ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑΣ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ - ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟ ΤΩΝ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΥΠΕΡΗΧΩΝ

Βαρούτη Ε.[1], Ρούσσος Ν., Αντωνακάκης Α.[1], και Καϊμάρας Δ[1].
[1]Κέντρο Δοκιμών Ερευνών και Προτύπων, Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού Α.Ε
Λεονταρίου 9, 15351, Κάντζα Παλλήνης
e-mail: Ei.Varouti@dei.com.gr

Περίληψη

Ο υπολογισμός της αβεβαιότητας μέτρησης προκύπτει ως απαίτηση από το πρότυπο ISO 17025, το οποίο προβλέπει την εκτίμηση της αβεβαιότητας και παροχή πληροφοριών σχετικά με αυτή, στις περιπτώσεις όπου είναι απαίτηση του πελάτη ή επηρεάζεται η συμμόρφωση ως προς το όριο μίας προδιαγραφής. Στην παρούσα εργασία γίνεται προσπάθεια αναλυτικής περιγραφής της μεθοδολογίας υπολογισμού της αβεβαιότητας, υπεισερχόμενη κατά την αξιολόγηση - μέτρηση των χαρακτηριστικών μεγεθών των ασυνεχειών – ελαττωμάτων (βάθος και μήκος), που ανιχνεύονται με τη μέθοδο των υπερήχων. Η διαδικασία υπολογισμού προβλέπει τον εντοπισμό και συνδυασμό όλων των παραγόντων που μπορεί να επηρεάσουν τη μέτρηση αυτών. Μεταξύ αυτών περιλαμβάνονται τα χαρακτηριστικά του υπό εξέταση δοκίμιο υλικού, ο χειριστής, τα υλικά αναφοράς, οι συνθήκες εργασίας κ.α

Λέξεις-Κλειδιά: αβεβαιότητα, μη καταστροφικός έλεγχος, υπέρηχοι, ασυνέχεια, ISO-17025

Abstract

Calculation of measurement uncertainty is a requirement found in ISO 17025. The aforementioned standard stipulates the estimation of uncertainty and provision of information, in cases where it is based on a requirement of the client or where there is a impingement of a decision on conformity to a specification. The current work constitutes an attempt towards an analytical description of the methodology related to the calculation of uncertainty that enters into the assessment measurement of the characteristic sizes of the discontinuities-defects (through wall size, length), who can be detected via ultrasonic. The procedure of calculation, requires the detection and combination of all the components that may affect the measurement of the aforementioned sizes. Among them the characteristics of the under investigation material, the user, the reference material and the working conditions are included.

Keywords: uncertainty, non destructive testing, ultrasonic, discontinuity, ISO 17025

---

1. Εισαγωγή

Ο μη καταστροφικός έλεγχος με τη μέθοδο των υπερήχων χρησιμοποιείται τόσο για την ανίχνευση, όσο και για την εκτίμηση διαστάσεων αυτών. Το αποτέλεσμα της εκτίμησης των ελαττωμάτων, αξιοποιείται, στη συνέχεια, προκειμένου να ληφθούν αποφάσεις σχετικά με τη δομική ακεραιότητα του επιθεωρούμενου εξαρτήματος ή κατασκευής. Είναι εμφανές ότι, τα δεδομένα που σχετίζονται με το μέγεθος και τη θέση των ελαττωμάτων θα πρέπει να προσδιορίζονται, έτσι ώστε να ανταποκρίνονται όσο το δυνατόν περισσότερο στην πραγματικότητα.

2. Η μέθοδος των υπερήχων

2.1 Τεχνικές διαστασιολόγησης

Μεταξύ των κυριότερων τεχνικών που χρησιμοποιούνται κατά τη διαστασιολόγηση-προσδιορισμό του μεγέθους ενός σφάλματος με τη μέθοδο των υπερήχων συγκαταλέγονται οι εξής:

1. Τεχνική Πτώσης στάθμης κατά 6 dB
2. Τεχνική πτώσης στάθμης κατά 20 dB
3. Τεχνική μεγίστου εύρους

Τεχνική πτώσης στάθμης κατά 6 dB: Η τεχνική αυτή εφαρμόζεται κατά τη διαστασιολόγηση «λειών» ελαττωμάτων, των οποίων το μήκος είναι μεγαλύτερο από το πλάτος της δέσμης στη διεύθυνση της μέτρησης και όταν η δέσμη είναι κάθετη στο επίπεδο της μέτρησης. Η τεχνική πτώσης των 6 dB βασίζεται στην υπόθεση ότι όταν η κεντρική γραμμή της δέσμης προσπίπτει στην άκρη του ελαττώματος, τότε μόνο η μισή δέσμη βρίσκεται πάνω στο ελάττωμα και, κατά συνέπεια, το σήμα θα είναι μειωμένο κατά 50% (6dB), συγκριτικά με το ύψος του σήματος που θα παρατηρούνταν αν όλη η δέσμη προσέπιπτε πάνω στο ελάττωμα. Στην περίπτωση που η παραπάνω τεχνική εφαρμοστεί σε ελαττώματα μικρότερα από τη δέσμη, τότε η μέτρηση θα τείνει να δώσει ως αποτέλεσμα το πλάτος της δέσμης, αντί του μήκους του ελαττώματος, οδηγώντας έτσι σε υπερεκτίμηση του. Καθώς η δέσμη αποκλίνει από την κάθετο, η απόκριση από το ελάττωμα παραμορφώνεται, δυσχεραίνοντας την εύρεση του σημείου στο οποίο σημειώνεται η πτώση των 6 dB.

Τεχνική Μέγιστου Εύρους: Η Τεχνική του μεγίστου Εύρους εφαρμόζεται για τη διαστασιολόγηση ελαττωμάτων όπου η δέσμη προσπίπτει πλάγια πάνω στο ελάττωμα. Η δέσμη μετακινείται, έτσι ώστε να μεγιστοποιηθεί η τελευταία κορυφή του σήματος πριν να εξαφανιστεί. Για την περίπτωση των λείων και επίπεδων ελαττωμάτων, η κορυφή αυτή αντιστοιχεί το περιθλώμενο σήμα που παράγεται από την ακμή του ελαττώματος. Για την περίπτωση των πολυεδρικών ελαττωμάτων το περιθλώμενο σήμα συχνά υπερκαλύπτεται από την ηχώ της τελευταίας έδρας του ελαττώματος, έχοντας σαν αποτέλεσμα την υποεκτίμηση του μήκους του.

Τεχνική πτώσης στάθμης κατά 20 dB: Η τεχνική της πτώσης στάθμης των 20 dB είναι παρόμοια με την τεχνική του μέγιστου εύρους. Η διαφορά των δύο τεχνικών έγκειται στο γεγονός ότι αντί να μεγιστοποιείται η ηχώ από τις ακμή-τελευταία έδρα του ελαττώματος, χρησιμοποιούνται οι άκρες της δέσμης, όπου το ύψος του σήματος έχει πέσει κατά 20 dB χαμηλότερα, συγκριτικά με το ύψος που αντιστοιχεί στην κεντρική γραμμή της δέσμης. Όπως και στην περίπτωση της τεχνικής μεγίστου εύρους υπάρχει συστηματικό σφάλμα το οποίο έχει ως αποτέλεσμα την υποεκτίμηση του σφάλματος.

Σε κάθε περίπτωση, η κατάλληλη τεχνική διαστασιολόγηση επιλέγεται με γνώμονα το είδος και τα χαρακτηριστικά των αναμενόμενων ασυνεχειών και λαμβάνοντας υπ' όψιν τους περιορισμούς που συνοδεύουν κάθε μία από τις προαναφερθείσες τεχνικές, καθώς επίσης, και το γεγονός ότι καμία από αυτές δεν θα δώσει την ακριβή τιμή του μεγέθους του ελαττώματος, παρά μια εκτίμηση αυτού στην **Τεχνική Μέγιστου Εύρους).**

2.2 Κατηγορίες πηγών σφάλματος κατά τη διαστασιολόγηση των ελαττωμάτων με τη μέθοδο των υπερήχων

Γενικά, οι πηγές των σφαλμάτων, που σχετίζονται με τη διαστασιολόγηση των ασυνεχειών με τη μέθοδο των υπερήχων, μπορούν να ταξινομηθούν στις παρακάτω δύο ευρείες κατηγορίες:

Α) **Αναπόφευκτα και Περιορισμένου Μεγέθους** σφάλματα που αποδίδονται στις διαδικασίες βαθμονόμησης και μέτρησης (καταγραφής), καθώς επίσης και σε ενδογενή σφάλματα της ίδιας της τεχνικής.

Β) **Σποραδικά και Εκτεταμένου Μεγέθους** σφάλματα που αποδίδονται στη λανθασμένη ερμηνεία των ανιχνευμένων ηχών, εξαιτίας της κακής λειτουργίας του εξοπλισμού ή/και σε εσφαλμένη ερμηνεία του επιθεωρητή.

Μία άλλη, ίσως πιο λεπτομερής, κατηγοριοποίηση των πηγών σφάλματος, που σχετίζονται με τη διαστασιολόγηση των ελαττωμάτων - ασυνεχειών, είναι η παρακάτω:

i. Σφάλματα μέτρησης που αποδίδονται σε υλικά αναφοράς.
ii. Σφάλματα οφειλόμενα στο χρησιμοποιούμενο εξοπλισμό.
iii. Σφάλματα, σχετιζόμενα με τα χαρακτηριστικά του υπό εξέταση δοκίμιο υλικού.
iv. Σφάλματα μέτρησης που αποδίδονται στο χειριστή.
v. Σφάλματα μέτρησης, σχετιζόμενα με τις συνθήκες εργασίας.

Ως προς τον υπολογισμό της αβεβαιότητας, εκτιμάται ότι οι 3 πρώτες κατηγορίες σφαλμάτων (σφάλματα οφειλόμενα στα μέσα ελέγχου, σφάλματα οφειλόμενα στο χρησιμοποιούμενο εξοπλισμό, σφάλματα οφειλόμενα στα χαρακτηριστικά του υπό εξέταση δοκιμίου) συνδέονται με αβεβαιότητα τύπου Β, ενώ οι δύο τελευταίες κατηγορίες σφαλμάτων (σφάλματα μέτρησης αποδιδόμενα στο χειριστή και σφάλματα μέτρησης σχετιζόμενα με τις συνθήκες εργασίες) συνδέονται με αβεβαιότητα τύπου Α

3. Μεθοδολογία εκτίμησης της αβεβαιότητας

Ο υπολογισμός της αβεβαιότητας, για τις μετρούμενες διαστάσεις ασυνέχειας με τη μέθοδο των υπερήχων, βασίζεται σε συνδυασμό των μεθοδολογιών που αναπτύσσονται στις παρακάτω Οδηγίες:

1. Οδηγία "Information for the procurement and conduct of NDT - Part 4: Ultrasonic Sizing Errors and their Implication for Defect Assessment"- HSE.
2. Specific Accreditation Guidance Infrastructure and Asset Integrity-Measurement uncertainty in NDT-NATA
3. Chapman, R. K. "Code of Practice. The Errors Assessment of Defect Measurement Errors in the Ultrasonic NDT of Welds," CEGB Guidance Document

Η συγκεκριμένη μεθοδολογία βασίζεται στις εξής παραδοχές:

- Η διαστασιολόγηση μίας ασυνέχειας με τη μέθοδο των υπερήχων υπόκειται τόσο σε συστηματικά (Τύπου Β), όσο και σε τυχαία σφάλματα (Τύπου Α), όπως αναφέρεται ανωτέρω.
- Τα συστηματικά σφάλματα, που είναι σε άμεση εξάρτηση από την επιλεγείσα τεχνική διαστασιολόγησης, θεωρούνται σταθερές τιμές.
- Τα τυχαία σφάλματα ποικίλλουν από μέτρηση σε μέτρηση και εκφράζονται μέσω της εκτιμώμενης τυπικής απόκλισης.

Η εκτίμηση του εύρους των σφαλμάτων ακολουθώντας τα εξής 4 βήματα:

1. Ανίχνευση των πηγών αβεβαιότητας και ποσοτικοποίηση των ευρών των σφαλμάτων. Παραδείγματα τέτοιων σφαλμάτων είναι το σφάλμα που σχετίζεται με τη βαθμονόμηση της γωνίας της δέσμης, το σφάλμα που προκύπτει από τη διακύμανση της ηχούς, εξαιτίας της κακής κατάστασης της υπό σάρωσης επιφάνειας κ.α. Στη βιβλιογραφία αναφέρονται 14 πηγές σφάλματος, χωρίς όμως να συνεισφέρουν όλα σε κάθε τεχνική διαστασιολόγησης..
2. Ακολουθεί ο υπολογισμός του σφάλματος διαστασιολόγησης που σχετίζεται με κάθε μία από τις παραπάνω πρωτογενείς πηγές σφάλματος. Η Οδηγία CEGB Code of Practice παρέχει τύπους για τον υπολογισμό του μεγέθους συνεισφοράς καθεμίας από τις παραπάνω πηγές σφάλματος στο συνολικό σφάλμα (βλ. Πίνακα 1). Τα εκτιμώμενα εύρη σφάλματος που προκύπτουν από τις εξισώσεις, εκφράζονται ως μια τιμή +/-.
3. Μετατροπή κάθε εύρους σε τυπική αβεβαιότητα. Η τυπική αβεβαιότητα αντιστοιχεί στο βαθμό διασποράς της κατανομής σφάλματος. Η μετατροπή του εύρους σφάλματος σε τυπική αβεβαιότητα γίνεται μετά από παραδοχές και λαμβάνοντας υπ' όψιν τη φύση της διασποράς μιας δεδομένης πηγής σφάλματος. Ως παράδειγμα αναφέρεται η περίπτωση της τριγωνικής κατανομής, όπου η τυπική αβεβαιότητα υπολογίζεται από την διαίρεση του ημιεύρους με $\sqrt{6}$. (Βλέπε ΠΙΝΑΚΑ 2)
4. Συνδυασμός των συνεισφορών από κάθε πηγή σφάλματος για την εξαγωγή της συνδυασμένης και, εν συνεχεία, της διευρυμένης αβεβαιότητας.

Πίνακας 1: Συνιστώσες πηγές πρωτογενών σφαλμάτων και σχετιζόμενοι τύποι υπολογισμού του σφάλματος διαστασιολόγησης

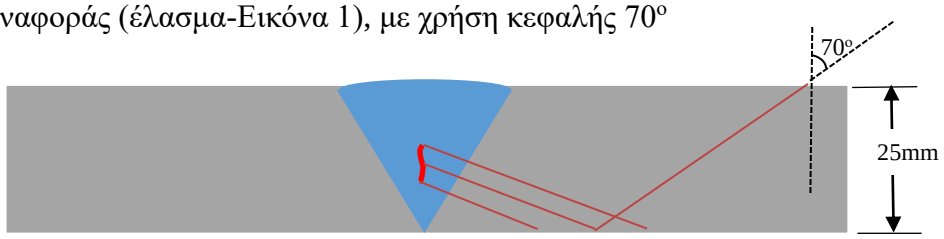
Περιγραφή πρωτογενούς σφάλματος	**Επιδρώντες παράγοντες**	***Συμβολισμός και εκτίμηση πρωτογενούς σφάλματος***	***Τύπος υπολογισμού του σχετιζόμενου σφάλματος διαστασιολόγησης (mm)***
Ενδογενή σφάλματα της τεχνικής διαστασιολόγησης Συστηματικό ***S1***	Τραχύτητας άκρης Μορφή (υποτίθεται συστηματική υποεκτίμηση μεγέθους 1,0 mm για κάθε άκρη, π.χ +2,0mm συνολικά)	Συστηματική υποδιαστασιολόγηση S1 mm (S1>0) **S1=2**	**S1 (συστηματικό)**
Ενδογενή σφάλματα της τεχνικής διαστασιολόγησης Τυχαίο ***E1***	Διαδρομή δέσμης / Απόσταση	Υπερτιθέμενο τυχαίο σφάλμα E1 mm **E1=4 mm**	**E1 (τυχαίο)**
Σφάλμα βαθμονόμησης στον ανιχνευτή ελαττώματος ***E2***	Εύρη στην κορυφή και στη βάση του ελαττώματος, Γωνία δέσμης	±Δr% **Δr=2**	$E2 = \pm \Delta r(R2 - R1) * \frac{cos\theta}{100}$
Σφάλμα βαθμονόμησης στη γωνία της δέσμης ***E3***	Γωνία δέσμης Εύρος	±$\Delta\theta_c$° **$\Delta\theta_c$=1**	$E3 = \pm \Delta\theta_c (R2 - R1) \frac{\pi}{180} sin\theta$
Σφάλματα εξαιτίας της μη γραμμικότητας της βάσης χρόνου ***E4***	-----	±Δρ% του πλάτους της πλήρους οθόνης **Δρ=1**	$E4 = \pm \Delta\rho * Rcal\sqrt{2} \frac{cos\theta}{100}$
Σφάλματα χαρτογράφησης ***E5***	Γωνίας δέσμης Εύρος	±ΔR_d mm στο εύρος για κάθε άκρη, ±$\Delta\theta_d$° για κάθε άκρη **ΔR_d=1 και $\Delta\theta_d$=0.5**	$E5 = \pm\sqrt{E_R^2 + E_\theta^2}$, όπου $E_R = \Delta R_d \sqrt{2} cos\theta$ και $E_\theta = \Delta\theta_d \sqrt{R_1^2 + R_2^2} \frac{\pi}{180} sin\theta$
Σφάλμα στη γωνία δέσμης εξαιτίας αποκλίσεων μορφής της υπό σάρωση επιφάνειας ***E6***	Καπάκι συγκόλλησης Μέταλλο βάσης	±$\Delta\theta_f$° **$\Delta\theta_f$=1 (για τα καπάκι της συγκόλλησης) $\Delta\theta_f$=0.4 (για το μέταλλο βάσης)**	$E6 = \pm \Delta\theta_f \sqrt{R_1^2 + R_2^2} \frac{\pi}{180} sin\theta$
Σφάλματα οφειλόμενα σε μεταβολές της σύζευξης, εξαιτίας του φινιρίσματος της υπό σάρωσης επιφάνειας (Μόνο για την τεχνική μεγίστου εύρους, η οποία χαρακτηρίζεται από αδιάστατη σταθερά β ***E7***	-----	Τεχνική μέγιστου εύρους Δεν υπάρχει συστηματικό σφάλμα Τυχαίο σφάλμα ±β **β=0.5 (καπάκι συγκόλλησης) β=0.2 (μέταλλο βάσης)**	$S7 = 0$ $E7 = \pm \frac{1}{90} \sqrt{(\Delta z_1)^2 + (\Delta z_2)^2} tan^{-1} \left[\frac{2 d_m \sin(\theta + \varepsilon)}{D cos\varepsilon}\right]$ όπου $\Delta z_1 = \begin{cases} \beta \frac{D}{4} sin\theta, αν\ R1 \le \frac{D^2}{4\lambda} \\ \beta \frac{\lambda}{D} R1 sin\theta, αν\ R1 \ge \frac{D^2}{4\lambda} \end{cases}$ και όμοια για το Δz_2 με αντικατάσταση του R1 από R2

Η υποδιασταδιολόγηση που σχετίζεται με το συστηματικό σφάλμα S1 αφορά, κυρίως, ελαττώματα που είναι μικρότερα από το πλάτος της δέσμης. Οι πρωτογενείς πηγές σφάλματος υποτίθεται ότι έχουν τριγωνική κατανομή, απ' όπου υπολογίζονται οι τυπικές

αβεβαιότητες. Ακολουθεί στη συνέχεια παράδειγμα υπολογισμού της αβεβαιότητας, όπου εφαρμόζονται τα παραπάνω.

4. Παράδειγμα υπολογισμού σφάλματος-Μελέτη περίπτωσης

Στη συνέχεια παρατίθεται μελέτη περίπτωσης στην οποία γίνεται η εκτίμηση της προβολής του ύψους του ελαττώματος (κάθετα στην υπό σάρωση επιφάνεια-through wall size), κατά τη διαστασιολόγηση ελαττώματος με τη μέθοδο των υπερήχων. Για τον υπολογισμό αυτό, έστω ότι ο έλεγχος με τη μέθοδο των υπερήχων πραγματοποιείται σε υλικό αναφοράς (έλασμα-Εικόνα 1), με χρήση κεφαλής 70^o



Σχήμα 1: Γεωμετρία του ελάσματος υπό εξέταση και ανιχνευθείσα ατέλεια

4.1 Υπολογισμός του του σφάλματος που σχετίζεται με την προβολή του ύψους του ελαττώματος

Ο παρακάτω υπολογισμός προκύπτει από τους τύπους του ΠΙΝΑΚΑ 1 και του ΠΙΝΑΚΑ 2 και αφορά το ύψος του ελαττώματος (διάσταση κάθετη στην επιφάνεια υπό σάρωση). Η χρησιμοποιούμενη τεχνική διαστασιολόγησης είναι η τεχνική του μέγιστου εύρους. Το γράμμα S αντιστοιχεί στα συστηματικά σφάλματα και το γράμμα Ε για τα τυχαία σφάλματα.

- S1 & E1: Ενδογενή σφάλματα της τεχνικής διαστασιολόγησης: Τα ενδογενή σφάλματα που σχετίζονται με την τεχνική διαστασιολόγησης είναι τόσο συστηματικά, όσο και τυχαία. Για την τεχνική του Μέγιστου Εύρους και για επίπεδο εμπιστοσύνης αυτά εκτιμώνται ως:

  S1=2mm και E1=±2.5mm

- E2: Σφάλμα βαθμονόμησης στον ανιχνευτή ελαττώματος: Το σφάλμα που σχετίζεται με τη βαθμονόμηση του ανιχνευτή εκτιμάται ως 2%. Η συνεισφορά στο σφάλμα διαστασιολόγησης υπολογίζεται από τον τύπο για το E2 και περιλαμβάνει τα εύρη στην κορυφή και στη βάση του ελαττώματος, R1 και R2 αντίστοιχα, καθώς και τη γωνία θ. Για το παράδειγμα ισχύει R1=47mm, R2=61mm και θ=70^o.

  E2=±0.1 mm

- E3: Σφάλμα βαθμονόμησης στη γωνία της δέσμης: Το πρωτογενές σφάλμα στη βαθμονόμηση της γωνίας της δέσμης εκτιμάται ως 1^o και η αντίστοιχη συνεισφορά στο σφάλμα του ύψους του ελαττώματος υπολογίζεται ως ±0.24mm.

  E3=±0.24 mm

- E4: Σφάλματα εξαιτίας τη μη γραμμικότητας της βάσης χρόνου: Το πρωτογενές σφάλμα εκτιμάται ως 1% του πλάτους της οθόνης. Το αντίστοιχο σφάλμα στο ύψος του ελαττώματος υπολογίζεται από τον τύπο και είναι ίσο με ±0.48 mm.

  E4= με ±0.48 mm

- Ε5: Σφάλματα χαρτογράφησης: Οι συνεισφορές των πρωτογενών σφαλμάτων κατά τη χαρτογράφηση των ευρών της κάθε ακμής εκτιμώνται ως1mm και στη χαρτογράφηση της γωνίας της δέσμης είναι 0.5^o. Το Ε5 υπολογίζεται ως ±0.8 mm.

$$E5=\pm 0.8 \text{ mm}$$

- Ε6: Αλλαγές στη γωνία της δέσμης, οφειλόμενα σε αποκλίσεις μορφής της υπό σάρωση επιφάνειας: Οποιοδήποτε σφάλμα μορφής στην υπό σάρωση επιφάνεια θα μεταβάλει τη γωνία της δέσμης. Αναμένεται οι αποκλίσεις να είναι μεγαλύτερες για το καπάκι της συγκόλλησης , συγκριτικά με το μέταλλο βάσης. Στην περίπτωση του παραδείγματος η κεφαλή είναι στο μέταλλο βάσης, οπότε προκύπτει ότι το Ε6 είναι ίσο με ±0.51 mm.

$$E6=\pm 0.51 \text{ mm}$$

- Ε7: Σφάλματα οφειλόμενα σε μεταβολές της σύζευξης, εξαιτίας του φινιρίσματος της υπό σάρωσης επιφάνειας: Αυτή η πηγή σφάλματος συνεισφέρει στο τυχαίο σφάλμα για την περίπτωση διαστασιολόγησης με την τεχνική του μέγιστου εύρους. Και σε αυτή την περίπτωση υπάρχει διαφοροποίηση μεταξύ του μετάλλου βάσης και του καπακιού της συγκόλλησης. Το Ε7, χρησιμοποιώντας τον τύπο του ΠΙΝΑΚΑ 1, υπολογίζεται ως ±0.57 mm.

$$E7=\pm 0.57 \text{ mm}$$

Υπολογισμός τυπικών αβεβαιοτήτων

Μετά την υπολογισμό των ευρών των σφαλμάτων ακολουθεί ο υπολογισμός των συνιστωσών των τυπικών αβεβαιοτήτων, λαμβάνοντας υπ' όψιν ότι ακολουθούν τριγωνική κατανομή. Κατά συνέπεια, τα εύρη των σφαλμάτων Ε1-Ε7 διαιρούνται με την τετραγωνική ρίζα του 6 και προκύπτουν τα u_1 ως u_7, τα οποία αντιστοιχούν στις επιμέρους αβεβαιότητες.

Υπολογισμός συνδυασμένης και διευρυμένης (τυχαία) αβεβαιότητα

Μετά τον υπολογισμό των επιμέρους αβεβαιοτήτων ακολουθεί ο υπολογισμός της συνδυασμένης αβεβαιότητας, η οποία προκύπτει από τον τύπο:

$$u_j = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2 + u_5^2 + u_6^2 + u_7^2}$$

Η διευρυμένη αβεβαιότητα U_j προκύπτει, αν θεωρήσουμε κανονική κατανομή πιθανότητας και θα είναι, για επίπεδο εμπιστοσύνης 95%:

$$U_j = 2 \times u_j$$

Η τελική εκτίμηση για την αβεβαιότητα που σχετίζεται με το ύψος του ελαττώματος, προκύπτει λαμβάνοντας υπ' όψιν το και το ενδογενές συστηματικό, το οποίο προστίθεται με την τιμή της διευρυμένης αβεβαιότητας.

Τα παραπάνω συνοψίζονται στον Πίνακα 2 που ακολουθεί.

Πίνακας 2: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα αβεβαιότητας για τη μελέτη περίπτωσης της διαστασιολόγησης του ύψους του ελαττώματος.

Συνιστώσα πηγής σφάλματος (σημείωση α)	**Εκτιμώμενο Εύρος (mm)** (από τους τύπους του Πίνακα 1)	**Υποτιθέμενη κατανομή**	**Συνιστώσα τυπικής αβεβαιότητας (mm)**	**Τετράγωνο τυπικής αβεβαιότητας (mm)**
Ενδογενή σφάλματα της τεχνικής διαστασιολόγησης Συστηματικό ***S1***	+2	-	-	-
Ενδογενή σφάλματα της τεχνικής διαστασιολόγησης ***Τυχαίο E1***	±2,5	Τριγωνική	1,02	1,04
Σφάλμα βαθμονόμησης στον ανιχνευτή ελαττώματος ***E2***	±0,1	Τριγωνική	0,04	0,001
Σφάλμα βαθμονόμησης στη γωνία της δέσμης ***E3***	±0,24	Τριγωνική	0,1	0,01
Σφάλματα εξαιτίας της μη γραμμικότητας της βάσης χρόνου ***E4***	±0,48	Τριγωνική	0,20	0,04
Σφάλματα χαρτογράφησης ***E5***	±0.8	Τριγωνική	0,33	0,11
Σφάλμα στη γωνία δέσμης εξαιτίας αποκλίσεων μορφής της υπό σάρωση επιφάνειας ***E6***	±0,51	Τριγωνική	0,21	0,04335
Σφάλματα οφειλόμενα σε μεταβολές της σύζευξης, εξαιτίας του φινιρίσματος της υπό σάρωσης επιφάνειας (Μόνο για την τεχνική μεγίστου εύρους, η οποία χαρακτηρίζεται από αδιάστατη σταθερά β ***E7***	±0,57	Τριγωνική	0,23	0,05

Πηγές τυχαίου σφάλματος μόνο:

Α. Άθροισμα τιμών των τετραγώνων των συνιστωσών τυχαίου σφάλματος	1.30
Β. Εκτιμώμενη συνδυασμένη τυπική (τυχαία) αβεβαιότητα (π.χ. πάρε τετραγωνική ρίζα μετά το βήμα Α)	1.14
Γ. Εκτιμώμενη διευρυμένη (τυχαία) αβεβαιότητα σε εύρος 95% (π.χ. πολλαπλασιασμός του βήματος Β επί 2)	+/- 2,28mm

Συνδυασμένες (συστηματική και τυχαία) πηγές σφάλματος

Δ. Εκτιμώμενη αβεβαιότητα εύρους 95% *(αφότου έχει περιληφθεί το συστηματικό σφάλμα)*	±2.28+2mm **π.χ., 0.28 ως 4.28mm**

5. Βιβλιογραφία

Cook R. , "Assessment of uncertainty for calibration and testing laboratories", NATA-National Association of Testing Authorities, 2nd edition, 2002.
Gardner W., "Improving the effectiveness and reliability of Non Destructive Testing", 1992 Pergamon Press.
National Association of Testing Authorities, "Technical Note 35 - Measurement uncertainty in Non-destructive Testing", January 2018.

Tesileanu D.M, "The calculating procedure for the measurement uncertianty using ultrasound testing", *The Romanian review precision mechanics, Optics & Mechatronics, p.p. 7-11* 2013.

Lingvall F., Tadeusz S.," Ultrasonic Characterization of Defects-Part 4. Study of realistic flaws in welded carbon steel", Uppsala University, Signals and Systems, February 1999.