



ΕΛΛΗΝΙΚΟ
ΑΝΟΙΚΤΟ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

«ΑΣΠΑΣΙΑ ΤΣΙΠΟΛΙΤΗ» «Η ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΩΝ ΣΕ ΕΝΑ
ΤΕΧΝΙΚΟ ΕΡΓΟ»



ΕΛΛΗΝΙΚΟ
ΑΝΟΙΚΤΟ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

«ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

&

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ»

«Διαχείριση Τεχνικών Έργων»

Διπλωματική Εργασία

«Η ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΩΝ ΣΕ ΕΝΑ ΤΕΧΝΙΚΟ
ΕΡΓΟ»

«Ασπασία Τσιπολίτη»

Επιβλέπων καθηγητής: «Κωνσταντίνος Σκαλωμένος»

Πάτρα, «Μάϊος» «2026»



Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του φοιτητή («συγγραφέας/δημιουργός») που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο ΕΑΠ, μη αποκλειστική άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, προσαρμογής, δημόσιου δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσής τους διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος και για όλο το χρόνο διάρκειας των δικαιωμάτων πνευματικής ιδιοκτησίας. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο για μελέτη και ανάγνωση δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, αποθήκευση, πώληση, εμπορική χρήση, μετάδοση, διανομή, έκδοση, εκτέλεση, «μεταφόρτωση» (downloading), «ανάρτηση» (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού. Ο συγγραφέας/δημιουργός διατηρεί το σύνολο των ηθικών και περιουσιακών του δικαιωμάτων.



ΕΛΛΗΝΙΚΟ
ΑΝΟΙΚΤΟ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

«ΑΣΠΑΣΙΑ ΤΣΙΠΟΛΙΤΗ» «Η ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΩΝ ΣΕ ΕΝΑ
ΤΕΧΝΙΚΟ ΕΡΓΟ»



ΕΛΛΗΝΙΚΟ
ΑΝΟΙΚΤΟ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

«Η ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΩΝ ΣΕ ΕΝΑ ΤΕΧΝΙΚΟ ΕΡΓΟ»

«ΑΣΠΑΣΙΑ ΤΣΙΠΟΛΙΤΗ»

Επιτροπή Επίβλεψης Πτυχιακής / Διπλωματικής Εργασίας

Επιβλέπων Καθηγητής:

«Κων/νος Σκαλωμένος»

«Καθηγητής ΕΑΠ»

Συν-Επιβλέπων Καθηγητής:

«Δημήτριος Μπάκος»

«Καθηγητής ΕΑΠ»

Πάτρα, «Μάϊος» «2026»



«Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή Κων/νο Σκαλωμένο για τη βοήθειά του και τις ωραίες παρατηρήσεις του στη συγγραφή της εν λόγω διπλωματικής εργασίας.»

«Αφιερώνω την εργασία μου στον σύντροφό μου για την κατανόησή του σε όλο το διάστημα της συγγραφής.»

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζει τις εργασίες συγκόλλησης ως κρίσιμη τεχνικοοικονομική διεργασία σε τεχνικά και βιομηχανικά έργα. Αντικείμενο της εργασίας είναι η ανάπτυξη και εφαρμογή πλαισίου αξιολόγησης που συνδέει τη μέθοδο συγκόλλησης με την ποιότητα, τους μη καταστροφικούς ελέγχους (NDT), τις επισκευές, την παραγωγικότητα, το Κόστος Ποιότητας (Cost of Quality - CoQ) και το ρίσκο σε επίπεδο έργου.

Η μεθοδολογία βασίζεται σε συγκριτική ανάλυση τριών πραγματικών έργων διαφορετικής φύσης: βιομηχανικό έργο σωληνώσεων, έργο αγωγού φυσικού αερίου και έργο κατασκευής/ανέγερσης σιδηροκατασκευής. Για κάθε περίπτωση εξετάζονται οι εφαρμοζόμενες μέθοδοι συγκόλλησης, οι απαιτήσεις ελέγχου, οι δείκτες παραγωγικότητας, ο παραγωγικός και μη παραγωγικός χρόνος, οι επισκευές, οι καθυστερήσεις και οι βασικοί παράγοντες κινδύνου. Η ανάλυση δεν περιορίζεται στην ταχύτητα εκτέλεσης της συγκόλλησης, αλλά αξιολογεί τη συνολική επίδραση των αποφάσεων συγκόλλησης στο πρόγραμμα, στο κόστος, στην ποιότητα και στην αξιοπιστία του έργου.

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η επιλογή μεθόδου συγκόλλησης δεν μπορεί να αξιολογείται απομονωμένα. Η αύξηση της φαινομενικής παραγωγικότητας μπορεί να οδηγήσει σε υψηλότερο κόστος αστοχίας, όταν δεν συνοδεύεται από κατάλληλη πιστοποίηση, επαρκή οπτικό έλεγχο, σωστή τεκμηρίωση και έγκαιρη εκτέλεση των NDT. Αντίθετα, η στρατηγική της σωστής αρχικής εκτέλεσης (right-first-time), με έμφαση στην πρόληψη, στον έλεγχο και στην οργανωμένη ροή εργασιών, μειώνει τις επισκευές, περιορίζει τους κύκλους επανεργασίας και βελτιώνει την προβλεψιμότητα του έργου.

Συμπερασματικά, η συγκόλληση πρέπει να αντιμετωπίζεται ως ολοκληρωμένη διεργασία έργου και όχι ως μεμονωμένη κατασκευαστική εργασία. Η τεκμηριωμένη σύνδεση παραγωγικότητας, ποιότητας, κόστους και ρίσκου μπορεί να υποστηρίξει καλύτερες αποφάσεις από μηχανικούς, επιθεωρητές και στελέχη διαχείρισης έργων.

Λέξεις-κλειδιά: συγκόλληση, τεχνικά έργα, παραγωγικότητα, μη καταστροφικοί έλεγχοι, Κόστος Ποιότητας, ρίσκο, right-first-time.

Abstract

This thesis examines welding as a critical techno-economic process in engineering and industrial projects. The objective of the study is to develop and apply an evaluation framework that links the welding method with quality, non-destructive testing (NDT), repairs, productivity, Cost of Quality (CoQ) and project-level risk.

The methodology is based on a comparative analysis of three real projects of different nature: an industrial piping project, a natural gas pipeline project and a steel structure fabrication and erection project. For each case study, the welding methods applied, inspection requirements, productivity indicators, productive and non-productive time, repairs, delays and main risk factors are examined. The analysis is not limited to welding speed alone, but evaluates the overall impact of welding-related decisions on project schedule, cost, quality and reliability.

The results show that the selection of a welding method cannot be assessed in isolation. An increase in apparent productivity may lead to higher failure costs when it is not supported by appropriate qualification, adequate visual inspection, proper documentation and timely execution of NDT. In contrast, a right-first-time strategy, with emphasis on prevention, inspection, and organised workflow, reduces repairs, limits rework cycles and improves project predictability.

In conclusion, welding should be treated as an integrated project process rather than an individual construction task. The documented link between productivity, quality, cost and risk can support better decisions by engineers, inspectors and project management executives.

Keywords: welding, technical projects, productivity, non-destructive testing, Quality Cost, risk, right-first-time.

Περιεχόμενα

Περίληψη	v
Abstract	vi
Περιεχόμενα.....	1
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	11
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	11
1.1 Ο ρόλος της συγκόλλησης στα τεχνικά έργα	11
1.2 Αντικείμενο και σκοπός - στόχοι της εργασίας	11
1.3 Μεθοδολογία εργασίας	12
1.4 Δομή της εργασίας	12
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	14
Η ΑΝΑΓΚΗ ΤΗΣ ΣΥΓΓΡΑΦΗΣ ΤΗΣ Δ.Ε ΚΑΙ Η ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ & ΤΩΝ ΣΤΟΧΩΝ ΤΗΣ.	14
2.1 Υφιστάμενη γνώση και βιβλιογραφική εικόνα.....	14
2.2 Κενά στη βιβλιογραφία και αναγκαιότητα της παρούσας εργασίας.....	14
2.3 Σκοπός και στόχοι της διπλωματικής εργασίας.....	17
2.4 Μεθοδολογία προσέγγισης	19
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	23
ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ ΤΗΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ	23
3.1 Γενικά στοιχεία για τη συγκόλληση	23
3.2 Βασικές μέθοδοι συγκόλλησης, είδη συνδέσεων.....	25
3.2.2 Χειροκίνητη μέθοδος GTAW «Συγκόλληση τόξου με ηλεκτρόδιο βολφραμίου (Gas Tungsten Arc Welding – GTAW / TIG)»	32
3.2.3 Ημιαυτόματη μέθοδος - συγκόλληση τόξου με προστατευτικό αέριο και αναλυσκόμενο σύρμα - (Gas Metal Arc Welding – GMAW / MIG–MAG)	34



3.2.4 Αυτόματη / ημιαυτόματη μέθοδος FCAW, συγκόλληση με σωληνοειδές σύρμα με πυρήνα ροής.....	37
3.2.5 Αυτόματες και ρομποτικές συγκολλήσεις (Automatic & Robotic Welding)	39
3.3 Περιβάλλον συγκολλήσεων και επίδραση στην ποιότητα, την παραγωγικότητα και το κόστος	40
3.3.1 Συγκολλήσεις σε ατελιέ – προστατευμένο περιβάλλον (προκατασκευή).....	42
3.3.2 Συγκολλήσεις σε εργοτάξιο	43
3.3.3 Συγκολλήσεις σε χαντάκια	44
3.4 Ελαττώματα και αστοχίες συγκολλήσεων	45
3.4.1 Γεωμετρικά ελαττώματα συγκολλήσεων	45
3.4.2 Μεταλλουργικά ελαττώματα	46
3.4.3 Αστοχίες συγκολλήσεων σε λειτουργία.....	48
3.4.4 Σχέση ελαττωμάτων με παραγωγικότητα και κόστος.....	49
3.4.5 Επεξήγηση ορισμών pWPS / PQR / WPS	50
3.5 Έλεγχοι συγκολλήσεων και διασφάλιση ποιότητας	51
3.5.1 Οπτικός έλεγχος (Visual Testing – VT).....	52
3.5.2 Έλεγχος με διεισδυτικά υγρά (Penetrant Testing – PT)	53
3.5.3 Έλεγχος με μαγνητικά σωματίδια (Magnetic Testing -MT).....	54
3.5.4 Ραδιογραφικός έλεγχος (Radiographic Testing – RT).....	54
3.5.6 Σχέση ελέγχων με κόστος ποιότητας (CoQ) / ρίσκο	56
3.6 Σύνδεση μεθόδων συγκόλλησης με κόστος παραγωγής	56
3.7 Πρότυπα συγκολλήσεων (ASME Section IX και EN ISO).....	60
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	63
ΠΑΡΑΓΩΓΙΚΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΗΤΑ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΩΝ	63
4.1 Παραγωγικότητα - Αποδοτικότητα - Δείκτες μέτρησης.....	63
4.2 Ανθρώπινος παράγοντας και παραγωγικότητα συγκολλήσεων.....	69
4.3 Ορισμός παραγωγικού και μη παραγωγικού χρόνου στις συγκολλήσεις	70



4.4 Επίδραση του περιβάλλοντος στην παραγωγικότητα των συγκολλήσεων.....	71
4.5 Οργάνωση συνεργείων και επίδραση στην παραγωγικότητα των συγκολλήσεων	73
4.6 Παραγωγικότητα συγκολλήσεων σε σχέση με τον προγραμματισμό έργου	73
4.7 Η αυτοματοποίηση της συγκόλλησης και η παραγωγικότητα	74
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5	78
ΚΟΣΤΟΣ, ΠΟΙΟΤΗΤΑ, ΡΙΣΚΟ / ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΠΑΡΑΓΩΓΙΚΟΤΗΤΑ.....	78
5.1 Ανάλυση κόστους συγκολλήσεων.....	78
5.2 Ανάλυση κόστους ποιότητας (Cost of Quality – CoQ)	79
5.3 Ανάλυση ρίσκου στις εργασίες συγκόλλησης.....	79
5.4 Συνδυαστική αξιολόγηση μεθόδων συγκόλλησης.....	83
5.5 Μαθηματική αποτύπωση παραγωγικότητας συγκολλήσεων σε σχέση με το κόστος.....	85
5.6 Μεθοδολογία ανάλυσης ευαισθησίας για το κόστος των συγκολλήσεων	87
5.7 Ανάλυση κόστους του κύκλου ζωής των συγκολλήσεων (Life Cycle Cost – LCC)	90
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6	93
ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ ΣΕ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΑ ΕΡΓΑ.....	93
6.1 Περιγραφή του Α έργου. Ανάλυση – παραγωγικότητας – ποιότητας – κόστους	93
6.2 Περιγραφή του Β' έργου. Ανάλυση – παραγωγικότητας – ποιότητας – κόστους.	104
Εικόνα 6.2.8: Επεξηγηματικός πίνακας σφαλμάτων των συγκολλήσεων για το έργο του ΤΑΡ	111
6.3 Περιγραφή του Γ' έργου. Ανάλυση – παραγωγικότητας–ποιότητας–κόστους. .	113
6.4 Συγκριτική ανάλυση: Έργου Α – Έργου Β - Έργο Γ	117
6.5 Σύγκριση μεθόδων συγκόλλησης ανά τύπο σύνδεσης	120
6.6 Συγκριτική απεικόνιση δεικτών κόστους ποιότητας για τα 3 έργα (KPI). ...	122



6.7 Ανάλυση ρίσκου σε επίπεδο έργου (Project-level risk analysis).....	126
6.8 Πρόταση και αξιολόγηση στρατηγικής διαχείρισης συγκολλήσεων.....	133
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7	136
ΚΑΝΟΝΙΣΤΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΚΑΙ ΠΡΟΤΥΠΑ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΩΝ ΣΕ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΑ ΕΡΓΑ.....	136
7.1 Ρόλος προτύπων και κανονισμών στη συγκόλληση	136
7.2 Συνήθη πλαίσια: ASME B31.3- EN – PED.....	136
7.3 Πιστοποιήσεις – Διαδικασίες : WPS – PQR – WPQ και πρακτική σημασία.....	137
7.4 Πλάνο επιθεώρησης (ITP) – Σημεία κρίσιμα / μαρτυρίες (Hold / Witness points) και “πραγματική” ροή έργου	137
7.5 Μη καταστροφικοί έλεγχοι (NDT’s : VT/PT/RT/UT): τι καλύπτουν, γιατί χρειάζεται ο συνδυασμός.....	137
7.6 Τεκμηρίωση – Weld dossier – Close-out	138
7.7 Σύνδεση κανονισμών με παραγωγικότητα, κόστος ποιότητας και ρίσκο (σύνοψη).....	138
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8	142
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ & ΤΕΛΙΚΕΣ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	142
8.1 Συνολικά συμπεράσματα.....	142
8.2 Συμπεράσματα για τις μεθόδους και το πεδίο εφαρμογής	143
8.3 Συμπεράσματα για παραγωγικότητα και αποδοτικότητα	143
8.4 Συμπεράσματα για NDT / κρίσιμα σημεία (hold points) / κύκλοι εργασιών (loops)	144
8.5 Συμπεράσματα για το κόστος ποιότητας	144
8.6 Συγκριτική αποτίμηση κινδύνων	145
8.7 Τελικές προτάσεις (τι μειώνει πραγματικά CoQ και ρίσκο).....	145
8.8 Πρόταση Στρατηγικών για τεχνικά έργα.....	146
8.9 Τελική αποτίμηση	146
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ	150

Παράρτημα Α : Γλωσσάριο	151
Παράρτημα Β: Πίνακας αντιστοίχισης υλικών (ASME P-N/GROUP ↔ ISO GROUP) για CS A106, P11/P22/P5/P9/P91, SS304/SS316.	157
Παράρτημα Γ: Ενδεικτικό πακέτο WPS/WPQR/WPQ	160
Παράρτημα Δ: Παράδειγμα υπολογισμού Cost of Quality (CoQ) στις συγκολλήσεις	161
Παράρτημα Ε: Ενδεικτικό ITP/Checklist συγκολλήσεων και NDT (hold points, witness points, traceability, θερμικά logs για Cr-Mo/P91).....	162

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ ΚΑΙ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Εικόνα 3.2.1 Μετωπική συγκόλληση τύπου V.....	26
Εικόνα 3.2.2: Socket weld.....	27
Εικόνα 3.2.3: Συνδέσεις.....	27
Εικόνα 3.2.4: Γωνιακές συνδέσεις.....	28
Εικόνα 3.2.5: Κοχλιωτές συνδέσεις.....	28
Εικόνα 3.2.6: Φλαντζωτή σύνδεση.....	29
Εικόνα 3.2.1.1: Συγκολλήσεις πεδίου.....	30
Εικόνα 3.2.1.2: Μηχανή ηλεκτροσυγκόλλησης.....	30
Εικόνα 3.2.1.3: Συγκόλληση με αργκόν.....	32
Εικόνα 3.2.3.1: Μηχανή συγκόλλησης MIG.....	35
Εικόνα 3.2.4.1: Συγκόλληση με μέθοδο FCAW.....	38
Εικόνα 3.3.1.1: Χώρος Ατελιέ.....	42
Εικόνα 3.3.2.1: Χώρος εργοταξίου.....	43
Εικόνα 3.3.3.1: αγωγός έξω από το χαντάκι.....	44
Εικόνα 3.4.1.1: Ατελή διείσδυση στη ρίζα.....	46
Εικόνα 3.4.2.1: Πόρος και ελλιπής συγκόλληση.....	47
Εικόνα 3.4.2.2: Υποκοπές (undercut), spatters.....	47
Εικόνα 3.4.2.3: Υποκοπή	48
Εικόνα 3.4.2.4: Επισκευή σφάλματος.....	48
Εικόνα 3.5.1: Οπτικός έλεγχος με ενδοσκόπιο.....	53
Εικόνα 3.5.2: Έλεγχος με τη μέθοδο των διεισδυτικών υγρών.....	54
Εικόνα 3.5.4: Τμήμα από φιλμ ραδιογραφικού ελέγχου.....	55
Εικόνα 6.1.1: Διάγραμμα ανόπτησης.....	96
Εικόνα 6.1.2: Μηχανή ανόπτησης	96



Εικόνα 6.1.3: Σωληνώσεις όπου γίνεται ανόπτηση.....	96
Εικόνα 6.1.4: Σωληνώσεις μετά την ανόπτηση.....	97
Εικόνα 6.1.5: Ενδείξεις οργάνου ΡΜΙ μετρήσεων ανοξείδωτου χάλυβα τύπου 316.....	98
Εικόνα 6.2.1: Στέγαστρο συγκολλήσεων στον ΤΑΠ.....	105
Εικόνα 6.2.2: ετικέτα από τις σωλήνες του έργου.....	107
Εικόνα 6.2.3: διαδρομή αγωγού στο έργο του ΤΑΠ.....	107
Εικόνα 6.2.4: Έλεγχος της φρέζας του αγωγού.....	107
Εικόνα 6.2.5: εργασίες μονταρίσματος (fit up) του αγωγού στο χαντάκι.....	108
Εικόνα 6.2.6 – Ενδεικτική κατανομή επισκευών (repairs) ανά μέθοδο Έργου Β’	108
Εικόνα 6.2.7 : Ημερήσια παραγωγή συγκολλήσεων στον ΤΑΠ και οι επισκευές της.....	109
Εικόνα 6.2.8 Επεξηγηματικός πίνακας σφαλμάτων των συγκολλήσεων για το έργο του ΤΑΠ.....	111
Εικόνα 6.3.1: Άποψη του έργου Γ’	114

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 3.6.1 – Συγκριτική αξιολόγηση μεθόδων συγκόλλησης ως προς το κόστος	58
Πίνακας 3.6.2 – Συγκριτική αξιολόγηση μεθόδων συγκόλλησης ως προς το κόστος.....	59
Πίνακας 3.7.1: Αντιστοίχιση υλικών κατά ASME και EN ISO.....	61
Πίνακας 4.1.1 – Ενδεικτικές μετρικές παραγωγικότητας συγκολλήσεων ανά μέθοδο.....	68
Πίνακας 4.7.1: Ορισμός KPI' s.....	77
Πίνακας 5.3.1 – Ενδεικτική ανάλυση ρίσκου εργασιών συγκόλλησης σε τεχνικά έργα.....	82
Πίνακας 5.4.1 – Ενδεικτικός πίνακας απόφασης επιλογής μεθόδου συγκόλλησης.....	84
Πίνακας 6.1.1 – Μετρικές παραγωγικότητας συγκολλήσεων Α' έργου.....	101
Πίνακας 6.1.2 – Κατανομή επισκευών και κόστους ποιότητας.....	102
Πίνακας 6.1.3 — Καταγραφή κινδύνων – Ενέργειες Μείωσης στο Έργου Α	104
Πίνακας 6.2.5 — Καταγραφή κινδύνων – Ενέργειες Μείωσης στο Έργου Β -ΤΑΠ.....	112
Πίνακας 6.3.1 – Κατανομή παραγωγικού και μη παραγωγικού χρόνου στο εργοστάσιο.....	115
Πίνακας 6.3.2 – Κατανομή παραγωγικού και μη παραγωγικού χρόνου στο εργοτάξιο.....	115
Πίνακας 6.3.3 – Καταγραφή κινδύνων και ενέργειες μείωσης στο έργο Γ.....	116
Πίνακας 6.4.1 – Συγκριτική αξιολόγηση των τριών έργων.....	117
Πίνακας 6.4.2 – Κατανομή παραγωγικού και μη παραγωγικού χρόνου.....	119
Πίνακας 6.5.1 – Μέθοδοι συγκόλλησης και επισκευές στα 3 έργα με διάκριση Ρίζα / Γεμίσματα.....	121
Πίνακας 6.6.1: Συγκριτικός πίνακας των (3) έργων των KPI.....	122
Πίνακας 6.6.2 – Σύγκριση παραγωγικότητας, ποιότητας και κόστους ποιότητας (πρόληψη, εκτίμηση, αποτυχία, καθυστέρηση).....	124
Πίνακας 6.6.3 – Συγκεντρωτικός πίνακας NDT's όλων των έργων).....	125
Πίνακας 6.7.1 – Σύγκριση κινδύνων στα τρία έργα.....	128
Πίνακας 6.7.2 – Παράγοντες κινδύνου στα τρία έργα.....	129



Πίνακας 6.7.3 — Συγκεντρωτικός πίνακας αξιολόγησης ρίσκου και τρόπος παρέμβασης.....	130
Πίνακας 6.7.4 — Κρίσιμα κριτήρια επιρροής των εργασιών συγκόλλησης σε τεχνικά έργα.....	132
Πίνακας 6.8.1 — Δείκτες επιρροής έργων και η βαρύτητά τους.....	133
Πίνακας 6.8.2 — Αξιολόγηση στρατηγικών.....	134
Πίνακας 7.7.1— Συγκριτική θεώρηση των πλαισίων ASME, EN και PED ως προς τη συγκόλληση, τους ελέγχους, την τεκμηρίωση, το κόστος και το ρίσκο σε τεχνικά έργα.....	139
Πίνακας 7.7.2 — Απαιτήσεις NDT ανά κανονισμό και υλικό.....	141
Πίνακας 7.7.3 — Επίδραση κανονισμών στο CoQ.....	141
Πίνακας Α.1 — Γλωσσάριο τεχνικών όρων.....	151
Πίνακας Β.1 — Αντιστοίχιση υλικών με βάση τα πρότυπα.....	158



ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 6.2.1 – Σφάλματα σε αυτόματες συγκολλήσεις.....	110
Διάγραμμα 6.2.2 – Σφάλματα σε υβριδικές συγκολλήσεις.....	110
Διάγραμμα 6.2.3 – Σφάλματα σε χειροκίνητες συγκολλήσεις.....	111
Διάγραμμα 6.6.1: Απεικόνιση των δεικτών κόστους ποιότητας για τα 3 έργα.....	123

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Ο ρόλος της συγκόλλησης στα τεχνικά έργα

Η συγκόλληση αποτελεί μία από τις βασικές διεργασίες κατασκευής σε σύγχρονα τεχνικά και βιομηχανικά έργα. Η ποιότητα των συγκολλήσεων επηρεάζει άμεσα τη μηχανική αντοχή, τη λειτουργικότητα, την ασφάλεια και τη διάρκεια ζωής των εγκαταστάσεων. Για τον λόγο αυτό, η συγκόλληση δεν μπορεί να αντιμετωπίζεται μόνο ως τεχνική εργασία εκτέλεσης, αλλά ως διεργασία που επηρεάζει συνολικά την αξιοπιστία και την οικονομική απόδοση ενός έργου.

Στην πράξη, οι αποφάσεις που αφορούν τη μέθοδο συγκόλλησης, το περιβάλλον εκτέλεσης, την οργάνωση των συνεργείων, την πιστοποίηση διαδικασιών και προσωπικού, καθώς και τον χρόνο εκτέλεσης των ελέγχων, επηρεάζουν ταυτόχρονα την παραγωγικότητα, την ποιότητα και το κόστος. Ελαττώματα που δεν εντοπίζονται έγκαιρα οδηγούν σε επισκευές, επαναληπτικούς ελέγχους, καθυστερήσεις, πρόσθετη κατανάλωση υλικών και αυξημένο ρίσκο για το έργο.

Η διάσταση αυτή μπορεί να αποτυπωθεί μέσω του Κόστους Ποιότητας (Cost of Quality - CoQ), το οποίο διακρίνει το κόστος πρόληψης και ελέγχου από το κόστος αστοχίας. Η αρχική επένδυση σε σωστή διαδικασία, εκπαίδευση, πιστοποίηση, τεκμηρίωση και επιθεώρηση μπορεί να αυξάνει φαινομενικά το άμεσο κόστος, αλλά μειώνει τις επισκευές, τις επανεργασίες και τις καθυστερήσεις που συνήθως επιβαρύνουν πολύ περισσότερο το τελικό κόστος του έργου.

1.2 Αντικείμενο και σκοπός - στόχοι της εργασίας

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάπτυξη και εφαρμογή ενός τεχνοοικονομικού πλαισίου αξιολόγησης εργασιών συγκόλλησης. Το πλαίσιο αυτό συνδέει τη μέθοδο συγκόλλησης με την ποιότητα, τους μη καταστροφικούς ελέγχους (NDT), τις επισκευές, την παραγωγικότητα, το Κόστος Ποιότητας (CoQ) και το ρίσκο, σε επίπεδο έργου.

Ειδικότεροι στόχοι είναι:

- η παρουσίαση και σύγκριση βασικών μεθόδων συγκόλλησης,



- η ανάλυση παραμέτρων που επηρεάζουν ποιότητα και μηχανική αντοχή,
- η εκτίμηση του άμεσου και έμμεσου κόστους και του CoQ,
- η συσχέτιση παραγωγικότητας, ποιότητας, κόστους και ρίσκου,
- η εξαγωγή συμπερασμάτων χρήσιμων για τη λήψη τεχνικών αποφάσεων σε μελλοντικά έργα.

Η κεντρική θέση της εργασίας είναι ότι η βέλτιστη επιλογή συγκόλλησης δεν προκύπτει μόνο από την ταχύτητα ή το άμεσο κόστος της μεθόδου. Προκύπτει από τη συνδυαστική αξιολόγηση τεχνικής καταλληλότητας, απαιτήσεων ποιότητας, επιπτώσεων στο χρονοδιάγραμμα, πιθανότητας επανεργασιών και συνολικού κόστους κύκλου έργου.

1.3 Μεθοδολογία εργασίας

Η εργασία ακολουθεί εφαρμοσμένη συγκριτική μεθοδολογία, βασισμένη σε τρεις πραγματικές περιπτώσεις έργων. Η επιλογή διαφορετικών έργων επιτρέπει τη σύγκριση μεθόδων συγκόλλησης, περιβαλλόντων εκτέλεσης, ποιοτικών απαιτήσεων και οργανωτικών περιορισμών.

Το Έργο Α αφορά βιομηχανικό έργο σωληνώσεων σε διυλιστηριακό περιβάλλον, με συγκολλήσεις σε ατελιέ και εργοτάξιο.

Το Έργο Β αφορά έργο αγωγού φυσικού αερίου, όπου εφαρμόζονται μέθοδοι υψηλής παραγωγικότητας και αυξημένης τυποποίησης.

Το Έργο Γ αφορά έργο κατασκευής και ανέγερσης σιδηροκατασκευής, στο οποίο αναδεικνύεται η επίδραση του ποιοτικού ελέγχου της προκατασκευής στην παραγωγικότητα του εργοταξίου.

Για κάθε έργο εξετάζονται ποσοτικά και ποιοτικά δεδομένα παραγωγικότητας, ποιότητας, κόστους και ρίσκου. Τα στοιχεία χρησιμοποιούνται συγκριτικά και τεκμηριωτικά. Δεν επιχειρείται πλήρης λογιστική κοστολόγηση όλων των έργων, αλλά ανάδειξη των μηχανισμών μέσω των οποίων οι αποφάσεις συγκόλλησης επηρεάζουν την τελική απόδοση.

1.4 Δομή της εργασίας

Το κεφάλαιο 1 παρουσιάζει το ρόλο της συγκόλλησης στα τεχνικά έργα, το αντικείμενο, το σκοπό και τη μεθοδολογία της εργασίας. Το Κεφάλαιο 2 παρουσιάζει την υφιστάμενη γνώση,

τα κενά της βιβλιογραφίας, τον σκοπό, τους στόχους και τη μεθοδολογική προσέγγιση της εργασίας. Το Κεφάλαιο 3 αναπτύσσει το θεωρητικό υπόβαθρο των μεθόδων συγκόλλησης, των ελαττωμάτων και των μη καταστροφικών ελέγχων. Το Κεφάλαιο 4 εξετάζει την παραγωγικότητα και τους δείκτες μέτρησής της. Το Κεφάλαιο 5 συνδέει το κόστος, την ποιότητα και το ρίσκο με την παραγωγικότητα. Το Κεφάλαιο 6 εφαρμόζει τη μεθοδολογία στα τρία πραγματικά έργα. Το Κεφάλαιο 7 παρουσιάζει τα συμπεράσματα, συνθέτει τις τελικές στρατηγικές και τα κριτήρια απόφασης. Το Κεφάλαιο 8 παρουσιάζει το κανονιστικό πλαίσιο και τα πρότυπα που επηρεάζουν τις συγκολλήσεις σε βιομηχανικά έργα.



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Η ΑΝΑΓΚΗ ΤΗΣ ΣΥΓΓΡΑΦΗΣ ΤΗΣ Δ.Ε ΚΑΙ Η ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ & ΤΩΝ ΣΤΟΧΩΝ ΤΗΣ.

2.1 Υφιστάμενη γνώση και βιβλιογραφική εικόνα

Η θεωρία της συγκόλλησης και οι επιμέρους μέθοδοι έχουν αποτελέσει αντικείμενο εκτενούς μελέτης στη διεθνή και ελληνική βιβλιογραφία. Πλήθος ερευνητικών εργασιών και τεχνικών εγχειριδίων αναλύουν τις παραμέτρους που επηρεάζουν είτε τη διείδυση, είτε τη μικροδομή του υλικού είτε τη μηχανική αντοχή των συγκολλήσεων. Τέλος υπάρχει μεγάλος όγκος μελετών οι οποίες ασχολούνται με τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των διαφορετικών τεχνικών συγκόλλησης.

Παράλληλα, στη σύγχρονη βιβλιογραφία παρατηρείται αυξανόμενο ενδιαφέρον για τη μέτρηση της παραγωγικότητας και της αποδοτικότητας σε πραγματικές συνθήκες έργου, μέσω δεικτών όπως χρόνος τόξου (Arc Time), αποδοτικότητα συγκόλλησης (Welding Efficiency), ρυθμός εναπόθεσης υλικού. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει να συνδεθεί η τεχνική απόδοση με την οικονομική διάσταση, καθώς οι καθυστερήσεις ελέγχων, οι αναμονές, οι επισκευές οι περιορισμοί του εργοταξίου επηρεάζουν άμεσα το τελικό κόστος.

Ωστόσο, σε αρκετές περιπτώσεις η συγκόλληση παρουσιάζεται ως μέρος ευρύτερων αναλύσεων τεχνικών έργων, χωρίς συστηματική ενοποίηση της τεχνικής αξιολόγησης (μέθοδος, παράμετροι, έλεγχοι) με την οικονομική αξιολόγηση (CoQ) και την ανάλυση ρίσκου. Επιπλέον, η κανονιστική διάσταση (π.χ. απαιτήσεις ASME/EN/PED, qualification WPS/WPQR/WPQ, επίπεδα NDT) αποτυπώνεται συχνά αποσπασματικά, παρότι επηρεάζει καθοριστικά χρόνο και κόστος έργου.

2.2 Κενά στη βιβλιογραφία και αναγκαιότητα της παρούσας εργασίας

Παρά την ευρεία εφαρμογή της συγκόλλησης σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις και τεχνικά έργα, η διεθνής βιβλιογραφία εμφανίζει σημαντική διαφοροποίηση ως προς το επίπεδο ανάλυσης και το αντικείμενο εστίασης. Ένα μεγάλο μέρος των δημοσιεύσεων εξετάζει τη

συγκόλληση πρωτίστως ως μεταλλουργική/μηχανική διεργασία εστιάζοντας στη μικροδομή, στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη (HAZ), στη διείσδυση, στην εμφάνιση ελαττωμάτων και στις μηχανικές ιδιότητες των συγκολλήσεων υπό διαφορετικές παραμέτρους διεργασίας (El-Shennawy et al., 2024; Shafeek et al., 2024; Kumar et al., 2025).

Αντίστοιχα, σημαντική βιβλιογραφία αφορά συγκολλήσεις ανόμοιων υλικών και τις επιπτώσεις στη δομή και στη μεταλλουργία της ζώνης συγκόλλησης, αναδεικνύοντας κρίσιμους μηχανισμούς που επηρεάζουν την ακεραιότητα και την αντοχή της σύνδεσης (Giudice et al., 2024). Η προσέγγιση αυτή είναι θεμελιώδης για την κατανόηση της συμπεριφοράς των συγκολλήσεων, ωστόσο συχνά παραμένει στο επίπεδο εργαστηριακής, τεχνολογικής διερεύνησης, χωρίς να επεκτείνεται συστηματικά στο πλαίσιο εκτέλεσης έργου.

Παράλληλα, αναπτύσσεται βιβλιογραφία που προσεγγίζει την παραγωγικότητα μέσω βελτιστοποίησης παραμέτρων και αξιολόγησης διεργασιών με στόχο τη βελτίωση ποιότητας και απόδοσης, ιδίως σε ειδικές περιπτώσεις (π.χ. συγκολλήσεις ανόμοιων υλικών) (Shrimali et al., 2026). Επίσης, υπάρχουν εργασίες που συγκρίνουν διεργασίες ως προς την “οικονομία” τους ή ως προς επιλεγμένους δείκτες παραγωγικότητας (π.χ. SMAW έναντι FCAW), χωρίς όμως να ενσωματώνουν πλήρως τις επιπτώσεις που εμφανίζονται σε πραγματικές συνθήκες εργοταξίου (αναμονές, συσσώρευση ελέγχων, περιορισμοί πρόσβασης, επισκευές) και χωρίς να αποτυπώνουν τον συνολικό μηχανισμό δημιουργίας κόστους σε επίπεδο έργου (Singh & Ziaulhaq, 2020). Επιπλέον, υπάρχει θεωρητική συζήτηση γύρω από δείκτες παραγωγικότητας συγκολλήσεων και τη χρησιμότητά τους, η οποία όμως συχνά παραμένει ως “κριτική ανάλυση δεικτών” χωρίς να καταλήγει σε ενιαίο πλαίσιο που να συνδέει με συνέπεια τους δείκτες αυτούς με οικονομικές και οργανωτικές επιπτώσεις σε πραγματικές εφαρμογές (Ferreira, 2018).

Σημαντικός άξονας της βιβλιογραφίας αφορά επίσης τους μη καταστροφικούς ελέγχους (NDT) και την τεχνική τους εφαρμογή. Υπάρχουν τεχνικο-εκπαιδευτικές και κατευθυντήριες πηγές που περιγράφουν τη λογική και τις δυνατότητες μεθόδων όπως ο υπερηχητικός έλεγχος (UT) και ο ρόλος του στη διάγνωση ασυνεχειών στις συγκολλήσεις (Sonatest, 2020). Παράλληλα, συναντώνται εργασίες που αξιολογούν και “κατεβάζουν” τεχνολογίες NDE για απαιτητικές βιομηχανικές εφαρμογές, ιδίως σε περιβάλλοντα όπου η πρόσβαση είναι περιορισμένη ή απαιτείται απομακρυσμένη επιθεώρηση (Akowua et al., 2023). Παρότι οι

μελέτες αυτές είναι κρίσιμες από τεχνική σκοπιά, συνήθως εστιάζουν στο “τι μπορεί να ελέγξει” η κάθε μέθοδος και υπό ποιες συνθήκες, χωρίς να συνδέουν συστηματικά την επιλογή και τον χρονισμό των NDT με (α) την παραγωγικότητα, (β) τις επισκευές, (γ) το συνολικό κόστος και (δ) το ρίσκο σε επίπεδο έργου (π.χ. rework loops, καθυστερημένες απορρίψεις, συσσώρευση ελέγχων RT/UT).

Από την άλλη πλευρά, η βιβλιογραφία για το κόστος επανεργασιών (rework) και τις συνέπειές του σε έργα κατασκευών είναι ιδιαίτερα πλούσια σε επίπεδο γενικής κατασκευαστικής διοίκησης (construction management). Ενδεικτικά, η μελέτη του Love (2002) καταδεικνύει την ύπαρξη σημαντικών άμεσων και έμμεσων επιπτώσεων από τις επισκευές, αναλύοντας τις “έμμεσες” συνέπειες σε διαχείριση έργου, χρόνο και τελικά κόστος.

Ωστόσο, η προσέγγιση αυτή δεν είναι εξειδικευμένη στις συγκολλήσεις : δεν εστιάζει στη συγκόλληση ως κρίσιμη διεργασία με ιδιαίτερες απαιτήσεις (qualification, WPS, NDT, αποδοχή/απόρριψη), ούτε περιγράφει ποσοτικά και συστηματικά την αλληλουχία: <ελαττώματα → NDT →επισκευές (repair) → επανέλεγχος> που χαρακτηρίζει τα βιομηχανικά έργα σωληνώσεων. Έτσι, ενώ η έννοια του rework είναι γνωστή, παραμένει κενό η εξειδικευμένη γεφύρωση των αρχών αυτών με την πραγματική πρακτική της συγκόλλησης σε τεχνικά έργα.

Με βάση τα παραπάνω, διαπιστώνεται ότι η βιβλιογραφία τείνει να καλύπτει τον χώρο της συγκόλλησης σε “κάθετες” ενότητες:

- (1) τεχνική/μεταλλουργική ανάλυση και μηχανικές ιδιότητες (El-Shennawy et al., 2024; Shafeek et al., 2024; Kumar et al., 2025; Giudice et al., 2024),
- (2) παραγωγικότητα ως δείκτες / αποδοτικότητα διεργασιών (Ferreira, 2018; Singh & Ziaulhaq, 2020; Shrimali et al., 2026),
- (3) NDT και τεχνολογίες επιθεώρησης (Sonatest, 2020; Akowua et al., 2023),
- (4) rework ως γενική κατασκευαστική έννοια (Love, 2002).

Ωστόσο, σπανίως παρουσιάζεται ένα ενιαίο και εφαρμόσιμο πλαίσιο που να συνδυάζει ταυτόχρονα, σε πραγματικά τεχνικά έργα:

1. τη μέθοδο συγκόλλησης (και τις τεχνικές απαιτήσεις της),



2. την ποιότητα ως λειτουργικό αποτέλεσμα (ελαττώματα και αποδοχή μέσω NDT),
3. την παραγωγικότητα ως πραγματική απόδοση έργου (χρόνοι συγκόλλησης, αναμονές),
4. το Κόστος Ποιότητας (CoQ) ως ολοκληρωμένο οικονομικό αποτύπωμα (πρόληψη–έλεγχοι–αστοχία),
5. την ανάλυση ρίσκου σε επίπεδο έργου,

δηλαδή πώς τα παραπάνω επηρεάζουν την κρίσιμη διαδρομή, την προβλεψιμότητα, την πιθανότητα των καθυστερήσεων και των αποκλίσεων.

Το κενό αυτό γίνεται εντονότερο σε βιομηχανικά έργα, όπου η συγκόλληση επηρεάζει το χρονοδιάγραμμα, το κόστος ποιότητας. Παράλληλα απαιτείται τεκμηρίωση της ποιότητας με τη χρήση κατάλληλων αποδεικτικών και ελέγχων καθώς και συμμόρφωση με κανόνες.

Η παρούσα διπλωματική εργασία έρχεται να καλύψει αυτό το κενό, προτείνοντας μια συνδυαστική προσέγγιση που γεφυρώνει την τεχνική αξιολόγηση των συγκολλήσεων με μετρικές παραγωγικότητας και με οικονομική αποτίμηση μέσω κόστους ποιότητας (CoQ), ενώ παράλληλα ενσωματώνει τη διάσταση του ρίσκου σε επίπεδο έργου. Η επιλογή πραγματικών έργων ως πεδίο εφαρμογής επιτρέπει τα συμπεράσματα να είναι πρακτικά αξιοποιήσιμα για τον μηχανικό, υποστηρίζοντας τεκμηριωμένη λήψη αποφάσεων σε μελλοντικές εφαρμογές.

2.3 Σκοπός και στόχοι της διπλωματικής εργασίας

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας, όπως ήδη αναφέρθηκε, είναι η ανάπτυξη και εφαρμογή ενός τεχνικοοικονομικού πλαισίου αξιολόγησης εργασιών συγκόλλησης σε τεχνικά έργα, το οποίο συνδέει τη μέθοδο συγκόλλησης με την ποιότητα (NDT/repairs), την παραγωγικότητα (Arc Time/αναμονές), το Κόστος Ποιότητας (Cost of Quality – CoQ) και το ρίσκο σε επίπεδο έργου. Ο σκοπός αυτός υπηρετεί τη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων για επιλογή μεθόδων και πρακτικών που οδηγούν σε σωστή πρώτη εκτέλεση (right-first-time), μειώνοντας τις επισκευές και ενισχύοντας την αξιοπιστία και την ανθεκτικότητα των κατασκευών.

Οι στόχοι οι οποίοι θα μας οδηγήσουν στον σκοπό μας είναι:

Ο πρώτος στόχος αναφέρεται στη χαρτογράφηση και περιγραφή μεθόδων συγκόλλησης που χρησιμοποιούνται συνήθως σε βιομηχανικά έργα.

Θα παρουσιαστούν και θα περιγραφούν συγκριτικά οι βασικές μέθοδοι που αφορούν το αντικείμενο της εργασίας (SMAW, GTAW, GMAW / ημιαυτόματες και αυτοματοποιημένες εφαρμογές), με σαφή αναφορά στα πλεονεκτήματα και τους περιορισμούς τους ως προς το πεδίο εφαρμογής καθώς και τις απαιτήσεις της ποιότητας.

Το αποτέλεσμα θα δοθεί με συγκριτικό πίνακα χαρακτηριστικών ανά μέθοδο, στα κεφάλαια 2-3.

Ο δεύτερος στόχος αναφέρεται στον ορισμό και την εφαρμογή των δεικτών παραγωγικότητας.

Θα οριστούν και θα εφαρμοστούν οι δείκτες παραγωγικότητας/αποδοτικότητας (ενδεικτικά Arc Time, Welding Efficiency), η κατανομή του παραγωγικού και μη παραγωγικού χρόνου και επίσης, όπου είναι διαθέσιμος, ο δείκτης ρυθμός εναπόθεσης ώστε να αποτυπωθεί η πραγματική απόδοση της συγκόλλησης σε συνθήκες έργου. Ο στόχος αυτός θα επιτευχθεί με τη χρήση πινάκων, διαγραμμάτων κατανομής χρόνου, και συγκριτικής απεικόνισης δεικτών ανά έργο. Η θεωρητική αρχή δίδεται στα κεφάλαια 3-4 ενώ η εφαρμογή στα έργα που μελετώνται πραγματοποιείται στο κεφάλαιο 6.

Ο τρίτος στόχος αναφέρεται στην αποτύπωση της ποιότητας μέσω μη καταστροφικών ελέγχων (NDT) και των επισκευών.

Θα αποτυπωθεί η ποιότητα των συγκολλήσεων μέσω αποτελεσμάτων της στρατηγικής των ελέγχων VT/PT/RT/UT. Επιπροσθέτως θα χρησιμοποιηθούν οι δείκτες επισκευών (repairs) ανά τύπο σύνδεσης (root, fill/cap, tie-ins,) όπου εφαρμόζονται στις μετωπικές και γωνιακές συγκολλήσεις (butt & socket welds), με σαφή διάκριση περιπτώσεων όπου δεν εφαρμόζονται (N/A).

Τα αποτελέσματα θα αποδοθούν με αντίστοιχους πίνακες για κάθε έργο, διαγράμματα σε κάποιες περιπτώσεις και τέλος θα γίνει η σύνδεση των επισκευών με τους κύκλους επαναληπτικών εργασιών (loops) των NDT's στα κεφάλαια 3 και 5 η θεωρία ενώ η εφαρμογή στο κεφάλαιο 6.



Ο τέταρτος στόχος αναφέρεται στην εκτίμηση του κόστους της ποιότητας (CoQ) και τη συσχέτισή του επίσης με την παραγωγικότητα και την ποιότητα.

Θα εκτιμηθεί το κόστος ποιότητας (CoQ) διαχωρίζοντας το κόστος πρόληψης από το κόστος ελέγχου και το κόστος αστοχίας (repairs, επαναληπτικοί έλεγχοι, καθυστερήσεις). Επίσης θα συσχετιστεί με τους δείκτες παραγωγικότητας και ποιότητας.

Τέλος το αποτέλεσμα επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας συγκριτική αποτύπωση του κόστους ποιότητας (δείκτες κόστους ποιότητας) και επιπροσθέτως τεκμηριωμένες προτάσεις μείωσης του κόστους ποιότητας (CoQ). Το αποτέλεσμα θα δοθεί στα κεφάλαια 4–6.

Ο πέμπτος στόχος αναφέρεται στην ανάλυση ρίσκου σε επίπεδο έργου.

Θα αξιολογηθεί το ρίσκο που προκύπτει από την συσσώρευση ελέγχων (bottlenecks) σε όλα τα στάδια, ήτοι τεχνικό, χρονικό, οικονομικό, λόγω της καθυστερημένης ανίχνευσης ελαττωμάτων και των επαναληπτικών εργασιών. Η μελέτη γίνεται ανά έργο και συγκεντρωτικά ώστε να εκτιμηθούν τα αποτελέσματα. Η ολοκλήρωση του στόχου θα γίνει στα κεφάλαια 5-6 και η τελική αποτίμηση θα παρουσιαστεί στο κεφάλαιο 8.

Ο έκτος στόχος αναφέρεται στην εξαγωγή εφαρμόσιμων συμπερασμάτων και πλαισίου της λήψης αποφάσεων.

Θα εξαχθούν συμπεράσματα και πρακτικές οδηγίες (lessons learned) που μετατρέπουν τα ευρήματα σε πλαίσιο λήψης αποφάσεων για μελλοντικά έργα (επιλογή μεθόδων, έλεγχοι, τεκμηρίωση, προγραμματισμός).

Ο στόχος θα προσδιοριστεί στα κεφάλαια 6-8.

Η επίτευξη των παραπάνω στόχων υποστηρίζεται από τη μεθοδολογία που παρουσιάζεται παρακάτω στην παράγραφο 1.4, η οποία βασίζεται σε συγκριτική ανάλυση πραγματικών έργων.

2.4 Μεθοδολογία προσέγγισης

Η μεθοδολογία της παρούσας διπλωματικής εργασίας όπως έχουμε ήδη αναφέρει, βασίζεται σε μία εφαρμοσμένη, συγκριτική προσέγγιση μελέτης, πραγματικών τεχνικών έργων (case

studies). Στόχος είναι η σύνδεση της τεχνικής συμπεριφοράς της συγκόλλησης με την παραγωγικότητα, το κόστος ποιότητας (CoQ) και το ρίσκο σε επίπεδο έργου.

Σε αντίθεση με καθαρά εργαστηριακές ή θεωρητικές προσεγγίσεις, η παρούσα εργασία αντιμετωπίζει τη συγκόλληση ως διεργασία έργου, η οποία επηρεάζεται από το περιβάλλον εφαρμογής (ατελιέ ή πεδίο), τον ανθρώπινο παράγοντα (η ικανότητα του συγκολλητή), τις απαιτήσεις ελέγχου (NDT) και την οργάνωση της παραγωγής.

Ο ερευνητικός σχεδιασμός και η λογική της προσέγγισης ακολουθούνται βάσει των παρακάτω βασικών σταδίων. Αρχικά γίνεται καθορισμός πλαισίου αξιολόγησης (κριτήρια/μετρικές) και επιλογή δεικτών που αποτυπώνουν παραγωγικότητα, ποιότητα και κόστος. Στη συνέχεια γίνεται συλλογή και οργάνωση δεδομένων έργου: αποτύπωση δεδομένων από πραγματικές κατασκευές, με στόχο τη συγκριτική ανάλυση. Έπειτα ακολουθεί ανάλυση παραγωγικότητας: υπολογισμός/εκτίμηση δεικτών όπως η παραγωγικότητα (Arc Time), η αποδοτικότητα (Welding Efficiency), χρόνοι αναμονών, μη παραγωγικός χρόνος. Ακολουθεί η ανάλυση ποιότητας: αποτύπωση ελαττωμάτων, επισκευές, αποτελεσμάτων NDT και των σχετικών κύκλων επανεργασιών (loops) (rework loops). Στη συνέχεια γίνεται οικονομική αποτίμηση μέσω κόστους ποιότητας (CoQ): διάκριση κόστους πρόληψης, ελέγχου και αστοχίας και συσχέτισή τους με την παραγωγικότητα και τις επισκευές. Η ανάλυση ρίσκου σε επίπεδο έργου: εκτίμηση τεχνικού, χρονικού, οικονομικού ρίσκου, με έμφαση στην αναμονή των ελέγχων (bottlenecks) και τις καθυστερημένες απορρίψεις. Τέλος απαιτείται αξιολόγηση επιδόσεων (benchmarking) και μαθήματα που αποκομίστηκαν (lessons learned): συγκριτική αποτίμηση έργων και εξαγωγή εφαρμόσιμων συμπερασμάτων για τη βελτιστοποίηση της διαδικασίας.

Η παραπάνω λογική χρησιμοποιείται για να τεκμηριωθεί το κεντρικό επιχείρημα της εργασίας: ότι η σωστή αρχική εκτέλεση (right-first-time) της συγκόλλησης μειώνει το κόστος ποιότητας (CoQ), περιορίζει τις καθυστερήσεις ενισχύει τη συνολική ανθεκτικότητα (resilience) του έργου ενώ παράλληλα βοηθά στην περιβαλλοντική βιωσιμότητα εφόσον μειώνει το περιβαλλοντικό αποτύπωμα της κατασκευής.

Την παράθεση περιπτώσεων μελέτης, (case studies), όπου επιλέγονται τεχνικά έργα με διαφορετικά χαρακτηριστικά, ώστε να αναδειχθεί η επίδραση του περιβάλλοντος, της οργάνωσης των μεθόδων συγκόλλησης στην υλοποίηση των έργων ως προς την ποιότητα

/ασφάλεια /οικονομικών αποτελεσμάτων. Στην παρούσα εργασία, ο κορμός της ανάλυσης βασίζεται σε τρία έργα διαφορετικής φύσης:

1. Έργο Α (βιομηχανικό έργο): αφορά ένα διϋλιστηριακό έργο κατασκευής νέας μονάδας παραγωγής πετρελαϊκού παραγώγου. Το έργο περιλαμβάνει την κατασκευή τμημάτων σωληνώσεων οι οποίες λαμβάνουν χώρα είτε σε στεγασμένο χώρο του εργολάβου (ατελιέ) είτε στο σημείο της τελικής ανέγερσης δηλαδή στο πεδίο (εργοτάξιο).
2. Έργο Β (έργο αγωγού – TAP): βιομηχανικό έργο επίσης, το οποίο αφορά την κατασκευή αγωγού μεγάλης διατομής, ο οποίος μεταφέρει φυσικό αέριο από το Αζερμπαϊτζάν, στην Αλβανία και την Ιταλία μέσω της Ελλάδος. Η ολοκλήρωση του έργου περιλαμβάνει επίσης την κατασκευή βανοστασίων στην διαδρομή του. Στον κυρίως όγκο του έργου η διατομή του αγωγού είναι 48 ίντσες και μικρότερες διατομές στα βανοστάσια.
3. Έργο Γ (Βιομηχανικό έργο): αφορά την κατασκευή-ανέγερση σιδηροκατασκευής σε διϋλιστηριακό χώρο, επίσης βιομηχανικό έργο. Η κατασκευή και η ανέγερση έγινε από διαφορετικούς εργολάβους. Επίσης δεν υπήρχε μόνιμος έλεγχος από τον πελάτη στη φάση της κατασκευής επειδή ο πελάτης ήθελε πιο νωρίς το έργο από τους αρχικούς χρόνους παράδοσης.

Όλα τα δεδομένα παρατίθενται ανά έργο και εξετάζονται αρχικά για το κάθε έργο ξεχωριστά και κατόπιν συγκριτικά, ώστε να μπορέσουμε να αποδείξουμε «τα κακώς και τα καλώς κείμενα» που έχουν αντιμετωπιστεί από έργα τα οποία υλοποιήθηκαν. Έχουμε λοιπόν δεδομένα παραγωγής, ποιότητας κόστους με όσα στοιχεία διατίθενται.

Τα ποσοτικά στοιχεία χρησιμοποιούνται με ενδεικτικό και συγκριτικό χαρακτήρα: στόχος δεν είναι η πλήρης λογιστική κοστολόγηση, αλλά η τεκμηρίωση της σχέσης παραγωγικότητας – ποιότητας – κόστους ποιότητας - ρίσκου.

Ακολουθούν οι δείκτες της παραγωγικότητας και της αποδοτικότητας όπου πάλι με βάση τα δεδομένα των έργων αποδεικνύεται ότι η παραγωγικότητα επηρεάζεται συχνά περισσότερο από συσσωρεύσεις εργασιών και αναμονές (ιδίως σε NDT) παρά από την “ταχύτητα” του ίδιου του συγκολλητή.

Μερικοί από τους δείκτες που θα ασχοληθούμε είναι οι εξής:

- Χρόνος Τόξου (Arc Time) (%): ποσοστό καθαρού χρόνου συγκόλλησης επί του συνολικού διαθέσιμου χρόνου,
- Αποδοτικότητα συγκόλλησης (Welding Efficiency): λόγος παραγωγικού προς συνολικό χρόνο,
- Μη παραγωγικός χρόνος (Non-productive time breakdown): fit-up, αναμονές ελέγχων, αλλαγές αναλωσίμων, rework,
- ρυθμός προόδου (όπου υπάρχει διαθέσιμη ποσοτικοποίηση).

Κατόπιν ακολουθεί η ποιότητα και οι εργασίες που δημιουργούνται στην περίπτωση επισκευών. Ήτοι:

- Επισκευές (συνολικά και ανά τύπο σύνδεσης),
- Διαδοχή ελέγχων (VT/PT/RT/UT) και χρονισμός τους,
- Επαναλαμβανόμενες εργασίες (Rework loops): κύκλοι επανεργασίας που προκύπτουν από απορρίψεις και επαναληπτικούς ελέγχους.

Όλη η παραπάνω ανάλυση δεν έχει ουσιαστικά καμία ουσία εάν δεν συνδυαστεί και αποτυπωθεί ως κόστος του έργου. Τι κοστίζει δηλαδή η αστοχία με τα επακόλουθά της σε όλο το φάσμα του έργου που μελετάμε και τεκμηριώνει ότι το κόστος πρόληψης ενώ δείχνει να ανεβάζει το κόστος του έργου, στην πραγματικότητα το μειώνει και άμεσα και έμμεσα. Η λογική αυτή διακρίνεται και συγκρίνει το:

- Κόστος πρόληψης (διαδικασίες, εκπαίδευση, πιστοποιήσεις (qualification)),
- Κόστος ελέγχου (VT/PT/RT/UT, τεκμηρίωση),
- Κόστος αστοχίας (repairs, επαναληπτικοί έλεγχοι, καθυστερήσεις).

Όσον αφορά την ανάλυση ρίσκου των έργων, αυτή τοποθετείται σε πίνακες ώστε να είναι κατανοητά τα συμπεράσματα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ ΤΗΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ

Στο κεφάλαιο αυτό θα αναφερθούν οι μέθοδοι συγκόλλησης που χρησιμοποιούνται στα έργα που θα αναλυθούν με τα πλεονεκτήματά τους και τα μειονεκτήματά τους. Επίσης αναλύονται τα περιβάλλοντα που συναντώνται οι συγκολλήσεις και τα εκάστοτε προβλήματα που μπορεί να δημιουργούνται καθώς και οι μέθοδοι συγκόλλησης που χρησιμοποιούνται. Γίνεται διαχωρισμός και ανάλυση των αστοχιών και των ελαττωμάτων μίας συγκόλλησης και εξηγούνται πως τα ελαττώματα επηρεάζουν την παραγωγικότητα. Στη συνέχεια γίνεται επεξήγηση των όρων WPS/PQR και τέλος αναφέρονται οι μη καταστροφικοί έλεγχοι που χρησιμοποιούνται στα βιομηχανικά έργα ώστε να βρεθούν και να αξιολογηθούν τυχόν ελαττώματα με βάση τον εκάστοτε κώδικα του έργου. Τέλος γίνεται σύνδεση των ελέγχων και των μεθόδων συγκόλλησης με το κόστος ποιότητας και μία αναφορά στην τελευταία ενότητα για τα πρότυπα συγκολλήσεων.

3.1 Γενικά στοιχεία για τη συγκόλληση

Η συγκόλληση αποτελεί μία από τις βασικότερες μεθόδους μόνιμης σύνδεσης μεταλλικών στοιχείων. Εφαρμόζεται εκτενώς σχεδόν σε όλα τα τεχνικά έργα, τις βιομηχανικές εγκαταστάσεις καθώς και στις μεταλλικές κατασκευές. Μέσω της συγκόλλησης επιτυγχάνεται η ένωση δύο ή περισσότερων τεμαχίων υλικού, με ή χωρίς την προσθήκη υλικού πλήρωσης, έτσι ώστε το τελικό σύνολο να συμπεριφέρεται ως ενιαίο δομικό στοιχείο.

Στις αρχές της βιομηχανικής εποχής, οι μεταλλικές κατασκευές βασίζονταν κυρίως σε μηχανικές συνδέσεις, όπως κοχλίες πριτσίνια. Οι μέθοδοι αυτές παρουσίαζαν περιορισμούς ως προς την κατασκευή λόγω μεγάλου βάρους και μικρής μηχανικής αντοχής. Η ανάγκη για πιο ελαφριές, πιο ανθεκτικές, οικονομικά πιο αποδοτικές κατασκευές οδήγησε σταδιακά στην ανάπτυξη νέων τεχνικών θερμικής σύνδεσης, οι οποίες αποτέλεσαν τον πρόδρομο της σύγχρονης συγκόλλησης.

Η συγκόλληση διαδραμάτισε καθοριστικό ρόλο στη βιομηχανική ανάπτυξη και στη διαμόρφωση της σύγχρονης μορφής των τεχνικών έργων. Η δυνατότητα δημιουργίας μόνιμων και ανθεκτικών, στεγανών, συνδέσεων μεταξύ μεταλλικών στοιχείων επέτρεψε την κατασκευή σύνθετων και μεγάλης κλίμακας δομών, οι οποίες δεν θα μπορούσαν να υλοποιηθούν με παραδοσιακές μηχανικές συνδέσεις.

Στον τομέα της βαριάς βιομηχανίας, η συγκόλληση αποτέλεσε βασικό εργαλείο για την ανάπτυξη βιομηχανικών μονάδων παραγωγής, διυλιστηρίων, χημικών βιομηχανιών, ενεργειακών εγκαταστάσεων. Η δυνατότητα συγκόλλησης σωληνώσεων και δοχείων πίεσης καθώς και μεταλλικών κατασκευών, με υψηλές απαιτήσεις αντοχής και στεγανότητας, συνέβαλε στην καλύτερευση της ασφάλειας, στην αύξηση της αξιοπιστίας, στην βελτιστοποίηση της απόδοσης των εγκαταστάσεων.

Ιδιαίτερα στον τομέα των αγωγών μεταφοράς υγρών και αερίων, η συγκόλληση κατέστη αναντικατάστατη τεχνολογία. Η κατασκευή εκτεταμένων δικτύων αγωγών σε δύσκολα γεωγραφικά και περιβαλλοντικά πεδία κατέστη εφικτή χάρη στη συγκόλληση, η οποία προσφέρει υψηλή μηχανική αντοχή και μειωμένο κίνδυνο διαρροών. Στα έργα αυτά, η ποιότητα της συγκόλλησης συνδέεται άμεσα με τη δημόσια ασφάλεια και την περιβαλλοντική προστασία, γεγονός που οδήγησε στη θέσπιση αυστηρών κανονισμών και διαδικασιών ελέγχου.

Παράλληλα, η συγκόλληση επηρέασε καθοριστικά την εξέλιξη της παραγωγικότητας στη βιομηχανία. Η μετάβαση από χειροκίνητες μεθόδους σε ημιαυτόματες, αυτόματες και ρομποτικές διαδικασίες συγκόλλησης επέτρεψε τη μείωση του χρόνου κατασκευής, τη βελτίωση της επαναληψιμότητας καθώς και τον περιορισμό των σφαλμάτων που οφείλονται στον ανθρώπινο παράγοντα. Η αύξηση της παραγωγικότητας αποτέλεσε κρίσιμο παράγοντα για τη μείωση του κόστους και τη βελτίωση της ανταγωνιστικότητας των βιομηχανικών έργων.

Ο ρόλος της συγκόλλησης δεν περιορίζεται μόνο στο τεχνικό σκέλος της κατασκευής, αλλά επεκτείνεται και στη διαχείριση των έργων. Οι επιλογές που αφορούν τη μέθοδο συγκόλλησης, το περιβάλλον εκτέλεσης (εργοτάξιο ή ατελιέ), τον βαθμό αυτοματοποίησης, το επίπεδο ποιοτικού ελέγχου επηρεάζουν άμεσα τον προγραμματισμό, τη στελέχωση καθώς



και το οικονομικό αποτέλεσμα του έργου. Έτσι, η συγκόλληση εξελίχθηκε από απλή τεχνική διεργασία σε κρίσιμο παράγοντα στρατηγικού σχεδιασμού.

Με βάση τα παραπάνω, καθίσταται απαραίτητη η συστηματική παρουσίαση των βασικών μεθόδων συγκόλλησης και των παραγόντων που επηρεάζουν την ποιότητά τους, προκειμένου να καταστεί δυνατή η αξιολόγηση της σχέσης τους με την παραγωγικότητα και το κόστος.

Στη σύγχρονη βιομηχανική πραγματικότητα, η συγκόλληση αντιμετωπίζεται ως μέρος ενός ολοκληρωμένου συστήματος παραγωγής, στο οποίο ενσωματώνονται δείκτες παραγωγικότητας, κόστους, ποιότητας και διαχείρισης ρίσκου.

Η κατανόηση του ρόλου της συγκόλλησης στη βιομηχανική ανάπτυξη, αποτελεί βασικό υπόβαθρο για την ανάλυση των σύγχρονων τεχνολογιών συγκόλλησης καθώς επίσης για τη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων σε τεχνικά έργα μεγάλης κλίμακας.

3.2 Βασικές μέθοδοι συγκόλλησης, είδη συνδέσεων.

Στη σύγχρονη κατασκευαστική πρακτική εφαρμόζεται ένα ευρύ φάσμα μεθόδων συγκόλλησης, οι οποίες διαφοροποιούνται ως προς τον τρόπο παραγωγής θερμότητας, τον βαθμό αυτοματοποίησης, τις απαιτήσεις σε εξοπλισμό και το επίπεδο ποιότητας του τελικού αποτελέσματος. Η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου συγκόλλησης δεν αποτελεί μόνο τεχνική απόφαση, αλλά επηρεάζει άμεσα την οργάνωση των εργασιών, την παραγωγικότητα, το οικονομικό αποτέλεσμα του έργου.

Μερικές από τις μεθόδους συγκόλλησης, οι οποίες θα αναφερθούν στη συγκεκριμένη εργασία, χρησιμοποιήθηκαν στα έργα που θα αναλυθούν και είναι οι εξής:

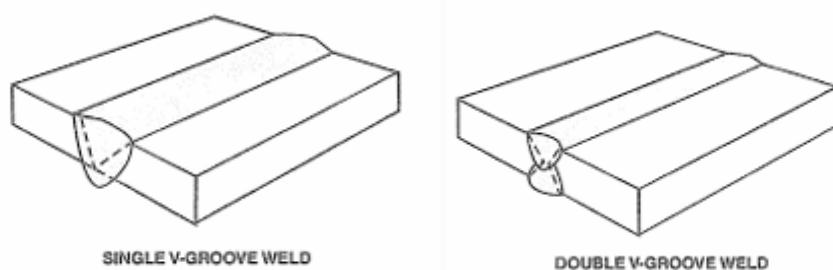
- 1) Χειροκίνητη μέθοδος SMAW <Συγκόλληση τόξου με επικαλυμμένο ηλεκτρόδιο (Shielded Metal Arc Welding – SMAW)>
- 2) Χειροκίνητη μέθοδος GTAW <Συγκόλληση τόξου με ηλεκτρόδιο βολφραμίου (Gas Tungsten Arc Welding – GTAW / TIG)>
- 3) Ημιαυτόματη μέθοδος - συγκόλληση τόξου με προστατευτικό αέριο και αναλίσκόμενο σύρμα - (Gas Metal Arc Welding – GMAW / MIG–MAG)

- 4) Αυτόματη / ημιαυτόματη μέθοδος FCAW, συγκόλληση με σωληνοειδές σύρμα με πυρήνα ροής.
- 5) Αυτόματες και ρομποτικές συγκολλήσεις (Automatic & Robotic Welding)

Πριν προχωρήσουμε αναλυτικά στις μεθόδους θα πρέπει να αναφερθούν τα είδη των συνδέσεων που συνήθως, σύμφωνα με τις κατηγοριοποιήσεις των προτύπων, συναντώνται στην βιομηχανία. Και είναι:

1. Μετωπικές συγκολλήσεις (butt welds). Αφορά συνδέσεις οι οποίες γίνονται μετωπικά σε απόσταση τουλάχιστον 3mm στις άκρες και έχουν ρίζα.

Υπάρχουν διάφορα είδη μετωπικών συνδέσεων ανάλογα με τη θέση, το σχήμα τα στοιχεία σύνδεσης όπως βλέπουμε στην εικόνα 3.2.1 που ακολουθεί. Μετωπικές συγκολλήσεις συναντάμε σε σωληνώσεις συνήθως $>2''$, σε σιδηροκατασκευές, σε λάμες (plates). Οι μετωπικές συγκολλήσεις αποτελούν το μεγαλύτερο ποσοστό στα βιομηχανικά έργα.



Εικόνα 3.2.1 Μετωπική συγκόλληση τύπου V

2. Συγκολλήσεις με υποδοχείς (socket welds). Πρόκειται για επιφανειακές συγκολλήσεις οι οποίες χρησιμοποιούνται σε σωληνώσεις με μικρές διαμέτρους $<2''$. Επίσης χρησιμοποιούνται για την κατασκευή βοηθητικών δικτύων μικρών πιέσεων π.χ συνοδείες ατμού σωληνώσεων για θέρμανση.

Τα socket welds, συνήθως αφορούν μικρό ποσοστό του έργου, μπορούν όμως να επιβαρύνουν σημαντικά το κόστος ποιότητας όταν δεν εκτελούνται σύμφωνα με τις προδιαγραφές. Ακολουθούν οι εικόνες 3.2.2 και 3.2.3 χρησιμοποιούνται ως οπτική

τεκμηρίωση της περιγραφόμενης εφαρμογής και συνδέουν τη θεωρητική ανάλυση με την πρακτική εκτέλεση στο έργο.



Εικόνα 3.2.2: Socket weld



Εικόνα 3.2.3: Συνδέσεις

3. Γωνιακές συγκολλήσεις (fillet welds). Πρόκειται είτε για συνδέσεις στηριγμάτων με σωλήνες είτε για συνδέσεις λαμών σε διάφορες θέσεις είτε συνδέσεις εξαρτημάτων.



Εικόνα 3.2.4: Γωνιακές συνδέσεις

Η εικόνα 3.2.4 χρησιμοποιείται ως οπτική επεξήγηση των περιγραφόμενων συνδέσεων εφαρμογής.

4. Κοχλιωτές συνδέσεις (threaded connections). Είναι οι συνδέσεις με σπείρωμα.



Εικόνα 3.2.5: Κοχλιωτές συνδέσεις

Η εικόνα 3.2.5 χρησιμοποιείται ως παράδειγμα των κοχλιωτών συνδέσεων.

5. Συγκόλληση στεγάνωσης (seal welds). Είναι οι συγκολλήσεις που εφαρμόζονται συνήθως μετά από μία βιδωτή σύνδεση ώστε να την καταστήσουν στεγανή. Είναι συγκολλήσεις με ένα γρήγορο πάσο στο τέλος της σύσφιξης συνήθως σε

εξυδατώσεις αγωγών (drain) για διασφάλιση μη διαρροής τους, εφόσον έχουμε επικίνδυνο υγρό ροής.

6. Φλαντζωτή σύνδεση (flanged joint). Σύνδεση που ενώνεται με φλάντζες και βίδες. Για τη στεγανοποίηση χρησιμοποιείται ειδικό παρεμβύσμα (gasket) το οποίο καθορίζεται από τον μελετητή του έργου. Ακολουθεί η εικόνα 3.2.6 όπου έχουμε φλατζωτή σύνδεση.



Εικόνα 3.2.6: Φλαντζωτή σύνδεση

3.2.1 Χειροκίνητη μέθοδος SMAW <Συγκόλληση τόξου με επικαλυμμένο ηλεκτρόδιο (Shielded Metal Arc Welding – SMAW)>

Η συγκόλληση τόξου με επικαλυμμένο ηλεκτρόδιο (Shielded Metal Arc Welding – SMAW) αποτελεί μία από τις παλαιότερες και πιο διαδεδομένες μεθόδους συγκόλλησης στη βιομηχανία και στα τεχνικά έργα. Η ευρεία εφαρμογή της οφείλεται κυρίως στην απλότητα του εξοπλισμού, στην ευελιξία χρήσης, στη δυνατότητα εκτέλεσης συγκολλήσεων σε ποικίλες και συχνά δυσμενείς συνθήκες περιβάλλοντος.

Η βασική αρχή λειτουργίας της SMAW στηρίζεται στη δημιουργία ηλεκτρικού τόξου μεταξύ του βασικού υλικού και ενός αναλίσκόμενου ηλεκτροδίου, το οποίο φέρει επικάλυψη. Το ηλεκτρόδιο λειτουργεί ταυτόχρονα ως υλικό πλήρωσης και ως μέσο προστασίας της λουτρού συγκόλλησης. Κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης, η επικάλυψη του ηλεκτροδίου τήκεται και δημιουργεί αέρια και σκωρία, τα οποία προστατεύουν το λουτρό από την ατμοσφαιρική μόλυνση και συμβάλλουν στη σταθεροποίηση της διαδικασίας.



Εικόνα 3.2.1.1: Συγκολλήσεις πεδίου



Εικόνα 3.2.1.2: Μηχανή ηλεκτ/σης

Οι Εικόνες 3.2.1.1 και 3.2.1.2 χρησιμοποιούνται ως οπτική τεκμηρίωση της περιγραφόμενης εφαρμογής και συνδέουν τη θεωρητική ανάλυση με την πρακτική εκτέλεση στο έργο. Η μέθοδος SMAW εφαρμόζεται ευρέως σε όλα τα βιομηχανικά έργα, τα έργα υποδομών, τις ενεργειακές εγκαταστάσεις, στις συγκολλήσεις πεδίου, όπου η χρήση πιο σύνθετων ή ευαίσθητων μεθόδων συγκόλλησης δεν είναι εφικτή. Στον τομέα των σωληνώσεων και των βιομηχανικών εγκαταστάσεων, η SMAW χρησιμοποιείται συχνά στα γεμίσματα και στα τελειώματα των συγκολλήσεων, μετά την εκτέλεση της ρίζας με άλλη μέθοδο υψηλότερης ακρίβειας, όπως η GTAW. Η πρακτική αυτή επιτρέπει τον συνδυασμό ποιότητας στη ρίζα και αυξημένης παραγωγικότητας στα επόμενα περάσματα. Τέλος σε μεγάλους αγωγούς μεταφοράς φυσικού αερίου χρησιμοποιείται και στην εκτέλεση της ρίζας με τη θέση συγκόλλησης τύπου «κατεβατό» και στα γεμίσματα, σε σημεία δύσβατα, όπου καμία άλλη μέθοδος δεν μπορεί να εφαρμοστεί.

Ένα από τα βασικότερα πλεονεκτήματα της SMAW είναι η ευελιξία. Η μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί σε διαφορετικές θέσεις συγκόλλησης (οριζόντια, κάθετη, ουρανός, υπό γωνία),



σε ευρύ φάσμα υλικών και σε περιβάλλοντα όπου οι καιρικές συνθήκες ή οι γεωμετρικοί περιορισμοί καθιστούν δύσκολη τη χρήση άλλων μεθόδων. Φυσικά για να έχεις ποιοτικό αποτέλεσμα στις συγκολλήσεις αυτές πρέπει να χρησιμοποιείται κάλυψη στο πεδίο, βασικά από τον αέρα και τις καιρικές συνθήκες, οπότε είθισται να χρησιμοποιείται κιόσκι πάνω από τις συγκολλήσεις. Φυσικά αυτό ισχύει για όλες τις μεθόδους συγκόλλησης στο πεδίο.

Επιπλέον, το κόστος εξοπλισμού είναι σχετικά χαμηλό, γεγονός που καθιστά τη SMAW οικονομικά προσιτή, ιδιαίτερα σε έργα μικρής ή μεσαίας κλίμακας. Η διαθεσιμότητα ποικιλίας ηλεκτροδίων επιτρέπει την προσαρμογή της διαδικασίας στις απαιτήσεις του εκάστοτε έργου, τόσο ως προς τη μηχανική αντοχή όσο και ως προς τις μεταλλουργικές ιδιότητες της συγκόλλησης.

Παρά τα πλεονεκτήματά της, η SMAW παρουσιάζει σημαντικούς περιορισμούς, κυρίως σε όρους παραγωγικότητας. Η διαδικασία χαρακτηρίζεται από συχνές διακοπές λόγω αλλαγής ηλεκτροδίων, καθαρισμού σκωρίας, ρύθμισης παραμέτρων, γεγονός που μειώνει τον πραγματικό χρόνο τόξου (Arc Time).

Η ποιότητα της συγκόλλησης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την εμπειρία και την ικανότητα του συγκολλητή. Η ανθρώπινη παρέμβαση αυξάνει τη μεταβλητότητα της διαδικασίας και, σε συνθήκες πίεσης χρόνου ή δυσμενούς περιβάλλοντος, μπορεί να οδηγήσει σε αυξημένο αριθμό ελαττωμάτων και επισκευών. Τα προβλήματα αυτά εμφανίζονται συχνότερα στα γεμίσματα και σε μικρές διαμέτρους, όπως τα socket welds, όταν δεν τηρούνται αυστηρά οι προδιαγραφές.

Από πλευράς παραγωγικότητας, η SMAW παρουσιάζει χαμηλότερους ρυθμούς εκτέλεσης σε σύγκριση με ημιαυτόματες και αυτόματες μεθόδους συγκόλλησης.

Σε επίπεδο κόστους, αν και το αρχικό κόστος εξοπλισμού είναι χαμηλό, το συνολικό κόστος εφαρμογής μπορεί να αυξηθεί σημαντικά λόγω αυξημένων εργατοωρών, επισκευών, πρόσθετων ελέγχων, καθυστερήσεων στο χρονοδιάγραμμα.

Η εμπειρία από πραγματικά έργα δείχνουν ότι η SMAW, όταν χρησιμοποιείται συνήθως χωρίς αυστηρό έλεγχο διαδικασιών και ποιότητας, μπορεί να οδηγήσει σε αυξημένο κόστος ποιότητας (Cost of Quality), ιδιαίτερα σε συγκολλήσεις πεδίου.

Στα τεχνικά έργα, η SMAW εξακολουθεί να διατηρεί σημαντικό ρόλο, όχι ως καθολική λύση, αλλά ως μέρος ενός συνδυαστικού μοντέλου συγκόλλησης. Η χρήση της σε συγκεκριμένα στάδια του έργου, όπως στα γεμίσματα ή σε δυσπρόσιτα σημεία, μπορεί να είναι τεχνικά και οικονομικά αποδεκτή, εφόσον εντάσσεται σε σωστό πλαίσιο διαχείρισης ποιότητας και ρίσκου.

3.2.2 Χειροκίνητη μέθοδος GTAW «Συγκόλληση τόξου με ηλεκτρόδιο βολφραμίου (Gas Tungsten Arc Welding – GTAW / TIG)»

Η συγκόλληση τόξου με ηλεκτρόδιο βολφραμίου (Gas Tungsten Arc Welding – GTAW), ευρύτερα γνωστή ως TIG, αποτελεί μία από τις πιο ακριβές και ελεγχόμενες μεθόδους συγκόλλησης. Χαρακτηρίζεται από τη χρήση μη αναλίσκόμενου ηλεκτροδίου βολφραμίου καθώς και χρήση προστατευτικού αερίου, συνήθως αργού ή μίγματος αερίων, με στόχο την απομόνωση του λουτρού συγκόλλησης από την ατμόσφαιρα.

Η GTAW χρησιμοποιείται ευρέως σε βιομηχανικά και ενεργειακά έργα με αυξημένες απαιτήσεις ποιότητας, όπου η αξιοπιστία της συγκόλλησης αποτελεί κρίσιμο παράγοντα ασφάλειας και λειτουργικότητας. Η μέθοδος εφαρμόζεται συχνά στη ρίζα των συγκολλήσεων των σωληνώσεων, όπου απαιτείται πλήρης διείσδυση και υψηλή ποιότητα.



Εικόνα 3.2.1.3: Συγκόλληση με αργκόν

Στην εικόνα 3.2.1.3 φαίνεται η μέθοδος συγκόλλησης με αργκόν. Η βασική αρχή της GTAW βασίζεται στη δημιουργία ηλεκτρικού τόξου μεταξύ του ηλεκτροδίου βολφραμίου και

του βασικού υλικού. Το ηλεκτρόδιο δεν τήκεται, γεγονός που επιτρέπει ακριβή έλεγχο της θερμικής εισόδου. Το υλικό πλήρωσης προστίθεται ξεχωριστά, δίνοντας στον συγκολλητή τη δυνατότητα λεπτομερούς ρύθμισης της μορφής και της ποιότητας της ραφής.

Η προστασία της λουτρού συγκόλλησης επιτυγχάνεται μέσω συνεχούς παροχής αδρανούς αερίου, συνήθως αργκόν υψηλής καθαρότητας (99,99%), το οποίο αποτρέπει την οξείδωση και τη δημιουργία μεταλλουργικών ελαττωμάτων. Ο υψηλός βαθμός ελέγχου καθιστά τη GTAW ιδανική για συγκολλήσεις λεπτών πάχους. Επίσης ενδείκνυται για συγκόλληση στη ρίζα των σωληνώσεων και προτιμάται σε ιδιαίτερα κρίσιμες συγκολλήσεις.

Στα τεχνικά και βιομηχανικά έργα, η GTAW εκτός από τη συγκόλληση της ρίζας, χρησιμοποιείται σε συγκολλήσεις υψηλής καθαρότητας και σε έργα όπου ο πρωταρχικός παράγοντας αξιολόγησης είναι η ποιότητα κατασκευής και όχι η ταχύτητα εκτέλεσης.

Το βασικό πλεονέκτημα της GTAW είναι η υψηλή ποιότητα συγκόλλησης. Η μέθοδος προσφέρει εκτός από εξαιρετικό έλεγχο της θερμικής εισόδου, σταθερή και καθαρή συγκόλληση, μειωμένη πιθανότητα ελαττωμάτων και τέλος υψηλή επαναληψιμότητα όταν εφαρμόζεται σωστά. Η ποιότητα αυτή μεταφράζεται σε μειωμένες επισκευές γεγονός που επηρεάζει θετικά το κόστος ποιότητας (Cost of Quality). Σε έργα με αυστηρές απαιτήσεις ελέγχου (RT, UT, PT), η GTAW μειώνει τον κίνδυνο απόρριψης συγκολλήσεων σε μεταγενέστερα στάδια.

Παρά τα σημαντικά πλεονεκτήματά της, η GTAW παρουσιάζει περιορισμούς κυρίως σε όρους παραγωγικότητας. Η διαδικασία χαρακτηρίζεται από χαμηλό ρυθμό εναπόθεσης υλικού. Επίσης έχει χαμηλό χρόνο τόξου σε συνθήκες εργοταξίου ενώ απαιτούνται αυξημένες δεξιότητες από τον συγκολλητή.

Οι παράγοντες αυτοί οδηγούν σε αυξημένο χρόνο εκτέλεσης και υψηλότερο άμεσο κόστος εργατοωρών. Σε έργα μεγάλης κλίμακας, η αποκλειστική χρήση της GTAW σε όλα τα περάσματα θεωρείται συνήθως μη αποδοτική από πλευράς χρόνου και υψηλού κόστους.

Η GTAW εμφανίζει χαμηλή παραγωγικότητα σε σύγκριση με άλλες μεθόδους, όπως η GMAW ή οι αυτόματες διαδικασίες. Ωστόσο, η χαμηλή παραγωγικότητα αντισταθμίζεται εν

μέρει από τη μείωση των επισκευών και του κόστους αστοχίας και επιπροσθέτως από την αποφυγή επαναληπτικών ελέγχων.

Στο πλαίσιο αυτό, η GTAW συμβάλλει στη βελτιστοποίηση του συνολικού κόστους, όταν χρησιμοποιείται συγκεκριμένα και όχι γενικευμένα. Η πρακτική συνδυασμού χρήσης GTAW στη ρίζα και άλλων μεθόδων στα γεμίσματα, αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα συνδυαστικής προσέγγισης παραγωγικότητας και ποιότητας καθώς μειώνει το τεχνικό ρίσκο και το κόστος αστοχίας.

Η εμπειρία δείχνει ότι η επένδυση σε GTAW για κρίσιμα περάσματα αποτελεί επένδυση πρόληψης, η οποία οδηγεί σε μείωση του συνολικού CoQ, ακόμη και αν αυξάνει το αρχικό κόστος εργασίας.

Η κατανόηση των πλεονεκτημάτων και των περιορισμών της GTAW είναι κρίσιμη για τη σωστή επιλογή μεθόδου συγκόλλησης και για τη βελτιστοποίηση της παραγωγικότητας, του κόστους και του ρίσκου στα τεχνικά έργα.

3.2.3 Ημιαυτόματη μέθοδος - συγκόλληση τόξου με προστατευτικό αέριο και αναλυσκόμενο σύρμα - (Gas Metal Arc Welding – GMAW / MIG–MAG)

Η συγκόλληση τόξου με προστατευτικό αέριο και αναλυσκόμενο σύρμα (Gas Metal Arc Welding – GMAW), γνωστή ευρύτερα ως MIG (Metal Inert Gas) ή MAG (Metal Active Gas), αποτελεί μία από τις πλέον διαδεδομένες και παραγωγικές μεθόδους συγκόλλησης στη σύγχρονη βιομηχανία. Η GMAW αναπτύχθηκε με στόχο την αύξηση της παραγωγικότητας και τη μείωση της εξάρτησης από τον ανθρώπινο παράγοντα, σε σύγκριση με τις παραδοσιακές χειροκίνητες μεθόδους συγκόλλησης. Σήμερα εφαρμόζεται ευρέως σε βιομηχανικά έργα, μεταλλικές κατασκευές, σωληνώσεις και γραμμές παραγωγής.

Η μέθοδος βασίζεται στη δημιουργία ηλεκτρικού τόξου μεταξύ του βασικού υλικού και ενός συνεχώς τροφοδοτούμενου σύρματος, το οποίο λειτουργεί ως υλικό πλήρωσης, ενώ το λουτρό συγκόλλησης προστατεύεται από την ατμόσφαιρα μέσω αδρανούς ή ενεργού αερίου. Πιο αναλυτικά, κατά τη διαδικασία GMAW, το σύρμα τροφοδοτείται συνεχώς μέσω μηχανισμού προώθησης και τήκεται στο άκρο του ηλεκτροδίου, σχηματίζοντας το λουτρό συγκόλλησης. Το προστατευτικό αέριο, συνήθως αργό ή μίγμα αερίων (π.χ. Ar/CO₂),

απομονώνει το λουτρό από την ατμόσφαιρα, περιορίζοντας την οξείδωση και τη δημιουργία μεταλλουργικών ελαττωμάτων.



Εικόνα 3.2.3.1: Μηχανή συγκόλλησης MIG

Στην παραπάνω εικόνα 3.2.3.1 έχουμε την απεικόνιση μίας μηχανής ηλεκτροσυγκόλλησης. Η δυνατότητα συνεχούς τροφοδοσίας σύρματος επιτρέπει υψηλότερο ρυθμό εναπόθεσης υλικού (Deposition Rate) και αυξημένο χρόνο τόξου (Arc Time), στοιχεία που συμβάλλουν καθοριστικά στη βελτίωση της παραγωγικότητας.

Η GMAW εφαρμόζεται κυρίως:

- σε εργοστασιακές και βιομηχανικές συνθήκες,
- σε έργα με επαναλαμβανόμενες συγκολλήσεις,
- σε περιβάλλοντα όπου είναι εφικτός ο έλεγχος των συνθηκών (άνεμος, υγρασία).

Στα τεχνικά έργα, η GMAW χρησιμοποιείται ευρέως για προκατασκευασμένα τμήματα (prefabrication), σε ημιαυτόματες εφαρμογές στο πεδίο με προστατευμένα συστήματα, σε αυτόματες και ρομποτικές συγκολλήσεις σωληνώσεων και μεταλλικών κατασκευών.

Η ευελιξία της μεθόδου επιτρέπει την προσαρμογή της τόσο σε πλήρως αυτοματοποιημένα όσο και σε ημιαυτόματα συστήματα, όπως αυτά που εφαρμόζονται σε μεγάλης κλίμακας έργα αγωγών.

Το σημαντικότερο πλεονέκτημα της GMAW είναι η υψηλή παραγωγικότητα. Η συνεχής τροφοδοσία σύρματος μειώνει τις διακοπές της διαδικασίας και αυξάνει τον πραγματικό



χρόνο συγκόλλησης. Παράλληλα, η μέθοδος προσφέρει σταθερή ποιότητα συγκόλλησης, μειωμένη παραγωγή σκωρίας, περιορισμένη ανάγκη καθαρισμού μεταξύ περασμάτων και βελτιωμένη επαναληψιμότητα.

Η GMAW απαιτεί μικρότερη χειροκίνητη παρέμβαση σε σύγκριση με τη SMAW, γεγονός που μειώνει τη μεταβλητότητα της ποιότητας και περιορίζει τον αριθμό των επισκευών, εφόσον τηρούνται οι εγκεκριμένες διαδικασίες (WPS).

Παρά τα πλεονεκτήματά της, η GMAW παρουσιάζει περιορισμούς που σχετίζονται κυρίως με το περιβάλλον εφαρμογής. Η εξάρτηση από προστατευτικό αέριο καθιστά τη μέθοδο ευαίσθητη σε εξωτερικούς παράγοντες, όπως ο άνεμος, γεγονός που περιορίζει τη χρήση της σε ανοιχτά εργοτάξια χωρίς κατάλληλα μέσα προστασίας (στέγαστρο). Επιπλέον, το κόστος εξοπλισμού είναι υψηλότερο σε σχέση με τη SMAW, ενώ απαιτείται καλύτερη οργάνωση, συντήρηση εξοπλισμού και εκπαίδευση χειριστών. Σε περιπτώσεις ανεπαρκούς ρύθμισης παραμέτρων, μπορεί να εμφανιστούν ελαττώματα όπως πόροι ή έλλειψη τήξης.

Η εφαρμογή της GMAW οδηγεί σε σημαντική αύξηση της παραγωγικότητας, ιδιαίτερα σε έργα με μεγάλο αριθμό παρόμοιων συγκολλήσεων. Ο αυξημένος ρυθμός εναπόθεσης και ο υψηλός χρόνος τόξου μεταφράζονται σε μειωμένο χρόνο εκτέλεσης και χαμηλότερο κόστος ανά μονάδα συγκόλλησης.

Από πλευράς κόστους, αν και το αρχικό κόστος εξοπλισμού και οργάνωσης είναι υψηλότερο, το συνολικό κόστος εφαρμογής συχνά μειώνεται λόγω:

- περιορισμού των εργατοωρών,
- μείωσης των επισκευών,
- μικρότερης επιβάρυνσης του κόστους ποιότητας (CoQ).

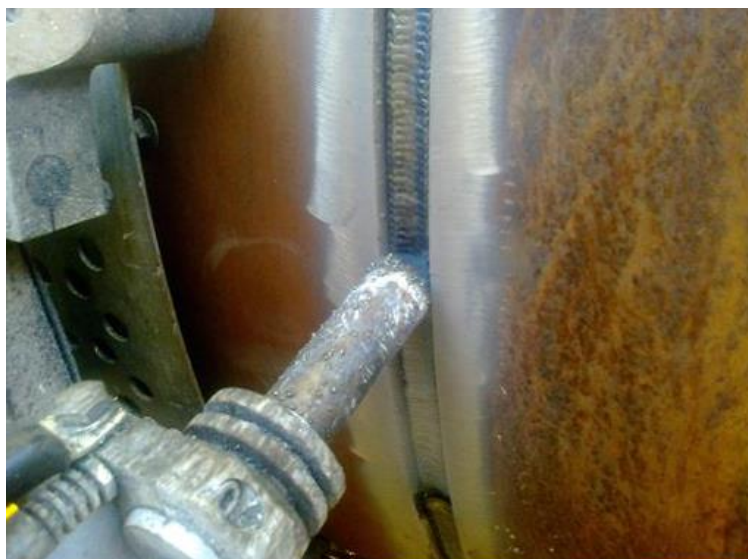
Η GMAW κατέχει κεντρικό ρόλο στη σύγχρονη βιομηχανική πρακτική, καθώς γεφυρώνει το χάσμα μεταξύ ποιότητας και παραγωγικότητας. Η δυνατότητα ενσωμάτωσής της σε ημιαυτόματες και πλήρως αυτοματοποιημένες εφαρμογές την καθιστά βασικό πυλώνα της εξέλιξης των συγκολλήσεων προς πιο αποδοτικά και ελεγχόμενα συστήματα παραγωγής.

3.2.4 Αυτόματη / ημιαυτόματη μέθοδος FCAW, συγκόλληση με σωληνοειδές σύρμα με πυρήνα ροής.

Η μέθοδος FCAW (Flux-Cored Arc-Welding) είναι μία μέθοδος συγκόλλησης που αναπτύχθηκε και εξελίχθηκε ώστε να χρησιμοποιηθεί σε συγκολλήσεις στο πεδίο. Μοιάζει πολύ με τη μέθοδο MIG/MAG, όπου και στις δύο περιπτώσεις έχουμε ημιαυτόματη συγκόλληση με προστατευτικό αέριο, η οποία δημιουργείται από το τόξο μεταξύ του μετάλλου που συγκοιείται και ενός ηλεκτροδίου με συνεχή τροφοδότηση. Το ηλεκτρόδιο που χρησιμοποιείται είναι σωληνωτό και περιέχει πάστα (flux) στο εσωτερικό του, η οποία κατά την τήξη της δημιουργεί προστατευτικό αέριο και μία στρώση σκωρίας (slag) για προστασία του λουτρού συγκόλλησης. Η μέθοδος εφαρμόζεται από έναν χειριστή ο οποίος αρχικά ρυθμίζει τις παραμέτρους της μηχανής, ώστε να έχει το επιθυμητό αποτέλεσμα. Στη συνέχεια η μηχανή δένεται πάνω στον αγωγό με ειδικό ράουλο και κινείται με αλυσίδα περιμετρικά του, οπότε ο χειριστής πρέπει να παρακολουθεί την κίνηση του ακροφυσίου ώστε να μην παρεκκλίνει της πορείας του. Τέλος ξεκινά και σταματά την διαδικασία, αναλόγων των αναγκών.

Το προστατευτικό αέριο, CO₂ είτε μίγμα Ar/CO₂., με τη βοήθεια του ηλεκτρικού ρεύματος δημιουργεί ένα ιονισμένο περιβάλλον το οποίο βοηθά στην τήξη της επιφάνειας συγκόλλησης και την προστασία της. Η παρουσία βοηθητικού αερίου δεν είναι απαραίτητη σε όλους τους τύπους της μεθόδου.

Στην περίπτωση της μεθόδου FCAW, το συνοδευτικό αέριο αντιδρά με το μέταλλο που τήκεται και επηρεάζει τη σταθερότητα του τόξου, τη διείσδυση, την ποσότητα των spatters συνεπώς λιγότερα τροχίσματα, λιγότερα σφάλματα.



Εικόνα 3.2.4.1: Συγκόλληση με τη μέθοδο FCAW

Η Εικόνα 3.2.4.1 χρησιμοποιείται ως οπτική τεκμηρίωση της περιγραφόμενης εφαρμογής και συνδέει τη θεωρητική ανάλυση με την πρακτική εκτέλεση στο έργο.

Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου την καθιστούν πολύ χρήσιμη και αποδοτική στο πεδίο και είναι:

1. Έχει μεγάλους ρυθμούς εναπόθεσης ηλεκτροδίου με μεγάλες ταχύτητες συγκόλλησης.
2. Η συγκόλληση μπορεί να πραγματοποιηθεί σε όλες τις θέσεις εφόσον χρησιμοποιείται μικρής διαμέτρου ηλεκτρόδιο.
3. Είναι προαιρετική η παρουσία συνοδευτικού αερίου.
4. Η συνεχής τροφοδότηση του ηλεκτροδίου εξασφαλίζει υψηλότερο ρυθμό εναπόθεσης υλικού (Deposition Rate) και περισσότερο χρόνο τόξου (Arc Time), δείκτες που ανεβάζουν πολύ την παραγωγικότητα σε σχέση με τις παρόμοιες μεθόδους ήτοι MIG – MAG.
5. Έχει καλύτερη διείσδυση από τη μέθοδο SMAW
6. Εάν εφαρμοστεί σωστά έχει καλή ποιότητα συγκόλλησης.
7. Απαιτεί χειριστή και όχι ηλεκτροσυγκολλητή.

Τα μειονεκτήματα της μεθόδου εκτός από τον ακριβό εξοπλισμό λειτουργίας, είναι ότι τα μεγάλης διαμέτρου ηλεκτρόδια δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε όλες τις θέσεις συγκόλλησης, γεγονός που την περιορίζει στη χρήση.

Η μέθοδος έχει ευρεία εφαρμογή όπου απαιτείται μεγάλη παραγωγή σε λίγο χρόνο. Ιδιαίτερα στις εγκαταστάσεις φυσικού αερίου χρησιμοποιείται συνδυαστικά με άλλες μεθόδους ώστε να είναι πιο αποτελεσματική.

3.2.5 Αυτόματες και ρομποτικές συγκολλήσεις (Automatic & Robotic Welding)

Η αυξανόμενη ανάγκη για υψηλότερη παραγωγικότητα και σταθερή ποιότητα καθώς και τη μείωση της εξάρτησης από τον ανθρώπινο παράγοντα οδήγησε στη σταδιακή μετάβαση από τις χειροκίνητες διαδικασίες σε ημιαυτόματες, αυτόματες και τελικά σε πλήρως ρομποτικές εφαρμογές.

Στα σύγχρονα τεχνικά έργα, οι αυτόματες και ρομποτικές συγκολλήσεις δεν αντιμετωπίζονται πλέον ως καινοτομία, αλλά ως βασικό εργαλείο βελτιστοποίησης της παραγωγικότητας, ιδιαίτερα σε έργα μεγάλης κλίμακας και υψηλών απαιτήσεων ποιότητας.

Στις αυτόματες συγκολλήσεις ορίζονται οι βασικές παράμετροι όπως ρεύμα, τάση, ταχύτητα, παροχή αερίου και ρυθμίζονται ώστε να διατηρούνται σταθερές από το σύστημα. Στις ρομποτικές συγκολλήσεις, η διαδικασία ελέγχεται από προγραμματιζόμενα συστήματα, τα οποία εκτελούν προκαθορισμένες τροχιές με υψηλή ακρίβεια και επαναληψιμότητα.

Οι αυτόματες και ρομποτικές συγκολλήσεις εφαρμόζονται ευρέως σε εκτεταμένα δίκτυα αγωγών, βιομηχανικές γραμμές παραγωγής, επαναλαμβανόμενες συγκολλήσεις σωληνώσεων, μεγάλης κλίμακας ενεργειακά έργα.

Σε ευθύγραμμα τμήματα αγωγών, όπου το έδαφος και η γεωμετρία το επιτρέπουν, η χρήση ρομποτικών συστημάτων συγκόλλησης οδηγεί σε σημαντική αύξηση της παραγωγικότητας και σε υψηλό επίπεδο ποιότητας. Σε πιο ανώμαλες περιοχές, εφαρμόζονται συχνά ημιαυτόματες λύσεις με προστατευμένα συστήματα, οι οποίες διατηρούν πολλά από τα πλεονεκτήματα της αυτοματοποίησης. Σε σημεία όπως οι επιτόπου ενώσεις (tie-ins), όπου η γεωμετρία δεν είναι σταθερή και συνήθως η πρόσβαση είναι περιορισμένη, η χρήση ρομποτικών συστημάτων δεν είναι εφικτή. Στις περιπτώσεις αυτές, απαιτείται μετάβαση σε χειροκίνητες μεθόδους, γεγονός που μειώνει την ομοιομορφία της συγκόλλησης καθώς και την παραγωγικότητα.

Το κυριότερο πλεονέκτημα των αυτόματων και ρομποτικών συγκολλήσεων όπως ήδη αναφέρθηκε, είναι η υψηλή παραγωγικότητα και η μείωση του χρόνου εκτέλεσης των συγκολλήσεων οι οποίες επιτυγχάνονται από τη συνεχή απρόσκοπτη λειτουργία, ενώ έχουν αυξημένο χρόνο τόξου (Arc Time), υψηλό ρυθμό εναπόθεσης υλικού και όσον αφορά την αποδοτικότητα της συγκόλλησης (Welding Efficiency) σε σύγκριση με όλες τις άλλες μεθόδους είναι η μεγαλύτερη που μπορεί να δοθεί. Παράλληλα προσφέρουν υψηλή επαναληψιμότητα και σταθερή ποιότητα συγκόλλησης. Ένα ακόμα πλεονέκτημα της εφαρμογής είναι ότι μειώνει δραστικά το τεχνικό ρίσκο, καθώς περιορίζεται η πιθανότητα σφαλμάτων που οφείλονται στον ανθρώπινο παράγοντα. Η σταθερότητα της διαδικασίας λοιπόν οδηγεί σε υψηλά ποσοστά αποδοχής συγκολλήσεων κατά τους ελέγχους, μειώνοντας το κόστος αστοχίας.

Παρά τα σημαντικά πλεονεκτήματά τους, οι αυτόματες και ρομποτικές συγκολλήσεις παρουσιάζουν και περιορισμούς. Η εφαρμογή τους απαιτεί υψηλό αρχικό κόστος επένδυσης, αυστηρό έλεγχο γεωμετρίας και συναρμογή (fit-up). Επίσης απαιτείται επαρκής προετοιμασία του έργου και εξειδικευμένο προσωπικό για τον προγραμματισμό και τη συντήρηση των συστημάτων.

Αν και το αρχικό κόστος εξοπλισμού είναι αυξημένο, σε έργα μεγάλης κλίμακας το κόστος αυτό αποσβένεται ταχέως μέσω της μείωσης του κόστους ποιότητας και του συνολικού ρίσκου. Επιπροσθέτως η αυξημένη παραγωγικότητα μεταφράζεται σε μειωμένες εργατοώρες, καλύτερη τήρηση χρονοδιαγραμμάτων, χαμηλότερο συνολικό κόστος ανά συγκόλληση.

Στη σύγχρονη βιομηχανία, οι αυτόματες και ρομποτικές συγκολλήσεις αποτελούν βασικό πυλώνα της μετάβασης προς πιο αποδοτικά και ελεγχόμενα μοντέλα παραγωγής.

3.3 Περιβάλλον συγκολλήσεων και επίδραση στην ποιότητα, την παραγωγικότητα και το κόστος

Το περιβάλλον στο οποίο εκτελούνται οι συγκολλήσεις αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για την επιτυχία ενός τεχνικού έργου. Ανεξάρτητα από τη μέθοδο συγκόλλησης που επιλέγεται, οι συνθήκες εκτέλεσης επηρεάζουν άμεσα την ποιότητα της συγκόλλησης, την



παραγωγικότητα των εργασιών, το κόστος ποιότητας καθώς και το συνολικό ρίσκο του έργου. Για τον λόγο αυτό, η αξιολόγηση του περιβάλλοντος συγκολλήσεων είναι αναπόσπαστο μέρος του σχεδιασμού και της διαχείρισης των τεχνικών έργων.

Στη σύγχρονη πρακτική, οι συγκολλήσεις εκτελούνται κυρίως σε τρία βασικά περιβάλλοντα:

- εργοστασιακό-προστατευμένο περιβάλλον (ατελιέ / προκατασκευή),
- εργοτάξιο
- ειδικά περιβάλλοντα αγωγών, χαντάκια (pipeline- trench).

Κάθε περιβάλλον αποτελεί διαφορετική πρόκληση για το μηχανικό σχεδιασμού του τεχνικού έργου και η επίλυσή του αποτελεί μέρος του προβλήματος που καλείται να επιλύσει στο οποίο πρέπει να μεγιστοποιήσει την παραγωγή, με την καλύτερη ποιότητα στο μικρότερο κόστος με το μικρότερο ρίσκο.

Σε εργοστασιακό περιβάλλον (ατελιέ), το κόστος ποιότητας επικεντρώνεται κυρίως στο κόστος πρόληψης και το κόστος ελέγχου με σκοπό τον περιορισμό του κόστους αστοχίας.

Αντίθετα, σε συγκολλήσεις εργοταξίου, ιδιαίτερα όταν δεν εφαρμόζεται αυστηρός έλεγχος διαδικασιών αυξάνεται σημαντικά το κόστος αστοχίας.

Η καθυστερημένη ανίχνευση ελαττωμάτων σε περιβάλλοντα πεδίου οδηγεί σε επαναλαμβανόμενες επισκευές και ανοιπτήσεις, εάν απαιτούνται, καθώς και καθυστερήσεις, επιβαρύνοντας το συνολικό οικονομικό αποτέλεσμα του έργου. Επιπροσθέτως οι παράγοντες που επηρεάζουν την ποιότητα της συγκόλλησης αποκτούν μεγαλύτερη σημασία όταν αξιολογούνται υπό το πρίσμα βιωσιμότητας και ανθεκτικότητας. Ελαττώματα που οδηγούν σε επισκευές αυξάνουν το περιβαλλοντικό αποτύπωμα του έργου (πρόσθετα υλικά/ενέργεια), ενώ υποβαθμίζουν την αξιοπιστία της σύνδεσης και την ανθεκτικότητα του συστήματος σωληνώσεων.

Συνεπώς η επιλογή του κατάλληλου περιβάλλοντος συγκολλήσεων δεν είναι αποκλειστικά τεχνική απόφαση, αλλά στρατηγική επιλογή έργου. Επίσης βασικές στρατηγικές για τη βελτίωση της αποδοτικότητας αποτελούν η μεγιστοποίηση της προκατασκευής, η χρήση αυτοματοποίησης όπου είναι εφικτό, η εφαρμογή αυστηρών διαδικασιών ελέγχου στο πεδίο.

Η εμπειρία από μεγάλης κλίμακας έργα καταδεικνύει ότι η σωστή κατανομή συγκολλήσεων μεταξύ ατελιέ και εργοταξίου μπορεί να μειώσει σημαντικά το συνολικό ρίσκο και να βελτιώσει την προβλεψιμότητα του έργου.

3.3.1 Συγκολλήσεις σε ατελιέ – προστατευμένο περιβάλλον (προκατασκευή)

Οι συγκολλήσεις που εκτελούνται σε ατελιέ - προστατευμένο περιβάλλον πραγματοποιούνται υπό ελεγχόμενες συνθήκες, γεγονός που επιτρέπει υψηλό επίπεδο ποιότητας και επαναληψιμότητας. Στο ατελιέ είναι δυνατός ο έλεγχος παραμέτρων όπως η θερμοκρασία, η υγρασία, ο φωτισμός καθώς επίσης η πρόσβαση στη συγκόλληση, στοιχεία που περιορίζουν την πιθανότητα ελαττωμάτων.

Κατά την προκατασκευή (prefabrication) λοιπόν, έχουμε καλύτερη εφαρμογή (fit-up) και ευθυγράμμιση των σωληνώσεων, περισσότερο παραγωγή και με δυνατότητα χρήσης πιο αυτοματοποιημένων μεθόδων συγκόλλησης. Τέλος ο προγραμματισμός και η εκτέλεση των ελέγχων γίνεται πιο άμεσα και πιο αποδοτικά σε σχέση με άλλα περιβάλλοντα.

Επιπροσθέτως η μείωση των διακοπών και των απρόβλεπτων παραγόντων οδηγεί σε καλύτερη τήρηση χρονοδιαγραμμάτων και συνολικά σε μειωμένο κόστος ποιότητας.

Ωστόσο, η προκατασκευή συνοδεύεται από αυξημένες απαιτήσεις σε σχεδιασμό, μεταφορά ανύψωση των προκατασκευασμένων τμημάτων. Οι περιορισμοί αυτοί πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά τον σχεδιασμό του έργου, ώστε το συνολικό όφελος να παραμένει θετικό. Ακολουθεί η εικόνα 3.3.1.1 όπου έχουμε μία άποψη χώρου περιβάλλοντος ατελιέ.



Εικόνα 3.3.1.1: Χώρος Ατελιέ

3.3.2 Συγκολλήσεις σε εργοτάξιο

Οι συγκολλήσεις εργοταξίου εκτελούνται υπό συνθήκες που συνήθως δεν είναι πλήρως ελεγχόμενες. Παράγοντες όπως οι καιρικές συνθήκες, ο περιορισμένος χώρος εργασίας, η δυσκολία πρόσβασης καθώς και η πίεση του χρόνου επηρεάζουν σημαντικά τη διαδικασία συγκόλλησης.

Σε αντίθεση με το ατελιέ στις συνθήκες εργοταξίου παρατηρούνται:

- χαμηλότερος χρόνος τόξου (Arc Time) της συγκόλλησης,
- αυξημένες διακοπές εργασίας για τους συγκολλητές,
- μεγαλύτερη εξάρτηση από τον ανθρώπινο παράγοντα,
- αυξημένος αριθμός επισκευών, ιδιαίτερα σε γεμίσματα και socket welds.

Η ποιότητα των συγκολλήσεων στο εργοτάξιο εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την εμπειρία του προσωπικού και από την τήρηση των διαδικασιών. Όταν δεν εφαρμόζεται αυστηρός και έγκαιρος οπτικός έλεγχος (VT), τα ελαττώματα εντοπίζονται συχνά σε μεταγενέστερα στάδια μέσω PT ή RT, οδηγώντας σε αυξημένο κόστος αστοχίας.

Από πλευράς κόστους, οι συγκολλήσεις εργοταξίου εμφανίζουν αυξημένο έμμεσο κόστος, το οποίο συνδέεται με επισκευές, καθυστερήσεις, πρόσθετους ελέγχους. Για τον λόγο αυτό, η μείωση των συγκολλήσεων πεδίου, μέσω αύξησης της προκατασκευής, αποτελεί βασική στρατηγική βελτιστοποίησης.



Εικόνα 3.3.2.1: Χώρος εργοταξίου

Στην παραπάνω εικόνα 3.3.2.1 υπάρχει άποψη του χώρου ενός εργοταξίου.

3.3.3 Συγκολλήσεις σε χαντάκια

Τα έργα αγωγών (pipelines) αποτελούν ειδική κατηγορία συγκολλήσεων πεδίου, με ιδιαίτερα αυξημένες απαιτήσεις ποιότητας και ελέγχου. Οι συγκολλήσεις εκτελούνται τόσο εντός όσο και εκτός χαντακιού, με αυστηρό έλεγχο συνθηκών περιβάλλοντος και γεωμετρίας.

Σε έργα αγωγών:

- εφαρμόζονται συχνά αυτόματες ή ρομποτικές συγκολλήσεις σε ευθύγραμμα τμήματα,
- χρησιμοποιούνται ημιαυτόματες λύσεις σε ανώμαλες περιοχές,
- οι ενώσεις (tie-in συγκολλήσεις) εκτελούνται συνήθως χειροκίνητα, με αυξημένες απαιτήσεις δεξιοτήτων.

Η αυστηρή τήρηση των WPS και η εφαρμογή ανεξάρτητου VT πριν από PT/RT αποτελούν κρίσιμους παράγοντες επιτυχίας. Συνήθως στα έργα αγωγών η επένδυση σε πρόληψη και έλεγχο μειώνει δραστικά τον αριθμό των επισκευών, ακόμη και σε απαιτητικά περιβάλλοντα πεδίου.



Εικόνα 3.3.3.1: αγωγός έξω από το χαντάκι

Η Εικόνα 3.3.3.1 χρησιμοποιείται ως οπτική τεκμηρίωση του περιγραφόμενου περιβάλλοντος αγωγών σε χαντάκια.

3.4 Ελαττώματα και αστοχίες συγκολλήσεων

Τα ελαττώματα και οι αστοχίες των συγκολλήσεων αποτελούν έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες της συγκόλλησης, τα οποία επηρεάζουν την ποιότητα, την αξιοπιστία και επίσης το κόστος των τεχνικών έργων.

Η εμφάνισή τους συνδέεται άμεσα με τη μέθοδο συγκόλλησης που χρησιμοποιείται, τις συνθήκες εκτέλεσης που εφαρμόζεται και πολύ βασικό, την εμπειρία του προσωπικού που εμπλέκεται. Καθοριστικό ρόλο επιπλέον παίζει και η τήρηση των προδιαγραφών από όλους τους εμπλεκόμενους.

Στα βιομηχανικά έργα και ιδιαίτερα σε έργα σωληνώσεων και αγωγών, τα ελαττώματα συγκολλήσεων μπορούν να οδηγήσουν όχι μόνο σε αυξημένες επισκευές, αλλά και σε σοβαρούς κινδύνους και για την ασφάλεια και για το περιβάλλον.

Η συστηματική κατανόηση και ταξινόμηση των ελαττωμάτων συγκολλήσεων αποτελεί βασική προϋπόθεση για την πρόληψή τους και για τη μείωση του κόστους ποιότητας (Cost of Quality).

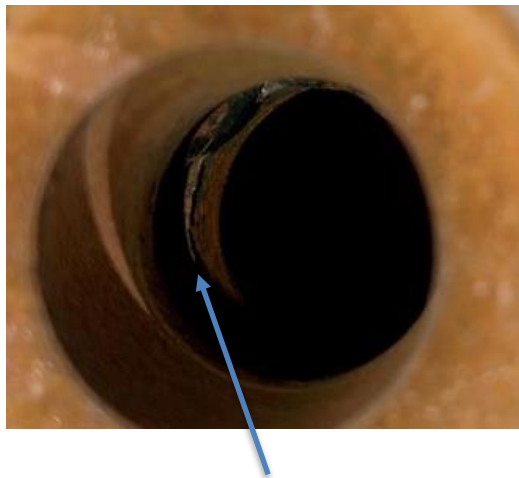
Στη βιβλιογραφία γίνεται σαφής διάκριση μεταξύ ελαττωμάτων συγκόλλησης και αστοχιών συγκόλλησης. Τα ελαττώματα αναφέρονται σε αποκλίσεις από τις απαιτήσεις ποιότητας που εντοπίζονται κατά τον έλεγχο, ενώ οι αστοχίες αφορούν την αποτυχία της συγκόλλησης κατά τη λειτουργία ή τη φόρτιση της κατασκευής. Ένα ελάττωμα δεν οδηγεί πάντοτε σε άμεση αστοχία, ωστόσο αυξάνει σημαντικά την πιθανότητα μελλοντικών προβλημάτων. Φυσικά στα έργα προδιαγραφών, τα ελαττώματα αξιολογούνται με βάση τον εκάστοτε κώδικα που ακολουθεί το έργο και γίνονται είτε αποδεκτά, είτε απορριπτέα, ανάλογα με το μέγεθός τους συγκριτικά με το πάχος του μετάλλου. Τέλος ανάλογα με το είδος τους διακρίνονται σε γεωμετρικά και μεταλλουργικά ελαττώματα.

3.4.1 Γεωμετρικά ελαττώματα συγκολλήσεων

Τα γεωμετρικά ελαττώματα σχετίζονται με τη μορφή και τη γεωμετρία της ραφής συγκόλλησης και αποτελούν από τα πιο συχνά προβλήματα σε συγκολλήσεις πεδίου. Στα γεωμετρικά ελαττώματα περιλαμβάνονται:

- Έλλειψη διείσδυσης, ιδιαίτερα στη ρίζα συγκολλήσεων σωληνώσεων.
- Έλλειψη τήξης μεταξύ των πασσών ή μεταξύ βασικού μετάλλου και συγκόλλησης.
- Υπερβολική ή ανεπαρκής ενίσχυση ραφής, που επηρεάζει την κατανομή τάσεων.
- Ανομοιομορφία ραφής, λόγω κακής τεχνικής συγκόλλησης ή ασταθών παραμέτρων.

Τα γεωμετρικά ελαττώματα εμφανίζονται συχνότερα σε συνθήκες εργοταξίου, όπου ο έλεγχος του fit-up και της θέσης συγκόλλησης είναι δυσκολότερος.



Εικόνα 3.4.1.1: Ατελή διείσδυση στη ρίζα

Στην εικόνα 3.4.1.1 έχουμε την οπτική τεκμηρίωση σφαλμάτων συγκολλήσεων ως γεωμετρικά ελαττώματα.

3.4.2 Μεταλλουργικά ελαττώματα

Τα μεταλλουργικά ελαττώματα σχετίζονται με τη μικροδομή της συγκόλλησης και επηρεάζονται από τη θερμική εισαγωγή, τη σύσταση των υλικών, τις συνθήκες ψύξης.

Στα συνηθέστερα μεταλλουργικά ελαττώματα περιλαμβάνονται:

- Ρωγμές συγκόλλησης, θερμές ή ψυχρές.
- Πόροι, λόγω εγκλωβισμού αερίων όπως φαίνεται στην εικόνα 3.4.2.1
- Εγκλείσματα σκωρίας, κυρίως σε συγκολλήσεις SMAW όταν δεν γίνεται επαρκής καθαρισμός μεταξύ περασμάτων.

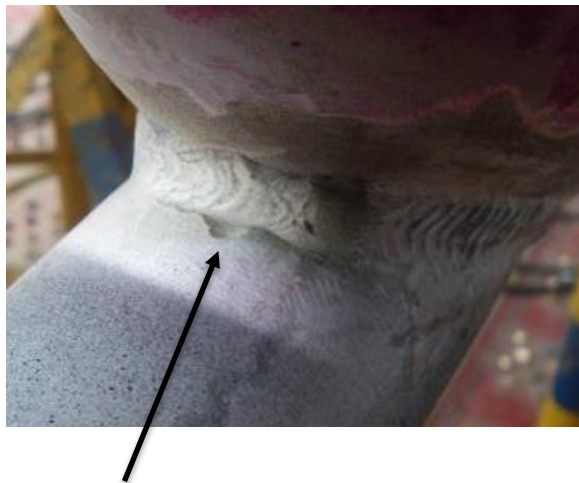
Τα ελαττώματα αυτά είναι συχνά δυσδιάκριτα με απλό οπτικό έλεγχο και εντοπίζονται σε μεταγενέστερα στάδια μέσω ΡΤ ή RΤ, αυξάνοντας το κόστος αποκατάστασης.



Εικόνα 3.4.2.1: Πόρος και ελλιπής συγκόλληση



Εικόνα 3.4.2.2: Υποκοπές (undercut), spatters.



Εικόνα 3.4.2.3: Υποκοπή

Η υποκοπή οφείλεται σε κακοτεχνία κατά την κατασκευή του στηρίγματος



Εικόνα 3.4.2.4: Επισκευή σφάλματος

Οι εικόνες 3.4.2.1 / 3.4.2.2 / 3.4.2.3 / 3.4.2.4 χρησιμοποιούνται ως οπτική τεκμηρίωση ενδεικτικών περιγραφόμενων μεταλλουργικών σφαλμάτων των συγκολλήσεων.

3.4.3 Αστοχίες συγκολλήσεων σε λειτουργία

Οι αστοχίες συγκολλήσεων κατά τη λειτουργία ενός έργου αποτελούν το πιο σοβαρό αποτέλεσμα ανεπαρκούς ποιότητας. Τέτοιες αστοχίες μπορεί να οδηγήσουν σε διαρροές, απώλεια στεγανότητας, περιβαλλοντικές επιπτώσεις, με συνέπεια την αύξηση λειτουργικού κόστους καθώς επίσης και σε διακοπή λειτουργίας.

Στα έργα αγωγών και βιομηχανικών εγκαταστάσεων, οι αστοχίες συγκολλήσεων συνδέονται άμεσα με κινδύνους ασφάλειας, γεγονός που δικαιολογεί τις αυστηρές απαιτήσεις ελέγχου και αποδοχής.

3.4.4 Σχέση ελαττωμάτων με παραγωγικότητα και κόστος

Η εμφάνιση ελαττωμάτων συγκολλήσεων επηρεάζει άμεσα την παραγωγικότητα, καθώς οδηγεί σε επισκευές, αυξημένες εργατοώρες, πρόσθετους ελέγχους και καθυστερήσεις στο χρονοδιάγραμμα. Από οικονομικής πλευράς, τα ελαττώματα αυξάνουν το κόστος αστοχίας, το οποίο συχνά υπερβαίνει το κόστος πρόληψης. Η εμπειρία από πραγματικά έργα δείχνει ότι η καθυστερημένη ανίχνευση ελαττωμάτων έχει δυσανάλογα μεγάλη επίδραση στο συνολικό κόστος. Όσο πιο αργά ανακαλυφθεί μία ατέλεια τόσο πιο μεγάλη πιθανότητα έχει να βρίσκεται στην κρίσιμη διαδρομή του χρονοδιαγράμματος με συνέπειες καθυστέρησης όλου του έργου. Αυτός ο λόγος καθιστά απαιτητό και αναγκαίο τον οπτικό έλεγχο στη φάση της προκατασκευής.

Η συγγραφή επίσης της κατάλληλης διαδικασίας συγκόλλησης (pWPS: preliminary welding procedure specification) όπου επιβεβαιώνεται με τις αντίστοιχες πιστοποιήσεις (PQR: procedure qualification report) και καταλήγει στο τελικό WPS welding procedure specification είναι η αρχή και το τέλος του ορισμού της ποιότητας των συγκολλήσεων στα σοβαρά τεχνικά έργα.

Με λίγα λόγια η πρόληψη των ελαττωμάτων συγκολλήσεων βασίζεται στο:

1. Στο σωστό σχεδιασμό της διαδικασίας και την ακριβή σύνταξη της. Η πιστοποίησή της με το κατάλληλο PQR καθώς και η συγγραφή ορθών WPS σύμφωνα με τις προδιαγραφές, το υλικό και το έργο είναι πολύ ουσιώδη.
2. Στην αυστηρή τήρηση των WPS. Η τοιχοκόλληση σε εμφανή σημεία ώστε να μπορούν να έχουν πρόσβαση σε αυτό όλοι οι εμπλεκόμενοι, ήτοι συγκολλητές, εργοδηγοί μηχανικοί, επιθεωρητές, βοηθά στην καλή τήρηση της εν λόγω διαδικασίας.
3. Στην επαρκή εκπαίδευση - επιτήρηση του προσωπικού και στην πιστοποίηση του εξοπλισμού. Αυτό οδηγεί σε ενημερωμένα πιστοποιητικά συγκολλητών (WPQ's) και πιστοποιητικά εξοπλισμού (μηχανές συγκόλλησης, φορητοί και σταθεροί φούρνοι ηλεκτροδίων, γεννητριών ρεύματος κ.λ.π) με αποτέλεσμα πιο αξιόπιστα προσωπικό και εργασία.
4. Στην έγκαιρη και ανεξάρτητη διεξαγωγή του οπτικού ελέγχου (VT) με ειδικευμένους τεχνίτες και μηχανικούς οι οποίοι ορίζονται ώστε να ελέγχουν οπτικά τις



συγκολλήσεις και τις διαδικασίες του WPS, πριν προχωρήσει η επόμενη φάση του έργου.

Με αυτή τη στρατηγική μετατοπίζεται το κόστος από την αποκατάσταση, στην πρόληψη, μειώνοντας το κόστος αστοχίας συνεπώς το συνολικό κόστος ποιότητας (CoQ) και το ρίσκο του έργου.

3.4.5 Επεξήγηση ορισμών pWPS / PQR / WPS

Με τον όρο <pWPS: preliminary welding procedure specification> ορίζουμε την προκαταρκτική αρχική διαδικασία συγκόλλησης η οποία καθορίζεται με βάση:

- το πρότυπο του έργου
- τα εμπλεκόμενα υλικά
- τα πάχη
- τις διαμέτρους των σωληνώσεων (εάν έχουμε σωληνώσεις)

Η επιβεβαίωση της αρχικής διαδικασίας γίνεται με την δημιουργία του <PQR: procedure qualification report>, όπου εφαρμόζεται το pWPS όπως έχει οριστεί, με τη χρήση δείγματος, το οποίο ακολουθούν καταστροφικές δοκιμές συγκεκριμένων δοκιμών από θέσεις συγκόλλησης, που ορίζουν τα εμπλεκόμενα πρότυπα. Οι τιμές που θα δοθούν από τους καταστροφικούς ελέγχους πρέπει να είναι εντός των ορίων που ορίζουν τα πρότυπα για να είναι αποδεκτές και να πιστοποιηθεί η διαδικασία. Σε αντίθετη περίπτωση επαναλαμβάνεται η διαδικασία αλλάζοντας κάποια παράμετρο πάντα με βάση το πρότυπο. Με αυτόν τον τρόπο πιστοποιείται η εκάστοτε διαδικασία και γίνεται η συγγραφή του τελικού <WPS welding procedure specification> το οποίο και θα εφαρμοστεί σε όλη την κατασκευή.

Τέλος έχουμε τις πιστοποιήσεις των συγκολλητών οι οποίες ακολουθούν το WPS. Δηλαδή ο κάθε συγκολλητής δίνει δείγμα συγκόλλησης με τις συνθήκες που περιγράφονται στο WPS και γίνονται έλεγχοι στο δείγμα του, είτε μη καταστροφικές είτε καταστροφικές ώστε να διασφαλιστεί η ικανότητά του ως συγκολλητής για το έργο.

Αυτό οδηγεί στην έκδοση του προσωπικού WPQ το οποίο ακολουθεί το έργο.

3.5 Έλεγχοι συγκολλήσεων και διασφάλιση ποιότητας

Η διασφάλιση της ποιότητας των συγκολλήσεων αποτελεί κρίσιμο στοιχείο στον σχεδιασμό και την υλοποίηση τεχνικών έργων, ιδιαίτερα σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις, σε αγωγούς, καθώς και σε ενεργειακά έργα. Οι έλεγχοι συγκολλήσεων δεν αποσκοπούν μόνο στην επιβεβαίωση της συμμόρφωσης με τις προδιαγραφές, αλλά λειτουργούν και ως μηχανισμός πρόληψης αστοχιών, με άμεσες επιπτώσεις:

- στην παραγωγικότητα,
- το κόστος ποιότητας (Cost of Quality)
- το συνολικό ρίσκο του έργου.

Επιπροσθέτως λειτουργούν και ως φίλτρο μεταξύ της παραγωγής και της αποδοχής της κατασκευής. Μέσω αυτών μπορούν να εντοπιστούν ελαττώματα σε πρώιμο στάδιο, να αποτραπεί η ενσωμάτωση μη αποδεκτών συγκολλήσεων στο έργο και να μειωθεί η πιθανότητα αστοχίας κατά τη λειτουργία.

Η αποτελεσματικότητα των ελέγχων εξαρτάται όχι μόνο από τη μέθοδο που εφαρμόζεται, αλλά και από τον χρόνο εκτέλεσής τους. Έγκαιροι έλεγχοι λειτουργούν προληπτικά, ενώ καθυστερημένοι έλεγχοι οδηγούν σε αυξημένο κόστος αποκατάστασης.

Στα τεχνικά έργα, οι έλεγχοι συγκολλήσεων εντάσσονται σε ένα οργανωμένο σύστημα διασφάλισης ποιότητας, το οποίο περιλαμβάνει τους προληπτικούς ελέγχους καθώς επίσης και τους ελέγχους μετά τη διαδικασία της συγκόλλησης ώστε να οδηγηθούν στην τελική αποδοχή των συγκολλήσεων.

Οι έλεγχοι που είθισται να εφαρμόζονται με βάση τα πρότυπα, τις απαιτήσεις του πελάτη και φυσικά βάση εμπειρίας εφαρμογής, είναι οι εξής:

1. Οπτικός έλεγχος (Visual Testing – VT)
2. Έλεγχος με διεισδυτικά υγρά (Penetrant Testing – PT)
3. Έλεγχος με μαγνητικά σωματίδια (Magnetic Testing – MT)
4. Ραδιογραφικός έλεγχος (Radiographic Testing – RT)
5. Έλεγχος με υπερηχητικά κύματα (Ultrasonic Testing- UT)

3.5.1 Οπτικός έλεγχος (Visual Testing – VT)

Ο οπτικός έλεγχος αποτελεί τη βασική και πιο διαδεδομένη μορφή ελέγχου συγκολλήσεων και επιτρέπει τον έγκαιρο εντοπισμό εμφανών ελαττωμάτων και αποκλίσεων από τις προδιαγραφές και το WPS, όπως γεωμετρικές ασυνέχειες, ανεπαρκή ενίσχυση ραφής ή κακή τεχνική εκτέλεση και τις εξαλείφει. Τα σφάλματα που εντοπίζει συνήθως είναι επιφανειακά και όχι στο εσωτερικό της συγκόλλησης. Βέβαια εξασφαλίζοντας την τήρηση του WPS μειώνεται και η πιθανότητα σφαλμάτων στο εσωτερικό της συγκόλλησης. Με τον τρόπο αυτό, βελτιώνει την αποτελεσματικότητα των RT και PT, καθώς μειώνει την πιθανότητα απόρριψης συγκολλήσεων σε μεταγενέστερο στάδιο.

Συνήθως εκτελείται πριν και μετά τη συγκόλληση και τα σφάλματα στα οποία αποσκοπεί να εντοπίσει είναι επιφανειακά όπως οι:

- επιφανειακές ρωγμές,
- επιφανειακοί πόροι,
- υποκοπές,
- spatters,
- ανεπαρκής ή υπερβολική ενίσχυση ραφής.

Οι έλεγχοι γίνονται με κάποια εργαλεία όπως gauge με το οποίο ελέγχεται η κλίση της φρέζας (εικόνα 6.2.4) και το ενδοσκόπιο το οποίο δίνει εικόνα σε σημεία που δεν μπορεί να δει ο επιθεωρητής όπως η ρίζα της συγκόλλησης. Η απεικόνιση που δίνει το ενδοσκόπιο φαίνεται στην εικόνα 3.5.1 που ακολουθεί.



Εικόνα 3.5.1: Οπτικός έλεγχος με ενδοσκόπιο.

Ο έλεγχος γίνεται στη ρίζα της συγκόλλησης όπου διαπιστώνεται ελλειπής διείσδυση και ανομοιογενής ρίζα λόγω κακού fit up πριν την συγκόλληση.

3.5.2 Έλεγχος με διεισδυτικά υγρά (Penetrant Testing – PT)

Ο διεισδυτικός έλεγχος χρησιμοποιείται για την ανίχνευση επιφανειακών ασυνεχειών σε μη πορώδη υλικά. Η μέθοδος βασίζεται στη διείσδυση ειδικού υγρού στις επιφανειακές ατέλειες (διεισδυτής) και στην επακόλουθη οπτική ανάδειξή τους (με τον εμφανιστή).

Ο PT εφαρμόζεται συνήθως σε κρίσιμες συγκολλήσεις, συγκολλήσεις μικρών διαμέτρων (socket welds) και γενικά όπου η οπτική επιθεώρηση δεν επαρκεί. Η εφαρμογή του γίνεται είτε δειγματοληπτικά είτε σε ποσοστό 100%, ανάλογα με την προδιαγραφή όπου αυξάνεται μεν το επίπεδο διασφάλισης ποιότητας, αλλά επιβαρύνεται ο χρόνος και το κόστος του έργου. Φυσικά ενώ αυξάνεται αρκετά το αρχικό κόστος ποιότητας τελικά μειώνεται σε μεγάλο βαθμό το κόστος αστοχίας με τη χρήση αυτής της μεθόδου.

Στην εικόνα 3.5.2 αποκαλύπτεται μέσω της μεθόδου των διεισδυτικών υγρών σφάλμα διείσδυσης στη συγκόλληση.



Εικόνα 3.5.2: Έλεγχος με τη μέθοδο των διεισδυτικών υγρών.

3.5.3 Έλεγχος με μαγνητικά σωματίδια (Magnetic Testing -MT)

Ο έλεγχος με μαγνητικά σωματίδια είναι έλεγχος που αποσκοπεί να ανακαλύψει, όπως και τα διεισδυτικά υγρά, επιφανειακές ατέλειες ως επί τω πλείστων γραμμικού τύπου είτε σε μικρό βάθος από την επιφάνεια. Η εφαρμογή του ακολουθεί την μέθοδο των διεισδυτικών υγρών. Ήτοι ψεκάζεται το σημείο που θα επιθεωρηθεί με ένα λευκό σπρέι λεπτόρρευστο που παίζει το ρόλο του εμφανιστή. Κατόπιν εφαρμόζεται ο μαγνήτης στην μεταλλική επιφάνεια. Παράλληλα ψεκάζεται υγρό σπρέι που περιέχει ρινίσματα σιδήρου. Σε περίπτωση ασυνέχειας τα σωματίδια παίρνουν το σχήμα της. Η αξιολόγηση γίνεται όσο ο μαγνήτης είναι στη θέση αυτή. Οι γραμμικές ασυνέχειες είναι πιο εμφανείς με αυτή τη μέθοδο. Ο έλεγχος με μαγνητικά σωματίδια χρησιμοποιείται απαραίτητα σε υλικά που μαγνητίζονται.

3.5.4 Ραδιογραφικός έλεγχος (Radiographic Testing – RT)

Ο ραδιογραφικός έλεγχος (RT), είναι απαραίτητος για την ανίχνευση εσωτερικών ασυνεχειών οι οποίες δεν είναι δυνατόν να εντοπιστούν μέσω της οπτικής επιθεώρησης ούτε μέσω επιφανειακών ελέγχων όπως τα διεισδυτικά υγρά ή τα μαγνητικά σωματίδια.

Ο έλεγχος αυτός γίνεται με τη χρήση ραδιενέργειας η οποία χρησιμοποιείται για την απεικόνιση της συγκόλλησης σε φιλμ. Όλη η διαδικασία γίνεται με βάση τους κώδικες του έργου και τις απαιτήσεις του πελάτη, ήτοι η πυκνότητα του φιλμ, το είδος ραδιενεργού υλικού, ο κώδικας αξιολόγησης.

Ο ραδιογραφικός έλεγχος (RT) αποτελεί μία από τις πιο αξιόπιστες μεθόδους μη καταστροφικού ελέγχου. Αφενός δημιουργεί αποδεικτικά στοιχεία με τα φιλμ τα οποία επιτρέπουν την απρόσκοπτη αξιολόγηση όλων των εμπλεκόμενων σε οποιοδήποτε χρόνο, αφετέρου ανιχνεύει εσωτερικών σφάλματα, όπως η έλλειψη διείσδυσης, τα εγκλείσματα σκωρίας, οι εσωτερικοί πόροι, οι ρωγμές.

Ο RT εφαρμόζεται κυρίως σε συγκολλήσεις σωληνώσεων μεγάλης διαμέτρου, σε γραμμές με εύφλεκτα υλικά και σε συγκολλήσεις που υπόκεινται σε αυστηρές απαιτήσεις ασφαλείας ανάλογα με τις προδιαγραφές του έργου. Παρά την αποτελεσματικότητά του, ο RT παρουσιάζει σημαντικές απαιτήσεις σε χρόνο, εξοπλισμό και ασφάλεια, γεγονός που επηρεάζει το χρονοδιάγραμμα και το κόστος ποιότητας του έργου. Ακολουθεί η εικόνα 3.5.4 όπου φαίνεται τμήμα από ραδιογραφικό φιλμ.



Εικόνα 3.5.4: Τμήμα από φιλμ ραδιογραφικού ελέγχου

3.5.5 Έλεγχος με υπερηχητικά κύματα (Ultrasonic Testing- UT)

Ο υπερηχητικός έλεγχος βασίζεται στη διάδοση υπερηχητικών κυμάτων εντός του υλικού και στην ανάλυση των ανακλώμενων σημάτων. Η μέθοδος προσφέρει υψηλή ακρίβεια στον εντοπισμό εσωτερικών ασυνεχειών και χρησιμοποιείται ευρέως ως εναλλακτική ή συμπληρωματική του RT.

Το πλεονέκτημα του UT είναι η ταχύτητα και η δυνατότητα άμεσης αξιολόγησης, χωρίς την ανάγκη ακτινοπροστασίας. Ωστόσο, η αξιοπιστία του εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την εμπειρία του χειριστή και για να πραγματοποιηθεί απαιτείται πάχος υλικού τουλάχιστον 8mm συνεπώς χρησιμοποιείται σε πιο μεγάλα πάχη από τα συνηθισμένα.

3.5.6 Σχέση ελέγχων με κόστος ποιότητας (CoQ) / ρίσκο

Οι έλεγχοι συγκολλήσεων αποτελούν βασικό στοιχείο του κόστους ποιότητας. Ο οπτικός έλεγχος (VT) εντάσσεται κυρίως στο κόστος πρόληψης ενώ τα διεισδυτικά, τα μαγνητικά, οι ραδιογραφίες και ο έλεγχος με υπερηχητικά κύματα εντάσσονται στο κόστος ελέγχου. Όταν οι έλεγχοι αυτοί εφαρμόζονται έγκαιρα και συστηματικά, μειώνουν δραστικά το κόστος αστοχίας, περιορίζοντας τις επισκευές (repairs) και τις καθυστερήσεις. Επίσης πρέπει να εφαρμοστούν συνδυαστικά κατά περίπτωση ώστε να αποδώσουν τα μέγιστα. Αυτό αποφασίζεται κατά την σχεδίαση του έργου. Έτσι ανάλογα με την κρισιμότητα της γραμμής, την κατηγορία που ανήκει κατά τους κανονισμούς του πελάτη, το πάχος της, τα υλικά της αποφασίζονται οι έλεγχοι και τα ποσοστά τους.

Η εμπειρία από πραγματικά έργα δείχνει ότι η επένδυση σε πρόληψη και έγκαιρο έλεγχο ακόμη και αν αυξάνει το αρχικό κόστος επιθεώρησης τελικά οδηγεί σε χαμηλότερο συνολικό κόστος ποιότητας (CoQ). Επίσης οι έλεγχοι συγκολλήσεων λειτουργούν ως βασικό εργαλείο διαχείρισης ρίσκου. Η έγκαιρη ανίχνευση ελαττωμάτων μειώνει το τεχνικό, το χρονικό και το οικονομικό ρίσκο.

Η σύγχρονη προσέγγιση στους ελέγχους συγκολλήσεων δεν περιορίζεται στην τυπική συμμόρφωση με τις προδιαγραφές, αλλά ενσωματώνεται στον συνολικό σχεδιασμό του έργου και η επιλογή του κατάλληλου τύπου και χρόνου του ελέγχου αποτελεί στρατηγική απόφαση, με στόχο τη βελτιστοποίηση των παραγόντων που συντελούν στην βελτίωση της ποιότητας, της παραγωγικότητας, του κόστους και φυσικά χωρίς την απόκλιση του αρχικού χρονοδιαγράμματος.

3.6 Σύνδεση μεθόδων συγκόλλησης με κόστος παραγωγής

Στο πλαίσιο της βιώσιμης ανάπτυξης, η επιλογή της μεθόδου συγκόλλησης δεν αξιολογείται μόνο ως τεχνική λύση, αλλά ως επιλογή που επηρεάζει τον κύκλο ζωής της κατασκευής.

Η επιλογή της μεθόδου συγκόλλησης που οδηγεί σε σταθερή ποιότητα και περιορίζει τις επισκευές (repairs), υποστηρίζει τη “right-first-time” εκτέλεση.

Αυτό μεταφράζεται συνολικά σε:

- χαμηλότερο κόστος ποιότητας
- μικρότερη σπατάλη πόρων
- ενίσχυση της αξιοπιστίας των συνδέσεων
- ενίσχυση της ανθεκτικότητας της εγκατάστασης.

Το κόστος των συγκολλήσεων δεν αποτελεί ενιαίο και σταθερό μέγεθος, αλλά διαμορφώνεται από τη μέθοδο συγκόλλησης που επιλέγεται, επηρεάζεται από το περιβάλλον εκτέλεσης και καθορίζεται από το επίπεδο της απαιτούμενης ποιότητας.

Κάθε μέθοδος συγκόλλησης εμφανίζει διαφορετικό προφίλ κόστους, τόσο ως προς το άμεσο όσο και ως προς το έμμεσο κόστος.

Η συγκόλληση τόξου με επικαλυμμένο ηλεκτρόδιο (SMAW) χαρακτηρίζεται από χαμηλό αρχικό κόστος εξοπλισμού και υψηλή ευελιξία εφαρμογής, γεγονός που την καθιστά ιδιαίτερα διαδεδομένη σε εργασίες εργοταξίου. Ωστόσο, η χαμηλή παραγωγικότητα, η υψηλή εξάρτηση από τον ανθρώπινο παράγοντα καθώς και η αυξημένη πιθανότητα ελαττωμάτων οδηγούν συχνά σε αυξημένο συνολικό κόστος, λόγω επισκευών (repairs) και πρόσθετων ελέγχων.

Αντίθετα, οι μέθοδοι συνεχούς τροφοδοσίας σύρματος (GMAW / MIG–MAG) παρουσιάζουν υψηλότερο κόστος εξοπλισμού και αυξημένες απαιτήσεις σε ελεγχόμενο περιβάλλον, αλλά προσφέρουν σημαντικά μεγαλύτερη παραγωγικότητα και σταθερότερη ποιότητα. Σε μεγάλα έργα με επανάληψη του μοτίβου εργασίας (π.χ pipeline) καθώς και τη δυνατότητα συγκολλήσεων σε εργοστασιακές συνθήκες ή σε χώρους προκατασκευής (ατελιέ), οι μέθοδοι αυτές οδηγούν σε χαμηλότερο κόστος ανά μονάδα συγκόλλησης. Βέβαια με προσοχή στο χώρο προστασίας μπορούν να χρησιμοποιηθούν και στο πεδίο σε πολλές περιπτώσεις.

Η συγκόλληση τόξου με ηλεκτρόδιο βολφραμίου (GTAW / TIG) παρουσιάζει το υψηλότερο κόστος εφαρμογής, λόγω χαμηλής παραγωγικότητας και αυξημένων απαιτήσεων εξειδίκευσης. Παρόλα αυτά, σε κρίσιμες συγκολλήσεις υψηλής ποιότητας, το αυξημένο αρχικό κόστος μπορεί να δικαιολογηθεί από τη μείωση του κινδύνου αστοχιών και του κόστους αποτυχίας.

Οι αυτόματες και ημιαυτόματες μέθοδοι συγκόλλησης (FCAW / ρομποτικές) εμφανίζουν αυξημένο αρχικό κόστος επένδυσης, αλλά σημαντική μείωση του συνολικού κόστους σε

έργα μεγάλης κλίμακας, μέσω της αύξησης της παραγωγικότητας και της ελαχιστοποίησης των επισκευών. Η οικονομική αποδοτικότητά τους εξαρτάται άμεσα από τον όγκο παραγωγής και τη δυνατότητα οργάνωσης των εργασιών σε ελεγχόμενο περιβάλλον.

Συνεπώς, η οικονομικότερη μέθοδος συγκόλλησης δεν είναι καθολικά η φθηνότερη σε επίπεδο εξοπλισμού ή εργατοωρών, αλλά εκείνη που επιτυγχάνει τη βέλτιστη ισορροπία μεταξύ της ποιότητας, της παραγωγικότητας, του κόστους, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του έργου.

Ο Πίνακας 3.6.1 χρησιμοποιείται για να συνοψίσει τα βασικά δεδομένα της ενότητας και να διευκολύνει τη σύγκριση των μεθόδων συγκόλλησης ως προς των τεχνικών, ποιοτικών και οικονομικών παραμέτρων.

Πίνακας 3.6.1 – Συγκριτική αξιολόγηση μεθόδων συγκόλλησης ως προς το κόστος

Μέθοδος συγκόλλησης	Κόστος εξοπλισμού	Παραγωγικότητα	Επίπεδο ποιότητας	Κίνδυνος επισκευών (repairs)	Συνολικό κόστος εφαρμογής
SMAW (επικαλυμμένο ηλεκτρόδιο)	Χαμηλό	Χαμηλή	Μέτριο	Υψηλός	Μέτριο έως υψηλό
GMAW (MIG/MAG)	Μέτριο	Υψηλή	Καλό	Μέτριος	Μέτριο
GTAW (TIG)	Μέτριο	Χαμηλή	Πολύ υψηλό	Χαμηλός	Υψηλό
Ημιαυτόματες μέθοδοι (FCAW)	Υψηλό	Πολύ υψηλή	Υψηλό	Χαμηλός	Χαμηλό έως μέτριο*
Αυτόματες μέθοδοι (Ρομποτικές)	Πολύ υψηλό	Πολύ υψηλή	Πολύ υψηλό	Πολύ χαμηλός	Χαμηλό*

Από τον Πίνακα 3.6.1 προκύπτει ότι το συνολικό κόστος συγκόλλησης δεν εξαρτάται αποκλειστικά από το κόστος εξοπλισμού ή εργατοωρών, αλλά από τη συνδυαστική επίδραση της παραγωγικότητας, της ποιότητας και του κινδύνου επισκευών. Μέθοδοι με χαμηλό

αρχικό κόστος, όπως η SMAW, ενδέχεται να οδηγήσουν σε αυξημένο συνολικό κόστος λόγω μειωμένης παραγωγικότητας και αυξημένων απαιτήσεων ποιοτικού ελέγχου. Αντίθετα, μέθοδοι με υψηλότερο αρχικό κόστος επένδυσης, όπως τα ρομποτικά συστήματα, μπορούν να εμφανίσουν χαμηλότερο συνολικό κόστος σε έργα μεγάλης κλίμακας, μέσω της μεγάλης αύξησης της παραγωγικότητας αναλογικά με την μείωση των επισκευών.

Ο Πίνακας 3.6.2 που ακολουθεί χρησιμοποιείται για να συνοψίσει τα πλεονεκτήματα, τους περιορισμούς, το πεδίο εφαρμογής τις απαιτήσεις ποιότητας των μεθόδων συγκόλλησης

Πίνακας 3.6.2 – Συνοπτική αξιολόγηση μεθόδων συγκόλλησης (πεδίο εφαρμογής & απαιτήσεις ποιότητας)

Μέθοδος	Πλεονεκτήματα	Περιορισμοί / Ρίσκα	Πεδίο εφαρμογής	Απαιτήσεις ποιότητας (τι χρειάζεται για “right-first-time”)
GTAW (TIG)	Υψηλή ποιότητα / έλεγχος τόξου, πολύ καλή ρίζα, μικρός αριθμός προβλημάτων στη ρίζα	Χαμηλότερη παραγωγικότητα, απαιτεί υψηλή δεξιότητα, ευαίσθητη σε άνεμο / ρύπανση	Ρίζα σε σωληνώσεις, κρίσιμες γραμμές, ψιλό πάχος σωλήνας / ανοξείδωτα	Πολύ καλό μοντάρισμα (fit-up), καθαριότητα / προστασία αερίου, σωστά WPS, έγκαιρος οπτικός έλεγχος
SMAW (ηλεκτρόδιο)	Ευελιξία πεδίου, απλός ελαφρύς εξοπλισμός	Διακοπές (αλλαγές ηλεκτροδίων), μεγαλύτερη μεταβλητότητα χειριστή, αυξημένο ρίσκο επισκευών	Επί τόπου εργασίες, tie-ins, επισκευές, χρησιμοποιείται σε δυσπρόσιτα σημεία	Έλεγχος υγρασίας / ηλεκτροδίων, σωστή προετοιμασία, ανεξάρτητος οπτικός έλεγχος, τήρηση WPS / παραμέτρων
GMAW (MIG/MAG)	Υψηλότερη παραγωγικότητα από SMAW, σταθερή ποιότητα στο ατελιέ, λιγότερες διακοπές	Ευαισθησία σε άνεμο (shielding gas), ανάγκη καλής ρύθμισης, όχι πάντα εύκολο σε στενούς χώρους	Ατελιέ (shop), σιδηροκατασκευές, prefabrication, piping spools	Σταθερές ρυθμίσεις/παράμετροι, καθαριότητα, έλεγχος αερίου, οπτικός & δειγματοληπτικό PT/UT όπου απαιτείται

Μέθοδος	Πλεονεκτήματα	Περιορισμοί / Ρίσκα	Πεδίο εφαρμογής	Απαιτήσεις ποιότητας (τι χρειάζεται για “right-first-time”)
Ημιαυτόματη FCAW (field set-ups)	Καλή παραγωγικότητα στο πεδίο όταν υπάρχει σωστή ρύθμιση	Συνθήκες περιβάλλοντος, πρόσβαση, αυξημένη πιθανότητα διακοπών / αστάθειας	Πεδίο με “στέγαστρα” /μηχανές υποβοήθηση, ευθείες / ελεγχόμενες ζώνες	Προστασία από άνεμο, σταθερή παροχή, έλεγχος στο μοντάρισμα, προγραμματισμός NDT για να μην δημιουργούνται καθυστερήσεις στις υπόλοιπες εργασίες
Ρομποτικά / Automatic GMAW (π.χ. pipeline)	Υψηλή επαναληψιμότητα, πολύ υψηλή παραγωγικότητα, χαμηλές επισκευές όταν τηρείται το WPS	Απαιτεί ειδικό εξοπλισμό / εδάφη, περιορισμοί σε tie-ins / ανωμαλίες, θέλει σωστή οργάνωση	Pipeline girth welds σε ευθείες/κατάλληλο έδαφος	Αυστηρή τήρηση WPS, ανεξάρτητο VT πριν NDT, σωστή ευθυγράμμιση, σταθερός προγραμματισμός ελέγχων

Ο Πίνακας 3.6.2 συνοψίζει τις βασικές μεθόδους συγκόλλησης και αναδεικνύει ότι μία μέθοδος θεωρείται κατάλληλη όχι μόνο από τα τεχνικά χαρακτηριστικά, αλλά και από το περιβάλλον εφαρμογής και από τις απαιτήσεις ποιότητας και ελέγχων που επηρεάζουν την παραγωγικότητα και το κόστος ποιότητας.

3.7 Πρότυπα συγκολλήσεων (ASME Section IX και EN ISO)

Στα τεχνικά έργα σωληνώσεων, ιδιαίτερα σε εγκαταστάσεις διεργασιών και ενέργειας, η διασφάλιση της ποιότητας των συγκολλήσεων βασίζεται σε τρία συμπληρωματικά τεκμήρια:

1. τις προδιαγραφές διαδικασίας συγκόλλησης (WPS),
2. τα αρχεία πιστοποίησης της διαδικασίας (PQR)
3. τα αρχεία πιστοποίησης συγκολλητών (WPQR).

Στην πράξη συναντάται συχνά απαίτηση συνδυαστικής συμμόρφωσης με το αμερικανικό πλαίσιο του ASME Section IX και με το ευρωπαϊκό/διεθνές πλαίσιο EN ISO (EN ISO 15609-1, EN ISO 15614-1 και EN ISO 9606-1).

Η αντιστοίχιση των ομάδων των υλικών μεταξύ ASME και EN ISO αποτελεί προ-απαιτούμενη προϋπόθεση για την τεκμηρίωση ότι μία πιστοποίηση διαδικασίας ή συγκολλητή καλύπτει ουσιαστικά την ίδια οικογένεια υλικού.

Στη συνέχεια παρατίθενται τα υλικά που απαντώνται συχνότερα στα εξεταζόμενα έργα:

- CS carbon steel
- Cr–Mo P11 / P22 / P5 / P9 / P91 alloy steel
- ωστενιτικοί ανοξείδωτοι χάλυβες τύπου SS304 / SS31 stainless steel

Η τελική συμπλήρωση/επιβεβαίωση των ISO GROUP γίνεται σύμφωνα με τις εκάστοτε προδιαγραφές του έργου.

Με βάση το ανωτέρω θεωρητικό και κανονιστικό υπόβαθρο, οι επόμενες ενότητες εστιάζουν στη μετάβαση από την «ορθή διαδικασία» στη «μετρήσιμη απόδοση» της συγκόλλησης. Συγκεκριμένα, αναλύονται οι δείκτες παραγωγικότητας και αποδοτικότητας που χρησιμοποιούνται σε τεχνικά έργα (χρόνοι, ρυθμοί απόθεσης, αποδοτικότητα τόξου -εργασίας, ποσοστά απορρίψεων NDT), ώστε να τεκμηριωθεί πώς οι τεχνικές μεταβλητές (WPS/PQR/WPQ, θερμικές πρακτικές, θέση 6G κ.λπ.) μεταφράζονται σε αποτελέσματα κόστους και χρονοδιαγράμματος.

Ο Πίνακας 3.7.1 χρησιμοποιείται για να συνοψίσει τα βασικά υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στα έργα της μεθοδολογίας και να διευκολύνει τη σύγκριση τεχνικών παραμέτρων.

Πίνακας 3.7.1: Αντιστοίχιση υλικών κατά ASME και EN ISO

Υλικό (έργο)	ASME IX (P- No/Group)	EN/ISO GROUP (ISO/TR 15608)	Σημειώσεις ρίσκου / ελέγχου
CS A106 (Low Carbon Steel)	P-No 1 (συνήθως)	Non-alloy steels (π.χ. Group 1.x)	Έμφαση σε fit-up, fusion, NDT sampling
P11 (1.25Cr- 0.5Mo)	P-No 4 (συχνά)	Cr–Mo steels (π.χ. Group 5.x)	Preheat/interpass, low-H practice, PWHT κατά προδιαγραφή, NDT ποσοστό, συνοδεία αερίου
P22 (2.25Cr- 1Mo)	P-No 5A (συχνά)	Cr–Mo steels (π.χ. Group 5.x)	Αυστηρός έλεγχος θερμικού κύκλου, PWHT συχνά NDT 100%, συνοδεία αερίου

Υλικό (έργα)	ASME IX (P- No/Group)	EN/ISO GROUP (ISO/TR 15608)	Σημειώσεις ρίσκου / ελέγχου
P5 (5Cr- 0.5Mo)	P-No 5A (συχνά)	Higher Cr–Mo (π.χ. Group 6.x)	PWHT σχεδόν κανόνας, έλεγχος υδρογόνου NDT 100%, συνοδεία αερίου
P9 (9Cr- 1Mo)	P-No 5B (συχνά)	High Cr–Mo (π.χ. Group 6.x)	Στενά παράθυρα WPS, αυξημένο τεχνικό ρίσκο NDT 100%, συνοδεία αερίου
P91 (9Cr- 1Mo-V-Nb, CSEF)	P-No 15E (συχνά)	CSEF steels (π.χ. Group 6/7.x)	Heat input / interpass / PWHT κρίσιμα, ενίσχυση ποιοτικού ελέγχου NDT 100%, συνοδεία αερίου
SS304	P-No 8	Austenitic stainless (π.χ. Group 8.x)	Συνοδεία αερίου, καθαριότητα, αποφυγή επιμόλυνσης NDT ποσοστό, ferrite 100%, PMI 100%
SS316	P-No 8	Austenitic stainless (π.χ. Group 8.x)	Όπως SS304 + έλεγχος αναλωσίμων, NDT ποσοστό, ferrite 100%, PMI 100%

Τα υλικά που αναφέρονται στον πίνακα 3.7.1 είναι τα υλικά που συναντάμε στα έργα τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη της μεθοδολογίας στο κεφάλαιο 6.



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΠΑΡΑΓΩΓΙΚΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΗΤΑ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΩΝ

Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναλυθεί η παραγωγικότητα σε όλα τα επίπεδα. Αρχικά θα γίνει διαχωρισμός της αποδοτικότητας και της παραγωγικότητας. Κατόπιν δίδονται οι εξισώσεις που αποδίδουν τους δείκτες μέτρησης της παραγωγικότητας και πως την επηρεάζει ο ανθρώπινος παράγοντας. Στη συνέχεια έχουμε τον ορισμό του παραγωγικού και του μη παραγωγικού χρόνου, και πως το περιβάλλον και η οργάνωση των συνεργείων επηρεάζουν την παραγωγικότητα. Τέλος παραβάλλεται η σχέση της παραγωγικότητας με τον προγραμματισμό και πως μπορεί να επηρεαστεί από την αυτοματοποίηση της συγκόλλησης.

4.1 Παραγωγικότητα - Αποδοτικότητα - Δείκτες μέτρησης

Η παραγωγικότητα και η αποδοτικότητα αποτελούν τις βασικές έννοιες στη διαχείριση των τεχνικών έργων. Επηρεάζουν άμεσα τον χρόνο υλοποίησης, το κόστος του έργου καθώς επίσης και την ποιότητα του τελικού αποτελέσματος. Ως παραγωγικότητα ορίζεται ως ο λόγος της παραγόμενης εργασίας προς τον απαιτούμενο χρόνο ή τις διαθέσιμες εργατοώρες.

$\text{Παραγωγικότητα} = \text{παραγόμενη εργασία} / \text{απαιτούμενος χρόνος ή εργατοώρες}$
$\text{Productivity} = \text{output quantity} / \text{man-hour (MH)}$

Η αποδοτικότητα δε, αναφέρεται ως η βέλτιστη αξιοποίηση των πόρων με στόχο την επίτευξη του επιθυμητού αποτελέσματος, με το μικρότερο δυνατό κόστος και απώλειες.

Στο πλαίσιο των συγκολλήσεων, η παραγωγικότητα συνδέεται κυρίως με τον ρυθμό εκτέλεσης των εργασιών. Συνεπώς ο αριθμός των επισκευών, οι απαιτήσεις ελέγχου και το τελικό οικονομικό αποτέλεσμα επηρεάζουν τελικά την αποδοτικότητα.

Η διάκριση μεταξύ των δύο εννοιών είναι κρίσιμη, καθώς η αύξηση της μίας δεν σημαίνει απολύτως και αύξηση της δεύτερης. Δηλαδή η αύξηση παραγωγικότητας δεν συνεπάγεται απαραίτητα και την αύξηση της αποδοτικότητας.

Η εμπειρία σε τεχνικά έργα έχει αποδείξει ότι με εκτεταμένες συγκολλήσεις, η μονομερής έμφαση στην ταχύτητα εκτέλεσης, δηλαδή αύξηση της παραγωγικότητας, μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση των ελαττωμάτων, με συνέπεια την αύξηση του αριθμού των επισκευών (repairs), μειώνοντας τελικά την αποδοτικότητα του έργου. Για τον λόγο αυτό, η αξιολόγηση των συγκολλήσεων απαιτεί συνδυαστική προσέγγιση που λαμβάνει υπόψη τόσο την παραγωγικότητα όσο και την αποδοτικότητα σε ισοδύναμα ποσοστά.

Η παραγωγικότητα των συγκολλήσεων δεν μπορεί να αξιολογηθεί αξιόπιστα χωρίς τη χρήση αντικειμενικών και μετρήσιμων δεικτών. Στη διεθνή βιβλιογραφία χρησιμοποιούνται συγκεκριμένες μετρικές, οι οποίες επιτρέπουν τη σύγκριση διαφορετικών μεθόδων συγκόλλησης, των περιβαλλόντων εκτέλεσης καθώς και των οργανωτικών πρακτικών.

Μία μονάδα μέτρησης της παραγωγικότητας είναι ο χρόνος τόξου (arc time). Ο χρόνος τόξου εκφράζει το ποσοστό του συνολικού χρόνου εργασίας κατά το οποίο το ηλεκτρικό τόξο είναι ενεργό και πραγματοποιείται πραγματική συγκόλληση. Αποτελεί θεμελιώδη δείκτη παραγωγικότητας, καθώς αποτυπώνει το ποσοστό του χρόνου που μετατρέπεται σε παραγωγικό έργο όπως αποτυπώνεται παρακάτω στην εξίσωση (1) όπου έχουμε τον χρόνο του τόξου να ισούται με τον χρόνο ενεργούς συγκόλλησης προς τον συνολικό χρόνο εργασίας:

Εξίσωση (1):

$$\text{Arc Time} = t_{\text{arc}} / t_{\text{total}}$$

όπου:

t_{arc} = χρόνος ενεργού συγκόλλησης
t_{total} = συνολικός χρόνος εργασίας

Σε συνθήκες εργοταξίου, ο χρόνος τόξου επηρεάζεται αρνητικά από τις διακοπές εργασίας, τις μετακινήσεις, τις προετοιμασίες καθώς επίσης από τους εξωτερικούς παράγοντες με αποτέλεσμα να οδηγείται σε χαμηλότερες τιμές. Αντίθετα, σε οργανωμένα ατελιέ σε συνδυασμό με χρήση αυτοματοποιημένων διαδικασιών, ο χρόνος τόξου εμφανίζεται σημαντικά αυξημένος.

Ένας δείκτης μέτρησης παραγωγικότητας είναι επίσης ο ρυθμός εναπόθεσης υλικού (Deposition Rate). Ο ρυθμός εναπόθεσης υλικού ο οποίος αποτυπώνεται στην εξίσωση (2) που ακολουθεί και εκφράζει την ποσότητα υλικού πλήρωσης που εναποτίθεται ανά μονάδα χρόνου συγκόλλησης:

Εξίσωση (2):

$$\text{Deposition Rate} = m_{\text{deposited}} / t_{\text{arc}}$$

όπου:

$$m_{\text{deposited}} = \text{μάζα εναποτιθέμενου υλικού}$$

$$t_{\text{arc}} = \text{χρόνος ενεργού συγκόλλησης}$$

Αποτελεί άμεσο δείκτη της ταχύτητας εκτέλεσης της διαδικασίας και επηρεάζεται επίσης από τη μέθοδο συγκόλλησης καθώς επιπλέον από τον τύπο του αναλωσίμου και τις παραμέτρους της διαδικασίας. Είναι ένας δείκτης ο οποίος για να εκτιμηθεί πρέπει να οργανωθεί πολύ καλά η παραγωγή στο εργοτάξιο και στο ατελιέ, να μην χάνονται τα scrap ηλεκτρόδια εάν έχουμε μέθοδο SMAW ώστε να ζυγιστούν ή το scrap από τις βέργες στη μέθοδο TIG. Συνεπώς είναι λίγο πιο δυσεύρετο νούμερο.

Εάν ανατρέξουμε στη βιβλιογραφία βλέπουμε ότι μέθοδοι συνεχούς τροφοδοσίας σύρματος και αυτοματοποιημένες διαδικασίες παρουσιάζουν υψηλότερους ρυθμούς εναπόθεσης σε σύγκριση με χειροκίνητες μεθόδους, γεγονός που μεταφράζεται σε αυξημένη παραγωγικότητα, υπό την προϋπόθεση ότι διατηρείται η απαιτούμενη ποιότητα.

Τέλος υπάρχει ένας ακόμα δείκτης, η αποδοτικότητα της συγκόλλησης (Welding Efficiency) που εκφράζει:



- τον βαθμό αξιοποίησης του υλικού πλήρωσης
- της ενέργειας
- των εργατοωρών

που καταναλώνονται κατά τη διαδικασία συγκόλλησης και αποτυπώνεται στην εξίσωση (3):

Εξίσωση (3):

$$\text{Welding Efficiency (WE)} = 1 - (t_{\text{nonproductive}} / t_{\text{total}})$$

όπου:

$$t_{\text{nonproductive}} = \text{χρόνος προετοιμασιών, αναμονών, ελέγχων και διακοπών}$$

Περιλαμβάνει τόσο την τεχνική αποδοτικότητα της μεθόδου όσο και την οργανωτική αποδοτικότητα του έργου.

Η χαμηλή αποδοτικότητα συνδέεται με απώλειες υλικού, με τις αυξημένες επισκευές (repairs) και την χαμηλή ποιότητα οδηγώντας σε αυξημένο συνολικό κόστος.

Αντίθετα, υψηλή αποδοτικότητα υποδηλώνει ορθολογική χρήση πόρων και καλύτερη ισορροπία μεταξύ παραγωγικότητας και ποιότητας.

Οι δείκτες παραγωγικότητας (Arc Time, Welding Efficiency, repair rate) λειτουργούν ως τεχνική “γέφυρα” μεταξύ οικονομικής απόδοσης και βιωσιμότητας. Η βελτίωση των δεικτών αυτών μειώνει τον μη παραγωγικό χρόνο και περιορίζει τις επισκευές. Επιπροσθέτως οδηγεί σε χαμηλότερη κατανάλωση πόρων και αυξάνει τη δυνατότητα του έργου να διατηρήσει σταθερό ρυθμό εκτέλεσης και να ανακάμπτει από διαταραχές (resilience).

Η παραγωγικότητα των συγκολλήσεων επηρεάζεται από πλήθος παραγόντων όπως:

- η επιλογή της μεθόδου
- ο βαθμός αυτοματοποίησης
- η εμπειρία του προσωπικού

- οι συνθήκες εκτέλεσης.

Αυτοί οι παράγοντες ουσιαστικά προσδιορίζουν την παραγωγικότητα και σχετίζονται τόσο με τη μέθοδο συγκόλλησης όσο με το περιβάλλον και την οργάνωση του έργου. Οι μετρικές αυτές συνολικά, χρησιμοποιούνται συνδυαστικά, καθώς καμία μεμονωμένη παράμετρος δεν επαρκεί για την πλήρη αποτύπωση της παραγωγικότητας των συγκολλήσεων.

Η βιβλιογραφία για τους δείκτες παραγωγικότητας συγκολλήσεων παρουσιάζει μεθόδους υπολογισμού για διαδικασίες όπως η SMAW και η FCAW, αξιοποιώντας μετρήσεις βάρους εναπόθεσης, χρόνου τόξου και συνολικού χρόνου εργασίας. Η προσέγγιση αυτή είναι χρήσιμη για την παρούσα εργασία, επειδή μετατρέπει την παραγωγικότητα από ποιοτική εκτίμηση σε μετρήσιμο μέγεθος που μπορεί να συσχετιστεί με κόστος και ποιότητα (Ferreira, 2018).

Στον διϋλιστηριακό χώρο για παράδειγμα η παραγωγικότητα μετριέται με τον αριθμό των συγκολλήσεων (ίντσες ανά δωρο, KPI) την ημέρα υπολογίζοντας βέβαια τη διάμετρο, το πάχος και το υλικό της σωλήνας. Αυτές οι πληροφορίες χρησιμοποιούνται στον πίνακα «6.1.1 Μετρικές παραγωγικότητας συγκολλήσεων Α' έργου»

Ο Πίνακας 4.1.1 χρησιμοποιείται για να συνοψίσει τα βασικά δεδομένα της ενότητας και να διευκολύνει τη σύγκριση τεχνικών, ποιοτικών και οικονομικών παραμέτρων των μεθόδων συγκόλλησης.

Πίνακας 4.1.1 – Ενδεικτικές μετρικές παραγωγικότητας συγκολλήσεων ανά μέθοδο

Μέθοδος συγκόλλησης	Χρόνος Τόξου (Arc Time) (%) επί συνολικού χρόνου)	Ρυθμός απόθεσης (Deposition Rate) (Kg/h)	Αποδοτικότητα Συγκόλλησης (Welding Efficiency) (%)	Σχόλια αποδοτικότητας
SMAW	Χαμηλό (15–25%)	Χαμηλός	Μέτρια (55–65%)	Μεγάλες διακοπές, υψηλή εξάρτηση από συγκολλητή
GMAW (MIG/MAG)	Μέτριο–Υψηλό (30–45%)	Υψηλός	Υψηλή (70–85%)	Σταθερή διαδικασία, απαιτεί ελεγχόμενο περιβάλλον
GTAW (TIG)	Χαμηλό (10–20%)	Πολύ χαμηλός	Πολύ υψηλή (85–95%)	Υψηλή ποιότητα, χαμηλή παραγωγικότητα
Ημιαυτόματες μέθοδοι (FCAW)	Υψηλό (40–55%)	Πολύ υψηλός	Υψηλή (80–90%)	Καλή ισορροπία ποιότητας–ταχύτητας
Αυτόματες μέθοδοι (Ρομποτική)	Πολύ υψηλό (60–80%)	Πολύ υψηλός	Πολύ υψηλή (90–98%)	Ελάχιστες απώλειες, απαιτεί όγκο παραγωγής

Από τον Πίνακα 4.1.1 προκύπτει ότι η παραγωγικότητα των συγκολλήσεων διαφοροποιείται σημαντικά ανάλογα με τη μέθοδο συγκόλλησης και τον βαθμό αυτοματοποίησης. Μέθοδοι με χαμηλό χρόνο τόξου και χαμηλό ρυθμό εναπόθεσης, όπως η SMAW και η GTAW, παρουσιάζουν περιορισμένη παραγωγικότητα, παρά το χαμηλό ή μέτριο κόστος εξοπλισμού. Αντίθετα, μέθοδοι με αυξημένο βαθμό αυτοματοποίησης εμφανίζουν υψηλότερο χρόνο τόξου, αυξημένο ρυθμό εναπόθεσης και υψηλή αποδοτικότητα, γεγονός που οδηγεί σε βελτιωμένη συνολική αποδοτικότητα και μειωμένο κόστος ανά μονάδα συγκόλλησης σε έργα μεγάλης κλίμακας.

4.2 Ανθρώπινος παράγοντας και παραγωγικότητα συγκολλήσεων

Ο ανθρώπινος παράγοντας αποτελεί επίσης έναν από τους πλέον καθοριστικούς συντελεστές της παραγωγικότητας στις συγκολλήσεις, ιδιαίτερα σε χειροκίνητες και ημιαυτόματες μεθόδους. Παρά την εξέλιξη της τεχνολογίας και την αυξανόμενη χρήση αυτοματισμών, η απόδοση των συγκολλήσεων εξακολουθεί να επηρεάζεται σε σημαντικό βαθμό από την εμπειρία, την εκπαίδευση, την πιστοποίηση καθώς και την φυσική κατάσταση του ανθρώπινου δυναμικού που συμμετέχει στη διαδικασία.

Στις χειροκίνητες μεθόδους στη SMAW και τη GTAW δηλαδή, η εξάρτηση από τον συγκολλητή είναι ιδιαίτερα έντονη. Η ποιότητα της τεχνικής, η σταθερότητα και η ικανότητα της εκτέλεσης και τήρησης των παραμέτρων επηρεάζουν άμεσα τον χρόνο τόξου (Arc Time), τον ρυθμό εναπόθεσης και τη συνολική αποδοτικότητα συγκόλλησης (Welding Efficiency) τους δείκτες δηλαδή της παραγωγικότητας.

Στις ημιαυτόματες μεθόδους (GMAW), η εξάρτηση από τον ανθρώπινο παράγοντα μειώνεται, χωρίς όμως να εκλείπει. Ο χειριστής του εξοπλισμού επηρεάζει την ποιότητα μέσω της σωστής ρύθμισης και παρακολούθησης της διαδικασίας. Η μετάβαση από τον ρόλο του συγκολλητή στον ρόλο του χειριστή απαιτεί διαφορετικό σύνολο δεξιοτήτων.

Η εκπαίδευση και η πιστοποίηση των συγκολλητών αποτελούν βασικές προϋποθέσεις για τη διασφάλιση αποδεκτού επιπέδου ποιότητας. Τα τεχνικά έργα και οι προδιαγραφές που καλούνται να ακολουθήσουν, απαιτούν πιστοποιήσεις σύμφωνα με συγκεκριμένα πρότυπα, ώστε να διασφαλίζεται ότι ο συγκολλητής διαθέτει τις απαιτούμενες δεξιότητες για το εκάστοτε έργο.

Ωστόσο, η ύπαρξη πιστοποίησης δεν εγγυάται από μόνη της υψηλή παραγωγικότητα. Η συνεχής εξάσκηση και η εξοικείωση με τις ιδιαιτερότητες του έργου αποτελούν συμπληρωματικούς παράγοντες που επηρεάζουν την πραγματική απόδοση στο πεδίο.

Η εμπειρία του συγκολλητή επηρεάζει άμεσα τη σταθερότητα της διαδικασίας και τον αριθμό των απαιτούμενων επισκευών. Έμπειροι συγκολλητές παρουσιάζουν εκτός από πραγματικά υψηλό χρόνο τόξου (Arc Time), σταθερή ποιότητα στις συγκολλήσεις τους, λιγότερες επισκευές και φυσικά είναι εξοικειωμένοι με τα πρότυπα και τις προδιαγραφές.

Αντίθετα, σε έργα όπου το προσωπικό δεν είναι επαρκώς εξοικειωμένο με τη συγκεκριμένη μέθοδο ή το περιβάλλον εργασίας, ή σαν άνθρωποι δεν είναι συνεπείς, παρατηρείται αυξημένη απώλεια παραγωγικού χρόνου και αυξημένο κόστος ποιότητας.

Άλλος παράγοντας που επηρεάζει σημαντικά την παραγωγικότητα των συγκολλήσεων είναι η φυσική κόπωση και οι συνθήκες εργασίας του προσωπικού. Σε έργα με εκτεταμένες βάρδιες, νυχτερινή εργασία ή δυσμενείς περιβαλλοντικές συνθήκες, η απόδοση του προσωπικού μειώνεται αισθητά.

Η σωστή οργάνωση των βαρδιών και η πρόβλεψη επαρκών διαλειμμάτων αποτελούν κρίσιμα μέτρα για τη διατήρηση αποδεκτών επιπέδων παραγωγικότητας και ποιότητας.

4.3 Ορισμός παραγωγικού και μη παραγωγικού χρόνου στις συγκολλήσεις

Για να γίνει σωστά η ανάλυση της παραγωγικότητας των συγκολλήσεων πρέπει να διαχωριστεί ο συνολικός χρόνος εργασίας σε παραγωγικό και μη παραγωγικό χρόνο.

Ο διαχωρισμός αυτός επιτρέπει την αναγνώριση των πραγματικών αιτιών απώλειας αποδοτικότητας καθώς και την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας της οργάνωσης του έργου, πέρα από τη μεμονωμένη τεχνική ικανότητα του προσωπικού.

Ως παραγωγικός χρόνος ορίζεται ο χρόνος κατά τον οποίο εκτελείται ενεργή συγκόλληση, δηλαδή ο χρόνος ενεργού τόξου (Arc Time) που συμβάλλει άμεσα στην ολοκλήρωση της συγκόλλησης. Όταν λοιπόν μιλάμε για παραγωγικό χρόνο εννοούμε το arc time το οποίο είναι μετρούμενο μέγεθος.

Ως μη παραγωγικός χρόνος ορίζεται κάθε χρόνος που δεν συνεισφέρει άμεσα στην παραγωγή συγκόλλησης, αλλά είναι αναγκαίος ή προκύπτει από οργανωτικές, τεχνικές ή ποιοτικές απαιτήσεις. Ο μη παραγωγικός χρόνος περιλαμβάνει τόσο αναπόφευκτες δραστηριότητες όσο και απώλειες που μπορούν να περιοριστούν μέσω καλύτερης οργάνωσης

Για τις ανάγκες της ανάλυσης, ο μη παραγωγικός χρόνος κατηγοριοποιείται στις ακόλουθες βασικές ομάδες:



- Χρόνος προετοιμασίας και fit-up, που περιλαμβάνει ευθυγραμμίσεις, προσαρμογές, καθαρισμούς και ρυθμίσεις πριν τη συγκόλληση.
- Χρόνος αλλαγής αναλωσίμων, όπως αλλαγές ηλεκτροδίων στη SMAW ή ρυθμίσεις σύρματος και αερίου στη GMAW.
- Χρόνος αναμονής ελέγχων, που αφορά την αναμονή για VT, PT ή RT πριν την πρόοδο στην επόμενη εργασία.
- Χρόνος επανεργασιών (repairs), ο οποίος περιλαμβάνει αποκατάσταση ελαττωμάτων, επανασυγκόλληση και επαναληπτικούς ελέγχους.
- Χρόνος ανοπτήσεων (PWHT), όπου εφαρμόζεται, καθώς και ο χρόνος αναμονής πριν και μετά την κατεργασία.
- Χρόνος λόγω συνθηκών εργοταξίου, όπως καιρικές συνθήκες, περιορισμένη πρόσβαση ή οργανωτικά ζητήματα.

Η παραπάνω κατηγοριοποίηση επιτρέπει τη σαφή αποτύπωση των πηγών απώλειας χρόνου και τη σύγκριση μεταξύ διαφορετικών έργων.

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, η ανάλυση εφαρμόζεται στα τρία εξεταζόμενα έργα (βιομηχανικό έργο σωληνώσεων, έργο αγωγού μεταφοράς φυσικού αερίου (pipeline), βιομηχανικό έργο σιδηροκατασκευής), με στόχο τη συγκριτική αποτύπωση των πηγών απώλειας χρόνου και την κατανόηση της διαφορετικής συμπεριφοράς της παραγωγικότητας σε κάθε περίπτωση.

4.4 Επίδραση του περιβάλλοντος στην παραγωγικότητα των συγκολλήσεων

Το περιβάλλον στο οποίο εκτελούνται οι συγκολλήσεις αποτελεί έναν από τους πλέον καθοριστικούς παράγοντες για την πραγματική παραγωγικότητα των εργασιών. Ανεξάρτητα από τη μέθοδο συγκόλλησης, οι συνθήκες του περιβάλλοντος επηρεάζουν άμεσα όλους τους παράγοντες της παραγωγικότητας της συγκόλλησης με συνέπεια αυτό που ουσιαστικά ενδιαφέρει, να αυξάνουν το κόστος του έργου.

Στα σημερινά έργα, το περιβάλλον συγκολλήσεων διακρίνεται κυρίως σε εργοστασιακό περιβάλλον (ατελιέ / προκατασκευή), εργοτάξιο και ειδικά περιβάλλοντα αγωγών (pipeline –

trench). Κάθε κατηγορία παρουσιάζει διαφορετικά επίπεδα ελέγχου, προβλεψιμότητας και ρίσκου, τα οποία αντικατοπτρίζονται άμεσα στους δείκτες παραγωγικότητας.

Σε εργοστασιακό περιβάλλον, ατελιέ, οι συγκολλήσεις εκτελούνται υπό ελεγχόμενες συνθήκες, γεγονός που επιτρέπει υψηλό βαθμό επαναληψιμότητας και σταθερότητας συνεπώς πιο υψηλή παραγωγικότητα με λιγότερες αστοχίες. Αντίθετα στο εργοτάξιο όπου η έκθεση των συνεργείων στις εκάστοτε καιρικές συνθήκες, οι διακοπές εργασιών για διάφορους λόγους και το ανακατωμένο, σκαμμένο συνήθως πεδίο, δημιουργεί μικρή παραγωγικότητα με αρκετές επισκευές και μεγαλύτερη κούραση στο ανθρώπινο δυναμικό .

Η χαμηλότερη παραγωγικότητα μεταφράζεται σε αυξημένο έμμεσο κόστος, το οποίο συχνά δεν αποτυπώνεται επαρκώς στον αρχικό προϋπολογισμό του έργου αλλά εμφανίζεται στην τελική αποτίμηση κόστους.

Τα έργα αγωγών αποτελούν ιδιαίτερη κατηγορία συγκολλήσεων πεδίου, με αυξημένες απαιτήσεις ποιότητας - ελέγχου - οργάνωσης. Οι συγκολλήσεις εκτελούνται τόσο εκτός όσο και εντός χαντακιού, με αυστηρή τήρηση διαδικασιών και περιβαλλοντικών περιορισμών.

Η εμπειρία από μεγάλα έργα αγωγών δείχνει ότι:

- η χρήση αυτόματων ή ρομποτικών συστημάτων σε ευθύγραμμα τμήματα οδηγεί σε υψηλή παραγωγικότητα,
- οι ημιαυτόματες λύσεις σε ανώμαλες περιοχές παρουσιάζουν αρκετά καλή και σταθερή απόδοση,
- τα tie-in κολλήματα εμφανίζουν χαμηλότερη παραγωγικότητα λόγω γεωμετρικών περιορισμών και ελέγχων

Οι περιβαλλοντικοί παράγοντες οι οποίοι επηρεάζουν άμεσα τους βασικούς δείκτες παραγωγικότητας είναι βασικά ο άνεμος και η υγρασία όπου επηρεάζουν τη σταθερότητα της διαδικασίας, οι χαμηλές ή υψηλές θερμοκρασίες οι οποίες επηρεάζουν τη συγκολλησιμότητα του μετάλλου, ενώ η πρόσβαση και ο φωτισμός επηρεάζουν την ακρίβεια και την ταχύτητα εκτέλεσης της συγκόλλησης. Ο τρόπος για να μετριαστεί το συγκεκριμένο πρόβλημα στο πεδίο είναι η χρήση στεγάστρων είτε στα βιομηχανικά έργα είτε στα pipelines είτε στις σιδηροκατασκευές εφόσον υπάρχουν συγκολλήσεις επιτόπου.

Η ανάλυση καταδεικνύει ότι το περιβάλλον συγκολλήσεων αποτελεί καθοριστικό παράγοντα παραγωγικότητας και αποδοτικότητας. Η σωστή κατανομή συγκολλήσεων μεταξύ ατελιέ και εργοταξίου, σε συνδυασμό με την εφαρμογή αυτοματοποίησης και ελέγχου, οδηγεί σε βελτιστοποίηση του συνολικού αποτελέσματος του έργου, ποιοτικά, χρονικά, οικονομικά.

4.5 Οργάνωση συνεργείων και επίδραση στην παραγωγικότητα των συγκολλήσεων

Η οργάνωση των συνεργείων συγκόλλησης αποτελεί έναν επίσης σημαντικό παράγοντα που επηρεάζει την πραγματική παραγωγικότητα των συγκολλήσεων στα τεχνικά έργα. Ανεξάρτητα από τη μέθοδο συγκόλλησης που εφαρμόζεται, η απόδοση της διαδικασίας εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη σύνθεση των ατόμων και του εξοπλισμού που στελεχώνουν την ομάδα καθώς και από τον συντονισμό τους. Η παραγωγικότητα δεν περιορίζεται στην ατομική απόδοση του συγκολλητή ή του χειριστή, αλλά αποτελεί αποτέλεσμα ομαδικής λειτουργίας, όπου συγκολλητές, βοηθητικό προσωπικό, επιθεωρητές και επιβλέποντες συνεργάζονται στο πλαίσιο μίας οργανωμένης ροής εργασιών με στόχο το καλύτερο ποιοτικό αποτέλεσμα που μπορούν να πάρουν.

Η αναλογία μεταξύ συγκολλητών και βοηθητικού προσωπικού επηρεάζει άμεσα τον χρόνο πραγματικής συγκόλλησης ήτοι το Arc Time. Σε συνεργεία με ανεπαρκή υποστήριξη, ο συγκολλητής αναγκάζεται να εκτελεί εργασίες προετοιμασίας και μεταφοράς, μειώνοντας σημαντικά τον καθαρό παραγωγικό χρόνο.

4.6 Παραγωγικότητα συγκολλήσεων σε σχέση με τον προγραμματισμό έργου

Η παραγωγικότητα των συγκολλήσεων συνδέεται άμεσα με τον συνολικό προγραμματισμό ενός τεχνικού έργου και, σε πολλές περιπτώσεις, αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για την

τήρηση ή μη του χρονοδιαγράμματος. Οι συγκολλήσεις δεν είναι απομονωμένη δραστηριότητα, αλλά εντάσσονται σε μία αλληλουχία εργασιών που περιλαμβάνει:

- fit – up
- συγκόλληση
- ελέγχους
- πιθανές επισκευές
- θερμικές κατεργασίες (PWHT) σε ορισμένες περιπτώσεις
- υδραυλικές δοκιμές

Στα περισσότερα βιομηχανικά έργα, οι συγκολλήσεις βρίσκονται είτε άμεσα είτε έμμεσα στο κρίσιμο μονοπάτι (critical path) του έργου. Ως αποτέλεσμα, κάθε απόκλιση στην παραγωγικότητά τους έχει δυσανάλογα μεγάλη επίδραση στη συνολική διάρκεια του έργου. Οι συγκολλήσεις συχνά αποτελούν δραστηριότητες που ενώ δεν μπορούν να παρακαμφθούν, δεν επιδέχονται εύκολη παράλληλη εκτέλεση και εννοείται ότι εξαρτώνται από την ολοκλήρωση προηγούμενων εργασιών (fit – up, προετοιμασία).

Η εμπειρία από έργα σωληνώσεων και βιομηχανικών εγκαταστάσεων δείχνει ότι ακόμη και μικρή αύξηση των επισκευών μπορεί να μεταβάλλει σημαντικά το τελικό χρονοδιάγραμμα. Επίσης οι έλεγχοι πρέπει να είναι συγχρονισμένοι με τις συγκολλήσεις για καλύτερο αποτέλεσμα της παραγωγικότητας των επισκευών και την έγκαιρη επισκευή σφαλμάτων ώστε να μην υπάρξει καμία καθυστέρηση στις εργασίες που έπονται.

4.7 Η αυτοματοποίηση της συγκόλλησης και η παραγωγικότητα

Η αυτοματοποίηση των συγκολλήσεων, είτε με τη μορφή ημιαυτόματων συστημάτων είτε πλήρως ρομποτικών εφαρμογών, στοχεύει κυρίως:

- στην αύξηση του χρόνου τόξου
- στη σταθεροποίηση των παραμέτρων συγκόλλησης
- στη μείωση της μεταβλητότητας της ποιότητας
- στον περιορισμό της εξάρτησης από τον ανθρώπινο παράγοντα.

Σε αυτοματοποιημένες εφαρμογές, η συγκόλληση εκτελείται με σταθερή ταχύτητα και πορεία καθώς και ελεγχόμενη προθέρμανση, γεγονός που οδηγεί σε υψηλότερη αποδοτικότητα συγκόλλησης και μειωμένο ποσοστό επισκευών. Η αύξηση της παραγωγικότητας είναι ιδιαίτερα εμφανής σε έργα με μεγάλο αριθμό παρόμοιων συγκολλήσεων, όπως αγωγοί και εκτεταμένες σωληνώσεις.

Η ψηφιακή παρακολούθηση συγκολλήσεων βασίζεται στη συλλογή δεδομένων κατά τη διάρκεια της εκτέλεσης της εργασίας. Τα δεδομένα αυτά μπορεί να περιλαμβάνουν το χρόνο ενεργού τόξου, το ρεύμα τάση και την ταχύτητα της συγκόλλησης, τη διάρκεια των διακοπών εργασίας, τον αριθμό και το είδος των επανεργασιών.

Μέσω της ανάλυσης των δεδομένων αυτών είναι δυνατός ο υπολογισμός βασικών δεικτών παραγωγικότητας, όπως ο χρόνος τόξου και η αποδοτικότητα συγκόλλησης, με ακρίβεια μεγαλύτερη από οποιαδήποτε εμπειρική εκτίμηση. Η ψηφιακή καταγραφή επιτρέπει τη σύγκριση μεταξύ διαφορετικών συνεργείων, μεθόδων και περιβαλλόντων συγκόλλησης.

Ως επιστέγασμα των μεθόδων καταγραφής των δεικτών συγκόλλησης έχουν υιοθετηθεί οι δείκτες απόδοσης (KPI's) στις συγκολλήσεις. Η χρήση δεικτών απόδοσης (Key Performance Indicators – KPI's) αποτελεί βασικό εργαλείο για τη διαχείριση της παραγωγικότητας συγκολλήσεων. Ενδεικτικοί KPI's περιλαμβάνουν:

- ποσοστό ενεργού χρόνου τόξου επί του συνολικού χρόνου εργασίας,
- μέσο ρυθμό εναπόθεσης υλικού,
- ποσοστό επισκευών ανά μέθοδο ή συνεργείο,
- χρόνο αναμονής για ελέγχους.

Οι δείκτες αυτοί επιτρέπουν την έγκαιρη αναγνώριση αποκλίσεων από τους στόχους παραγωγικότητας και τη λήψη διορθωτικών μέτρων πριν οι αποκλίσεις μετατραπούν σε καθυστερήσεις ή υπερβάσεις κόστους. Η παρακολούθηση αυτή επιτυγχάνεται με ψηφιακό τρόπο όπου γίνεται καταγραφή όλων των δεδομένων ώστε να γίνει παρακολούθηση πέραν της παραγωγικότητας και η ποιοτική αξιολόγηση του συστήματος καταγράφοντας όλα τα αποτελέσματα των ελέγχων (VT, PT, RT).

Η συσχέτιση λοιπόν των δεδομένων συγκόλλησης οδηγεί:

- στον εντοπισμό επαναλαμβανόμενων προβλημάτων,
- στη συσχέτιση συγκεκριμένων παραμέτρων με ελαττώματα,
- στη βελτίωση των WPS βάσει πραγματικών δεδομένων.

Με τον τρόπο αυτό, η ποιότητα παύει να αξιολογείται μόνο εκ των υστέρων και ενσωματώνεται δυναμικά στη διαδικασία παραγωγής, μειώνοντας το κόστος αστοχίας.

Παρά τα πλεονεκτήματά της, η ψηφιακή παρακολούθηση συγκολλήσεων παρουσιάζει και προκλήσεις. Η συλλογή και ανάλυση δεδομένων απαιτεί αξιόπιστο εξοπλισμό και επιπροσθέτως κατάλληλη εκπαίδευση προσωπικού για τη σωστή ερμηνεία των αποτελεσμάτων. Επιπλέον, σε περιβάλλοντα πεδίου με περιορισμένη συνδεσιμότητα, η εφαρμογή ψηφιακών συστημάτων μπορεί να είναι πιο απαιτητική. Ωστόσο, οι τεχνολογικές εξελίξεις μειώνουν σταδιακά τα εμπόδια αυτά.

Βλέπουμε λοιπόν ότι η αυτοματοποίηση και η ψηφιακή παρακολούθηση μετασχηματίζουν τη συγκόλληση από εμπειρική διαδικασία σε μετρήσιμη και ελεγχόμενη διεργασία έργου. Η χρήση δεδομένων επιτρέπει τη βελτίωση της παραγωγικότητας, τη μείωση του κόστους ποιότητας και τον περιορισμό του ρίσκου, καθιστώντας τα ψηφιακά εργαλεία αναπόσπαστο μέρος της σύγχρονης διαχείρισης τεχνικών έργων. Επιπροσθέτως η ποσοτικοποίηση της παραγωγικότητας που παρουσιάστηκε στο παρόν κεφάλαιο αποτελεί το απαραίτητο υπόβαθρο για την ολοκληρωμένη αξιολόγηση του «Κόστους Ποιότητας» (CoQ) και του τεχνικού ρίσκου στις συγκολλήσεις τα οποία παρατίθενται στο επόμενο κεφάλαιο.

Ο Πίνακας 4.7.1 χρησιμοποιείται για να συνοψίσει τους δείκτες απόδοσης των συγκολλήσεων (KPI's).

Πίνακας 4.7.1: Ορισμός KPI's

KPI	Ορισμός	Μονάδα	Πώς προκύπτει στο έργο	Ένδειξη δείκτη
Arc Time (%)	Καθαρός χρόνος τόξου / συνολικός χρόνος συγκόλλησης	%	κατανομή χρόνου έργου	καθαρή παραγωγή
Welding Efficiency (%)	Παραγωγικός χρόνος / (παραγωγικός + μη παραγωγικός)	%	από διακοπές χρόνου	απόδοση οργάνωσης/ροής
Μη παραγωγικός χρόνος (%)	Μονταρίσματα, αναμονές, αλλαγές, μετακινήσεις, rework	%	Διακοπή του χρόνου	πηγές απώλειας
Επισκευές / Ρυθμός επαναληπτικών εργασιών (%)	Επισκευές / σύνολο συγκολλήσεων ανά κατηγορία	%	Καταγραφή των εγγράφων ποιότητας ή εκτίμηση	Δείκτης αποτυχίας (CoQ)
NDT Χρόνος κύκλου εργασιών	Συγκόλληση → ολοκλήρωση/αποδοχή NDT	ώρες/ημέρες	πρόγραμμα/αναφορές ελέγχων	Συσσωρεύσεις εργασιών / κρίσιμα σημεία ελέγχου
Ρυθμός απόθεσης υλικού	Kg μετάλλου/ώρα τόξου	kg/h	WPS/αναλώσιμα (όπου υπάρχουν στοιχεία)	τεχνική παραγωγικότητα
Ημερήσια παραγωγή ιντσών	Συγκολλήσεις / ημέρα	Ίντσες / ημέρα	Μέτρηση συγκολλήσεων από WIR (welding identification report)	Παραγωγή ημέρας



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΚΟΣΤΟΣ, ΠΟΙΟΤΗΤΑ, ΡΙΣΚΟ / ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΠΑΡΑΓΩΓΙΚΟΤΗΤΑ

Στο κεφάλαιο που θα ακολουθήσει θα γίνει ανάλυση του κόστους των συγκολλήσεων και του κόστους ποιότητας. Θα αναλυθούν επίσης οι κίνδυνοι που συναντάμε σε μία συγκόλληση και η κατηγοριοποίησή τους. Επιπροσθέτως θα αναφερθεί η συνδυαστική αξιολόγηση των μεθόδων συγκόλλησης ως προς το κόστος της, το κόστος της ποιότητας, τους κινδύνους την παραγωγικότητα με έναν συγκεντρωτικό πίνακα. Τέλος γίνεται σύνδεση της παραγωγικότητας με το κόστος και αναφέρεται η μέθοδος της ανάλυσης ευαισθησίας, ενώ στην τελευταία ενότητα αναλύεται το κόστος του κύκλου ζωής των συγκολλήσεων και οι συνέπειές του μακροπρόθεσμα στην κατασκευή.

5.1 Ανάλυση κόστους συγκολλήσεων

Η ανάλυση του κόστους των συγκολλήσεων διακρίνεται σε άμεσο και έμμεσο κόστος.

Το άμεσο κόστος περιλαμβάνει:

1. εργατοώρες συγκολλητών και βοηθητικού προσωπικού,
2. αναλώσιμα υλικά (ηλεκτρόδια, σύρματα, αέρια),
3. χρήση και απόσβεση εξοπλισμού,
4. κατανάλωση ενέργειας.

Το έμμεσο κόστος περιλαμβάνει:

1. καθυστερήσεις στο χρονοδιάγραμμα,
2. κόστος επιθεωρήσεων και ελέγχων,
3. επισκευές (repairs) και ολικές επισκευές (cut-out),
4. απώλειες παραγωγικότητας λόγω διακοπών εργασίας.



Η μεθοδολογία λαμβάνει υπόψη ότι το έμμεσο κόστος μπορεί σε πολλές περιπτώσεις να υπερβαίνει το άμεσο, ιδιαίτερα σε συγκολλήσεις πεδίου ή σε έργα με αυξημένες απαιτήσεις ποιότητας.

5.2 Ανάλυση κόστους ποιότητας (Cost of Quality – CoQ)

Η έννοια του κόστους ποιότητας χρησιμοποιείται για να αποτυπώσει το συνολικό κόστος που σχετίζεται με τη διασφάλιση και την επίτευξη της απαιτούμενης ποιότητας στις συγκολλήσεις. Το κόστος ποιότητας διακρίνεται σε:

- Κόστος πρόληψης, το οποίο περιλαμβάνει ενέργειες όπως η εκπαίδευση και πιστοποίηση συγκολλητών, η εφαρμογή εγκεκριμένων διαδικασιών συγκόλλησης (WPS) και η σωστή επιλογή εξοπλισμού.
- Κόστος ελέγχου, το οποίο περιλαμβάνει επιθεωρήσεις και μη καταστροφικούς ελέγχους (NDT).
- Κόστος αστοχίας, το οποίο προκύπτει όταν η ποιότητα δεν επιτυγχάνεται και περιλαμβάνει επισκευές, απορρίψεις συγκολλήσεων και καθυστερήσεις.

Η συνήθης πρακτική δείχνει ότι η αύξηση του κόστους της πρόληψης και του ελέγχου μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική μείωση του συνολικού κόστους, μέσω της μείωσης του κόστους αστοχίας.

5.3 Ανάλυση ρίσκου στις εργασίες συγκόλλησης

Οι εργασίες συγκόλλησης σε τεχνικά έργα ενέχουν σημαντικούς κινδύνους (ρίσκα), οι οποίοι μπορούν να επηρεάσουν το έργο. Συγκεκριμένα μπορούν να επηρεάσουν την ποιότητα και το χρονοδιάγραμμα και κατά συνέπεια το συνολικό κόστος

Η ανάλυση του ρίσκου αποσκοπεί στον εντοπισμό και την αξιολόγηση των κινδύνων. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να γίνει σωστά η διαχείρισή τους, οπότε θα μειωθεί η πιθανότητα εμφάνισής τους και θα περιοριστούν οι επιπτώσεις τους.

Το ρίσκο κατηγοριοποιείται σε:

1. Τεχνικό ρίσκο, που αφορά την πιθανότητα εμφάνισης ελαττωμάτων και αστοχιών, οι οποίες μπορεί να οδηγήσουν σε μειωμένη μηχανική αντοχή ή σε μη αποδεκτό τελικό αποτέλεσμα.

Τα τεχνικά ρίσκα των συγκολλήσεων σχετίζονται είτε με την επιλογή ακατάλληλης μεθόδου συγκόλλησης είτε με τις λανθασμένες παραμέτρους διαδικασίας είτε με την ποιότητα των αναλωσίμων είτε με την εμπειρία και την πιστοποίηση του συγκολλητή είτε με τις συνθήκες του περιβάλλοντος εκτέλεσης.

Η πιθανότητα εμφάνισης τεχνικού ρίσκου αυξάνεται ιδιαίτερα σε συγκολλήσεις πεδίου, όπου οι συνθήκες δεν είναι ελεγχόμενες. Οι επιπτώσεις του τεχνικού ρίσκου εκδηλώνονται κυρίως μέσω επανεργασιών, αυξημένων ελέγχων και σε ακραίες περιπτώσεις, αντικατάστασης κατασκευαστικών στοιχείων.

2. Χρονικό ρίσκο, που αφορά καθυστερήσεις στο χρονοδιάγραμμα.

Το χρονικό ρίσκο αφορά την πιθανότητα καθυστερήσεων στο χρονοδιάγραμμα του έργου λόγω προβλημάτων στις εργασίες συγκόλλησης. Οι καθυστερήσεις μπορεί να προκύψουν από χαμηλή παραγωγικότητα, από αυξημένο αριθμό επισκευών (repairs), από την αναμονή για ελέγχους και επιθεωρήσεις, από τις δυσμενείς καιρικές συνθήκες και τέλος από την ελλιπή οργάνωση των εργασιών.

Η εμπειρία δείχνει ότι οι καθυστερήσεις στις συγκολλήσεις συχνά έχουν αλυσιδωτές επιπτώσεις σε επόμενες δραστηριότητες του έργου, αυξάνοντας το συνολικό κόστος και μειώνοντας την αποδοτικότητα. Το χρονικό ρίσκο είναι στενά συνδεδεμένο με το τεχνικό ρίσκο, καθώς τα ελαττώματα συγκολλήσεων οδηγούν σχεδόν πάντοτε σε απώλεια χρόνου.

3. Οικονομικό ρίσκο, που αφορά υπέρβαση κόστους λόγω επισκευών (repairs) και καθυστερήσεων.

Το οικονομικό ρίσκο προκύπτει από την αβεβαιότητα που σχετίζεται με το τελικό κόστος των συγκολλήσεων. Αφορά τόσο το άμεσο κόστος (εργατοώρες, υλικά, εξοπλισμός) όσο και το έμμεσο κόστος (επισκευές, καθυστερήσεις, πρόσθετοι έλεγχοι).



Ιδιαίτερα σημαντικό στοιχείο του οικονομικού ρίσκου αποτελεί το κόστος αποτυχίας, δηλαδή το κόστος που προκύπτει όταν η απαιτούμενη ποιότητα δεν επιτυγχάνεται. Έχει παρατηρηθεί στα τεχνικά έργα ότι το κόστος αποτυχίας, εάν ξεφύγει, μπορεί να υπερβεί σημαντικά το αρχικό κόστος πρόληψης και ελέγχου, καθιστώντας το οικονομικό ρίσκο έναν από τους πιο κρίσιμους παράγοντες στη λήψη αποφάσεων.

Η συστηματική ανάλυση και η διαχείριση του ρίσκου επιτρέπει τη μείωση της αβεβαιότητας και επίσης συμβάλλει στη βελτίωση της συνολικής αποδοτικότητας των συγκολλήσεων σε τεχνικά έργα.

Ο Πίνακας 5.3.1 χρησιμοποιείται για να συνοψίσει την κατηγοριοποίηση του ρίσκου την πιθανότητα εμφάνισης, την επίπτωση στο έργο και μέτρα μετριασμού του.

Πίνακας 5.3.1 – Ενδεικτική ανάλυση ρίσκου εργασιών συγκόλλησης σε τεχνικά έργα

Κατηγορία ρίσκου	Περιγραφή ρίσκου	Πιθανότητα εμφάνισης	Επίπτωση στο έργο	Επίπεδο ρίσκου	Ενδεικτικά μέτρα μετριασμού
Τεχνικό	Εμφάνιση ελαττωμάτων συγκόλλησης	Χαμηλή (ατελιέ) - Υψηλή (εργοτάξιο)	Υψηλή	Υψηλό	Κατάλληλη επιλογή μεθόδου, WPS, εκπαίδευση συγκολλητών
Τεχνικό	Αστοχία λόγω ακατάλληλων παραμέτρων	Μέτρια	Υψηλή	Υψηλό	Έλεγχος παραμέτρων, επιτήρηση συγκόλλησης
Χρονικό	Καθυστερήσεις λόγω επανεργασιών	Μέτρια (ατελιέ) – Υψηλή (εργοτάξιο)	Μέτρια	Μέτριο – Υψηλό	Πρόληψη ελαττωμάτων, προγραμματισμός ελέγχων
Χρονικό	Διακοπές εργασιών λόγω καιρού	Υψηλή (εργοτάξιο)	Μέτρια	Μέτριο	Μεταφορά συγκολλήσεων σε εργαστήριο όπου είναι δυνατό
Οικονομικό	Αύξηση κόστους λόγω πρόσθετων ελέγχων	Μέτρια	Μέτρια	Μέτριο	Βελτιστοποίηση επιπέδου ελέγχων
Οικονομικό	Κόστος αποτυχίας (scrap, αντικατάσταση)	Χαμηλή– Μέτρια	Πολύ υψηλή	Υψηλό	Επένδυση σε πρόληψη και ποιοτικό έλεγχο

Από τον Πίνακα 5.1 προκύπτει ότι τα ρίσκα που σχετίζονται με τις συγκολλήσεις εμφανίζουν διαφορετικό επίπεδο σοβαρότητας, ανάλογα με το περιβάλλον εκτέλεσης. Ιδιαίτερα τα τεχνικά και χρονικά ρίσκα παρουσιάζουν υψηλή πιθανότητα εμφάνισης σε συγκολλήσεις πεδίου, με άμεσες επιπτώσεις στην ποιότητα και το κόστος του έργου. Η εφαρμογή μέτρων πρόληψης και μετριασμού του ρίσκου, όπως η επιλογή κατάλληλης μεθόδου συγκόλλησης και η ενίσχυση των διαδικασιών ποιοτικού ελέγχου, συμβάλλει ουσιαστικά στη βελτίωση της συνολικής αποδοτικότητας των συγκολλήσεων.

5.4 Συνδυαστική αξιολόγηση μεθόδων συγκόλλησης

Η επιλογή της καταλληλότερης μεθόδου συγκόλλησης σε ένα τεχνικό έργο δεν μπορεί να βασιστεί σε μεμονωμένα κριτήρια, όπως η ταχύτητα εκτέλεσης ή το αρχικό κόστος εξοπλισμού. Αντίθετα, απαιτείται συνδυαστική αξιολόγηση της παραγωγικότητας, του κόστους και της ποιότητας καθώς και του ρίσκου ώστε η τελική απόφαση να είναι τεχνικά και οικονομικά τεκμηριωμένη.

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, η συνδυαστική αξιολόγηση βασίζεται στις μετρικές παραγωγικότητας που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 4, στην ανάλυση κόστους και κόστους ποιότητας (CoQ), που αναφέρθηκαν, καθώς και στην ανάλυση ρίσκου των εργασιών συγκόλλησης. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει τη συγκριτική αξιολόγηση διαφορετικών μεθόδων συγκόλλησης υπό πραγματικές συνθήκες έργου.

Τα βασικά κριτήρια που λαμβάνονται υπόψη στη διαδικασία λήψης απόφασης είναι:

- Παραγωγικότητα, όπως εκφράζεται μέσω των δεικτών της (χρόνος τόξου, ρυθμός εναπόθεσης, αποδοτικότητα συγκόλλησης).
- Κόστος, συμπεριλαμβανομένου του άμεσου και έμμεσου κόστους.
- Ποιότητα, όπως επηρεάζεται από τον κίνδυνο ελαττωμάτων και επανεργασιών.
- Ρίσκο, τεχνικό, χρονικό, οικονομικό.

Η βαρύτητα κάθε κριτηρίου μπορεί να διαφοροποιείται ανάλογα με το είδος και τις απαιτήσεις του έργου, γεγονός που καθιστά τη διαδικασία αξιολόγησης ευέλικτη και προσαρμόσιμη.

Ο Πίνακας 5.4.1 χρησιμοποιείται για να συνοψίσει τα βασικά δεδομένα της ενότητας και να διευκολύνει τη σύγκριση των μεθόδων συγκόλλησης όσον αφορά το κόστος, την ποιότητα, το ρίσκο ώστε να έχουμε τη συνολική τους αξιολόγηση.

Πίνακας 5.4.1 – Ενδεικτικός πίνακας απόφασης επιλογής μεθόδου συγκόλλησης

Μέθοδος συγκόλλη σης	Παραγωγικότητα	Κόστος	Ποιότητα	Ρίσκο	Συνολική αξιολόγηση
SMAW	Χαμηλή	Χαμηλό	Μέτρια	Υψηλό (εργοτάξιο)	Μέτρια
GMAW (MIG/MA G)	Υψηλή	Μέτριο	Καλή	Μέτριο	Υψηλή
GTAW (TIG)	Χαμηλή	Υψηλό	Πολύ υψηλή	Χαμηλό	Εξειδικευμένη χρήση
Ημιαυτόμα τες μέθοδοι (FCAW)	Πολύ υψηλή	Υψηλό	Υψηλή	Χαμηλό	Πολύ υψηλή
Αυτόματες μέθοδοι	Πολύ υψηλή	Υψηλό*	Πολύ υψηλή	Πολύ χαμηλό	Άριστη*

* Σε έργα μεγάλης κλίμακας ή επαναλαμβανόμενης παραγωγής.

Από τον Πίνακα 5.2 προκύπτει ότι δεν υπάρχει μία καθολικά βέλτιστη μέθοδος συγκόλλησης για όλες τις εφαρμογές. Οι χειροκίνητες μέθοδοι, όπως η SMAW, μπορεί να είναι κατάλληλες σε μικρής κλίμακας ή δυσπρόσιτα έργα, αλλά παρουσιάζουν αυξημένο ρίσκο και περιορισμένη παραγωγικότητα. Αντίθετα, οι μέθοδοι συνεχούς τροφοδοσίας σύρματος και οι αυτοματοποιημένες διαδικασίες εμφανίζουν υψηλότερη συνολική αποδοτικότητα σε οργανωμένα έργα με επαναληψιμότητα.

Η συγκόλληση GTAW, αν και εμφανίζει χαμηλή παραγωγικότητα και υψηλό κόστος, παραμένει αναντικατάστατη σε εφαρμογές με αυξημένες απαιτήσεις ποιότητας, όπου το κόστος αποτυχίας είναι ιδιαίτερα υψηλό. Η τελική επιλογή της μεθόδου συγκόλλησης πρέπει να βασίζεται στη στάθμιση των κριτηρίων και στις ιδιαιτερότητες του εκάστοτε έργου.

5.5 Μαθηματική αποτύπωση παραγωγικότητας συγκολλήσεων σε σχέση με το κόστος.

Η ποσοτική αξιολόγηση της παραγωγικότητας στις συγκολλήσεις απαιτεί τη χρήση σαφώς ορισμένων μετρικών και μαθηματικών σχέσεων, οι οποίες επιτρέπουν την αντικειμενική σύγκριση διαφορετικών μεθόδων, περιβαλλόντων και οργανωτικών προσεγγίσεων. Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, η παραγωγικότητα προσεγγίζεται μέσω ενός συνόλου βασικών δεικτών, οι οποίοι αποτυπώνουν το πραγματικό παραγόμενο έργο σε σχέση με τον διαθέσιμο χρόνο και τους χρησιμοποιούμενους πόρους.

Η μαθηματική αποτύπωση δεν στοχεύει στη δημιουργία ενός αυστηρά θεωρητικού μοντέλου, αλλά στη διαμόρφωση ενός πρακτικού εργαλείου αξιολόγησης, ικανού να εφαρμοστεί σε πραγματικά τεχνικά έργα.

Για τη μαθηματική προσέγγιση της παραγωγικότητας υιοθετούνται οι ακόλουθες βασικές παραδοχές:

- Ο συνολικός χρόνος εργασίας διαχωρίζεται σε παραγωγικό χρόνο (ενεργή συγκόλληση) και μη παραγωγικό χρόνο (προετοιμασία, αναμονές, έλεγχοι, διακοπές).
- Η ποιότητα της συγκόλλησης επηρεάζει άμεσα την παραγωγικότητα μέσω του αριθμού των επανεργασιών.
- Οι μετρικές παραγωγικότητας εκφράζονται ως λόγοι ή ποσοστά, ώστε να είναι συγκρίσιμες ανεξαρτήτως μεγέθους έργου.

Οι επισκευές (repairs) επηρεάζουν άμεσα την παραγωγικότητα, καθώς αυξάνουν τόσο τον χρόνο ενεργού συγκόλλησης όσο και τον μη παραγωγικό χρόνο (επαναλαμβανόμενοι έλεγχοι, προετοιμασία).

Ο συνολικός χρόνος συγκόλλησης μπορεί να εκφραστεί με την εξίσωση (4) σύνολο αρχικού χρόνου συγκόλλησης και πρόσθετο χρόνο λόγω επανεργασιών.

Ήτοι:

εξίσωση (4):

$$t_total_welding = t_initial + t_repairs$$

όπου:

$$t_initial = \text{αρχικός χρόνος συγκόλλησης}$$

$$t_repairs = \text{πρόσθετος χρόνος λόγω επανεργασιών}$$

Αύξηση του ποσοστού repairs οδηγεί σε μείωση της συνολικής αποδοτικότητας και σε αύξηση του κόστους αστοχίας.

Η παραγωγικότητα συνδέεται άμεσα με το κόστος συγκολλήσεων, καθώς ο συνολικός χρόνος εργασίας επηρεάζει τις εργατοώρες, τη χρήση εξοπλισμού καθώς και το κόστος των ελέγχων όπως φαίνεται από την εξίσωση (5) που ακολουθεί.

Το συνολικό κόστος συγκόλλησης μπορεί να προσεγγιστεί ως:

εξίσωση (5):

$$C_total = C_labor + C_consumables + C_equipment + C_NDT + C_repairs + \\ + C_delays$$

Η μείωση της παραγωγικότητας οδηγεί σε αύξηση του $t_total_welding$ και του C_total , επιβαρύνοντας το συνολικό οικονομικό αποτέλεσμα του έργου.

Η μαθηματική αποτύπωση επιτρέπει τη σύγκριση διαφορετικών σεναρίων όπως το εργαστηριακό έναντι του εργοταξιακού περιβάλλοντος, οι χειροκίνητες έναντι των αυτοματοποιημένων μεθόδων, το υψηλό έναντι του χαμηλού ποσοστού επισκευών.

Η σύγκριση αυτή δείχνει ότι η αύξηση του χρόνου του τόξου και της αποδοτικότητας της συγκόλλησης έχει πολλαπλασιαστική επίδραση στη συνολική παραγωγικότητα και στο κόστος.



Παρά τη χρησιμότητά της, η μαθηματική αποτύπωση βασίζεται σε παραδοχές που ενδέχεται να διαφοροποιούνται σε πραγματικές συνθήκες έργου. Υπάρχουν αρκετοί παράγοντες οι οποίοι δεν μπορούν να αποτυπωθούν πλήρως μέσω εξισώσεων όμως μπορεί να είναι καθοριστικοί στην έκβαση του έργου όπως για παράδειγμα οι καιρικές συνθήκες ή η ανθρώπινη συμπεριφορά.

Η μαθηματική αποτύπωση της παραγωγικότητας συγκολλήσεων επιβεβαιώνει ότι μικρές μεταβολές στους βασικούς δείκτες μπορούν να οδηγήσουν σε σημαντικές διαφορές στο συνολικό αποτέλεσμα του έργου. Η προσέγγιση αυτή παρέχει ένα αξιόπιστο πλαίσιο σύγκρισης και λήψης αποφάσεων, ιδιαίτερα όταν συνδυάζεται με ανάλυση ρίσκου και εμπειρικά δεδομένα.

5.6 Μεθοδολογία ανάλυσης ευαισθησίας για το κόστος των συγκολλήσεων

Η ανάλυση ευαισθησίας αποτελεί ένα ακόμα βασικό εργαλείο στη μεθοδολογική αξιολόγηση τεχνικών έργων, καθώς επιτρέπει τη διερεύνηση της επίδρασης μεταβολών κρίσιμων παραμέτρων στο τελικό αποτέλεσμα. Στην περίπτωση των συγκολλήσεων, μικρές μεταβολές σε δείκτες παραγωγικότητας ή ποιότητας μπορούν να οδηγήσουν σε δυσανάλογες επιπτώσεις στο κόστος και στο χρονοδιάγραμμα του έργου. Από τη σκοπιά βιωσιμότητας, η ευαισθησία του συνολικού κόστους σε επισκευές και καθυστερήσεις αποτελεί ένδειξη της “σπατάλης” πόρων που μπορεί να αποφευχθεί μέσω στοχευμένων μέτρων πρόληψης.

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, η ανάλυση ευαισθησίας εφαρμόζεται για να αξιολογηθεί η επίδραση μεταβολών:

- στον χρόνο τόξου (Arc Time)
- στο ποσοστό επισκευών (repairs)
- στον χρόνο και τον τρόπο εκτέλεσης των ελέγχων
- στο επίπεδο αυτοματοποίησης της συγκόλλησης.

Η ανάλυση αυτή δεν αποσκοπεί στην ακριβή πρόβλεψη, αλλά στην κατανόηση της σχετικής βαρύτητας κάθε παραμέτρου.

Η ανάλυση βασίζεται στη μεταβολή μίας παραμέτρου κάθε φορά, ενώ οι υπόλοιπες διατηρούνται σταθερές σύμφωνα με την οικονομική μέθοδο ανάλυσης *ceteris paribus*. Με τον τρόπο αυτό, απομονώνεται η επίδραση της συγκεκριμένης παραμέτρου στην παραγωγικότητα και στο κόστος.

Οι μεταβολές εξετάζονται σε εύρη τιμών, τα οποία αντανakλούν ρεαλιστικές συνθήκες τεχνικών έργων, όπως αυτές προκύπτουν από τη βιβλιογραφία και την εμπειρία πραγματικών εφαρμογών.

Ο χρόνος τόξου αποτελεί μία από τις πιο κρίσιμες παραμέτρους παραγωγικότητας όπως έχει ήδη αναφερθεί σε αρκετές περιπτώσεις. Η ανάλυση ευαισθησίας εξετάζει την επίδραση μεταβολών του χρόνου του τόξου στο συνολικό χρόνο συγκολλήσεων και στο κόστος.

Σε σενάρια όπου ο χρόνος τόξου (Arc Time) μειώνεται λόγω των αυξημένων διακοπών εργασίας ή της κακής οργάνωσης συνεργειών, ή των δυσμενών συνθηκών εργοταξίου, παρατηρείται σημαντική αύξηση του συνολικού χρόνου εκτέλεσης. Αντίθετα, μικρή αύξηση του Arc Time μέσω καλύτερης οργάνωσης ή αυτοματοποίησης οδηγεί σε δυσανάλογη βελτίωση της παραγωγικότητας. Η ανάλυση καταδεικνύει ότι ο χρόνος τόξου έχει υψηλή ευαισθησία, γεγονός που τον καθιστά βασικό μοχλό βελτίωσης της απόδοσης των συγκολλήσεων.

Το ποσοστό των επανεργασιών αποτελεί κρίσιμη παράμετρο που επηρεάζει τόσο την παραγωγικότητα όσο και το κόστος ποιότητας. Η αύξηση των επισκευών (repairs) οδηγεί σε επανάληψη συγκολλήσεων, σε επαναλαμβανόμενους ελέγχους, σε πιθανές επαναληπτικές ανοπτήσεις, εάν απαιτούνται, ή ακόμα στη χειρότερη περίπτωση, κοπή και απόρριψη της αρχικής συγκόλλησης και επανασυγκόλληση τμήματος σωλήνας. Η ανάλυση ευαισθησίας δείχνει ότι ακόμη και μικρή αύξηση του ποσοστού επισκευών (repairs) μπορεί να προκαλέσει εκθετική αύξηση του συνολικού κόστους, ιδιαίτερα σε συγκολλήσεις πεδίου. Αντίθετα, η μείωση των επισκευών (repairs) μέσω πρόληψης και έγκαιρων ελέγχων έχει δυσανάλογα θετική επίδραση στο κόστος της ποιότητας (CoQ).

Η χρονική στιγμή εκτέλεσης των ελέγχων (VT, PT, RT) αποτελεί παράμετρο με υψηλή επίδραση στο συνολικό αποτέλεσμα. Σενάρια όπου ο οπτικός έλεγχος εκτελείται έγκαιρα και



ανεξάρτητα εμφανίζουν μειωμένο αριθμό καθυστερημένων επισκευών, καθώς και τον περιορισμό του κόστους αστοχίας.

Αντίθετα, η καθυστερημένη ανίχνευση ελαττωμάτων μέσω RT ή PT οδηγεί σε σημαντική αύξηση του χρόνου και του κόστους αποκατάστασης, ιδιαίτερα όταν οι συγκολλήσεις βρίσκονται ήδη σε προχωρημένο στάδιο. Συνεπώς οι έλεγχοι πρέπει να γίνονται στο χρόνο που έχει οριστεί από το αρχικό χρονοδιάγραμμα και να ακολουθείται η επισκευή, εφόσον βρέθηκε, χωρίς καθυστέρηση για να μην έχει ουσιαστικά επίπτωση στο χρόνο παράδοσης του έργου.

Η ανάλυση ευαισθησίας εξετάζει επίσης την επίδραση του επιπέδου αυτοματοποίησης στη συνολική απόδοση. Η μετάβαση από χειροκίνητες σε ημιαυτόματες ή αυτόματες διαδικασίες οδηγεί σε αύξηση του χρόνου του τόξου (Arc Time), σε σταθεροποίηση της ποιότητας καθώς και σε μείωση των επισκευών (repairs). Ωστόσο, η επίδραση της αυτοματοποίησης εξαρτάται από την κλίμακα του έργου και το περιβάλλον εφαρμογής. Σε μικρής κλίμακας ή έντονα μεταβαλλόμενα περιβάλλοντα, τα οφέλη μπορεί να είναι περιορισμένα, γεγονός που αναδεικνύει την ανάγκη στοχευμένης εφαρμογής.

Στην πράξη, οι παράμετροι παραγωγικότητας και ποιότητας δεν μεταβάλλονται ανεξάρτητα. Η ανάλυση καταδεικνύει ότι:

- χαμηλός χρόνος τόξου (Arc Time) σε συνδυασμό με υψηλό ποσοστό επισκευών (repairs) οδηγεί σε σημαντική επιδείνωση του αποτελέσματος,
- η βελτίωση ενός μόνο παράγοντα δεν επαρκεί εάν οι υπόλοιποι παραμένουν ανεξέλεγκτοι.

Η συνδυαστική προσέγγιση ενισχύει τη σημασία της ολιστικής διαχείρισης των συγκολλήσεων.

Η ανάλυση ευαισθησίας καταδεικνύει ότι οι συγκολλήσεις παρουσιάζουν υψηλή ευαισθησία σε παραμέτρους που σχετίζονται με την ποιότητα και την οργάνωση και όχι αποκλειστικά με τον εξοπλισμό. Η επένδυση σε πρόληψη, οργάνωση, έγκαιρους ελέγχους, εμφανίζεται ως η πλέον αποδοτική στρατηγική για τη βελτίωση της παραγωγικότητας και τη μείωση του συνολικού κόστους.

5.7 Ανάλυση κόστους του κύκλου ζωής των συγκολλήσεων (Life Cycle Cost – LCC)

Η ανάλυση κόστους κύκλου ζωής (Life Cycle Cost – LCC) αποτελεί μία ολοκληρωμένη προσέγγιση αξιολόγησης των συγκολλήσεων, η οποία υπερβαίνει τη στενή θεώρηση του κόστους κατασκευής και εξετάζει το συνολικό οικονομικό αποτύπωμα καθ' όλη τη διάρκεια ζωής μιας εγκατάστασης ή κατασκευής. Στα τεχνικά έργα υψηλής κρισιμότητας, όπως βιομηχανικές εγκαταστάσεις και αγωγοί, η προσέγγιση LCC είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς μικρές αποκλίσεις στην ποιότητα των συγκολλήσεων μπορούν να οδηγήσουν σε δυσανάλογες επιπτώσεις στο λειτουργικό κόστος και στη διαθεσιμότητα του συστήματος όπως μας κατέδειξε ήδη η ανάλυση ευαισθησίας στην προηγούμενη παράγραφο.

Η εφαρμογή της ανάλυσης LCC στις συγκολλήσεις επιτρέπει τη μετάβαση από βραχυπρόθεσμες αποφάσεις κόστους σε στρατηγικές αποφάσεις μακροπρόθεσμης αξίας, λαμβάνοντας υπόψη όχι μόνο την κατασκευή, αλλά και τη λειτουργία και τη συντήρηση και τον κίνδυνο αστοχίας.

Η ενσωμάτωση του κόστους της ποιότητας (CoQ) και του ρίσκου στη μεθοδολογία συνάδει με τη λογική βιώσιμης ανάπτυξης και ανθεκτικών υποδομών. Ήτοι η μετατόπιση πόρων προς πρόληψη και έγκαιρο έλεγχο ενώ μειώνει το κόστος αστοχίας καθώς περιορίζει τις επανεργασίες παράλληλα μειώνει και το περιβαλλοντικό αποτύπωμα της κατασκευής. Επιπροσθέτως, μειώνει την πιθανότητα απρογραμμάτιστων βλαβών και διακοπών λειτουργίας, ενισχύοντας την ανθεκτικότητα της εγκατάστασης κατά τη διάρκεια ζωής της.

Η ανάλυση κόστους κύκλου ζωής εξετάζει το συνολικό κόστος που σχετίζεται με ένα στοιχείο ή μια διαδικασία από τη φάση του σχεδιασμού έως την απόσυρση. Στην περίπτωση των συγκολλήσεων, τα βασικά στάδια περιλαμβάνουν εκτός από το κόστος σχεδιασμού και επιλογής μεθόδου συγκόλλησης, το κόστος της κατασκευής, το κόστος της επιθεώρησης και του ελέγχου κατά τη λειτουργία, το κόστος της συντήρησης και της αποκατάστασης, το κόστος αστοχίας και της διακοπής λειτουργίας της εγκατάστασης, το κόστος αποξήλωσης ή αντικατάστασης.

Η συνολική θεώρηση αυτών των σταδίων επιτρέπει την αξιολόγηση της πραγματικής οικονομικής επίπτωσης των επιλογών που γίνονται στη φάση της κατασκευής.

Το κόστος κατασκευής περιλαμβάνει το άμεσο κόστος από τις εργατοώρες, των αναλωσίμων, του εξοπλισμού μέχρι τους ελέγχους κατά την κατασκευή. Παραδοσιακά, το κόστος αυτό αποτελεί το κύριο κριτήριο επιλογής μεθόδου συγκόλλησης. Ωστόσο, η ανάλυση LCC δείχνει ότι το χαμηλότερο κόστος κατασκευής δεν συνεπάγεται απαραίτητα με το χαμηλότερο συνολικό κόστος του κύκλου ζωής. Μέθοδοι συγκόλλησης με χαμηλό αρχικό κόστος αλλά αυξημένο ποσοστό ελαττωμάτων οδηγούν σε υψηλότερα κόστη στα επόμενα στάδια του κύκλου ζωής.

Κατά τη φάση λειτουργίας, οι συγκολλήσεις υπόκεινται σε περιοδικούς ελέγχους και επιθεωρήσεις, ιδιαίτερα σε εγκαταστάσεις υψηλής κρισιμότητας. Το κόστος αυτό περιλαμβάνει τους περιοδικούς μη καταστροφικούς ελέγχους, τις επιθεωρήσεις βάσει κανονισμών και επίσης τις προληπτικές εργασίες συντήρησης.

Η ποιότητα της αρχικής συγκόλλησης επηρεάζει άμεσα τη συχνότητα και την έκταση των απαιτούμενων ελέγχων. Για παράδειγμα συγκολλήσεις υψηλής ποιότητας παρουσιάζουν μειωμένη ανάγκη για επεμβάσεις, περιορίζοντας το λειτουργικό κόστος. Το κόστος αστοχίας αποτελεί έναν από τους πιο κρίσιμους παράγοντες της ανάλυσης LCC και περιλαμβάνει:

- το κόστος επισκευής ή αντικατάστασης συγκόλλησης,
- το κόστος απώλειας παραγωγής,
- το κόστος διακοπής λειτουργίας,
- τις έμμεσες οικονομικές και περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

Σε βιομηχανικά έργα και αγωγούς, μία αστοχία συγκόλλησης μπορεί να έχει ιδιαίτερα υψηλό οικονομικό αντίκτυπο, καθιστώντας το κόστος αυτό συχνά μεγαλύτερο από το αρχικό κόστος κατασκευής.

Η ανάλυση LCC συνδέεται άμεσα με την έννοια του κόστους ποιότητας. Τελικά το κόστος πρόληψης και ελέγχου που καταβάλλεται κατά τη φάση κατασκευής μπορεί να μειώσει σημαντικά το κόστος αστοχίας κατά τη φάση λειτουργίας.

Η εμπειρία από πραγματικά έργα δείχνει ότι η επένδυση σε αυστηρή τήρηση WPS, ανεξάρτητο και έγκαιρο VT, κατάλληλη επιλογή μεθόδου συγκόλλησης, οδηγεί σε

χαμηλότερο συνολικό κόστος κύκλου ζωής, ακόμη και αν αυξάνει το αρχικό κόστος της κατασκευής.

Το ρίσκο αποτελεί αναπόσπαστο στοιχείο της ανάλυσης κόστους κύκλου ζωής. Η πιθανότητα και η σοβαρότητα μίας αστοχίας συγκόλλησης επηρεάζουν άμεσα την αναμενόμενη τιμή του συνολικού κόστους.

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, η ενσωμάτωση του ρίσκου στην ανάλυση LCC επιτρέπει τη σύγκριση των εναλλακτικών μεθόδων συγκόλλησης, την αξιολόγηση διαφορετικών επιπέδων ελέγχου καθώς επίσης και τη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων με βάση τον συνολικό οικονομικό αντίκτυπο.

Η ανάλυση LCC αναδεικνύει ότι:

- χειροκίνητες μέθοδοι με υψηλό ποσοστό repairs εμφανίζουν αυξημένο κόστος κύκλου ζωής,
- ημιαυτόματες και αυτόματες μέθοδοι, με υψηλότερο αρχικό κόστος, παρουσιάζουν συχνά χαμηλότερο συνολικό κόστος λόγω μειωμένων αστοχιών,
- η χρήση υψηλής ποιότητας μεθόδων στη ρίζα συγκολλήσεων μειώνει το ρίσκο μακροπρόθεσμων προβλημάτων.

Η συγκριτική αυτή θεώρηση είναι ιδιαίτερα χρήσιμη σε έργα μεγάλης διάρκειας ζωής, όπου το λειτουργικό κόστος υπερβαίνει το κόστος κατασκευής.

Παρά τα πλεονεκτήματά της, η ανάλυση LCC βασίζεται σε παραδοχές και εκτιμήσεις που ενδέχεται να διαφοροποιούνται στην πράξη. Ωστόσο, ακόμη και με τις αβεβαιότητες αυτές, η ανάλυση LCC παρέχει ένα πολύτιμο πλαίσιο σύγκρισης και λήψης αποφάσεων, ιδίως όταν συνδυάζεται με ανάλυση ευαισθησίας και ρίσκου.



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ ΣΕ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΑ ΕΡΓΑ

Στο κεφάλαιο που ακολουθεί θα αναφερθούν και θα αναλυθούν τα έργα που θα χρησιμοποιηθούν στην εργασία. Στην ανάλυση των έργων θα γίνει μέτρηση της παραγωγικότητας με τους δείκτες παραγωγικότητας και επίσης θα εξεταστεί η κατανομή των επισκευών των συγκολλήσεων καθώς και η σχέση τους με το κόστος ποιότητας. Πλέον θα γίνει συγκριτικός πίνακας των μεθόδων συγκόλλησης ανά τύπο σύνδεσης και συγκριτική απεικόνιση δεικτών κόστους ποιότητας για τα 3 έργα, ενώ στην τελευταία ενότητα θα γίνει η κατηγοριοποίηση των κινδύνων και ανάλυση ρίσκου για κάθε έργο.

6.1 Περιγραφή του Α έργου. Ανάλυση – παραγωγικότητας – ποιότητας - κόστους

Το παρόν κεφάλαιο παρουσιάζει την εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας σε πραγματικά βιομηχανικά έργα, στα οποία οι εργασίες της συγκόλλησης αποτελούσαν κρίσιμο κομμάτι της κατασκευής. Για λόγους εμπιστευτικότητας, τα έργα παρουσιάζονται όσο το δυνατόν σε ανώνυμη μορφή, διατηρώντας ωστόσο τα βασικά τεχνικά και οργανωτικά στοιχεία τους.

Το έργο Α (βιομηχανικό έργο) αφορά ένα διϋλιστηριακό έργο κατασκευής νέας μονάδας παραγωγής πετρελαϊκού παράγωγου. Το έργο περιλαμβάνει την κατασκευή τμημάτων σωληνώσεων οι οποίες λαμβάνουν χώρα είτε σε στεγασμένο χώρο του εργολάβου (ατελιέ) είτε στο σημείο της τελικής ανέγερσης δηλαδή στο πεδίο (εργοτάξιο). Οι συγκολλήσεις είναι ως επί τω πλείστον μετωπικές (butt welds) ενώ έχουμε και συγκολλήσεις μικρής διαμέτρου τύπου socket (small bore - socket welds). Επίσης έχουμε συγκολλήσεις σε στηρίγματα με σωληνώσεις και με δομικά υλικά. Οι εφαρμοζόμενες μέθοδοι συγκόλλησης των σωληνώσεων είναι οι εξής:

- αργκόν (GTAW) στη ρίζα και ηλεκτρόδιο (SMAW) στα γεμίσματα, συνήθως αφορά πάχος σωλήνας $>8\text{mm}$
- αργκόν (GTAW) σε όλο το πάχος της συγκόλλησης, αφορά μικρά πάχη μετωπικών συγκολλήσεων (butt welds) $< 8\text{mm}$
- μόνο ηλεκτρόδιο σε μικρές διαμέτρους (socket welds)
- μόνο αργκόν σε μικρές διαμέτρους (socket welds).

Τα στηρίγματα συνήθως συγκολλούνται με ηλεκτρόδιο σαν πιο οικονομική και ευέλικτη μέθοδο στο πεδίο, σε σχέση με το αργκόν ή τις ημιαυτόματες. Βέβαια σε ατελιέ δύναται να χρησιμοποιηθεί η μέθοδος GMAW όταν έχουμε κάθετη παραγωγή κατασκευής τους. Επίσης οι έλεγχοι στα στηρίγματα είναι συνήθως επιφανειακοί, ήτοι διεισδυτικά ή μαγνητικά σε πιο σπάνιες περιπτώσεις με ποσοστό 5-10%. Σε αυτές τις περιπτώσεις με έναν επαρκή οπτικό έλεγχο μπορεί να εξοικονομηθεί χρόνος με συνέπεια κόστος του έργου εφόσον μπορούν να εξαλειφθούν εύκολα ελαττώματα όπως πιτσιλίσματα-υποκοπές-επιφανειακοί πόροι-ελλιπές γέμισμα-πάστες.

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή είναι:

1. χάλυβας (Carbon Steel τύπου A106, A333)
2. χρωμιούχα κράματα σιδήρου (alloy steel P11, P5)
3. ανοξείδωτος χάλυβας (stainless steel SS316, SS304) .

Τα ποσοστά των μη καταστροφικών ελέγχων που απαιτούνται για το έργο καθορίζονται με βάση το υλικό, τις συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας και την κατηγοριοποίηση των γραμμών κατά τη φάση του σχεδιασμού, σύμφωνα με τις απαιτήσεις του PED, του ASME και των σχετικών EN/ISO προτύπων.

Επιπροσθέτως λαμβάνονται υπόψη και οι κλάσεις των γραμμών που χρησιμοποιεί ο πελάτης του εκάστοτε έργου (owner)

Έτσι έχουμε τα ποσοστά μη καταστροφικών ελέγχων για τον χάλυβα:

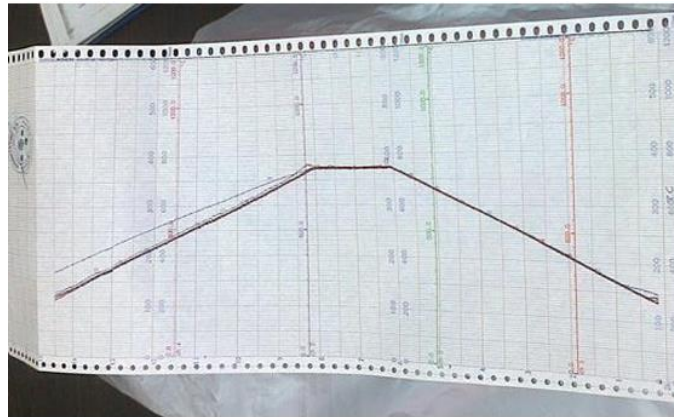
- Ποσοστό 100%, σε γραμμές που μεταφέρουν επικίνδυνο υλικό σε μεγάλη πίεση και θερμοκρασία, κατηγορίας III

- Ποσοστό 20%, σε γραμμές που μεταφέρουν λιγότερο επικίνδυνο υλικό σε μικρότερες πιέσεις και θερμοκρασίες, κατηγορίας II
- Ποσοστό 5% στις κατηγορίες I και sep.

Οι χρωμιούχοι χάλυβες, μετά τις συγκολλήσεις τους, λόγω τοπικής σκλήρυνσης του μετάλλου στο σημείο των συγκολλήσεων, εξαιτίας του χρωμίου, έχουν μεγάλη πιθανότητα ρηγμάτων στην επικείμενη περιοχή. Για το λόγο αυτό γίνεται θερμική κατεργασία που λέγεται αποτατική ανόπτηση (PWH), η οποία ουσιαστικά καθιστά την συγκολληθείσα περιοχή περισσότερο όλκιμη και λιγότερο σκληρή ώστε να εξαλειφθεί ο κίνδυνος της ρηγμάτωσής της. Οι έλεγχοι, ραδιογραφίες ή διεισδυτικά υγρά απαιτούνται πριν και μετά την ανόπτηση της συγκόλλησης ώστε να διαπιστωθεί η τελική ακεραιότητα της.

Η αποτατική ανόπτηση είναι μία θερμική διεργασία η οποία γίνεται με αντιστάσεις και καταγραφικά. Η διαδικασία απαιτεί την άνοδο της θερμοκρασίας με συγκεκριμένο ρυθμό, ο οποίος ορίζεται από τα πρότυπα ανάλογα με το κράμα, μέχρι μία θερμοκρασία (620-650 °C για C.S και 700-750 °C για alloy. Ακολουθεί πτώση της θερμοκρασίας επίσης με προκαθορισμένο ρυθμό. Η όλη διαδικασία καταγράφεται σε καταγραφικό θερμοκρασίας-χρόνου και ελέγχεται από τους επιθεωρητές η τήρηση της. Η ανόπτηση έχει πετύχει όταν κατά τη μέτρηση της σκληρομέτρησης, αμέσως μετά το τέλος του προγράμματος, η σκληρότητα του υλικού βρίσκεται εντός των ορίων που θέτουν οι προδιαγραφές του υλικού σε συνεργασία με τον κώδικα του έργου.

Το διάγραμμα που πρέπει να σχηματιστεί είναι της μορφής που φαίνεται στην εικόνα που ακολουθεί.



Εικόνα 6.1.1: Διάγραμμα ανόπτησης



Εικόνα 6.1.2: Μηχανή ανόπτησης



Εικόνα 6.1.3: Σωληνώσεις όπου γίνεται ανόπτηση



Εικόνα 6.1.4: Σωληνώσεις μετά την ανόπτηση

Οι εικόνες 6.1.1 / 6.1.2 / 6.1.3 / 6.1.4 χρησιμοποιούνται ως οπτική τεκμηρίωση της περιγραφόμενης διαδικασίας. Επιπλέον ελέγχουμε τις συγκολλήσεις είτε με ραδιογραφίες στις μετωπικές συγκολλήσεις πριν και μετά την ανόπτηση σε ποσοστό 100% - και στις μικρές διαμέτρους εφαρμόζεται έλεγχος με διεισδυτικά υγρά σε ποσοστό 100% επίσης πριν και μετά την ανόπτηση. Τέλος ελέγχουμε το υλικό πλήρωσης κάνοντας PMI - ήτοι positive material identification,- δηλαδή αναγνώριση της ταυτότητας του υλικού πλήρωσης σε ποσοστό 100%, πριν την ανόπτηση ιδανικά, ώστε εάν βρεθεί κάποιο λάθος υλικό, να μην επαναληφθεί η θερμική διεργασία της ανόπτησης. Σημειωτέων ότι η ανόπτηση δεν μπορεί να επαναληφθεί πάνω από δύο φορές έχοντας γίνει έλεγχος στην σκληρότητα του μετάλλου, η οποία επιτρέπεται να βρίσκεται μεταξύ όριων (ελάχιστο – μέγιστο) όπως ήδη έχουμε αναφέρει.

Για τους ανοξείδωτους χάλυβες ακολουθείται ο κανόνας του χάλυβα, δηλαδή το υλικό που περνάει από τους αγωγούς καθορίζει τους ελέγχους των συγκολλήσεων. Εδώ δεν απαιτείται ανόπτηση. Απαιτούνται όμως έλεγχοι οι οποίοι αφορούν τον μαγνητισμό της συγκόλλησης και επίσης την αντοχή της σε διάβρωση και την αποφυγή ρηγματώσεων (cracking). Ο έλεγχος αυτός γίνεται μετρώντας το ποσοστό του φερρίτη στη συγκόλληση. Τέλος λόγω του υλικού κατασκευής, του ανοξείδωτου χάλυβα δηλαδή, γίνεται και έλεγχος PMI που αναφέρθηκε λίγο πριν ώστε να διαπιστωθεί η ορθότητα του υλικού πλήρωσης σε ποσοστό 100%. Ακολουθεί η εικόνα 6.1.5 όπου απεικονίζεται μία συσκευή ελέγχου των υλικών κατασκευής (PMI) για ανοξείδωτους χάλυβες.



Εικόνα 6.1.5: Ενδείξεις οργάνου PMI μετρήσεων ανοξειδώτου χάλυβα τύπου 316

Ο χρόνος υλοποίησης του έργου είναι 10 μήνες. Στο έργο υπήρχε επίβλεψη από την εταιρεία που είχε κάνει και τη μελέτη και η οποία είχε την ευθύνη της παρακολούθησης της ανέγερσης, με μηχανικούς, οι οποίοι ουσιαστικά επέβλεπαν την ορθότητα των εργασιών με βάση τις προδιαγραφές. Στο έργο υπήρχε και <Third party> δηλαδή τρίτο γραφείο, το οποίο είχε την τελική ευθύνη του έργου ώστε το έργο να ολοκληρωθεί σωστά, με βάση τους κανονισμούς. Οι επιθεωρητές του κυρίως εργολάβου, έπρεπε να ελέγχουν 100% όλες τις γραμμές. Οι επιθεωρητές του τρίτου γραφείου σε συνεργασία με τους επιθεωρητές του κυρίως εργολάβου και μελετητή, έλεγχαν ποσοστιαία τμήματα του έργου ανάλογα με την κατηγοριοποίηση των προδιαγραφών. Έτσι για την κατηγορία III υπήρχε πολύ αυστηρός έλεγχος 100% των γραμμών στα NDT's και παρακολούθηση της υδραυλικής δοκιμής 100%, στην κατηγορία II 20% των γραμμών (NDT's-Y/Δ) αντίστοιχα, στις κατηγορίες I και sep 5%. Ο εξοπλισμός ήταν προμήθεια της επίβλεψης και οι σωληνώσεις του Κυρίου του έργου (owner) και παρατηρήθηκαν καθυστερήσεις στις παραλαβές των υλικών. Έτσι η συνολική παραγωγικότητα του έργου αξιολογήθηκε ως μέτρια, γεγονός που αποδόθηκε σε συνδυασμό παραγόντων.

Οι κύριες πηγές απώλειας παραγωγικού χρόνου ήταν τα προβλήματα fit-up και ευθυγράμμισης, οι αναμονές ελέγχων που δημιουργήθηκαν, οι αναμονές για την παραλαβή των υλικών. Επίσης οι συχνές αλλαγές ηλεκτροδίων κατά τις συγκολλήσεις SMAW, γεγονός που αφορά τη μέθοδο γενικότερα, οι επισκευές των συγκολλήσεων και οι απαιτήσεις για



ανοπτήσεις (PWHT) ανήκουν στους λόγους καθυστέρησης του έργου. Τέλος ένας σημαντικός παράγοντας καθυστέρησης ήταν η διαμόρφωση του ίδιου του πεδίου, η πρόσβαση, ο χώρος, η οργάνωση.

Οι παράγοντες αυτοί επηρέασαν αρνητικά:

- το ρυθμό απόθεσης υλικού
- τον χρόνο τόξου (Arc Time)
- τη συνολική αποδοτικότητα συγκόλλησης (Welding Efficiency), ιδιαίτερα στις συγκολλήσεις πεδίου
- έγιναν η αιτία δημιουργίας επισκευών στις συγκολλήσεις.

Εκτός από τις παραπάνω αιτίες της δημιουργίας των επισκευών στις συγκολλήσεις, μία επιπλέον αιτία ήταν η πίεση του χρόνου που ασκήθηκε, γεγονός που πρέπει να αναφερθεί. Οι επισκευές οι οποίες είχαν ουσιαστική επίδραση και στην παραγωγικότητα αλλά και στο κόστος ποιότητας εμφανίστηκαν:

- Στη ρίζα (GTAW):
Οι επισκευές στη ρίζα ήταν σχετικά λίγες, επιβεβαιώνοντας τη σταθερή ποιότητα της μεθόδου.
- Στα γεμίσματα (SMAW):
Εμφανίστηκε ο μεγαλύτερος αριθμός επισκευών, κυρίως λόγω κακής συγκόλλησης, κακή διαμόρφωση στο εργοτάξιο, μέτριοι συγκολλητές.
- Στις συγκολλήσεις πεδίου (field welds), λόγω αύξησης του αρχικού πλήθους από την καθυστέρηση των υλικών.
- Στα socket welds ($\leq 1,5''$):
Καταγράφηκαν αρκετά repairs, τα οποία αποδόθηκαν κυρίως σε μη τήρηση της προδιαγραφής. Ειδικότερα αποδόθηκαν στην εκτέλεση συγκολλήσεων χωρίς τον ελάχιστο απαιτούμενο αριθμό πάσων συγκόλλησης (η απαίτηση είναι τουλάχιστον δύο πάσα).

Στο έργο εφαρμόστηκε πλήρες πρόγραμμα ποιοτικών ελέγχων, σύμφωνα με τις προδιαγραφές:

- VT 100% σε όλες τις συγκολλήσεις,
- PT / RT 5% , 20%, 100% ανάλογα με την κλάση της γραμμής,
- PT ή RT 100% σε συγκολλήσεις που απαιτούσαν ανοπτήσεις (PWHT)
- Σκληρομετρήσεις 100%
- Φερρίτες 100% στα ανοξείδωτα
- PMI 100% στα alloy και στα ανοξείδωτα

Ωστόσο, στην πράξη διαπιστώθηκε ότι ο οπτικός έλεγχος (VT) δεν εκτελούνταν πάντοτε σωστά ή έγκαιρα. Ως αποτέλεσμα πολλά ελαττώματα δεν εντοπίζονταν στο αρχικό στάδιο, αλλά ανακαλύπτονταν αργότερα μέσω PT, συχνά όταν οι συγκολλήσεις βρίσκονταν ήδη στο εργοτάξιο. Ειδικά στα socket welds λόγω της ελλιπούς επίβλεψης τα σφάλματα βρέθηκαν την ώρα της δοκιμής, είτε της υδραυλικής είτε του service test. Η καθυστερημένη ανίχνευση των ελαττωμάτων οδήγησε σε αυξημένο κόστος αστοχίας (Cost of Failure), επηρεάζοντας το χρονοδιάγραμμα και το συνολικό κόστος του έργου.

Η εφαρμογή της ανάλυσης ρίσκου ανέδειξε ότι:

- το τεχνικό ρίσκο ήταν αυξημένο στις συγκολλήσεις πεδίου και στα γεμίσματα SMAW
- το χρονικό ρίσκο ενισχύθηκε από τις καθυστερήσεις λόγω των επισκευών (repairs), των ελέγχων, της καθυστέρησης των υλικών
- το οικονομικό ρίσκο συνδέθηκε άμεσα με το αυξημένο κόστος επανεργασιών ανοπτήσεων, αύξησης του αριθμού των field welds

Η απουσία έγκαιρου και συνεχούς VT ενίσχυσε σημαντικά και τις τρεις κατηγορίες ρίσκου.

Από την ανάλυση του πραγματικού έργου προκύπτουν τα ακόλουθα κρίσιμα συμπεράσματα:

- Η εφαρμογή ανεξάρτητου και υποχρεωτικού VT πριν από PT ή RT αποτελεί καθοριστικό μέτρο πρόληψης και μείωσης του κόστους αστοχίας καθώς και επιβεβαίωση της ποιότητας όντας τηρουμένων των διαδικασιών.
- Το VT πρέπει να εφαρμόζεται σε όλη την κατασκευή ακόμα και σε αυτά που θεωρούνται μικρότερης σημασίας όπως τα socket welds, τα οποία μπορεί να αποβούν τελικά, καταλυτικά στην εξέλιξη και το κόστος του έργου.

- Η μέγιστη δυνατή προκατασκευή σε ατελιέ συμβάλλει ουσιαστικά στη μείωση των συγκολλήσεων πεδίου, περιορίζοντας το τεχνικό και χρονικό ρίσκο.
- Η έγκαιρη επένδυση σε πρόληψη και ποιοτικό έλεγχο αποδεικνύεται οικονομικά αποδοτικότερη από τη διαχείριση των συνεπειών των αστοχιών.
- Η οργάνωση του έργου ξεκινάει πολύ πριν την έναρξή του, με καθρέφτη τα υλικά τα οποία πρέπει να βρίσκονται όλα στο έργο πριν την έναρξη των εργασιών

Ο Πίνακας 6.1.1 χρησιμοποιείται για να δείξει την επιρροή του περιβάλλοντος στην παραγωγικότητα ανά μέθοδο συγκόλλησης.

Πίνακας 6.1.1 – Μετρικές παραγωγικότητας συγκολλήσεων Α' έργου

Περιβάλλον / Μέθοδος	Χρόνος Τόξου (Arc Time) (%)	Αποδοτικότητα συγκόλλησης (Welding Efficiency) (%)	Τντσεσ ανά 8ωρο (KPI)	Παρατηρήσεις
Εργοτάξιο – SMAW (γεμίσματα)	15–25%	55–60%	1 συγκ/της 24’’ στο 8ωρο	Συχνές διακοπές, αλλαγές ηλεκτροδίων, επισκευές (repairs)
Εργοτάξιο – GTAW (ρίζα-γέμισμα)	20–30%	65–70%	1 συγκολλητής 12’’ στο πεδίο 8ωρο	Καλή ποιότητα, χαμηλή ταχύτητα
Ατελιέ – GTAW (ρίζα)	35–45%	75–80%	1 συγκ/της 50’’ στο 8ωρο (ρίζες)	Σταθερές συνθήκες, λιγότερες επισκευές (repairs)
Socket welds / στηρίγματα ή socket welds (ατελιέ)	45–55%	40–50%	1 συγκολλητής 5 στηρίγματα ή 20 συγκολλήσεις 1’’	Συχνές διακοπές, αλλαγές ηλεκτροδίων, τροχίσματα επισκευές (repairs)

Από τον Πίνακα 6.1.1 προκύπτει ότι το περιβάλλον εκτέλεσης επηρεάζει καθοριστικά τον χρόνο τόξου και τη συνολική αποδοτικότητα. Οι συγκολλήσεις στο ατελιέ εμφανίζουν αυξημένο χρόνο τόξου (Arc Time) και υψηλότερη αποδοτικότητα, γεγονός που μεταφράζεται σε μικρότερο συνολικό χρόνο εκτέλεσης των εργασιών.

Ο Πίνακας 6.1.2 χρησιμοποιείται για να συνοψίσει τις επισκευές ανά μέθοδο ώστε να τις κατηγοριοποιήσει.

Πίνακας 6.1.2 – Κατανομή επισκευών και κόστους ποιότητας

Τύπος συγκόλλησης	Ποσοστό επισκευών repairs (%)	Κύρια αιτία	Επίπτωση στο κόστος ποιότητας (CoQ)
Ρίζα GTAW	5–10%	Μοντάρισμα (Fit-up) / παραμέτρους	Χαμηλή–μέτρια
Γεμίσματα SMAW	20–30%	Κακή συγκόλληση, αστάθεια	Υψηλή
Socket welds ≤1,5”	65-75%	Μη τήρηση προδιαγραφής (≥2 πάσσα)	Πολύ υψηλή
Field welds	30 – 40%	Αύξηση του πλήθους λόγω καθυστέρησης άφιξης των υλικών συνεπώς οι συγκολλήσεις πραγματοποιήθηκαν στο εργοτάξιο αντί για το ατελιέ	Υψηλή

Η υψηλή συγκέντρωση επισκευών (repairs) στα γεμίσματα SMAW και στις συγκολλήσεις τύπου socket welds καθώς και στα field κολλήματα επηρέασε σημαντικά το κόστος αστοχίας.

Η καθυστερημένη ανίχνευση ελαττωμάτων μέσω PT/RT, λόγω ανεπαρκούς αρχικού VT, οδήγησε σε αυξημένες επισκευές (repairs) και επιβάρυνση του χρονοδιαγράμματος με χρονική και ποιοτική επίπτωση.

Ήτοι:

- Συνολική αύξηση χρόνου συγκολλήσεων λόγω επισκευών:
15 με 20%
- Επιπλέον επιβάρυνση από επαναληπτικές ανοπτήσεις (PWHT):
κρίσιμη σε συγκεκριμένες γραμμές
- Εκτίμηση κόστους ποιότητας (CoQ):
 - Πρόληψη & έλεγχος: ~5–8%
 - Κόστος αστοχίας (επισκευές, καθυστερήσεις): ~12–18%

Τα παραπάνω καταδεικνύουν ότι το *κόστος αστοχίας* υπερέβη σημαντικά το *κόστος πρόληψης*. Επίσης αξίζει να σημειωθεί ότι το περιβαλλοντικό αποτύπωμα το οποίο αυξάνει δυσανάλογα με το αρχικό κόστος ποιότητας και κατασκευής μεγαλώνει κατά πολύ. Το κόστος αστοχίας (repairs – cut-outs – rework) αντιστοιχεί σε πρόσθετη κατανάλωση υλικών και ενέργειας, αλλά και σε παραγωγή αποβλήτων (scrap, τροχίσματα, υπολείμματα αναλωσίμων). Κατά συνέπεια, η μείωση του κόστους ποιότητας (CoQ) μέσω πρόληψης και έγκαιρου ελέγχου λειτουργεί ταυτόχρονα ως μηχανισμός μείωσης σπατάλης πόρων και βελτίωσης της βιωσιμότητας του έργου.

Μία σοβαρή αστοχία η οποία έχει σαν κόστος την επανάληψη μίας συγκόλλησης πέραν του χρόνου, την ποιότητά της, (NDT's κ.λ.π), υπάρχει μεγάλη πιθανότητα εάν δεν βρεθεί και αποκατασταθεί στο χρόνο κατασκευής, να βρεθεί σε ένα χρονικό διάστημα πέραν αυτού όπου μπορεί να κινδυνεύσει και η ανθρώπινη ζωή αλλά και η εγκατάσταση λόγω ατυχήματος (φωτιά, ζημιά κ.λ.π). Το πόσο σοβαρό μπορεί να είναι αυτό που θα συμβεί διακυβεύει εκτός από την ακεραιότητα της επιχείρησης και την πιθανότητα τραυματισμού ανθρώπινου δυναμικού με σοβαρότατες επιπτώσεις για όλους, γεγονός που αποδεικνύεται με μία ανάλυση LCC του έργου.

Όταν λοιπόν ρισκάρουμε μια κατασκευή, για οικονομικούς λόγους και μειώνεται ο χρόνος της κατασκευής εις βάρος της ποιότητας, της ασφάλειας και του περιβάλλοντος, ο μηχανικός οφείλει να αντιλαμβάνεται το κόστος επίπτωσης πιθανής αστοχίας με ότι συνεπάγεται και να ενημερώνει την επιχείρηση θέτοντας το πρόβλημα στη σωστή του βάση.

Ο Πίνακας 6.1.3 χρησιμοποιείται για να συνοψίσει τους κινδύνους στο αναλυόμενο έργο.

Πίνακας 6.1.3 — Καταγραφή κινδύνων – Ενέργειες Μείωσης στο Έργο Α

Κίνδυνος	Επίπεδο	Μείωση
Επισκευές γεμισμάτων (SMAW)	Υψηλό	VT gate + fit-up hold + έλεγχος αναλωσίμων
Επισκευές sockets	Υψηλό	≥2 πάσσα + WPS οδηγία
NDT loops (late RT/PT)	Υψηλό	ομαδοποίηση RT/PT + ανεξάρτητος οπτικός έλεγχος πριν NDT
Tie-ins (access/fit-up)	Μέτριο	ορισμός του μονταρίσματος hold point + αλληλουχία εργασίας
Alloys / αυξημένες απαιτήσεις	Υψηλό	προγραμματισμός ανόπτησης / NDT, αυστηρά WPS, έλεγχοι νωρίς

Από τον πίνακα της καταγραφής των κινδύνων «κρατάμε» τη στήλη με τις ενέργειες που πρέπει να γίνουν ώστε να μειώσουμε τον κίνδυνο.

6.2 Περιγραφή του Β' έργου. Ανάλυση – παραγωγικότητας – ποιότητας – κόστους.

Το έργο Β (έργο αγωγού – TAP) είναι βιομηχανικό έργο επίσης, το οποίο αφορά την κατασκευή αγωγού μεγάλης διατομής (48"), ο οποίος μεταφέρει φυσικό αέριο από το Αζερμπαϊτζάν, στην Αλβανία και την Ιταλία μέσω της Ελλάδος. Η ολοκλήρωση του έργου περιλαμβάνει επίσης την κατασκευή βανοστασιών στην διαδρομή του. Στον κυρίως όγκο του έργου η διατομή του αγωγού είναι 48 ίντσες και μικρότερες διατομές στα βανοστάσια. Οι συγκολλήσεις είναι περιφερειακές με ρίζα (girth welds) και το υλικό της σωλήνας είναι χάλυβας υψηλής αντοχής που ακολουθείται από το πρότυπο en-iso-3183, με πάχος από 17 mm έως 34mm ανάλογα με το βάθος του χαντακιού.

Οι συγκολλήσεις του έργου γίνονται με τρεις τρόπους.

1. Ρομποτικά σε ευθείες και ομαλούς δρόμους
2. Υβριδικά συστήματα

3. Χειροκίνητες μεθόδους

Τα ρομποτικά είναι αυτοματοποιημένος τρόπος συγκόλλησης που εφαρμόστηκε στις ευθείες και στην ομαλή πορεία του αγωγού. Η συγκόλληση πραγματοποιείται από χειριστές των μηχανημάτων με τη μέθοδο GMAW (135) ρίζα και FCAW (136) hot pass / filling.

Τα υβριδικά συστήματα είναι συνδυαστικοί τρόποι συγκόλλησης, όπου χρησιμοποιείται συγκολλητής για τη ρίζα και χειριστής για hot pass/filling. Η μέθοδος είναι επίσης GMAW (135) και FCAW (136) και εφαρμόζεται στο μεγαλύτερο μέρος του έργου.

Τέλος έχουμε την χειροκίνητη μέθοδο η οποία εφαρμόζεται:

1. στα tie-in,
2. σε εξαιρετικά δύσκολες περιοχές όπου δεν μπορεί να προσεγγίσει καμία από τις παραπάνω πρακτικές
3. στις επισκευές.

Η μέθοδος που χρησιμοποιείται σε αυτές τις περιπτώσεις είναι είτε εξ' ολοκλήρου με ηλεκτρόδιο SMAW (111) είτε συνδυαστικά GMAW(135) με SMAW(111), ανάλογα με την περίπτωση.

Τέλος να σημειωθεί ότι σε όλες τις περιπτώσεις των συγκολλήσεων χρησιμοποιείται μια κατασκευή ως στέγαστρο η οποία καλύπτει τη συγκόλληση και τους συγκολλητές - χειριστές με τον εξοπλισμό τους, ώστε να είναι καλυμμένοι από τις καιρικές συνθήκες που επηρεάζουν τις συγκολλήσεις.



Εικόνα 6.2.1: Στέγαστρο συγκολλήσεων στον ΤΑΠ

Η εικόνα 6.2.1 χρησιμοποιείται ως οπτική τεκμηρίωση της περιγραφόμενης εργασίας. Σε κάθε περίπτωση σε όλες τις συγκολλήσεις, υπάρχει επιθεωρητής καθ' όλη τη διάρκεια της

συγκόλλησης ο οποίος ελέγχει όλη τη διαδικασία και στη συνέχεια έπονται οι υπόλοιποι έλεγχοι.

Δηλαδή:

- οπτικός έλεγχος (VT) 100%
- υπερηχητικός έλεγχος τρισδιάστατος (UT) 100%
- ραδιογραφία (RT) 100%
- μαγνητικά σωματίδια (MT) ή διεισδυτικά υγρά (PT) 100%

Με αυτόν τον τρόπο γίνεται ο έλεγχος στη συγκόλληση για εύρεση σφαλμάτων επιφανειακά και επίσης σε όλο το βάθος του υλικού για εύρεση σφαλμάτων που πρέπει να επισκευαστούν. Οι έλεγχοι ακολουθούν τα ευρωπαϊκά πρότυπα όπως τον 15614 -1 για τις πιστοποιήσεις iso 9712, iso 12732, και κάποια αμερικάνικα όπως τον API 1104 ως γενικά πρότυπα για αγωγούς.

Ο οπτικός έλεγχος είναι πολύ βασικός και ελέγχει:

- την κλίση της φρέζας με ειδικά εργαλεία μέτρησης (βλέπε εικ.5.1.9)
- την ορθή συναρμογή των σωληνώσεων (fit up), ώστε να αποφευχθεί η διαφορά ευθυγράμμισης (misalignment) (βλέπε εικ.5.1.10)
- τη θερμοκρασία προθέρμανσης όπως ορίζεται από τη διαδικασία (WPS)
- το τελικό καπάκι της συγκόλλησης ώστε να είναι απαλλαγμένο από πιτσιλίσματα περιφερειακά (spatters) καθώς και το ύψος του καπακιού να είναι <3mm. Οι ατέλειες αυτές είναι καταστροφικές για την επικάλυψη της μόνωσης που ακολουθεί οπότε απαιτείται η εξάλειψή τους.

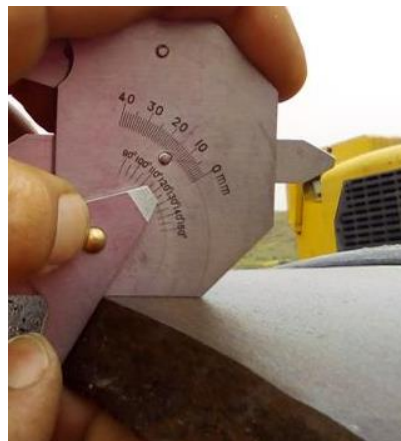
Σημειώνεται επίσης ότι στο συγκεκριμένο έργο δεν υπήρχαν συγκολλήσεις μικρής διαμέτρου (small bore/socket welds) ούτε υπήρχε η απαίτηση ανόπτησης σε αντίθεση με το έργο Α που εξετάσαμε ήδη.



Εικόνα 6.2.2: ετικέτα από τις σωλήνες του έργου



Εικόνα 6.2.3: διαδρομή αγωγού στο έργο του ΤΑΠ



Εικόνα 6.2.4: Έλεγχος της φρέζας του αγωγού



Εικόνα 6.2.5: εργασίες μονταρίσματος (fit up) του αγωγού στο χαντάκι.

Οι εικόνες 6.2.2 / 6.2.3 / 6.2.4 / 6.2.5 χρησιμοποιούνται ενημερωτικά ως εικόνες γενικού τύπου αναφοράς στο έργο του ΤΑΠ.

Welding operators				Manual welders				Hybrid welders			
W. OPERATOR ID	Total passes	Defects	Defect rate	Welder ID	Total passes	Defects	Defect rate	Welder ID	Total passes	Defects	Defect rate
1	3402	9	0,26%	M1	32	0	0,00%	A1	69	1	1,45%
2	3212	1	0,03%	M2	148	0	0,00%	A2	542	5	0,92%
3	2616	0	0,00%	M3	151	1	0,66%	A3	412	4	0,97%
4	2213	2	0,09%	M4	426	3	0,70%	A4	465	2	0,43%
5	2967	3	0,10%	M5	421	2	0,48%	A5	414	3	0,72%
6	2844	0	0,00%	M6	56	0	0,00%	A6	13	0	0,00%
7	2766	1	0,04%	M7	5	0	0,00%	A7	43	1	2,33%
8	3055	1	0,03%	M8	5	0	0,00%	A8	43	0	0,00%
9	300	0	0,00%	M9	136	0	0,00%	A9	81	1	1,23%
10	1031	2	0,19%	M10	138	0	0,00%				
11	1398	1	0,07%	M11	133	5	3,76%	Σύνολο	2082	17	0,82%
12	1413	0	0,00%								
13	2573	1	0,04%	Σύνολο	1651	11	0,67%				
14	1619	0	0,00%								
15	1366	6	0,44%								
16	1355	1	0,07%								
Σύνολο	34130	28	0,08%								

Εικ. 6.2.6 – Ενδεικτική κατανομή επισκευών (repairs) ανά μέθοδο Έργου Β'

Στην εικόνα 6.2.6 έχουμε ένα τμήμα της καταγραφής του έργου με τα στοιχεία επισκευών ανά μέθοδο όπως προέκυψαν κατά τη φάση της κατασκευής.

WELDS PERFORMED MECHANIZED											
TO DATE					TOTAL						RATES
JOINTS WELDED COMPLET	INCOMPLET WELDS	ACCEPTED IN VT	ACCEPTED IN RT	ACCEPTED IN AUT	JOINTS WELDED COMPLET	ACC. IN VT	ACC. IN RT	ACC. IN AUT	REJECTED	REST TO BE REPAIRED	REPAIR RATE
23	6	23	0	0	2666	2665	0	2601	25	0	0,94%
Total Welds	29										

WELDS PERFORMED MANUAL											
TO DATE					TOTAL						RATES
JOINTS WELDED COMPLET	INCOMPLET WELDS	ACCEPTED IN VT	ACCEPTED IN RT	ACCEPTED IN SAUT	JOINTS WELDED COMPLET	ACC. IN VT	ACC. IN RT	ACC. IN SAUT	REJECTED	REST TO BE REPAIRED	REPAIR RATE
2	0	1	0	0	142	140	78	46	12	0	8,45%
Total Welds	2										

WELDS PERFORMED HYBRID											
TO DATE					TOTAL						RATES
JOINTS WELDED COMPLET	INCOMPLET WELDS	ACCEPTED IN VT	ACCEPTED IN RT	ACCEPTED IN SAUT	JOINTS WELDED COMPLET	ACC. IN VT	ACC. IN RT	ACC. IN SAUT	REJECTED	REST TO BE REPAIRED	REPAIR RATE
2	0	2	0	0	166	166	108	34	16	4	9,64%
Total Welds	2										

TOTAL Complet	27	WELDING PROCESS	MECHANIZED	MANUAL	HYBRID	TOTAL AVERAGE WELDS/ DAY		TOTAL REPAIR RATE
TOTAL Incomplet	6	TOTAL WORKING DAYS	132	103	72	22,53		6,34%
TOTAL General	33	AVERAGE WELDS/ DAY	20,2	1,4	2,3			

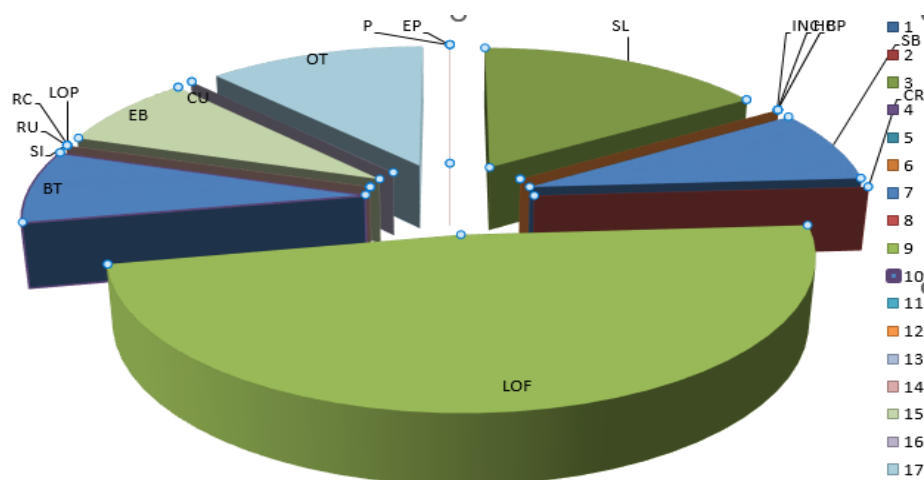
Εικόνα 6.2.7 : Ημερήσια παραγωγή συγκολλήσεων στον ΤΑΠ και οι επισκευές της.

Από την παραπάνω εικόνα 6.2.2 και τις τιμές που έχουμε βλέπουμε ότι η μέθοδος του ρομποτικού συστήματος είναι πολύ πιο παραγωγική (20,2 συγκολλήσεις/ημέρα = 960''/ημέρα) ήτοι με περισσότερο παραγωγικό χρόνο και παράλληλα με πολύ μικρά ποσοστά επισκευών (0,94%) σε σχέση με τη χειροκίνητη μέθοδο και την υβριδική.

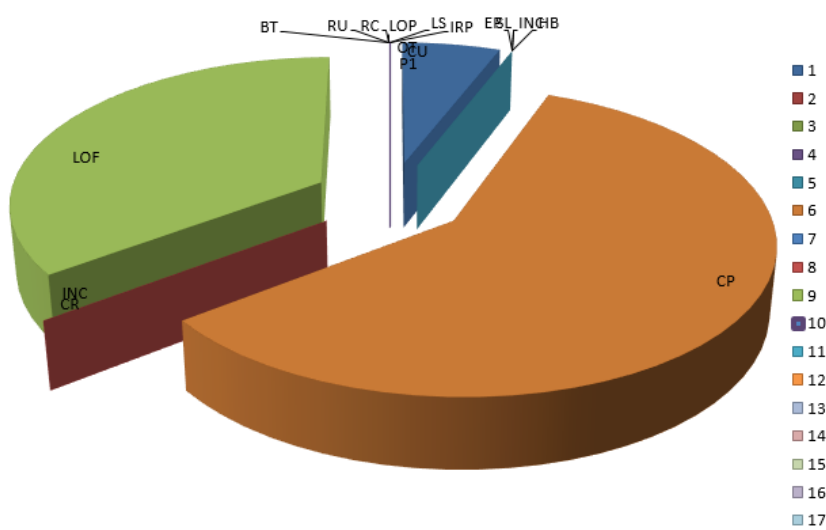
Επίσης η υβριδική μέθοδος είναι πιο παραγωγική (2,5 συγκολλήσεις/ημέρα = 120'' / ημέρα) σε σχέση με τη χειροκίνητη μέθοδο στο σύνολό της (1,4 συγκολλήσεις/ημέρα= 67,2 / ημέρα) αλλά με περισσότερες επισκευές, η χειροκίνητη μέθοδος έχει 8,45 % επισκευές ενώ η υβριδική 9,64%.

Η έγκαιρη εκτέλεση του VT επέτρεψε την αποφυγή των επιφανειακών ελαττωμάτων, τον έλεγχο του fit-up και φυσικά την τήρηση του WPS (προθέρμανση, ρεύματα), με αποτέλεσμα τη τάση μηδένισης των επιφανειακών ελαττωμάτων, τη μείωση των υπολοίπων ελαττωμάτων, την εξάλειψη προβλημάτων όπως misalignment εσωτερικά / εξωτερικά, τη μείωση του κόστους αστοχίας και τέλος τον περιορισμό των επανεργασιών.

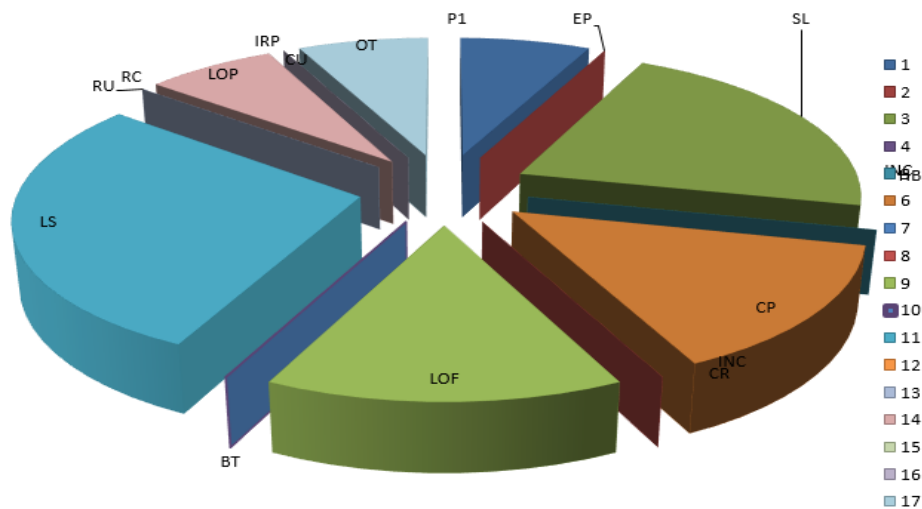
Στο ΤΑΡ, το κόστος ποιότητας επικεντρωνόταν κυρίως στο κόστος πρόληψης και ελέγχου, με σαφώς μειωμένο κόστος αστοχίας και φυσικά καλή παραγωγικότητα που είχε ως αποτέλεσμα την τήρηση του χρονοδιαγράμματος.



Διάγραμμα 6.2.1 – Σφάλματα σε αυτόματες συγκολλήσεις



Διάγραμμα 6.2.2 – Σφάλματα σε υβριδικές συγκολλήσεις



Διάγραμμα 6.2.3 – Σφάλματα σε χειροκίνητες συγκολλήσεις

Τα διαγράμματα 6.2.1 & 6.2.2 & 6.2.3 αποτυπώνουν οπτικά τα αντίστοιχα αποτελέσματα των σφαλμάτων των συγκολλήσεων και βοηθούν στην ερμηνεία των διαφορών που παρατηρούνται μεταξύ των μεθόδων, με τη βοήθεια του επεξηγηματικού πίνακα 6.2.4 που ακολουθεί.

%	TAG	DEFECT	TAG
7%	P1	POROSITY	P1
0%	EP	EXTERNAL PROFILE	EP
21%	SL	SLAG	SL
0%	INC	INCLUSIONS	INC
0%	HB	HOLLOW BEAD	HB
14%	CP	CLUSTERED POROSITY	CP
0%	INC	INC. SIDEWALL FUSION	INC
0%	CR	CRACK	CR
14%	LOF	L.O.F.	LOF
0%	BT	BURN THROUGH	BT
29%	LS	LINEAR SURFACE	LS
0%	RU	ROOT UNDERCUT	RU
0%	RC	ROOT CONCAVITY	RC
7%	LOP	L.O.P.	LOP
0%	IRP	INADEQ. ROOT PENETR.	IRP
0%	CU	CAP UNDERCUT	CU
7%	OT	OTHER (INTERACTION BETWEEN DEFECTS)	OT
100%		TOTAL	

Εικόνα 6.2.8: Επεξηγηματικός πίνακας σφαλμάτων των συγκολλήσεων για το έργο του TAP

Από τα παραπάνω διαγράμματα βλέπουμε αρχικά ότι δεν υπάρχουν σχεδόν καθόλου επιφανειακά σφάλματα σε καμία από τις εφαρμοζόμενες μεθόδους συγκόλλησης.

Όλες οι μέθοδοι έχουν πόρους είτε σε σύννεφο (cluster porosity) είτε μεμονωμένους (porosity) σφάλματα που συνήθως οφείλονται στο περιβάλλον. Επίσης κάποια σφάλματα όπως το σφάλμα της lack of fusion (LOF) και το burn through (BT) στην αυτόματη μέθοδο έχει να κάνει με τις ρυθμίσεις του ρεύματος ενώ τα Inadequate penetration (ατελή διείσδυση) και Sidewall fusion (ατελή τήξη στα πλαϊνά της συγκόλλησης) διορθώθηκαν άμεσα από τη μηχανή. Στην αυτόματη και την υβριδική μέθοδο τα σφάλματα είναι αρκετά πιο λίγα από τη χειροκίνητη μέθοδο. Στη χειροκίνητη θέση έχουμε σφάλματα τα οποία οφείλονται στη θέση της συγκόλλησης στον συγκολλητή στα ρεύματα στις συνθήκες κ.λ.π.

Το άμεσο περιβαλλοντικό αποτύπωμα του έργου είναι μικρό διότι μειώθηκε αρκετά το κόστος αστοχίας, μειώνοντας την κατανάλωση των αναλωσίμων και της ενέργειας ανά συγκόλληση. Επιπλέον, λόγω της φύσης του έργου, κάθε απορριπτική συγκόλληση μπορεί να προκαλέσει καθυστέρηση και πρόσθετες μετακινήσεις, αυξάνοντας το έμμεσο αποτύπωμα όπως δείχνει ο πίνακας 6.2.5 κινδύνων έργου B – ΤΑΠ.

Πίνακας 6.2.5 — Καταγραφή κινδύνων – Ενέργειες Μείωσης στο Έργο B -ΤΑΠ

Κίνδυνος	Επίπεδο	Μείωση
Tie-ins SMAW	Υψηλό	Έλεγχος (hold point) του μονταρίσματος + οπτικός (VT gate) + έλεγχοι NDT windows
Υβριδική μέθοδος / χαντάκι	Μέτριο	προστασία/ρύθμιση διαδικασίας, έλεγχος ευθυγράμμισης
NDT συσσώρευση εργασιών	Υψηλό	προγραμματισμός ελέγχων ανά παρτίδα
Υλικά / πρόσβαση	Μέτριο	Διαχείριση των εργασιών
Το τελικό κλείσιμο των εγγράφων (λόγω όγκου)	Μέτριο	dossier εγγράφων εβδομαδιαίο κλείσιμο

Από τον παραπάνω πίνακα βλέπουμε τους κινδύνους που υπάρχουν στο έργο B (ΤΑΠ) και επίσης τις ενέργειες που πρέπει να πραγματοποιηθούν ώστε να ελαχιστοποιηθούν και εάν είναι δυνατό να μηδενιστούν. Επίσης με μία ανάλυση LCC καταδεικνύει την πραγματική αξία της στρατηγικής «σωστή αρχική κατασκευή (right-first-time)» όπου οι επιπτώσεις αστοχιών σε ένα τέτοιο έργο πέραν της αύξησης του κόστους ποιότητας και του

περιβαλλοντικού αποτυπώματος, το κόστος επισκευής κατά τη λειτουργία καθώς επίσης μίας αστοχίας στην ίδια φάση, μπορεί να κοστίσει ανθρώπινες ζωές.

6.3 Περιγραφή του Γ' έργου. Ανάλυση – παραγωγικότητας– ποιότητας–κόστους.

Έργο Γ (Βιομηχανικό έργο): αφορά την κατασκευή-ανέγερση σιδηροκατασκευής σε διϋλιστηριακό χώρο, επίσης βιομηχανικό έργο, βλέπε εικόνα 6.3.1 που ακολουθεί. Η κατασκευή και η ανέγερση έγινε από διαφορετικούς εργολάβους. Επίσης δεν υπήρχε μόνιμος έλεγχος από τον πελάτη στη φάση της κατασκευής επειδή ο πελάτης ήθελε πιο νωρίς το έργο από τους αρχικούς χρόνους παράδοσης. Αυτές οι κατασκευές αποτελούνται από ένα τμήμα συγκολλητό και ένα τμήμα βιδωτό.

Ένα μεγάλο τμήμα του κυρίου όγκου των σιδηροκατασκευών έχει κατασκευαστεί με συγκολλήσεις σε εργοστάσιο με κάθετη παραγωγή το οποίο έχει ποιοτικό έλεγχο. Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε είναι ημιαυτόματη GMAW. Στις περιπτώσεις επισκευών χρησιμοποιούν SMAW. Οι συγκολλήσεις είναι γωνιακές (fillet welds). Η παραγωγικότητα είναι αρκετά καλή με τις μεθόδους που χρησιμοποιούνται. Έτσι παρότι η κατασκευή προηγήθηκε ελάχιστα της ανέγερσης, η παράδοση των κατασκευών έγινε σχετικά γρήγορα. Λόγω όμως βιασύνης και προφανώς ελλιπούς οπτικού ελέγχου, τα προβλήματα που δεν βρέθηκαν στο εργοστάσιο, ανακαλύφθηκαν στο εργοτάξιο και χρειάστηκαν άμεση επισκευή ώστε να προχωρήσει η ανέγερση.

Οικονομικοί λόγοι, καθυστέρησαν την αποδοχή ευθύνης από τον εργολάβο κατασκευής, με αποτέλεσμα να καθυστερήσει περισσότερο ακόμα η ανέγερση των σιδηροκατασκευών. Τελικά ο εργολάβος της κατασκευής, αφού χάθηκε πολύτιμος χρόνος, ανέλαβε μέρος της ευθύνης μαζί με την σχεδιαστική ομάδα και προχώρησαν σε επισκευές των συγκολλήσεων επιτόπου.

Βλέπουμε λοιπόν ότι η αύξηση της παραγωγικότητας χωρίς τον οπτικό έλεγχο της κατασκευής οδήγησε σε προβλήματα στο εργοτάξιο τα οποία καθυστέρησαν την ανέγερση.

Εκτός του αρνητικού που αντιλαμβανόμαστε όλοι, του άμεσου χρόνου και κόστους δηλαδή, υπήρξε και το αρνητικό της τελικής ποιότητας, η οποία δεν ήταν η ίδια με το εργοστάσιο.

Υπήρξαν όμως και θετικά στην προκειμένη περίπτωση. Το πρώτο θετικό ήταν ότι μπόρεσε να διορθωθεί το πρόβλημα στις επόμενες κατασκευές, εφόσον δεν είχαν κατασκευαστεί, στην εργοστασιακή φάση και να φτάσουν σωστά στο εργοτάξιο. Το δεύτερο θετικό ήταν ότι ελέγχθηκε όλη η κατασκευή ώστε να βρεθεί το μέγεθος του προβλήματος. Το τρίτο θετικό ήταν η γνώση ότι η μελέτη με αυτόν τον τρόπο έχει προβλήματα συνεπώς επανεξετάστηκε η εφαρμογή της σε μελλοντικές κατασκευές.

Η επισκευή στο εργοτάξιο έγινε με ηλεκτρόδιο (SMAW). Αυτό σημαίνει μέτρια παραγωγικότητα. Εφόσον αρκετά τμήματα ήταν κοχλιωτά η ανέγερση προχώρησε, όσο ήταν εφικτό, παράλληλα με τις επισκευές, για να μη χαθεί χρόνος στο σύνολο του έργου. Φυσικά το κόστος επιτάχυνσης επιβάρυνε τον κυρίως εργολάβο του έργου.

Σε αυτήν την περίπτωση είδαμε ότι ναι μεν οι κολλήσεις είναι βασικές αλλά εφόσον έχουμε και άλλο τύπο σύνδεσης (κοχλίες) και το πρόβλημα βρέθηκε στην αρχή της ανέγερσης, ο χρόνος καθυστέρησης του έργου μπόρεσε να αναπληρωθεί σχετικά ανώδυνα. Εάν αντιθέτως το έργο είχε μόνο συγκολλητές συνδέσεις σε όποια φάση και να βρισκόταν το σφάλμα, το έργο θα καθυστερούσε ανάλογα. Βέβαια όσο πιο αργά βρισκόταν το σφάλμα τόσο πιο πίσω θα πήγαινε το έργο. Όσον αφορά το κόστος, υπάρχει το κόστος της ποιότητας το οποίο εφόσον δεν αξιοποιήθηκε στη φάση της κατασκευής αντικαταστάθηκε στο διπλάσιο από το κόστος αστοχίας.



Εικόνα 6.3.1: Αποψη του έργου Γ΄

Ο Πίνακας 6.3.1 χρησιμοποιείται για να συνοψίσει την κατανομή του χρόνου εργασίας στο εργοστάσιο

Πίνακας 6.3.1 – Κατανομή παραγωγικού και μη παραγωγικού χρόνου στο εργοστάσιο

Κατηγορία χρόνου	Ποσοστό %	Παρατηρήσεις
Παραγωγικός χρόνος (Arc Time)	[58]	Επηρεάζεται από ροή υλικών/πρόσβαση
Fit-up & προετοιμασία	[10]	Μοντάρισμα / ευθυγραμμίσεις
Αλλαγές αναλωσίμων/ρυθμίσεις	[5]	Εξαρτάται από μέθοδο/οργάνωση
Αναμονές ελέγχων (NDT/hold points)	[2]	Επίβλεψη
Αναμονές υλικών	[5]	Καθυστερήσεις παραλαβών
Επισκευές & επανεργασίες	[5]	Συνδέεται με NDT rejects και timing VT
Βαφές έλεγχοι μεταφορές στο site	[15]	Τελικό στάδιο
Σύνολο	100	

Ο Πίνακας 6.3.2 χρησιμοποιείται συνοψίσει την κατανομή του χρόνου εργασίας στο εργοτάξιο

Πίνακας 6.3.2 – Κατανομή παραγωγικού και μη παραγωγικού χρόνου στο εργοτάξιο

Κατηγορία χρόνου	Ποσοστό %	Παρατηρήσεις
Ανέγερση	[30]	Επηρεάζεται από ροή υλικών/πρόσβαση
Επισκευές & επανεργασίες	[35]	SMAW
Αναμονές ελέγχων (NDT/hold points)	[15]	3 ^ο γραφείο (Third party) + κατηγοριοποίηση ελέγχων
Αναμονές υλικών από εργοστάσιο	[20]	Καθυστερήσεις παραλαβών
Σύνολο	100	

Βλέπουμε λοιπόν στους παραπάνω πίνακες, ότι ενώ η παραγωγικότητα στο εργοστάσιο είναι πολύ καλή, λόγω της φύσης της δουλειάς, συγκολλήσεις με GMAW και των απαιτήσεων, αντιθέτως στο εργοτάξιο λόγω των επισκευών, έπεσε πολύ το ποσοστό της ανέγερσης. Οι επισκευές λοιπόν είχαν ως αντίκτυπο την συνολική πτώση της παραγωγικότητας με την έννοια πλέον συνολικής εργασίας της σιδηροκατασκευής (προκατασκευή – ανέγερση). Σε αυτό το έργο ο παραγωγικός χρόνος συγκόλλησης έπρεπε να είναι μόνο στο εργοστάσιο και 0% στο εργοτάξιο. Επίσης ο ποιοτικός έλεγχος του εργοστασίου είχε κενό στο σημείο της συναρμογής (γιατί εκεί ήταν το πρόβλημα) με αποτέλεσμα να ξεφύγει το πρόβλημα από την προκατασκευή και να έλθει στο εργοτάξιο όπου όλα είναι πιο δύσκολα.

Σε αυτό το έργο τα NDT's δεν έχουν μεγάλη επίδραση λόγω μικρού ποσοστού. Ο οπτικός έλεγχος όμως παίζει πολύ σημαντικό ρόλο όπως σε όλες τις κατασκευές.

Το άμεσο περιβαλλοντικό αποτύπωμα της κατασκευής λόγω των επισκευών, ήτοι περισσότερη ενέργεια ανά συγκόλληση, περισσότερα αναλώσιμα περισσότερα τροχίσματα, αυξάνεται κατά πολύ. Επίσης λόγω της μεταφοράς της επισκευής από το εργοστάσιο στο εργοτάξιο που σημαίνει μετακινήσεις, αναμονές συνεργείων άσκοπες εργατοώρες αυξάνεται και το έμμεσο περιβαλλοντικό αποτύπωμα.

Ο Πίνακας 6.3.3 χρησιμοποιείται για να συνοψίσει τους κινδύνους και τις ενέργειες μείωσης τους.

Πίνακας 6.3.3 – Καταγραφή κινδύνων και ενέργειες μείωσης στο έργο Γ

Κίνδυνος	P	I	Επίπεδο	Μείωση
Επαναλήψεις στο πεδίο λόγω λάθους	M–Y	Y	Υψηλό	ελευθέρωση spools στο ατελιέ και πρωτόκολλο γρήγορης επισκευής
Ανοχές στο μοντάρισμα	M	M	Μέτριο	Έλεγχος στο μοντάρισμα πριν τις συγκολλήσεις
SMAW (επισκευές)	M	M	Μέτριο	Έλεγχος αναλωσίμων και οπτικός έλεγχος
Butt weld UT (λίγα)	X	M	Χαμηλό	UT μόνο όπου απαιτείται + προγραμματισμός
Close-out/τεκμηρίωση	X–M	M	Μέτριο	Εβδομαδιαίο κλείσιμο φακέλων

6.4 Συγκριτική ανάλυση: Έργου Α – Έργου Β - Έργο Γ

Για λόγους ορθής συγκριτικής αξιολόγησης, επισημαίνεται ότι τα τρία έργα παρουσιάζουν διαφοροποίηση ως προς το αντικείμενο. Το έργο Α είναι βιομηχανικό με διάφορα υλικά, δυσκολία στο εργοτάξιο, με συγκολλήσεις σε σωληνώσεις butt και socket welds και στηρίγματα fillet welds. Επίσης σε κάποιες περιπτώσεις λόγω υλικού κατασκευής (alloy steel) ή λόγω process, απαιτείται από τις προδιαγραφές θερμική κατεργασία (ανόπτηση / PWHY).

Το Έργο Β (TAP) αφορά συγκολλήσεις μεγάλων διαμέτρων σε χαντάκι, (field girth welds). Στο έργο δεν υπάρχουν σωληνώσεις μικρών διαμέτρων ούτε ανοπτήσεις, συνεπώς οι σχετικές κατηγορίες και δείκτες δηλώνονται ως N/A (not applicable) και δεν συμμετέχουν στη συγκριτική ανάλυση του κόστους- ποιότητας - ρίσκου.

Το έργο Γ' είναι έργο κατασκευής – ανέγερσης σιδηροκατασκευής. Οι συνδέσεις είναι ένας μεγάλος αριθμός κοχλιωτές και ένα μικρότερο μέγεθος συγκολλητές γωνιακού τύπου και μόνο στο εργοστάσιο. Από κακή μελέτη έγινε λάθος κατά το fit-up κάποιων συγκολλητών στελεχών της κατασκευής και λόγω αδυναμίας του οπτικού ελέγχου να βρεθεί η αστοχία στο εργοστάσιο, μεταφέρθηκε το πρόβλημα στο εργοτάξιο με επακόλουθα πλέον κόστους – ρίσκου – ποιότητας.

Ο Πίνακας 6.4.1 χρησιμοποιείται για να συνοψίσει τη συγκριτική αξιολόγηση των τριών έργων και να διευκολύνει τη σύγκριση τεχνικών, ποιοτικών και οικονομικών παραμέτρων.

Πίνακας 6.4.1 – Συγκριτική αξιολόγηση των τριών έργων

Παράμετρος	Έργο Α (Βιομηχανικό)	Έργο Β (TAP)	Έργο Γ (σιδηροκατασκευές)
Περιβάλλον συγκολλήσεων	Ατελιέ & εργοτάξιο	Μόνο χαντάκι (field) : έξω / μέσα	Εργοστάσιο / εργοτάξιο
Κύριες μέθοδοι	GTAW ρίζα / SMAW hot- pass, γέμισμα	Ρομποτικό / Υβριδικό GMAW - FCAW / SMAW tie-ins	GMAW κυρίως συγκολλήσεις / SMAW επισκευές
Τήρηση WPS	Με αποκλίσεις	Αυστηρή	Μέτρια

VT	100% αλλά όχι έγκαιρο	Ανεξάρτητο, 100%, υποχρεωτικό πριν RT/PT	Ποσοστιαίος έλεγχος στο εργοστάσιο
Επισκευές	Πολλές	Λίγες	Αρκετές. Διόρθωση στο εργοτάξιο
Παραγωγικότητα	Μέτρια	Καλή (αυτόματη), μέτρια (ημιαυτόματη), χαμηλή (tie- ins)	Καλή
Κόστος ποιότητας (CoQ)	Υψηλό κόστος αστοχίας	Κυρίως κόστος πρόληψης	Κόστος αστοχίας
Συνολικό ρίσκο	Αυξημένο	Ελεγχόμενο	Υψηλό

Η σύγκριση των τριών έργων καταδεικνύει ότι:

- η αυστηρή τήρηση διαδικασιών και ανεξάρτητος οπτικός έλεγχος σε όλο το εύρος της κατασκευής μειώνουν δραστικά τις επισκευές στα επόμενα στάδια
- η αυτοματοποίηση αυξάνει την παραγωγικότητα και την αποδοτικότητα, ακόμη και σε έργα που είναι μόνο field
- το αυξημένο κόστος πρόληψης στο έργο του TAP οδήγησε σε χαμηλότερο συνολικό κόστος μέσω μείωσης του CoQ και του ρίσκου
- εάν ένα πρόβλημα μεταφερθεί από το ατελιέ στο εργοτάξιο μπορεί να κινδυνεύσει ακόμη και το χρονοδιάγραμμα με επιπτώσεις στο κόστος την ποιότητα και το ρίσκο της κατασκευής.

Η ανάλυση επιβεβαιώνει ότι η επιλογή μεθόδου συγκόλλησης και επιπέδου ελέγχου αποτελεί στρατηγική απόφαση έργου και όχι απλώς τεχνική επιλογή.

Ακολουθεί ο Πίνακας 6.4.2 ο οποίος χρησιμοποιείται για να συνοψίσει τον χρόνο εργασίας και στα τρία έργα ώστε να γίνει η σύγκρισή τους.

Πίνακας 6.4.2 – Κατανομή παραγωγικού και μη παραγωγικού χρόνου

Κατηγορία χρόνου	Έργο Α – Βιομηχανικό (%)	Έργο Β – TAP (%)	Έργο Γ – Σιδηρο/σκευή (%)	Σχόλιο
Παραγωγικός χρόνος (Arc Time)	25	60	45	Υψηλότερος στο TAP λόγω αυτόματης / πειθαρχίας
Μοντάρισμα (Fit-up) & προετοιμασία	20	15	10	Καλύτερη οργάνωση / προετοιμασία στο TAP
Αλλαγές αναλωσίμων / ρυθμίσεις	10	5	5	Μειωμένες αλλαγές στο TAP
Αναμονές ελέγχων (NDT)	15	10	10	Πιο σωστός προγραμματισμός στο TAP
Επισκευές & επανεργασίες	15	10	20	Λιγότερες επισκευές αναλογικά στο TAP
PWHT & αναμονές	10	N/A	N/A	B / Γ: δεν εφαρμόστηκε PWHT
Αναμονές υλικών	5	0	10	Καθυστερήσεις παραλαβών
Σύνολο	100	100	100	

Σημείωση:

«Στο έργο Β (ΤΑΡ) & Γ δεν απαιτήθηκαν ανοπτήσεις (PWHΤ), συνεπώς η κατηγορία δεν εφαρμόζεται (N/A).»

Η αναλυτική κατανομή παραγωγικού και μη παραγωγικού χρόνου που παρουσιάζεται στον παραπάνω πίνακα 6.4.2 αποδεικνύει ότι η βελτίωση της παραγωγικότητας στις συγκολλήσεις δεν προκύπτει αποκλειστικά από την αύξηση της ταχύτητας συγκόλλησης, αλλά και από τη μείωση των απωλειών χρόνου που συνδέονται με την οργάνωση καθώς και με τον έλεγχο και την ποιότητα.

Η υψηλή συμμετοχή μη παραγωγικού χρόνου (αναμονές, επισκευές) δεν αυξάνει μόνο το κόστος και την απόκλιση χρονοδιαγράμματος, αλλά συνιστά και αρνητικό δείκτη βιωσιμότητας, καθώς αντιστοιχεί σε επιπλέον κατανάλωση υλικών, ενέργειας και εργασίας χωρίς προστιθέμενη αξία. Αυξάνει δηλαδή και το περιβαλλοντικό αποτύπωμα. Αντίθετα, η αύξηση του παραγωγικού χρόνου (Arc Time) μέσω καλής οργάνωσης και σωστής πρόληψης, λειτουργεί υπέρ της ανθεκτικότητας του έργου, βελτιώνοντας την προβλεψιμότητα, τη δυνατότητα ανάκαμψης από καθυστερήσεις καθώς επίσης ελαχιστοποιεί και το περιβαλλοντικό αποτύπωμα.

6.5 Σύγκριση μεθόδων συγκόλλησης ανά τύπο σύνδεσης

Στον πίνακα 6.5.1 συνοψίζονται οι μέθοδοι συγκολλήσεως που χρησιμοποιούνται στα έργα που αναφέρονται, στην ρίζα και στα γεμίσματα, καθώς και οι επισκευές που συνήθως συναντώνται.

Πίνακας 6.5.1 – Μέθοδοι συγκόλλησης και επισκευές στα 3 έργα με διάκριση Ρίζα / Γεμίσματα

Έργο	Περιβάλλον	Τύπος συγκόλλησης	Ρίζα (ROOT PASS)	Γεμίσματα (HOT PASS / CAP)	Μέθοδος σε επισκευές (επισκευές / επαναληπτικές εργασίες)	Πού εμφανίζονται κυρίως οι επισκευές
Έργο Α – Βιομηχανικό ατελιέ & εργοτάξιο	Ατελιέ & Εργοτάξιο	Butt welds μεγάλων διαμέτρων	GTAW	SMAW	Συνήθως SMAW (rework), κατά περίπτωση GTAW σε ρίζα	Στα γεμίσματα (υψηλότερα ποσοστά), επίσης σε field welds & tie-ins
		Small bore / sockets ($\leq 1\frac{1}{2}$ ")	GTAW ή SMAW (ανά πρακτική)	GTAW ή SMAW (≥ 2 πάσα)	SMAW συχνά σε επισκευές	Sockets (πολλά όταν δεν τηρείται WPS) ≥ 2 πάσα
Έργο Β – TAP (pipeline field girth welds)	έξω από το χαντάκι	Girth welds – ευθείες (όπου επιτρέπεται)	Ρομποτικές GMAW	Ρομποτικές FCAW	GMAW (ρίζα) SMAW (ΥΠΟΛΟΙΠΟ) ΧΕΙΡΟΚΙΝΗΤΑ	Χαμηλές σε σχέση με την παραγωγικότητά τους
	έξω από το χαντάκι & χαντάκι	Girth welds – δύσκολες περιοχές - εντός και εκτός χαντακιού	Υβριδικές Συγκολλητής GMAW	Υβριδική Χειριστής FCAW	GMAW (ρίζα) SMAW (ΥΠΟΛΟΙΠΟ) ΧΕΙΡΟΚΙΝΗΤΑ	Υψηλές πιθανότητες επισκευής από την χειροκίνητη μέθοδο πιο μεγάλη παραγωγικότητα από τη χειροκίνητη μέθοδο
	χαντάκι	Tie-ins / σημεία που δεν μπαίνουν μηχανές εντός χαντακιού	Χειροκίνητες SMAW (κατεβατό)	Χειροκίνητες SMAW	SMAW ΧΕΙΡΟΚΙΝΗΤΑ	Υψηλή πιθανότητα χαμηλή παραγωγικότητα
Έργο Γ – Σιδηροκατασκευή ή (κυρίως εργοστάσιο)	Εργοστάσιο	Κύρια παραγωγή σιδηροκατασκευής	Γωνιακά κολλήματα – παραγωγή GMAW	GMAW	Επισκευές κυρίως SMAW (όπου χρειάστηκε)	Χαμηλές-μέτριες στο εργοστάσιο (ελεγχόμενες συνθήκες)
	Εργοτάξιο (μόνο επισκευές λόγω λάθους)	Μη προγραμματισμένες επαναλήψεις λόγω λάθους	SMAW (rework)	SMAW (rework)	SMAW	Υψηλή επίδραση (όχι λόγω πλήθους, αλλά λόγω field rework)

Στα έργα σωληνώσεων (Έργο Α και έργο Β -TAP-) ο διαχωρισμός ρίζας - γεμισμάτων είναι κρίσιμος, καθώς τα γεμίσματα εμφανίζουν μεγαλύτερη πιθανότητα επισκευών και μεγαλύτερη επίδραση στο κόστος της ποιότητας. Στη σιδηροκατασκευή (Έργο Γ) η κύρια παραγωγή στο εργοστάσιο είναι με GMAW μέθοδος η οποία έχει υψηλή σταθερότητα και

παραγωγικότητα, ενώ η συνολική επίπτωση προκύπτει όταν απαιτηθεί μη προγραμματισμένη επισκευή στο εργοτάξιο με SMAW.

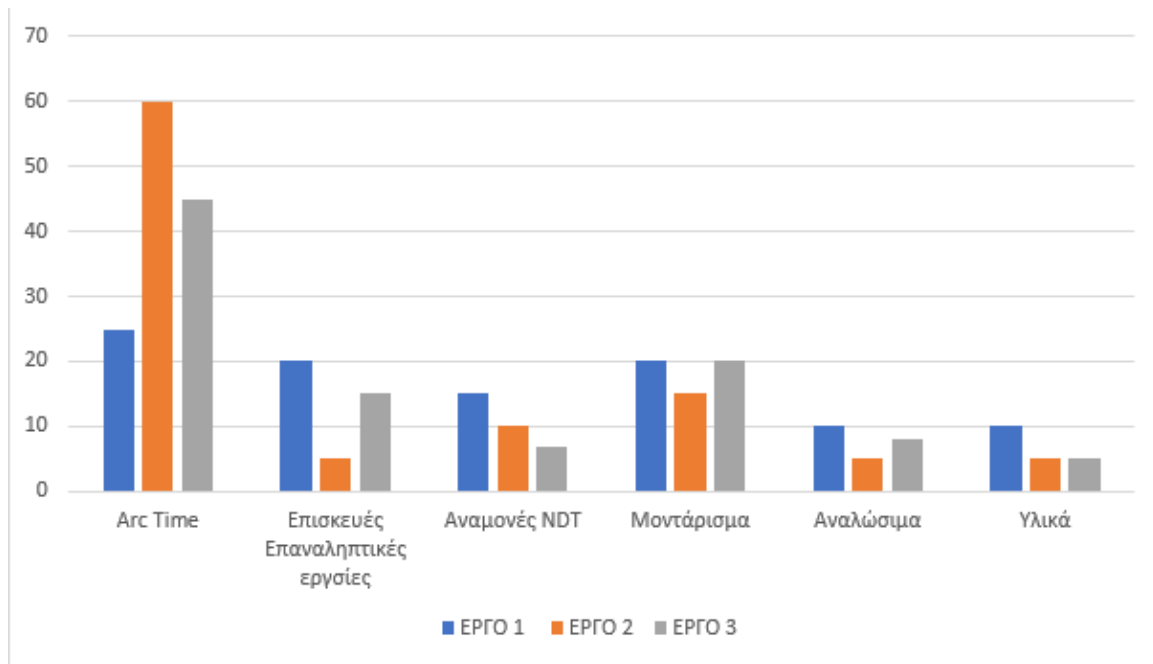
6.6 Συγκριτική απεικόνιση δεικτών κόστους ποιότητας για τα 3 έργα (KPI).

Ο πίνακας 6.6.1 που ακολουθεί συνοψίζει τους δείκτες του κόστους ποιότητας για κάθε έργο και μπορεί να γίνει εύκολα η σύγκρισή τους.

Πίνακας 6.6.1: Συγκριτικός πίνακας των (3) έργων των KPI

ΔΕΙΚΤΗΣ%	ΕΡΓΟ Α	ΕΡΓΟ Β (ΤΑΡ)	ΕΡΓΟ Γ
Arc Time	25	60	45
Επισκευές Επαναληπτικές εργασίες	20	5	15
Αναμονές NDT	15	10	7
Μοντάρισμα	20	15	20
Αναλώσιμα	10	5	8
Υλικά	10	5	5

Στη συνέχεια το Διάγραμμα 6.6.1 αποτυπώνει οπτικά την απεικόνιση των δεικτών κόστους ποιότητας για τα εξεταζόμενα (3) έργα και βοηθά στην ερμηνεία των διαφορών που παρατηρούνται μεταξύ τους.



Διάγραμμα 6.6.1: Απεικόνιση των δεικτών κόστους ποιότητας για τα 3 έργα

Από τον παραπάνω πίνακα και το διάγραμμα βλέπουμε ότι το έργο Β (ΤΑΠ) έχει τον καλύτερο παραγωγικό χρόνο με τις λιγότερες επισκευές αναλογικά με τα υπόλοιπα έργα.

Ο Πίνακας 6.6.2 χρησιμοποιείται για να συνοψίσει τα βασικά δεδομένα της ενότητας και να διευκολύνει τη σύγκριση τεχνικών, ποιοτικών και οικονομικών παραμέτρων.

Πίνακας 6.6.2 – Σύγκριση παραγωγικότητας, ποιότητας και κόστους ποιότητας (πρόληψη, εκτίμηση, αποτυχία, καθυστέρηση)

Συνιστώσες Κόστους Ποιότητας	Έργο Α – Βιομηχανικό	Έργο Β2 – ΤΑΡ	Έργο Γ – Σιδηροκατασκευή
Κόστος πρόληψης	Μέτριο	Υψηλό	Μέτριο
<i>Οδηγός</i>	Μοντάρισμα (fit-up) / QC, διαδικασία	αυστηρή WPS + ανεξάρτητος οπτικός έλεγχος	Πειθάρχηση στο εργοστάσιο
Κόστος Εκτίμησης (έλεγχοι)	Υψηλό	Μέτριο–Υψηλό	Χαμηλό–Μέτριο
<i>Οδηγός</i>	RT/PT/UT ανά κλάση + hold points	VT 100% πριν RT/PT + οργανωμένο NDT	VT 100% + PT 5% + UT μόνο σε λίγα butt
Κόστος αποτυχίας (αστοχία/επισκευές)	Υψηλό	Χαμηλό	Μέτριο–Υψηλό
<i>Οδηγός</i>	Επισκευές κυρίως γεμισμάτων / sockets / tie-ins	χαμηλά επισκευές, tie-ins πιο δύσκολα	Επανάληψη εργασίας στο πεδίο λόγω λάθους (SMAW)
Κόστος καθυστέρησης	Υψηλό	Μέτριο	Μέτριο
<i>Οδηγός</i>	NDT loops → αναμονή, επαναπροσδιορισμός αλληλουχίας	Υλικά / χαντάκι + tie-ins	Επανάληψη εργασίας στο πεδίο → απώλεια ρυθμού
Συνολικό Κόστος Ποιότητας	Υψηλό	Χαμηλότερο	Μέτριο

Κατά τη σύγκριση έχουμε ότι η χαμηλή παραγωγικότητα και οι αυξημένες επισκευές στο Έργο Α οδηγούν σε υψηλό κόστος ποιότητας κυρίως λόγω κόστους καθυστέρησης και αποτυχίας που προκαλούνται από NDT loops. Αντίθετα, στον ΤΑΡ η τυποποίηση και ο έγκαιρος ανεξάρτητος οπτικός έλεγχος πριν από τους υπόλοιπους ελέγχους δηλαδή RT και PT, περιορίζουν τις επισκευές και κρατούν το κόστος ποιότητας χαμηλότερο. Στη σιδηροκατασκευή, η σταθερή παραγωγή στο εργοστάσιο μειώνει το κόστος αποτυχίας και αξιολόγησης, όμως οι μη προγραμματισμένες επισκευές στο εργοτάξιο αυξάνουν δυσανάλογα το κόστος αποτυχίας και καθυστέρησης.

6.6.3 Συγκεντρωτικός πίνακας NDT's όλων των έργων

Έργο	NDT	Τι βρίσκουν συνήθως	Πού γίνονται τα περισσότερα επισκευές	Κρίσιμο συμπέρασμα
Έργο Α	Μέτρια–Υψηλή (ανά κλάση + ειδικές περιπτώσεις)	Σφάλματα στα γεμίσματα, τα / καπάκια τα sockets, τα tie-ins	γεμίσματα + sockets + tie-ins	έγκαιρο VT + πειθαρχία πάσων μειώνει το κόστος της ποιότητας
Έργο Β-TAP	Υψηλή πειθαρχία (VT 100% πριν RT/PT)	σποραδικά σφάλματα, tie-ins πιο δύσκολα	tie-ins	ρομπότ = μικρός αριθμός επισκευών tie-ins = κρίσιμη εργασία
Έργο Γ	Ποιοτικός έλεγχος εργοστασίου: οπτικός έλεγχος ποσοστό + PT 5%, UT μόνο σε λίγα butt)	κυρίως επιφανειακά σφάλματα τα οποία απαιτούν τρόχισμα και κάποιες φορές συγκόλληση	Εργασίες επαναληπτικές στο πεδίο λόγω λάθους	ο κύριος οδηγός είναι οι επαναληπτικές εργασίες και όχι οι έλεγχοι

Στα τεχνικά έργα, οι συγκολλήσεις δεν ολοκληρώνονται με τις συγκολλήσεις, αλλά μόνο μετά την αποδοχή τους μέσω των προβλεπόμενων ελέγχων ώστε να προχωρήσει η υδραυλική ή η πνευματική δοκιμή και να γίνει η τελική αποδοχή των γραμμών από τον πελάτη. Συνεπώς διακρίνουμε την κρισιμότητα των ελέγχων οι οποίοι ενσωματώνονται στο χρονοδιάγραμμα και ελέγχουν την πορεία του έργου.

Όταν οι έλεγχοι μπαίνουν σωστά στη ροή του και πραγματοποιούνται απρόσκοπτα δεν δημιουργούνται καθυστερήσεις και αναμονές εργασιών. Αντιθέτως λειτουργούν υποστηρικτικά ως προς το χρονοδιάγραμμα και περιορίζουν τον κίνδυνο να χαθεί πολύτιμος χρόνος. Όταν όμως αντιμετωπίζονται ως μεταγενέστερη δραστηριότητα, οδηγούν σε σημαντικές καθυστερήσεις των εργασιών που ακολουθούν με συνέπεια τελικά καθυστέρηση του χρονοδιαγράμματος.

Ο οπτικός έλεγχος αποτελεί τον πιο γρήγορο, άμεσο, οικονομικό και αποτελεσματικό έλεγχο ο οποίος μπορεί να καθιερωθεί σε μία γραμμή παραγωγής ή σε ένα νέο έργο.

Όπως είδαμε στις αναφερθείσες περιπτώσεις έργων κατασκευής το έργο Γ το οποίο δεν βρήκε το πρόβλημα στο εργοστάσιο λόγω ελλιπούς οπτικού ελέγχου, είχε καθυστέρηση σε όλη την πορεία του έργου με κίνδυνο να ξεφύγει από το χρονοδιάγραμμα. Εάν το έργο είχε περισσότερες συγκολλήσεις στο εργοτάξιο τα οικονομικά αποτελέσματα θα ήταν ολέθρια για τον εργολάβο με μεγάλη οικονομική επιβάρυνση. Επίσης στο έργο Β <ΤΑΠ> λόγω του 100% οπτικού ελέγχου δεν είχε πολύ μεγάλο αριθμό αστοχιών και σφαλμάτων. Και φυσικά στο έργο Α η έλλειψη του οπτικού οδηγεί σε πολλές επαναληπτικές εργασίες και NDT's. Αξίζει να σημειωθεί ότι ο οπτικός έλεγχος πέραν των σφαλμάτων διασφαλίζει την πιστή τήρηση των WPS και των προδιαγραφών με συνέπεια λιγότερα σφάλματα στις συγκολλήσεις και τήρηση των χρόνων του έργου.

Οι έλεγχοι PT /RT/MT/UT, είναι απαραίτητοι για την αποδοχή των συγκολλήσεων σε αυτά τα έργα.

Η εμπειρία δείχνει ότι η έγκαιρη εφαρμογή των προληπτικών ελέγχων, εάν είναι σωστά δομημένοι στο χρονοδιάγραμμα και στη ροή των εργασιών, βοηθά να ολοκληρωθεί ένα έργο όπως έχει οριστεί αρχικά στο χρόνο του χωρίς ιδιαίτερα προβλήματα στην ποιότητα και στο συνολικό κόστος.

6.7 Ανάλυση ρίσκου σε επίπεδο έργου (Project-level risk analysis)

Ένα βασικό εργαλείο διαχείρισης στα τεχνικά έργα και ιδιαιτέρως στις συγκολλήσεις είναι η ανάλυση ρίσκου σε επίπεδο έργου. Εξετάζεται η συνολική επίδραση των συγκολλήσεων στο χρονοδιάγραμμα, στο κόστος στη λειτουργική ακεραιότητα και την αξιοπιστία της εγκατάστασης.

Το ρίσκο στις συγκολλήσεις μπορεί να οριστεί ως η πιθανότητα εμφάνισης γεγονότων που επηρεάζουν αρνητικά την τεχνική αρτιότητα των συγκολλήσεων, το χρόνο ολοκλήρωσης του έργου, την ασφάλεια και τη διαθεσιμότητα της εγκατάστασης και φυσικά το συνολικό κόστος του έργου.

Για τις ανάγκες της ανάλυσης, το ρίσκο διακρίνεται σε τρεις βασικές κατηγορίες οι οποίες είναι αλληλένδετες μεταξύ τους, σχετίζονται με τις συγκολλήσεις και το πρόβλημα που μπορούν να προκαλέσουν σε επίπεδο τεχνικό, χρονικό και οικονομικό.

Πιο αναλυτικά:

- το τεχνικό ρίσκο αφορά την πιθανότητα εμφάνισης ελαττωμάτων ή αστοχιών
- το χρονικό ρίσκο σχετίζεται με την πιθανότητα καθυστερήσεων στο χρονοδιάγραμμα λόγω προβλημάτων στις συγκολλήσεις
- το οικονομικό ρίσκο σχετίζεται με την πιθανότητα υπέρβασης του προϋπολογισμού λόγω επίσης προβλημάτων στις συγκολλήσεις

Ο Πίνακας 6.7.1 χρησιμοποιείται για να συνοψίσει τους κινδύνους των (3) έργων.

Πίνακας 6.7.1 – Σύγκριση κινδύνων στα τρία έργα

Κλίμακα: Χαμηλό / Μέτριο / Υψηλό			
Διάσταση κινδύνου	Έργο Α – Βιομηχανικό (GTAW root + SMAW fill, sockets/tie-ins)	Έργο Β – TAP (mechanized/semi-auto GMAW, tie-ins SMAW)	Έργο Γ – Σιδηροκατασκευή (shop GMAW, field rework SMAW)
Τεχνικός κίνδυνος (πιθανότητα ελαττωμάτων / επισκευές)	Υψηλός	Μέτριος	Μέτριος
Χρονικός κίνδυνος (καθυστερήσεις από holds/loops)	Υψηλός	Μέτριος	Μέτριος
Οικονομικός κίνδυνος (CoQ & delay cost)	Υψηλός	Χαμηλός–Μέτριος	Μέτριος
Κυρίαρχο hotspot	Γεμίσματα + sockets + tie-ins	Tie-ins	Επαναληπτικές εργασίες στο πεδίο (μη προγραμματισμένες)
NDT/loops exposure	Υψηλή (late findings → rework loop)	Χαμηλή–Μέτρια (VT gate μειώνει loops)	Χαμηλή στο ατελιέ / Μέτρια στην επανάληψη εργασιών
Συνολικό risk profile	ΥΨΗΛΟ	METPIO	METPIO

Αντίστοιχα ο Πίνακας 6.7.2 χρησιμοποιείται για να συνοψίσει τους παράγοντες κινδύνου και τις αιτίες πρόκλησής τους για κάθε έργο.

Πίνακας 6.7.2 – Παράγοντες κινδύνου στα τρία έργα

Έργο	Παράγοντες Κινδύνου	Αιτία
Έργο Α	SMAW στα γεμίσματα, sockets, tie-ins, bottlenecks RT/PT	Μεγαλύτερη μεταβλητότητα + πιθανότητα καθυστερημένης απόρριψης → κύκλος εργασιών NDT → Κόστος Ποιότητας και χρονική καθυστέρηση
Έργο Β - TAP	Tie-ins με SMAW, περιβάλλον χαντάκι σε δύσκολες περιοχές, RT/PT εκτεταμένα	Τα tie-ins είναι χειροκίνητα & περιορισμένα → μεγαλύτερο ρίσκο από τις αυτοματοποιημένες συγκολλήσεις
Έργο Γ	Μη προγραμματισμένες εργασίες στο πεδίο λόγω λάθους, SMAW στο πεδίο, μοντάρισμα	Οι εργασίες επισκευών στο πεδίο έχουν δυσανάλογη επίπτωση σε χρόνο, κόστος ποιότητας

Από τους παραπάνω πίνακες βλέπουμε ότι το Έργο Α εμφανίζει το υψηλότερο συνολικό προφίλ κινδύνου, καθώς συνδυάζει υψηλή πιθανότητα επισκευών (γεμίσματα / sockets / tie-ins) με αυξημένη έκθεση σε NDT loops και hold points, τα οποία μετατρέπουν τεχνικές αποκλίσεις σε καθυστερήσεις και αυξημένο κόστος ποιότητας. Στο έργο Β (TAP), η τυποποίηση / μηχανοποίηση περιορίζει τις επανεργασίες στις κύριες συγκολλήσεις όμως τα tie-ins παραμένουν το βασικό σημείο αυξημένου κινδύνου. Στη σιδηροκατασκευή, η παραγωγή στο εργοστάσιο είναι σταθερή, αλλά όταν προκύψει field rework (λόγω λάθους) η επίδραση σε χρόνο και στο κόστος ποιότητας είναι δυσανάλογη.

Με την βάση την ανάλυση των τριών έργων, η αξιολόγηση του ρίσκου δεν περιορίζεται μόνο στην πιθανότητα εμφάνισης ελαττωμάτων αλλά περιλαμβάνει τον τρόπο με τον οποίο τα ελαττώματα επηρεάζουν τον χρόνο του έργου, το συνολικό κόστος, την ποιότητα και σε συνολική εικόνα αποτίμησης την τελική αξιοπιστία του έργου. Ο πίνακας 6.7.3 συγκεντρώνει τα βασικά κριτήρια που χρησιμοποιούνται για την τελική αξιολόγηση και δείχνει ουσιαστικά ποιες παρεμβάσεις μειώνουν το ρίσκο.

Πίνακας 6.7.3 — Συγκεντρωτικός πίνακας αξιολόγησης ρίσκου και τρόπος παρέμβασης.

Κριτήριο	Τι αξιολογεί	Δείκτης / Απόδειξη	Στόχος	Επίτευξη στόχου
Παραγωγικότητα (Arc Time)	Πόσος χρόνος είναι πραγματικά παραγωγικός	Arc Time %, Welding Efficiency	Αύξηση του παραγ/κού χρόνου Αύξηση της συγκολλητικής αποτελεσματικότητας	Αλληλουχίες εργασιών, μείωση αναμονών, σωστός προγραμματισμός ελέγχων
Μη παραγωγικός χρόνος	Πού χάνεται χρόνος (fit-up, αναμονές, αλλαγές, υλικά)	Κατανομή χρόνου	Μείωση του μη παραγωγικού χρόνου	Διαχείριση: του επαγγελματικού χώρου και του κρίσιμου σημείου του μονταρίσματος, ομαδοποίηση NDT
Ποιότητα (repairs/rework)	Συχνότητα / ένταση επανεργασιών	Ρυθμός Επισκευών, σύνολο επισκευών, hotspots	Μείωση των επισκευών, μείωση των κύκλων εργασιών (loops)	Οπτικός έλεγχος πριν PT/RT/UT, τήρηση των πασσών (π.χ. sockets ≥ 2), έλεγχος των αναλωσίμων SMAW (π.χ ψήσιμο ηλεκτροδίων)
NDT loops / κρίσιμα σημεία ελέγχου	Πόσο “σπάει” η ροή από ελέγχους & επαναλήψεις	NDT cycle time, αριθμός κύκλων εργασιών (loops), hold points	Μείωση των κύκλων εργασιών (loops), μείωση των αργοπορημένων απορρίψεων	Ανεξάρτητος οπτικός έλεγχος, σαφές ITP, παράλληλοι έλεγχοι, πρωτόκολλο γρήγορης επισκευής
Κόστος Ποιότητας	Πρόληψη / Εκτίμηση / Αποτυχία / έλεγχος καθυστέρησης	Πίνακες Κόστους Ποιότητας + Διάγραμμα Κόστους Ποιότητας	Μείωση της αποτυχίας + της καθυστέρησης, βελτιστοποίηση εκτίμησης	Επένδυση σε πρόληψη/έλεγχο εκεί που μειώνει την αποτυχία (right-first-time)
Χρονικός κίνδυνος (Κίνδυνος χρονοδιαγράμματος)	Πιθανότητα καθυστέρησης λόγω κύκλων εργασιών (loops) / αναμονές	Πίνακες κινδύνου (risk matrices) + σεναρία	Μείωση του κινδύνου στο χρονοδιάγραμμα	Προγραμματισμός ελέγχων, γρήγορος κύκλος επισκευή - επανέλεγχος, κλείσιμο dossier εβδομαδιαία

Κριτήριο	Τι αξιολογεί	Δείκτης / Απόδειξη	Στόχος	Επίτευξη στόχου
Τεχνικός κίνδυνος	Πιθανότητα αστοχίας / απόρριψης	Ευρήματα (VT/PT/RT/UT), κίνδυνοι στα tie-ins	Μείωση του κινδύνου ακεραιότητας	Θέτουμε κρίσιμο σημείο ελέγχου το μοντάρισμα, ακολουθούμε πιστά τα WPS, ελέγχοι στα hotspots (tie-ins, sockets, γεμίσματα)
Περιβάλλον εφαρμογής (Ατελιέ # πεδίο)	Μεταβλητότητα λόγω πρόσβασης / καιρού / συμφόρησης	Σύγκριση Ατελιέ – Εργοτάξιο	Αύξηση προκατασκευής	Μεγιστοποίηση της προκατασκευής στο ατελιέ, συγκολλήσεις στο πεδίο (field welds) μόνο όπου είναι απαραίτητο
Περιβαλλοντικό αποτύπωμα	Σπατάλη πόρων λόγω επαναληπτικών εργασιών	Επισκευές → επιπλέον αναλώσιμα / ενέργεια / scrap	Μείωση του αποτυπώματος των επανεργασιών	Σωστή αρχική κατασκευή, μείωση cut-outs/ επισκευών, ελαχιστοποίηση επαναληπτικών εργασιών στο εργοτάξιο
Συμμόρφωση / τεκμηρίωση	Κίνδυνος close-out καθυστερήσεων	Φάκελοι συγκολλήσεως / ITP, κλείσιμο φακέλων	Να μην υπάρχουν εκπλήξεις	Εβδομαδιαίο κλείσιμο των εγγράφων, σαφές πακέτο αποδείξεων, ορισμός του hold/witness

Από τον παραπάνω πίνακα προκύπτει ότι οι πιο αποτελεσματικές παρεμβάσεις είναι αυτές που εφαρμόζονται πριν δημιουργηθεί το πρόβλημα και όχι μετά την απόρριψη της συγκόλλησης.

Για να μπορεί η παραπάνω ανάλυση να χρησιμοποιηθεί σε μελλοντικά έργα τα κριτήρια αξιολόγησης πρέπει να συνδεθούν με συγκεκριμένα βήματα ώστε να αποφευχθούν οι επιπτώσεις των κινδύνων. Ο πίνακας 6.7.4 που ακολουθεί παρουσιάζει τα βασικά σημεία που πρέπει να ελεγχθούν από τον μηχανικό του έργου και τους υπεύθυνους ποιότητας πριν και κατά τις συγκολλήσεις.

Πίνακας 6.7.4 — Κρίσιμα κριτήρια επιρροής των εργασιών συγκόλλησης σε τεχνικά έργα

Κρίσιμα Κριτήρια	Εφαρμογή	Μη εφαρμογή	Ενέργειες
Οπτικός έλεγχος πριν τα NDT	Όταν υπάρχουν καθυστερημένες απορρίψεις / κύκλοι εργασιών (loops)	Όταν δεν υπάρχουν loops και τα NDT είναι άμεσα	Βάζουμε ανεξάρτητο οπτικό έλεγχο ως φίλτρο
Μοντάρισμα – ορισμός κρίσιμου σημείου ελέγχου (hold point)	Όταν έχουμε Tie-ins και δύσκολα σημεία με κίνδυνο απόρριψη συγκόλλησης	Σε καθαρή ροή χωρίς θέματα μονταρίσματος (fit-up)	Έλεγχος της ευθυγράμμισης των σωληνώσεων και του κενού της ρίζας (gap)
Ομαδοποίηση των NDT's	Όταν τα NDT's δημιουργούν αναμονές	Όταν τα NDT's κλείνουν άμεσα χωρίς συσσώρευση εργασιών	Ορίζουμε “παράθυρα” RT/UT/PT
Πρωτόκολλο γρήγορης επισκευής	Όταν οι επισκευές δημιουργούν πληθώρα καθυστερήσεων	Όταν οι επισκευές είναι λίγες και κλείνουν γρήγορα	Δίνουμε προτεραιότητα στον κύκλο εργασιών: κοπή συγκόλλησης (cut-out) → επανασυγκόλληση → επανέλεγχος
Μέγιστη προκατασκευή ατελιέ	Όταν έχουμε επαναλήψεις εργασιών του ατελιέ στο πεδίο και υπάρχει αστάθεια πεδίου	Το έργο είναι πλήρως πεδίου (π.χ. pipeline)	Μεταφορά όσο γίνεται στον χώρο της προκατασκευής (ατελιέ, εργοστάσιο)

Από τον πίνακα 6.7.4 τελικά φαίνεται ότι η συγκόλληση επηρεάζει το έργο σε περισσότερα από ένα επίπεδα. Δεν επηρεάζει απλά τεχνικά την ποιότητα της σύνδεσης αλλά και τη ροή των εργασιών, που συνεπάγεται το χρονικό προγραμματισμό του έργου, το κόστος του έργου με τελικό αποδέκτη την αξιοπιστία της κατασκευής. Γι’ αυτό το λόγο η επιλογή της μεθόδου συγκόλλησης πρέπει να γίνεται μαζί με το σχεδιασμό των ελέγχων και όχι ανεξάρτητα από αυτούς.

Μετά την ανάλυση των τριών έργων και την αποτίμηση του ρίσκου σε επίπεδο έργου είναι αναγκαίο τα επιμέρους συμπεράσματα να μετατραπούν σε πρακτική στρατηγική διαχείρισης των συγκολλήσεων. Η στρατηγική αυτή δεν αλλάζει τα δεδομένα αλλά τα συγκεντρώνει και τα αξιολογεί ώστε να δώσει χρήσιμες και ουσιαστικές προτάσεις στην πράξη. Στόχος είναι να φανεί ποια προσέγγιση μειώνει τις επισκευές, το κόστος της ποιότητας και το ρίσκο. Για το

λόγο αυτό ακολουθεί μια ενότητα αξιολόγησης των στρατηγικών που προέκυψαν από την ανάλυση των έργων.

6.8 Πρόταση και αξιολόγηση στρατηγικής διαχείρισης συγκολλήσεων.

Με βάση όλη την εργασία και τα συμπεράσματα στα οποία καταλήξαμε, δημιουργήθηκε μία λίστα δεικτών που επηρεάζουν την κατασκευή των τεχνικών έργων. Δίνοντας ένα βαθμό στον κάθε δείκτη ανάλογα με την βαρύτητά του, φτιάχτηκε ο παρακάτω πίνακας 6.8.1. όπου αναφέρονται οι δείκτες και η βαρύτητά τους σε ένα τεχνικό έργο.

Πίνακας 6.8.1 — Δείκτες επιρροής έργων και η βαρύτητά τους

Δείκτες	Βαρύτητα
Παραγωγικότητα (Arc Time / Efficiency)	20%
Ποιότητα (επισκευές / επανεργασίες)	20%
NDT loops / Hold points (cycle time, late rejects)	15%
Κόστος Ποιότητας (Πρόληψη – Εκτίμηση – Αποτυχία – Καθυστερήση συνολικά)	20%
Χρονική καθυστέρηση	15%
Συμμόρφωση / τεκμηρίωση (close-out risk)	10%
Σύνολο	100%

Ακολουθώντας τον πίνακα δημιουργήσαμε τις ακόλουθες στρατηγικές :

- S1 Right-first-time: Εισαγωγή Οπτικού ελέγχου + fit-up hold + NDT windows + fast repair protocol
- S2 Run fast: ελάχιστοι έλεγχοι “τρέχουμε” (υψηλό ρίσκο αργοπορημένα ευρήματα αστοχίας)
- S3 Max shop prefabrication: μεταφέρουμε την κατασκευή όσο γίνεται σε ατελιέ (μείωση επί τόπου συγκολλήσεων)

και τις βαθμολογήσαμε ώστε να τις συγκρίνουμε αντίστοιχα. Έτσι λοιπόν καταλήξαμε στον πίνακα 6.8.2 που ακολουθεί, όπου με μια κλίμακα από 1(κακό) έως 5 (άριστα) βαθμολογήθηκαν οι στρατηγικές.

Πίνακας 6.8.2 — Αξιολόγηση στρατηγικών

Δείκτες (βάρος)	S1 Right- first- time	Σύνολο S1	S2 Run fast	Σύνολο S2	S3 Max shop prefabrication	Σύνολο S2
Παραγωγικότητα (20%)	4	0,8	5	1	4	0,8
Ποιότητα (20%)	5	1	2	0,4	4	0,8
NDT loops / Holds (15%)	5	0,75	2	0,3	4	0,6
CoQ συνολικά (20%)	5	1	2	0,4	4	0,8
Schedule risk (15%)	5	0,75	2	0,3	4	0,6
Συμμόρφωση/τεκμηρίωση (10%)	4	0,4	2	0,2	4	0,4
Τελικό Weighted Score /5		4,7		2,6		4

Συμπέρασμα (γενικό): S1 > S3 >> S2

Από τον πίνακα 6.8.2 προκύπτει ότι η στρατηγική «Right-first-time» συγκεντρώνει την καλύτερη βαθμολογία. Με άλλα λόγια η σωστή εκτέλεση από την αρχή μειώνει τις πιθανότητες να δημιουργηθεί πρόβλημα αργότερα στο έργο, όπου κάτι τέτοιο θα κοστίσει σε εκείνη τη φάση πολύ περισσότερο.

Η στρατηγική της γρήγορης παραγωγής έχει την πιο χαμηλή βαθμολογία. Φυσικά έχει υψηλή παραγωγικότητα όμως χάνει από τους υπόλοιπους δείκτες πράγμα που σημαίνει ότι θα την πληρώσεις αργότερα την επιτάχυνση με τους αργοπορημένους ελέγχους και τις επισκευές.

Τέλος η στρατηγική να μεγιστοποιηθεί η προκατασκευή και να μειωθούν οι επί τόπου συγκολλήσεις είναι σωστή αλλά λίγο πιο χαμηλά στη βαθμολογία. Ουσιαστικά είναι μία



στρατηγική που προσφέρει σταθερές τιμές απλά δεν μπορεί να εφαρμοστεί πλήρως σε κάποιες περιπτώσεις όπου οι επί τόπου συγκολλήσεις είναι απαιτητές.

Ήτοι: η σωστή αρχική κατασκευή αξιολογείται πιο ψηλά από την μεγιστοποίηση της προκατασκευής και αυτή με τη σειρά της είναι σε καλύτερη μοίρα από την γρήγορη προσέγγιση και έτσι προτείνεται. Επίσης σε τεχνικά έργα προτείνεται ο συνδυασμός των δύο αυτών στρατηγικών ως απόσταγμα επιρροής κόστους ποιότητας, χρόνου έργου και αξιοπιστίας κατασκευής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

ΚΑΝΟΝΙΣΤΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΚΑΙ ΠΡΟΤΥΠΑ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΩΝ ΣΕ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΑ ΕΡΓΑ

Στο κεφάλαιο αυτό συγκεντρώνεται το κανονιστικό πλαίσιο που συναντάται συχνότερα σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις και σε έργα διυλιστηρίων. Εδώ εξηγείται πώς οι απαιτήσεις προτύπων/κανονισμών μεταφράζονται σε πρακτικές απαιτήσεις (πιστοποιήσεις (WPS/PQR/WPQ), hold points, NDT's, τήρηση αρχείων για την τεκμηρίωση και τέλος το κλείσιμο των τεχνικών φακέλων του έργου. Η σύνδεση με τα προηγούμενα κεφάλαια είναι άμεση: στο Κεφάλαιο 6 φάνηκε ότι οι επισκευές και τα NDT loops ανεβάζουν το κόστος ποιότητας (CoQ) και δημιουργούν καθυστερήσεις.

7.1 Ρόλος προτύπων και κανονισμών στη συγκόλληση

Στα βιομηχανικά έργα, τα πρότυπα δεν λειτουργούν ως «θεωρία». Καθορίζουν τι θεωρείται αποδεκτή συγκόλληση, ποιος έχει δικαίωμα να την εκτελέσει, ποια έγγραφα πρέπει να υπάρχουν και πότε «σταματά» ή «προχωρά» η παραγωγή. Αυτό πρακτικά επηρεάζει την παραγωγικότητα και το κόστος της ποιότητας (CoQ), γιατί οι απαιτήσεις ελέγχων - τεκμηρίωσης δημιουργούν κρίσιμα σημεία ελέγχου (hold points) και, αν δεν οργανωθούν σωστά, οδηγούν σε αναμονές και επαναλήψεις.

7.2 Συνήθη πλαίσια: ASME B31.3- EN – PED

Σε διυλιστήρια και αγωγούς συναντάται συχνά το ASME B31.3 (Process Piping) ως κύριος κώδικας σχεδιασμού και κατασκευής. Σε ευρωπαϊκές εφαρμογές συναντώνται επίσης τα EN (ενδεικτικά EN 13480 για βιομηχανικές σωληνώσεις) και όπου εμπίπτει η οδηγία PED. Η ουσία για την παρούσα εργασία είναι ότι οι κανονισμοί αυτοί ορίζουν επίπεδα ελέγχων, απαιτήσεις πιστοποίησης και τεκμηρίωση, άρα επηρεάζουν άμεσα το κόστος της ποιότητας (CoQ /Prevention/Appraisal/Failure/Delay).

7.3 Πιστοποιήσεις – Διαδικασίες : WPS – PQR – WPQ και πρακτική σημασία

Η προδιαγραφή της μεθόδου ακολουθεί μια απλή λογική: πρώτα τεκμηριώνεται η διαδικασία (WPS/PQR) και μετά πιστοποιείται ο συγκολλητής (WPQ). Στην πράξη, όταν αυτά είναι ξεκάθαρα και διαθέσιμα από την αρχή, μειώνονται οι παρερμηνείες στο πεδίο, οι αποκλίσεις από WPS καθώς και οι επισκευές (repairs) που εμφανίζονται αργότερα μέσω NDT. Για τον λόγο αυτό, η ύπαρξη ολοκληρωμένου συστήματος καταγραφής ενσωματώνεται στο κόστος πρόληψης (prevention cost) και τελικά μειώνει το κόστος αστοχίας.

7.4 Πλάνο επιθεώρησης (ITP) – Σημεία κρίσιμα / μαρτυρίες (Hold / Witness points) και “πραγματική” ροή έργου

Το πλάνο επιθεώρησης (ITP) ορίζει τα σημεία ελέγχου (hold/witness). Ένα κρίσιμο σημείο (hold point) σημαίνει ότι οι εργασίες δεν προχωράνε χωρίς την αποδοχή της ποιότητας. Αν ο χρονισμός των ελέγχων δεν είναι σωστός, δημιουργείται συσσώρευση εργασιών (bottleneck) με συνέπειες συνεργεία σε αναμονή, μετακινήσεις των εργασιών, καθώς και πολύ χαμένος παραγωγικός χρόνος.

Γι’ αυτό στα συμπεράσματα του Κεφαλαίου 6 προτάθηκε οπτικός έλεγχος (VT) πριν από τους υπόλοιπους μη καταστροφικούς ελέγχους (PT/RT/UT) και ορισμός του fit-up ως κρίσιμου σημείου (hold point) πριν από τη ρίζα στα tie -ins. Αυτές οι παρεμβάσεις μειώνουν τις επαναληπτικές εργασίες ήτοι συγκόλληση – έλεγχος - απόρριψη – επισκευή- επανέλεγχος.

7.5 Μη καταστροφικοί έλεγχοι (NDT’s : VT/PT/RT/UT): τι καλύπτουν, γιατί χρειάζεται ο συνδυασμός

Ο οπτικός (VT) είναι ο πρώτος και πιο άμεσος έλεγχος και δεν «αντικαθιστά» τους υπολοίπους ελέγχους (RT/UT/PT), τους συμπληρώνει, γιατί μπορεί να εντοπίσει έγκαιρα επιφανειακά/γεωμετρικά θέματα πριν αυτά καταλήξουν σε απόρριψη στο RT/UT.

Το PT χρησιμοποιείται κυρίως για επιφανειακές ασυνέχειες.

Οι RT/UT χρησιμοποιούνται για εσωτερικές ασυνέχειες και η επιλογή τους καθορίζεται από τον μελετητή την προδιαγραφή του έργου καθώς και από τις απαιτήσεις του πελάτη.

7.6 Τεκμηρίωση – Weld dossier – Close-out

Σε βιομηχανικά έργα, το “κλείσιμο” δεν είναι μόνο ότι εκτελέστηκε μια συγκόλληση. Πρέπει να υπάρχει πλήρης τεχνικός φάκελος ο οποίος περιέχει τα WPS τα PQR και τις πιστοποιήσεις των συγκολλητών (WPQ's). Επίσης έχουμε το welding map όπου είναι τα τελικά σχέδια με την ταυτότητα κάθε συγκόλλησης (συγκολλητής, ημερομηνία, WPS) το WIR ή log (αριθμός σχεδίου, συγκολλητής διάμετρος-πάχος σωλήνας, αναφορές NDT's reports κλπ), ITP records, NDT's reports διαγράμματα από τις θερμικές κατεργασίες κλπ. Αυτά πρέπει να παραδοθούν στον πελάτη συμπληρωμένα και υπογεγραμμένα συνήθως από τον κατασκευαστή, το Τρίτο Γραφείο (Third Party) και τον ιδιοκτήτη.

7.7 Σύνδεση κανονισμών με παραγωγικότητα, κόστος ποιότητας και ρίσκο (σύνοψη)

Αν το δούμε συνολικά οι κανονισμοί αυξάνουν το κόστος πρόληψης -ελέγχου (prevention /appraisal), αλλά μειώνουν τον κίνδυνο αστοχίας.

Το πρόβλημα δεν είναι οι έλεγχοι, αλλά οι αργοπορημένες απορρίψεις (late rejects) και οι κύκλοι εργασιών (loops) που προκύπτουν όταν οι έλεγχοι δεν ενσωματώνονται σωστά στη ροή. Γι' αυτό οι τελικές προτάσεις του Κεφαλαίου 6 (VT gate, fit-up hold point, batching NDT, fast repair protocol) είναι στην πράξη ο πιο αποτελεσματικός τρόπος για να μειωθεί το συνολικό της ποιότητας (CoQ) χωρίς να «χαλαρώσει» η συμμόρφωση.

Τέλος, η μείωση επανεργασιών (rework) μειώνει όχι μόνο το κόστος και τις καθυστερήσεις, αλλά και την άσκοπη κατανάλωση πόρων (αναλώσιμα/ενέργεια) και αποβλήτων (scrap), άρα υποστηρίζει πρακτικά στόχους βιωσιμότητας και ανθεκτικότητας (sustainability & resilience) σε επίπεδο έργου.

Ο Πίνακας 7.7.1 χρησιμοποιείται για να συνοψίσει τα βασικά κριτήρια με τους κώδικες.

Πίνακας 7.7.1: Συγκριτική θεώρηση των πλαισίων ASME, EN και PED ως προς τη συγκόλληση, τους ελέγχους, την τεκμηρίωση, το κόστος και το ρίσκο σε τεχνικά έργα.

Κριτήριο σύγκρισης	ASME	EN / EN ISO	PED
Φύση πλαισίου	Κώδικας τεχνικού σχεδιασμού και κατασκευής, με ιδιαίτερη εφαρμογή σε process piping και βιομηχανικές εγκαταστάσεις.	Σύστημα ευρωπαϊκών προτύπων που καθορίζουν τεχνικές απαιτήσεις κατασκευής, συγκόλλησης, ελέγχων και πιστοποίησης.	Κανονιστικό / νομοθετικό πλαίσιο για εξοπλισμό υπό πίεση στην Ευρωπαϊκή Ένωση.
Βασικός προσανατολισμός	Τεχνικός και μηχανολογικός προσανατολισμός, με έμφαση στην καταλληλότητα για χρήση και στην ασφαλή λειτουργία.	Προτυποποιημένη και περισσότερο τυποποιημένη τεχνική προσέγγιση, με σαφείς απαιτήσεις εφαρμογής.	Συμμόρφωση με τις απαιτήσεις ασφάλειας, αξιολόγησης και τεκμηρίωσης για εξοπλισμό υπό πίεση.
Πεδίο εφαρμογής	Βιομηχανικές σωληνώσεις διεργασιών, διυλιστήρια, ενεργειακές εγκαταστάσεις, χημικές και πετροχημικές μονάδες.	Βιομηχανικές σωληνώσεις, μεταλλικές κατασκευές και συγκολλήσεις σε ευρωπαϊκό τεχνικό περιβάλλον.	Εξοπλισμός και σωληνώσεις που εμπίπτουν στην ευρωπαϊκή νομοθεσία περί εξοπλισμού υπό πίεση.
Σχέση με τις συγκολλήσεις	Καθορίζει απαιτήσεις για διαδικασίες συγκόλλησης, qualification, ελέγχους και αποδοχή ραφών.	Καθορίζει με μεγαλύτερη τυποποίηση τις διαδικασίες WPS/WPQR/WPQ, τους ελέγχους και τη συμμόρφωση.	Επηρεάζει τις συγκολλήσεις έμμεσα αλλά ουσιαστικά μέσω απαιτήσεων συμμόρφωσης, πιστοποίησης και τεκμηρίωσης.
Φιλοσοφία εφαρμογής	Πιο ευέλικτη και τεχνικά προσανατολισμένη, με δυνατότητα μηχανικής κρίσης ανάλογα με το έργο.	Πιο περιγραφική και προτυποποιημένη, με αυξημένη τυποποίηση απαιτήσεων και διαδικασιών.	Πιο αυστηρή ως προς τη συμμόρφωση, με έμφαση στη ρυθμιστική πληρότητα και στην αποδεδειγμένη τήρηση απαιτήσεων.
Προσέγγιση στους NDT	Εφαρμογή ελέγχων βάσει κατηγορίας υπηρεσίας, υλικού, κρισιμότητας και απαιτήσεων έργου.	Πιο σαφής και τυποποιημένη σύνδεση ελέγχων με πρότυπα, κατηγορίες αποδοχής και επίπεδα εφαρμογής.	Οι έλεγχοι εντάσσονται στο συνολικό πλαίσιο υποχρεωτικής συμμόρφωσης και τεκμηρίωσης, όπου απαιτείται.
Προσέγγιση στο PWH	Εφαρμόζεται υπό συγκεκριμένες τεχνικές προϋποθέσεις, ανά υλικό, πάχος και συνθήκες λειτουργίας.	Συνήθως αποτυπώνεται με περισσότερο σαφείς και τυποποιημένες απαιτήσεις ανά πρότυπο και υλικό.	Η απαίτηση PWHT συνδέεται με το εφαρμοζόμενο τεχνικό πρότυπο και τη νομική υποχρέωση συμμόρφωσης του εξοπλισμού.
Βαρύτητα τεκμηρίωσης	Υψηλή, αλλά με μεγαλύτερη έμφαση στην τεχνική επάρκεια και τη μηχανολογική τεκμηρίωση.	Υψηλή και περισσότερο δομημένη, με έντονη απαίτηση για πλήρη τεκμηρίωση διαδικασιών και ελέγχων.	Πολύ υψηλή, καθώς η τεκμηρίωση αποτελεί βασικό στοιχείο της κανονιστικής αποδοχής.
Επίδραση στο χρονοδιάγραμμα	Μέτρια έως υψηλή, ανάλογα με την κρισιμότητα του έργου και το επίπεδο ελέγχων.	Υψηλότερη επιβάρυνση λόγω τυποποίησης, ελέγχων και απαιτήσεων τεκμηρίωσης.	Συχνά σημαντική, καθώς οι απαιτήσεις συμμόρφωσης, εγκρίσεων και τεκμηρίωσης επηρεάζουν άμεσα τη ροή του έργου.
Επίδραση στο αρχικό κόστος	Αυξάνει το κόστος πρόληψης και ελέγχου σε μέτριο έως υψηλό βαθμό.	Αυξάνει περισσότερο το αρχικό κόστος συμμόρφωσης λόγω αυξημένης τυποποίησης και τεκμηρίωσης.	Ενδέχεται να αυξήσει σημαντικά το αρχικό κόστος συμμόρφωσης, ιδιαίτερα σε έργα εξοπλισμού υπό πίεση.

Κριτήριο σύγκρισης	ASME	EN / EN ISO	PED
Επίδραση στο κόστος αστοχίας	Συμβάλλει στη μείωση του κόστους αστοχίας μέσω τεχνικού ελέγχου και qualification.	Συμβάλλει περαιτέρω στη μείωση αστοχιών μέσω συστηματικής τυποποίησης και ελέγχων.	Μπορεί να περιορίσει σημαντικά το κόστος αστοχίας, καθώς ενισχύει τη συμμόρφωση, την ιχνηλασιμότητα και την επιθεωρησιμότητα.
Σχέση με το CoQ	Μετατοπίζει μέρος του κόστους προς την πρόληψη και τον έλεγχο.	Ενισχύει περισσότερο το κόστος πρόληψης/ελέγχου, με σκοπό τη μείωση του κόστους αποτυχίας.	Συνδέεται με υψηλό κόστος συμμόρφωσης, αλλά δύναται να μειώσει δραστικά το κόστος αστοχίας και αποκλίσεων.
Σχέση με τη διαχείριση ρίσκου	Μειώνει το τεχνικό ρίσκο μέσω τεχνικών απαιτήσεων και ορίων αποδοχής.	Μειώνει τεχνικό και διαχειριστικό ρίσκο μέσω αυστηρότερης τυποποίησης και σαφήνειας διαδικασιών.	Μειώνει το κανονιστικό και διαχειριστικό ρίσκο, ενισχύοντας την αποδεδειγμένη συμμόρφωση του έργου.
Καταλληλότητα σε διεθνή έργα	Πολύ υψηλή, ιδιαίτερα σε έργα πετρελαίου, φυσικού αερίου, διύλισης και process piping.	Πολύ υψηλή σε ευρωπαϊκά έργα και σε περιβάλλοντα που απαιτούν εναρμόνιση με EN/ISO πρότυπα.	Ιδιαίτερα κρίσιμη σε έργα εντός της Ευρωπαϊκής Ένωσης που εμπίπτουν στη νομοθεσία εξοπλισμού υπό πίεση.

Από τον Πίνακα 7.7.1 προκύπτει ότι τα τρία αυτά πλαίσια δεν λειτουργούν ανταγωνιστικά αλλά συμπληρωματικά, καθώς το καθένα καλύπτει διαφορετική διάσταση της τεχνικής και κανονιστικής οργάνωσης των συγκολλήσεων. Ο ASME παρέχει τεχνική ευελιξία και ισχυρό μηχανολογικό υπόβαθρο, τα πρότυπα EN ενισχύουν την τυποποίηση και τη σαφήνεια εφαρμογής, ενώ η PED προσθέτει τη διάσταση της κανονιστικής συμμόρφωσης και της νομικά τεκμηριωμένης αποδοχής.

Στον πίνακα 7.7.2 που ακολουθεί έχουμε τους κανονισμούς ανά υλικό και βλέπουμε ότι έχουμε την πιο αυστηρή τεκμηρίωση στα κράματα με τους ευρωπαϊκούς κανονισμούς.

Πίνακας 7.7.2: Απαιτήσεις NDT ανά κανονισμό και υλικό

Υλικό	Κανονισμός	Butt Welds	Socket Welds	Παρατηρήσεις
Carbon Steel	ASME B31.3	RT 10–20%	VT / PT	Ανά κλάση γραμμής
P11 / P22	ASME B31.3	RT ή UT 100%	PT / RT	Υψηλή κρισιμότητα

Υλικό	Κανονισμός	Butt Welds	Socket Welds	Παρατηρήσεις
P5 / P9	ASME B31.3 + PED	RT 100%	PT + RT	Πριν & μετά PWHT
Carbon Steel	EN 13480	RT/UT $\geq$ ASME	PT	
Cr–Mo	EN 13480 + PED	RT/UT 100%	PT + RT	Αυστηρή τεκμηρίωση

Στη συνέχεια έπεται ο Πίνακας 7.7.3 χρησιμοποιείται για να συνοψίσει τα βασικά δεδομένα της ενότητας και να διευκολύνει τη σύγκριση τεχνικών, ποιοτικών και οικονομικών παραμέτρων.

Πίνακας 7.7.3: Επίδραση κανονισμών στο CoQ

Κανονισμός	Κόστος Πρόληψης	Κόστος Αστοχίας	Συνολικό CoQ
ASME μόνο	Μέτριο	Μέτριο	Μέτριο
ASME + EN	Υψηλό	Χαμηλό	Μέτριο
ASME + EN + PED	Πολύ Υψηλό	Πολύ Χαμηλό	Χαμηλότερο

Από τον πίνακα 7.7.3 βλέπουμε ότι οι κανονισμοί αυξάνουν το κόστος πρόληψης και ελέγχου, αλλά μειώνουν δραστικά το κόστος αστοχίας. Αυτό επιβεβαιώνεται από τη συγκριτική ανάλυση των έργων του Κεφαλαίου 5.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ & ΤΕΛΙΚΕΣ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Στο κεφάλαιο αυτό θα έχουμε τα τελικά συμπεράσματα όλης της ανάλυσης τα οποία αφορούν τις μεθόδους συγκόλλησης ως προς την παραγωγικότητα, το κόστος ποιότητας, τους ελέγχους και φυσικά αποτίμηση των κινδύνων στα έργα που εξετάστηκαν με ολοκλήρωση της ενότητας όπου καταλήγει σε αξιολόγηση στρατηγικών και πρόταση για το σχεδιασμό των τεχνικών έργων.

8.1 Συνολικά συμπεράσματα

Η συγκόλληση στα τεχνικά έργα δεν είναι απλά μια “εργασία”. Είναι μια διεργασία έργου που επηρεάζει άμεσα την παραγωγικότητα, την ποιότητα, το πρόγραμμα του έργου και επίσης το τελικό κόστος του έργου.

Από την ανάλυση των τριών έργων φαίνεται ότι το αποτέλεσμα δεν καθορίζεται μόνο από τη μέθοδο (GTAW/SMAW/GMAW), αλλά κυρίως από το πώς οργανώνεται η ροή των εργασιών, τότε γίνονται οι ποιοτικοί έλεγχοι και πόσο γρήγορα ολοκληρώνονται οι επισκευές στις απορριφθείσες συγκολλήσεις.

Σε όλα τα έργα, όταν δεν υπάρχει έγκαιρος έλεγχος και σωστός χρονισμός των NDT, δημιουργούνται επαναληπτικές εργασίες (loops) ήτοι συγκόλληση – έλεγχος - απόρριψη – επισκευή- επανέλεγχος (weld → NDT reject → repair → re-test).

Αυτοί οι κύκλοι εργασιών (loops) είναι ο βασικός μηχανισμός που ανεβάζει τον μη παραγωγικό χρόνο και το κόστος της ποιότητας και κάνει το πρόγραμμα να ξεφεύγει από όλα τα όρια, δηλαδή τα χρονικά - τα οικονομικά – τα τεχνικά.

Οι παρεμβάσεις στην ποιότητα λοιπόν είναι καθοριστικές γιατί μειώνουν τις επαναληπτικές εργασίες (κύκλοι εργασιών (loops))

8.2 Συμπεράσματα για τις μεθόδους και το πεδίο εφαρμογής

- Στο βιομηχανικό έργο, ο συνδυασμός GTAW στη ρίζα και SMAW στα γεμίσματα είναι τεχνικά σωστός, αλλά τα περισσότερα προβλήματα εμφανίζονται στα γεμίσματα, στα tie-ins και στα socket welds, ειδικά όταν δεν τηρούνται βασικοί κανόνες (π.χ. ≥ 2 πάσσα στα socket welds ή 100% έλεγχος στα tie-ins)
- Στο έργο του TAP, η ρομποτική διαδικασία δίνει καλύτερη σταθερότητα στις κύριες συγκολλήσεις. Οι υβριδικές μέθοδοι είναι πιο παραγωγικές από τις χειροκίνητες όμως έχουν μεγαλύτερο ποσοστό επισκευών σε σχέση με την χειροκίνητη μέθοδο (SMAW). Συνεπώς όπου υπάρχει ανθρώπινος παράγοντας ανεβαίνει το ρίσκο και οι επισκευές.
- Στη σιδηροκατασκευή, το εργοστασιακό GMAW είναι σταθερό και παραγωγικό. Το πρόβλημα εμφανίζεται όταν πρέπει να γίνει επισκευή στο πεδίο (λόγω λάθους). Εκεί, παρότι οι συγκολλήσεις μπορεί να είναι λίγες, ο χρόνος που απαιτείται ανεβάζει το κόστος ποιότητας δυσανάλογα.

8.3 Συμπεράσματα για παραγωγικότητα και αποδοτικότητα

Ο βασικός δείκτης που μας καθοδηγεί, είναι ο παραγωγικός χρόνος (arc time) και η κατανομή του μη παραγωγικού χρόνου. Στα έργα που ο παραγωγικός χρόνος (arc time) είναι χαμηλός, δεν σημαίνει ότι οι συγκολλητές δεν δουλεύουν. Συνήθως σημαίνει ότι υπάρχουν πολλές καθυστερήσεις μονταρίσματος καθώς και αναμονές ελέγχων. Επίσης οι μετακινήσεις συνεργείων και οι επισκευές δημιουργούν αναμονές εργασιών.

Η συγκριτική εικόνα (με βάση τους πίνακες και τα διαγράμματα του Κεφ. 5) δείχνει ότι:

- Έργο Α: χαμηλός παραγωγικός χρόνος (arc time) και αυξημένες επισκευές (repairs) → χαμηλή προβλεψιμότητα.
- Έργο Β-TAP: υψηλότερος παραγωγικός χρόνος (arc time), καλύτερη ροή, αλλά οι τελικές ενώσεις ή αλλιώς τα tie-in είναι σημεία που θέλουν ιδιαίτερη προσοχή.

- Έργο Γ: καλός παραγωγικός χρόνος (arc time) στο εργοστάσιο, όμως οι επαναλήψεις εργασιών λόγω επισκευής στο εργοτάξιο κατεβάζει τους δείκτες και της παραγωγικότητας και της αποδοτικότητας.

8.4 Συμπεράσματα για NDT / κρίσιμα σημεία (hold points) / κύκλοι εργασιών (loops)

Οι έλεγχοι (VT/PT/RT/UT) δεν είναι “μετά τη συγκόλληση”. Είναι κομμάτι όλης της διαδικασίας. Όταν έχουμε ένα κρίσιμο σημείο ελέγχου (hold point) οι εργασίες σταματάνε μέχρι ένα αποδεκτό αποτέλεσμα από τους εμπλεκόμενους. Αν η αποδοχή αργήσει ή αν τα ευρήματα βγουν αργά, τότε οι κύκλοι εργασιών (loops) μεγαλώνουν.

Η πιο πρακτική διαπίστωση είναι αυτή:

Ο οπτικός έλεγχος (VT) δεν αντικαθιστά τους υπόλοιπους μη καταστροφικούς ελέγχους, RT/UT, αλλά όταν γίνεται σωστά και έγκαιρα, μειώνει τις αργοπορημένες απορρίψεις και κόβει τις επαναληπτικές εργασίες (κύκλοι εργασιών (loops)).

Άρα, το θέμα δεν είναι “να κάνουμε λιγότερους ελέγχους”, αλλά να κάνουμε τους ελέγχους σωστά και στην ώρα τους όπως προβλέπει συνήθως το χρονοδιάγραμμα του έργου.

8.5 Συμπεράσματα για το κόστος ποιότητας

Το κόστος ποιότητας βοηθά να δεις πού πραγματικά «φεύγουν» χρήματα:

- Πρόληψη (prevention): έλεγχος μονταρίσματος (fit-up checks), πειθαρχία στις προδιαγραφές, τήρηση του WPS, εφαρμογή τρόπου εργασίας σύμφωνα με τους κανόνες της τέχνης και της επιστήμης.
- Εκτίμηση (appraisal): VT/PT/RT/UT, κρίσιμα σημεία ελέγχου (hold points), τήρηση εγγράφων (documentation).
- Αστοχία (failure): επισκευές, κοπές συγκολλήσεων (cut-outs), επανάληψη ελέγχων.
- Καθυστέρηση: αναμονές για εργασίες, χαμένος ρυθμός.

Στα έργα που οι επισκευές γίνονται αργά ή εντοπίζονται αργά, η αστοχία και το κόστος λόγω της καθυστέρησης που δημιουργείται, ανεβαίνουν πολύ.

8.6 Συγκριτική αποτίμηση κινδύνων

Η αναλυτική αξιολόγηση του ρίσκου παρουσιάστηκε στην ενότητα 6.7 όπου συγκρίθηκαν τα τρία έργα ως προς το τεχνικό, το χρονικό και το οικονομικό ρίσκο. Από τη σύγκριση προέκυψε ότι παρότι τα τρία έργα έχουν διαφορετικό προφίλ κινδύνου τα βήματα που πρέπει να γίνουν ώστε να μειωθούν ταυτόχρονα και το τεχνικό και το χρονικό καθώς και το οικονομικό ρίσκο είναι:

- η έγκαιρη εφαρμογή VT
- η σωστή τήρηση των WPS
- ο έγκαιρος προγραμματισμός των ελέγχων
- η άμεση επισκευή των σφαλμάτων.

8.7 Τελικές προτάσεις (τι μειώνει πραγματικά CoQ και ρίσκο)

Οι προτάσεις που προτείνονται είναι πρακτικές κινήσεις που κόβουν τις επαναληπτικές εργασίες λόγω αστοχίας (loops) και δεν χάνεται το χρονοδιάγραμμα:

1. Ανάπτυξη στρατηγικής συγκόλλησης από τη φάση σχεδιασμού.
2. Διαφοροποίηση μεθόδων και επιπέδων ελέγχου ανά τύπο σύνδεσης και υλικό.
3. Ενσωμάτωση δεικτών παραγωγικότητας (KPI's) στη διαχείριση έργου.
4. Διαχείριση συγκολλήσεων βασιζόμενη στην ανάλυση κινδύνου.
5. Εισαγωγή υποχρεωτικού οπτικού ελέγχου πριν από RT/UT/PT, όπου είναι εφικτό
6. Ορισμός του μονταρίσματος σαν κρίσιμο σημείο ελέγχου στις σοβαρές συγκολλήσεις πριν την συγκόλληση της ρίζας(ειδικά σε tie-ins).
7. Ομαδοποίηση των ελέγχων NDT (RT/UT/PT) ώστε κάποιοι να πραγματοποιούνται σε παράλληλη ροή με τις συγκολλήσεις και να μην υπάρχουν αναμονές των συνεργείων.

8. Πρωτόκολλο γρήγορης επισκευής ώστε να καλύπτονται περιπτώσεις λάθους του ατελιέ στο εργοτάξιο εύκολα.
Επίσης στις συγκολλήσεις που κόβονται εντελώς (cut-out) και στις επισκευές να επαναλαμβάνεται η διαδικασία των ελέγχων με άμεση προτεραιότητα ώστε να κλείνουν τα θέματα. Το ίδιο πρέπει να γίνεται και στα NCR. Άμεση επίλυση.
9. Sockets (όπου υπάρχουν) να ακολουθείται ο κανόνας των δύο τουλάχιστον πάσσων καθώς και σύντομη οδηγία στο συνεργείο ώστε να μειωθούν αυτού του είδους οι επισκευές.
10. Μεγιστοποίηση των προκατασκευασμένων τμημάτων (spools) όπου είναι εφικτό ώστε να μειωθούν οι επί τόπου συγκολλήσεις.

8.8 Πρόταση Στρατηγικών για τεχνικά έργα.

Η πρόταση και αξιολόγηση της στρατηγικής διαχείρισης παρουσιάστηκε αναλυτικά στην παράγραφο 6.8 του κεφαλαίου 6. Από τη συγκριτική αξιολόγηση προέκυψε ότι η «right – first – time» αποτελεί την κατάλληλη προσέγγιση τακτικής όπου μειώνονται οι επισκευές, οι επαναληπτικοί έλεγχοι, το συνολικό κόστος ποιότητας και το ρίσκο. Το αποτέλεσμα είναι αξιόπιστη κατασκευή σε βάθος χρόνου.

8.9 Τελική αποτίμηση

Το βασικό συμπέρασμα είναι ότι η βελτίωση δεν έρχεται μόνο από “καλύτερη μέθοδο”, αλλά από σωστή ροή, έλεγχο και συγχρονισμό εργασιών. Όταν η κατασκευή προχωρά όπως πρέπει κατά την κατασκευή της, μειώνονται επισκευές και κόστος ποιότητας, μειώνεται και η σπατάλη πόρων (αναλώσιμα/ενέργεια/scrap) και το έργο γίνεται πιο προβλέψιμο και πιο “ανθεκτικό” στην πράξη.

Βιβλιογραφία

- Akowua, K., Aucott, L., Waillis, D., Raphael, H., Remi, C., Emmanuel, B., & Lamb, C. (2023). *Review and down-selection of NDE technologies suitable for ITER cooling water system remote weld inspections*. *Fusion Engineering and Design*, 196, 113980. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2023.113980>
- American Society of Mechanical Engineers. (2024). *ASME B31.3-2024: Process piping*. ASME.
- American Society of Mechanical Engineers. (2025). *ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section IX: Welding, brazing, and fusing qualifications*. ASME.
- American Welding Society. (2001). *Welding handbook* (9th ed.). American Welding Society.
- Babu, S. K. (2017). Productivity and reliability study of magnetic particle testing and eddy current testing for inspection of structural welds. In *APCNDT 2017* (Conference paper). NDT.net. https://www.ndt.net/events/APCNDT2017/app/content/Paper/29_Babu_Rev1.pdf
- Bajgholi, M., Rousseau, G., Thibault, D., & Francoeur, S. (2025). Advanced non-destructive testing techniques for welded joint repairs: A case study on improving inspection reliability and structural integrity assessment. *e-Journal of Nondestructive Testing (NDT.net)*. <https://doi.org/10.58286/30800>
- Campanella, J. (Ed.). (1999). *Principles of quality costs: Principles, implementation, and use* (3rd ed.). ASQ Quality Press.
- Cary, H. B., & Helzer, S. C. (2005). *Modern welding technology* (6th ed.). Pearson/Prentice Hall.
- Crosby, P. B. (1979). *Quality is free: The art of making quality certain*. McGraw-Hill.
- El-Shennawy, M., Abdel-Aleem, H. A., Ghanem, M. M., & Sehsah, A. M. (2024). Effect of welding parameters on microstructure and mechanical properties of dissimilar AISI 304/ductile cast iron fusion welded joints. *Scientific Reports*, 14, Article 70050. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-70050-0>
- European Committee for Standardization. (2024). *EN 13480: Metallic industrial piping*. CEN.

- European Parliament and Council of the European Union. (2014). *Directive 2014/68/EU on the harmonisation of the laws of the Member States relating to the making available on the market of pressure equipment*. Official Journal of the European Union.
- Feigenbaum, A. V. (1991). *Total quality control* (4th ed.). McGraw-Hill.
- Ferreira, M. L. R. (2018). Welding productivity indicators: A critical analysis. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, 15(5), 22–32. <https://doi.org/10.9790/1684-1505012232>
- Giudice, F., Missori, S., Scolaro, C., & Sili, A. (2024). A review on fusion welding of dissimilar ferritic/austenitic steels: Processing and weld zone metallurgy. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 8(3), Article 96. <https://doi.org/10.3390/jmmp8030096>
- International Organization for Standardization. (2017). *EN ISO 9606-1: Qualification testing of welders—Fusion welding—Part 1: Steels*. ISO.
- International Organization for Standardization. (2019). *EN ISO 15614-1:2017/A1: Specification and qualification of welding procedures for metallic materials—Welding procedure test—Part 1: Arc and gas welding of steels and arc welding of nickel and nickel alloys—Amendment 1*. ISO.
- International Organization for Standardization. (2021). *EN ISO 3834-2: Quality requirements for fusion welding of metallic materials—Part 2: Comprehensive quality requirements*. ISO.
- Juran, J. M., & Godfrey, A. B. (Eds.). (1999). *Juran's quality handbook* (5th ed.). McGraw-Hill.
- Kou, S. (2003). *Welding metallurgy* (2nd ed.). Wiley-Interscience.
- Kumar, V., Yadav, S. K., Vijetha, K., Mendhe, V., Kumari, A., Shrivastava, V., Goga, G., & Joshi, A. (2025). An investigation of the effect of GMAW and SMAW processes on mechanical and microstructural properties of welded E350 grade steel. *Scientific Reports*, 15, Article 36338. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-20140-4>
- Lancaster, J. F. (1999). *The metallurgy of welding* (6th ed.). Woodhead Publishing.

- Love, P. E. D. (2002). Auditing the indirect consequences of rework in construction: A case based approach. *Managerial Auditing Journal*, 17(3), 138–146.
<https://doi.org/10.1108/02686900210419921>
- Project Management Institute. (2021). *A guide to the project management body of knowledge (PMBOK® guide)* (7th ed.). Project Management Institute.
- Shafeek, M., Suranjan, S., Doreswamy, D., & Sachidananda, H. K. (2024). Effect of welding parameters on microstructure and mechanical properties of GMAW welded S275 steel welded zone. *Discover Materials*, 4, Article 169. <https://doi.org/10.1007/s43939-024-00169-4>
- Shrimali, R., Kumar, M., Sharma, V., Pandey, S., Kumar, M., & Ranjan, R. (2026). Optimization of flux metal arc welding parameters for productivity and quality in dissimilar metal welding. *Materials Today Communications*, 50, Article 114463.
<https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2025.114463>
- Singh, R. K., & Ziaulhaq, M. (2020). A work on welding productivity and economy for SMAW & FCAW processes. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, 9(5), 372–376. <https://doi.org/10.35940/ijitee.E2228.039520>
- Sonatest. (2020). *Ultrasonic inspection of welds* (Educational Note E011). Sonatest.
https://sonatest.com/application/files/3316/8995/6100/E011_Ultrasonic_Inspection_of_Welds.pdf
- Yapp, D., & Blackman, S. A. (2004). Recent developments in high productivity pipeline welding. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 26(1), 89–97. <https://doi.org/10.1590/S1678-58782004000100015>



ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

Τα παραρτήματα περιλαμβάνουν συμπληρωματικό υλικό τεκμηρίωσης (πίνακες / παραδείγματα) που υποστηρίζει τη μεθοδολογία και τα συμπεράσματα της εργασίας.

Παράρτημα Α : Γλωσσάριο

Ο Πίνακας Α.1 χρησιμοποιείται για να συνοψίσει τα βασικά δεδομένα της ενότητας και να διευκολύνει τη σύγκριση τεχνικών, ποιοτικών και οικονομικών παραμέτρων.

Πίνακας Α.1 – Γλωσσάριο τεχνικών όρων

Αγγλικός όρος / Συντομογραφία	Ελληνική απόδοση / ερμηνεία
Arc Time	Χρόνος τόξου. Το ποσοστό του συνολικού χρόνου εργασίας κατά το οποίο το ηλεκτρικό τόξο είναι ενεργό και εκτελείται πραγματική συγκόλληση.
Automatic Welding	Αυτόματη συγκόλληση. Συγκόλληση που εκτελείται με μηχανοποιημένο ή αυτοματοποιημένο σύστημα, με ελάχιστη ανθρώπινη παρέμβαση.
Benchmarking	Συγκριτική αξιολόγηση επιδόσεων, πρακτικών ή αποτελεσμάτων μεταξύ έργων, διαδικασιών ή μεθόδων.
Bottleneck	Σημείο συμφόρησης ή «στενωπός» μιας διαδικασίας, που περιορίζει τη ροή του έργου και προκαλεί καθυστερήσεις.
Butt Weld	Μετωπική συγκόλληση δύο τεμαχίων που ενώνονται κατά μέτωπο.
Cap Pass	Τελικό πάσο ή τελικό πέρασμα συγκόλλησης, που διαμορφώνει την εξωτερική επιφάνεια της ραφής.
Case Study / Case Studies	Μελέτη περίπτωσης / μελέτες περίπτωσης πραγματικών έργων ή εφαρμογών.
Claim	Απαίτηση ή αξίωση, συνήθως οικονομική ή συμβατική, που προκύπτει στο πλαίσιο του έργου.
Cleanliness	Καθαρότητα επιφανειών, υλικών και ζώνης συγκόλλησης πριν και κατά την εκτέλεση των εργασιών.
CoQ (Cost of Quality)	Κόστος ποιότητας. Το συνολικό κόστος πρόληψης, ελέγχου και αστοχίας της ποιότητας.
Consumables	Αναλώσιμα συγκόλλησης, όπως ηλεκτρόδια, σύρματα, αέρια προστασίας και λοιπά βοηθητικά υλικά.
Consumables Control	Έλεγχος αναλωσίμων. Διαδικασία διαχείρισης, αποθήκευσης, έκδοσης και παρακολούθησης των αναλωσίμων συγκόλλησης.
Continuity Log	Αρχείο συνέχειας ισχύος συγκολλητή, που τεκμηριώνει τη διατήρηση της πιστοποίησής του.
Critical Path	Κρίσιμο μονοπάτι του χρονοδιαγράμματος, δηλαδή η ακολουθία δραστηριοτήτων που καθορίζει τη συνολική διάρκεια του έργου.
Cut-out	Ολική αφαίρεση και επανεκτέλεση τμήματος συγκόλλησης.



Αγγλικός όρος / Συντομογραφία	Ελληνική απόδοση / ερμηνεία
Delay	Καθυστέρηση σε σχέση με τον αρχικό προγραμματισμό του έργου.
Deposition Rate	Ρυθμός εναπόθεσης υλικού πλήρωσης ανά μονάδα χρόνου συγκόλλησης.
Dissimilar Weld	Συγκόλληση ανόμοιων υλικών.
Doc Control (Document Control)	Έλεγχος τεκμηρίωσης και διαχείριση εγγράφων ποιότητας, σχεδίων και αναθεωρήσεων.
Dual Compliance	Διπλή συμμόρφωση με δύο διαφορετικά κανονιστικά ή προτυποποιημένα πλαίσια, π.χ. ASME και EN ISO.
External Failure	Εξωτερική αστοχία, δηλαδή αστοχία που εμφανίζεται μετά την παράδοση ή τη θέση του έργου σε λειτουργία.
Field / Site	Πεδίο / εργοτάξιο, δηλαδή ο χώρος επιτόπιας εκτέλεσης των εργασιών.
Field Welds	Συγκολλήσεις Πεδίου
Field Girth Weld	Περιφερειακή συγκόλληση πεδίου σε σωληνώσεις ή αγωγούς.
Fill Pass / Fill Passes	Ενδιάμεσα περάσματα γεμίσματος μεταξύ της ρίζας και του τελικού πάσου.
Filler Metal / Filler	Υλικό πλήρωσης της συγκόλλησης.
Fit-up	Συναρμογή ή μοντάρισμα πριν από τη συγκόλληση, με σωστή ευθυγράμμιση, διάκενο και προετοιμασία της ένωσης.
Foreman	Εργοδηγός συνεργείου.
FCAW (Flux Cored Arc Welding)	Συγκόλληση τόξου με σωληνωτό σύρμα με πυρήνα συλλιπάζματος.
GMAW (Gas Metal Arc Welding)	Συγκόλληση τόξου με αναλίσκόμενο σύρμα και προστατευτικό αέριο.
Global Sustainable Development Goals	Παγκόσμιοι στόχοι βιώσιμης ανάπτυξης.
GTAW (Gas Tungsten Arc Welding)	Συγκόλληση τόξου με ηλεκτρόδιο βολφραμίου και προστατευτικό αέριο.
HAZ (Heat Affected Zone)	Θερμικά επηρεασμένη ζώνη του βασικού μετάλλου.
Heat Input	Θερμική εισροή κατά τη συγκόλληση.
Heat number	Αριθμός χύτευσης ή παρτίδας τήξης υλικού, χρήσιμος για την ιχνηλασιμότητα.
Helper	Βοηθός συνεργείου συγκόλλησης ή σωληνουργίας.
Hold Point	Σημείο υποχρεωτικής στάσης εργασιών μέχρι να δοθεί έγκριση ή να ολοκληρωθεί ο απαιτούμενος έλεγχος.
Hydrogen Cracking	Ρηγμάτωση υδρογόνου.
Inspection	Επιθεώρηση ή έλεγχος.



Αγγλικός όρος / Συντομογραφία	Ελληνική απόδοση / ερμηνεία
Integrity Risk	Κίνδυνος ακεραιότητας της κατασκευής ή της συγκολλητής σύνδεσης.
Interpass Temperature	Θερμοκρασία μεταξύ πασσών κατά τη συγκόλληση.
Internal Failure	Εσωτερική αστοχία, δηλαδή αστοχία που εντοπίζεται πριν από την τελική παράδοση.
ITP (Inspection and Test Plan)	Σχέδιο Επιθεωρήσεων και Δοκιμών.
KPI (Key Performance Indicator)	Βασικός δείκτης απόδοσης.
Lack of Fusion	Έλλειψη σύντηξης μεταξύ πάσσων ή μεταξύ ραφής και βασικού μετάλλου.
LCC (Life Cycle Cost)	Κόστος κύκλου ζωής της κατασκευής ή του έργου.
Lessons Learned	Συμπεράσματα ή μαθήματα που προκύπτουν από την εμπειρία ενός έργου.
Low-H Practice	Πρακτική χαμηλού υδρογόνου κατά τη συγκόλληση.
MIG (Metal Inert Gas)	Συνήθης ονομασία της GMAW όταν χρησιμοποιείται αδρανές αέριο προστασίας.
MAG (Metal Active Gas)	Συνήθης ονομασία της GMAW όταν χρησιμοποιείται ενεργό αέριο προστασίας.
MTC (Material Test Certificate)	Πιστοποιητικό ελέγχου υλικού.
MT (Magnetic Particle Testing)	Έλεγχος με μαγνητικά σωματίδια.
N/A (Not Applicable)	Μη εφαρμόσιμο.
NCR (Non-Conformance Report)	Αναφορά μη συμμόρφωσης.
NDE (Non-Destructive Evaluation)	Μη καταστροφική αξιολόγηση.
NDT (Non-Destructive Testing)	Μη καταστροφικοί έλεγχοι.
NDT Bottleneck	Καθυστέρηση ή συμφόρηση λόγω περιορισμών στους μη καταστροφικούς ελέγχους.
NDT Rejects	Απορρίψεις συγκολλήσεων κατόπιν μη καταστροφικού ελέγχου.
Non-Productive Time	Μη παραγωγικός χρόνος, όπως αναμονές, μετακινήσεις, προετοιμασία και επανεργασίες.
Pack Review	Έλεγχος πληρότητας φακέλου ποιότητας ή τεκμηρίωσης.
Penetrant Testing (PT)	Έλεγχος με διεισδυτικά υγρά.
Pipe Fitter / Fitter	Σωληνουργός ή μονταδόρος σωληνώσεων.



Αγγλικός όρος / Συντομογραφία	Ελληνική απόδοση / ερμηνεία
Pipeline	Αγωγός μεταφοράς ρευστού ή αερίου.
Preheat	Προθέρμανση πριν από τη συγκόλληση.
Prefabrication / Prefab	Προκατασκευή τμημάτων σε ατελιέ ή εργαστήριο πριν από την επιτόπια τοποθέτηση.
Probability × Impact	Πιθανότητα × επίπτωση, βασική λογική αξιολόγησης κινδύνου.
Project Process	Διεργασία έργου.
PQR (Procedure Qualification Record)	Αρχείο πιστοποίησης διαδικασίας συγκόλλησης κατά ASME.
Process	Διεργασία ή μέθοδος συγκόλλησης.
Purge / Purging	Εσωτερική προστασία με αέριο στο εσωτερικό της σωλήνωσης.
Purge Dam	Φράγμα purge για συγκράτηση του προστατευτικού αερίου στο εσωτερικό του σωλήνα.
PWHT (Post Weld Heat Treatment)	Θερμική κατεργασία μετά τη συγκόλληση.
QA (Quality Assurance)	Διασφάλιση ποιότητας.
QC (Quality Control)	Έλεγχος ποιότητας.
Qualified Range	Πεδίο ισχύος πιστοποίησης ή διαδικασίας.
Quality Pack / Welding Quality Pack	Φάκελος ποιότητας συγκολλήσεων.
Reject	Απόρριψη συγκόλλησης ή αποτελέσματος ελέγχου.
Repair	Επισκευή συγκόλλησης.
Repair WPS	Εγκεκριμένη διαδικασία συγκόλλησης επισκευής.
Resilience	Ανθεκτικότητα συστήματος, έργου ή κατασκευής.
Re-NDT	Επανελέγχος με NDT μετά από επισκευή.
Rework	Επανεργασία λόγω μη αποδεκτού αποτελέσματος.
Rework Loop	Κύκλος επανεργασίας, δηλαδή απόρριψη, επισκευή και επανελέγχος.
Right-First-Time	Σωστή εκτέλεση από την πρώτη φορά.
Risk Matrix	Πίνακας αξιολόγησης κινδύνου.
Risk Register	Μητρώο κινδύνων.
Robotic Welding	Ρομποτική συγκόλληση.
Root Pass / Root Weld	Ρίζα ή πρώτο πέρασμα συγκόλλησης.
Schedule Slip	Ολίσθηση χρονοδιαγράμματος ή καθυστέρηση έναντι του προγράμματος.
Scrap	Οριστική απόρριψη υλικού ή τμήματος.



Αγγλικός όρος / Συντομογραφία	Ελληνική απόδοση / ερμηνεία
Shielded Metal Arc Welding (SMAW)	Συγκόλληση τόξου με επικαλυμμένο ηλεκτρόδιο.
Shop	Ατελιέ, εργαστήριο ή χώρος προκατασκευής.
Shop welds	Συγκολλήσεις στο ατελιέ
Site Tie-in	Τελική επιτόπια σύνδεση τμημάτων στο έργο.
Site - boom	Ειδικός γερανός για μεταφορά αγωγών στο χαντάκι.
Small Bore	Σωληνώσεις μικρής διαμέτρου.
Steel Carbon Steel Alloy steel Stainless Steel	Χάλυβας Ανθρακούχος Χάλυβας Κραμματούχος Χάλυβας Ανοξείδωτος Χάλυβας
Socket Weld	Συγκόλληση υποδοχής, συνήθως σε μικρές διαμέτρους.
Spatter / Spatters	Πιτσιλίσματα μετάλλου κατά τη συγκόλληση.
Standby	Χρόνος αναμονής προσωπικού ή εξοπλισμού χωρίς παραγωγικό αποτέλεσμα.
Sustainability	Βιωσιμότητα.
TC (Thermocouple)	Θερμοζεύγος για μέτρηση θερμοκρασίας.
Tie-in	Επιτόπια τελική ένωση τμημάτων σωληνώσεων ή αγωγού.
TIG (Tungsten Inert Gas)	Συνήθης ονομασία της GTAW.
Traceability	Ιχνηλασιμότητα υλικών, συγκολλήσεων, ελέγχων και τεκμηρίωσης.
Trench	Χάνδακας – χαντάκι.
UT (Ultrasonic Testing)	Υπερηχητικός έλεγχος.
Visual Testing (VT)	Οπτικός έλεγχος.
Witness Point	Σημείο επιθεώρησης με δυνατότητα παρουσίας επιθεωρητή χωρίς υποχρεωτική διακοπή εργασιών.
Welder	Συγκολλητής.
Weld	Συγκόλληση ή συγκολλητή ραφή, ανάλογα με τα συμφραζόμενα.
Weld Dossier / Weld Pack	Φάκελος συγκόλλησης.
Weld Log ή WIR (welding identification report)	Αρχείο καταγραφής συγκολλήσεων.
Welding Coordination	Συντονισμός συγκολλήσεων.
Welding Efficiency	Αποδοτικότητα συγκόλλησης.



Αγγλικός όρος / Συντομογραφία	Ελληνική απόδοση / ερμηνεία
Welding Monitoring	Παρακολούθηση της συγκολλητικής διαδικασίας και των παραμέτρων της.
WPS (Welding Procedure Specification)	Προδιαγραφή διαδικασίας συγκόλλησης.
WPQ (Welder Performance Qualification)	Πιστοποίηση ικανότητας συγκολλητή.
WPQR (Welding Procedure Qualification Record)	Αρχείο πιστοποίησης διαδικασίας συγκόλλησης κατά EN ISO.
Wrong Filler Mix-up	Λανθασμένη χρήση ή ανάμιξη υλικού πλήρωσης.

Σημείωση:

Σημειώνεται ότι ορισμένοι όροι χρησιμοποιούνται στην παρούσα εργασία είτε αυτούσιοι στην αγγλική γλώσσα είτε σε συνδυασμό με την ελληνική απόδοσή τους, όταν αυτό κρίνεται σκόπιμο για λόγους τεχνικής ακρίβειας και συμφωνίας με τη διεθνή πρακτική.



Παράρτημα Β: Πίνακας αντιστοίχισης υλικών (ASME P-N/GROUP ↔ ISO GROUP) για CS A106, P11/P22/P5/P9/P91, SS304/SS316.

B.1 Ενδεικτική αντιστοίχιση (ενδεικτική χαρτογράφηση) και κανόνας χρήσης

Ο ακόλουθος πίνακας παρέχει ενδεικτική αντιστοίχιση μεταξύ ASME P-No/Group (ASME IX) και ομάδων υλικών κατά ISO/TR 15608 (οι οποίες χρησιμοποιούνται στα EN ISO 15614/9606). Η τελική αντιστοίχιση επιβεβαιώνεται από την Προδιαγραφή Έργου, (by Owner) και το εφαρμοζόμενο πλαίσιο πιστοποίησης.

Πίνακας Β.1 Αντιστοίχιση υλικών με βάση τα πρότυπα

Υλικό / Παράδειγμα	Τυπικό πρότυπο/grade	ASME IX P- No / Group (ενδεικτικό)	ISO/TR 15608 ομάδα (ενδεικτική)	Τυπική εφαρμογή	Κρίσιμοι έλεγχοι WPS
CS A106 (Low carbon steel)	ASTM A106 Gr.B/Gr.C	P-No 1 / Group (ανά grade)	Group 1 (C- Mn/non-alloy) – επιβεβαίωση	Process & utilities piping	Fit-up, heat input, NDT plan
P11 (1.25Cr- 0.5Mo)	ASTM A335 P11	P-No 4 / Group	Cr-Mo group ($\approx 5.x$) – επιβεβαίωση	High-temp services	Preheat/interpass, low-H, πιθανό PWHT
P22 (2.25Cr- 1Mo)	ASTM A335 P22	P-No 5A / Group	Cr-Mo group ($\approx 5.x$) – επιβεβαίωση	Steam/high- pressure	PWHT cycle, hardness (αν ζητηθεί)
P5 (5Cr-0.5Mo)	ASTM A335 P5	P-No 5A / Group	Higher Cr-Mo ($\approx 6.x$) – επιβεβαίωση	Severe high- temp	Αυστηρό PWHT, interpass max
P9 (9Cr-1Mo)	ASTM A335 P9	P-No 5B / Group	High Cr steels ($\approx 6.x$) – επιβεβαίωση	Creep services	Heat input window, PWHT, consumables control
P91 (9Cr-1Mo- V-Nb, CSEF)	ASTM A335 P91	P-No 15E / Group	CSEF high-Cr ($\approx 6/7.x$) – επιβεβαίωση	Critical creep service	Heat input/interpass strict, PWHT charts, enhanced QA
SS304/SS316 (Austenitic)	ASTM A312 TP304/316	P-No 8 / Group	Austenitic SS ($\approx 8.x$) – επιβεβαίωση	Corrosion- resistant lines	Purging, cleanliness, heat input per spec



B.2 Κανόνες εφαρμογής στην παραγωγή

Για την αποφυγή ασυμβατοτήτων κατά τις επιθεωρήσεις, υιοθετείται η αρχή ότι τα επιτρεπτά όρια εφαρμογής, το εύρος του WPS στην παραγωγή, ορίζονται ως τομή των αντίστοιχων ορίων που προκύπτουν από :

- (i) ASME IX (PQR/WPQ) και
- (ii) EN ISO (WPQR/WPQ).

Σε περίπτωση διαφορών, εφαρμόζεται το αυστηρότερο όριο ανά μεταβλητή (πάχος, διάμετρος, θέση, μέθοδος, προθέρμανση, ενδιάμεσα πάσσα, PWHT, heat input, αναλώσιμα).



Παράρτημα Γ: Ενδεικτικό πακέτο WPS/WPQR/WPQ

Γ.1 Μητρώο WPS/WPQR/WPQ (template)

ID	Έγγραφο	Υλικό family	Process (root/fill)	Θέσεις	Qualified range (t/D)	Rev/Ημ/Υπεύθυνος
WPS- CS-01	WPS	CS A106	GTAW/SMAW	6G (site), 2G (shop)	t: ____ έως ____, D: ____	Rev ____ / ____ / QC
WPQR- CS-01	WPQR	CS A106	GTAW/SMAW	6G	tq: ____	Rev ____ / ____ / TPI
WPS- P22-01	WPS	P22	GTAW/SMAW	6G	t: ____ έως ____	Rev ____ / ____ / QC
WPQR- P22-01	WPQR	P22	GTAW/SMAW	6G	tq: ____ + PWHT	Rev ____ / ____ / TPI

Γ.2 Welder Continuity Log – template

Welder ID	Ημερομηνία	WPS No.	Υλικό	Process	Θέση	Υπογραφή (Supervisor/QA)

Ενδεικτική δομή φακέλου: (1) WPS list & revisions, (2) PQR/WPQR records, (3) WPQ certificates, (4) Welder continuity logs (6G), (5) Consumables control (baking/holding), (6) Material traceability & heat numbers, (7) PWHT procedures & charts (Cr-Mo/P91), (8) NDT reports & disposition (repairs/NCR).



Παράρτημα Δ: Παράδειγμα υπολογισμού Cost of Quality (CoQ) στις συγκολλήσεις

Δ.1 Ενδεικτικό φύλλο υπολογισμού CoQ (template)

Κατηγορία	Στοιχείο κόστους	Μονάδα	Ποσότητα	Κόστος/μονάδα (€)	Σύνολο (€)
Prevention	Qualification tests (WPQR/WPQ)	test	—	—	—
Prevention	Consumables baking/holding (ovens)	day	—	—	—
Appraisal	NDT (RT/UT/MT/PT)	welds	—	—	—
Appraisal	QA/QC manhours (inspection/records)	mh	—	—	—
Internal failure	Repair welds (εργασία+αναλώσιμα)	welds	—	—	—
Internal failure	Re-NDT μετά από repair	welds	—	—	—
Internal failure	Schedule impact (standby/inefficiency)	day	—	—	—
External failure	Claims/penalties/rectifications	lump sum	—	—	—

Παράρτημα Ε: Ενδεικτικό ITP/Checklist συγκολλήσεων και NDT (hold points, witness points, traceability, θερμικά logs για Cr-Mo/P91).

Ε.1 ITP / Checklist συγκολλήσεων & NDT (template)

No	Activity	Reference	Acceptance criteria	H/W	Records	Responsible	Status
1	Material receipt & identification	MTC/Heat No.	Correct grade/heat	W	MTC log	Store/QC	
2	Fit-up & joint prep	WPS/drawings	Gap/land/alignment ok	W	Fit-up report	QC/Foreman	
3	Preheat verification (Cr-Mo/P91)	WPS	$\geq$ preheat setpoint	H	Preheat log	QC	
4	Root pass welding	WPS	VT acceptable	W	Weld log	Welder/Foreman	
5	Interpass control	WPS	$\leq$ interpass max	W	Interpass log	QC	
6	Fill & cap passes	WPS	VT acceptable	W	Weld log	Welder/Foreman	
7	PWHT set-up (Cr-Mo/P91)	PWHT procedure	TC placement ok	H	PWHT set-up sheet	QC/PWHT vendor	
8	PWHT execution	PWHT procedure	Cycle within limits	H	PWHT charts	QC/PWHT vendor	
9	Final VT	Spec/Code	No surface defects	W	VT report	QC	
10	NDT (RT/UT/MT/PT)	NDT procedure	Per acceptance	H/W	NDT reports	NDT/QA	
11	Repair welding (if needed)	Repair WPS	Per code	H	Repair log	QC/QA	
12	Re-NDT after repair	NDT procedure	Accept	H	NDT reports	NDT/QA	
13	Compilation of weld dossier	Doc list	Complete pack	H	Weld pack	QA	

Υπεύθυνη Δήλωση Συγγραφέα:

Δηλώνω ρητά ότι, σύμφωνα με το άρθρο 8 του Ν.1599/1986, η παρούσα εργασία αποτελεί αποκλειστικά προϊόν προσωπικής μου εργασίας, δεν προσβάλλει κάθε μορφής δικαιώματα διανοητικής ιδιοκτησίας, προσωπικότητας και προσωπικών δεδομένων τρίτων, δεν περιέχει έργα/εισφορές τρίτων για τα οποία απαιτείται άδεια των δημιουργών/δικαιούχων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον και πληρούν τους κανόνες της επιστημονικής παράθεσης.