές απαιτήσεις καθορισμένες σαν ανοχές συναρμογής

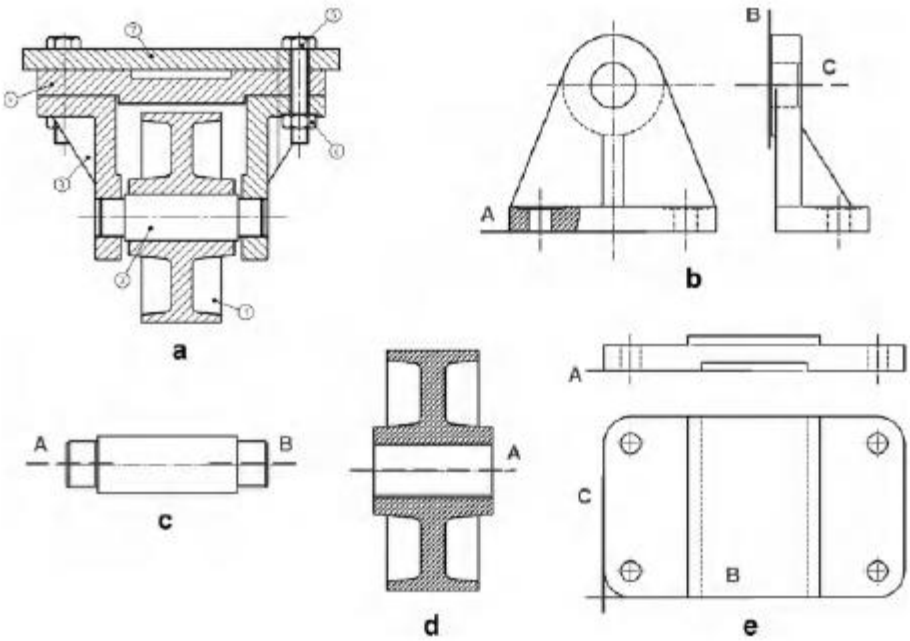
Γενικές μέθοδοι καθορισμού ανοχών

Οι δυσκολίες που αντιμετωπίζουν οι μηχανικοί στο καθορισμό των γεωμετρικών ανοχών προκύπτουν από την έλλειψη ευρείας γνώσης η οποία είναι περιορισμένη σε κανόνες και βασικά παραδείγματα τα οποία προκύπτουν από τα εφαρμοζόμενα πρότυπα. Οι ειδικοί έχουν προσπαθήσει να συστηματοποιήσουν τη γνώση σχετικά με το καθορισμό των ανοχών σε κάποιους βασικούς κανόνες και αρχές, που είναι χρήσιμες για την εξεύρεση γενικής μεθόδου καθορισμού ανοχών. Οι κανόνες αυτοί περιλαμβάνουν:

-Εμπειρικές μεθόδους για την επιλογή των στοιχείων αναφοράς και του είδους της ανοχής

-Ταξινόμηση των περιπτώσεων ανοχής έτσι ώστε να καθορίζονται συγκεκριμένα σετ λύσεων

3.4 Εμπειρικές Μέθοδοι Καθορισμού Ανοχών



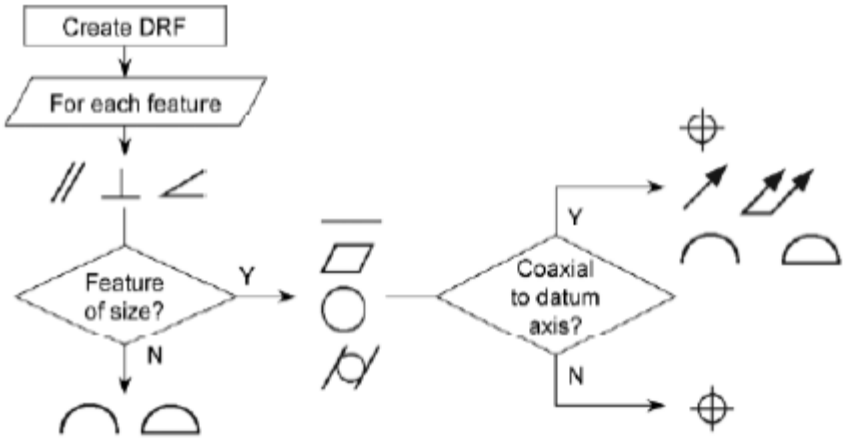
Σχ. 3.9: Παραδείγματα καθορισμού στοιχείων αναφοράς, a. Συναρμογή τροχού, b. Νεύρο στήριξης, c. Άξονας, d. Ζάντα, e. Πλάκα

Συνήθως ως στοιχεία αναφοράς επιλέγονται τα στοιχεία του τεμαχίου, που καθορίζουν τις πιο σημαντικές σχέσεις συναρμογής για τη λειτουργία του προϊόντος. Τέτοια στοιχεία συνήθως είναι οι άξονες περιστροφής (όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.9 b,c και d) οι επιφάνειες επαφής μέσω των οποίων μεταδίδονται μεγάλες δυνάμεις επαφής στο μηχανισμό (π.χ. η πάνω επιφάνεια της πλάκας e). Για να καταλάβουμε τη σημασία μιας λειτουργικής σχέσης μεταξύ δύο επιφανειών πρέπει να χρησιμοποιήσουμε κάποια επιμέρους λογικά κριτήρια. Ένα κριτήριο το οποίο χρησιμοποιείται για το καθορισμό μιας επιφάνειας αναφοράς είναι η επιφάνεια αυτή να έχει πολλά σημεία σύνδεσης στα οποία μπορεί να εφαρμοστεί πάκτωση και να γίνουν μετρήσεις (όπως φαίνεται στα αρχικά στοιχεία στα σχήματα b-d). Ένα κριτήριο ακόμα αποτελεί ο αριθμός των βαθμών ελευθερίας που αφαιρούνται από την κίνηση του τεμαχίου όταν η επιφάνεια συνδεθεί με το αντίστοιχο τεμάχιο: περιορισμοί περιστροφής καθορίζουν την επιλογή του αρχικού επιπέδου, ενώ περιορισμοί μετατόπισης καθορίζουν τα δευτερεύοντα ή και τα τριτεύοντα επίπεδα (όπως φαίνεται στην εικόνα 3.9).

Οποιοσδήποτε διαφορετικός καθορισμός των στοιχείων αναφοράς, που δεν εμπίπτει στους παραπάνω κανόνες, απαιτεί ειδικό σχεδιασμό των κατασκευαστικών απαιτήσεων. Επομένως είναι επιθυμητό τα στοιχεία αναφοράς στο τεμάχιο να είναι εύκολα προσβάσιμα και να μπορούν να κατεργαστούν και να επιθεωρηθούν και για το λόγο αυτό συνήθως επιλέγονται επίπεδες και κυλινδρικές επιφάνειες.

Οι ανωτέρω κανόνες δεν αποτελούν τη γενική απάντηση στο καθορισμό των στοιχείων αναφοράς. Τα πιο συχνά στοιχεία αναφοράς είναι οι άξονες περιστροφής, ή σχήματα τα οποία περιέχουν τρία

κατακόρυφα επίπεδα (e), ή δύο επίπεδα και έναν άξονα περιστροφής (b). Σε κάθε ένα από τα παραπάνω κατασκευαστικά σχήματα υπάρχουν συνήθως κανόνες για το ποια στοιχεία θα καθορισθούν ως πρωτεύοντα, ποια ως δευτερεύοντα και ποια ως τριτεύοντα. Ένα άλλο κριτήριο το οποίο χρησιμοποιείται περιλαμβάνει τον καθορισμό των ελάχιστων δυνατών στοιχείων αναφοράς όπως αναφέρεται στους Farmer και Gladman (1986) and Weill (1988).



Σχ. 3.10: Αρχές καθοριζόμενες από πρότυπο ASME Y14.5.1 (1994) για επιλογή στοιχείων αναφοράς

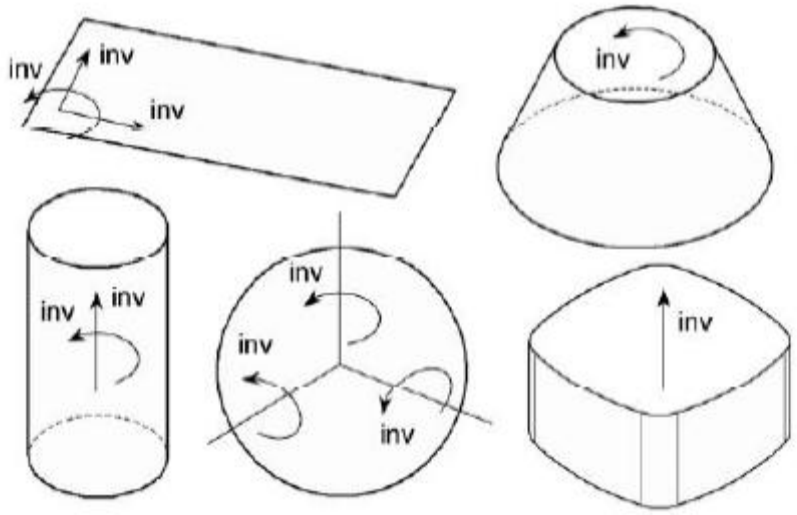
Αφού καθορισθούν τα στοιχεία αναφοράς, πρέπει να επιλεχθούν ανοχές σε όλα τα στοιχεία του τεμαχίου. Εκτός από τη γεωμετρική ταξινόμηση που περιγράφεται παρακάτω, υπάρχουν ορισμένοι εμπειρικοί κανόνες για το σκοπό αυτό και καθορίζονται από τα πρότυπα (ASME Y14.5.1 1994). Για παράδειγμα οι ανοχές ενός στοιχείου μεγέθους επιλέγονται συμφώνως με τη θέση του στοιχείου (ομοκεντρικότητα ως προς στοιχείο αναφοράς άξονα) και με σκοπό να διευκολύνουν τις σχεδιαστικές απαιτήσεις (εναλλαξιμότητα, ευθυγράμμιση, επιλογή όσο το δυνατόν μεγαλύτερου όγκου). Κάποιες από τις βασικές αρχές φαίνονται στο ανωτέρω **Σχ. 3.10**.

3.5 Ταξινόμηση Περιπτώσεων Διαστασιολόγησης

Ο καθορισμός των ανοχών των στοιχείων των τεμαχίων αποτελεί μια επαναληπτική διαδικασία. Σε κάθε βήμα καθορίζονται οι ανοχές σ'ένα καινούργιο στοιχείο του τεμαχίου σε σχέση με το στοιχείο αναφοράς λαμβάνοντας υπόψιν τα στοιχεία στα οποία έχουν ήδη καθορισθεί οι ανοχές. Αν και υφίστανται πολλά κατασκευαστικά σχέδια, η διαδικασία αυτή είναι λιγότερο περίπλοκη απ'ότι φαίνεται, καθώς έχουν πραγματοποιηθεί πολλές σχετικές μελέτες και έχουν περιορίσει τον αριθμό των περιπτώσεων ανοχών σε πεπερασμένο αριθμό.

Οι περισσότερες ταξινομήσεις των μεθόδων διαστασιολόγησης στηρίζονται στη λογική του αναλλοίωτου μεγέθους (invariance). Για να είναι πλήρως ελεγχόμενο ένα χαρακτηριστικό ενός τεμαχίου πρέπει όλες οι πιθανές αποκλίσεις από την ονομαστική του γεωμετρία να είναι περιορισμένες σε ορισμένες ζώνες ανοχής. Καθώς ένα μετρούμενο στοιχείο συσχετίζεται με το ιδανικό στοιχείο το οποίο παρουσιάζεται στο σχέδιο, μια απόκλιση μπορεί να μεταφραστεί σαν μια υπέρθεση δύο μεταβολών από την ονομαστική γεωμετρία: α) μια μεταβολή στις γεωμετρικές παραμέτρους του στοιχείου (π.χ. η διάμετρος του κυλίνδρου) και β) μικρές μεταβολές (μετατοπίσεις και περιστροφές) είτε του στοιχείου είτε παράγωγων μεγεθών του στοιχείου (π.χ. άξονας κυλίνδρου). Για τα περισσότερα στοιχεία, ωστόσο υφίστανται μετατοπίσεις και

περιστροφές οι οποίες δε χρειάζεται να είναι υπό έλεγχο καθώς δεν αλλάζουν τη γεωμετρία του στοιχείου. Έτσι ο γεωμετρικός έλεγχος του στοιχείου εξαρτάται από τις αμετάβλητες του σε σχέση με τις μετατοπίσεις και τις περιστροφές ως προς τις κύριες κατευθύνσεις σε ένα δεδομένο πλαίσιο αναφοράς. Στο **Σχ. 3.11** παρουσιάζονται οι αμετάβλητες για ορισμένους τύπους επιφανειών.



Σχ. 3.11: Αμετάβλητες συνήθων επιφανειών

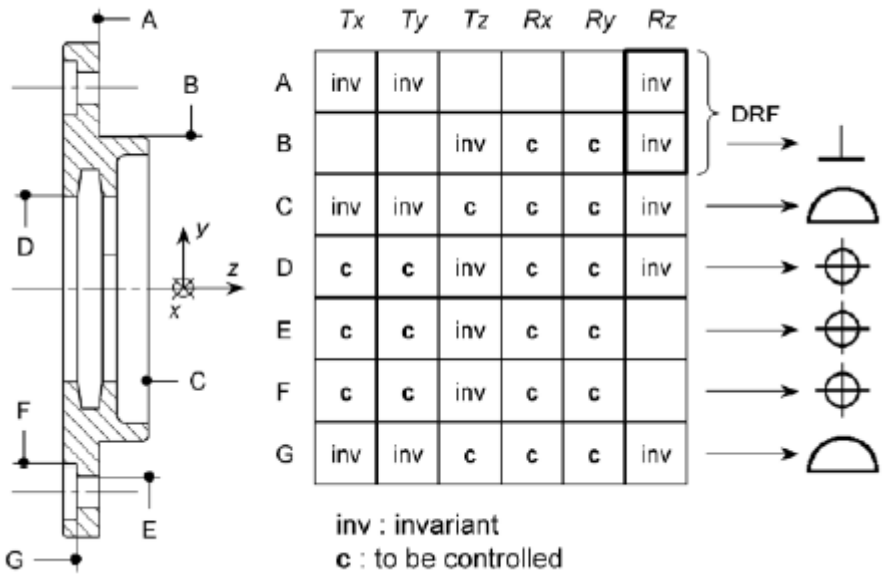
Η λογική για το καθορισμό των ανοχών των στοιχείων ενός μηχανολογικού τεμαχίου παρουσιάζεται στο **Σχ. 3.12**. Στα στοιχεία του παραδείγματος (κέλυφος του συστήματος μετάδοσης με ιμάντα του **Σχ. 3.7** πρέπει να καθορισθούν οι ανοχές με την καθορισμένη σειρά (A, B, C, D, E, F, G) η οποία έχει προσδιορισθεί από την αρχική ανάλυση του τεμαχίου. Δεδομένου ότι έχουμε ένα επίπεδο αναφοράς xyz όπως φαίνεται στο σχήμα αρχικά αναγνωρίζονται οι αμετάβλητες του τεμαχίου και τοποθετούνται στον πίνακα. Λαμβάνοντας ως δεδομένο το **Σχ. 3.11** υφίστανται τρεις διαφορετικές περιπτώσεις: (1) τα επίπεδα A,C και G είναι αμετάβλητα ως προς τις μετατοπίσεις κατά τους άξονες x,y και περιστροφή κατά τον άξονα z (2) οι κύλινδροι B και D είναι αμετάβλητοι ως προς μετατόπιση και περιστροφή κατά τον άξονα z (3) οι κύλινδροι E και F που είναι κινηματικά ισοδύναμοι με πρισματικές επιφάνειες είναι αμετάβλητοι ως προς τη μετατόπιση κατά τον άξονα z.

Οι αμετάβλητες μας βοηθούν να εντοπίσουμε τα στοιχεία στα οποία πρέπει να καθορισθούν ανοχές. Αυτό γίνεται υπακούοντας στην ακόλουθη αρχή: όταν ελέγχεις ένα στοιχείο στόχο (target feature) σε σχέση με ένα στοιχείο αναφοράς (datum feature), οι αμετάβλητες οι οποίες είναι κοινές και για τα δύο στοιχεία δε χρειάζεται να ελέγχονται. Επομένως, ο κύλινδρος B πρέπει να ελεγχθεί μόνο ως προς δύο περιστροφές κατακόρυφες στον άξονα του (όταν το στοιχείο αναφοράς είναι το επίπεδο A) το οποίο μπορεί να γίνει μέσω μιας ανοχής προσανατολισμού. Εάν τα στοιχεία A και B επιλεχθούν σα στοιχεία αναφοράς μόνο η κοινή τους αμετάβλητη (περιστροφή γύρω από τον άξονα z) μπορεί να χρησιμοποιηθεί σα χαρακτηριστικό στοιχείο αναφοράς (DRF). Σύμφωνα με τον ακόλουθο κανόνα, το επίπεδο C πρέπει να ελεγχθεί ως προς

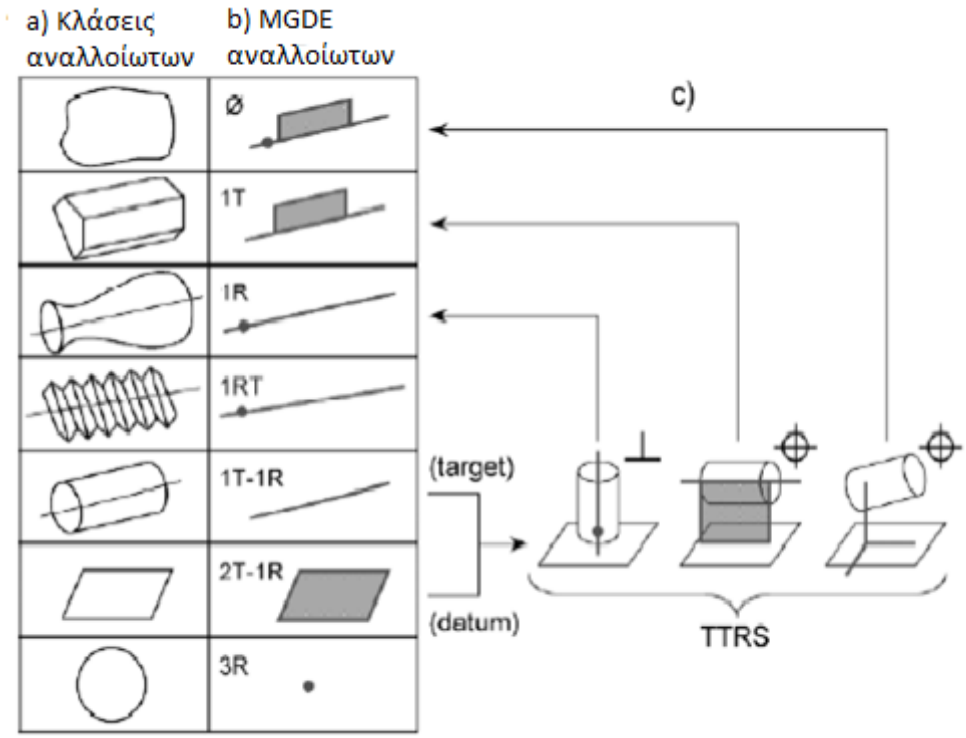
μια μετατόπιση και δύο περιστροφές κάθετες σε αυτό για το οποίο απαιτείται ανοχή προφίλ (profile tolerance). Οι περιορισμοί επίσης των υπόλοιπων χαρακτηριστικών καθορίζονται με τον ίδιο τρόπο. Ο κινηματικός έλεγχος δεν αποτελεί το μοναδικό κριτήριο για την επιλογή του τύπου των ανοχών: για παράδειγμα η λειτουργία του επιπέδου G (επαφή με την επιφάνεια κεφαλής του κοχλία) μπορεί να επιτευχθεί αποτελεσματικότερα με έναν απλό έλεγχο κατεύθυνσης παρά με έναν έλεγχο θέσης όπως καθορίζεται από τις αμετάβλητες.

Η αρχική τυποποίηση των περιπτώσεων των ανοχών μπορεί να αναπαραχθεί από το μοντέλο ανοχών που εισήγαγε ο Clement et al. (1994) και το οποίο περιέγραψαν ο Clément και ο Rivière (1993), ο Weill (1997), και οι Chiabert και Orlando (2004). Το μοντέλο αυτό προτείνει την ταξινόμηση των επιφανειών των τεμαχίων σε 7 κατηγορίες με βάση τις αμετάβλητες τους σε σχέση με τους άξονες μετατόπισης και τους άξονες περιστροφής τους. Οι καθοριζόμενοι τύποι επιφανειών είναι οι σφαιρικές, οι επίπεδες, οι κυλινδρικές, οι ελλιπτικές, οι περιστροφικές, οι πρισματικές και οι γενικές (χωρίς να περιέχουν κάποια αμετάβλητη) και παρουσιάζονται με αντίστροφη σειρά στο **Σχ. 3.13a)**. Η κάθε κατηγορία χαρακτηρίζεται από έναν ελάχιστο αριθμό γεωμετρικών στοιχείων αναφοράς (MGDE-Minimum Geometric Datum Element) για παράδειγμα το σύνολο των γεωμετρικών οντοτήτων (σημείο, γραμμή και επίπεδο) τα οποία είναι επαρκή για να καθορίσουν τη χωρική θέση της επιφάνειας μέσω διαστάσεων και ανοχών. Στο **Σχ. 3.13b)**, παρουσιάζεται ο MGDE και ο αριθμός των περιστροφικών των μετατοπισιακών και των περιστροφομετατοπισιακών αμετάβλητων για την κάθε κατηγορία.

.



Σχ. 3.12 : Επιλογή τύπου ανοχών με βάση τις αμετάβλητες των επιφανειών



Σχ. 3.13: Ταξινόμηση των περιπτώσεων ανοχών με βάση τις τεχνολογικές και τοπολογικές σχέσεις των επιφανειών (TTRS-Technologically and Topologically Related Surfaces). MGDE: Minimum Geometric Datum Element, T: translational, R: Rotational, RT: roto-translational

Δύο επιφάνειες που ανήκουν στο ίδιο τεμάχιο ονομάζονται τεχνολογικά και τοπολογικά συσχετιζόμενες επιφάνειες (TTRS-Technologically and Topologically Related Surfaces). Η σύνθεση των MGDEs των δύο συσχετιζόμενων επιφανειών επιτρέπει τον καθορισμό των MGDEs της προκύπτουσας TTRS η οποία ταξινομείται εκ νέου σε μία από τις αρχικές κατηγορίες αμετάβλητων επιφανειών. Με τον τρόπο αυτό οι TTRS μπορούν να συσχετιστούν με τη σειρά τους με άλλες επιφάνειες ή TTRSs και εν συνεχεία επαναλαμβάνουμε επαναληπτικά τη διαδικασία καθορισμού ανοχών. Λαμβάνοντας υπόψη όλες τις περιπτώσεις που προκύπτουν από πιθανές γεωμετρίες των συνδεομένων επιφανειών, μπορούν να εντοπιστούν 44 κανόνες σύνθεσης. Αυτές αντιστοιχούν στον αριθμό περιπτώσεων ανοχής ενός χαρακτηριστικού σε σχέση με ένα άλλο.

Για παράδειγμα, το **Σχ. 3.13c)**, δείχνει τις τρεις περιπτώσεις TTRSs όταν συνδυάζονται ένας κύλινδρος (στοιχείο στόχος) με ένα επίπεδο (στοιχείο αναφοράς). Εάν ο κύλινδρος είναι κάθετος προς το επίπεδο, η προκύπτουσα TTRS ανήκει στην κατηγορία αναλλοίωτης περιστροφής επιφάνειας σύμφωνα με την ίδια λογική του παραδείγματος του **Σχ. 3.12**, μια τέτοια περίπτωση αντιστοιχεί σε ανοχή καθετότητας επί του στοιχείου στόχου. Εάν ο κύλινδρος είναι παράλληλος προς το επίπεδο, το TTRS ανήκει στην κατηγορία της αναλλοίωτης πρισματικής επιφάνειας και αντιστοιχεί σε ανοχή θέσης με μια βασική διάσταση (απόσταση του άξονα του κυλίνδρου από το επίπεδο). Εάν ο κύλινδρος είναι λοξός ως προς το επίπεδο, η TTRS ανήκει στην κατηγορία των γενικών επιφανειών χωρίς αναλλοίωτες και αντιστοιχεί σε μια ανοχή θέσης με δυο βασικές διαστάσεις (γωνία του άξονα του κυλίνδρου ως προς το επίπεδο, και απόσταση ενός αυθαίρετου σημείου επί του άξονα του κυλίνδρου ως προς το επίπεδο).

Η επέκταση στο μοντέλο TTRS έχει προταθεί με σκοπό την ταξινόμηση των συσχετίσεων μεταξύ των επιφανειών διαφορετικών τμημάτων (Clément et al. 1995). Οι συσχετίσεις αυτές, ονομάζονται ψευδο-TTRSs και είναι ένας επιπλέον τρόπος για την ικανοποίηση των απαιτήσεων ακρίβειας. Με βάση τα δεδομένα αυτά, έχει αποδειχθεί πως οι λειτουργικές απαιτήσεις που καθορίζονται σε υψηλό επίπεδο (π.χ. την ελαχιστοποίηση του θορύβου του συστήματος οδοντωτών τροχών) μπορούν να μεταφραστούν ιεραρχικά στο επίπεδο γεωμετρίας (Toulorge et al., 2003).

Μια ενδιαφέρουσα συνέπεια των παραπάνω εννοιών είναι ότι υφίσταται ένα περιορισμένο σύνολο ανοχών που μπορεί να αναλυθεί σε μια αναλυτική διαδικασία καθορισμού των προδιαγραφών. Όσον αφορά τον αριθμό των περιπτώσεων, η ταξινόμηση που βασίζεται στο μοντέλο TTRS δεν είναι η μόνη, καθώς περιλαμβάνει έναν αριθμό κατηγοριών αναλλοίωτων το οποίο δεν μπορεί να καλύψει την ποικιλία των χαρακτηριστικών που έχουν σχεδιαστεί για τα κατασκευασμένα τεμάχια.

Το πρότυπο ASME (ASME Y14.5.1.M 1994) ταξινομεί τα στοιχεία αναφοράς DRFs που μπορούν να κατασκευαστούν από πρωταρχικές γεωμετρικές οντότητες (σημεία, γραμμές, και επίπεδα), θεωρώντας την αντίστοιχη σειρά προτεραιότητας. Ο κάθε συνδυασμός περιγράφεται από τις αμετάβλητές τους, που είναι διαστάσεις (αποστάσεις ή γωνίες) και οι οποίες δεν αλλάζουν μετά τους μετασχηματισμούς. Οι δυνατές αμετάβλητες περιλαμβάνουν τις τρεις κύριες μετατοπίσεις και τις τρείς περιστροφές, την απόσταση από έναν άξονα ή ένα σημείο καθώς και τη γωνία ως προς ένα άξονα. Υφίσταται ένα σύνολο 52 οριζόμενων συστημάτων DRFs, περισσότερων από τον αριθμό των συσχετίσεων μεταξύ των TTRSs, δεδομένου ότι λαμβάνονται υπόψη οι προτεραιότητες των στοιχείων. Τα συστήματα αναφοράς ομαδοποιούνται ανάλογα με τις αμετάβλητες, δίνοντας έτσι έξι γενικές περιπτώσεις (μία λιγότερη από τον αριθμό των TTRS αναλλοίωτων κατηγοριών καθώς η ελικοειδή επιφάνεια δεν διευκρινίζεται ρητά στο πρότυπο).

Ένα άλλο μοντέλο αναπαράστασης ανοχών (Shah et al 1998, Kandikjan et al. 2001) βασίζεται σε στοιχειώδεις οντότητες που συμπίπτουν (ή προέρχονται από) με τα χαρακτηριστικά ενός τεμαχίου. Κάθε οντότητα έχει βαθμούς ελευθερίας ως προς την περιστροφή και τη μετατόπιση, που μπορούν να θεωρηθούν ως το συμπληρωματικό σύνολο των αναλλοίωτων. Οποιοσδήποτε συσχετισμός μεταξύ δύο οντοτήτων αντιστοιχεί στη σχέση μεταξύ ενός στοιχείου στόχου και ενός σημείου αναφοράς, και διατηρεί έναν αριθμό από τους βαθμούς ελευθερίας, ανάλογα με τις δύο αρχικές οντότητες. Λαμβάνοντας υπόψη όλους τους πιθανούς συνδυασμούς μεταξύ δύο ή τριών οντοτήτων, προκύπτουν 31 περιπτώσεις DRFs οι οποίες και ταξινομούνται. Παρά την ομοιότητα μεταξύ των δύο αυτών προσεγγίσεων, ο αριθμός των περιπτώσεων είναι μικρότερος από ό,τι στο μοντέλο TTRS καθώς η κατάταξη δεν αντιπροσωπεύει ακριβώς τις εκφυλισμένες περιπτώσεις (όπως π.χ. όταν συμπίπτουν σημεία, γραμμές, ή επίπεδα) και δεν αντιμετωπίζει τις ελικοειδείς επιφάνειες ως ξεχωριστές περιπτώσεις.

Ένα επιπλέον μοντέλο βασίζεται στους βαθμούς ελευθερίας (Hu et al.,2004). Ταξινομεί όλους τους δυνατούς συνδυασμούς μεταξύ των στοιχειωδών οντοτήτων που υφίστανται στο ίδιο τεμάχιο και αναφέρονται ως cross-referenced variational geometric constraints. Εδώ πάλι ο κάθε συνδυασμός αντιστοιχεί σε έναν τρόπο για να ελεγχθεί το στοιχείο στόχος σε σχέση με ένα

στοιχείο αναφοράς. Δεδομένου ότι καθορίζονται μόνο συνδυασμοί μεταξύ δύο οντοτήτων, υφίστανται συνολικά 27 περιπτώσεις.

Όλα τα παραπάνω αποτελέσματα επιτρέπουν σε κάποιον την αντιμετώπιση του προβλήματος του καθορισμού των ανοχών σαν ένα βήμα κατά το οποίο τα χαρακτηριστικά τα οποία απαιτούνται για καθορισμό ανοχών (επίπεδα αναφοράς) έχουν προηγουμένως τοποθετηθεί σε σειρά. Για το λόγο αυτό, αποτελούν τη βάση για κάποιες μεθόδους που προτείνονται στη βιβλιογραφία, και θα περιγραφούν στα ακόλουθα κεφάλαια. Οι μέθοδοι αυτές ενσωματώνουν κανόνες ταξινόμησης σε μια λογική διαδικασία που αναλύει τα χαρακτηριστικά σε σχέση με την γεωμετρία της συναρμογής και τις απαιτήσεις του σχεδιασμού.

3.6 Γενικές Μέθοδοι Προδιαγραφών

Αρκετές μέθοδοι έχουν προταθεί για την επιλογή των DRFs και των τύπων ανοχής στα διάφορα χαρακτηριστικά του τεμαχίου και ορισμένες από αυτές έχουν υλοποιηθεί σε υπολογιστικά εργαλεία 3D-CAD. Οι μέθοδοι που έχουν αναπτυχθεί για την παραγωγή ανοχών με επαρκή πληρότητα και γενικότητα στηρίζονται σε έξι διαφορετικές προσεγγίσεις:

1.Ανάλυση της ιεραρχίας TTRs που προκύπτει από σχέσεις μεταξύ των χαρακτηριστικών.
2.Ανάλυση των βαθμών ελευθερίας των χαρακτηριστικών του τεμαχίου (degrees of freedom).
3.Εξαγωγή των σημείων αναφοράς και των γεωμετρικών ανοχών από ειδικά χαρακτηριστικά (καθρέφτες-mirrors).
4.Αποσύνθεση των λειτουργικών απαιτήσεων σε επίπεδο χαρακτηριστικού με την απλούστευση του γραφήματος της σχέσης συναρμογής (functional decomposition).
5.Εξαγωγή των απαιτήσεων σε επιμέρους τμήματα με πίνακα θέσεων (positioning table)
6.Μοντελοποίηση γεωμετρικών μεταβολών για τα χαρακτηριστικά που εμπλέκονται στις απαιτήσεις (variational loop circuit).

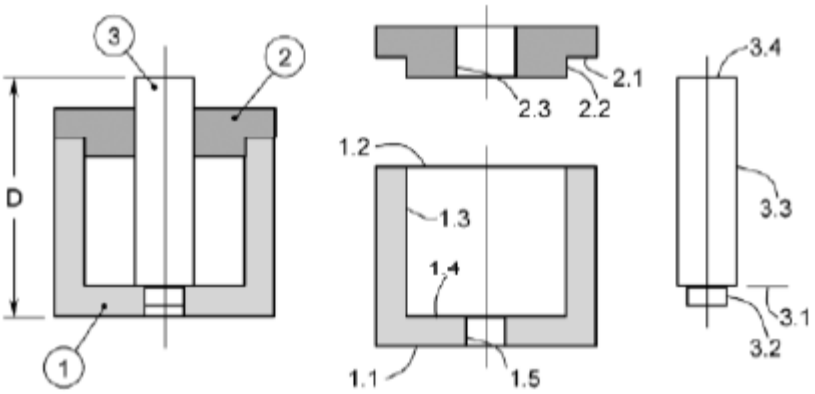
Στον **Πίν. 3.1** συγκρίνονται οι μέθοδοι για την επεξεργασία των δεδομένων. Βασικά κριτήρια αποτελούν η ύπαρξη εκ των προτέρων κατάταξης για τις περιπτώσεις ανοχών, η χρήση ενός γενικού μοντέλου περιγραφής της συναρμογής, καθώς και η αντιμετώπιση των ειδικών απαιτήσεων σχεδιασμού.

Όπως αναφέρθηκε ανωτέρω, μια ταξινόμηση των περιπτώσεων διαστασιολόγησης επιτρέπει σε κάποιον τον καθορισμό των ανοχών μέσω ενός συνόλου προκαθορισμένων περιπτώσεων. Για να αναπτυχθεί μια μέθοδος προδιαγραφών, τα χαρακτηριστικά που πρέπει να διαστασιολογηθούν σε κάθε τμήμα πρέπει να είναι κατάλληλα τοποθετημένα. Οι προσεγγίσεις με βάση την αρχή αυτή διαφέρουν στο τρόπο με τον οποίο αναλύεται η γεωμετρία του προϊόντος για να προσδιοριστούν οι προτεραιότητες μεταξύ των χαρακτηριστικών. Μια ταξινόμηση συμβάλλει στη βελτίωση της ορθότητας και της πληρότητας των ανοχών που δημιουργούνται, και συνήθως έχει ένα μαθηματικό υπόβαθρο το οποίο μπορεί να επιτρέψει σε κάποιον να δημιουργήσει λειτουργικές εξισώσεις για μετέπειτα διαδικασίες καθορισμού ανοχών.

Method	*a priori* classification	Model of relations	Explicit requirements
TTRS	X	X	–
Degrees of freedom	X	X	–
Mirrors	–	X	–
Function decomposition	–	X	X
Positioning table	–	–	X
Variational loop circuit	X	–	X

Πίν. 3.1 Σύγκριση των μεθόδων προσδιορισμού προδιαγραφών ανοχής

Σε ορισμένες μεθόδους, οι λειτουργικές απαιτήσεις και οι απαιτήσεις συναρμολόγησης ορίζονται ρητά από το σχεδιαστή ή αναγνωρίζονται αυτόματα από γεωμετρικά δεδομένα. Η προσέγγιση αυτή εγγυάται ότι όλες οι σχετικές απαιτήσεις ικανοποιούνται από τις ανοχές που παράγονται, αλλά μπορεί να είναι περίπλοκη λόγω του μεγάλου αριθμού των απαιτήσεων που προκύπτουν από τις πολύπλοκες συναρμογές. Επιπλέον, αν οι απαιτήσεις αυτές δεν ορίζονται σε ένα γενικό μοντέλο, οι ανοχές που δημιουργούνται από τις διαφορετικές απαιτήσεις πρέπει να συνδυάζονται σωστά (το πρόβλημα δεν έχει αντιμετωπιστεί ακόμα επαρκώς). Αν και μερικές φορές υπεραπλουστευμένες, οι ακόλουθες περιγραφές θα δημιουργήσουν μερικές χρήσιμες έννοιες για την κατανόηση των διαφόρων λύσεων που προτείνονται στον καθορισμό ανοχών. Αυτό περιγράφεται στο **Σχ. 3.14**, το οποίο δείχνει μια διάταξη που αποτελείται από τρία μέρη και στην οποία φαίνονται τα λειτουργικά χαρακτηριστικά του καθενός από αυτά. Οι απαιτήσεις της συναρμογής προσδιορίζουν ένα σταθερό ταίριασμα των επίπεδων επιφανειών και μια σφιχτή ανοχή των κυλινδρικών επιφανειών. Μια πρόσθετη λειτουργική απαίτηση είναι ότι η ονομαστική τιμή της απόστασης D ικανοποιείται μέσα σε μια δεδομένη ανοχή.



Σχ. 3.14: Χαρακτηριστικό παράδειγμα

3.6.1 Technologically and Topologically Related Surfaces (TTRS)

Η πρώτη και η πιο συχνά αναφερόμενη μέθοδος προσδιορισμού ανοχών βασίζεται στο μοντέλο TTRS (Clément et al., 1994). Η γενική προσέγγιση, η οποία έχει περιγραφεί προηγουμένως, μοντελοποιεί κάθε επιφάνεια με μια αναλλοίωτη κλάση και ένα σύνολο γεωμετρικών οντοτήτων αναφοράς (MGDEs). Όταν οι δύο επιφάνειες έρχονται σε επαφή μεταξύ τους, τα δεδομένα αυτά επιτρέπουν στο σχεδιαστή να προσδιορίσει τις ανοχές που απαιτούνται για τον έλεγχο της σχετικής τους θέσης. Η ίδια η επαφή (TTRS) των επιφανειών μοντελοποιείται με μια αναλλοίωτη κλάση και με MGDE. Η λογική αυτή αξιοποιείται με επαγωγικό τρόπο δημιουργώντας μια

ιεραρχία TTRS για τα λειτουργικά χαρακτηριστικά (που εδώ ονομάζονται "επιφάνειες") του κάθε τμήματος.

Η αλληλουχία των επαφών των επιφανειών σε ένα τεμάχιο προέρχεται από ένα γράφημα το οποίο αντιπροσωπεύει τις σχέσεις των επιφανειών μεταξύ των τμημάτων στη συναρμογή. Κάθε βρόχος του γράφου περιλαμβάνει δύο ή περισσότερα τμήματα: για κάθε τμήμα, ο βρόχος περιλαμβάνει δύο επιφάνειες, οι οποίες μπορούν να συνδεθούν σε ένα TTRS. Με διερεύνηση όλων των βρόχων με μία επιλεγμένη από το χρήστη σειρά τα TTRS που ορίζονται στα τμήματα καθορίζουν μια ιεραρχία. Η ιεραρχία αυτή επιτρέπει το προσδιορισμό του τύπου των ανοχών σύμφωνα με τις ταξινομημένες περιπτώσεις ανοχών από τις ιδιότητες του TTRS (κλάση αναλλοίωτης και MGDE).

Το **Σχ. 3.15** δείχνει την επαναληπτική διαδικασία που καθορίζει την ιεραρχία των διαγραμμάτων TTRS για το παράδειγμα. Η κατάρτιση του γραφήματος ξεκινά με το καθορισμό των σχέσεων μεταξύ των επαφών των επιφανειών που αντιστοιχούν στα λειτουργικά χαρακτηριστικά των τμημάτων (**Σχ. 3.15a**). Οι βρόχοι του γραφήματος διατάσσονται σε μία αλληλουχία (L1, L2, L3, L4), η οποία εν συνεχεία ακολουθείται όταν συνδέονται οι επιφάνειες σε TTRSs. Για παράδειγμα, ο βρόχος L1 περιλαμβάνει δύο επιφάνειες στο τμήμα 1 (S12 και S13), οι οποίες συνδέονται στο T1, και δύο επιφάνειες στο τμήμα 2 (S21 και S22) οι οποίες συνδέονται στο T2. Οι επόμενοι βρόχοι επιτρέπουν τον προσδιορισμό των άλλων TTRSs, δηλαδή των T3 και T4 (Εικόνα 3.15b), T5 και T6 (Σχήμα 3.15c) και τελικά T7, T8, T9 και (Σχήμα 3.15d).

Για σύνθετες συναρμογές, οι βρόχοι πρέπει να είναι σωστά διατεταγμένοι, προκειμένου να κατασκευαστεί μια ιεραρχία TTRS σύμφωνα με τη λογική της μεθόδου. Για το σκοπό αυτό, οι προμηθευτές των εξαρτημάτων προκαθορίζουν πρότυπα ανοχών που διαθέτουν κοινές λειτουργικές απαιτήσεις (έδρανα,γλίστρες, γρανάζια, σφραγίδες, κλπ).

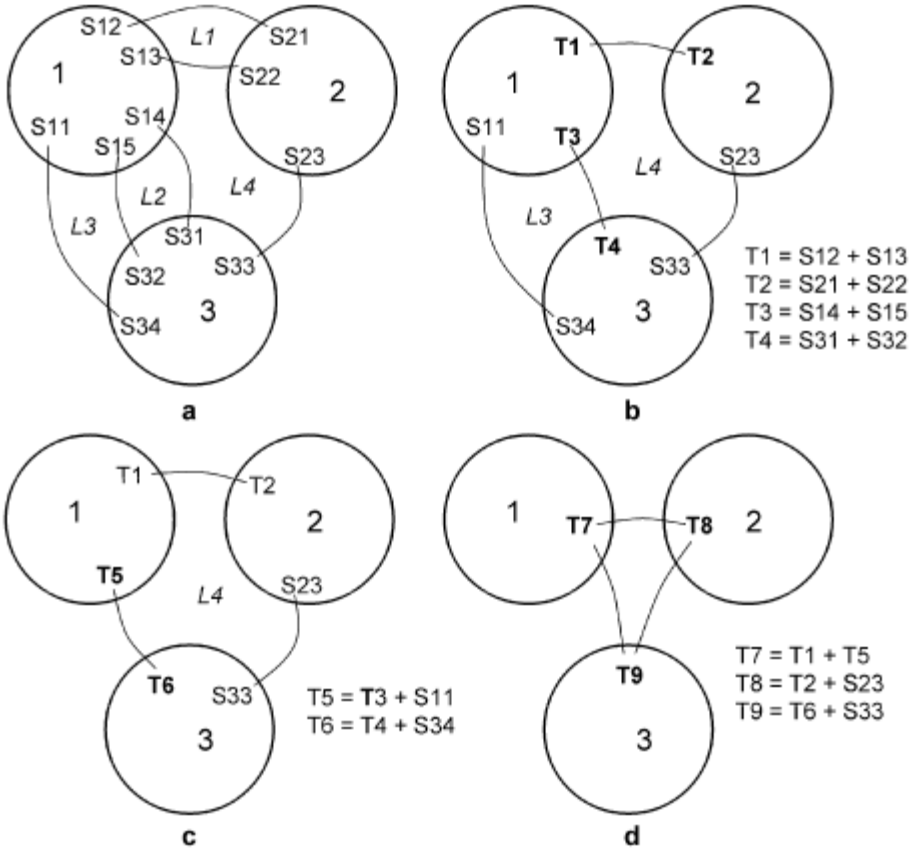
Η μέθοδος προσδιορισμού των προδιαγραφών μέσω TTRs έχει εξελιχθεί σε ένα διαδραστικό λογισμικό εργαλείο (Salomons 1995 Salomons et al. 1996). Εκτός από την αρχική μέθοδο, έχουν θεσπιστεί κάποια κριτήρια που καθορίζουν τη σειρά των βρόχων του γραφήματος και κατασκευάζουν τα MGDE των TTRS από τα MGDEs των συσχετιζόμενων χαρακτηριστικών. Τα στοιχεία αυτά εισάγονται από τον χειριστή του λογισμικού όπως και το μοντέλο συναρμολόγησης 3D-CAD καθώς η μέθοδος αυτή δεν προσφέρει λογισμικό για σχεδίαση.

3.6.2 Βαθμοί Ελευθερίας

Μια άλλη μέθοδος που έχει αναπτυχθεί για τον καθορισμό των ανοχών και των DRFs είναι η μέθοδος των βαθμών ελευθερίας (Shah et al 1998; Kandikjan et al . 2001). Αρχικά η μέθοδος αυτή χρησιμοποιούταν για την επικύρωση των ανοχών σε ένα μοντέλο 3D-CAD ,αλλά εν συνεχεία επεκτάθηκε σε ένα γενικότερο μοντέλο προδιαγραφών (Wu et al., 2003). Ως εκ τούτου, το μοντέλο αυτό έχει αναπτυχθεί σε ένα ισχυρό εργαλείο καθορισμού ανοχών.

Ένα ζευγάρι στοιχειωδών γεωμετρικών οντοτήτων (σημεία, γραμμές, επίπεδα) μπορεί να συνδεθεί με μια μετρική σχέση (ταύτιση, παραλληλότητα, απόσταση , κλπ) η οποία πρέπει να ελέγχεται με ανοχές. Για κάθε πιθανό συνδυασμό των οντοτήτων , η ταξινόμηση παρέχει τον αριθμό και τον τύπο των μεταφορικών και περιστροφικών βαθμών ελευθερίας που πρέπει να ελέγχονται, κατά μήκος των διαστάσεων, όπως και τους βαθμούς ελευθερίας που πρέπει να ελέγχονται από τις ανοχές μεγέθους. Οι περιορισμοί στους βαθμούς ελευθερίας στη συνέχεια μετατρέπονται σε

γραμμικές και γεωμετρικές ανοχές μέσω κανόνων, οι οποίοι επίσης, επιτρέπουν την επιλογή σημείων αναφοράς και βασικών διαστάσεων.



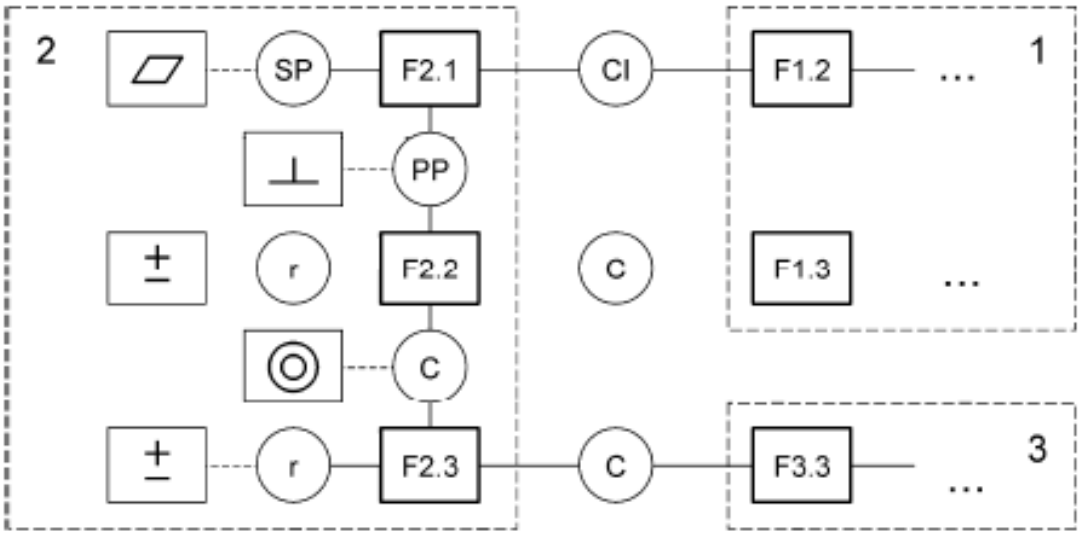
Σχ. 3.15: Καθορισμός ιεραρχίας TTRS: a. Βρόχοι, επιφάνειες και τεμάχια, b. Καθορισμός των T3 και των T4, c. Καθορισμός των T5 και των T6, d. Καθορισμός των T7, T8 και των T9

Τα στοιχεία στόχοι και οι μετρικές σχέσεις αναπαρίστανται σε ένα γράφημα ,το οποίο εκτείνεται σε όλη τη συναρμογή και περιλαμβάνει το μέγεθος και τις γεωμετρικές ανοχές σα χαρακτηριστικά των σχέσεων. Το γράφημα κατασκευάζεται από ένα σύνολο χαρακτηριστικών υπο-γράφων που αντιστοιχούν σε διαφορετικές περιπτώσεις των σχετικών ανοχών μεταξύ των οντοτήτων.

Στο **Σχ. 3.16** φαίνεται το μοντέλο ανοχών γράφου για το τεμάχιο 2 της συναρμογής του παραδείγματος. Τα χαρακτηριστικά τμήματα του ίδιου τμήματος (F2.1, F2.2, F2.3) που συνδέονται με αυτοσυσχετίσεις του σχήματος και του μεγέθους , για παράδειγμα , ακτίνα , και συνδέονται μεταξύ τους με μετρικές σχέσεις καθετότητας και ομοαξονικότητας. Για κάθε τμήμα του τεμαχίου καθορίζεται ο κατάλληλος τύπος ανοχής. Επιπρόσθετα καθορίζονται μετρικές σχέσεις ταύτισης και ομοαξονικότητας με τα άλλα χαρακτηριστικά του τεμαχίου.

Η μέθοδος προδιαγραφής ανοχής συνίσταται στην ημιαυτόματη δημιουργία γράφων με μετρικές σχέσεις οι οποίες συμπληρώνονται με χαρακτηριστικά ανοχής. Κατά το πρώτο βήμα , η κάθε μετρική σχέση μεταξύ των οντοτήτων μετατρέπεται σε μια κατευθυντική σχέση μεταξύ ενός στοιχείου αναφοράς και ενός στοιχείου στόχου. Η επιλογή των στοιχείων αναφοράς δίνει προτεραιότητα στις επίπεδες έδρες ή στις οντότητες με πολλές μετρικές σχέσεις ή σε αυτές που έχουν μεγάλο μέγεθος. Σε μια δεύτερη φάση , οι γραμμικές και γεωμετρικές ανοχές καθορίζονται για κάθε μετρική σχέση σύμφωνα με την ταξινόμηση, σε μια δομημένη διαδικασία που επιτρέπει

τον ορισμό προτεραιότητας στα στοιχεία αναφοράς. Οι ανοχές που δημιουργούνται τελικά επικυρώνονται από την επαλήθευση ότι κάθε στοιχείο στόχος είναι σωστά καθορισμένο από ένα ή περισσότερα στοιχεία αναφοράς . Μια άλλη επιλογή είναι η αυτόματη αναγνώριση των αλυσίδων ανοχής για τον προσδιορισμό και την ανάλυση τους.

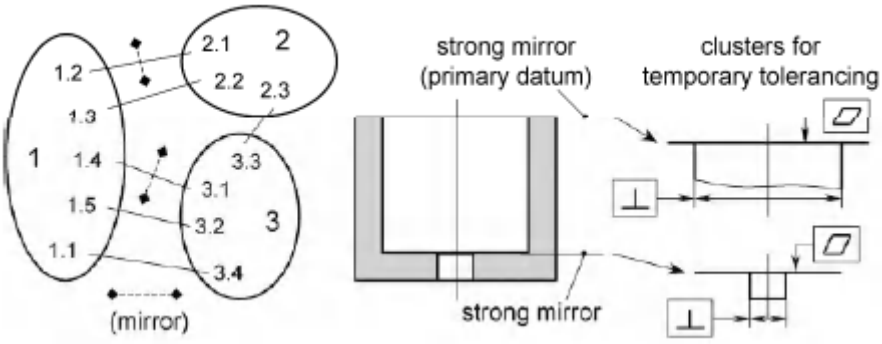


Σχ. 3.16: Μετρικές σχέσεις στη μέθοδο των βαθμών ελευθερίας, SP: shape (σχήμα), r: radius (ακτίνα), PP: perpendicularity (καθετότητα), CI: coincidence (ταύτιση), C: coaxiality (ομοαξονικότητα)

3.6.3 Mirrors (κατοπτρικά χαρακτηριστικά)

Μία άλλη προσέγγιση των προδιαγραφών ανοχής (Wang et al.,2003) βασίζεται στο κατοπτρισμό, π.χ. επίπεδες επιφάνειες που εμπλέκονται στις σχέσεις συναρμογής. Οι σχέσεις συναρμογής κατατάσσονται σε ισχυρούς κατοπτρισμούς (που αντιστοιχούν σε σχέσεις επαφής με τουλάχιστον τρία σημεία-seating) και σε ανίσχυρους κατοπτρισμούς (που αντιστοιχούν σε σχέσεις που δεν απαιτούν τουλάχιστον τρία πραγματικά σημεία επαφής). Ανάμεσα στις σχέσεις αυτές μεταξύ των χαρακτηριστικών, μερικές περιλαμβάνουν κατοπτρισμούς και έχουν ιδιαίτερη επίδραση στο καθορισμό των ανοχών. Το τμήμα με το μέγιστο αριθμό κατοπτρισμών θεωρείται το πιο σημαντικό και είναι το πρώτο στο οποίο πρέπει να τοποθετηθούν ανοχές. Εν συνεχεία καθορίζονται οι ανοχές στα υπόλοιπα τμήματα κατά σειρά προτεραιότητας.

Οι ανοχές που δημιουργούνται σε κάθε τμήμα του τεμαχίου προσδιορίζονται σε δύο στάδια. Στο πρώτο στάδιο (προσωρινός καθορισμός ανοχών), οι επιφάνειες αναφοράς επιλέγονται βάσει των κανόνων του κατοπτρισμού και των σχεδιαστικών απαιτήσεων: για παράδειγμα, οι ισχυροί κατοπτρισμοί χρησιμοποιούνται ως πρωταρχικά σημεία αναφοράς , τα τοπολογικά χαρακτηριστικά ως δευτερεύοντα σημεία αναφοράς κτλ.. Για να κατασκευαστεί ένα DRF, τα χαρακτηριστικά ομαδοποιούνται σύμφωνα με την γειτνίασή τους με κατοπτρικά χαρακτηριστικά. Η μορφή, ο προσανατολισμός και η θέση των ανοχών τοποθετούνται τόσο στα επίπεδα αναφοράς όσο και στα επίπεδα στόχους. Στο επόμενο βήμα (τελικός καθορισμός ανοχών) εφαρμόζονται άλλοι κανόνες για να γίνει εναρμονισμός των ανοχών των τεμαχίων με βάση τις σχέσεις συναρμογής.



Σχ. 3.17: Προσωρινός καθορισμός ανοχών με βάση τη μέθοδο του κατοπτρισμού

Το **Σχ. 3.17** δείχνει τη χρήση του κατοπτρισμού στο παράδειγμα. Το τεμάχιο 1 θεωρείται το πιο σημαντικό καθώς έχει δύο κάτοπτρα, ισχυρά λόγω της ύπαρξης τριών τουλάχιστον σημείων πραγματικής επαφής. Ένα από τα δύο κάτοπτρα (χαρακτηριστικό 1.2) προτιμάται ως το πρωτεύον χαρακτηριστικό του τεμαχίου , δεδομένου ότι είναι πιο εύκολα προσβάσιμο τόσο στην κατασκευή όσο και στην επιθεώρηση. Κάθε κάτοπτρο λαμβάνεται ως σημείο εκκίνησης για να συγκεντρωθούν πλησίον του τα γειτονικά χαρακτηριστικά, στα οποία έχουν ήδη καθορισθεί οι ανοχές σύμφωνα με το ASME. Για αμφότερες τις ομάδες του παραδείγματος, το προσωρινό σύστημα ανοχών αποτελείται από ένα έλεγχο επιπεδότητας του επιπέδου και έλεγχο καθετότητας του κυλινδρικού χαρακτηριστικού.

3.6.4 Καταμερισμός Λειτουργίας (function decomposition)

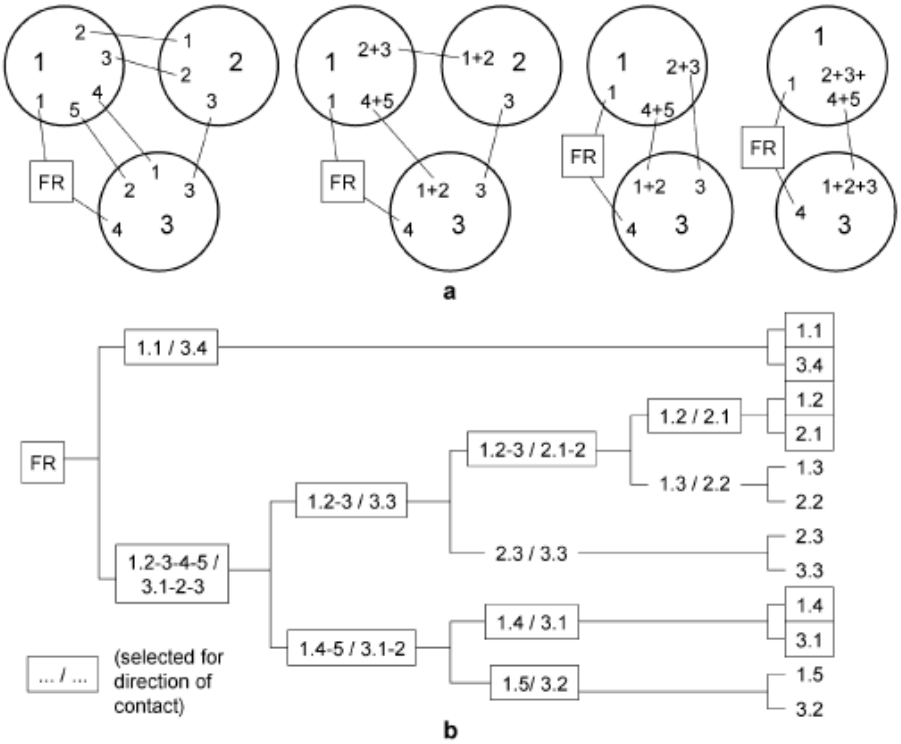
Η προσέγγιση αυτή συνίσταται σε μία διαδικασία , που αρχικά προοριζόταν ως ένα εκπαιδευτικό εργαλείο , το οποίο αργότερα ενσωματώθηκε σε μια γενική μέθοδο προσδιορισμού προδιαγραφών (Ballu και Mathieu, 1999). Συνδυάζει μια γενική στρατηγική που βασίζεται σε σχέσεις συναρμογής με αναλυτική επεξεργασία των λειτουργικών τους απαιτήσεων. Αυτά καθορίζονται από τους σχεδιαστές ως σύνδεσμοι μεταξύ των χαρακτηριστικών του τεμαχίου στο γράφημα με τις σχέσεις συναρμολόγησης.

Για κάθε λειτουργική απαίτηση , η γραφική παράσταση απλοποιείται με την αναγνώριση ειδικού τύπου επαφών (π.χ. σειράς ή παράλληλες). Σε κάθε επανάληψη, τα χαρακτηριστικά που συμμετέχουν στα σχέδια συγκεντρώνονται σε σύνθετα χαρακτηριστικά για την επόμενη επανάληψη. Τα χαρακτηριστικά είναι έτσι διατεταγμένα σε μια ιεραρχία, η οποία στη συνέχεια αναλύεται με σκοπό τον εντοπισμό των χαρακτηριστικών που σχετίζονται με την απαίτηση. Αυτό γίνεται με τους κανόνες που να ληφθεί υπόψη η γεωμετρία των χαρακτηριστικών σε ενδιάμεσα επίπεδα (τύπους χαρακτηριστικό και συνδέονται κατεύθυνση).

Αφού η διαδικασία αυτή έχει επαναληφθεί για όλες τις λειτουργικές απαιτήσεις , όλες οι μετατοπίσεις και οι περιστροφές είναι γνωστές για κάθε χαρακτηριστικό του κάθε τμήματος . Ως εκ τούτου, είναι δυνατόν να επιλεγεί ο κατάλληλος τύπος γεωμετρικού ελέγχου για το κάθε χαρακτηριστικό (προσανατολισμός, θέση) και τα συσχετιζόμενα με αυτό επίπεδα με σειρά προτεραιότητας (π.χ. επίπεδα και κύλινδροι μόνιμης επαφής προηγούνται από τους κυλίνδρους κυμαινόμενης επαφής).

Στο **Σχ. 3.18b** φαίνεται η επιλογή των χαρακτηριστικών που εμπλέκονται στην λειτουργική απαίτηση για τη συναρμογή. Στο **Σχ. 3.18a**, η γραφική παράσταση των σχέσεων ολοκληρώνεται με τη λειτουργική απαίτηση , σε σχέση με την απόσταση μεταξύ των χαρακτηριστικών 1.1 και 3.4 . Το γράφημα στη συνέχεια απλοποιείται τρεις φορές μέσα από την αναγνώριση των προτύπων επαφής παράλληλων (πρώτο και τρίτο βήμα) και σε σειρά (δεύτερο βήμα). Απλοποιώντας τα γραφήματα καταμερίζονται οι λειτουργικές απαιτήσεις ως μια ταξινόμηση των χαρακτηριστικών που έρχονται σε επαφή (**Σχ. 3.18b**) . Εντός της ταξινόμησης αυτής, τα χαρακτηριστικά τα οποία δεν επηρεάζουν τη λειτουργική απαίτηση απορρίπτονται από περαιτέρω εξέταση: συγκεκριμένα , όλες οι κυλινδρικές επαφές δεν συμμετέχουν στο περιορισμό μετατόπισης της λειτουργικής απαίτησης και επομένως δε χρειάζεται να τους καθορίσουμε διαστάσεις (τουλάχιστον σε σχέση με τη λειτουργική απαίτηση).

Η διαδικασία που περιγράφεται έχει ενσωματωθεί στο διαδραστικό εργαλείο προσδιορισμού προδιαγραφών, που αποσκοπεί στην υποστήριξη των σχεδιαστών κατά τη διάρκεια του κύκλου ανάπτυξης του προϊόντος, ξεκινώντας από τον αρχικό αφηρημένο σχεδιασμό (Dantan et al., 2003a). Για τον καλύτερο συσχετισμό των δεδομένων εισόδου με το σχεδιασμό του προϊόντος , οι λειτουργίες που καθορίζονται σε υψηλό επίπεδο μετατρέπονται σε ένα σύνολο βασικών χαρακτηριστικών που σχετίζονται με τα χαρακτηριστικά του προιόντος . Επιπλέον, γίνεται μια προσπάθεια να εξεταστεί η επίδραση του σχεδίου συναρμολόγησης στις ανοχές. Σε ορισμένες περιπτώσεις, η εκπλήρωση μιας λειτουργικής απαίτησης (π.χ. επαρκές περιθώριο σε μια συναρμογή) εξαρτάται από τη διαμόρφωση σε προηγούμενες εργασίες συναρμογής . Η εξάρτηση αυτή μοντελοποιείται μέσα από τους κανόνες για την επιλογή του μέγιστου ή του ελάχιστου υλικού (Dantan et αϊ . 2003b , 2005).



Σχ. 3.18: Καταμερισμός μιας λειτουργικής απαίτησης (FR) : α. ένα γράφημα ολοκληρωμένων σχέσεων με τις λειτουργικές απαιτήσεις , και β. καταμερισμός των λειτουργικών απαιτήσεων σε μια ιεραρχία χαρακτηριστικών.

3.6.5 Πίνακας θέσεων

Η κάθε σχεδιαστική απαίτηση συνήθως περιλαμβάνει μόνο έναν περιορισμένο αριθμό εξαρτημάτων. Για το σκοπό αυτό, η επιλογή των ανοχών που απαιτούνται για να ικανοποιήσουν την απαίτηση μπορεί να γίνει χωρίς να λαμβάνεται υπόψη το σύνολο των σχέσεων των γραφημάτων μεταξύ των χαρακτηριστικών της συναρμογής Η μέθοδος αυτή εισήχθει από τον Anselmetti και Mawussi (2003), και Mejbri et al. (2003 , 2005).

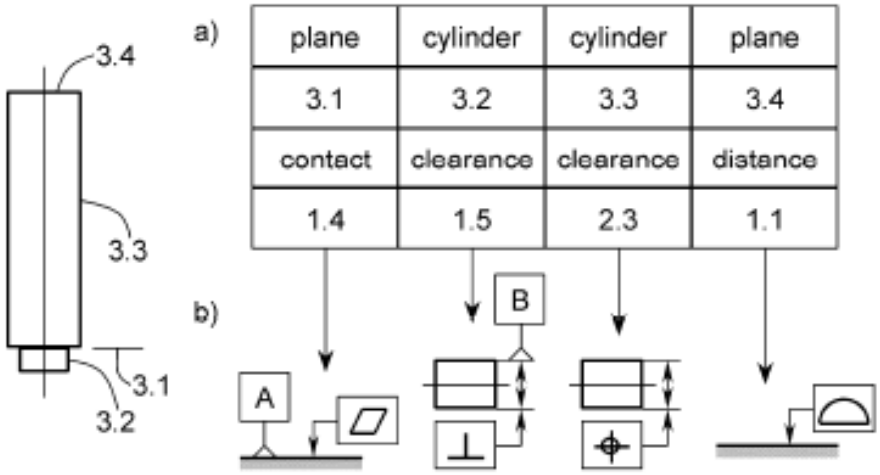
Μια λειτουργική απαίτηση ορίζεται ως η γεωμετρική ανοχή που αποδίδεται σε μια τελική οντότητα ενός τεμαχίου σε σχέση με εξωτερικά στοιχεία αναφοράς. Μια τέτοια "γενικευμένη" ανοχή πρέπει να μετατρέπεται σε μια σειρά τακτικών ανοχών (π.χ. με μόνο εσωτερικά στοιχεία αναφοράς) για τα επιμέρους τμήματα που εμπλέκονται στην απαίτηση. Για το σκοπό αυτό καθορίζεται ένας πίνακας τοποθέτησης που αντιπροσωπεύει τις σχέσεις επαφής με τα συνεργαζόμενα μέρη. Ο πίνακας παραθέτει τις επαφές σε ένα οργανωμένο σύνολο , που αντιστοιχεί στη σειρά προτεραιότητας των στοιχείων αναφοράς για όλες τις απαιτήσεις που αφορούν το δεδομένο τεμάχιο. Η σειρά των στοιχείων αναφοράς καθορίζεται από τον σχεδιαστή , σύμφωνα με τους τύπους των πραγματικών επαφών που απαιτούνται μεταξύ των χαρακτηριστικών (επαφές με τρία πραγματικά σημεία, απλές επαφές , κλπ) και την ανάγκη να καθορίσουν περίπλοκες περιπτώσεις πλαισίων αναφοράς (σύνθετα πλαίσια αναφοράς, συμμετρίες, χαρακτηριστικά μοτίβα, κ.λπ.).

Με τη χρήση των πινάκων τοποθέτησης των εξαρτημάτων, δημιουργείται μια αλυσίδα σχέσεων (μηχανικές αρθρώσεις) έως το βασικό εξάρτημα για κάθε λειτουργική απαίτηση. Η αλυσίδα ακολούθως διευρύνεται προς τα πίσω από το πρώτο τεμάχιο ακολουθώντας την αλυσίδα των σχέσεων. Σε κάθε στάδιο, οι εξωτερικές επιφάνειες αναφοράς της γεωμετρικής ανοχής που συνδέονται με την απαίτηση μετατρέπονται σε εσωτερικές επιφάνειες αναφοράς .

Το πλαίσιο DRF που χρησιμοποιείται για κάθε ανοχή επικυρώνεται , δηλαδή περιορίζεται στο απλούστερο υποσύστημα που είναι σε θέση να ελέγχει με σαφήνεια τη τυχαία θέση της ζώνης ανοχής . Το κριτήριο επικύρωσης βασίζεται στους αμετάβλητους βαθμούς ελευθερίας, δηλαδή τις μετατοπίσεις και τις περιστροφές που δεν έχουν καμία επίδραση στην ζώνη ανοχής. Αν σ'ένα στοιχείο αναφοράς που έρχεται σε επαφή με ένα άλλο στοιχείο δε χρειάζεται να περιοριστούν οι βαθμοί ελευθερίας της ζώνης ανοχής του , τότε το τμήμα αυτό θεωρείται ανενεργό . Η επικύρωση βασίζεται στην ταξινόμηση των ζωνών ανοχής, που θεωρούνται σε συνδυασμό με άλλους τύπους χαρακτηριστικών . Ένα σύνολο κανόνων επικύρωσης επιτρέπει τη διακρίβωση εάν ένα συγκεκριμένο σύστημα αναφοράς συμβάλλει στο περιορισμό των βαθμών ελευθερίας , δηλαδή, εξαλείφει τους βαθμούς ελευθερίας που είναι μη μεταβαλλόμενοι στη ζώνη ανοχής.

Στο **Σχ. 3.19a** φαίνεται ο πίνακας τοποθέτησης για το τεμάχιο 3 του παραδείγματος. Η πρώτη στήλη του πίνακα, υποδεικνύει ότι υπάρχει μια επαφή μεταξύ των επίπεδων στοιχείων 3.1 και 1.4. Οι υπόλοιπες στήλες παρομοίως ερμηνεύονται με άλλους τύπους χαρακτηριστικών και σχέσεων. Στο **Σχ. 3.19b)**, κάθε σχέση δημιουργεί μια ανοχή στο εμπλεκόμενο χαρακτηριστικό. Η στήλη καθορίζεται από το σχεδιαστή και καθορίζει την προτεραιότητα των σημείων αναφοράς (Α και Β για το τεμάχιο αυτό).

Η προσέγγιση αυτή ολοκληρώθηκε αργότερα με ένα αυτοματοποιημένο τρόπο παραγωγής λειτουργικών εξισώσεων για κατανομή των ανοχών (Anselmetti 2006). Εκτός από τις λειτουργικές απαιτήσεις που καθορίζονται από το χρήστη , ορισμένες απαιτήσεις συναρμολόγησης είναι προσδιορίζονται αυτόματα από τα γεωμετρικά δεδομένα . Αυτές περιλαμβάνουν παρεμβολές και ευθυγραμμίσεις μεταξύ των επιφανειών και περιορισμούς στις πακτωμένες επιφάνειες και σε συγκεκριμένα τεμάχια (σπειρώματα σύνδεσης, πείρους κ.α.). Η μέθοδος αυτή εφαρμόστηκε σε ένα διαδραστικό λογισμικό εργαλείο βασισμένο σε πακέτο 3D-CAD.



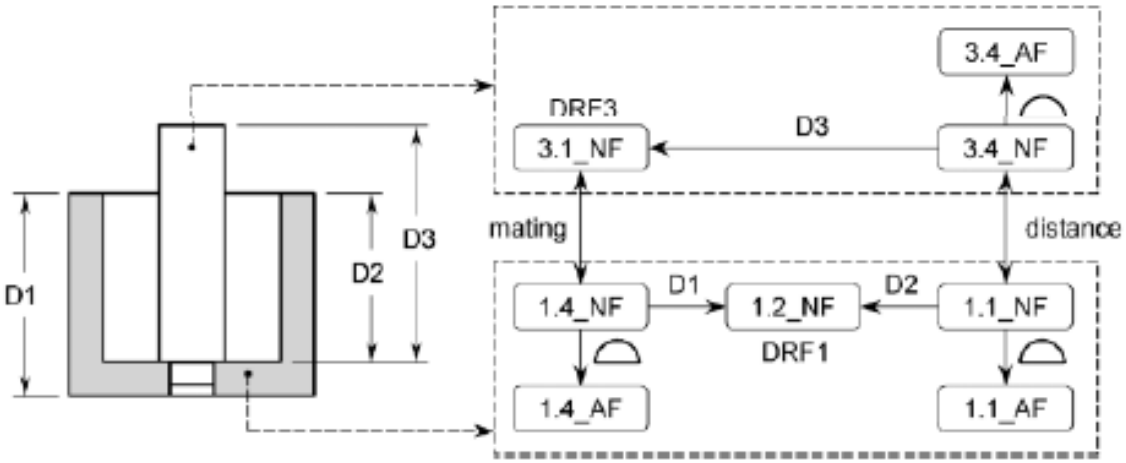
Σχ. 3.19: Πίνακας θέσεων και κανόνες ανοχών

3.6.6 Μεταβλητά Διαγράμματα Βρόχου

Μια άλλη μέθοδος που προέρχεται από την κατηγοριοποίηση των περιπτώσεων ανοχών προτάθηκε από το Hu et al . (2004) και τον Hu και Xiong (2005a ,b) ως μέρος μιας συνολικής μεθόδου για το προσδιορισμό των γεωμετρικών ανοχών. Σε αντίθεση με προσεγγίσεις που βασίζονται στα TTRS και στους βαθμούς ελευθερίας των μοντέλων, στη μέθοδο αυτή χρειάζονται επίσης και οι απαιτήσεις συναρμολόγησης ως δεδομένα εισόδου. Η μέθοδος αυτή βασίζεται σε μοντέλα συναρμολόγησης τα οποία περιλαμβάνουν τόσο ονομαστικά χαρακτηριστικά (π.χ. επίπεδα, κύλινδρους) όσο και προερχόμενα από αυτά χαρακτηριστικά (π.χ. κυλινδρικούς άξονες). Η σχέση μεταξύ των δύο αυτών οντοτήτων βασίζεται σε ονομαστικές παραμέτρους που αντιστοιχούν σε ονομαστικές διαστάσεις των τμημάτων κατά μήκος των διευθύνσεων αναφοράς.

Για κάθε σχεδιαστική απαίτηση, ένας κατευθυνόμενος γράφος που ονομάζεται ονομαστικό κύκλωμα βρόχου (Nominal Loop Circuit-NLC) αντιπροσωπεύει όλες τις σχέσεις μεταξύ των εμπλεκόμενων οντοτήτων και των σχετικών ονομαστικών παραμέτρων. Τα NLC είναι κατασκευασμένα από υπο-γράφους και αντιστοιχούν σε συναρμογές ή και άλλα προκαθορισμένα σχέδια και σχέσεις. Οι εξισώσεις που συνδέουν τις ονομαστικές παραμέτρους παράγονται από τη δομή του γράφου. Οι γεωμετρικές μεταβολές των στοιχείων λαμβάνονται υπόψη καθορίζοντας τα συναφή χαρακτηριστικά π.χ. τα χαρακτηριστικά που λαμβάνονται υπόψη με μέτρηση των πραγματικών επιφανειών. Έτσι για κάθε απαίτηση το NLC εμπλουτίζεται με συνδεδεμένες οντότητες και οι σχέσεις τους με τις ονομαστικές οντότητες. Οι σχέσεις αυτές εκφράζονται μέσω πρόσθετων παραμέτρων (μεταβολές των παραμέτρων) , οι οποίες επιτρέπουν την κατασκευή ενός δεύτερου γραφήματος που ονομάζεται κύκλωμα μεταβλητού βρόχου (Variational Loop Circuit-

VLC). Το κάθε VLC συμπληρώνεται με γεωμετρικές ανοχές που εκφράζονται σαν ανισότητες που περιέχουν μεταβολές των παραμέτρων και που προσδιορίζονται από γεωμετρικούς κανόνες.



Σχ. 3.20: Κύκλωμα μεταβλητού βρόχου για μια λειτουργική απαίτηση, DRF: πλαίσιο αναφοράς δεδομένο, NF ονομαστικό χαρακτηριστικό , AF συναφές χαρακτηριστικό

Το σχήμα 3.20 δείχνει τις αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις για τις λειτουργικές απαιτήσεις του παραδείγματος. Δεδομένου ότι η απαίτηση περιλαμβάνει μόνο επίπεδες επιφάνειες δύο τμημάτων (1 και 3) , το κύκλωμα είναι πολύ απλό και δεν έχει συναφή χαρακτηριστικά (π.χ. άξονες). Το NLC είναι το πρώτο που χτίστηκε με ονομαστικά χαρακτηριστικά. Κάθε ονομαστικό χαρακτηριστικό συνδέεται με τα χαρακτηριστικά (ένα ενιαίο επίπεδο σε αυτήν την περίπτωση) της DRF του ιδίου τεμαχίου (DRF1 ή DRF3). Κάθε σύνδεσμος αντιπροσωπεύει τη γεωμετρική σχέση των επιπέδων αναφοράς , η οποία αποτελείται από μία εκ των αποστάσεων D1, D2, και D3. Για να δημιουργηθεί το VLC , τα συναφή χαρακτηριστικά προστίθενται. Κάθε ένα από αυτά συνδέεται με το αντίστοιχο ονομαστική χαρακτηριστικό μέσω γεωμετρικών παραμέτρων (δεν φαίνονται στο σχήμα) , που επιτρέπουν την επιλογή του κατάλληλου τύπου ανοχής και την πιθανή ανάγκη για καθορισμό βασικών διαστάσεων από μια λίστα πιθανών περιπτώσεων ανοχών.

3.7 Συμπεράσματα

Είναι σαφές ότι η εισαγωγή των γεωμετρικών ανοχών στο σχεδιασμό μηχανολογικών κατασκευών έχει δημιουργήσει ένα νέο περιβάλλον που δεν υπήρχε με τις γραμμικές ανοχές. Ο μηχανικός είναι υποχρεωμένος να καθορίσει το βαθμό του γεωμετρικού ελέγχου του κάθε χαρακτηριστικού του στοιχείου, προκειμένου να διασφαλιστεί η εφαρμογή και η λειτουργία του προϊόντος. Η ταξινόμηση των περιπτώσεων ανοχών και των τυποποιημένων διαδικασιών είναι όλο και περισσότερο διαθέσιμες για την υποβοήθηση του σχεδιασμού. Οι γενικές μέθοδοι που αναπτύσσονται και ενσωματώνονται σε λογισμικό 3D-CAD είναι μια περαιτέρω υποβοήθηση όταν ασχολούμαστε με πολύπλοκες συναρμογές. Τα εργαλεία αυτά δεν είναι εύκολα στο χειρισμό και συνήθως περιλαμβάνουν σημαντική αλληλεπίδραση του χρήστη.

Οι κυριότερες μελλοντικές εξελίξεις που αναμένονται αφορούν τρεις τομείς : την επεξεργασία των δεδομένων, την ανάπτυξη γενικής στρατηγικής για την επίλυση των προβλημάτων ανοχών, καθώς και τη συμβατότητα με τα συναφή όρια ανοχών.

Για να καταστεί δυνατή η πλήρης περιγραφή του προϊόντος, πρέπει να γίνουν βελτιώσεις στην επεξεργασία των απαιτήσεων σχεδιασμού. Λόγω του μεγάλου αριθμού τους, είναι πρακτικώς αδύνατος ο προσδιορισμός των απαιτήσεων μονάχα από το μηχανικό-σχεδιαστή. Οι διαδικασίες θα πρέπει να αναπτυχθούν για την αυτοματοποιημένη αναγνώριση των απαιτήσεων της συναρμογής , και οι λειτουργικές απαιτήσεις θα πρέπει να μοντελοποιηθούν και να ταξινομηθούν καλύτερα . Το αποτέλεσμα της διαδικασίας συναρμολόγησης για τις ανοχές θα πρέπει να διευκρινιστούν καλύτερα. Οι βελτιωμένες διεπαφές λογισμικών 3D-CAD θα βοηθήσουν στον εξορθολογισμό της κατασκευής του προϊόντος με μοντέλα χωρίς ιδιαίτερα κουραστικές και επίπονες διαδικασίες.

Για να βελτιωθεί η διαδικασία καθορισμού των ανοχών, θα πρέπει να βρεθεί μια ισορροπία μεταξύ μιας αναλυτικής επεξεργασία των απαιτήσεων ακρίβειας, ιδανικών για την αντιμετώπιση πολύπλοκων αλυσίδων γεωμετρικών ανοχών και μια γενικής μεθόδου καθοδηγούμενης από τις σχέσεις των χαρακτηριστικών σε επίπεδο συναρμογής. Η ανάγκη να καλυφθεί το σύνολο των ανοχών που παρέχονται από τις τεχνικές προδιαγραφές κατά πάσα πιθανότητα θα απαιτήσει την επέκταση των υφιστάμενων κανόνων προσδιορισμού και ταξινόμησης των περιπτώσεων ανοχών .

Για την επέκταση του πεδίου εφαρμογής των μεθόδων καθορισμού ανοχών, πρέπει να αναπτυχθούν κατάλληλα μοντέλα διεπαφών λογισμικού. Η διεπαφή αυτή θα πρέπει να περιλαμβάνει την αυτόματη παραγωγή γεωμετρικών αλυσίδων ανοχής και συναφών λειτουργικών εξισώσεων. Αυτό θα επιτρέψει μία σημαντική αύξηση της αποτελεσματικότητας στο σχεδιασμό των συναρμολογημένων μηχανολογικών συνόλων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΑΝΟΧΩΝ

4.1. Εισαγωγή

Η αύξηση του ανταγωνισμού στον τομέα της βιομηχανίας οδηγεί στην υιοθέτηση προγραμμάτων μείωσης κόστους τόσο στη κατασκευή όσο και στο σχεδιασμό και στη συναρμολόγηση των προϊόντων. Τα σύγχρονα μηχανολογικά προϊόντα είναι πολύπλοκα συστήματα, που συχνά αποτελούνται από διαφορετικές συναρμογές και υπο-συναρμογές, που περιλαμβάνουν πολύπλοκες γεωμετρίες και πρέπει να ικανοποιούν μία ευρεία ποικιλία διαφορετικών απαιτήσεων στα στάδια του σχεδιασμού και της κατασκευής, ώστε να εκπληρούν τις επιθυμητές λειτουργικές τους απαιτήσεις.

Η σύγχρονη προσέγγιση που αφορά την παραγωγή του προιόντος συνίσταται στην εκτέλεση ταυτόχρονα τόσο του σχεδιασμού του προϊόντος όσο και στον προγραμματισμό της διαδικασίας κατασκευής του, με στόχο τη μείωση του χρόνου επανεπεξεργασίας (reworking times) και του ποσοστού απόρριψης του προϊόντος (discard rates). Κατά τα τελευταία χρόνια, έχει διαπιστωθεί πως οι επιπτώσεις των ανοχών συναρμολόγησης των προϊόντων έχουν καθοριστική σημασία στο συνολικό κόστος του τελικού προϊόντος και έχουν γίνει σημαντικές προσπάθειες για βελτιστοποίηση αυτών. Στην πραγματικότητα, ενώ η ανάγκη για τον καθορισμό κάποιου είδους διαστάσεων και γεωμετρικών ανοχών για συναρμολόγηση των εξαρτημάτων αναγνωρίζεται ευρέως ως ένα απαραίτητο βήμα για την εξασφάλιση μιας τυποποιημένης παραγωγικής διαδικασίας και για τη διασφάλιση της ορθής λειτουργίας του προϊόντος, οι σχέσεις μεταξύ των τιμών που καθορίζονται στις ανοχές και στη λειτουργικότητα του τελικού προϊόντος θα πρέπει να διερευνηθούν λεπτομερέστερα.

Όπως καθορίζεται από τις προθέσεις του σχεδιαστή, τα συναρμολογηθέντα προϊόντα κατασκευάζονται για να ικανοποιήσουν μία ή περισσότερες λειτουργικές προϋποθέσεις. Ο βαθμός κατά τον οποίο κάθε μια από αυτές τις λειτουργικές απαιτήσεις ικανοποιείται από το τελικό προϊόν είναι συνήθως στενά συνδεδεμένος με συγκεκριμένες βασικές διαστάσεις της ίδιας της τελικής συναρμολόγησης. Στη σχετική βιβλιογραφία αυτές οι βασικές διαστάσεις συχνά αποκαλούνται βασικές λειτουργικές παράμετροι ή σχεδιαστικές διαστάσεις, ή λειτουργικές απαιτήσεις, όπως θα αναφέρονται και στη ΔΕ αυτή. Οι λειτουργικές απαιτήσεις είναι συνήθως το αποτέλεσμα των συνολικών γεωμετριών και διαστάσεων των διαφόρων τμημάτων του τεμαχίου και η τελική τους μεταβλητότητα είναι θεμελιώδης σημασίας για τον καθορισμό της συνολικής λειτουργικής απόδοσης της κατασκευής. Οι τιμές των ανοχών που αποδίδονται στα τεμάχια και στις συναρμογές έχουν θεμελιώδη σημασία για τον καθορισμό της συνολικής μεταβλητότητας των λειτουργικών απαιτήσεων και, κατά συνέπεια, για τη λειτουργική απόδοση του τελικού προϊόντος.

Επιπλέον, κατά την ανάλυση της αλυσίδας των συναρμολογημένων εξαρτημάτων, είναι σημαντικό να αναγνωριστούν οι ανοχές εκείνες των τεμαχίων που έχουν τη μεγαλύτερη επίδραση στο τελικό αποτέλεσμα. Έχει αποδειχθεί ότι συχνά ισχύει ο 70-30 κανόνας, πράγμα που σημαίνει ότι το 30% των ανοχών που έχουν καθορισθεί στα επιμέρους εξαρτήματα είναι υπεύθυνα για το 70% του συνολικού τεμαχίου των γεωμετρική μεταβολών. Οι μεταβολές αυτές που σχετίζονται με τις διαστάσεις και τη γεωμετρία της συναρμογής δημιουργούν τη μεταβλητότητα που σχετίζεται με τις λειτουργικές απαιτήσεις. Οι συναρτήσεις συνολικών ανοχών είναι μαθηματικά μοντέλα με στόχο την υποτύπωση των συνδυασμών αυτών. Ονομάζονται έτσι, επειδή δίνουν σαν αποτέλεσμα το εύρος διακύμανσης της λειτουργικής απαίτησης, με είσοδο τις ανοχές των συνιστωσών της συναρμογής. Με άλλα λόγια, ένα πρόβλημα ανάλυσης ανοχών συνεπάγεται την μοντελοποίηση και επίλυση μιας συνάρτησης στοίβας ανοχών (stack –up tolerance) προκειμένου να καθοριστεί η ονομαστική αξία και το εύρος ανοχής μιας λειτουργικής απαίτησης ξεκινώντας από τις ονομαστικές τιμές και τη διακύμανση των ανοχών των επιμέρους εξαρτημάτων της συναρμογής.

Σε ένα τυπικό πρόβλημα ανάλυσης ανοχών, γραμμικής ή μη γραμμικής συνάρτησης στοίβας ανοχών χρειάζεται να επιλυθούν συναρτήσεις, ανάλογα με το πρόβλημα που μελετάται και με τον τρόπο με τον οποίο μοντελοποιήθηκε στην ανάλυση. Μπορεί επίσης να εξεταστεί το ενδεχόμενο εφαρμογής εναλλακτικών κύκλων συναρμολόγησης στο πλαίσιο της ανάλυσης, για τον προσδιορισμό της λειτουργικότητας της συναρμογής με ταυτόχρονη αύξηση του εύρους ανοχής που αποδίδεται στα συστατικά. Η σημασία μιας αποτελεσματικής ανάλυσης ανοχών είναι ευρέως αναγνωρισμένη καθώς μπορεί να προκύψουν σημαντικά προβλήματα κατά τη διάρκεια της πραγματικής διαδικασίας συναρμολόγησης αν η ανοχή σε ένα τεμάχιο ή εξάρτημα δεν πραγματοποιήθηκε σε ικανοποιητικό επίπεδο (Whitney 2004). Επίσης υπάρχει περίπτωση το προϊόν να αναγκαστεί να επανυποβληθεί σε επανασχεδιασμό λόγω απρόβλεπτων προβλημάτων ανοχής, τα οποία δεν ανιχνεύονται πριν από τη ρεαλιστική συναρμολόγηση του τεμαχίου. Στην περίπτωση αυτή, τα έξοδα των επιχειρήσεων μπορεί να είναι ιδιαίτερα υψηλά, ιδίως εάν ληφθεί υπόψη ότι το 40-60% του κόστους παραγωγής εκτιμάται ότι οφείλεται στη διαδικασία συναρμογής (DELCHAMBRE 1996).

Υπάρχουν πολλά γνωστά μοντέλα στη βιβλιογραφία για την ανάλυση των ανοχών (Hong Chang 2002, Shen et al 2004). Το μοντέλο διανυσμάτων βρόχου (vector loop model) όπου κάθε σχετική γραμμική διάσταση στη συναρμογή αντιπροσωπεύεται από ένα διάνυσμα ενώ η σχετική ανοχή αναπαρίσταται σαν μια μικρή μεταβολή του διανύσματος αυτού (Chase et al 1997; Chase 1999). Τα διανύσματα συνδέονται για να σχηματίσουν αλυσίδες ή και βρόχους, που απεικονίζουν τον τρόπο συναρμολόγησης των εξαρτημάτων για τον καθορισμό των τελικών λειτουργικών απαιτήσεων του τεμαχίου. Οι συναρτήσεις στοίβας έχουν κατασκευαστεί συνδυάζοντας τις μεταβολές των διανυσμάτων που εμπλέκονται σε κάθε αλυσίδα με μαθηματικές εκφράσεις, οι οποίες μπορούν στη συνέχεια να επιλυθούν με διαφορετικές μεθόδους.

Το μεταβολικό μοντέλο (variational model) έχει τις ρίζες του στη παραμετρική γεωμετρική μοντελοποίηση, όπου η γεωμετρία μπορεί να μοντελοποιηθεί με μαθηματικές εξισώσεις που επιτρέπουν στο σχήμα και στο μέγεθος του χαρακτηριστικού να μπορεί να αλλάζει και να ελέγχεται μέσω ενός συνόλου παραμέτρων (Gupta και Turner 1993, Whitney et al 1999, Li and Roy 2001). Η παραμετρική μοντελοποίηση μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως σημείο εκκίνησης για την αναπαραγωγή μικρών παραλλαγών σε μια συναρμογή, εντός των ορίων που ορίζονται από μια δεδομένη ανοχή. Στο μοντέλο μήτρας (matrix model), η προσέγγιση αποβλέπει στην κατάρτιση

μιας σαφής μαθηματικής αναπαράστασης της γεωμετρίας κάθε περιοχής ανοχής (το τμήμα του χώρου όπου ένα χαρακτηριστικό επιτρέπεται να βρίσκεται, δεδομένου ενός συνόλου ανοχών). Αυτό επιτυγχάνεται μέσω μητρών μετατόπισης, οι οποίες περιγράφουν τις μικρές μετατοπίσεις του χαρακτηριστικού χωρίς να παραβιάζονται τα όρια ανοχών (Desrochers and Rivière 1997, Clément et al. 1998).

Στο Ιακωβιανό μοντέλο (Jacobian model), οι αλυσίδες ανοχής μοντελοποιούνται ως αλληλουχίες συνδεδεμένων ζευγών συσχετιζόμενων επιφανειών. Η μετατόπιση μεταξύ των επιφανειών αυτών (είτε ονομαστική είτε λόγω διακυμάνσεων που επιτρέπονται από τις ανοχές) διαμορφώνεται μέσω ομογενών συντεταγμένων μητρών μετασχηματισμού (Laperrière and Lafond 1999, Laperrière and Kabore 2001). Ο τρόπος που οι μήτρες διαμορφώνονται έχει κοινά χαρακτηριστικά με τις ιακωβιανές μήτρες στη ρομποτική. Τέλος, στο μοντέλων στροφέων (torsor model), οι παράμετροι εισάγονται σε 3D μοντέλα ζωνών ανοχών (Ballot and Bourdet 1995, 1997).

Οι πέντε αυτές διαφορετικές προσεγγίσεις μοντελοποίησης που αναπτύχθηκαν παραπάνω, προτείνουν διαφορετικές λύσεις για συγκεκριμένες πτυχές του προβλήματος της ανάλυσης ανοχών, αλλά όλες έχουν τόσο ισχυρά σημεία όσο και αδυναμίες που μπορεί να τις κάνουν ανεπαρκείς για συγκεκριμένες εφαρμογές. Οι περισσότερες διαφοροποιήσεις σχετίζονται με την μοντελοποίηση της γεωμετρικής μεταβλητότητας των εξαρτημάτων και των συναρμογών, καθώς και με το πώς οι αρθρώσεις και οι ανοχές μεταξύ των τμημάτων αναπαριστούνται. Επίσης υπάρχουν διαφορές στον τρόπο που επιλύονται οι συναρτήσεις ανοχών στοίβας. Επιπλέον, είναι δύσκολο να βρεθεί κατάλληλη βιβλιογραφία όπου να αναλύονται συστηματικά οι διαφορετικές προσεγγίσεις σε ένα συγκεκριμένο παράδειγμα με στόχο την ανάδειξη των πλεονεκτημάτων και μειονεκτήματα της κάθε μίας.

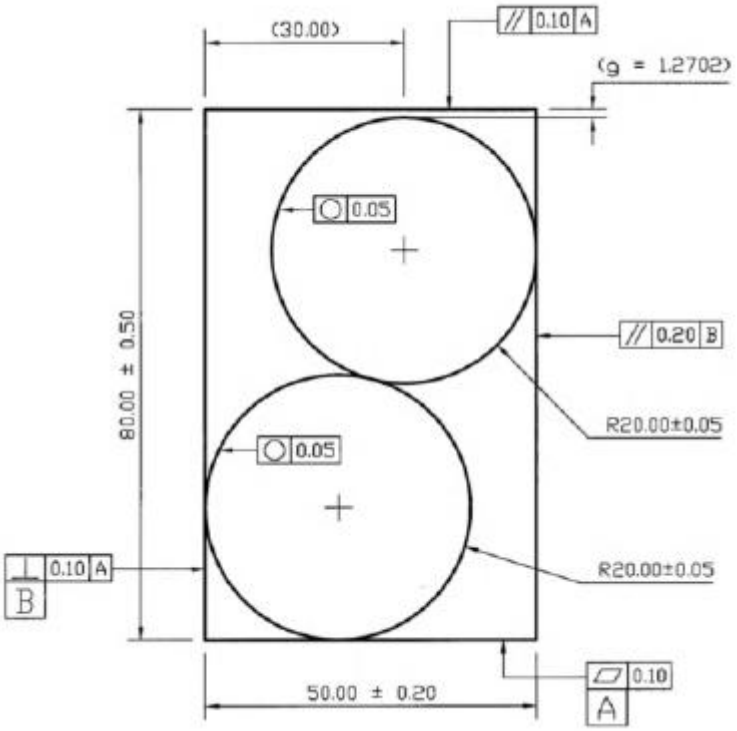
Στο τμήμα 4.2 περιγράφεται μια πρακτική μελέτη περίπτωσης, η οποία θα χρησιμοποιηθεί ως παράδειγμα αναφοράς για την ανάπτυξη των μοντέλων ανάλυσης ανοχής που παρουσιάζονται στις παραγράφους 4.3-4.5. Στην παράγραφο 4.6 παρέχονται ορισμένες κατευθυντήριες οδηγίες για την ανάπτυξη ενός νέου μοντέλου που αποσκοπούν στην ξεπέρασμα των αδυναμιών των μοντέλων της βιβλιογραφίας.

4.2 Καθορισμός Ανοχών Τεμαχίου (case study)

Για να συγκρίνουμε τα μοντέλα ανάλυσης ανοχών, χρησιμοποιούμε το παράδειγμα που φαίνεται στο **Σχ. 4.1**. Η γεωμετρία 2D του παραδείγματος αποτελείται από ένα ορθογώνιο που περιέχει δύο τεμάχια σε σχήμα κυκλικού δίσκου. Το πλάτος g του διακένου μεταξύ του άνω δίσκου και της άνω επιφάνειας του κουτιού θεωρείται ως η λειτουργική απαίτηση που μελετάται κατά την ανάλυση. Ο στόχος της ανάλυσης είναι να προσδιορισθεί η συνάρτηση στοίβας του διακένου g, που το περιγράφει ως συνάρτηση των γεωμετριών και των ανοχών των εξαρτημάτων που συμμετέχουν στη συναρμολόγηση. Η ανάλυση ανοχής βασίζεται στις διαστάσεις και στις γεωμετρικές ανοχές που απεικονίζονται στο **Σχ. 4.1**. Το παράδειγμα έχει ληφθεί από μια πραγματική βιομηχανική εφαρμογή και έχει απλουστευθεί, ώστε να καταστεί ευκολότερη η παρουσίαση και η συζήτησή του στο πλαίσιο αυτό.

Η ακόλουθη περίπτωση είναι αντιπροσωπευτική όλων των κύριων πτυχών και των κρίσιμων ζητημάτων που εμπλέκονται σε ένα τυπικό πρόβλημα ανάλυσης ανοχών και είναι αρκετά απλή ώστε να επιτρέψει τον υπολογισμό των ακραίων τιμών του διακένου g για την ειδική περίπτωση όπου χρησιμοποιούνται μόνο ανοχές διαστάσεων. Η αυτόματη διαδικασία υπολογισμού βασίζεται στην αναζήτηση της χειρότερης περίπτωσης δηλαδή όταν οι συνδυασμοί διαστάσεων δημιουργούν τη μέγιστη και την ελάχιστη τιμή διακένου, δεδομένου ότι δεν θεωρούνται γεωμετρικές ανοχές, οι γεωμετρίες των επιφανειών του τεμαχίου θεωρούνται ότι έχουν τις ονομαστικές τιμές. Η μέγιστη τιμή του διακένου υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψη το μέγιστο ύψος και πλάτος του κουτιού, σε συνδυασμό με την ελάχιστη τιμή της ακτίνας του δίσκου:

$$g_{max} = 80.5 - 2 * 19.95 - \sqrt{(19.95 * 2)^2 - (50.20 - 19.95 - 19.95)^2} \\ = 2.05237mm$$



Σχ. 4.1: Διαστασιολογικές και γεωμετρικές ανοχές για την περίπτωση

Κατά τον ίδιο τρόπο, η ελάχιστη τιμή του διακένου είναι:

$$g_{min} = 79.5 - 2 * 20.05 - \sqrt{(20.05 * 2)^2 - (49.80 - 20.05 - 20.05)^2} \\ = 0.4909mm$$

Η μεταβλητότητα του διακένου είναι η διαφορά μεταξύ της μέγιστης και της ελάχιστης τιμής από τις ονομαστικές τιμές:

$$\Delta g_{dim1} = +(g_{max} - g_N) = 2.05237 - 1.2702 = 0.78217mm$$

$$\Delta g_{dim1} = +(g_N - g_{min}) = -(1.2702 - 0.4909) = -0.7793mm$$

Αν και λειτουργούμε σε ένα απλοποιημένο πρόβλημα (οι γεωμετρικές ανοχές έχουν αμεληθεί) το υπολογιστικό αυτό εργαλείο παρέχει χρήσιμη υποστήριξη για τη ποσοτική σύγκριση των πέντε μεθόδων, τουλάχιστον όταν αυτά εφαρμόζονται λαμβάνοντας υπόψη μόνο τις ανοχές διαστάσεων. Οι ακραίες αυτές τιμές θα χρησιμοποιηθούν ως τιμές αναφοράς αργότερα, και τότε τα αποτελέσματα των πέντε μεθόδων θα συζητηθούν.

Επιπλέον ο ανωτέρω τρόπος υπολογισμού αναδεικνύει ένα από τα θεμελιώδη θέματα που αναλύονται στο κεφάλαιο αυτό, δηλαδή πόσο δύσκολο είναι πραγματικά να περιληφθούν οι γεωμετρικές ανοχές σε κάθε μοντέλο ώστε να υπάρχει γεωμετρική μεταβλητότητα. Η περαιτέρω μελέτη για το πώς αντιμετωπίζεται η πρόκληση αυτή στην ανάλυση των αλυσίδων ανοχής είναι θεμελιώδους σημασίας κατά την ανάλυση της απόδοσης και των περιορισμών των ακόλουθων πέντε προσεγγίσεων: εδώ θα πρέπει να σημειωθεί πώς κάθε προσέγγιση παρέχει διαφορετικό βαθμό συμμετοχής των γεωμετρικών ανοχών, και κάθεμια απαιτεί διαφορετικές δυνατότητες μοντελοποίησης, απλουστεύσεις και λύσεις, προκειμένου οι γεωμετρικές ανοχές να συμπεριληφθούν στην ανάλυση της αλυσίδας των προβλημάτων ανοχής.

4.3 Μοντέλο Διανυσμάτων Βρόχου

Το μοντέλο διανυσμάτων βρόχου χρησιμοποιεί διανύσματα για να αναπαραστήσει τις σχετικές διαστάσεις μιας συναρμογής (Chase et al, 1995, 1996). Κάθε διάνυσμα αναπαριστά είτε μια διάσταση τεμαχίου είτε μια διάσταση συναρμογής. Τα διανύσματα είναι διατεταγμένα είτε σε αλυσίδες είτε σε βρόχους ώστε να προσδιορίζουν τις προκύπτουσες διαστάσεις συναρμολόγησης. Οι τρεις τύποι των διακυμάνσεων μοντελοποιούνται σε μοντέλο διανυσμάτων βρόχου: μεταβολές διαστάσεων, κινηματικές μεταβολές και γεωμετρικές μεταβολές.

Σε ένα μοντέλο διανυσμάτων βρόχου, το μέγεθος μιας γεωμετρικής διάστασης αντιστοιχίζεται στο μήκος (L_i) του αντίστοιχου διανύσματος. Οι μεταβολές των διαστάσεων που καθορίζονται από ανοχές διαστάσεων ενσωματώνονται ως μεταβολές ± στο μήκος του διανύσματος. Οι κινηματικές μεταβολές περιγράφουν τις σχετικές κινήσεις μεταξύ των συνεργαζόμενων τεμαχίων, δηλαδή, μικρές μεταβολές που συμβαίνουν κατά το χρόνο συναρμολόγησης σε απόκριση των διαστασιολογικών και γεωμετρικών μεταβολών των τεμαχίων. Στο μοντέλο διανυσμάτων βρόχου, οι κινηματικές διακυμάνσεις μοντελοποιούνται μέσω κινηματικών αρθρώσεων. Σε μοντέλα διανυσμάτων βρόχου υπάρχουν έξι τύποι διαθέσιμων αρθρώσεων για διδιάστατες συναρμογές και δώδεκα τύποι αρθρώσεων για συναρμογές 3D. Σε κάθε κινηματική άρθρωση, οι μεταβλητές των συναρμογών μετατρέπονται σε εύροι περιοχών για τις κινήσεις των αρθρώσεων (δηλαδή σε βαθμούς ελευθερίας). Σε κάθε κινηματική άρθρωση πρέπει να ορίζεται ένα τοπικό πλαίσιο αναφοράς.

Για την καλύτερη κατανόηση του μοντέλου διανυσμάτων βρόχου, τα βασικά βήματα για την εφαρμογή του σε μια ανάλυση ανοχών περιγράφονται παρακάτω (Gao et al 1998; Faerber 1999; Nigam και Turner 1995):

1. Δημιουργία του γραφήματος της συναρμογής. Το πρώτο βήμα είναι η δημιουργία ενός γραφήματος συναρμογής. Το γράφημα αυτό είναι ένα απλοποιημένο διάγραμμα της συναρμογής που αντιπροσωπεύει τα επιμέρους τμήματα, τις διαστάσεις τους, τις επιφάνειες επαφής και τις λειτουργικές απαιτήσεις τους, δηλαδή τις τελικές διαστάσεις συναρμολόγησης

που πρέπει να μετρηθούν, προκειμένου να επαληθευθεί ότι το προϊόν είναι ικανό να παρέχει την απαιτούμενη λειτουργικότητα. Ένα διάγραμμα συναρμολόγησης βοηθά στον προσδιορισμό του αριθμού των αλυσίδων των διανυσμάτων και των βρόχων που εμπλέκονται στη συναρμολόγηση.

2. Καθορισμός του συστήματος αναφοράς για κάθε τεμάχιο. Το επόμενο βήμα είναι ο καθορισμός του συστήματος αναφοράς για το κάθε τεμάχιο. Τα συστήματα αναφοράς απαιτούνται για τον εντοπισμό των αντίστοιχων χαρακτηριστικών για το κάθε τεμάχιο. Εάν για παράδειγμα υπάρχει μια κυκλική επιφάνεια επαφής το κέντρο της θεωρείται ως χαρακτηριστικό σύστημα αναφοράς.
3. Καθορισμός των κινηματικών αρθρώσεων και δημιουργία μονοπατιών αναφοράς. Κάθε σχέση συναρμογής μεταξύ των τεμαχίων μεταφράζεται σε μια κινηματική άρθρωση. Οι κινηματικές αρθρώσεις εντοπίζονται κυρίως στα σημεία επαφής μεταξύ των τεμαχίων. Τα μονοπάτια αναφοράς είναι γεωμετρικές διατάξεις που καθορίζουν την κατεύθυνση και τον προσανατολισμό των διανυσμάτων που σχηματίζουν τους βρόχους διανυσμάτων.
4. Δημιουργία βρόχου διανυσμάτων. Με τη χρήση γραφημάτων συναρμογής και μονοπατιών αναφοράς δημιουργούνται οι βρόχοι διανυσμάτων. Κάθε βρόχος διανυσμάτων δημιουργείται μέσω της σύνδεσης επιφανειών. Οι βρόχοι διανυσμάτων μπορεί να είναι ανοιχτοί ή ακόμα και κλειστοί. Ο ανοιχτός βρόχος τερματίζει με μια λειτουργική απαίτηση η οποία μπορεί να μετρηθεί στην τελική συναρμογή (μπορεί να είναι είτε το μέγεθος ενός διακένου είτε κάποια άλλη διάσταση που σχετίζεται με τις λειτουργικές απαιτήσεις της συναρμογής), ενώ ένας κλειστός βρόχος υποδεικνύει την ύπαρξη ενός η περισσοτέρων μεταβλητών στοιχείων στη συναρμογή.
5. Κατάρτιση των εξισώσεων στοίβας. Οι περιορισμοί της συναρμογής που καθορίζονται μέσω του μοντέλου διανυσμάτων βρόχου μπορούν να αναπαρασταθούν μαθηματικά σα μια αλληλουχία ομογενών πινάκων μετασχηματισμού:

$$R_1 * T_1 * \dots R_i * T_i * \dots . R_n * T_n * R_f = H \tag{4.1}$$

Όπου το R_1 είναι ο περιστροφικός πίνακας μετασχηματισμού ανάμεσα στο άξονα χ και στο πρώτο διάνυσμα και T_1 είναι ο πίνακας μετατόπισης για το πρώτο διάνυσμα, R_i και $T_ι$ είναι οι αντίστοιχοι πίνακες για το διάνυσμα στο κόμβο i και R_f είναι η τελική περιστροφή σε σχέση με τον άξονα χ. Ο H είναι ο προκύπτον πίνακας. Π.χ. για την ανωτέρω περίπτωση 2D οι πίνακες περιστροφής και μετατόπισης είναι οι ακόλουθοι:

$$R_i = \begin{bmatrix} cos\varphi_i & -sin\varphi_i & 0 \\ sin\varphi_i & cos\varphi_i & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \text{ και } T_i = \begin{bmatrix} 1 & 0 & L_i \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Όπου φ_i είναι η γωνία μεταξύ των διανυσμάτων στον κόμβο i και L_i είναι το μήκος του διανύσματος i. Εάν η συναρμογή περιγράφεται από ένα κλειστό βρόχο διανυσμάτων το H είναι ίσο με το g, το διάνυσμα που αντιπροσωπεύει τον τελικό μετασχηματισμό και που θα οδηγήσει στη διακρίβωση της λειτουργικής απαίτησης.

6. Ανάλυση ανοχών. Θεωρώντας πως μια συναρμογή αποτελείται από p τμήματα. Κάθε τμήμα του αντιπροσωπεύεται από ένα διάνυσμα x με τις σχετικές διαστάσεις του και από ένα διάνυσμα α που περιέχει επιπλέον διαστάσεις που πρέπει να προστεθούν ώστε να ληφθούν υπόψη οι γεωμετρικές ανοχές. Όταν τα τμήματα αυτά συναρμολογούνται μεταξύ τους, το προκύπτον προϊόν χαρακτηρίζεται από ένα διάνυσμα u των μεταβλητών της συναρμογής και

από ένα διάνυσμα g των μετρήσιμων λειτουργικών απαιτήσεων. Είναι δυνατόν να γραφτεί ότι ο αριθμός των κλειστών βρόχων είναι L = J - P + 1, όπου J είναι ο αριθμός των συναρμογών μεταξύ των τμημάτων και P είναι ο αριθμός των τμημάτων. Για κάθε κλειστό βρόχο ισχύει:

$$\mathbf{H}(x,u,\alpha) = 0 \tag{4.2}$$

Ενώ για τον ανοιχτό βρόχο έχουμε :

$$\mathbf{g} = \mathbf{K}(x,u,\alpha) \tag{4.3}$$

Η εξίσωση 4.5 επιτρέπει τον υπολογισμό του g αφού λυθεί το σύστημα των εξισώσεων στην εξίσωση 4.4. Οι εξισώσεις στη σχέση 4.4 δεν είναι συνήθως γραμμικές αλλά μπορούν να λυθούν με διάφορους τρόπους, για παράδειγμα, μέσω της μεθόδου γραμμικοποίησης αυτών:

$$\mathbf{dH} \cong \mathbf{A}\cdot\mathbf{dx} + \mathbf{B}\cdot\mathbf{du} + \mathbf{F}\cdot\mathbf{d}\alpha = 0 \tag{4.4}$$

$$\mathbf{dH} \cong -\mathbf{B}^{-1}\cdot\mathbf{A}\cdot\mathbf{dx} - \mathbf{B}^{-1}\cdot\mathbf{F}\cdot\mathbf{d}\alpha \tag{4.5}$$

$$\mathbf{dg} \cong \mathbf{C}\cdot\mathbf{dx} + \mathbf{D}\cdot\mathbf{du} + \mathbf{G}\cdot\mathbf{d}\alpha = 0 \tag{4.6}$$

με $A_{ij} = \frac{\partial H_i}{\partial x_j}$, $B_{ij} = \frac{\partial H_i}{\partial u_j}$, $F_{ij} = \frac{\partial H_i}{\partial a_j}$, $C_{ij} = \frac{\partial K_i}{\partial x_j}$, $D_{ij} = \frac{\partial K_i}{\partial x_j}$, $D_{ij} = \frac{\partial K_i}{\partial u_j}$ και $G_{ij} = \frac{\partial K_i}{\partial a_j}$

Από τις εξισώσεις 4.7-4.9 προκύπτουν τα ακόλουθα για το διάκενο dg:

$$\mathbf{dg} \cong [\mathbf{C}-\mathbf{D}*\mathbf{B}^{-1}*\mathbf{A}]\cdot\mathbf{dx} + [\mathbf{G}-\mathbf{D}*\mathbf{B}^{-1}*\mathbf{F}]\cdot\mathbf{d}\alpha = S_x*dx + S_a*da \tag{4.7}$$

Όπου $S_x = [\mathbf{C}-\mathbf{D}*\mathbf{B}^{-1}*\mathbf{A}]$ και $S_a = [\mathbf{G}-\mathbf{D}*\mathbf{B}^{-1}*\mathbf{F}]$ είναι οι πίνακες ευαισθησίας. Όταν είναι γνωστές οι μήτρες ευαισθησίας, είναι δυνατόν να υπολογιστεί η λύση στην χειρότερη περίπτωση ως:

$$\Delta g_i = \sum_k \left|S_{x_{tk}} * t_{X_\kappa}\right| + \sum_l \left|S_{a_{tl}} * t_{a_l}\right| \tag{4.8}$$

ενώ στατιστικά η λύση μπορεί να ληφθεί ως η ρίζα του αθροίσματος των τετραγώνων, ως εξής:

$$\Delta g_i = [\sum_k (S_{x_{tk}} * t_{X_\kappa})^2 + \sum_l (S_{a_{tl}} * t_{a_l})]^{1/2} \tag{4.9}$$

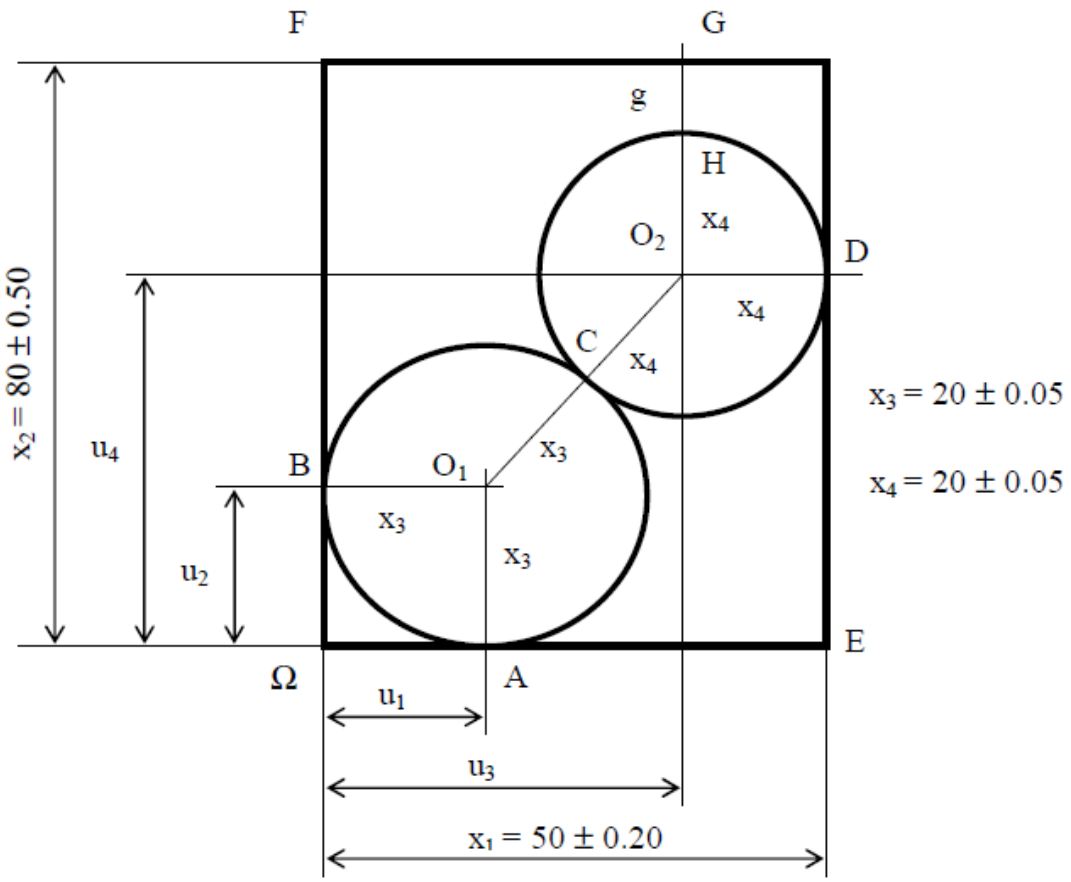
όπου k και I είναι ο αριθμός των διαστάσεων χ και των γεωμετρικών ανοχών α που επηρεάζουν τη μεταβλητή gi, $S_{x_{tk}}$ είναι η μήτρα των συντελεστών των μεταβλητών tk μέσα στη συνάρτηση στοίβας της Εξίσωσης 4.10. $S_{a_{tl}}$ είναι η μήτρα των συντελεστών των μεταβλητών tl στην εξίσωση 4.10, και t_{X_κ} και t_{a_l} είναι τα διανύσματα των διαστάσεων ή των γεωμετρικών ανοχών των x_k και a_l μεταβλητών, αντίστοιχα.

Η άμεση μέθοδος γραμμικοποίησης είναι μια πολύ απλή και γρήγορη μέθοδος, αλλά οι λύσεις της είναι προσεγγιστικές. Όταν μία προσεγγιστική λύση δεν είναι αποδεκτή, είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν εναλλακτικές προσεγγίσεις, όπως αριθμητική προσομοίωση μέσω της μεθόδου Μόντε Κάρλο (Gao et al 1998, Boyer και Stewart 1991).

4.3.1 Αποτελέσματα Μεθόδου με Χρήση Ανοχών Διαστάσεων

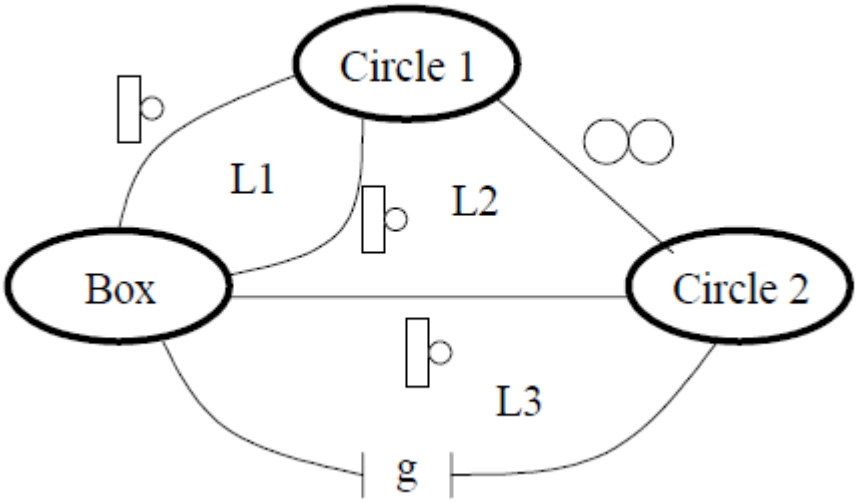
Στο Σχήμα 4.2, ας είναι x_1 και x_2 οι διαστάσεις του κιβωτίου, και x_3και x_4 οι διάμετροι των δύο δίσκων: u_1, u_2, u_3, u_4 είναι οι διαστάσεις της διάταξης (εξαρτημένες) και g είναι το πλάτος του διακένου μεταξύ της άνω πλευράς του κουτιού και του δεύτερου δίσκου. Η διάσταση g είναι η λειτουργική απαίτηση. Συνεπώς δημιουργούμε το διάγραμμα συναρμογής όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.3. Δείχνει δύο επαφές του κυλίνδρου1 ανάμεσα σε αυτόν και στο κουτί στα σημεία A και B, αντίστοιχα. Ένα σημείο επαφής μεταξύ των δύο κυλίνδρων 1 και 2 στο σημείο C και μία επαφή μεταξύ του δίσκου 2 και του κουτιού στο σημείο D καθώς και η μέτρηση του διακένου (g).

Το επίπεδο A είναι το ονομαστικό επίπεδο. Το σχήμα 4.4 δείχνει το δημιουργούμενο μονοπάτι που ενώνει τα σημεία επαφής του ενός τμήματος με το άλλο. Υπάρχουν L = J - P + 1 = 4-3 + 1 = 2 κλειστοί βρόχοι και ένας ανοιχτός βρόχος O πρώτος κλειστός βρόχος ενώνει το κουτί με το δίσκο 1 διερχόμενος από τα σημεία επαφής A και B.

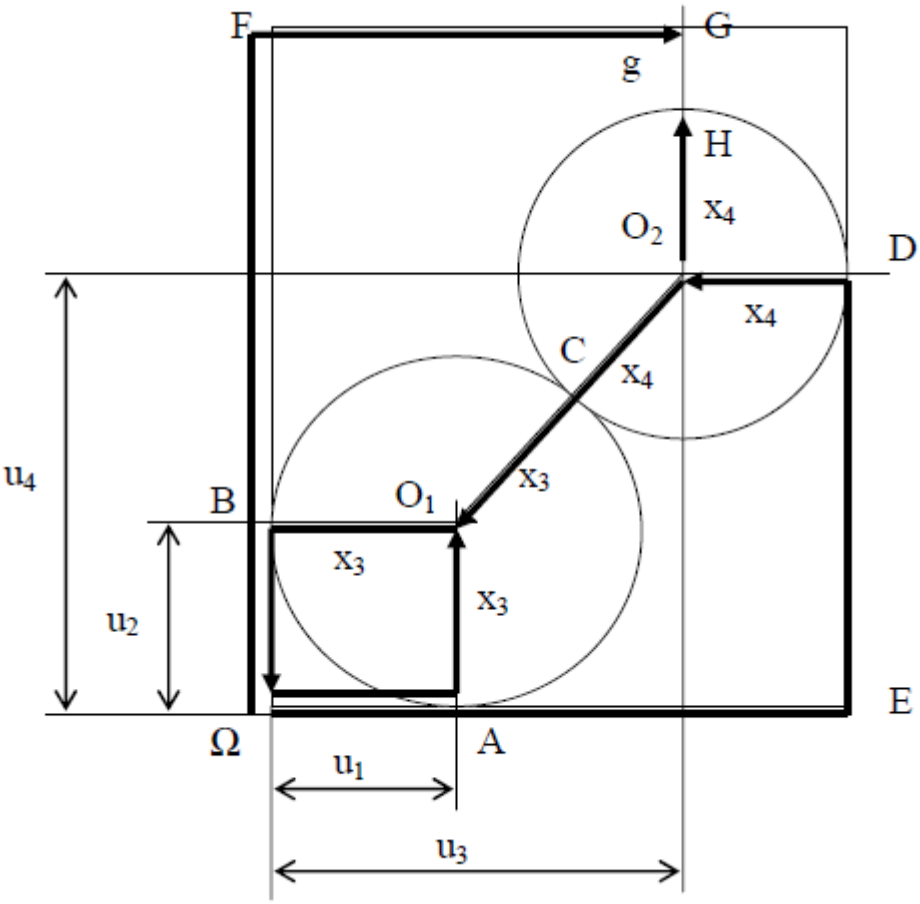


Σχ. 4.2: Μεταβλητές διάταξης και ανοχές μοντέλου διανυσμάτων βρόχου με διαστασιολογικές ανοχές

Ο δεύτερος κλειστός βρόχος ενώνει το δίσκο 1 και 2 μέσω των σημείων επαφής D και C. Ο ανοικτόw βρόχο ορίζει το πλάτος της σχισμής g. Όλοι οι βρόχοι ορίζονται αριστερόστροφα. Οι πίνακες R και T είναι δισδιάστατοι. Τα στοιχεία τους φαίνονται στο Πίνακας 2.1.



Σχ. 4.3: Διάγραμμα γράφου



Σχ. 4.4: Μονοπάτια του μοντέλου διαγράμματος βρόχου

	Loop 1		Loop 2		Loop 3	
i	ϕ_i of R_i	L_i of T_i	ϕ_i of R_i	L_i of T_i	ϕ_i of R_i	L_i of T_i
1	0	u_1	0	x_1	0	x_1
2	90°	x_3	90°	u_4	90°	u_4
3	ϕ_{13}	x_3	90°	x_4	90°	x_4
4	90°	u_2	ϕ_{24}	x_4	ϕ_{34}	x_4
5	90°		0°	x_3	0°	g
6			ϕ_{26}	x_3	90°	u_3
7			90°	u_2	90°	x_2
8			90°		90°	

Πίν. 4.1: Στοιχεία των R και T μητρών, όταν εξετάζουμε τις ανοχές διαστάσεων

Για το πρώτο βρόχο, η εξίσωση 4.4 γίνεται:

$$\mathbf{R}_1 \cdot \mathbf{T}_1 \cdot \mathbf{R}_2 \cdot \mathbf{T}_2 \cdot \mathbf{R}_3 \cdot \mathbf{T}_3 \cdot \mathbf{R}_4 \cdot \mathbf{T}_4 \cdot \mathbf{R}_f = \mathbf{I},$$

Και έτσι προκύπτει το σύστημα:

$$x_1 - x_4 + x_4 \cos(180 + \varphi_{24}) + x_3 \cos(180 + \varphi_{24}) + x_3 \cos(180 + \varphi_{24} + \varphi_{26}) = 0,$$
$$\varphi_{24} + \varphi_{26} = 0 \qquad (4.10)$$

Ενώ για τον τρίτο κόμβο προκύπτει η εξίσωση :

$$\mathbf{R}_1 \cdot \mathbf{T}_1 \cdot \mathbf{R}_2 \cdot \mathbf{T}_2 \cdot \mathbf{R}_3 \cdot \mathbf{T}_3 \cdot \mathbf{R}_4 \cdot \mathbf{T}_4 \cdot \mathbf{R}_5 \cdot \mathbf{T}_5 \cdot \mathbf{R}_6 \cdot \mathbf{T}_6 \cdot \mathbf{R}_7 \cdot \mathbf{T}_7 \cdot \mathbf{R}_f = \mathbf{G} \qquad (4.11)$$

Η οποία δίνει :

$$g = x_2 - u_4 - x_4 \qquad (4.12)$$

Από την ανάλυση ευαισθησίας προκύπτει η ακόλουθη σχέση:

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{dx} + \mathbf{B} \cdot \mathbf{du} = 0 \qquad (4.13)$$

Το οποίο δίνει :

$$\mathbf{du} = -\mathbf{B}^{-1} \cdot \mathbf{A} \cdot \mathbf{dx} = \mathbf{S}u \cdot \mathbf{dx} \qquad (4.14)$$

όπου:

$$\mathbf{du} = \{du_1, du_2, du_4, d\phi_{13}, d\phi_{24}, d\phi_{26}\}^T \qquad (4.15)$$

$$\mathbf{dx} = \{dx_1, dx_2, dx_3, dx_4\} = \{0.20, 0.50, 0.05, 0.05\}^T \qquad (4.16)$$

$$Su = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -0.25820 & 2.2910 & 1.2910 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0.02580 & 0.0323 & 0.0323 \\ 0.0258 & 0 & -0.0323 & -0.0323 \end{bmatrix}$$

Το διάκενο g εξαρτάται από τις ακόλουθες μεταβλητές x μέσω των συντελεστών ευαισθησίας:

$$\mathrm{d}g = dx_2 - du_4 - dx_4 = 0.2582 * dx_1 + dx_2 - 2.2910 * dx_3 - 2.2910 * dx_4 \quad (4.17)$$

Είναι δυνατόν να υπολογιστεί η λύση στη χειρότερη περίπτωση:

$$\Delta g_{WC} = \pm \sum |S_i| * \Delta x_i = \pm 0.7807 = \pm 0.78074\ mm \quad (4.18)$$

Η λύση που λαμβάνεται είναι μειωμένη από την τιμή που λαμβάνεται με τη βοήθεια της αρχικής μεθόδου επίλυσης κατά περίπου 0.6% [(1,56148-1,57147) /1.57147]. Είναι δυνατόν να υπολογιστεί η λύση στατιστικά μέσω της μέσης τιμής :

$$\Delta g_{stat} = \pm [\sum_k (S_{x_{tk}} * t_{X_k})]^{\frac{1}{2}} = \pm 0.52\ mm \quad (4.19)$$

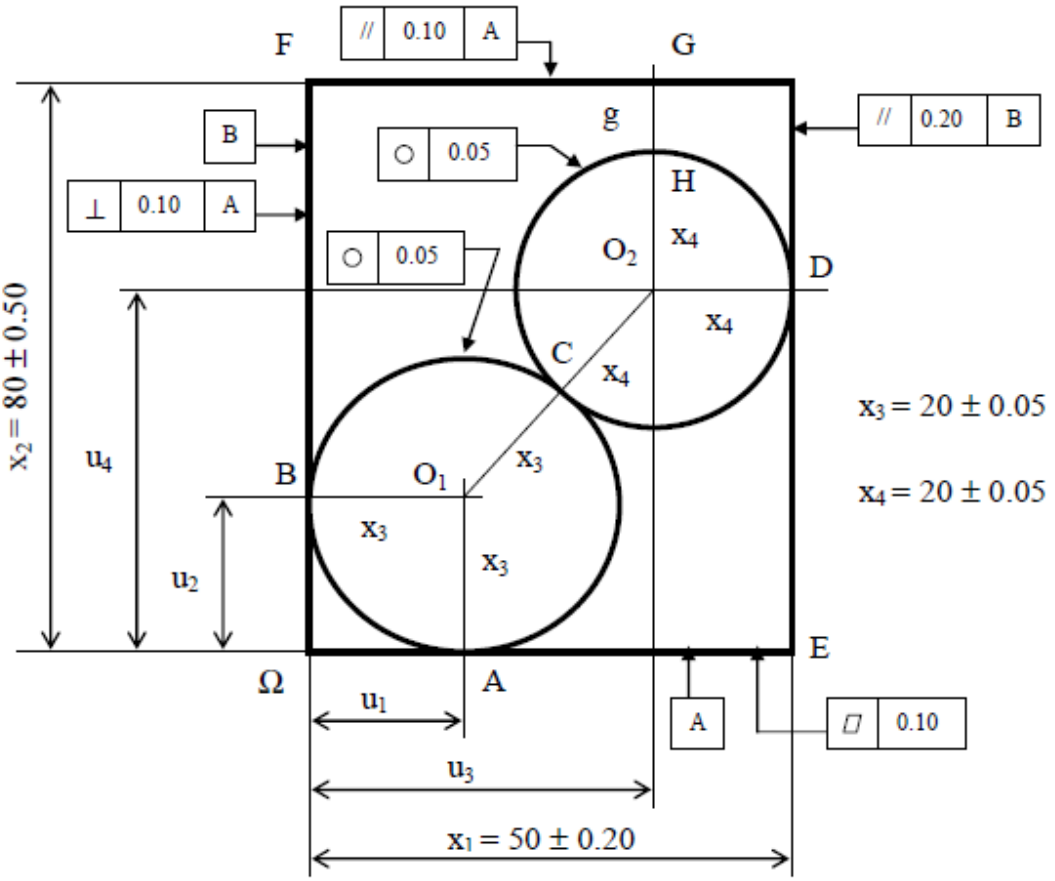
4.3.2 Αποτελέσματα Μεθόδου με Χρήση Γεωμετρικών Ανοχών

Στο Σχήμα 4.5, τα X_1 και X_2 είναι οι διαστάσεις του κιβωτίου, και X_3 και X_4 οι διάμετροι των δύο δίσκων. U_1, U_2, U_3, U_4 και είναι οι διαστάσεις της διάταξης (εξαρτημένες) και g είναι το πλάτος του διακένου μεταξύ της άνω πλευράς του κουτιού και του δεύτερου δίσκου. Οι DRFs και τα μονοπάτια αναφοράς είναι τα ίδια όπως και στην προηγούμενη περίπτωση (βλέπε Ενότητα 2.3.1). Τα διανύσματα βρόχων είναι τα ίδια όπως και στην προηγούμενη περίπτωση, αλλά λαμβάνουμε υπόψη επίσης τις γεωμετρικές ανοχές. Για να συμπεριλάβουμε τις γεωμετρικές ανοχές, πρέπει να προσθέσουμε στο χ διάνυσμα τις ακόλουθες μεταβλητές (σημειώστε ότι τα σημεία ζευγαρώματος A και B ονομάζονται από τα σημεία αναφοράς A και B, πάνω στα οποία βρίσκονται):

- Η ανοχή επιπεδότητας εφαρμόζεται στην κάτω επιφάνεια του κουτιού (επίπεδο A στο σχέδιο) και μπορεί να παρασταθεί ως μετατόπιση του σημείου A στην κατεύθυνση κάθετα προς το επίπεδο A, δηλαδή κάθετα προς τον άξονα χ. Αυτή η μετατόπιση περιγράφεται από τη μεταβλητή $\alpha_1 = TA_1 = 0 \pm 0.10 / 2 = 0 \pm 0{,}05$ mm.
- Η καθετότητα εφαρμόζεται στην κατακόρυφη αριστερή επιφάνεια του κουτιού (επίπεδο B) και μπορεί να παρασταθεί ως μετατόπιση του σημείου B κατά την κατεύθυνση κάθετη στο επίπεδο B (άξονας y). Η μετατόπιση αυτή περιγράφεται από τη μεταβλητή $\alpha_2 = TB_2 = 0 \pm 0.10 / 2 = 0 \pm 0{,}05$ χιλιοστά.

- Ο παραλληλισμός εφαρμόζεται στην δεξιά πλευρά του πλαισίου (σε σχέση με το επίπεδο B) και μπορεί να παρασταθεί ως μετατόπιση του σημείου A, και πάλι σε μια κατεύθυνση κάθετη στο B Μπορεί να περιγραφεί από τη μεταβλητή $\alpha_3 = T_{D3} = 0 \pm 0.20 / 2 = 0 \pm 0.10$ mm.
- Η κυκλικότητα που εφαρμόζεται στο δίσκο 1 μπορεί να θεωρηθεί στα σημεία C,D, και H κατά μήκος της ακτίνας, και μπορεί να περιγραφεί με τις μεταβλητές $\alpha_4 = T_{A4} = 0 \pm 0.05 / 2 = 0 \pm 0{,}025$mm, $\alpha_5 = T_{B4} = 0 \pm 0.05 / 2 = 0 \pm 0{,}025$ mm, και $\alpha_6 = T_{C4} = 0 \pm 0.05 / 2 = 0 \pm 0{,}025$ mm.
- Η κυκλικότητα που εφαρμόζεται στο δίσκο 2 μπορεί να εφαρμοστεί στα σημεία C, D, και H κατά μήκος της ακτίνας, και μπορεί να περιγραφεί με τις μεταβλητές $\alpha_7 = T_{C5} = 0 \pm 0.05 / 2 = 0 \pm 0{,}025$ mm, $\alpha_8 = T_{D5} = 0 \pm 0.05 / 2 = 0 \pm 0{,}025$ mm, και $\alpha_9 = T_{H5} = 0 \pm 0.05 / 2 = 0 \pm 0{,}025$ mm.
- Ο παραλληλισμός εφαρμόζεται στην άνω πλευρά του κουτιού μπορεί να αναπαρασταθεί ως μια κάθετη μετατόπιση του σημείου Z, και περιγράφεται από τη μεταβλητή $\alpha_{10} = T_{G6} = 0 \pm 0.10 / 2 = 0 \pm 0{,}05$ mm.

Οι πίνακες R και T είναι δισδιάστατοι και τα στοιχεία τους παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.2.



Σχ. 4.5: Μεταβλητές διάταξης και ανοχές μοντέλου διανυσμάτων βρόχου με διαστασιολογικές ανοχές

	Loop 1		Loop 2		Loop 3	
i	ϕ_i of R_i	L_i of T_i	ϕ_i of R_i	L_i of T_i	ϕ_i of R_i	L_i of T_i
1	0	u_1	0	x_1	0°	x_1
2	90°	$\alpha_1 = 0 \pm 0.05$	90°	u_4	90°	u_4
3	0°	$\alpha_4 = 0 \pm 0.025$	90°	$\alpha_3 = 0 \pm 0.1$	90°	$\alpha_3 = 0 \pm 0.1$
4	0°	x_3	0°	$\alpha_8 = 0 \pm 0.025$	0°	$\alpha_8 = 0 \pm 0.025$
5	ϕ_{13}	x_3	0°	x_4	0°	x_4
6	0°	$\alpha_5 = 0 \pm 0.025$	ϕ_{24}	x_4	ϕ_{34}	x_4
7	0°	$\alpha_2 = 0 \pm 0.05$	0°	$\alpha_7 = 0 \pm 0.025$	0°	$\alpha_9 = 0 \pm 0.025$
8	90°	u_2	0°	$\alpha_6 = 0 \pm 0.025$	0°	g
9	90°		0°	x_3	0°	$\alpha_{10} = 0 \pm 0.05$
10			ϕ_{26}	x_3		
11			0°	$\alpha_5 = 0 \pm 0.025$		
12			0°	$\alpha_2 = 0 \pm 0.05$		
13			90°	u_2		
14			90°			

Πίν. 4.2: Στοιχεία των R και T μητρών, όταν εξετάζουμε τις ανοχές διαστάσεων

Μόλις το μοντέλο βρόχοι έχει κατασκευαστεί, οι σχετικές εξισώσεις μπορούν να οριστούν και να επιλυθούν. Για το πρώτο βρόχο, η εξίσωση 2.4 γίνεται:

$$\mathbf{R_1 \cdot T_1 \cdot R_2 \cdot T_2 \cdot R_3 \cdot T_3 \cdot R_4 \cdot T_4 \cdot R_5 \cdot T_5 \cdot R_6 \cdot T_6 \cdot R_7 \cdot T_7 \cdot R_8 \cdot T_8 \cdot R_f = I} \quad (4.20)$$

Απ'όπου προκύπτει το σύστημα:

$$u_1 + (x_3 + a_2 + a_5)\cos(90 + \varphi_{13}) + u_2 \cos(180 + \varphi_{13}) = 0$$
$$x_3 + a_1 + a_4 + (x_3 + a_2 + a_5)\, cos(90 + \varphi_{13}) + u_2 \sin(180 + \varphi_{13}) = 0$$
$$\varphi_{24} + \varphi_{26} = 0 \quad (4.21)$$

Για το δεύτερο βρόχο, η εξίσωση 2.4 γίνεται:

$$\mathbf{R_1 \cdot T_1 \cdot R_2 \cdot T_2 \cdot R_3 \cdot T_3 \cdot R_4 \cdot T_4 \cdot R_5 \cdot T_5 \cdot R_6 \cdot T_6 \ldots\ldots \cdot R_{13} \cdot T_{13} \cdot R_f = I} \quad (4.22)$$

Απ'όπου προκύπτει το σύστημα:

$$x_1 - (x_4 + a_3 + a_8) + (x_3 + x_4 + a_6 + a_7)\cos(180 + \varphi_{24}) + (x_3 + a_2 + a_5)\cos(180 + \varphi_{24} + \varphi_{26}) = 0,$$
$$u_4 + (x_3 + x_4 + a_6 + a_7)\sin(180 + \varphi_{24}) + (x_3 + a_2 + a_5)\sin(180 + \varphi_{24} + \varphi_{26}) - u_2 = 0$$
$$\varphi_{24} + \varphi_{26} = 0 \quad (4.23)$$

Για το τρίτο βρόχο, η εξίσωση 4.4 γίνεται:

$$\mathbf{R_1 \cdot T_1 \cdot R_2 \cdot T_2 \cdot R_3 \cdot T_3 \cdot R_4 \cdot T_4 \cdot R_5 \cdot T_5 \cdot R_6 \cdot T_6 \ldots\ldots \cdot R_{11} \cdot T_{11} \cdot R_f = G} \quad (4.24)$$

Απ'όπου έχουμε:

$$g = x_2 + a_{10} - u_4 - x_4 - a_9 \tag{4.25}$$

Σχετικά με την ανάλυση ευαισθησίας έχουμε τις ακόλουθες εξισώσεις :

$$\mathbf{du} = -\mathbf{B}^{-1} \cdot \mathbf{A} \cdot \mathbf{dx} - \mathbf{B}^{-1} \cdot \mathbf{C} \cdot \mathbf{d\alpha} = \mathbf{S}^{ud} \cdot \mathbf{dx} + \mathbf{S}^{u\alpha} \cdot \mathbf{d\alpha} \tag{4.26}$$

όπου :

$$\mathbf{du} = \{du_1, du_2, du_4, d\phi_{13}, d\phi_{24}, d\phi_{26}\}^T \tag{4.27}$$

$$\mathbf{dx} = \{dx_1, dx_2, dx_3, dx_4\}^T = \{0.20, 0.50, 0.05, 0.05\}^T \tag{4.28}$$

$$\mathbf{da} = \{da_1, da_2, \ldots, da_{10}\}^T = \{0.05, 0.05, 0.10, 0.025, 0.025, 0.025, 0.025, 0.025, 0.025, 0.05\}^T \tag{4.29}$$

$$S^{ud} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -0.25820 & 2.2910 & 1.2910 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0.02580 & 0.0323 & 0.0323 \\ 0.0258 & 0 & -0.0323 & -0.0323 \end{bmatrix} \tag{4.30}$$

$$S^{ua} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0.2582 & 0 & 0.0258 & -0.0258 \\ 0 & 0 & 0.2582 & 0 & 0.0258 & -0.0258 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0.2582 & 0 & 0.0258 & -0.0258 \\ 0 & 0 & 1.0328 & 0 & 0.0064 & -0.0064 \\ 0 & 0 & 1.0328 & 0 & 0.0064 & -0.0064 \\ 0 & 0 & 0.2582 & 0 & 0.0258 & -0.0258 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{4.31}$$

Η λύση δείχνει ότι η μεταβλητότητα του πλάτους του διακένου g μπορεί να αντιπροσωπεύεται από την ακόλουθη συνάρτηση του φορέα x:

$$dg = dx_2 + da_{10} - dx_4 - du_4 - da_9 = 0.2582 \cdot dx_1 + dx_2 - 2.2910 \cdot dx_3 - 2.2910 \cdot dx_4 - da_1 - 0.2582 \cdot da_2 - 0.2582 \cdot da_3 - da_4 - 0.2582 \cdot da_5 - 1.0328 \cdot da_6 - 1.0328 \cdot da_7 - 0.2582 \cdot da_8 - da_9 + da_{10} \tag{4.32}$$

Είναι δυνατόν να υπολογιστεί η λύση στη χειρότερης περίπτωση:

$$\Delta g_{WC} = \pm(\sum|S_i| \cdot \Delta x_i + \sum|S_j| \cdot \Delta a_j) = \pm 1.034 \text{ mm} \tag{4.33}$$

Είναι επίσης δυνατόν να υπολογίσουμε τη λύση με τη στατιστική προσέγγιση (ρίζα του αθροίσματος των τετραγώνων):

$$\Delta g_i = [\sum_k (S_{x_{tk}} * t_{X_\kappa})^2 + \sum_l (S_{a_{tl}} * t_{a_l})]^{1/2} = \pm 0.5361 \text{ mm} \tag{4.34}$$

4.4 Επιπλέον μοντέλα ανάλυσης ανοχών

4.4.1 Μεταβολικό μοντέλο (Variational model)

Μια μαθηματική θεμελίωση του μοντέλου αυτού προτάθηκε για πρώτη φορά από τον Boyer και Stewart (1991) και στη συνέχεια από τους Gupta και Turner (1993). Αργότερα προτάθηκαν επίσης αρκετές πρόσθετες παραλλαγές, και σήμερα υπάρχουν λογισμικά Computer Aided Tolerancing (CAT) που βασίζονται στην προσέγγιση αυτή, όπως το Em-TolMate της UGS® το 3-DCS και το VisVSA. Η βασική ιδέα του μεταβολικού μοντέλου είναι να αντιπροσωπεύει τη μεταβλητότητα της διάταξης, λόγω των ανοχών και συνθηκών συναρμολόγησης, μέσα από ένα παραμετρικό μαθηματικό μοντέλο.

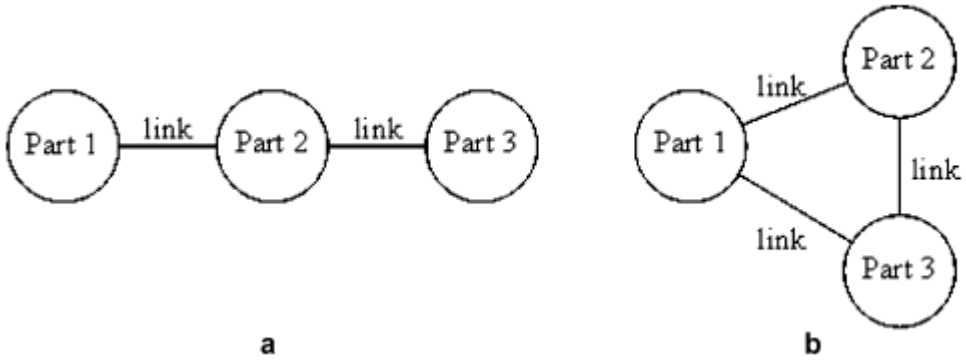
Για να κατασκευαστεί μια μηχανολογική διάταξη, ο σχεδιαστής πρέπει να καθορίσει το ονομαστικό σχήμα και τις διαστάσεις του κάθε στοιχείου της συναρμογής (αυτή η πληροφορία συνήθως προέρχονται από Αρχεία 3D-CAD). Στη συνέχεια, ο σχεδιαστής προσδιορίζει τα σχετικά χαρακτηριστικά του κάθε συστατικού και εκχωρεί διαστάσεις και γεωμετρικές ανοχές σε αυτά. Κάθε χαρακτηριστικό έχει τις τοπικές του DRF, ενώ κάθε επιμέρους τεμάχιο αλλά και ολόκληρη η διάταξη έχουν τα δικά τους συνολικά DRF. Στις ονομαστικές συνθήκες, ορίζεται μια ομογενής μήτρα μετασχηματισμού (που ονομάζεται TN) και προσδιορίζει τη θέση του DRF του χαρακτηριστικού σε σχέση με το DRF του τεμαχίου. Στις πραγματικές συνθήκες (δηλαδή στο κατασκευασμένο τεμάχιο), το χαρακτηριστικό θα πρέπει να χαρακτηρίζεται από μια στροφική και μια παράλληλη μετατόπιση σε σχέση με την ονομαστική του θέση. Αυτή η μετατόπιση μοντελοποιείται για να περιγράψει τα πλήρη αποτελέσματα των διαστασιολογικών και γεωμετρικών μεταβολών που αφορούν το τεμάχιο με τη βοήθεια ενός άλλου πίνακα: τη διαφορική ομογενή μήτρα μετασχηματισμού (που ονομάζεται DT).

Το μεταβολικό μοντέλο δεν εξετάζει τις ανοχές μορφή, όπως κάνει το μοντέλο διανυσμάτων βρόχου και αυτό σημαίνει ότι το χαρακτηριστικό σχήμα θεωρείται αμετάβλητο, δηλαδή οι μεταβολές στο σχήμα του χαρακτηριστικού θεωρούνται αμετάβλητες. Το μοντέλο θεωρείται παραμετρικό επειδή διαφορετικοί τύποι και ποσότητες των μεταβολών μπορούν να μοντελοποιηθούν με την απλή αλλαγή των παραμέτρων του πίνακα DT. Μόλις οι μεταβλητότητες των επιμέρους τμημάτων μοντελοποιηθούν θα πρέπει να συναρμολογούνται μεταξύ τους. Ένα άλλο σύνολο διαφορικών ομογενών μητρών μετασχηματισμού εισάγεται για να ελέγξει τις περιστροφικές αποκλίσεις εισάγονται από κάθε συναρμογή. Αυτές οι μήτρες ονομάζονται DA (Differential Assembly). Αυτές οι μήτρες είναι δύσκολο να προσδιορισθούν, διότι εξαρτώνται τόσο από τις ανοχές που επιβάλλονται επί των τμημάτων επαφής όσο και από τις συνθήκες συναρμολόγησης.
Όταν όλες οι μήτρες μετασχηματισμού έχουν οριστεί, είναι δυνατόν να εκφράσουμε όλα τα χαρακτηριστικά στην ίδια γενική DRF της διάταξης. Τέλος, οι λειτουργικές απαιτήσεις μπορούν να μοντελοποιηθεί με τη μορφή των λειτουργιών, ως εξής:

$$FR = f\,(\,p_1\,,\,p_2\,,...,\,p_n\,) \tag{4.35}$$

όπου FR είναι η λειτουργική απαίτηση της συναρμογής, p_1, ..., p_n είναι οι παράμετροι του μοντέλου, και f (ρ) είναι η συνάρτηση στοίβας-up (συνήθως μη γραμμική) που ελήφθη από τη μήτρα πολλαπλασιασμών που περιγράφονται παραπάνω. Το μοντέλο αυτό μπορεί να εφαρμοστεί

σε διάταξη που περιλαμβάνει αρθρώσεις που δημιουργούν μια γραμμική δομή μεταξύ των τμημάτων (γραμμική συνάρτηση στοίβας-up, βλέπε **Σχ. 4.6a**) και αρθρώσεων που δημιουργούν μια σύνθετη δομή μεταξύ των τμημάτων (δίκτυο συναρτήσεων στοίβας, βλέπε **Σχ. 4.6b**), όπως με τη μέθοδο διανυσμάτων βρόχου. Μόλις οι συναρτήσεις στοίβας μοντελοποιηθούν, υπάρχουν δύο προσεγγίσεις για την επίλυσή τους: η προσέγγιση της χειρότερης περίπτωσης και η στατιστική προσέγγιση. Η χειρότερη περίπτωση συνίσταται στον εντοπισμό των ακραίων διαμορφώσεων της διάταξης στο πλαίσιο ενός δεδομένου συνόλου ανοχών. Στη μεταβολική προσέγγιση, το πρόβλημα γενικά ορίζεται ως πρόβλημα βελτιστοποίησης (μεγιστοποίηση και / ή ελαχιστοποίηση), σύμφωνα με τους περιορισμούς που ορίζονται από τις ίδιες τις ανοχές. Η στατιστική προσέγγιση γενικά γίνεται με την ανάθεση προκαθορισμένων συναρτήσεων πυκνότητας πιθανότητας, π.χ., Gaussian.



Σχ. 4.6a: Γραμμική συνάρτηση στοίβας και **b**. Δίκτυο λειτουργίας στοίβας

Για να επεξηγήσουμε καλύτερα το μεταβολικό μοντέλο, τα βασικά βήματα που ακολουθούνται είναι τα ακόλουθα:

1. Δημιουργία του γραφήματος συναρμολόγησης. Το πρώτο βήμα είναι να δημιουργηθεί ένα γράφημα της συναρμογής. Το γράφημα είναι ένα απλοποιημένο διάγραμμα της διάταξης που αντιπροσωπεύει τα τμήματα, τα στοιχεία, τις συνθήκες επαφής και τις λειτουργικές απαιτήσεις.
2. Καθορισμός του DRF για κάθε χαρακτηριστικό, για κάθε τμήμα της διάταξης. Το επόμενο βήμα είναι να προσδιορίσουμε την τοπική DRF για κάθε χαρακτηριστικό και τη συνολική DRF για κάθε τμήμα της διάταξης (συνήθως το DRF του συγκροτήματος συμπίπτει με την DRF του πρώτου μέρους). Οι DRFs τοποθετούνται ανάλογα με τον τύπο της επιφάνειας. Από τις DRFs, ορίζονται οι τοπικές παράμετροι και οι διαφορικοί ομογενής μετασχηματισμοί μητρών DT.
3. Μετασχηματισμός των χαρακτηριστικών. Μόλις γίνουν γνωστές οι μήτρες μετασχηματισμού, κάθε χαρακτηριστικό του τμήματος μετασχηματίζεται στο συνολικό DRF του τεμαχίου.
4. Δημιουργία της διάταξης. Με τη χρήση του γραφήματος συναρμολόγησης και των μετασχηματισμένων χαρακτηριστικών, εξάγονται οι συνθήκες συναρμολόγησης, δηλαδή υπολογίζονται οι παράμετροι συναρμολόγησης που περιλαμβάνονται στη μήτρα DA.
5. Εξαγωγή των εξισώσεων των λειτουργικών απαιτήσεων. Μόλις καθορισθούν οι παράμετροι συναρμολόγησης, όλα τα χαρακτηριστικά της διάταξης μπορούν να εκφραστούν στο συνολικό DRF του μηχανολογικού τεμαχίου. Στο σημείο αυτό, οι λειτουργικές απαιτήσεις καθορίζονται σε όρους λειτουργίας που μπορούν να επιλυθούν με την βοήθεια των προηγουμένως περιγραφέντων χειρότερων περιπτώσεων ή και στατιστικών προσεγγίσεων.

4.4.2 Μοντέλο μήτρας (Matrix Model)

Αντί της εξαγωγής εξισώσεων που μοντελοποιούν μια συγκεκριμένη μετατόπιση ενός επιμέρους τμήματος της συναρμογής σα συνάρτηση ενός δεδομένου συνόλου γεωμετρικών διαστάσεων (παράμετροι) λαμβάνοντας συγκεκριμένες τιμές εντός των ορίων που ορίζονται από τις ανοχές (όπως στην Μεταβολική προσέγγιση), το μοντέλο μήτρας αποσκοπεί στην εξαγωγή μιας αναλυτικής μαθηματική αναπαράσταση του ορίου ολόκληρης της περιοχής του χώρου που περικλείει όλες τις πιθανές μετατοπίσεις οφειλόμενες σε μία ή περισσότερες πηγές μεταβλητότητας. Για να γίνει αυτό οι ομογενείς μήτρες μετασχηματισμού θεωρούνται πάλι ως το θεμέλιο της μαθηματικής αναπαράστασης. Ένας πίνακας μετατόπισης DT χρησιμοποιείται για να περιγράψει οποιαδήποτε στροφική και μετατοπιστική μεταβολή στην οποία μπορεί να υπόκεινται ένα χαρακτηριστικό ενώ ορίζεται σε σχέση με ένα τοπικό DRF. Δεδομένου ότι ο στόχος είναι να αναπαρασταθούν τα όρια της περιοχής των πιθανών μεταβολών (δηλαδή, ακραίες τιμές) η προσέγγιση αυτή σχετίζεται με την προσέγγιση της χειρότερης δυνατής περίπτωσης. Δεν χρησιμοποιείται στατιστική προσέγγιση όπως βρόχος διανυσμάτων ή μεταβολικά μοντέλα. Τα όρια των μεταβολών που προκύπτουν από πολύπλοκες σειρές ανοχών, επιλύονται μοντελοποιώντας τα αποτελέσματα της κάθε ανοχής ξεχωριστά και εν συνεχεία συνδυάζοντας τις προκύπτουσες περιοχές. Αναλόγως τα διάκενα αναπαριστώνται σαν να είναι περιοχές ανοχής. Τέλος, κατατάσσοντας τις επιφάνειες σε διάφορες κατηγορίες, που η κάθε μια από τις οποίες χαρακτηρίζεται από ορισμένου τύπου αναλλοίωτες σε σχέση με συγκεκριμένους τύπους μετατοπίσεων (π.χ., ένας κύλινδρος είναι αναλλοίωτος σε κάθε περιστροφή γύρω από τον άξονά του), μπορεί κανείς να απλοποιήσει τις προκύπτουσες μετατοπίσεις.

Μια παρόμοια προσέγγιση ακολουθείται για τη μοντελοποίηση των διαστάσεων που αποτελούν τις λειτουργικές απαιτήσεις της διάταξης καθώς στην περίπτωση αυτή η προκύπτουσα περιοχή (πιθανών τιμών) ουσιαστικά περιέχεται σε ένα τμήμα, τα όρια του οποίου θα πρέπει να υπολογιστούν με τη βοήθεια της προσέγγισης της χειρότερης περίπτωσης (ελάχιστη-μέγιστη απόσταση μεταξύ των δύο σημείων). Τα δύο σημεία που καθορίζουν τα όρια του τμήματος πρέπει να καθοριστούν ως το αποτέλεσμα μιας συνάρτησης στοίβας (Desrochers και Rivière 1997).

Το μοντέλο της μήτρας βασίζεται στην ανοχή θέσεως και στο μοντέλο TTRS. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά θεωρούνται ιδανικά, δηλαδή οι ανοχές μορφή παραμελούνται, όπως και στο μεταβολικό μοντέλο. Για την καλύτερη κατανόηση της μεθόδου μοντέλου μήτρας στην ανάλυση ανοχών, τα βασικά βήματα της παρέχονται παρακάτω:

1. Μετασχηματισμό των ανοχών που εφαρμόζονται στο σχέδιο. Το πρώτο βήμα είναι η μετατροπή των ορίων ανοχής που υφίστανται στο σχέδιο ώστε να καταστούν συμβατά με την ανοχή θέσης και τα κριτήρια TTRS.
2. Δημιουργία του γράφου συναρμολόγησης. Το δεύτερο βήμα είναι η δημιουργία ενός γράφου συναρμογής. Το γράφημα συναρμογής επιτρέπει τον καθορισμό του γενικού DRF και τους δεσμούς μεταξύ των χαρακτηριστικών στα οποία έχουν καθορισθεί ανοχές. Τα μέρη του συγκροτήματος θα πρέπει να είναι σε επαφή.
3. Καθορισμός του τοπικού DRF για κάθε χαρακτηριστικό τμήμα. Ένα τοπικό DRF πρέπει να αποδοθεί σε καθένα τμήμα του χαρακτηριστικού.
4. Προσδιορισμός των μετρήσιμων στοιχείων για κάθε λειτουργική απαίτηση. Τα σημεία που εντοπίζουν τα όρια της κάθε λειτουργικής απαίτησης πρέπει να εντοπιστούν καθώς και το

μονοπάτι που τις συνδέει με την καθολική DRF πρέπει να καθορίζονται, λαμβάνοντας υπόψη όλες τις ανοχές στοίβας κατά μήκος του τρόπου.
5. Ορισμός της συνεισφοράς της κάθε μεμονωμένης μετατόπισης και των σχετικών περιορισμών. Είναι αναγκαίο να καθοριστεί η συμβολή της κάθε μετατόπισης προς τη συνολική περιοχή μετατόπισης, καθώς και οι περιορισμοί που απαιτούνται για την αναγνώριση των ορίων της. Κάθε επιφάνεια μπορεί να ταξινομηθεί σε μία από τις επτά τάξεις αναλλοίωτων επιφανειών.
6. Εφαρμογή της αρχής της υπέρθεσης και εκτέλεση βελτιστοποίησης. Εάν περισσότερες από μια ανοχές εφαρμόζονται στο ίδιο τεμάχιο, το συνολικό αποτέλεσμα υπολογίζεται μέσω της αρχής της υπέρθεσης.

4.4.3 Ιακωβιανό Μοντέλο

Σύμφωνα με το Ιακωβιανό μοντέλο, κάθε σχετική επιφάνεια που συμμετέχει στην ανοχή στοίβας αναφέρεται σαν ένα λειτουργικό στοιχείο. Στην αλυσίδα ανοχής, τα λειτουργικά στοιχεία θεωρούνται σε ζευγάρια: τα δύο ζεύγη επιφανειών μπορούν να ανήκουν στο ίδιο τμήμα (εσωτερικό ζεύγος), ή σε δύο διαφορετικά τμήματα. Τα εξαρτήματα θα πρέπει να είναι σε επαφή για να μοντελοποιηθούν με το μοντέλο αυτό.

Οι μήτρες μετασχηματισμού μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον εντοπισμό ενός λειτουργικού στοιχείου ενός ζεύγους: τέτοιες μήτρες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να διαμορφώσουν την ονομαστική μετατόπιση μεταξύ των δύο λειτουργικών στοιχείων, αλλά επίσης και επιπλέον μικρές μετατοπίσεις που οφείλονται στις μεταβλητότητες των ανοχών. Οι ανοχές μορφής παραμεληθεί. Η κύρια πτυχή της Ιακωβιανής προσέγγισης είναι πώς τέτοιες μήτρες διαμορφώνονται, δηλαδή, μέσω μιας προσέγγισης που προέρχεται από την περιγραφή των κινηματικών αλυσίδων ρομποτική. Ο μετασχηματισμός που συνδέει δύο λειτουργικά στοιχεία που ανήκουν σε ένα ζεύγος, περιλαμβάνει ονομαστική μετατόπιση και μικρές αποκλίσεις που οφείλονται στις ανοχές και μπορεί να μοντελοποιηθεί από ένα σύνολο έξι εικονικών αρθρώσεων, που το καθένα συνδέεται με ένα DRF. Κάθε εικονική άρθρωση προσανατολίζεται έτσι ώστε κάθε λειτουργικό της στοιχείο να έχει είτε μια μετατόπιση ή μια περιστροφή κατά μήκος του άξονα Z. Η συνάθροιση των έξι εικονικών αρθρώσεων δημιουργεί τη μήτρα μετασχηματισμού που συνδέει ένα λειτουργικό στοιχείο με ένα άλλο λειτουργικό στοιχείο του ζεύγους (Laperrière και Lafond 1999; Laperrière και Kabore 2001).

4.4.4 Μοντέλο στροφέα (torsor model)

Το μοντέλο του στροφέα χρησιμοποιεί παραμέτρους κοχλία (screw parameters) για να μοντελοποιήσει σε 3D αναπαράσταση τις ζώνες ανοχής (Chase et al.1996). Οι παράμετροι κοχλία αποτελούν μια κοινή προσέγγιση που υιοθετήθηκε στην κινηματική για να περιγράψει την κίνηση, και δεδομένου ότι μια ζώνη ανοχής μπορεί να θεωρηθεί ως η περιοχή όπου μια επιφάνεια μπορεί να κινηθεί, οι παράμετροι βίδας μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να την περιγράψουν. Κάθε πραγματική επιφάνεια του τμήματος μοντελοποιείται από μια υποκατάστατη επιφάνεια. Μια υποκατάστατη επιφάνεια είναι μια ονομαστική επιφάνεια που χαρακτηρίζεται από ένα

σύνολο παραμέτρων κοχλία που μοντελοποιούν τις αποκλίσεις από την ονομαστική γεωμετρία λόγω των εφαρμοζόμενων ανοχών. Ορίζονται επτά τύποι ζωνών ανοχής. Κάθε μια χαρακτηρίζεται από ένα υποσύνολο μη μηδενικών παράμετρων κοχλία, ενώ οι υπόλοιπες ορίζονται στο μηδέν δεδομένου ότι αφήνουν την επιφάνεια αναλλοίωτη. Οι παράμετροι κοχλία είναι διατεταγμένοι σε ένα συγκεκριμένο μαθηματικό τελεστή που ονομάζεται torsor, εξ ου και το όνομα της μεθόδου. Θεωρώντας μια γενική επιφάνεια, αν U_a, V_a, και W_a είναι οι συντεταγμένες του σημείου A της και α, β, και γ είναι οι γωνίες περιστροφής (που θεωρούνται μικρές) σε σχέση με την ονομαστική γεωμετρία, ο αντίστοιχος στροφέας είναι:

$$\mathrm{T}_A = \begin{Bmatrix} a & u_A \\ \beta & v_A \\ \upsilon & w_A \end{Bmatrix}_R \tag{4.36}$$

όπου R είναι το DRF που χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση των τμημάτων του κοχλία.

Για να μοντελοποιήσουμε τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των τμημάτων της διάταξης ορίζονται τρεις τύποι στροφέων (ή μικρών στροφέων μετατόπισης, SDT) (Ballot and Bourdet 1997): ένας part SDT για κάθε τμήμα της διάταξης που μοντελοποιεί τη μετατόπιση του τμήματος, ένας deviation SDT για κάθε επιφάνεια του κάθε τμήματος που μοντελοποιεί τις γεωμετρικές αποκλίσεις από την ονομαστική γεωμετρία και ένα gap SDT μεταξύ των δύο επιφανειών που συνδέουν δύο τμήματα της διάταξης. Οι ανοχές μορφής αμελούνται και δεν συμπεριλαμβάνονται στην απόκλιση SDT.

Το μοντέλο του στροφέα λειτουργεί υπό την παραδοχή ότι υιοθετούνται τα TTRS και τα κριτήρια ανοχών θέσης που εγκρίθηκε, πράγμα που σημαίνει ότι τα όρια ανοχής στο σχέδιο μπορεί να χρειαστεί να ενημερωθούν πριν από τη διενέργεια της ανάλυσης ανοχής. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι, στη σχετική βιβλιογραφία, η χρήση των SDTs για μοντελοποίηση των προβλημάτων ανάλυσης ανοχής τείνει να ακολουθήσει δύο βασικές προσεγγίσεις: από τη μία πλευρά οι SDTs που χρησιμοποιούνται για την ανάπτυξη λογισμικού για υπολογισμό της θέσης των γεωμετρικών στοιχείων που ανήκουν στη διάταξη (π.χ., βλέπε Chase κ.ά. 1996), αφετέρου οι SDTs που χρησιμοποιούνται για την μοντελοποίηση του συνόλου του χωρικού όγκου ο οποίοw ενσωματώνει όλα τα δυνατά σημεία στο χώρο που μπορεί να καταληφθούν από τα γεωμετρικά στοιχεία κατά τη διάρκεια των μεταβολών (π.χ., Laperrière κ.ά.. 2002).

4.5 Σύγκριση των μοντέλων

Μια πρώτη σύγκριση των προηγουμένων πέντε μοντέλων μπορεί να γίνει με την αξιολόγηση τους με βάση ένα σύνολο δεικτών που περιγράφουν τα χαρακτηριστικά και τις δυνατότητες τους που σχετίζονται με την εφαρμογή των μοντέλων αυτών σε προβλήματα που σχετίζονται με καθορισμό ανοχών στοίβας (stack-up tolerances). Ο πρώτος δείκτης είναι ο “τύπος ανάλυσης” (analysis type) ο οποίος αναφέρεται στο είδος της προσέγγισης που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επίλυση της συνάρτησης στοίβας (stack-up tolerance function), δηλαδή εάν έχουμε επίλυση με βάση τη χειρότερη περίπτωση ή με βάση τη στατιστική. Ο δεύτερος δείκτης είναι ο ‘’τύπος της ανοχής’’ (tolerance type) που υποδηλώνει το είδος της ανοχής που το μοντέλο μπορεί να εξετάσει: ανοχή

διάστασης, μορφής, ή άλλη γεωμετρική ανοχή. Ο δείκτης "ανεξαρτησίας και περιβάλλουσας" (envelope and independence) αναφέρεται στη δυνατότητα του μοντέλου να αναπαραστήσει μια διαστασιολογική ανοχή όταν καθορίζεται η αρχή της περιβάλλουσας ή η αρχή της ανεξαρτησίας. Ο δείκτης ‘‘ανοχή τύπου στοίβας’’ (tolerance stack-up type) αναφέρεται στη δυνατότητα του μοντέλου να κατασκευάσει και να επιλύσει γραμμικές συναρτήσεις στοίβας ή ακόμα και δίκτυα συναρτήσεων στοίβας. Ο δείκτης ‘‘joint type’’ αναφέρεται στις αρθρώσεις που το μοντέλο μπορεί να εξετάσει, είτε με την επαφή μεταξύ των επιφανειών είτε μέσω των διακένων. Ο δείκτης “functional requirement schematization” αναφέρεται στο πώς μια λειτουργική απαίτηση μπορεί να αντιπροσωπευτεί από ένα χαρακτηριστικό ή από ένα σύνολο σημείων που ανήκουν σε ένα χαρακτηριστικό. Ο δείκτης “tolerance zones interaction” δείχνει την ικανότητα αναπαράστασης της αλληλεπίδρασης ανάμεσα σε περισσότερες από μία ανοχές που εφαρμόζονται στην ίδια επιφάνεια. Ο δείκτης “datum precedence” δείχνει αν το μοντέλο μπορεί να αναπαραστήσει μια ακολουθία επιπέδων αναφοράς. Ο δείκτης “material modifiers condition” δείχνει την ικανότητα του μοντέλου να αναλύσει διαφορετικά υλικά.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της πρώτης σύγκρισης, το μοντέλο διανυσμάτων βρόχου και το μεταβολικό μοντέλο είναι πιο ανεπτυγμένα από τα άλλα; είναι τα μόνα που μπορούν να επιλύσουν δίκτυα ανοχών στοίβας. Επιπλέον, παρέχουν μια μέθοδο για την εκχώρηση συναρτήσεων πυκνότητας πιθανότητας στις παραμέτρους του μοντέλου, με δεδομένες τις εφαρμοζόμενες ανοχές. Ωστόσο, μοντέλο διανυσμάτων βρόχου και το μεταβολικό μοντέλο δεν είναι απολύτως σύμφωνα με τα υφιστάμενα πρότυπα ISO και ASME και δεν παρέχουν τη δυνατότητα εξέτασης αλληλεπιδράσεων μεταξύ των ζωνών ανοχής.

Το μοντέλο διανυσμάτων βρόχου είναι το μόνο μοντέλο που παρέχει δυνατότητα μοντελοποίησης ανοχών μορφής ενώ όλα τα άλλα μοντέλα κάνουν την απλούστευση ότι τα πραγματικά χαρακτηριστικά συμπίπτουν με τα υποκατάστατά τους.

Το μεταβολικό μοντέλο υποστηρίζει την ένταξη περιορισμών μεταξύ των σημείων αναφοράς, καθώς επίσης και τη παρουσία διαφορετικών υλικών.

Το μοντέλο της μήτρας και η υποστήριξη μοντέλο torsor υποστηρίζει μόνο τη χειρότερη περίπτωση για την επίλυση του προβλήματος ανάλυσης ανοχών.

Το ιακωβιανό μοντέλο έχει το πλεονέκτημα ότι η ιακωβιανή μήτρα μπορεί να υπολογίζεται εύκολα από τις ονομαστικές συνθήκες, ενώ οι μετατοπίσεις των λειτουργικών απαιτήσεων μπορούν να συνδέονται άμεσα με τις μετατοπίσεις των εικονικών αρθρώσεων.

		Vector loop	Variational	Matrix	Jacobian	Torsor
Analysis type	Worst case	X	X	X	X	X
	Statistical	X	X	–	X	–
Tolerance type	Dimensional	X	X	X	X	X
	Form	X	–	–	–	–
	Other geometric	X	X	X	X	X
Envelope and independence		–	–	–	–	–
Parameters from tolerances		–	–	–	–	–
Stack-up type	Linear	X	X	X	X	X
	Network	X	X	–	–	–
Link type	With contact	X	X	X	X	X
	With clearance	–	?	X	?	X
Functional requirement schematization	With feature	X	X	–	X	X
	With points	X	X	X	X	X
Tolerance zones interaction		–	–	X	X	X
Datum precedence		?	X	?	?	X
Material modifiers condition		?	X	?	?	?

X possible, – not possible,? unclear

Πίν. 4.3: Αποτελέσματα της σύγκρισης συμφώνως των δεικτών (Wilma Polini, 2012)

Τα αποτελέσματα που έχουν προκύψει από τα πέντε μοντέλα παρουσιάζονται στους ακόλουθους πίνακες. Στον **Πιν. 4.4** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τις ανοχές στην περίπτωση εκείνη που λαμβάνονται υπόψη μονάχα οι διαστασιολογικές ανοχές και όχι οι γεωμετρικές ανοχές. Αντίστοιχα στον **Πιν. 4.5** λαμβάνονται υπόψη και οι γεωμετρικές ανοχές.

Στα αποτελέσματα που λαμβάνονται υπόψη μόνο οι ανοχές διαστάσεων δείχνουν ότι όλα τα μοντέλα δίνουν ελαφρώς αυξημένα αποτελέσματα με την προσέγγιση της χειρότερης περίπτωσης, όταν συγκρίνονται με τα αποτελέσματα που λαμβάνονται με υπολογισμούς με την προσέγγιση που περιγράφεται νωρίτερα. Το μοντέλο της μήτρας έχει το υψηλότερο σφάλμα (-14%), ενώ όλα τα άλλα μοντέλα παρέχουν το ίδιο αποτέλεσμα (-4%). Αυτό πιθανότατα οφείλεται στον τρόπο μορφοποίησης των διαστάσεων (λόγω του ότι το πρώτο χαρακτηριστικό δεδομένο είναι ονομαστικό). Επιπλέον, η στατιστική προσέγγιση δίνει παρόμοια αποτελέσματα για όλα τα εξεταζόμενα μοντέλα.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εξέταση των διαστασιολογικών και γεωμετρικών ανοχών δείχνουν ότι όλα τα μοντέλα, εκτός από το μοντέλο διανυσμάτων βρόχου, δίνουν παρόμοια αποτελέσματα με τη προσέγγιση της χειρότερης περίπτωσης. Αυτό πιθανότατα οφείλεται στο γεγονός ότι το μοντέλο διανυσμάτων βρόχου εκτιμά το αποτέλεσμα ενός συνόλου ανοχών που εφαρμόζονται σε μία επιφάνεια ως το άθροισμα των επιμέρους ανοχών που εφαρμόζονται στην ίδια επιφάνεια. Τα αποτελέσματα των διαφορετικών ανοχών θεωρούνται ανεξάρτητα. Ως εκ τούτου, η αύξηση του αριθμού των ανοχών που εφαρμόζονται στην ίδια

επιφάνεια αυξάνει τη μεταβλητότητα της λειτουργικής απαίτησης. Αυτό σημαίνει ότι η αλληλεπίδραση μεταξύ των ανοχών που καθορίζονται στην ίδια επιφάνεια δεν αναπαρίσταται σωστά. Όλα τα μοντέλα παράγουν παρόμοια αποτελέσματα όταν εφαρμόζεται η στατιστική προσέγγιση.

Model	Type of analysis	Results (mm)
Exact solution	Worst case	+0.84 –0.78
Vector loop	Worst case	±0.78
	Statistical case	±0.52
Variational	Worst case	±0.78
	Statistical case	±0.51
Matrix	Worst case	±0.70
	Statistical case	–
Jacobian	Worst case	±0.78
	Statistical case	±0.53
Torsor	Worst case	±0.78
	Statistical case	–

Πίν. 4.4: Αποτελέσματα της σύγκρισης μεταξύ των μοντέλων που χρησιμοποιήθηκαν με διαστασιολογικές ανοχές

Model	Type of analysis	Results (mm)
Vector loop	Worst case	±1.03
	Statistical case	±0.54
Variational	Worst case	±0.78
	Statistical case	±0.50
Matrix	Worst case	±0.69
	Statistical case	–
Jacobian	Worst case	±0.78
	Statistical case	±0.53
Torsor	Worst case	±0.78
	Statistical case	–

Πίν. 4.5: Αποτελέσματα της σύγκρισης μεταξύ των μοντέλων που χρησιμοποιήθηκαν με χρήση διαστασιολογικών και γεωμετρικών ανοχών

Κεφάλαιο 5

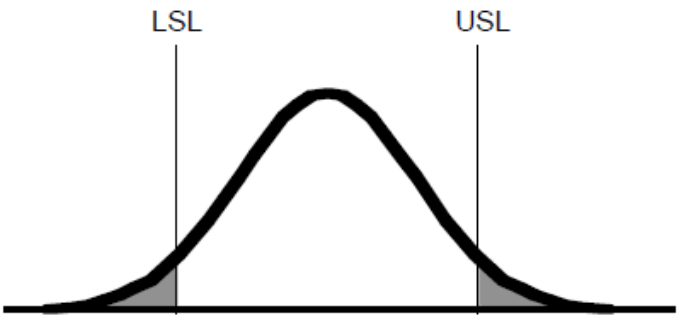
ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΑ ΕΡΓΑΛΕΙΑ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΕΠΑΡΚΕΙΑΣ ΤΗΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ

5.1. Εισαγωγή

Η επάρκεια της κατεργασίας (process capability) είναι μια έννοια κεντρικής σημασίας για τη σύγχρονη βιομηχανική παραγωγή. Όπως έχει ήδη αναφερθεί η μεγαλύτερη πρόκληση στις σημερινές ανταγωνιστικές αγορές είναι η παραγωγή προϊόντων υψηλής ποιότητας με το ελάχιστο δυνατό κόστος. Για να επιτευχθεί ο στόχος αυτός απαιτείται συστηματική αξιολόγηση των χαρακτηριστικών των παραγόμενων τεμαχίων/προϊόντων μέσω στατιστικών εργαλείων ποιοτικού ελέγχου (Statistical Quality Control) που μας επιτρέπουν να καθορίσουμε την επάρκεια της κατεργασίας (Process Capability).

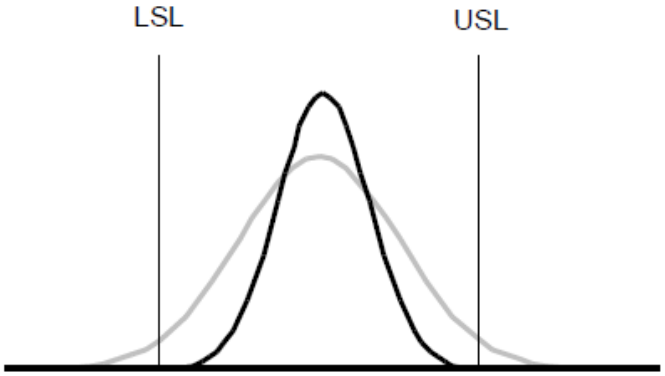
Ο έλεγχος της επάρκειας της κατεργασίας είναι πολύ σημαντικός καθώς μας επιτρέπει να προσδιορίσουμε ποσοτικά κατά πόσο μια διαδικασία μπορεί να παράγει αποδεκτό προϊόν. Ως αποτέλεσμα, ο μηχανικός μπορεί να εντοπίσει που απαιτούνται αναγκαίες βελτιώσεις στην κατεργασία και ποια προβλήματα πρέπει να επιλυθούν. Η ποσοτική εκτίμηση της επάρκειας κατεργασίας υποδεικνύει εάν μια κατεργασία μπορεί να παράγει συμβατά με την εκάστοτε προδιαγραφή προϊόντα. Εάν η κατεργασία είναι επαρκής, τότε μπορούν να χρησιμοποιηθούν στατιστικοί έλεγχοι για την παρακολούθησή της σε βάθος χρόνου και οι συμβατικοί μέθοδοι ελέγχου μπορούν να μειωθούν ή και να εξαλειφθούν τελείως. Αυτό οδηγεί σε σημαντική εξοικονόμηση κόστους τόσο λόγω της εξάλειψης των πρόσθετων επιθεωρήσεων στα τεμάχια όσο – κυρίως - λόγω της μέιωσης απορριπτώμενων / μη απόδεκτών τεμαχίων (scrap) και της ανάγκης επανεπεξεργασίας Τα οφέλη από τη διενέργεια μελετών επάρκειας της κατεργασίας σίγουρα αξίζουν τον κόπο μακροπρόθεσμα και έχουν ικανοποιητικό δείκτη ROI.

Μετά από μια μελέτη επάρκειας, μια κατεργασία μπορεί να ταξινομηθεί είτε ως επαρκής είτε ως ανεπαρκής. Όταν η μέθοδος δεν είναι ικανή να παράγει το σύνολο σχεδόν του προδιαγραφέντος προϊόντος, τότε η κατεργασία χαρακτηρίζεται ανεπαρκής και η δειγματοληψία και ο έλεγχος πρέπει να γίνεται στο 100% των παραγόμενων προϊόντων. Το **Σχ. 5.1** δείχνει το γράφημα της κατεργασίας, σε σύγκριση με τα όρια προδιαγραφών για μια τυπική ανεπαρκή διαδικασία.

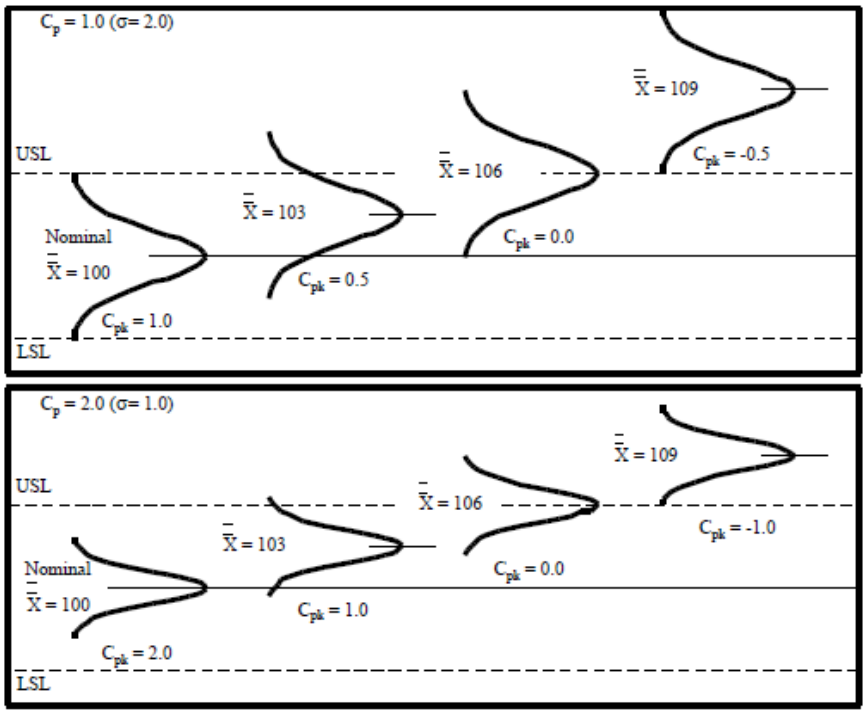


Σχ. 5.1: Τυπική ανεπαρκής κατεργασία

Οι κατεργασίες μπορούν επίσης να ξεκινούν ως επαρκείς, αλλά με την πάροδο του χρόνου να αυξάνεται η μεταβλητότητα. Επιπλέον, η μέση τιμή της κατεργασίας μπορεί επίσης να αλλάξει τη θέση της κατεργασίας και να προσεγγίσει κοντά σε ένα από τα όρια της προδιαγραφής. Αμφότερες οι αυξήσεις τόσο στη διασπορά όσο και η μετατόπιση της μέσης τιμής μπορούν να οδηγήσουν ορισμένες επαρκείς διαδικασίες στο να μετατραπούν σε ανεπαρκείς.



Σχ. 5.2: Αρχικά επαρκής εργασία μετατράπηκε σε ανεπαρκή λόγω αύξησης σ



Σχ. 5.3: Μετατόπιση της μέσης τιμής της κατεργασίας

Στο **Σχ. 5.2** απεικονίζεται μία αρχικά επαρκής διαδικασία που με την πάροδο του χρόνου, έχει μετατραπεί σε ανεπαρκή λόγω της αυξημένης διασποράς. Στο **Σχ. 5.3** απεικονίζονται τα αποτελέσματα στην ποιότητα της κατεργασίας λόγω της μετατόπισης της μέσης τιμής ενώ η τυπική απόκλιση παραμένει η ίδια.

5.2. Ορισμοί

Κατεργασία: Η κατεργασία αναφέρεται σε οποιοδήποτε συνδυασμό εργασιών που αποσκοπεί στην παραγωγή ενός συγκεκριμένου προϊόντος.

Επάρκεια κατεργασίας: Η επάρκεια κατεργασίας αναφέρεται στη συνήθη συμπεριφορά μιας κατεργασίας όταν λειτουργεί σε κατάσταση στατιστικού ελέγχου. Αναφέρεται στην εγγενή ικανότητα μιας κατεργασίας για παραγωγή παρόμοιων τεμαχίων για μια παρατεταμένη χρονική περίοδο κάτω από ένα δεδομένο σύνολο συνθηκών.

Δείκτης επάρκειας κατεργασίας: Η επάρκεια της κατεργασίας μπορεί να εκφραστεί ως το ποσοστό των μη συμμορφούμενων με την προδιαγραφή τεμαχίων ως προς τα συνολικά παραγόμενα.

Μελέτη διαδικασίας επάρκειας: Η μελέτη επάρκειας της διαδικασίας είναι μια συστηματική διαδικασία για τον προσδιορισμό της επάρκειας μιας διαδικασίας όσο και για τη βελτίωση αυτής. Οι μελέτες επάρκειας της διαδικασίας συνήθως εκτελούνται ως μέρος μιας προσπάθειας πιστοποίησης της διαδικασίας ή προσπάθεια βελτιστοποίησης της διαδικασίας.

Βήματα Μελέτης Επάρκειας Διαδικασίας

Τα βήματα μελέτης της επάρκειας της διαδικασίας είναι:

1. <u>Επιλογή κρίσιμων παραμέτρων</u>
Οι κρίσιμες παράμετροι πρέπει να επιλεγούν πριν από την έναρξη της μελέτης. Καθορίζονται από τα σχέδια, τις συμβάσεις, τις οδηγίες ελέγχου, τις οδηγίες εργασίας, κλπ και συνήθως σχετίζονται με την εφαρμογή ή και τη λειτουργία του προϊόντος.

2. <u>Συλλογή δεδομένων</u>
Πρέπει να δημιουργηθεί ένα σύστημα συλλογής δεδομένων για να εξασφαλιστεί ότι συλλέγονται τα κατάλληλα δεδομένα. Είναι προτιμότερο να συλλέγονται τουλάχιστον 60 τιμές δεδομένων για κάθε κρίσιμη παράμετρο. Αν αυτό είναι δεν είναι δυνατόν, διορθώσεις μπορούν να γίνουν για την προσαρμογή του σφάλματος όταν εισάγονται λιγότερες από 60 τιμές. Σημαντικά ψηφία για το κάθε χαρακτηριστικό θα πρέπει να είναι ο αριθμός των σημαντικών ψηφίων που απαιτούνται σύμφωνα με τα όρια των προδιαγραφών συν ένα επιπλέον ψηφίο για να βεβαιωθεί ότι η σταθερότητα της διαδικασίας μπορεί να αξιολογηθεί.

3. <u>Έλεγχος της διαδικασίας</u>
Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να γίνει διάκριση μεταξύ του προϊόντος και της κατεργασίας. Το προϊόν είναι το τελικό αποτέλεσμα που προκύπτει από την κατεργασία. Το προϊόν μπορεί να είναι

ένα φυσικό προϊόν (παράδειγμα: κατασκευασμένο τεμάχιο) ή μια υπηρεσία (παράδειγμα: πληκτρολόγηση μιας έκθεσης). Κάποιος μπορεί να ελέγχει τη διαδικασία με την μέτρηση και έλεγχο των παραμέτρων του προϊόντος άμεσα ή μετρώντας και ελέγχοντας τις εισόδους της διαδικασίας (όταν υπάρχει συσχέτιση μεταξύ των εισόδων της κατεργασίας και των κρίσιμων παραμέτρων του προϊόντος). Είναι τελικά σκόπιμο να καθιερωθεί ο έλεγχος της διαδικασίας από τον έλεγχο των εισόδων. Από την άλλη πλευρά, οι δείκτες επάρκειας της διαδικασίας υπολογίζονται πάντα χρησιμοποιώντας τις κρίσιμες παραμέτρους του προϊόντος. Ο υπολογισμός των αναμενόμενων δεικτών επάρκειας της διαδικασίας εξαρτάται από τον στατιστικό έλεγχο της διαδικασίας. Εάν η διαδικασία δεν είναι σε στατιστικό έλεγχο, τότε τα αποτελέσματα της μελέτης υπόκεινται σε απρόβλεπτες διακυμάνσεις. Ο στατιστικός έλεγχος της διαδικασίας μπορεί να μελετηθεί με τη χρήση διαγραμμάτων ελέγχου (συνήθως Xbar-R διαγράμματα).

4. <u>Ανάλυση δεδομένων κατεργασίας</u>
Για τον υπολογισμό των δεικτών επάρκειας της κατεργασίας, υπολογίζουμε το μέσο όρο της διαδικασίας και τη διασπορά της (τυπική απόκλιση) από τα ληφθέντα δεδομένα. Επιπλέον, οι τύποι για τους δείκτες επάρκειας της διαδικασίας υποθέτουμε ότι προήλθαν από μια συνήθη στατιστική κατανομή. Είναι σημαντικό να δειχτεί ότι τα δεδομένα κατανέμονται κανονικά πριν από τη μελέτη της επάρκειας της διαδικασίας, διότι τα σφάλματα λόγω εσφαλμένης εκτίμησης μπορούν να οδηγήσουν σε ανεπιθύμητες ενέργειες.

5. <u>Ανάλυση πηγών διακυμάνσεων</u>
Μελέτη των πηγών που προκαλούν διακύμανση καθώς αυτές μπορούν να κυμαίνονται από απλούς στατιστικούς ελέγχους έως πολύπλοκους πειραματικούς σχεδιασμούς που διεξάγονται επί μακρό χρονικό διάστημα. Αν είναι δυνατόν, οι δοκιμές αυτές πρέπει να είναι απλές. Ανάλυση των πηγών διακύμανσης περιλαμβάνει τον καθορισμό των παραγόντων που επηρεάζουν τη μεταβλητότητα και τη διαδικασία του κεντραρίσματος. Με τη γνώση αυτή, είναι δυνατόν να βελτιωθεί η επάρκεια της κατεργασίας. Η ανάλυση των πηγών διακύμανσης απαιτεί πάντα προσεκτικό σχεδιασμό στη συλλογή δεδομένων.

6. <u>Εφαρμογή συστήματος παρακολούθησης της κατεργασίας</u>
Μόλις οι δείκτες επάρκειας της διαδικασίας υποδεικνύουν μια επαρκή διαδικασία, μια τυπική διαδικασία ελέγχου ρουτίνα θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί για να εξασφαλιστεί ότι η διαδικασία παραμένει σταθερή. Αυτό μπορεί να γίνει με μια ποικιλία μεθόδων, όπως η θέσπιση προγράμματος στατιστικής επεξεργασίας (SPC). Οι δείκτες επάρκειας της κατεργασίας θα πρέπει επίσης να υπολογίζονται εκ νέου σε τακτά χρονικά διαστήματα ώστε να διασφαλίζεται ότι η κατεργασία δεν έχει αλλάξει σημαντικά.

5.3. Δείκτες επάρκειας κατεργασίας

<u>Υπολογισμός της μέσης τιμής (Xbar)</u>

$$Mean = X_{bar} = \frac{\sum x_i}{n}$$

Όπου n είναι το μέγεθος του δείγματος και x_i είναι οι τιμές των μεταβλητών

Υπολογισμός της τυπικής απόκλισης (standard deviation s)

$$s = \sqrt{\frac{\sum(X_i - Mean)^2}{(n-1)}}$$

Για να αποκτήσουμε μια ακριβή εκτίμηση της τυπικής απόκλισης της διαδικασίας απαιτούνται τουλάχιστον 60 τιμές δεδομένων. Αν το δείγμα είναι μικρότερο από 60 χρησιμοποιούμε τον ακόλουθο τύπο με τους συντελεστές διόρθωσης σφάλματος δίνεται στον Πίνακα 5.1.

$$s_{corrected} = \frac{s}{c_4}$$

n	c_4
15	0.9823
16	0.9835
17	0.9845
18	0.9854
19	0.9862
20	0.9869
21	0.9876
22	0.9882
23	0.9887
24	0.9892
25	0.9896
30	0.9914
35	0.9927
40	0.9936
45	0.9943
50	0.9949
55	0.9954

Πίν. 5.1.: Συντελεστής διόρθωσης τυπικής απόκλισης

Υπάρχουν διαθέσιμοι πολλοί δείκτες επάρκειας κατεργασίας. Παρουσιάζονται εδώ οι κυριότεροι από αυτούς:

1. C_p

Είναι ο δείκτης επάρκειας της κατεργασίας που υποδηλώνει δυνητική απόδοση της κατεργασίας, συσχετίζοντας την τυπική απόκλιση της κατεργασίας με τις προδιαγραφές (ανοχή). Χρησιμοποιείται κατά τη φάση του σχεδιασμού του προϊόντος και εκφράζεται ως ακολούθως:

$$C_P = \frac{Specification\ Range}{6\sigma} = \frac{(USL - LSL)}{6\sigma} \quad (5.1)$$

Όπου USL (Upper Side Limit) είναι το ανώτατο όριο της προδιαγραφής και LSL (Lower Side Limit) είναι το κατώτερο όριο της προδιαγραφής. Επίσης για να χρησιμοποιηθεί ο ανωτέρω τύπος απαιτείται η μέση τιμή του δείγματος να είναι ίση με τη με τη μέση τιμή της προδιαγραφής.

2. C_{pk} (Όρια ανοχής σε δίπλευρη κατανομή)

Είναι ένας δείκτης επάρκειας της κατεργασίας που υποδηλώνει την απόδοση της υπολογίζοντας μετατόπιση στη μέση τιμή της διαδικασίας προς την κατεύθυνση είτε του ανώτατου ή του κατώτατου ορίου της προδιαγραφής.

$$C_{Pk} = Min\left[\frac{(USL-Mean)}{3\sigma}, \frac{(Mean-LSL)}{3\sigma}\right] \tag{5.2}$$

$C_{pku} = C_{pk}\ (Upper\ Specification\ Limit)$
$C_{pkl} = C_{pk}\ (Lower\ Specification\ Limit)$

3. C_{pk} (Όρια ανοχής σε μονόπλευρη κατανομή)

Το C_{pk} μπορεί να υπολογιστεί ακόμα κι αν υπάρχει μόνο ένα όριο προδιαγραφής ή εάν έχει καθοριστεί ένα ελάχιστο / μέγιστο.

α. $C_{pk\ (max)}$: C_{pk} για άνω όρια προδιαγραφών ή ανώτατο καθοριζόμενο

$$Cpk\ (max) = \frac{(USL - Mean)}{3\sigma}$$

β. $C_{pk\ (min)}$: C_{pk} για κάτω όρια προδιαγραφών ή κατώτατο καθοριζόμενο

$$Cpk\ (min) = \frac{(Mean - LSL)}{3\sigma}$$

4. C_{pm}, δείκτης επάρκειας για χρήση με τελικές τιμές στόχους (target values)
C_{pm}: χρησιμοποιείται όταν η επιθυμητή τιμή-στόχος είναι διαφορετική από το κέντρο της κατανομής και δίνεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$C_{pm} = \frac{C_p}{1 + \frac{(X_{bar} - T)^2}{s^2}}$$

Όπου T είναι η επιθυμητή τιμή στόχος που είναι διαφορετική από το κέντρο της κατανομής

5.3.1. Ανάλυση της επάρκειας της κατεργασίας μέσω διαγραμμάτων ελέγχου

Τα διαγράμματα ελέγχου χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση της κατεργασίας μετά την αρχική αξιολόγηση της επάρκειας της. Ωστόσο, η περιοδική επαναξιολόγηση της ικανότητας της διαδικασίας, συνιστάται στη πιστοποίηση ότι η μέση τιμή δεν έχει μετατοπιστεί και ότι η τυπική απόκλιση της κατεργασίας δεν έχει αυξηθεί. Το διάγραμμα ελέγχου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να γίνει μια εκτίμηση της τυπικής απόκλισης και της μέσης τιμής που θα χρησιμοποιηθούν στους δείκτες επάρκειας της κατεργασίας. Χρησιμοποιούμε τους ακόλουθους μαθηματικούς τύπους για να λάβουμε τη μέση τιμή και την τυπική απόκλιση με τους κατάλληλους συντελεστές διόρθωσης σφάλματος από τον πίνακα 5.2.

$$\text{Mean} = X_{dbar}$$

$$\sigma = \frac{s_{bar}}{c_4}$$

Στην περίπτωση αυτή, ο μεγάλος μέσος όρος (Xdbar) χρησιμοποιείται ως μια εκτίμηση για τη μέση τιμή της κατεργασίας (Xbar).

n Subgroup Sample Size	d_2	c_4
2	1.128	0.7979
3	1.693	0.8862
4	2.059	0.9213
5	2.326	0.9400
6	2.534	0.9515
7	2.704	0.9594
8	2.847	0.9650
9	2.970	0.9693
10	3.078	0.9727
11	3.173	0.9754
12	3.258	0.9776
13	3.336	0.9794
14	3.407	0.9810
15	3.472	0.9823

Πίν. 5.2: Συντελεστές διόρθωσης τυπικής απόκλισης

5.4 Υπολογισμός του C_{pk} σε συνθήκες μεταβλητών ανοχών

Μια πιο απαιτητική ερώτηση σε σχέση με τον υπολογισμό του C_{pk} είναι για προδιαγραφές γεωμετρικών χαρακτηριστικών όπως η ακόλουθη (π.χ. για ένα στοιχείο χαρακτηριζόμενο ως «άξονα»):

⌖	Ø 0.08 Ⓜ	A	B	C

Σύμφωνα με την ανωτέρω προδιαγραφή και όπως έχουμε αναφέρει και σε προηγούμενο κεφάλαιο, ο άξονας πρέπει να είναι με ακρίβεια τοποθετημένος ως προς τα επίπεδα A,B και C όταν βρίσκεται σε κατάσταση πλήρους υλικού (MMC) αλλά λαμβάνει επιπλέον – «bonus» ανοχή στην προδιαγραφή θέσης του όταν το μέγεθος (διάμετρος) του άξονα απομακρύνεται από το μέγιστο επιτρεπτό όριο (MMC). Στην περίπτωση αυτή υφίστανται δύο τρόποι υπολογισμού του C_{pk} ***σε συνθήκες μεταβλητών ανοχών***.

Η πρώτη μέθοδος υπολογισμού του C_{pk} είναι η αντιμετώπιση της συνολικής ανοχής ως ίσης με την βασική ανοχή *συν* την ανοχή bonus στο *μέσο μέγεθος* (διάμετρος) του εξεταζόμενου γεωμετρικού χαρακτηριστικού. Για παράδειγμα εάν ο άξονας με ονομαστική διάμετρο Ø24.1mm του εικονιζόμενου στο Σχήμα 5.4 εξαρτήματος μετρηθεί 24.09 mm τότε η bonus ανοχή θέσης του είναι 0.135mm (24.225-24.09). Ο υπολογισμός αυτός της bonus ανοχής χρησιμοποιώντας το μέσο μέγεθος του χαρακτηριστικού οδηγεί σε μια μέση bonus ανοχή (Average Bonus Tolerance- ABT) που είναι ίση με :

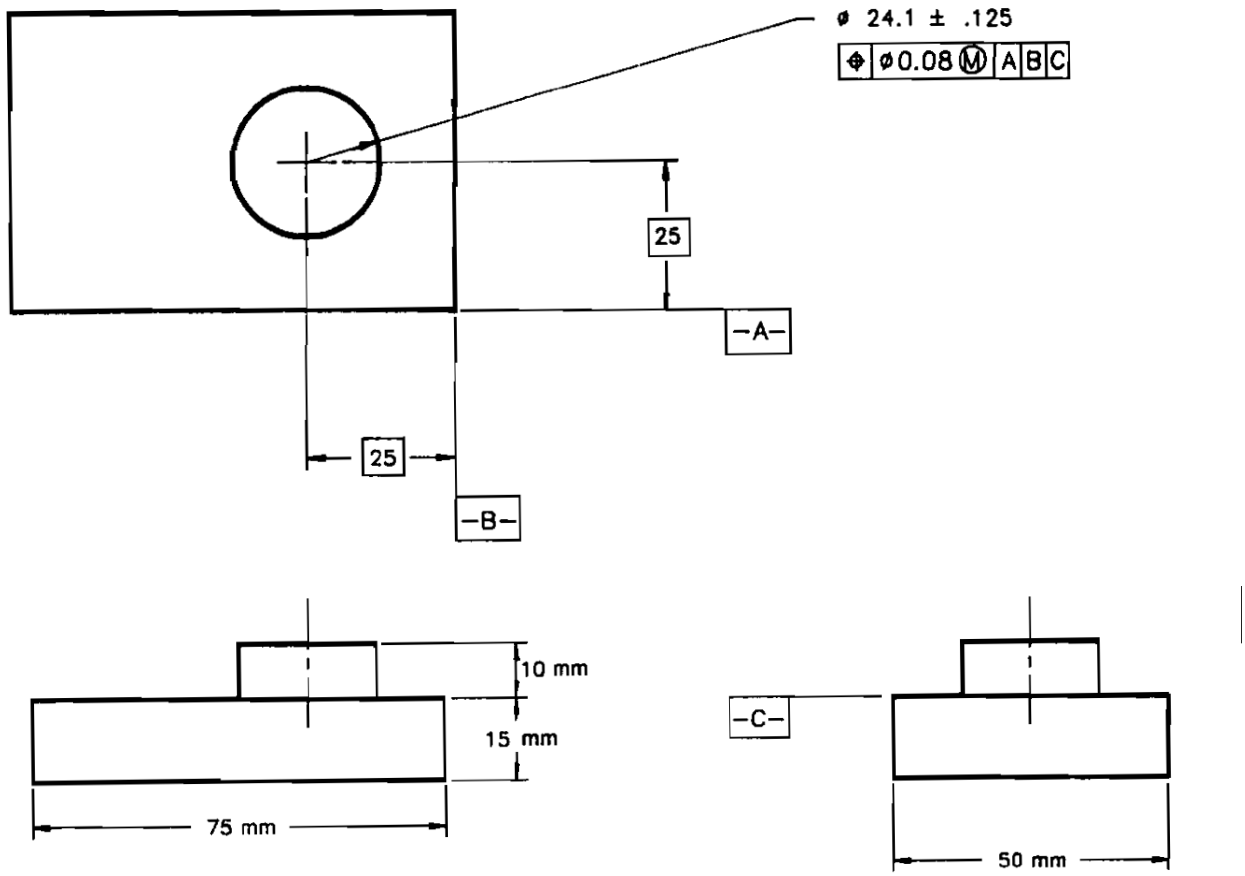
$$ABT=MMC-X_{barf} \quad (5.3\alpha)$$

ή

$$ABT= X_{barf} - MMC \quad (5.3\beta)$$

Όπου

ABT=Average Bonus Tolerance (Μέση Bonus Ανοχή)
MMC= Maximum Material Condition (ΑΠΕ)
X_{barf} = Μέση τιμή του μεγέθους του χαρακτηριστικού



Σχ. 5.4: Εξεταζόμενο τεμάχιο

Η επιλογή σχετικά με το ποιά από τις (5.3α) ή (5.3β) εξισώσεις θα χρησιμοποιήσουμε βασίζεται στο εάν η συνθήκη της ΑΠΕ (MMC) προκύπτει όταν το μέγεθος του χαρακτηριστικού είναι στο USL (άξονας-3α) ή στο LSL (τρύμα -3β). Εν συνεχεία για την διευκόλυνση των υπολογισμών μας εξετάζουμε την περίπτωση ενός άξονα όπως φαίνεται και στην ανωτέρω εικόνα το οποίο έχει τη συνθήκη μέγιστου υλικού στη μέγιστη διάστασή του. Επομένως η εξίσωση (5.2) γίνεται :

$$C_{pk} = \frac{USL+ABT-X_{bar}}{3\sigma} \tag{5.4}$$

Άρα από την εξίσωση (5.3α) για το ΑΒΤ έχουμε την ακόλουθη σχέση:

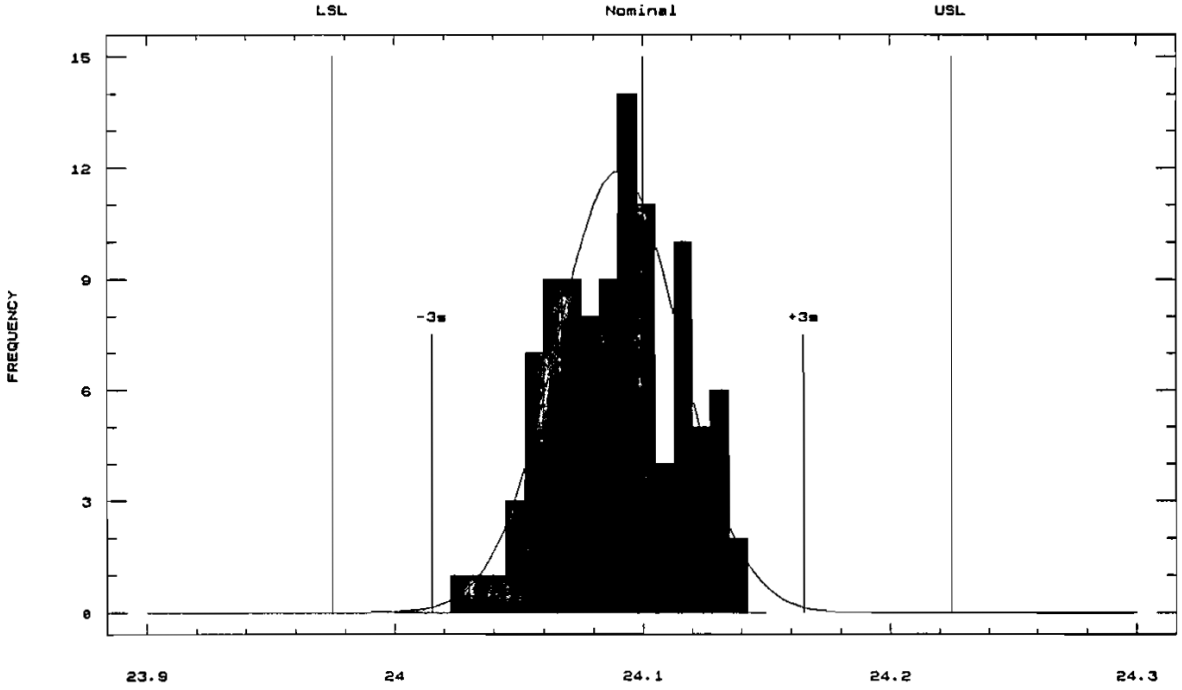
$$C_{pk} = \frac{USL+MMC-X_{barf}-X_{bar}}{3\sigma} \tag{5.4α}$$

Όπου το X_{bar} είναι η παρατηρούμενη μέση τιμή της θέσης του κέντρου του τεμαχίου και το X_{barf} όπως αναφέρθηκε παραπάνω είναι η παρατηρούμενη μέση τιμή της διάστασης του τρύματος.

Εάν αντί για άξονα έχουμε τρύμα η ανωτέρω σχέση λαμβάνει την ακόλουθη τιμή:

$$C_{pk} = \frac{USL-MMC+X_{barf}-X_{bar}}{3\sigma} \tag{5.4β}$$

Για το τεμάχιο του Σχ. 5.4 θεωρούμε ως κρίσιμα μεγέθη τη διάμετρο και τη θέση του άξονα Ø24.1. Το μέγεθος της εν λόγω διαμέτρου έχει προσδιορισθεί στα 24.1 ±0.125mm και η μελέτη της επάρκειας της κατεργασίας που έγινε κατά τις πρώτες φάσεις ανάπτυξης του προϊόντος έδειξε ότι η κατανομή του δείγματος είναι «κεντραρισμένη» σωστά με ικανοποιητική τυπική απόκλιση. Το ιστόγραμμα και τα στατιστικά στοιχεία που προκύπτουν για το μέγεθος του άξονα και για τη θέση του δίνονται στα επόμενα διαγράμματα :

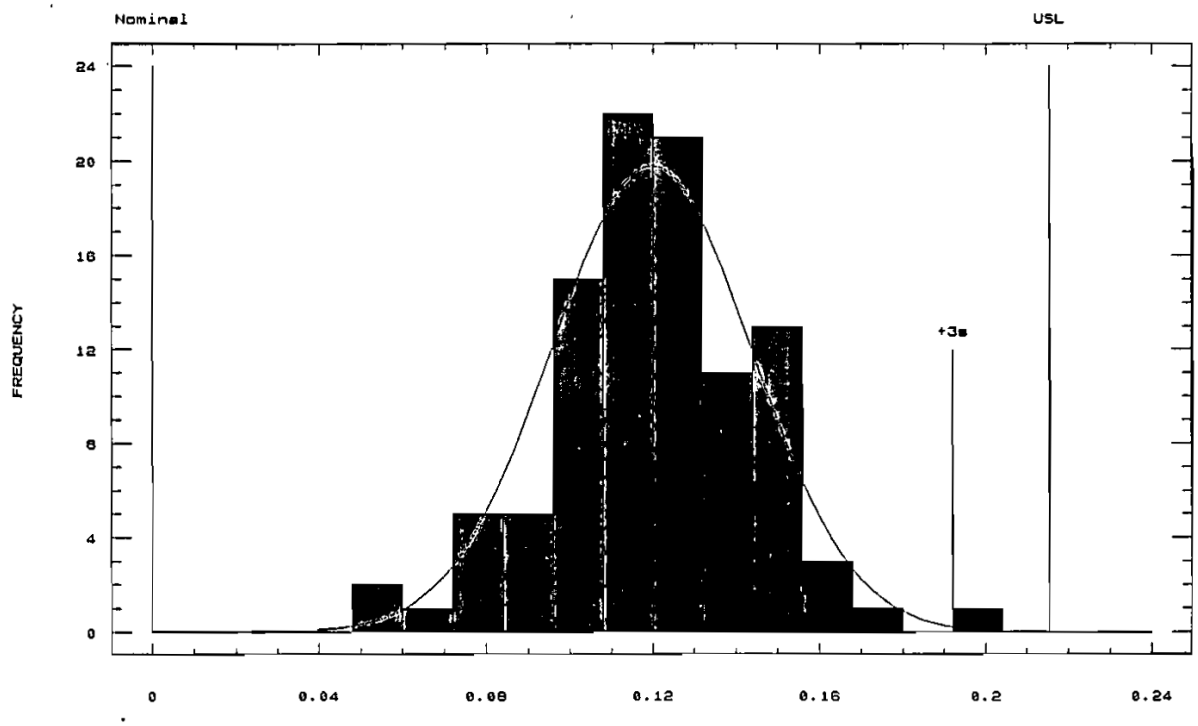


Σχ. 5.5: Ιστόγραμμα μεγέθους του άξονα

X_{barf}=24.0895

σ=0.02522

$$C_{pk} = \frac{24.0895 - 23.975}{3 * 0.02522} = 1.513$$



Σχ. 5.6: Ιστόγραμμα αληθούς θέσης του άξονα

X_{bar}=0.1171

σ=0.02521

$$C_{pk} = \frac{.08 + (24.225 - 24.0895) - 0.1171}{3 * 0.02521} = 1.301$$

Από πίνακες κανονικής κατανομής έχουμε :

Απορριπτέα: 0.00028% (±4σ κατανομη)

Ppm=2.79

Ωστόσο ο τρόπος αυτός προσδιορισμού του C_{pk} δεν είναι ο πλέον ακριβής καθόσον εξετάζουμε δύο εξαρτημένες παραμέτρους, την ανοχή θέσης του τεμαχίου και το μέγεθος του, σαν να είναι ανεξάρτητες (δεν ισχύει καθώς έχουμε τη συνθήκη του πλήρους υλικού). Δηλαδή μπορεί να υπάρχει τεμάχιο το οποίο έχει μεγάλη σχετικά διάμετρο αλλά έχει και μεγάλη ανοχή θέσης η οποία ξεπερνάει τα όρια π.χ. διάμετρος 24.16 mm με τιμή απόκλισης θέσης 0.153mm (εντός των παραπάνω κατανομών). Με την προηγούμενη θεώρηση για το C_{pk} τα όρια τόσο για το μέγεθος όσο και την ανοχή θέσης είναι εντός ορίων και ο άξονας θα θεωρείτο αποδεκτός, ωστόσο το στην πραγματικότητα ο άξονας αυτός είναι απορριπτέος.

Για το λόγο αυτό έχει αναπτυχθεί μια διαφορετική έκφραση για το C_{pk} η οποία περιλαμβάνει την εξάρτηση των δύο αυτών παραγόντων (διάμετρος – θέση). Η θεώρηση αυτή είναι ο συνδυασμός του μεγέθους του χαρακτηριστικού και της θέσης του η οποία είναι σημαντική συνολικά και όχι μεμονωμένα. Το πραγματικό χαρακτηριστικό το οποίο εξετάζουμε είναι η αληθής θέση του χαρακτηριστικού αφού προστεθεί σε αυτό η bonus ανοχή. Έτσι έχουμε την ακόλουθη εξίσωση :

$$\begin{aligned} TP_a &= TP_m - (\text{Bonus tolerance}) \\ &= TP_m - (MMC - X_f) \\ &= TP_m - MMC + X_f \end{aligned} \tag{5}$$

Όπου:

TP_a : προσαρμοσμένη αληθής θέση
TP_m : μετρούμενη αληθής θέση
X_f : μετρούμενο μέγεθος του χαρακτηριστικού

Από την ανωτέρω εξίσωση προκύπτει μια μεταβλητή με μέση τιμή που βασίζεται στις μετρήσεις της αληθούς θέσης και του μεγέθους του χαρακτηριστικού. Έτσι η μέση τιμή θα είναι ίδια με τη μέση τιμή που προσδιορίσθηκε στην αρχική μέθοδο (ΑΒΤ) αλλά στη μέθοδο αυτή έχουμε μεταβολή της τυπικής απόκλισης η οποία θα είναι μεγαλύτερη καθώς η νέα παράμετρος έχει δύο μεταβλητές που συνδράμουν στη μεταβλητότητα της (μεταβλητότητα θέσης και μεταβλητότητα μεγέθους). Έτσι, καθώς η τυπική απόκλιση είναι μεγαλύτερη το C_{pk} θα είναι μικρότερο. Η μείωση αυτή του C_{pk} εξαρτάται από τη μεταβολή του μεγέθους του άξονα σε σχέση με τη μεταβολή της θέσης του και κατά περίπτωση μπορεί να είναι ή να μην είναι σημαντική. Εάν η διακύμανση του μεγέθους του χαρακτηριστικού είναι ένα μικρό ποσοστό της διακύμανσης της θέσης του η μείωση του C_{pk} είναι αμελητέα. Ωστόσο εάν η διακύμανση του μεγέθους του χαρακτηριστικού αποτελεί μεγάλο ποσοστό της διακύμανσης της θέσης του κέντρου του τρύματος τότε η μείωση του C_{pk} είναι ιδιάιτερα σημαντική.

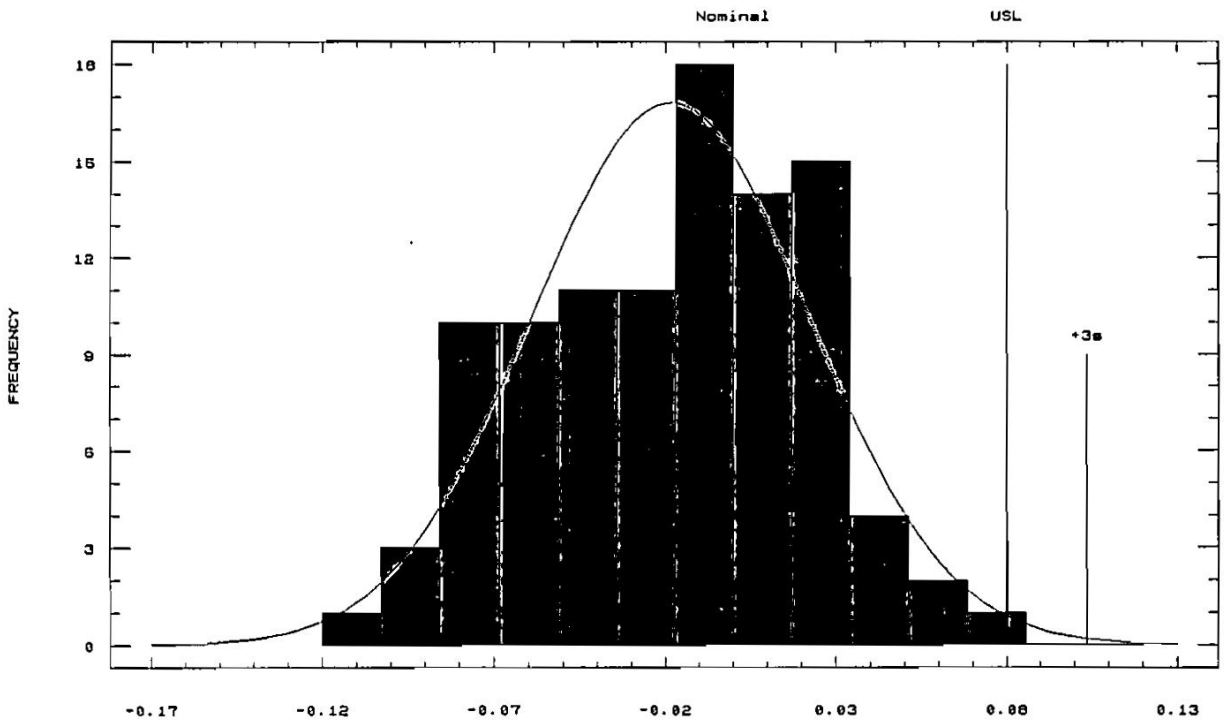
Για δύο ανεξάρτητες μεταβλητές που έχουν κανονική κατανομή η διακύμανση του αθροίσματος τους είναι ίση με το άθροισμα των διακυμάνσεων τους. Έτσι θεωρώντας πως η θέση του άξονα και το μέγεθος του είναι δύο ανεξάρτητες μεταβλητές η νέα διακύμανση της μεταβλητής του αθροίσματος τους είναι:

$$s_i = \sqrt{(s_f^2 + s^2)}$$

Όπου

s_i : παρατηρούμενη τυπική απόκλιση του αθροίσματος των μεταβλητών
s_f : παρατηρούμενη τυπική απόκλιση του μεγέθους του άξονα
s : παρατηρούμενη τυπική απόκλιση της θέσης του άξονα

Χρησιμοποιώντας τα δεδομένα από την αρχική μας μελέτη επάρκειας υπολογίζουμε το TP_a για τα 100 δείγματα τα οποία έχουμε και στη συνέχεια αξιολογούμε την επάρκεια της κατεργασίας χρησιμοποιώντας την ανωτέρω εξίσωση. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο ακόλουθο ιστόγραμμα. Ωστόσο τα αποτελέσματα δεν είναι τόσο ενθαρρυντικά σε σύγκριση με την αρχική μέθοδο, προσεγγίζουν όμως με μεγαλύτερη ακρίβεια την πραγματικότητα. Το ποσοστό των μη αποδεκτών τεμαχίων έχει αυξηθεί κατά 3500 φορές. Βέβαια ακόμα και η περίπτωση του τεμαχίου που αναφέραμε ανωτέρω (d=24.16 mm με ανοχή θέσης 0.153mm) είναι πάλι εντός ορίων καθώς TP_a = 0.153-24.225 +24.16= 0.088 mm



Σχ. 5.7

X_{bar}=-0.0184

σ=0.04061

$$C_{pk} = \frac{0.08\ (USL) - (-0.0184)}{3 * 0.04061} = 0.808$$

Από πίνακες κανονικής κατανομής έχουμε :

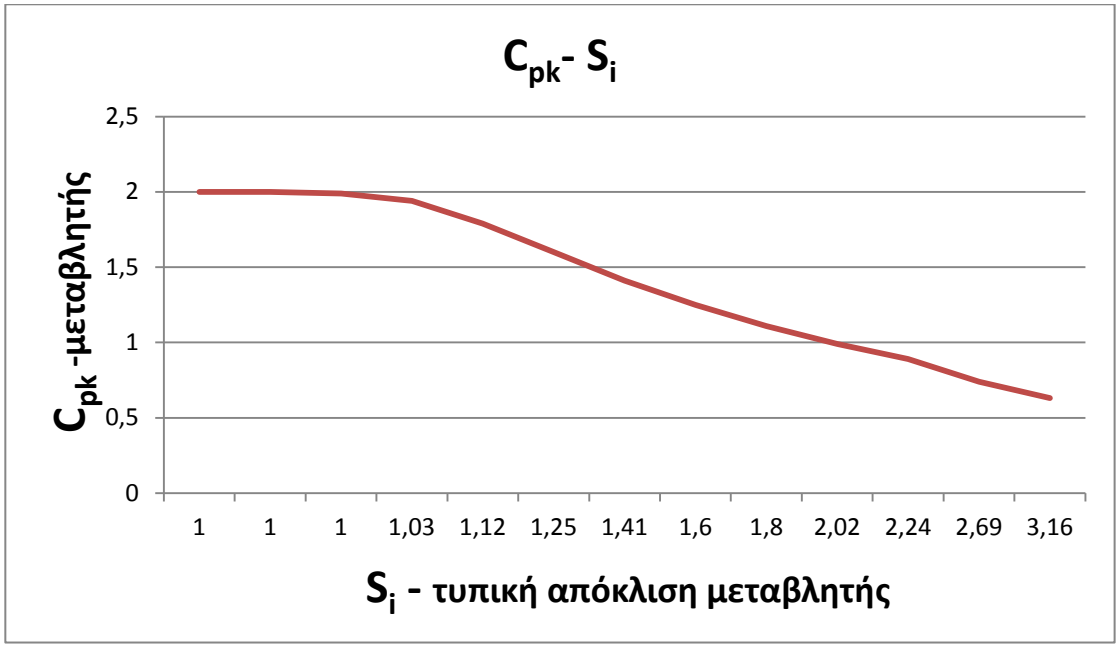
Ελαττωματικά: 0,771% (±4σ κατανομή)

Ppm=7712

Συνοψίζοντας τα ανωτέρω η πλέον κατάλληλη μέθοδος υπολογισμού του C_{pk} για ένα τεμάχιο που χρησιμοποιεί τη συνθήκη της ΑΠΕ είναι να υπολογίσουμε τη γεωμετρική του διάσταση (π.χ. θέση-TP_m), εν συνεχεία το μέγεθος του χαρακτηριστικού (X_f) και τη bonus ανοχή (MMC- X_f) και ύστερα να δημιουργήσουμε τη διαφορά $TP_a = TP_m$ - (Bonus ανοχή) και να εξετάσουμε όλες τις παραμέτρους ως προς αυτή τη μεταβλητή με βάση την οποία θα γίνει και η αξιολόγηση της επάρκειας της κατεργασίας. Η μεταβλητή αυτή όπως αναφέραμε και παραπάνω έχει άνω όριο προδιαγραφής (USL) 0.08mm το οποίο προκύπτει όταν το TP_m παίρνει την οριακή του τιμή που είναι (Bonus tolerance) +0.08mm.

Στην ανωτέρω περίπτωση είδαμε πως εφαρμόζεται η μέθοδος αυτή στην ανοχή θέσης η οποία επηρεάζεται από το μέγεθος του χαρακτηριστικού καθόσον πρέπει να πληροί την αρχή του πλήρους υλικού (MMC). Ωστόσο μπορεί να εφαρμοστεί και σε άλλα τεμάχια τα οποία έχουν διαφορετικά χαρακτηριστικά π.χ. ομοκεντρικότητας και παραλληλότητας. Στον επόμενο πίνακα φαίνεται πως μεταβάλλεται η τυπική απόκλιση και το C_{pk} της νέας αυτής μεταβλητής που καθορίζουμε ανάλογα με τη μεταβολή της τυπικής απόκλισης του μεγέθους του χαρακτηριστικού θεωρώντας την τυπική απόκλιση της θέσης ίση με 1.

s	s_f	s_t	Cpk	PERCENT CHANGE IN Cpk
1.00	0.0	1.00	2.00	0.0
1.00	0.05	1.00	2.00	−0.1
1.00	0.10	1.00	1.99	−0.5
1.00	0.25	1.03	1.94	−3.0
1.00	0.50	1.12	1.79	−10.6
1.00	0.75	1.25	1.60	−20.0
1.00	1.00	1.41	1.41	−29.3
1.00	1.25	1.60	1.25	−37.5
1.00	1.50	1.80	1.11	−44.5
1.00	1.75	2.02	0.99	−50.4
1.00	2.00	2.24	0.89	−55.3
1.00	2.50	2.69	0.74	−62.9
1.00	3.00	3.16	0.63	−68.4



Πίν. 5.3: Μεταβολή του C_{pk} σε σχέση με τη μεταβολή του s_i

Παρόμοιοι υπολογισμοί μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ανοχές οι οποίες καθορίζονται με την αρχή του ελάχιστου υλικού (LMC) χωρίς όμως να αλλάξει ο βασικός τρόπος στατιστικής ανάλυσης της μεταβλητής. Επίσης η μέθοδος αυτή μπορεί να εφαρμοστεί στα πακέτα στατιστικού λογισμικού (SPC software) κάνοντας άμεσα τον υπολογισμό του C_{pk}. Η μέθοδος αυτή είναι αρκετά αποτελεσματική και τα αποτελέσματα που δίνει όπως είδαμε στο ανωτέρω παράδειγμα προσεγγίζουν περισσότερο την πραγματικότητα και τις απαιτήσεις του προιόντος.

5.5 Αποδεκτές τιμές δεικτών επάρκειας κατεργασίας

Στο σημερινό βιομηχανικό περιβάλλον οι συνήθεις – γενικά αποδεκτές τιμές για τους δείκτες επάρκειας κατεργασίας C_p και C_{pk} είναι:

$C_p > 1.33$
$C_{pk} > 1.33$

Επιλέγεται αυτή η τιμή να είναι 1.33 για διάφορους λόγους. Οι κατεργασίες είναι σπάνια πραγματικά στατικές και η τιμή επιτρέπει μικρές αλλαγές της διαδικασίας. Για παράδειγμα, εάν το C_{pk} αλλάξει από 1,0 σε 0.67, η διαδικασία οδηγείται σε αύξηση από 0.27% σε 4.55% των μη-συμβατών τεμαχίων.

Equivalent C_p	Capability %
0.50	86.64
0.62	93.50
0.68	96.00
0.75	97.50
0.81	98.50
0.86	99.00
0.91	99.35
1.00	99.73
1.33	99.994

Πίν. 5.4.: Ποσοστό αποδοχής τεμαχίων συναρτήσει του C_p

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΧΡΗΣΗ ΑΠΥ ΓΙΑ ΑΥΞΗΣΗ ΤΩΝ ΑΝΟΧΩΝ ΚΑΙ ΜΕΙΩΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΡΡΙΠΤΟΜΕΝΩΝ ΤΕΜΑΧΙΩΝ

6.1 Εισαγωγή

Όσο μεγαλύτερη διαστασιολογική και γεωμετρική ακρίβεια έχει ένα τεμάχιο τόσο υψηλότερη είναι η ποιότητα του. Η ακρίβεια αυτή προσδιορίζεται στα μηχανολογικά σχέδια με κατάλληλα σύμβολα και αποτελεί ιδιαίτερα σημαντικό στοιχείο που επηρεάζει καθοριστικά τον συνολικό σχεδιασμό της παραγωγής του προϊόντος *(process planning)*. Όσο πιο "σφιχτή" είναι κάποια ανοχή τόσο αυξάνεται το κόστος παραγωγής με εκθετικό ρυθμό. Οι παράγραφοι που ακολουθούν εστιάζονται στη διαπίστωση ότι η κατάλληλη ερμηνεία και χρήση της ΑΠΕ (MMC, ISO 2692) μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική μείωση του κόστους παραγωγής.

ΑΠΕ είναι η κατάσταση του εξεταζόμενου χαρακτηριστικού μεγέθους κατά την οποία αυτό παίρνει την οριακή του τιμή, όπου η ποσότητα του υλικού παίρνει τη μέγιστη τιμή της, π.χ. για οπή αναφερόμαστε στη μικρότερη διάμετρο ενώ για άξονα αναφερόμαστε στη μέγιστη διάμετρο (ISO 2692). Κατά συνέπεια, μπορούμε να ορίσουμε ως μέγιστο μέγεθος του υλικού (MMS-Maximum Material Size), τη διάσταση που καθορίζει την MMC υλικού ενός χαρακτηριστικού. Σε κάθε μηχανολογικό στοιχείο μπορούμε να προσδιορίσουμε το μέγιστο εικονικό μέγεθος του τεμαχίου (MMVS-Maximum Material Virtual Condition) λαμβάνοντας υπόψη το MMS και τη γεωμετρική ανοχή που ακολουθείται από το σύμβολο Ⓜ. Η αρχή του πλήρους υλικού μπορεί να εφαρμοστεί μόνο σε τεμάχια τα οποία παρουσιάζουν αξονική συμμετρία η μέσο επίπεδο (κυλινδρικά χαρακτηριστικά ή χαρακτηριστικά τα οποία αποτελούνται από δύο παράλληλα επίπεδα). Δεν μπορεί να εφαρμοστεί σε μια επίπεδη επιφάνεια ή σε μια γραμμή σε μια επιφάνεια. Στην περίπτωση των αξόνων, το MMVS είναι ίσο με το MMS συν τις γεωμετρικές ανοχές, ενώ στα τρύματα υπολογίζεται αφαιρώντας τη γεωμετρική ανοχή.

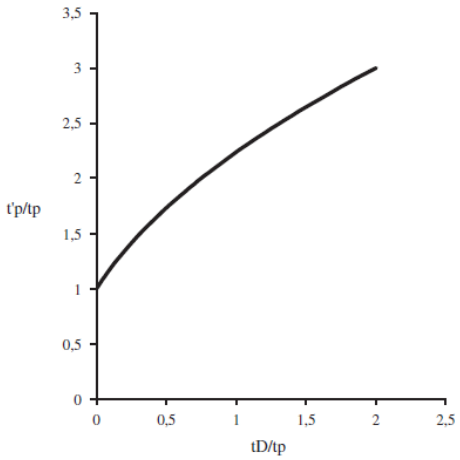
Εκτός από τη συχνή χρήση της MMC σε χαρακτηριστικά στοιχεία μπορεί επίσης αυτή να εφαρμοστεί *σε στοιχεία αναφοράς (datum)*. Όταν εφαρμόζεται σε ένα στοιχείο αναφοράς η MMC, τότε ο μετρητικός εξοπλισμός που χρησιμοποιείται είναι κατάλληλος για να προσομοιάσει το αντίστοιχο στοιχείο αναφοράς στο οποίο αντιστοιχεί το μέγιστο υλικό. Σε κάθε περίπτωση, το μέγεθος της αντίστοιχης γεωμετρικής επιφάνειας (προσομοιωμένης επιφάνειας) καθορίζεται από το MMC του ορίου του μεγέθους του δεδομένου χαρακτηριστικού ή από το MMVS, όπου εφαρμόζεται. Η χρήση της συνθήκης του MMC στα στοιχεία αναφοράς είναι ένας τεχνολογικά απολύτως αποδεκτός τρόπος για να αυξηθεί τελικά το μέγεθος της ανοχής και κατά συνέπεια το ποσοστό αποδοχής των τεμαχίων με συνακόλουθη μείωση του κόστους παραγωγής.

6.2 Βιβλιογραφική Επισκόπηση

Έχει πραγματοποιηθεί σημαντική σχετική έρευνα σχετικά με το πώς η εφαρμογή της ΜΜC στο χαρακτηριστικό στοιχείο μπορεί να μειώσει το ποσοστό απόρριψης βιομηχανικών τεμαχίων και να αυξήσει τον δείκτη επάρκειας της κατεργασίας (Διπλάρης, Σφαντζικόπουλος, 2006). Η χρήση της ΜΜC συμβάλλει στην χαλάρωση των ανοχών θέσης και, κατά συνέπεια, σε σημαντική μείωση του κατασκευαστικού κόστους, δεδομένου ότι επιτρέπει στα αρχικά στάδια σχεδιασμού της διαδικασίας, τον αναλυτικό υπολογισμό και τη συνακόλουθη υιοθέτηση χαμηλότερου συντελεστή επάρκειας (CP) από αυτόν που εφαρμόζεται συμβατικά για την ανοχή θέσης. Συγκεκριμένα, η ζώνη ανοχής θέσης για ένα χαρακτηριστικό στοιχείο με διαστασιολογικές και γεωμετρικές ανοχές μπορεί να αυξηθεί σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση (Διπλάρης, Σφαντζικόπουλος 2006):

$$t'_p = t_p(1 + 4\frac{t_D}{t_p})^{1/2} \tag{6.1}$$

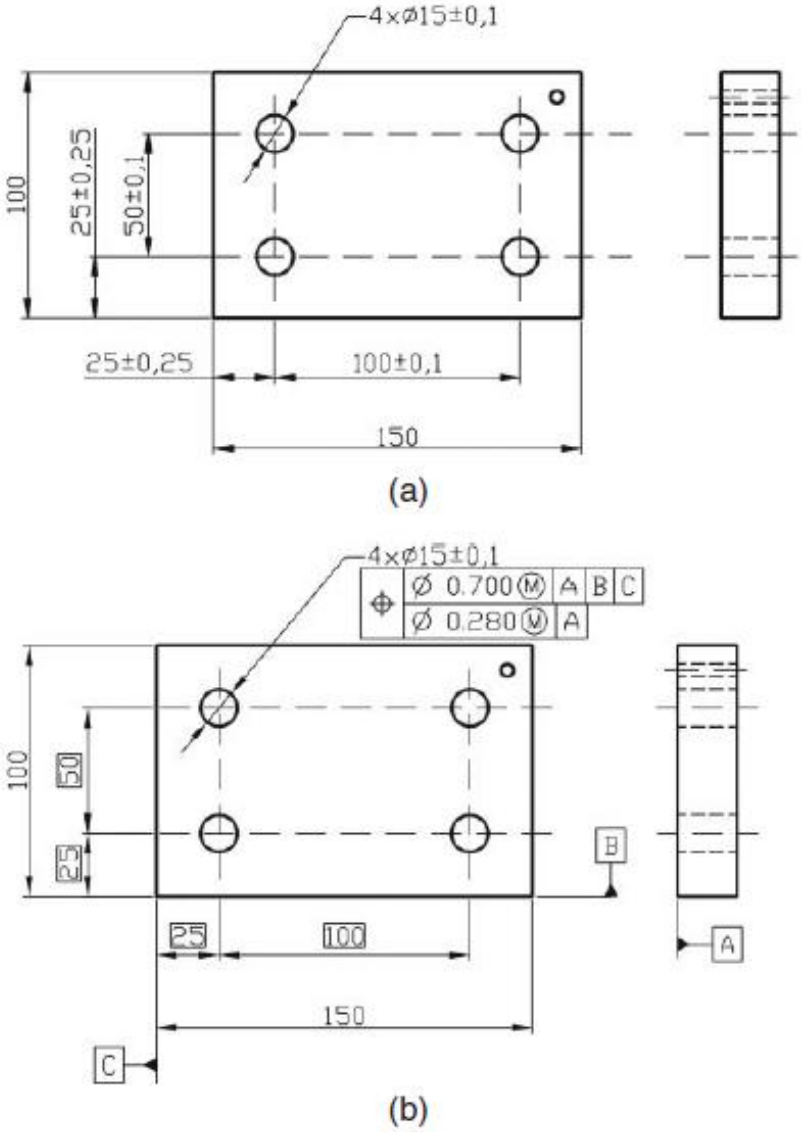
Από την παραπάνω σχέση μπορεί να συναχθεί ότι το μέγεθος της αποτελεσματικής ανοχής θέσης t'_p που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για το σχεδιασμό της διαδικασίας κατεργασίας είναι συνάρτηση του λόγου t_D/t_P. Όσο μεγαλύτερη είναι η αναλογία, τόσο μεγαλύτερη είναι η χαλάρωση της αρχικής απαίτησης για την ακρίβεια θέσης της οπής και επομένως η μείωση του κόστους της διαδικασίας (**Σχ. 6.1**).



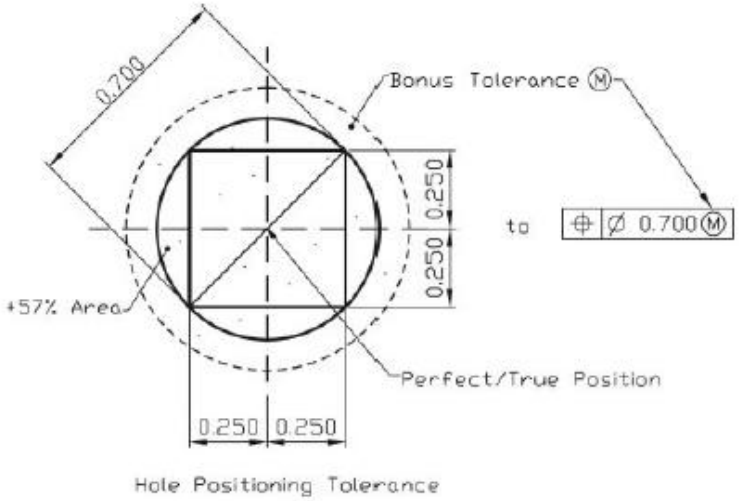
Σχ. 6.1:Αύξηση ανοχής θέσης

Επιπρόσθετα, έχει επίσης δειχθεί (Διπλάρης, Σφαντζικόπουλος 2006) ότι η χρήση του ΜΜC σε μηχανολογικά τεμάχια μπορεί να οδηγήσει σε μείωση του CP_Δ διατηρώντας τον ίδιο ρυθμό αποδοχής και κατά συνέπεια σε μείωση του κόστους κατασκευής. Λόγω όλων αυτών των δυνατοτήτων που προσφέρει η ΜΜC στον μηχανικό-σχεδιαστή κατά το σχεδιασμό του προϊόντος, είναι μια χρήσιμη πρακτική που χρησιμοποιείται ευρέως σε μηχανολογικά τεμάχια. Εξάλλου όταν χρησιμοποιούνται συντεταγμένες, Σχ. 6.2 (α), η θέση ενός χαρακτηριστικού (π.χ. οπή) πρέπει να βρίσκεται εντός της ορθογώνιας ζώνης της οποίας το μέγεθος καθορίζεται από τις ανοχές διαστάσεων (Σχ. 6.3). Εάν αντίθετα χρησιμοποιείται μια ανοχή θέσης, Σχ. 6.2(β), τότε ο άξονας συμμετρίας του χαρακτηριστικού θα πρέπει να βρίσκεται στο εσωτερικό του κύκλου εντός του οποίου είναι εγγεγραμμένο το ορθογώνιο αυτό. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η προκύπτουσα

57% αύξηση της διαθέσιμης περιοχής δεν επηρεάζει την απαιτούμενη ακρίβεια. Μια πρόσθετη χαλάρωση ανοχής μπορεί να επιτευχθεί περαιτέρω με τη μπόνους ανοχή λόγω MMC (Σχ 6.3).



Σχ. 6.2: Καθορισμός ανοχών με βάση τις συντεταγμένες και σύνθετη ανοχή θέσης



Σχ. 6.3: Ανοχή θέσης και bonus MMC

6.3 ΑΠΥ - Μετρητικές Μέθοδοι

Είναι ευρέως αποδεκτό ότι, όσον αφορά τον ποιοτικό έλεγχο, ο βέλτιστος τρόπος για την επαλήθευση της συμμόρφωσης ενός τεμαχίου ως προς μια γεωμετρική απαίτηση είναι με τη χρήση πρότυπων/«λειτουργικών» τεμαχίων σταθερών διαστάσεων ***(fixed limit-gages)***. Τα τεμάχια αυτά έχουν διαστάσεις που αντιστοιχούν στη *«χειρότερη κατάσταση»* του προς συναρμογή τεμαχίου. Εάν το ελεγχόμενο τεμάχιο ταιριάζει/ συναρμόζει στο λειτουργικό τεμάχιο, ο επιθεωρητής μπορεί να είναι βέβαιος ότι πληροί τις απαιτήσεις του σχεδίου. Τα πρότυπα τεμάχια χρησιμοποιούνται εύκολα από προσωπικό με ελάχιστες δεξιότητες ελέγχου και μπορούν να μειώσουν σημαντικά το συνολικό χρόνο επιθεώρησης. Ωστόσο υφίστανται ορισμένα μειονεκτήματα κατά την χρήση των πρότυπων τεμαχίων: είναι υψηλού κόστους (σχεδιασμός και κατασκευή) και απαιτούν ότι ένα τμήμα της ανοχής του ελεγχόμενου προϊόντος θα «θυσιαστεί» *(συνήθως περίπου 10%)* για να παρέχει ανοχή για την παραγωγή του ίδιου του gage. Για αυτούς τους λόγους η χρήση των πρότυπων τεμαχίων μετρητών περιορίζεται στις περιπτώσεις όπου μια μεγάλη ποσότητα τεμαχίων θα πρέπει να ελεγχθεί και το όφελος από τον μειωμένο χρόνο ελέγχου θα αντισταθμίσει το υψηλό κόστος σχεδιασμού/παραγωγής του gage.

Ο έλεγχος των γεωμετρικών ανοχών για τη συντριπτική πλειοψηφία των παραγόμενων εξαρτημάτων επιτυγχάνεται μέσω της χρήσης των δεδομένων που συλλέγονται είτε με συμβατικά όργανα χειρός (μικρόμετρα, παχύμετρα κ.α.), ή ηλεκτρονικά με χρήση μετρητικών μηχανών CMM. Οι δύο μέθοδοι απαιτούν από τον επιθεωρητή να «κλειδώσει» το ελεγχόμενο τεμάχιο σε ένα πλαίσιο αναφοράς, όπως ορίζεται από το κατασκευαστικό του σχέδιο και να λάβει τις πραγματικές μετρήσεις των κατασκευασμένων χαρακτηριστικών. Ο επιθεωρητής θα πρέπει στη συνέχεια να καθορίσει τις "X" και "Y" αποκλίσεις των συντεταγμένων για τα χαρακτηριστικά που μετρώνται από τη σύγκριση των πραγματικών τιμών μέτρησης με τις βασικές/ονομαστικές τιμές που αναφέρονται στο σχέδιο. Η μέτρηση με τη χρήση «ελεγκτήρων χαρτιού» (paper gaging) είναι μία από τις τεχνικές ελέγχου που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να εξασφαλιστεί αν το παραγόμενο χαρακτηριστικό συμμορφώνεται με την απαίτηση της μηχανολογικής σχεδίασης. Η τεχνική αυτή, που αναφέρεται επίσης ως γραφική ανάλυση και επιθεώρηση, παρέχει γεωμετρική επαλήθευση μέσω γραφικής παράστασης και αξιολόγησης των συλλεγόμενων δεδομένων. Οι καρτεσιανές αποκλίσεις που προκύπτουν από τη διαδικασία της μέτρησης αποτυπώνονται σε ένα πλέγμα συντεταγμένων, παρέχοντας μια γραφική "εικόνα" των παραγόμενων χαρακτηριστικών θέσεων σε σχέση με τη θεωρητική τους αληθή θέση.

Το κύριο μειονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι ότι απαιτεί περισσότερο χρόνο και προσπάθεια ενώ και ο επιθεωρητής πρέπει να είναι εξειδικευμένος για να λάβει τις πραγματικές μετρήσεις και να τις αποτυπώσει στο χαρτί. Για το λόγο αυτό η μέθοδος της γραφικής ανάλυσης χρησιμοποιείται συνήθως μόνο όταν η ποσότητα των εξαρτημάτων που πρέπει να ελεγχθούν είναι μικρή, ή όταν υπάρχουν τεμάχια που πρέπει να ελέγχονται μόνο ως τυχαία δειγματοληψία. Επιπρόσθετα, η διάδοση των μετρητικών μηχανών CMM και η εξέλιξη του λογισμικού τους τείνουν να ενσωματώσουν την εν λόγω μέθοδο σε υπολογιστικά περιβάλλοντα που προσφέρονται άμεσα στον χρήστη.

6.4 Θεωρητική Ανάλυση

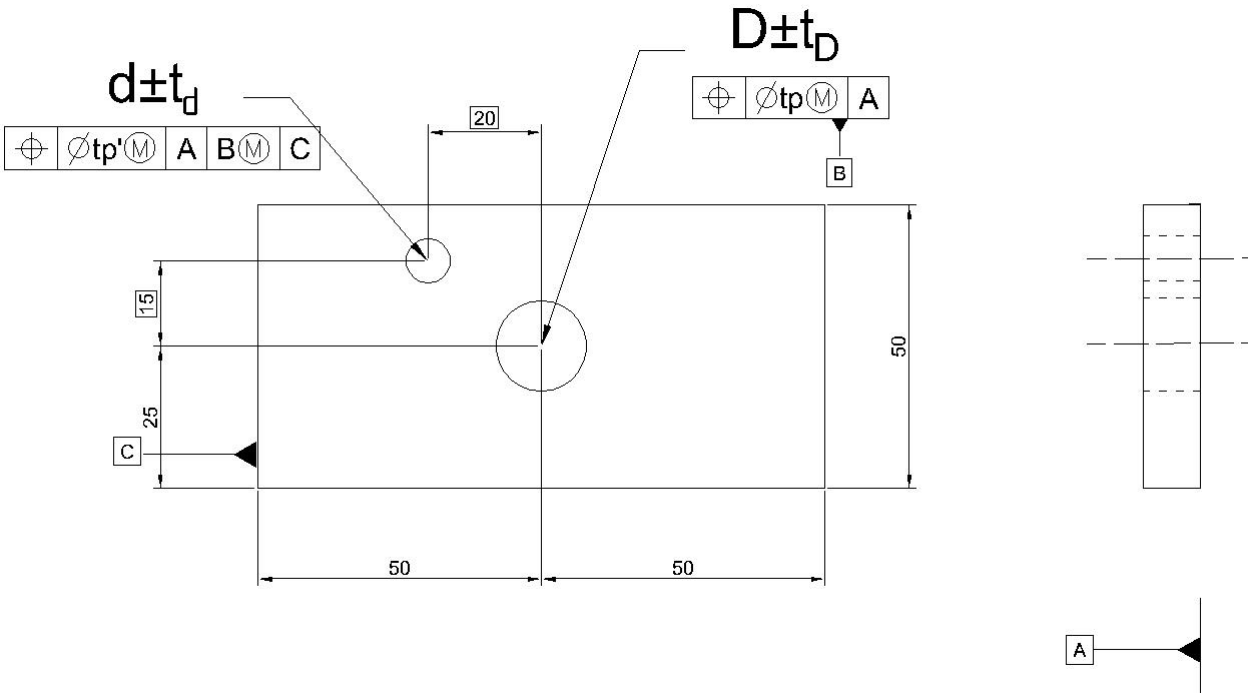
Θα εξετάσουμε δύο παρόμοια σχέδια για το ίδιο τεμάχιο, όπου το πρώτο (**Σχ. 6.4**) έχει MMC στην επιφάνεια/ στοιχείο αναφοράς (datum) ενώ το άλλο όχι (**Σχ. 6.**5). Η επιθεώρηση θα γίνει με τη χρήση γραφικής μεθόδου (paper gage) μετά τη συμπλήρωση του Πινάκα μετρήσεων (**Σχ. 6.6**). Κατά την έναρξη της διαδικασίας μετράμε τις διαστάσεις της κύριας κεντρικής οπής (στοιχείο αναφοράς B). Όπως μπορούμε να δούμε από τις αποδιδόμενες ανοχές, εκτός από την ανοχή διαστάσεων που έχει για τη διάμετρο του έχει επίσης ανοχή θέσης. Η ανοχή θέσης ακολουθεί την απαίτηση MMC γι 'αυτό θα πρέπει επίσης να λαμβάνεται υπόψη στους υπολογισμούς μας. Ας θεωρήσουμε ότι η διάμετρος της μεγάλης οπής είναι D_1 με $D\text{-}t_d \leq D_1 \leq D + t_d$ με καθετότητα του t_{P1}, όπως φαίνεται στο **Σχ. 6.7**. Σε όλες τις μετρήσεις θεωρούμε το κέντρο του συστήματος συντεταγμένων ως προς το κέντρο της μεγάλης κεντρικής οπής.

Το μέγεθος που θα πρέπει πρώτα να μετρήσουμε είναι το δεδομένο πραγματικό μέγεθος της συναρμογής (datum actual mating size). Το δεδομένο πραγματικό μέγεθος αντιπροσωπεύει την χειρότερη περίπτωση συναρμογής για ένα χαρακτηριστικό μέγεθος (σχήμα 6.8). Έτσι, στην περίπτωση μας το πραγματικό μέγεθος συναρμογής είναι $D_1\text{-}t_{P1}$ (D_1 είναι η μετρούμενη διάμετρος του τμήματος και T_{P1} η ανοχή θέσεως), ενώ το δεδομένο μέγιστο εικονικό μέγεθος είναι $D\text{-}t_D\text{-}tp$. Αν $D_1\text{-}t_{P1} > D\text{-}t_D\text{-}tp$ τότε έχουμε δυνατότητα μετακίνησης (datum shift allowance) που ισούται με κύκλο με διάμετρο

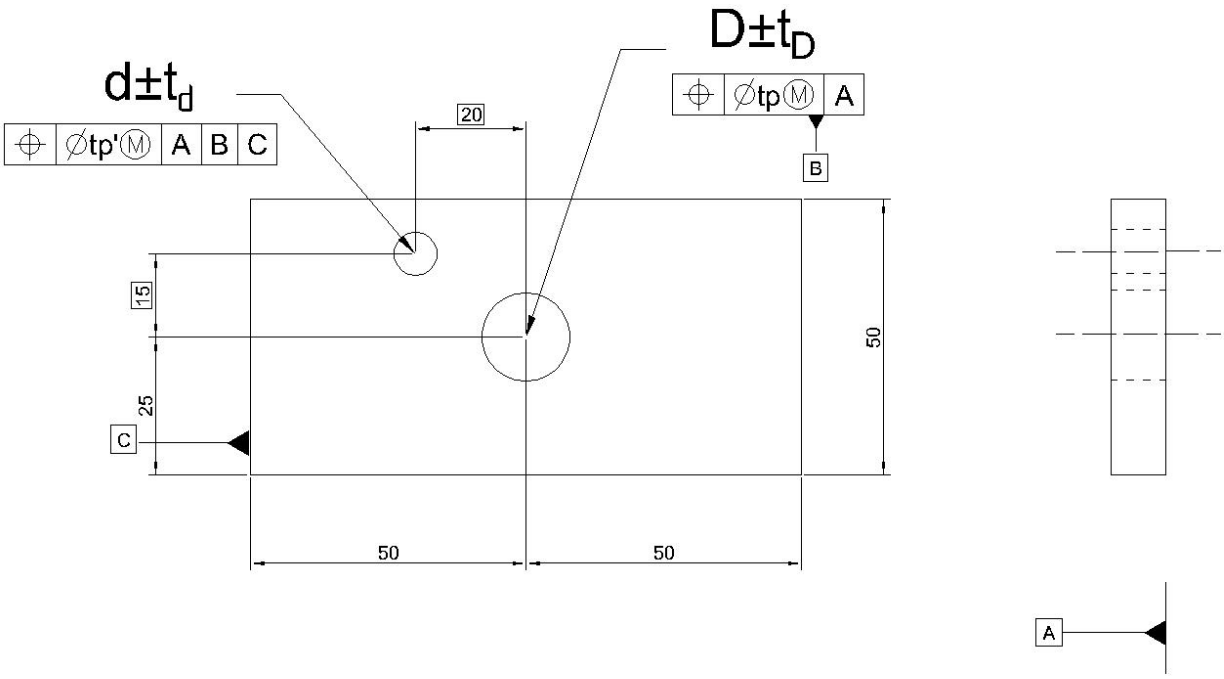
$$(D_1\text{-}t_{P1}) - (D\text{-}t_D\text{-}tp) \qquad (6.2)$$

Datum shift allowance είναι ο τομέας στον οποίο το δεδομένο χαρακτηριστικό (στην περίπτωσή μας το σύστημα συντεταγμένων της κύριας οπής) μπορεί να μετακινείται, αν το χαρακτηριστικό δεν βρίσκεται στη MMC. Ωστόσο, σε αντίθεση με τη "μπόνους" ανοχή, η δυνατότητα μετακίνησης δεν είναι προσθετική στην ανοχή θέσης που υποδεικνύεται από το χαρακτηριστικό πλαίσιο ελέγχου για τις οπές. Αυτή η δυνατότητα μετακίνησης μακριά από το κέντρο του προσομοιωτή δεν μπορεί να εφαρμοστεί κατά τον έλεγχο τεμαχίων χωρίς MMC όπως αυτά στο σχήμα 6.5.

Μετά την ολοκλήρωση των μετρήσεων στην κεντρική οπή κινούμαστε προς τη μικρότερη οπή και μετράμε τη διάμετρό της και την κατά X και Y απόστασή της από την κύρια οπή όπως φαίνεται στο σχετικό έντυπο ελέγχου. Χρησιμοποιώντας τα δεδομένα από το έντυπο ελέγχου, η πληροφορία μεταφέρεται στη γραφική παράσταση και αποτυπώνονται οι οπές σε ένα πλέγμα συντεταγμένων (το οποίο αντιπροσωπεύει τις μετρήσεις του επιθεωρητή), όπως φαίνεται στο **Σχ. 6.9**. Το κέντρο αυτού του πλέγματος αποτελεί το κέντρο του πλαισίου αναφοράς. Οι αποκλίσεις των θέσεων των οπών σε σχέση με την πραγματική τους θέση απεικονίζονται στο διάγραμμα στους άξονες X και Y με βάση τις μετρήσεις του επιθεωρητή.



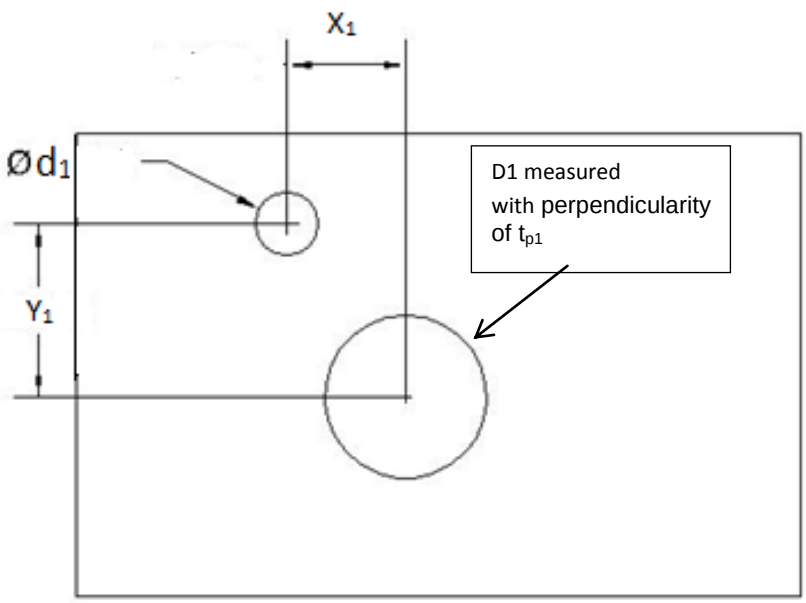
Σχ. 6.4: Μηχανολογικό σχέδιο με στοιχείο αναφοράς σε MMC



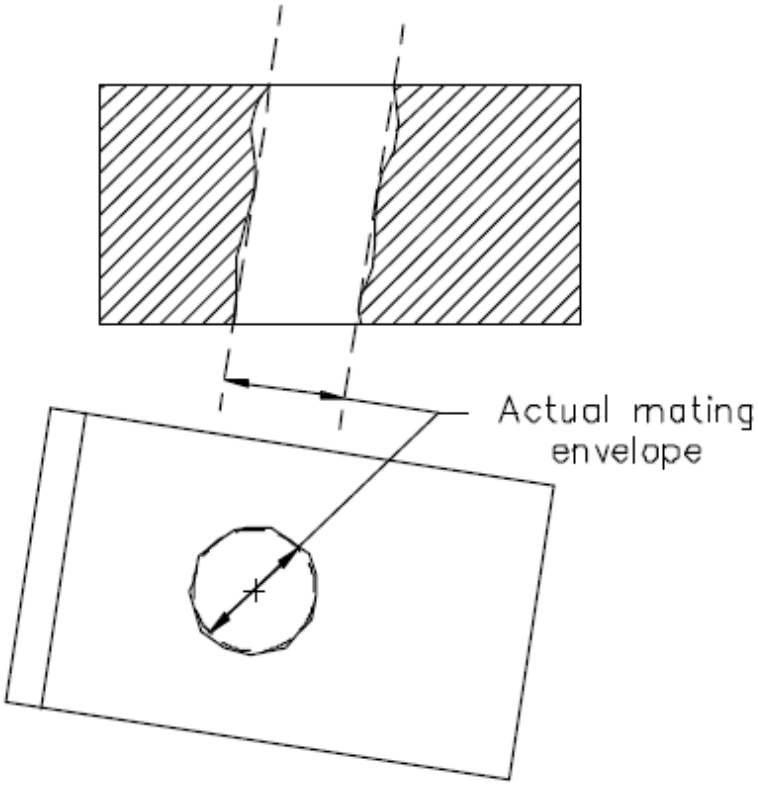
Σχ. 6.5: Μηχανολογικό σχέδιο με στοιχείο αναφοράς χωρίς MMC

FEATURE (small hole)	FEATURE SIZE			ALLOWABLE TOLERANCE	X LOCATION			Y LOCATION		
	MMC	ACTUAL	DEV		BASIC	ACTUAL	DEV	BASIC	ACTUAL	DEV
$d \pm t_d$	$d-t_d$	d_1	$d_1-(d-t_d)$	$d_1-(d-t_d-t_{p'})$	X	X_1	X_1-X	Y	Y_1	Y_1-Y

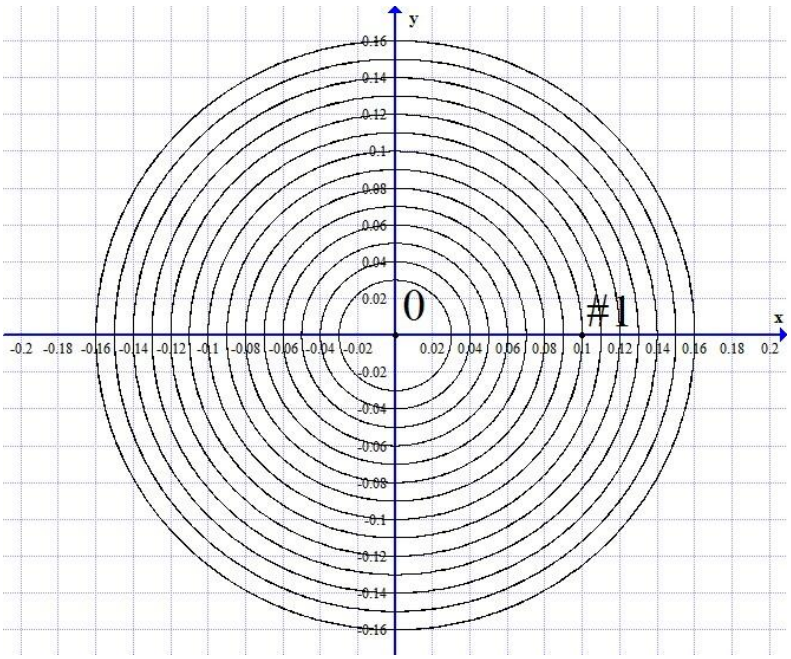
Σχ. 6.6: Πίνακας μετρήσεων



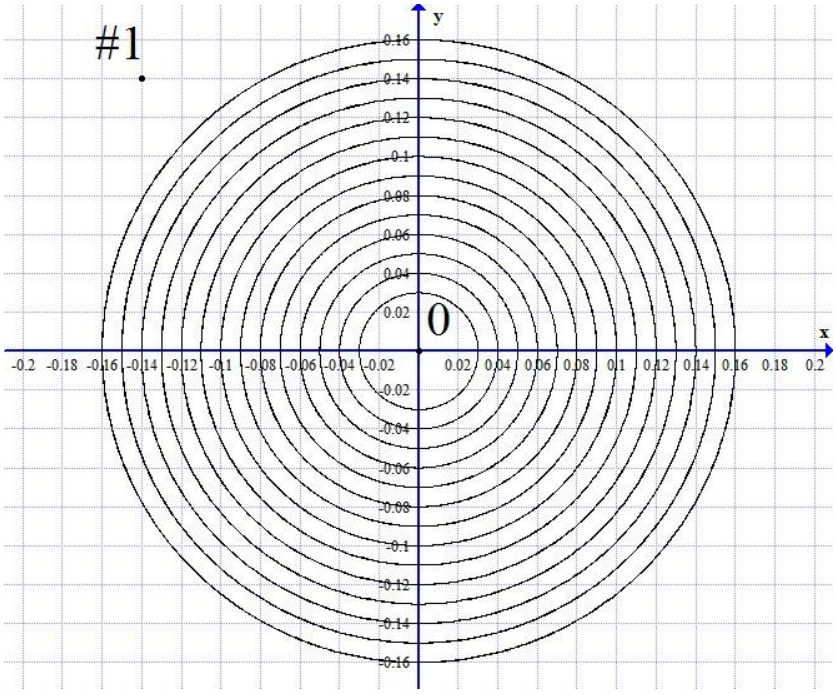
Σχ. 6.7



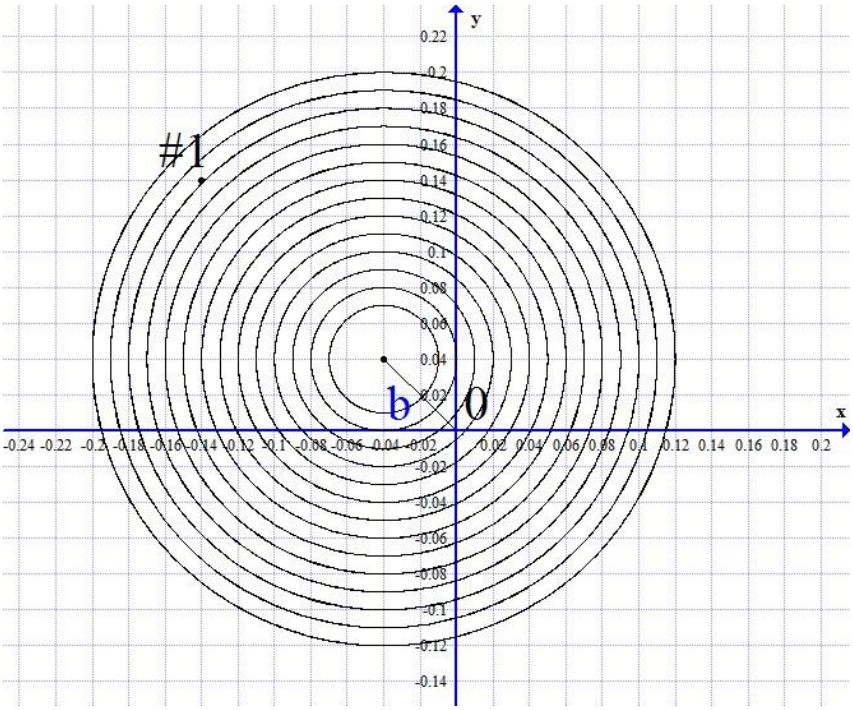
Σχ. 6.8: Πραγματικό μέγεθος συναρμογής



Σχ. 6.9: Οπή ευρισκόμενη εντός ορίων



Σχ. 6.10: Οπή ευρισκόμενη εκτός ορίων



Σχ. 6.11: Τοποθέτηση της οπής εντός ορίων μετά μετακίνηση του διαγράμματος

Μόλις η οπή έχει σχεδιαστεί γραφικά επί του πλέγματος συντεταγμένων, ένα πολικό πλέγμα (που αντιπροσωπεύει τις κυκλικές ζώνες ανοχής) τοποθετείται πάνω στο πλέγμα συντεταγμένων όπως φαίνεται στο **Σχ. 6.9** (επάνω). Αυτό το πολικό πλέγμα έχει μία εξωτερική διάμετρο η οποία είναι ίση με d_1-(d-t_D-tp), όπως εμφανίζεται στην έκθεση επιθεώρησης. Ο επιθεωρητής κατόπιν ελέγχει ότι το σημείο του κέντρου βρίσκεται εντός της επιτρεπόμενης ανοχής θέσης του. Εάν εμπίπτει εντός των ζωνών, το τεμάχιο γίνεται αποδεκτό.

Αλλά, για το παράδειγμα που φαίνεται στο **Σχ. 6.10**, η οπή #1 βρίσκεται έξω από την επιτρεπόμενη ανοχή θέσης επέτρεψε την οπή όταν το πολικό πλέγμα είναι κεντραρισμένο στο πλέγμα συντεταγμένων. Σε αυτή την περίπτωση, το τεμάχιο απορρίπτεται για την περίπτωση του σχήματος 2, ενώ για την περίπτωση του σχήματος 1 έχουμε να κάνουμε κάποιες επιπλέον μετρήσεις. Συγκρίνοντας το πραγματικό μέγεθος του δεδομένου χαρακτηριστικού B με το εικονικό του μέγεθος παρατηρούμε ότι υπάρχει μια (D_1-t_{P1}) - (D-t_D-tp) διαφορά μεταξύ των δύο.

Η διαφορά αυτή αντικατοπτρίζει την ανοχή μετακίνησης για το δεδομένο χαρακτηριστικό. Αυτή η επιτρεπόμενη μετατόπιση μπορεί να οδηγήσει στην επαλήθευση της οπής μετακινώντας το πολικό πλέγμα έτσι ώστε το κέντρο του πλέγματος συντεταγμένων να παραμένει εντός της ζώνης με διάμετρο (D_1- t_{P1}) - (D-t_D-tp) όπως φαίνεται στο Σχ.6.11. Αυτή η μετακίνηση μεταξύ των δύο πολικών διαγραμμάτων αντιπροσωπεύει την επιτρεπόμενη μετατόπιση που προέρχεται από την μετακίνηση του δεδομένου χαρακτηριστικού από την εικονική κατάσταση.

Ας εξετάσουμε την περίπτωση όπου η οπή είναι έξω από το πολικό πλέγμα, όπως φαίνεται στο σχήμα 6.10. Ας θεωρήσουμε ως α την απόσταση μεταξύ του αρχικού κέντρο 0 του συστήματος συντεταγμένων από το σημείο No1. Για την απόσταση αυτή έχουμε:

$$a \geq \frac{d_1 - (d - t_d - t_{p\prime})}{2} \tag{6.3}$$

Η μέγιστη επιτρεπόμενη ανοχή μετατοπίσεως του συστήματος συντεταγμένων είναι $\frac{(D_1 - t_{P1}) - (D - t_D - t_P)}{2}$, όπως προφανώς επιλέγουμε να κινηθούμε κατά μήκος της γραμμής που συνδέει το αρχικό σημείο 0 με το σημείο 1. Εάν:

$$a > \frac{d_1 - (d - t_d - t_{p\prime})}{2} + \frac{(D_1 - t_{P1}) - (D - t_D - t_P)}{2}$$

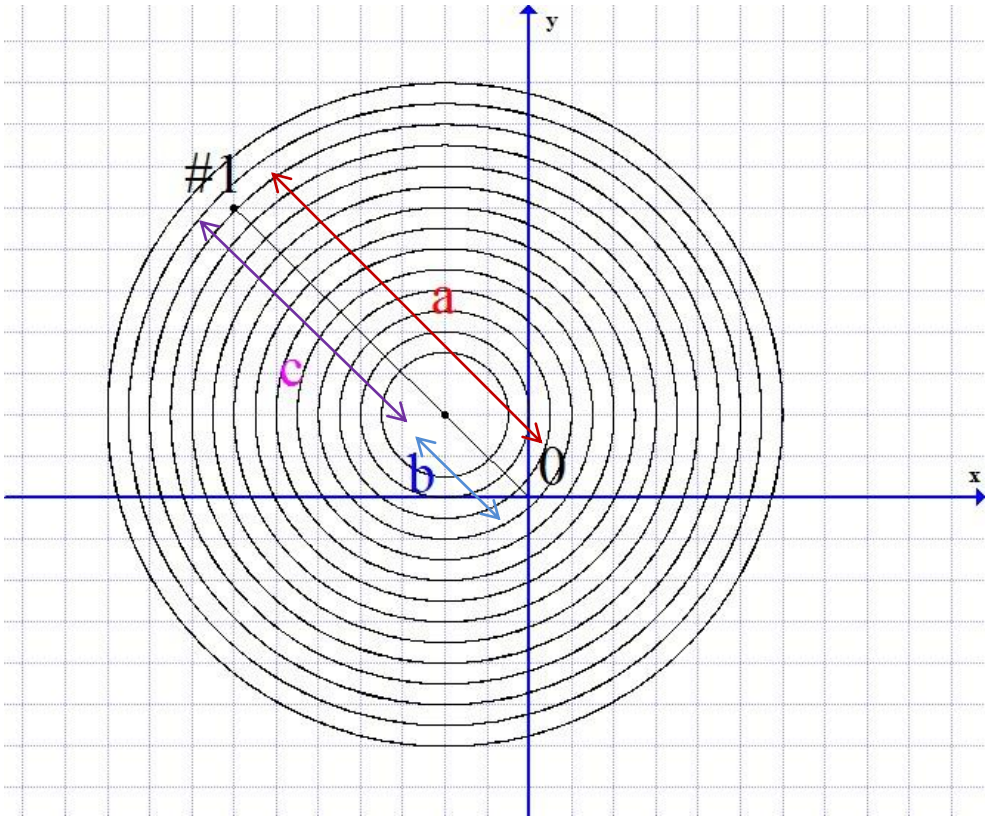
τότε δεν υπάρχει επιτρεπόμενη ανοχή μετατόπισης του συστήματος συντεταγμένων που μπορεί να γίνει και να οδηγήσει σε συμμόρφωση με την απαίτηση. Έτσι, το τεμάχιο απορρίπτεται. Διαφορετικά, εάν:

$$a \leq \frac{d_1 - (d - t_d - t_{p\prime})}{2} + \frac{(D_1 - t_{p1}) - (D - t_d - t_p)}{2}$$

τότε υπάρχει μια μετατόπιση του συστήματος συντεταγμένων b που μπορεί να γίνει προκειμένου να είναι εντός των ορίων. Μετά την ολοκλήρωση αυτής της μετατόπισης από τη γεωμετρία του σχήματος 12 έχουμε την ακόλουθη εξίσωση:

$$\mathrm{a} = \mathrm{b} + c \rightarrow b = a - c \tag{6.4}$$

$$\frac{d_1 - (d - t_d - t_{p\prime})}{2} \leq a \leq \frac{d_1 - (d - t_d - t_{p\prime})}{2} + \frac{(D_1 - t_{P1}) - (D - t_D - t_P)}{2} \tag{6.5}$$



Σχ. 6.12: Μετατόπιση διαγράμματος κατά b ώστε η οπή να εμπίπτει εντός ορίων

Όπου c είναι η απόσταση μεταξύ της νέας θέσης του σημείου 0 έως το σημείο 1 που μπορεί να επιτευχθεί με τη μετατόπιση του αρχικού σημείου μηδέν κατά μια ποσότητα b κατά μήκος της γραμμής που συνδέει το αρχικό σημείο 0 έως 1. Στο παράδειγμα μας c = α_{min} επειδή στο σημείο που μπορούμε να επιτύχουμε c = α_{min} σταματάμε τη μετατόπιση των αξόνων, όπως φαίνεται στο σχήμα 9, μέχρι:

$$c = a_{min} = \frac{d_1 - (d - t_d - t_{p\prime})}{2} \tag{6.6}$$

$$b = a - a_{min} \tag{6.7}$$

Έτσι από τις προηγούμενες εξισώσεις μπορούμε να δούμε ότι έχουμε μια αύξηση στη ζώνη αποδοχής κατά:

$$\Pi = \frac{a - a_{min}}{a_{min}} \% \tag{6.8}$$

6.5 Εφαρμογή σε Θεωρητικό Εξάρτημα – Αριθμητικό Παράδειγμα

Ας εξετάσουμε, ως αριθμητικό παράδειγμα, το εξάρτημα που φαίνεται στο σχήμα 6.4. Η διάμετρος της κύριας οπής είναι 25 ± 0.20 mm (D = 25mm, t_D = 0.20 mm) και η διάμετρος της μικρότερης οπής είναι 10 ± 0.20 mm (d = 10 mm, t_d = 0.20 mm). Το πλαίσιο της γεωμετρικής ανοχής θέσης ελέγχει τη θέση της μικρής οπής, με αναφορά στα στοιχεία A, B (MMC), και C μέσω της ανοχής θέσης $t_{p'}$ = 0.20 mm, ενώ η ακρίβεια θέσης της κύριας οπής είναι t_p = 0.20 mm, με αναφορά στην επιφάνεια αναφοράς A. Για την κύρια οπή μετράμε το μέγεθος της διαμέτρου D_1 = 24.90 mm με καθετότητα t_{P1} = 0.10 mm. Επομένως η δυνατότητα μετακίνησης είναι (1) 0.20 mm.

Μετρούμε επίσης το πραγματικό μέγεθος της μικρής οπής 9.90 mm και τις αποστάσεις από το κέντρο της κύριας οπής, όπως φαίνεται στην έκθεση επιθεώρησης διάταξης στον παρακάτω πίνακα, Σχ. 6.15.
Χρησιμοποιώντας τα δεδομένα από την έκθεση επιθεώρησης της διάταξης σχεδιάζουμε το διάγραμμα όπως φαίνεται στο σχήμα 6.13. Όπως μπορούμε να δούμε το σημείο είναι έξω από τα επιτρεπτά όρια ανοχών των 0.15 mm. Υπολογίζουμε την ποσότητα α_1 από το διάγραμμα α_1 = 0.223 χιλιοστά. Επίσης υπολογίζουμε και την ποσότητα α:

$$\alpha = \frac{d' - (d - t_d - t_p)}{2} + \frac{(D_1 - t_{p1}) - (D - t_d - t_p)}{2} = 0.25mm$$

Όπως μπορούμε να δούμε από την ανωτέρω εξίσωση α_1 <0.25mm, επομένως υπάρχει διαθέσιμη ανοχή μετατόπισης της αρχής 0 ώστε να είναι μέσα στα όρια. Αυτή η μετατόπιση του συστήματος συντεταγμένων δίνεται από την εξίσωση (7):

$$b = a - a_{min} = 0.073\ mm$$

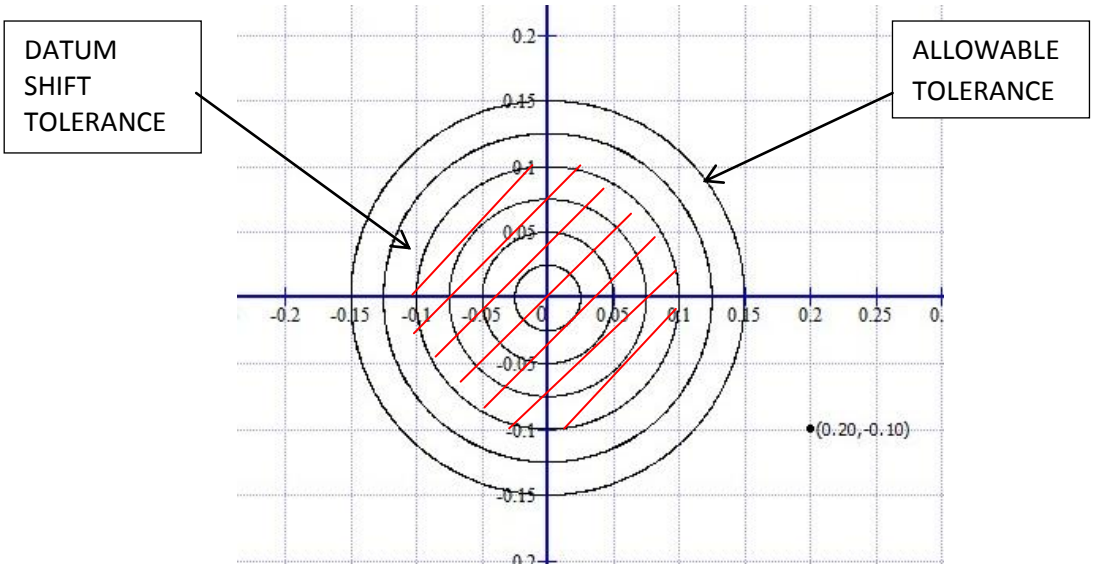
Κατά μήκος της γραμμής που συνδέει το σημείο 0 με το σημείο 1 από την εξίσωση (6) έχουμε:

$$a_{min} = \frac{d\prime - (d - t_d - t_{p\prime})}{2} = 0.15\text{mm}$$

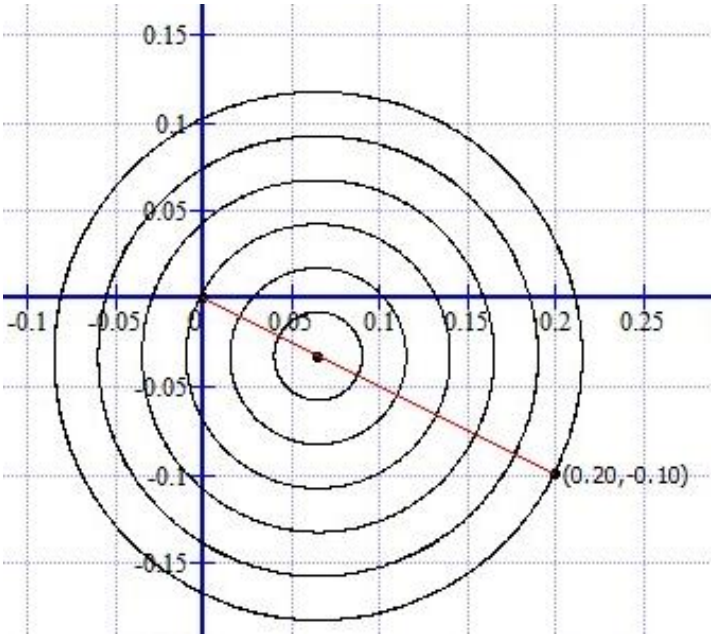
Τα αποτελέσματα φαίνονται στο σχήμα 14 και η αύξηση στη ζώνη αποδοχής δίνεται από την εξίσωση (8):

$$\Pi = \frac{a - a_{min}}{a_{min}} = 48.66\%$$

Η ίδια ανάλυση μπορεί επίσης να επεκταθεί σε μια ομάδα/ διάταξη χαρακτηριστικών που έχουν σύνθετο πλαίσιο ανοχής θέσης *(composite position tolerance frame)*. Σε αυτή την περίπτωση πρέπει να δοθεί προσοχή κατά την μετατόπιση του πολικού πλέγματος με τέτοιον τρόπο, ώστε να διασφαλίζεται ότι όλες οι οπές εμπίπτουν στις αντίστοιχες ζώνες ανοχής τους. Εάν το πολικό πλέγμα μπορεί να μετακινηθεί σε μία βέλτιστη θέση που δέχεται το σύνολο των κέντρων (αξόνων) των οπών στις ζώνες ανοχής τους χωρίς να παραβιάζεται η ζώνη ανοχής μετατόπισης αναφοράς, τότε η οπή είναι αποδεκτή και βρίσκεται εντός των προδιαγραφών των ανοχών θέσης.



Σχ. 6.13: Σημείο ενδιαφέροντος εκτός επιτρεπτής ανοχής



Σχ. 6.14: Μετατόπιση συστήματος αξόνων ώστε να τοποθετηθεί η οπή εντός της ζώνης ανοχής

FEATURE (small hole)	FEATURE SIZE			ALLOW TOL.	X LOCATION			Y LOCATION		
	MMC	ACTUAL	DEV		BASIC	ACTUAL	DEV	BASIC	ACTUAL	DEV
10±0.20	9.80	9.90	0.10	0.3	20.00	20.20	0.20	15.00	14.90	-0.10

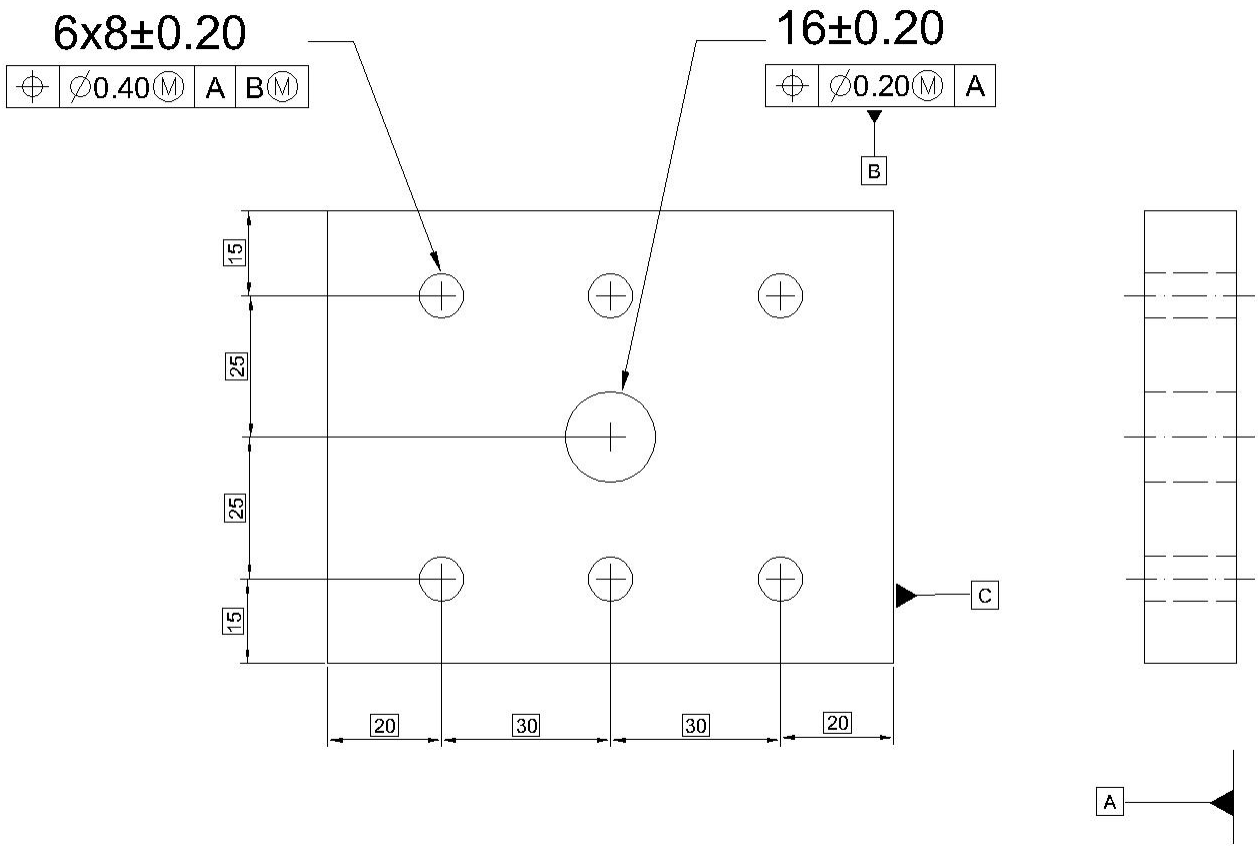
Σχ. 6.15: Πίνακας μετρήσεων /επιθεώρησης τεμαχίου του Σχ.6.4

6.6 Γενίκευση Προβλήματος σε Σύστημα Οπών

Εξετάζουμε την περίπτωση που έχουμε περισσότερες από δύο οπές (ομάδα οπών) και όπου το δευτερεύων στοιχείο αναφοράς τους είναι μια κεντρική οπή στην οποία έχει εφαρμοστεί η συνθήκη MMC, όπως φαίνεται παρακάτω **Σχ. 6.16**.

Ας θεωρήσουμε ότι στο παράδειγμά μας το σχέδιο έχει n μικρότερες οπές με δεδομένο στοιχειό αναφοράς τη μεγαλύτερη κεντρική οπή. Θέλουμε να εξακριβώσουμε εάν αυτές οι οπές πληρούν την απαίτηση της μέγιστης ανοχής θέσης. Κατασκευάζουμε κύκλους για κάθε μία από αυτές με διάμετρο ίση με d_i- (d-t_d-tp) και βρίσκουμε την κοινή περιοχή όπου οι κύκλοι τέμνονται. Θα πρέπει να βρούμε ένα σημείο L στην περιοχή όπου:

$$(OL) \leq (D_1\text{-}t_{p1})\text{-}\ (D\text{-}t_D\text{-}t_p)$$

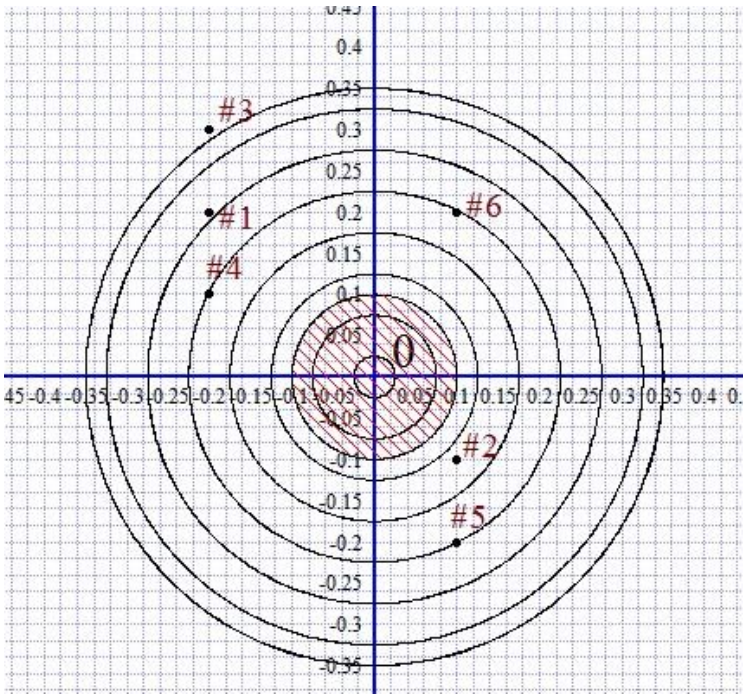


Σχ. 6.16: Τυπικό σχέδιο τεμαχίου με ομάδα οπών

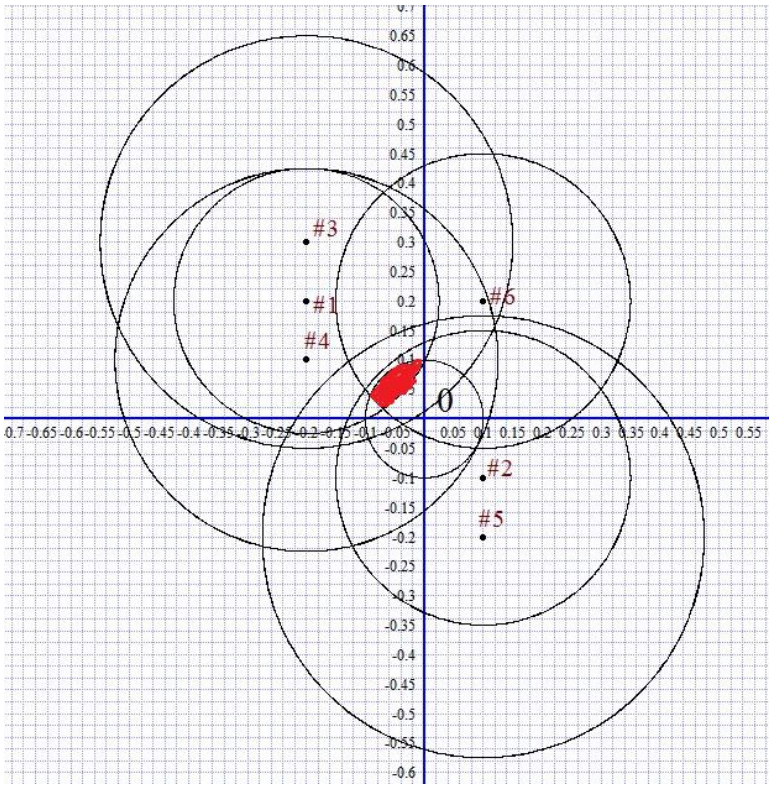
FEATURE (small hole)	FEATURE SIZE		ALLOWABLE TOLERANCE (r)	X LOCATION			Y LOCATION			
	ACTUAL	DEV		BASIC	ACTUAL	DEV	BASIC	ACTUAL	DEV	R_{dev}
8±0.20 mm	7.85	0.05	0.45 (0.225)	-30	-30.20	-0.20	25	25.20	0.20	0.282
8±0.20 mm	7.90	0.10	0.50 (0.25)	0	0.10	0.10	25	24.90	-0.10	0.14
8±0.20 mm	8.10	0.30	0.70 (0.35)	30	29.80	-0.20	25	25.30	0.30	0.36
8±0.20 mm	8.05	0.25	0.65 (0.325)	-30	-30.20	-0.20	-25	-24.90	0.10	0.223
8±0.20 mm	8.15	0.35	0.75 (0.375)	0	0.10	0.10	-25	-25.20	-0.20	0.223
8±0.20 mm	7.90	0.10	0.50 (0.25)	30	30.10	0.10	-25	-24.80	0.20	0.223

Σχ. 6.17: Πίνακας αξιολόγησης για το τεμάχιο του **Σχ.16**

Από τον πίνακα επιθεώρησης της διάταξης και από το παρακάτω σχήμα έχουμε ότι τα (κέντρα) σημεία # 1 και #3 είναι εκτός της επιτρεπόμενης ανοχής. Γι 'αυτό θα πρέπει να κάνουμε μια μετατόπιση του συστήματος συντεταγμένων ώστε να εγγραφτούν τα σημεία αυτά εντός της επιτρεπόμενης ζώνης ανοχής. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο σχεδιάζουμε τους κύκλους από κάθε σημείο με διάμετρο d_i-(d-t_D-t_P) για να βρούμε τη κοινή τους περιοχή, όπου η αρχή των αξόνων το σημείο 0 πρέπει να βρίσκεται. Επιπλέον σχεδιάζουμε τον κύκλο με κέντρο το σημείο 0 και διάμετρο (D_1-t_{P1}) - (D-t_D-t_P) = (16-0.2)- (16-0.2-0.2)= 0.2 mm για να βρούμε την κοινή περιοχή όπου το σημείο 0 θα πρέπει να βρίσκεται. Έτσι, έχουμε το επόμενο διάγραμμα:



Σχ. 6.18: Ζώνη επιτρεπόμενης μετακίνησης κέντρου συντεταγμένων



Σχ. 6.19: Κοινή περιοχή κύκλων όπου το μπορεί να μετακινηθεί το σημείο 0

Από ό, τι μπορούμε να δούμε παραπάνω, υπάρχει μια κοινή περιοχή όπου τέμνονται όλοι οι κύκλοι και αυτή η περιοχή είναι η κατάλληλη περιοχή για το σημείο 0 για να μετακινηθεί οδηγώντας σε μια αύξηση στη ζώνη αποδοχής σε σύγκριση με ένα σχέδιο χωρίς ΑΠΥ. Έτσι από τις προηγούμενες εξισώσεις μπορούμε να δούμε ότι έχουμε μια αύξηση στη ζώνη αποδοχής κατά:

$$\Pi = \frac{a - a_{min}}{a_{min}} = \frac{0.286 - 0.225}{0.225} * 100\% = 27\%$$

6.7 Συντελεστής Επάρκειας (C_P)

Εδώ εξετάζουμε τον συντελεστή επάρκειας κατεργασίας για τη διαδικασία που έχουμε. Το Cp είναι υψηλότερο στην περίπτωση που έχουμε στο στοιχείο αναφοράς τη συνθήκη MMC. Αυτό μπορεί να φανεί για παράδειγμα για το συντελεστή επάρκειας της οπής #1. Αν δεν ήταν η MMC το C_P για την ανοχή θέσης της οπής # 1 θα είναι:

$$\mathrm{Cp} = \frac{T}{6\sigma} = \frac{0.225}{6\sigma}$$

ενώ στην περίπτωση μας για την MMC έχουμε μια αύξηση στην κατασκευαστική ικανότητα T'= 0.282 και έτσι:

$$\mathrm{Cp}' = \frac{T'}{6\sigma} = \frac{0.282}{6\sigma}$$

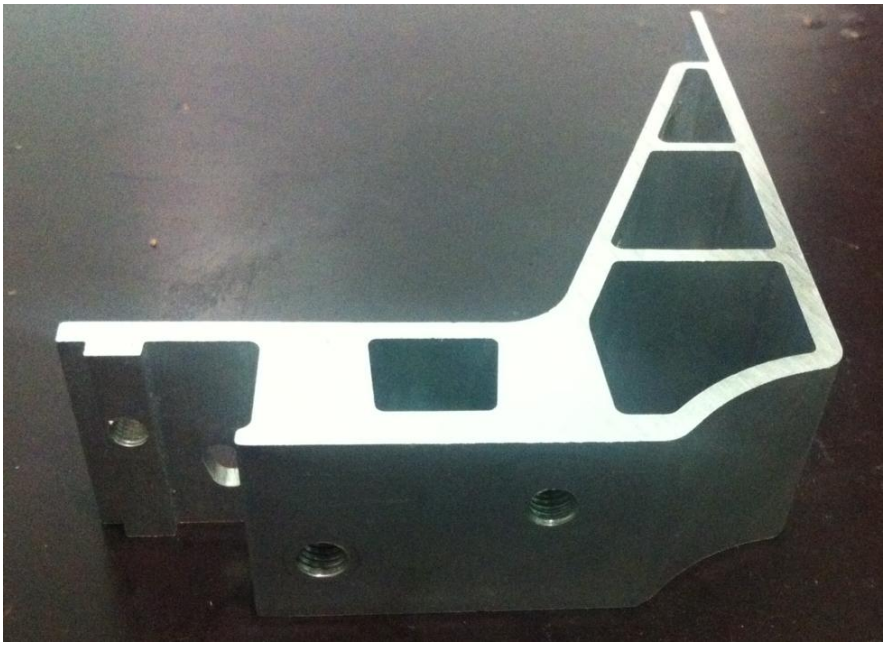
$$Cp/_{Cp'} = 0.798 \rightarrow Cp' = 1.253 * Cp$$

Μπορούμε να δούμε μια αύξηση κατά 25.3% του C_p για την οπή 1.

6.8 Εφαρμογή σε Βιομηχανικό Εξάρτημα

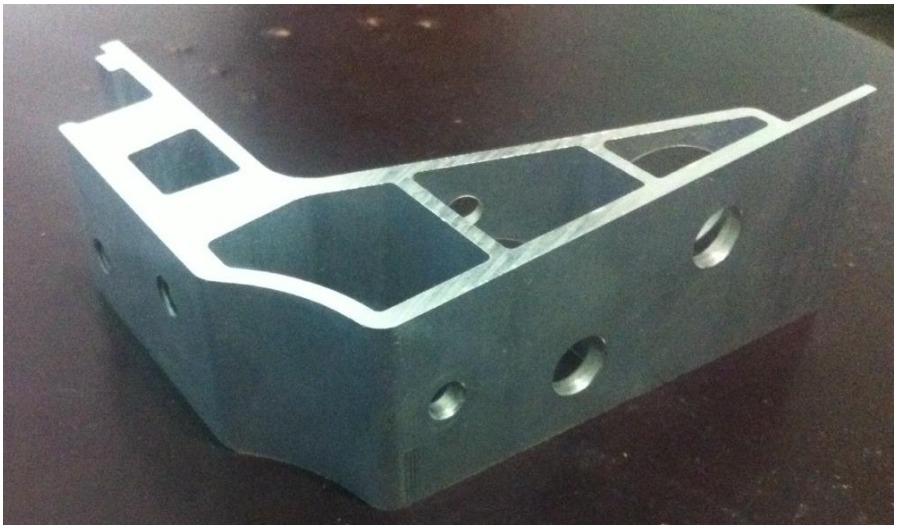
Η ανάλυση/ μεθοδολογία που παρουσιάστηκε στις παραπάνω ενότητες εφαρμόζεται σε βιομηχανικό εξάρτημα μαζικής παραγωγής (Εικ. 6.1 – 6.3). Η εφαρμογή εστιάζεται στην ανάλυση των ανοχών αληθούς θέσης δύο κρίσιμων χαρακτηριστικών *(features)* του τεμαχίου, τη σπειροτομημένη οπή M8 και την σπειροτομημένη οπή M6. Για λόγους απλοποίησης στα Σχ.6.20 και 6.21 απεικονίζονται μόνο τα features τα οποία εδώ μας ενδιαφέρουν.

Στο τεμάχιο που παρουσιάζεται στα ακόλουθα σχήματα έχουμε την κεντρική οπή που αποτελεί το στοιχείο αναφοράς B και με βάση αυτό καθορίζονται οι θέσεις των δύο επιμέρους οπών M8 και M6 αντίστοιχα, σε συνδυασμό με το προτεύων επίπεδο αναφοράς A. Για το καθορισμό των δύο αυτών οπών υπάρχουν δύο δυνατότητες: είτε να προσδιορίσουμε τις οπές ως προς το επίπεδο B με τη συνθήκη RFS (**Σχ.6.20**) είτε με τη συνθήκη MMC (**Σχ.6.21**).

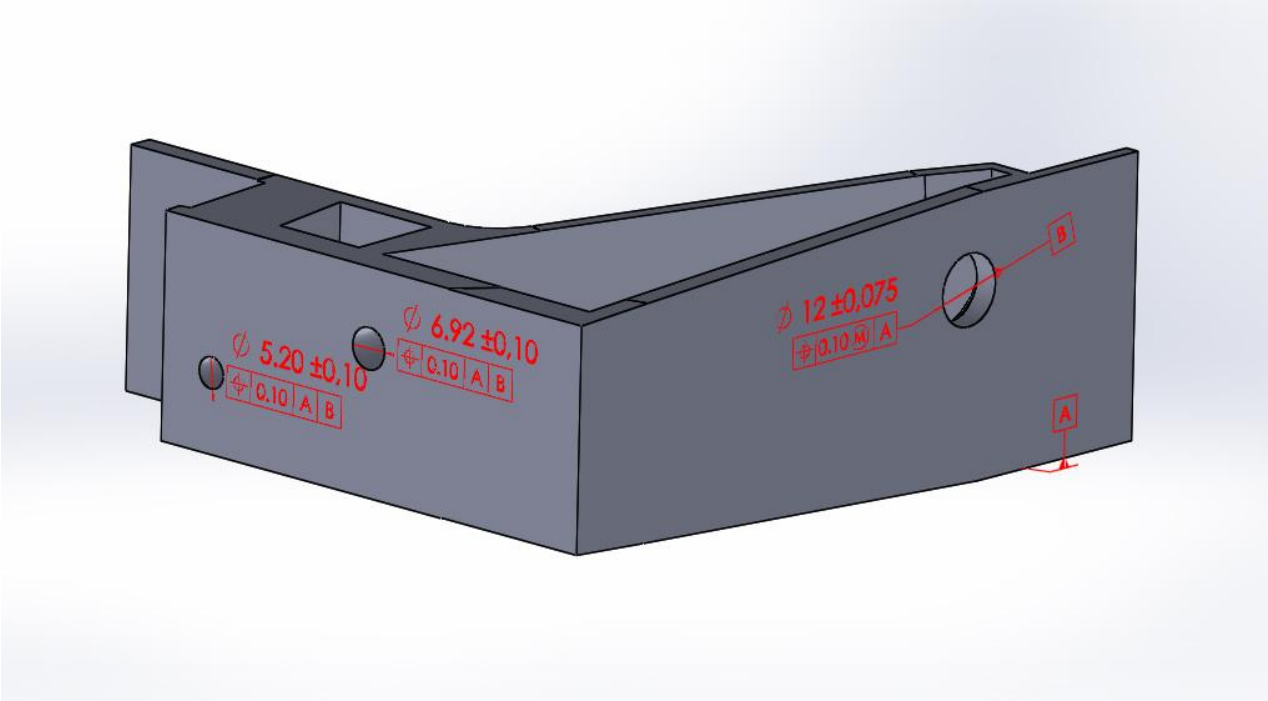


Εικ.6.1

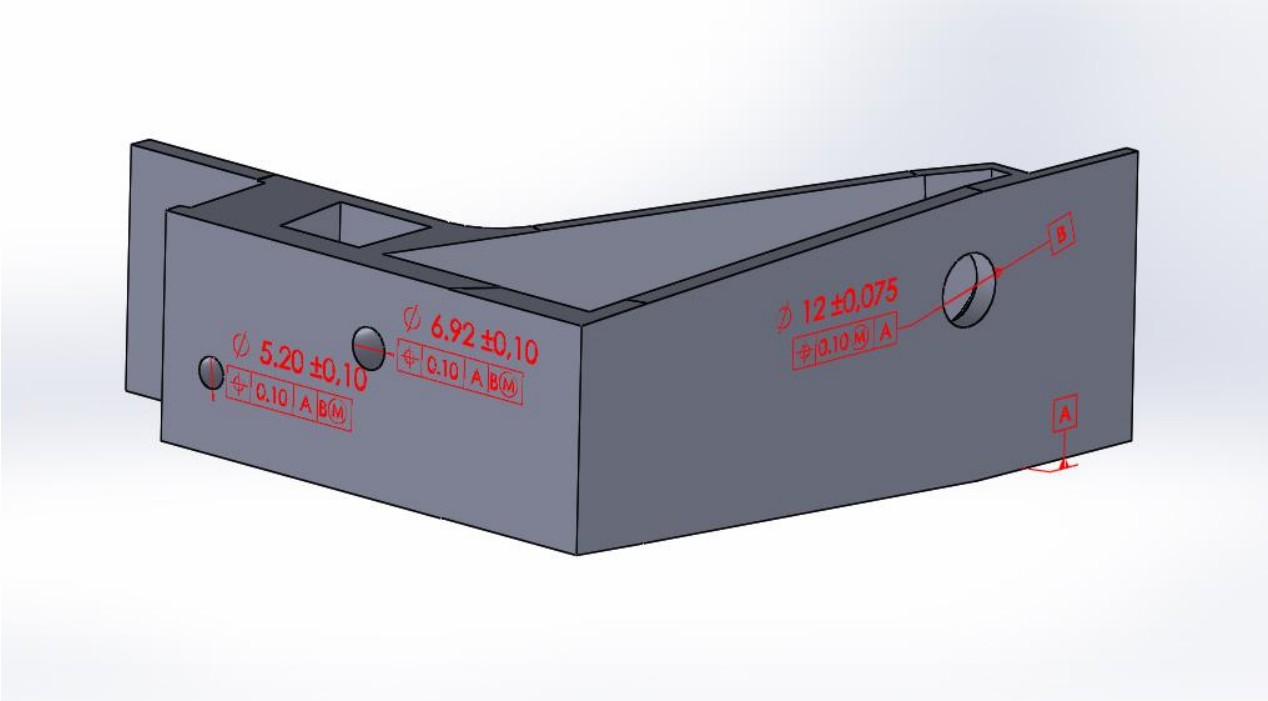
Εικ.6.2



Εικ.6.3



Σχ.6.20: Προσδιορισμός των δύο οπών με τη συνθήκη RFS



Σχ. 6.21: Προσδιορισμός των δύο οπών με τη συνθήκη MMC

		NOMINALS	PART-3-11	PART-5-5	PART-5-4	PART-7-1	PART-1-1
M6							
	y	***-27,72***	-27,77	-27,58	-27,69	-27,68	-27,71
	z	***108,50***	108,40	108,66	108,52	108,57	108,40
5.2 +/- 0.1	***d'***	***d=5,2***	5,17	5,23	5,16	5,13	5,11
t_{d1}=0.10, t_{p1}=0,10	t_{d1}	***0.10***					
M8							
	Y	***-26,25***	-26,30	-26,29	-26,18	-25,95	-26,02
	z	***79,50***	79,40	79,57	79,57	79,70	79,53
6.92 +/- 0.1	***d'***	***d=6,92***	6,89	6,91	6,90	6,96	6,93
t_{d2}=0.10, t_{p2}=0,10	t_{d2}	***0.10***					
DATUM B	***D'***	***D=12,00***	12,10	12,10	12,13	12,10	12,10
Dia 12,075 +/-0.075	t_P'	t_P***=0.10***	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10

		NOMINALS	PART-5-7	PART-6-8	PART-7-8	PART-7-6	PART-7-10	PART-7-9	PART-5-10
M6									
	y	***-27,72***	-27,81	-27,87	-27,62	-27,71	-27,72	-27,81	-27,66
	z	***108,50***	108,45	108,45	108,44	108,47	108,55	108,38	108,55
5.2 +/- 0.1	***d'***	***d=5,2***	5,12	5,13	5,08	5,20	5,15	5,17	5,14
t_{d1}=0.10, t_{p1}=0,10									
M8									
	y	***-26,25***	-26,03	-26,09	-26,21	-26,32	-26,08	-26,10	-25,94
	z	***79,50***	79,48	79,51	79,48	79,50	79,51	79,33	79,58
6.92 +/- 0.1	***d'***	***d=6,92***	6,90	6,87	6,94	6,87	6,89	6,94	6,93
t_{d2}=0.10, t_{p2}=0,10									
DATUM B	***D'***	***D=12,00***	12,10	12,11	12,10	12,09	12,10	12,10	12,14
Dia 12,075 +/-0.075 t_D=0.075	$t_{p'}$	t_P***=0.10***	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0	0.10

Πίνακας μετρήσεων από δειγματοληπτικό έλεγχο 12 τεμαχίων

Για την αξιολόγηση των μετρήσεων των τεμαχίων που λαμβάνουμε ανωτέρω, εφαρμόζεται η ανάλυση που παρουσιάστηκε στην παρ. 6.4. Για το λόγο αυτό υπολογίζουμε για το κάθε τεμάχιο και για κάθε οπή τις ακόλουθες ποσότητες, με βάση τις σχέσεις της παρ. 6.4:

$$\alpha = \frac{d' - (\, d - t_{di} - t_{pi})}{2} + \frac{(D' - \ t_P{}') - (D - t_D - \ t_P)}{2}$$

$$\alpha_1 = \sqrt{(y - y_{nom})^2 + (z - z_{nom})^2}$$

$$a_{min} = \frac{d' - \ (d - t_{di} - t_{pi})}{2}$$

Όπως είδαμε και στην ανωτέρω παράγραφο, διακρίνουμε τις ακόλουθες περιπτώσεις για τις ανωτέρω ποσότητες:

1) Αν $\alpha_1 < \alpha_{min}$ τότε η οπή βρίσκεται εντός των προβλεπόμενων ορίων είτε έχουμε MMC στο επίπεδο αναφοράς B είτε RFS – ικανοποιείται και στις δύο περιπτώσεις.
2) Αν $\alpha_{min} < \alpha_1 < \alpha$ τότε κατά τη γραφική λύση μπορύμε να μεταφέρουμε τους άξονες κατά την ποσόστητα $\beta = \alpha_1 - \alpha$ έτσι ώστε το σημείο που αντιπροσωπεύει την οπή να είναι εντός ορίων στην περίπτωση που έχουμε MMC στο επίπεδο αναφοράς B.
3) Αν $\alpha_1 > \alpha$ τότε η εξεταζόμενη οπή είναι εκτός ορίων και δε γίνεται αποδεκτή σε καμία περίπτωση.

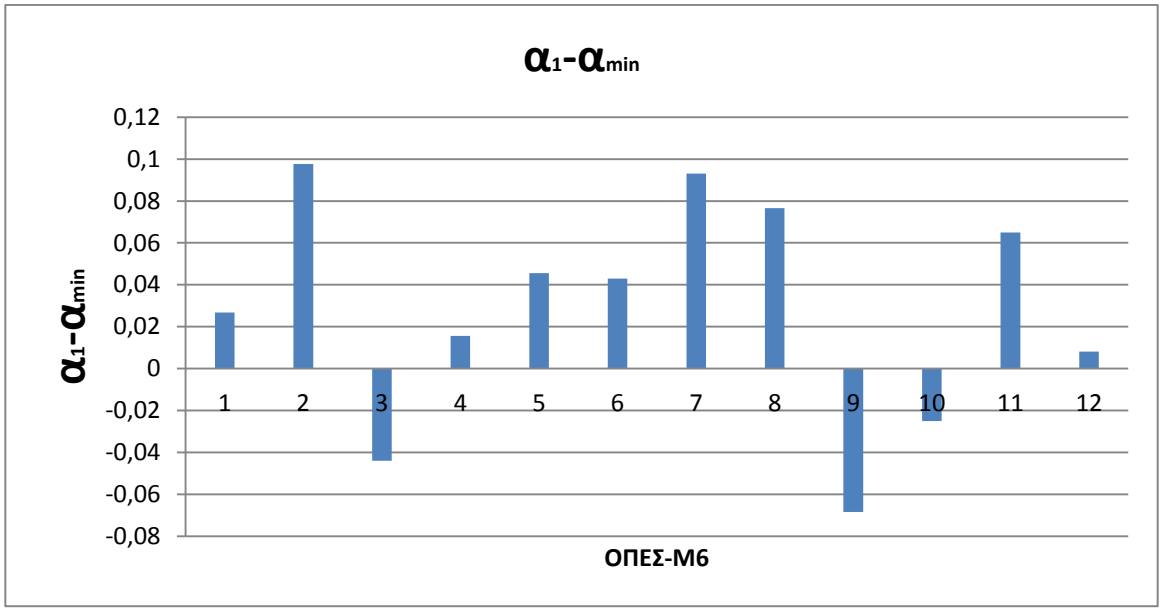
Για να αναλύσουμε τις μετρήσεις και να βρούμε το C_p της κατεργασίας πραγματοποιούμε τη στατιστική ανάλυση μέσω excel δύο διαφορών $\alpha_1 - \alpha_{min}$ και $\alpha_1 - \alpha$ με τα ακόλουθα αποτελέσματα:

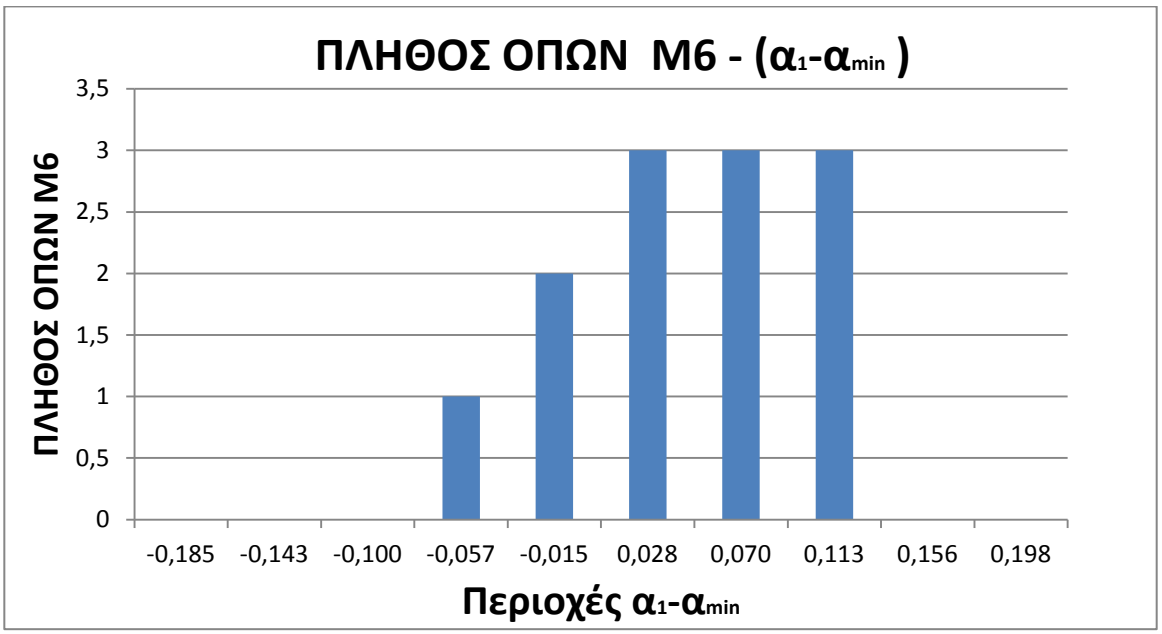
Εάν $\alpha_1 - \alpha_{min} < 0$ τότε ικανοποιείται ακόμα και όταν δεν έχουμε MMC στο επίπεδο αναφοράς.
Εάν $\alpha_1 - \alpha < 0$ τότε ικανοποιείται όταν έχουμε MMC στο επίπεδο αναφοράς.

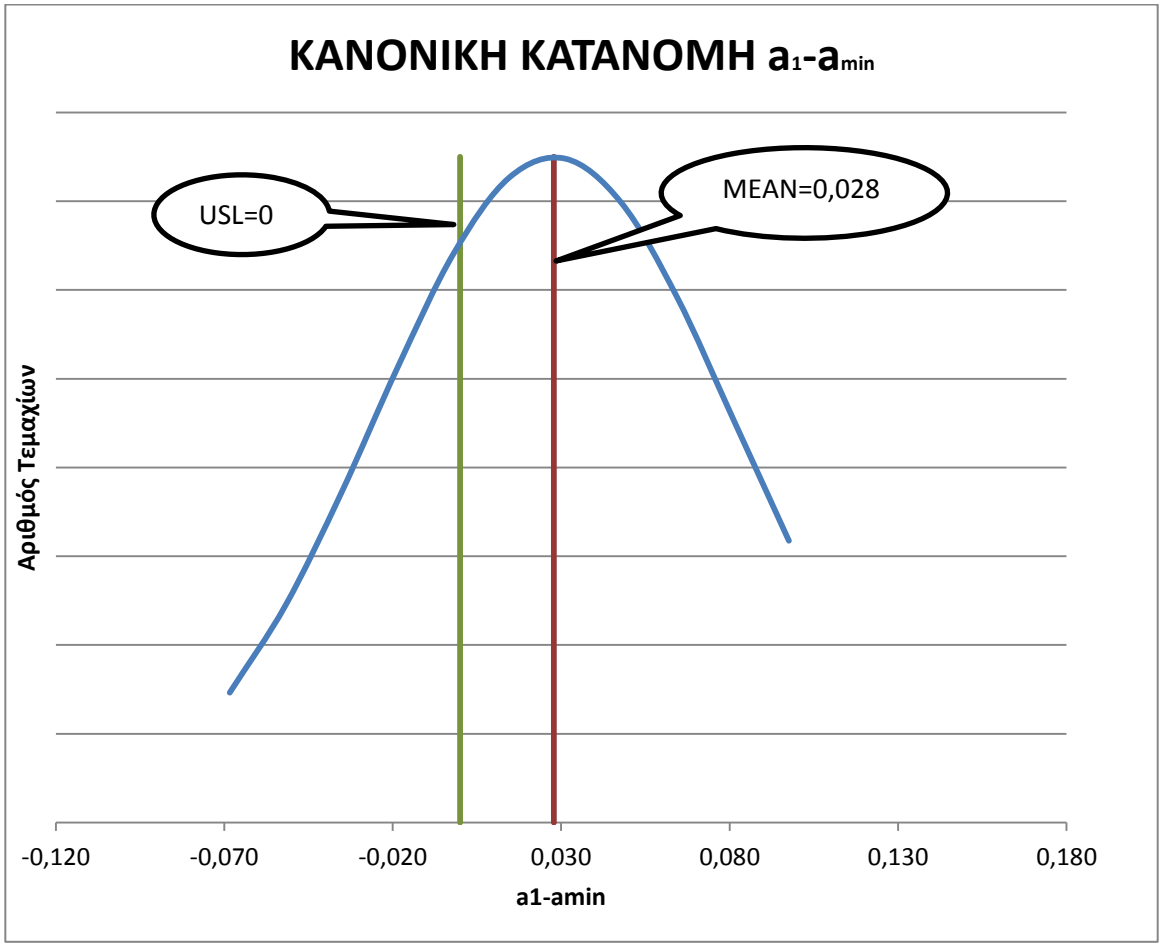
- **<u>Ανάλυση δεδομένων για οπή M6</u>**

α_1-α_{min}	α_1-α
0,0268	-0,0232
0,0976	0,0476
-0,0439	-0,1089
0,0156	-0,0344
0,0455	-0,0045
0,0430	-0,0070
0,0931	0,0381
0,0766	0,0266
-0,0684	-0,1134
-0,0250	-0,0750
0,0650	-0,0350
0,0081	-0,0619

Από των ανωτέρω πίνακα παρατηρούμε πως υπάρχουν 3 μόνο τεμάχια από το σύνολο των 12 τα οποία ικανοποιούν τη συνθήκη $\alpha_1 - \alpha_{min} < 0$ ενώ τα τεμάχια με $\alpha_1 - \alpha < 0$ είναι συνολικά 9. Εν συνεχεία προβαίνουμε σε στατιστική ανάλυση των ευρημάτων με τα ακόλουθα διαγράμματα:



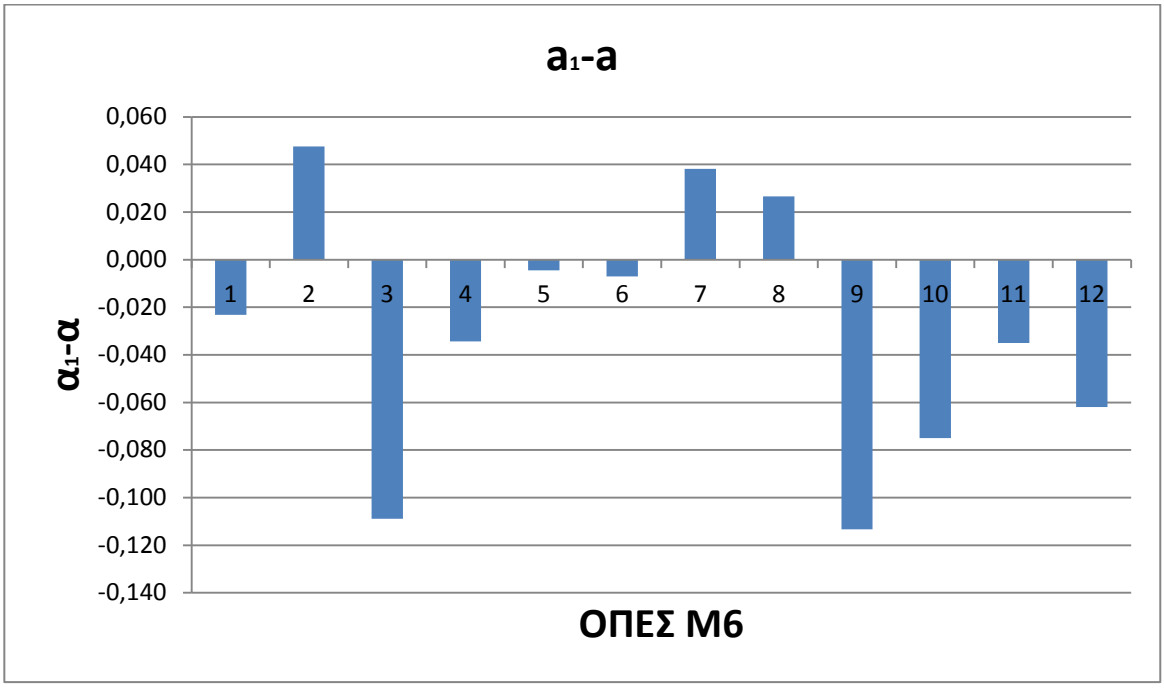


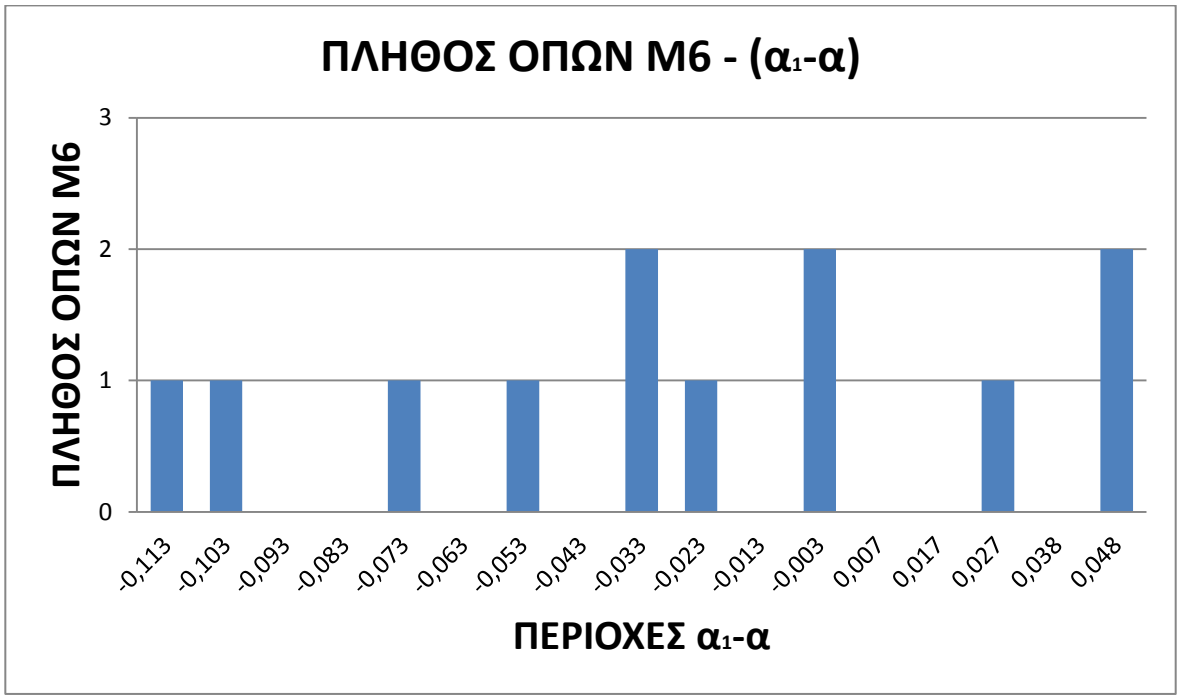


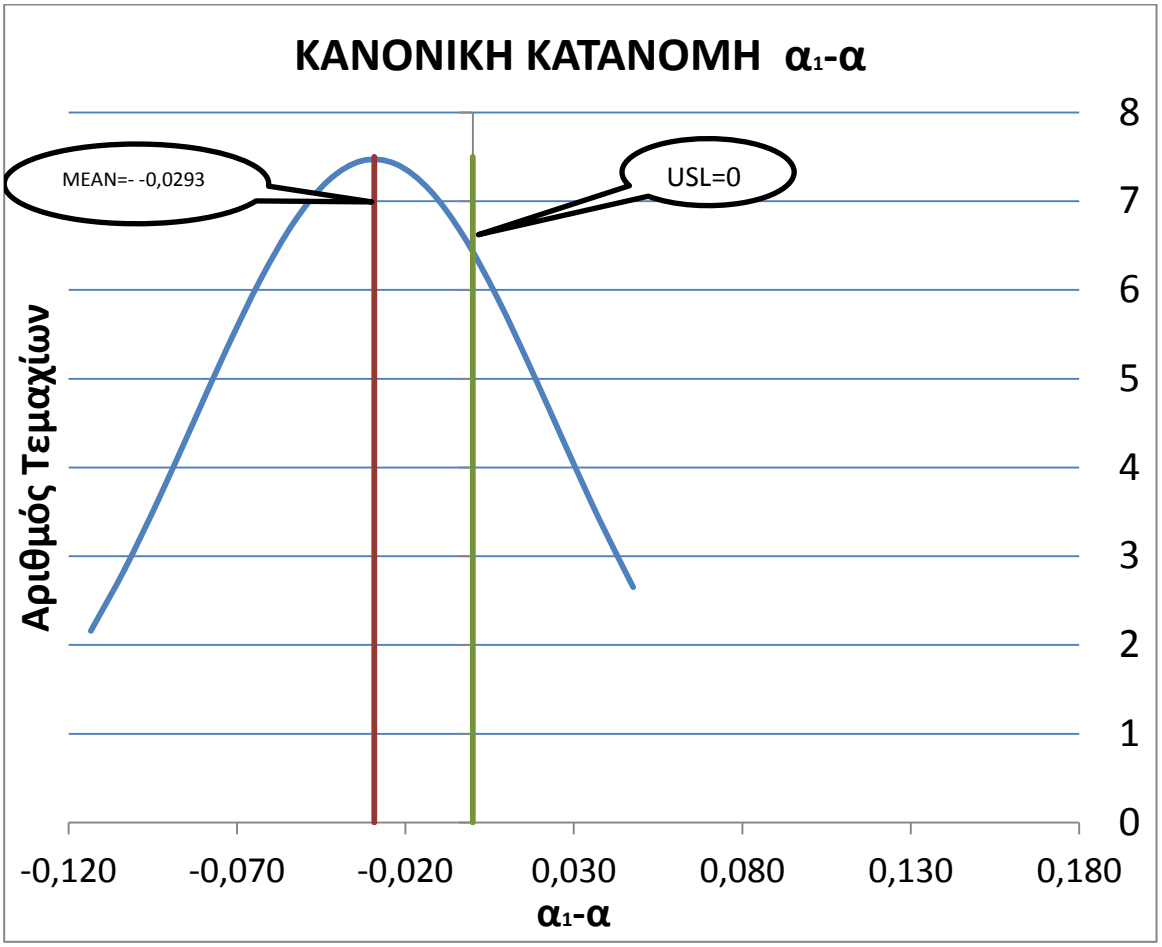
Για την ποσότητα $\alpha_1 - \alpha_{min}$ από την ανωτέρω ανάλυση έχουμε:

	α_1-α_{min}
MIN	-0,068
MAX	0,098
MEAN	0,028
σ	0,053
USL	0
C_{pk}=(USL - MEAN)/3σ	-0,174

Επομένως για την περίπτωση που εξετάζουμε την οπή M6 ως προς το επίπεδο αναφοράς B με RFS έχουμε C_{pk}= -0,174. Στο σημείο αυτό πρέπει να παρατηρήσουμε πως το αρνητικό C_{pk} υποδηλώνει πως η μέση τιμή της κατανομής είναι μεγαλύτερη από το USL και επομένως η πλειοψηφία των τεμαχίων δε γίνονται αποδεκτά. Επίσης κατά τη χρήση της τυπικής απόκλισης σ γίνεται η προσέγγιση όπως φαίνεται στον **Πιν. 5.2** με το συντελεστή c_4 επειδή το πλήθος του δείγματος είναι μικρό- 12 τεμάχια.


a1-a
0,060
0,040
0,020
0,000
-0,020
-0,040
-0,060
-0,080
-0,100
-0,120
-0,140
α1-α
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
ΟΠΕΣ Μ6


ΠΛΗΘΟΣ ΟΠΩΝ Μ6 - (α1-α)
3
2
1
0
ΠΛΗΘΟΣ ΟΠΩΝ Μ6
-0,113
-0,103
-0,093
-0,083
-0,073
-0,063
-0,053
-0,043
-0,033
-0,023
-0,013
-0,003
0,007
0,017
0,027
0,038
0,048
ΠΕΡΙΟΧΕΣ α1-α

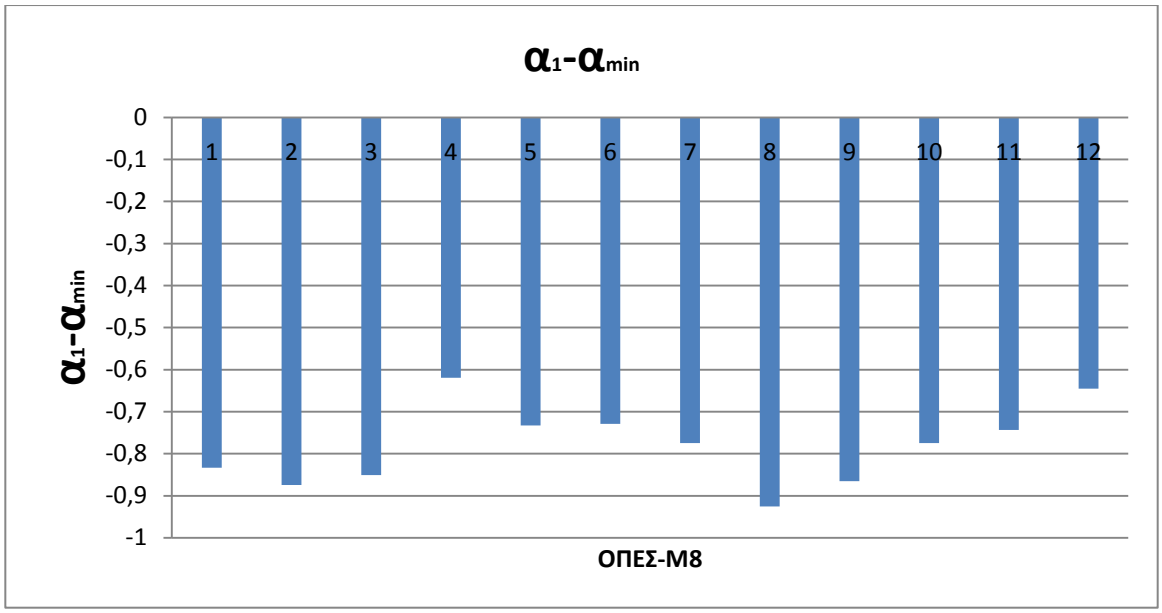


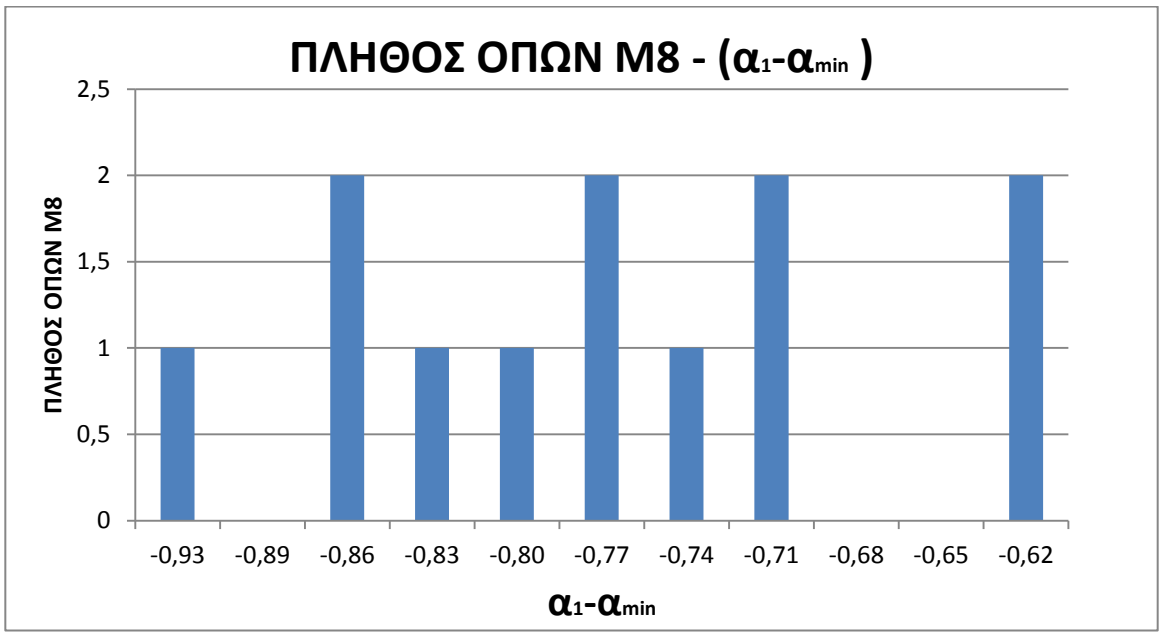
Για την ποσότητα $\alpha_1 - \alpha$ από την ανωτέρω ανάλυση έχουμε:

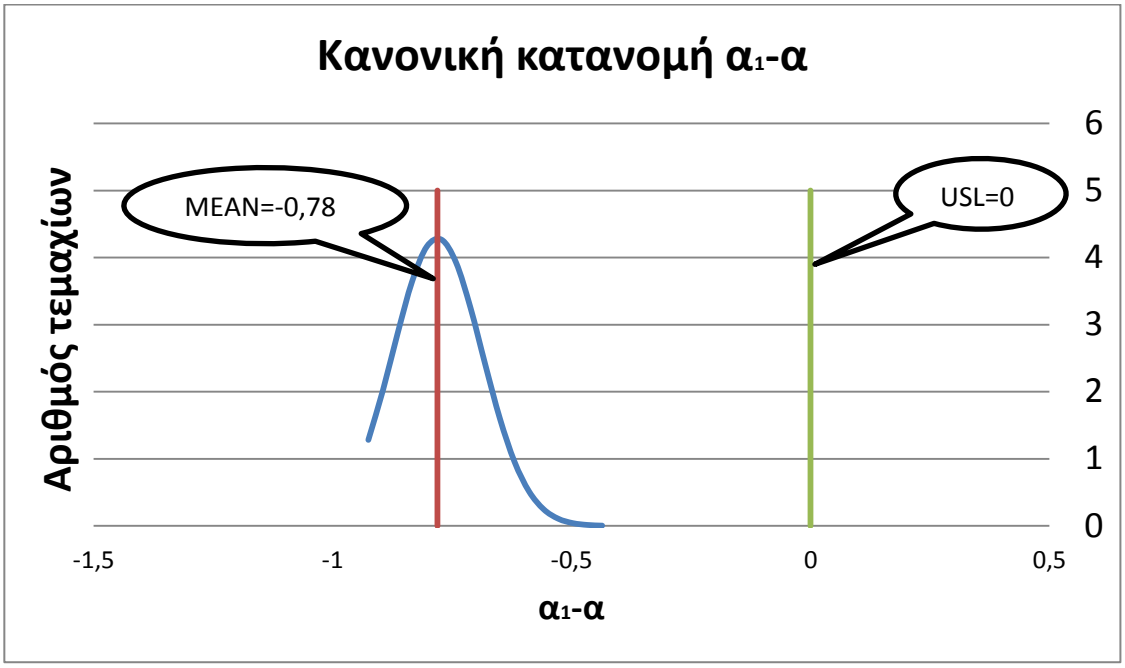
	α_1-α
MIN	-0,113
MAX	0,048
AVERAGE	-0,029
σ	0,053
C_{pk}=(USL - MEAN)/3σ	0,183

Παρατηρούμε αύξηση του C_{pk} κατά 200% περίπου (απόλυτη τιμή) σε σύγκριση με την πρώτη περίπτωση και επίσης ότι έχει περάσει σε θετικό πρόσημο, δεδομένο που υποδεικνύει πως η μέση τιμή της κατανομής είναι μικρότερη από το USL και το ποσοστό των οπών M6 που γίνονται αποδεκτές αυξάνεται.

- **<u>Ανάλυση δεδομένων για οπή M8</u>**

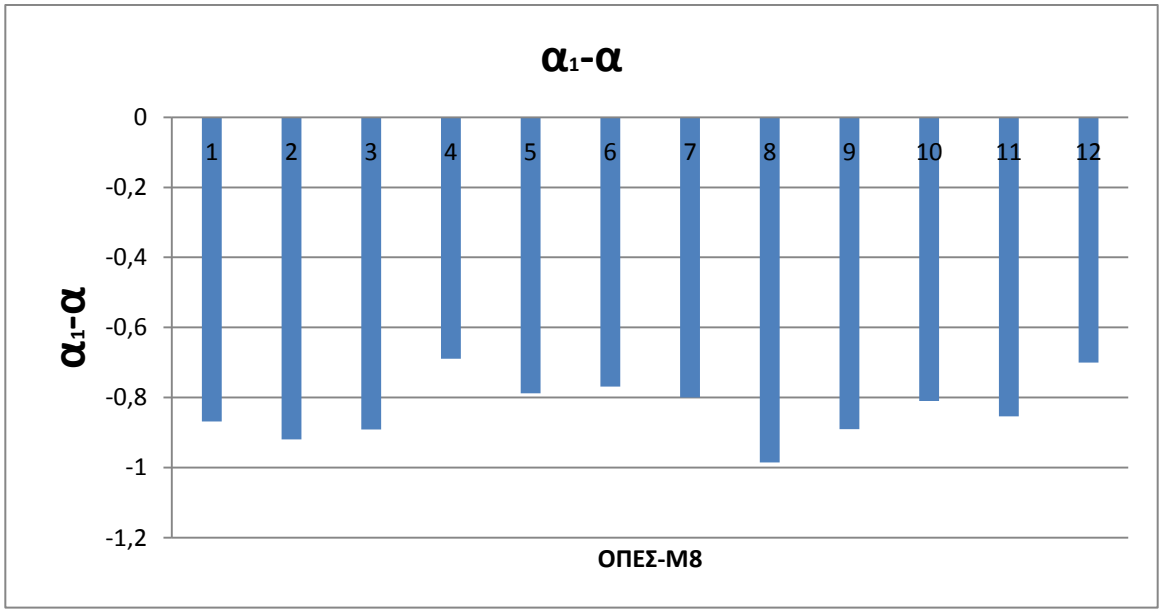


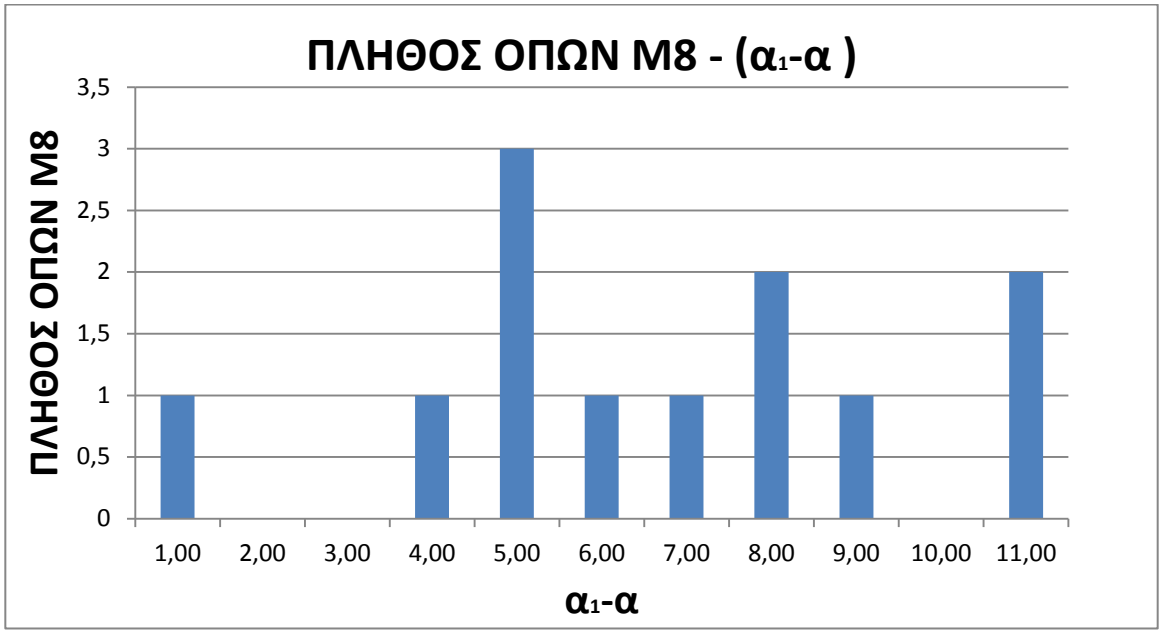


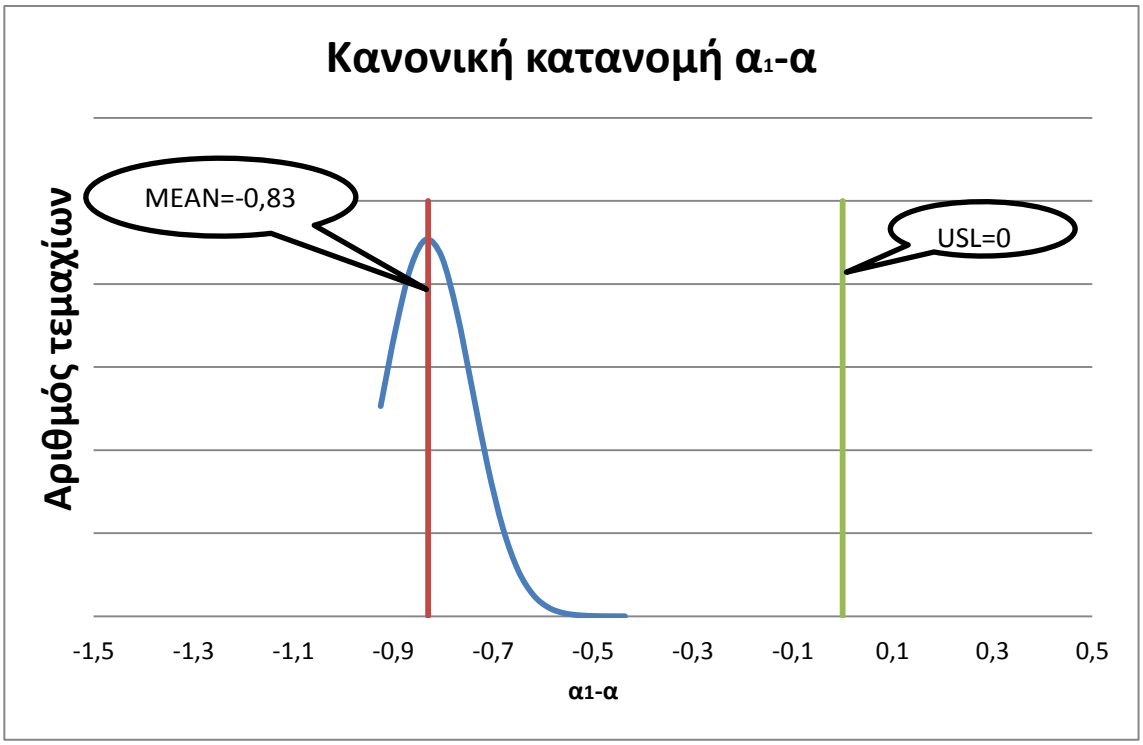


	a_1-a_{min}
MIN	-0,925
MAX	-0,619
AVERAGE	-0,781
σ	0,093
C_{pk}=(USL-MEAN)/3σ	2,795

Από των ανωτέρω πίνακα συμπεραίνουμε πως η οπή M8 στην περίπτωση που δεν έχουμε MMC στο επίπεδο αναφοράς έχει ικανοποιητικό C_{pk} που ικανοποιεί σε γενικές γραμμές τις απαιτήσεις κατασκευής.







	α_1-α
MIN	-0,985
MAX	-0,689
AVERAGE	-0,830
σ	0,088
Cpk=(USL-MEAN)/3σ	3,150

Παρατηρούμε αύξηση του C_{pk} κατά 12,7% περίπου σε σύγκριση με την περίπτωση RFS και συνεπακόλουθα αύξηση του ποσοστού των οπών M8 που γίνονται αποδεκτές.

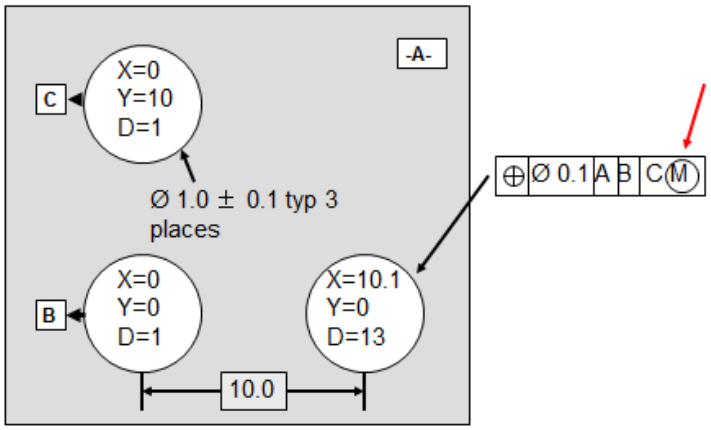
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ & ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

7.1 Συμπεράσματα Δ.Ε- Κατευθύνσεις/ Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

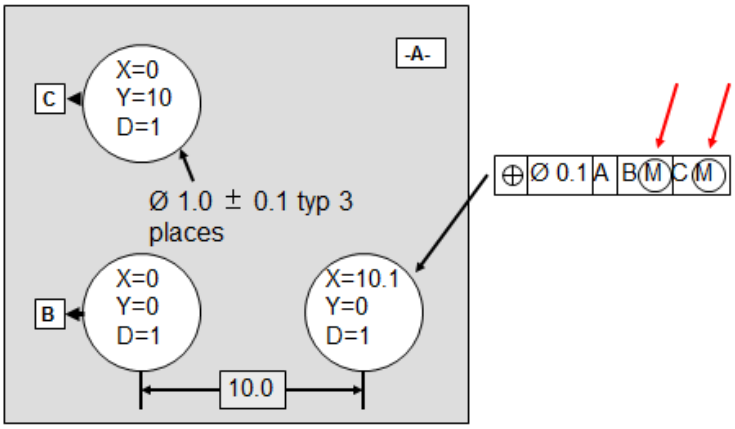
Από την εφαρμογή της μεθοδολογίας που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο της ΔΕ, τόσο από το αριθμητικό παράδειγμα της παραγράφου 6.5 όσο και από το βιομηχανικό εξάρτημα της παραγράφου 6.8 εξάγονται τα εξής γενικά συμπεράσματα:

- Οι εφαρμογές επιβεβαιώνουν υψηλό βαθμό ρεαλιστικής προσέγγισης και ανταπόκρισης της μεθόδου στους τεθέντες στόχους της ΔΕ.
- Η μεθοδολογία αποτελεί αξιόπιστο και λειτουργικό μέσο για τον υπολογισμό της νέας, επαυξημένης ανοχής αληθούς θέσης όπως αυτή διαμορφώνεται όταν ληφθεί υπόψη η εφαρμογή της ΑΠΥ στο/-α στοιχείο/-α αναφοράς.
- Η αναπτυχθείσα μεθοδολογία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για περιπτώσεις που δεν υπάρχει αντίστοιχη βιομηχανική πρότερη εξειδικευμένη γνώση σε θέματα γεωμετρικής ακρίβειας κατασκευών
- Η επιρροή της ΑΠΥ στον υπολογισμό των δεικτών επάρκειας κατεργασίας (Cp, Cpk) και τελικά στο κόστος παραγωγής εξαρτημάτων είναι, σε πολλές περιπτώσεις, καθοριστική.

Αν θέλαμε να εξάγουμε γενικότερα συμπεράσματα που καλύπτουν ένα ευρύτερο φάσμα, θα πρέπει να γίνει έλεγχος και λήψη μετρήσεων από τεμάχια που έχουν πολλαπλό έλεγχο χαρακτηριστικών ή ακόμα και σε τεμάχια στα οποία η ΑΠΥ εφαρμόζεται και στο τριτεύων στοιχείο αναφοράς (tertiary datum reference), όπως χαρακτηριστικά φαίνεται στα σχήματα 7.1 – 7.3. Στις περιπτώσεις αυτές τα αποτελέσματα που αναμένουμε να λάβουμε με εφαρμογή της ΑΠΥ στα στοιχεία αναφοράς αναμένονται να είναι βελτιωμένα, καθώς οι ζώνες ανοχής αυξάνονται σημαντικά.

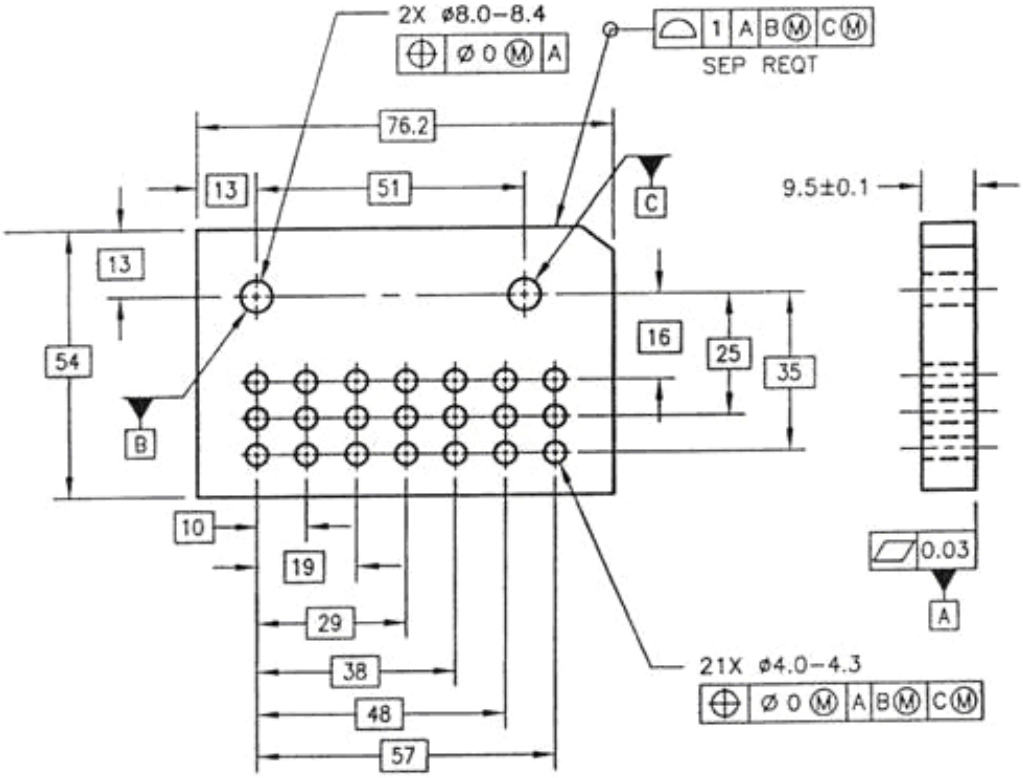


Σχ. 7.1



Σχ. 7.2

Περαιτέρω διερεύνηση απαιτείται ασφαλώς και για τις περιπτώσεις άλλων τύπων γεωμετρικών ανοχών, πέρα από την ανοχή αληθούς θέσης στην οποία εστιάστηκε η ΔΕ, όπως π.χ. η ανοχή πιστότητας επιφάνειας (Σχ. 7.3). Τέλος, συναφής ανάλυση θα μπορούσε να διερευνήσει την επιρροή της ΑΠΕ σε διαφορετικούς δείκτες επάρκειας κατεργασίας όπως οι C_{pm}, C_{pmk} κ.α.



Σχ. 7.3

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

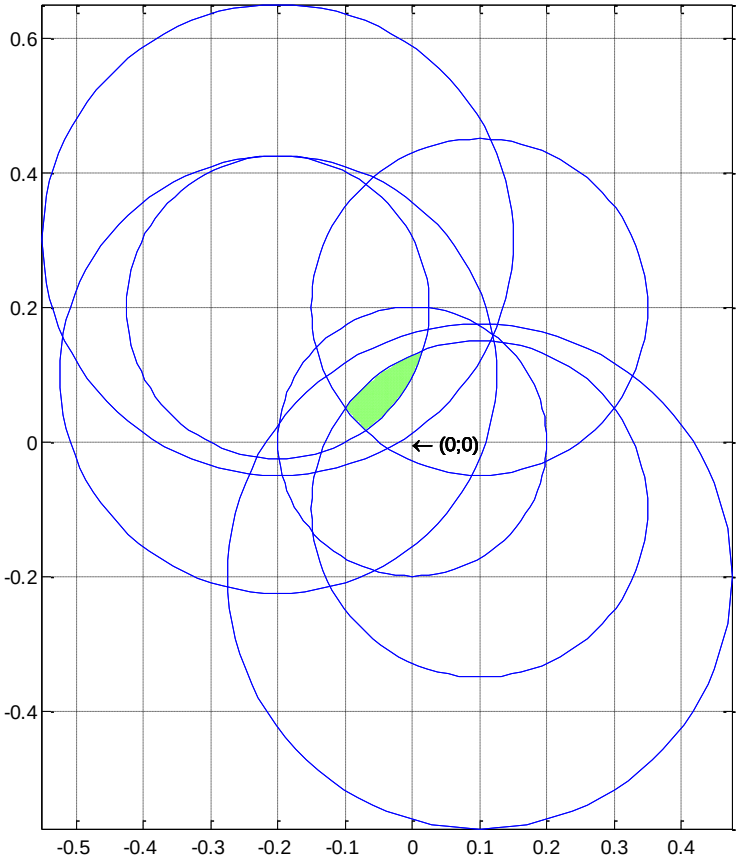
ΓΡΑΦΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΕΜΑΧΙΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ MATLAB

Μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε ένα γενικότερο πρόγραμμα για να ελέγξουμε αν το ελεγχόμενο εξάρτημα πληροί την απαίτηση του σχεδίου. Το πρόγραμμα που έχουμε αναπτύξει είναι γραμμένο σε Matlab και θα πρέπει να εισάγουμε για κάθε οπή τις αποκλίσεις από τις ονομαστικές τους θέσεις και φυσικά τη διάμετρο της ζώνης ανοχής. Με το πρόγραμμα αυτό σχεδιάζονται οι κύκλοι και βρίσκουμε τη κοινή περιοχή όπου οι κύκλοι τέμνονται. Εάν η κοινή περιοχή περιλαμβάνει το σημείο (0,0), αυτό σημαίνει ότι η απαίτηση αυτή πληρείται ακόμη και αν δεν χρησιμοποιείτε η αρχή MMC. Διαφορετικά, αν ο κοινός χώρος δεν περιλαμβάνει το σημείο (0,0), αυτό σημαίνει ότι θα πρέπει να μετακινήσουμε το πολικό διάγραμμα και γι 'αυτό χρειαζόμαστε την ΑΠΥ. Φυσικά υπάρχει πάντα η πιθανότητα ότι δεν υπάρχει κοινή περιοχή και έτσι η απαίτηση αυτή δεν πληρείται με άλλο τρόπο. Επιπλέον, λόγω του γεγονότος ότι η περιοχή έχει δημιουργηθεί από τομή κύκλων καθίσταται δύσκολος ο υπολογισμός της περιοχής και γι 'αυτό δεν μπορούμε να έχουμε ειδικούς ποσοτικούς δείκτες για την περιοχή. Το πρόγραμμα είναι το ακόλουθο:

```
%%%%%%%%%%
% function circint(xc(1),yc(1),r(1),xc(2),yc(2),r(2)…… xc(n),yc(n),r(n))
% xc1, yc1, r1: x,y coordinates of center and radius of first circle
 % xc2, yc2, r2: x,y coordinates of center and radius of second circle
 %Polar coordinates

 n=4;                (total number of circles including the one with center (0,0) that
                      represents the datum shift tolerance and the number of the holes
                      in the hole pattern)
xc(1)=0;             (insert the coordinates of the center of the circles)
yc(1)=0;
r(1)=0.4;
xc(2)=0;
yc(2)=0;
r(2)=0.4;
xc(3)=0;
yc(3)=0;
r(3)=0.4;
xc(4)=0;
yc(4)=0;
r(4)=0.4;

theta = 0:2*pi/100:2*pi;

x=zeros(max(size(theta)),n);
y=zeros(max(size(theta)),n);

 %Circle equations                                (draw the circles)
 for i=1:n
 x(:,i) = r(i)*cos(theta) + xc(i);
 y(:,i) = r(i)*sin(theta) + yc(i);
 end

 %find minimum & maximum values of x, y
for i=1:n
```

```
 xmin = min(xc(i)-r(i));
 xmax = max(xc(i)+r(i));
 ymin = min(yc(i)-r(i));
 ymax = max(yc(i)+r(i));
end

%Number of grid cells (increase this value to get more accuracy in shading)
 ndiv = 200;
 %Create mesh
 xa = xmin:(xmax-xmin)/ndiv:xmax;
 ya = ymin:(ymax-ymin)/ndiv:ymax;
 [xo,yo] = meshgrid(xa,ya);
 H=cell(201,201,n-1);

%Find Intersection Region
 for i=2:n-1
   G(:,:,1)=((xo - xc(1)).^2 + (yo - yc(1)).^2 < r(1)^2) & ((xo - xc(2)).^2 +(yo -yc(2)).^2 < r(2)^2);
   G(:,:,i)=(G(:,:,1)&((xo - xc(i+1)).^2 +(yo -yc(i+1)).^2 < r(i+1)^2));
  end

 %Replace zeros with NaN (Better look with pcolor)
 A=double(G(:,:,n-1));
 A(A==0)=NaN;

  %Show plots
  pcolor(xa,ya,A)
 shading interp
 grid on

hold on
 for i=1:n
 plot(x(:,i),y(:,i),'b')
 axis equal
 hold on
 axis tight
 end
```

Εφαρμόζουμε το πρόγραμμα για το παράδειγμα της παραγράφου 6.5 με τα ακόλουθα αποτελέσματα:



Παράδειγμα κοινής περιοχής στην οποία μπορεί να μετακινηθεί το κέντρο συντεταγμένων 0 με το παραπάνω πρόγραμμα Matlab

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- Μ.Μ. Σφαντζικόπουλος, Σχεδιασμός Μηχανολογικών Κατασκευών Ι, Έκδοση Ε.Μ.Π., Αθήνα, 2005.

- Μ.Μ. Σφαντζικόπουλος, Σχεδιασμός Μηχανολογικών Κατασκευών ΙΙ, Έκδοση Ε.Μ.Π., Αθήνα, 2003.

- Ε.Δ. Παπαδανιήλ, Μ.Μ. Σφαντζικόπουλος, Μηχανολογικό Σχέδιο, Έκδοση Ε.Μ.Π., Αθήνα, 2004.

- Χ. Καραχάλιου, Γ. Μανσούρ, Διαστατική Μετρολογία, Εκδόσεις ΖΗΤΗ, Θεσσαλονίκη 2007.

- Π. Πετρόπουλος, Μηχανουργική τεχνολογία: μετρήσεις, εργαστήριο, Ίδρυμα Ευγενίδου, Αθήνα, 1982.

- Σ. Δημητρέλλου, Προσδιορισμός του Ρόλου της Ακρίβειας Απόδοσης Γεωμετρικών Μορφών στην Ποιότητα και το Κόστος των Μηχανολογικών Κατασκευών, Διδακτορική Διατριβή, Ε.Μ.Π., Αθήνα, 2008.

- Γ. Καϊσαρλής, Συμβολή στην Ανάπτυξη και Εφαρμογή Μεθόδων Αντίστροφου Μηχανολογικού Σχεδιασμού, Διδακτορική Διατριβή, Ε.Μ.Π., Αθήνα, 2007.

- ISO 5458, Geometrical Product Specifications (GPS) - Geometrical Tolerance - Position Tolerancing, The International Organization for Standardization, Geneva, 1998

- ISO/R 1938, ISO system of limits and fits - Part II: Inspection of plain workpieces, The International Organization for Standardization, Geneva, 1998

- ISO 2692, Technical drawings - geometrical tolerancing - maximum material principle, The International Organization for Standardization, Geneva, 2014.

- ISO-1101, Geometrical Product Specifications (GPS) - Geometrical tolerancing - Tolerances of form, orientation, location and run-out, The International Organization for Standardization, Geneva, 2004.

- ASME Y14.5.1M-1994, Mathematical Definition of Dimensioning and Tolerancing Principles, The American Society of Mechanical Engineers, New York, 1995.

- ASME Y14.5M–2009, Dimensioning and Tolerancing, The American Society of Mechanical Engineers, New York, 2009.

- ASME Y14.43-2011, Dimensioning and Tolerancing Principles for gages and fixtures, The American Society of Mechanical Engineers, New York, 2011.

- Paul Green, The Geometrical Tolerancing Desk Reference Creating and Interpreting ISO Standard Technical Drawings,Elsevier, Oxford, 2005.

- Bianca M. Colosimo, Nicola Senin, Geometric Tolerances Impact on Product Design, Quality Inspection and Statistical Process Monitoring, Springer, London 2011.

• Xiu-Tian Yan, Chengyu Jiang, Benoit Eynard, Advanced Design and Manufacture to Gain a Competitive Edge New Manufacturing Techniques and their Role in Improving Enterprise Performance, Springer, London 2008.

• Glenn Grunner, Calculation of Cpk Under Conditions of Variable Tolerances, Quality Engineering, Vol. 3, Iss. 3, 1991, 281-291

• Bryan R. Fischer, Mechanical Tolerance Stackup and Analysis, Taylor and Francis Group, Ohio, 2011

• Paul J. Drake Jr, Dimensioning and Tolerancing Handbook, McGraw-Hill, 1999

• S. C. Diplaris and M. M. Sfantsikopoulos, Process capability requirement under maximum material condition, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture October 1, 2006, Vol. 220, No. 10, 1629-1634.

• S. C. Diplaris and M. M. Sfantsikopoulos, Maximum material condition in process planning, Production Planning & Control, Vol. 17, No. 3, April 2006, 293–300.

• Πηγές από το Διαδίκτυο.