



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗΣ ΚΡΙΣΗΣ
ΚΑΙ ΠΟΛΙΤΙΚΗΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ
ΓΕΝΙΚΗ ΓΡΑΜΜΑΤΕΙΑ
ΠΟΛΙΤΙΚΗΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ
ΑΡΧΗΓΕΙΟ ΠΥΡ/ΚΟΥ ΣΩΜΑΤΟΣ
ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ
ΕΓΚΛΗΜΑΤΩΝ ΕΜΠΡΗΣΜΟΥ
✉ Ριζαρείου 1 & Μ. Ασίας,
152 33 Χαλάνδρι
☎ 2132158702-4,724
@ daee2@psnet.gr
Αριθμ. Πρωτ. : 698 Φ.706.12

Χαλάνδρι 6 Μαρτίου 2026

ΠΡΟΣ: κ. Ανακριτή
Πρωτοδικών Τρικάλων

ΘΕΜΑ : «Υποβολή έκθεσης πραγματογνωμοσύνης»

ΣΧΕΤ : Το υπ' αριθμ. 64 /25-02-26 έγγραφό σας.

Σε εκτέλεση του ανωτέρου σχετικού, σας υποβάλλουμε την έκθεση πραγματογνωμοσύνης (φυλ. 48) του διορισθέντος από την υπηρεσία μας πραγματογνώμονα, κ. Τσακιρίδη Πέτρου του Ευαγγέλου, Μεταλλειολόγου-Μεταλλουργού, την οποία μας εγχείρισε την 25-02-2026.

Διευκρινίζεται ότι η εν λόγω έκθεση σας είχε αποσταλεί και με το από 02-03-2026 μήνυμα ηλεκτρονικού ταχυδρομείου.



Αποστολή

Δημήτριος Θ. Δημακογιάννης
Αντιπύραρχος



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΕΤΑΛΛΕΙΟΛΟΓΩΝ-ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΑΣ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΟΓΝΩΣΙΑΣ
ΗΡΩΩΝ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟΥ 9, ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟΥΠΟΛΗ ΖΩΓΡΑΦΟΥ

Δρ. Πέτρος Ε. Τσακιρίδης, Αναπλ. Καθηγητής ΕΜΠ
Τηλ: 210 772 2171, e-mail: ptsakiri@central.ntua.gr

Ημερομηνία: 25 Φεβρουαρίου 2026

ΕΚΘΕΣΗ ΠΡΑΓΜΑΤΟΓΝΩΜΟΣΥΝΗΣ

Προς: Αρχηγείο Πυροσβεστικού Σώματος
Διεύθυνση Αντιμετώπισης Εγκλημάτων Εμπρησμού (Δ.Α.Ε.Ε.)

Θέμα: Αξιολόγηση Μηχανισμών Διάβρωσης-Αστοχίας Μεταλλικών Τεμαχίων από Τμήμα Υπόγειας Σωλήνωσης Μεταφοράς Αερίου Καυσίμου, Εργοστασίου «ΒΙΟΛΑΝΤΑ Α.Ε.», 6ο χλμ. Ε.Ο. Τρικάλων-Καρδίτσας, Τ.Κ. Αγίας Κυριακής, Δήμου Τρικκαίων, Π.Ε. Τρικάλων

Υπ' όψιν: Αντιπύραρχος Δημήτριος Δημακογιάννης
Διευθυντής Δ/νσης Αντιμετώπισης Εγκλημάτων Εμπρησμού

Αντικείμενο της παρούσας Τεχνικής Έκθεσης αποτελεί η αναλυτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων του εργαστηριακού ελέγχου, ο οποίος πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Μεταλλογνωσίας, της Σχολής Μεταλλειολόγων-Μεταλλουργών Μηχανικών του Ε.Μ.Π., σε τέσσερα (4) μεταλλικά τεμάχια, από τμήμα υπόγειας σωλήνωσης μεταφοράς αερίου καυσίμου, η οποία συνέδεε δύο (2) υπέργειες δεξαμενές (χωρητικότητας 5.000 lt και 9.000 lt) που βρίσκονται στον αύλειο χώρο του εργοστασίου «ΒΙΟΛΑΝΤΑ Α.Ε.» (6ο χλμ. Ε.Ο. Τρικάλων-Καρδίτσας, Τ.Κ. Αγίας Κυριακής, Δήμου Τρικκαίων, Π.Ε. Τρικάλων). Η εν λόγω πραγματογνωμοσύνη διενεργήθηκε στα πλαίσια της προκαταρκτικής εξέτασης, η οποία πραγματοποιείται από την Διεύθυνση Αντιμετώπισης Εγκλημάτων Εμπρησμού (Δ.Α.Ε.Ε.), για το περιστατικό της προκληθείσας έκρηξης και εν συνεχεία πυρκαγιάς που εκδηλώθηκε την 26-01-2026.

Σκοπός των διενεργηθέντων πειραματικών δοκιμών-αναλύσεων ήταν ο πλήρης χημικός και μεταλλογραφικός χαρακτηρισμός των παραληφθέντων δειγμάτων, όπως

επίσης και η ανίχνευση του αναπτυσσόμενου μηχανισμού διάβρωσης, ο οποίος οδήγησε σε εκτεταμένα φαινόμενα υποβάθμισης-φθοράς και τελικά, διάτρησης της υπόγειας σωλήνωσης.

Σύνταξη:

Petros Tsakiridis

25.02.2026 12:05 UTC

Π. Τσακιρίδης

Αναπλ. Καθηγητής ΕΜΠ



ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ.....	5
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	7
1.1 Ιστορικό Ανάθεσης Έργασιών	7
1.2 Διαδικασία Αυτοψίας - Δειγματοληψία	8
1.3 Το Φαινόμενο της Διάβρωσης των Μεταλλικών Υλικών	15
1.4 Μηχανισμός Διάβρωσης Κοινού Ανθρακούχου Χάλυβα	18
1.5 Μηχανισμός Διάβρωσης Κοινού Ανθρακούχου Χάλυβα στο Έδαφος.....	21
1.6 Μηχανισμός Διάβρωσης με Βελονισμούς Χάλυβα στο Έδαφος	24
1.7 Τεχνικές Προδιαγραφές για Βιομηχανικές Εγκαταστάσεις.....	29
1.7.1 Υλικό και Πάχος Τοιχώματος Σωλήνα	32
1.7.2 Παθητική Αντιδιαβρωτική Προστασία.....	34
1.7.3 Βάθος Ταφής & Μηχανική Προστασία.....	37
1.7.4 Σύνδεση Υπόγειων Σωληνώσεων	39
1.7.5 Ενεργητική - Καθοδική Αντιδιαβρωτική Προστασία	41
1.7.6 Περιοδικός έλεγχος.....	43
2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ.....	46
2.1 Δειγματοληψία - Περιγραφή Δειγμάτων	46
2.2 Στερεοσκοπικό Μικροσκόπιο	47
2.3 Μεταλλογραφική Προετοιμασία	48
2.4 Οπτικό Μικροσκόπιο	49
2.5 Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης	49
2.6 Σκληρότητα κατά Vickers (Hardness Vickers – HV)	50
2.7 Φασματογράφος Μάζας Spark-OES.....	51
2.8 Περίθλαση Ακτίνων Χ (XRD)	52
3. ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....	54
3.1 Χαρακτηρισμός “Δείγματος 7”	54



3.2 Χαρακτηρισμός "Δείγματος 2"	64
3.3 Χαρακτηρισμός "Δειγμάτος1" και "Δείγματος 3" – Περιοχή Διάτρησης	68
4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	85
5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	93
5.1 Ελληνική και Ευρωπαϊκή Νομοθεσία	93
5.2 Διεθνή Πρότυπα	93
5.3 Λοιπή Βιβλιογραφία	94



ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

- Εικόνα 1:** Αυτοψία στον αέριο χώρο του εργοστασίου «ΒΙΟΛΑΝΤΑ Α.Ε.». Διακρίνονται οι δεξαμενές προπανίου, και η εκσκαφή-αποκάλυψη τμήματος υπόγειας σωλήνωσης.....9
- Εικόνα 2:** Αυτοψία στον αέριο χώρο του εργοστασίου «ΒΙΟΛΑΝΤΑ Α.Ε.». Ανίχνευση διατρήσεων-διαρροής μέσω αύξησης πίεσης με μηχανική αντλία νερού.....11
- Εικόνα 3:** Αυτοψία στον αέριο χώρο του εργοστασίου «ΒΙΟΛΑΝΤΑ Α.Ε.». Δειγματοληψία μέσω αποκοπής τμήματος της σωλήνωσης με μέθοδο αδιατάρακτης κοπής.....12
- Εικόνα 4:** Ηλεκτροχημικός μηχανισμός διάβρωσης χάλυβα μέσω ανάπτυξης μικροσκοπικών γαλβανικών στοιχείων.....19
- Εικόνα 5:** Μηχανισμός διάβρωσης χάλυβα με βελονισμούς (pitting corrosion).....26
- Εικόνα 6:** “Δείγμα 7” από το από υπέργειο και μακροσκοπικά υγιές τμήμα της σωλήνωσης...54
- Εικόνα 7:** Επιφανειακές μακρογραφίες στερεοσκοπίου “Δείγματος 7” – Υπέργειο τμήμα σωλήνωσης.....57
- Εικόνα 8:** Μικρογραφίες οπτικού μικροσκοπίου “Δείγματος 7”-Υπέργειο τμήμα σωλήνωσης...59
- Εικόνα 9:** Ενδεικτικές μικρογραφίες SEM και στοιχειακές αναλύσεις EDS “Δείγματος 7”60
- Εικόνα 10:** Ακτινοδιάγραμμα XRD “Δείγματος 7” - Υπέργειο τμήμα σωλήνωσης63
- Εικόνα 11:** “Δείγμα 2” από περιοχή βιδωτής σύνδεσης τμημάτων της σωλήνωσης.....64
- Εικόνα 12:** Μακρογραφίες στερεοσκοπίου “Δείγματος 2” – Βιδωτή σύνδεση τμημάτων σωλήνωσης...65
- Εικόνα 13:** “Δείγμα 1” από περιοχή διάτρησης στο υπόγειο τμήμα της σωλήνωσης.....68



Εικόνα 14: “Δείγμα 3” από περιοχή διάτρησης στο υπόγειο τμήμα της σωλήνωσης.....	69
Εικόνα 15: “Δείγμα 1α” γεώδους υλικού από την επιφάνεια της σωλήνωσης.....	70
Εικόνα 16: “Δείγμα 3α” γεώδους υλικού από την επιφάνεια της σωλήνωσης.....	70
Εικόνα 17: Συγκριτικά ακτινοδιαγράμματα XRD εδαφικού υλικού από την επιφάνεια της σωλήνωσης.....	71
Εικόνα 18: Επιφανειακές μακρογραφίες στερεοσκοπίου “Δείγματος 1” – Περιοχή Διάτρησης.....	73
Εικόνα 19: Επιφανειακές μακρογραφίες στερεοσκοπίου “Δείγματος 3” – Περιοχή Διάτρησης.....	74
Εικόνα 20: Μικρογραφίες SEM και στοιχειακές αναλύσεις EDS “Δείγματος 1” - Περιοχή Διάτρησης...	76
Εικόνα 21: Μικρογραφίες SEM και στοιχειακές αναλύσεις EDS “Δείγματος 3” - Περιοχή Διάτρησης...	77
Εικόνα 22: Συγκριτικά ακτινοδιαγράμματα XRD προϊόντων διάβρωσης στην περιοχή της διάτρησης.	78
Εικόνα 23: Μικρογραφίες οπτικού μικροσκοπίου “Δείγματος 1” σε τομή – Περιοχή διάτρησης...	80
Εικόνα 24: Μικρογραφίες οπτικού μικροσκοπίου “Δείγματος 3” σε τομή – Περιοχή διάτρησης...	81
Εικόνα 25: Μικρογραφίες SEM και στοιχειακές αναλύσεις EDS “Δείγματος 1” σε τομή – Περιοχή Διάτρησης.....	83
Εικόνα 26: Μικρογραφίες SEM και στοιχειακές αναλύσεις EDS “Δείγματος 3” σε τομή – Περιοχή Διάτρησης.....	84



1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Ιστορικό Ανάθεσης Εργασιών

Σε εκτέλεση της από 28-01-2026 εισαγγελικής παραγγελίας της Εισαγγελίας Πρωτοδικών Τρικάλων (ΑΒΜ. Α26-71), στο πλαίσιο της διενεργούμενης από την Διεύθυνση Αντιμετώπισης Εγκλημάτων Εμπρησμού (Δ.Α.Ε.Ε) προκαταρκτικής εξέτασης για την διακρίβωση των αιτίων και των συνθηκών επέλευσης του διερευνώμενου περιστατικού της προκληθείσας έκρηξης και εν συνεχεία πυρκαγιάς που εκδηλώθηκε την 26-01-2026 στο εργοστάσιο της «ΒΙΟΛΑΝΤΑ Α.Ε.» (6ο χλμ. Ε.Ο. Τρικάλων-Καρδίτσας, Τ.Κ. Αγίας Κυριακής, Δήμου Τρικκαίων, Π.Ε. Τρικάλων), παραγγέλθηκε διενέργεια αυτοψίας, από τους αρμόδιους ανακριτικούς υπαλλήλους της Διεύθυνσης Αντιμετώπισης Εγκλημάτων Εμπρησμού (Δ.Α.Ε.Ε.).

Επειδή κατά την αυτοψία μπορούν να προσληφθούν μάρτυρες ή πραγματογνώμονες, που ορκίζονται νομότυπα, για να γίνει ο καθορισμός πραγμάτων ή τόπων ή της ταυτότητας προσώπων ή για να δοθούν άλλα χρήσιμα στοιχεία, κρίθηκε σκόπιμη η παρουσία μου στο εργοστάσιο της «ΒΙΟΛΑΝΤΑ Α.Ε.» (6ο χλμ. Ε.Ο. Τρικάλων-Καρδίτσας, Τ.Κ. Αγίας Κυριακής, Δήμου Τρικκαίων, Π.Ε. Τρικάλων), κατά την διενεργούμενη αυτοψία προκειμένου, και αφού ήδη είχε πραγματοποιηθεί ο αρχικός έλεγχος από τους ανακριτικούς υπαλλήλους της ΔΑΕΕ, να παράσχω προς αυτούς κάθε αναγκαία και χρήσιμη πληροφορία και σχετικό χρήσιμο στοιχείο για τον ανωτέρω σκοπό, για τον οποίο διενεργείται η αυτοψία και άπτεται εντός του Επιστημονικού μου Αντικειμένου.

Την Τετάρτη 04 Φεβρουαρίου 2026, σύμφωνα με το υπ' αριθμ. 317 Φ.706. 12/04-02-2026 έγγραφο της Δ.Α.Ε.Ε. αποφασίστηκε ο διορισμός μου ως πραγματογνώμονας, σύμφωνα με τα άρθρα 183-203 του Κώδικα Ποινικής Δικονομίας, επειδή για την ακριβή διάγνωση και κρίση της προκείμενης υπόθεσης παρίσταται ανάγκη



πραγματογνωμοσύνης στο γνωστικό μου αντικείμενο. Την ίδια ημέρα, Τετάρτη 04 Φεβρουαρίου 2026, μετά τον διορισμό μου πραγματοποιήθηκε η όρκιση μου, σύμφωνα με το άρθρο 194 του Κώδικα Ποινικής Δικονομίας, στο κατάστημα της Διεύθυνσης Αντιμετώπισης Εγκλημάτων Εμπρησμού (Δ.Α.Ε.Ε), Ριζαρείου 1 και Μικράς Ασίας, Δ. Χαλανδρίου, Ν. Αττικής ενώπιον του Επιπυραγού κου Δημητρίου Μείντάνη, που διενεργεί προανάκριση για την πυρκαγιά που έλαβε χώρα την 26/01/2026 στο εργοστάσιο της «ΒΙΟΛΑΝΤΑ Α.Ε.», στο 6^ο χλμ. Ε.Ο. Τρικάλων- Καρδίτσας, και του Πυραγού Μπαρού Ιωάννη προσληφθέντα ως 2^ο ανακριτικού υπαλλήλου.

1.2 Διαδικασία Αυτοψίας - Δειγματοληψία

Την Πέμπτη 05 Φεβρουαρίου και την Παρασκευή 06 Φεβρουαρίου 2026, μετά την μετάβαση μου στο εργοστάσιο της «ΒΙΟΛΑΝΤΑ Α.Ε.» (6ο χλμ. Ε.Ο. Τρικάλων- Καρδίτσας, Τ.Κ. Αγίας Κυριακής, Δήμου Τρικαίων, Π.Ε. Τρικάλων), έλαβα μέρος στην αυτοψία που πραγματοποιήθηκε σε συνεργασία με τους ανακριτικούς υπαλλήλους της Δ.Α.Ε.Ε., στον αύλειο χώρο του εργοστασίου «ΒΙΟΛΑΝΤΑ Α.Ε.» και συγκεκριμένα στην εκσκαφή και αποκάλυψη της υπόγειας σωλήνωσης μεταφοράς αερίου καυσίμου, η οποία συνέδεε δύο (2) υπέργειες δεξαμενές (χωρητικότητας 5.000 lt και 9.000 lt) με το σύστημα τροφοδοσίας του κεντρικού κτιρίου (**Εικόνα 1**).

Κατά την αυτοψία στο εργοστάσιο πραγματοποιήθηκε ελεγχόμενη αποκάλυψη τμήματος της υπόγειας σωλήνωσης με σκοπό τη διερεύνηση πιθανών φαινομένων φθοράς και διάτρησης λόγω διάβρωσης. Αρχικά, εκτελέστηκε εκσκαφή με σκαπτικό μηχάνημα σε επαρκή απόσταση και βάθος από την εκτιμώμενη στάθμη τοποθέτησης της σωλήνας, ώστε να αφαιρεθεί ο κύριος όγκος των υπερκείμενων γαιών με ταυτόχρονη διατήρηση ασφαλούς περιθωρίου προστασίας.



Εικόνα 1: Αυτοψία στον αύλειο χώρο του εργοστασίου «ΒΙΟΛΑΝΤΑ Α.Ε.». Διακρίνονται οι δεξαμενές προπανίου, και η εκσκαφή-αποκάλυψη τμήματος υπόγειας σωλήνωσης



Η διαδικασία αυτή πραγματοποιήθηκε με συνεχή επίβλεψη, ελεγχόμενη πρόοδο και σταδιακή μείωση του βάθους εκσκαφής, προκειμένου να αποτραπεί οποιαδήποτε μηχανική καταπόνηση ή τυχαίος τραυματισμός της σωλήνωσης. Στη συνέχεια, όταν η εκσκαφή προσέγγισε τη ζώνη εντοπισμού του αγωγού, η εργασία συνεχίστηκε αποκλειστικά χειρωνακτικά με χρήση σκαπτικών εργαλείων (φτυάρια, αξίνες και μικρά εργαλεία απομάκρυνσης εδαφικού υλικού), ώστε να διασφαλιστεί η προσεκτική και ελεγχόμενη αποκάλυψη της εξωτερικής επιφάνειας του σωλήνα. Μετά την πλήρη αποκάλυψη του εξεταζόμενου τμήματος, πραγματοποιήθηκε καθαρισμός της επιφάνειας από προσκολλημένα εδαφικά υπολείμματα και επικαθίσεις, με στόχο τη σαφή οπτική επιθεώρηση της κατάστασης του μετάλλου και της εξωτερικής προστατευτικής επικάλυψης, όπου αυτή υπήρχε. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στον εντοπισμό ενδείξεων τοπικής ή γενικευμένης διάβρωσης, απολέπισης, δημιουργίας κοιλοτήτων (pitting), μηχανικών φθορών ή ενδεχόμενων διατρήσεων, καθώς και στη διερεύνηση πιθανής υποσκαφής ή διαφοροποίησης της υφής του περιβάλλοντος εδάφους που θα μπορούσε να επιταχύνει φαινόμενα ηλεκτροχημικής διάβρωσης. Η συνολική διαδικασία εκτελέστηκε με γνώμονα την ακεραιότητα της εγκατάστασης, επιτρέποντας την αξιόπιστη αξιολόγηση της κατάστασης της σωλήνωσης και τη διαμόρφωση τεκμηριωμένων συμπερασμάτων.

Μετά την πλήρη αποκάλυψη του εξεταζόμενου τμήματος της σωλήνωσης και την απομόνωση της εξόδου, εφαρμόστηκε διαδικασία ελέγχου στεγανότητας με υδροστατική πίεση, προκειμένου να διαπιστωθεί η ύπαρξη ενδεχόμενων διατρήσεων ή μικρορωγμών στο τοίχωμα του αγωγού. Συγκεκριμένα, στην είσοδο της σωλήνας συνδέθηκε μηχανική-χειροκίνητη αντλία, μέσω κατάλληλης διάταξης στεγανοποίησης, ώστε να διασφαλιστεί η ελεγχόμενη εισαγωγή νερού υπό πίεση στο εσωτερικό της. Η πίεση αυξανόταν σταδιακά και ελεγχόμενα, με συνεχή παρακολούθηση της συμπεριφοράς της σωλήνωσης στο αποκαλυφθέν τμήμα,



δίνοντας ιδιαίτερη προσοχή σε ενδείξεις διαρροής, υγρασίας ή εμφάνισης σταγονιδίων στην εξωτερική επιφάνεια. Παράλληλα, ελέγχθηκε η σταθερότητα της εφαρμοζόμενης πίεσης, καθώς τυχόν πτώση της θα μπορούσε να υποδηλώνει απώλεια ρευστού λόγω διαρροής σε μη ορατό σημείο. Η μέθοδος αυτή επέτρεψε την άμεση και σαφή επιβεβαίωση της ύπαρξης διαρροής, καθώς κατά την εφαρμογή της πίεσης παρατηρήθηκε εκροή νερού από δύο διακριτά σημεία του αποκαλυφθέντος τμήματος της σωλήνωσης. Τα σημεία αυτά αντιστοιχούσαν σε τοπικές διατρήσεις του τοιχώματος, οι οποίες εντοπίστηκαν μέσω της εμφάνισης συνεχούς ροής και σχηματισμού σταγονιδίων στην εξωτερική επιφάνεια του αγωγού. Η διαπίστωση των δύο οπών τεκμηριώνει την παρουσία προχωρημένης τοπικής διάβρωσης και επιβεβαιώνει τη μειωμένη δομική ακεραιότητα του συγκεκριμένου τμήματος της υπόγειας σωλήνωσης (Εικόνα 2).



Εικόνα 2: Αυτοψία στον αύλειο χώρο του εργοστασίου «ΒΙΟΛΑΝΤΑ Α.Ε.». Ανίχνευση διατρήσεων-διαρροής μέσω αύξησης πίεσης με μηχανική αντλία νερού

Στη συνέχεια, προκειμένου να πραγματοποιηθεί εργαστηριακή διερεύνηση των αιτιών της αστοχίας, το τμήμα της σωλήνωσης που έφερε τις διατρήσεις αποκόπηκε με μέθοδο αδιατάρακτης κοπής, χρησιμοποιώντας υδραυλικό ψαλίδι κοπής μετάλλων (τύπου rescue tool), κατάλληλο για εργασίες χωρίς παραγωγή σπινθήρων και χωρίς ανάπτυξη υψηλών θερμοκρασιών (Εικόνα 3).



Εικόνα 3: Αυτοψία στον αέριο χώρο του εργοστασίου «ΒΙΟΛΑΝΤΑ Α.Ε.». Δειγματοληψία μέσω αποκοπής τμήματος της σωλήνωσης με μέθοδο αδιατάρακτης κοπής

Η επιλογή της συγκεκριμένης μεθόδου κρίθηκε απαραίτητη ώστε να αποφευχθεί θερμική ή μεταλλουργική αλλοίωση του υλικού στην περιοχή των διατρήσεων, διασφαλίζοντας ότι τα προς εξέταση δείγματα θα διατηρούσαν αναλλοίωτη τη



μικροδομή και τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας διάβρωσης. Η αποκοπή πραγματοποιήθηκε σε επαρκή απόσταση περιμετρικά των διατρήσεων, ώστε να συμπεριληφθεί τόσο η άμεσα προσβεβλημένη ζώνη όσο και τμήμα γειτονικού υγιούς σχετικά μετάλλου για συγκριτική αξιολόγηση. Παράλληλα, ελήφθησαν επιπρόσθετα δείγματα από υπέργειο και εμφανώς υγιές τμήμα της ίδιας σωλήνωσης, τα οποία προορίζονται να χρησιμοποιηθούν ως δείγματα αναφοράς (reference samples), με σκοπό τη σύγκριση της μικροδομής, του πάχους τοιχώματος, της χημικής σύστασης και της κατάστασης της επιφάνειας. Η διαδικασία δειγματοληψίας ολοκληρώθηκε με κατάλληλη σήμανση και καταγραφή της θέσης προέλευσης κάθε δοκιμίου, προκειμένου να διασφαλιστεί η ιχνηλασιμότητα και η ορθή ερμηνεία των εργαστηριακών αποτελεσμάτων.

Στο πλαίσιο της πληρέστερης και αντιπροσωπευτικής αξιολόγησης της κατάστασης της σωλήνωσης, αποφασίστηκε η συστηματική δειγματοληψία επτά (7) μεταλλικών δοκιμίων κατά μήκος του εξεταζόμενου τμήματος. Τα δείγματα ελήφθησαν σε όλο το μήκος της σωλήνωσης σε θέσεις που κάλυπταν τόσο τις περιοχές εμφανών διατρήσεων και εντονότερης διάβρωσης όσο και ενδιάμεσα ή μακροσκοπικά υγιή τμήματα, ώστε να καταστεί δυνατή η συγκριτική ανάλυση της φθοράς. Κάθε δοκίμιο αποκόπηκε με ελεγχόμενη, αδιατάρακτη μέθοδο και επισημάνθηκε με μοναδική ονομασία (Δείγμα 1, Δείγμα 2, ..., Δείγμα 7). Η διαδικασία συνοδεύτηκε από φωτογραφική τεκμηρίωση και καταγραφή των μακροσκοπικών χαρακτηριστικών, διασφαλίζοντας την πλήρη ιχνηλασιμότητα των δοκιμίων και την αξιόπιστη συσχέτιση των εργαστηριακών αποτελεσμάτων με τις πραγματικές συνθήκες πεδίου.

Από τα επτά (7) συνολικά μεταλλικά δείγματα που ελήφθησαν κατά μήκος της σωλήνωσης, επιλέχθηκαν τέσσερα (4) για περαιτέρω εργαστηριακή διερεύνηση, με στόχο την εκτέλεση χημικού και μεταλλογραφικού ελέγχου. Η επιλογή έγινε με κριτήριο την αντιπροσωπευτικότητα και τη συγκριτική αξιολόγηση διαφορετικών



ζωνών λειτουργικής καταπόνησης. Συγκεκριμένα, δύο (2) δείγματα προήλθαν από την περιοχή των διατρήσεων (“Δείγμα 1” και “Δείγμα 3”), όπου είχε διαπιστωθεί ενεργός διαρροή, προκειμένου να διερευνηθεί η μικροδομή, ο μηχανισμός και η μορφολογία της διάβρωσης, καθώς και τυχόν τοπικές μεταλλουργικές ανομοιογένειες. Ένα (1) δείγμα ελήφθη από υπέργειο και μακροσκοπικά υγιές τμήμα της σωλήνωσης (“Δείγμα 7”), ώστε να χρησιμοποιηθεί ως δείγμα αναφοράς για τη σύγκριση της χημικής σύστασης, της μικροδομής και του πάχους τοιχώματος. Τέλος, ένα (1) δείγμα λήφθηκε από την περιοχή βιδωτής σύνδεσης των σωλήνων (“Δείγμα 2”), με σκοπό να αξιολογηθεί η πιθανή επίδραση της γεωμετρικής ασυνέχειας, των τοπικών τάσεων ή της διαφοροποίησης των συνθηκών διάβρωσης στην περιοχή της ένωσης. Με τον τρόπο αυτό διασφαλίζεται η ολοκληρωμένη και τεκμηριωμένη προσέγγιση ως προς τη διερεύνηση των αιτιών της αστοχίας.

Τα προς εξέταση τέσσερα (4) μεταλλικά τεμάχια, τα οποία αποσπάστηκαν κατά μήκος του εξεταζόμενου τμήματος της σωλήνωσης, με κωδικούς “Δείγμα 1”, “Δείγμα 2”, “Δείγμα 3” και “Δείγμα 7”, μεταφέρθηκαν με ασφαλή συνοδεία στο κατάστημα της Διεύθυνσης Αντιμετώπισης Εγκλημάτων Εμπρησμού (Δ.Α.Ε.Ε), Ριζαρείου 1 και Μικράς Ασίας, Δ. Χαλανδρίου, Ν. Αττικής. Ακολούθως, τα εν λόγω δείγματα παρελήφθησαν με πρωτόκολλο παράδοσης-παραλαβής την Τρίτη 10 Φεβρουαρίου 2026.

Σκοπός των διενεργηθέντων πειραματικών δοκιμών-αναλύσεων, οι οποίες πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Μεταλλογνωσίας, της Σχολής Μεταλλειολόγων-Μεταλλουργών Μηχανικών, του ΕΜΠ, ήταν ο πλήρης χημικός και μεταλλογραφικός χαρακτηρισμός των παραληφθέντων δειγμάτων, όπως επίσης και η ανίχνευση του αναπτυσσόμενου μηχανισμού διάβρωσης, ο οποίος οδήγησε σε εκτεταμένα φαινόμενα υποβάθμισης-φθοράς και, τελικά, διάτρησης της υπόγειας σωλήνωσης.



1.3 Το Φαινόμενο της Διάβρωσης των Μεταλλικών Υλικών

Η διάβρωση αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα φαινόμενα υποβάθμισης των μεταλλικών υλικών και ορίζεται ως η φυσικοχημική αλληλεπίδραση ενός μετάλλου με το περιβάλλον του, η οποία οδηγεί σε μεταβολή των ιδιοτήτων του και τελικά σε απώλεια μάζας, μηχανικής αντοχής ή λειτουργικότητας. Από θερμοδυναμική άποψη, τα περισσότερα μέταλλα βρίσκονται σε μετασταθή κατάσταση, καθώς η εξόρυξη και μεταλλουργική τους παραγωγή απαιτεί ενέργεια για τη μετατροπή των φυσικών οξειδίων, αλάτων ή θειούχων ενώσεων σε καθαρό μέταλλο. Η διάβρωση αποτελεί ουσιαστικά την “επιστροφή” του μετάλλου στη θερμοδυναμικά σταθερή μορφή του (οξείδιο; υδροξείδιο; άλας):

Στις περισσότερες τεχνικές εφαρμογές, η διάβρωση των μετάλλων είναι ηλεκτροχημικής φύσεως. Πρόκειται για σύζευξη δύο ημιαντιδράσεων: μίας ανοδικής (οξείδωση του μετάλλου) και μίας καθοδικής (αναγωγή συστατικού του περιβάλλοντος, συνήθως οξυγόνου ή υδρογόνου). Για ένα μέταλλο, το βασικό ανοδικό στάδιο είναι:



Τα ηλεκτρόνια που απελευθερώνονται καταναλώνονται σε καθοδικές αντιδράσεις. Η ταυτόχρονη ύπαρξη ηλεκτρολύτη (π.χ. νερό με διαλυμένα άλατα) και διαφοράς δυναμικού μεταξύ ανοδικών και καθοδικών περιοχών επιτρέπει τη ροή ηλεκτρονίων και ιόντων, οδηγώντας στον σχηματισμό προϊόντων διάβρωσης (υδροξείδια, οξείδια). Η διαδικασία αυτή μπορεί να θεωρηθεί ως λειτουργία μικροσκοπικών γαλβανικών στοιχείων πάνω στην επιφάνεια του μετάλλου.

Η πιθανότητα διάβρωσης ενός μετάλλου καθορίζεται θερμοδυναμικά από το ηλεκτροχημικό του δυναμικό, όπως απεικονίζεται σε διαγράμματα Pourbaix (E-pH).



Ωστόσο, η ταχύτητα διάβρωσης ελέγχεται κινητικά, από την ταχύτητα των ηλεκτροχημικών αντιδράσεων και τη μεταφορά μάζας στον ηλεκτρολύτη. Ένα μέταλλο μπορεί να είναι θερμοδυναμικά ασταθές, αλλά πρακτικά ανθεκτικό, εάν σχηματίζει προστατευτική παθητική στοιβάδα (π.χ. Al, Cr, Ti). Στον κοινό ανθρακούχο χάλυβα, τα προϊόντα διάβρωσης (FeOOH , Fe_2O_3 , Fe_3O_4) είναι συνήθως πορώδη και μη προστατευτικά, επιτρέποντας τη συνέχιση της αντίδρασης. Αντίθετα, στα ανοξείδωτα κράματα, η παρουσία χρωμίου οδηγεί σε σχηματισμό συνεκτικής στοιβάδας Cr_2O_3 που περιορίζει τη διάχυση ιόντων.

Θα πρέπει να επισημανθεί ότι η διάβρωση δεν εκδηλώνεται πάντοτε ομοιόμορφα. Οι βασικές μορφές περιλαμβάνουν:

1. **Ομοιόμορφη διάβρωση (uniform corrosion):** Ομοιόμορφη απώλεια πάχους. Είναι η πιο προβλέψιμη μορφή και συχνά λαμβάνεται υπόψη στον σχεδιασμό μέσω επιπλέον πάχους.
2. **Διάβρωση με Βελονισμούς (pitting):** Δημιουργία μικρών αλλά μεγάλου βάθους κοιλοτήτων λόγω τοπικής διάσπασης της παθητικής στοιβάδας. Ιδιαίτερα επικίνδυνη, καθώς οδηγεί σε διάτρηση χωρίς σημαντική συνολική απώλεια μάζας.
3. **Διάβρωση Χαραγής (crevice corrosion):** Εμφανίζεται σε περιοχές περιορισμένης ανανέωσης οξυγόνου (π.χ. φλάντζες, επικαλύψεις).
4. **Γαλβανική διάβρωση:** Όταν δύο διαφορετικά μέταλλα έρχονται σε ηλεκτρική επαφή εντός ηλεκτρολύτη. Το μέταλλο με χαμηλότερο δυναμικό δρα ως άνοδος και διαβρώνεται ταχύτερα.
5. **Διάβρωση λόγω μηχανικής καταπόνησης (stress corrosion cracking – SCC):** Συνδυασμός εφελκυστικής τάσης και διαβρωτικού περιβάλλοντος που οδηγεί σε ρηγμάτωση.



6. **Μικροβιακά επαγόμενη διάβρωση (MIC):** Προκαλείται από δραστηριότητα μικροοργανισμών (π.χ. βακτήρια αναγωγής θεικών), που μεταβάλλουν το τοπικό ηλεκτροχημικό περιβάλλον.

Η ένταση και ο ρυθμός διάβρωσης εξαρτώνται από συνδυασμό παραγόντων, όπως η χημική σύσταση του μετάλλου (περιεκτικότητα σε C, S, P, κραματικά στοιχεία), η μικροδομή (μέγεθος κόκκων, φάσεις, εγκλείσματα), η σύνθεση του ηλεκτρολύτη (pH, περιεκτικότητα σε Cl^- , SO_4^{2-} , διαλυμένο οξυγόνο), η θερμοκρασία (αυξάνει γενικά τον ρυθμό αντίδρασης), η ταχύτητα ροής ρευστού (επηρεάζει τη μεταφορά μάζας και την απομάκρυνση προστατευτικών στοιβάδων) και η παρουσία καταπονήσεων ή παραμένουσων τάσεων. Ιδιαίτερη σημασία έχει η παρουσία ιόντων χλωρίου, τα οποία διασπούν παθητικές στοιβάδες και επιταχύνουν τοπικές μορφές διάβρωσης.

Η διάβρωση ποσοτικοποιείται συνήθως ως ρυθμός απώλειας πάχους (mm/year). Οι μέθοδοι εκτίμησης περιλαμβάνουν την απώλεια βάρους δοκιμίων, ηλεκτροχημικές τεχνικές (polarization resistance), υπερηχητική μέτρηση πάχους και μικροσκοπική ανάλυση (SEM/EDS) για ταυτοποίηση προϊόντων διάβρωσης. Η μικροσκοπική εξέταση επιτρέπει τον προσδιορισμό μορφολογίας (π.χ. pit morphology) και στοιχειακής σύστασης προϊόντων διάβρωσης, παρέχοντας ενδείξεις για το περιβάλλον που προκάλεσε την αστοχία.

Γίνεται κατανοητό ότι η διάβρωση αποτελεί ένα σύνθετο, πολυπαραγοντικό φαινόμενο με έντονη ηλεκτροχημική βάση. Η κατανόηση της θερμοδυναμικής τάσης και της κινητικής των αντιδράσεων, σε συνδυασμό με τη γνώση του περιβάλλοντος λειτουργίας, είναι κρίσιμη για την πρόληψη αστοχιών. Στις τεχνικές εγκαταστάσεις, ιδιαίτερα σε υπόγειες σωληνώσεις υπό πίεση, η διάβρωση μπορεί να εξελιχθεί σιωπηρά και τοπικά, οδηγώντας σε διαρροές χωρίς εμφανή προειδοποιητικά σημάδια. Συνεπώς,



η ορθή επιλογή υλικών, η κατάλληλη αντιδιαβρωτική προστασία και η συστηματική επιθεώρηση αποτελούν βασικές προϋποθέσεις για τη διασφάλιση της δομικής ακεραιότητας και της λειτουργικής ασφάλειας.

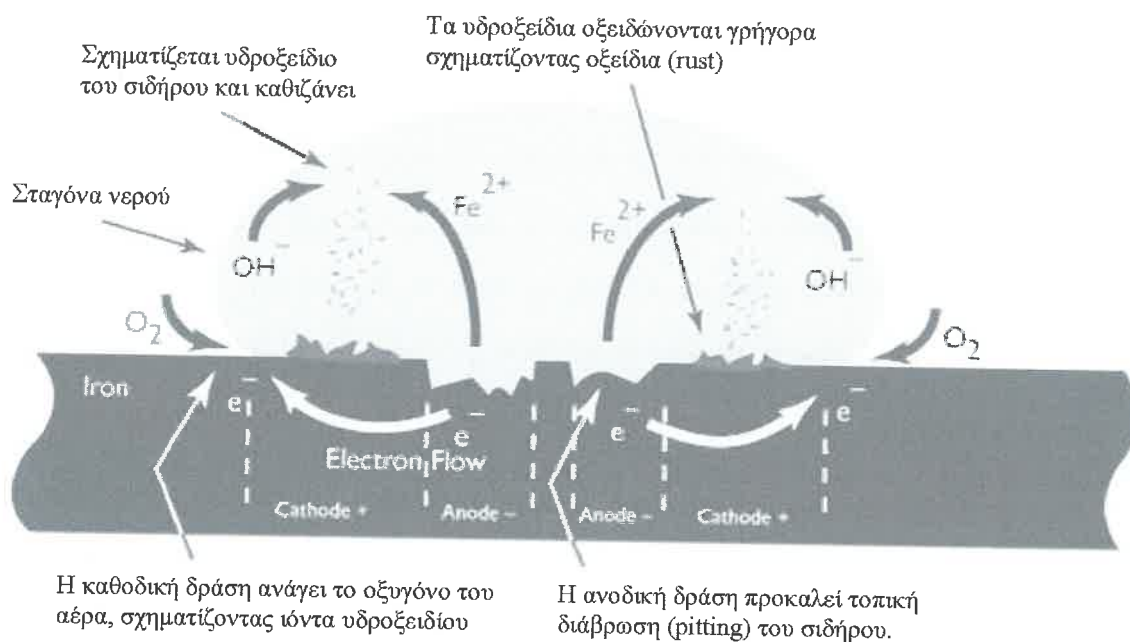
1.4 Μηχανισμός Διάβρωσης Κοινού Ανθρακούχου Χάλυβα

Η διάβρωση του χάλυβα αποτελεί κατεξοχήν ηλεκτροχημικό φαινόμενο, το οποίο προκύπτει από τη θερμοδυναμική τάση του σιδήρου να επανέλθει στη φυσική του μορφή, δηλαδή σε οξειδωμένες ενώσεις όπως οξείδια και υδροξείδια. Ο χάλυβας, ως κράμα με κύριο συστατικό τον σίδηρο, βρίσκεται σε μετασταθή ενεργειακή κατάσταση, δεδομένου ότι η παραγωγή του από τα μεταλλεύματα προϋποθέτει αναγωγικές διεργασίες υψηλής ενέργειας. Υπό την παρουσία κατάλληλου περιβάλλοντος, κυρίως υγρασίας και διαλυμένου οξυγόνου, ενεργοποιούνται ηλεκτροχημικές αντιδράσεις που οδηγούν στη σταδιακή οξείδωσή του.

Ο βασικός μηχανισμός διάβρωσης του χάλυβα περιλαμβάνει την ανάπτυξη μικροσκοπικών γαλβανικών στοιχείων στην επιφάνειά του (Εικόνα 4). Ακόμη και σε φαινομενικά ομοιογενές υλικό, υπάρχουν μικροδομικές ανομοιογένειες, όπως διαφοροποιήσεις στη σύσταση, εγκλείσματα, όρια κόκκων ή υπολειμματικές τάσεις, που δημιουργούν τοπικές διαφορές δυναμικού.

Οι περιοχές με χαμηλότερο ηλεκτροχημικό δυναμικό λειτουργούν ως άνοδοι, όπου λαμβάνει χώρα η οξείδωση του σιδήρου σύμφωνα με την αντίδραση:





Εικόνα 4: Ηλεκτροχημικός μηχανισμός διάβρωσης χάλυβα μέσω ανάπτυξης μικροσκοπικών γαλβανικών στοιχείων

Τα ηλεκτρόνια που απελευθερώνονται μεταφέρονται μέσω της μεταλλικής μήτρας σε γειτονικές περιοχές που λειτουργούν ως κάθοδοι, όπου καταναλώνονται σε αντιδράσεις αναγωγής. Σε ουδέτερα ή ελαφρώς αλκαλικά περιβάλλοντα, η κυρίαρχη καθοδική αντίδραση είναι η αναγωγή του διαλυμένου οξυγόνου:



Σε όξινα περιβάλλοντα, ενδέχεται να κυριαρχεί η αναγωγή ιόντων υδρογόνου προς μοριακό υδρογόνο. Η ταυτόχρονη ύπαρξη ανοδικών και καθοδικών περιοχών, σε συνδυασμό με την παρουσία ηλεκτρολύτη που επιτρέπει τη μεταφορά ιόντων, καθιστά δυνατή τη συνεχή λειτουργία του ηλεκτροχημικού κυκλώματος. Τα ιόντα Fe^{2+} που παράγονται στην άνοδο αντιδρούν περαιτέρω με υδροξυλιόντα και οξυγόνο, σχηματίζοντας υδροξείδια και οξείδια σιδήρου, τα οποία συνιστούν τα προϊόντα διάβρωσης.



Η αρχική φάση της διάβρωσης συχνά οδηγεί στον σχηματισμό υδροξειδίου του σιδήρου $\text{Fe}(\text{OH})_2$, το οποίο οξειδώνεται περαιτέρω σε $\text{Fe}(\text{OH})_3$ και τελικά μετατρέπεται σε ένυδρα οξειδία όπως FeOOH και $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$. Σε συνθήκες περιορισμένου οξυγόνου μπορεί να σχηματιστεί μαγνητίτης (Fe_3O_4). Τα προϊόντα αυτά χαρακτηρίζονται από πορώδη και χαλαρή δομή, γεγονός που επιτρέπει τη διείσδυση υγρασίας και οξυγόνου προς το υπόστρωμα, με αποτέλεσμα η διάβρωση να συνεχίζεται. Σε αντίθεση με μέταλλα τα οποία σχηματίζουν παθητικά οξειδία (films), ο κοινός ανθρακούχος χάλυβας δεν αναπτύσσει σταθερή και συνεκτική προστατευτική στοιβάδα υπό συνηθισμένες ατμοσφαιρικές ή υγρές συνθήκες.

Η κινητική του φαινομένου καθορίζεται από την ισορροπία μεταξύ ανοδικών και καθοδικών αντιδράσεων, όπως περιγράφεται από τις καμπύλες πόλωσης. Παράγοντες όπως η θερμοκρασία, η συγκέντρωση οξυγόνου, το pH και η παρουσία ιόντων, όπως τα χλωριόντα, επηρεάζουν σημαντικά την ταχύτητα των αντιδράσεων και συνεπώς τον ρυθμό διάβρωσης. Επίσης η μικροδομή του χάλυβα διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στον μηχανισμό. Σε πολυφασικά μικροδομικά συστήματα, όπως ο φερριτο-περλιτικός χάλυβας, οι διαφορές δυναμικού μεταξύ φερρίτη και σεμεντίτη μπορεί να δημιουργήσουν μικρογαλβανικά στοιχεία. Ο φερρίτης, όντας ηλεκτροχημικά πιο ενεργός, διαβρώνεται εκλεκτικά, οδηγώντας σε μικροσκοπική υποβάθμιση της δομής. Επιπλέον, μη μεταλλικά εγκλείσματα, όπως θειούχο μαγγάνιο, αποτελούν συχνά σημεία έναρξης τοπικής διάβρωσης, καθώς διαταράσσουν τη συνέχεια της επιφάνειας και μεταβάλλουν το τοπικό ηλεκτροχημικό πεδίο.

Ιδιαίτερη σημασία έχει και η αλληλεπίδραση μηχανικών τάσεων με τη διάβρωση. Η παρουσία εφελκυστικών τάσεων μπορεί να επιταχύνει τη διάλυση του μετάλλου σε συγκεκριμένες περιοχές, ενώ σε συνδυασμό με διαβρωτικό περιβάλλον ενδέχεται να οδηγήσει σε φαινόμενα ρηγμάτωσης λόγω διάβρωσης υπό τάση. Αν και ο μηχανισμός



αυτός διαφοροποιείται από την απλή ηλεκτροχημική απώλεια υλικού, βασίζεται επίσης στην τοπική ενίσχυση της ανοδικής διάλυσης.

Ο μηχανισμός διάβρωσης του χάλυβα είναι αποτέλεσμα σύζευξης θερμοδυναμικής αστάθειας και ηλεκτροχημικής δραστηριότητας, η οποία εκδηλώνεται μέσω μικρογαλβανικών διεργασιών στην επιφάνεια του υλικού. Η παρουσία ηλεκτρολύτη, διαλυμένου οξυγόνου και διαφορών δυναμικού αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση για την εξέλιξη του φαινομένου. Η κατανόηση των επιμέρους σταδίων, από την ανοδική διάλυση του σιδήρου έως τον σχηματισμό και τη μορφολογία των προϊόντων διάβρωσης, είναι κρίσιμη για την ορθή ερμηνεία μηχανισμών αστοχίας και για τον σχεδιασμό κατάλληλων στρατηγικών προστασίας.

1.5 Μηχανισμός Διάβρωσης Κοινού Ανθρακούχου Χάλυβα στο Έδαφος

Η διάβρωση του χάλυβα στο έδαφος αποτελεί ιδιαίτερη κατηγορία ηλεκτροχημικής υποβάθμισης, η οποία καθορίζεται από τις φυσικοχημικές ιδιότητες του εδαφικού περιβάλλοντος και από την ανομοιογένεια που αυτό επιβάλλει στην επιφάνεια του μετάλλου. Σε αντίθεση με ένα ομοιογενές υδατικό διάλυμα, το έδαφος είναι ένα πολυφασικό και ανομοιογενές σύστημα, αποτελούμενο από στερεά σωματίδια διαφορετικής κοκκομετρίας, πόρους που περιέχουν νερό, εγκλωβισμένα αέρια και διαλυμένα ιόντα. Αυτή η δομική και χημική ετερογένεια δημιουργεί διαφοροποιήσεις στη συγκέντρωση οξυγόνου, στην υγρασία, στο pH και στην ηλεκτρική αντίσταση κατά μήκος της μεταλλικής επιφάνειας, οδηγώντας σε έντονα τοπικά διαφοροποιημένες μορφές διάβρωσης.

Καθοριστικός παράγοντας είναι η ειδική ηλεκτρική αντίσταση του εδάφους. Εδάφη με χαμηλή αντίσταση, συνήθως λόγω υψηλής υγρασίας και αυξημένης συγκέντρωσης διαλυμένων αλάτων, ευνοούν την ανάπτυξη ηλεκτροχημικών κυκλωμάτων μεγάλης



έκτασης και συνεπώς υψηλότερους ρυθμούς απώλειας μετάλλου. Αντιθέτως, ξηρά και αμμώδη εδάφη με υψηλή αντίσταση περιορίζουν τη ροή ιόντων και επιβραδύνουν το φαινόμενο. Ωστόσο, ακόμη και σε εδάφη υψηλής αντίστασης, η τοπική συγκράτηση υγρασίας γύρω από τον σωλήνα μπορεί να δημιουργήσει μικροπεριβάλλοντα επιθετικής δράσης.

Ιδιαίτερη σημασία έχει η δημιουργία κελιών διαφοροποίησης αερισμού. Η επιφάνεια ενός θαμμένου σωλήνα δεν εκτίθεται ομοιόμορφα στο διαλυμένο οξυγόνο του εδαφικού διαλύματος. Περιοχές με καλύτερο αερισμό λειτουργούν ως καθοδικές, ενώ περιοχές με περιορισμένη πρόσβαση οξυγόνου καθίστανται ανοδικές και διαβρώνονται έντονα. Το φαινόμενο αυτό οδηγεί σε τοπική απώλεια πάχους, συχνά με μορφή βαθιών κοιλοτήτων. Τυπικό παράδειγμα αποτελεί η διαφορά αερισμού μεταξύ της άνω και κάτω επιφάνειας ενός αγωγού, ή μεταξύ περιοχών με διαφορετική συμπίεση και υγρασία του εδάφους.

Η χημική σύσταση του εδάφους επηρεάζει επίσης σημαντικά τον μηχανισμό. Η παρουσία ιόντων χλωρίου ενισχύει τη διάλυση των προστατευτικών προϊόντων διάβρωσης και ευνοεί την ανάπτυξη τοπικών εστιών έντονης διάβρωσης. Τα θεϊκά ιόντα και γενικότερα η υψηλή ιοντική ισχύς αυξάνουν την αγωγιμότητα του εδαφικού διαλύματος. Σε εδάφη με χαμηλό pH παρατηρείται αυξημένη διαλυτότητα των οξειδίων του σιδήρου, με αποτέλεσμα τη μειωμένη σταθερότητα των προϊόντων διάβρωσης. Αντίθετα, σε ελαφρώς αλκαλικά περιβάλλοντα μπορεί να σχηματιστούν περισσότερο συμπαγείς στοιβάδες, χωρίς όμως να εξασφαλίζεται πλήρης προστασία.

Ένας επιπλέον παράγοντας που διαφοροποιεί τη διάβρωση στο έδαφος είναι η επίδραση των μικροοργανισμών. Η μικροβιακά επιταχυνόμενη διάβρωση σχετίζεται συχνά με βακτήρια αναγωγής θεϊκών, τα οποία μετατρέπουν τα θεϊκά ιόντα σε



θειούχα, παράγοντας υδρόθειο. Το υδρόθειο αντιδρά με τον σίδηρο σχηματίζοντας θειούχες ενώσεις, ενώ ταυτόχρονα μεταβάλλει το τοπικό ηλεκτροχημικό περιβάλλον. Η δραστηριότητα αυτών των μικροοργανισμών μπορεί να οδηγήσει σε έντονα τοπική διάβρωση και σχηματισμό χαρακτηριστικών προϊόντων, όπως θειούχος σίδηρος, που ανιχνεύονται με μεταλλογραφική ή/και στοιχειακή ανάλυση.

Η ετερογένεια του εδάφους μπορεί επίσης να δημιουργήσει μακροσκοπικά γαλβανικά στοιχεία κατά μήκος του ίδιου του αγωγού. Διαφορές στη σύσταση του εδάφους κατά μήκος της διαδρομής, μεταβολές στην υγρασία ή στην περιεκτικότητα σε άλατα, ακόμη και διαφορές θερμοκρασίας, ενδέχεται να προκαλέσουν διαφορές δυναμικού μεταξύ τμημάτων του σωλήνα. Σε τέτοιες περιπτώσεις, το αρνητικότερο τμήμα δρα ως άνοδος και υφίσταται επιταχυνόμενη διάβρωση. Το φαινόμενο αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε εκτεταμένες υπόγειες εγκαταστάσεις.

Θα πρέπει να επισημανθεί, ότι η παρουσία επικαλύψεων δεν εξαλείφει τον μηχανισμό αλλά τον τροποποιεί. Σε περιπτώσεις όπου η επικάλυψη παρουσιάζει ασυνέχειες ή τοπικές φθορές, το εκτεθειμένο μέταλλο μπορεί να λειτουργήσει ως μικρή άνοδος σε σχέση με τη μεγάλη καθοδική επιφάνεια που δημιουργεί η υπόλοιπη επικαλυμμένη περιοχή. Το αποτέλεσμα είναι υψηλή πυκνότητα ρεύματος στην αστοχία της επικάλυψης και ταχεία τοπική διάτρωση. Ο μηχανισμός αυτός εξηγεί γιατί μικρές βλάβες coating σε υπόγειους αγωγούς οδηγούν συχνά σε βαθιές, εντοπισμένες απώλειες πάχους.

Τέλος, η μηχανική αλληλεπίδραση μεταξύ σωλήνα και εδάφους μπορεί να ενισχύσει το φαινόμενο. Καθιζήσεις, τοπικές πιέσεις ή παραμένουσες τάσεις δημιουργούν περιοχές αυξημένης ενέργειας, οι οποίες ενδέχεται να εμφανίσουν ενισχυμένη ηλεκτροχημική δραστηριότητα. Σε συνδυασμό με επιθετικό περιβάλλον, μπορεί να αναπτυχθούν



ρωγμές σχετιζόμενες με διάβρωση υπό τάση. Η διάβρωση του χάλυβα στο έδαφος δεν αποτελεί απλή προέκταση της κλασσικής ηλεκτροχημικής διάβρωσης, αλλά αποτέλεσμα πολύπλοκης αλληλεπίδρασης ηλεκτροχημικών, γεωχημικών και βιολογικών παραμέτρων. Η ανομοιογένεια του περιβάλλοντος οδηγεί κυρίως σε τοπικές μορφές υποβάθμισης, οι οποίες είναι δυσκολότερο να προβλεφθούν και να ανιχνευθούν έγκαιρα. Για τον λόγο αυτό, η αξιολόγηση των ιδιοτήτων του εδάφους, η σωστή αντιδιαβρωτική προστασία και η περιοδική παρακολούθηση αποτελούν κρίσιμα στοιχεία για τη διασφάλιση της μακροχρόνιας ακεραιότητας θαμμένων χαλύβδινων κατασκευών.

1.6 Μηχανισμός Διάβρωσης με Βελονισμούς Χάλυβα στο Έδαφος

Η διάβρωση με βελονισμούς (pitting corrosion) σε χάλυβα τοποθετημένο στο έδαφος αποτελεί ιδιαίτερα επικίνδυνη μορφή τοπικής προσβολής, διότι οδηγεί σε έντονη απώλεια πάχους σε περιορισμένες περιοχές χωρίς εμφανή εκτεταμένη γενικευμένη οξείδωση στην υπόλοιπη επιφάνεια. Στο εδαφικό περιβάλλον, η ανάπτυξη βελονισμών σχετίζεται άμεσα με τη χωρική ανομοιογένεια του ηλεκτρολύτη, τις διαφορές αερισμού, τη σύσταση των διαλυμένων ιόντων και τις μεταλλουργικές ιδιότητες του ίδιου του χάλυβα.

Η εκκίνηση ενός βελονισμού προϋποθέτει τοπική διαταραχή της επιφανειακής κατάστασης του μετάλλου. Στους κοινούς ανθρακούχους χάλυβες, ακόμη και αν δεν υφίσταται παθητικό φιλμ όπως στους ανοξείδωτους, σχηματίζονται επιφανειακά προϊόντα οξείδωσης που λειτουργούν ως ημιπροστατευτικά στρώματα. Σε εδαφικό περιβάλλον που περιέχει χλωρίοντα ή άλλα επιθετικά ανιόντα, τα προϊόντα αυτά αποσταθεροποιούνται τοπικά. Η παρουσία εγκλεισμάτων (π.χ. θειούχων μαγγανίου), μικροδομικών ετερογενειών ή μηχανικών βλαβών στην επιφάνεια (χαραγές, ασυνέχειες επικάλυψης) δημιουργούν περιοχές με ελαφρώς διαφορετικό

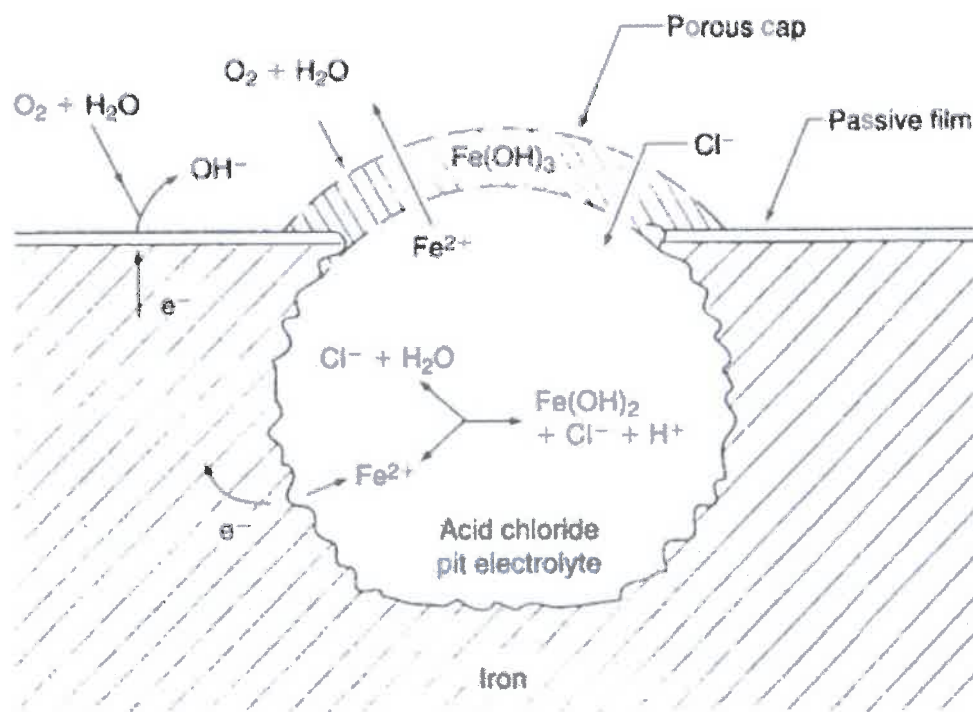


ηλεκτροχημικό δυναμικό. Αυτές οι μικροπεριοχές μπορούν να λειτουργήσουν ως τοπικές άνοδοι σε σχέση με την υπόλοιπη επιφάνεια.

Στο σημείο έναρξης, η τοπική ανοδική διάλυση του σιδήρου οδηγεί στον σχηματισμό ιόντων Fe^{2+} . Η γεωμετρία της κοιλότητας που αρχίζει να σχηματίζεται περιορίζει τη διάχυση οξυγόνου προς το εσωτερικό της. Έτσι δημιουργείται συνθήκη διαφορικού αερισμού: το εσωτερικό του βελονισμού καθίσταται ανοδικό, ενώ η γύρω επιφάνεια, που τροφοδοτείται ευκολότερα με οξυγόνο από τους πόρους του εδάφους, λειτουργεί καθοδικά. Η καθοδική αντίδραση λαμβάνει χώρα κυρίως στην περιφέρεια, ενισχύοντας τη διατήρηση της ανοδικής διάλυσης στο εσωτερικό της κοιλότητας.

Καθοριστικό ρόλο στην αυτοενίσχυση του φαινομένου παίζει η τοπική μεταβολή της χημείας στο εσωτερικό του βελονισμού. Τα ιόντα Fe^{2+} που παράγονται υδρολύονται, οδηγώντας σε τοπική μείωση του pH. Η όξινη μικροπεριοχή αυξάνει σημαντικά τον ρυθμό διάλυσης του σιδήρου. Παράλληλα, για λόγους ηλεκτρικής ουδετερότητας, ανιόντα από το εδαφικό διάλυμα (ιδίως χλωριόντα) μεταναστεύουν προς το εσωτερικό της κοιλότητας. Τα χλωριόντα σχηματίζουν διαλυτά σύμπλοκα με τα ιόντα σιδήρου, εμποδίζοντας την απόθεση σταθερών προϊόντων διάβρωσης που θα μπορούσαν να φράξουν ή να παθητικοποιήσουν την περιοχή. Το αποτέλεσμα είναι η δημιουργία ενός «κλειστού» μικροπεριβάλλοντος με χαμηλό pH και υψηλή συγκέντρωση διαλυμένων μεταλλικών ιόντων, το οποίο συντηρεί και επιταχύνει τον βελονισμό (Εικόνα 5).

Στο έδαφος, η ανομοιομορφία της υγρασίας και της αγωγιμότητας ενισχύει το χωρικό εντοπισμό της προσβολής. Περιοχές με υψηλότερη περιεκτικότητα σε άλατα ή υγρασία εμφανίζουν αυξημένη ιοντική αγωγιμότητα, διευκολύνοντας τη ροή ρεύματος μεταξύ ανοδικών και καθοδικών περιοχών. Αντίθετα, πιο ξηρές ή αμμώδεις ζώνες μπορεί να λειτουργούν ως σχετικά καθοδικές περιοχές λόγω καλύτερου αερισμού.



Εικόνα 5: Μηχανισμός διάβρωσης χάλυβα με βελονισμούς (pitting corrosion)

Η εναλλαγή αυτών των μικροεστιών διαφορετικών συνθηκών κατά μήκος ενός θαμμένου σωλήνα δημιουργεί τοπικές ηλεκτροχημικές κυψέλες που ευνοούν την ανάπτυξη μεμονωμένων αλλά βαθιών κοιλοτήτων.

Ιδιαίτερη σημασία έχει και η αλληλεπίδραση με μικροοργανισμούς. Σε αναερόβιες συνθήκες, βακτήρια αναγωγής θεικών μπορούν να μεταβάλλουν το τοπικό δυναμικό και να παράγουν θειούχα συστατικά, τα οποία επηρεάζουν τη σταθερότητα των προϊόντων διάβρωσης και διευκολύνουν την τοπική ανοδική διάλυση. Η βιολογική δραστηριότητα μπορεί να επιδεινώσει τη χημεία μεταξύ εσωτερικού και εξωτερικού της κοιλότητας, ενισχύοντας τον αυτοκαταλυτικό χαρακτήρα της διαδικασίας.

Από μηχανικής πλευράς, η διάβρωση με βελονισμούς είναι ιδιαίτερα επικίνδυνη διότι η απώλεια υλικού δεν κατανέμεται ομοιόμορφα. Ένας σωλήνας μπορεί να παρουσιάζει



μικρή μέση απώλεια πάχους, αλλά να έχει αναπτύξει μία ή λίγες κοιλότητες που διαπερνούν σημαντικό ποσοστό του τοιχώματος. Η τοπική αύξηση της τάσης γύρω από τον βελονισμό, σε συνδυασμό με εσωτερική πίεση ή εξωτερικά φορτία εδάφους, μπορεί να οδηγήσει σε ρηγματώση ή διάτρηση. Επιπλέον, η γεωμετρία της κοιλότητας συχνά είναι στενή στην επιφάνεια και βαθύτερη στο εσωτερικό, καθιστώντας δυσχερή τον οπτικό εντοπισμό χωρίς κατάλληλες μεθόδους μη καταστροφικού ελέγχου.

Η απώλεια υλικού κατά τη διάβρωση με βελονισμούς, στην περίπτωση κοινού ανθρακούχου χάλυβα στο έδαφος, παρουσιάζει έντονα τοπικό χαρακτήρα και δεν μπορεί να περιγραφεί επαρκώς μέσω μιας μέσης τιμής γενικευμένης διάβρωσης. Σε αντίθεση με την ομοιόμορφη προσβολή, όπου η μείωση πάχους κατανέμεται σχετικά ομοιόμορφα στην επιφάνεια, ο βελονισμός οδηγεί σε συγκέντρωση της μεταλλικής διάλυσης σε μικρές ενεργές περιοχές, με αποτέλεσμα η τοπική ταχύτητα απώλειας υλικού να είναι πολλαπλάσια της μέσης.

Σε εδαφικά περιβάλλοντα μέτριας έως υψηλής διαβρωτικότητας, έχουν αναφερθεί τοπικοί ρυθμοί διείσδυσης της τάξης των 300–350 $\mu\text{m}/\text{έτος}$, ιδιαίτερα κατά τα αρχικά στάδια ανάπτυξης του βελονισμού, όταν η ηλεκτροχημική δραστηριότητα στο εσωτερικό της κοιλότητας είναι έντονη και το μικροπεριβάλλον χαρακτηρίζεται από χαμηλό pH και αυξημένη συγκέντρωση επιθετικών ιόντων. Οι τιμές αυτές δεν αντιστοιχούν σε συνολική απώλεια πάχους του σωλήνα, αλλά σε βάθος διείσδυσης σε συγκεκριμένα σημεία. Έτσι, ένας σωλήνας με πάχος τοιχώματος της τάξης των 3 mm (3000 μm) μπορεί να εμφανίσει κρίσιμη τοπική απομείωση σε σχετικά μικρό χρονικό διάστημα (≈ 8.5 έτη), εφόσον οι συνθήκες παραμείνουν ευνοϊκές για την εξέλιξη της κοιλότητας.

Η εξέλιξη της απώλειας υλικού δεν είναι γραμμική με τον χρόνο. Συχνά παρατηρείται υψηλός αρχικός ρυθμός, ο οποίος ενδέχεται να μειωθεί λόγω μερικής πλήρωσης της



κοιλότητας με προϊόντα διάβρωσης ή μεταβολής των εδαφικών συνθηκών. Ωστόσο, σε περιβάλλοντα με διαρκή υγρασία, υψηλή αγωγιμότητα και παρουσία χλωριόντων ή μικροβιακής δραστηριότητας, η αυτοκαταλυτική φύση του βελονισμού μπορεί να διατηρήσει σημαντικούς ρυθμούς διείδυσης για μεγάλο χρονικό διάστημα.

Από μηχανικής σκοπιάς, η κρίσιμη παράμετρος δεν είναι μόνο το μέσο βάθος των βελονισμών, αλλά το μέγιστο βάθος (maximum pit depth) και η στατιστική κατανομή τους κατά μήκος της σωλήνωσης. Η αστοχία προκαλείται συνήθως όταν το τοπικό υπολειπόμενο πάχος δεν επαρκεί για να ανταπεξέλθει στα εσωτερικά και εξωτερικά φορτία, ακόμη και αν η μέση απώλεια υλικού παραμένει χαμηλή. Συνεπώς, η αξιολόγηση της δομικής ακεραιότητας σε θαμμένες χαλύβδινες κατασκευές πρέπει να λαμβάνει υπόψη την πιθανότητα τοπικών ρυθμών διάβρωσης της τάξης εκατοντάδων μικρομέτρων ανά έτος, οι οποίοι μπορούν να καθορίσουν τον πραγματικό χρόνο ζωής του στοιχείου.

Η διάβρωση με βελονισμούς σε θαμμένο χάλυβα είναι αποτέλεσμα σύζευξης ηλεκτροχημικών, γεωχημικών, μικροδομικών και ενδεχομένως βιολογικών παραμέτρων. Ο αυτοενισχυόμενος χαρακτήρας της, μέσω τοπικής οξίνισης και συσσώρευσης επιθετικών ιόντων, καθιστά το φαινόμενο ιδιαίτερα επιθετικό ακόμη και σε εδάφη που δεν θεωρούνται γενικά υψηλής διαβρωτικότητας. Για τον λόγο αυτό, η αξιολόγηση κινδύνου σε υπόγειες εγκαταστάσεις δεν πρέπει να βασίζεται αποκλειστικά στη μέση ταχύτητα γενικευμένης διάβρωσης, αλλά και στη δυνατότητα ανάπτυξης τοπικών, μεγάλου βάθους βελονισμών που μπορεί να καθορίσουν τον χρόνο αστοχίας της κατασκευής.



1.7 Τεχνικές Προδιαγραφές για Βιομηχανικές Εγκαταστάσεις

Σύμφωνα με το ισχύον θεσμικό πλαίσιο για βιομηχανικές εγκαταστάσεις στην Ελλάδα, όπως αυτό καθορίζεται στο **ΦΕΚ 477/Β/1993**, τα συστήματα σωληνώσεων οφείλουν να μελετώνται, να κατασκευάζονται και να εγκαθίστανται σύμφωνα με “αναγνωρισμένο Κανονισμό Σωληνώσεων”. Στην παράγραφο 2.3.1.1 ορίζεται ότι ως αναγνωρισμένος κανονισμός νοείται ο σχετικός Εθνικός Κανονισμός ή Πρότυπο ΕΛΟΤ, ή, ελλείψει αυτών, αντίστοιχο πρότυπο χώρας της Ευρωπαϊκής Ένωσης ή των Ηνωμένων Πολιτειών Αμερικής. Η διατύπωση αυτή καθιστά σαφές ότι το ΦΕΚ δεν αναπτύσσει αναλυτικές τεχνικές απαιτήσεις, αλλά παραπέμπει ρητά στην εφαρμογή διεθνώς αποδεκτών και τεκμηριωμένων προτύπων. Βασικά Ευρωπαϊκά / ISO πρότυπα που ισχύουν και στην Ελλάδα είναι:

- ❖ Το πρότυπο EN 16125 “*LPG Equipment and Accessories – Pipework Systems and Supports – LPG in Liquid and Vapour Phase*” αφορά τον σχεδιασμό, την κατασκευή, την εγκατάσταση και την επιθεώρηση συστημάτων σωληνώσεων υγραερίου (LPG), τόσο σε υγρή όσο και σε αέρια φάση. Καλύπτει σταθερές εγκαταστάσεις, όπως βιομηχανικές ή εμπορικές μονάδες, και καθορίζει απαιτήσεις για επιλογή υλικών, πάχη τοιχώματος, στηρίξεις, διαστολικές καταπονήσεις, προστασία έναντι μηχανικών βλαβών και μέτρα αποφυγής διαρροών. Περιλαμβάνει επίσης κατευθυντήριες οδηγίες για δοκιμές στεγανότητας, έλεγχο διαρροών και θέση σε λειτουργία, λαμβάνοντας υπόψη τις ιδιότητες του LPG ως εύφλεκτου ρευστού υπό πίεση.
- ❖ Το πρότυπο ΕΛΟΤ EN 15001-1 “*Gas Infrastructure – Gas Installation Pipework with an Operating Pressure Greater than 0,5 bar for Industrial Installations and Non-Industrial Installations – Part 1: Detailed Functional Requirements for Design, Materials, Construction, Inspection and Testing*”) αποτελεί βασικό ευρωπαϊκό πρότυπο για σωληνώσεις εγκαταστάσεων φυσικού αερίου με πίεση λειτουργίας



άνω των 0.5 bar, τόσο σε βιομηχανικές όσο και σε μη βιομηχανικές εφαρμογές. Η έκδοση E2 αφορά την ελληνική υιοθέτηση από τον ΕΛΟΤ.

- ❖ Το πρότυπο EN ISO 3183 *“Petroleum and Natural Gas Industries – Steel Pipes for Pipeline Transportation Systems”* καθορίζει τις τεχνικές προδιαγραφές για χαλύβδινους σωλήνες που χρησιμοποιούνται σε αγωγούς μεταφοράς πετρελαίου και φυσικού αερίου. Προδιαγράφει χημική σύσταση, μηχανικές ιδιότητες, κατηγορίες ποιότητας (π.χ. L245, L360 κ.λπ.), απαιτήσεις αντοχής, δοκιμές (υδραυλικές, μη καταστροφικές), ανοχές διαστάσεων και απαιτήσεις ιχνηλασιμότητας. Το πρότυπο εστιάζει κυρίως στον σωλήνα ως προϊόν (product standard) και όχι στο συνολικό σύστημα σωληνώσεων, αλλά αποτελεί βασική αναφορά για την επιλογή υλικού σε υπόγειους ή υπέργειους αγωγούς μεταφοράς αερίων καυσίμων.
- ❖ Τέλος, το πρότυπο EN 15589-1 *“Cathodic Protection of Buried or Immersed Metallic Structures – Part 1: Pipelines”* αφορά τον σχεδιασμό, την εγκατάσταση, τη θέση σε λειτουργία και την παρακολούθηση συστημάτων καθοδικής προστασίας για υπόγειους ή βυθισμένους μεταλλικούς αγωγούς. Καθορίζει κριτήρια προστασίας (π.χ. δυναμικά έναντι ηλεκτροδίου αναφοράς), απαιτήσεις για ανοδικά συστήματα (θυσιαζόμενες άνοδοι ή επιβαλλόμενο ρεύμα), ελέγχους επικάλυψης, μετρήσεις δυναμικού και διαδικασίες περιοδικής επιθεώρησης. Το πρότυπο αυτό εφαρμόζεται συμπληρωματικά προς τα πρότυπα σχεδιασμού σωληνώσεων, διασφαλίζοντας τη μακροχρόνια προστασία έναντι διάβρωσης σε εδαφικό ή υδάτινο περιβάλλον.

Κεντρικό στοιχείο των αναγνωρισμένων κανονισμών αποτελεί ο μηχανικός σχεδιασμός υπό πίεση. Προσδιορίζεται η επιτρεπόμενη τάση του υλικού σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία λειτουργίας, λαμβάνονται υπόψη συντελεστές ασφαλείας, ανοχές



κατασκευής και περιθώρια διάβρωσης (corrosion allowance), ενώ ελέγχονται τόσο οι εσωτερικές πιέσεις όσο και οι εξωτερικές φορτίσεις, όπως βάρος, θερμικές διαστολές, σεισμικά ή ανεμολογικά φορτία. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στον έλεγχο των στηρίξεων και των αγκυρώσεων, ώστε να αποφεύγονται υπερβολικές καταπονήσεις στα σημεία σύνδεσης με εξοπλισμό.

Η επιλογή των υλικών αποτελεί επίσης κρίσιμη παράμετρο. Τα πρότυπα ορίζουν επιτρεπόμενες κατηγορίες χαλύβων και άλλων μεταλλικών υλικών, με βάση πρότυπα υλικών (π.χ. ASTM, EN), και απαιτούν τεκμηρίωση των μηχανικών ιδιοτήτων, της χημικής σύστασης και της καταλληλότητας για το συγκεκριμένο ρευστό. Παράγοντες όπως η αντοχή σε διάβρωση, η συμπεριφορά σε υψηλές ή χαμηλές θερμοκρασίες, η αντοχή σε κόπωση και η συγκολλησιμότητα αξιολογούνται στο στάδιο της μελέτης. Σε περιβάλλοντα με αυξημένη διαβρωτική δράση, προβλέπεται είτε επιλογή κατάλληλου κράματος είτε λήψη μέτρων προστασίας, όπως επικαλύψεις ή καθοδική προστασία.

Οι διαδικασίες συγκόλλησης και οι μη καταστροφικοί έλεγχοι ρυθμίζονται επίσης λεπτομερώς. Απαιτείται πιστοποίηση διαδικασιών συγκόλλησης (WPS/PQR), προσόντα συγκολλητών, καθώς και διενέργεια ελέγχων όπως οπτικός, ακτινογραφικός, υπερηχογραφικός ή διεισδυτικών υγρών, ανάλογα με την κατηγορία της σωλήνωσης και το επίπεδο επικινδυνότητας. Η τελική δοκιμή πίεσης, συνήθως υδραυλική, αποτελεί υποχρεωτικό στάδιο πριν τη θέση σε λειτουργία, με πίεση ανώτερη της μέγιστης επιτρεπόμενης λειτουργικής, σύμφωνα με τον εκάστοτε κανονισμό. Επιπλέον, τα αναγνωρισμένα πρότυπα προβλέπουν κατηγοριοποίηση των σωληνώσεων με βάση τη φύση του ρευστού (εύφλεκτο, τοξικό, διαβρωτικό), την πίεση και τη θερμοκρασία, καθορίζοντας διαφορετικές απαιτήσεις επιθεώρησης και ελέγχου. Η τεκμηρίωση της εγκατάστασης, μέσω σχεδίων, καταλόγων υλικών και φακέλου ποιότητας, αποτελεί αναπόσπαστο τμήμα της συμμόρφωσης.



Συνεπώς, στο θεωρητικό και κανονιστικό πλαίσιο μιας τεχνικής έκθεσης για βιομηχανικές σωληνώσεις, είναι ουσιώδες να επισημαίνεται ότι η μελέτη και κατασκευή δεν βασίζεται σε γενικές πρακτικές, αλλά σε συγκεκριμένα, διεθνώς αναγνωρισμένα πρότυπα, όπως προβλέπεται από το ΦΕΚ 477/Β/1993. Κάθε έργο οφείλει να δηλώνει ρητά ποιος κανονισμός εφαρμόζεται (π.χ. ASTM ή EN), και να τεκμηριώνει ότι όλα τα στάδια – από τον υπολογισμό πάχους έως τις δοκιμές και την τελική παραλαβή – συμμορφώνονται με τις απαιτήσεις του συγκεκριμένου προτύπου. Η συμμόρφωση με αναγνωρισμένο κανονισμό δεν αποτελεί τυπική διαδικασία, αλλά βασικό μηχανισμό διασφάλισης της δομικής ακεραιότητας, της λειτουργικής αξιοπιστίας και της ασφάλειας προσωπικού και εγκαταστάσεων. Ως εκ τούτου, σε κάθε βιομηχανική εγκατάσταση, η επιλογή και εφαρμογή του κατάλληλου προτύπου σωληνώσεων αποτελεί θεμελιώδη τεχνική και νομική απαίτηση.

1.7.1 Υλικό και Πάχος Τοιχώματος Σωλήνα

Στο πλαίσιο των ευρωπαϊκών προτύπων που εφαρμόζονται σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις και υπόγειες γραμμές μεταφοράς αερίων ή καυσίμων, όπως τα EN ISO 3183 και ΕΛΟΤ EN 15001-1, η επιλογή του υλικού και ο καθορισμός του πάχους τοιχώματος του σωλήνα αποτελούν θεμελιώδη στάδια του μηχανικού σχεδιασμού. Για υπόγειες σωληνώσεις, οι απαιτήσεις δεν περιορίζονται μόνο στην αντοχή έναντι εσωτερικής πίεσης, αλλά λαμβάνουν υπόψη και τις εξωτερικές μηχανικές καταπονήσεις που επιβάλλει το έδαφος.

Ως προς το υλικό, οι υπόγειοι αγωγοί κατασκευάζονται κατά κανόνα από κοινούς ανθρακούχους ή χαμηλής κραματοποίησης χάλυβες, οι οποίοι συμμορφώνονται με ευρωπαϊκά πρότυπα προϊόντος. Το EN ISO 3183 καθορίζει κατηγορίες ποιότητας (π.χ. L245, L290, L360 κ.λπ.), οι οποίες αντιστοιχούν σε ελάχιστες τιμές ορίου διαρροής και



εφελκυστικής αντοχής. Η επιλογή της κατηγορίας γίνεται βάσει της πίεσης σχεδιασμού, της διαμέτρου του αγωγού και του επιπέδου αξιοπιστίας που απαιτείται. Σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις φυσικού αερίου, το ΕΛΟΤ EN 15001-1 απαιτεί τα υλικά να διαθέτουν τεκμηριωμένες μηχανικές ιδιότητες και κατάλληλη συγκολλησιμότητα, ώστε να εξασφαλίζεται η ακεραιότητα των ενώσεων σε όλο το μήκος της υπόγειας γραμμής.

Η χημική σύσταση του χάλυβα περιορίζεται ως προς τα επίπεδα άνθρακα και άλλων στοιχείων, προκειμένου να επιτυγχάνεται καλή συγκολλησιμότητα και επαρκής δυσθραυστότητα. Για υπόγειες εφαρμογές, ιδιαίτερη σημασία έχει η αντοχή σε ψαθυρή θραύση, ιδίως σε περιοχές χαμηλών θερμοκρασιών. Τα πρότυπα προβλέπουν δοκιμές κρούσης (Charpy) και ελέγχους ομοιογένειας, διασφαλίζοντας ότι το υλικό παρουσιάζει επαρκή δυσθραυστότητα υπό τις αναμενόμενες συνθήκες λειτουργίας.

Ο καθορισμός του πάχους τοιχώματος βασίζεται πρωτίστως στην πίεση σχεδιασμού και στην ονομαστική εξωτερική ή εσωτερική διάμετρο του σωλήνα. Τα πρότυπα απαιτούν ο υπολογισμός να γίνεται με βάση το επιτρεπόμενο όριο τάσης του υλικού, λαμβάνοντας υπόψη συντελεστές ασφαλείας. Στις υπόγειες σωληνώσεις, εκτός από την περιφερειακή (hoop) τάση λόγω εσωτερικής πίεσης, συνεκτιμώνται και εξωτερικά φορτία, όπως το βάρος του υπερκείμενου εδάφους, κυκλοφοριακά φορτία (όταν η σωλήνωση διέρχεται κάτω από οδούς) και πιθανές τοπικές καθιζήσεις. Επομένως, το τελικό πάχος μπορεί να προκύπτει όχι μόνο από την πίεση, αλλά και από κριτήρια αντοχής σε εξωτερική πίεση ή παραμόρφωση.

Στις περιπτώσεις όπου χρησιμοποιείται η ονοματολογία "Schedule" (ιδίως σε σωλήνες που ακολουθούν διαστασιολόγηση τύπου ASME), το Schedule εκφράζει τυποποιημένο πάχος τοιχώματος για συγκεκριμένη ονομαστική διάμετρο. Αν και τα ευρωπαϊκά



πρότυπα δεν βασίζονται αποκλειστικά στο σύστημα Schedule, στην πράξη συχνά γίνεται αντιστοίχιση μεταξύ υπολογισμένου απαιτούμενου πάχους και του πλησιέστερου ανώτερου τυποποιημένου πάχους (π.χ. Schedule 40, 80). Σε κάθε περίπτωση, το επιλεγμένο πάχος πρέπει να είναι ίσο ή μεγαλύτερο από το ελάχιστο υπολογισμένο πάχος σχεδιασμού.

Η επιλογή υλικού και πάχους τοιχώματος για υπόγειες χαλύβδινες σωληνώσεις δεν αποτελεί απλή επιλογή εμπορικής διατομής, αλλά αποτέλεσμα τεκμηριωμένου μηχανικού υπολογισμού σύμφωνα με τα εφαρμοστέα πρότυπα EN/ISO. Η τελική διαστασιολόγηση πρέπει να καλύπτει τόσο τις εσωτερικές πιέσεις λειτουργίας όσο και τις εξωτερικές εδαφικές επιδράσεις, διασφαλίζοντας την απαιτούμενη μηχανική αντοχή και δομική ακεραιότητα σε όλη τη διάρκεια ζωής της εγκατάστασης.

1.7.2 Παθητική Αντιδιαβρωτική Προστασία

Στην περίπτωση εγκαταστάσεων υγραερίου (LPG), το βασικό ευρωπαϊκό πρότυπο που διέπει τον σχεδιασμό και την κατασκευή των συστημάτων σωληνώσεων είναι το EN 16125. Το πρότυπο αυτό αφορά σταθερές εγκαταστάσεις LPG και καθορίζει τις απαιτήσεις για τον σχεδιασμό, τα υλικά, την κατασκευή, τη δοκιμή και την προστασία των σωληνώσεων, με κύριο στόχο τη διασφάλιση της λειτουργικής ακεραιότητας και της ασφάλειας.

Σε ό,τι αφορά την αντιδιαβρωτική προστασία, το EN 16125 δεν περιορίζεται σε γενική σύσταση βαφής, αλλά απαιτεί οι χαλύβδινες σωληνώσεις – ιδίως όταν τοποθετούνται εντός εδάφους – να προστατεύονται αποτελεσματικά έναντι εξωτερικής διάβρωσης, με κατάλληλο σύστημα επικάλυψης ή/και καθοδικής προστασίας, όπου αυτό κρίνεται αναγκαίο. Η επιλογή του συστήματος πρέπει να βασίζεται στις περιβαλλοντικές



συνθήκες εγκατάστασης, όπως η υγρασία και η διαβρωτικότητα του εδάφους, καθώς και στη διάρκεια ζωής σχεδιασμού της εγκατάστασης.

Για υπόγειες σωληνώσεις LPG, η επικάλυψη λειτουργεί ως το πρωτεύον παθητικό μέσο απομόνωσης του χάλυβα από το εδαφικό ηλεκτρολυτικό περιβάλλον. Το πρότυπο απαιτεί τα χρησιμοποιούμενα υλικά επικάλυψης να παρουσιάζουν επαρκή μηχανική αντοχή κατά την επίχωση, καλή πρόσφυση στο υπόστρωμα και ανθεκτικότητα σε αποκόλληση. Ιδιαίτερη έμφαση δίδεται στα σημεία συγκόλλησης πεδίου, όπου η εργοστασιακή επικάλυψη διακόπτεται και πρέπει να αποκαθίσταται με ισοδύναμο σύστημα προστασίας. Επιπλέον, προβλέπεται η διενέργεια ελέγχων ποιότητας, όπως μετρήσεις πάχους και έλεγχος ασυνεχειών, ώστε να διασφαλίζεται η ακεραιότητα της επικάλυψης πριν από την επίχωση.

Για υπέργεια τμήματα σωληνώσεων LPG, το EN 16125 απαιτεί προστασία έναντι ατμοσφαιρικής διάβρωσης, λαμβάνοντας υπόψη έκθεση σε υγρασία, βιομηχανικούς ρύπους και υπεριώδη ακτινοβολία. Εφαρμόζονται συνήθως πολυστρωματικά συστήματα βαφής με αντιδιαβρωτικό υπόστρωμα και τελική στρώση ανθεκτική σε UV και καιρικές καταπονήσεις. Στις ζώνες μετάβασης εδάφους-ατμόσφαιρας απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή, καθώς πρόκειται για περιοχές αυξημένου κινδύνου διάβρωσης λόγω συνδυασμού συνθηκών.

Η προσέγγιση του EN 16125 είναι λειτουργική και βασίζεται στην αρχή ότι η προστασία από διάβρωση πρέπει να είναι τεκμηριωμένη και επαρκής για την προβλεπόμενη διάρκεια ζωής της εγκατάστασης. Η απαίτηση αυτή συνδέεται άμεσα με τις γενικότερες διατάξεις του ΕΛΟΤ EN 15001-1, το οποίο αφορά συστήματα σωληνώσεων αερίων καυσίμων με πίεση λειτουργίας άνω των 0,5 bar σε βιομηχανικές και εμπορικές εγκαταστάσεις. Το EN 15001-1 θέτει γενικές απαιτήσεις για υλικά, κατασκευή, δοκιμές



και προστασία έναντι διάβρωσης, απαιτώντας τα μεταλλικά μέρη να προστατεύονται κατάλληλα από το περιβάλλον λειτουργίας τους.

Για υπόγειες σωληνώσεις, η επικάλυψη λειτουργεί ως το κύριο παθητικό φράγμα μεταξύ χάλυβα και εδάφους. Οι επικαλύψεις που χρησιμοποιούνται σε αγωγούς καυσίμων είναι συνήθως πολυμερικής βάσης, όπως τριπλής στρώσης πολυαιθυλένιο (3LPE), τριπλής στρώσης πολυπροπυλένιο (3LPP) ή εποξειδικές επικαλύψεις συγκόλλησης (FBE – Fusion Bonded Epoxy). Τα συστήματα αυτά αποτελούνται από ένα στρώμα πρόσφυσης (primer), ένα ενδιάμεσο συγκολλητικό στρώμα και ένα εξωτερικό πολυμερές στρώμα μηχανικής προστασίας. Το EN ISO 21809 καθορίζει τις απαιτήσεις δοκιμών για τέτοιες επικαλύψεις, όπως αντοχή σε αποκόλληση (peel strength), αντίσταση σε καθοδική αποκόλληση, αντοχή σε κρούση, πάχος και ηλεκτρική συνέχεια.

Το πάχος της επικάλυψης επιλέγεται βάσει της κατηγορίας περιβάλλοντος και των μηχανικών καταπονήσεων κατά την επίχωση. Για υπόγειους αγωγούς μέσης και υψηλής πίεσης, τα ονομαστικά πάχη πολυμερικών επικαλύψεων κυμαίνονται συνήθως από 1.8 έως 3.5 mm, ανάλογα με τη διάμετρο και τις απαιτήσεις του έργου. Η επικάλυψη πρέπει να παρουσιάζει χαμηλή διαπερατότητα σε υγρασία, υψηλή ηλεκτρική αντίσταση και καλή πρόσφυση στο υπόστρωμα, ώστε να περιορίζεται η πιθανότητα υποεπικαλυπτικής διάβρωσης.

Ιδιαίτερη μέριμνα απαιτείται στα σημεία συγκόλλησης πεδίου (field joints), όπου η εργοστασιακή επικάλυψη διακόπτεται. Εκεί εφαρμόζονται συστήματα επιτόπιας επικάλυψης (π.χ. θερμοσυστελλόμενα περιβλήματα ή υγρά εποξειδικά), τα οποία πρέπει να είναι συμβατά με το κύριο σύστημα και να παρουσιάζουν ισοδύναμες μηχανικές και ηλεκτρικές ιδιότητες. Η ποιότητα εφαρμογής ελέγχεται με μετρήσεις



πάχους και ηλεκτρικούς ελέγχους ασυνέχειας, ώστε να διασφαλίζεται η απουσία πόρων ή αστοχιών.

Για υπέργειες σωληνώσεις μεταφοράς αερίου καυσίμου, οι απαιτήσεις διαφοροποιούνται, καθώς το περιβάλλον διάβρωσης είναι ατμοσφαιρικό. Σε αυτές τις περιπτώσεις εφαρμόζονται συνήθως πολυστρωματικά συστήματα βαφής, αποτελούμενα από αντιδιαβρωτικό υπόστρωμα (π.χ. εποξειδικό primer), ενδιάμεση στρώση και τελική στρώση ανθεκτική σε υπεριώδη ακτινοβολία και καιρικές συνθήκες (π.χ. πολυουρεθανική). Τα συστήματα αυτά πρέπει να συμμορφώνονται με σχετικά πρότυπα βαφών για βιομηχανικές κατασκευές, να εξασφαλίζουν επαρκές συνολικό πάχος ξηρού υμένα και να παρουσιάζουν αντοχή σε UV, θερμοκρασιακές μεταβολές και μηχανικές φθορές.

Η επικάλυψη ενός χαλύβδινου σωλήνα μεταφοράς αερίου καυσίμου αποτελεί κρίσιμο στοιχείο της αντιδιαβρωτικής στρατηγικής, είτε η εγκατάσταση είναι εντός εδάφους είτε εκτός. Τα εφαρμοζόμενα συστήματα πρέπει να είναι πιστοποιημένα σύμφωνα με τα αντίστοιχα ευρωπαϊκά πρότυπα, να παρουσιάζουν τεκμηριωμένες μηχανικές και ηλεκτρικές ιδιότητες και να εφαρμόζονται με ελεγχόμενες διαδικασίες, ώστε να διασφαλίζεται η μακροχρόνια ακεραιότητα του αγωγού.

1.7.3 Βάθος Ταφής & Μηχανική Προστασία

Η τοποθέτηση χαλύβδινων σωληνώσεων LPG εντός εδάφους πρέπει να σχεδιάζεται και να εκτελείται σύμφωνα με τις απαιτήσεις του EN 16125, σε συνδυασμό με τις γενικές διατάξεις του ΕΛΟΤ EN 15001-1 για συστήματα αερίων καυσίμων. Τα δύο πρότυπα, αν και δεν δίνουν πάντα αναλυτικές διαστασιολογικές τιμές για κάθε περίπτωση, καθορίζουν σαφείς τεχνικές αρχές που πρέπει να τηρούνται, ώστε να εξασφαλίζεται η μηχανική ακεραιότητα και η μακροχρόνια ασφάλεια της εγκατάστασης.



Καταρχάς, το βάθος ταφής πρέπει να είναι επαρκές ώστε ο αγωγός να προστατεύεται από μηχανικές καταπονήσεις που προέρχονται από κυκλοφορία οχημάτων, γεωργικές δραστηριότητες ή άλλες επιφανειακές φορτίσεις. Η επιλογή του βάθους καθορίζεται από τη χρήση της επιφάνειας του εδάφους και την κατηγορία της εγκατάστασης. Σε βιομηχανικά περιβάλλοντα, το βάθος ταφής αυξάνεται όταν η σωλήνωση διέρχεται κάτω από οδούς ή περιοχές βαριάς κυκλοφορίας. Το EN 16125 απαιτεί η σωλήνωση να τοποθετείται σε τέτοιο βάθος ώστε να αποφεύγεται ο κίνδυνος μηχανικής βλάβης, ενώ το EN 15001-1 τονίζει ότι ο σχεδιασμός πρέπει να λαμβάνει υπόψη τα εξωτερικά φορτία και τη μακροχρόνια σταθερότητα του εδάφους. Το ελάχιστο βάθος προσδιορίζεται στα 60 cm από τελικό έδαφος και στα 80 cm σε ζώνες κυκλοφορίας / βαριά φορτία

Η εκσκαφή πρέπει να διαμορφώνεται κατά τρόπο που να εξασφαλίζει ομοιόμορφη στήριξη του σωλήνα. Ο πυθμένας της τάφρου οφείλει να είναι επίπεδος, χωρίς αιχμηρά αντικείμενα, πέτρες, μπάζα ή θραυστά υλικά που θα μπορούσαν να προκαλέσουν σημειακή φόρτιση ή φθορά της αντιδιαβρωτικής επικάλυψης. Για τον σκοπό αυτό προβλέπεται στρώση έδρασης από κατάλληλο κοκκώδες υλικό, συνήθως καθαρή άμμος ή λεπτόκοκκο υλικό. Η στρώση αυτή λειτουργεί ως μηχανικό «μαξιλάρι», διασφαλίζοντας την ομοιόμορφη κατανομή φορτίων και περιορίζοντας τον κίνδυνο τοπικών πιέσεων που θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε βλάβη της επικάλυψης και μελλοντική διάβρωση.

Μετά την τοποθέτηση του σωλήνα, προβλέπεται πλευρική και άνω κάλυψη με το ίδιο ή ισοδύναμο κοκκώδες υλικό, πριν την τελική επίχωση με το προϊόν εκσκαφής. Το πάχος της προστατευτικής στρώσης άμμου πάνω από τον σωλήνα πρέπει να είναι επαρκές ώστε να απομονώνει τον αγωγό από χονδρόκοκκα υλικά (≈ 20 cm περιμετρικά του σωλήνα). Τα πρότυπα απαιτούν η επίχωση να γίνεται σταδιακά και με ελεγχόμενη



συμπύκνωση, ώστε να αποφεύγονται μελλοντικές καθιζήσεις που θα μπορούσαν να επιφέρουν καμπτικές τάσεις στον αγωγό.

Σε περιπτώσεις αυξημένου κινδύνου μηχανικής καταπόνησης, όπως διέλευση κάτω από δρόμους ή σε βιομηχανικές περιοχές με βαριά οχήματα, μπορεί να απαιτείται πρόσθετη μηχανική προστασία. Αυτή μπορεί να περιλαμβάνει προστατευτικές πλάκες, πλάκες σκυροδέματος ή τοποθέτηση του αγωγού εντός προστατευτικού σωλήνα. Η επιλογή τέτοιων μέτρων τεκμηριώνεται μέσω μηχανικής αξιολόγησης φορτίων, σύμφωνα με τις αρχές σχεδιασμού που προβλέπει το EN 15001-1. Επιπλέον, τα πρότυπα επισημαίνουν ότι πρέπει να αποφεύγεται η άμεση επαφή του αγωγού με άλλα μεταλλικά στοιχεία εντός εδάφους, εφόσον υπάρχει κίνδυνος ηλεκτροχημικής αλληλεπίδρασης. Η χωροθέτηση εντός της τάφρου πρέπει να εξασφαλίζει επαρκείς αποστάσεις από άλλα δίκτυα ή θεμελιώσεις, ώστε να μην μεταφέρονται ανεπιθύμητα φορτία ή κραδασμοί.

Η ορθή τοποθέτηση του σωλήνα στο έδαφος δεν αποτελεί απλή διαδικασία επίχωσης, αλλά κρίσιμο στάδιο που επηρεάζει άμεσα τη διάρκεια ζωής της εγκατάστασης. Σύμφωνα με το EN 16125 και το EN 15001-1, η εκσκαφή, η στρώση έδρασης, η προστατευτική κάλυψη και η τελική επίχωση πρέπει να εκτελούνται με τεχνικά ελεγχόμενο τρόπο, ώστε να διασφαλίζεται η μηχανική προστασία του αγωγού, η διατήρηση της αντιδιαβρωτικής επικάλυψης και η ασφαλής λειτουργία του συστήματος LPG καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του.

1.7.4 Σύνδεση Υπόγειων Σωληνώσεων

Η σύνδεση χαλύβδινων σωληνώσεων LPG εντός εδάφους αποτελεί κρίσιμο τεχνικό σημείο του συστήματος, καθώς οι ενώσεις συνιστούν θέσεις αυξημένου κινδύνου τόσο από πλευράς μηχανικής αντοχής όσο και από πλευράς στεγανότητας και διάβρωσης. Σύμφωνα με το EN 16125 και σε συνδυασμό με το ΕΛΟΤ EN 15001-1, οι υπόγειες



συνδέσεις πρέπει να σχεδιάζονται έτσι ώστε να ελαχιστοποιείται ο αριθμός αποσπώμενων ενώσεων και να προτιμώνται μόνιμες, υψηλής αξιοπιστίας λύσεις.

Για υπόγειες σωληνώσεις LPG, οι συγκολλητές ενώσεις αποτελούν την προτιμώμενη και τεχνικά ενδεδειγμένη μέθοδο σύνδεσης. Οι περιμετρικές συγκολλήσεις (butt welds) παρέχουν συνεχή μεταλλική σύνδεση, με μηχανική συμπεριφορά ισοδύναμη ή ανώτερη του βασικού μετάλλου, όταν εκτελούνται σύμφωνα με εγκεκριμένες διαδικασίες συγκόλλησης (WPS) και από πιστοποιημένους συγκολλητές. Το EN 15001-1 απαιτεί οι συγκολλήσεις να πληρούν καθορισμένες προδιαγραφές ποιότητας, να υποβάλλονται σε κατάλληλους μη καταστροφικούς ελέγχους και να τεκμηριώνονται στο πλαίσιο του συστήματος διασφάλισης ποιότητας της εγκατάστασης. Η χρήση συγκολλήσεων μειώνει σημαντικά τον κίνδυνο διαρροών, καθώς δεν υπάρχουν σπειρώματα ή ελαστομερή παρεμβύσματα που θα μπορούσαν να υποστούν γήρανση ή χαλάρωση με τον χρόνο.

Οι φλαντζωτές συνδέσεις επιτρέπονται, αλλά η χρήση τους σε υπόγεια τμήματα πρέπει να περιορίζεται σε απολύτως αναγκαία σημεία, όπως σε συνδέσεις με εξοπλισμό ή σε θέσεις όπου απαιτείται αποσυναρμολόγηση για λόγους συντήρησης. Τα πρότυπα τονίζουν ότι όταν χρησιμοποιούνται φλάντζες σε υπόγειο περιβάλλον, πρέπει να λαμβάνονται πρόσθετα μέτρα προστασίας, τόσο ως προς τη στεγανότητα όσο και ως προς την αντιδιαβρωτική προστασία. Οι φλαντζωτές συνδέσεις περιλαμβάνουν παρεμβύσματα και κοχλίες, στοιχεία τα οποία είναι ευαίσθητα σε διάβρωση και μηχανική καταπόνηση. Για τον λόγο αυτό, συχνά τοποθετούνται εντός φρεατίων επιθεώρησης ή ειδικών θαλάμων, ώστε να είναι προσβάσιμες και να μην έρχονται σε άμεση επαφή με το έδαφος.



Αντιθέτως, οι βιδωτές (σπειρωτές) συνδέσεις δεν θεωρούνται κατάλληλες για υπόγειες σωληνώσεις LPG μέσης ή υψηλότερης πίεσης. Το EN 16125 και το EN 15001-1 περιορίζουν τη χρήση σπειρωτών ενώσεων σε μικρές διαμέτρους και κυρίως σε υπέργειες ή προσβάσιμες εγκαταστάσεις χαμηλής πίεσης. Σε υπόγειο περιβάλλον, τα σπειρώματα αποτελούν εστία συγκέντρωσης τάσεων και πιθανής διαρροής, ενώ η στεγανότητα βασίζεται σε υλικά στεγανοποίησης που ενδέχεται να υποβαθμιστούν με την πάροδο του χρόνου. Επιπλέον, η διάβρωση στα σπειρώματα μπορεί να οδηγήσει σε απώλεια προέντασης και σε σταδιακή αστοχία της σύνδεσης.

Σε όλες τις περιπτώσεις υπόγειων συνδέσεων, απαιτείται η αποκατάσταση της αντιδιαβρωτικής προστασίας μετά την ολοκλήρωση της συγκόλλησης ή της συναρμολόγησης. Τα σημεία σύνδεσης θεωρούνται ιδιαίτερα ευαίσθητες περιοχές και πρέπει να επικαλύπτονται με σύστημα ισοδύναμο της κύριας επικάλυψης του σωλήνα. Η ποιότητα της εφαρμογής ελέγχεται πριν από την επίχωση, ώστε να διασφαλίζεται η συνέχεια της προστασίας.

1.7.5 Ενεργητική - Καθοδική Αντιδιαβρωτική Προστασία

Η καθοδική προστασία υπόγειων χαλύβδινων σωληνώσεων αποτελεί βασικό συμπληρωματικό μέτρο αντιδιαβρωτικής προστασίας, ιδίως σε εγκαταστάσεις μεταφοράς LPG, όπου η διατήρηση της ακεραιότητας του αγωγού είναι κρίσιμη για την ασφάλεια. Το ευρωπαϊκό πρότυπο EN 15589-1 καθορίζει τις απαιτήσεις σχεδιασμού, εγκατάστασης, θέσης σε λειτουργία και παρακολούθησης συστημάτων καθοδικής προστασίας για υπόγειους αγωγούς.

Η αρχή λειτουργίας βασίζεται στη μετατροπή του χαλύβδινου σωλήνα σε καθοδικό στοιχείο ενός ηλεκτροχημικού κυκλώματος, έτσι ώστε να αποτρέπεται η οξειδωση του σιδήρου. Αυτό επιτυγχάνεται είτε με τη χρήση θυσιαζόμενων ανοδίων (π.χ. μαγνησίου



ή ψευδαργύρου), είτε με σύστημα επιβαλλόμενου ρεύματος (impressed current), ανάλογα με το μήκος του αγωγού, τη διαβρωτικότητα του εδάφους και τη συνολική ηλεκτρική αντίσταση της εγκατάστασης. Το EN 15589-1 ορίζει κριτήρια προστασίας βάσει ηλεκτροχημικών δυναμικών, τα οποία πρέπει να επιτυγχάνονται και να επαληθεύονται με μετρήσεις έναντι ηλεκτροδίου αναφοράς.

Για υπόγειες σωληνώσεις μικρού ή μεσαίου μήκους σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις LPG, συχνά επαρκεί σύστημα θυσιαζόμενων ανοδίων, ιδίως όταν η επικάλυψη του σωλήνα είναι υψηλής ποιότητας και χαμηλής διαπερατότητας. Ωστόσο, η τελική επιλογή τεκμηριώνεται μέσω μελέτης καθοδικής προστασίας, η οποία λαμβάνει υπόψη την ειδική ηλεκτρική αντίσταση του εδάφους, τη συνολική εκτεθειμένη επιφάνεια χάλυβα (λαμβάνοντας υπόψη πιθανές ασυνέχειες επικάλυψης) και τη διάρκεια ζωής σχεδιασμού.

Ιδιαίτερη σημασία αποκτά η εφαρμογή καθοδικής προστασίας όταν ο υπόγειος αγωγός βρίσκεται σε μικρή απόσταση από το κυρίως κτίριο ή άλλες γειωμένες μεταλλικές κατασκευές. Σε τέτοιες περιπτώσεις ενδέχεται να αναπτυχθούν ανεπιθύμητα ρεύματα διαφυγής ή ηλεκτρικές αλληλεπιδράσεις με τα συστήματα γείωσης του κτιρίου. Το EN 15589-1 απαιτεί να αξιολογείται η ηλεκτρική συνέχεια και η πιθανότητα παρεμβολών, ώστε να αποφεύγεται τόσο η υπο-προστασία όσο και η υπερ-προστασία, η οποία μπορεί να προκαλέσει αποκόλληση της επικάλυψης.

Όταν ο αγωγός εισέρχεται στο κτίριο, προβλέπεται συχνά ηλεκτρική απομόνωση μέσω μονωτικών συνδέσμων (insulating joints ή flanges), ώστε να διαχωρίζεται το σύστημα καθοδικής προστασίας του υπόγειου τμήματος από τη γείωση της εσωτερικής εγκατάστασης. Η σωστή τοποθέτηση και προστασία των μονωτικών συνδέσμων είναι κρίσιμη, καθώς αποτελούν σημεία υψηλής ηλεκτρικής ευαισθησίας και πρέπει να



προστατεύονται και μηχανικά και αντιδιαβρωτικά. Το πρότυπο καθορίζει επίσης απαιτήσεις παρακολούθησης και ελέγχου. Πρέπει να προβλέπονται σημεία μέτρησης (test posts) σε κατάλληλες θέσεις, ιδίως κοντά σε κτίρια ή άλλες μεταλλικές εγκαταστάσεις, ώστε να είναι δυνατός ο περιοδικός έλεγχος των δυναμικών προστασίας. Η τεκμηρίωση των μετρήσεων αποτελεί μέρος του συστήματος διαχείρισης ακεραιότητας της εγκατάστασης.

Η καθοδική προστασία δεν εφαρμόζεται τυπικά ή αυτόματα, αλλά κατόπιν τεχνικής αξιολόγησης κινδύνου διάβρωσης. Σε υπόγειες σωληνώσεις LPG, και ιδιαίτερα όταν αυτές βρίσκονται σε μικρή απόσταση από το κυρίως κτίριο, η μελέτη ηλεκτρικών αλληλεπιδράσεων, η σωστή ηλεκτρική απόμόνωση και η συνεχής παρακολούθηση αποτελούν ουσιώδεις παράγοντες για την ασφαλή και μακροχρόνια λειτουργία του συστήματος.

1.7.6 Περιοδικός έλεγχος

Ο περιοδικός έλεγχος των σωληνώσεων LPG σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις αποτελεί κρίσιμο αλλά συχνά υποτιμημένο στοιχείο της διαχείρισης ακεραιότητας. Τόσο το EN 16125 όσο και το ΕΛΟΤ EN 15001-1 δεν περιορίζονται στον αρχικό σχεδιασμό και την κατασκευή, αλλά επιβάλλουν την τεκμηριωμένη επιθεώρηση και συντήρηση των συστημάτων σωληνώσεων καθ' όλη τη διάρκεια ζωής τους. Η φιλοσοφία των προτύπων βασίζεται στην αρχή ότι η συμμόρφωση κατά την εγκατάσταση δεν επαρκεί χωρίς συνεχή επαλήθευση της λειτουργικής κατάστασης.

Το EN 15001-1 απαιτεί τα συστήματα σωληνώσεων αερίων καυσίμων να υποβάλλονται σε περιοδικούς ελέγχους στεγανότητας, κατάστασης υλικών και μηχανικής ακεραιότητας. Οι έλεγχοι αυτοί περιλαμβάνουν οπτική επιθεώρηση υπέργειων τμημάτων για σημεία διάβρωσης, μηχανικών βλαβών, φθοράς επικάλυψης ή χαλάρωσης στηρίξεων. Παράλληλα, προβλέπεται επανέλεγχος στεγανότητας με



κατάλληλες μεθόδους (π.χ. δοκιμή πίεσης ή έλεγχος με ανιχνευτή διαρροών), ιδιαίτερα μετά από παρεμβάσεις, τροποποιήσεις ή μακρά περίοδο ακινησίας της εγκατάστασης.

Το EN 16125, ως ειδικό πρότυπο για εγκαταστάσεις LPG, δίνει έμφαση στην περιοδική επαλήθευση της ασφάλειας λειτουργίας. Προβλέπει ότι οι εγκαταστάσεις πρέπει να επιθεωρούνται σε τακτά χρονικά διαστήματα, τα οποία καθορίζονται από τον φορέα εκμετάλλευσης βάσει αξιολόγησης κινδύνου, λαμβάνοντας υπόψη την πίεση λειτουργίας, το περιβάλλον εγκατάστασης και την παλαιότητα του συστήματος. Η επιθεώρηση περιλαμβάνει έλεγχο συνδέσεων, φλαντζών, βαλβίδων, στηρίξεων και προστατευτικών συστημάτων.

Για υπόγεια τμήματα σωληνώσεων, όπου η άμεση οπτική πρόσβαση δεν είναι δυνατή, ο περιοδικός έλεγχος αποκτά ιδιαίτερη σημασία. Τα πρότυπα απαιτούν την επαλήθευση της αποτελεσματικότητας της αντιδιαβρωτικής προστασίας, ιδίως όταν εφαρμόζεται καθοδική προστασία. Αυτό περιλαμβάνει μετρήσεις δυναμικού σε προκαθορισμένα σημεία ελέγχου, καταγραφή και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων. Η απουσία συστηματικής παρακολούθησης μπορεί να οδηγήσει σε μη εντοπισμένη υποπροστασία και σε ανάπτυξη τοπικής διάβρωσης.

Επιπλέον, προβλέπεται έλεγχος των σημείων μετάβασης εδάφους-ατμόσφαιρας, τα οποία θεωρούνται περιοχές αυξημένου κινδύνου. Εκεί συχνά εμφανίζονται πρώιμα σημάδια φθοράς επικάλυψης ή διάβρωσης, λόγω συνδυασμού υγρασίας και οξυγόνου. Η περιοδική επιθεώρηση αυτών των περιοχών μπορεί να λειτουργήσει προληπτικά, πριν η βλάβη εξελιχθεί σε διαρροή.

Τα πρότυπα απαιτούν επίσης τεκμηρίωση όλων των ελέγχων. Η καταγραφή των επιθεωρήσεων, των μετρήσεων και τυχόν διορθωτικών ενεργειών αποτελεί



αναπόσπαστο μέρος του συστήματος διαχείρισης της εγκατάστασης. Η τεκμηρίωση αυτή δεν έχει μόνο διοικητικό χαρακτήρα, αλλά επιτρέπει την αξιολόγηση ρυθμού φθοράς και τον προγραμματισμό προληπτικών παρεμβάσεων.

Σύμφωνα με το EN 15001-1 και το EN 16125, ο περιοδικός έλεγχος δεν αποτελεί προαιρετική διαδικασία, αλλά ουσιώδη απαίτηση για τη διατήρηση της ασφάλειας και της αξιοπιστίας των σωληνώσεων LPG. Η συστηματική επιθεώρηση, η επαλήθευση στεγανότητας, ο έλεγχος της αντιδιαβρωτικής προστασίας και η τεκμηριωμένη παρακολούθηση αποτελούν θεμελιώδη στοιχεία μιας ορθής τεχνικής και κανονιστικής πρακτικής.



2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ

2.1 Δειγματοληψία - Περιγραφή Δειγμάτων

Την Πέμπτη 05 Φεβρουαρίου και την Παρασκευή 06 Φεβρουαρίου 2026, μετά την μετάβαση μου στο εργοστάσιο της «ΒΙΟΛΑΝΤΑ Α.Ε.» (6ο χλμ. Ε.Ο. Τρικάλων-Καρδίτσας, Τ.Κ. Αγίας Κυριακής, Δήμου Τρικκαίων, Π.Ε. Τρικάλων), έλαβα μέρος στην αυτοψία που πραγματοποιήθηκε σε συνεργασία με τους ανακριτικούς υπαλλήλους της ΔΑΕΕ, στον αύλειο χώρο του εργοστασίου «ΒΙΟΛΑΝΤΑ Α.Ε.» και συγκεκριμένα στην εκσκαφή και αποκάλυψη της υπόγειας σωλήνωσης μεταφοράς αερίου καυσίμου, η οποία συνδέει δύο (2) υπέργειες δεξαμενές (χωρητικότητας 5.000 lt και 9.000 lt) με το σύστημα τροφοδοσίας του κεντρικού κτιρίου (**Εικόνα 1**).

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, κατά την αυτοψία στο εργοστάσιο πραγματοποιήθηκε ελεγχόμενη αποκάλυψη τμήματος υπόγειας σωλήνωσης με σκοπό τη διερεύνηση πιθανών φαινομένων φθοράς και διάτρησης λόγω διάβρωσης. Μετά την πλήρη αποκάλυψη του εξεταζόμενου τμήματος της σωλήνωσης και την απομόνωση της εξόδου, εφαρμόστηκε διαδικασία ελέγχου στεγανότητας με υδροστατική πίεση, μέθοδος η οποία επέτρεψε την άμεση και σαφή επιβεβαίωση της ύπαρξης διαρροής, σε δύο διακριτά σημεία του αποκαλυφθέντος τμήματος της σωλήνωσης (**Εικόνα 2**). Ακολούθως, το τμήμα της σωλήνωσης που έφερε τις διατρήσεις αποκόπηκε με μέθοδο αδιατάρακτης κοπής, χρησιμοποιώντας υδραυλικό ψαλίδι κοπής μετάλλων (τύπου rescue tool), κατάλληλο για εργασίες χωρίς παραγωγή σπινθήρων και χωρίς ανάπτυξη υψηλών θερμοκρασιών (**Εικόνα 3**). Παράλληλα, λήφθηκαν επιπρόσθετα δείγματα από υπέργειο και εμφανώς υγιές τμήμα της ίδιας σωλήνωσης (reference samples) με σκοπό τη σύγκριση της μικροδομής, του πάχους τοιχώματος, της χημικής σύστασης και της κατάστασης της επιφάνειας.



Αποφασίστηκε η δειγματοληψία επτά (7) μεταλλικών δοκιμίων κατά μήκος του εξεταζόμενου τμήματος. Τα δείγματα ελήφθησαν σε όλο το μήκος της σωλήνωσης σε θέσεις που κάλυπταν τόσο τις περιοχές εμφανών διατρήσεων και εντονότερης διάβρωσης όσο και ενδιάμεσα ή μακροσκοπικά υγιή τμήματα, ώστε να καταστεί δυνατή η συγκριτική ανάλυση της φθοράς. Από τα επτά (7) συνολικά μεταλλικά δείγματα, επιλέχθηκαν τέσσερα (4) για περαιτέρω εργαστηριακή διερεύνηση, με στόχο την εκτέλεση χημικού και μεταλλογραφικού ελέγχου. Δύο (2) δείγματα προήλθαν από την περιοχή των διατρήσεων (“Δείγμα 1” και “Δείγμα 3”), όπου είχε διαπιστωθεί ενεργός διαρροή, προκειμένου να διερευνηθεί η μικροδομή, ο μηχανισμός και η μορφολογία της διάβρωσης, καθώς και τυχόν τοπικές μεταλλουργικές ανομοιογένειες. Ένα (1) δείγμα ελήφθη από υπέργειο και μακροσκοπικά υγιές τμήμα της σωλήνωσης (“Δείγμα 7”), ώστε να χρησιμοποιηθεί ως δείγμα αναφοράς για τη σύγκριση της χημικής σύστασης, της μικροδομής και του πάχους τοιχώματος. Τέλος, ένα (1) δείγμα λήφθηκε από την περιοχή βιδωτής σύνδεσης των σωλήνων (“Δείγμα 2”), με σκοπό να αξιολογηθεί η πιθανή επίδραση της γεωμετρικής ασυνέχειας, των τοπικών τάσεων ή της διαφοροποίησης των συνθηκών διάβρωσης στην περιοχή της ένωσης.

2.2 Στερεοσκοπικό Μικροσκόπιο

Το στερεοσκοπικό μικροσκόπιο ρυθμιζόμενης εστίασης χρησιμοποιείται ως μέθοδος παρατήρησης και ερμηνείας των μορφολογικών χαρακτηριστικών αλλά και της μικροδομής των υπό μελέτη υλικών σε σχετικά χαμηλές μεγεθύνσεις. Η πηγή ακτινοβολίας που χρησιμοποιείται είναι συνήθως λευκό φως, ενώ είναι ιδανικό για την παρατήρηση της δομής αλλά και την ανίχνευση ελαττωμάτων. Τα οπτικά του στοιχεία είναι κατασκευασμένα από ύαλο υψηλής διαπερατότητας, γεγονός το οποίο επιτρέπει την απόδοση των ειδώλων με υψηλή ανάλυση. Για την μικροσκοπική παρατήρηση των δοκιμίων χρησιμοποιήθηκε στερεοσκοπικό μικροσκόπιο Zeiss Stemi DV4, του Εργαστηρίου Μεταλλογνωσίας, της Σχολής ΜΜΜ του Ε.Μ.Π. Πρόκειται για ένα οπτικό



στερεοσκόπιο ειδικά σχεδιασμένο για χαμηλές αλλά και υψηλότερες μεγεθύνσεις (x8 – x32).

2.3 Μεταλλογραφική Προετοιμασία

Τα παραληφθέντα μεταλλικά τεμάχια εξετάστηκαν με την μορφή στιλπνών τομών (παράλληλα στην διεύθυνση της καταπόνησης), μετά από εγκιβωτισμό σε ρητίνη αργής πήξης. Για τη μεταλλογραφική παρατήρηση των δειγμάτων απαραίτητη είναι η προετοιμασία της επιφάνειας των, προς παρατήρηση, δοκιμίων με λείανση και στίλβωση, η οποία πραγματοποιήθηκε σε συσκευή λείανσης LaboPol-5 της Struers. Η συσκευή διαθέτει εύρος λειτουργίας γωνιακής ταχύτητας από 50 έως και 500 στροφές ανά λεπτό, ενώ για την ψύξη του δοκιμίου χρησιμοποιείται σύστημα παροχής νερού.

Η λείανση αποσκοπεί στην εξάλειψη των γεωμετρικών ανωμαλιών της εξεταζόμενης επιφάνειας, καθώς και στην απομάκρυνση των επιφανειακών στρωμάτων του υλικού, που ενδεχομένως να έχουν παραμορφωθεί ή αλλοιωθεί κατά τη διαδικασία της κοπής. Πραγματοποιήθηκε με χρήση λειαντικών χαρτιών από κόκκους καρβιδίου του πυριτίου (400 mesh, 800 mesh, 1000 mesh, 2000 mesh). Μετά το στάδιο της λείανσης ακολούθησε η διαδικασία της στίλβωσης. Σε αυτό το στάδιο, χρησιμοποιείται κατάλληλο ύφασμα στίλβωσης, πάνω στο οποίο απλώνεται αδαμαντόπαστα 6 μm και στην συνέχεια αντίστοιχη του 1 μm . Η λίπανση λαμβάνει χώρα με χρήση αλκοολούχου διαλύματος. Τέλος πραγματοποιήθηκε χημική προσβολή, η οποία είναι απαραίτητη στη μεταλλογραφία για την αποκάλυψη της μικροδομής ενός δοκιμίου και την παρατήρησή του στο οπτικό ή στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο. Η μικροδομή αποκαλύπτεται με την επιλεκτική διαλυτοποίηση της δομής στα όρια των κόκκων, ξεκινώντας από την επιφάνεια και συνεχίζοντας προς το εσωτερικό. Οι διαφορές στον ρυθμό προσβολής των φάσεων αποκαλύπτουν τη μικρογραφική δομή. Κατά τη διάρκεια της προσβολής, προσβάλλεται η περισσότερο ηλεκτροθετική ανοδική φάση, ενώ η ηλεκτροαρνητική δεν προσβάλλεται σχεδόν καθόλου.



2.4 Οπτικό Μικροσκόπιο

Η οπτική μικροσκοπία χρησιμοποιείται ως μέθοδος παρατήρησης και ερμηνείας της μικροδομής των υλικών και αποτελεί το βασικό εργαλείο της μεταλλογραφίας. Η πηγή ακτινοβολίας που χρησιμοποιείται είναι συνήθως λευκό φως, η διακριτική ικανότητα είναι περίπου 1 μπι, ενώ και το βάθος πεδίου είναι της ίδιας περίπου τάξης μεγέθους. Για την μικροσκοπική παρατήρηση των δοκιμίων χρησιμοποιήθηκε οπτικό μικροσκόπιο JenaVert, του Εργαστηρίου Μεταλλογνωσίας, της Σχολής ΜΜΜ του Ε.Μ.Π. Πρόκειται για ένα οπτικό μικροσκόπιο ειδικά σχεδιασμένο για μεταλλουργική παρατήρηση. Διαθέτει ενσωματωμένους φακούς 10x, 20x, 50x και 100x και προσοφθάλμιο φακό 10x. Επίσης, διαθέτει ενσωματωμένες θέσεις για τοποθέτηση οπτικών φίλτρων, τράπεζα δύο βαθμών ελευθερίας (x,y) και φωτισμό με λάμπα αλογόνου ισχύος 35W.

2.5 Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης

Το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (Scanning Electron Microscope – SEM) χρησιμοποιείται για την παρατήρηση επιφανειών, σε συνδυασμό με τα κατάλληλο σύστημα μικροανάλυσης (Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy – EDS), για τη στοιχειακή ανάλυση συγκεκριμένων περιοχών της υπό παρατήρηση εικόνας. Το βάθος πεδίου και η διακριτική ικανότητα-μεγέθυνση του SEM, είναι πολύ μεγαλύτερα από τα αντίστοιχα μεγέθη του οπτικού-μεταλλογραφικού μικροσκοπίου. Μεγεθύνσεις της τάξης x10000-x30000 είναι εντός των πρακτικών δυνατοτήτων ενός ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης. Η λειτουργία του βασίζεται στην αλληλεπίδραση του, προς εξέταση, δείγματος με την προσπίπτουσα, σε αυτό, δέσμη ηλεκτρονίων. Η παραγόμενη δέσμη των ηλεκτρονίων (πρωτογενή ηλεκτρόνια), διερχόμενη μέσα από μια σειρά μαγνητικών φακών, επιταχύνεται, συγκεντρώνεται και εστιάζεται πάνω στην εξεταζόμενη επιφάνεια του δοκιμίου. Η εστιασμένη δέσμη ηλεκτρονίων, περνώντας



μέσα από ζεύγη πηνίων σάρωσης, τα οποία την εκτρέπουν οριζόντια και κάθετα, σαρώνει μια τετραγωνική περιοχή της επιφάνειας του δοκιμίου. Τα εκπεμπόμενα από την επιφάνεια του δοκιμίου ηλεκτρόνια συλλέγονται και ενισχύονται, έτσι ώστε να δημιουργήσουν ένα οπτικό σήμα. Ο στοιχειακός αναλυτής EDS παρέχει ποιοτική και ημιποσοτική στοιχειακή ανάλυση της επιφάνειας του δείγματος, υπό την προϋπόθεση ο ατομικός αριθμός των στοιχείων να είναι μεγαλύτερος του 11. Οι εκπεμπόμενες από το δοκίμιο ακτίνες X , κατά την παρατήρηση σε ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης, εισέρχονται σε φασματογράφο διασποράς ενέργειας, μέσω ενός παραθύρου από Be και συλλέγονται από έναν ηλεκτρονικό ανιχνευτή, ο οποίος είναι συνήθως ημιαγωγός Si με πρόσμιξη Li. Ο ανιχνευτής διεγείρεται ανάλογα με την ενέργεια των ακτίνων X , δημιουργώντας κάποιο χαρακτηριστικό ρεύμα. Με κατάλληλη διάταξη το ρεύμα αυτό ενισχύεται και καταγράφεται. Έπειτα από ανάλογη επεξεργασία των δεδομένων λαμβάνεται το φάσμα των παλμών, συναρτήσεως της ενέργειας της ακτινοβολίας (σε keV). Το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών, που χρησιμοποιήθηκε στη συγκεκριμένη μελέτη, είναι τύπου Jeol 6380 LV.

2.6 Σκληρότητα κατά Vickers (Hardness Vickers – HV)

Η επίδραση μηχανικών ή και θερμικών φορτίων επιφέρει αλλαγές στις ιδιότητες του υλικού κοντά στην επιφάνεια, από τις σημαντικότερες των οποίων είναι η αλλαγή της σκληρότητας. Για τη μέτρηση της σκληρότητας χρησιμοποιούνται διάφορες μέθοδοι, με διαφορετικό υλικό διείδυσης, διαφορετική κλίμακα επιβαλλόμενων φορτίων, αλλά και διαφορετικά μετρούμενα μεγέθη. Σύμφωνα με την μέθοδο Vickers, χρησιμοποιείται αδαμάντινη πυραμίδα με τετραγωνική βάση και γωνία κορυφής $\alpha=136^\circ$, στην οποία εφαρμόζεται δύναμη “F” στη λειασμένη επιφάνεια του υλικού, για συγκεκριμένο χρόνο. Από το πηλίκο της δύναμης αυτής που χρησιμοποιήθηκε, προς την επιφάνεια του αποτυπώματος που προκλήθηκε προκύπτει το μέτρο της σκληρότητας. Για τη



μέτρηση της σκληρότητας απαραίτητη προϋπόθεση είναι η επιφάνεια να είναι επίπεδη, γι' αυτό προηγούνται οι διαδικασίες της λείανσης και της στίλβωσης. Πραγματοποιήθηκαν τουλάχιστον έξι μετρήσεις σκληρότητας σε κάθε δοκίμιο, ενώ το κάθε αποτύπωμα της πυραμίδας απείχε από το επόμενο περίπου $3d$, όπου d ο μέσος όρος των δύο διαγωνίων του σχηματιζόμενου ρόμβου. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν παράλληλα στην διεύθυνση της παραμόρφωσης, ξεκινώντας από την θραυστιγενή επιφάνεια προς το εσωτερικό του δείγματος, με βήμα 1mm, φορτίο 98.07 Newton, για χρόνο 10 sec.

2.7 Φασματογράφος Μάζας Spark-OES

Η φασματομετρία μάζας αποτελεί μία από τις πλέον αξιόπιστες και ευρέως χρησιμοποιούμενες τεχνικές για τον ποιοτικό και ποσοτικό προσδιορισμό στοιχειακής σύστασης μεταλλικών υλικών, καθώς προσφέρει εξαιρετικά χαμηλά όρια ανίχνευσης, επιτρέποντας τον προσδιορισμό ιχνοστοιχείων σε επίπεδα ppm ή και ppb. Επιπλέον, παρέχει υψηλή ακρίβεια και επαναληψιμότητα, στοιχεία κρίσιμα για τον ποιοτικό έλεγχο και την πιστοποίηση υλικών. Η βασική αρχή λειτουργίας ενός φασματογράφου μάζας στηρίζεται στη δημιουργία ιόντων από τα άτομα του δείγματος, στον διαχωρισμό αυτών των ιόντων με βάση τον λόγο μάζας προς φορτίο (m/z) και τελικά στην ανίχνευση και καταγραφή της έντασής τους. Κατά το πρώτο στάδιο της ανάλυσης πραγματοποιείται η ιονοποίηση του δείγματος. Η επιφάνεια του μεταλλικού δείγματος διεγείρεται μέσω ηλεκτρικής εκκένωσης υψηλής ενέργειας. Η εκκένωση προκαλεί τοπική εξαχνωχη μικρής ποσότητας υλικού, δημιουργώντας ένα πλάσμα που περιέχει άτομα, ιόντα και ηλεκτρόνια. Τα άτομα του υλικού μετατρέπονται σε θετικά ιόντα μέσω απομάκρυνσης ενός ή περισσότερων ηλεκτρονίων. Στη συνέχεια, τα παραγόμενα ιόντα εισέρχονται στο σύστημα επιτάχυνσης του φασματογράφου. Εκεί επιταχύνονται μέσω ηλεκτρικού πεδίου αποκτώντας καθορισμένη κινητική ενέργεια. Η κινητική ενέργεια εξαρτάται από το φορτίο του ιόντος και τη διαφορά δυναμικού που



εφαρμόζεται. Με αυτόν τον τρόπο, ιόντα με διαφορετική μάζα, αλλά ίδιο φορτίο αποκτούν την ίδια ενέργεια αλλά διαφορετική ταχύτητα. Ακολούθως, πραγματοποιείται διαχωρισμός των ιόντων μέσω αναλυτή μάζας. Τα ιόντα εκτρέπονται από μαγνητικό πεδίο και ακολουθούν καμπύλη τροχιά, της οποίας η ακτίνα εξαρτάται από τη μάζα και την ταχύτητα του ιόντος. Ελαφρύτερα ιόντα εκτρέπονται περισσότερο, ενώ βαρύτερα λιγότερο, επιτρέποντας τον διαχωρισμό τους στον χώρο. Μετά τον διαχωρισμό, τα ιόντα φθάνουν στον ανιχνευτή, ο οποίος μετατρέπει την πρόσκρουση των ιόντων σε ηλεκτρικό σήμα, το οποίο είναι ανάλογο της ποσότητας των ιόντων που ανιχνεύονται. Το σήμα αυτό ενισχύεται και μετατρέπεται σε φάσμα μάζας, όπου στον οριζόντιο άξονα απεικονίζεται ο λόγος m/z και στον κατακόρυφο η ένταση του σήματος. Η πειραματική διάταξη η οποία χρησιμοποιήθηκε για τις δοκιμές προσδιορισμού της χημικής σύστασης των παραληφθέντων δειγμάτων (T4 Optical Emission Spectrometer) είναι εγκατεστημένη στο Εργαστήριο Μεταλλογνωσίας, της Σχολής Μεταλλειολόγων Μεταλλουργών Μηχανικών. Πραγματοποιήθηκαν δύο (2) δοκιμές-χημικές αναλύσεις, ανά δείγμα.

2.8 Περίθλαση Ακτίνων Χ (XRD)

Η περίθλαση ακτίνων Χ (X-Ray Diffraction) χρησιμοποιείται ως μέθοδος μελέτης της κρυσταλλικής δομής στερεών υλικών, όπως επίσης και για την ταυτοποίηση των κρυσταλλικών φάσεων, στις οποίες κατανέμονται τα στοιχεία που απαρτίζουν το υλικό. Η μέθοδος ανάλυσης με περίθλαση ακτίνων Χ βασίζεται στην περίθλαση μονοχρωματικής ακτινοβολίας ακτίνων Χ, γνωστού μήκους κύματος λ , επάνω στα επίπεδα του κρυσταλλικού πλέγματος του εξεταζόμενου υλικού. Οι ακτίνες Χ παράγονται από μία λυχνία χαλκού. Η κάθοδος της λυχνίας αποτελείται από νήμα βολφραμίου και η άνοδος από χαλκό. Η διάταξη βρίσκεται σε κενό. Κατά την εφαρμογή τάσης στο νήμα βολφραμίου τα ηλεκτρόνια θερμαίνονται, διεγείρονται και υπό κενό οδηγούνται στην άνοδο χαλκού. Έτσι τα ηλεκτρόνια του Cu διεγείρονται, μεταπηδούν

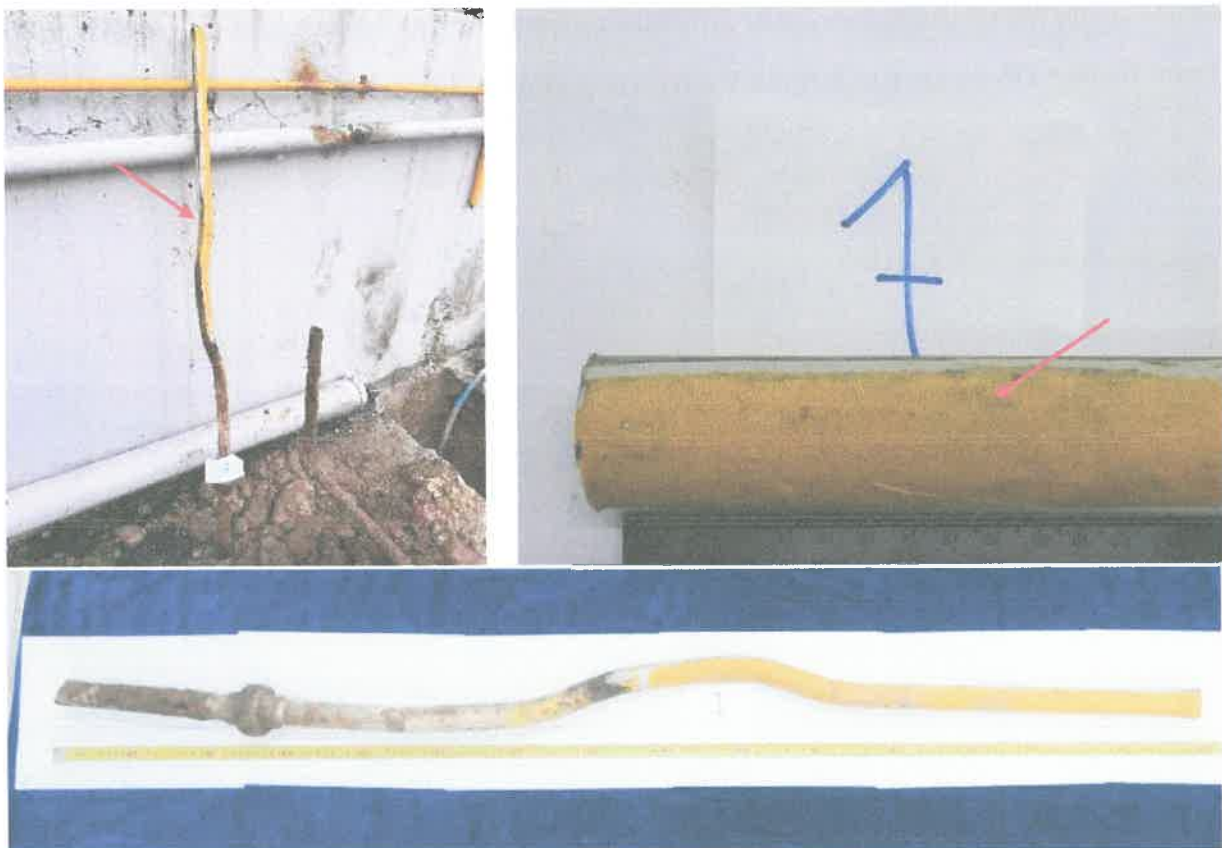


σε εξωτερικές στοιβάδες και κατά την επαναφορά τους στη θεμελιώδη στοιβάδα παράγουν φωτόνια μήκους κύματος ακτίνων Χ. Το περιθλασίμετρο διαθέτει γωνιόμετρο που περιστρέφει το δείγμα κατά γωνία θ , ενώ ο ανιχνευτής περιστρέφεται κατά γωνία 2θ για να λαμβάνει όλη την ακτινοβολία. Η σχέση μεταξύ γωνίας θ , του μήκους κύματος λ των ακτίνων Χ και της διαπλεγματικής απόστασης d , δίνεται από την γνωστή εξίσωση Bragg. Το περιθλασίμετρο ακτίνων Χ της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών, που χρησιμοποιήθηκε στην συγκεκριμένη μελέτη, είναι τύπου Bruker D8-Focus (με λυχνία Cu ακτινοβολίας $K\alpha$ μήκους κύματος 1.5405 \AA).

3. ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

3.1 Χαρακτηρισμός “Δείγματος 7”

Το υπό εξέταση “Δείγμα 7” αποσπάστηκε από υπέργειο και μακροσκοπικά υγιές τμήμα της σωλήνωσης ώστε να χρησιμοποιηθεί ως δείγμα αναφοράς για τη σύγκριση της χημικής σύστασης, της μικροδομής και του πάχους τοιχώματος (Εικόνα 6).



Εικόνα 6: “Δείγμα 7” από το από υπέργειο και μακροσκοπικά υγιές τμήμα της σωλήνωσης

Κατά τον εργαστηριακό έλεγχο πραγματοποιήθηκαν οι ακόλουθες δοκιμές:

- ✓ Χημική Ανάλυση μέσω Φασματογράφου Μάζας Spark OES
- ✓ Στερεοσκοπικός Έλεγχος
- ✓ Έλεγχος Μικροδομής στο Οπτικό Μικροσκόπιο



- ✓ Έλεγχος Μικροδομής και Μικροανάλυση σε Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης
- ✓ Έλεγχος Σκληρότητας Vickers
- ✓ Περίθλαση Ακτίνων Χ

Ο προσδιορισμός των διαστασιολογικών χαρακτηριστικών του παραληφθέντος δείγματος πραγματοποιήθηκε με μετρήσεις μέσω μικρομέτρου, οι οποίες επιβεβαιώθηκαν και στο οπτικό και ηλεκτρονικό μικροσκόπιο. Η εξωτερική διάμετρος (OD) του σωλήνα μετρήθηκε στα 33.60 mm, ενώ η αντίστοιχη εσωτερική διάμετρος (ID) στα 27.75 mm. Το πάχος του τοιχώματος (t) ήταν 2.83mm. Τα εν λόγω χαρακτηριστικά αντιστοιχούν σε σωλήνα NPS 3/4" (DN20), Schedule 40, για τον οποίο η τυπική εξωτερική διάμετρος είναι 33.40 mm, ενώ το ονομαστικό πάχος τοιχώματος (Sch 40) είναι 2.87 mm (NPS: Nominal Pipe Size, DN: Nominal Diameter). Η μετρούμενη εξωτερική διάμετρος βρίσκεται εντός των επιτρεπόμενων ανοχών παραγωγής, ενώ το πάχος τοιχώματος είναι πολύ κοντά στο ονομαστικό και συμβατό με τις τυπικές ανοχές έλασης χαλύβδινων σωλήνων. Συνεπώς, γεωμετρικά το δείγμα ταυτοποιείται ως σωλήνας NPS 3/4" Schedule 40.

Για τον προσδιορισμό της χημικής σύστασης του χάλυβα της σωλήνωσης ("Δείγμα 7") χρησιμοποιήθηκε Φασματογράφος Μάζας Spark OES, και πραγματοποιήθηκαν δοκιμές-αναλύσεις σε δύο διαφορετικές θέσεις, οι οποίες παρουσιάζονται στον Πίνακα 1. Από τα αποτελέσματα προέκυψε ότι ο υπό μελέτη χάλυβας περιέχει C \approx 0.13 %, Mn \approx 0.56 %, Si \approx 0.35 %, P \approx 0.010–0.011 %, S \approx 0.007–0.008 % και Fe \approx 98.6 %. Η σύσταση αυτή είναι χαρακτηριστική κοινού ανθρακούχου χάλυβα χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα. Τα επίπεδα φωσφόρου και θείου είναι χαμηλά και εντός των συνήθων ορίων για σωλήνες μεταφοράς ρευστών, γεγονός που υποδηλώνει καλή μεταλλουργική ποιότητα χωρίς αυξημένη ευθραυστότητα ή μειωμένη συγκολλησιμότητα.



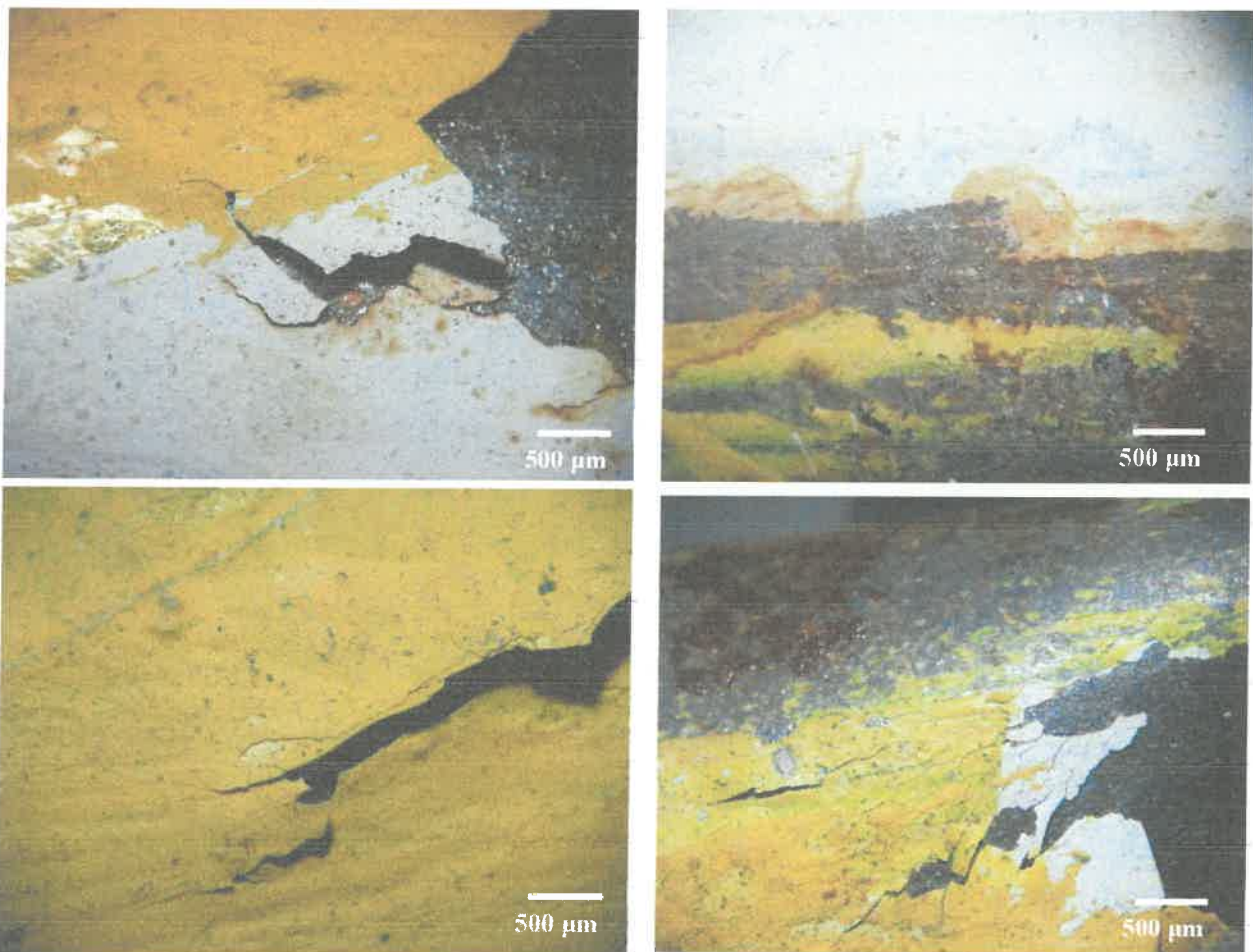
Πίνακας 1: Αποτελέσματα χημικής ανάλυσης Spark-OES "Δείγματος 7" - Υπέργειο τμήμα σωλήνωσης

No	Al	As	B	Bi	C	Ca	Ce	Co	Cr	Cu
1 st	0.04	0.001	0.001	0.006	0.135	0.002	0.001	0.005	0.031	0.131
2 nd	0.04	0.001	0.001	0.006	0.132	0.002	0.002	0.002	0.033	0.132
No	Fe	La	Mg	Mn	Mo	Nb	Ni	P	Pb	S
1 st	98.610	<0.001	<0.001	0.564	<0.001	<0.001	<0.001	0.010	<0.001	0.007
2 nd	98.604	<0.001	<0.001	0.568	<0.001	<0.001	<0.001	0.011	<0.001	0.008
No	Sb	Si	Sn	Ti	V	W	Zn			
1 st	<0.001	0.347	0.104	0.007	<0.001	<0.001	<0.001			
2 nd	<0.001	0.351	0.104	0.007	<0.001	<0.001	<0.001			

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, η χημική σύσταση είναι συμβατή με ποιότητες σωλήνων κατά ASTM A53 Grade A/B, ή ASTM A106 Grade A, οι οποίες χρησιμοποιούνται ευρέως σε δίκτυα μεταφοράς αερίων και υγρών χαμηλής και μέσης πίεσης. Θα πρέπει να επισημανθεί, ότι αναφορικά με την καταλληλότητα του εν λόγω σωλήνα για μεταφορά αερίου προπανίου σε 1.5 bar, η πίεση λειτουργίας θεωρείται ιδιαίτερα χαμηλή για χαλύβδινους σωλήνες Schedule 40. Για σωλήνα NPS 3/4" Sch 40 από κοινό ανθρακούχο χάλυβα, η επιτρεπόμενη πίεση λειτουργίας (ανάλογα με το πρότυπο σχεδιασμού, π.χ. ASME B31.3 ή αντίστοιχα ευρωπαϊκά πρότυπα) είναι πολλαπλάσια των 1.5 bar, συνήθως δεκάδες bar, ακόμη και με συντηρητικούς συντελεστές ασφαλείας.

Κατά συνέπεια, με βάση τα διαστασιολογικά χαρακτηριστικά (πάχος ~2.8 mm), και τη χημική σύσταση (τυπικός κοινός ανθρακούχος χάλυβας), η σωλήνα στην αρχική της κατάσταση είναι απολύτως επαρκής και σύμφωνη για μεταφορά αερίου καυσίμου (προπανίου) σε πίεση 1.5 bar, υπό την προϋπόθεση ότι πληρούνται οι απαιτήσεις εγκατάστασης και αντιδιαβρωτικής προστασίας, ώστε να μην υφίσταται διάβρωση και να μην παρατηρείται σημαντική μείωση πάχους.

Η παρατήρηση του “Δείγματος 7” με στερεοσκοπικό μικροσκόπιο ανέδειξε την κατάσταση της εξωτερικής οργανικής επικάλυψης της σωλήνωσης, η οποία λειτουργεί ως αντιδιαβρωτικό προστατευτικό σύστημα. Σε μακροσκοπικό επίπεδο το μεταλλικό υπόστρωμα δεν εμφανίζει ενδείξεις ενεργού διάβρωσης· ωστόσο, η οργανική επίστρωση παρουσιάζει εμφανείς αστοχίες συνοχής και πρόσφυσης (Εικόνα 7).



Εικόνα 7: Επιφανειακές μακρογραφίες στερεοσκοπίου “Δείγματος 7” – Υπέργειο τμήμα σωλήνωσης

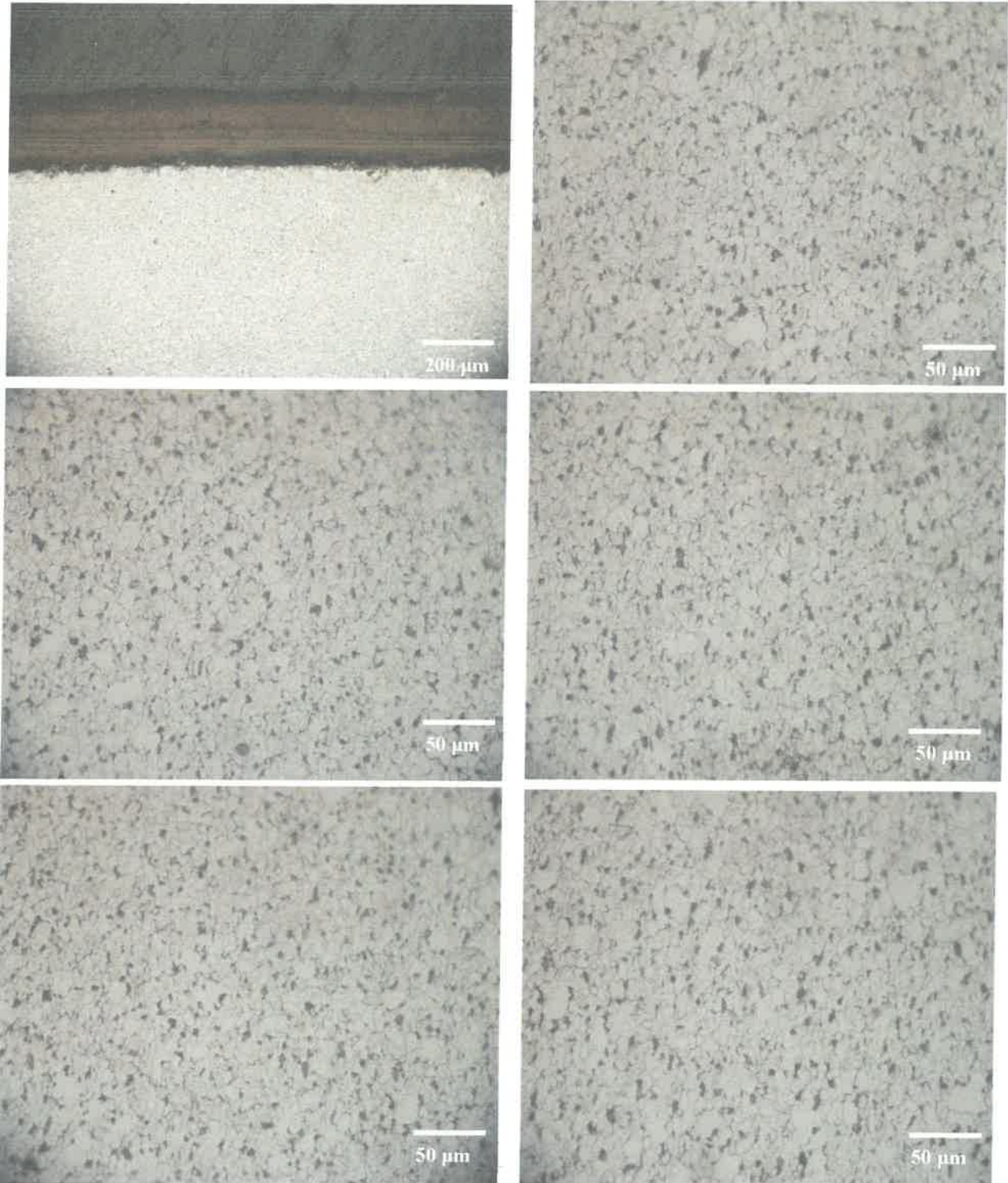
Συγκεκριμένα, παρατηρούνται εκτεταμένες ρωγματώσεις της επιφανειακής στοιβάδας, με μορφολογία δικτυωτής (craquelure) κατανομής, καθώς και τοπικές γραμμικές ρηγματώσεις που διατρέχουν το πάχος του επιστρώματος. Οι ρωγμές αυτές υποδηλώνουν γήρανση της οργανικής επικάλυψης, πιθανή απώλεια ελαστικότητας και ανάπτυξη εσωτερικών τάσεων λόγω θερμικών μεταβολών ή μακροχρόνιας έκθεσης σε περιβαλλοντικούς παράγοντες.



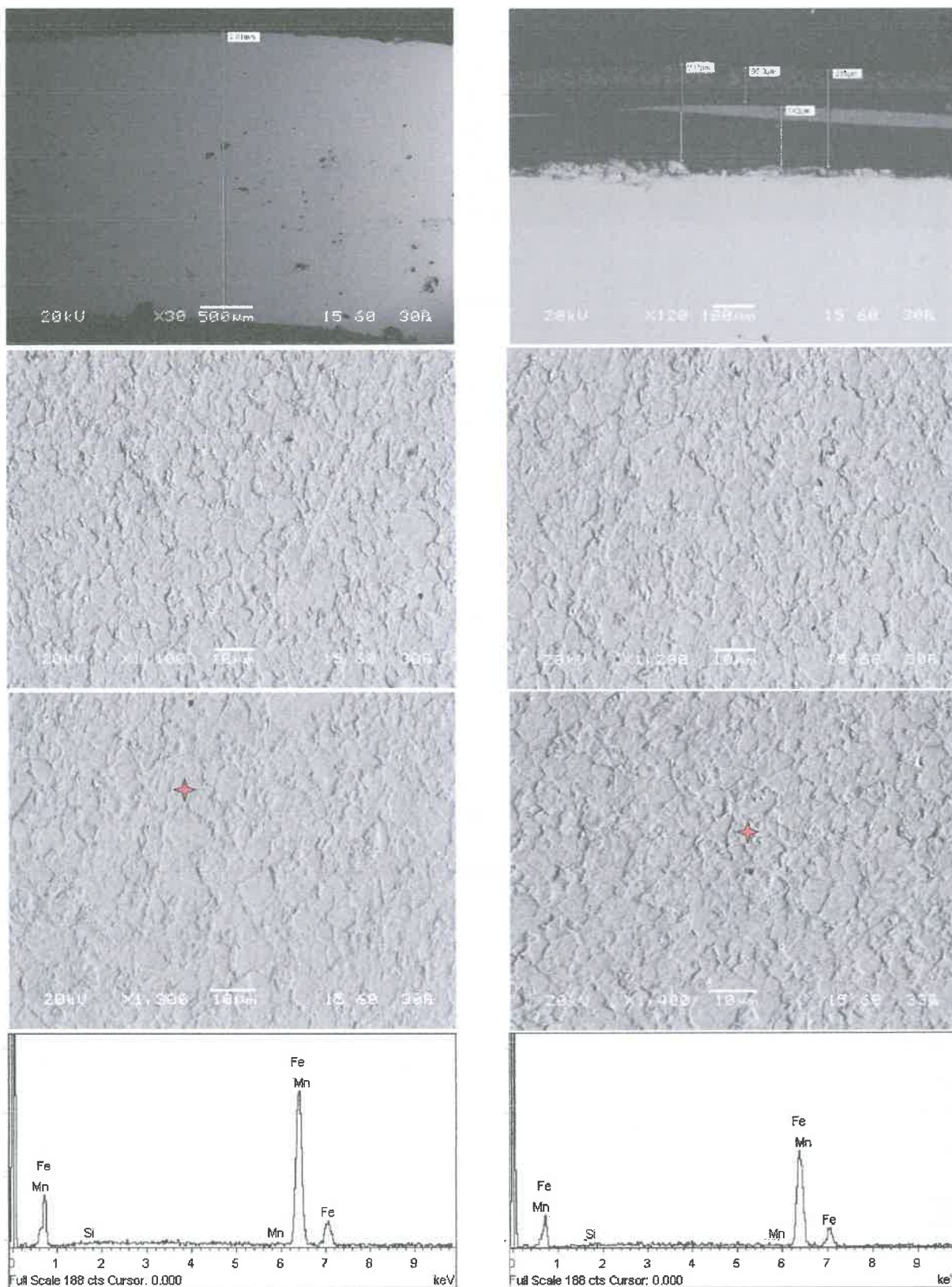
Παράλληλα, σε ορισμένες περιοχές διαπιστώθηκε μερική αποκόλληση της επικάλυψης από το μεταλλικό υπόστρωμα, με δημιουργία τοπικών απολεπίσεων και ανυψώσεων των άκρων του χρώματος. Τα φαινόμενα αυτά καταδεικνύουν υποβάθμιση της πρόσφυσης μεταξύ επιστρώματος και χάλυβα, γεγονός που δυνητικά επιτρέπει τη διείσδυση υγρασίας και διαβρωτικών παραγόντων στο υπόστρωμα. Αν και στο εξεταζόμενο υπέργειο τμήμα δεν παρατηρήθηκε εκτεταμένη οξείδωση του χάλυβα, η κατάσταση της επικάλυψης υποδηλώνει ότι η προστατευτική της ικανότητα είχε μειωθεί σημαντικά. Η παρουσία ρηγματώσεων και τοπικών αποκολλήσεων συνιστά κρίσιμο παράγοντα για την έναρξη ή επιτάχυνση φαινομένων διάβρωσης, ιδίως σε υπόγειες συνθήκες όπου επικρατούν αυξημένη υγρασία και ηλεκτροχημική δραστηριότητα.

Στις **Εικόνες 8 και 9** παρουσιάζονται ενδεικτικές μικρογραφίες από την εξέταση των παραχθέντων στιλπνών τομών σε Μεταλλογραφικό Οπτικό Μικροσκόπιο και σε Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης, σε συνδυασμό με τοπικές στοιχειακές αναλύσεις, μέσω ανιχνευτή ακτίνων Χ, ενεργειακής διασποράς (EDS). Αρχικά θα πρέπει να επισημανθεί η παρουσία της οργανικής αντιδιαβρωτικής επικάλυψης, η οποία έχει συνολικό πάχος της τάξεως των 240 μm, τιμή σχετικά υψηλή και συμβατή με σύστημα βαφής βαρέως τύπου για εξωτερική χρήση. Η μορφολογία της επικάλυψης υποδηλώνει σαφή διπλοστρωματική δομή. Διακρίνεται εσωτερική στρώση, σε άμεση επαφή με το χαλύβδινο υπόστρωμα, με μεγαλύτερη συμπαγή υφή και καλή αρχική πρόσφυση, η οποία πιθανώς αντιστοιχεί σε αστάρι (primer) αντιδιαβρωτικής προστασίας, και εξωτερική στρώση με ελαφρώς διαφοροποιημένη υφή και οπτική αντίθεση, που αντιστοιχεί στο τελικό προστατευτικό/επικαλυπτικό χρώμα.

Η διεπιφάνεια μεταξύ των δύο στρώσεων είναι σαφώς οριοθετημένη, χωρίς όμως να παρατηρείται πλήρης ομοιογένεια πάχους σε όλη την έκταση, γεγονός που υποδηλώνει εφαρμογή με συμβατική μέθοδο βαφής.



Εικόνα 8: Μικρογραφίες οπτικού μικροσκοπίου "Δείγματος 7" - Υπέργειο τμήμα σωλήνωσης



Εικόνα 9: Ενδεικτικές μικρογραφίες SEM και στοιχειακές αναλύσεις EDS "Δείγματος 7"



Σε ορισμένες περιοχές παρατηρούνται μικροκενά ή τοπικές ασυνέχειες, καθώς και αρχόμενη αποκόλληση στη διεπιφάνεια επικάλυψης-μετάλλου, στοιχείο που συνδέεται με τις ρηγματώσεις που καταγράφηκαν μακροσκοπικά. Το πάχος των 240 μm, αν και επαρκές θεωρητικά για αντιδιαβρωτική προστασία, σε συνδυασμό με την παρουσία μικρορηγματώσεων και τοπικής απώλειας πρόσφυσης, υποδηλώνει ότι η λειτουργική ικανότητα του συστήματος επικάλυψης έχει υποβαθμιστεί, επιτρέποντας δυνητικά τη διείσδυση υγρασίας και την έναρξη υποφιλμικής διάβρωσης υπό κατάλληλες περιβαλλοντικές συνθήκες.

Η παρατήρηση στο οπτικό μικροσκόπιο ανέδειξε τυπική μικροδομή υποευτηκτοειδούς κοινού ανθρακούχου χάλυβα, αποτελούμενη από φερριτική μήτρα με νησίδες περλίτη. Η εκτίμηση των ποσοστών φάσεων, βάσει της περιεκτικότητας σε άνθρακα (~0.13 % C από OES) και της μορφολογίας της μικροδομής, υποδηλώνει ποσοστό φερρίτη περίπου 85% και περλίτη περίπου 15%. Η κατανομή των φάσεων είναι ομοιόμορφη σε όλη τη διατομή, χωρίς ενδείξεις ζωνώσεων, απανθράκωσης επιφανείας ή μικροδομικών ασυνεχειών. Ο φερρίτης (α -Fe) είναι σχεδόν καθαρός σίδηρος, ο οποίος έχει χωροκεντρωμένη δομή (bcc). Η μέγιστη διαλυτότητα του C στο φερρίτη (τυχαίο στερεό διάλυμα του C στο πλέγμα του Fe) είναι 0.025% στους 723 °C. Η δημιουργία των κόκκων φερρίτη λαμβάνει χώρα κυρίως κατά τον μετασχηματισμό του γ -Fe (ωστενίτη), κατά την αργή απόψυξη ενός υποευτηκτοειδούς χάλυβα μεταξύ των θερμοκρασιών 910 °C και 723 °C (ανάλογα με την περιεκτικότητα σε άνθρακα). Οι κόκκοι του φερρίτη εμφανίζονται ισοαξονικοί και μη πεπλατυσμένοι, χωρίς επιμήκυνση κατά συγκεκριμένη διεύθυνση. Η απουσία προσανατολισμένης επιμήκυνσης ή ινώδους δομής υποδηλώνει ότι το υλικό δεν έχει υποστεί ψυχρή διαμόρφωση τελικού σταδίου, αλλά αντιθέτως έχει παραχθεί μέσω θερμής διαμόρφωσης (θερμή έλαση) ακολουθούμενης από φυσιολογική ψύξη στον αέρα. Το εκτιμώμενο μέγεθος κόκκου, βάσει σύγκρισης με πρότυπα ASTM E112, αντιστοιχεί σε λεπτόκοκκη έως μέσης



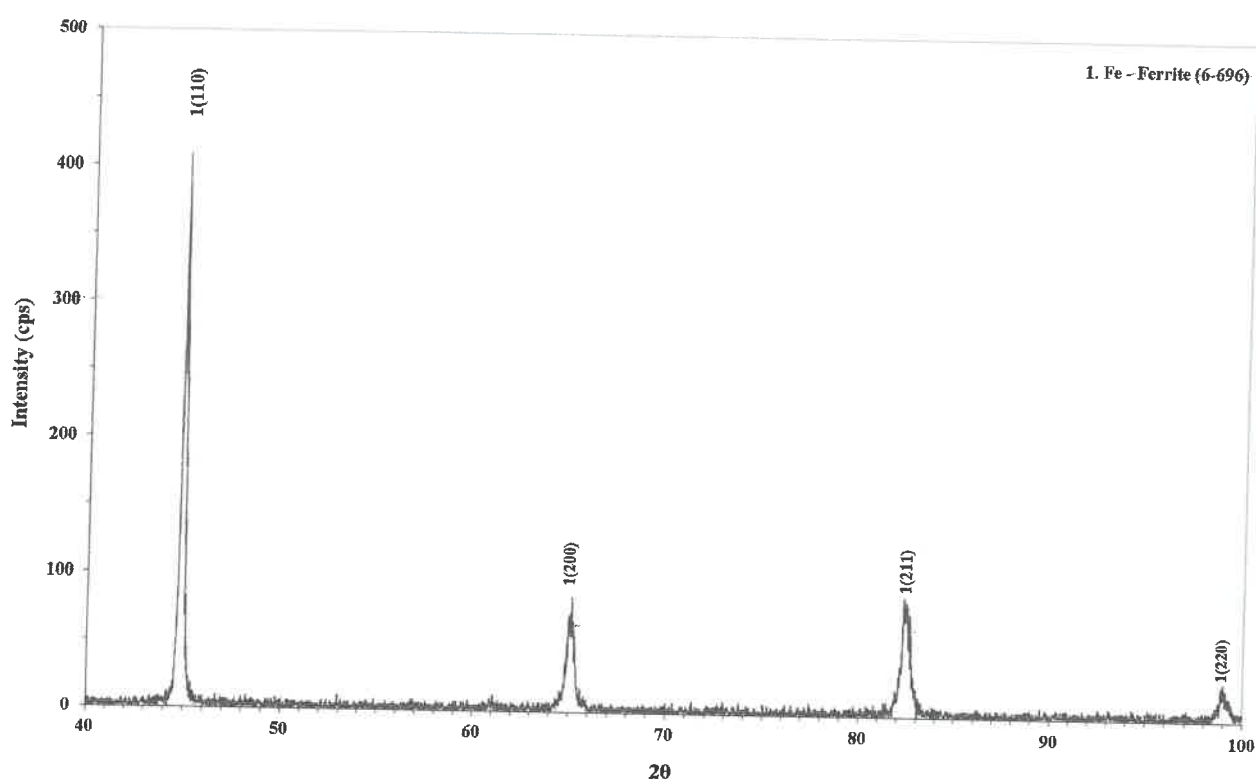
λεπτότητας μικροδομή, χαρακτηριστική σωλήνων γενικής χρήσης από κοινό ανθρακούχο χάλυβα χαμηλού ποσοστού άνθρακα.

Η παρατήρηση στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM) επιβεβαίωσε τη φερριτοπερλιτική φύση της μικροδομής. Ο περλίτης δεν αποτελεί ο ίδιος φάση, αλλά είναι μία σύνθετη ευτηκτοειδής δομή εναλλασσόμενων πλακιδίων φερρίτη και σεμεντίτη (δηλ. καρβιδίου του σιδήρου Fe_3C). Ο περλιτικός μετασχηματισμός λαμβάνει χώρα στους χάλυβες κάτω από την ευτηκτοειδή θερμοκρασία ($723^{\circ}C$) καθώς ο γ -Fe μετατρέπεται σε α -Fe και Fe_3C . Ο μετασχηματισμός αυτός βασίζεται κυρίως στη διάχυση του άνθρακα στον ωστενίτη. Η πυρήνωση, ο σχηματισμός δηλαδή των πυρήνων της νέας φάσης και ο σχηματισμός του περλίτη στους υποευτηκτοειδείς χάλυβες πραγματοποιείται στα όρια του κόκκων του προευτηκτοειδή φερρίτη που έχει σχηματιστεί κατά τον φερριτικό μετασχηματισμό. Μορφολογικά ο περλίτης αποτελείται από εναλλαγές πλακιδίων φερρίτη και σεμεντίτη, με σαφή διαχωρισμό από τη φερριτική μήτρα, τα οποία πολλαπλασιάζονται με την ανάπτυξη του περλίτη, είτε με πλευρική πυρήνωση νέων, είτε με διακλάδωση των ήδη υπάρχοντων. Δεν εντοπίστηκαν μικρορωγμές, μικροπορώδεις ασυνέχειες ή παθολογικά εγκλείσματα σημαντικού μεγέθους. Η στοιχειακή ανάλυση EDS έδειξε ομοιογενή κατανομή των κύριων στοιχείων κράματος, χωρίς τοπικούς εμπλουτισμούς ή διαχωρισμούς φάσεων πέραν των αναμενόμενων για τον περλίτη. Η συνολική μικροδομική εικόνα είναι συμβατή με κοινό ανθρακούχο χάλυβα χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα, ο οποίος έχει υποστεί θερμή ελάση και κανονική ψύξη, χωρίς θερμική σκλήρυνση ή άλλες επιφανειακές κατεργασίες.

Πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις μακροσκληρότητας κατά Vickers (HV), σε εγκάρσια τομή της σωλήνας. Οι τιμές σκληρότητας κυμάνθηκαν στην περιοχή των 145-155 HV, με μέση τιμή περί τα 150 HV. Οι τιμές αυτές είναι απολύτως εντός των αναμενόμενων ορίων για φερριτοπερλιτικό χάλυβα με ποσοστό άνθρακα της τάξης του 0.13 % C, ενώ επιβεβαιώνουν την απουσία τοπικής σκλήρυνσης, βαφής ή μεταλλουργικής

αλλοίωσης. Η ομοιομορφία των μετρήσεων κατά μήκος της διατομής υποδηλώνει ομοιογενή μικροδομή και απουσία διαφοροποιήσεων λόγω κατεργασιών ή υπολειμματικών τάσεων.

Η ανάλυση μέσω περίθλασης ακτίνων-Χ (XRD) επιβεβαίωσε πλήρως τα μικροδομικά ευρήματα της μεταλλογραφικής και ηλεκτρονικής μικροσκοπικής εξέτασης (Εικόνα 10).



Εικόνα 10: Ακτινοδιάγραμμα XRD "Δείγματος 7" - Υπέργειο τμήμα σωλήνωσης

Το ακτινοδιάγραμμα παρουσιάζει χαρακτηριστικές κορυφές που αντιστοιχούν αποκλειστικά στη φάση α -Fe (φερρίτης) με χωροκεντρωμένη κυβική δομή (BCC), χωρίς ανίχνευση επιπρόσθετων κρυσταλλικών φάσεων. Δεν καταγράφονται κορυφές που να υποδηλώνουν παρουσία άλλων φάσεων (π.χ. μαρτενσίτη, καρβιδίων διακριτής μορφής ή προϊόντων θερμικής κατεργασίας), γεγονός που επιβεβαιώνει ότι το υλικό βρίσκεται σε κατάσταση ισορροπίας τυπικού υποευθηκτοειδούς φερριτοπερλιτικού χάλυβα.

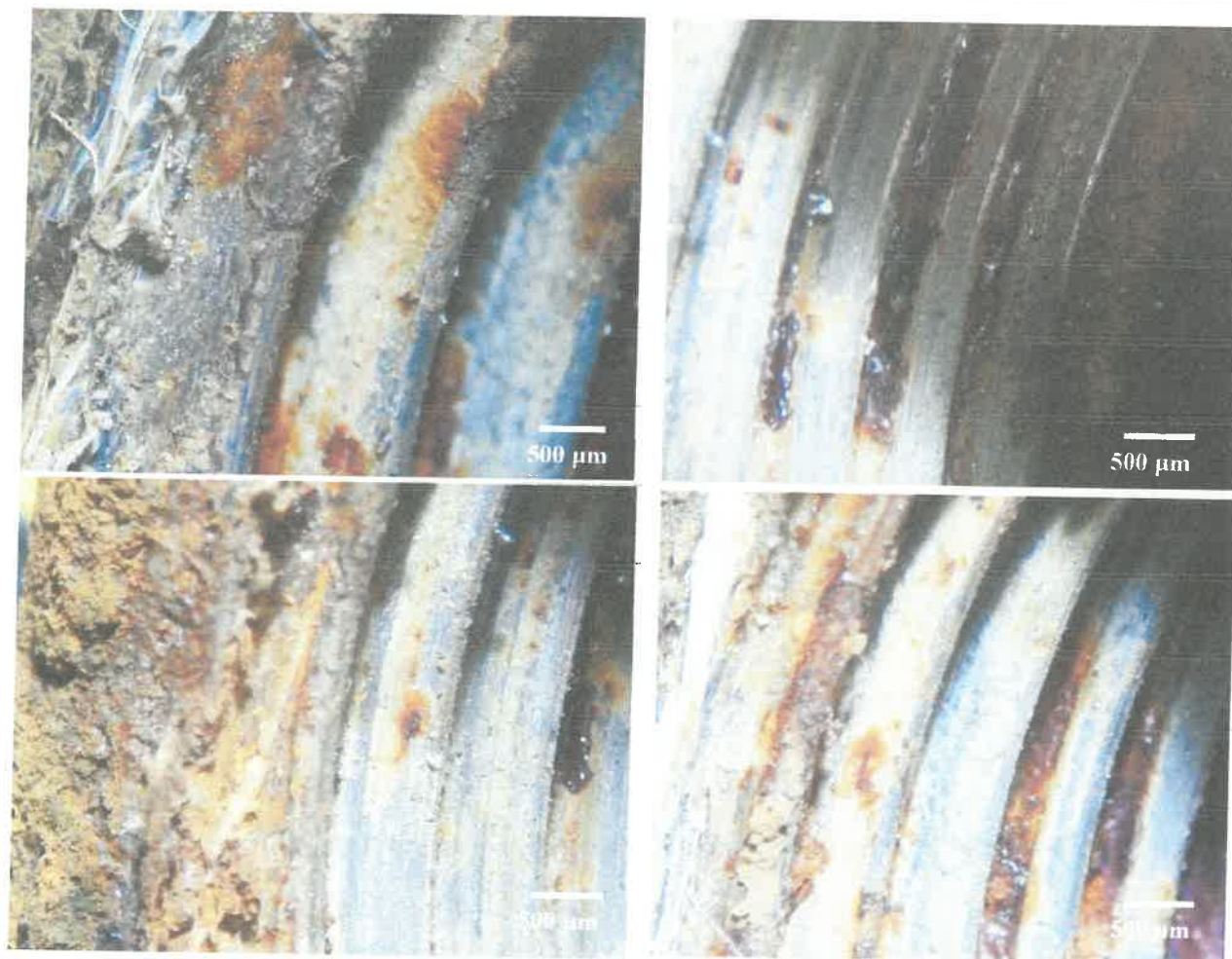
3.2 Χαρακτηρισμός “Δείγματος 2”

Το υπό εξέταση “Δείγμα 2” λήφθηκε από περιοχή βιδωτής σύνδεσης (μούφα) τμημάτων της υπόγειας σωλήνωσης, με σκοπό να αξιολογηθεί η πιθανή επίδραση της γεωμετρικής ασυνέχειας, των τοπικών τάσεων ή της διαφοροποίησης των συνθηκών διάβρωσης στην περιοχή της ένωσης (Εικόνα 11).



Εικόνα 11: “Δείγμα 2” από περιοχή βιδωτής σύνδεσης τμημάτων της σωλήνωσης

Οι μακροσκοπικές και στερεοσκοπικές παρατηρήσεις καταδεικνύουν εκτεταμένη παρουσία προϊόντων διάβρωσης τόσο στην εξωτερική, όσο και την εσωτερική επιφάνεια της σύνδεσης, με μορφολογία που παραπέμπει σε τοπική επιφανειακή και ενδεχομένως σχισμοειδή (crevice) διάβρωση (Εικόνα 12).



Εικόνα 12: Μακρογραφίες στερεοσκοπίου “Δείγματος 2” – Βιδωτή σύνδεση τμημάτων σωλήνωσης

Αν και δεν ανιχνεύθηκε διάτρηση ή πλήρης διαμπερής αστοχία στο συγκεκριμένο σημείο, η ανάπτυξη οξειδίων και η έντονη προσβολή της επιφάνειας υποδηλώνουν ότι η περιοχή λειτουργεί ως ζώνη αυξημένης διαβρωτικής ευαισθησίας. Η συμπεριφορά αυτή συνδέεται άμεσα με τη φύση της βιδωτής σύνδεσης. Οι κοχλιωτές ενώσεις δημιουργούν αναπόφευκτα μικροκενά και σχισμές στη διεπιφάνεια των σπειρωμάτων, τα οποία, σε υπόγειο περιβάλλον με παρουσία υγρασίας και ηλεκτρολυτών, λειτουργούν ως εστίες σχισμοειδούς διάβρωσης. Η περιορισμένη ανανέωση οξυγόνου εντός της σχισμής οδηγεί σε διαφοροποίηση αερισμού (differential aeration cell), δημιουργώντας τοπικά ηλεκτροχημικά στοιχεία με ανοδική συμπεριφορά στο εσωτερικό της σχισμής και καθοδική στην εξωτερική επιφάνεια. Το αποτέλεσμα είναι



επιταχυνόμενη τοπική απώλεια μετάλλου, ακόμη και όταν το υπόλοιπο τμήμα της σωλήνωσης εμφανίζεται λιγότερο προσβεβλημένο. Επιπλέον, η γεωμετρική ασυνέχεια της μούφας συνεπάγεται αυξημένες τοπικές μηχανικές τάσεις, καθώς και πιθανή διατάραξη ή ασυνέχεια της οργανικής αντιδιαβρωτικής επικάλυψης, γεγονός που επιδεινώνει την έκθεση του μετάλλου στο διαβρωτικό περιβάλλον.

Για τους παραπάνω λόγους, τα διεθνή πρότυπα σχεδιασμού και εγκατάστασης αγωγών αερίων καυσίμων, όπως το ASME B31.8 (Gas Transmission and Distribution Piping Systems) και το EN 12007 (Gas supply systems – Pipelines for maximum operating pressure up to and including 16 bar), αποθαρρύνουν ή περιορίζουν τη χρήση βιδωτών συνδέσεων σε υπόγειες εγκαταστάσεις μεταφοράς αερίου. Τα πρότυπα αυτά προκρίνουν συγκολλητές ή φλαντζωτές συνδέσεις, ιδίως σε υπόγεια τμήματα, διότι οι συγκολλητές ενώσεις εξαλείφουν τις σχισμές και τα μικροκενά, παρέχοντας συνεχή μεταλλική διατομή και ομοιόμορφη κατανομή τάσεων. Παράλληλα, διευκολύνουν την εφαρμογή και τη συνέχεια της αντιδιαβρωτικής επικάλυψης και της καθοδικής προστασίας, όπου αυτή προβλέπεται.

Συνεπώς, αν και δεν παρατηρήθηκε διάτρηση, η συγκέντρωση προϊόντων διάβρωσης και η μορφολογία της προσβολής στη βιδωτή σύνδεση υποδεικνύουν ότι τα σημεία αυτά αποτελούν δυνητικά σημεία μελλοντικής αστοχίας. Η επιλογή βιδωτής σύνδεσης σε υπόγειο περιβάλλον δημιουργεί αυξημένο διαβρωτικό κίνδυνο σε σύγκριση με συγκολλητές ενώσεις, ιδίως όταν συνδυάζεται με υποβάθμιση της οργανικής επικάλυψης και απουσία ενισχυμένων μέτρων αντιδιαβρωτικής προστασίας.

Για τους ανωτέρω τεχνικούς λόγους, τα ισχύοντα ευρωπαϊκά και εθνικά πρότυπα εγκαταστάσεων αερίων καυσίμων περιορίζουν ουσιαστικά ή δεν επιτρέπουν τη χρήση βιδωτών (κοχλιωτών) συνδέσεων σε υπόγειες σωληνώσεις μεταφοράς αερίου. Ειδικότερα,



το EN 15001-1 (στην Ελλάδα ως ΕΛΟΤ 15001-1) θέτει αυστηρές απαιτήσεις για τη στεγανότητα, τη μηχανική αντοχή και την αντιδιαβρωτική προστασία των σωληνώσεων, προβλέποντας ότι οι υπόγειες γραμμές πρέπει να κατασκευάζονται κατά τρόπο που να ελαχιστοποιεί τον κίνδυνο διαρροής και τοπικής διάβρωσης. Στο ίδιο πνεύμα, το EN 16125, που αφορά εξοπλισμό και συστήματα υγραερίου (LPG), απαιτεί συνδέσεις υψηλής αξιοπιστίας και αντοχής σε διαβρωτικό περιβάλλον, αποθαρρύνοντας τη χρήση κοχλιωτών ενώσεων σε θαμμένα τμήματα όπου δεν είναι δυνατή η τακτική επιθεώρηση και συντήρηση.

Η τεχνική βάση των περιορισμών αυτών έγκειται στο γεγονός ότι οι βιδωτές συνδέσεις δημιουργούν εγγενώς σχισμές στα σπειρώματα, στις οποίες ευνοείται η ανάπτυξη σχισμοειδούς διάβρωσης, η συγκέντρωση υγρασίας και η διατάραξη της συνέχειας της οργανικής επικάλυψης ή της καθοδικής προστασίας. Επιπλέον, η στεγανότητα των κοχλιωτών συνδέσεων βασίζεται σε παρεμβύσματα ή υλικά στεγανοποίησης (π.χ. πάστα, ταινία PTFE), τα οποία ενδέχεται να υποβαθμιστούν με την πάροδο του χρόνου σε υπόγειες συνθήκες. Αντιθέτως, οι συγκολλητές ή κατάλληλα φλαντζωτές συνδέσεις παρέχουν συνεχή μεταλλική διατομή, μειωμένο κίνδυνο διαρροής και ευκολότερη εξασφάλιση ομοιόμορφης αντιδιαβρωτικής προστασίας.

3.3 Χαρακτηρισμός “Δειγμάτος 1” και “Δειγμάτος 3” – Περιοχή Διάτρησης

Το υπό εξέταση “Δείγματα 1 και 3” αποσπάστηκαν από την περιοχή των διατρήσεων, όπου είχε διαπιστωθεί ενεργός διαρροή, μέσω ελέγχου στεγανότητας με υδροστατική πίεση, προκειμένου να διερευνηθεί η μικροδομή, ο μηχανισμός και η μορφολογία της διάβρωσης, καθώς και τυχόν τοπικές μεταλλουργικές ανομοιογένειες (Εικόνες 13, 14)



Εικόνα 13: “Δείγμα 1” από περιοχή διάτρησης στο υπόγειο τμήμα της σωλήνωσης

Κατά τον εργαστηριακό έλεγχο πραγματοποιήθηκαν οι ακόλουθες δοκιμές:

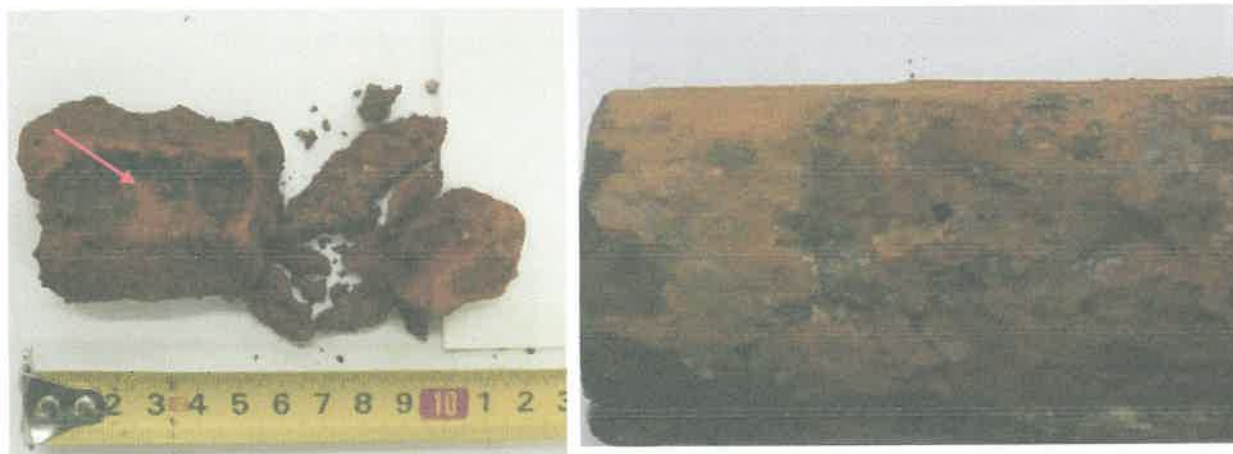
- ✓ Στερεοσκοπικός Έλεγχος
- ✓ Έλεγχος Μικροδομής στο Οπτικό Μικροσκόπιο
- ✓ Έλεγχος Μικροδομής και Μικροανάλυση σε Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης
- ✓ Έλεγχος Σκληρότητας Vickers
- ✓ Περίθλαση Ακτίνων Χ



Εικόνα 14: “Δείγμα 3” από περιοχή διάτρησης στο υπόγειο τμήμα της σωλήνωσης

Το “Δείγμα 1” προέρχεται από περιοχή διαμπερούς διάτρησης του υπόγειου τμήματος της σωλήνωσης. Μακροσκοπικά παρατηρείται τοπική απώλεια μετάλλου με μορφολογία που παραπέμπει σε έντονη τοπική (pitting) διάβρωση, η οποία εξελίχθηκε σε πλήρη διαμπερή οπή. Περιμετρικά της διάτρησης διακρίνεται ζώνη εκτεταμένων προϊόντων διάβρωσης, με χαρακτηριστική ερυθροκαστανή απόχρωση, καθώς και ανώμαλη επιφάνεια υποσκαφής του μετάλλου. Αντίστοιχα, το “Δείγμα 3” εμφανίζει παρόμοια μορφολογία τοπικής προσβολής, με προχωρημένη μείωση πάχους και διαμπερή αστοχία, επιβεβαιώνοντας ότι η διάβρωση δεν ήταν μεμονωμένο περιστατικό αλλά επαναλαμβανόμενο φαινόμενο σε περισσότερα του ενός σημεία της υπόγειας γραμμής.

Στις Εικόνες 15 και 16 φαίνονται τα δείγματα γεώδους υλικού (“Δείγμα 1α” και “Δείγμα 3α”)τα οποία αποσπάστηκαν περιμετρικά, από την επιφάνεια της σωλήνωσης για περαιτέρω έλεγχο.

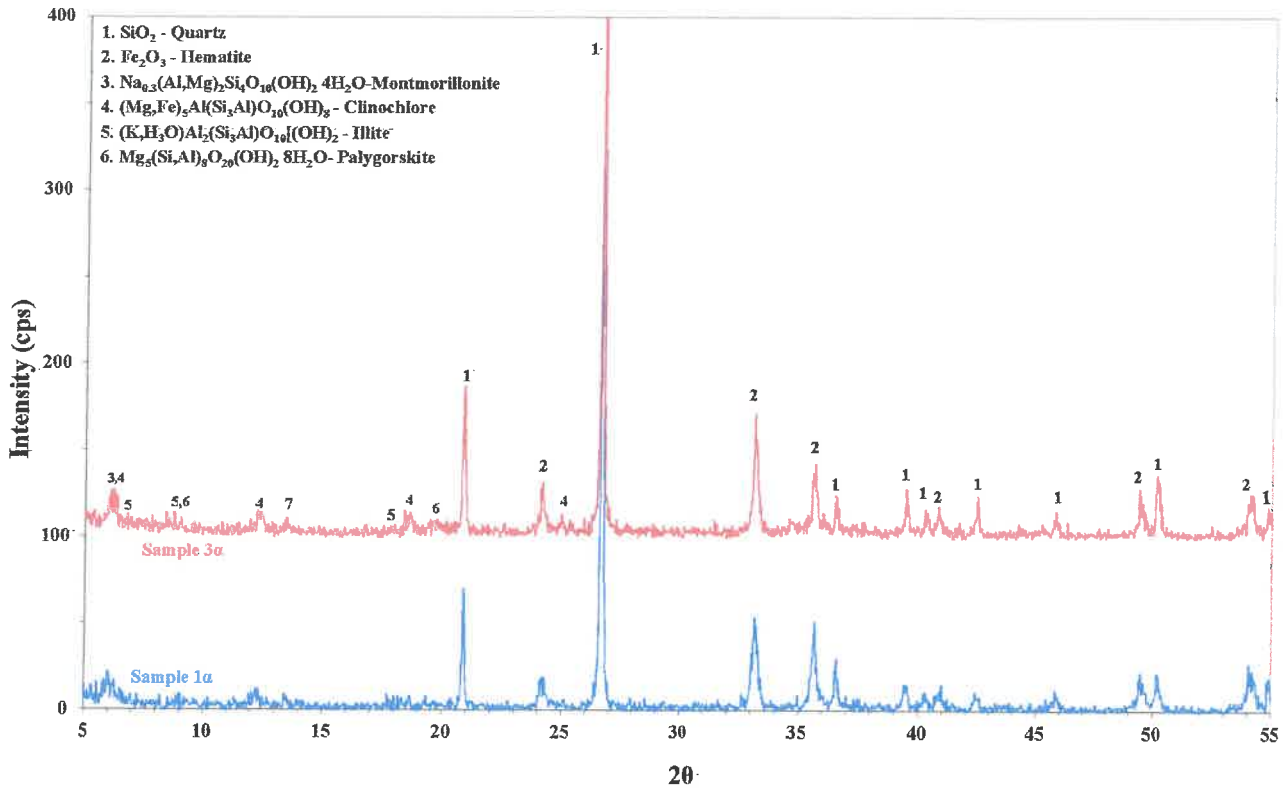


Εικόνα 15: "Δείγμα 1α" γεώδους υλικού από την επιφάνεια της σωλήνωσης



Εικόνα 16: "Δείγμα 3α" γεώδους υλικού από την επιφάνεια της σωλήνωσης

Τα συγκριτικά ακτινοδιαγράμματα XRD (Εικόνα 17) καταδεικνύουν παρουσία κρυσταλλικών φάσεων όπως χαλαζία (SiO_2), αιματίτη (Fe_2O_3) και αργιλικά ορυκτά (μοντμοριλλονίτης, ιλλίτης, χλωρίτης, παλυγορσκήτης). Η ορυκτολογική αυτή σύσταση είναι τυπική γεώδους εδαφικού υλικού με αργιλικά συστατικά, τα οποία παρουσιάζουν αυξημένη ικανότητα συγκράτησης υγρασίας και ιοντικής αγωγιμότητας, δημιουργώντας ευνοϊκές συνθήκες για ηλεκτροχημική διάβρωση κοινού ανθρακούχου χάλυβα. Η παρουσία αιματίτη στο έδαφος επιβεβαιώνει επίσης την οξειδωτική φύση του περιβάλλοντος.



Εικόνα 17: Συγκριτικά ακτινοδιαγράμματα XRD εδαφικού υλικού από την επιφάνεια της σωλήνωσης

Θα πρέπει επίσης να επισημανθεί ότι κατά την αποκάλυψη της σωλήνωσης διαπιστώθηκε ότι το υπόγειο τμήμα δεν έφερε καμία εξωτερική αντιδιαβρωτική προστασία. Δεν παρατηρήθηκε επικάλυψη πολυαιθυλενίου (PE), εποξειδική βαφή, περιέλιξη με αντιδιαβρωτική ταινία ή ασφαλική προστασία (ασφαλτόπανο), όπως συνήθως απαιτείται για θαμμένους χαλύβδινους αγωγούς. Ο σωλήνας βρισκόταν σε άμεση επαφή με το φυσικό έδαφος.

Η πρακτική αυτή έρχεται σε αντίθεση με τις απαιτήσεις των κανονισμών εγκατάστασης δικτύων αερίων καυσίμων, όπως το EN 15001-1 (στην Ελλάδα ΕΛΟΤ 15001-1), τα οποία προβλέπουν ότι οι χαλύβδινοι αγωγοί που τοποθετούνται υπόγεια πρέπει να φέρουν κατάλληλη αντιδιαβρωτική προστασία, ικανή να αποτρέπει την



άμεση επαφή του μετάλλου με το έδαφος και να διασφαλίζει τη μακροχρόνια στεγανότητα και μηχανική ακεραιότητα του συστήματος. Η απουσία επικάλυψης καταργεί το βασικό φράγμα προστασίας και επιτρέπει την άμεση ανάπτυξη ηλεκτροχημικών στοιχείων διάβρωσης στην διεπιφάνεια μετάλλου-εδάφους.

Επιπλέον, κατά την εκσκαφή διαπιστώθηκε ότι ο σωλήνας δεν ήταν εγκιβωτισμένος σε στρώση καθαρής άμμου αλλά ήταν τοποθετημένος απευθείας μέσα στο φυσικό έδαφος. Τα πρότυπα εγκατάστασης υπόγειων αγωγών αερίου, συμπεριλαμβανομένων των ΕΝ και ΕΛΟΤ κανονισμών, απαιτούν την τοποθέτηση των σωλήνων εντός στρώσης επιλεγμένου υλικού επίχωσης, συνήθως καθαρής άμμου, απαλλαγμένης από λίθους και αιχμηρά αντικείμενα. Η άμμος λειτουργεί ως μηχανικό και χημικό προστατευτικό μέσο, εξασφαλίζοντας ομοιόμορφη στήριξη, αποφυγή σημειακών φορτίσεων και μείωση της επαφής με επιθετικά εδαφικά συστατικά.

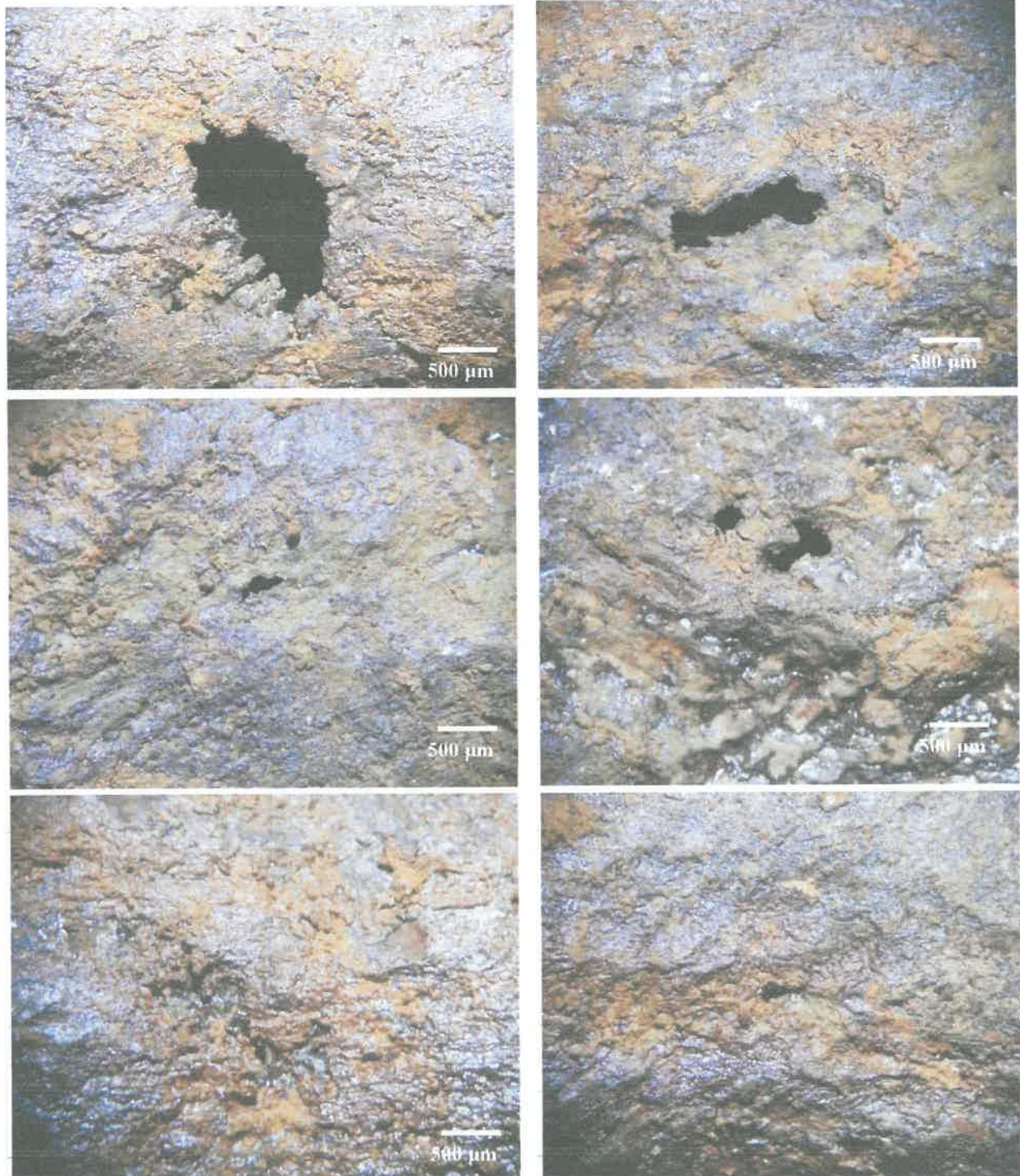
Η απευθείας επαφή του σωλήνα με φυσικό έδαφος που περιέχει αργιλικά ορυκτά και οξειδία σιδήρου, όπως τεκμηριώνεται από την ανάλυση περίθλασης ακτίνων Χ (XRD) των αντίστοιχων δειγμάτων γεώδους υλικού, δημιουργεί συνθήκες αυξημένης υγρασίας, μεταβλητής αεροπερατότητας και υψηλότερης ηλεκτρικής αγωγιμότητας. Οι συνθήκες αυτές ευνοούν την ανάπτυξη τοπικών ηλεκτροχημικών στοιχείων, οδηγώντας σε διάβρωση με βελονισμούς (pitting) και τελικά σε φαινόμενα διάτρησης, όπως παρατηρήθηκε στα Δείγματα 1 και 3.

Κατά συνέπεια, η συνδυασμένη απουσία αντιδιαβρωτικής επικάλυψης και προστατευτικής στρώσης άμμου συνιστά σοβαρή απόκλιση από τις κανονιστικές απαιτήσεις και εξηγεί, σε τεχνικό επίπεδο, τον μηχανισμό και την εξέλιξη της αστοχίας της υπόγειας σωλήνωσης.

Οι επιφανειακές μακρογραφίες στερεοσκοπίου των Δειγμάτων 1 και 3 από τις περιοχές διάτρησης (Εικόνες 18 και 19) αναδεικνύουν έντονα την τοπική ανάπτυξη της ανιχνευόμενης μορφή διάβρωσης, με χαρακτηριστικούς κρατήρες μικρής διαμέτρου και σημαντικού βάθους, οι οποίοι περιβάλλονται από εκτεταμένη ζώνη προϊόντων οξείδωσης. Η μορφολογία είναι τυπική μορφή διάβρωσης με βελονισμούς (pitting corrosion), δηλαδή εντοπισμένης ηλεκτροχημικής προσβολής που εξελίσσεται κατακόρυφα προς το εσωτερικό του μετάλλου αντί να αναπτύσσεται ομοιόμορφα σε όλη την επιφάνεια. Οι κοιλότητες εμφανίζουν απότομα τοιχώματα και υποσκαφή της μεταλλικής μήτρας, γεγονός που υποδηλώνει προοδευτική επιτάχυνση της τοπικής ανοδικής διάλυσης.



Εικόνα 18: Επιφανειακές μακρογραφίες στερεοσκοπίου "Δείγματος 1" – Περιοχή Διάτρησης



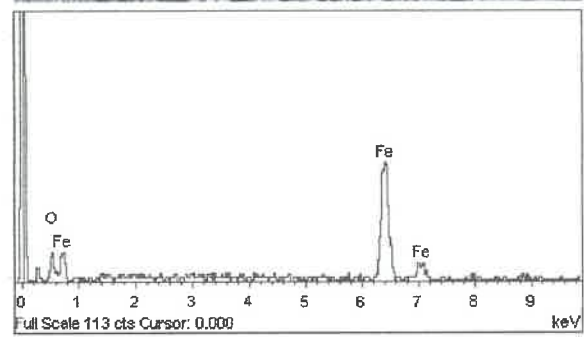
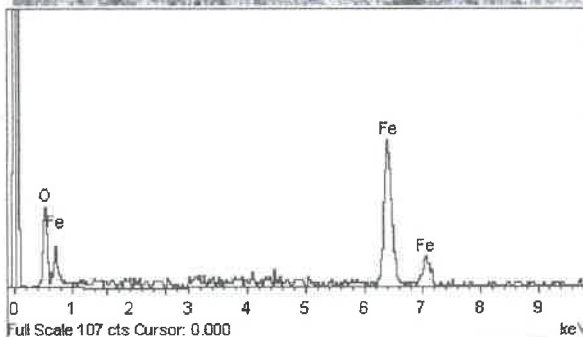
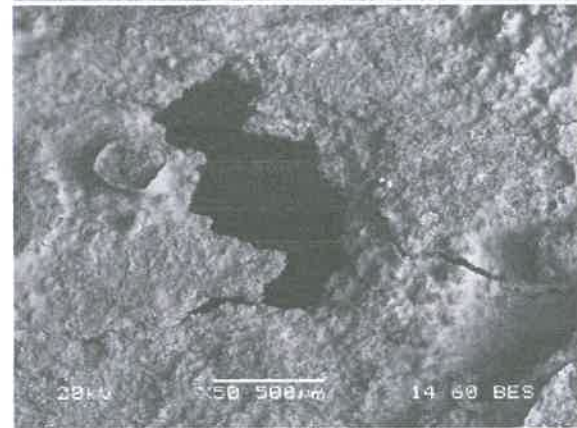
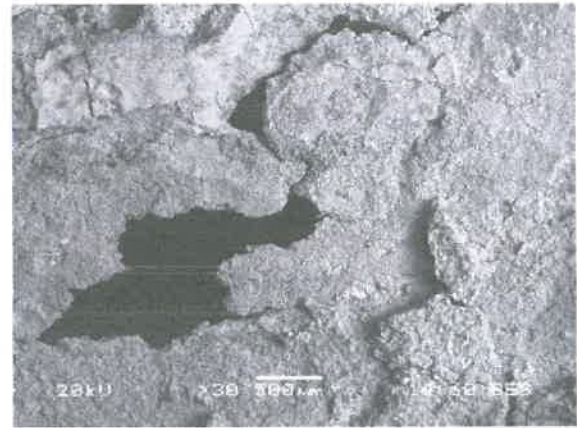
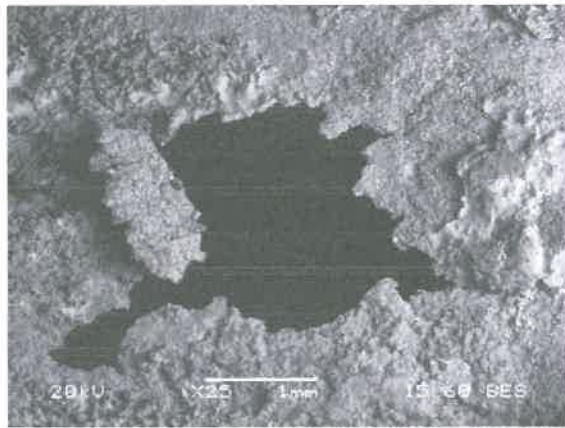
Εικόνα 19: Επιφανειακές μακρογραφίες στερεοσκοπίου "Δείγματος 3" – Περιοχή Διάτρησης



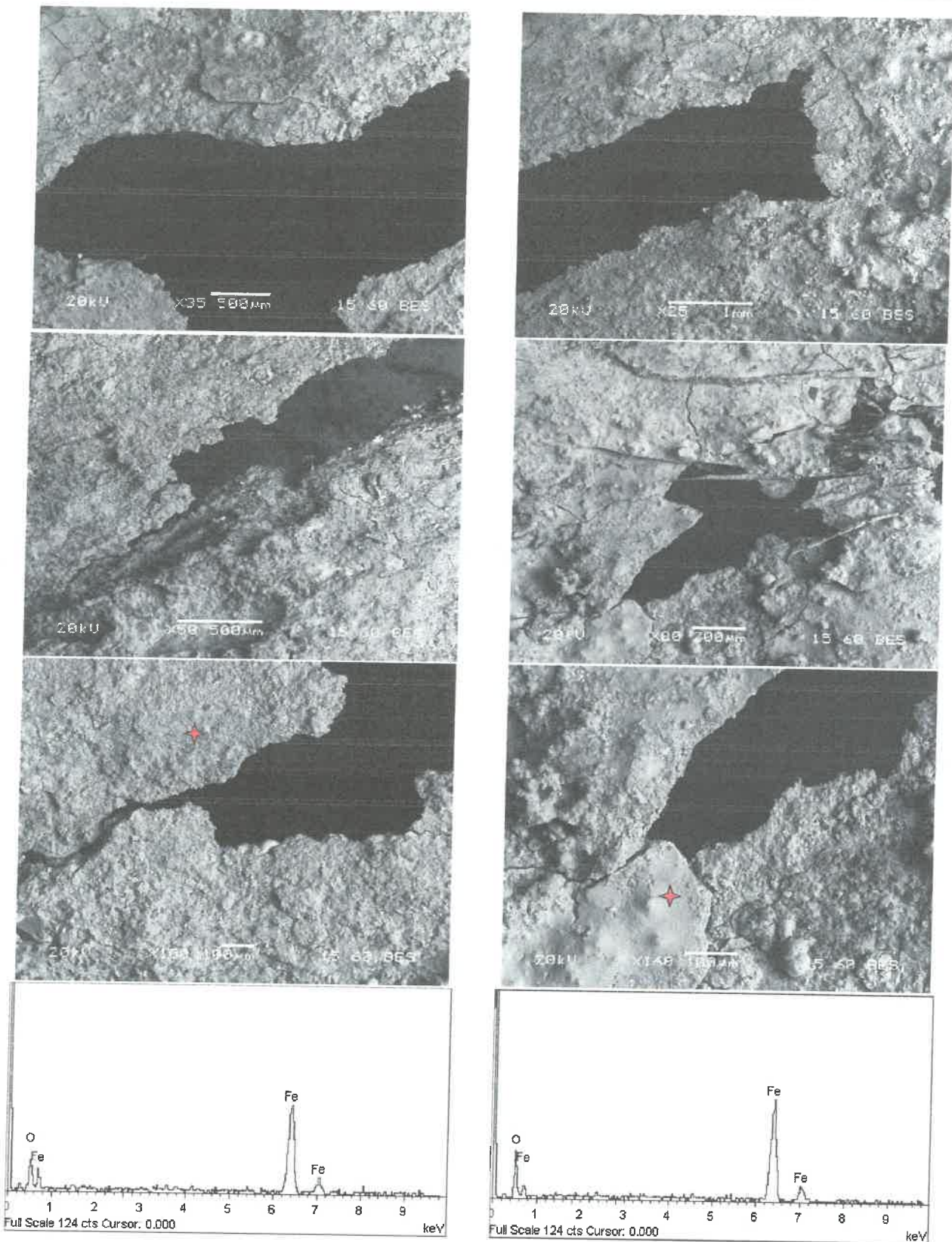
Οι μικρογραφίες SEM των ίδιων περιοχών (**Εικόνες 20 και 21**) αποκαλύπτουν την πραγματική γεωμετρία των κοιλοτήτων, με έντονη τραχύτητα, πορώδη στρώματα προϊόντων διάβρωσης και διαφοροποίηση μεταξύ πυρήνα της κοιλότητας και περιφερειακής ζώνης. Σε αρκετές περιπτώσεις διακρίνεται πολυστρωματική ανάπτυξη οξειδίων, ένδειξη διαδοχικών σταδίων οξείδωσης-αναγωγής. Οι στοιχειακές αναλύσεις EDS καταγράφουν αυξημένη παρουσία Fe και O, επιβεβαιώνοντας ότι τα προϊόντα διάβρωσης αποτελούνται κυρίως από οξείδια και υδροξείδια του σιδήρου. Παράλληλα, σε ορισμένα σημεία ανιχνεύονται ιχνοστοιχεία που σχετίζονται με το περιβάλλον του εδάφους, γεγονός που υποδηλώνει διείσδυση εδαφικών συστατικών εντός των κοιλοτήτων και ενεργό αλληλεπίδραση μετάλλου-εδάφους.

Τα συγκριτικά ακτινοδιαγράμματα XRD των προϊόντων διάβρωσης (**Εικόνα 22**), τα οποία ελήφθησαν μετά από απόξεση από τις περιοχές διάτρησης, επιβεβαιώνουν την παρουσία πολλαπλών φάσεων οξειδίων και υδροξειδίων του σιδήρου. Αναγνωρίζονται μαγνητίτης (Fe_3O_4), λεπιδόχροκιτης και γκαιτίτης ($\text{FeO}(\text{OH})$), αιματίτης (Fe_2O_3) καθώς και βουσίτης (FeO). Η συνύπαρξη αυτών των φάσεων υποδηλώνει εναλλασσόμενες συνθήκες οξείδωσης και διαφοροποιημένη διαθεσιμότητα οξυγόνου στο μικροπεριβάλλον των κοιλοτήτων. Ειδικότερα, η παρουσία μαγνητίτη και βουσίτη σχετίζεται με συνθήκες περιορισμένου αερισμού στο εσωτερικό του pit, ενώ οι φάσεις αιματίτη, λεπιδόχροκιτη και γκαιτίτη σχηματίζονται σε περισσότερο οξειδωτικό περιβάλλον στην εξωτερική επιφάνεια.

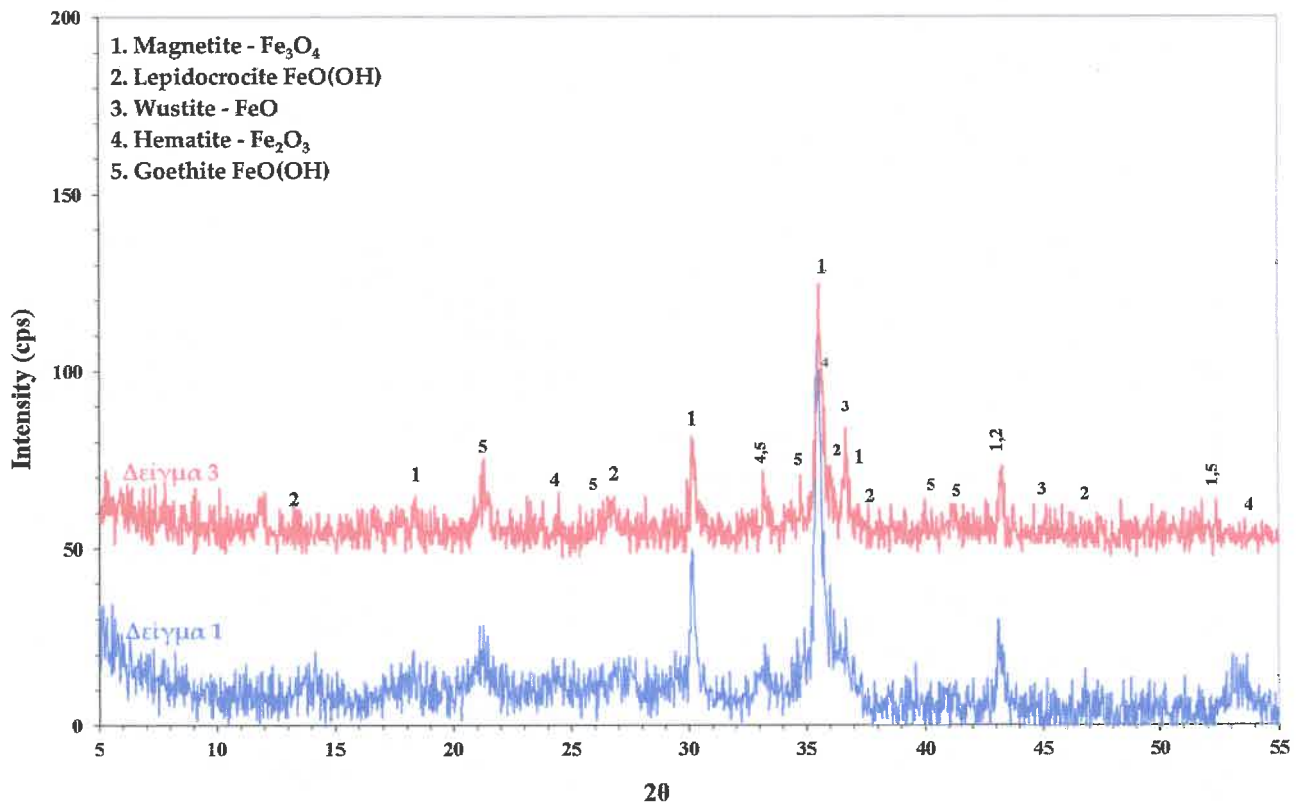
Ο αναπτυσσόμενος μηχανισμός pitting στην παρούσα περίπτωση μπορεί να ερμηνευθεί ως εξής: η απουσία αντιδιαβρωτικής επικάλυψης και η άμεση επαφή του χάλυβα με υγρό, αργιλικό έδαφος οδήγησαν στη δημιουργία τοπικών ηλεκτροχημικών στοιχείων.



Εικόνα 20: Μικρογραφίες SEM και στοιχειακές αναλύσεις EDS "Δείγματος 1" - Περιοχή Διάτρησης



Εικόνα 21: Μικρογραφίες SEM και στοιχειακές αναλύσεις EDS "Δείγματος 3"- Περιοχή Διάτρησης



Εικόνα 22: Συγκριτικά ακτινοδιαγράμματα XRD προϊόντων διάβρωσης στην περιοχή της διάτρησης

Μικροανομοιογένειες της επιφάνειας ή περιοχές διαφοροποιημένου αερισμού λειτούργησαν ως αρχικά ανοδικά σημεία. Με την έναρξη της τοπικής διάλυσης του μετάλλου ($\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$) το εσωτερικό της κοιλότητας έγινε προοδευτικά περισσότερο όξινο λόγω υδρόλυσης των ιόντων Fe^{2+} , ενώ ταυτόχρονα η περιορισμένη ανανέωση οξυγόνου στο εσωτερικό δημιούργησε διαφορά δυναμικού μεταξύ πυθμένα και επιφάνειας.

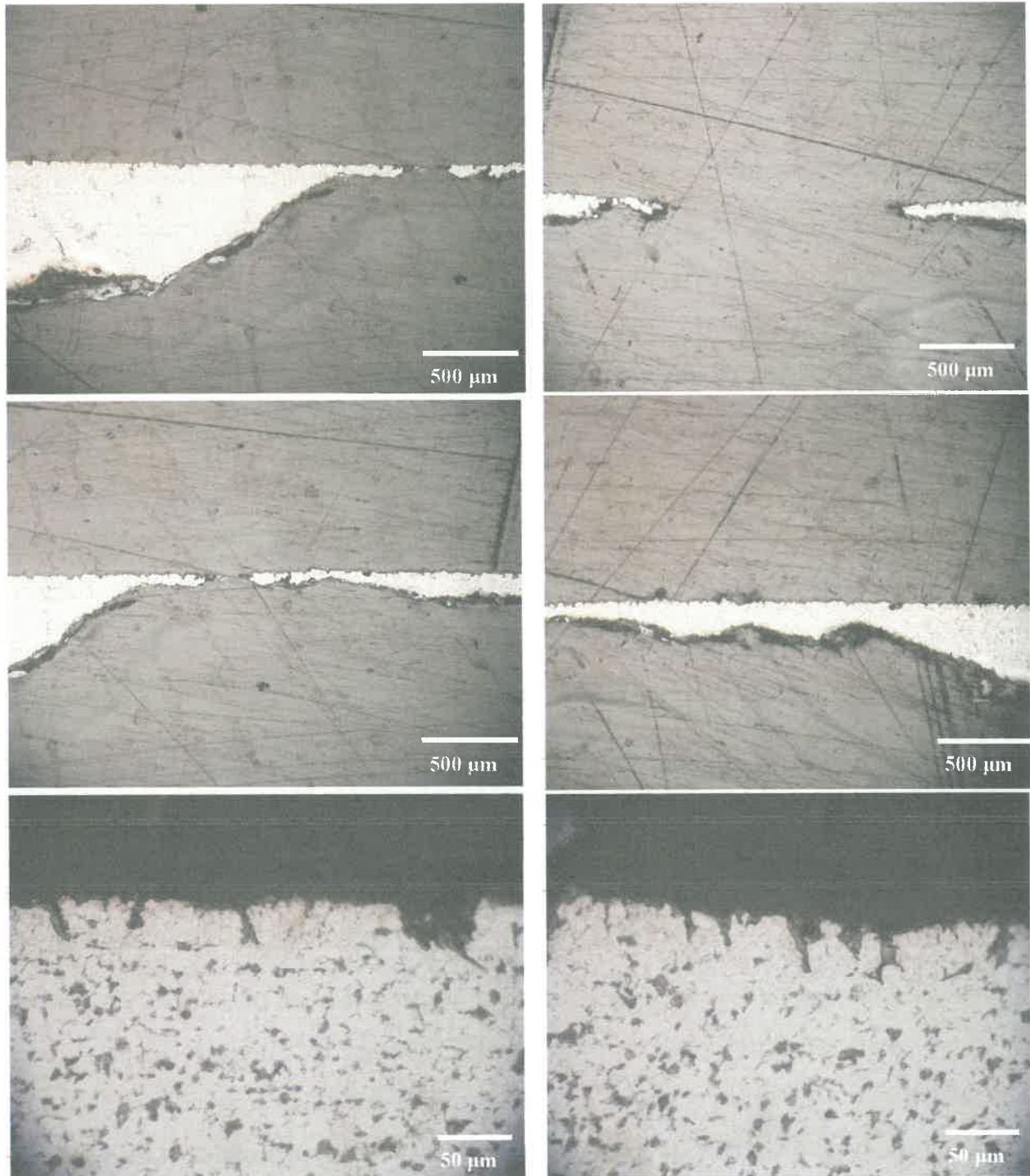
Το φαινόμενο αυτό αυτοενισχύεται, καθώς η αύξηση της τοπικής οξύτητας και η συσσώρευση ιόντων επιταχύνουν τη διάλυση του μετάλλου στο βάθος της κοιλότητας. Τα προϊόντα διάβρωσης που σχηματίζονται περιμετρικά δεν παρέχουν προστατευτικό φράγμα, αλλά λειτουργούν ως πορώδη φράγματα και επιτρέπουν τη συνέχιση της ηλεκτροχημικής διεργασίας.



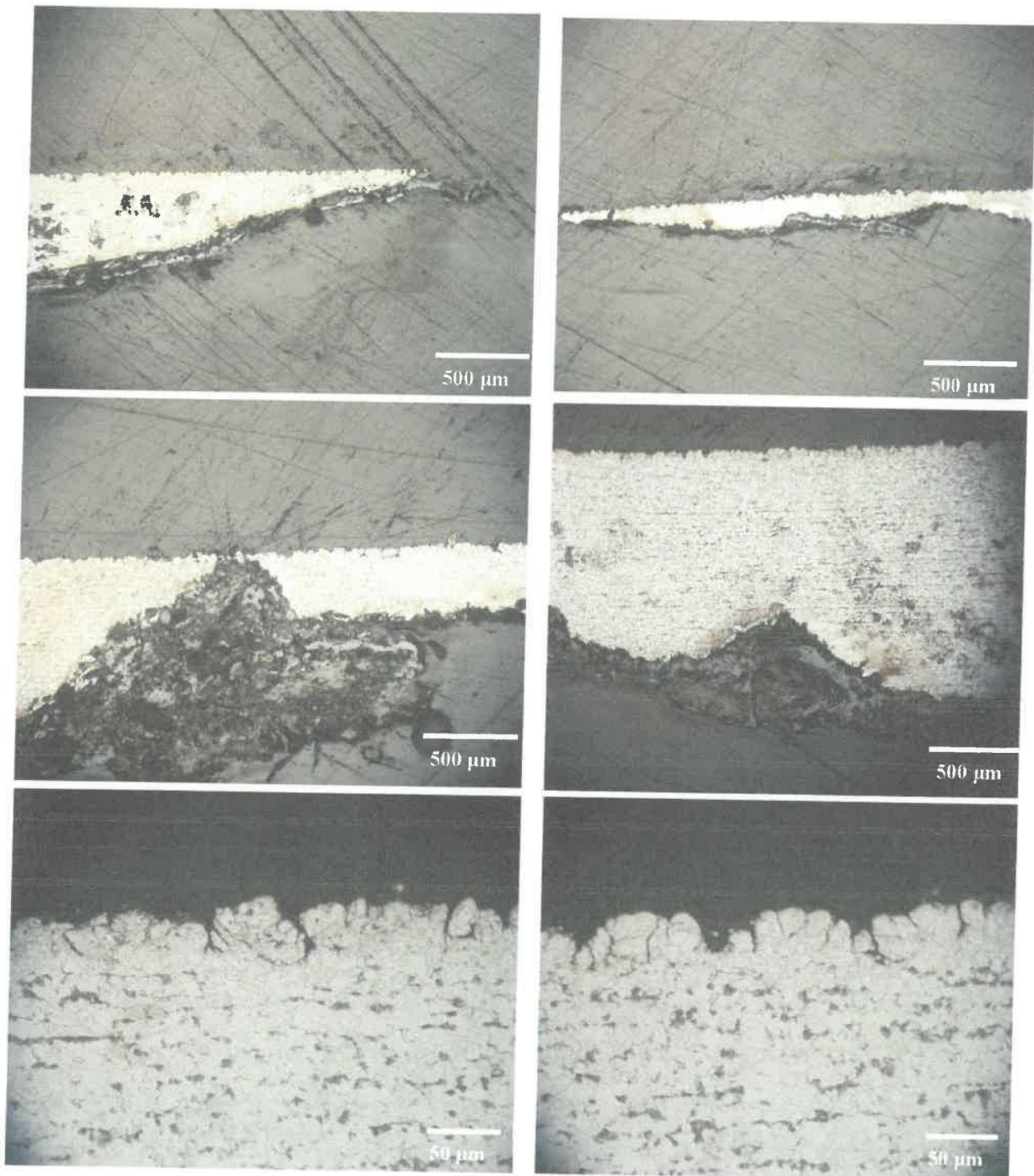
Η προοδευτική κατακόρυφη ανάπτυξη των κοιλοτήτων, όπως τεκμηριώνεται από τις μικρογραφίες, οδήγησε τελικά σε πλήρη διαμπερή αστοχία του τοιχώματος. Συνεπώς, ο συνδυασμός μικρομορφολογικών παρατηρήσεων (στερεοσκόπιο και SEM), στοιχειακής σύστασης (EDS) και ανάλυσης φάσεων (XRD) επιβεβαιώνει με συνέπεια ότι η αστοχία της υπόγειας σωλήνωσης οφείλεται σε έντονη τοπική ηλεκτροχημική διάβρωση τύπου pitting, αναπτυσσόμενη σε περιβάλλον άμεσης επαφής με υγρό, οξυγονούχο και ιοντικά αγωγίμο έδαφος, χωρίς αντιδιαβρωτική προστασία και χωρίς προστατευτικό εγκιβωτισμό.

Οι μικρογραφίες οπτικού μικροσκοπίου των Δειγμάτων 1 και 3 σε τομή (Εικόνες 23 και 24) αποτυπώνουν με σαφήνεια τη γεωμετρία και το βάθος των τοπικών κοιλοτήτων διάβρωσης. Στις περιοχές όπου έχει ήδη συμβεί διάτρηση, παρατηρείται έντονη κατακόρυφη ανάπτυξη της προσβολής με στενό στόμιο και διευρυνόμενη υποεπιφανειακή υποσκαφή, χαρακτηριστική μορφολογία pitting corrosion. Τα τοιχώματα των κοιλοτήτων εμφανίζουν ανώμαλη μορφολογία και διαδοχικά επίπεδα διάλυσης, ενώ σε αρκετές περιπτώσεις διακρίνεται εγκλωβισμένο στρώμα προϊόντων διάβρωσης εντός της κοιλότητας. Η μεταλλική μήτρα περιμετρικά των pits δεν παρουσιάζει γενικευμένη απώλεια πάχους, γεγονός που επιβεβαιώνει τον εντοπισμένο χαρακτήρα του μηχανισμού.

Ιδιαίτερη σημασία έχει το γεγονός ότι ακόμη και σε περιοχές όπου δεν έχει επέλθει πλήρης διαμπερή αστοχία, παρατηρούνται πολλαπλές μικροκοιλότητες στην επιφάνεια του μετάλλου, οι οποίες αποτελούν αρχικά στάδια ανάπτυξης pitting. Σε υψηλότερες μεγεθύνσεις διακρίνονται επιφανειακές εσοχές μικρής διαμέτρου που διεισδύουν προοδευτικά στο πάχος του τοιχώματος.



Εικόνα 23: Μικρογραφίες οπτικού μικροσκοπίου “Δείγματος 1” σε τομή – Περιοχή διάτρησης



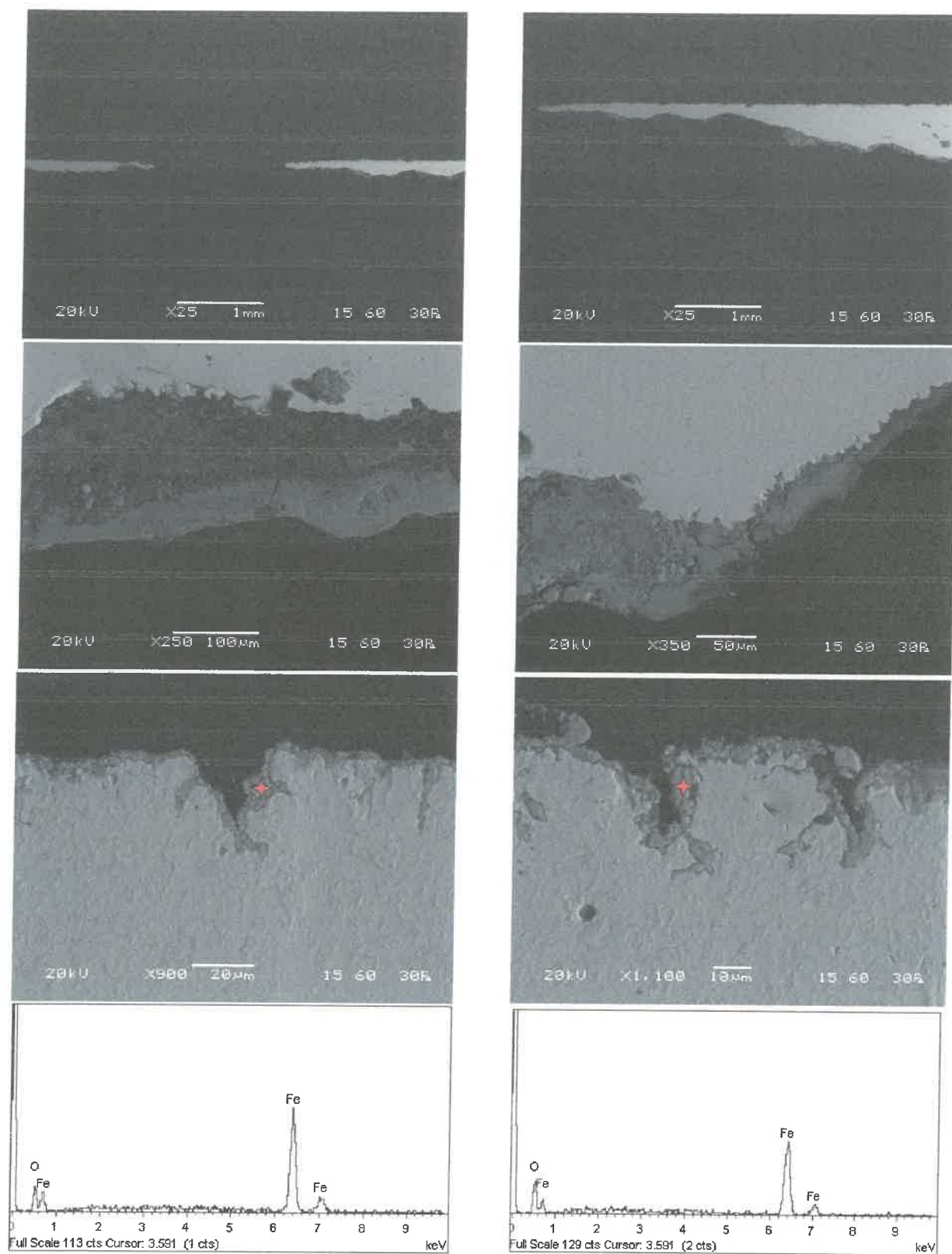
Εικόνα 24: Μικρογραφίες οπτικού μικροσκοπίου “Δείγματος 3” σε τομή – Περιοχή διάτρησης



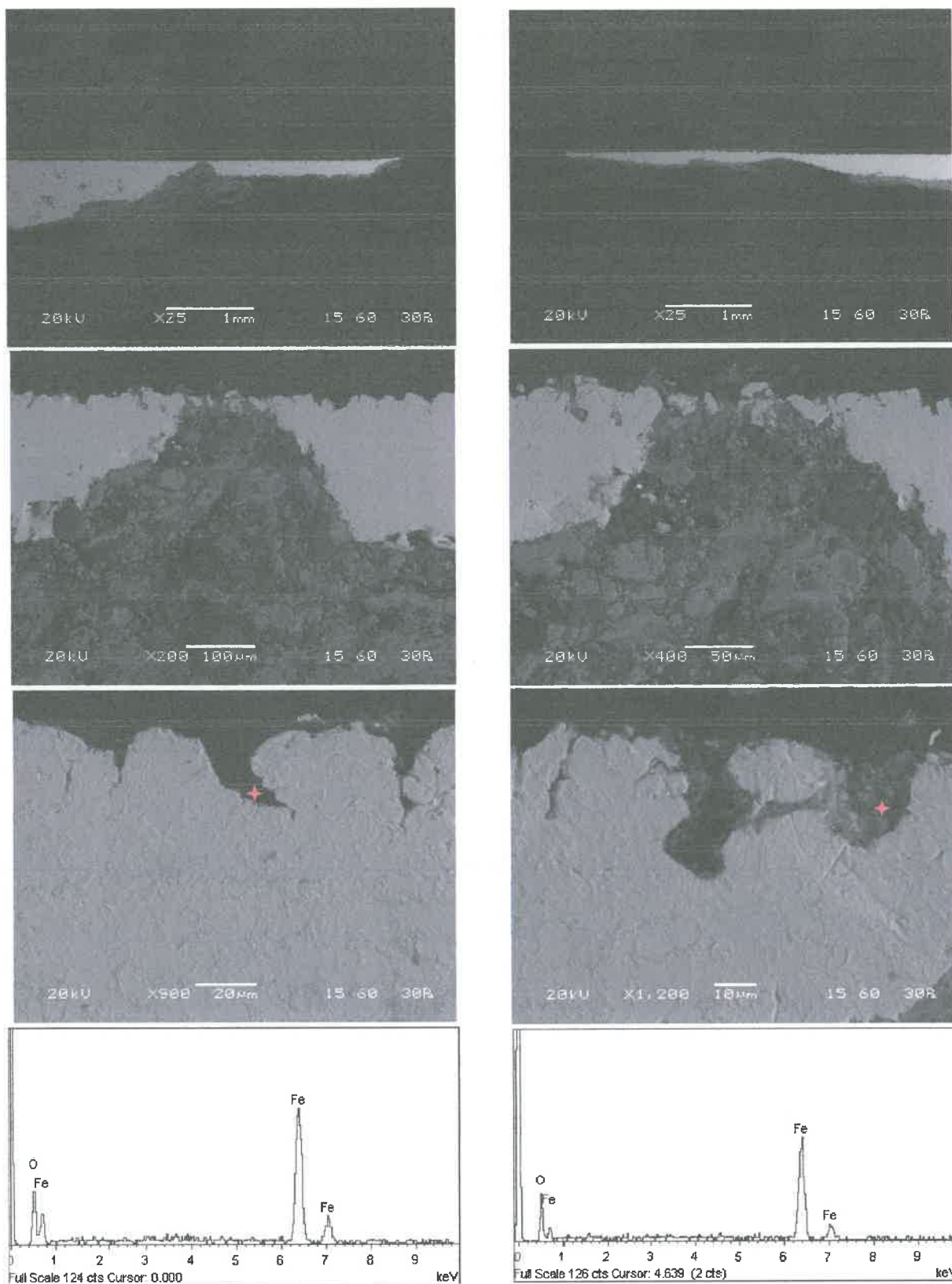
Η παρουσία αυτών των “ενεργών” σημείων υποδηλώνει ότι η διαδικασία διάβρωσης δεν ήταν μεμονωμένη αλλά εκτεταμένη σε σημαντικό τμήμα της υπόγειας σωλήνωσης, με πολλαπλά ταυτόχρονα ανοδικά σημεία. Τέλος, οι μικρογραφίες SEM σε τομή (Εικόνες 25 και 26) επιβεβαιώνουν τη μορφολογία των κοιλοτήτων σε υψηλότερη ανάλυση. Παρατηρείται σαφής διαχωρισμός μεταξύ του υγιούς φερριτοπερλιτικού υποστρώματος και της ζώνης διάβρωσης, με τραχεία, πορώδη στρώση προϊόντων οξείδωσης που επενδύει τα τοιχώματα των pits. Οι αναλύσεις EDS στις περιοχές αυτές καταγράφουν υψηλή περιεκτικότητα σε Fe και O, επιβεβαιώνοντας ότι πρόκειται για οξείδια και υδροξείδια του σιδήρου, ενώ σε ορισμένα σημεία ανιχνεύονται στοιχεία προερχόμενα από το περιβάλλον του εδάφους, στοιχείο που ενισχύει την ερμηνεία της άμεσης αλληλεπίδρασης μετάλλου-εδάφους.

Ο μηχανισμός που αποτυπώνεται στις τομές είναι χαρακτηριστικός αυτοκαταλυόμενου pitting. Η έναρξη γίνεται σε μικροανομοιογένειες της επιφάνειας ή σε σημεία διαφοροποιημένου αερισμού. Η τοπική ανοδική διάλυση του σιδήρου δημιουργεί ιόντα Fe^{2+} , τα οποία υδρολύονται, οδηγώντας σε τοπική πτώση του pH εντός της κοιλότητας. Η περιορισμένη διάχυση οξυγόνου στο εσωτερικό του pit σε σχέση με την εξωτερική επιφάνεια δημιουργεί διαφορά δυναμικού (cell διαφοροποιημένου αερισμού), με αποτέλεσμα ο πυθμένας της κοιλότητας να παραμένει ανοδικός και να επιταχύνεται η διάλυση.

Τα προϊόντα διάβρωσης που σχηματίζονται στα τοιχώματα είναι πορώδη και δεν λειτουργούν προστατευτικά, επιτρέποντας τη συνέχιση της προσβολής σε βάθος. Η παρατήρηση ότι σε μη διαμπερείς περιοχές έχουν ήδη αναπτυχθεί πολλαπλά αρχικά pits υποδηλώνει ότι, εάν η σωλήνωση παρέμενε σε λειτουργία υπό τις ίδιες συνθήκες (απουσία επικάλυψης, απευθείας επαφή με αγώγιμο, υγρό έδαφος), η εξέλιξη προς νέες διατρήσεις θα ήταν θέμα χρόνου.



Εικόνα 25: Μικρογραφίες SEM και στοιχειακές αναλύσεις EDS “Δείγματος 1” σε τομή – Περιοχή Διάτρησης



Εικόνα 26: Μικρογραφίες SEM και στοιχειακές αναλύσεις EDS “Δείγματος 3” σε τομή – Περιοχή Διάτρησης



4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σύμφωνα με το υπ' αριθμ. 317 Φ.706. 12/04-02-2026 έγγραφο της Δ.Α.Ε.Ε., στα πλαίσια διεξαγωγής της προανάκρισης για την πυρκαγιά που έλαβε χώρα την 26/01/2026 στο εργοστάσιο της «ΒΙΟΛΑΝΤΑ Α.Ε.», 6ο χλμ. Ε.Ο. Τρικάλων-Καρδίτσας, Τ.Κ. Αγίας Κυριακής, Δήμου Τρικκαίων, Π.Ε. Τρικάλων, ορίστηκε η διενέργεια “Πραγματογνωμοσύνης”, βασικό αντικείμενο της οποίας ήταν ο πλήρης χημικός και μεταλλογραφικός χαρακτηρισμός σε μεταλλικά τεμάχια από τμήμα υπόγειας σωλήνωσης μεταφοράς αερίου καυσίμου, η οποία συνέδεε δύο (2) υπέργειες δεξαμενές (χωρητικότητας 5.000 lt και 9.000 lt) που βρίσκονται στον αύλειο χώρο του εργοστασίου «ΒΙΟΛΑΝΤΑ Α.Ε.», όπως επίσης και η ανίχνευση του αναπτυσσόμενου μηχανισμού διάβρωσης, ο οποίος οδήγησε σε εκτεταμένα φαινόμενα υποβάθμισης-φθοράς και, τελικά, διάτρησης της σωλήνωσης.

Για τον σκοπό αυτό αποφασίστηκε και πραγματοποιήθηκε δειγματοληψία τεσσάρων (4) δειγμάτων. Συγκεκριμένα, δύο (2) δείγματα προήλθαν από την περιοχή των διατρήσεων (“Δείγμα 1” και “Δείγμα 3”), όπου είχε διαπιστωθεί ενεργός διαρροή, προκειμένου να διερευνηθεί η μικροδομή, ο μηχανισμός και η μορφολογία της διάβρωσης, καθώς και τυχόν τοπικές μεταλλουργικές ανομοιογένειες. Ένα (1) δείγμα ελήφθη από υπέργειο και μακροσκοπικά υγιές τμήμα της σωλήνωσης (“Δείγμα 7”), ώστε να χρησιμοποιηθεί ως δείγμα αναφοράς για τη σύγκριση της χημικής σύστασης, της μικροδομής και του πάχους τοιχώματος. Τέλος, ένα (1) δείγμα λήφθηκε από την περιοχή βιδωτής σύνδεσης των σωλήνων (“Δείγμα 2”), με σκοπό να αξιολογηθεί η πιθανή επίδραση της γεωμετρικής ασυνέχειας, των τοπικών τάσεων ή της διαφοροποίησης των συνθηκών διάβρωσης στην περιοχή της ένωσης. Με τον τρόπο αυτό διασφαλίστηκε η ολοκληρωμένη και τεκμηριωμένη προσέγγιση ως προς τη διερεύνηση των αιτίων της αστοχίας.



Από τη συνεκτίμηση όλων των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τους εργαστηριακούς ελέγχους, εξήχθησαν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- **Τύπος Χάλυβα:** Από το σύνολο των χημικών και μεταλλογραφικών αναλύσεων προκύπτει ότι η υπό εξέταση σωλήνωση είναι κατασκευασμένη από κοινό ανθρακούχο χάλυβα χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα (~0.13 % C), με τυπική φερριτοπερλιτική μικροδομή (85% φερρίτη, 15% περλίτη), ισοαξονικούς και μη πεπλατυσμένους κόκκους, χαρακτηριστικούς θερμής διαμόρφωσης (θερμή έλαση) και φυσιολογικής ψύξης. Οι τιμές σκληρότητας Vickers (~145–155 HV) είναι απολύτως συμβατές με χάλυβα χαμηλού ποσοστού άνθρακα χωρίς ενδείξεις θερμικής σκλήρυνσης ή μεταλλουργικής αλλοίωσης. Η ανάλυση περιθλασης ακτίνων Χ (XRD) επιβεβαιώνει την παρουσία αποκλειστικά φάσης α -Fe (BCC), χωρίς δευτερογενείς φάσεις ή προϊόντα μετασχηματισμού. Τα διαστασιολογικά χαρακτηριστικά (OD: 33.6 mm, πάχος: 2.83 mm) αντιστοιχούν σε σωλήνα NPS 3/4" (DN20), Schedule 40, ενώ η χημική σύσταση και η μικροδομή είναι συμβατές με ποιότητες σωλήνων κατά ASTM A53 ή ASTM A106, οι οποίες χρησιμοποιούνται ευρέως σε δίκτυα μεταφοράς ρευστών και αερίων καυσίμων χαμηλής και μέσης πίεσης. Λαμβάνοντας υπόψη την πίεση λειτουργίας του δικτύου (1.5 bar), η οποία είναι ιδιαίτερα χαμηλή σε σχέση με την αντοχή σωλήνα Schedule 40, καθώς και τις απαιτήσεις των κανονισμών εγκατάστασης αερίων καυσίμων όπως το EN 15001-1, προκύπτει ότι το υλικό κατασκευής της σωλήνωσης ήταν από τεχνικής άποψης κατάλληλο και συμβατό με τις απαιτήσεις μηχανικής αντοχής και λειτουργίας του συστήματος. Συνεπώς, η αστοχία που παρατηρήθηκε δεν αποδίδεται σε ακαταλληλότητα ή μεταλλουργική ανεπάρκεια του χάλυβα, αλλά σε εξωγενείς παράγοντες που σχετίζονται με τις συνθήκες εγκατάστασης και αντιδιαβρωτικής προστασίας του υπόγειου τμήματος.



- **Γήρανση Επικάλυψης Υπέργειου Τμήματος:** Η μικροσκοπική και μακροσκοπική εξέταση της οργανικής επικάλυψης του υπέργειου τμήματος κατέδειξε ότι, παρότι το μεταλλικό υπόστρωμα παραμένει σε καλή κατάσταση, το σύστημα βαφής εμφανίζει σαφή σημάδια υποβάθμισης. Συγκεκριμένα, διαπιστώθηκαν εκτεταμένες ρηγματώσεις της επιφανειακής στρώσης, τοπικές αποκολλήσεις και μείωση της πρόσφυσης μεταξύ επικάλυψης και χάλυβα. Από τη μεταλλογραφική τομή προέκυψε ότι η επικάλυψη είναι διπλοστρωματική, συνολικού πάχους περίπου 240 μm, τιμή θεωρητικά επαρκής για αντιδιαβρωτική προστασία, υπό την προϋπόθεση ότι διατηρείται η συνοχή και η στεγανότητά της. Η παρουσία ρωγμών και απολεπίσεων υποδηλώνει γήρανση του οργανικού υλικού, πιθανή απώλεια ελαστικότητας και ανάπτυξη εσωτερικών τάσεων λόγω θερμοκρασιακών μεταβολών, υπεριώδους ακτινοβολίας και περιβαλλοντικής έκθεσης. Οιασυνέχειες αυτές λειτουργούν ως δυνητικά σημεία εισόδου υγρασίας και οξυγόνου, επιτρέποντας την έναρξη υποφιλμικής διάβρωσης (underfilm corrosion), ακόμη και όταν η επιφάνεια του μετάλλου δεν εμφανίζει άμεσα ορατή προσβολή. Συνεπώς, παρότι στο εξεταζόμενο υπέργειο δείγμα δεν παρατηρήθηκε ενεργός διάβρωση του χάλυβα, η κατάσταση της επικάλυψης υποδεικνύει σημαντική μείωση της προστατευτικής της ικανότητας, καθώς βρίσκεται σε στάδιο λειτουργικής υποβάθμισης.
- **Τύπος Υπόγειων Συνδέσεων:** Η εργαστηριακή διερεύνηση του “Δείγματος 2” από την περιοχή της βιδωτής σύνδεσης κατέδειξε σαφή ανάπτυξη προϊόντων διάβρωσης στην εξωτερική επιφάνεια, με μορφολογία που παραπέμπει σε τοπική και σχισμοειδή (stevise) διάβρωση. Παρότι στο συγκεκριμένο σημείο δεν παρατηρήθηκε διαμπερής διάτρηση, η παρουσία εκτεταμένων οξειδίων και η έντονη προσβολή συγκριτικά και με γειτονικές περιοχές καταδεικνύουν ότι η κοχλιωτή σύνδεση (μούφα) λειτουργεί ως ζώνη αυξημένης διαβρωτικής



ευαισθησίας. Η γεωμετρία των σπειρωμάτων δημιουργεί μικροκενά και περιοχές διαφοροποιημένου αερισμού, εντός των οποίων αναπτύσσονται τοπικά ηλεκτροχημικά στοιχεία. Σε υπόγειο, υγρό και ιοντικά αγωγίμο περιβάλλον, οι συνθήκες αυτές ευνοούν την επιτάχυνση της τοπικής ανοδικής διάλυσης του χάλυβα, ακόμη και εάν η γενική διάβρωση του σωλήνα είναι περιορισμένη. Τα ευρήματα αυτά συνάδουν με τη διεθνή τεχνική εμπειρία και με τις απαιτήσεις κανονισμών εγκατάστασης δικτύων αερίων καυσίμων, όπως το EN 15001-1 (στην Ελλάδα ΕΛΟΤ 15001-1) και το ASME B31.8, τα οποία περιορίζουν ουσιωδώς ή δεν επιτρέπουν τη χρήση κοχλιωτών συνδέσεων σε υπόγεια τμήματα δικτύων αερίου. Η φιλοσοφία των προτύπων αυτών βασίζεται στην ανάγκη εξάλειψης σχισμών, μικροκενών και ασυνεχειών που ενδέχεται να λειτουργήσουν ως εστίες διάβρωσης ή διαρροής. Οι συγκολλητές ενώσεις, αντιθέτως, παρέχουν συνεχή μεταλλική διατομή, καλύτερη κατανομή τάσεων και ευκολότερη εφαρμογή ομοιόμορφης αντιδιαβρωτικής προστασίας. Συνεπώς, η επιλογή κοχλιωτής σύνδεσης στο εξεταζόμενο υπόγειο τμήμα συνιστά κατασκευαστική πρακτική αυξημένου κινδύνου, η οποία, σε συνδυασμό με την απουσία εξωτερικής αντιδιαβρωτικής προστασίας και προστατευτικής επίχωσης, συνέβαλε καθοριστικά στη δημιουργία συνθηκών τοπικής διάβρωσης. Αν και δεν αποτέλεσε στο συγκεκριμένο σημείο άμεση αιτία διάτρησης, η κοχλιωτή σύνδεση τεκμηριώνεται ως δυνητικό σημείο αστοχίας και ως απόκλιση από τις βέλτιστες πρακτικές και τις κανονιστικές απαιτήσεις για υπόγειες εγκαταστάσεις αερίων καυσίμων.

- **Απουσία Αντιδιαβρωτικής Προστασίας:** Η εργαστηριακή διερεύνηση των διατρήσεων, σε συνδυασμό με τα ευρήματα από την εκσκαφή, τεκμηριώνει ότι η υπόγεια σωλήνωση ήταν τοποθετημένη σε άμεση επαφή με το φυσικό έδαφος, χωρίς καμία εξωτερική αντιδιαβρωτική επικάλυψη (π.χ. εποξειδική βαφή, επικάλυψη PE τριών στρωμάτων, περιέλιξη με αντιδιαβρωτική ταινία ή ασφαλτική



προστασία). Η απουσία προστατευτικού φράγματος είχε ως αποτέλεσμα την άμεση ηλεκτροχημική αλληλεπίδραση μεταξύ του χάλυβα και του εδαφικού περιβάλλοντος, το οποίο, όπως προέκυψε από τις αναλύσεις XRD των δειγμάτων γεώδους υλικού, περιέχει αργιλικά ορυκτά και οξειδία σιδήρου, με ικανότητα συγκράτησης υγρασίας και αυξημένη ιοντική αγωγιμότητα. Οι συνθήκες αυτές είναι ιδιαίτερα ευνοϊκές για την ανάπτυξη τοπικών στοιχείων διάβρωσης και μηχανισμού pitting, όπως επιβεβαιώθηκε μεταλλογραφικά. Σύμφωνα με τις απαιτήσεις των κανονισμών εγκατάστασης δικτύων αερίων καυσίμων, όπως το EN 15001-1 (ΕΛΟΤ 15001-1) και το EN 12007, οι χαλύβδινοι αγωγοί που τοποθετούνται υπόγεια οφείλουν να διαθέτουν κατάλληλη αντιδιαβρωτική επικάλυψη και, όπου απαιτείται από την κατηγορία του έργου και τις εδαφικές συνθήκες, σύστημα καθοδικής προστασίας. Η φιλοσοφία των προτύπων αυτών βασίζεται στη συνδυαστική εφαρμογή παθητικής προστασίας (επίστρωση) και ενεργητικής προστασίας (καθοδική προστασία), ώστε να ελαχιστοποιείται το ρεύμα διάβρωσης και να αποτρέπεται η τοπική διάλυση του μετάλλου ακόμη και σε περίπτωση αστοχίας της επικάλυψης. Στην υπό εξέταση περίπτωση, πέραν της απουσίας επικάλυψης, δεν διαπιστώθηκε η ύπαρξη συστήματος καθοδικής προστασίας (π.χ. θυσιαζόμενα ανόδια ή επιβαλλόμενο ρεύμα), το οποίο θα μπορούσε να αντισταθμίσει ηλεκτροχημικά την ανοδική συμπεριφορά του χάλυβα (διάβρωση) στο εδαφικό περιβάλλον. Η έλλειψη τόσο παθητικής όσο και ενεργητικής προστασίας άφησε τον αγωγό πλήρως εκτεθειμένο στη φυσική διαβρωτική δράση του εδάφους, οδηγώντας στην ανάπτυξη εκτεταμένου pitting και τελικά σε διαμπερείς αστοχίες. Συνεπώς, η απουσία αντιδιαβρωτικής επικάλυψης και καθοδικής προστασίας συνιστά ουσιώδη απόκλιση από τις κανονιστικές απαιτήσεις και τις βέλτιστες τεχνικές πρακτικές για υπόγειους αγωγούς αερίων καυσίμων και αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για τον αναπτυσσόμενο μηχανισμό διάβρωσης και την πρόωρη αστοχία της σωλήνωσης.



- **Απουσία Προστατευτικού Στρώματος Άμμου:** Η αυτοψία και τα εργαστηριακά ευρήματα κατέδειξαν ότι η υπόγεια σωλήνωση δεν ήταν εγκιβωτισμένη σε στρώση καθαρής άμμου αλλά είχε τοποθετηθεί απευθείας εντός του φυσικού εδάφους. Τα δείγματα γεώδους υλικού που ελήφθησαν από την επιφάνεια επαφής με τον σωλήνα επιβεβαιώνουν ορυκτολογική σύσταση τυπική φυσικού εδάφους με παρουσία χαλαζία, αργιλικών φάσεων και οξειδίων σιδήρου, υλικά τα οποία συγκρατούν υγρασία και παρουσιάζουν αυξημένη ιοντική αγωγιμότητα. Η άμεση επαφή του χαλύβδινου αγωγού με τέτοιο έδαφος ευνοεί τη δημιουργία τοπικών ηλεκτροχημικών στοιχείων, διαφοροποιημένου αερισμού και τελικά, εντοπισμένης διάβρωσης τύπου pitting, όπως τεκμηριώθηκε μεταλλογραφικά. Σύμφωνα με τις απαιτήσεις των κανονισμών εγκατάστασης υπόγειων αγωγών αερίων καυσίμων, όπως το EN 15001-1 και το EN 12007, προβλέπεται ότι οι σωληνώσεις πρέπει να τοποθετούνται εντός στρώσης επιλεγμένου υλικού επίχωσης, συνήθως καθαρής άμμου, απαλλαγμένης από λίθους, αργιλικά συστατικά και αιχμηρά αντικείμενα. Η άμμος εξασφαλίζει ομοιόμορφη μηχανική στήριξη, αποτρέπει σημειακές καταπονήσεις και, κυρίως, λειτουργεί ως ουδέτερο και αποστραγγιστικό μέσο, μειώνοντας την παραμονή υγρασίας και την άμεση επαφή του μετάλλου με επιθετικά εδαφικά συστατικά. Η απουσία τέτοιας προστατευτικής στρώσης στην εξεταζόμενη εγκατάσταση συνιστά ουσιώδη απόκλιση από τις κανονιστικές απαιτήσεις και τις βέλτιστες τεχνικές πρακτικές. Σε συνδυασμό με την έλλειψη εξωτερικής αντιδιαβρωτικής επικάλυψης και καθοδικής προστασίας, η απευθείας έδραση του σωλήνα σε φυσικό, αγωγίμο και υγρό έδαφος συνέβαλε καθοριστικά στη δημιουργία συνθηκών έντονης τοπικής διάβρωσης και στην πρόωρη διαμπερή αστοχία της σωλήνωσης.



- **Διατρήσεις – Μηχανισμός Διάβρωσης:** Οι ανιχνευόμενες διατρήσεις που παρατηρήθηκαν στα Δείγματα 1 και 3 τεκμηριώνονται πειραματικά ως αποτέλεσμα έντονης τοπικής ηλεκτροχημικής διάβρωσης με βελονισμούς (pitting corrosion). Οι μακροσκοπικές παρατηρήσεις, οι μικρογραφίες στερεοσκοπίου, οι μεταλλογραφικές τομές, οι αναλύσεις SEM/EDS και τα ακτινοδιαγράμματα XRD των προϊόντων διάβρωσης συγκλίνουν σε ένα κυρίαρχο μηχανισμό αστοχίας. Η μορφολογία των κοιλοτήτων με στενό στόμιο και σημαντική υποεπιφανειακή διείδυση, η παρουσία πορωδών οξειδίων και υδροξειδίων του σιδήρου (μαγνητίτης, αιματίτης, γκαιτίτης, λεπιδόκροικιτης), καθώς και η διαπίστωση πολλαπλών αρχόμενων κοιλοτήτων (pits) ακόμη και σε μη διαμπερείς περιοχές, επιβεβαιώνουν αυτοενισχυόμενο μηχανισμό τοπικής ανοδικής διάλυσης. Ο αναπτυσσόμενος μηχανισμός ερμηνεύεται ως εξής: η άμεση επαφή του κοινού ανθρακούχου χάλυβα με το ιοντικά αγωγίμο έδαφος, παρουσία υγρασία, οδήγησε στη δημιουργία τοπικών στοιχείων διαφοροποιημένου αερισμού. Σε μικροανομοιογένειες της επιφάνειας ενεργοποιήθηκαν ανοδικές περιοχές, όπου ο σίδηρος διαλύθηκε ($\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$). Η υδρόλυση των ιόντων Fe^{2+} εντός των κοιλοτήτων προκάλεσε τοπική μείωση του pH, ενώ η περιορισμένη ανανέωση οξυγόνου στο εσωτερικό της κοιλότητας ενίσχυσε τη διαφορά δυναμικού μεταξύ πυθμένα και περιφέρειας. Η διεργασία κατέστη αυτοκαταλυόμενη, επιταχύνοντας τη διείδυση της διάβρωσης σε βάθος έως ότου επήλθε πλήρης διάτρηση του τοιχώματος. Καθοριστικό ρόλο στην εξέλιξη της αστοχίας διαδραμάτισε ο συνδυασμός κατασκευαστικών και κανονιστικών ελλείψεων: η απουσία εξωτερικής αντιδιαβρωτικής επικάλυψης, η έλλειψη συστήματος καθοδικής προστασίας και η μη ύπαρξη προστατευτικού εγκιβωτισμού σε καθαρή άμμο στο υπόγειο τμήμα. Οι παράγοντες αυτοί λειτούργησαν συνεργιστικά, επιτρέποντας την απευθείας ηλεκτροχημική αλληλεπίδραση μετάλλου-εδάφους και την ανεμπόδιστη ανάπτυξη τοπικών στοιχείων διάβρωσης. Συνεπώς, οι διατρήσεις δεν αποδίδονται σε ακαταλληλότητα



του υλικού, το οποίο αποδείχθηκε μεταλλουργικά συμβατό με τη χρήση, αλλά σε ανεπαρκή εφαρμογή βασικών μέτρων αντιδιαβρωτικής προστασίας και εγκατάστασης σύμφωνα με τα ισχύοντα πρότυπα. Η αστοχία αποτελεί τυπικό παράδειγμα πρόωρης διάτρησης υπόγειας χαλύβδινης σωλήνωσης λόγω προχωρημένης τοπικής διάβρωσης (pitting) σε περιβάλλον χωρίς παθητική και ενεργητική προστασία.

- **Τελικό Συμπέρασμα:** Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών-ελέγχων, προκύπτει ότι ο χρησιμοποιηθείς χαλύβδινος σωλήνας ήταν μεταλλουργικά κατάλληλος και διαστασιολογικά συμβατός με τις απαιτήσεις λειτουργίας (NPS 3/4", Schedule 40) για μεταφορά αερίου καυσίμου (προπανίου) σε πίεση 1.5 bar, σύμφωνα με τα ισχύοντα πρότυπα εγκατάστασης. Ωστόσο, η εγκατάσταση παρουσίαζε ουσιώδεις αποκλίσεις από τις κανονιστικές απαιτήσεις: απουσία εξωτερικής αντιδιαβρωτικής επικάλυψης στο υπόγειο τμήμα, έλλειψη συστήματος καθοδικής προστασίας και μη εγκιβωτισμό της σωλήνας σε στρώση καθαρής άμμου εντός εδάφους. Οι ελλείψεις αυτές οδήγησαν σε άμεση και παρατεταμένη επαφή του χάλυβα με υγρό, αγώγιμο εδαφικό περιβάλλον, ευνοώντας την ανάπτυξη εντοπισμένης ηλεκτροχημικής διάβρωσης με βελονισμούς (pitting corrosion). Ο αυτοενισχυόμενος μηχανισμός τοπικής ανοδικής διάλυσης είχε ως αποτέλεσμα τη δημιουργία πολλαπλών κοιλοτήτων και τελικά διατρήσεων-οπών, οι οποίες επιβεβαιώθηκαν πειραματικά. Κατά συνέπεια, η αστοχία της σωλήνωσης δεν οφείλεται σε ακαταλληλότητα του υλικού, αλλά σε ανεπαρκή αντιδιαβρωτικό σχεδιασμό και μη συμμόρφωση της εγκατάστασης με τις βασικές απαιτήσεις των εφαρμοζόμενων τεχνικών προτύπων για υπόγειους αγωγούς 'μεταφοράς αερίων καυσίμων.



5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

5.1 Ελληνική και Ευρωπαϊκή Νομοθεσία

Δ3/14858/1993, Κανονισμός τεχνικών προδιαγραφών διαμόρφωσης, σχεδίασης, κατασκευής, ασφαλούς λειτουργίας και πυροπροστασίας εγκαταστάσεων υγραερίου σε βιομηχανικές, βιοτεχνικές και επαγγελματικές δραστηριότητες, ΦΕΚ 477/Β'/01.07.1993, Εφημερίδα της Κυβερνήσεως της Ελληνικής Δημοκρατίας, Αθήνα, 1993.

ΦΕΚ 1257/Β/03.09.2003, Τεχνικός κανονισμός εγκαταστάσεων υγραερίου στα κτίρια (πλην βιομηχανιών-βιοτεχνιών), Εφημερίδα της Κυβερνήσεως της Ελληνικής Δημοκρατίας, Αθήνα, 2003.

European Parliament and Council Directive 2014/65/EU, *On the harmonisation of the laws of Member States relating to the making available on the market of pressure equipment (Pressure Equipment Directive – PED)*, Official Journal of the European Union, L 169, 28.06.2014.

European Parliament and Council Regulation (EU) 2016/426, *On appliances burning gaseous fuels, and repealing Directive 2009/142/EC (Gas Appliances Regulation – GAR)*, Official Journal of the European Union, L 81, 31.03.2016.

5.2 Διεθνή Πρότυπα

ASTM A53/A53M, *Standard Specification for Pipe, Steel, Black and Hot-Dipped, Zinc-Coated, Welded and Seamless*, ASTM International, West Conshohocken, PA, latest edition, 2020.

ASTM A106/A106M, *Standard Specification for Seamless Carbon Steel Pipe for High-Temperature Service*, ASTM International, West Conshohocken, PA, latest edition, 2019.

ASTM E112, *Standard Test Methods for Determining Average Grain Size*, ASTM International, West Conshohocken, PA, latest edition, 2021.



EN ISO 3183, *Petroleum and natural gas industries — Steel pipe for pipeline transportation systems*, International Organization for Standardization, Geneva, latest edition, 2019.

EN 12007, *Gas supply systems — Pipelines for maximum operating pressure up to and including 16 bar — Functional requirements*, European Committee for Standardization (CEN), Brussels, latest edition, 2015.

EN 15001-1, *Gas infrastructure — Gas installation pipework with an operating pressure greater than 0.5 bar for industrial installations and greater than 5 bar for industrial and non-industrial installations — Part 1: Detailed functional requirements for design, materials, construction, inspection and testing*, European Committee for Standardization (CEN), Brussels, latest edition, 2023.

EN 15589-1, *Petroleum and natural gas industries — Cathodic protection of pipeline transportation systems — Part 1: On-land pipelines*, European Committee for Standardization (CEN), Brussels, latest edition, 2015.

EN 16125, *LPG equipment and accessories — Pipework systems and supports — LPG in liquid phase and vapour pressure phase*, European Committee for Standardization (CEN), Brussels, 2019.

5.3 Λοιπή Βιβλιογραφία

Ahmad, Z., *Principles of Corrosion Engineering and Corrosion Control*, Butterworth-Heinemann (Elsevier), Oxford, 2006.

Ashby M, Shercliff H, Cebon D, Υλικά: Μηχανική, Επιστήμη, Επεξεργασία & Σχεδιασμός, Εκδόσεις Κλειδάριθμος, 2011.

Askeland DR, Wright WJ, Υλικά, Δομή, Ιδιότητες και Τεχνολογικές Εφαρμογές, Εκδόσεις Τζιόλα, 2017.



- Baboian, R.** (Ed.), *Corrosion Tests and Standards: Application and Interpretation*, 2nd ed., ASTM International, West Conshohocken, PA, 2005.
- Fontana, M.G.**, *Corrosion Engineering*, 3rd ed., McGraw-Hill, New York, 1986.
- Jones, D.A.**, *Principles and Prevention of Corrosion*, 2nd ed., Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 1996.
- Landolt, D.**, *Corrosion and Surface Chemistry of Metals*, EPFL Press / CRC Press, Lausanne, 2007.
- Marcus, P.** (Ed.), *Corrosion Mechanisms in Theory and Practice*, 3rd ed., CRC Press, Boca Raton, FL, 2011.
- McCafferty, E.**, *Introduction to Corrosion Science*, Springer, New York, 2010.
- Revie, R.W., Uhlig, H.H.**, *Corrosion and Corrosion Control: An Introduction to Corrosion Science and Engineering*, 4th ed., John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, 2008.
- Schweitzer, P.A.**, *Fundamentals of Corrosion: Mechanisms, Causes, and Preventative Methods*, CRC Press, Boca Raton, FL, 2010.
- Uhlig, H.H., Revie, R.W.**, *Corrosion and Corrosion Control*, 3rd ed., John Wiley & Sons, New York, 1985.

ΕΚΘΕΣΗ ΕΓΧΕΙΡΙΣΕΩΣ

Αθήνα σήμερα την 25^η του μήνα Φεβρουαρίου του έτους 2026
ημέρα της εβδομάδας Τετάρτη και ώρα 12:10 ενώπιόν μας
Επιπυραγού Δημήτριο Μείντανη παρουσία και του Ανθυποπυραγού Μπούκουρα
Χρήστου που προσλήφθηκε σαν 2ος ανακριτικός υπάλληλος
η αρουσιάστηκε ο Τσακιδής Πέτρος του Ευαγγέλου
και μου ενεχείρησε Έκθεση Πραγματογνωμοσύνης
(φύλλα σαράντα οκτώ 48.)

βεβαίωσε δε και προφορικά το περιεχόμενό της.
Τρος/βεβαίωση συντάξαμε την παρούσα η οποία αναγνώσθηκε, θεωρήθη
και υπογράφεται ως ακολούθως.

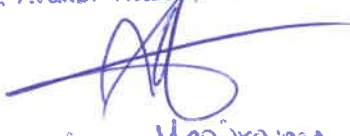
ενχριστός


2ος Ανακρ. Υπάλληλος

Ανακρ. Υπάλληλος


Πέτρος Τσακιδής

Αυτήλη Καστητική Επιπ


Χρήστω Μπούκουρας
Ανθυποπυραγός


Δημήτριος Μείντανης
Επιπυραγός