

ΜΗΧ  
698

# ΓΡΑΜΜΑΤΕΙΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ

## ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΣΩΛΗΝΩΣΕΩΝ ΜΕΣΗΣ ΠΙΕΣΗΣ



ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΣΑΡΡΗΣ ΜΑΤΘΑΙΟΣ του Κοσμά  
(Α.Μ 32011)

ΣΤΑΥΡΟΠΟΥΛΟΣ ΚΩΝ/ΝΟΣ ΜΑΡΙΟΣ  
του Σταύρου(Α.Μ 37716)

ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ

Δρ Πανδώρα Π. Ψυλλάκη

Μηχανικός Μεταλλείων – Μεταλλουργός, Ε.Μ.Π.

## Περιεχόμενα

ΥΠΟΜΝΗΜΑ ΕΙΚΟΝΩΝ .....	3
ΥΠΟΜΝΗΜΑ ΠΙΝΑΚΩΝ .....	5
ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....	7
ABSTRACT .....	7
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 <sup>ο</sup> .....	9
Εισαγωγή.....	9
1α. Το φυσικό αέριο εν συντομία .....	9
1β. Η ιστορία του φυσικού αερίου από τα αρχαία χρόνια μέχρι σήμερα .....	10
1β.Ι. Οι «πρωτοδαμαστές» του φυσικού αερίου.....	11
1β.ΙΙ. Μία σύντομη περιγραφή του κανονισμού διανομής του φυσικού αερίου. ....	12
1γ. Τι είναι το φυσικό αέριο.....	13
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 <sup>ο</sup> .....	15
Το φυσικό αέριο στον 21 <sup>ο</sup> αιώνα .....	15
2α. Κύρια κοιτάσματα φυσικού αερίου παγκοσμίως.....	15
2β. Διαφορές στην ποιότητα του φυσικού αερίου .....	16
2γ. Επεξεργασία φυσικού αερίου.....	17
2δ. Τρόποι εξεύρεσης και άντλησης φυσικού αερίου.....	17
2ε. Τρόποι διανομής του φυσικού αερίου.....	19
2ε.Ι. Διανομή φυσικού αερίου μέσω χαλύβδινων δικτύων.....	19
2ε.ΙΙ. Διανομή φυσικού αερίου σε υγρή μορφή (Lng) μέσω δεξαμενοπλοίων .....	20
2στ. Διανομή φυσικού αερίου στην Ελλάδα.....	21
2στ.Ι. Το δίκτυο χαμηλής πίεσης 0.025 bar στο κέντρο της Αθήνας.....	28
2στ.ΙΙ. Πλεονεκτήματα του φυσικού αερίου για βιομηχανική και οικιακή χρήση.....	29
2ζ. Μέθοδοι και τεχνικές πρόληψης ατυχημάτων .....	31
2ζ.Ι. Ασφάλεια σε εσωτερικές εγκαταστάσεις κτιρίων.....	32
2ζ.ΙΙ. Προδιαγραφές ασφαλείας για τα δίκτυα της μέσης και υψηλής πίεσης που περιέχουν χαλυβδοσωλήνες.....	37
2ζ.ΙΙΙ. Προδιαγραφές ασφαλείας για το δίκτυο χαμηλής πίεσης .....	38
2ζ.ΙV. Προβλεπόμενα μέτρα ατομικής προστασίας (Μ.Α.Π) εργαζομένων συντήρησης δικτύου.....	40
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 <sup>ο</sup> .....	44
Ανάλυση πρόληψης και αστοχίας σωληνώσεων .....	44
3α. Τεχνικές πρόληψης καταστροφής σωληνώσεων με μη καταστρεπτικές μεθόδους .....	44
Μη καταστρεπτικές τεχνικές (non destructive testing, ndt) .....	44
3β. Συμπεριφορά υλικών σε διάφορες καταπονήσεις.....	49
3β.Ι. Κόπωση – περιοδικά μεταβαλλόμενη μηχανική φόρτιση.....	49
3β.ΙΙ. Διάβρωση — αστοχία λόγω δράσης χημικών παραγόντων.....	54
3β.ΙΙΙ. Διαλυτοποίηση μετάλλων από διαλύματα σε χαμηλές θερμοκρασίες.....	55
Ομοιόμορφη διάβρωση.....	55
Γαλβανική διάβρωση .....	55



Μικρογαλβανική διάβρωση .....	56
Διάβρωση με εσοχές (Crevice) .....	56
Διάβρωση με βελονισμούς (Pitting corrosion) .....	57
Διάβρωση υπο μηχανική τάση (stress corrosion) .....	58
Ψαθυροποίηση από υδρόγονο (hydrogen embrittlement) .....	58
Φθορά λόγω τριβής – επιφανειακή καταπόνηση υλικού .....	59
Φθορά λόγω εκτριβής .....	60
Παράγοντες που επηρεάζουν τη φθορά λόγω τριβής .....	61
Ανάλυση διαρροής και της συμπεριφορά θραύσης σε ένα διάγραμμα αξιολόγησης αστοχίας για χαλύβδινους αγωγούς .....	61
1. Εισαγωγή.....	62
2. Ανάλυση διαδικασίας.....	62
Συνθήκες ανάλυσης .....	62
Ανάλυση θραύσης.....	63
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup></b> .....	<b>65</b>
Πειραματική διερεύνηση αστοχίας σωληνώσεων .....	65
Αστοχία σωλήνα σε σύστημα αποθείωσης πετροχημικών .....	65
Συμπεράσματα .....	78
Επίδραση του μήκους της περιοχής αστοχίας σε χαλύβδινο σωλήνα .....	78
2. Πειραματική διαδικασία .....	79
2.1. Δείγμα αγωγού .....	79
2.2. Πειραματική διαδικασία .....	81
3. Αποτελέσματα.....	84
3.1. Τρόποι αστοχίας.....	84
Συμπεράσματα .....	85
Αξιοπιστία αγωγών Πολυβινυλοχλωριδίου(PVC) και αστοχία.....	86
Ιστορικό αστοχίας αγωγών pvc.....	86
Αποτελέσματα.....	89
Άλλες παρατηρήσεις.....	89
Σύνοψη και συμπεράσματα.....	89
Αστοχία αγωγών πολυαιθυλενίου.....	90
Εισαγωγή.....	90
Πειραματική διαδικασία .....	90
Υλικά.....	90
Μέθοδος δοκιμής .....	90
Αποτελέσματα.....	91
Τυπικά δεδομένα.....	91
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</b> .....	<b>93</b>

## ΥΠΟΜΝΗΜΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

- ΕΙΚ.1 Έκρηξη φυσικού αερίου με 4 νεκρούς σε εργοστάσιο τροφίμων στις 9 Ιουνίου,2009 . Περιοχή : Garner,North Carolina Ην.Πολιτείες.....ΣΕΛ 9
- ΕΙΚ.2 Έκρηξη φυσικού αερίου στις 11 Δεκεμβρίου 1998 με 4 νεκρούς και δεκάδες τραυματίες. 6 πολυκατοικίες καταστράφηκαν ολοσχερώς. Περιοχή: Saint Cloud , Minnesota.....ΣΕΛ 9
- ΕΙΚ.3 Κύρια σύσταση του φυσικού αερίου είναι η χημική ένωση  $CH_4$  (Μεθάνιο).....ΣΕΛ 14
- ΕΙΚ 2.1 Οι χώρες με τη μεγαλύτερη παραγωγή φυσικού αερίου...ΣΕΛ 15
- ΕΙΚ.2γ.1 Σημειακή διάβρωση(pitting corrosion).....ΣΕΛ 17
- ΕΙΚ.2γ.1 και 2γ.2 Λειτουργία SONAR για εξεύρεση πιθανών πηγών Φυσικού Αερίου.....ΣΕΛ 18
- ΕΙΚ. 2ε.Π.1 Δεξαμενόπλοιο μεταφέρει υγροποιημένο Φυσικό Αέριο.  
ΕΙΚ. 2ε.Π.2 Σταθμός επεξεργασίας υγροποιημένου Φυσικού Αερίου στην Ρεβυθούσα.....ΣΕΛ 20
- ΕΙΚ 2.στ.1 CITY GATE ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΣΠΑΤΩΝ.....ΣΕΛ 21
- ΕΙΚ 2.στ.2 Χάρτης δικτύου Υψηλής Πίεσης στην Ελλάδα.....ΣΕΛ 22
- ΕΙΚ 2.στ.3 Υπέργειος σταθμός μέτρησης-ρύθμισης 19-4 bar στον δήμο Χαϊδαρίου.....ΣΕΛ 23
- ΕΙΚ 2.στ.4 Υπόγειος σταθμός μέτρησης-ρύθμισης 19-4 bar στον δήμο Αθηνών -περιοχή Φιλοπάππου.....ΣΕΛ 24
- ΕΙΚ 2.στ.5 Εποπτικός χάρτης δικτύου Μέσης Πίεσης.....ΣΕΛ 25
- ΕΙΚ 2.στ.6 Σταθμοί διανομής 4-0.025 bar.....ΣΕΛ 27
- ΕΙΚ 2.στ.7 Εποπτικός χάρτης δικτύου χαμηλής πίεσης..... ΣΕΛ 27
- ΕΙΚ 2.στ.8 Χάρτης περιοχής αντικατάστασης παλαιού δικτύου στο κέντρο της Αθήνας.....ΣΕΛ 28



- ΕΙΚ. 2.ζ.1 Απεικόνιση SCADA του δικτύου Φυσικού Αερίου στην Αττική. Οι κόκκινες κουκίδες υποδηλώνουν πρόβλημα σε σταθμό ή σε βάνες του δικτύου.....ΣΕΛ 32
- ΕΙΚ.2.ζ.1 Βαλβίδα πυροπροστασίας (DIN 3586) .....ΣΕΛ 34
- ΕΙΚ.2.ζ.2 Αντισεισμικές βαλβίδες.....ΣΕΛ 35
- ΕΙΚ 2.ζ.3 Κατασκευή δικτύου Χαμηλής Πίεσης.....ΣΕΛ 40
- ΕΙΚ 2.ζ.4 Ένδειξη τοποθεσίας αγωγού Χαμηλής Πίεσης.....ΣΕΛ 41
- Σχήμα 3.α.1, Έλεγχος μεταλλικών υλικών με μαγνητικά σωματίδια (α) Βασική αρχή της μεθόδου, (β) εντοπισμός επιφανειακής ρωγμής.....ΣΕΛ 46
- Σχήμα 3.α.2. Ραδιογραφικός έλεγχος συγκόλλησης μεταλλικών υλικών  
ΕΙΚ 3.α.1 Έλεγχος με υπερήχους.....ΣΕΛ 47
- ΕΙΚ.3.α.2 Έλεγχος με υπερήχους που ελέγχονται από κεφαλές κρυστάλλων.  
ΣΕΛ 48
- Σχήμα 3.α.3. Έλεγχος μεταλλικών υλικών με χρήση υπερήχων.....ΣΕΛ 49
- ΕΙΚ.3.α. Συσκευή παραγωγής δινορρευμάτων.....ΣΕΛ 49
- Σχήμα 3.β.1. Χαρακτηριστικές καμπύλες χρονικής μεταβολής της επιβαλλόμενης τάσης σε καταπονήσεις κόπωσης.....ΣΕΛ 51
- Σχήμα 3.β.2. Καμπύλη Wohler για χάλυβα 4140 μετά από εξομάλυνση.  
ΣΕΛ 51
- Σχήμα 3.β.3. Καμπύλες S-N: Τυπικές καμπύλες για χάλυβες και κράματα τιτανίου.....ΣΕΛ 52
- Σχήμα 3.β.4. Χαρακτηριστικές επιφάνειες θραύσης λόγω κόπωσης.(α) Ραβδώσεις κόπωσης σε κράμα αλουμινίου (θραυστογραφία με χρήση TEM), (β) Κυματοειδής μορφολογία σε χαλύβδινο άξονα, (γ) Απουσία κυματοειδούς μορφολογίας λόγω αστοχίας υπό καθεστώς ολιγοκυκλικής κόπωσης.....ΣΕΛ 53
- Σχήμα 3.β.5. Περικρυσταλλική διάβρωση συγκόλλησης στα όρια της θερμικά επηρεασμένης ζώνης.....ΣΕΛ 57
- Σχήμα 3.β.6 (i) Μεταλλική πλάκα βυθισμένη σε θαλασσινό νερό παρουσιάζει ενδείξεις έντονης διάβρωσης στις περιοχές όπου είχαν τοποθετηθεί ροδέλλες. (ii) Διάβρωση με εσοχές κοχλίων που έχει οδηγήσει σε σημαντική μείωση της διατομής τους.....ΣΕΛ 58

➤ Σχήμα 3.β.7. Διάβρωση με βελονισμούς. (α) Μορφολογία διαβρωμένης επιφάνειας, (β) Μεγέθυνση μιας οπής της.....	ΣΕΛ 59
➤ Σχήμα 3.β.8 Διάβρωση υπό μηχανική τάση: (α) Περικρυσταλλική ρωγμάτωση ορείχαλκου, (β) Διάβρωση σωλήνα στα σημεία αλλαγής της κατεύθυνσής του λόγω εσωτερικών τάσεων που αναπτύχθηκαν κατά την κάμψη του, (γ) Διάβρωση των ενεργειακά αναβαθμισμένων ορίων των κόκκων..	ΣΕΛ 59
➤ Σχήμα 3.β.9. Συστατικά μέρη ενός τριβοσυστήματος.....	ΣΕΛ 60
➤ Σχήμα 3.β.10. Φθορά λόγω τριβής μέσω μηχανισμών εκτριβής....	ΣΕΛ 62
➤ ΕΙΚ 4.1.....	ΣΕΛ 68
➤ ΕΙΚ 4.2.....	ΣΕΛ 69
➤ ΕΙΚ 4.3.....	ΣΕΛ 70
➤ ΕΙΚ 4.4.....	ΣΕΛ 71
➤ ΕΙΚ 4.5.....	ΣΕΛ 72
➤ ΕΙΚ.4.6.....	ΣΕΛ 73
➤ ΕΙΚ 4.7.....	ΣΕΛ 74
➤ ΕΙΚ 4.8.....	ΣΕΛ 75
➤ ΕΙΚ 4.9.....	ΣΕΛ 76
➤ ΕΙΚ 4.10.....	ΣΕΛ 77
➤ ΕΙΚ 4.11.....	ΣΕΛ 77
➤ ΕΙΚ 4.12.....	ΣΕΛ 81
➤ ΕΙΚ 4.13.....	ΣΕΛ 82
➤ ΕΙΚ 4.14.....	ΣΕΛ 85
➤ ΕΙΚ 4.15.....	ΣΕΛ 88
➤ ΕΙΚ 4.16.....	ΣΕΛ 88
➤ ΕΙΚ 4.17.....	ΣΕΛ 91
➤ ΕΙΚ 4.18.....	ΣΕΛ 91

## ΥΠΟΜΝΗΜΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

➤ ΠΙΝΑΚΑΣ 2β.1.....	ΣΕΛ 17
➤ ΠΙΝΑΚΑΣ 2.στ.1.....	ΣΕΛ 31
➤ ΠΙΝΑΚΑΣ 4.1.....	ΣΕΛ 65
➤ ΠΙΝΑΚΑΣ 4.2.....	ΣΕΛ 75
➤ ΠΙΝΑΚΑΣ 4.3.....	ΣΕΛ 79
➤ ΠΙΝΑΚΑΣ 4.4.....	ΣΕΛ 80





## **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Σκοπός της παρούσας πτυχιακής εργασίας είναι η πειραματική διερεύνηση αστοχίας σε χαλύβδινο αγωγό φυσικού αερίου, καθώς και η μελέτη της προστασίας του χάλυβα υπό συνθήκες μεταφοράς φυσικού αερίου. Το κύριο περιεχόμενο της εργασίας είναι η ανάλυση της αστοχίας των σωληνώσεων καθώς και η δυνατότητα πρόληψης με συγκεκριμένες τεχνικές. Επίσης, υπάρχει εκτεταμένη αναφορά στο φυσικό αέριο ως προς την φύση του, τις τεχνικές εξεύρεσης και αντλησής του και τους τρόπους διανομής του.

## **ABSTRACT**

The aim of this thesis is the experimental investigation of failure in a steel gas pipeline, and the study of the protection of steel under conditions of natural gas transport. To the main content of this paper we analyze the failure of the piping and the possibility of prevention with specific techniques. In addition, there is extensive reference to the natural gas as its nature, techniques for discovering and pumping natural gas and ways of distribution.

## Συμπέρασμα

### 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παρούσα εργασία αφορά στην πειραματική διερεύνηση της αστοχίας υλικού σε αγωγό φυσικού αερίου. Η μελέτη πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο του προγράμματος «ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ» της Γενικής Γραμματείας Έρευνας και Τεχνολογίας (ΓΓΕΤ) και χρηματοδοτήθηκε από το Υπουργείο Παιδείας, Έρευνας και Θρησκευμάτων. Η εργασία αποτελεί μέρος της διπλωματικής εργασίας του κ. [Όνομα], φοιτητή του Τμήματος Μηχανολογίας του Πανεπιστημίου Πειραιά.

### 2. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Το υλικό υποβλήθηκε σε δοκιμή μετρήσιμης τάσης και παραμόρφωσης. Τα αποτελέσματα της δοκιμής είναι τα ακόλουθα:

Η μέγιστη τάση που αντέχει το υλικό είναι  $\sigma_{max}$  και η μέγιστη παραμόρφωση είναι  $\epsilon_{max}$ .

Η αστοχία του υλικού εμφανίστηκε σε τάση  $\sigma_{rupture}$  και παραμόρφωση  $\epsilon_{rupture}$ .

Η αστοχία του υλικού εμφανίστηκε με τη μορφή ραγίσματος.

Η αστοχία του υλικού εμφανίστηκε σε τάση  $\sigma_{rupture}$  και παραμόρφωση  $\epsilon_{rupture}$ .

Η αστοχία του υλικού εμφανίστηκε με τη μορφή ραγίσματος.

Η αστοχία του υλικού εμφανίστηκε σε τάση  $\sigma_{rupture}$  και παραμόρφωση  $\epsilon_{rupture}$ .

Η αστοχία του υλικού εμφανίστηκε με τη μορφή ραγίσματος.

Η αστοχία του υλικού εμφανίστηκε σε τάση  $\sigma_{rupture}$  και παραμόρφωση  $\epsilon_{rupture}$ .

Η αστοχία του υλικού εμφανίστηκε με τη μορφή ραγίσματος.

Η αστοχία του υλικού εμφανίστηκε σε τάση  $\sigma_{rupture}$  και παραμόρφωση  $\epsilon_{rupture}$ .

Η αστοχία του υλικού εμφανίστηκε με τη μορφή ραγίσματος.

Η αστοχία του υλικού εμφανίστηκε σε τάση  $\sigma_{rupture}$  και παραμόρφωση  $\epsilon_{rupture}$ .

Η αστοχία του υλικού εμφανίστηκε με τη μορφή ραγίσματος.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup>

### Εισαγωγή

#### 1α. Το φυσικό αέριο εν συντομία

Το Φυσικό αέριο είναι ευρύτερα γνωστό πάνω από 120 χρόνια στις αναπτυγμένες χώρες , υπάρχουν μεγάλες ποσότητες άντλησης(τρισεκατομμύρια κυβικά μέτρα ανά την υφήλιο) ώστε να μπορεί να καλύψουν τις ανάγκες των ανθρώπων για ενέργεια δίχως τους υπόλοιπους φυσικούς πόρους( πετρέλαιο ,φωταέριο ,ξύλα κλπ.) για μερικές δεκαετίες. Παρόλα αυτά παραμένει ακόμα επίφοβο στο ευρύ κοινό λόγω των σοβαρών εκρήξεων που έχουν συμβεί κατά καιρούς όπως φαίνεται και στις παρακάτω εικόνες.(1)



ΕΙΚ.1

Έκρηξη φυσικού αερίου με 4 νεκρούς σε εργοστάσιο τροφίμων στις 9 Ιουνίου,2009 . Περιοχή : Garner,North Carolina Ην.Πολιτείες.



ΕΙΚ.2

Έκρηξη φυσικού αερίου στις 11 Δεκεμβρίου 1998 με 4 νεκρούς και δεκάδες τραυματίες. 6 πολυκατοικίες καταστράφηκαν ολοσχερώς. Περιοχή: Saint Cloud , Minnesota



Αυτά του είδους ατυχήματα οφείλονται σε τρεις λόγους :

A) Σε φαινόμενα αστοχίας υλικών (τα οποία θα αναλύσουμε σε επόμενο κεφάλαιο). Μολονότι υπήρξε έκρηξη τεχνογνωσίας με την έναρξη του Β' Παγκοσμίου Πολέμου πάνω σε θέματα μετάλλων και τεχνικών συγκόλλησης μετάλλων , συνεχίζονται να υπάρχουν προβλήματα σε δίκτυα φυσικού αερίου ,ύδρευσης και πετρελαίου. Αξίζει να αναφερθεί ότι τα περισσότερα ατυχήματα οικιακών εγκαταστάσεων οφείλονται σε αυτά τα φαινόμενα.

B) Σε ατυχήματα που οφείλονται σε ανθρώπινη αμέλεια. Παρά τα απαραίτητα μέτρα ασφαλείας και προδιαγραφών τα ανθρώπινα σφάλματα-ατυχήματα συνεχίζονται. Αναγνωρίζεται όμως το μικρό ποσοστό που κατέχει ,δείχνοντας την συνεχή ενημέρωση εργαζομένων για την πρόληψη ατυχημάτων.

Γ) Σε ατυχήματα που οφείλονται σε φυσικές καταστροφές. Είναι τα πιο απρόβλεπτα σε έκταση ατυχήματα.

## **1β. Η ιστορία του φυσικού αερίου από τα αρχαία χρόνια μέχρι σήμερα**

Το φυσικό αέριο δεν είναι τίποτα νέο. Στην πραγματικότητα, το μεγαλύτερο μέρος του φυσικού αερίου που παρουσιάζεται στην επιφάνεια της γης και κάτω από το έδαφος είναι εκατομμυρίων ετών. Μια πρώτη προσέγγιση του ανθρώπου με τις ιδιότητες του φυσικού αερίου αποτέλεσε το φαινόμενο της ανάφλεξης. Κάτι τέτοιο έγινε αντιληπτό όταν αστραπές, σε συνδυασμό με το φυσικό αέριο, απελευθερώνονταν υπό πίεση από το έδαφος δημιουργώντας πίδακες φλόγας πολλών μέτρων. Πίδακες φλόγας, που ήταν ικανοί να σκορπίσουν το φόβο στους περισσότερους πρώιμους πολιτισμούς. Γεγονός που συντέλεσε στη δημιουργία μύθων και δεισιδαιμονιών στην προσπάθεια επεξήγησης του φαινομένου της ανάφλεξης. Μια από τις σημαντικότερες πηγές φυσικού αερίου του πρώιμου πολιτισμού, τοποθετείται στην αρχαία Ελλάδα και πιο συγκεκριμένα στον Παρνασσό, με τις πρώτες ιστορικές αναφορές να κάνουν λόγο για το 1000 περίπου π.Χ . Οι Αρχαίοι Έλληνες, θεωρούσαν ότι η φλόγα που ξεπετούσε από την γη ήταν θεϊκής προέλευσης, και για αυτόν τον λόγο κατασκεύασαν έναν ναό περιμετρικά της φλόγας. Αυτός ο ναός (όπου παραμένει ακόμα και σήμερα ένα από το εμβληματικότερα μνημεία του Ελληνικού πολιτισμού) είναι το Μαντείο των Δελφών, όπου η ιέρεια του ναού έδινε προφητείες οι οποίες ήταν εμπνευσμένες από τη φλόγα. Αυτοί οι τύποι προφητειών-χρησμών υπήρχαν και στις υπόλοιπες θρησκείες της Ινδίας, και της Περσίας όπου παρατηρήθηκαν παρόμοιοι πίδακες φωτιάς. Οι άνθρωποι στην προσπάθεια τους να ερμηνεύσουν το φαινόμενο αυτό, του απέδωσαν τον τίτλο του θείου, ή υπερφυσικού.(2)



## 1β.1. Οι «πρωτοδαμαστές» του φυσικού αερίου

Το 500 Π.Χ περίπου, οι Κινέζοι ανακάλυψαν ότι υπάρχει δυνατότητα χρήσης του φυσικού αερίου. Βρίσκοντας την τοποθεσία όπου το αέριο διέρρεε στην επιφάνεια, οι κινεζικές διαμορφωμένες ακατέργαστες σωληνώσεις από τους βλαστούς μπαμπού, πρόδρομοι των σημερινών χαλυβδοσωλήνων, μετέφεραν το αέριο όπου χρησιμοποιήθηκε για να βράζει το θαλάσσιο νερό, διαχωρίζοντας το άλας και καθιστώντας το σε πόσιμο.

Η Μεγάλη Βρετανία ήταν η πρώτη χώρα που εμπορευματοποίησε τη χρήση του φυσικού αερίου. Περίπου το 1785, το φυσικό αέριο που παραγόταν από τον άνθρακα (φωταέριο) χρησιμοποιήθηκε στους φάρους, καθώς επίσης και τους φωτεινούς σηματοδότες. Παραγόμενο φυσικό αέριο αυτού του τύπου ξεκίνησε στις Ηνωμένες Πολιτείες το 1816, όταν χρησιμοποιήθηκε για να ανάψουν οι λάμπες στις οδούς της Βαλτιμόρης, στο Μέρυλαντ. Εντούτοις, αυτό το κατασκευασμένο αέριο, ήταν πολύ λιγότερο αποδοτικό και φιλικό προς το περιβάλλον, σε σχέση με το σύγχρονο φυσικό αέριο που προέρχεται από την γη. Το φυσικό αέριο ανακαλύφθηκε και προσδιορίστηκε στην Αμερική από το 1626, όταν Γάλλοι εξερευνητές, ανακάλυψαν ντόπιους να αναφλέγουν τα αέρια που διέρρεαν γύρω από τη λίμνη Erie. Η αμερικανική φυσική βιομηχανία αερίου πρωτοξεκίνησε σε αυτήν την περιοχή. Το 1859, ο Edwin Drake ο οποίος έσκαβε για να δημιουργήσει ένα πηγάδι χτύπησε το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο 69 πόδια (περίπου 21 m) κάτω από την επιφάνεια της γης.

Από αυτό το ατύχημα ξεκίνησε στην ουσία η βιομηχανία του φυσικού αερίου στην Αμερική. Ένας αγωγός διαμέτρου δύο-ιντσών και μήκος  $5 \frac{1}{2}$  μιλίων κατασκευάστηκε από το πηγάδι έως το χωριό Titusville, της Πενσυλβάνια. Η κατασκευή αυτού του αγωγού απέδειξε ότι το φυσικό αέριο θα μπορούσε να μετακινηθεί με ασφάλεια και σχετικά εύκολα από υπόγεια πηγή και να χρησιμοποιηθεί για πρακτικούς σκοπούς.

Το 1821, δημιουργήθηκε το πρώτο πηγάδι άντλησης, που προορίζονταν ειδικά για την απόκτηση φυσικού αερίου, στην Fredonia, της Νέας Υόρκης από τον William Hart.

Ο Hart θεωρείται από πολλούς ως «ο πατέρας του φυσικού αερίου» στην Αμερική. Η εταιρεία Fredonia βασίστηκε πάνω στα σχέδια του Hart και τελικά αναδείχθηκε ως η πρώτη αμερικανική εταιρία φυσικού αερίου.

Κατά το μεγαλύτερο μέρος του 19ου αιώνα, το φυσικό αέριο χρησιμοποιήθηκε σχεδόν αποκλειστικά ως πηγή του φωτός. Χωρίς υποδομές αγωγών, ήταν δύσκολη η μεταφορά του φυσικού αερίου πολύ μακριά από την πηγή άντλησης του, καθώς και σε σπίτια που το χρησιμοποιούσαν για θέρμανση ή μαγείρεμα. Το μεγαλύτερο μέρος του φυσικού αερίου που παράχθηκε αυτή την εποχή ήταν κατασκευασμένο από άνθρακα (coal gas). Κοντά στο τέλος του 19ου αιώνα, με την αύξηση της ηλεκτρικής ενέργειας οι λάμπες φυσικού αερίου μετατράπηκαν σε ηλεκτρικές λάμπες. Αυτό οδήγησε τους παραγωγούς φυσικού αερίου να ψάξουν νέες χρήσεις για το προϊόν τους.

Το 1885, ο Robert Bunsen εφηύρε αυτό που είναι τώρα γνωστός ως καυστήρας Bunsen. Κατάφερε να δημιουργήσει μια συσκευή ανάμειξης του φυσικού αερίου με



τον αέρα στις σωστές αναλογίες, με αποτέλεσμα, μια φλόγα που θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί με ασφάλεια για το μαγείρεμα και τη θέρμανση. Η εφεύρεση του καυστήρα Bunsen διέυρνε τη χρήση του φυσικού αερίου στην Αμερική και σε όλο τον κόσμο. Επίσης η εφεύρεση του θερμοκρασιακού ρυθμιστή καθώς και νέες θερμοστατικές συσκευές επέτρεπαν την καλύτερη αξιοποίηση του φυσικού αερίου ,με τη θερμοκρασία της φλόγας να προσαρμόζεται και να παρακολουθείται ανάλογα με τις συνθήκες.

Χωρίς να υπάρχει κάποιος αποτελεσματικός τρόπος μεταφοράς του φυσικού αερίου πριν τον Β' Παγκόσμιο Πόλεμο, όταν εντοπιζόταν μαζί με άνθρακα και πετρέλαιο το άφηναν να διαρρέεται στην ατμόσφαιρα, ή να καεί .Σε περιπτώσεις που εντοπιζόταν μόνο του ,το άφηναν στο υπέδαφος.

Ένας από τους πρώτους μεγάλου μήκους αγωγός κατασκευάστηκε το 1891. Ο αγωγός αυτός είχε περίπου 120 μίλια( σχεδόν 190 χλμ.) απόσταση από την πηγή ,που ήταν τα πηγάδια στην κεντρική Ιντιάνα έως την πόλη του Σικάγο. Ωστόσο, αυτός ο αγωγός ήταν πολύ στοιχειώδης, και δεν ήταν αποτελεσματική η μεταφορά του φυσικού αερίου. Αυτό συνέβαινε έως τη δεκαετία του 1920 όπου έγιναν σημαντικές προσπάθειες κατασκευής σωστών υποδομών αγωγών φυσικού αερίου. Μετά τον Δεύτερο Παγκόσμιο Πόλεμο και την ραγδαία αύξηση τεχνογνωσίας στις τεχνικές συγκόλλησης σωληνώσεων, και των μεταλλουργικών κατασκευών , επέτρεψαν στην Αμερική να κατασκευάσει αξιόπιστους αγωγούς. Η μεταπολεμική έκρηξη κατασκευής αγωγών συνεχίστηκε μέχρι τα τέλη της δεκαετίας του '60, με την κατασκευή χιλιάδων χιλιομέτρων του αγωγού στην Αμερική.

Μόλις η μεταφορά του φυσικού αερίου κατέστη δυνατή , ανακαλύφθηκαν αρκετές νέες χρήσεις του. Αυτές περιλάμβαναν τη χρήση φυσικού αερίου για τη θέρμανση των σπιτιών και τη λειτουργία οικιακών συσκευών, όπως θερμαντήρες νερού . Παράλληλα , η βιομηχανία άρχισε να χρησιμοποιεί το φυσικό αέριο στην παραγωγή και σε εγκαταστάσεις επεξεργασίας. Επίσης, χρήση του φυσικού αερίου συναντάμε για τις ανάγκες θέρμανσης σε λέβητες ,εξυπηρετώντας με αυτό τον τρόπο και την παραγωγή ηλεκτρισμού. Η υποδομή μεταφορών ανέδειξε το φυσικό αέριο σε μια ιδιαίτερα δημοφιλή και ραγδαία αναπτυσσόμενη μορφή ενέργειας καθιστώντας τη διανομή του ολοένα και πιο εφικτή.(2)

## **1β.ΙΙ. Μία σύντομη περιγραφή του κανονισμού διανομής του φυσικού αερίου.**

Το 1938, η κυβέρνηση των ΗΠΑ αποφασίζει να ρυθμίσει για πρώτη φορά την βιομηχανία φυσικού αερίου. Εκείνη την εποχή, κοινό μυστικό για τους κυβερνητικούς κύκλους αποτελούσε το ότι η βιομηχανία φυσικού αερίου είναι ένα «φυσικό μονοπώλιο». Λόγω του φόβου των ενδεχόμενων καταχρήσεων, όπως η υπερτιμολόγηση και δεδομένης της αυξανόμενης ζήτησης από τους καταναλωτές, θεωρήθηκε αναγκαία η ψήφιση νόμου σχετικά με τη διανομή φυσικού αερίου. Ο νόμος αυτός επέβαλλε κανονισμούς και περιορισμούς σχετικά με την τιμή του φυσικού αερίου για την προστασία των καταναλωτών. Τη δεκαετία του 1970 και του 1980, μια σειρά από ελλείψεις και παρατυπίες στις τιμές, είχαν ως αποτέλεσμα τη μείωση της ζήτησης από τους καταναλωτές και την παρουσίαση ύφεσης στη



βιομηχανία φυσικού αερίου. Στα μέσα της δεκαετίας του 1980 και στις αρχές της δεκαετίας του 1990, ο κλάδος σταδιακά παρουσίασε ευνοϊκότερες ρυθμίσεις, προωθώντας τον υγιή ανταγωνισμό και την αγορά με βάση τις τιμές. Οι κινήσεις αυτές οδήγησαν σε ενίσχυση της αγοράς λόγω της σημαντικής μείωσης των τιμών. Το γεγονός αυτό είχε ως αποτέλεσμα, το φυσικό αέριο να γίνει πιο προσιτό στο μέσο καταναλωτή. Αν και τα ποσοστά ζήτησης δεν ήταν τόσο υψηλά όπως τη δεκαετία του 1990, η αρχή του 21ου αιώνα έφερε μαζί σημαντικά μέτρα ρύθμισης όσον αφορά την ποιότητα του αερίου, τα πρότυπα συμπεριφοράς των διακρατικών αγωγών, και κοινοποίησης των τιμών.

Σήμερα, η βιομηχανία φυσικού αερίου ρυθμίζεται από την Ομοσπονδιακή Ρυθμιστική Επιτροπή Ενέργειας (FERC). Αξίζει να σημειώσουμε ότι η FERC δεν αποτελεί απλά μία επιτροπή που πραγματεύεται θέματα σχετικά με το φυσικό αέριο, αλλά είναι το κύριο όργανο λήψης κανόνων σχετικά με τη ρύθμιση της βιομηχανίας φυσικού αερίου.

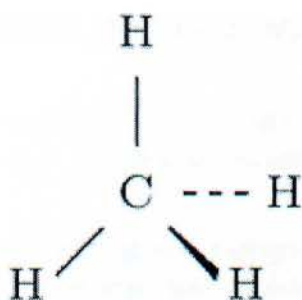
Ο ανταγωνισμός χαρακτηρίζει τη βιομηχανία φυσικού αερίου, όπως είναι γνωστό σήμερα. Η αναδιάρθρωση της βιομηχανίας, και η απομάκρυνση από την αυστηρή ρύθμιση, επέτρεψε την αύξηση της αποτελεσματικότητας και τεχνολογικές βελτιώσεις ως προς την αξιοποίηση της θερμογόνου δύναμης του. Το φυσικό αέριο μεταμορφώθηκε πλέον σε μια μορφή ενέργειας πολύ πιο φιλική για το μέσο καταναλωτή. Ξεχώριζε ιδιαιτέρως λόγω του ότι ήταν οικονομικό και είχε εύκολο τρόπο διανομής. Ωστόσο, η αναζήτηση περισσότερων πηγών φυσικού αερίου για να εξυπηρετήσει την ολοένα αυξανόμενη ζήτηση, απαιτεί νέες τεχνικές και γνώσεις για να αποκτηθεί από δύσκολες πηγές άντλησης.

Σήμερα, η βιομηχανία φυσικού αερίου απαριθμεί πάνω από 100 χρόνια συνεχούς παρουσίας, και συνεχίζει να αυξάνεται. Η αναδιάρθρωση και η τάση προς καθαρότερη καύση καυσίμων έχουν δημιουργήσει μια τεράστια αγορά για το φυσικό αέριο σε ολόκληρη τη χώρα. Οι νέες τεχνολογίες αναπτύσσονται με ταχύτερους ρυθμούς, γεγονός που μας επιτρέπει να ανακαλύπτουμε συνεχώς καινοτόμους τρόπους χρήσης του φυσικού αερίου. Τα πολλαπλά πλεονεκτήματα που προσφέρει, έχουν αναδείξει το φυσικό αέριο σε μια τάχιστα ανερχόμενη μορφή ενέργειας, η οποία κερδίζει ολοένα και περισσότερο έδαφος στην άκρως ανταγωνιστική βιομηχανία καυσίμων παγκοσμίως.(2)

## **1γ. Τι είναι το φυσικό αέριο**

Το φυσικό αέριο είναι ένα φυσικό μίγμα αεριοδών υδρογονανθράκων και βρίσκεται συνήθως κοντά σε αποθέματα πετρελαίου. Η άντληση του γίνεται μέσω μεγάλων φρεατίων, όπου το βάθος τους είναι αρκετά μεγάλο (σε κάποιες περιπτώσεις ξεπερνούν τα 2 ή και 3 χιλιάδες μέτρα). Αφότου φθάσει στην επιφάνεια, το αέριο διαχωρίζεται από οποιοδήποτε έλαιο ή νερό που μπορεί να υπήρχε στο απόθεμα πετρελαίου. Έπειτα υποβάλλεται σε επεξεργασία για να αφαιρεθούν οι ακαθαρσίες, άλλα αέρια όπως το προπάνιο και το βουτάνιο, και οποιοδήποτε υπόλειμμα νερού ή υδρατμού. Η σύνθεση του φυσικού αερίου διαφέρει από περιοχή σε περιοχή. Το βασικό του συστατικό είναι το μεθάνιο ( $\text{CH}_4$ ), που αποτελεί συνήθως και το 80% - 95% της σύστασής του, ενώ σε μικρότερα ποσοστά υπάρχουν επίσης το αιθάνιο

( $C_2H_6$ ), το προπάνιο ( $C_3H_8$ ), το βουτάνιο ( $C_4H_{10}$ ), και διάφορες άλλες ενώσεις υδρογονανθράκων. Μερικοί από τους υδρογονάνθρακες που βρίσκονται στη βενζίνη εμφανίζονται επίσης ως ατομί στο φυσικό αέριο και με την υγροποίηση αυτών των υδρογονανθράκων δημιουργείται καλής ποιότητας βενζίνη.



**ΕΙΚ.3**Κύρια σύσταση του φυσικού αερίου είναι η χημική ένωση  $CH_4$  (Μεθάνιο)

Αν και συναντάται συνήθως σε κοιτάσματα πετρελαίου, μπορεί να εμφανιστεί επίσης χωριστά στην άμμο, στον ψαμμίτη, και στις καταθέσεις ασβεστόλιθων. Μερικοί γεωλόγοι θεωρούν ότι το φυσικό αέριο είναι ένα υποπροϊόν φυτικού υλικού αποσύνθεσης στα υπόγεια στρώματα, ενώ άλλοι θεωρούν ότι μπορεί να είναι αρχέγονα αέρια που ανέρχονται από το μανδύα της γης. Λόγω της εύφλεκτης φύσης του και της υψηλής θερμαντικής του αξίας, το φυσικό αέριο χρησιμοποιείται εκτενώς ως φωτιστικό και ως καύσιμο.(3)



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup>

### **Το φυσικό αέριο στον 21<sup>ο</sup> αιώνα**

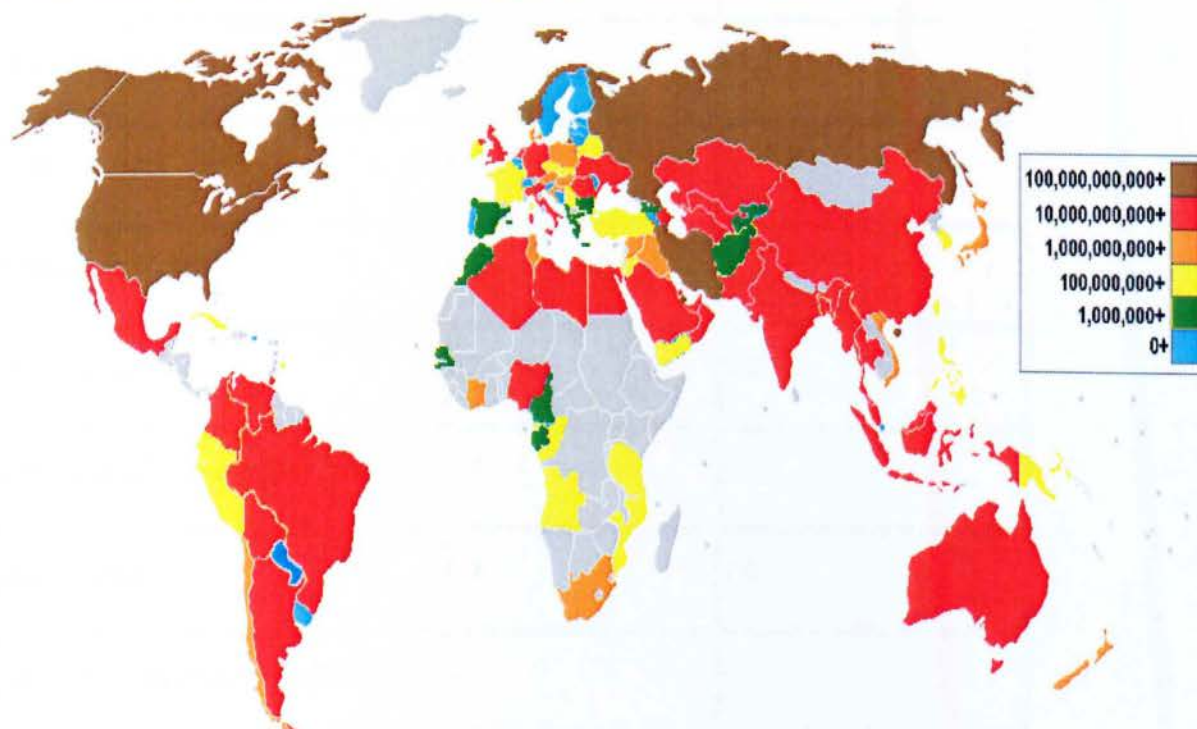
#### **2α. Κύρια κοιτάσματα φυσικού αερίου παγκοσμίως**

Με την συνεχόμενα ραγδαία αύξηση της ενέργειας και ταυτόχρονα την μείωση των αποθεμάτων του πετρελαίου ,η εκμετάλλευση του φυσικού αερίου ήταν αναγκαία.

Τα αποδεδειγμένα αποθέματα Φυσικού αερίου ανέρχονται στα 146 τρις κυβικά μέτρα , εκ των οποίων το μεγαλύτερο ποσοστό τους βρίσκεται στην Μ. Ανατολή ,στην Αλάσκα, στην περιοχή γύρω από την Κασπία θάλασσα (Αζερμπαϊτζάν ,Καζακστάν) και τον Βόρειο Παγωμένο Ωκεανό όπου τα κοιτάσματα του τα εκμεταλλεύεται η Ρωσία.

Όσον αφορά την Ελλάδα υπάρχουν στοιχεία που αποδεικνύουν ότι στην γύρω περιοχή της Ανατολικής Μεσογείου υπάρχουν ανεκμετάλλευτες πηγές οι οποίες μπορούν να μετατρέψουν την Ελλάδα και την Κύπρο σε ενεργειακά αυτόνομες χώρες.(4)

Στον παρακάτω χάρτη υπάρχουν όλες οι χώρες που παράγουν Φυσικό Αέριο:



EΙΚ 2.1

Οι χώρες με τη μεγαλύτερη παραγωγή φυσικού αερίου (με καφέ χρώμα οι χώρες με τη μεγαλύτερη παραγωγή, ακολουθούν αυτές που σημειώνονται με κόκκινο χρώμα)



## 2β. Διαφορές στην ποιότητα του φυσικού αερίου

Η σύσταση του Φυσικού Αερίου διαφέρει σε κάθε περιοχή που αντλείτε. Τα κύρια συστατικά παραμένουν ίδια απλώς διαφέρουν στα ποσοστά περιεκτικότητας, με αποτέλεσμα την διαφορά στην θερμογόνο δύναμη του Φυσικού Αερίου της εκάστοτε περιοχής. Στον παρακάτω πίνακα φαίνεται η χημική σύσταση καθώς και η θερμογόνος δύναμη του Φυσικού Αερίου που εισάγεται στην Ελλάδα από 2 διαφορετικές περιοχές, την Ρωσία και την Αλγερία.(5)

ΠΙΝΑΚΑΣ 2β.1.

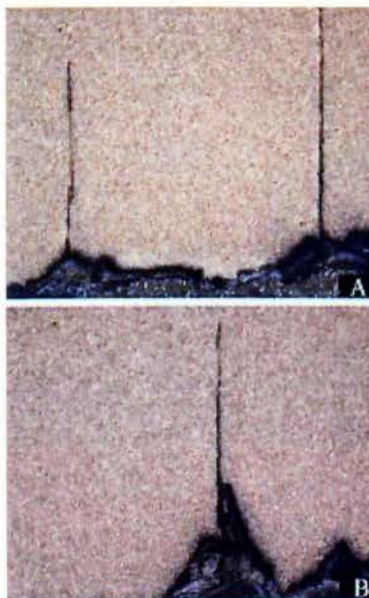
ΤΥΠΙΚΗ ΣΥΣΤΑΣΗ	ΡΩΣΙΚΟ ΦΥΣΙΚΟ ΑΕΡΙΟ	ΑΛΓΕΡΙΝΟ ΦΥΣΙΚΟ ΑΕΡΙΟ
Περιεκτικότητα (% κ.ο.) σε :		
Μεθάνιο (C1)	98	91,2
Αιθάνιο (C2)	0,6	6,5
Προπάνιο (C3)	0,2	1,1
Βουτάνιο (C4)	0,2	0,2
Πεντάνιο (C5) και βαρύτερα	0,1	-
Άζωτο (N2)	0,8	1,0
Διοξείδιο του άνθρακα (CO2)	0,1	-
Ανωτέρα Θερμογόνος Δύναμη	8600 - 9200 kcal/Nm <sup>3</sup>	9640 - 10650 kcal/Nm <sup>3</sup>

## 2γ.Επεξεργασία φυσικού αερίου

Πέρα των κυρίων συστατικών που περιλαμβάνονται στο Φυσικό Αέριο (Μεθάνιο, Βουτάνιο κ.λ.π) υπάρχουν συστατικά διαφορετικά ανά την υφήλιο που μπορούν να δημιουργήσουν προβλήματα κατά την χρησιμοποίηση του αλλά και κατά την διάρκεια διακίνησης του μέσα στους σωλήνες χάλυβα ή PVC.

I. ΝΕΡΟ: Το νερό δημιουργεί διάβρωση καθώς σχηματίζει ενώσεις με υδρογονάνθρακες. Επίσης λόγω ύπαρξης του Θείου δημιουργείτε το Υδρόθειο ουσία που επίσης δημιουργεί διάβρωση

II. ΔΙΟΞΕΙΔΙΟ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ: Το Διοξείδιο του Άνθρακα σε συνδυασμό με το νερό δημιουργεί τοπική-σημειακή διάβρωση(pitting corrosion) σε χάλυβες με χαμηλή περιεκτικότητα άνθρακα. Επίσης η ύπαρξη του μειώνει την θερμογόνο δύναμη του Φυσικού Αερίου.



ΕΙΚ.2γ.1

Σημειακή διάβρωση(pitting corrosion)

III. ΘΕΙΟ : Όπως προαναφέραμε το Θείο σε συνδυασμό με το νερό δημιουργεί διάβρωση .Επιπλέον υπάρχουν περιπτώσεις όπου το Θείο κατέχει μεγάλο ποσοστό στην σύσταση του Φυσικού Αερίου με αποτέλεσμα να δημιουργεί προβλήματα στην διανομή επειδή φράζει τους αγωγούς.

IV. ΥΔΡΑΡΓΥΡΟΣ: Πέρα του ότι ο Υδράργυρος είναι εξαιρετικά τοξικός για τον άνθρωπο δημιουργεί διάβρωση στους αγωγούς και στα εξαρτήματα κυρίως λόγω της περιεκτικότητας σε μη σιδηρούχα μέταλλα. (6)

## 2δ.Τρόποι εξεύρεσης και άντλησης φυσικού αερίου

Όπως είναι ευρέως διαδεδομένο το Φυσικό Αέριο βρίσκεται κοντά σε περιοχές που υπάρχει πετρέλαιο , το οποίο τους 2 προηγούμενους αιώνες είχε την μεγαλύτερη



ζήτηση από τους φυσικούς πόρους της γης. Πλέον οι ρόλοι έχουν αντιστραφεί, γνωρίζοντας ότι τα αποθέματα φυσικού αερίου είναι πολύ περισσότερα από αυτά του πετρελαίου και η αναζήτηση νέων πηγών κυρίως στην θάλασσα όπου στον πυθμένα των ωκεανών πιθανόν να υπάρχουν αμέτρητες ποσότητες Φυσικού Αερίου.

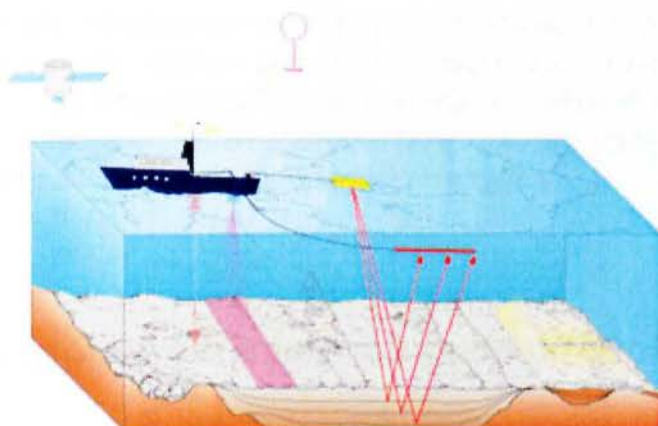
Με την βοήθεια τις τεχνολογίας οι τρόποι εξεύρεσης πηγών γίνεται ως εξής:

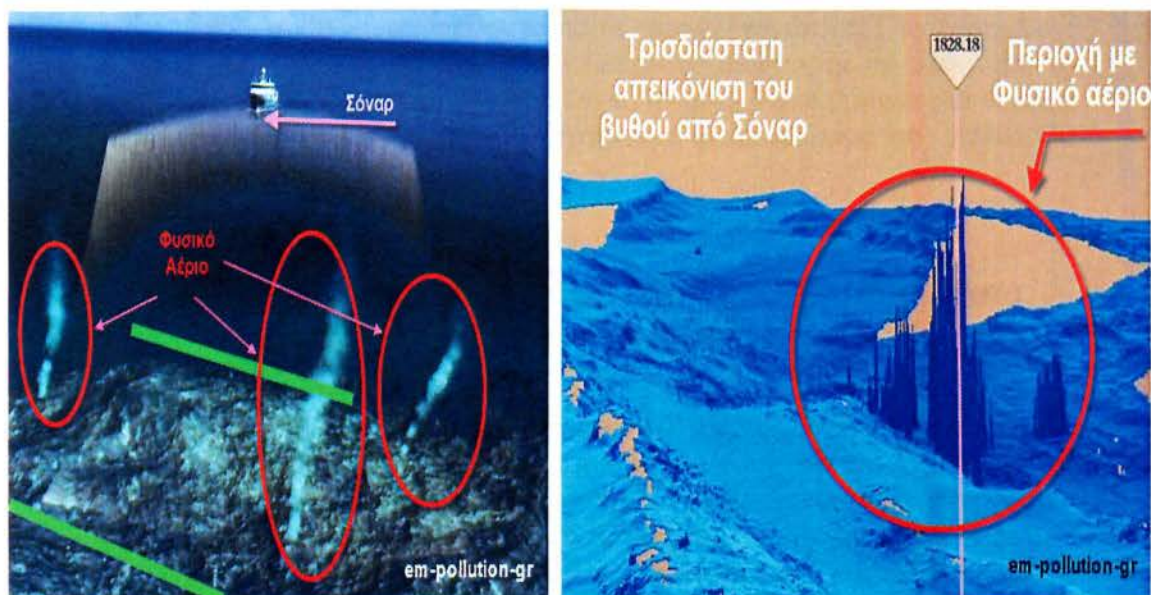
1) Με το μηχάνημα συχνοτήτων(sonar) το οποίο στέλνει συχνότητες στον πυθμένα των ωκεανών και στην συνέχεια τις λαμβάνει πίσω .Με αυτόν τον τρόπο ο μηχανισμός αυτός χαρτογραφεί τον πυθμένα και ταυτόχρονα εντοπίζει τυχόν διαρροές Φυσικού Αερίου που μπορεί να υπάρχουν.

2) Με την ρίψη και απελευθέρωση συμπιεσμένου αέρα στον βυθό όπου πάλι γίνεται ανίχνευση του βυθού αλλά με περισσότερες συχνότητες από το sonar.

3) Με ελεγχόμενες εκρήξεις στον βυθό ώστε να δημιουργούν μικρά ρήγματα.

4)Με ηλεκτρομαγνητικούς παλμούς. Κατά την ανίχνευση κοιτάσματος χαρτογραφείτε μια περιοχή, με έναν τρόπο όπως στην ανωτέρω φωτογραφία. Με αριθμητική ανάλυση του μετρούμενου κύματος από το βυθό λαμβάνεται μια τρισδιάστατη μορφή της περιοχής κάτω από την θάλασσα.





ΕΙΚ.2γ.1 και 2γ.2 Λειτουργία SONAR για εξεύρεση πιθανών πηγών Φυσικού Αερίου.

Μόλις βρεθεί η πηγή τοποθετείται σε αυτή ένας σωλήνας άντλησης. Για αποφυγή έκρηξης λόγω των υψηλών πιέσεων που έχουν τα αέρια στον σωλήνα τοποθετούνται εκτονωτικά μέσα όπως εκτονωτικές βαλβίδες καθώς και αδρανή αέρια (π.χ Άζωτο) για να μην υπάρχει πρόσμιξη με το οξυγόνο. Στην συνέχεια οδηγείτε σε δεξαμενές επεξεργασίας για την απομάκρυνση διαβρωτικών στοιχείων.(7)

## 2ε. Τρόποι διανομής του φυσικού αερίου

Κατόπιν της επεξεργασίας το Φυσικό Αέριο είναι έτοιμο προς διανομή. Υπάρχουν 2 μέθοδοι διανομής :

- I. Μέσω αγωγών, διανέμεται το μεγαλύτερο ποσοστό Φυσικού Αερίου. Υπάρχουν εκατοντάδες χιλιάδες χιλιόμετρα παγκοσμίως με την Ευρασία να κατέχει το μεγαλύτερο δίκτυο διανομής.
- II. Με μεταφορά μέσω ειδικά διαμορφωμένων δεξαμενόπλοιων όπου το Φυσικό Αέριο μεταφέρεται σε υγρή μορφή(LNG-Liquefied Natural Gas).(8)

### 2ε.Ι. Διανομή φυσικού αερίου μέσω χαλύβδινων δικτύων

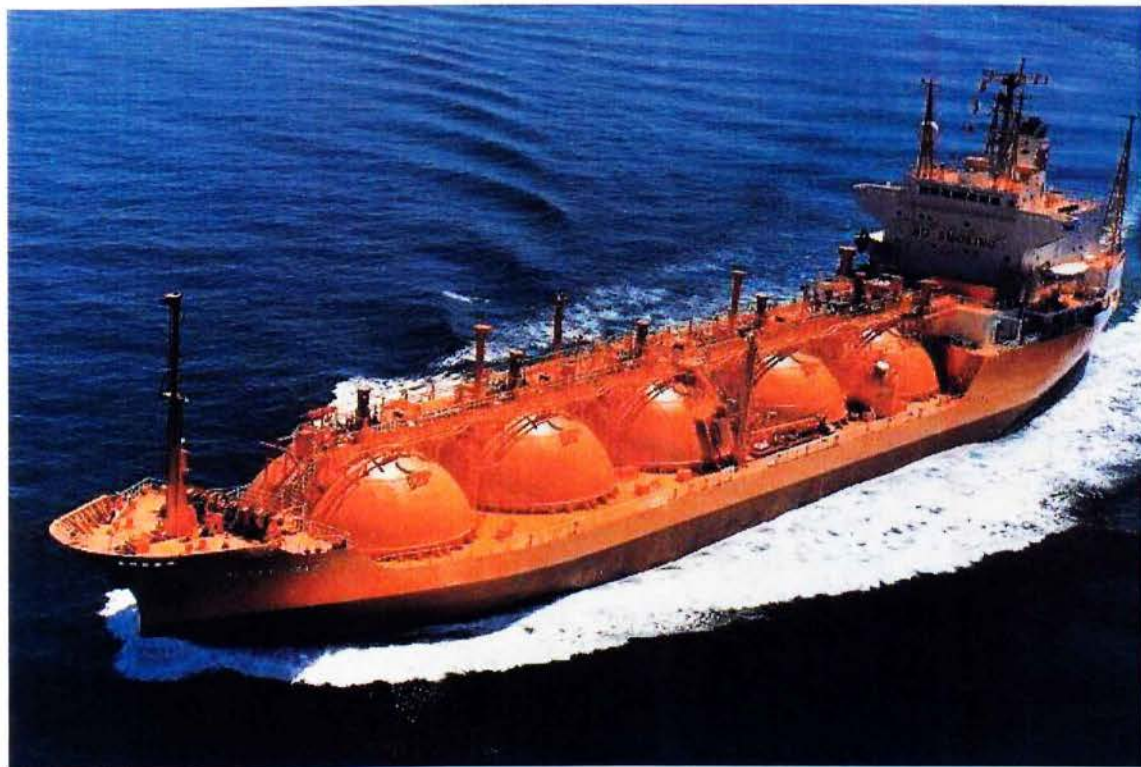
Τα χαλύβδινα δίκτυα έχουν την δυνατότητα να μεταφέρουν το Φυσικό Αέριο σε αρκετά μεγάλες ποσότητες λόγω των υψηλών πιέσεων που μπορούν να αντέξουν .Η συνηθέστερη πίεση μεταφοράς είναι 80 -60 bar σε κράτη τα οποία είναι ενεργοβόρα. Σε μικρότερα κράτη όπως είναι η Ελλάδα η διανομή γίνεται στα 40 bar . Η συγκεκριμένη πίεση για λόγους ασφαλείας πέφτει στα 19-16 bar λίγο πριν την είσοδο



πόλεων σε ειδικά διαμορφωμένα αντλιοστάσια τα οποία λέγονται και City Gates. Στην συνέχεια μέσω των σταθμών διανομής που υπάρχουν διάσπαρτα σε ολόκληρο το χαλύβδινο δίκτυο, η πίεση πέφτει στα 4 bar και το Φυσικό Αέριο μπαίνει στο οικιακό δίκτυο με σωλήνες PVC. Ποιο κάτω θα εξηγήσουμε αναλυτικότερα την διαδικασία διανομής στους τελικούς καταναλωτές.(8)

## **2ε.ΙΙ.Διανομή φυσικού αερίου σε υγρή μορφή (Lng) μέσω δεξαμενοπλοίων**

Η διανομή μέσω δεξαμενόπλοιων ξεκίνησε το 1959 με μέγιστη χωρητικότητα τα 25.000 m<sup>3</sup>. Σήμερα υπάρχουν δεξαμενόπλοια που μεταφέρουν έως και 125.000 m<sup>3</sup> σε χώρες όπου είναι ακόμα αρκετά δύσκολο να γίνουν υποθαλάσσια δίκτυα. Το υγροποιημένο Αέριο μεταφέρεται στους -60 °C και μόλις το δεξαμενόπλοιο φτάσει στον προορισμό του, μεταφέρεται σε ειδικές εγκαταστάσεις και επανέρχεται σε αέρια μορφή. Στην Ελλάδα το 20% του εισαγόμενου Φυσικού Αερίου έρχεται σε υγρή μορφή από την Αλγερία. Ο σταθμός όπου γίνεται η παραλαβή του υγροποιημένου Φυσικού Αερίου βρίσκεται στην νήσο Ρεβυθούσα, στον Σαρωνικό κόλπο.(8)



ΕΙΚ. 2ε.ΙΙ.1  
Δεξαμενόπλοιο μεταφέρει υγροποιημένο Φυσικό Αέριο.





ΕΙΚ. 2ε.Π.2

Σταθμός επεξεργασίας υγροποιημένου Φυσικού Αερίου στην Ρεθυθούσα.

## **2στ. Διανομή φυσικού αερίου στην Ελλάδα**

Αρχικά χρειάζεται να χωρίσουμε το υπάρχον δίκτυο σε 3 βασικές κατηγορίες πιέσεων :

- A) Την Υψηλή Πίεση 40 bar.
- B) Την Μέση Πίεση 19-4 και 10-4 bar.
- Γ) Την Χαμηλή Πίεση 300- 25 mbar.

**Υψηλή Πίεση :** Το τμήμα δικτύου Υψηλής Πίεσης ξεκινά από τα Ελληνοβουλγαρικά σύνορα και καταλήγει στον Νομό Αττικής(περίπου 600 χλμ.) όπου το δίκτυο χωρίζεται σε 4 μέρη ώστε να υπάρχει καλύτερη κατανομή Αερίου. Παράλληλα σε όλη την διαδρομή του δικτύου μέχρι την Αττική υπάρχουν άλλες 2 διακλαδώσεις ,στην Θεσσαλονίκη και στον Βόλο. Επίσης το δίκτυο υψηλής πίεσης θα επεκταθεί έως την περιοχή της Μεγαλόπολης στον Νομό Αρκαδίας , καθώς πρόκειται να κατασκευαστεί ατμοηλεκτρικό εργοστάσιο παραγωγής με Φυσικό Αέριο.

Η διάσταση των χαλυβδοσωλήνων φτάνει έως και 30 ίντσες (inch) . Το τμήμα της Υψηλής Πίεσης τελειώνει στους μετρητικούς –ρυθμιστικούς σταθμούς πόλεων – CITY GATES που βρίσκονται στις περιοχές Άνω Λιόσια , Θριάσιο ,Παλλήνη , Σπάτα και Σχιστό Κερατσινίου .(9)





ΕΙΚ 2.στ.1  
CITY GATE ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΣΠΑΤΩΝ



ΕΙΚ 2.στ.2  
Χάρτης δικτύου Υψηλής Πίεσης στην Ελλάδα

Μέση Πίεση: Το τμήμα δικτύου Μέσης Πίεσης ξεκινά από τα CITY GATES και καταλήγει σε υπέργειους ή υπόγειους σταθμούς μέτρησης-ρύθμισης (MR Station) όπου η πίεση των 19 bar πέφτει στα 4 bar . Επίσης σε κάποιες περιοχές όπου δεν χρειάζονται μεγάλες παροχές η πίεση στο δίκτυο της μέσης πίεσης είναι στα 10 bar και στην συνέχεια πέφτει στα 4 bar. Οι διαστάσεις των χαλυβδοσωλήνων κυμαίνεται από 18 έως 4 ίντσες.(9)

Επίσης το δίκτυο της Μέσης Πίεσης περιλαμβάνει:

- 300 χλμ. χαλύβδινο δίκτυο.
- 165 βανοστάσια από τα οποία τα 53 είναι ηλεκτροκινούμενα.
- 166 βάνες θαμμένου τύπου.
- 200 σταθμούς διανομής.
- 50 βιομηχανικούς πελάτες.(9)

Επιπλέον οι σταθμοί μέτρησης-ρύθμισης (MR Station) 19-4 ή 10-4 bar:

- Τοποθετούνται σε ελεύθερους κοινόχρηστους χώρους, πάρκα, πλατειές, παρτέρια κλπ.
- Έχουν δυο λειτουργικές γραμμές.
- Σε κάθε λειτουργική γραμμή του σταθμού είναι τοποθετημένες ασφαλιστικές διατάξεις διακοπής της ροής σε περίπτωση υπερπίεσης ή υποπίεσης.
- Οι σταθμοί διανομής τοποθετούνται κυρίως με υπέργεια εγκατάσταση και καταλαμβάνουν έναν χώρο μαζί με την περίφραξη τους περίπου 25 m<sup>2</sup>
- Σε πυκνοδομημένες περιοχές, λόγω έλλειψης κατάλληλων χώρων, τοποθετούνται με υπόγεια εγκατάσταση.(10)





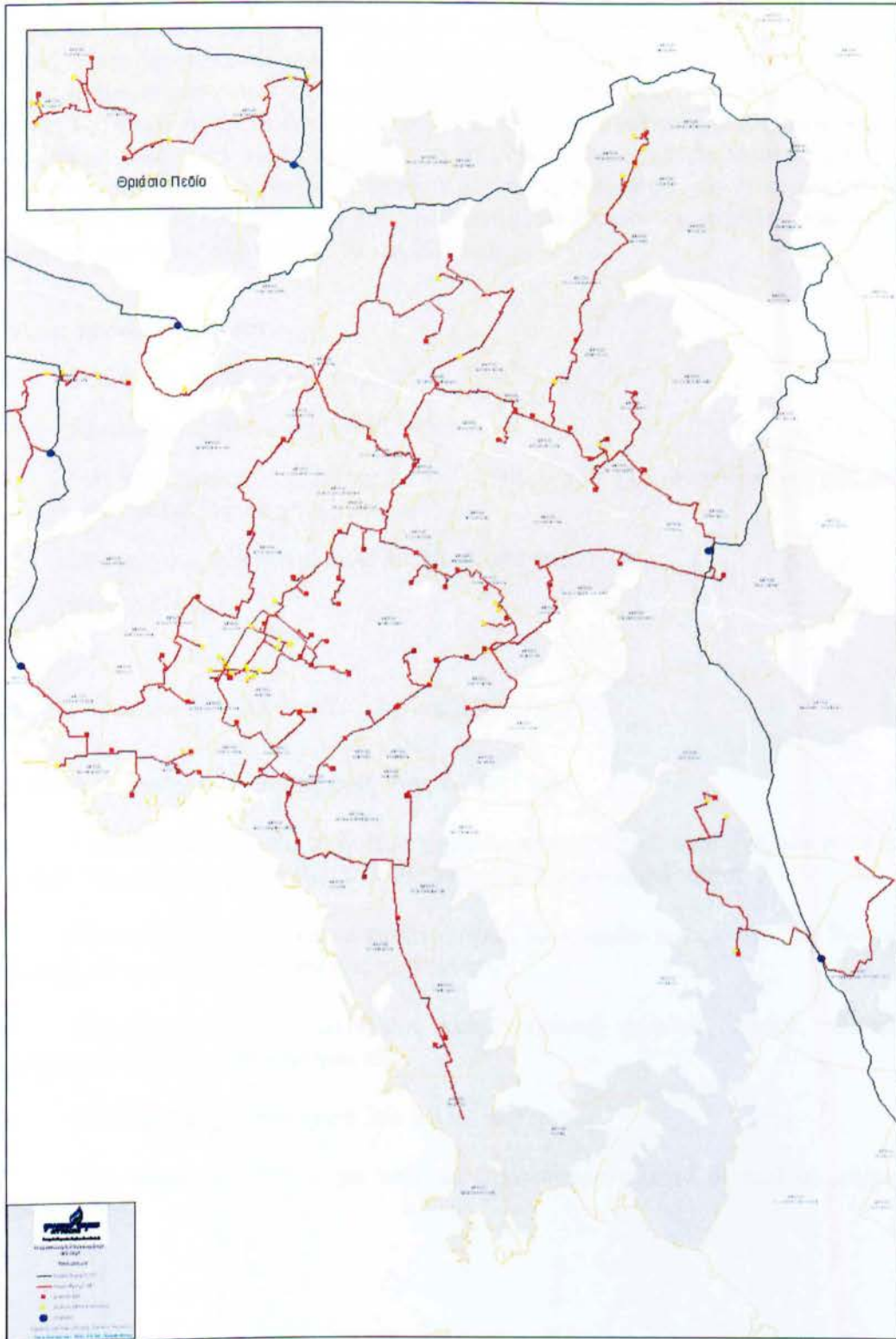
ΕΙΚ 2.στ.3

Υπέργειος σταθμός μέτρησης-ρύθμισης 19-4 bar στον δήμο Χαϊδαρίου



ΕΙΚ 2.στ.4

Υπόγειος σταθμός μέτρησης-ρύθμισης 19-4 bar στον δήμο Αθηνών –περιοχή Φιλοπάππου



ΕΙΚ 2.στ.5  
Εποπτικός χάρτης δικτύου Μέσης Πίεσης



**Χαμηλή Πίεση:** Το δίκτυο της χαμηλής πίεσης ξεκινά από τους σταθμούς μέτρησης-ρύθμισης (MR Station) και καταλήγουν σε οικιακές εγκαταστάσεις. Το συγκεκριμένο δίκτυο είναι κατασκευασμένο εξ'ολοκλήρου από πολυαιθυλαίνιο(PVC). Οι αγωγοί έχουν χρώμα κίτρινο για να ξεχωρίζουν από τους υπόλοιπους αγωγούς. Επίσης κάθε τομέας της χαμηλής τροφοδοτείται από 2 τουλάχιστον σταθμούς μέτρησης-ρύθμισης ώστε να αποφεύγονται τυχόν προβλήματα στο δίκτυο όπως υψηλή κατανάλωση ή σε περίπτωση προβλήματος σε έναν σταθμό μέτρησης-ρύθμισης , να δίνει παροχή στο δίκτυο ένας άλλος σταθμός μέτρησης-ρύθμισης . Το δίκτυο της χαμηλής πίεσης έχει αγωγούς διαμέτρων 63,90,125,160 και 225 mm.

#### **Επίσης περιλαμβάνονται:**

1. 2.300 χλμ. δικτύου χαμηλής πίεσης 4 bar.
2. 82 σταθμούς Διανομής 4/0,025 bar.
3. 560 χλμ. Δικτύου 0,025 bar εκ των οποίων 429 χλμ. δίκτυο πολυαιθυλενίου και 131 χλμ. παλιό δίκτυο χυτοσίδηρου .
4. 209 μεγάλοι εμπορικοί πελάτες 4/1-0.300 bar.
5. 33.500 παροχές.
6. Πάνω από 300.000 πελάτες οικιακής χρήσης.(9)

Επιπλέον οι σταθμοί μέτρησης-ρύθμισης 4-0.025 bar:

- Τροφοδοτούνται από το δίκτυο χαμηλής πίεσης 4 bar, υποβιβάζουν την πίεση στα 0,025 bar και τροφοδοτούν το κάθε δίκτυο που περιλαμβάνονται .
- Έχουν συνήθως μια λειτουργική γραμμή με ασφαλιστικές διατάξεις διακοπής της ροής σε περίπτωση υπερπίεσης η υποπίεσης.
- Τοποθετούνται σε ελεύθερους κοινόχρηστους χώρους, πάρκα, πλατειές, παρτέρια, διευρυμένα πεζοδρόμια κλπ.
- Καταλαμβάνουν ένα χώρο δυο (2) m<sup>2</sup> περίπου.
- Τοποθετούνται κυρίως με υπόγεια εγκατάσταση λόγω δυσκολίας εύρεσης χώρων.(10)

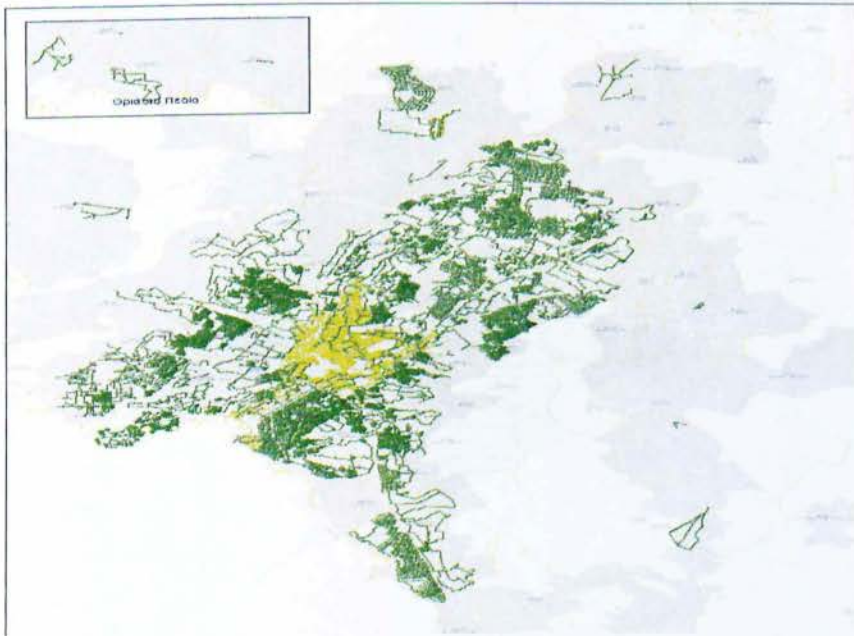


**ΥΠΟΓΕΙΟΣ ΣΤΑΘΜΟΣ  
4/0,025bar  
ΠΕΡΙΟΧΗΣ  
ΠΛ. ΠΛΑΣΤΗΡΑ**



**ΥΠΕΡΓΕΙΟΣ ΣΤΑΘΜΟΣ  
4/0,025bar  
ΠΕΡΙΟΧΗΣ  
ΘΗΣΕΙΟΥ**

**ΕΙΚ 2.στ.6  
Σταθμοί διανομής 4-0.025 bar**



**ΕΙΚ 2.στ.7**Εποπτικός χάρτης δικτύου χαμηλής πίεσης



## 2στ.1. Το δίκτυο χαμηλής πίεσης 0.025 bar στο κέντρο της Αθήνας

Το δίκτυο των 0,025 bar προέρχεται από παλαιότερο δίκτυο φωταερίου (ΔΕΦΑ) το οποίο είχε κατασκευαστεί σταδιακά σε προγενέστερο χρόνο (1930-2000).

Εκτείνεται κυρίως στο κέντρο της Αθηνάς και της γύρω περιοχές.

- είναι διασυνδεδεμένο και έχει κυψελωτή Δομή.

- οι αγωγοί του είναι :

1. Από πολυαιθυλένιο κίτρινου ή μαύρου Χρώματος.

2. Παλαιοί χυτοσίδηροι με μηχανικές Συνδέσεις.

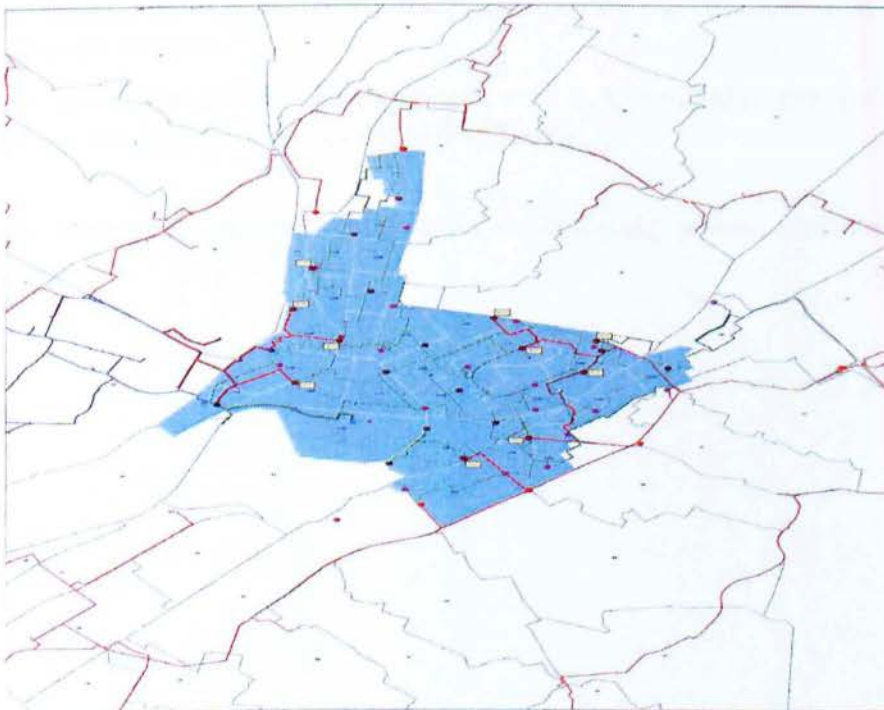
Σε τρεις (3) άξονες γίνονται οι εργασίες για την αναβάθμιση του στο κέντρο της Αθήνας:

- σταδιακή αντικατάσταση με προτεραιότητα επικινδυνότητας, όλων των παλαιών χυτοσιδήρων αγωγών με

αγωγούς πολυαιθυλενίου.

- σταδιακή αναβάθμιση της δυναμικότητας του δικτύου ανά περιοχή με στοχευόμενα έργα ευρείας κλίμακας.

- αναδιαμόρφωση και τομεοποίηση του δικτύου για την ευχερέστερη και ασφαλέστερη λειτουργία του.(9)



ΕΙΚ 2.στ.8Χάρτης περιοχής αντικατάστασης παλαιού δικτύου στο κέντρο της Αθήνας

## **2στ.ΙΙ. Πλεονεκτήματα του φυσικού αερίου για βιομηχανική και οικιακή χρήση**

Είναι διαθέσιμο μέσω δικτύου, δεν παραγγέλλεται, δεν προπληρώνεται και μετριέται με ακρίβεια με μετρητή όπως το νερό και το ρεύμα, ενώ πληρώνεται μετά την κατανάλωση.

- Προσφέρει πλήρη αυτονομία.
- Προσφέρει συνεχή και άμεση παραγωγή ζεστού νερού.
- Οι εγκαταστάσεις Φ.Α. είναι πιο καθαρές και χρειάζονται λιγότερη συντήρηση.
- Δεν υπάρχει ανάγκη τήρησης δεξαμενής ή φιάλης αποθήκευσης καυσίμου, όπως στο πετρέλαιο ή το υγραέριο.
- Το φυσικό αέριο είναι ένα φυσικό, καθαρό προϊόν (αποτελείται κυρίως από μεθάνιο, ο ελαφρύτερος υδρογονάνθρακας), χωρίς προσμίξεις και θειούχα συστατικά που συγκαταλέγονται στις κύριες αιτίες περιβαλλοντικής ρύπανσης.
- Η καύση του δεν παράγει διοξείδιο του θείου άρα δεν προκαλεί το φαινόμενο της όξινης βροχής, ενώ παράγει ουσιαστικά μόνο υδρατμούς και σημαντικά λιγότερο διοξείδιο του άνθρακα.
- Έτσι η υποκατάσταση άλλων καυσίμων από Φ.Α. συμβάλλει στη μείωση του φαινομένου του θερμοκηπίου και της όξινης βροχής.(9)

Στον παρακάτω πίνακα συγκρίνονται οι εκπομπές ρύπων των συμβατικών καυσίμων:



ΠΙΝΑΚΑΣ 2.στ.1

		Εκπομπές αέριων ρύπων [λκκ ] (g/kg καυσίμου)					
		CO <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>	CO	NO <sub>x</sub>	HC	Σωματίδια
eNoI	(1500) Χαμηλού	3.175	14	0,565	5,363	0,188	1,832
eNoI	(1500) Υψηλού	3.109	64	0,553	5,251	0,184	1,832
eNo3	(3500) Χαμηλού	3.175	14	0,565	5,363	0,188	1,832
eNo3	(3500) Υψηλού	3.091	64	0,550	5,221	0,183	1,832
		3.142	0,7	0,572	2,384	0,191	0,286
ιο		3.030	0,0	0,332	2,102	0,080	0,100
<b>ό Αέριο</b>		<b>2.715</b>	<b>0,0</b>	<b>0,332</b>	<b>2,102</b>	<b>0,080</b>	<b>0,100</b>

## 2.7. Μέθοδοι και τεχνικές πρόληψης ατυχημάτων

Το Φυσικό Αέριο , επειδή είναι εύφλεκτο και μεταφέρεται υπό πίεση, η συνεχόμενη παρακολούθηση του δικτύου διανομής του, είναι δεδομένη. Πέραν των προληπτικών συντηρήσεων που γίνονται σε σταθμούς διανομής (μέτρησης - ρύθμισης ) ,βανοστάσια και βάνες που υπάρχουν σε όλα τα δίκτυα πολυαιθυλαινίου και χαλύβδινου , υπάρχει και ο τηλεέλεγχος και τηλεχειρισμός διαδικασιών γνωστός και ως SCADA( Supervisory Control and Data Acquisition) το οποίο περιλαμβάνει:

- Κεντρικό Υπολογιστικό Σύστημα στο Κέντρο Ελέγχου (server, modems)
- Τοπικοί Ελεγκτές (H/Y) στα σημεία ελέγχου (RTU).
- Δίκτυο αναλογικών ή ψηφιακών τηλεφωνικών γραμμών data.
- Σύνδεση RTU με αισθητήρια όργανα (μετρητές, μανόμετρα, διακόπτες βαννών, ανιχνευτές αερίου κτλ).
- Real time μεταφορά πληροφοριών από σταθμούς MR(μέτρησης –ρύθμισης) και φρεάτια βαννών (διαφυγή Φυσικού Αερίου, κατάσταση βαννών, κατανάλωση Φυσικού Αερίου, πιέσεις κτλ).
- Τηλεχειρισμός ηλεκτροκίνητων βαννών.
- Αποθήκευση data στον κεντρικό server.
- Αδιάλειπτος τηλεέλεγχος δικτύου 19/4 bar μέσω alarms που χτυπάνε στο κέντρο βλαβών και επίβλεψης δικτύου σε περίπτωση προβλήματος.(9)





Ανίχνευση Αερίου:

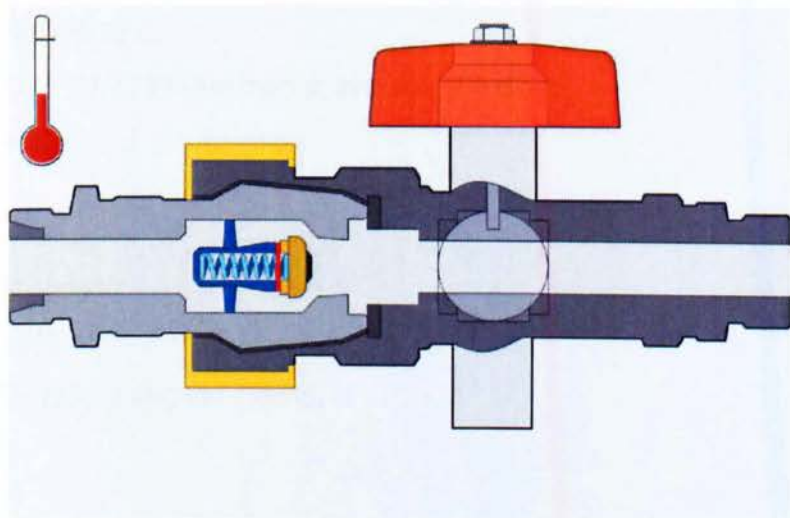
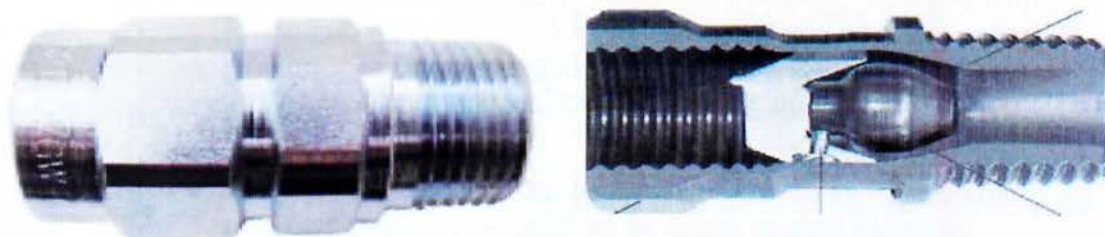
- Με χρήση Ηλεκτρική Βαλβίδα Αποκοπής.
- Με χρήση Πνευματικής Βαλβίδας.

Πυροπροστασία

Υλικά που δεν ικανοποιούν την απαίτηση πυρανθεκτικότητας ( $650^{\circ}\text{C}$ ) πρέπει να προστατεύονται με κατάλληλα μέσα:

- Με χρήση βαλβίδας πυροπροστασίας.
- Με χρήση βαλβίδας υπερβολικής ροής.

Το μέτρο αφορά τους σωλήνες πολυαιθυλενίου.(10)

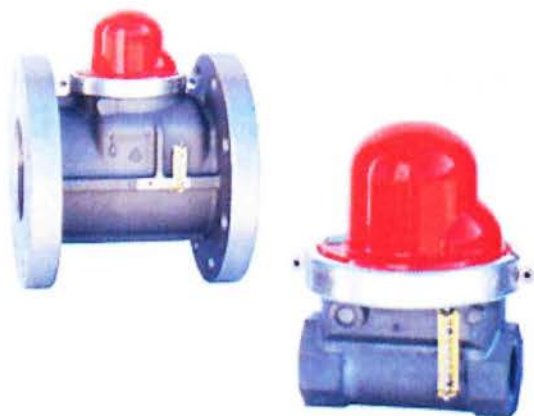


ΕΙΚ.2.ζ.1

**Βαλβίδα πυροπροστασίας (DIN 3586)**  
Ενεργοποιείται στους  $100^{\circ}\text{C}$  έως  $110^{\circ}\text{C}$

Επίσης υπάρχουν επιπλέον μέτρα ασφαλείας σε ιδιαίτερες σεισμογενής περιοχές όπως είναι η Ελλάδα .Σε ολόκληρο το δίκτυο υπάρχουν αντισεισμικές βαλβίδες μηχανικές και ηλεκτρονικές.(10)





ΕΙΚ.2.ζ.2  
Αντισεισμικές βαλβίδες

Αξίζει να αναφερθεί ότι στον μεγάλο σεισμό στο Κόμπε της Ιαπωνίας καταστράφηκαν οι χυτοσίδηροι σωλήνες και οι κοχλιωτές συνδέσεις. Εμπειρία στην Ελλάδα στον τελευταίο μεγάλο σεισμό των Αθηνών (όπου γινόταν διανομή φυσικού αερίου σε 8.000 εγκαταστάσεις) δεν καταστράφηκε καμία εσωτερική εγκατάσταση. Θεωρείται ότι το μοντέλο ασφαλείας που επελέγη είναι αποτελεσματικό.(10)

Επίσης οι προδιαγραφές του δικτύου του Φυσικού Αερίου που αφορούν εσωτερικές εγκαταστάσεις, όσον αφορά συσκευές και τα υλικά θα πρέπει να είναι σύμφωνα:

- Με την Gas Appliance Directive 90/396/EEC.
- Με την Pressure Equipment Directive 97/23/EG για πιέσεις άνω των 500 mbar.

Για τα υλικά ενδεικτικά αναφέρονται:

- Βαλβίδες κατά ΕΛΟΤ EN 331.
- Ρυθμιστές κατά ΕΛΟΤ EN 334.
- Χαλυβδοσωλήνες κατά ΕΛΟΤ EN 10255.
- Χαλκοσωλήνες κατά ΕΛΟΤ EN 1057.
- Σωλήνες Πολυαιθυλενίου κατά EN 1555-1 έως EN 1555-5.

#### **Συνδέσεις χαλυβδοσωλήνων**

- Με συγκόλληση:
  - Σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ EN ISO 15607 για ηλεκτροσυγκολλήσεις σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ EN 288-2.
  - Συγκολλήσεις για πιέσεις μεγαλύτερες των 100 mbar εκτελούνται από πιστοποιημένους συγκολλητές κατά ΕΛΟΤ EN 287-1.
- Με φλάντζες λαιμού:

- Σύμφωνα με το πρότυπο DIN 2631- DIN 2635.
- Με κοχλίες για σωληνώσεις μικρότερες των 2'':
- Σύμφωνα με το πρότυπο ISO 898.

### **Συνδέσεις Πολυαιθυλενίου**

- Συνδέσεις μόνο με ηλεκτροσύντηξη.
- Φλαντζωτές συνδέσεις μόνο για συνδέσεις οργάνων κατά EN 1555-3.
- Θεωρημένη μελέτη εσωτερικών εγκαταστάσεων.
- Τεχνικός Φάκελος Έργου
- Πιστοποίηση Υλικών.
- Πιστοποίηση Εργασιών.
- Επιθεώρηση εσωτερικής εγκατάστασης πριν την ενεργοποίηση.
- Διαδικασία Ενεργοποίησης E.E.
- Ρύθμιση Διατάξεων μονάδων καύσης.
- Έκδοση Αδείας Χρήσης.
- Ο ιδιοκτήτης (χρήστης) μιας εγκατάστασης φυσικού αερίου είναι υπεύθυνος για τη χρήση και συντήρηση της εγκατάστασης.
- Η επιθεώρηση της εγκατάστασης πρέπει να επαναλαμβάνεται κατά τα χρονικά διαστήματα που δίδονται στον κατωτέρω πίνακα από το προσωπικό Λειτουργίας και Συντήρησης της εγκατάστασης.(10)

Είδος εγκατάστασης	Αριθμός επιθεωρήσεων ανά έτος
Λέβητες Συνολικό θερμικό φορτίο 100-300 kw 300-1000 kw άνω των 1000 kw	1 2 2-4*
Άλλα θερμικά συστήματα Βιομηχανικές εγκαταστάσεις θερμικών διεργασιών	2-4*

### **ΠΕΡΙΟΔΙΚΟΙ ΟΠΤΙΚΟΙ ΕΛΕΓΧΟΙ**

Βασικά σημεία ελέγχου :

- Τυχόν Διαρροές στις συνδέσεις σωλήνων, στα υπόγεια τμήματα του δικτύου, στα τμήματα εισόδου του δικτύου σε κτίρια.
- Της κατάσταση της αντιδιαβρωτικής προστασίας.



- Της πρόσβαση της κεντρικής αποφρακτικής βαλβίδας.
- Της πίεση εξόδου από τους ρυθμιστές πίεσης της εγκατάστασης.
- Της κατάσταση των εύκαμπτων συνδέσμων παροχής αερίου στους καυστήρες.
- Ευκρίνεια της σήμανσης των σωλήνων.

Τέλος συστήνεται ο οπτικός έλεγχος κατά την στάση της λειτουργίας της εγκατάστασης.(10)

### **ΠΕΡΙΟΔΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΑΠΟΦΡΑΚΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΡΥΘΜΙΣΤΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ**

- Επιθεώρηση της λειτουργίας της κεντρικής αποφρακτικής βαλβίδας - τοποθέτηση της στη κλειστή ή στη μερικώς κλειστή θέση.
- Επιθεώρηση των ρυθμιστικών και ασφαλιστικών διατάξεων της πίεσης.(10)

### **ΠΕΡΙΟΔΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΦΙΛΤΡΩΝ**

- Επιθεώρηση των φίλτρων και συστημάτων απομάκρυνσης υγρών σε νέα εγκατάσταση αερίου ένα μήνα από την έναρξη λειτουργίας του.
- Στην περίπτωση κανονικής λειτουργίας της εγκατάστασης ο έλεγχος πρέπει να γίνεται κατά την τακτική επιθεώρηση σύμφωνα με το πρόγραμμα Λειτουργίας και Συντήρησης.

Στο Σχέδιο Δράσης Έκτακτης Ανάγκης περιλαμβάνονται:

- Η χάραξη του δικτύου σωληνώσεων αερίου.
- Η θέση της μονάδας (σταθμού) ρύθμισης πίεσης – μέτρησης παροχής M/P.
- Η θέση της κεντρικής αποφρακτικής βαλβίδας και τυχόν επιμέρους αποφρακτικές βαλβίδες.
- Οι θέσεις των πυροσβεστήρων.
- Στο σχέδιο δράσης αναγράφονται ονόματα και τηλέφωνα αρμόδιων ατόμων καθώς και τοπικών Αρχών.

### **Προτεινόμενες Εργασίες Συντήρησης**

Η καλή λειτουργία των εγκαταστάσεων Φυσικού Αερίου και η διατήρηση αυτών, διασφαλίζεται:

- Με την εκτέλεση συγκεκριμένων εργασιών και ελέγχων ανά είδος εξοπλισμού.
- Με την επανάληψη των εργασιών και ελέγχων σε ορισμένα τακτά διαστήματα.(10)

### **Πλαστικού δικτύου P.E.**

Προτείνονται οι κάτωθι ενότητες ελέγχων και εργασιών:

- Περιοδικός έλεγχος δικτύου.

- Έλεγχος του οδοστρώματος που διέρχεται ο αγωγός.
- Έλεγχος φρεατίων και βαλβίδων πλαστικού P.E. Δικτύου.
- Έλεγχος των εξαιρεστικών των φρεατίων και των υπόγειων βαλβίδων.

Σκοπός του ελέγχου αυτού είναι να διαπιστωθεί εάν υπάρχει:

- Εξωτερική διαφυγή αερίου με χρήση αφρίζοντος μέσου ή ανιχνευτή κατάλληλο για Φ.Α.
- Σωστή λειτουργία αποφρακτικών βαλβίδων.
- Εσωτερική διαφυγή αν είναι εφικτό.
- Καλή κατάσταση στα φρεατίων των βαλβίδων.
- Καλή κατάσταση στο κάλυμμα των φρεατίων των βαλβίδων.
- Δυνατότητα εύκολου χειρισμού των υπόγειων βαλβίδων PE.
- Οποιοδήποτε άλλο πρόβλημα.(10)

## **2ζ.ΙΙ. Προδιαγραφές ασφαλείας για τα δίκτυα της μέσης και υψηλής πίεσης που περιέχουν χαλυβδοσωλήνες**

- Κατασκευάζεται βάσει του εθνικού κανονισμού δικτύων μέσης και υψηλής πίεσης (ΦΕΚ 1552 24/10/2006).
- Τροφοδοτείται από τους μετρητικούς ρυθμιστικούς σταθμούς πόλης.
- Έχει σχεδιαστεί με βάση την προδιαγραφή ASME B31.8.
- Οι συνδέσεις του είναι 100% ηλεκτροσυγκολλητές.
- Οι συνδέσεις του ελέγχονται 100% ραδιογραφικά.
- Μετά το πέρας της κατασκευής το δίκτυο δοκιμάζεται υδραυλικά.
- Είναι μονωμένο εξωτερικά - παθητική προστασία.
- Προστατεύεται καθοδικά - ενεργητική προστασία.

Επίσης στο δίκτυο της Μέσης Πίεσης περιλαμβάνονται οι παρακάτω προδιαγραφές ασφαλείας:

- Κάθε τρία (3) χλμ. υπάρχουν βάνες χειροκίνητες η ηλεκτροκίνητες.

Για την τμηματοποίηση του δικτύου.

- οι βάνες έως 4'' είναι θαμμένοι τύπου και από διάμετρο 6'' έως 18'' που τοποθετούνται σε υπόγεια φρεατία επισκέψιμα.(9)
- Έχει σύστημα τηλεελέγχου - scada, με δυνατότητα ελέγχου από κεντρικό control room των ηλεκτροκίνητων βανοστασίων και των σταθμών διανομής.



- Σε περίπτωση ανάγκης το σύστημα scada παρέχει τη δυνατότητα τηλεχειρισμού των ηλεκτροκίνητων βανών και απομόνωσης τμήματος του δικτύου μέσης πίεσης.
- Υπάρχει η δυνατότητα εσωτερικού καθαρισμού του κυρίως δικτύου από επικαθίσεις και εντοπισμού τμημάτων αγωγών με μειωμένο πάχος τοιχώματος.
- Ανά τμήματα και σε επιλεγμένα σημεία υπάρχουν επιφανειακές πινακίδες σημάνσεις σε κολωνάκια για τον εντοπισμό του δικτύου και του εξοπλισμού του.
- ο αγωγός περιβάλλεται από στρώμα άμμου.
- Υπόγεια 30 εκατ. πάνω από τον αγωγό υπάρχει πλέγμα κίτρινου χρώματος με την ένδειξη «αγωγός φυσικού αερίου 19 bar».
- Τυπικό βάθος εγκατάστασης του δικτύου 1,10 μ.(9)

### **2ξ.III. Προδιαγραφές ασφαλείας για το δίκτυο χαμηλής πίεσης**

- Κατασκευάζεται βάσει του εθνικού κανονισμού δικτύων διανομής με πίεση λειτουργίας έως 4 bar ( ΦΕΚ 1530 19/10/2006.)
- Υποδιαιρείται σε λειτουργικούς τομείς οι οποίοι καλύπτουν μια συγκεκριμένη γεωγραφική περιοχή και είναι λειτουργικά ανεξάρτητοι.
- Το τυπικό φορτίο αιχμής κάθε λειτουργικού τομέα είναι 10.000 Nm<sup>3</sup>/h.
- Το δίκτυο του λειτουργικού τομέα έχει την μορφή βρόγχου με δένδρα και αναπτύσσεται σε όλη την περιοχή του τομέα.
- Κάθε λειτουργικός τομέας τροφοδοτείται από δύο τουλάχιστον σταθμούς διανομής 19/4 bar.
- Οι αγωγοί είναι κίτρινου χρώματος.
- Οι συνδέσεις των σωλήνων γίνονται με την μέθοδο της ηλεκτροσύντηξης.
- Το δίκτυο υποβάλλεται σε πνευματική δόκιμη αντοχής και στεγανότητας.
- Φέρνει χειροκίνητες βάνες τμηματοποίησης στο δίκτυο του βρόγχου ανά ένα (1) χιλιόμετρο, στην αρχή και στο τέλος σημαντικών εμποδίων και στην αρχή κάθε αντένας.
- Για κάθε βάνα υπάρχει και αντίστοιχο καπάκι επιφάνειας με φρεάτιο στήριξης.
- Για τον εντοπισμό των βανών του δικτύου τοποθετούνται πινακίδες σήμανσης κίτρινου χρώματος σε κολωνάκια.(9)
- Το τυπικό βάθος εγκατάστασης του αγωγού είναι 0,80 μ.
- Ο αγωγός περιβάλλεται από στρώμα άμμου.

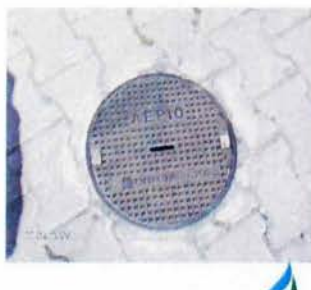
- Υπόγεια 30 εκατ. πάνω από τον αγωγό υπάρχει πλέγμα προστασίας κίτρινου χρώματος με την ένδειξη «αγωγός φυσικού αερίου PE 4 bar».



ΕΙΚ 2.ζ.3

Κατασκευή δικτύου Χαμηλής Πίεσης





ΕΙΚ 2.ζ.4

Ένδειξη τοποθεσίας αγωγού Χαμηλής Πίεσης

## 2ζ.ΙV. Προβλεπόμενα μέτρα ατομικής προστασίας (Μ.Α.Π) εργαζομένων συντήρησης δικτύου

- Υποδήματα ασφαλείας
- Κράνος
- Γάντια
- Γυαλιά
- Προστατευτικά ακοής
- Μάσκες
- Ρουχισμός εργασίας (φόρμα, γιλέκο, αδιάβροχα κλπ)

Επιπλέον προβλεπόμενα ΜΕΤΡΑ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ

- Φράγματα
- Περίφραξη
- Φανοί
- Κώνοι
- Διαβάσεις πεζών
- Πινακίδες οδικής σήμανσης
- Προειδοποίηση Έργων Φυσικού Αερίου



- «Η είσοδος επιτρέπεται μόνο στο αρμόδιο προσωπικό»



- «Μας συγχωρείτε για την προσωρινή ενόχληση»



Σήμανση Ασφαλείας

- Απαγορευτικές πινακίδες





• Προειδοποιητικές πινακίδες



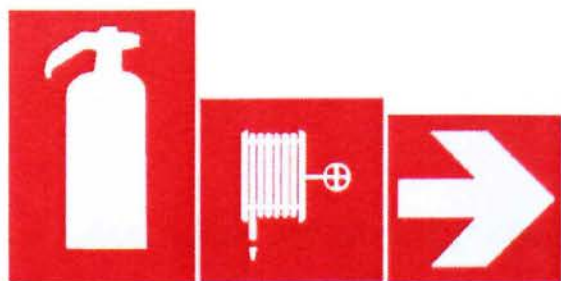
• Πινακίδες Υποχρέωσης



• Πινακίδες διάσωσης / βοήθειας



• Πινακίδες πυροσβεστικού εξοπλισμού



Επίσης ο Τεχνικός Ασφαλείας πραγματοποιεί:• Δειγματοληπτικές επιθεωρήσεις σε συνεργεία των εργολάβων σε

θέματα Υ&Α από τον Τεχνικό Ασφάλειας.

- Αποστολή αποτελεσμάτων επιθεώρησης στους αντίστοιχους Project Managers του έργου για ενέργειες.

- Καταγραφή ατυχημάτων & παρ' ολίγον ατυχημάτων και εξαγωγή στατιστικών στοιχείων.(11)



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup>

### **Ανάλυση πρόληψης και αστοχίας σωληνώσεων**

#### **3α. Τεχνικές πρόληψης καταστροφής σωληνώσεων με μη καταστρεπτικές μεθόδους**

#### **Μη καταστρεπτικές τεχνικές (non destructive testing, ndt)**

Προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η πιθανότητα αστοχίας ενός μεταλλικού εξαρτήματος, λόγω της ύπαρξης εσωτερικών δομικών ατελειών του υλικού, όπως είναι οι πόροι ή προϋπάρχουσες υποεπιφανειακές ρωγμές, στην ενδιάμεση φάση μεταξύ της παραγωγής του τελικού προϊόντος και της χρήσης του, το εξάρτημα υποβάλλεται σε σειρά ελέγχων που δεν επηρεάζουν τη γεωμετρία του ή τις ιδιότητες του υλικού. Ο στόχος αυτός επιτυγχάνεται με την εφαρμογή **μη καταστρεπτικών τεχνικών** που επιτρέπουν την «ενδοσκοπική» μελέτη του αντικειμένου χωρίς την παραμικρή αλλοίωση των χαρακτηριστικών του. Στη συνέχεια, αναπτύσσονται οι βασικές αρχές των κυριότερων μη καταστρεπτικών τεχνικών ελέγχου μεταλλικών υλικών και τα πεδία εφαρμογής τους.(12)

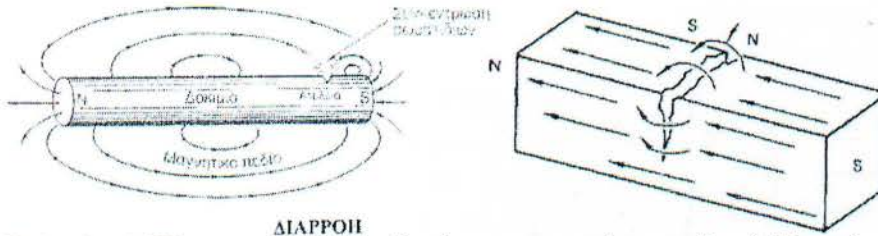
Οι κυριότερες τεχνικές ανάλυσης αγωγών και συγκολλήσεων με μη καταστρεπτικές μεθόδους είναι:

- Οπτικός έλεγχος(VT): Η πρώτη και βασικότερη μέθοδος μη καταστρεπτικού ελέγχου που υπάρχει καθώς ο επιβλέπων κρίνει αν χρειάζεται περαιτέρω έλεγχος με άλλες μεθόδους.(13)
- Έλεγχος με μαγνητικά σωματίδια (Magnetic-Particie Inspection)

Η τεχνική αυτή χρησιμοποιείται για την ανίχνευση ασυνεχειών (π.χ. ρωγμές, πόροι, μη μεταλλικά εγκλείσματα) σε σίδηρομαγνητικά υλικά και κυρίως σε χάλυβες. Η εφαρμογή της επιτρέπει τη διάγνωση επιφανειακών ατελειών μη ορατών με γυμνό μάτι, ή υποεπιφανειακών ατελειών που προκύπτουν συνήθως μετά από συγκολλήσεις. Ο συγκεκριμένος έλεγχος έχει την δυνατότητα για έλεγχο ασυνεχειών έως και 3 mm κάτω από την επιφάνεια σίδηρομαγνητικών υλικών. Στην επιφάνεια τοποθετούμε λευκού χρώματος υγρό με σίδηρομαγνητικά σωματίδια, έπειτα δημιουργούμε ένα μικρό μαγνητικό πεδίο με μαύρη μαγνητική μελάνη όπου έλκει τα σωματίδια. Οι τυχόν επιφανειακές ασυνέχειες στην περιοχή της δοκιμής οι οποίες τέμνουν κάθετα το μαγνητικό πεδίο δημιουργούν πεδίο διαρροής και η πολικότητα που δημιουργείται έλκει τα σωματίδια και τις αποκαλύπτει. Στο σχήμα 3.1 παρουσιάζεται η βασική αρχή της τεχνικής ελέγχου με μαγνητικά σωματίδια. Στην



πράξη εφαρμόζονται διάφορες παραλλαγές της τεχνικής, ανάλογα με τον τρόπο εφαρμογής του μαγνητικού πεδίου και την τεχνική διασποράς των μαγνητικών σωματιδίων στην επιφάνεια.(12,13)



ΔΙΑΡΡΟΗ

Σχήμα 3.α.1, Έλεγχος μεταλλικών υλικών με μαγνητικά σωματίδια (α) Βασική αρχή της μεθόδου, (β) εντοπισμός επιφανειακής ρωγμής

Ραδιογραφία (RT) :Η ραδιογραφία αποτελεί την συνηθέστερη τεχνική ανάλυσης αγωγών. Μια συσκευή που εκπέμπει ακτίνες X ή γ διεισδύουν στον αγωγό που εξετάζουμε, οι οποίες λόγω του μικρού μήκους κύματός τους εμφανίζουν υψηλή διεισδυτική ικανότητα, ενώ ένα μικρό μόνο ποσοστό τους απορροφάται από το υλικό. Αυτό το ποσοστό εξαρτάται από την πυκνότητα του υλικού, το πάχος του και φυσικά το μήκος κύματος της χρησιμοποιούμενης ακτινοβολίας.

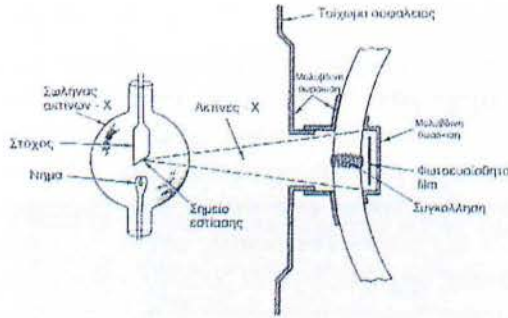
Οι ακτίνες X παράγονται από τον βομβαρδισμό ενός μεταλλικού στόχου, συνήθως βολφραμίου (W), από δέσμη ηλεκτρονίων υψηλής ταχύτητας, που λαμβάνει χώρα στο σωλήνα ακτίνων X, ενώ οι ακτίνες γ εκπέμπονται είτε από φυσική ραδιενεργή πηγή, συνήθως ράδιο (Ra), είτε από τεχνητή, συνήθως  $^{60}\text{Co}$ . Συγκρινόμενες μεταξύ τους, οι ακτίνες γ έχουν μεγαλύτερη διεισδυτική ικανότητα από τις ακτίνες X, γεγονός που τις καθιστά κατάλληλες για ραδιογραφία αντικειμένων μεγάλου πάχους, αλλά μικρότερη ευαισθησία.

Υπενθυμίζεται ότι το μήκος κύματος των ακτίνων γ είναι  $\lambda < 0,1 \text{ nm}$ , ενώ το εύρος του μήκους κύματος των ακτίνων X είναι  $10^{-3} \text{ nm} < \lambda < 10 \text{ nm}$ .

Η ακτινοβολία που προσπίπτει στην επιφάνεια του υλικού και διέρχεται από τη μάζα του ανιχνεύεται στο πίσω μέρος του ελεγχόμενου υλικού, όπου και αποτυπώνεται σε φωτοευαίσθητη επιφάνεια (σχήμα 3.2). Οι περιοχές του υλικού με τη μεγαλύτερη πυκνότητα απορροφούν μεγαλύτερο ποσοστό της ακτινοβολίας και κατά συνέπεια η εξερχόμενη ακτινοβολία στο πίσω μέρος του εξεταζόμενου υλικού σκιάζει λιγότερο το φιλμ, σε σχέση με τις περιοχές μικρότερης πυκνότητας, όπως είναι οι πόροι και οι ρωγμές. Όταν στην εξεταζόμενη μάζα υπάρχουν εγκλείσματα που είναι εν γένει μεγαλύτερης πυκνότητας, οι αντίστοιχες περιοχές τους στο φιλμ καταγράφονται ως φωτεινότερα σημεία. Έτσι, από την πυκνότητα της αποτύπωσης στο φωτογραφικό φιλμ γίνεται τελικά δυνατός ο εντοπισμός της θέσης αλλά και του είδους του ελαττώματος.



Ο ραδιογραφικός έλεγχος χρησιμοποιείται ευρύτατα για τον έλεγχο των ελαττωμάτων χυτών αντικειμένων, σφυρήλατων και συγκολλημένων κατασκευών.



Σχήμα 3.α.2. Ραδιογραφικός έλεγχος συγκόλλησης μεταλλικών υλικών

Υπέρηχοι έλεγχου συγκολλήσεων(UT/W):Μια συσκευή που παράγει ήχους υψηλών συχνοτήτων(1-6 MHz) τους στέλνει στο αντικείμενο που εξετάζουμε και στην συνέχεια επιστρέφει στην πηγή. Η διαφοροποίηση της συχνότητας αντιλαμβάνεται ως εύρεση ασυνεχειών.(13)



ΕΙΚ 3.α.1

Έλεγχος με υπερήχους

▪ Υπέρηχοι έλεγχου με χρήση κεφαλών πολλαπλών κρυστάλλων(UT/PA) : Πολύ πιο σύνθετο από τους υπερήχους συγκολλήσεων καθώς έχει την δυνατότητα να μεταβάλλει την διεύθυνση και την εστίαση της δέσμης υπερήχων. Κοινώς έχει την δυνατότητα της πλήρους απεικόνισης της κάτοψης και της τομής του αγωγού. Οι συνήθεις τεχνικές υπερήχων για τον έλεγχο μεταλλικών υλικών χρησιμοποιούν κύματα συχνοτήτων 1-5 MHz που δημιουργούνται από μια διάταξη κρυστάλλων χαλαζία, τιτανικού βαρίου ή θειϊκού λιθίου. Τα υλικά αυτά εμφανίζουν πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο, όταν δηλαδή σε έναν τέτοιο κρύσταλλο εφαρμοστεί εναλλασσόμενο ηλεκτρικό πεδίο, ο πιεζοκρύσταλλος διαστέλλεται κατά το πρώτο μισό της περιόδου του ρεύματος και συστέλλεται κατά το δεύτερο μισό. Η μηχανική



δόνηση του υλικού, λόγω των διαδοχικών διαστολών-συστολών, γίνεται με συχνότητα ίδια με εκείνη του ηλεκτρικού ρεύματος εκπέμποντας ηχητικό κύμα. Με τον τρόπο αυτό, μπορεί να καθοριστεί επακριβώς η συχνότητα του εκπεμπόμενου από τον πιεζοκρύσταλλο ηχητικού σήματος.

Ο πιεζοηλεκτρικός κρύσταλλος εκπομπής υπερηχητικών κυμάτων τοποθετείται στην επιφάνεια του εξεταζόμενου υλικού και το ελαστικό υπερηχητικό κύμα που δημιουργείται διαδίδεται διαμέσου του εξεταζόμενου υλικού με ταχύτητα που εξαρτάται από την πυκνότητα και το μέτρο ελαστικότητας του τελευταίου. Με την άφιξη του κύματος στην πίσω επιφάνεια του υλικού ένα μέρος του ανακλάται προς την επιφάνεια, ενώ το υπόλοιπο συνεχίζει την πορεία του εκτός του υλικού. Με τη χρήση κατάλληλων παλμογράφων-δεκτών γίνεται καταγραφή της χρονικής εξέλιξης της πορείας είτε του ανακλώμενου είτε του διερχόμενου μέρους του υπερηχητικού κύματος. Και στις δυο περιπτώσεις, η ύπαρξη επιμήκων ασυνεχειών κάθετων στη διεύθυνση διάδοσης καταγράφεται ως μη ομαλή, πολλαπλή ανάκλαση του κύματος. Η ύπαρξη πόρων ή εγκλεισμάτων γίνεται αντιληπτή κυρίως από τη διαφοροποίηση της τιμής της ταχύτητας διάδοσης του κύματος, που όπως αναφέρθηκε εξαρτάται από την πυκνότητα και το μέτρο ελαστικότητας του υλικού.

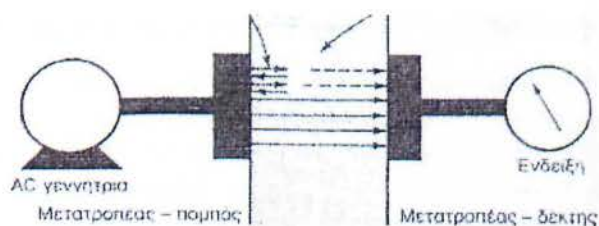
Κύριο μειονέκτημα της τεχνικής αυτής είναι η αναγκαιότητα καλής επαφής πιεζοκρυστάλλου-εξεταζόμενου υλικού. Πρόσφατες έρευνες έδειξαν ότι ακουστικά κύματα υπερηχητικών συχνοτήτων μπορούν να δημιουργηθούν από απόσταση σε υποεπιφανειακή περιοχή του ίδιου του εξεταζόμενου υλικού με τη χρήση πηγών παλμικού laser με διάρκεια παλμού της τάξης των ns . Τα επιμήκη, εγκάρσια ή επιφανειακά κύματα που δημιουργούνται σ'αυτή την περίπτωση μπορούν να καταγραφούν δίνοντας πληροφορίες για το υλικό ανάλογες αυτών των κλασσικών τεχνικών υπερήχων. Η χρήση της νέας αυτής τεχνολογίας είναι αρκετά δελεαστική για βιομηχανικές εφαρμογές, αφού η πηγή διέγερσης είναι σε απόσταση από το εξεταζόμενο αντικείμενο επιτρέποντας έτσι μετρήσεις σε θερμοκρασίες υψηλότερες αυτής του περιβάλλοντος.(12)



ΕΙΚ.3.α.2

Έλεγχος με υπερήχους που ελέγχονται από κεφαλές κρυστάλλων.





Σχήμα 3.α.3. Έλεγχος μεταλλικών υλικών με χρήση υπερήχων.

- Δινορρεύματα (ET): Η χρήση των δινορρευμάτων θεωρείται μία μέθοδος ελέγχου προσιτή και ακριβής, κατάλληλη για τον έλεγχο επιφανειακών και υποεπιφανειακών ασυνεχειών. Τα δινορρεύματα παράγονται σε αγωγίμα μεταλλικά υλικά μέσω εναλλασσόμενου μαγνητικού πεδίου και η έντασή τους είναι μετρήσιμη. Οι ασυνέχειες του υλικού διαταράσσουν την ροή των δινορρευμάτων και με την αντίστοιχη ένδειξη στην συσκευή επιτυγχάνεται ο εντοπισμός τους.(13)



ΕΙΚ.3.α.3

Συσκευή παραγωγής δινορρευμάτων

- Διεισδυτικά υγρά (PT) : Από τις πιο οικονομικές μεθόδους ελέγχου υλικών τα διεισδυτικά υγρά εντοπίζουν ασυνέχειες σε μια επιφάνεια (ρωγμές ή πόρους). Στην τεχνική αυτή εκμεταλλευόμαστε την ικανότητα υγρών υψηλής επιφανειακής τάσης να διεισδύουν σε επιφανειακά ελαττώματα (πόρους και μικρορωγμές), μέσω τριχοειδών φαινομένων. Η επιφάνεια του εξεταζόμενου αντικειμένου καλύπτεται με λεπτό στρώμα υγρού, για χρονικό διάστημα τέτοιο ώστε να ολοκληρωθεί η διείσδυση του. Εν συνεχεία, η περίσσεια του υγρού απομακρύνεται από την επιφάνεια με έκπλυση. Σε τρίτο στάδιο, η εξεταζόμενη επιφάνεια καλύπτεται με κατάλληλη σκόνη, τον «εμφανιστή», ο οποίος ενεργώντας ως σφουγγάρι, προκαλεί εκρόφηση του υγρού που είχε διεισδύσει στην επιφανειακή ατάλεια. Το εκροφούμενο υγρό αφήνει στην επιφάνεια ίχνος διαφορετικού χρώματος από τον εμφανιστή, ο οποίος είναι κατά κανόνα λευκός, υποδεικνύοντας έτσι την ύπαρξη και την έκταση της επιφανειακής ατέλειας.(12,13)

### 3β. Συμπεριφορά υλικών σε διάφορες καταπονήσεις

Παρότι η απλή στατική εφελκυστική φόρτιση αποτελεί ένα σημαντικό παράδειγμα για την κατανόηση των θεμελιωδών μηχανισμών που λαμβάνουν χώρα κατά τη μηχανική καταπόνηση των υλικών, σε καθημερινές εφαρμογές τα προβλήματα που συναντώνται λόγω άσκησης μηχανικών φορτίων σε υλικά είναι σημαντικά πιο πολύπλοκα. Ιδιαίτερα μάλιστα όταν εκτός των μηχανικών φορτίων θα πρέπει να ληφθεί υπόψη η συνέργεια διαβρωτικών μέσων σε υψηλές θερμοκρασίες, όπου τμήματα της κατασκευής βρίσκονται σε επαφή και σε σχετική κίνηση με άλλες επιφάνειες. Λόγω της πολυπλοκότητας αυτής, στη συνέχεια θα εξεταστεί η απόκριση και οι βασικοί μηχανισμοί αστοχίας μεταλλικών υλικών σε τέσσερις χαρακτηριστικές περιπτώσεις, στις οποίες:

- Η τιμή της επιβαλλόμενης τάσης μεταβάλλεται χρονικά και αλλάζει πρόσημο κατά τη διάρκεια της λειτουργίας της κατασκευής, η οποία βρίσκεται υπό καθεστώς **κόπωσης (fatigue)**.
- Η τιμή της επιβαλλόμενης τάσης παραμένει σταθερή με το χρόνο αλλά η καταπόνηση της κατασκευής γίνεται σε σχετικά υψηλή θερμοκρασία και στο υλικό ενεργοποιούνται μηχανισμοί **εμπυσμού (creep)**.
- Η κατασκευή λειτουργεί σε περιβάλλον σχετικά υψηλής συγκέντρωσης σε χημικούς παράγοντες οι οποίοι συνεργούν στη **διάβρωση (corrosion)** του υλικού.
- Τα κινούμενα μέρη της κατασκευής βρίσκονται σε επαφή και οι συζυγείς επιφάνειες υφίστανται **φθορά λόγω τριβής (wear)**.(12)

#### 3.β.1. Κόπωση – περιοδικά μεταβαλλόμενη μηχανική φόρτιση

Όταν ένα μεταλλικό υλικό υποβάλλεται σε περιοδικά εναλλασσόμενες τάσεις ή παραμορφώσεις, η θραύση του επέρχεται σε τιμές τάσης πολύ χαμηλότερες της αντοχής του σε εφελκυσμό (OTS) ή ακόμη και του ορίου διαρροής ( $\sigma_y$ ), χωρίς να παρουσιάσει εμφανείς ενδείξεις, χωρίς δηλαδή να μας «προειδοποιήσει» για την επερχόμενη αστοχία. Για το λόγο αυτό, η κόπωση του υλικού είναι η πιο επικίνδυνη αιτία αστοχίας καθώς επίσης και η πιο διαδεδομένη, αφού σχεδόν όλα τα μηχανολογικά εξαρτήματα λειτουργούν υπό καθεστώς μεταβαλλόμενης φόρτισης (μεταβολή των παραμέτρων ή/ και προσωρινή διακοπή της λειτουργίας, κλπ).

Τα χαρακτηριστικά μεγέθη που προσδιορίζουν το είδος μιας περιοδικά εναλλασσόμενης φόρτισης, εκτός από τις τιμές μεγίστης ( $\sigma_{max}$ ) και ελάχιστης ( $\sigma_{min}$ ) τάσης φόρτισης, και τη συχνότητα εναλλαγής ( $f$ ) είναι:

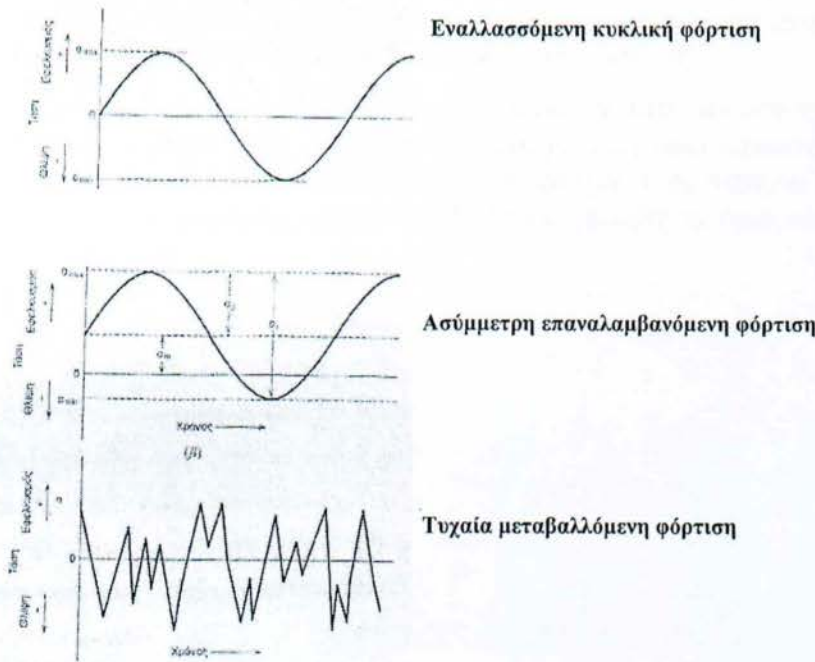
Η μέση τιμή της τάσης:  $\sigma_m = (\sigma_{max} + \sigma_{min})/2$

Το εύρος των τάσεων:  $\sigma_r = \sigma_{max} - \sigma_{min}$

Το πλάτος της τάσης:  $\sigma_a = (\sigma_{max} - \sigma_{min})/2$

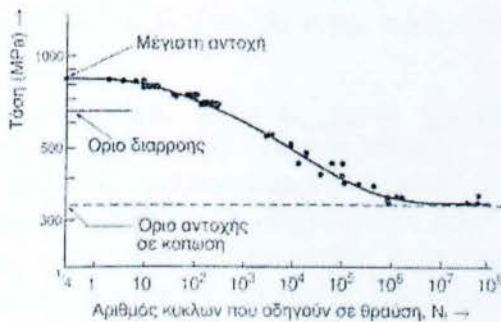


Κατά σύμβαση, οι εφελκυστικές τάσεις έχουν θετικό πρόσημο και οι θλιπτικές αρνητικό. Στο σχήμα 3.β.1. παρουσιάζονται τρεις τύποι χρονικά μεταβαλλόμενης φόρτισης που ενδέχεται να οδηγήσουν σε αστοχία λόγω κόπωσης.



Σχήμα 3.β.1. Χαρακτηριστικές καμπύλες χρονικής μεταβολής της επιβαλλόμενης τάσης σε καταπονήσεις κόπωσης

Η συμπεριφορά ενός υλικού σε κόπωση εκφράζεται από την **καμπύλη S-N** ή **καμπύλη Wohler**. Πρόκειται για καμπύλη που απεικονίζει τη διάρκεια ζωής του υλικού (σε αριθμό κύκλων φόρτισης,  $N_f$ ) για δεδομένο πλάτος επιβαλλόμενης τάσης και έχει συνήθως τη μορφή του παραδείγματος του σχήματος 3.β.2.



Σχήμα 3.β.2. Καμπύλη Wohler για χάλυβα 4140 μετά από εξομάλυνση.

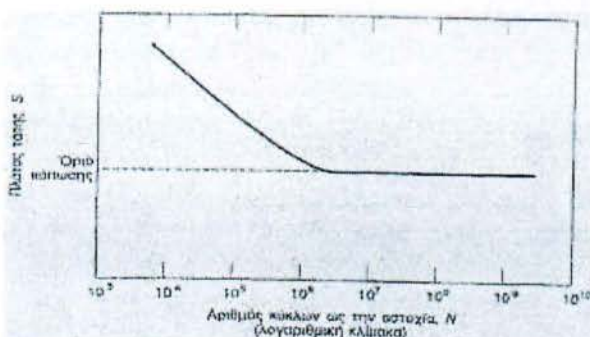
Σε μια τέτοια καμπύλη διακρίνονται τρεις ζώνες:

**Ζώνη ολιγοκυκλικής κόπωσης.** Πρόκειται για την περιοχή του διαγράμματος «υψηλών τιμών πλάτους τάσης» (~70% της  $\sigma_{TS}$ ), η εναλλασσόμενη επιβολή των οποίων περιορίζει τη διάρκεια ζωής του υλικού στους 100 κύκλους.

**Ζώνη κόπωσης περιορισμένης αντοχής.** Πρόκειται για την περιοχή «ενδιάμεσων τιμών πλάτους τάσης», η εναλλασσόμενη επιβολή των οποίων επιφέρει θραύση του υλικού για τιμές αριθμού κύκλων:  $10^2 < N_f < 10^6$ . Στη ζώνη αυτή η διάρκεια ζωής του υλικού επιμηκύνεται με την ελάττωση του πλάτους της επιβαλλόμενης τάσης.

**Ζώνη ασφαλείας.** Πρόκειται για την περιοχή «σχετικά χαμηλών τιμών πλάτους τάσης», η εναλλασσόμενη επιβολή των οποίων αποκλείεται να επιφέρει θραύση του υλικού για απεριόριστο αριθμό κύκλων φόρτισης ( $N_f > 10^6$ ).

Στην περίπτωση των χαλύβων και των κραμάτων τιτανίου που η ζώνη ασφαλείας διακρίνεται καθαρά στην καμπύλη S-N, ορίζεται ως όριο κόπωσης η μέγιστη τιμή πλάτους εναλλασσόμενης τάσης που δε θα οδηγήσει σε αστοχία μετά από άπειρο αριθμό κύκλων φόρτισης (σχήμα 3.β.3). Στους χάλυβες το όριο κόπωσης είναι ~35-60% της  $\sigma_{TS}$ .(12)



Σχήμα 3.β.3. Καμπύλες S-N: Τυπικές καμπύλες για χάλυβες και κράματα τιτανίου

Δεδομένου ότι η αντοχή ενός υλικού σε κόπωση εξαρτάται από μεγάλο αριθμό παραμέτρων, οι οποίες είναι δύσκολα ελέγξιμες και αναπαραγωγίμες, τα αποτελέσματα προκαταρκτικών δοκιμών κόπωσης που θα επιτρέψουν τη χάραξη της καμπύλης S-N για ένα υλικό παρουσιάζουν μεγάλη διασπορά. Κατά το σχεδιασμό λοιπόν μιας κατασκευής λαμβάνονται υπ'όψιν οι **καμπύλες βέλτιστης προσαρμογής** που αποτελούν δέσμες καμπυλών S-N για διάφορες τιμές πιθανότητας (P) να επέλθει αστοχία του υλικού.

Οι επιφάνειες θραύσης λόγω κόπωσης έχουν χαρακτηριστική κυματοειδή μορφολογία συνιστώμενη από αριθμό μικροραβδώσεων που αντιστοιχεί στους διαδοχικούς κύκλους επιβολής εφελκυστικών/ θλιπτικών φορτίσεων (σχήμα 3.β.4). Τα σημεία έναρξης της ρωγμής εύκολα ανιχνεύονται στην επιφάνεια θραύσης ως λείες περιοχές, δεδομένου ότι εκεί η θραύση επήλθε ταχύτερα κατά το αρχικό στάδιο φόρτισης. Επίσης, η χαρακτηριστική κυματοειδής μορφολογία δεν παρατηρείται σε περιπτώσεις που η τελική αστοχία συνέβη σε σύντομο χρονικό διάστημα (περιπτώσεις ολιγοκυκλικής κόπωσης).(12)





Σχήμα 3.β.4. Χαρακτηριστικές επιφάνειες θραύσης λόγω κόπωσης.  
 (α) Ραβδώσεις κόπωσης σε κράμα αλουμινίου (θραυστογραφία με χρήση TEM),  
 (β) Κυματοειδής μορφολογία σε χαλύβδινο άξονα, (γ) Απουσία κυματοειδούς  
 μορφολογίας  
 λόγω αστοχίας υπό καθεστώσ ολιγοκυκλικής κόπωσης.

Εκτός από τα εγγενή χαρακτηριστικά του υλικού, σημαντική βαρύτητα στην απόκριση ενός εξαρτήματος σε συνθήκες κόπωσης έχουν:

- Οι συνθήκη φόρτισης. Εκτός από το πλάτος της επιβαλλόμενης τάσης, η διάρκεια ζωής του υλικού επηρεάζεται και από την τιμή της μέσης τάσης. Αύξηση της στη μειώνει τη διάρκεια ζωής σε κόπωση .
- Η γεωμετρία του αντικειμένου και κύρια η ύπαρξη οπών και οι αλλαγές της διατομής που αποτελούν σημεία υψηλής συγκέντρωσης τάσεων. Κατά τη διαστασιολόγηση του αντικειμένου στο στάδιο του σχεδιασμού, θα πρέπει να αποφεύγεται η απότομη αλλαγή των διαστάσεων.
- Η επιφανειακή κατεργασία του υλικού, δεδομένου ότι η ρωγμάτωση λόγω κόπωσης ξεκινά από σημεία της επιφάνειας. Γενικά, υλικά με λειασμένη επιφάνεια εμφανίζουν υψηλότερη αντοχή σε κόπωση, όπως επίσης και υλικά με επιφανειακή κατεργασία (σφαιροβολή, ενανθρακαζώτωση) που εισάγει επιφανειακές θλιπτικές τάσεις στο αντικείμενο.
- Οι εναλλαγές της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος. οι οποίες υποβάλλουν επιπροσθέτως το αντικείμενο σε θερμική κόπωση. Κυκλικές μεταβολές της θερμοκρασίας εισάγουν στο υλικό εναλλασσόμενο πεδίο εσωτερικών τάσεων, λόγω περιορισμών της ελεύθερης διαστολής-συστολής του. Το μέγεθος των εσωτερικών αυτών τάσεων που αναπτύσσονται εξαρτάται από το συντελεστή θερμικής διαστολής και το μέτρο ελαστικότητας του υλικού.
- Η παρουσία διαβρωτικών παραγόντων στο περιβάλλον λειτουργίας του αντικειμένου επιταχύνει την αστοχία λόγω κόπωσης, δεδομένου ότι τα σημεία τοπικής επιφανειακής διάβρωσης αποτελούν σημεία υψηλής συγκέντρωσης τάσεων και για το λόγο αυτό σημεία ενδεχόμενης έναρξης ρωγμών.(12)

Κατά το σχεδιασμό λοιπόν, μιας κατασκευής που θα υποβληθεί σε εναλλασσόμενα μηχανικά φορτία πρέπει να λαμβάνεται υπ'οψιν η επίδραση όλων των παραμέτρων που προαναφέρθηκαν, συνυπολογίζοντας τον κατάλληλο συντελεστή ασφαλείας για την κατασκευή. Έτσι, η διάρκεια ζωής σε κόπωση ( $N_f$ ) μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση:

$$N_f = K_1 * K_d * K_s * N_i$$

Όπου:  $K_1$  συντελεστής διόρθωσης σχετικός με τις συνθήκες εξωτερικής φόρτισης,

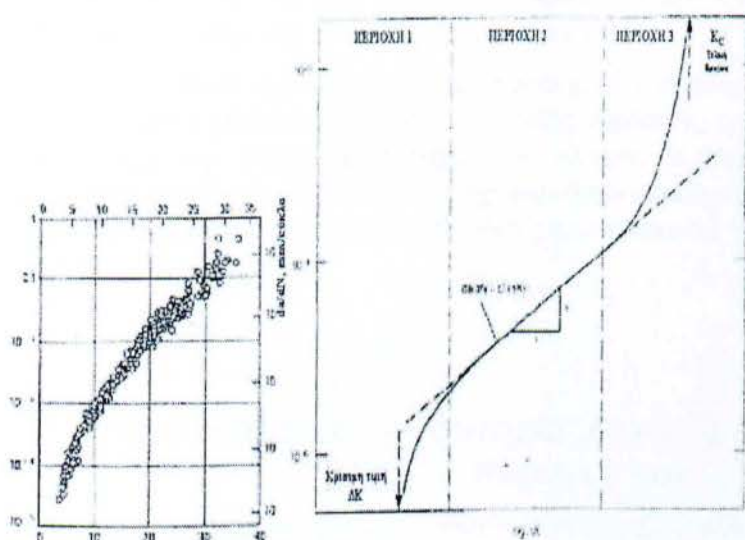
$K_d$  συντελεστής διόρθωσης σχετικός με τις διαστασιακές μεταβολές,

$K_s$  συντελεστής διόρθωσης σχετικός με την κατάσταση της επιφάνειας,



Νι «ιδανική» διάρκεια ζωής του υλικού.

Σημαντικό σημείο στην εκτίμηση του χρόνου ζωής μιας κατασκευής που υφίσταται κόπωση αποτελεί η γνώση του ρυθμού διάδοσης προϋπάρχουσας ρωγμής ( $da/dN$ ). Παρατηρήθηκε ότι η ταχύτητα διάδοσης μιας ρωγμής μπορεί να εκφραστεί συναρτήσει της μεγίστης διαφοράς μεταξύ του συντελεστή έντασης τάσης που προκύπτει από την εφαρμογή της μέγιστης τάσης και αυτού από την εφαρμογή της ελάχιστης τάσης κατά την εναλλασσόμενη φόρτιση ( $\Delta K$ , σχήμα 3.β.4). Ειδικά στην περίπτωση που η ελάχιστη τάση είναι θλιπτική, ως ελάχιστη τάση θεωρείται η μηδενική, αφού από την ανάλυση των τάσεων στο μέτωπο της ρωγμής αποδεικνύεται ότι η ρωγμή διαδίδεται μόνο κατά την εφαρμογή εφελκυστικής φόρτισης.



Στη καμπύλη του σχήματος 3.β.4(α), μπορούμε να διακρίνουμε τρεις διαδοχικές περιοχές σε καθεμιά από τις οποίες ο ρυθμός διάδοσης της ρωγμής φαίνεται να υπακούει σε διαφορετικό νόμο:

**Περιοχή 1:** Για τιμές του  $\Delta K$  μικρότερες από μια κρίσιμη τιμή που καλείται και κατώφλιο διάδοσης της ρωγμής ( $\Delta K_{th}$ ), η ρωγμή δε διαδίδεται, δηλαδή δεν αυξάνεται το μήκος της, για σχετικά μεγάλο αριθμό κύκλων φόρτισης. Έχει αποδειχθεί ότι για μεγάλο αριθμό χαλύβων η κρίσιμη αυτή τιμή εξαρτάται από το λόγο των επιβαλλόμενων τάσεων ( $R = \sigma_{min}/\sigma_{max}$ ) και μάλιστα είναι :

$$\Delta K_{th} = 6,4(1 - 0,85R) \text{ ksi}\sqrt{in}, \text{ για } R \geq +0,1$$

$$\Delta K_{th} = 5,5 \text{ ksi}\sqrt{in}, \text{ για } R < +0,1$$

**Περιοχή 2:** Για τιμές του  $\Delta K$  υψηλότερες της κρίσιμης τιμής ο ρυθμό διάδοσης της ρωγμής μεταβάλλεται συναρτήσει του  $\Delta K$  με εκθετικό τρόπο, ή με γραμμικό συναρτήσει του  $\log(\Delta K)$ :



$$da/dN = C(\Delta K)^n$$

όπου  $C$  και  $n$  σταθερές χαρακτηριστικές για το υλικό. Η περιοχή αυτή ονομάζεται περιοχή Paris, προς τιμήν των πρώτων μηχανικών που παρατήρησαν αυτή τη συμπεριφορά. Αν είναι γνωστό το μήκος της προϋπάρχουσας ρωγμής ( $a_0$ ), από την (5.6) μπορεί να υπολογιστεί ο αριθμός κύκλων έως τη θραύση ( $N_f$ ), αφού πρώτα υπολογισθεί το κρίσιμο μήκος ρωγμής του υλικού για τη μέγιστη επιβαλλόμενη τάση από τη σχέση του Griffith:

$$N_f = \int_0^{N_f} dN = \int$$

Εδώ, τόσο ο λόγος των τάσεων, όσο και η μέση επιβαλλόμενη τάση έχουν πολύ μικρή επίδραση στο ρυθμό διάδοσης της ρωγμής. Για πολλούς χάλυβες έχει παρατηρηθεί ότι η ταχύτητα διάδοσης της ρωγμής δεν εξαρτάται ούτε από τη συχνότητα φόρτισης, ούτε από την κυματομορφή της. Ο αριθμός κύκλων έως τη θραύση που υπολογίζονται από την μπορούν να προσδιοριστούν και στην τελική επιφάνεια θραύσης από τον αριθμό των κυματώσεων.

Περιοχή 3: Όταν η τιμή του  $(\Delta K)$  προσεγγίσει εκείνη του κρίσιμου συντελεστή έντασης τάσης ( $K_{Ic}$ ) του υλικού, ο ρυθμός διάδοσης της ρωγμής επιταχύνεται με αποτέλεσμα την ταχύτερη αστοχία του υλικού. Η ταχεία διάδοση της ρωγμής προκύπτει από την υπέρθεση στο μηχανισμό υπο-κρίσιμης διάδοσης λόγω κυκλικής φόρτισης της ψαθυρής ή όλκιμης θραύσης που προκαλεί η εντατική καταπόνηση του υλικού.

### **3β.ΙΙ. Διάβρωση — αστοχία λόγω δράσης χημικών παραγόντων**

Η δράση επιβαρυντικών παραγόντων του περιβάλλοντος μπορεί να οδηγήσει σε υποβάθμιση των ιδιοτήτων του υλικού μιας κατασκευής ή και την τελική αστοχία της. Για παράδειγμα, μια μεταλλική κατασκευή ενδέχεται να υποστεί διάβρωση (corrosion) λόγω ηλεκτροχημικών δράσεων που λαμβάνουν χώρα όταν η επιφάνειά της είναι σε επαφή με ηλεκτρολύτη, ή οξειδωση όταν η επιφάνειά της έρθει σε επαφή με αέριο υψηλής θερμοκρασίας (oxidation). Αναλόγως, τα πολυμερή ενδέχεται να υποστούν φυσική αποσύνθεση, δηλαδή καταστροφή του μακρομοριακού τους πλέγματος, ατμοσφαιρική αποσύνθεση, λόγω της επίδρασης ατμοσφαιρικού οξυγόνου ή όζοντος, φωτοαποδόμηση, υπό την επίδραση ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, θερμική αποσύνθεση ή/και βιοαποδόμηση, λόγω της δράσης ενζύμων και μικροοργανισμών. Αντιθέτως, τα κεραμικά υλικά που αποτελούν στην πλειοψηφία τους ισχυρές ετεροπολικές ενώσεις μετάλλων με αμέταλλα είναι σχεδόν απρόσβλητα από τις συνήθεις χημικές δράσεις για ένα μεγάλο εύρος θερμοκρασιών.(12)



### **3β.ΙΙΙ. Διαλυτοποίηση μετάλλων από διαλύματα σε χαμηλές θερμοκρασίες**

Σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, όταν δυο μεταλλικά τεμάχια διαφορετικής χημικής σύστασης είναι σε επαφή με ηλεκτρολύτη, λαμβάνουν χώρα ηλεκτροχημικές δράσεις οξείδωσης και αναγωγής που έχουν ως αποτέλεσμα τη δημιουργία γαλβανικού στοιχείου. Το ανοδικότερο μέταλλο έχει την τάση να διαλυθεί στον ηλεκτρολύτη, ενώ το καθοδικότερο είναι ουσιαστικά αδρανές. Η γαλβανική σειρά αποτελεί έναν πρακτικό οδηγό για μια πρώτη εκτίμηση της τάσης διάβρωσης διαφόρων εμπορικών κραμάτων όταν αυτά βρίσκονται εκτεθειμένα σε θαλασσινό νερό. Το αυθόρμητο πραγματοποίησης μιας αντίδρασης γαλβανικού στοιχείου μπορεί να υπολογιστεί από το νόμο Nemst, ενώ ο ρυθμός διάβρωσης εξαρτάται από το ρεύμα διάβρωσης μεταξύ των δυο ηλεκτροδίων του γαλβανικού στοιχείου. (12)

### **Ομοιόμορφη διάβρωση**

Η εκτεθειμένη επιφάνεια προσβάλλεται ομοιόμορφα από το διαβρωτικό μέσο και το προϊόν της διάβρωσης παραμένει ως σαθρή επικάλυψη καλύπτοντάς την στο σύνολό της. Χαρακτηριστικά παραδείγματα ομοιόμορφης διάβρωσης αποτελούν η εμφάνιση σκουριάς στην επιφάνεια σιδηρούχων κραμάτων και το «μαύρισμα» των ασημικών.

### **Γαλβανική διάβρωση**

Όπως ήδη αναφέρθηκε, αφορά τη διάβρωση κραμάτων διαφορετικής χημικής σύστασης που συνδέονται ηλεκτρικά παρουσία ηλεκτρολύτη. Το δραστηκότερο μέταλλο θα διαβρωθεί, ενώ το πιο αδρανές θα προστατευθεί. Ο ρυθμός γαλβανικής διάβρωσης εξαρτάται από το σχετικό μέγεθος των επιφανειών ανόδου/ καθόδου. Για δεδομένη καθοδική επιφάνεια, μικρότερη ανοδική θα διαβρωθεί ταχύτερα. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αυτού του τύπου είναι η καταστροφική διάβρωση κοχλίων από χάλυβα όταν χρησιμοποιούνται για τη συγκράτηση ορειχάλκινων τεμαχίων σε θαλάσσιο περιβάλλον ή η διάβρωση χαλύβδινων σωλήνων στην περιοχή της σύνδεσής τους με άλλους χάλκινους σ'εναν οικιακό θερμαντήρα νερού.

Προκειμένου να αποφευχθούν τα αρνητικά αποτελέσματα της γαλβανικής διάβρωσης, τόσο στο στάδιο του σχεδιασμού όσο και στο στάδιο της κατασκευής πρέπει να λαμβάνεται πρόληψη ώστε να:

- Επιλέγονται μέταλλα που βρίσκονται σε κοντινές θέσεις στη γαλβανική σειρά.
- Χρησιμοποιείται η μεγαλύτερη δυνατή ανοδική επιφάνεια.
- Μονώνονται ηλεκτρικά ανόμοια μέταλλα, εφόσον η χρήση τους επιβάλλεται από τους άλλους περιορισμούς της κατασκευής.
- Χρησιμοποιείται τρίτο μέταλλο, ανοδικότερο των δυο άλλων, προκειμένου να διαβρωθεί αυτό κι όχι τα υλικά της βασικής κατασκευής.



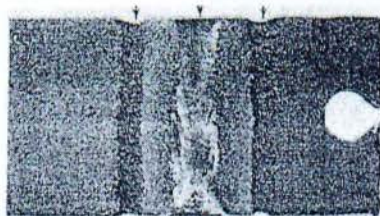
## Μικρογαλβανική διάβρωση

Παρατηρείται σε περιπτώσεις πολυφασικών κραμάτων, η επιφάνεια των οποίων είναι σε επαφή με ηλεκτρολύτη και η μια φάση του κράματος είναι κατά πολύ δραστικότερη της άλλης. Χαρακτηριστικά παραδείγματα μικρογαλβανικής διάβρωσης αποτελούν:

- Η ενδοκρυσταλλική διάβρωση των κόκκων του περλίτη στο γάλυβα. οι οποίοι αποτελούνται από διαδοχικές στρώσεις φερρίτη και σεμεντίτη. Ο πρώτος είναι δραστικότερος και αποτελεί τη διαλυόμενη (διαβρωνόμενη) άνοδο, ενώ ο δεύτερος είναι παθητικότερος και αποτελεί την κάθοδο.
- Η περικρυσταλλική διάβρωση των ωστενιτικών ανοξειδωτων γαλύβων. Οι χάλυβες αυτοί περιέχουν υψηλό ποσοστό χρωμίου, το οποίο έχει την τάση να οδηγήσει σε κατακρήμνιση καρβιδίων ( $C^{\wedge}Ce$ ) στα όρια των κόκκων του υλικού. Τα καρβίδια είναι παθητικότερα του ωστενίτη, έτσι παρουσία ηλεκτρολύτη ο ωστενίτης στην περιοχή των ορίων των κόκκων διαβρώνεται σχηματίζοντας ένα στρώμα οξειδίου στην επιφάνεια του μετάλλου.

Η μικρογαλβανική διάβρωση αποτελεί από τα σημαντικότερα προβλήματα της συγκόλλησης ανοξειδωτων χαλύβων με τήξη (σχήμα 3.β.5) και αντιμετωπίζεται με:

- Θερμική κατεργασία του υλικού μετά τη συγκόλληση για διαλυτοποίηση των καρβιδίων
- Χρησιμοποίηση χάλυβα χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα ( $< 0,03\%$ ), ώστε να ελαχιστοποιηθούν τα κατακρημνίσματα καρβιδίων στα όρια των κόκκων.
- Χρησιμοποίηση χάλυβα που περιέχει Ti ή Nb, μέταλλα περισσότερο καρβιδιογόνα από το Cr, ώστε να μη σχηματιστούν καρβίδια του χρωμίου αλλά αυτό να παραμείνει σε στερεό διάλυμα.



Σχήμα 3.β.5. Περικρυσταλλική διάβρωση συγκόλλησης στα όρια της θερμικά επηρεασμένης ζώνης.

## Διάβρωση με εσοχές (Crevice)

Σε περιπτώσεις που η γεωμετρία της επιφάνειας το επιτρέπει, δημιουργούνται τοπικά μικροδιαφοροποιήσεις στη συγκέντρωση ιόντων ή διαλυτών αερίων του ηλεκτρολύτη κι έτσι μέταλλο που είναι σε επαφή με το υγρό χαμηλότερης συγκέντρωσης διαβρώνεται. Διάβρωση τέτοιου τύπου παρατηρείται σε σχισμές ή εσοχές ή κάτω από εναποθέσεις προϊόντων διάβρωσης, όπου μπορεί να εισχωρήσει ο ηλεκτρολύτης και να παραμείνει στάσιμος (σχήμα 3.β.6).



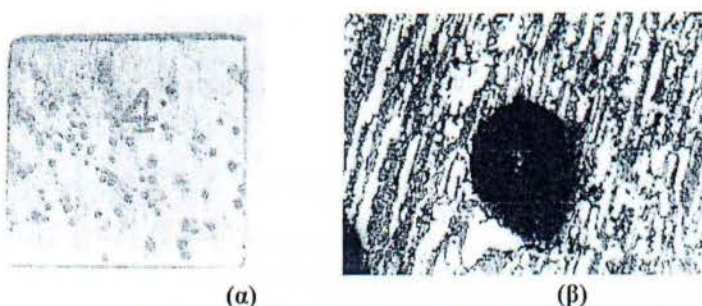
*Σχήμα 3.β.6 (i) Μεταλλική πλάκα βυθισμένη σε θαλασσινό νερό παρουσιάζει ενδείξεις έντονης διάβρωσης στις περιοχές όπου είχαν τοποθετηθεί ροδέλλες. (ii) Διάβρωση με εσοχές κοχλίων που έχει οδηγήσει σε σημαντική μείωση της διατομής τους.*

### **Διάβρωση με βελονισμούς (Pitting corrosion)**

Πρόκειται για σημειακή διάβρωση των οριζόντιων επιφανειών μετάλλων με σχηματισμό κοιλοτήτων και οπών (σχήμα 3.β.7.α, β) μεγάλου βάθους, των οποίων τα σημεία έναρξης τοποθετούνται σε αρχικές επιφανειακές ανωμαλίες του υλικού. Γενικά, λειασμένες επιφάνειες υλικού έχουν καλύτερη συμπεριφορά σε διάβρωση με βελονισμούς. Στο σχήμα 3.β.7β, φαίνεται σε κάθετη τομή η μορφολογία και η έκταση που ενδέχεται να αποκτήσουν υποεπιφανειακά τέτοιες κοιλότητες.

Γενικά, μπορούμε να πούμε ότι είναι εξαιρετικά επικίνδυνος μηχανισμός διάβρωσης, δεδομένου ότι αυτό που αντιλαμβάνεται ο επιθεωρητής/ ελεγκτής/ συντηρητής μιας κατασκευής είναι επιφανειακές οπές πολύ μικρής διαμέτρου, τις οποίες εύκολα θα «υποτιμούσε» ένα μη εκπαιδευμένο άτομο. Όπως όμως φαίνεται και στο σχήμα 3.β.7.β, οι βελόνες της διάβρωσης μπορεί να έχουν πολύ μεγάλο βάθος ή να διευρύνονται υποεπιφανειακά σχηματίζοντας κοιλότητες σχετικά μεγάλων διαστάσεων.



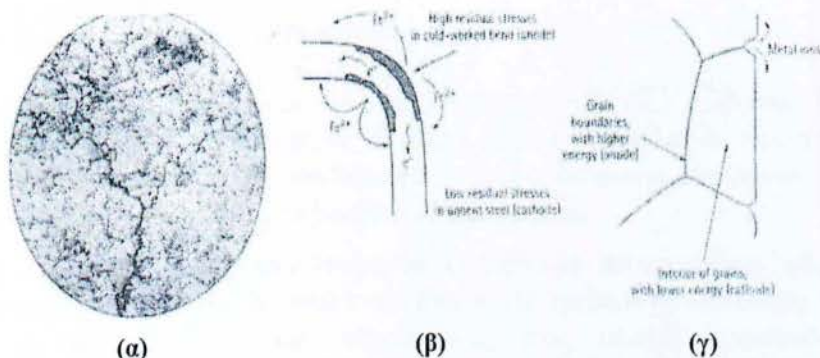


Σχήμα 3.β.7. Διάβρωση με βελονισμούς.

(α) Μορφολογία διαβρωμένης επιφάνειας, (β) Μεγέθυνση μιας οπής της

### Διάβρωση υπο μηχανική τάση (stress corrosion)

Μέταλλα τα οποία είναι απρόσβλητα από κάποιο χημικό παράγοντα, υπό την ταυτόχρονη επίδραση μηχανικού φορτίου μπορεί να οδηγηθούν σε μικρορωγμάτωση και τελική καταστροφική αστοχία. Το φορτίο αυτό μπορεί να είναι εξωτερικά επιβαλλόμενο (σχήμα 3.β.8 α) ή να οφείλεται σε εσωτερικές παραμένουσες τάσεις του υλικού (σχήμα 3.β.8 α, β).



Σχήμα 3.β.8 Διάβρωση υπό μηχανική τάση: (α) Περικρυσταλλική ρωγμάτωση ορείχαλκου, (β) Διάβρωση σωλήνα στα σημεία αλλαγής της κατεύθυνσής του λόγω εσωτερικών τάσεων που αναπτύχθηκαν κατά την κάμψη του, (γ) Διάβρωση των ενεργειακά αναβαθμισμένων ορίων των κόκκων.

### Ψαθυροποίηση από υδρογόνο (hydrogen embrittlement)

Ιδιαίτερη αναφορά πρέπει να γίνει στο φαινόμενο ψαθυροποίησης μεταλλικών υλικών λόγω της διάχυσης ατομικού υδρογόνου σε θέσεις παρεμβολής στο κρυσταλλικό πλέγμα, όπου και πολύ μικρές συγκεντρώσεις του είναι ικανές να οδηγήσουν σε σημαντική υποβάθμιση της ολκιμότητας του μετάλλου και να προκαλέσουν τη ρωγμάτωσή του. Πηγές ατομικού υδρογόνου είναι: τα διαλύματα χημικού καθαρισμού της επιφάνειας (pickling), τα διαλύματα ηλεκτρολυτικής εναπόθεσης, ατμόσφαιρα υπέρθερων ατμών, κλπ. Η ψαθυροποίηση από υδρογόνο προσβάλλει ιδιαίτερα τους χάλυβες και, όπως είναι κατανοητό, το φαινόμενο είναι πιο έντονο όταν έχει προηγηθεί μηχανική κατεργασία του μετάλλου με εισαγωγή εσωτερικών τάσεων. Η πιθανότητα ψαθυροποίησης από υδρογόνο μειώνεται με



θέρμανση του υλικού, οπότε το υδρογόνο απομακρύνεται (εκροφάται) διαμέσου της επιφάνειάς του.

### Φθορά λόγω τριβής – επιφανειακή καταπόνηση υλικού

Στην πλειοψηφία τους, οι βιομηχανικές κατασκευές περιλαμβάνουν κινούμενα τμήματα που βρίσκονται σε σημειακή ή επιφανειακή επαφή. Η σχετική κίνηση των επαπτόμενων επιφανειών οδηγεί σε φθορά τους μέσω τριβολογικών μηχανισμών χημικής ή μηχανικής (ρύσεως ή συνδυασμού τους. Οι δυο επαπτόμενες επιφάνειες (συζυγείς επιφάνειες), το περιβάλλον στο οποίο βρίσκονται (θερμοκρασία, υγρασία, χημικοί παράγοντες), καθώς και τα προϊόντα της φθοράς, όταν δεν απομακρύνονται, αποτελούν το τριβοςύστημα (σχήμα 3.β.9)



Σχήμα 3.β.9. Συστατικά μέρη ενός τριβοςυστήματος

Κοιτώντας γύρω μας μπορούμε να αναγνωρίσουμε ποικίλλα τριβοςυστήματα: οι δίσκοι των φρένων των αυτοκινήτων, το νερό και οι ορειχάλκινοι σωλήνες στους οποίους ρέει, ακόμη και οι πεζοί που περπατούν στο οδόστρωμα φθείροντας τις σόλες των παπουτσιών ή γλυστρώντας σε βρεγμένα πεζοδρόμια.

Κατά τη σχετική κίνηση των συζυγών επιφανειών παρατηρείται φθορά τους (απομάκρυνση υλικού), η οποία είναι εντονότερη στο τριβικά ασθενέστερο υλικό. Σε αντίθεση με τις μηχανολογικές κατασκευές, στις οποίες προσπαθούμε να περιορίσουμε (π.χ. με λίπανση) τις δυνάμεις τριβής στη διεπιφάνεια και το ποσοστό φθοράς των υλικών διότι εισάγουν επιπλέον παράγοντες αστοχίας, υπάρχουν τριβοςυστήματα στα οποία η φθορά της μιας επιφάνειας είναι το ζητούμενο:

- Μεταλλογραφική προετοιμασία δοκιμίων με λείανση και στίλβωση προκειμένου να εξομαλυνθεί το ανάγλυφο της επιφάνειας τους.
- Γραφή με μολύβι ή κιμωλία των οποίων τα προϊόντα τριβής δίνουν το επιδιωκόμενο αποτέλεσμα: γραπτό κείμενο σε χαρτί ή πίνακα.

Με τον όρο φθορά υπονοείται τόσο ο μηχανισμός σταδιακής απομάκρυνσης υλικού, όσο και το μέτρο προσδιορισμού της (ποσότητα φθοράς). Η μέτρηση της ποσότητας φθοράς ενός στοιχείου κάποιου τριβοςυστήματος εκφράζεται συνήθως ως:

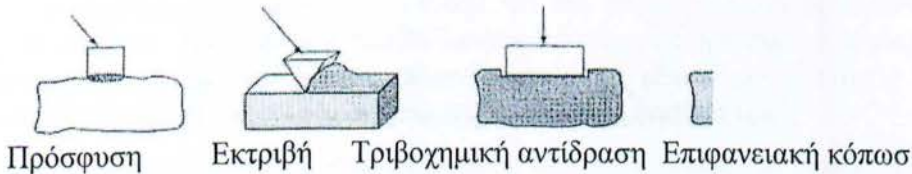
- Μείωση μιας διάστασής του (γραμμική φθορά)
- Μείωση του όγκου του (όγκος φθοράς)
- Μείωση της μάζας του (μάζα φθοράς)



Πρέπει να τονιστεί ότι επιφανειακή καταπόνηση του υλικού λόγω φαινομένων τριβής οδηγεί πάντοτε σε μεταβολή των διαστάσεων ή της μάζας του και γι' αυτό στο στάδιο του σχεδιασμού θα πρέπει να ληφθεί υπόψιν προκειμένου να επιβραδυνθεί, αν όχι να εκμηδενιστεί, η πιθανότητα αστοχίας της κατασκευής. Εκτός από την ποσότητα φθοράς, δυο σημαντικά μεγέθη για την εκτίμηση των επιπτώσεων της καταπόνησης στην κατασκευή είναι:

- Ο ρυθμός Φθοράς, δηλαδή η ποσότητα φθοράς (απομακρυνόμενου υλικού) στη μονάδα του χρόνου.
- Ο συντελεστής φθοράς, ο οποίος εκφράζει την ποσότητα της φθοράς (συνήθως του όγκου) ανά μονάδα κάθετα επιβαλλόμενου φορτίου και ανά μονάδα μήκους σχετικής κίνησης των συζυγών επιφανειών.

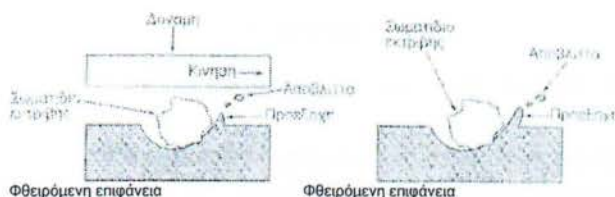
Εχουν προταθεί διάφορα κριτήρια για την ταξινόμηση των μηχανισμών φθοράς των υλικών λόγω τριβής. Για τους σκοπούς του συγκεκριμένου προγράμματος στη συνέχεια θα αναπτυχθεί η ταξινόμηση των μηχανισμών φθοράς βάσει του μηχανισμού που επιφέρει την απομάκρυνση του υλικού (σχήμα 3.β.9)



### Φθορά λόγω εκτριβής

Ο μηχανισμός αυτός ενεργοποιείται όταν μια επιφάνεια βρίσκεται σε επαφή με σκληρά σωματίδια τα οποία αποτελούν είτε το ανταγωνιστικό υλικό, είτε προκύπτουν ως προϊόντα φθοράς των δυο επιφανειών (σχήμα 3.β.10). Ο τύπος αυτός φθοράς συναντάται συχνά σε πτερύγια κινητήρων, κοπτικά άκρα, κλπ, όταν σκληρή και τραχεία επιφάνεια κινείται σε επαφή με άλλη μικρότερης σκληρότητας ή πιο όλκιμη, οπότε στη δεύτερη δημιουργούνται αύλακες άροσης.

Καλή συμπεριφορά σε φθορά λόγω εκτριβής παρουσιάζουν υλικά υψηλής σκληρότητας και δυσθραυστότητας.



Σχήμα 3.β.10. Φθορά λόγω τριβής μέσω μηχανισμών εκτριβής.

### Παράγοντες που επηρεάζουν τη φθορά λόγω τριβής

Αξίζει να επισημανθεί ότι η φθορά λόγω τριβής, όπως άλλωστε και ο συντελεστής τριβής, δεν χαρακτηρίζουν ένα υλικό, αλλά ένα τριβόσυστημα. Θα πρέπει δηλαδή οι τιμές τους να δίνονται πάντοτε αναφορικά με την ποιότητα της συζυγούς επιφάνειας (ανταγωνιστικό υλικό), και τις συνθήκες λειτουργίας: θερμοκρασία, υγρασία, λίπανση, ενώ επίσης όπως έγινε κατανοητό από την προηγούμενη προσέγγιση των μηχανισμών σημαντικό ρόλο παίζει και το ανάγλυφο των επιφανειών που βρίσκονται σε επαφή. Η ποιότητα του χημικού περιβάλλοντος λειτουργίας τροποποιεί μερικώς τους μηχανισμούς φθοράς εισάγοντας, πιθανά, επιπλέον οξειδωτικές δράσεις οι οποίες επιταχύνουν την αστοχία λόγω φθοράς (τριβοχημικές αντιδράσεις).

Στο σχήμα παρουσιάζεται η επιφάνεια ενός εργαλειοχάλυβα, ο οποίος έχει υποστεί επιφανειακή κατεργασία ενανθρακαζώτωσης προκειμένου να αυξηθεί η αντοχή του σε τριβικά φορτία και σε φορτία κόπωσης. Μετά από κάποιο χρονικό διάστημα δοκιμασίας σε τριβή ολίσθησης επαναλαμβανόμενων κύκλων (οπότε και ενεργοποιείται επιπλέον μηχανισμός επιφανειακής κόπωσης), με την εφαρμογή σημειακού κάθετου φορτίου 150 N και χρησιμοποιώντας ως ανταγωνιστικό υλικό αλούμινα (σκληρό κεραμικό υλικό), στην επιφάνεια του εξεταζόμενου υλικού αναγνωρίζονται ίχνη διαφόρων μηχανισμών αστοχίας της επιφάνειας:

- Το κεντρικό τμήμα της επιφάνειας επαφής καλύπτεται από στρώμα οξειδωμένου υλικού (τριβοχημική δράση), ενώ παρατηρούνται επίσης και ενδείξεις αποφλοίωσης (φθορά λόγω εκτριβής).
- Στα ακραία τμήματα της επιφάνειας επαφής παρατηρείται εκτεταμένη ρωγμάτωση (επιφανειακή κόπωση), καθώς επίσης περιοχές άροσης (που αποτυπώνουν τη διεύθυνση ολίσθησης) και χαλαρής συνοχής που υποδηλώνουν απομάκρυνση υλικού με μηχανισμό πρόσφυσης.

### Ανάλυση διαρροής και της συμπεριφορά θραύσης σε ένα διάγραμμα αξιολόγησης αστοχίας για χαλύβδινους αγωγούς



## 1. Εισαγωγή

Σε αυτό το σημείο εξετάζονται οι συνθήκες της διαρροής ψυκτικού υγρού χωρίς θραύση.

Μία καμπύλη υπολογισμού της διαρροής, δηλαδή, ένας γεωμετρικός τόπος των σημείων ανιχνεύσιμης διαρροής ψυκτικού, ορίστηκε στο διάγραμμα αξιολόγησης αστοχίας. Η περιοχή μεταξύ των καμπυλών διαρροής και αστοχίας πληροί την προϋπόθεση της ανίχνευσης διαρροής χωρίς θραύση. Σε αυτή την περιοχή, μια ρωγμή μπορεί με ασφάλεια να ελεγχθεί από έναν ανιχνευτή διαρροής ψυκτικού.

Ένα διάγραμμα αξιολόγησης της αστοχίας (FAD) ορίζεται από το Central Electricity Generating Board ως παραμόρφωση που οριοθετείται από μια γραμμική ελαστική παραμόρφωση στο ένα άκρο και μία πλήρως πλαστική παραμόρφωση στο άλλο. Η μέθοδος αυτή μπορεί να αξιολογήσει ένα ευρύ φάσμα από ελαστοπλαστικές καταστάσεις παραμόρφωσης.

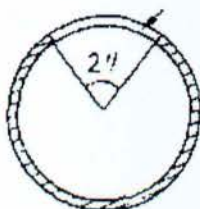
Κατά την εξέταση της διαρροής πριν από τη θραύση στις σωληνώσεις του ψυκτικού υγρού, είναι απαραίτητο να λαμβάνονται υπόψη τόσο η πιθανότητα θραύσεως όσο και ο ρυθμός διαρροής του ψυκτικού υγρού. Είναι σημαντικό για την ασφάλεια να ανιχνεύονται οι διαρροές ψυκτικού υγρού πριν από μία θραύση αγωγού. Η σχέση ανάμεσα στην πιθανότητα διαρροής και του εύρους των διαρροών με τις ρωγμές και τις θραύσεις αγωγών θα πρέπει να καθορίζεται για να είναι δυνατή η αξιολόγηση των διαρροών πριν από τις ρωγμές.

## 2. Ανάλυση διαδικασίας

### Συνθήκες ανάλυσης

Ο τύπος 304 ανοξείδωτου χάλυβα κατά JIS (Ιαπωνικά Βιομηχανικά Πρότυπα) STS42 σωληνώσεων χάλυβα αναλύονται για θραύση και διαρροή. Το JIS STS42, αντιστοιχεί κατά ASME σε A333 Gr. 6, και ονομάζεται "Αγωγός χάλυβα για αντοχή σε υψηλή πίεση".

Οι αγωγοί με περιμετρικές διαμπερείς ρωγμές υποβάλλονται σε εσωτερική πίεση και ροπή κάμψης, όπως φαίνεται στο σχήμα. 1.



*Σχήμα. 3.11. Περιμετρικά διαμπερείς ρωγμές σωλήνα υποβάλλεται σε εσωτερική πίεση και ροπή κάμψης.*

Η εσωτερική πίεση διατηρείται σταθερή στα 70 kg/cm<sup>2</sup> (6,9 MPa). Μεγέθη σωλήνων, από 4-ίντσες διάμετρο (4B) έως 26-ίντσες διάμετρο (26B), αναλύθηκαν και οι διαστάσεις τους αναφέρονται στον πίνακα 1.

Θη ών	Εξωτερική διάμετρος (mm)	Πάχος (mm)
	114.3	8.6
	318.5	17.4
	660.4	34.0

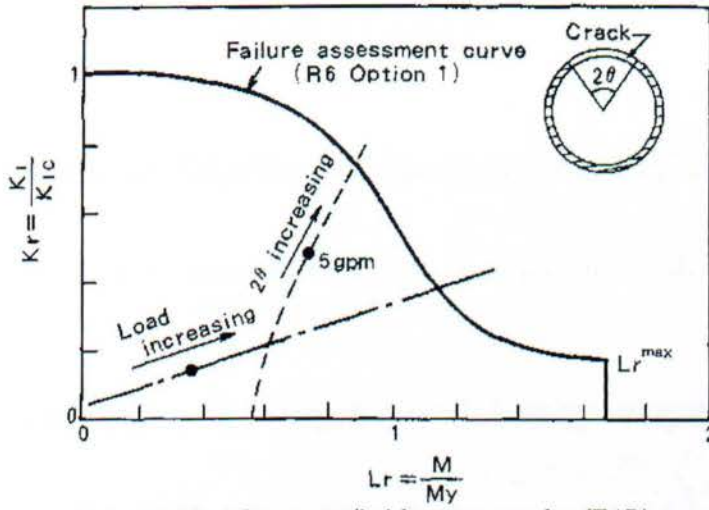
*ΠΙΝΑΚΑΣ 1.Στοιχεία αγωγών*

### **Ανάλυση θραύσης**

Η αστοχία μιας δομής οριοθετείται από τα δύο άκρα, μία γραμμική ελαστική παραμόρφωση  $K_r$  και μια πλήρως πλαστική παραμόρφωση  $L_r$ . Σε αυτή την προσέγγιση, η οποία συνδυάζει την  $K_T$  και την  $L_r$ , αντιπροσωπεύεται η θραύση στο διάγραμμα αξιολόγησης αστοχίας (FAD), όπως φαίνεται στο σχήμα. 2. Το FAD αξιολογεί την ακεραιότητα των υποβαθμισμένων αγωγών. Όταν ένα σημείο αξιολόγησης της ραγισμένου σωλήνα χαράσσεται κάτω από την καμπύλη αξιολόγησης αστοχίας (FAC) στο FAD, ο σωλήνας δεν σπάει. Αντιστρόφως, όταν το σημείο βρίσκεται πάνω από την καμπύλη αξιολόγησης αστοχίας, στον αγωγό συμβαίνει θραύση. Τρεις επιλογές καμπυλών αξιολόγησης αστοχίας προτείνονται από την CEGB. Στην παρούσα μελέτη, η πρώτη επιλογή καμπύλης χρησιμοποιείται και δίνεται ως ακολούθως:

$$f^{\wedge}(L_r) = (1 - 0.14L_r^2)[0.3 + 0.7 \exp(-0.65L_r^6)].$$





Σχήμα. 3.12. Διάγραμμα αξιολόγησης αστοχίας (FAD)

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup>****Πειραματική διερεύνηση αστοχίας σωληνώσεων**

Στα παρακάτω πειράματα μελετώνται αστοχίες αναλόγως με το είδος των ρευστών που μεταφέρουν (νερό ,πετροχημικά ,φυσικό αέριο).

**Αστοχία σωλήνα σε σύστημα αποθείωσης πετροχημικών**

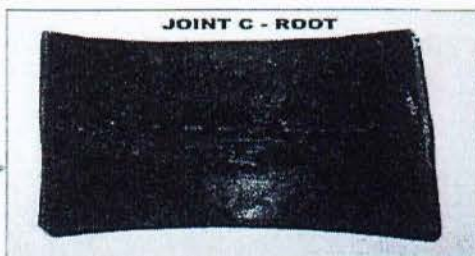
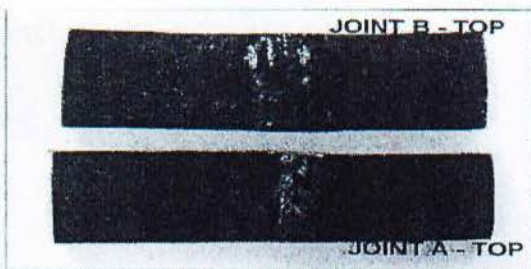
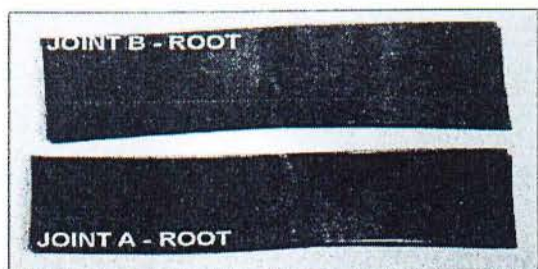
Λόγω της υψηλής περιεκτικότητας σε Θείο (S) των πετροχημικών ,η απομάκρυνση του είναι απαραίτητη ώστε να γίνουν αναλώσιμα. Η απομάκρυνση του Θείου γίνεται με την βοήθεια του νερού δημιουργώντας ταυτόχρονα όξινο νερό. Το Υδρόθειο( $H_2S$ ) που υπάρχει στο νερό διαμορφώνει ένα εξαιρετικά διαβρωτικό περιβάλλον μέσα στους σωλήνες μεταφοράς, που έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία υδρογονικής ψαθυροποίησης (hydrogen embrittlement) καθ'όλο το μήκος του σωλήνα καθώς και την σημαντική ρωγμάτωση των συγκολλητών συνδέσμων.Επιπλέον παράγοντες που μπορούν να επηρεάσουν την αστοχία του σωλήνα είναι η θερμοκρασία , η πίεση του ρευστού καθώς και η παρουσία άλλων αερίων όπως διοξείδιο του Άνθρακα ( $CO_2$ ) και Οξυγόνο( $O_2$ ).Στις εικόνες που ακολουθούν βλέπουμε 3 διαφορετικούς συγκολλητούς σωλήνες στους οποίους έχουν δημιουργηθεί στην ένωση τους ρωγμές(crack). (14)

Στον παρακάτω πίνακα επισημαίνετε η διαφορετική χημική τους σύσταση:

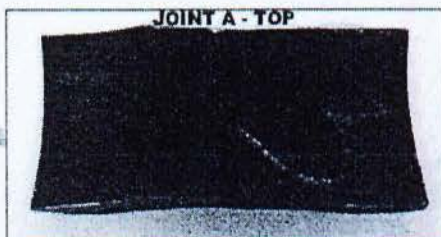
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.1

ΜΙΚΗ ΣΥΣΤΑΣΗ (%)													
ΝΑΣ	C	Si	Mn	P	S	Ni	Mo	Al	V	Nb	Ti	Pb	Fe
1	0.2	0.19	0.83	0.015	0.007	0.01	0.01	0.02	0.01	0.002	0.001	0.002	98.703
2	0.18	0.2	0.52	0.013	0.009	0.01	0.02	0.02	0	0.001	0	0.001	99.026
3	0.13	0.23	1.3	0.017	0.005	0.01	0.04	0.02	0.045	0.034	0	0.002	98.167



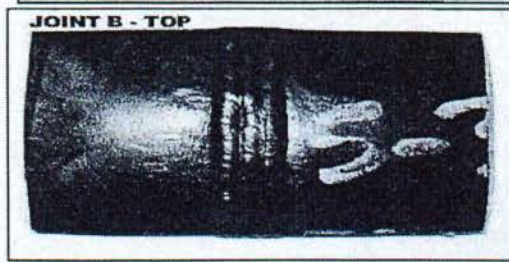
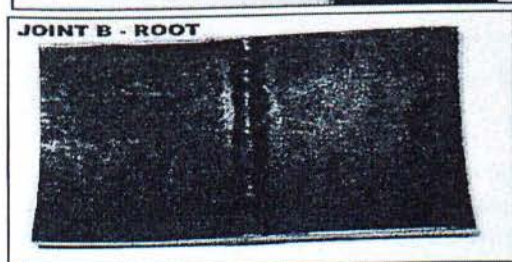
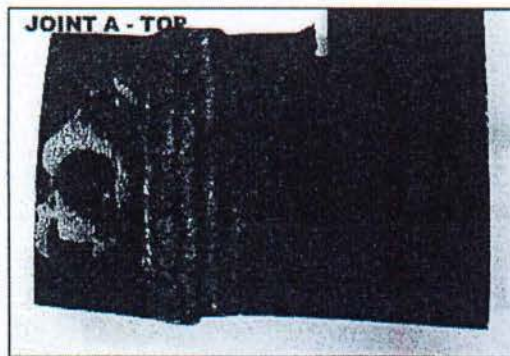
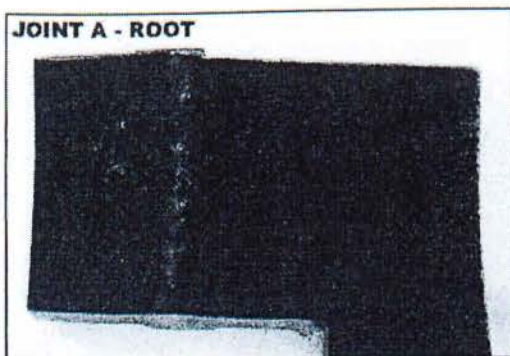


ΣΩΛΗΝΑΣ N<sub>0</sub>1



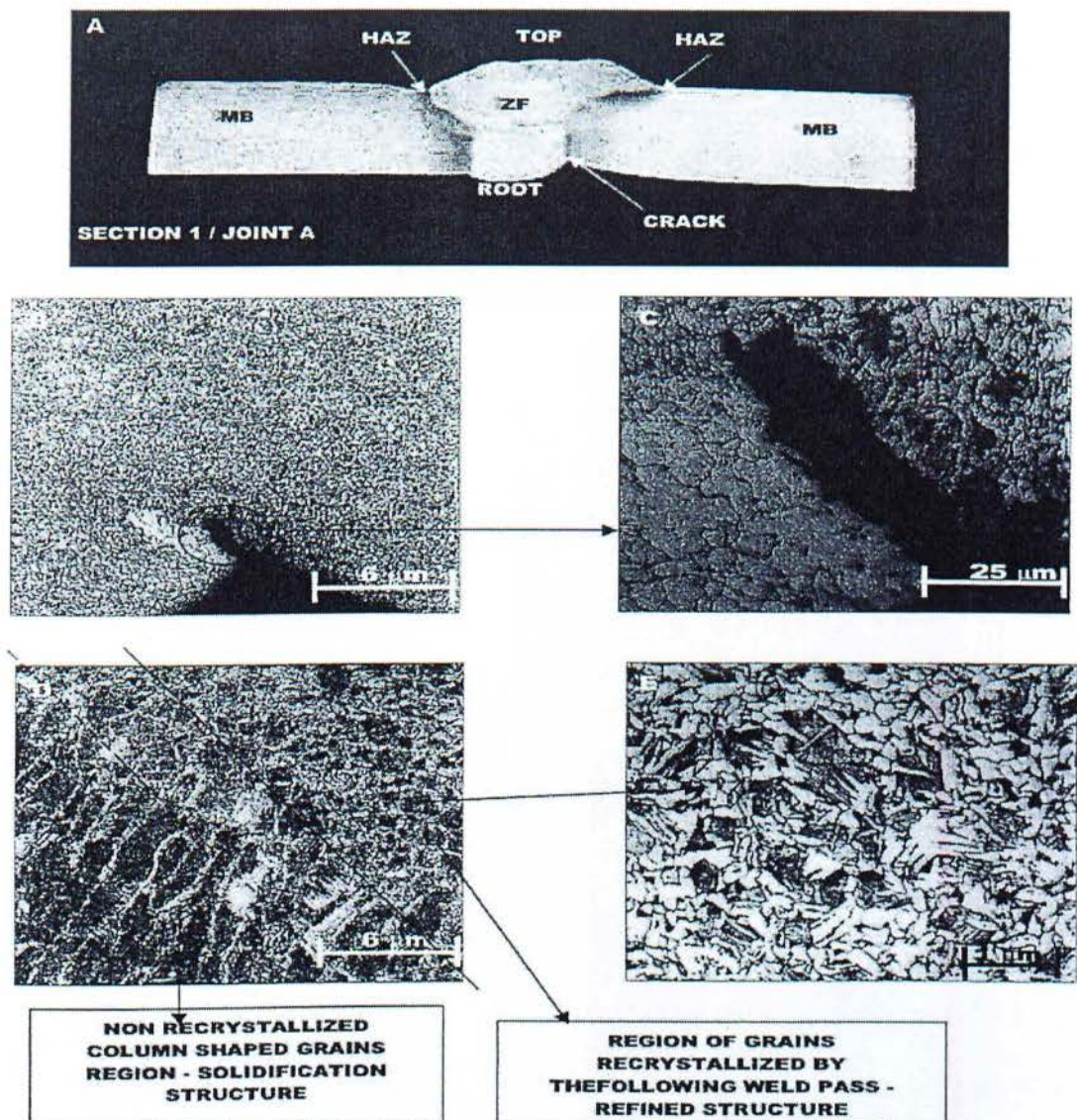
ΣΩ

ΣΩΛΗΝΑΣ N<sub>0</sub>2



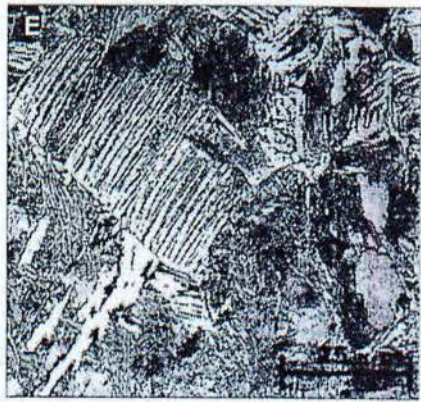
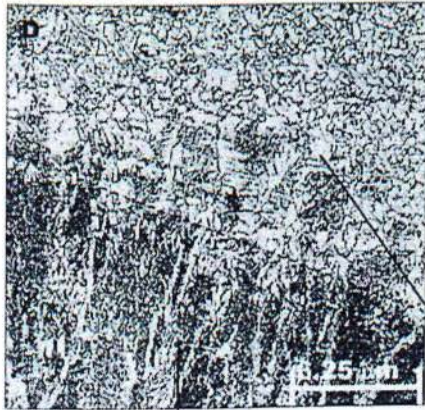
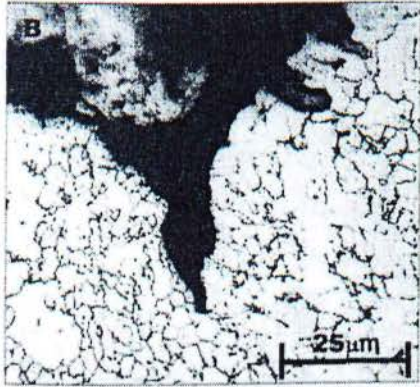
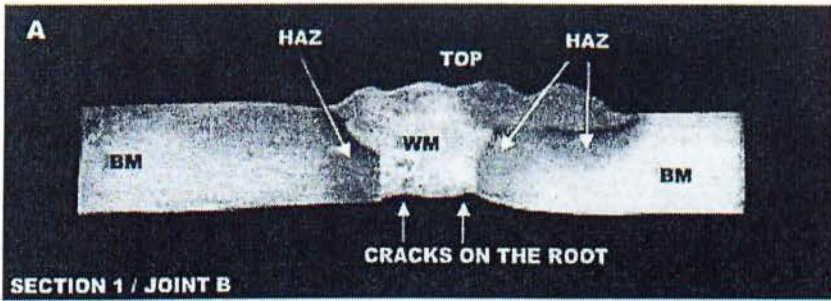
ΣΩΛΗΝΑΣ N<sub>0</sub>3





ΕΙΚ.4.1 (Α) Μακροσκοπική άποψη της σύνδεσης του σωλήνα 1, της 1<sup>ης</sup> συγκόλλησης(joint A) . (Β) Η μικροδομή του και (C) μια ρωγμή στο στην ρίζα της συγκόλλησης. (D) Μικροδομή δύο διαφορετικών περιοχών συγκόλλησης: ένα με μη ανακρυσταλλικούς κόκκους, τυπικά ένα όπως στερεοποιημένη μικροδομή, και το άλλο με περισσότερους πολυγωνικούς κόκκους που ανακρυσταλλώθηκαν από πέρασμα στην κορυφή της συγκόλλησης. (Ε) Λεπτομέρεια της περιοχής με ανακρυσταλλικούς κόκκους.



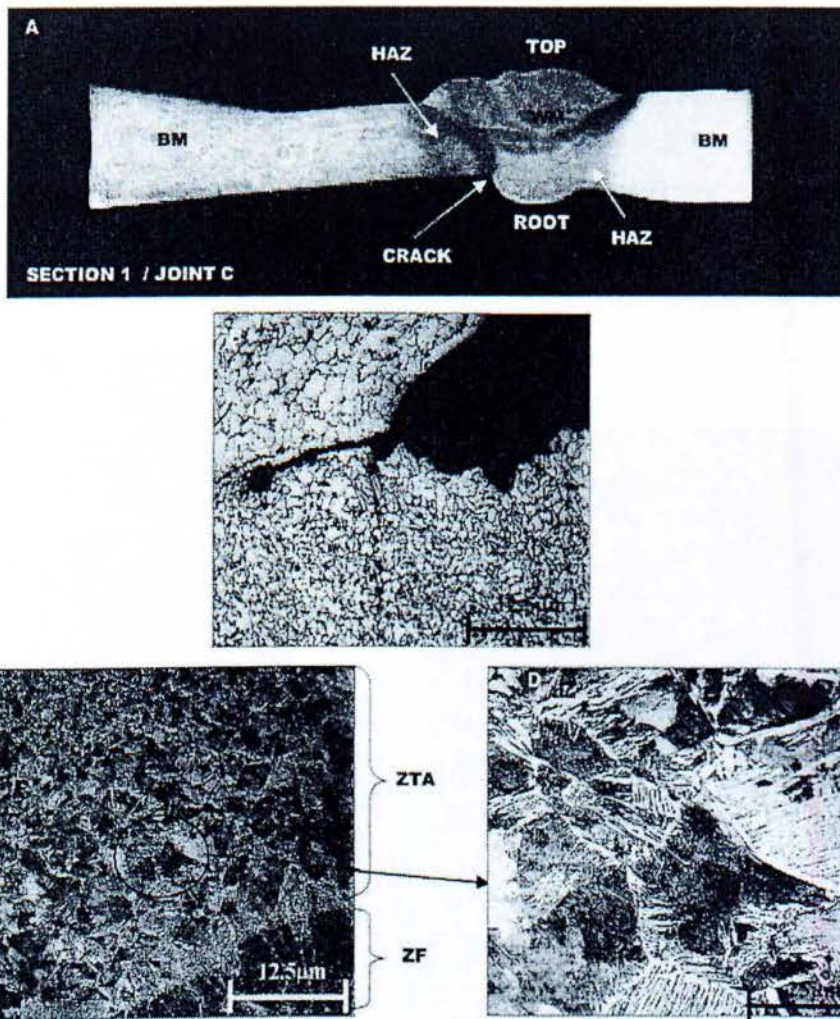


**REGION WITH COLUMN SHAPED  
GRAINS NOT RECRYSTALLIZED  
- SOLIDIFICATION STRUCTURE**

**REGION WITH GRAINS  
RECRYSTALLIZED BY THE  
FOLLOWING WELD PASS -REFINED  
STRUCTURE**

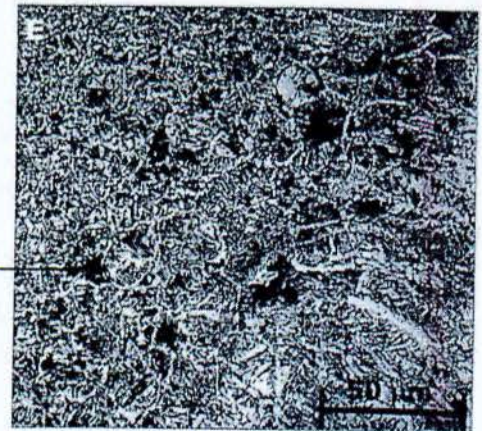
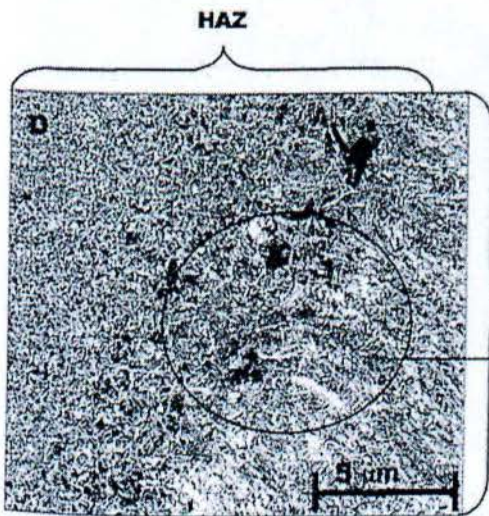
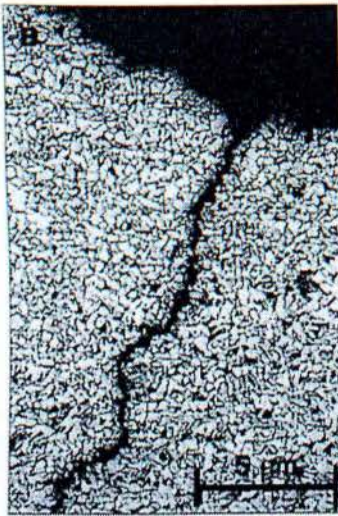
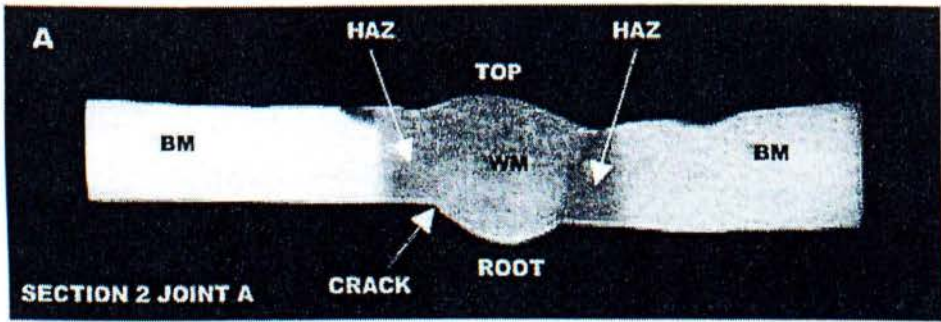
ΕΙΚ.4.2 (Α) Μακροσκοπική άποψη της σύνδεσης του σωλήνα 1, της 2<sup>ης</sup> συγκόλλησης(joint B) .  
(Β) Ρωγμή στην ρίζα της συγκόλλησης.(C) Βαινιτική-μαρτενσιτικοί μικροδομή της θερμικά επηρεαζόμενης ζώνης στη ρίζα.. (D) Μικροδομή στην κορυφή της συγκόλλησης με δύο περιοχές: η μία στήλη με χοντρό σχήμα κόκκων, που προκύπτουν από την στερεοποίηση, και ο άλλος με το ανακρυσταλλικούς κόκκους, ως αποτέλεσμα των ακόλουθων πέρασμα συγκόλλησης. (E) Εύθραυστη βαινιτική-μαρτενσιτική μικροδομή της θερμικά επηρεαζόμενης ζώνης στην κορυφή της συγκόλλησης.





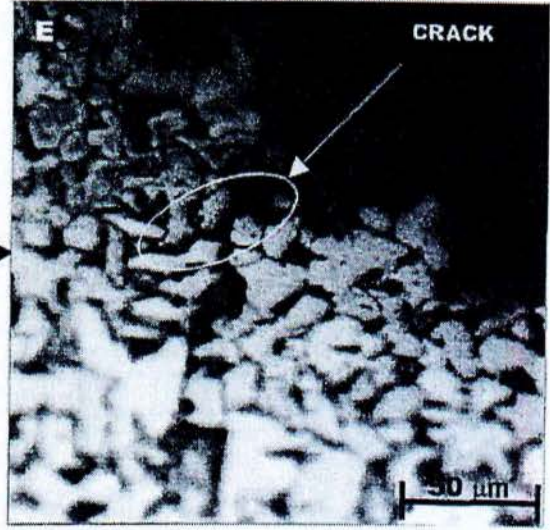
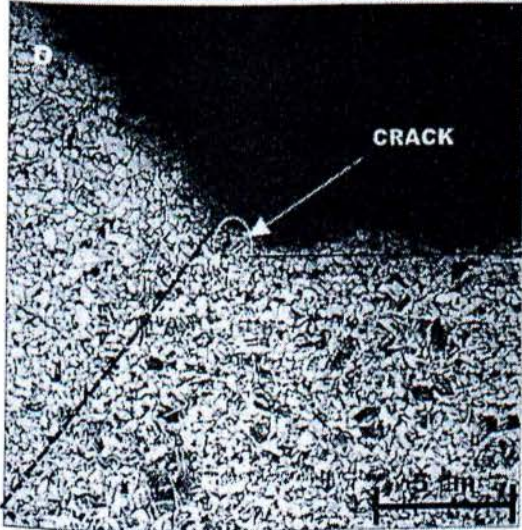
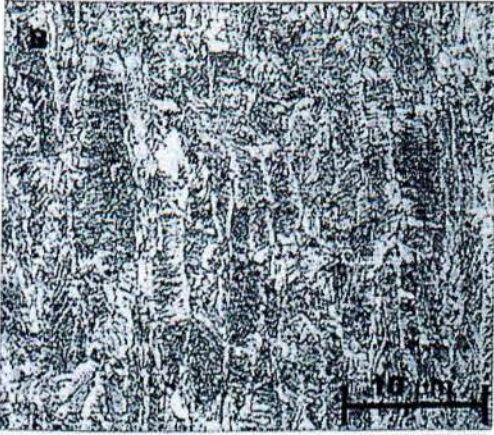
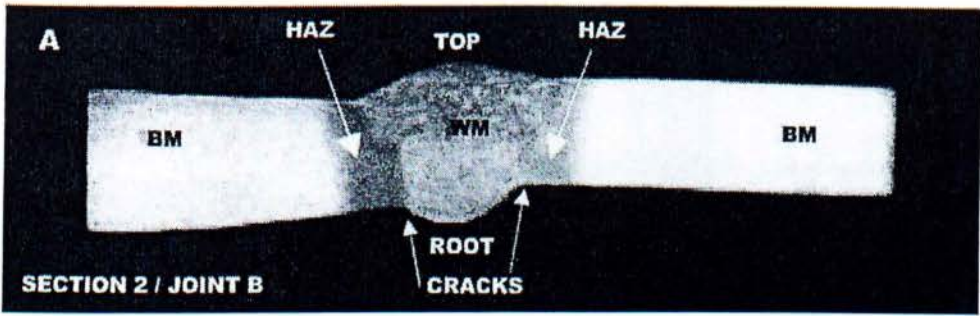
ΕΙΚ.4.3 (Α)Μακροσκοπική άποψη της σύνδεσης του σωλήνα 1 της 3<sup>ης</sup> συγκόλλησης(joint C) και οι μικροδομές του. (Β),(C) Μια ρωγμή που δημιουργήθηκε στην θερμικά επηρεασμένη ζώνη(HAZ) / του μετάλλου συγκόλλησης (WM) στη ρίζα..(D) Λεπτομέρεια από εύθραυστους κόκκους (μαρτενσίτη και μπαινίτη) στην ρίζα.





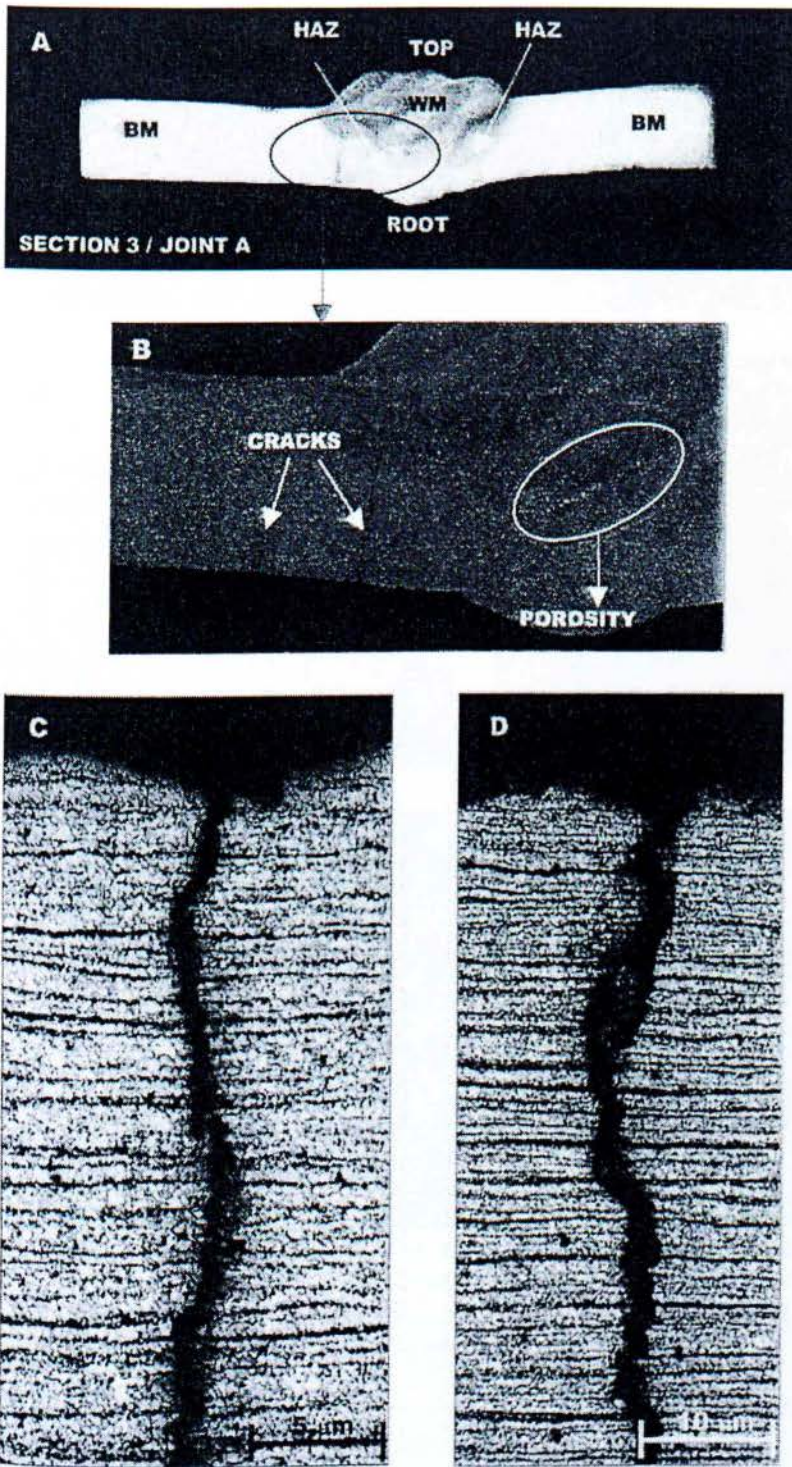
ΕΙΚ.4.4 (Α)Μακροσκοπική άποψη του σωλήνα 2 ,της 1<sup>ης</sup> συγκόλλησης (joint A) και οι μικροδομές που υπάρχουν σε αυτήν. (Β) Μια ρωγμή διαδίδεται κατά μήκος της ρίζας του υλικού συγκόλλησης ρίζα. (C) Μικροδομή της θερμικά επηρεαζόμενης ζώνης στη ρίζα, με την παρουσία μαρτενσίτη και μπαϊνίτη. (D) Μικροδομή της θερμικά επηρεαζόμενης ζώνης στην κορυφή της συγκόλλησης. (E) Λεπτομερή προβολή αυτής της μικροδομής με εύθραυστο προ-ευθηκτοειδή φερρίτη.





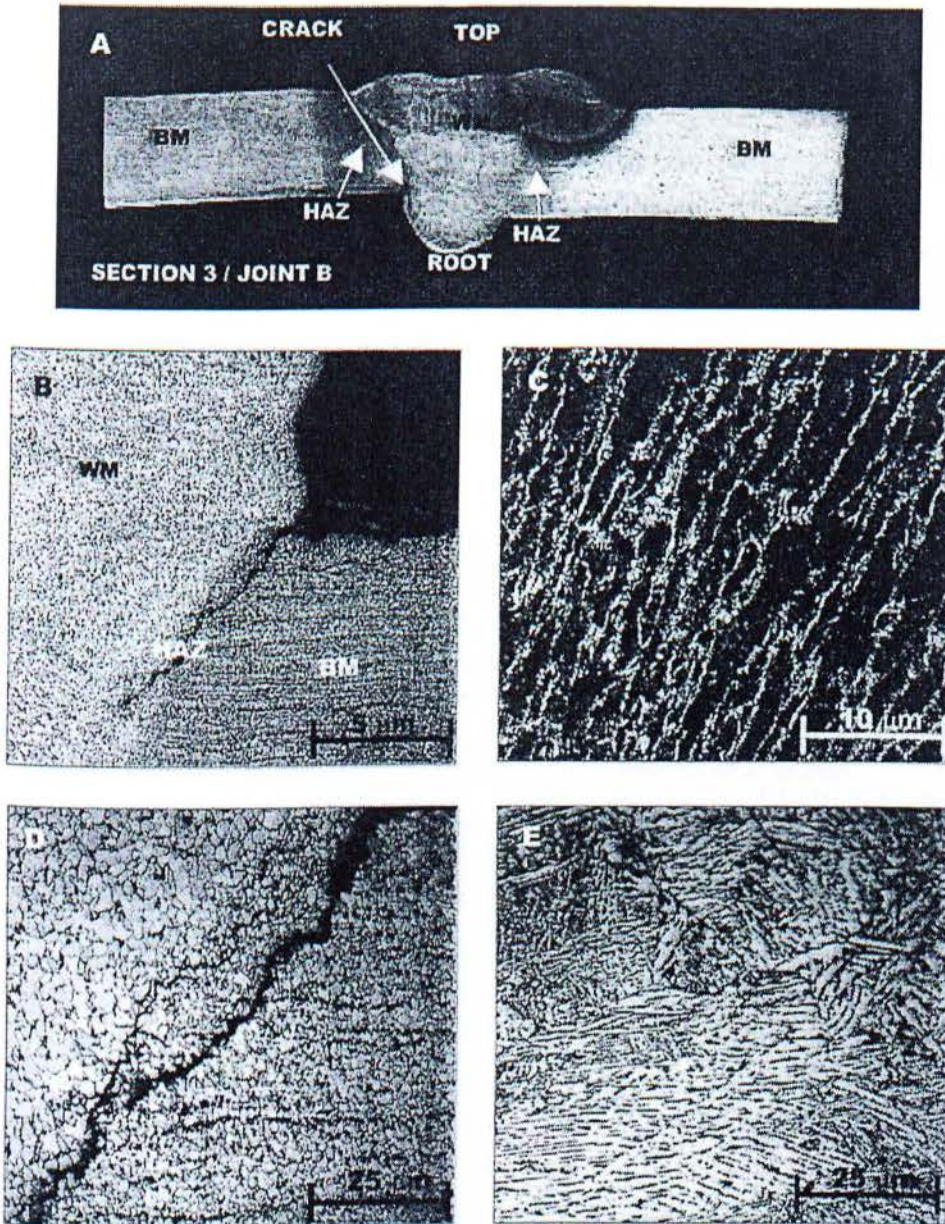
ΕΙΚ.4.5 (Α)Μακροσκοπική άποψη του σωλήνα 2 ,της 2<sup>ης</sup> συγκόλλησης (joint B) με τις μικροδομές του. (Β) και (C) Μικροδομή της θερμικά επηρεαζόμενης ζώνης στη ρίζα, με ορισμένες μπαινιτικές και μαρτενσιτικές περιοχές. (D) και (E) Μια ρωγμή στην ρίζα.





ΕΙΚ.4.6 (Α)Μακροσκοπική άποψη του σωλήνα 3 ,της 1<sup>ης</sup> συγκόλλησης (joint A) με ρωγμές, και πόρους που μπορεί να δει κανείς σε μια λεπτομερή εικόνα. (Β), (C) και (D) Ρωγμές προήλθαν στην θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη, και οι οποίες διαδίδονται μέσω του βασικού μετάλλου.





ΕΙΚ.4.7 (Α)Μακροσκοπική άποψη του σωλήνα 3 ,της 2<sup>ης</sup> συγκόλλησης (joint B) με τις μικροδομές του. (Β) και (D) Μια ρωγμή στην θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη σε λεπτομερή όψη.(C) Κόκκοι στο μέταλλο συγκόλλησης. (E)Μαρτενσιτική - μπαινιτική μικροδομή της θερμικά επηρεαζόμενης ζώνης.

Επίσης αξίζει να αναφερθεί ότι η συγκόλληση έγινε με την μέθοδο TIG (ακίδα Βολφραμίου και αδρανές αέριο).

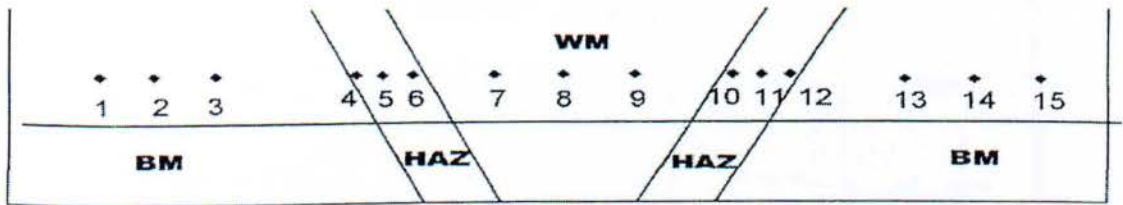
Βάση των παραπάνω εικόνων προκύπτουν τα εξής αποτελέσματα:

- Πόροι στην κορυφή της συγκόλλησης (καπάκι).
- Ρωγμές στην θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη και στην ρίζα του μετάλλου συγκόλλησης .
- Εύθραυστες Μαρτενσιτικές – Μπαινιτικές περιοχές στην ρίζα και την κορυφή του μετάλλου συγκόλλησης καθώς και στην θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη.
- Μη ανακρυσταλλικούς κόκκους στο μέταλλο συγκόλλησης



- Περιοχές με ανακρυσταλλικούς κόκκους στην κορυφή της συγκόλλησης και οφείλονται στα περάσματα του λιωμένου μετάλλου.
- Παρουσία προεντικοειδή Φερρίτη και στις 2 θερμικά επηρεαζόμενες ζώνες.
- Κακή ευθυγράμμιση των δύο βασικών μετάλλων συγκόλλησης με αποτέλεσμα την δημιουργία υψηλών τοπικών τάσεων.
- Κακή προσπάθεια οπλισμού της συγκόλλησης με παραπάνω μέταλλο συγκόλλησης στην ρίζα και στην κορυφή της καθώς ξεχωρίζει αρκετά σε ύψος από το βασικό μέταλλο. (15)

Στην παρακάτω εικόνα φαίνονται οι περιοχές μέτρησης σκληρότητας:

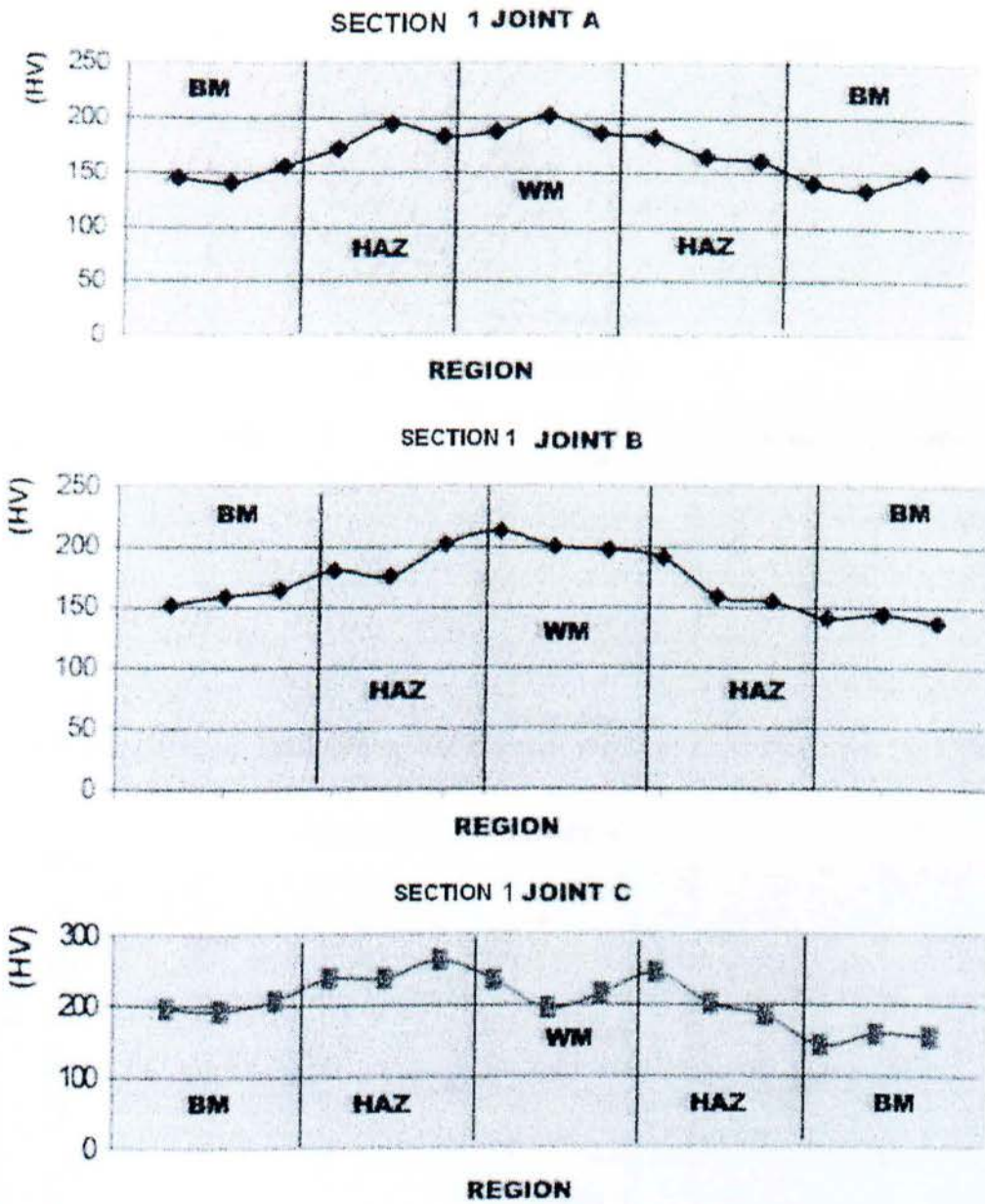


ΕΙΚ4.8 ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑΣ

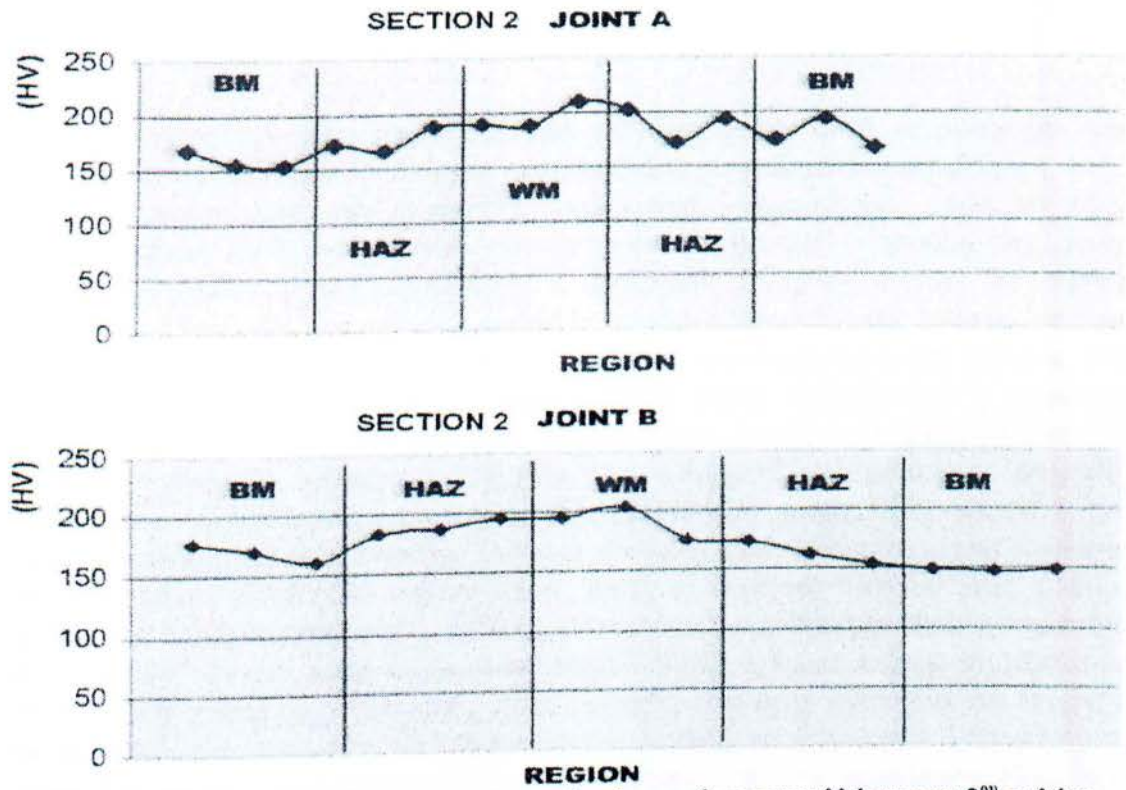
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.2 ΜΕΤΡΗΣΗ ΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑΣ

Τομέας	Σωλήνας N°1	Σωλήνας N°1	Σωλήνας N°1	Σωλήνας N°2	Σωλήνας N°2	Σωλήνας N°3	Σωλήνας N°3
Αριστερά (βασικό μέταλλο)	joint A	joint B	joint C	joint A	joint B	joint A	joint B
1	145.74	151.42	195.08	168.47	176.88	165.39	169.54
2	140.79	158.79	191.25	154.95	170.88	169.54	170.88
3	156.08	164.02	205.36	153.66	159.78	155.02	169.54
Αριστερά (H.A.Z)							
4	172.39	180.14	237.61	172.11	183.38	205.8	202.1
5	194.87	175.41	237.39	166.5	186.52	235.53	233.3
6	183.28	202.33	263.05	188.15	194.93	250.36	242.1
Μεταλλο συγκόλλησης							
7	187.94	213.69	235.33	189.47	194.98	245.38	218.1
8	202.21	200.42	194.55	187.75	204.31	271.54	209.1
9	186.47	198.03	215.75	209.91	175.13	219.26	200.1
Δεξιά (H.A.Z)							
10	182.81	191.46	244.85	202.06	173.98	233.12	202.1
11	165.29	158.74	200.45	171.68	162.91	194.22	189.1
12	161.33	155.02	184.69	193.06	153.79	193.3	187.1
Δεξιά (βασικό μέταλλο)							
13	140.99	140.94	142.08	174.06	148.85	158.73	164.1
14	134.57	143.73	158.44	193.3	147.83	158.71	158.1
15	151.24	136.82	153.74	166.73	149.08	159.91	168.1

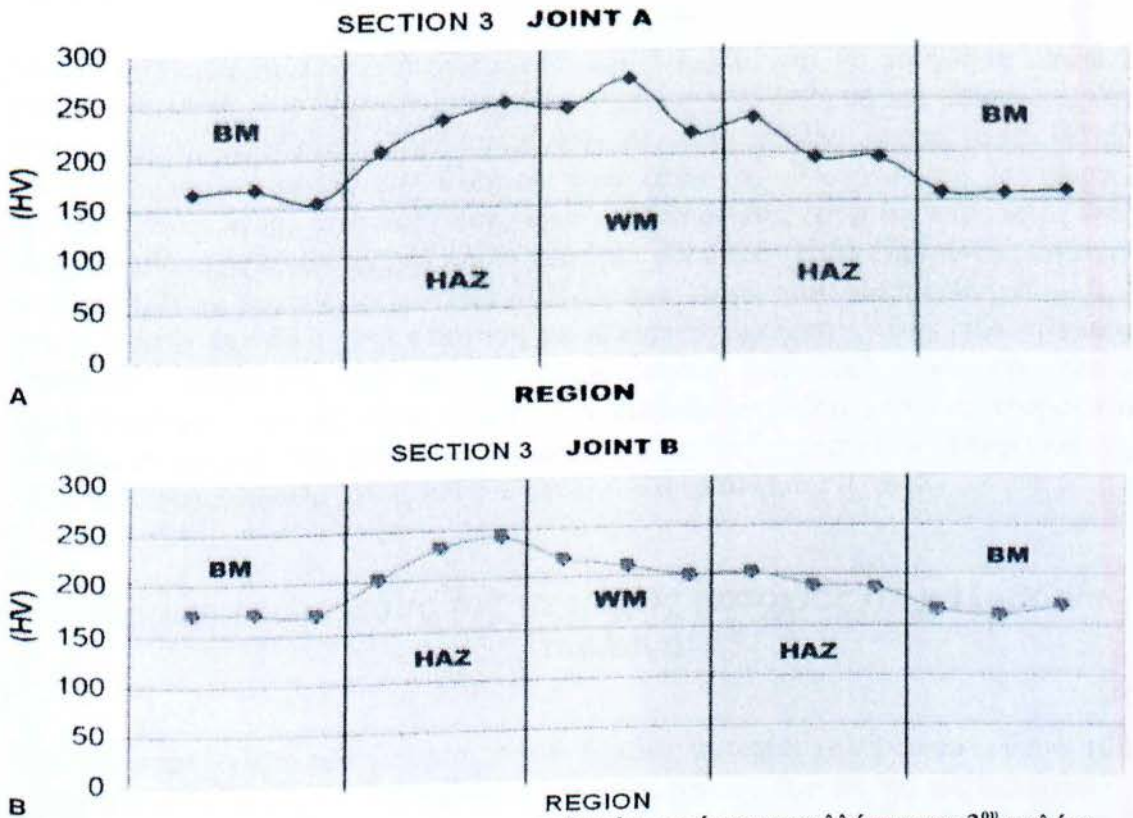




ΕΙΚ.4.9 Μέτρηση σκληρότητας των περιοχών γύρω από τις συγκολλήσεις του 1<sup>ου</sup> σωλήνα



ΕΙΚ.4.10 Μέτρηση σκληρότητας των περιοχών γύρω από τις συγκολλήσεις του 2<sup>ου</sup> σωλήνα



ΕΙΚ.4.11 Μέτρηση σκληρότητας των περιοχών γύρω από τις συγκολλήσεις του 3<sup>ου</sup> σωλήνα



## Συμπεράσματα

Οι ασυνέχειες που δημιουργούνται από τα ελαττώματα αυτά ενεργούν για την δημιουργία των ρωγμών, ακόμη και όταν δεν υπάρχει διαβρωτικό περιβάλλον, αλλά γίνεται κρίσιμη υπό την παρουσία διαβρωτικών παραγόντων όπως το  $H_2S$ . Παρατηρήθηκε ότι οι ρωγμές δημιουργούνται επί της θερμικά επηρεαζόμενης ζώνης και του μετάλλου συγκόλλησης όπου η ανεπαρκής ενίσχυση ενεργεί ως αύξηση μηχανικής τάσης. Οι εσωτερικές ρωγμές είναι χαρακτηριστικό της ευθραυστότητας από το υδρογόνο, διαδίδεται διαμέσου του πάχους του τοιχώματος του σωλήνα, από την εσωτερική πλευρά (ρίζα της συγκόλλησης) προς την εξωτερική επιφάνεια (κορυφή της συγκόλλησης) της στο τοίχωμα του σωλήνα. Η διάδοση ρωγμών ευνοήθηκε από μία εύθραυστη μικροδομή στην θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη των αρθρώσεων συγκόλλησης, το οποίο αποτελείται από μαρτενσίτη, μπαινίτη και προευτηκτοειδή φερρίτη. Συνήθως αυτά τα δυσμενή χαρακτηριστικά είναι συνέπεια των ανεπαρκών συνθηκών συγκόλλησης, όπως η ταχύτητα συγκόλλησης, ρυθμός ψύξης και άλλες παραμέτρους. Άλλος μειονεκτικός παράγοντας είναι η παρουσία χονδροειδών κόκκων στην κορυφή της συγκόλλησης, η οποία επίσης σχετίζεται με τις συνθήκες ψύξης μετά τη συγκόλληση. Συνεπώς, υπάρχουν αναγκαίοι και επαρκείς παράγοντες που μπορούν να προκαλέσουν ψαθυροποίηση λόγω υδρογόνου ή μηχανικής τάσης. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνεται από την προέλευση όλων των ρωγμών πάντα στην ρίζα, η οποία δημιουργείται στην εσωτερική πλευρά των σωλήνων.

Μετά την ανάλυση των αποτελεσμάτων που λαμβάνονται με τη χρήση οπτικού μικροσκοπίου και την μέτρηση σκληρότητας με τεχνικές δοκιμές, και θεωρώντας ότι είχαμε όλες τις διαθέσιμες πληροφορίες πάνω σε αυτό το θέμα, μπορεί να πει κανείς ότι η αιτία της αποτυχίας των σωλήνων ήταν λόγω του υδρογόνου που δημιουργεί ψαθυροποίηση, επαγόμενη διάβρωση ρωγμής καταπόνησης λόγω της παρουσίας ενός διαβρωτικού περιβάλλοντος, το οποίο περιέχει Υδρόθειο ( $H_2S$ ) ενεργώντας κατόπιν συγκολλημένων δομή με σημαντικά ελαττώματα. Αυτά ήταν κακή ευθυγράμμιση / αναντιστοιχία και ανεπαρκή ενίσχυση με πλευρικές κοιλότητες στη ρίζα, η οποία δημιουργεί διάβρωση υπό μηχανική τάση (stress corrosion), από την οποία δημιουργήθηκαν ρωγμές στον πυρήνα και διαδόθηκαν μέσα από ένα εύθραυστο περιβάλλον (μαρτενσίτη, μπαινίτη και προευτηκτοειδή φερρίτη) που υπάρχει επί της θερμικά επηρεαζόμενης ζώνης και του μετάλλου συγκόλλησης. (16-18)

## Επίδραση του μήκους της περιοχής αστοχίας σε χαλύβδινο σωλήνα

Στην παρούσα μελέτη πραγματοποιήθηκαν δοκιμές αστοχίας χαλύβδινου σωλήνα 102 χιλιοστών με διάφορες προσομοιώσεις λέπτυνσης του τοιχώματος για να ερευνηθεί η επίδραση του αξονικού μήκους της λέπτυνσης τοιχώματος και της εσωτερικής πίεσης στην αστοχία του σωλήνα. Οι δοκιμές διεξήχθησαν υπό συνθήκες φόρτισης των τεσσάρων σημείων κάμψης χωρίς εσωτερική πίεση καθώς και με την χρήση αυτής. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι ένας τρόπος αστοχίας του σωλήνα εξαρτιόταν από το μέγεθος της εσωτερικής πίεσεως. Τόσο η ικανότητα μεταφοράς φορτίου καθώς και η



ικανότητα παραμόρφωσης, εξαρτιόταν από τον τύπο φόρτισης στην πάσχουσα περιοχή και τις διαστάσεις του ελαττώματος.

Για την εφαρμογή εφελκυστικής τάσης στην περιοχή λέπτυνσης, η εξάρτηση της ικανότητας μεταφοράς φορτίου από το αξονικό μήκος της λέπτυνσης του τοιχώματος προσδιορίζεται με περιμετρική γωνία λέπτυνσης, και η ικανότητα παραμόρφωσης ήταν αναλογικά αυξανόμενη με την αύξηση του αξονικού μήκους της λέπτυνσης του τοιχώματος ανεξαρτήτως της περιφερειακής γωνίας.

Με την εφαρμογή θλιπτικής τάσης στην περιοχή λέπτυνσης, ωστόσο, η ικανότητα μεταφοράς φορτίου μειώθηκε με αύξηση του αξονικού μήκους της περιοχής λέπτυνσης. Επίσης, η επίδραση της εσωτερικής πίεσης και οδήγησε σε εμφάνιση ρωγμών και τοπικό λυγισμό της περιοχής λέπτυνσης.

Οι χαλύβδινοι σωλήνες χρησιμοποιούνται συνήθως σε πρωτογενή συστήματα σωληνώσεων υπό πίεση βαρέως ύδατος και δευτερεύοντα συστήματα σωληνώσεων υπό πίεση νερού του αντιδραστήρα σε πυρηνικούς σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής.

Είναι γνωστό ότι οι σωλήνες χάλυβα είναι ευαίσθητοι στην διάβρωση υπό συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας και υψηλή ταχύτητα ροής ρευστού, ωστόσο έχει ένα καλό χαρακτηριστικό κατασκευής. Κατά την διάρκεια των τελευταίων τριών δεκαετιών, περίπου 400 αστοχίες λέπτυνσης τοιχώματος έχουν αναφερθεί στον κόσμο. (19)

## Πειραματική διαδικασία

### Δείγμα αγωγού

Δοκιμές διεξήχθησαν χρησιμοποιώντας αγωγούς 102 χιλιοστών (4 ίντσες). Το υλικό του σωλήνα που χρησιμοποιείται στο πείραμα είναι ανθρακούχος χάλυβας που ορίζεται από το ASTM ως A333 Gr.6, και χρησιμοποιείται συνήθως σε δευτερεύον σύστημα σωληνώσεων του πυρηνικού σταθμού.

#### ΠΙΝΑΚΑΣ 4.3 ΧΗΜΙΚΗ ΣΥΣΤΑΣΗ

Σύνθεση	C	Si	Mn	P	S
	0.19	0.21	0.59	0.0015	0.0011



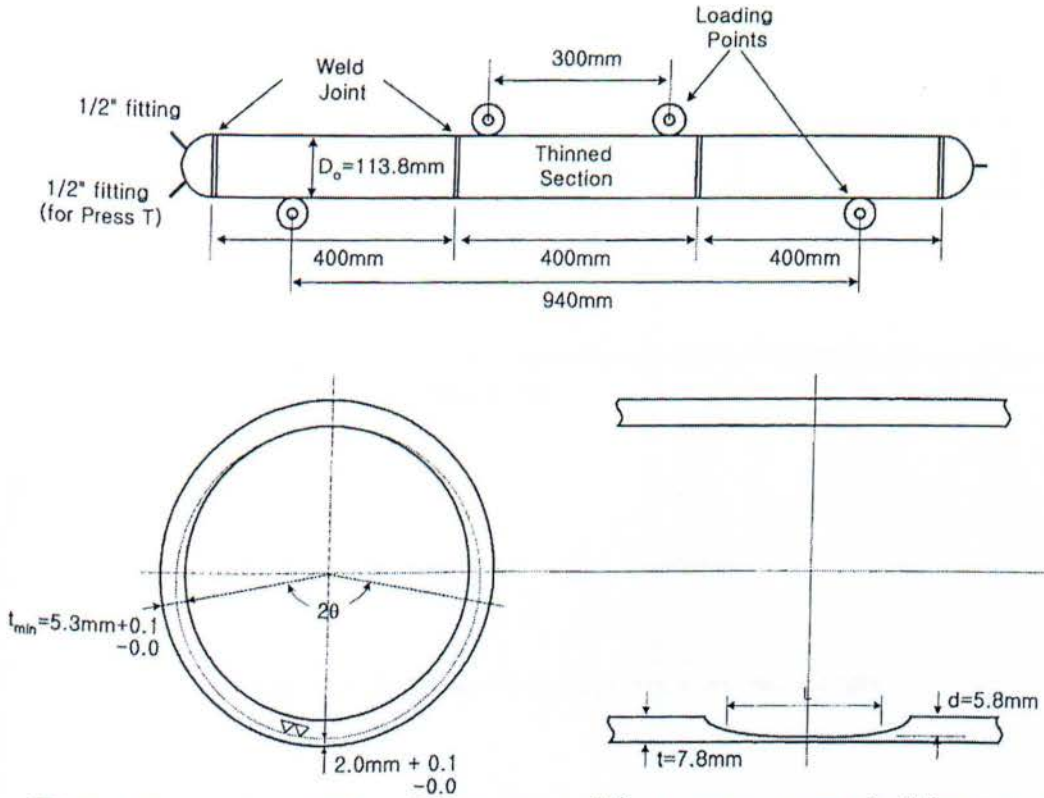
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.4 ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

Yield stress ( $p_y$ , MPa)	Ultimate tensile stress ( $\sigma$ ^MPa)	Elongation (%)
302.0	449.8	30.1

Η χημική σύνθεση και οι μηχανικές ιδιότητες του υλικού των σωλήνων απαριθμούνται στους πίνακες 1 και 2, αντιστοίχως. Τα δείγματα κατασκευάστηκαν με συγκόλληση τριών κομματιών αγωγού μήκους 400 χιλιοστών. Όλα τα τμήματα σωλήνων υποβλήθηκαν σε κατεργασία ώστε οι διαστάσεις της εξωτερικής διαμέτρου και του πάχους να είναι ομοιόμορφες ( $D_o = 113,8$  χιλιοστά,  $t = 7,8$  mm) προ της τοπικής λέπτυνση του τοιχώματος. Η λέπτυνση κατασκευάστηκε στην εσωτερική πλευρά του τμήματος, και οι διαμορφώσεις του δείγματος καθώς και η λέπτυνση του τοιχώματος απεικονίζονται στο Σχήμα. 1.

Στον Πίνακα 4.5 παρατίθενται, τα διάφορα αξονικά μήκη ( $L$ ) και οι περιφερειακές γωνίες ( $2\theta$ ) λέπτυνσης του τοιχώματος της εξετάστηκαν στο παρόν πείραμα. Το εύρος του αξονικού μήκους του τοιχώματος λέπτυνσης ήταν από 25mm ( $L / D_i = 0.25$ ) μέχρι 200 χιλιοστά ( $L / D_i = 4.0$ ), και η περιφερειακή γωνία λέπτυνσης ήταν  $2\theta = 90, 180$ , και  $360^\circ$ , και βάθος  $d / t = 0,74$  αντίστοιχα.

Τα αξονικά μήκη και η περιφερειακή γωνία λέπτυνσης της λέπτυνσης καθορίστηκαν από την περιοχή, όπου το πάχος του τοιχώματος είναι λεπτότερο από το ελάχιστο πάχος ( $t_{min}$ ) που απαιτείται από τους κατασκευαστικούς κώδικες, ASME B&PV Sec.III (1995) και ANSI/ASME B31.1 (1995). Επίσης, οι διαστάσεις των τοπικών λεπτύνσεων του τοιχώματος σε όλα τα δείγματα ελέγχθηκαν με τη τεχνική των υπερήχων.

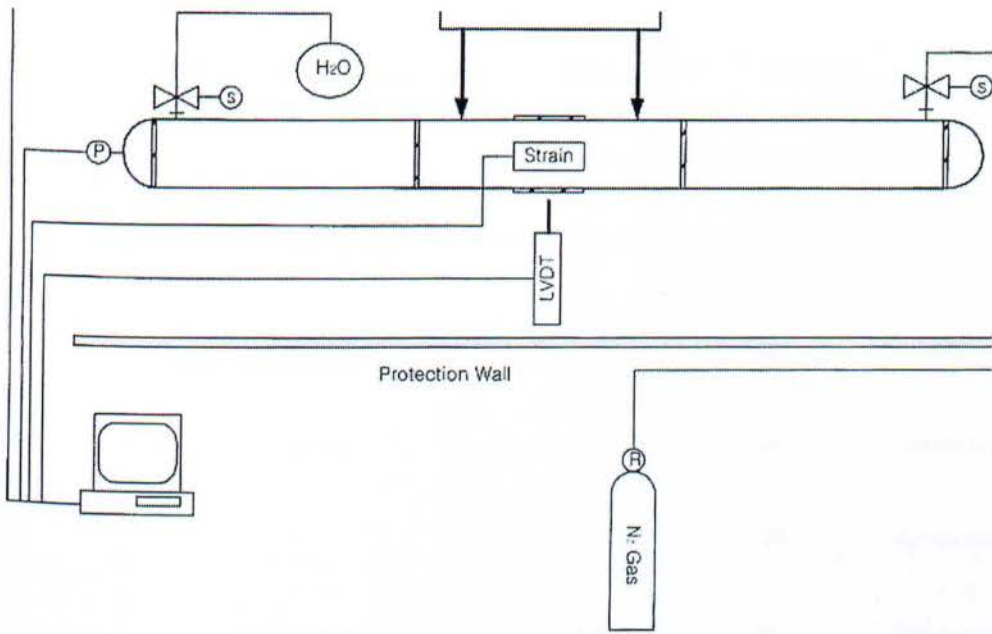


**ΕΙΚ.4.12. Διαμόρφωση του δείγματος σωλήνα και των τοπικών λέπτυνση του τοιχώματος σχήμα.**

### Πειραματική διαδικασία

Στο παρόν πείραμα, εφαρμόστηκε καμπτικό φορτίο στο δοκίμιο από τέσσερα σημεία φόρτωσης με και χωρίς εσωτερική πίεση σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Στο Σχήμα 2 φαίνεται η συσκευή δοκιμής που χρησιμοποιείται στο πείραμα. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2, αυτό αποτελείται από ένα τεσσάρων σημείων σύστημα φόρτωσης που εφαρμόζει ροπή κάμψεως και ένα σύστημα για τον έλεγχο της εσωτερικής πίεσης. Το τεσσάρων σημείων σύστημα φόρτωσης σχεδιάστηκε για να είναι σε θέση να εξυπηρετεί τη μεταβολή της κατεύθυνσης φόρτωσης. Οι μείζονες και ελάσσονες αποστάσεις των τεσσάρων σημείων του συστήματος φόρτισης είναι 940 και 300 mm, αντίστοιχα.





ΕΙΚ 4.13. Σχηματικό διάγραμμα της συσκευής ελέγχου

Όπως παριστάνεται στον Πίνακα 4.5, δύο τύποι φορτίου κάμψης εξετάστηκαν στο πείραμα, το ένα είναι η τάση εφελκυσμού που εφαρμόζεται στην λεπτότερη περιοχή και η άλλη είναι η θλιπτική τάση.

	Εφαρμογής	γωνία	μήκος	αστοχίας
	τάσεων στην			
(P, MPa)	περιοχή λέπτυνσης	λέπτυνσης	λέπτυνσης	
		(2θ, °)	(L, mm)	
0	Εφελκυσμός	180	25	ράγισμα
			200	ωοειδές σχήμα
	Θλίψη		25	τοπικός λυγισμός
			200	τοπικός λυγισμός
	Εφελκυσμός + Θλίψη	360	25	τοπικός λυγισμός /ράγισμα
			200	τοπικός λυγισμός / ωοειδές σχήμα
10	Εφελκυσμός	90	25	ράγισμα
			200	ωοειδές σχήμα
	Θλίψη		25	τοπικός λυγισμός
			200	τοπικός λυγισμός
	Εφελκυσμός	180	25	ράγισμα
			50	ράγισμα
			100	ράγισμα
			200	ράγισμα
	Θλίψη		25	τοπικός λυγισμός
			50	τοπικός λυγισμός
			100	τοπικός λυγισμός
			200	τοπικός λυγισμός



Στις δοκιμές με την εσωτερική πίεση, ένα δείγμα του σωλήνα είχε πρωταρχικά υποστεί πίεση με νερό και αέριο άζωτο ( $N_2$ ) σε μια εσωτερική πίεση 10 MPa, και κατόπιν επιφορτίστηκε με ροπή κάμψης. Στο πείραμα μετρήθηκαν , το φορτίο , η εσωτερική πίεση, και οι τάσεις.

## Αποτελέσματα

### Τρόποι αστοχίας

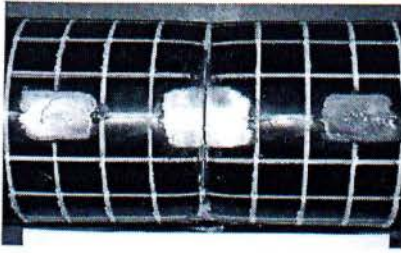
Στον πίνακα 3 παρουσιάζεται μια περίληψη των τρόπων αστοχίας που παρατηρήθηκαν στο πείραμα. Όπως παρατίθεται στον Πίνακα 3, η αστοχία στο κομμάτι λέπτυνσης του τοιχώματος ταξινομήθηκε σε πέντε τύπους, οι οποίες είναι: τοπικός λυγισμός, ράγισμα, ωοειδές σχήμα, τοπικός λυγισμός με ράγισμα και τοπικός λυγισμός με ωοειδές σχήμα. Αυτό χαρακτηρίζεται από την τάση στην πάσχουσα περιοχή, το μέγεθος της εσωτερικής πίεσεως, το αξονικό μήκος λέπτυνσης, και την περιφερειακή γωνία λέπτυνσης. Το Σχήμα 3 δείχνει τους τύπους αστοχίας που παρατηρήθηκαν στο παρόν πείραμα. Όταν η περιοχή λέπτυνσης υποβλήθηκε σε θλιπτική τάση, αστόχησε λόγω τοπικού λυγισμού, ανεξάρτητα από τις διαστάσεις λέπτυνσης και εσωτερικής πίεσεως.

Όταν η λεπτή περιοχή υποβλήθηκε σε εφελκυστική τάση, ο αγωγός αστόχησε λόγω ραγίσματος και πήρε ωοειδές σχήμα, ανάλογα με τις διαστάσεις της περιοχής λέπτυνσης και του μεγέθους της εσωτερικής πίεσεως. Όπως παριστάνεται στον Πίνακα 3, όλοι οι αγωγοί που περιέχουν ένα μικρό αξονικό μήκος λέπτυνσης ( $L = 25$  mm) παρουσιάζουν ρωγμές. Για αγωγό με ένα μεγάλο αξονικό μήκος λέπτυνσης ( $L = 200$  mm), το ωοειδές σχήμα εμφανίστηκε υπό την προϋπόθεση της μικρής γωνίας λέπτυνσης ( $2\theta = 90^\circ$ ) ή χωρίς εσωτερική πίεση, ενώ οι ρωγμές εμφανίστηκαν όταν η γωνία λέπτυνσης ήταν  $2\theta = 180^\circ$  με εσωτερική πίεση 10 MPa. Για αγωγό με γωνία λέπτυνσης  $2\theta = 360^\circ$ , παρατηρήθηκε συνδυασμένος τύπος αστοχίας. Ένας τοπικός λυγισμός συνέβη όταν ο αγωγός υποβλήθηκε σε συμπιεστικές τάσεις, και ένα ράγισμα με ωοειδές σχήμα εμφανίστηκε όταν υποβλήθηκε σε εφελκυστική τάση.

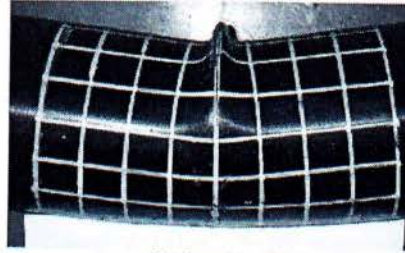
Σε αυτή την περίπτωση μάλιστα, η ρωγμή παρατηρήθηκε σε μικρό μήκος λέπτυνσης ( $L = 25$  mm) και υπό συνθήκες πίεσης, και το ωοειδές σχήμα παρατηρήθηκε στον αγωγό σε μεγάλο μήκος λέπτυνσης  $L = 200$  mm, χωρίς εσωτερική πίεση.

Αυτά τα αποτελέσματα δείχνουν ότι ο τύπος αστοχίας επηρεάζεται όχι μόνο από το βάθος της λέπτυνσης, και την περιφερειακή γωνία λέπτυνσης, αλλά και από τον τύπο τάσεων που εφαρμόζονται στην περιοχή λέπτυνσης. (20-23)

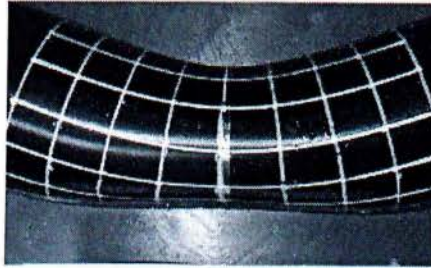
**ΕΙΚ 4.14. Τύποι αστοχίας**



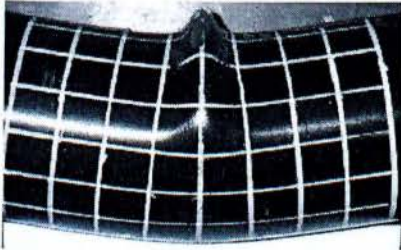
(a) Cracking



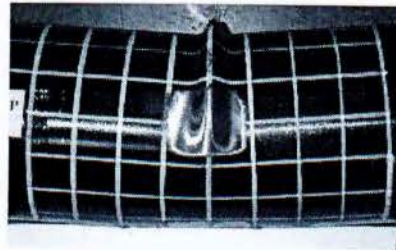
(b) Local buckling



(c) Ovalization



(d) Cracking with local buckling



(e) Ovalization with local buckling

**Συμπεράσματα**

Στην παρούσα μελέτη, οι δοκιμές αστοχίας εκτελέστηκαν χρησιμοποιώντας αγωγό 102 mm (4in.) από χάλυβα που ορίζεται από το ASTM ως A333Gr.6 σε θερμοκρασία περιβάλλοντος για να αξιολογήσει η αστοχία σε τοπικό σημείο λέπτυνσης. Ιδιαίτερη σημασία δόθηκε στο αξονικό μήκος του τοιχώματος λέπτυνσης και την εσωτερική πίεση. Τα αποτελέσματα ήταν ως προς: την επιβολή τάσεων στην περιοχή λέπτυνσης, το βάθος λέπτυνσης, και την περιμετρική γωνία λέπτυνσης.

Επίσης, η πιθανότητα ρωγμής στην περιοχή λέπτυνσης αυξάνεται με την μείωση του αξονικού μήκους λέπτυνσης και αυξάνοντας την εσωτερική πίεση. Όταν η τάση εφελκυσμού εφαρμόστηκε στην περιοχή λέπτυνσης, η ικανότητα μεταφοράς φορτίου κατά μήκος της πάσχουσας περιοχής αυξήθηκε σε μικρή περιφερειακή γωνία ( $2\theta < 180$



°) και μειώθηκε σε μεγάλη περιφερειακή γωνία ( $2\theta > 180^\circ$ ). Η ικανότητα παραμόρφωσης αυξάνεται αναλογικά με την αύξηση του αξονικού μήκους της πάσχουσας περιοχής ανεξάρτητα της περιφερειακής γωνίας. Όταν η θλιπτική τάση εφαρμόστηκε στην περιοχή λέπτυνσης, η ικανότητα μεταφοράς φορτίου μειώθηκε σε μεγάλο αξονικό μήκος λέπτυνσης σε όλες τις περιφερειακές γωνίες.

Σε αγωγούς με ίδια γεωμετρία τοπικής λέπτυνσης τοιχώματος, η ικανότητα μεταφοράς φορτίου υπό τάση θλίψης ήταν υψηλότερη από ότι υπό τάση εφελκυσμού σε μικρό αξονικό μήκος ( $L < \Delta l / 2$ ). Ωστόσο, τα αποτελέσματα αντιστρέφονται σε μεγάλα μήκη περιοχής λέπτυνσης.

Η αυξανόμενη εσωτερική πίεση μείωσε την ικανότητα μεταφοράς φορτίου και την ικανότητα παραμόρφωσης σε συνδυασμό με τάση εφελκυσμού στην περιοχή λέπτυνσης, ενώ ενίσχυσε την ικανότητα μεταφοράς φορτίου και την ικανότητα παραμόρφωσης στην εφαρμογή θλιπτικής τάσης στην περιοχή λέπτυνσης. Αυτό οφείλεται σε μια αύξηση στην αξονική τάση εφελκυσμού στην λεπτή περιοχή λόγω της εσωτερικής πίεσης. (24)

## **Αξιοπιστία αγωγών Πολυβινυλοχλωριδίου(PVC) και αστοχία**

Έρευνες για πλαστικούς σωλήνες αποκάλυψαν ότι αγωγοί και εξαρτημάτων συχνά είχαν τα ελαττώματα και αστοχίες και ότι πολλές κοινές πρακτικές εγκατάστασης θα μπορούσαν να προκαλέσουν σημαντικές βλάβες στις σωληνώσεις. Για τον προσδιορισμό των επιπτώσεων της αστοχίας σωλήνων από PVC, έγιναν δοκιμές για να χαρακτηριστούν οι τύποι αστοχίας και τις συνέπειες αυτών.

### **Ιστορικό αστοχίας αγωγών pvc**

Λόγω της εύθραυστης φύσης του, όταν σωλήνα PVC αποτυγχάνει κάτω από το φορτίο του φυσικού αερίου, η κατάσταση είναι «καταστροφική». Οι σωληνώσεις τείνουν να σπάσουν σε αιχμηρά θραύσματα, που διαδίδονται σε μια αρκετά μεγάλη περιοχή. Σε μια περίπτωση, ένας σωλήνας 5 ιντσών (υποτιθέμενη αντοχή σε 500 psi) ήταν υπό πίεση 300 psi μέσα σε μία 40 ιντσών τάφρο καλυπτόμενη με χάλυβα, διασκόρπισε θραύσματα της τάφρου 65 μέτρα σε μία κατεύθυνση και 72 μέτρα σε μία άλλη. Συντρίμμια PVC βρέθηκαν σε μια έκταση περίπου 6000 τετραγωνικών σε αυτό το ατύχημα.

Ένας αριθμός περιστατικών αστοχίας PVC, χωρίς αναγνωρισμένη βλάβη στο υλικό, έχουν αναφερθεί. Ένα τέτοιο περιστατικό που συμμετέχουν σύστημα μεταφοράς υγρού αζώτου, όπου ο σωλήνας τοποθετήθηκε σε εξωτερικούς χώρους. Η αστοχία αποδόθηκε σε υπερϊώδη ευθραυστότητα του σωλήνα λόγω έκθεσης σε ακραίες θερμοκρασίες επί αρκετά έτη.

Ένα δεύτερο περιστατικό αφορά μια αστοχία νέας εγκατάστασης για τοξικά αέρια θείο, που είχε σχεδιαστεί για 500 psi χρήση. Το σύστημα είχε αντοχή σε 650 psi αποδεδειγμένα βάση δοκιμής και χρησιμοποιούνταν στα 300 psi όταν απέτυχε, προφανώς από ελάττωμα σε ένα εξάρτημα αγκώνα. Όταν ο αγκώνας αστόχησε, προκλήθηκε βλάβη στο παρακείμενο σύστημα σωληνώσεων. Το SF<sub>6</sub> δεν ήταν χημικώς διαδραστικό με το PVC. Αντίθετα, με μεταλλικό υλικό σωληνώσεων θα μπορούσε πιθανότατα να δράσει και να εξαιρωθεί το άκρως βλαβερό περιεχόμενό του.

Βρετανοί επιστήμονες αναφέρθηκαν στην «απρόβλεπτη ευθραυστότητα» των σωλήνων από PVC, οι οποίες λένε ότι θεωρείται αποδεκτή λόγω των πολλών άλλων πλεονεκτημάτων που ο σωλήνας προσφέρει, και αναφέρουν ότι λόγω αυστηρής νομοθεσίας, δεν μπορεί να αντισταθμιστεί και να χρησιμοποιηθούν ευρύτερα οι αγωγοί PVC. Οι επιστήμονες, οι οποίοι είναι διαχειριστές και τεχνικοί υπάλληλοι σε μια βιομηχανική έρευνα, αναφέρουν διαφορές, μεταξύ των σωλήνων ίδιου υλικού, ιδίως στην αντοχή κρούσης. Αποδίδουν τη διαφορά σε παραλλαγές-προσθήκες που γίνονται στο PVC.

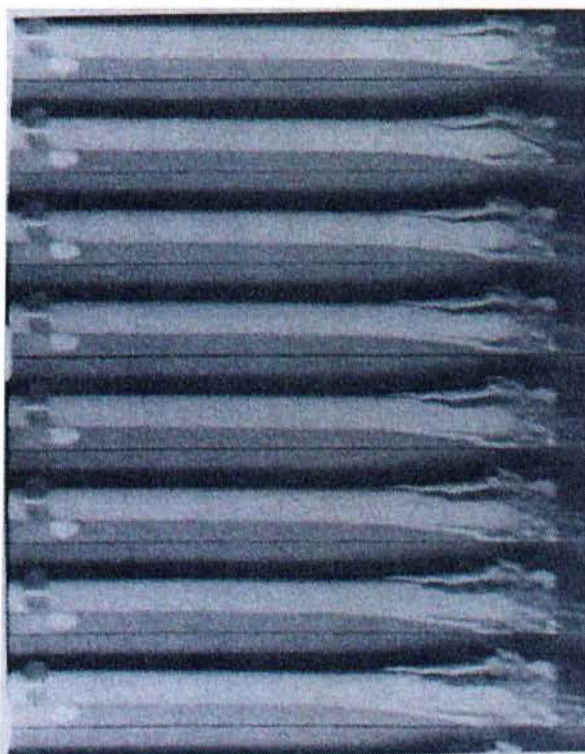
Για να καθορίσει τους τύπους αστοχίας, έγιναν δοκιμές σε σωλήνες PVC και εξαρτήματα από την Sandia National Laboratories (SNL). Για τις δοκιμές, επιλέχθηκαν 2 ιντσών σωλήνας με κολλημένα εξαρτήματα που συναρμολογήθηκαν για να προσομοιώσουν ένα σύστημα σωληνώσεων το οποίο είχε κατά λάθος εκραγεί σε μια εγκατάσταση της SNL και είχε χρησιμοποιηθεί σε ένα σύστημα μεταφοράς αέριου θείου. Ο σωλήνας δοκιμής, που έχει δοκιμαστεί σε 470 psi, τέθηκε υπό πίεση με ξηρό αέρα σε 750 psi.

Με σκοπό να εξασφαλισθεί υψηλή ταχύτητα, χρησιμοποιήθηκε πυροκροτητής Reynolds RP-2 bridgewire για να δημιουργηθεί ρωγμή, το οποίο περιείχε 64 mg εκρηκτικών. Ο πυροκροτητής συνδέθηκε με το σωλήνα με εποξική ρητίνη. Ούτε η πυροδότηση του πυροκροτητή, ούτε η εποξειδική ρητίνη παρήγαγαν οποιαδήποτε ζημιά στο δείγμα του σωλήνα. Η έναρξη και η ανάπτυξη της ρωγμής, καθώς και η έκρηξη του σωλήνα παρατηρήθηκαν με τη βοήθεια υψηλής ταχύτητας φωτογραφικής κάμερας (25).





**ΕΙΚ.4.15** Θραύσματα των PVC σωλήνα Ο πρώτος αριθμός είναι ενδεικτικός της αλληλουχίας δοκιμής, ο δεύτερος αριθμός είναι η απόσταση από το σημείο της δοκιμής όπου το θραύσμα ανακτήθηκε.



**ΕΙΚ.4.16** Η φωτογραφία επάνω στην ακολουθία δείχνει την έναρξη της αστοχίας που προκαλείται σε σωλήνα PVC Κάθε διαδοχική φωτογραφία δείχνει την ανάπτυξη της αστοχίας.

## Αποτελέσματα

Ανάλυση του υψηλής ταχύτητας φιλμ έδωσε ένα μέσο ρυθμό πολλαπλασιασμού ρωγμής περίπου 616 m / s. Η ταχύτητα των θραυσμάτων σωλήνων υπολογίστηκε από τις μετρήσεις σε 38 m / s. Μετά τη δοκιμή, τα θραύσματα των σωληνώσεων και εξαρτημάτων ανακτήθηκαν 0,6 έως 36 m (περίπου 2 - 118 πόδια) μακριά από την περιοχή δοκιμής. Τα θραύσματα που ανακτήθηκαν είχαν βάρος από 4,05 έως 41,85 g. Τα θραύσματα είναι κοφτερά, συνήθως με επίμηκες σχήμα. (26)

## Άλλες παρατηρήσεις

Στο σημείο της αστοχίας, τα τμήματα σωλήνα κινούνται ανεξάρτητα και μακριά από την αρχική θέση του πειράματος. Η κίνηση αυτή προκάλεσε άλλα τμήματα του σωλήνα σε ρήξη που οφείλεται σε συμπίεση ακόμη και αν δεν ήταν μέρος του αρχικής ρωγμής. Σε πραγματικές εγκαταστάσεις, τα κομμάτια του σπασμένου σωλήνα θα μπορούσε να χτυπήσουν άλλα συστήματα σωλήνα με επαρκή δύναμη για να προκαλέσει την θραύση αυτών. Αυτό φαίνεται να είναι ο τρόπος με τον οποίο έλαβε χώρα μια παλαιότερη τυχαία έκρηξη σε συστήματα σωληνώσεων PVC. (26)

## Σύνοψη και συμπεράσματα

Αγωγοί PVC πρέπει να χρησιμοποιούνται μόνο σε συστήματα χαμηλής πίεσης όπου το υγρό θα βρίσκεται κοντά στη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Οι αγωγοί PVC, λόγω του εύθραυστου χαρακτήρα τους, θα πρέπει να χρησιμοποιούνται μόνο σε ελεγχόμενες περιοχές από το προσωπικό. Θα πρέπει αλλιώς να προστατεύονται έτσι ώστε να μην υποβάλλονται σε υπεριώδες φως, μεγάλες εναλλαγές θερμοκρασίας (π.χ. συγκολλήσεις και κοπές) καθώς επίσης θα πρέπει να αποφεύγεται η άμεση γεινίαση των σωληνώσεων. Σωλήνες από PVC δεν πρέπει να χρησιμοποιούνται όπου θα υπόκεινται σε κραδασμούς. Τα αποτελέσματα μίξης ορισμένων χημικών ουσιών με το PVC θα πρέπει να εξεταστεί προσεκτικά, τόσο όταν ο σωλήνας είναι ένα μέσο μεταφοράς χημικών καθώς και όπου ο σωλήνας μπορεί να εκτεθεί σε χημικά εξωτερικά.

Οι σωλήνες από PVC είναι επιθυμητοί για πολλούς λόγους, αλλά θα πρέπει, να χρησιμοποιούνται με σύνεση. Συστάσεις του κατασκευαστή για την επιλογή, τη χρήση, και την εγκατάσταση θα πρέπει να ακολουθούνται προσεκτικά. Καλή μεταφορά, εγκατάσταση, επί τόπου επιθεώρηση, συντήρηση και πρακτικές, καθώς και ο κατάλληλος σχεδιασμός θα πρέπει να χρησιμοποιούνται όταν ασχολούμαστε με PVC σωλήνες και εξαρτήματα, λόγω της φύσης του. (27)



## **Αστοχία αγωγών πολυαιθυλενίου**

### **Εισαγωγή**

Δύο είδη αγωγών που χρησιμοποιούνται ευρέως στις ΗΠΑ συγκρίνονται με βάση τον χρόνο ζωής τους. Μετρήθηκε, η βελτίωση στις επιδόσεις των υλικών που χρησιμοποιούνται σήμερα σε σχέση με παλαιότερα υλικά.

Η συγκεκριμένη πειραματική διαδικασία έχει διάφορους σκοπούς:

- (1) Να συγκρίνει τη διάρκεια ζωής των υλικών που χρησιμοποιούνται σήμερα σε σωληνώσεις πολυαιθυλενίου
- (2) Για να αναδειχθούν οι συνθήκες για την παραγωγή αστοχία θραύσεως σε ελάχιστους χρόνους δοκιμών
- (3) για να δείξει πώς η απόδοση των αγωγών πολυαιθυλενίου από τον ίδιο παραγωγό έχουν αλλάξει με το χρόνο και
- (4) για να προβλέψει την επίδραση της θερμοκρασίας στον χρόνο ζωής του υλικού. (28)

### **Πειραματική διαδικασία**

#### **Υλικά**

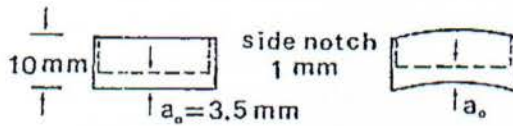
Ερευνήθηκαν αγωγοί πολυαιθυλενίου από δύο από τους σημαντικότερους παραγωγούς για χρήση σε σωληνώσεις φυσικού αερίου στις ΗΠΑ. Μέσα από τα χρόνια, οι επιδόσεις τους έχουν βελτιωθεί. Από κάθε παραγωγό, πάρθηκαν ένα δείγμα παλιού υλικού και ένα που χρησιμοποιήθηκε πρόσφατα και συγκρίθηκαν. (29)

### **Μέθοδος δοκιμής**

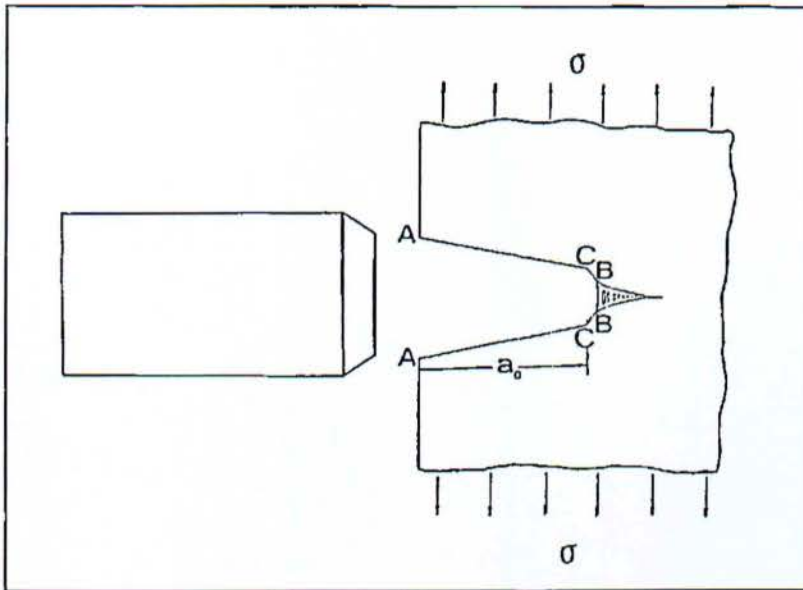
Μετά από εκτεταμένες δοκιμές με διαφορετικές γεωμετρίες δείγματος, χρησιμοποιήθηκαν δείγματα μονής ακμής (Σχήμα 1), επειδή (1) ο λόγος του βάθους εγκοπής προς το πάχος δείγματος είναι της τάξης του  $1/3$  και ελαχιστοποιεί το χρόνο στην αστοχία χωρίς υπερβολική εισαγωγή ερπυσμού του συνδέσμου (2) τα πλευρικά αυλάκια ενισχύουν την μείωση του χρόνου αστοχίας. Η εγκοπή έγινε αργά πιέζοντας ξυριστική λεπίδα μέσα στο δείγμα..

Η κινητική της διεργασίας αστοχίας ελήφθη με τη μέτρηση με ένα μικροσκόπιο στη μετατόπιση της εγκοπής ως μια συνάρτηση του χρόνου, όπως επιδεικνύεται στο Σχ. 2.

Τα δείγματα εκτέθηκαν σε ένα σταθερό φορτίο και η διάρκεια των δοκιμών κυμαίνονταν από 10 λεπτά έως άνω του 1 έτους. Οι θερμοκρασίες δοκιμής κυμαίνονταν από 80 έως 23 ° C.(29)



ΕΙΚ4.17 Γεωμετρία της συμπίεσης β) Γεωμετρία του δείγματος.



ΕΙΚ.4.18 Πειραματική μέθοδος για τη μέτρηση της εγκοπής.

## Αποτελέσματα

### Τυπικά δεδομένα

Τυπικά δεδομένα για ψαθυρή θραύση παριστάνονται στο σχήμα. 3, όπου το COD παριστάνεται γραφικώς έναντι του χρόνου σε μια δεδομένη θερμοκρασία και τάση. Η έναρξη της ανάπτυξης της ρωγμής συμβαίνει στο σημείο όπου η καμπύλη αρχίζει να επιταχύνει. Σε γενικές γραμμές, ο χρόνος για την έναρξη ρωγμών είναι της τάξεως του 60% του χρόνου ζωής όπως αναφέρθηκε προηγουμένως από τους Dickinson και Ewing για το υλικό του σωλήνα που χρησιμοποιείται στην Αγγλία. Σημειώνεται ότι στους 80 ° C η διάρκεια ζωής του δείγματος του νέου σωλήνα του Παραγωγού II είναι περίπου 100 φορές μεγαλύτερη από ό, τι στο νέο σωλήνα του Παραγωγού I.



Οι καμπύλες των τάσεων σε σχέση με τη διάρκεια της ζωής του υλικού σε διάφορες θερμοκρασίες δείχνονται στο Σχήμα. 4. Η συμπεριφορά είναι τυπική για όλα τα πολυαιθυλένια αφού η περιοχή από όλκιμη αστοχία δείχνει μια ρηχή κλίση και η χαμηλή τάση ευθραυστότητας έχει πολύ πιο απότομη κλίση. Η μύτη της καμπύλης είναι η περιοχή μετάβασης όπου η ανώμαλη συμπεριφορά παρουσιάζει μια μείωση στην τάση και προκαλεί μια μείωση στη διάρκεια της ζωής. Λεπτομερής μικροσκοπικές παρατηρήσεις από τους Lu & Brown της κατεστραμμένης ζώνης στη ρίζα της εγκοπής δείχνει ότι η εκτεταμένη άμβλυση στη ρωγμή εμφανίζεται στην όλκιμη περιοχή. Η περιοχή της μετάβασης από την άμβλυση μειώνεται από τη μείωση της πίεσης, έτσι η τοπική συγκέντρωση τάσεων αυξάνεται. Έτσι, η διάρκεια ζωής μειώνεται με την ελάττωση της τάσης. (29)

**ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

1. <http://washingtonexaminer.com/ap-impact-gas-line-safety-valves-resisted/article/feed/2014913>
2. <http://www.naturalgas.org/overview/history.asp>
3. <http://www.gastherm.gr/usefullinfo.html>
4. BP Statistical review of world energy (2008)
5. <http://www.aeriodynamiki.gr/fysiko-aerio/chhmikes-idiothtes.html>
6. [http://www.corrosionclinic.com/types\\_of\\_corrosion/pitting\\_corrosion.htm](http://www.corrosionclinic.com/types_of_corrosion/pitting_corrosion.htm)
7. [http://dionios.blogspot.gr/2011/10/blog-post\\_6272.html](http://dionios.blogspot.gr/2011/10/blog-post_6272.html)
8. ΔΕΠΑ : Το Φυσικό Αέριο και οι χρήσεις του
9. ΕΠΑ: Το Φυσικό Αέριο στην Αττική
10. Καραγιάννης Ιωάννης : Μετρητικοί - Ρυθμιστική σταθμοί – Ρυθμιστής Εγχειρίδιο βασικής εκπαίδευσης τεχνικού προσωπικού κλάδου μεταφοράς .
11. Βασιλειάδης Κωνσταντίνος : Μέτρα Προστασίας , Ασφάλεια Εργασίας
12. Δρ. Ψυλλάκη Πανδώρα : Επιλογή και αστοχία υλικών
13. [http://www.acucert.gr/media/pdf/Acucert\\_cp.pdf](http://www.acucert.gr/media/pdf/Acucert_cp.pdf)
14. Kane RD, Cayard MS. Roles of H<sub>2</sub>S in the behavior for engineering alloys, a review of literature and experience
15. Jelink J, Dagata S, Bonis M, Louge MF, Crolet JL. Selection of C110 grade for mildly sour service, UK Corrosion and Eurocorr 94, vol. 3
16. Metals Handbook. Corrosion, 9th ed., vol. 13, ASM International, Metals Park
17. Balasubramanian V, Gulra B. Effect of welding processes on toe cracking behavior of pressure vessel grade steel.
18. Tuma JV, Sedmark A. Analysis of the unstable fracture behavior of a high strength low alloy steel weldment.
19. USNRC, 1989; Chexal et al., 1998; Ting and Ma, 1999; Choi and Kang, 2000; Michel et al., 2001
20. Choi, Y.H., Kang, S.C., 2000. Evaluation of piping integrity in thinned main feedwater pipes
21. Michel, F., Reck, H., Schulz, H., 2001. Experience with piping in German NPPs with respect to aging-related aspects.
22. Miyazaki, K., Kanno, S., Ishiwata, M., Hasegawa, K., Ahn, S.H., Ando, K., 1999. Fracture behavior of carbon steel pipe with local wall thinning subjected to bending load. Nucl. Eng. Design.
23. USNRC, 1989, Erosion/corrosion-induced pipe wall thinning in US NPPs, NUREG-1344.
24. Blake, A., 1990. Practical Stress Analysis in Engineering Design, 2nd edition. Marcel Dekker, New York.
25. National Transportation Safety Board, Pipeline industry's practice using plastic pipe in gas pipeline facilities and the resulting safety factors, DOT- O PS-75/07 and MTB Leak Report, in *An Analysis of Accident Data From Plastic Pipe Natural Gas Distribution System*, US Department of Transportation, Washington, DC, 19 September 1980.
26. Padilla, R PVC pipe testing data, Sandia National Laboratories Internal Report, July 1981
27. Kirby, P C Surge and fatigue in unplasticized PVC sewer rising mains. *Plastics and Rubber Materials and Applications*, May 1980



28. Dickinson A and Ewing L, Int Gas Research Conf. Toronto, pub. GR1 1986, Vol. 1
29. Lu X and Brown N, Polymer Preprints pub. Am. Chem. Soc. - Conf. on LA, September 1988.