



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ
UNIVERSITY OF PIRAEUS

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΤΙΛΙΑΣ & ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ ΣΤΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗ
ΔΙΟΙΚΗΣΗ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ
ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ: ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ & ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕ ΤΙΤΛΟ:

«ΜΕΛΕΤΗ ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑΣ ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ
ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΔΙΑΦΥΓΩΝ ΣΕ ΣΥΣΤΗΜΑ
ΥΔΡΟΓΟΝΑΝΘΡΑΚΩΝ»



ΚΑΤΣΑΝΕΒΑΚΗΣ ΟΡΕΣΤΗΣ, ΤΜΣ 1707

ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ : ΣΙΟΝΤΟΡΟΥ ΧΡΙΣΤΙΝΑ

ΠΕΙΡΑΙΑΣ 2019

ΔΗΛΩΣΗ

Copyright ©, 2019

«Η εργασία αυτή είναι πρωτότυπη και εκπονήθηκε αποκλειστικά και μόνο για την απόκτηση του συγκεκριμένου μεταπτυχιακού τίτλου».

«Τα πνευματικά δικαιώματα χρησιμοποίησης του μη πρωτότυπου υλικού ΜΔΕ ανήκουν στο μεταπτυχιακό φοιτητή και το επιβλέπον μέλος ΔΕΠ εις ολόκληρο, δηλαδή εκάτερος μπορεί να κάνει χρήση αυτών χωρίς τη συναίνεση άλλου. Τα πνευματικά δικαιώματα χρησιμοποίησης του πρωτότυπου μέρους ΜΔΕ ανήκουν στον μεταπτυχιακό φοιτητή και τον επιβλέποντα από κοινού, δηλαδή δεν μπορεί ο ένας από τους δύο να κάνει χρήση αυτού χωρίς τη συναίνεση του άλλου. Κατ' εξαίρεση, επιτρέπεται η δημοσίευση του πρωτότυπου μέρους της διπλωματικής εργασίας σε επιστημονικό περιοδικό ή πρακτικά συνεδρίου από τον ένα εκ των δύο, με την προϋπόθεση ότι αναφέρονται τα ονόματα και των δύο (ή των τριών σε περίπτωση συνεπιβλέποντα) ως συν-συγγραφέων. Στην περίπτωση αυτή προηγείται γραπτή ενημέρωση του μη συμμετέχοντα στη συγγραφή του επιστημονικού άρθρου. Δεν επιτρέπεται η κατά οποιοδήποτε τρόπο δημοσιοποίηση υλικού το οποίο έχει δηλωθεί εγγράφως ως απόρρητο».

(Υπογραφή)

Κατσανεβάκης Ορέστης

(Υπογραφή)

Σιοντόρου Χριστίνα

Πειραιάς 2019

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη αξιοπιστίας ενός δικτύου για την παρακολούθηση διαφυγών σε ένα σύστημα μεταφοράς υδρογονανθράκων.

Αρχικά, γίνεται αναφορά στο φυσικό αέριο ως το βασικότερο και πιο σύνηθες αέριο της κατηγορίας, στη μεταφορά του με τη χρήση αγωγών και στη συνέχεια, περιγράφονται τα χαρακτηριστικά και τα κυριότερα μέρη ενός συστήματος μεταφοράς. Επισημαίνεται το ζήτημα των διαφυγών από ένα τέτοιο σύστημα και αναφέρονται τα συστήματα ανίχνευσης διαρροών που εφαρμόζονται καθώς και οι τεχνικές παρακολούθησης που χρησιμοποιούνται για την αποφυγή κινδύνων.

Γίνεται ιδιαίτερη αναφορά στα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων (ΑΔΑ) αναλύοντας τα στοιχεία από τα οποία αποτελούνται. Τα ΑΔΑ εμφανίζονται ως ένας ιδανικός τρόπος παρακολούθησης διαφυγών σε ένα σύστημα μεταφοράς υδρογονανθράκων με χρήση αισθητήρων για την ανίχνευση του αερίου στην ατμόσφαιρα.

Ένα σημαντικό ζήτημα που αναδεικνύεται είναι αυτό της αξιοπιστίας και της ευαισθησίας του συστήματος. Η αξιοπιστία αναφέρεται κυρίως στο κομμάτι της λειτουργίας του συστήματος παρακολούθησης, στην ικανότητα ανίχνευσης, στη μεταφορά δεδομένων και στην επικοινωνία μεταξύ των κόμβων.

Τέλος, προτείνεται η εγκατάσταση ενός ΑΔΑ σε ένα σύστημα μεταφοράς το οποίο διασχίζει χερσαία τμήματα και αφορά τμήματα του αγωγού που βρίσκονται πάνω από το έδαφος ή θαμμένα και υπάρχει η πιθανότητα να εμφανιστεί κάποια διαρροή κατά τη λειτουργία του.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

Φυσικό αέριο, σύστημα μεταφοράς, αγωγός, διαρροή, παρακολούθηση, Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων, αισθητήρες, ανίχνευση, τεχνικές αξιόπιστης μετάδοσης δεδομένων, αξιοπιστία μετρήσεων, αξιοπιστία δικτύου

ABSTRACT

The purpose of this work is to study the reliability of a network for the monitoring of leaks in a hydrocarbon system.

Initially, natural gas is mentioned as the most basic and most common gas in the category, in its transport using pipelines and then described the characteristics and the main parts of a transmission system. The issue of a leak from such a system is indicated and the leakage detection systems applied and the monitoring techniques used to avoid risks are mentioned.

Special reference is made to the Wireless Sensors Network (WSN) analyzing the elements from which they are composed. The WSN are shown as an ideal way of monitoring leakages in a hydrocarbon transport system using sensors to detect the gas in the atmosphere.

An important issue that emerges is that of the reliability and sensitivity of the system. Reliability refers mainly to the operation of the monitoring system, to the ability to detect, to transfer data and to the communication between nodes.

Finally, it is proposed to install a WSN in a transport system that crosses land sections and concerns parts of the pipeline that are above the ground or buried and there is a possibility that a leak may occur during operation.

KEY WORDS

Natural gas, transport system, pipeline, leakage, monitoring, Wireless Sensors Network, sensors, techniques for reliable data transmission, detection, reliability of measurements, reliability of network

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την επιβλέπουσα καθηγήτρια της διπλωματικής μου εργασίας Κα. Σιοντόρου Χριστίνα κυρίως για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε στην ανάθεση της διπλωματικής αυτής εργασίας, καθώς και για την επιμονή της κατά τη διάρκεια της υλοποίησής της. Η βοήθεια και η καθοδήγησή της για την επίλυση διαφόρων ζητημάτων ήταν πολύτιμη. Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την ηθική τους συμπαράσταση και για την υποστήριξη τους καθ' όλη τη διάρκεια της σταδιοδρομίας μου. Τέλος, ευχαριστώ τον πατέρα μου, Κατσανεβάκη Χάρη, που υπήρξε εμπνευστής των επιλογών μου, αφιερώνοντας στη μνήμη του την παρούσα εργασία.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Πίνακας περιεχομένων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	8
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	8
1.1 Η βιομηχανία του φυσικού αερίου	8
1.2 Ιδιότητες και χαρακτηριστικά φυσικού αερίου	8
1.3 Το φυσικό αέριο ως πηγή ενέργειας.....	9
1.4 Μεταφορά φυσικού αερίου.....	10
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	13
ΑΓΩΓΟΙ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΥΔΡΟΓΟΝΑΝΘΡΑΚΩΝ.....	13
2.1 Γενικά.....	13
2.2 Σχεδιασμός αγωγού	14
2.3 Συστήματα αγωγών για τη μεταφορά.....	16
2.3.1 Τα κυριότερα μέρη ενός συστήματος μεταφοράς.....	18
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	20
ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΚΑΙ ΚΙΝΔΥΝΟΙ ΔΙΑΡΡΟΩΝ.....	20
3.1 Διαρροή	20
3.2 Συστήματα ανίχνευσης διαρροών	20
3.3 Τεχνικές παρακολούθησης αγωγών	22
3.4 Διαχείρισης της ασφάλειας.....	24
3.5 Κίνδυνοι και αιτίες διαρροών	25
3.6 Αιτίες αστοχίας αγωγού	27
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	29
ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ.....	29
4.1 Αισθητήρες	29
4.2 Κόμβοι	31
4.3 Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων	32
4.3.1 Ορισμός	32
4.3.2 Δομικά στοιχεία.....	33
4.3.3 Στοιβα πρωτοκόλλου.....	34
4.3.4 Τι προσφέρει ένα ΑΔΑ.....	35
4.3.5 Κατηγορίες υπόγειων δικτύων παρακολούθησης	36
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5	40
ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ , ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΚΑΙ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ	40

5.1 Αξιοπιστία και ευαισθησία	40
5.2 Αποτυχία και λειτουργικότητα σε ένα ΑΔΑ	42
5.3 Παράγοντες που επηρεάζουν την αξιοπιστία ενός ΑΔΑ.....	44
5.4 Τεχνικές αξιόπιστης μετάδοσης δεδομένων σε ένα Ασύρματο Δίκτυο Αισθητήρων...	46
5.4.1 Τεχνική αναμετάδοσης.....	46
5.4.2 Τεχνική εφεδρείας ή πλεονασμού	48
5.4.3 Μηχανισμοί αποκατάστασης της απώλειας πακέτων με δεδομένα: hop-by-hop και end-to-end.....	49
6.ΕΦΑΡΜΟΓΗ	51
6.1 Εισαγωγή	51
6.2 Συνθήκες.....	52
6.3 Περιγραφή του δικτύου αγωγών	53
6.4 Σύστημα αισθητήρων.....	54
6.5 Κόμβοι και αισθητήρες	55
6.6 Ασύρματη επικοινωνία δικτύου παρακολούθησης: πρωτόκολλο ZIGBEE	61
6.7 Τοπολογία πλέγματος (mesh)	63
6.8 Ροόμετρα.....	64
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7	66
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	66
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	68

ΛΙΣΤΑ ΓΡΑΦΗΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 1: Πρόβλεψη κατανάλωσης ενέργειας σε παγκόσμιο επίπεδο.....	10
Διάγραμμα 2: Συνολικό μήκος αγωγών στην Ευρώπη.....	11
Διάγραμμα 3: Κατανάλωση ενέργειας σε παγκόσμιο επίπεδο με βάση την πηγή προέλευσης.....	11
Διάγραμμα 4: Δυναμικότητα αγωγών μεταφοράς φυσικού αερίου.....	13
Διάγραμμα 5: Κατηγορίες αισθητήρων.....	30
Διάγραμμα 6: Μια διαρροή εκδηλώνεται ως πρόσθετη ενέργεια σε ορισμένες ζώνες συχνότητας.....	60
Διάγραμμα 7: Διάρκεια καθυστέρησης ανάλογα το μέγεθος του πακέτου στο πρωτόκολλο Zigbee.....	63

ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Ακεραιότητα αγωγού.....	16
Εικόνα 2: Ταξινόμηση των τεχνικών ανίχνευσης διαρροών αερίων βάσει της τεχνικής τους φύσης.....	23
Εικόνα 3: Δημιουργία κρατήρα από την έκρηξη αγωγού μεταφοράς φυσικού αερίου	27
Εικόνα 4: Η δομή ενός ασύρματου κόμβου.....	32
Εικόνα 5: Ασύρματο Δίκτυο Αισθητήρων.....	33
Εικόνα 6: Στοιβα πρωτοκόλλου σε ένα ΑΔΑ.....	35
Εικόνα 7: Ασύρματη επικοινωνία που βασίζεται στη μαγνητική επαγωγή.....	37
Εικόνα 8: Αρχιτεκτονική συστήματος στη μαγνητική επαγωγή.....	38
Εικόνα 9: Η επίδραση της αβεβαιότητας στην ανίχνευση διαρροών στους αγωγούς.....	41
Εικόνα 40: Βήματα που ακολουθούνται για την αξιολόγηση της ενεργειακής κατανάλωσης ενός ΑΔΑ.....	45
Εικόνα 51: Ένα τρισδιάστατο μοντέλο αναφοράς για έρευνα αξιοπιστίας σε ένα ΑΔΑ....	46
Εικόνα 62: Μηχανισμοί ρητής αναγνώρισης για αναμετάδοση.....	47
Εικόνα 13: Μηχανισμοί έμμεσης αναγνώρισης για αναμετάδοση.....	48
Εικόνα 14: Αγωγός μεταφοράς φυσικού αερίου.....	53
Εικόνα 15: Απεικόνιση ασύρματου δικτύου παρακολούθησης με χρήση αισθητήρων.....	54
Εικόνα 16: Ασύρματο σύστημα ανίχνευσης διαρροών.....	55
Εικόνα 77: Ο κόμβος XBEE PRO S2C.....	56
Εικόνα 88: Ο αισθητήρας Winsen MQ4.....	58
Εικόνα 19: Αρχιτεκτονική συστήματος ενός ΑΔΑ με βάση τη μαγνητική επαγωγή για την παρακολούθηση υπόγειων αγωγών MISE-PIPE.....	59
Εικόνα 20: Τοπολογία πλέγματος.....	64
Εικόνα 21: Το ροόμετρο SONARtrac Model VF/GVF-100 της εταιρίας CIDRA.....	65

ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Συστήματα ανίχνευσης διαρροών.....	22
---	----

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Η βιομηχανία του φυσικού αερίου

Η βιομηχανία του φυσικού αερίου είναι ένας ταχέως αναπτυσσόμενος τομέας ο οποίος παρέχει στους καταναλωτές την άμεση και εύκολη πρόσβαση στη χρήση του. Τεράστιες ποσότητες αέριων καυσίμων διακινούνται καθημερινά σε παγκόσμια κλίμακα από τους τόπους άντλησης και τους σταθμούς παραγωγής προς τους τελικούς καταναλωτές μέσω συστημάτων σωληνώσεων.

Η ροή του φυσικού αερίου ξεκινά από τις δεξαμενές και μέσω των αγωγών μεταφέρεται γρήγορα σε μεγάλες αποστάσεις με προορισμό τις εγκαταστάσεις επεξεργασίας και τα σημεία όπου υπάρχει ζήτηση. Για να φτάσει στον τελικό καταναλωτή ως πηγή ενέργειας, συμμετέχουν διάφοροι παράγοντες και πραγματοποιείται πλήθος δραστηριοτήτων, όπως: εξερεύνηση, γεώτρηση, εξόρυξη, παραγωγή και επεξεργασία, αποθήκευση, μεταφορά και διανομή.

Η εκτίμηση των παγκόσμιων αποθεμάτων φυσικού αερίου είναι $185-200 \times 10^{12} \text{ m}^3$ και με το σημερινό ρυθμό κατανάλωσης προβλέπεται να διαρκέσουν για 55-65 χρόνια περίπου. Οι εκτιμήσεις επάρκειας αναθεωρούνται συστηματικά λόγω της βελτίωσης των τεχνολογιών αποθήκευσης και εξοικονόμησης της ενέργειας και της ανάπτυξης νέων υβριδικών μηχανισμών εξόρυξης με συνέπεια τη διαρκή ανακάλυψη νέων κοιτασμάτων (Σπανίδης, 2018).

1.2 Ιδιότητες και χαρακτηριστικά φυσικού αερίου

Το φυσικό αέριο είναι ένα αέριο μίγμα κορεσμένων υδρογονανθράκων (αλκανίων) με κυριότερο συστατικό το μεθάνιο (CH_4) σε ποσοστό άνω του 90%. Σε αυτό συνυπάρχουν και σημαντικές ποσότητες από αιθάνιο, προπάνιο, βουτάνιο καθώς και διοξείδιο του

άνθρακα, άζωτο, υδρογόνο, ήλιο και πολύ μικρή ποσότητα υδροθείου. Η σύσταση του δεν είναι πάντα σταθερή και διαφέρει ανάλογα με την πηγή προέλευσής του (Schobert, 2013).

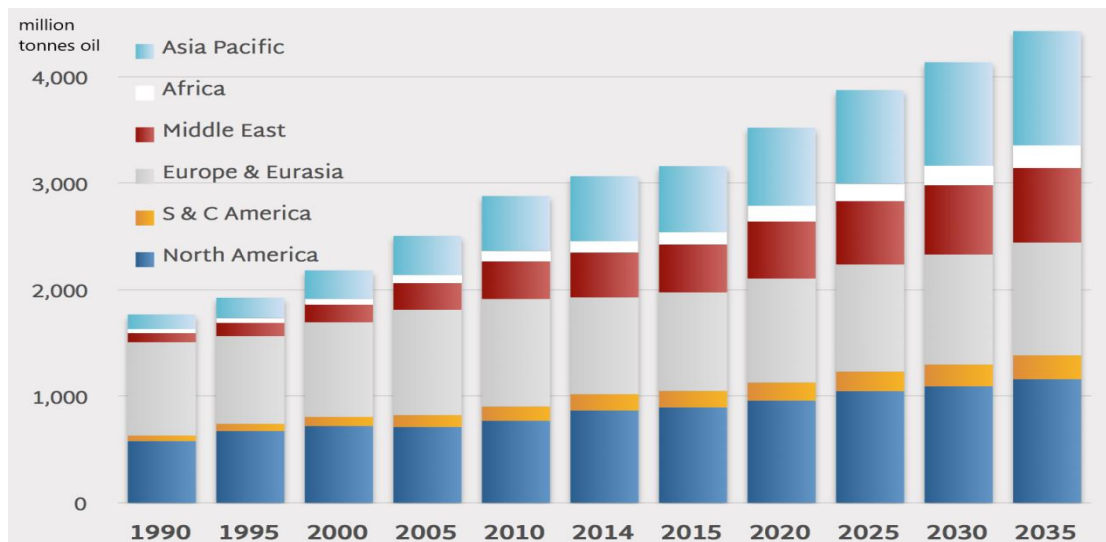
Δεν είναι ένα αέριο που προκαλεί καρκινογενέσεις ή μολύνσεις στον άνθρωπο αλλά μπορεί να συμβάλλει στην επιβάρυνση της ατμόσφαιρας με χημικές ενώσεις καθώς και να αποτελέσει την αιτία για την πρόκληση εκρήξεων και πυρκαγιών. Είναι μη τοξικό/δηλητηριώδες σε μικρές συγκεντρώσεις, ωστόσο αν βρεθεί σε μεγαλύτερες σε κλειστό χώρο είναι ασφυξιογόνο.

Επίσης, το φυσικό αέριο είναι άοσμο, άγευστο και άχρωμο με συνέπεια να μην ανιχνεύεται εύκολα. Είναι ελαφρύτερο από τον αέρα και σε περίπτωση διαρροής διαφεύγει εύκολα στην ατμόσφαιρα. Για την αναγνώριση του μίγματος (στη φάση της διανομής) και τον ευκολότερο εντοπισμό διαρροών προστίθενται μερκαπτάνες οι οποίες έχουν έντονη οσμή (Παπανίκας, 1997).

1.3 Το φυσικό αέριο ως πηγή ενέργειας

Το φυσικό αέριο αποτελεί βασική πηγή ενέργειας και χαρακτηρίζεται ως η κύρια πρώτη ύλη της πετροχημικής βιομηχανίας παρουσιάζοντας υψηλό βαθμό απόδοσης κατά την καύση του (περίπου 95%). Μαζί με το υδρογόνο και τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας αναμένεται να αντικαταστήσει σε σημαντικό βαθμό τα υπόλοιπα συμβατικά καύσιμα που είναι πολύ περισσότερο ζημιογόνα για το περιβάλλον συμβάλλοντας στην απανθρακοποίηση των ενεργειακών συστημάτων σε παγκόσμιο επίπεδο.

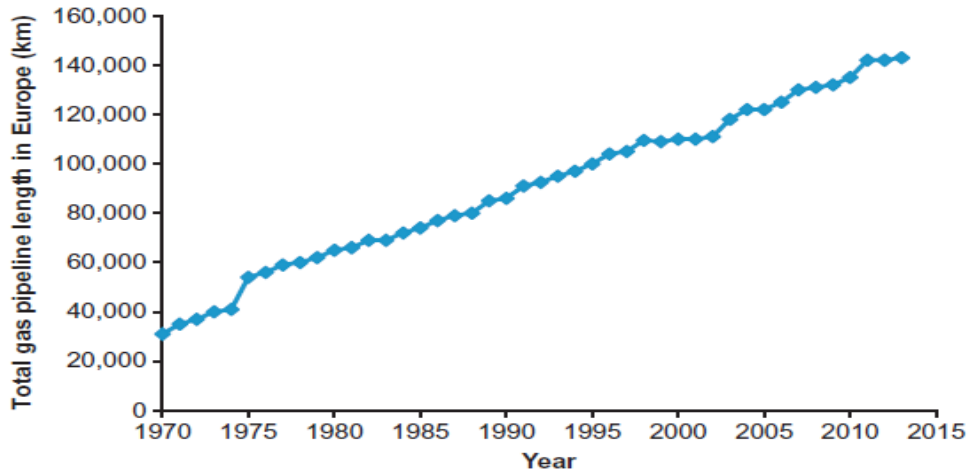
Από την καύση του παράγεται θερμική ενέργεια για βιομηχανικές, εμπορικές και οικιακές χρήσεις, ενώ εφαρμόζεται σταδιακά η ευρύτερη χρήση του και σε άλλους τομείς όπως στην αυτοκίνηση και στις μεταφορές. Επίσης, καλύπτει τις ανάγκες για ηλεκτρική ενέργεια, για την παραγωγή ζεστού νερού και για τη θέρμανση χώρων.



Διάγραμμα 8: Πρόβλεψη κατανάλωσης ενέργειας σε παγκόσμιο επίπεδο
(Πηγή: Bp Energy Outlook 2016, Helgi Analytics)

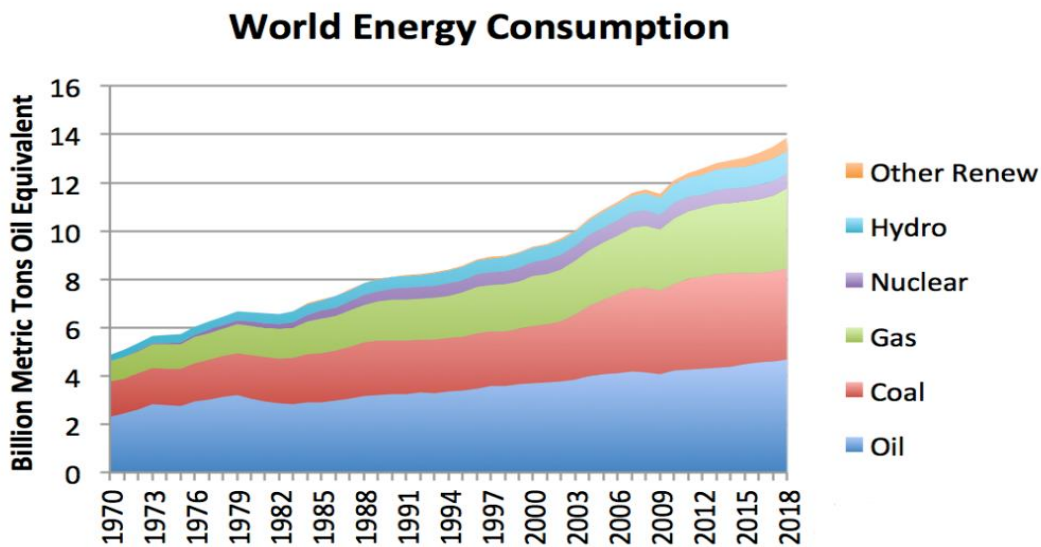
1.4 Μεταφορά φυσικού αερίου

Η μεταφορά των υδρογονανθράκων (φυσικό αέριο) είναι μια σημαντική δραστηριότητα κατά την οποία το αέριο πρέπει να μετακινηθεί από ένα σημείο σε κάποιο άλλο. Υπάρχουν διάφοροι τρόποι μεταφοράς, ωστόσο οι αγωγοί αυστηρών προδιαγραφών ασφαλείας που βρίσκονται είτε στην επιφάνεια του εδάφους είτε θαμμένοι, αποτελούν το οικονομικότερο, ταχύτερο και ασφαλέστερο μέσο για τη μεταφορά και διανομή μεγάλων ποσοτήτων αερίου. Η εμφάνιση μεταλλουργικών βελτιώσεων και νέων τεχνικών συγκόλλησης, σε συνδυασμό με την εκθετική αύξηση των δικτύων των αγωγών κατά τη διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών σε όλο τον κόσμο, έχουν μετατρέψει τη μεταφορά αερίων με αυτόν τον τρόπο, στην πιο ελκυστική μέθοδο.



Διάγραμμα 9: Συνολικό μήκος αγωγών στην Ευρώπη
(Πηγή: Nord Stream)

Η χρήση του στη βιομηχανία ευνοείται καθώς αυξάνει την ενεργειακή απόδοση λόγω της υψηλής θερμογόνου δύναμής του (6000-12000 kcal/m³), μειώνει το λειτουργικό κόστος για τη διαχείριση καυσίμου και βελτιώνει την ποιότητα των προϊόντων. Πλέον κατέχει περίπου το ¼ της παγκόσμιας ενεργειακής κατανάλωσης, προσφέροντας οικονομικά οφέλη σε παγκόσμιο επίπεδο αλλά κυρίως περιβαλλοντικά, συμβάλλοντας στην ενεργειακή μετάβαση σε μια οικονομία χωρίς άνθρακα και σε ένα περιβάλλον χαμηλότερων ρύπων (Towler, 2014).



Διάγραμμα 10: Κατανάλωση ενέργειας σε παγκόσμιο επίπεδο με βάση την πηγή προέλευσης
(Πηγή: BP Statistical Review of World Energy, 2019)

Όμως, καθώς το δίκτυο αγωγών αναπτύσσεται αδιάλειπτα, την ίδια στιγμή αυξάνονται και οι κίνδυνοι για τις δημόσιες κοινότητες και το περιβάλλον όπως θα αναφερθεί. Υπάρχουν πολλές ανησυχίες σχετικά με τη μεταφορά καθώς οι διαρροές αποτελούν το σημαντικότερο ζήτημα λόγω του μεθανίου το οποίο υπό συνθήκες είναι εύφλεκτο. Κατά το παρελθόν, έχουν καταγραφεί περιπτώσεις ατυχημάτων, εκρήξεων και γενικά ανεπιθύμητων συνεπειών που απειλούν τον άνθρωπο και το περιβάλλον αλλά επηρεάζουν και την οικονομία. Επομένως, η ανάπτυξη ολοένα και πιο αξιόπιστων συστημάτων και τεχνικών παρακολούθησης για το δίκτυο μεταφοράς είναι αναγκαία και αποτελεί πρόκληση για τη διαρκώς αναπτυσσόμενη βιομηχανία. Η ικανότητα ανάπτυξης ενός αέριου και αξιόπιστου συστήματος για την ανίχνευση και τον εντοπισμό διαφυγών είναι το βασικό θέμα της παρούσας εργασίας.

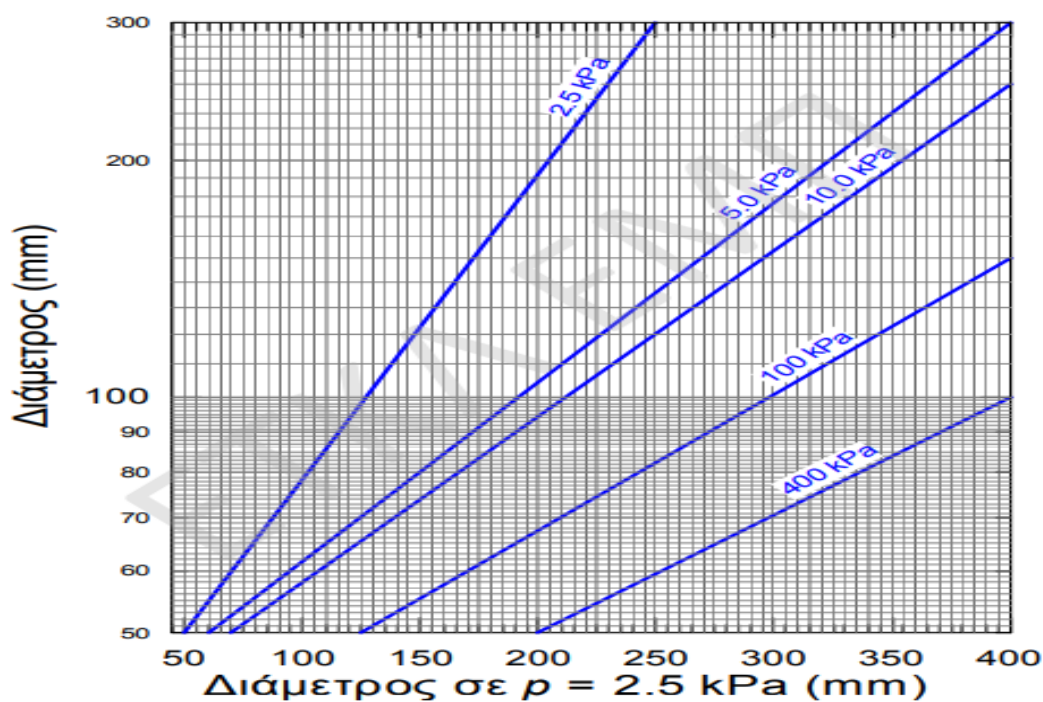
Οι περιπτώσεις όπου παρατηρούνται διαφυγές εμφανίζονται κατά τη λειτουργία των τμημάτων ενός συστήματος μεταφοράς όπως θα αναφερθούν στο επόμενο κεφάλαιο. Για το λόγο αυτό καθίσταται αναγκαία η παρακολούθηση της διαδρομής των σωληνώσεων από συστήματα ανίχνευσης διαρροών προκειμένου να προλαμβάνεται ο κίνδυνος. Όπως θα αναπτυχθεί και στη συνέχεια της παρούσας εργασίας, τα συστήματα αυτά στηρίζονται σε αισθητήρες οι οποίοι συνδέονται μεταξύ τους με τη βοήθεια ενός ασύρματου δικτύου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΑΓΩΓΟΙ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΥΔΡΟΓΟΝΑΝΘΡΑΚΩΝ

2.1 Γενικά

Οι αγωγοί είναι συνήθως φτιαγμένοι από ανθρακοχάλυβα το οποίο είναι ένα κράμα χάλυβα και άνθρακα. Οι σωλήνες μεγάλων διαμέτρων όπως και αυτοί που αναφέρονται στην εργασία, από 500 mm έως 1220 mm, παράγονται από φύλλα μετάλλου που είναι διπλωμένα σε σχήμα κυλίνδρου με τις άκρες τους να συγκολλούνται έτσι ώστε να διαμορφώσουν ένα τμήμα σωλήνωσης. Η σωληνογραμμή καλύπτεται με ένα ειδικό επίστρωμα για να εξασφαλισθεί η προστασία από τη στιγμή που θα τοποθετηθεί στο έδαφος. Ο σκοπός του επιστρώματος είναι να ελαχιστοποιήσει τους κινδύνους για το περιβάλλον και την ατμόσφαιρα οι οποίοι οφείλονται σε αστοχία υλικού και να προστατεύσει τον αγωγό από την υγρασία, η οποία προκαλεί διάβρωση και οξείδωση (Λέφας, 2004).



Διάγραμμα 11: Δυναμικότητα αγωγών μεταφοράς φυσικού αερίου
(Πηγή: Εργαστήριο Τεχνολογίας Καυσίμων Και Λιπαντικών ΕΜΠ., 2015)

2.2 Σχεδιασμός αγωγού

Προκειμένου να μεταφερθεί επιτυχώς το αέριο από την πηγή ή την εγκατάσταση παραγωγής προς τους σταθμούς εγκατάστασης των τελικών χρηστών, ο αγωγός πρέπει να σχεδιαστεί και να λειτουργήσει σύμφωνα με τα ισχύοντα πρότυπα και τις βέλτιστες πρακτικές που ορίζονται σε κάθε χώρα, ώστε να εξασφαλιστεί η καταλληλότητα και η ακεραιότητά του. Συνοπτικά, ο σχεδιασμός του περιλαμβάνει τις ακόλουθες παραμέτρους:

- Μέγεθος Αγωγού (διάμετρος)

Αυτή η παράμετρος καθορίζεται από την ποσότητα του υλικού που πρόκειται να μεταφερθεί μέσω του αγωγού, δηλαδή από την επιθυμητή παροχή. Όσο μεγαλύτερη είναι η παροχή τόσο μεγαλύτερο είναι και το μέγεθος του αγωγού. Τα μοντέλα παρέχουν τις κατάλληλες οδηγίες σχετικά με τις αποδεκτές ροές για μια δεδομένη περιοχή εγκάρσιας διατομής του αγωγού. Οι συνιστώμενες ταχύτητες προκύπτουν από την ισορροπία μεταξύ του μεγέθους του αγωγού και της επιχειρησιακής του ανάγκης. Εάν χρησιμοποιούνται πολύ χαμηλές ταχύτητες, τότε θα χρειαστούν μεγαλύτεροι αγωγοί, γεγονός που αυξάνει το κόστος κατασκευής και εμφανίζονται συχνότερα λειτουργικά προβλήματα. Από την άλλη πλευρά, οι υψηλές ταχύτητες μειώνουν το μέγεθος του αγωγού αλλά μπορεί να προκαλέσουν προβλήματα όπως φθορά στο υλικό των αγωγών ή υψηλή απώλεια πίεσης μέσα στον αγωγό γεγονός που απαιτεί τη συχνότερη συντήρησή του.

- Πάχος τοιχωμάτων αγωγού

Το πάχος των τοιχωμάτων του αγωγού εξαρτάται από παράγοντες όπως η πίεση και η θερμοκρασία λειτουργίας, η διαβρωτικότητα του υλικού και γενικότερα τα χαρακτηριστικά του υλικού κατασκευής. Το πάχος των τοιχωμάτων υπολογίζεται σύμφωνα με τα διεθνή πρότυπα όπως το ASME 31.4 και το ASME 31.8. Συγκεκριμένα από τα: i) *ANSI/ASME Standard B31.4, Liquid Transportation Systems for Hydrocarbons*,

Liquid Petroleum Gas, Anhydrous Ammonia, and Alcohols. και ii) *ANSI/ASME Standard B31.8, Gas Transmission and Distribution Piping Systems.*

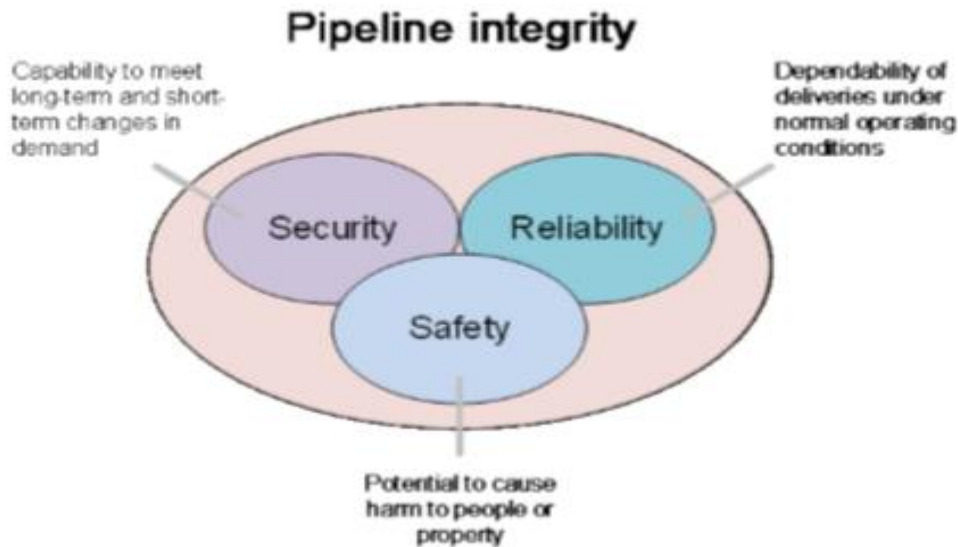
- Υλικό αγωγού

Η επιλογή της ποιότητας του υλικού εξαρτάται από λειτουργικούς και σχεδιαστικούς παράγοντες συμπεριλαμβανομένων της πίεσης, της θερμοκρασίας και της απαιτούμενης αντοχής στη διάβρωση. Τα μοντέλα API, ASME, ASTM και ANSI χρησιμοποιούνται για το σκοπό αυτό διότι περιγράφουν τις λεπτομερείς προδιαγραφές για την ορθή επιλογή του υλικού (American Society of Mechanical Engineers, 2012).

- Εξωτερική επικάλυψη του αγωγού

Η εξωτερική επικάλυψη χρησιμοποιείται για να προστατέψει τους αγωγούς κυρίως από εξωτερικές διαβρώσεις, ειδικά για περιπτώσεις όπου ο αγωγός θάβεται.

Υπάρχουν διάφοροι τύποι προστασίας με διαφορετικές ιδιότητες και δυνατότητες για τη μείωση της εξωτερικής διάβρωσης. Ο κατάλληλος τύπος επικάλυψης καθορίζεται κυρίως από το περιβάλλον στο οποίο βρίσκεται, είτε είναι θαμμένος είτε όχι, σε όλο το μήκος του. Επομένως, σημαντικό ρόλο παίζουν τα χαρακτηριστικά της απορροής, δηλαδή της φύσης του εδάφους που περιβάλλει το θαμμένο αγωγό.



Εικόνα 9: Ακεραιότητα αγωγού
(Πηγή: Gas Industry Company Limited, 2016)

2.3 Συστήματα αγωγών για τη μεταφορά

Τα συστήματα αγωγών που διασχίζουν κάποια χώρα (χερσαία και θαλάσσια τμήματα) είναι ενιαία μηχανικά συστήματα σχεδιασμένα για να μεταφέρουν επικίνδυνα υλικά με ασφαλή τρόπο από το σημείο προέλευσης/πηγή στον τελικό προορισμό. Η διαδρομή του αγωγού επιλέγεται με στόχο τη βελτιστοποίηση της ασφάλειας και της οικονομίας για τον περιορισμό των κινδύνων. Μια βραχύτερη απόσταση μετριάζει το κόστος κεφαλαίου που επενδύεται για την κατασκευή του αγωγού, ωστόσο πρώτα και κυρίως πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι παράγοντες της προστασίας της ατμόσφαιρας και του περιβάλλοντος καθώς και της δημόσιας ασφάλειας, οι οποίοι είναι και αυτοί που θα καθορίσουν την τελική επιλογή της διαδρομής.

Γενικά, υπάρχουν τρεις κύριες κατηγορίες συστημάτων: τα συστήματα συλλογής, τα συστήματα μεταφοράς και τα συστήματα διανομής. Τα συστήματα αγωγών συλλογής συλλέγουν το ακατέργαστο φυσικό αέριο από τα σημεία εξόρυξης. Τα συστήματα αγωγών μεταφοράς μεταφέρουν το αέριο σε αποστάσεις χιλιάδων χιλιομέτρων από τις μονάδες

επεξεργασίας ή αποθήκευσης στα συστήματα διανομής τα οποία με τη σειρά τους διανέμουν το υλικό προς τους τελικούς χρήστες (Rios-Mercado et al., 2014).

Ειδικότερα, τα συστήματα αγωγών (φυσικού αερίου) βάσει της πίεσης που τα χαρακτηρίζει κατά τη λειτουργία τους και της απόστασης που διανύουν, διακρίνονται σε: α) Διεθνείς αγωγούς (Gas Transportation Interconnectors) ή Αγωγούς μεταφοράς υψηλής πίεσης, β) Αγωγούς μεταφοράς μεγάλης κλίμακας (Gas Grids), γ) Συστήματα κατανομής ή αγωγούς μεταφοράς μέσης πίεσης, και δ) Συστήματα διανομής (Gas Distribution Networks) ή Αγωγούς διανομής χαμηλής πίεσης.

Όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, η ροή σε ένα δίκτυο σωληνώσεων ξεκινά από τις δεξαμενές και καταλήγει μέσω αγωγών στα σημεία όπου υπάρχει ζήτηση. Συνδέοντας τα αρχικά με τα τελικά σημεία της διαδρομής μέσω σωληνώσεων, δημιουργείται το δίκτυο. Βασικά χαρακτηριστικά του δικτύου είναι οι αγωγοί και οι κόμβοι, τα σημεία δηλαδή όπου συναντώνται δύο ή περισσότεροι αγωγοί (Folga, 2007).

Αναλυτικότερα, ένα δίκτυο όπως το Σύστημα Μεταφοράς Φυσικού Αερίου, αποτελείται συνολικά από:

- Χαλύβδινους αγωγούς
- Χαλύβδινους κλάδους μεταφοράς
- Μετρητικούς σταθμούς των ποσοτήτων φυσικού αερίου στα σημεία εισαγωγής αερίου στον αγωγό
- Σταθμούς ρύθμισης πίεσης/σταθμοί συμπίεσης του αερίου
- Βαννοστάσια
- Διατάξεις καθαρισμού του αερίου
- Μονάδες αφύγρανσης του φυσικού αερίου (όπου είναι απαραίτητο)
- Συλλέκτες συμπυκνωμάτων
- Διατάξεις οσμής του φυσικού αερίου (προσθήκη κατάλληλων ουσιών)
- Σταθμούς αποστολής και υποδοχής ξεστρών (scraper stations)
- Βαλβίδες

- Κέντρα ελέγχου και διανομής/κατανομής φορτίου
 - Σύστημα επικοινωνιών, παρακολούθησης και μεταφοράς δεδομένων/Σύστημα τηλεχειρισμού-τηλεελέγχου SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition)
- Χώρους αποθήκευσης του αερίου (υπόγειες αποθήκες, δεξαμενές, LNG) (Λέφας, 2004).

2.3.1 Τα κυριότερα μέρη ενός συστήματος μεταφοράς

Τα βασικότερα μέρη ενός τέτοιου συστήματος είναι:

- Ο κύριος αγωγός

Αποτελεί το βασικότερο στοιχείο του συστήματος καθώς είναι το μέσο που μεταφέρει το αέριο/υγρό από ένα σημείο σε κάποιο άλλο. Ο αγωγός πρέπει να σχεδιάζεται, να κατασκευάζεται, να λειτουργεί και να συντηρείται με τέτοιο τρόπο ώστε να διασφαλίζεται η ομαλή λειτουργία και να περιορίζεται ο κίνδυνος.

Προκειμένου να διατηρηθεί η ακεραιότητα του αγωγού, θα πρέπει να επιθεωρείται και να ελέγχεται κατάλληλα ανά τακτά χρονικά διαστήματα. Πρέπει να αξιολογείται η λειτουργία του και να συντηρούνται εξαρτήματα όπως οι βαλβίδες ή η μηχανική σφράγιση της αντλίας, με στόχο να διορθωθούν πιθανά στοιχεία και σημεία που μπορεί να οδηγήσουν σε αποτυχία (Cordell et al., 2003).

- Οι σταθμοί μέτρησης

Προκειμένου να προσδιοριστεί η ποσότητα του αερίου που ρέει στον αγωγό, χρησιμοποιούνται μετρητικοί σταθμοί οι οποίοι έχουν τοποθετημένους κατάλληλους μετρητές ροής στην πηγή, σε διάφορα μήκη του αγωγού και στον τελικό προορισμό. Έτσι, γνωρίζοντας την ποσότητα που υπάρχει εντός του αγωγού, είναι εφικτό να εντοπιστούν τυχόν διαρροές (Mokhatab, 2009).

- Οι βαλβίδες

Αυτές εγκαθίστανται κατά μήκος των γραμμών μεταφοράς βοηθώντας στον έλεγχο της ροής του αερίου. Είναι είτε ανοικτές ώστε να επιτρέπουν την ελεύθερη ροή είτε μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να διακόψουν τη ροή του αερίου σε ένα ορισμένο τμήμα του αγωγού, απομονώνοντας το από τη λειτουργία του υπόλοιπου συστήματος για λόγους ασφάλειας και συντήρησης.

- Οι σταθμοί αύξησης πίεσης ή συμπίεσης

Για να κινείται το αέριο από μια θέση (θέση εκκίνησης ή πηγή) προς το άλλο άκρο του αγωγού (προορισμός), πρέπει να υπάρχει διαφορά πίεσης. Καθώς το φυσικό αέριο εισέρχεται στο σταθμό συμπίεσης συμπιέζεται από στρόβιλο, μηχανή ή από κινητήρα αυξάνοντας την πίεση του αερίου. Μειώνοντας τον όγκο του, παρέχεται η απαιτούμενη ώθηση ώστε να διατηρείται η ομαλή κίνηση εντός του αγωγού. Με αυτό τον τρόπο το αέριο ξεπερνάει τις απώλειες λόγω τριβής μεταξύ των τοιχωμάτων του σωλήνα και διατηρεί την απαιτούμενη πίεση για να συνεχίσει μέχρι τον επόμενο συμπιεστή ή τους τελικούς χρήστες.

Οι σταθμοί είναι εγκατεστημένοι ανά διαστήματα κατά μήκος των γραμμών μεταφοράς και αποτελούν μεγάλες μηχανικές εγκαταστάσεις που λαμβάνουν το αέριο σε πίεση που κυμαίνεται από 200 έως 600psi και το συμπιέζει σε τιμές από 1000 έως 1400psi.

Ειδικά για μεγάλους αγωγούς που καλύπτουν τεράστιες αποστάσεις, χρησιμοποιούνται σταθμοί αύξησης της πίεσης με σκοπό να αυξάνουν την πίεση όταν αυτή πέσει κάτω από μία κρίσιμη τιμή (Rios-Mercado et al., 2014).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΚΑΙ ΚΙΝΔΥΝΟΙ ΔΙΑΡΡΟΩΝ

3.1 Διαρροή

Η *διαρροή* ορίζεται ως ένας τρόπος διαφυγής/απόδρασης του αερίου έξω από τον αγωγό και τις δεξαμενές. Αυτό έχει ως συνέπεια οικονομικές και υλικές απώλειες καθώς επίσης και περιβαλλοντικές καταστροφές εάν το υλικό που μεταφέρεται είναι, τοξικό, εύφλεκτο ή διαβρωτικό. Οι διαρροές που έχουν παρατηρηθεί σε κάποιον αγωγό εμφανίζουν διάφορες τιμές που κυμαίνονται από 0,03 m³/h έως 300 m³/h και εξαρτώνται τόσο από τη λειτουργία του ίδιου του αγωγού όσο και από τις ατμοσφαιρικές συνθήκες (Siontorou et al., 2010).

Η ανίχνευση της διαρροής αποτελεί ένα από τα βασικότερα στοιχεία της διαχείρισης του κινδύνου σε κάποιο σύστημα αγωγών. Τα συστήματα ανίχνευσης διαρροών ειδοποιούν το διαχειριστή ώστε να αποτραπούν πιθανές απειλές και απώλειες και ταυτόχρονα εγγυώνται την ασφάλεια και την αξιοπιστία της λειτουργίας των αγωγών. Διάφορες τεχνολογίες είναι διαθέσιμες για το σκοπό αυτό και ποικίλλουν από τεχνικές ισοζυγίου υλικών έως άλλα πιο πολύπλοκα και εξελιγμένα συστήματα προσφέροντας ενεργειακή και οικονομική εξοικονόμηση, περιορισμό των απωλειών και μείωση των φθορών στα δίκτυα αγωγών (Christodoulou et al. 2010, Tariq AL-Kadi et al. 2013).

3.2 Συστήματα ανίχνευσης διαρροών

Ο πρωταρχικός σκοπός των συστημάτων ανίχνευσης διαρροών (LDS, Leakage Detection Systems) είναι να βοηθήσουν τους ελεγκτές των αγωγών στην ανίχνευση και τον εντοπισμό των διαρροών. Τα συστήματα αυτά αποτελούν σημαντικές πτυχές της τεχνολογίας των αγωγών χάρη στην τεχνολογική και μηχανολογική εξέλιξή τους, έχοντας ξεπεράσει πλέον τις παλαιότερες μεθόδους όπως για παράδειγμα τις επιτόπιες επιθεωρήσεις από ειδικές ομάδες συντήρησης.

Γενικά, υπάρχουν δυο βασικές κατηγορίες συστημάτων ανίχνευσης αερίων, τα απλά και τα αναλογικά συστήματα. Τα απλά συστήματα αναφέρονται σε συμβατικούς ανιχνευτές αερίων που έχουν τη δυνατότητα εντοπισμού αερίων και συνδέονται σε ένα πίνακα πυρανίχνευσης δίνοντας ένα απλό σήμα alarm. Ο πίνακας μπορεί να δώσει εντολή σε σειρήνες ή σε φωτεινές ενδείξεις για να ενεργοποιηθούν και ακολούθως να δοθεί εντολή σε μια ηλεκτροβάννα ώστε να διακόψει την παροχή προς τον αγωγό ή το τμήμα του αγωγού όπου εμφανίζονται διαφυγές (συστήματα πυρόσβεσης) μέχρις ότου να διορθωθεί η βλάβη (Murvay et al., 2012).

Από την άλλη πλευρά, τα αυτόματα/αναλογικά συστήματα ανίχνευσης διαθέτουν ανιχνευτές που όχι μόνον εντοπίζουν την ύπαρξη αερίου αλλά καταμετρούν και το ποσοστό συγκέντρωσής του στην ατμόσφαιρα. Στη συνδεσμολογία τους μπορούν να προστεθούν αισθητήρες που μετρούν την πίεση του αερίου. Τα συστήματα αυτά έχουν την ικανότητα να επιτηρούν διαρκώς τις συγκεντρώσεις των αερίων που είναι προς μελέτη και να στέλνουν δεδομένα σε πραγματικό χρόνο, σε αντίθεση με τα προηγούμενα συστήματα τα οποία δεν ανταποκρίνονται σε υψηλές προδιαγραφές ασφάλειας. Συνεπώς, ένα αυτόματο σύστημα ανίχνευσης προσφέρει την έγκαιρη πρόγνωση επικίνδυνων καταστάσεων, εξαλείφοντας την πιθανότητα πρόκλησης ατυχήματος και διαφυλάσσοντας την αδιάλειπτη λειτουργία των εγκαταστάσεων (Murvay et al., 2012).

Στον παρακάτω πίνακα αναγράφονται τα συστήματα ανίχνευσης που εφαρμόζονται σε αγωγούς. Πρόκειται για τεχνικές που χρησιμοποιούν εξοπλισμό μόνιμα τοποθετημένο στον αγωγό, για τεχνικές που δεν επιβλέπουν διαρκώς τη γραμμή του αγωγού ή για άλλες τεχνικές που εμφανίζουν καθυστέρηση στην εφαρμογή τους.

Πίνακας 2:Συστήματα ανίχνευσης διαρροών

On-line leak detection systems	Examples
<p>Techniques without permanent instrumentation on the line Generally, these techniques allow detection and localization of large leaks. They do not permit permanent supervision of the line</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Visual inspection of the line (by the line operator or unofficially by people living nearby) • Airborne visual inspection • Airborne infra-red inspection • External detection of the sonic or ultrasonic noise generated by a leakage in a subsea or underground pipeline • Internal detection of the noise generated by a leakage using instrumented pigs • Detection of a tracer (generally an odourant) added to the fluid • Oil soluble wire whose electrical impedance changes in the case of a leak • Oil soluble tube whose internal pressure decreases in the case of a leak • Oil permeable tube whose gas content is pumped and analyzed at regular intervals • Sensor cable equipped with thermistors to detect variations of the temperature profile due to a leak
<p>Permanent sensing lines placed along the pipe These techniques, allowing permanent monitoring of the pipeline, can detect and localize small leaks. However, a delay of several hours is often necessary before detection.</p>	<p><i>Acoustic methods</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Intercorrelation analysis of pressure measurements at two opposite points of a pipe in order to detect the noise created by the leak • System identification with the use of random binary signal excitation <p><i>Methods using pressure measurements</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Sudden pressure fall detection in the case of a line break • Detection of a slight pressure decrease or a slight change in the hydraulic profile using time-series analysis • Detection of the negative pressure wave generated by the sudden occurrence of a leak <p><i>Methods using flow rate measurements</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Detection of sudden flow rate changes or flow reversal in the case of a line break • Detection of a discrepancy between inlet and outlet flow rate measurements over a predefined time interval <p><i>Methods using flow rate and pressure measurements</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • All these methods rely on a mass balance
<p>Techniques using permanent instrumentation implemented on the pipeline</p>	

(Πηγή: Batzias, 2010)

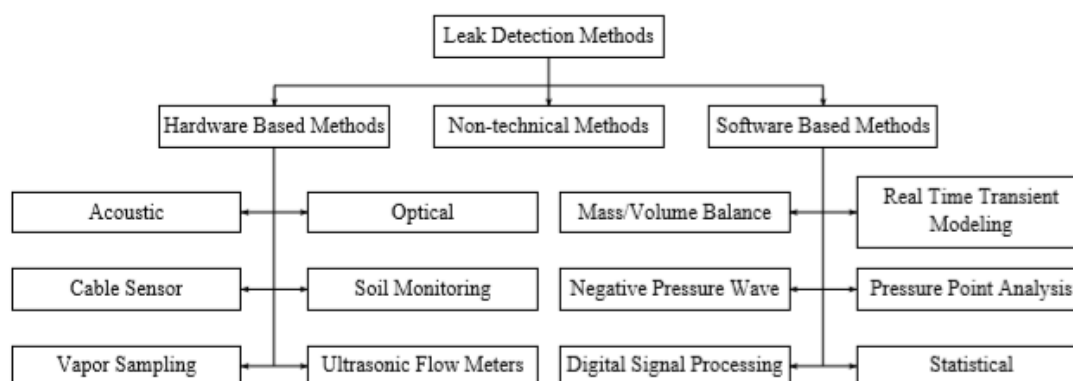
3.3 Τεχνικές παρακολούθησης αγωγών

Οι τεχνικές παρακολούθησης διακρίνονται σε εξωτερικές και εσωτερικές. Στις εξωτερικές τεχνικές παρακολούθησης των αγωγών ο αισθητήρας μπορεί να τοποθετηθεί ακριβώς έξω από τους αγωγούς, σε σταθερά ή μη σημεία, για να ανιχνεύσει διαρροές. Σε αυτή την περίπτωση, ο αισθητήρας μπορεί να ανιχνεύσει την τοποθεσία της διαρροής ακόμα και για πολύ μικρές απώλειες. Στις εσωτερικές τεχνικές παρακολούθησης αγωγών οι αισθητήρες τοποθετούνται εντός του αγωγού, στους σταθμούς αντλιών και στα σημεία ελέγχου. Εάν υπάρχει μικρή διαρροή, παράγονται υψηλής συχνότητας ταλαντώσεις στο τοίχωμα του σωλήνα, το οποίο μπορεί να ανιχνευτεί από ακουστικούς μετατροπείς/μορφοτροπείς. Οι ακουστικοί αισθητήρες μπορούν να ανιχνεύσουν μόνο μικρές διαρροές και ως εκ τούτου είναι κατάλληλοι για χρήση κοντά σε σταθμούς αντλιών και στα σημεία ελέγχου για ανίχνευση υψηλής ακρίβειας (Aamo, 2006).

Όσον αφορά τη λειτουργία τους, οι δύο κύριες κατηγορίες διακρίνονται στις μεθόδους που βασίζονται στο υλικό (hardware), δηλαδή στη χρήση ειδικών συσκευών ανίχνευσης, και

σε μεθόδους που βασίζονται στο λογισμικό (software). Αυτές διαχωρίζονται περαιτέρω/εκτενέστερα όπως παρατηρείται στην παρακάτω εικόνα (Geiger, 2003).

Ως τρίτη κατηγορία εμφανίζονται οι μη τεχνικές μέθοδοι οι οποίες δεν χρησιμοποιούν καμία συσκευή και συνήθως εξαρτώνται από φυσικές αισθήσεις ανθρώπων ή ζώων (Sheltami, 2016).



Εικόνα 10: Ταξινόμηση των τεχνικών ανίχνευσης διαρροών αερίων βάσει της τεχνικής τους φύσης (Πηγή:Adnan, 2014)

Επιπρόσθετα, οι τεχνολογίες που είναι διαθέσιμες σήμερα για τον εντοπισμό διαρροών μπορούν να ταξινομηθούν σε μη-οπτικές και οπτικές μεθόδους. Οι πρώτες περιλαμβάνουν τη μέθοδο ακουστικής διαρροής, τη δειγματοληψία αερίου (βιολογική ανίχνευση), τη μέτρηση της ροής και της πίεσης ενώ οι οπτικές μέθοδοι αφορούν τεχνικές φασματοσκοπίας και λέιζερ όπως για παράδειγμα tunable diode laser spectroscopy (TDLS), laser induced fluorescence (LIF) ή coherent anti-raman spectroscopy (CARS) (Klein 1993, Tian 1994).

Ωστόσο, καμία από αυτές τις τεχνικές δεν έχει αποτελέσει βασικό πρότυπο για τη βιομηχανία λόγω των περιορισμών και των συνθηκών που επικρατούν στο χώρο. Οι μη-οπτικές μέθοδοι αδυνατούν να ανιχνεύσουν πολύ χαμηλές συγκεντρώσεις ενώ από την άλλη πλευρά, οι οπτικές παρέχουν την απαραίτητη ακρίβεια και ευαισθησία αλλά

εμφανίζουν πρόβλημα στην ανακλαστικότητα του υποβάθρου με αποτέλεσμα να προκαλούνται ψευδείς συναγερμοί (Fingas, 2004).

Στην παρούσα εργασία προτείνεται η χρήση τεχνολογίας βιοαισθητήρων η οποία συνδυάζει μηχανισμούς φυσικής αναγνώρισης (βιοστοιχεία ή βιολογικά συστήματα) με χημικούς μεταλλάκτες/μορφοτροπείς και η οποία θα περιγραφεί σε επόμενο κεφάλαιο (κεφάλαιο 6).

3.4 Διαχείρισης της ασφάλειας

Η εξασφάλιση της ακεραιότητας του αγωγού κατά τη λειτουργία του είναι απαραίτητη για τη διατήρηση της συνεχούς παροχής και τη διαχείριση του κινδύνου. Εκτός από τα συστήματα παρακολούθησης, τα κύρια συστήματα διαχείρισης της ασφάλειας για το σκοπό αυτό είναι:

- Τα συστήματα διαχείρισης διάβρωσης, τα οποία αναπτύχθηκαν για τον περιορισμό και την εξάλειψη της διάβρωσης που πιθανόν να εμφανιστεί σε κάποιον αγωγό λόγω του περιβάλλοντος στο οποίο βρίσκεται ή του υλικού που μεταφέρει στο εσωτερικό του.
- Τα συστήματα διαχείρισης υπερτάσεων, τα οποία δημιουργήθηκαν για την προστασία του αγωγού από τις ξαφνικές αλλαγές πίεσης όταν η τιμή της υπερβαίνει τη μέγιστη επιτρεπόμενη πίεση που ορίζεται για τον καθένα.
- Οι βαλβίδες και ρυθμιστές, τα οποία αποτελούν βασικά εξαρτήματα ενός συστήματος αγωγών μέσω των οποίων οι χειριστές έχουν τη δυνατότητα να ρυθμίζουν και να ελέγχουν την πίεση και τη ροή του αερίου.
- Η απόξεση του αγωγού, η οποία είναι μια διαδικασία που πραγματοποιείται με καθορισμένη συχνότητα. Ο αποξεστήρας είναι ένα κομμάτι του εξοπλισμού που εισάγεται στον αγωγό και ρέει μέχρι το σταθμό αποστάξεως απ' όπου και συλλέγεται (Tian, 1994).

Όσον αφορά τα μέτρα που πρέπει να λαμβάνονται για τον περιορισμό των κινδύνων, αυτά συνοπτικά είναι:

- Η κατάλληλη διαστασιολόγηση του αγωγού, η οποία ευνοεί τη μείωση της διάβρωσης.
- Το κατάλληλο πάχος, το οποίο θα προστατέψει τον αγωγό από το εξωτερικό περιβάλλον και τις δραστηριότητες (φυσικές ή ανθρωπογενείς).
- Η ορθή επιλογή της εγκατάστασης, των τεχνικών συγκόλλησης και των υλικών επικάλυψης.
- Η χρήση αξιόπιστων τεχνολογιών παρακολούθησης (EGIG 2015, Murvay 2012).

3.5 Κίνδυνοι και αιτίες διαρροών

Ο όρος της *αναγνώρισης κινδύνου* χρησιμοποιείται με την έννοια της επισήμανσης όλων των πιθανών επικίνδυνων καταστάσεων που πιθανόν να ακολουθήσουν μετά από μια ατυχή έκλυση καυσίμου αερίου.

Οι παράγοντες οι οποίοι θα μπορούσαν να επηρεάσουν ουσιαστικά την εξέλιξη μιας ανεπιθύμητης διαφυγής αερίου είναι η χρονική στιγμή της ανάφλεξης και ο περιορισμός του χώρου (ανοικτός ή κλειστός) όταν αυτή διενεργείται. Βασικός κίνδυνος σε ενδεχόμενη διαφυγή φυσικού αερίου στην ατμόσφαιρα είναι η πιθανότητα ανάφλεξης, πυρκαγιάς ή έκρηξης. Κατά τη διαφυγή/εκτόνωσή του αερίου από αγωγό υψηλής πίεσης η συμπεριφορά του αλλάζει, και σε αντίθεση με ό,τι συμβαίνει στις κανονικές συνθήκες, μετατρέπεται σε αέριο βαρύτερο του αέρα διότι έχει μεγαλύτερη πυκνότητα κατά την έξοδό του από το σωλήνα (Deaves, 1992).

Σε περίπτωση μιας ανεπιθύμητης διαφυγής καυσίμου αερίου και ανάφλεξης του σε ανοικτό χώρο, η φλόγα διαδίδεται στην αναφλέξιμη ζώνη του νέφους με ταχύτητα που για μίγματα υδρογονανθράκων δεν ξεπερνά τις μερικές δεκάδες μέτρα το δευτερόλεπτο με αμελητέες υπερπίεσεις (κατάκαυση - deflagration). Σε συγκέντρωση από 5% έως 15%

κατόγκο στον αέρα μπορεί να αναφλέγεται, με μέγιστη ταχύτητα ανάφλεξης 0,30 έως 0,35 m/sec και θερμοκρασία ανάφλεξης 650°C έως 670°C. Τα όρια ανάφλεξης του φυσικού αερίου είναι 4,5% έως 15%. Δηλαδή, η καύση δεν μπορεί να συντηρηθεί εάν η περιεκτικότητα του αέρα σε φυσικό αέριο είναι εκτός αυτών των ορίων (Schobert, 2013).

Εάν το νέφος του αερίου καυσίμου δεν αναφλεγεί, τότε το διαφυγόν αέριο διασπείρεται στην ατμόσφαιρα με ταυτόχρονο σχηματισμό νέφους που είναι αναφλέξιμο έως μια συγκεκριμένη απόσταση. Η απόσταση αυτή περιορίζεται μέχρι το σημείο όπου εκτείνεται το κατώτερο όριο αναφλεξιμότητάς του αερίου (ΚΟΑ). Η παρουσία μιας πηγής έναυσης εντός της απόστασης αυτής θα προκαλέσει ανάφλεξη, η οποία θα καταλήξει είτε σε απλή καύση (ταχυκαύση - flash fire) είτε σε έκρηξη περιορισμένου νέφους ατμών (Confined Vapor Cloud Explosion - CVCE) (CCPS, 1995).

Η χρονική στιγμή στην οποία συμβαίνει η ανάφλεξη, αφορά στο κατά πόσο έχει αναμιχθεί επαρκώς το διαρρέον αέριο με τον ατμοσφαιρικό αέρα. Όταν η ανάφλεξη είναι άμεση, τότε εκτός από το φλογοπίδακα (jet fire) που συνήθως δημιουργείται στο σημείο της διαρροής, ή την έκρηξη που μπορεί να συμβεί ανάλογα με τον περιορισμό, είναι πιθανό να δημιουργηθεί και πυρόσφαιρα (fireball). Το σχήμα, το μέγεθος και άρα η ποσότητα της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας ενός φλογοπίδακα επηρεάζεται σημαντικά από την ταχύτητα του ανέμου (Jo et al., 2002).

Το σημείο της διαρροής μπορεί να μην είναι εύκολα ανιχνεύσιμο στην περίπτωση όπου ο αγωγός είναι θαμμένος καθώς τα κενά και το πορώδες έδαφος μπορεί να «μετακινήσουν» την ακριβή θέση της διαρροής. Στην περίπτωση όπου ο όγκος του διαφεύγοντος αερίου δεν εξαπλώνεται ελεύθερα στην ατμόσφαιρα αλλά παραμένει εγκλωβισμένος κάτω από το έδαφος, οι κίνδυνοι αυξάνονται καθώς δεν υπάρχει πάντα πρόληψη.



Εικόνα 11: Δημιουργία κρατήρα από την έκρηξη αγωγού μεταφοράς φυσικού αερίου
(Πηγή: www.cnn.gr)

3.6 Αιτίες αστοχίας αγωγού

Πολλοί παράγοντες μπορούν να οδηγήσουν στην αποτυχία των αγωγών φυσικού αερίου. Σύμφωνα με τα στοιχεία της ευρωπαϊκής οργάνωσης για θέματα αγωγού φυσικού αερίου EGIG¹, η αστοχία υλικού και η διάβρωση είναι υπεύθυνες για το 30-40% των αστοχιών των αγωγών και το υπόλοιπο ποσοστό συμπληρώνεται από παράγοντες όπως εργασίες συντήρησης, λανθασμένες λειτουργίες και παρεμβολές τρίτων (EGIG, 2015).

Συνοπτικά, οι κύριες αιτίες που θα μπορούσαν να προκαλέσουν την απελευθέρωση αερίου από τον αγωγό στην ατμόσφαιρα και να αποτελέσουν το έναυσμα για ένα ατύχημα, είναι:

- Η διάβρωση - αστοχία λόγω δράσης χημικών παραγόντων. Το φυσικό αέριο περιέχει μικρή ποσότητα υδρόθειου, η οποία αντιδρά με το ατμό και κατόπιν προκαλεί χημική διάβρωση στο εσωτερικό τοίχωμα του αγωγού.
- Η διάρρηξη λόγω μηχανικής αστοχίας (θραύση), ηλικίας και κόπωσης των υλικών καθώς και μικρορωγμές στο μέσο μεταφοράς.
- Η φθορά κατά τη λειτουργία του αγωγού για τη μεταφορά φυσικού αερίου-εσωτερική πίεση και θερμοκρασία.

¹ European Gas Pipeline Incident Data Group

- Εξωτερικοί παράγοντες όπως το επιπρόσθετο βάρος/φορτίο, οι εργασίες πάνω στον αγωγό, εκσκαφές και άλλες δραστηριότητες (βανδαλισμοί, δολιοφθορές).
- Η πρόσθετη καταπόνηση από τη μετακίνηση του εδάφους (ασταθές υπέδαφος, καθίζηση), τη σεισμική δραστηριότητα (δονήσεις) και τις φυσικές καταστροφές-περιοδικά μεταβαλλόμενη μηχανική φόρτιση (EGIG 2008.).

Ο κίνδυνος σε κάθε περίπτωση πρέπει να προλαμβάνεται, να αξιολογείται και να διαχειρίζεται σε αποδεκτά όρια για το μετριασμό των επιπτώσεων με στόχο την προστασία τόσο του ανθρώπου όσο και του περιβάλλοντος. Για το σκοπό αυτό, στην παρούσα εργασία προτείνεται η παρακολούθηση ενός συστήματος μεταφοράς να πραγματοποιείται από αισθητήρες ασύρματων δικτύων κατά μήκος όλης της διαδρομής του. Η τεχνική αυτή αποτελεί ένα μέτρο που επιτρέπει την παρακολούθηση και τη λήψη δεδομένων σε πραγματικό χρόνο έχοντας την ικανότητα να καλύπτει μεγάλες αποστάσεις όπως θα περιγραφεί στο επόμενο κεφάλαιο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ

4.1 Αισθητήρες

Αισθητήρας ονομάζεται η ηλεκτρονική συσκευή η οποία έχει τη δυνατότητα να παρατηρεί και να καταγράφει κάποια παράμετρο του περιβάλλοντος όπως για παράδειγμα τη θερμοκρασία, την υγρασία, την πίεση, την ένταση φωτισμού και ήχου, την κίνηση, τα επίπεδα συγκεκριμένων αερίων κ.α. Η λειτουργία των αισθητήρων βασίζεται στο γεγονός ότι εκμεταλλεύονται τις φυσικές αντιδράσεις κάποιων υλικών σε συγκεκριμένες μεταβολές του περιβάλλοντος για να μετατρέψουν την αλλαγή σε μετρήσιμη ποσότητα. Ανάλογα με την επιρροή τους στο περιβάλλον διαχωρίζονται σε παθητικούς και ενεργητικούς (Akyildiz, 2002).

Χαρακτηριστικά μεγέθη που καθορίζουν την ποιότητα και τα όρια του κάθε αισθητήρα είναι:

- Το εύρος λειτουργίας
- Ο χρόνος ζωής
- Η ακρίβεια
- Το σφάλμα
- Η ανοχή, δηλαδή το μέγιστο σφάλμα του αισθητήρα
- Η διακριτική ικανότητα, δηλαδή τη μικρότερη μεταβολή του μετρούμενου μεγέθους που μπορεί να ανιχνεύσει ο αισθητήρας και αναλόγως να μεταβάλλει την έξοδό του
- Η ευαισθησία
- Η νεκρή ζώνη, δηλαδή η μέγιστη μεταβολή στην είσοδο που δεν ανιχνεύεται από τον αισθητήρα

- Η γραμμικότητα, δηλαδή κατά πόσο η έξοδος μεταβάλλεται γραμμικά σε μια γραμμική είσοδο
- Η απόκριση
- Η επανάληψη (Akyildiz, 2002).



Διάγραμμα 12: Κατηγορίες αισθητήρων

Όσον αφορά τους βασικούς παράγοντες που πρέπει να εξετάζει κάποιος σε σχέση με τους αισθητήρες που χρησιμοποιούνται στο δίκτυο αισθητήρων είναι ο ρυθμός δειγματοληψίας του αισθητήρα, οι απαιτήσεις σε τάση τροφοδοσίας, η κατανάλωση ενέργειας (ενεργειακή αποτελεσματικότητα), η ακτίνα κάλυψης καθώς και η επεκτασιμότητα.

Κύριοι δείκτες της απόδοσης ενός αισθητήρα είναι η πιθανότητα εντοπισμού (Production of detection, PD) και το ποσοστό λαθεμένων συναγερμών (False Alarm Rate, FAR).

Οι παράγοντες που επηρεάζουν την πιθανότητα εντοπισμού/ανίχνευσης ενός αερίου είναι η ποσότητα και το μοτίβο της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας, το μέγεθος του αντικειμένου, η απόσταση μεταξύ αισθητήρα και αντικειμένου, η ταχύτητα και η κατεύθυνση κίνησης του αντικειμένου καθώς και τα χαρακτηριστικά αντανάκλασης και απορρόφησης των ενεργειακών κυμάτων από το αντικείμενο και το περιβάλλον.

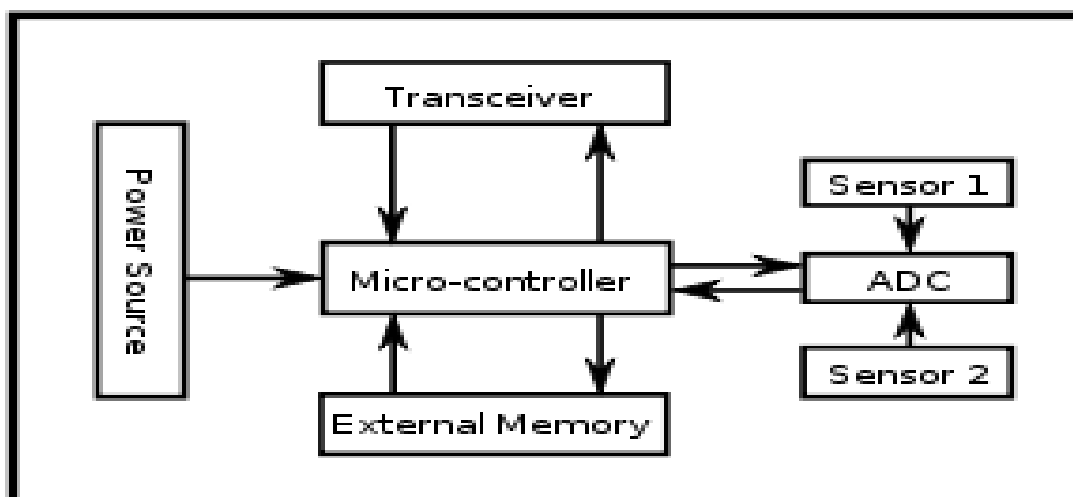
Ως καλός και αξιόπιστος αισθητήρας χαρακτηρίζεται αυτός ο οποίος είναι ευαίσθητος στην ποσότητα που μετράει, δεν επηρεάζεται από άλλες φυσικές ποσότητες και μεταβολές του περιβάλλοντος και τέλος, να είναι γραμμικός και παθητικός (Yick et al.,2008).

4.2 Κόμβοι

Ένα δίκτυο αισθητήρων αποτελείται από πολλαπλούς σταθμούς ανίχνευσης που ονομάζονται κόμβοι (sensor nodes) και οι οποίοι διαθέτουν ικανότητες αίσθησης, υπολογισμών και επικοινωνίας. Συνήθως αυτοί είναι φορητοί, μικρού μεγέθους και βάρους. Όλες οι καταγραφές τους καταλήγουν σε έναν κεντρικό υπολογιστή και βρίσκονται εντός ή πάρα πολύ κοντά στο φαινόμενο το οποίο καλούνται να παρατηρούν. Ο κάθε κόμβος επικοινωνεί με τον κεντρικό υπολογιστή όχι μόνο για να μεταδώσει τα δεδομένα που έχει καταγράψει αλλά και για να δεχτεί εντολές από αυτόν, έτσι ώστε να είναι δυνατή η διαδικασία ελέγχου του αισθητήρα από μακριά.

Κάθε κόμβος αισθητήρα είναι εφοδιασμένος με έναν αισθητήρα-μετατροπέα (transducer-υποσύστημα αισθητήρων), ένα μικροϋπολογιστή/μικροελεγκτή (υποσύστημα επεξεργασίας), ένα (ραδιο)πομποδέκτη (transceiver-υποσύστημα επικοινωνιών), μνήμη και μια πηγή ενέργειας (υποσύστημα τροφοδοσίας) που είναι συνήθως μια μπαταρία ή μια ενσωματωμένη μορφή συγκομιδής ενέργειας. Πιο αναλυτικά, ο μετατροπέας (transducer) μετατρέπει σε ηλεκτρικό σήμα την είσοδο που παίρνει από τα φυσικά φαινόμενα που παρακολουθεί. Ο μικροϋπολογιστής επεξεργάζεται και αποθηκεύει το σήμα εξόδου του αισθητήρα ενώ ο πομποδέκτης, που μπορεί να είναι συνδεδεμένος ενσύρματα ή ασύρματα, μεταδίδει τα δεδομένα στον κεντρικό υπολογιστή. Στην περίπτωση που ο πομποδέκτης συνδέεται ασύρματα θα πρέπει να έχει επιπλέον μια εσωτερική κεραία ή μια σύνδεση σε κάποια εξωτερική κεραία (Ruiz 2003).

Κύριοι δείκτες της απόδοσης ενός κόμβου είναι η κατανάλωση ισχύος, η προσαρμοστικότητα, το μέγεθος και το κόστος του, η ασφάλεια που προσφέρει, η δυνατότητα επικοινωνίας, η υπολογιστική ισχύς και ο συγχρονισμός (Κίκιρας, 2008).



Εικόνα 4: Η δομή ενός ασύρματου κόμβου

4.3 Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων

4.3.1 Ορισμός

Γενικά, με τον όρο Ασύρματο Δίκτυο Αισθητήρων (ΑΔΑ / Wireless Sensor Network, WSN) εννοούμε ένα σύνολο από διασκορπισμένους/κατανεμημένους στο χώρο αυτόνομους αισθητήρες-μετατροπείς (transducers) ή αισθητήριους κόμβους. Αυτοί έχουν ως κύριο στόχο την παρακολούθηση και καταγραφή φυσικών ή περιβαλλοντολογικών στοιχείων/φαινομένων, σε σημεία που δεν είναι εύκολα προσβάσιμα από τον άνθρωπο, και τη μεταφορά των καταγεγραμμένων δεδομένων σε έναν απομακρυσμένο κεντρικό σταθμό.

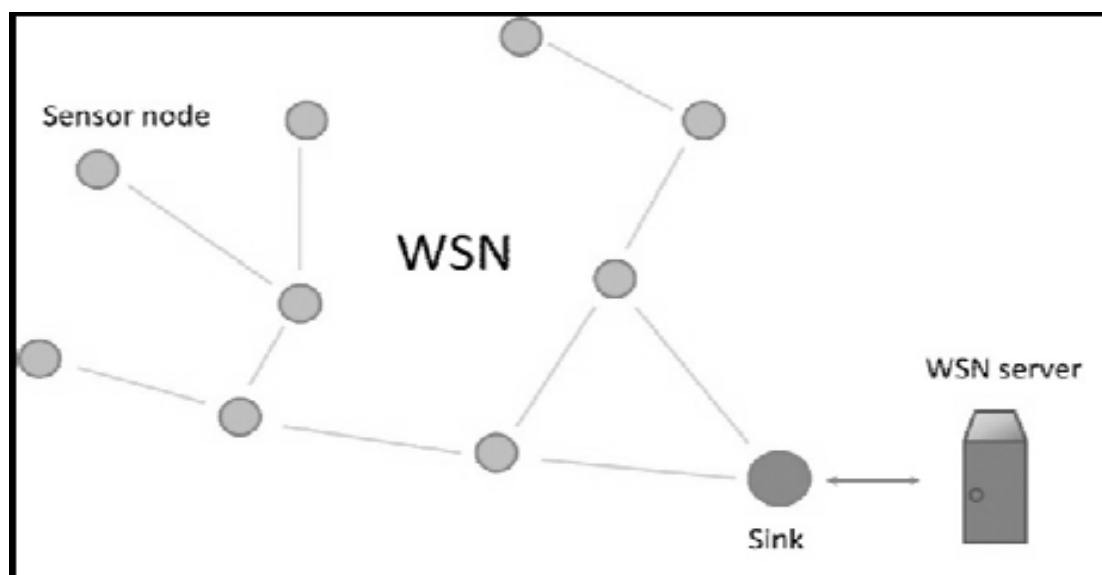
Τα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων αποτελούν μια από τις σημαντικότερες τεχνολογίες του 21^{ου} αιώνα και έναν από τους πιο αποτελεσματικούς τρόπους για τον εντοπισμό διαρροών. Προσφέρουν στους ερευνητές μια εύκολη, ευέλικτη, αποδοτική και οικονομική λύση/προσέγγιση για την απόκτηση κατανεμημένων δεδομένων και παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο. Η εξέλιξη των δικτύων αυτών απαιτεί τεχνολογίες από τρεις

διαφορετικές περιοχές έρευνας: των αισθητήρων, των επικοινωνιών και των υπολογιστών (συμπεριλαμβανομένων των hardware, software και αλγορίθμων) (Mahmood, 2014).

4.3.2 Δομικά στοιχεία

Ένα ΑΔΑ αποτελείται κυρίως από δύο δομικά στοιχεία: αυτά που παράγουν την πληροφορία στο δίκτυο και ονομάζονται κόμβοι-πηγές (sources) και από τα στοιχεία που συλλέγουν την πληροφορία από τις πηγές και ονομάζονται αποδέκτες ή καταβόθρες (sinks). Κάθε κόμβος επικοινωνεί με τους γειτονικούς κόμβους καθώς στέλνει και δέχεται δεδομένα. Η διασύνδεση και ο τρόπος που επικοινωνούν μεταξύ τους οι πηγές και οι αποδέκτες καθορίζουν την τοπολογία του δικτύου.

Ειδικότερα, οι κόμβοι από τους οποίους αποτελείται «αισθάνονται» και αλληλεπιδρούν με το περιβάλλον στο οποίο βρίσκονται, παρατηρούν φυσικά μεγέθη με σκοπό τη μετάδοση της επεξεργασμένης (ή και όχι) μέτρησής τους σε ένα σταθμό βάσης (base station). Η επικοινωνία των κόμβων είναι αμφίδρομη, δηλαδή όπως μεταδίδουν πληροφορίες στο base station μπορούν αντίστοιχα να δεχτούν πληροφορίες και από αυτόν (Akyildiz, 2002).



Εικόνα 5: Ασύρματο Δίκτυο Αισθητήρων
(Πηγή: Kabashkin et al.,2016)

4.3.3 Στοιβά πρωτοκόλλου

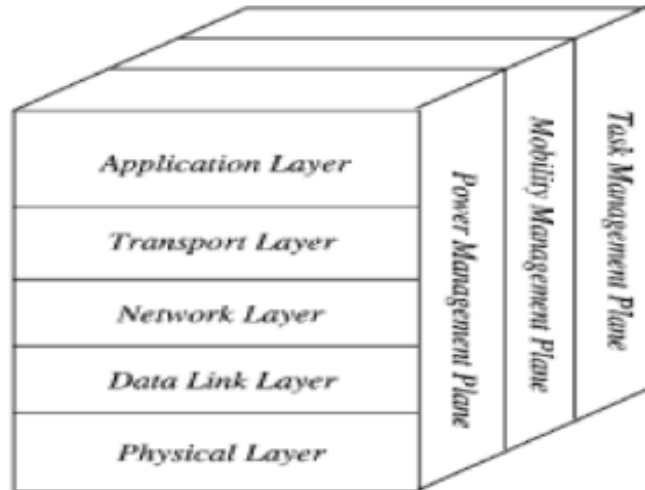
Κάθε ΑΔΑ λειτουργεί βάσει κάποιου συγκεκριμένου λογισμικού προγράμματος που αποτελεί τη διεπαφή του χρήστη με το υλικό. Αυτό είναι υπεύθυνο για τη διαχείριση, τον συντονισμό των εργασιών, καθώς και την κατανομή των διαθέσιμων πόρων. Ένα από τα πιο γνωστά και διαδεδομένα λειτουργικά συστήματα είναι το X-CTU της εταιρίας X-BEE το οποίο αναφέρεται και στην παρούσα εργασία.

Όπως προαναφέρθηκε, σε ένα δίκτυο με ασύρματους κόμβους υπάρχει ένα κεντρικό σημείο στο οποίο καταλήγουν όλα τα δεδομένα τα οποία αρχικά θα υποστούν επεξεργασία από τους υπόλοιπους. Τόσο το κεντρικό όσο και κάθε άλλο σημείο χρησιμοποιούν την παρακάτω στοιβά πρωτοκόλλου.

Το μοντέλο OSI (Open Systems Interconnection) είναι ένα πρότυπο μοντέλο επτά επιπέδων και καθορίζει τη διασύνδεση μεταξύ των δικτύων (αρχιτεκτονική δικτύου). Το μοντέλο αυτό υποδιαιρεί τις λειτουργίες ενός τηλεπικοινωνιακού δικτύου σε μια κατακόρυφη στοιβά επτά επιπέδων. Η συγκεκριμένη στοιβά αποτελείται από τα παρακάτω επίπεδα:

- Φυσικό
- Ζεύξης δεδομένων
- Δικτύου
- Μεταφοράς
- Εφαρμογής
- καθώς και από τα επίπεδα διαχείρισης (management planes) ενέργειας, κινήσεως και στόχου.

Στο κάθε στρώμα ένα συγκεκριμένο πρωτόκολλο είναι υπεύθυνο να παρέχει στο προηγούμενο και στο επόμενο στρώμα την αναμενόμενη μορφή δεδομένων.



Εικόνα 6: Στοίβα πρωτοκόλλου σε ένα ΑΔΑ
(Πηγή: Akyildiz et al., 2006),

Τα τρία τελευταία επίπεδα διαχείρισης βοηθούν τους αισθητήριους κόμβους να συνεργαστούν καλύτερα ο ένας με τον άλλο προκειμένου να φέρουν εις πέρας τον σκοπό για τον οποίο εγκαταστάθηκαν καταναλώνοντας όσο το δυνατόν λιγότερη ενέργεια (Al-Obaisat, 2007).

Ιδανικά, κάθε δίκτυο θα πρέπει να ικανοποιεί τους ακόλουθους στόχους προκειμένου να εγγυάται την ασφάλεια και την αξιοπιστία του:

- Confidentiality: Διασφάλιση ότι το μήνυμα παραμένει ανέπαφο από κάθε επίθεση.
- Integrity: Αναφέρεται στην αξιοπιστία των μηνυμάτων τα οποία δεν έχουν αλλοιωθεί.
- Authentication: Επιβεβαιώνει ότι το μήνυμα προέρχεται από τον κόμβο που ισχυρίζεται ότι προέρχεται.
- Access control: Είναι η ικανότητα να καθορίζεται αν ο κόμβος έχει πρόσβαση στους σωστούς πόρους του συστήματος.

4.3.4 Τι προσφέρει ένα ΑΔΑ

Τα βασικά πλεονεκτήματα που προσφέρει ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων είναι η χαμηλή κατανάλωση, η αυτόνομη και προγραμματιζόμενη λειτουργία, το χαμηλό κόστος, η γρήγορη δημιουργία δικτύου και η ευκολία ανάπτυξης, η προσαρμοστικότητα, η

απλότητα καθώς και η δυνατότητα παρακολούθησης δυσπρόσιτων περιοχών και μεγάλων εκτάσεων.

Ένα δίκτυο αισθητήρων χαρακτηρίζεται κυρίως από:

- το χρόνο ζωής
- την επεκτασιμότητα
- την κάλυψη που παρέχει
- το κόστος παραγωγής
- την ανίχνευση και διόρθωση σφαλμάτων
- το χρόνο απόκρισης
- τον τρόπο συγχρονισμού
- την ασφάλεια που παρέχει.
- την ικανότητα αντιμετώπισης κάποιας αστοχίας στους κόμβους
- την κινητικότητα των κόμβων
- τη δυναμική τοπολογία δικτύου (Κίικρας, 2008).

4.3.5 Κατηγορίες υπόγειων δικτύων παρακολούθησης

Πλέον είναι εφικτή η ανάπτυξη ενός τεράστιου αριθμού αισθητήρων χαμηλού κόστους για την παρακολούθηση μεγάλων περιοχών πάνω από την επιφάνεια του εδάφους, υποθαλάσσια ή μέσα στην ατμόσφαιρα παρέχοντας πλήθος δεδομένων για το περιβάλλον στο οποίο αναπτύσσονται. Τα ΑΔΑ διακρίνονται σε υπέργεια, υπόγεια, υποθαλάσσια, multimedia, κινούμενα.

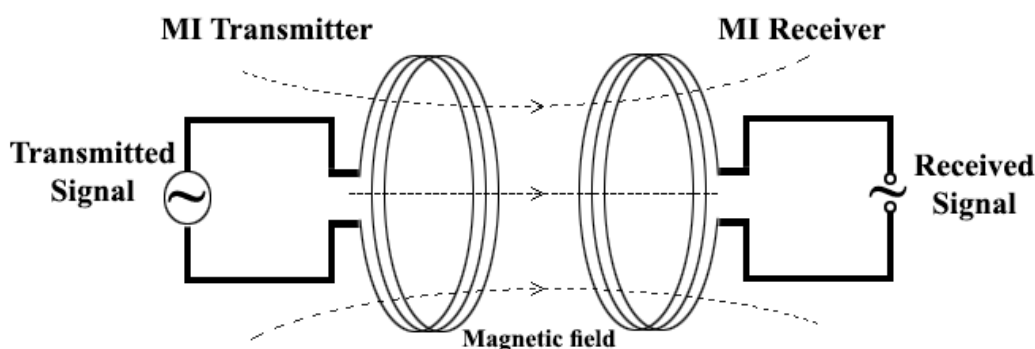
Τέλος, τα συστήματα δικτύων αισθητήρων που εφαρμόζονται για την παρακολούθηση των υπόγειων αγωγών ομαδοποιούνται κυρίως στις εξής κατηγορίες:

Α) Δίκτυα ασύρματων αισθητήρων που στηρίζονται στη μαγνητική επαγωγή.

Το ασύρματο δίκτυο αισθητήρων με μαγνητική επαγωγή παρέχει μια λύση σχετικά χαμηλού κόστους για ένα σύστημα ανίχνευσης διαρροών σε πραγματικό χρόνο. Στις υπόγειες ασύρματες επικοινωνίες, τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα εξασθενούν κατά τη

διάδοσή τους. Συγκεκριμένα, η μείωση κατά τη μαγνητική επαγωγή είναι ανάλογη με $1/r^2$ ενώ η εξασθένιση του H/M κύματος είναι ανάλογη με $1/r^3$ (Sun et al., 2010).

Τα κανάλια της μαγνητικής επαγωγής δε μεταβάλλονται καθώς αλλάζει η ιδιότητα του εδάφους και η επικοινωνία πραγματοποιείται με τη χρήση ενός συρμάτινου πηνίου που έχει τοποθετηθεί εντός των αγωγών. Το σήμα στο πηνίο του πομπού ρυθμίζεται από ένα ημιτονοειδές ρεύμα το οποίο παράγει ένα χρονικά μεταβαλλόμενο πεδίο, το οποίο με τη σειρά του προκαλεί ένα άλλο ημιτονοειδές ρεύμα στο πηνίο του δέκτη κι έτσι επιτυγχάνει την ασύρματη επικοινωνία υπόγειας μαγνητικής επαγωγής με τη λήψη μετρήσεων που λαμβάνονται από τους υπόγειους αισθητήρες (Tariq AL-Kadia, 2013).



Εικόνα 7: Ασύρματη επικοινωνία που βασίζεται στη μαγνητική επαγωγή
(Πηγή:Sun et al., 2009)

Δομή του συστήματος

Το σύστημα είναι μια συστοιχισμένη αρχιτεκτονική συμπλέγματος που αποτελείται από ετερογενείς αισθητήρες.

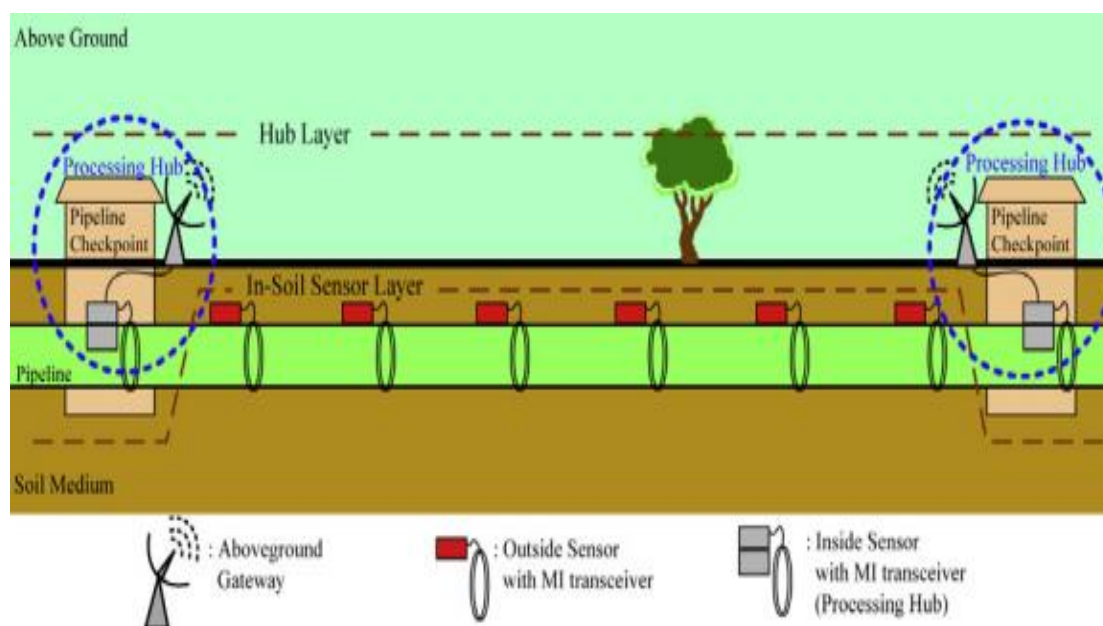
Οι αισθητήρες διακρίνονται σε δύο στρώματα/επίπεδα: στο στρώμα πλήμνης και στο στρώμα εδάφους. Ο αισθητήρας πλήμνης αναπτύσσεται εντός του αγωγού και αποτελείται από αισθητήρες πίεσης και ακουστικούς αισθητήρες στα σημεία ελέγχου ή στους

² r: απόσταση

σταθμούς αντλιών. Οι αισθητήρες πλήμνης επικοινωνούν με τους αισθητήρες εδάφους με μαγνητικούς επαγωγικούς πομποδέκτες. Το στρώμα εδάφους αναπτύσσεται εκτός του αγωγού και αποτελείται από τους κατάλληλους αισθητήρες εδάφους για τη μέτρηση που πρέπει να πραγματοποιηθεί.

Οι μετρήσεις στέλνονται ασύρματα στο σύμπλεγμα κεφαλής στο σημείο ελέγχου και στη συνέχεια, το σύμπλεγμα κεφαλής επεξεργάζεται τα δεδομένα και μεταδίδει τις πληροφορίες ασύρματα μέσω του αέρα με ηλεκτρομαγνητικά κύματα σε ένα κέντρο ελέγχου (Sun et al.2009).

Η τεχνική αυτή αναφέρεται στο κεφάλαιο της εφαρμογής και προτείνεται για την παρακολούθηση των υπόγειων τμημάτων του αγωγού. Σε σύγκριση με άλλες λύσεις ανίχνευσης διαρροών που είναι διαθέσιμες στην αγορά, η συγκεκριμένη τεχνική είναι πολύ αποδοτική, απλή και έχει χαμηλή κατανάλωση ενέργειας.



Εικόνα 8: Αρχιτεκτονική συστήματος στη μαγνητική επαγωγή
(Πηγή: Sun, 2010)

B) Αυτοοργανωμένα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων για την παρακολούθηση της πίεσης.

Τα ΑΔΑ σε ένα τέτοιο σύστημα χρησιμοποιούν κινητούς ασύρματους αισθητήρες οι οποίοι μπορούν να ανιχνεύουν τυχόν διαρροές στους υπόγειους σωλήνες παρακολουθώντας την πίεση του ρευστού που ρέει εντός των σωλήνων.

Ειδικότερα, οι αισθητήρες μεταδίδουν τα δεδομένα που λήφθηκαν από τους αγωγούς προς την επιφάνεια με τη χρήση ασύρματου δικτύου, εκεί όπου υπάρχουν σταθμοί οι οποίοι λαμβάνουν και επεξεργάζονται το σήμα με τα δεδομένα. Στη συνέχεια οι σταθμοί επικοινωνούν με μια κεντρική μονάδα που λειτουργεί ως το κύριο σημείο σύνδεσης. Η κεντρική μονάδα επεξεργάζεται το ληφθέν σήμα και επιτρέπει την αναγνώριση της διαρροής, αν υπάρχει.

Το σύνολο του δικτύου αποτελείται από επίγειους σταθμούς που υπάρχουν σε σταθερές ή κινητές/κινούμενες θέσεις. Οι επίγειοι σταθμοί είναι εξοπλισμένοι με κατευθυνόμενες κεραιές για επικοινωνία με τους αισθητήρες που συμμετέχουν στο δίκτυο αγωγών και αυτοί ουσιαστικά αποτελούν τον «πυρήνα» του συστήματος παρακολούθησης. Σε αυτή την τεχνική είναι εφικτή η διαρκής και σε πραγματικό χρόνο παρακολούθηση και σε περίπτωση όπου παρατηρηθεί κάποια διαρροή, ο αισθητήρας στέλνει τη θέση του στον πλησιέστερο σταθμό που βρίσκεται στην επιφάνεια (Trinchero, 2009).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ, ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΚΑΙ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

5.1 Αξιοπιστία και ευαισθησία

Η αξιοπιστία κάθε συστήματος πολλαπλών στοιχείων ορίζεται τυπικά ως *“η πιθανότητα ένα σύστημα να λειτουργεί ικανοποιητικά κατά τη διάρκεια του χρόνου λήψης και αποστολής δεδομένων όταν χρησιμοποιείται υπό τις καθορισμένες συνθήκες”*.

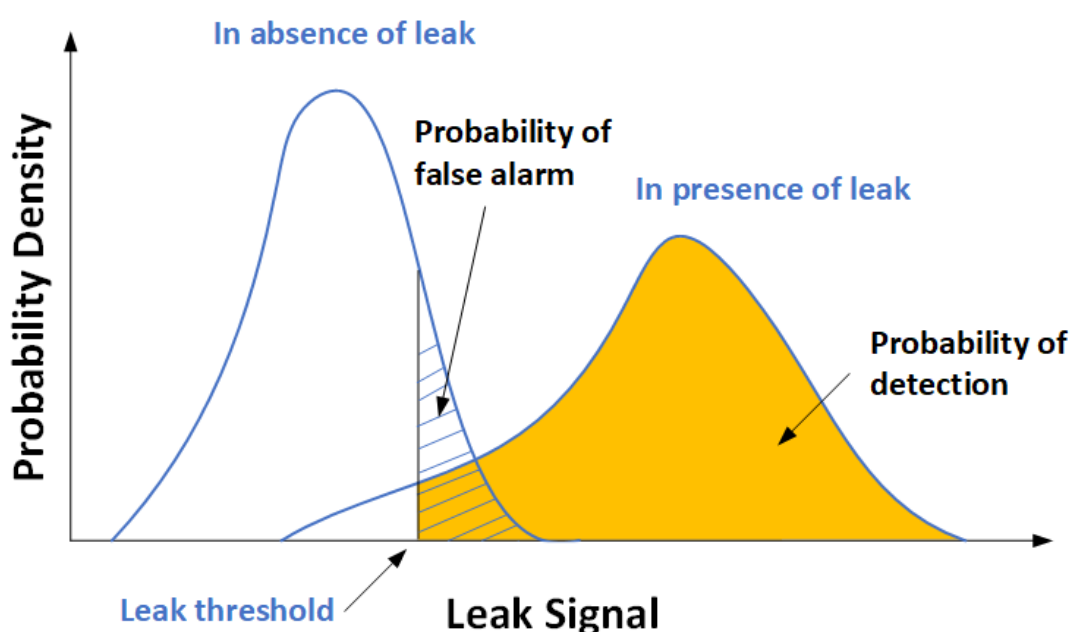
Η μέθοδος με την οποία αξιολογείται η αξιοπιστία ενός συγκεκριμένου συστήματος ποικίλλει ανάλογα με τον τύπο των στοιχείων που αυτό αποτελείται, τη διαμόρφωση του συστήματος ως προς τον τρόπο με τον οποίο τα στοιχεία αυτά συνδέονται μεταξύ τους και την κατάσταση στην οποία το σύστημα ορίζεται ότι έχει αποτύχει. Επομένως, η αξιοπιστία του συστήματος θα μπορούσε να χαρακτηριστεί ως μια συνάρτηση της αξιοπιστίας των μετρήσεων των στοιχείων του (Deif et al., 2017).

Η αξιοπιστία των μετρήσεων (reliability of measurements) εξαρτάται από τις απαιτήσεις που σχετίζονται με την εγκατάσταση του συστήματος μέτρησης και τα χαρακτηριστικά της ροής που καταμετρώνται όπως το επίπεδο στροβιλισμού, η ταχύτητα, οι μεταβολές στις ιδιότητες του ρευστού. Η ακρίβεια της μέτρησης εξαρτάται από την τεχνική της μέτρησης, την ικανότητα του υπεύθυνου για την επιτήρηση, τη βαθμονόμηση του μετρητή του οργάνου καθώς και τη συχνότητα της διαδικασίας μέτρησης.

Γενικά, η αξιοπιστία (βάσει του API1155³) ορίζεται ως το μέτρο της ικανότητας ενός συστήματος ανίχνευσης διαρροών (LDS) να λαμβάνει ακριβείς αποφάσεις σχετικά με την πιθανή ύπαρξη διαρροής στον αγωγό. Συνεπώς, η αξιοπιστία μπορεί να εκφραστεί ως *“μια συνάρτηση πιθανότητας για την ανίχνευση διαρροών, δεδομένου ότι δεν υπάρχει κάποια*

³ Το API 1155 καθόρισε μια ομοιόμορφη μεθοδολογία που θα μπορεί να χρησιμοποιηθεί από τις εταιρείες αγωγών ως βοήθεια για την αξιολόγηση των συστημάτων ανίχνευσης διαρροών που βασίζονται σε κάποιο λογισμικό.

διαρροή”. Ένα σύστημα θεωρείται πιο αξιόπιστο εάν η πιθανότητα αυτή είναι χαμηλή, δηλαδή αν ανιχνεύει πραγματικές διαρροές δίχως να δημιουργεί λανθασμένους συναγερμούς, γεγονός που αποτελεί μεγάλη πρόκληση. Επομένως, η αξιοπιστία επιτυγχάνεται σε ένα σύστημα αν αυτό είναι ικανό να ανιχνεύει ακόμα και μικρές διαρροές, το μέγεθος και την ακριβή θέση τους σε πραγματικό χρόνο, δεν είναι επιρρεπές σε λανθασμένες ειδοποιήσεις και μπορεί να εκτιμήσει την ταχύτητα με την οποία απελευθερώνεται το αέριο (Zhang et al., 2009).



Εικόνα 9: Η επίδραση της αβεβαιότητας στην ανίχνευση διαρροών στους αγωγούς (Πηγή: Gilmour, 2019)

Η ευαισθησία είναι επίσης ένας σημαντικός παράγοντας στην αξιολόγηση απόδοσης ενός συστήματος ανίχνευσης διαρροών. Βάσει του API1155, η ευαισθησία ορίζεται ως “ένα σύνθετο μέτρο του μεγέθους της διαρροής που μπορεί να ανιχνεύσει ένα σύστημα ανίχνευσης διαρροών και του χρόνου που απαιτείται από το σύστημα ώστε να εκπέμψει κάποια ειδοποίηση”. Ο ελάχιστος ρυθμός διαρροής και ο χρόνος ανίχνευσής της, εξαρτώνται ο ένας από τον άλλο. Επομένως, τα μικρότερα ποσοστά ανίχνευσης διαρροών απαιτούν μεγαλύτερο χρόνο ανίχνευσης ενώ οι υψηλότεροι ρυθμοί ανίχνευσης επιτρέπουν

μικρότερους χρόνους. Οι μέθοδοι που βασίζονται στο υλικό (hardware) λειτουργούν καλύτερα σε σχέση με την ευαισθησία (Deif et al., 2017)..

Το πρώτο βήμα στο σχεδιασμό ενός αξιόπιστου ΑΔΑ είναι η αξιολόγηση της αξιοπιστίας μιας δεδομένης ανάπτυξης ΑΔΑ προκειμένου τα πακέτα δεδομένων να μεταφέρονται με επιτυχία από τον κάθε κόμβο στο κόμβο-καταβόθρα και στη συνέχεια στο σταθμό βάσης. Η αξιοπιστία οποιουδήποτε συστήματος πολλαπλών στοιχείων ορίζεται τυπικά ως «η πιθανότητα ένα σύστημα να λειτουργεί ικανοποιητικά κατά τη διάρκεια του χρόνου αποστολής δεδομένων όταν χρησιμοποιείται υπό καθορισμένες συνθήκες» (Kuo et al., 2003).

Η αξιοπιστία ενός ΑΔΑ επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες όπως η αποτυχία των στοιχείων, η επιρροή από το περιβάλλον, οι αλλαγές εργασιών και η ενημέρωση του δικτύου. Αυτοί οι παράγοντες καθώς και η συμπεριφορά του δικτύου είναι δύσκολο να περιγραφούν ή να υπολογιστούν με μαθηματικά μοντέλα. Ως λύση προτείνεται η προσομοίωση του δικτύου η οποία αποτελεί μια σημαντική μέθοδο για την ανάλυση της αξιοπιστίας (Kabashkin et al., 2016).

5.2 Αποτυχία και λειτουργικότητα σε ένα ΑΔΑ

Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο (κεφάλαιο 4), οι κόμβοι-αισθητήρες αισθάνονται συλλογικά το περιβάλλον και παρέχουν τα δεδομένα μέσω ασύρματων καναλιών. Είναι συστήματα πολλαπλών εξαρτημάτων, με αποτέλεσμα να υπόκεινται σε διαφορετικές βλάβες στοιχείων. Σε πολλές περιπτώσεις χαρακτηρίζονται από περιορισμένη ικανότητα επεξεργασίας, χαμηλή ισχύς (χαμηλή μπαταρία), βραχεία περιοχή μετάδοσης και μικρή μνήμη, καθιστώντας την αξιόπιστη παράδοση των δεδομένων μια από τις μεγαλύτερες προκλήσεις.

Έτσι, καθώς τα ΑΔΑ είναι δίκτυα πολλαπλών στοιχείων, συσκευών και λειτουργιών, η αποτυχία μίας μόνο συσκευής μπορεί να μην είναι κρίσιμη για τις εφαρμογές. Ωστόσο, όταν συμβαίνουν ταυτόχρονες αποτυχίες σε πολλαπλές συσκευές, οι συνέπειες είναι πιθανό να αποβούν καταστροφικές. Οι ταυτόχρονες αποτυχίες πολλών συσκευών συμβάλλουν στην αναξιοπιστία των ΑΔΑ καθώς μπορούν να παρεμποδίσουν την επικοινωνία για μεγάλες χρονικές περιόδους και κατά συνέπεια να διαταράξουν ή ακόμα και να απενεργοποιήσουν τους αλγόριθμους διαχείρισης του δικτύου (Dilmaghani et al.,2011).

Προκειμένου να εντοπιστούν οι καταστάσεις στις οποίες αποτυγχάνει μια συγκεκριμένη ανάπτυξη ΑΔΑ, πρέπει πρώτα να καθοριστεί η λειτουργικότητα ενός τέτοιου συστήματος. Η λειτουργικότητα ενός ΑΔΑ μπορεί να διακριθεί σε δύο χωριστά στοιχεία. Το πρώτο είναι η λειτουργία ανίχνευσης, η οποία είναι η ικανότητα ενός ΑΔΑ να ανιχνεύει όλους τους στόχους ή τα φαινόμενα που πραγματοποιούνται εντός ολόκληρης της περιοχής που παρακολουθείται κατά τη διάρκεια αποστολής δεδομένων. Το δεύτερο στοιχείο της λειτουργικότητας ενός ΑΔΑ, είναι η λειτουργία συνδεσιμότητας, η οποία είναι η ικανότητα του ΑΔΑ να παράγει ανιχνεύσιμα δεδομένα από τις πηγές (κόμβοι) προς τον καθορισμένο προορισμό (σταθμό βάσης ή κόμβο καταβόθρα). Συνεπώς, για να είναι ένα ΑΔΑ λειτουργικό όσον αφορά τη συνδεσιμότητα, κάθε ανιχνεύσιμο φαινόμενο από έναν ή περισσότερους κόμβους πρέπει να μεταφέρεται και στον κόμβο καταβόθρα μέσω της ασύρματης επικοινωνίας καθόλη τη διάρκεια αποστολής δεδομένων. Βάσει των παραπάνω, ένα ΑΔΑ θεωρείται πως έχει αποτύχει συνολικά αν αποτύχει κάποιο από τα στοιχεία λειτουργίας ανίχνευσης ή συνδεσιμότητας (Zhu et al., 2017).

5.3 Παράγοντες που επηρεάζουν την αξιοπιστία ενός ΑΔΑ

Υπάρχουν διάφοροι παράγοντες που μπορούν να επηρεάσουν την αξιοπιστία ενός ΑΔΑ θέτοντας σε κίνδυνο τη λειτουργικότητά του όσον αφορά την κάλυψη και τη συνδεσιμότητα. Αυτοί οι παράγοντες μπορούν να ταξινομηθούν σε αυτούς που σχετίζονται και σε αυτούς που δε σχετίζονται με τους κόμβους-αισθητήρες.

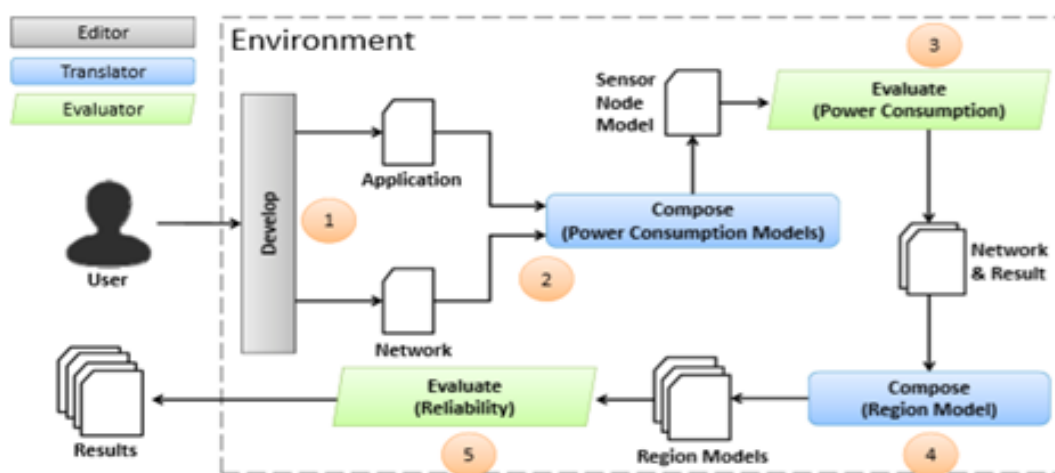
Αυτοί που συνδέονται με τους κόμβους-αισθητήρες είναι παράγοντες σχετικοί με τη λειτουργικότητα τους και αφορούν κυρίως την έλλειψη παροχής ενέργειας. Πλέον, έχουν εισαχθεί στο εμπόριο εξαιρετικά ανθεκτικές μπαταρίες οι οποίες μπορούν να διαρκέσουν για χρόνια κάτω από καθορισμένες συνθήκες (λιθίου, θειονυλοχλωριδίου) διατηρώντας τη λειτουργία των κόμβων για μεγάλες χρονικές περιόδους. Ωστόσο, άλλα ζητήματα εμφανίζονται και τα οποία αφορούν τα εξαρτήματα που αποτελούν τους κόμβους (αισθητήρες, πομποδέκτες, επεξεργαστές κ.α). Αυτό οφείλεται κυρίως είτε στην ποιότητα των υλικών από τα οποία είναι φτιαγμένοι οι κόμβοι είτε στις αστοχίες λογισμικού (software) εξαιτίας των σκληρών περιβαλλοντικών συνθηκών που βρίσκονται οι κόμβοι με αποτέλεσμα την αδυναμία επικοινωνίας, αίσθησης και ανίχνευσης (Virkki et al.2012, Koushanfar et al. 2005).

Από την άλλη πλευρά, τα ζητήματα που δε συνδέονται με τους κόμβους-αισθητήρες είναι εξωτερικοί παράγοντες όπως η αποτυχία της ασύρματης σύνδεσης εξαιτίας της εξασθένησης του σήματος ή εξωτερικών παρεμβολών καθώς και οι υπερβολικές συγκρούσεις πακέτων δεδομένων κατά την αποστολή τους (Baccour et al. 2012, Mahmood et al.2017).

Η σημαντικότερη πρόκληση που αντιμετωπίζουν τα περισσότερα συστήματα είναι η ανάγκη για ενεργειακή αποτελεσματικότητα επιτυγχάνοντας ταυτόχρονα ορθή μεταφορά.

Η εξασφάλιση της ενεργειακής αποτελεσματικότητας και της αξιόπιστης μεταφοράς

δεδομένων στα ΑΔΑ είναι τα βασικότερα ζητήματα. Διάφορες τεχνικές έχουν αναπτυχθεί για τη βελτιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας των κόμβων αυξάνοντας τη διάρκεια ζωής και βελτιώνοντας την ποιότητά του δικτύου με στόχο τη διαρκή μεταφορά και παράδοση πακέτων δεδομένων. Ωστόσο υπάρχει μια σύγκρουση μεταξύ της κατανάλωσης ενέργειας και της αξιοπιστίας. Η αύξηση της αξιοπιστίας συνήθως οδηγεί σε αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας, ενώ οι τεχνικές που έχουν αναπτυχθεί για τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας επηρεάζουν αρνητικά την αξιοπιστία και το αντίστροφο (Mahmood et al.2017).

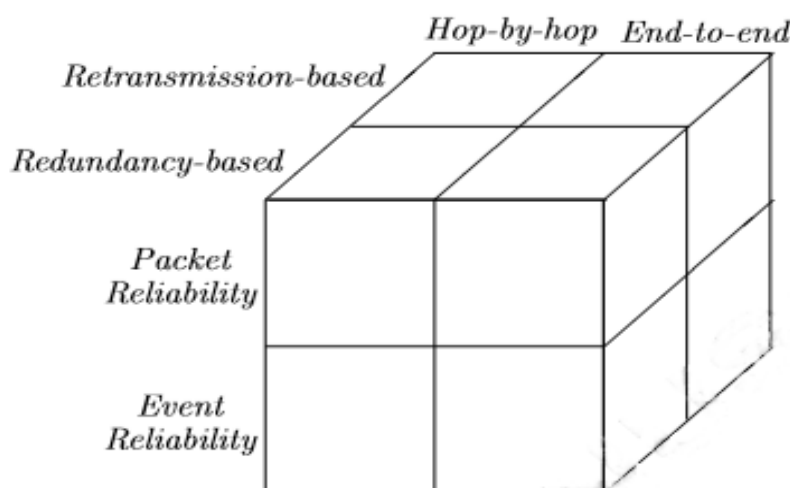


Εικόνα 120: Βήματα για την αξιολόγηση της ενεργειακής κατανάλωσης ενός ΑΔΑ (Πηγή: Dâmaso et al.,2014)

Η επίπτωση αυτών των παραγόντων στη συνολική αξιοπιστία του δικτύου είναι δύσκολο να προβλεφθεί εξαιτίας της πολύπλοκης και παροδικής φύσης τους. Για το λόγο αυτό, με σκοπό το μετριασμό των συνεπειών από τέτοιου είδους παράγοντες, έχουν προταθεί μέθοδοι όπως η αναγνώριση και η αναμετάδοση στις οποίες θα αναφερθούμε στο επόμενο κεφάλαιο.

5.4 Τεχνικές αξιόπιστης μετάδοσης δεδομένων σε ένα Ασύρματο Δίκτυο Αισθητήρων

Ένα ΑΔΑ θεωρείται ότι λειτουργεί ορθά εφόσον οι κόμβοι των αισθητήρων από μια συγκεκριμένη περιοχή αποδίδουν αξιόπιστα τα δεδομένα προς τον κόμβο καταβόθρα που λειτουργεί ως συλλέκτης των δεδομένων. Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την ενίσχυση της αξιοπιστίας βασίζονται σε τεχνικές όπως η αναμετάδοση και ο πλεονασμός ή εφεδρεία χρησιμοποιώντας μηχανισμούς αποκατάστασης της απώλειας πακέτων με δεδομένα hop-by-hop ή end-to-end. Σκοπός είναι η αξιόπιστη και ενεργειακά αποδοτική μετάδοση δεδομένων.



Εικόνα 131: Ένα τρισδιάστατο μοντέλο αναφοράς για έρευνα αξιοπιστίας σε ένα ΑΔΑ (Πηγή: Mahmood, et al., 2014),

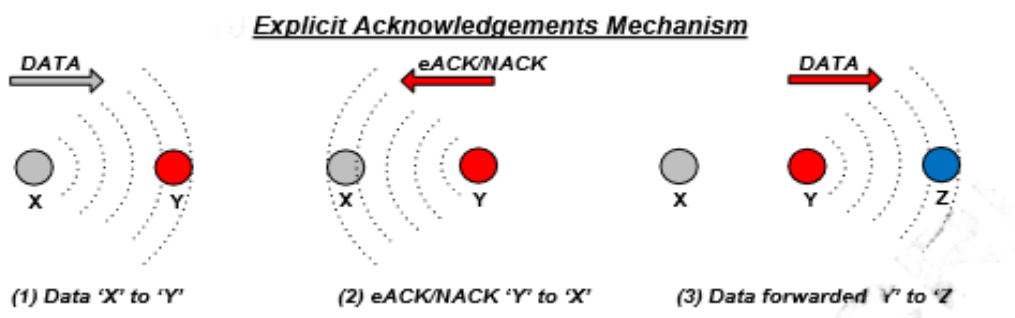
5.4.1 Τεχνική αναμετάδοσης

Σε ένα ασύρματο δίκτυο, η αναμετάδοση είναι η πιο διαδεδομένη τεχνική προκειμένου να επιτευχθεί η μετάδοση δεδομένων αξιόπιστα μεταξύ των κόμβων. Σύμφωνα με αυτή, ο κόμβος-αποστολέας αφού μεταδώσει το πακέτο του (σύνολο δεδομένων), αναμένει την αναγνώριση από τον επόμενο κόμβο καθώς αυτό προωθείται προς το σταθμό-καταβόθρα.. Αν ο αποστολέας δε λάβει κάποια επιβεβαίωση, τότε το πακέτο θεωρείται ότι χάθηκε με συνέπεια την επανάληψη αποστολής ολόκληρου του πακέτου. Ένα πακέτο θεωρείται ότι

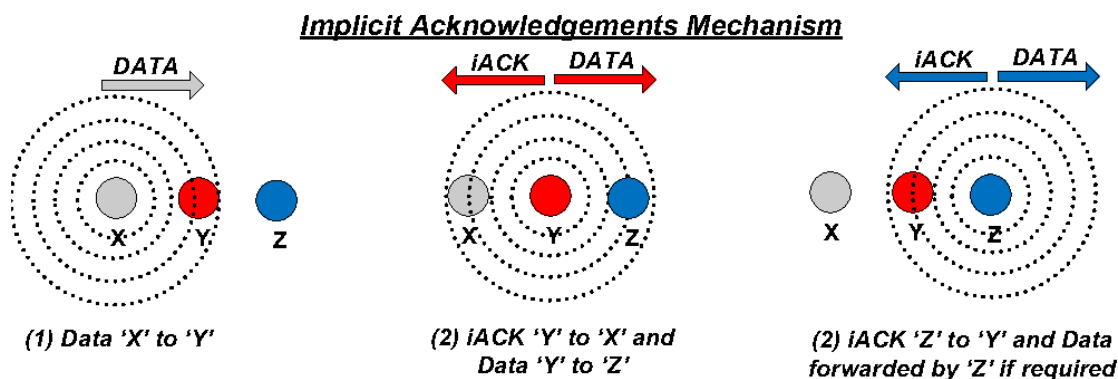
έχει χαθεί αν λείπει από αυτό έστω και έστω και ένα bit (δυναδικό ψηφίο) και απαιτείται η επανάληψη της μετάδοσης (Yick et al., 2008).

Σε ένα ΑΔΑ πολλαπλών κόμβων (multihop), η αξιοπιστία βάσει της αναμετάδοσης επιτυγχάνεται μέσω αναγνωρίσεων όπου ο κάθε κόμβος-αποστολέας απαιτεί από το γειτονικό αποδέκτη την επιβεβαίωση ότι έλαβε τα πακέτα δεδομένων που του έστειλε. Ειδικότερα, υπάρχουν δύο είδη μηχανισμών αναγνώρισης: i) η σαφής ή ρητή αναγνώριση (eACK, explicit acknowledgement), η οποία περιλαμβάνει την αρνητική αναγνώριση (NACK, negative acknowledgement), και ii) η έμμεση αναγνώριση (iACK, implicit acknowledgement) όπως φαίνεται και στις παρακάτω εικόνες (Εικόνες 12 και 13).

Ο μηχανισμός eACK βασίζεται σε ένα μήνυμα ειδικού ελέγχου το οποίο ο κόμβος-παραλήπτης, αφού πρώτα λάβει επιτυχώς ένα πακέτο, στέλνει πίσω στον αποστολέα ως απόδειξη παραλαβής. Όπως το eACK, το NACK στηρίζεται επίσης σε ένα μήνυμα ειδικού ελέγχου το οποίο επιτρέπει στο δέκτη να ειδοποιήσει τον αποστολέα προκειμένου να αναμεταδώσει τα στοιχεία που λείπουν από το πακέτο.



Εικόνα 142: Μηχανισμοί ρητής αναγνώρισης για αναμετάδοση
(Πηγή: Gonzalez et al., 2010)



Εικόνα 13: Μηχανισμοί έμμεσης αναγνώρισης για αναμετάδοση
(Πηγή: Gonzalez et al., 2010)

Από την άλλη πλευρά, στο μηχανισμό iACK, ο αποστολέας μετά την αποστολή του πακέτου εντοπίζει το σήμα από το κανάλι και ερμηνεύει την προώθηση του πακέτου που έστειλε στον επόμενο κόμβο μεταπήδησης ως μια απόδειξη για τη λήψη. Με αυτόν τον τρόπο, το iACK εκμεταλλεύεται τη φύση εκπομπής του ασύρματου καναλιού, αποφεύγοντας την επιπρόσθετη επιβάρυνση για τη μεταφορά και τη χρήση ενέργειας που προκαλείται από τη μετάδοση μηνυμάτων ειδικού ελέγχου (eACK/NACK) (Park et al., 2004).

5.4.2 Τεχνική εφεδρείας ή πλεονασμού

Από την άλλη πλευρά, αντί να αναμεταδοθεί ολόκληρο το χαμένο πακέτο, η προσέγγιση της εφεδρείας αποσκοπεί στη διόρθωση μόνο των χαμένων ή κατεστραμμένων τμημάτων. Ο αποστολέας προσθέτει ορισμένες επιπλέον πληροφορίες στο πακέτο τις οποίες ο δέκτης μπορεί να χρησιμοποιήσει για την ανασυγκρότηση των δεδομένων (Yick et al., 2008).

Σύμφωνα με αυτή την τεχνική, τα χαμένα ή κατεστραμμένα τμήματα δεδομένων από το κάθε πακέτο, μπορούν να ανακτηθούν μέσω τεχνικών κωδικοποίησης. Κατ' αυτό τον τρόπο μειώνεται σημαντικά η επιβάρυνση για τη μετάδοση, διατηρούνται οι περιορισμένοι ενεργειακοί πόροι και ενισχύεται η συνολική αξιοπιστία του συστήματος. Οι τεχνικές κωδικοποίησης απαιτούν από τον αποστολέα να προσθέσει κάποιο εφεδρικό σύνολο

τμημάτων στο πακέτο, έτσι ώστε ο δέκτης να μπορεί να ανακατασκευάσει το πακέτο αν κάποια δεδομένα χαθούν ή αλλοιωθούν (Rizzo, 1997).

Ένα από τα βασικότερα ζητήματα που αντιμετωπίζουν τα περισσότερα από τα πρωτόκολλα αξιοπιστίας που βασίζονται στην εφεδρεία, είναι πως η απόδοσή τους επηρεάζεται σε περιβάλλοντα με υψηλές απώλειες. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι τεχνικές κωδικοποίησης είναι σε θέση να ανακατασκευάσουν έναν περιορισμένο αριθμό bits (δυαδικών ψηφίων). Το όριο αυτό εξαρτάται από την ποσότητα τμημάτων που προστίθενται στο αρχικό σύνολο των τμημάτων του πακέτου. Αντίθετα, το μεγάλο πλήθος εφεδρικών τμημάτων είναι σε θέση να ανεχτεί μεγαλύτερο βαθμό απωλειών, όμως ταυτόχρονα μπορεί να οδηγηθεί σε συμφόρηση και να επηρεάσει τη συνολική αξιοπιστία.

5.4.3 Μηχανισμοί αποκατάστασης της απώλειας πακέτων με δεδομένα: hop-by-hop και end-to-end

Τόσο η τεχνική της αναμετάδοσης όσο και του πλεονασμού μπορούν να συνδυαστούν με τους μηχανισμούς hop-by-hop και end-to-end. Στην πρώτη μέθοδο, η οποία αναφέρεται και ως ένας μηχανισμός προσανατολισμένος προς το σύνδεσμο (link oriented), κάθε κόμβος από την πηγή προς τον τελικό προορισμό είναι υπεύθυνος για τη διασφάλιση της αξιόπιστης μετάδοσης των δεδομένων που ανιχνεύονται και καταγράφονται. Σε κωδικοποίηση hop-by-hop, η κωδικοποίηση/αποκωδικοποίηση γίνεται σε κάθε ενδιάμεσο κόμβο μέχρι τον κόμβο-καταβόθρα, ανανεώνοντας τα δεδομένα σε κάθε μετάβαση, όντας μια πιο ασφαλής τεχνική σε περιβάλλοντα με υψηλές απώλειες.

Παρόμοια, μπορεί να οριστεί και η επόμενη μέθοδος, η end-to-end ή από άκρο σε άκρο, ως ένας μηχανισμός προσανατολισμένης σύνδεσης, όπου μόνο τα δυο τελικά σημεία, δηλαδή ο κόμβος προέλευσης και ο κόμβος προορισμού, είναι υπεύθυνα για την αξιοπιστία του συστήματος ενώ οι ενδιάμεσοι κόμβοι απλώς αναμεταδίδουν τα πακέτα μεταξύ της πηγής και του τελικού προορισμού (Yick et al. 2008, Tang et al. 2006)

Στην κωδικοποίηση end-to-end, η κωδικοποίηση/αποκωδικοποίηση των δεδομένων εκτελείται μόνο στους κόμβους πηγής και καταβόθρας (προορισμού) και οι ενδιάμεσοι κόμβοι αναμεταδίδουν απλώς τα πακέτα.

Όσον αφορά την τεχνική της αναμετάδοσης, με τη μέθοδο end-to-end απαιτεί μόνο από τον κόμβο-πηγή που παρήγαγε την πληροφορία να αναμεταδώσει το πακέτο ενώ η μέθοδος hop-by-hop επιτρέπει στους ενδιάμεσους κόμβους να εκτελούν αναμεταδόσεις των χαμένων πακέτων.

6.ΕΦΑΡΜΟΓΗ

6.1 Εισαγωγή

Η παρακολούθηση του αγωγού καθίσταται δυσκολότερη όταν πρόκειται για αγωγό μεγάλων αποστάσεων που καλύπτει εκατοντάδες ή ακόμα και χιλιάδες χιλιόμετρα. Τα ΑΔΑ, όπως αναφέρθηκε, προσφέρουν μια αποτελεσματική λύση για την παρακολούθηση παραμέτρων που αφορούν τη λειτουργία των αγωγών ακόμα και σε δυσπρόσιτες περιοχές χωρίς να απαιτείται η μόνιμη επιτήρηση από κάποιο άτομο. Μεταφέρουν αναλλοίωτα δεδομένα σε πραγματικό χρόνο και παράγουν αληθείς ειδοποιήσεις όποτε κρίνεται απαραίτητο.

Στην εφαρμογή που παρουσιάζεται στη συνέχεια, προτείνεται ένα σύστημα για την ανίχνευση διαρροών το οποίο βασίζεται στη χρήση και τοποθέτηση αισθητήρων ανίχνευσης μεθανίου και ροομέτρων ανά τακτά διαστήματα κατά μήκος της διαδρομής του αγωγού φυσικού αερίου. Η μέθοδος στηρίζεται στην παρατήρηση συγκεντρώσεων μεθανίου από κόμβους-αισθητήρες γύρω από τον αγωγό και στην εγκατάσταση ροομέτρων εντός αυτού, προκειμένου να εντοπιστεί η ακριβής θέση των διαφυγών καθώς και το μέγεθός τους.

Μελετάται ποιοτικά η αξιοπιστία του συστήματος, λαμβάνοντας υπόψη ζητήματα σχετικά με τη σταθερότητα της λειτουργίας του ασύρματου δικτύου, τη λειτουργικότητα του ΑΔΑ όσον αφορά την κάλυψη του δικτύου και τη συνδεσιμότητα των κόμβων-αισθητήρων με τον κόμβο-καταβόθρα. Αυτοί οι παράγοντες είναι πιθανό να επηρεαστούν από σφάλματα που εισέρχονται στα όργανα μέτρησης λόγω των εξαρτημάτων που τα αποτελούν ή των συνθηκών που επικρατούν στο εξωτερικό περιβάλλον προκαλώντας τη δυσλειτουργία του συστήματος.

6.2 Συνθήκες

Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στις περιβαλλοντικές και ατμοσφαιρικές συνθήκες που εμφανίζονται σε κάθε περιοχή που διανύουν τα τμήματα του αγωγού μέχρι τον τελικό προορισμό.

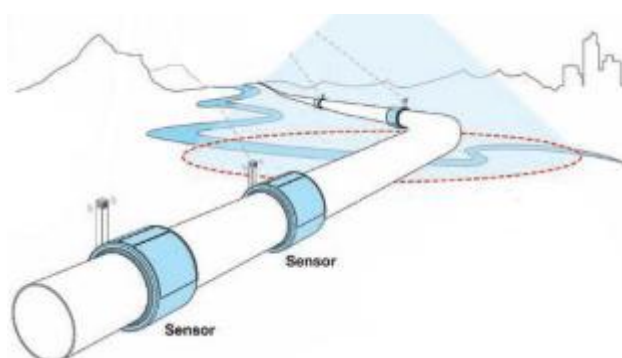
Το αέριο αφού ελευθερωθεί στο περιβάλλον, ως ελαφρύτερο του ατμοσφαιρικού αέρα, διαφεύγει στην ατμόσφαιρα και ακολουθεί μια διαδρομή που επηρεάζεται από τις μετεωρολογικές συνθήκες που επικρατούν τη στιγμή της έκλυσης καθώς και από την ταχύτητα με την οποία εκτονώνεται από την οπή. Η βροχόπτωση και ο δυνατός άνεμος σε συνδυασμό με τη ηλιακή ακτινοβολία συνεισφέρουν σημαντικά στη διασπορά του αερίου. Ο έντονος στροβιλισμός των μορίων του αέρα με τα μόρια του αερίου είναι αυτός που οδηγεί στον ταχύ σχηματισμό εύφλεκτου μίγματος.

Επίσης, ανάλογα με την περιοχή, το θερμό ή το ψυχρό έδαφος επηρεάζει την κατεύθυνση της μεταφοράς θερμότητας προς τον αγωγό και το περιβάλλον και αντίστροφα. Το γεγονός αυτό μπορεί να επηρεάσει τις συνθήκες ροής και πίεσης εντός του αγωγού. Επιπλέον, η σύνθεση του εδάφους, η ύπαρξη ζώων (κυρίως αγελάδες) καθώς και τα επίπεδα ρύπανσης που προϋπάρχουν σε κάθε μέρος πρέπει να μελετηθούν διεξοδικά και να ληφθούν υπόψη ώστε να οριστούν τα αποδεκτά όρια μεθανίου σε κάθε περίπτωση. Αντίστοιχα πρέπει να ερευνηθούν οι περιοχές υψηλού κινδύνου και να οριστούν αποστάσεις ασφαλείας κατά μήκος της διαδρομής του αγωγού.

Σε ορισμένες περιπτώσεις η επικοινωνία των κόμβων, η μεταφορά δεδομένων και η ορθή λειτουργία των αισθητήρων, ανάλογα με τα όρια ανοχής του συστήματος, είναι πιθανό να επηρεαστούν από ακραίες τιμές θερμοκρασίας και πίεσης, ξαφνικές μεταβολές των συνθηκών που επικρατούν στην περιοχή ή από φαινόμενα όπως παγετός, πλημμύρες, υψηλή υγρασία.

6.3 Περιγραφή του δικτύου αγωγών

Ένα πραγματικό δίκτυο μεταφοράς υδρογονανθράκων (φυσικού αερίου), όπως το δίκτυο της Ελλάδας αποτελείται από έναν κεντρικό αγωγό μεταφοράς υψηλής πίεσης (70 bar) που ξεκινά από τα ελληνοβουλγαρικά σύνορα και καταλήγει στην Αττική, συνολικού μήκους 512 χιλιομέτρων. Η διάμετρος του αγωγού είναι 36'' για τα πρώτα 100 χιλιόμετρα και 30'' για τα υπόλοιπα. Επιπλέον, υπάρχουν κλάδοι μεταφοράς υψηλής πίεσης (παράπλευρο δίκτυο) συνολικού μήκους 450 χιλιομέτρων, 6500 χιλιόμετρα δίκτυα πόλεων, εκατοντάδες κόμβοι και αγωγοί. Το δίκτυο, στο σύνολό του, το συμπληρώνουν το σύστημα διανομής, μετρητικοί και ρυθμιστικοί σταθμοί, σταθμοί συμπίεσης, συνοριακοί σταθμοί εισόδου καθώς και τερματικοί σταθμοί αποθήκευσης και διανομής. Σημαντικό ρόλο κατέχουν το σύστημα τηλεχειρισμού, το σύστημα ελέγχου λειτουργίας και επικοινωνιών και τέλος, τα κέντρα λειτουργίας και συντήρησης (www.rae.gr). Σε αυτό το σύστημα μεταφοράς εφαρμόζονται διάφορα μέτρα ασφαλείας όπως αναφέρθηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο (κεφάλαιο 3) με σκοπό τον περιορισμό του κινδύνου και την αποφυγή ατυχημάτων και απωλειών. Ωστόσο, θα είχε ιδιαίτερο ενδιαφέρον αν θα ήταν εφικτή η εγκατάσταση ενός επιπλέον συστήματος παρακολούθησης διαφυγών στα ήδη υπάρχοντα που χρησιμοποιούνται για την εποπτεία του αγωγού.



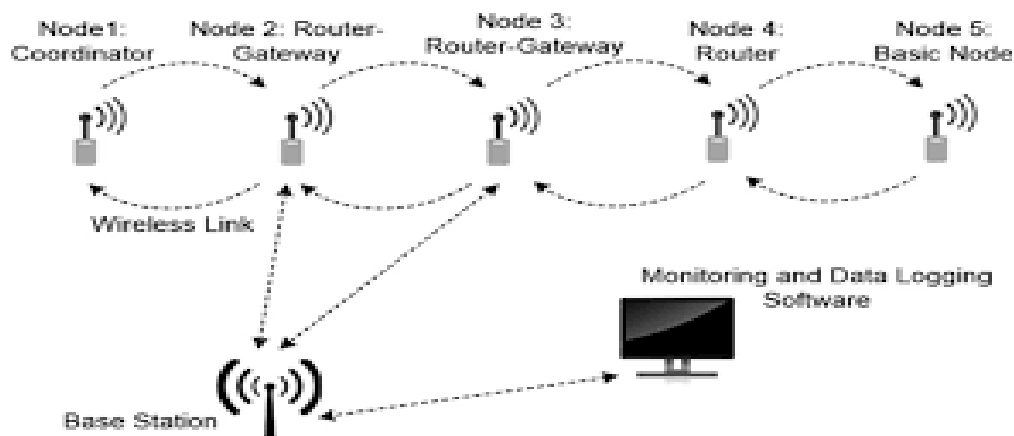
Εικόνα 14: Αγωγός μεταφοράς φυσικού αερίου

Σε θεωρητικό επίπεδο, η μελέτη αναφέρεται συγκεκριμένα στο τμήμα του κύριου αγωγού του οποίου το συνολικό μήκος είναι εκατοντάδες χιλιόμετρα και περιλαμβάνει

μετρητικούς σταθμούς και σταθμούς συμπίεσης. Θεωρείται πως ο αγωγός διανύει μόνο χερσαία τμήματα της χώρας και βρίσκεται είτε πάνω από το έδαφος είτε θαμμένος. Διασχίζει την ηπειρωτική χώρα περνώντας από δυσπρόσιτα μέρη, από περιβαλλοντικά προστατευόμενες περιοχές, από περιοχές με πυκνή βλάστηση ή ακόμα και από κοντινές αποστάσεις σε πόλεις διατηρώντας τις απαραίτητες αποστάσεις ασφαλείας.

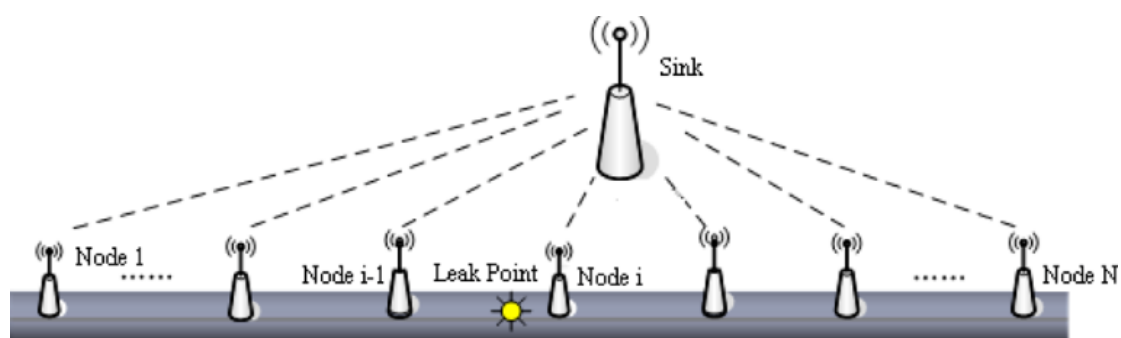
6.4 Σύστημα αισθητήρων

Η εργασία εστιάζει στο ζήτημα της αξιοπιστίας ενός δικτύου για την παρακολούθηση και ανίχνευση διαρροών του κύριου αγωγού για τον οποίο αναπτύσσεται οργανωμένο σύστημα ΑΔΑ χωρίς να εξετάζεται το κόστος που απαιτείται για την εφαρμογή του. Αυτό αποτελείται από κόμβους-αισθητήρες οι οποίοι εντοπίζουν συγκεντρώσεις μεθανίου στην ατμόσφαιρα που βρίσκονται εκτός επιτρεπτών ορίων. Οι κόμβοι συνδέονται ασύρματα τόσο μεταξύ τους όσο και με σταθμούς βάσης δεδομένων για τη συλλογή και διαχείριση των πληροφοριών. Κάθε κόμβος βρίσκεται σε συγκεκριμένη σταθερή θέση και είναι υπεύθυνος για τη συλλογή στοιχείων μέσω αισθητήρα και για την αποστολή τους σε πραγματικό χρόνο στους γειτονικούς κόμβους, έως ότου όλα τα δεδομένα να καταλήξουν στο σταθμό βάσης. Ορίζεται συγκεκριμένο πλήθος σταθμών βάσης όπου ο καθένας επικοινωνεί και αλληλεπιδρά με όσους κόμβους βρίσκονται στην εμβέλειά του και είναι συνδεδεμένοι μαζί του.



Εικόνα 15: Απεικόνιση ασύρματου δικτύου παρακολούθησης με χρήση αισθητήρων
(Πηγή: Salman et al., 2016)

Το ΑΔΑ που αναπτύσσεται είναι ομοιογενές καθώς αποτελείται από όμοιους τύπους αισθητήριων κόμβων με ίδια χαρακτηριστικά κάλυψης και δυνατότητες. Η λειτουργικότητα του ΑΔΑ εξετάζεται τόσο από πλευράς ανίχνευσης και κάλυψης όσο και από ικανότητα συνδεσιμότητας και επικοινωνίας των κόμβων ώστε να κριθεί αν είναι αξιόπιστο χωρίς να οδηγείται σε αποτυχίες. Το σύστημα πρέπει να είναι εύρωστο για να αντιμετωπίσει προβλήματα όπως η αποτυχία υλικού και η κακή συνδεσιμότητα σήματος.



Εικόνα 16: Αυτόματο σύστημα ανίχνευσης διαρροών
Πηγή: (Wan et al., 2012)

6.5 Κόμβοι και αισθητήρες

Στην εφαρμογή, το αυτόματο σύστημα ΑΔΑ που αναπτύσσεται κατά μήκος του αγωγού περιλαμβάνει εκατοντάδες κατανεμημένους κόμβους οι οποίοι διαθέτουν ενσωματωμένους αισθητήρες ανίχνευσης και μέτρησης ποσοτήτων μεθανίου. Ένας τυπικός κόμβος αποτελείται από ένα υποσύστημα ανίχνευσης, ένα υποσύστημα επεξεργασίας, ένα υποσύστημα επικοινωνίας και ένα υποσύστημα παροχής ενέργειας. Το υποσύστημα επεξεργασίας αποτελείται κυρίως από τον μικροελεγκτή και την μνήμη, ενώ το υποσύστημα επικοινωνίας από έναν πομποδέκτη ο οποίος λαμβάνει εντολές από έναν κεντρικό υπολογιστή και μεταδίδει δεδομένα σε αυτόν. Επίσης, κάθε κόμβος έχει ενσωματωμένο σύστημα εντοπισμού θέσης (GPS) ώστε να είναι γνωστές οι ακριβείς γεωγραφικές συντεταγμένες του σημείου που βρίσκεται.

Οι κόμβοι που τοποθετούνται στα τμήματα του αγωγού που βρίσκονται πάνω από το έδαφος εγκαθίστανται σε σταθερά σημεία παρακολούθησης σε ύψος μεταξύ 0,5 και 1,5 μέτρου πάνω από την επιφάνεια και σε απόσταση μερικών εκατοστών από τον αγωγό, χωρίς να έρχονται σε επαφή με το αέριο που κινείται εντός αυτού.

Στην παρούσα εργασία, επιλέχθηκε ο κόμβος Xbee-Pro (S2C), 63 mW. Αποτελείται από μικροελεγκτή XBee-PRO, πομποδέκτη Silicon Labs EM357 SoC⁴, αισθητήρες ανίχνευσης μεθανίου Winsen MQ4 και λειτουργεί στα 2,4 GHz με βάση το πρότυπο IEEE 802.15.4. Χαρακτηρίζεται από χαμηλό ρυθμό δεδομένων, χαμηλό κόστος και μικρή κατανάλωση ενέργειας.



Εικόνα 157: Ο κόμβος XBEE PRO S2C

(Πηγή: <https://gr.mouser.com/new/digi-international/digi-xbee-digimesh-s2c-modules/>)

Για τον προγραμματισμό κάθε κόμβου γίνεται χρήση του λογισμικού X-CTU⁵. Μέσω αυτού ο χρήστης μπορεί να ενημερώνει τις παραμέτρους, να αναβαθμίζει το λογισμικό του επεξεργαστή και να λαμβάνει εγγυήσεις για τη σύνδεση.

Όπως προαναφέρθηκε, το XBEE προσφέρει μεταδόσεις εμβέλειας έως 1500 μέτρα σε ανοιχτούς χώρους. Οι κόμβοι βρίσκονται σε απόσταση δεκάδων μέτρων μεταξύ τους

⁴ Τα τεχνικά χαρακτηριστικά βρίσκονται στη διεύθυνση:

https://gr.mouser.com/pdfdocs/digiinternational_10192016_s2c-xbeedigimesh-241.pdf

⁵ είναι μια ελεύθερη εφαρμογή πολλαπλών πλατφορμών που επιτρέπει στους προγραμματιστές να διαχειρίζονται μονάδες ραδιοσυχνότητας (RF) Digi μέσω μιας απλής στη χρήση σχηματικής/γραφικής διεπαφής

τοποθετημένοι σε μεταλλικό μονωμένο κουτί ώστε να προστατεύονται από την υγρασία. Η ισχύς του σήματος επηρεάζεται σε μικρό βαθμό από παράγοντες όπως τα δέντρα, η πυκνή βλάστηση, η γεωμορφολογία του εδάφους και οι καιρικές συνθήκες.

Η τροφοδοσία των κόμβων που βρίσκονται σε ανοιχτό χώρο μπορεί να πραγματοποιείται με τη βοήθεια ηλιακών κυψελών (Jin et al., 2008). Πρόκειται για λεπτές αυτοκόλλητες «ταινίες» ηλιακών κυψελών που τοποθετούνται πάνω στην επιφάνεια του προστατευτικού κουτιού των κόμβων και συλλέγουν το ηλιακό φως και παράγουν ηλεκτρική ενέργεια για τη λειτουργία των κόμβων και κατ' επέκταση και των αισθητήρων.

Δεδομένου του συνολικού μήκους του αγωγού που μας ενδιαφέρει, πρέπει να εκτιμηθεί ο αριθμός των κόμβων ώστε να υπάρχει κάλυψη σε όλη την διαδρομή. Οι κόμβοι τοποθετούνται σε στρατηγικά σημεία ώστε να έχουν την ικανότητα να ανιχνεύουν ακόμα και πολύ μικρές διαφυγές σε πραγματικό χρόνο. Με τη βοήθεια αισθητήρων οι οποίοι καταγράφουν δεδομένα κάθε 20-30 δευτερόλεπτα, οι κόμβοι μεταφέρουν τα δεδομένα που συλλέγουν στο συντονιστή μέσω του Zigbee και στη συνέχεια στο σταθμό βάσης.

Κάθε κόμβος συλλέγει δεδομένα για τις συνθήκες περιβάλλοντος σχετικά με τη θερμοκρασία, την υγρασία και τις συγκεντρώσεις μεθανίου στην ατμόσφαιρα. Η υψηλή ευαισθησία και η απόκριση (ms) επιτυγχάνεται με τη χρήση βιοαισθητήρα που συνδυάζει μηχανισμούς φυσικής αναγνώρισης (βιολογικά στοιχεία ή βιολογικά συστήματα) με χημικούς μεταλλάκτες (Siontorou et al., 1997).

Προτείνεται ο αισθητήρας Winsen MQ4 ο οποίος χρησιμοποιείται για την ανίχνευση μεθανίου στην ατμόσφαιρα. Διακρίνεται για την υψηλή ακρίβεια και ευαισθησία σε μικρές συγκεντρώσεις, την επιλεκτικότητα στην ανίχνευση, αποφεύγοντας τα σφάλματα και τις αποκλίσεις. Επίσης, χαρακτηρίζεται από τη στιγμιαία ανταπόκριση (ms), τη μεγάλη ακτίνα δράσης και τη μακροχρόνια διάρκεια λειτουργίας.



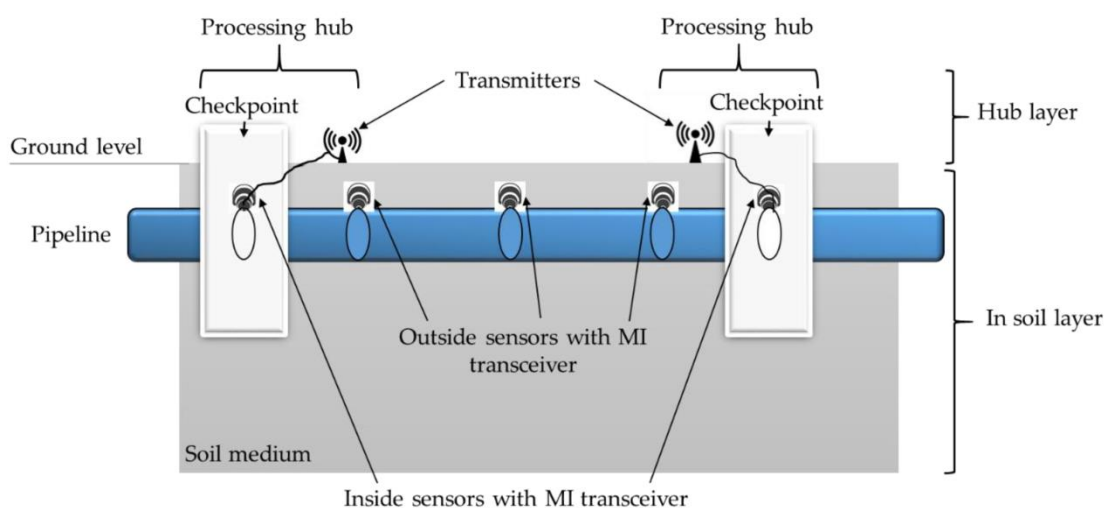
Εικόνα 168: Ο αισθητήρας Winsen MQ4

Για την εφαρμογή προτείνεται η τοποθέτηση τριών (3) αισθητήρων εντοπισμού μεθανίου σε κάθε κόμβο. Αυτοί λειτουργούν ως εξής: Οι τρεις ίδιοι αισθητήρες βρίσκονται σε συστοιχία με τους δύο πρώτους να είναι σε διαρκή λειτουργία και ο τρίτος απενεργοποιημένος (sleep mode). Ο πρώτος αισθητήρας ανίχνευσης και μέτρησης εκπέμπει μία ειδοποίηση όταν η συγκέντρωση του μεθανίου στην ατμόσφαιρα είναι μεγαλύτερη από συγκεκριμένη ποσότητα που έχει προκαθοριστεί για κάθε περιοχή και μετράται σε ppm. Ο δεύτερος, είναι συνεχώς ενεργοποιημένος, τόσο για να υπάρχει κάλυψη σε περίπτωση δυσλειτουργίας του πρώτου αισθητήρα όσο και για να επιβεβαιώσει την ειδοποίηση που λαμβάνει για υπέρβαση των επιτρεπτών ορίων μεθανίου. Ο τρίτος αισθητήρας, ενεργοποιείται στιγμιαία μόνο στην περίπτωση όπου και ο δεύτερος εκπέμπει κάποιο σήμα (alarm). Σε αυτή την περίπτωση, είναι αυτός που στέλνει δεδομένα στον σταθμό βάσης ώστε να ληφθούν τα απαραίτητα μέτρα απο το υπεύθυνο προσωπικό. Στη συνέχεια, μπαίνει πάλι σε sleep mode.

Με τον τρόπο αυτό παρέχεται κάλυψη σε όλη την περιοχή, ενώ περιορίζεται σε μεγάλο βαθμό η κατανάλωση ενέργειας και αποφεύγονται οι λανθασμένοι συναγερμοί στο σύστημα. Έτσι, το σύστημα μπορεί να χαρακτηριστεί ως αξιόπιστο και ταυτόχρονα να αυξάνει το χρόνο λειτουργίας του.

Για τους αισθητήρες που τοποθετούνται στα τμήματα του αγωγού που είναι θαμμένα, προτείνεται η τεχνική MISE-PIPE η οποία αναλύεται στη δημοσίευση “*MISE-PIPE: Magnetic induction-based wireless sensor networks for underground pipeline monitoring*, Zhi Sun, Pu Wang, Mehmet C. Vuran, Mznah A. Al-Rodhaan, Abdullah M. Al-Dhelaan b, Ian F. Akyildiz, 2010” καθώς η ανάπτυξη αισθητήρων που περιγράφηκε παραπάνω είναι δύσκολο να εφαρμοστεί στην περίπτωση τους.

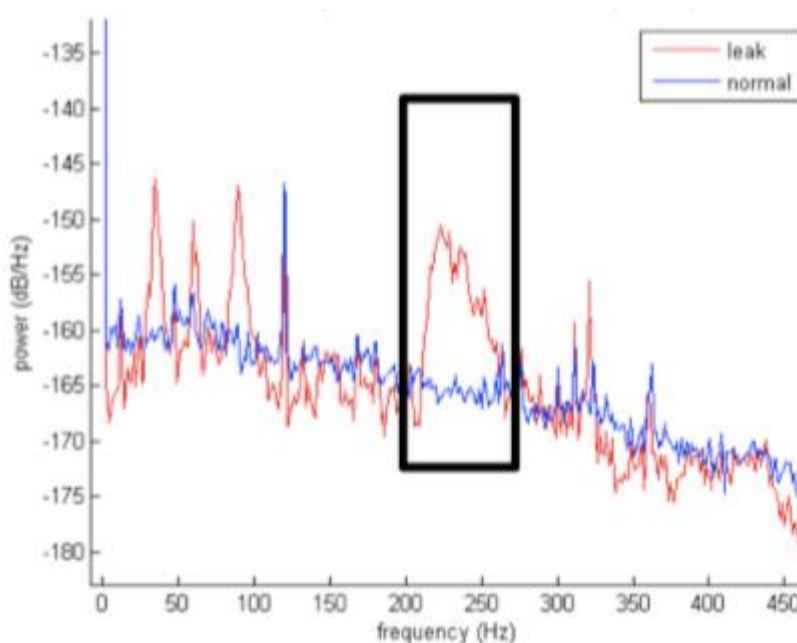
Η συγκεκριμένη τεχνική αποσκοπεί στην ανίχνευση, τον εντοπισμό και την ποσοτικοποίηση των διαρροών σε ένα σύστημα αγωγών μεταφοράς υδρογονανθράκων. Το MISE-PIPE (Magnetic Induction, MI) όπως περιγράφηκε καις το κεφάλαιο 4, αποτελείται από δύο τύπους αισθητήρων, αυτούς που βρίσκονται εντός του αγωγού και αυτούς που βρίσκονται εκτός. Οι αισθητήρες οι οποίοι βρίσκονται μέσα στον αγωγό, μετρούν την πίεση και την ταχύτητα ροής του αερίου και τοποθετούνται συνήθως σε σημεία ελέγχου ή σε σταθμούς αντλιών. Οι αισθητήρες οι οποίοι βρίσκονται εξωτερικά των υπόγειων τμημάτων του αγωγού, είναι διαφορετικοί καθώς μετρούν τη θερμοκρασία, την υγρασία και τα χαρακτηριστικά του εδάφους όπως τις συγκεντρώσεις μεθανίου.



Εικόνα 19: Αρχιτεκτονική συστήματος ενός ΑΔΑ με βάση τη μαγνητική επαγωγή για την παρακολούθηση υπόγειων αγωγών MISE-PIPE
(Πηγή: Haibat et al., 2019)

Οι κόμβοι εσωτερικού και εξωτερικού χώρου έχουν ενσωματωμένο σύστημα εντοπισμού του στίγματός τους (GPS) όπως αυτοί που χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση των επίγειων τμημάτων.

Συντονίζοντας αυτούς τους δύο τύπους αισθητήρων και τις μετρήσεις τους οι οποίες λειτουργούν συμπληρωματικά η μια για την άλλη, το MISE-PIPE παρέχει έγκαιρη και έγκυρη ανίχνευση κάποιας διαρροής καθώς και μακροχρόνια διάρκεια του συστήματος. Οι μετρήσεις που λαμβάνονται από τους εξωτερικούς αισθητήρες μεταδίδονται ασύρματα χρησιμοποιώντας τη μέθοδο της μαγνητικής επαγωγής από κόμβο σε κόμβο όπως περιγράφηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο. Τέλος, μέσω του ασύρματου δικτύου όλα τα δεδομένα καταλήγουν σε πραγματικό χρόνο σε ένα κέντρο διαχείρισης. Σημειώνεται πως η επικοινωνία η οποία στηρίζεται στη μαγνητική επαγωγή, προσφέρει ασφάλεια για τη διάδοση του σήματος καθώς δεν επηρεάζεται σε σημαντικό βαθμό από τις αλλαγές των ιδιοτήτων του εδάφους (Wang et al.2010, Sun et al.,2010).



Διάγραμμα 13: Μια διαρροή εκδηλώνεται ως πρόσθετη ενέργεια σε ορισμένες ζώνες συχνοτήτων (Πηγή: Stoianov et al., 2007)

Για την επίτευξη υψηλότερης αξιοπιστίας του συστήματος για την ανίχνευση διαφυγών, συνίσταται η χρήση και ενός τρίτου κόμβου/αισθητήρα τύπου Xbee-Pro ο οποίος είναι εγκατεστημένος στην επιφάνεια του εδάφους σε σημείο ακριβώς πάνω από τους υπόγειους κόμβους και επικοινωνεί ασύρματα με τους υπόλοιπους επίγειους κόμβους μέσω του πρωτοκόλλου IEEE 802.15.4 (Sun et al., 2009).

Όσον αφορά την αξιόπιστη ικανότητα ανίχνευσης των αισθητήρων που επιλέχθηκαν, αυτή εξαρτάται από την ποιότητα των εξαρτημάτων τους, την έγκυρη και έγκαιρη τεχνική επεξεργασίας όπως επίσης και από την αντοχή τους σε αντίξοες καιρικές συνθήκες.

6.6 Ασύρματη επικοινωνία δικτύου παρακολούθησης: πρωτόκολλο ZIGBEE

Το ΑΔΑ χρησιμοποιεί τη ραδιοεπικοινωνία για τη μετάδοση αισθητηριακών σημάτων μεταξύ των συστημάτων που στελεχώνονται από αισθητήριους κόμβους και σταθμούς βάσης. Αυτοί με τη σειρά τους συνδέονται με έναν κεντρικό σταθμό που θεωρείται ως το κέντρο ελέγχου όλου του δικτύου.

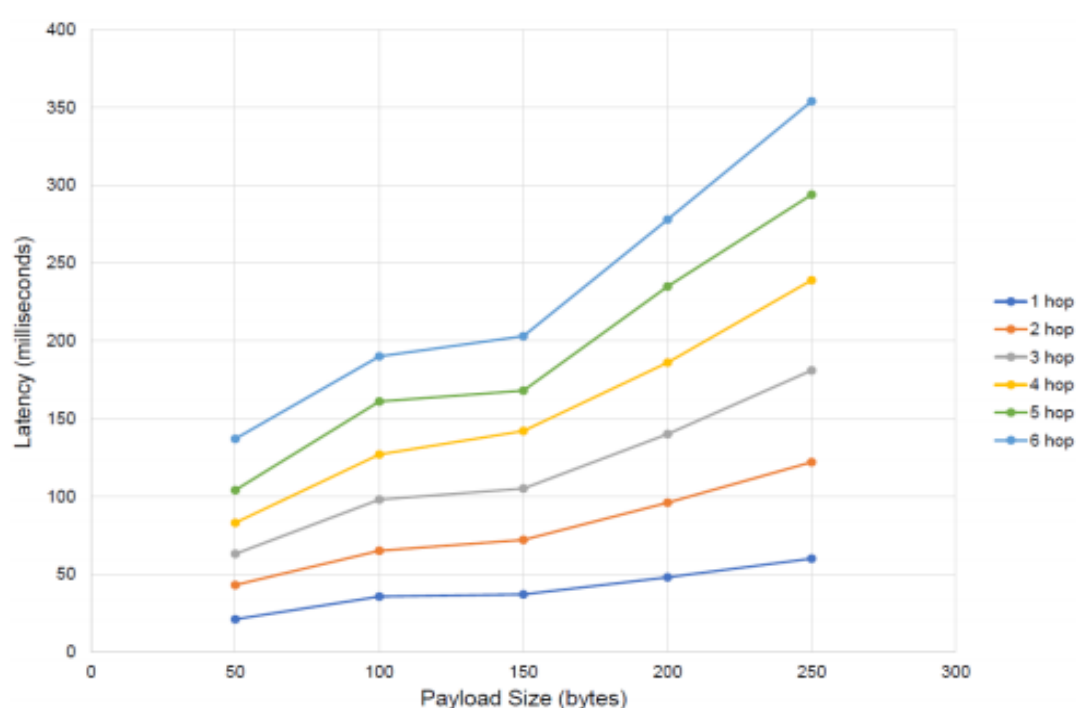
Υπάρχουν δύο τύποι επικοινωνίας εντός του ΑΔΑ: Πρώτον, η *επικοινωνία εφαρμογής* η οποία σχετίζεται με την ανίχνευση του φαινομένου στην περιοχή παρατήρησης και την αξιόπιστη παράδοση των καταγεγραμμένων δεδομένων στον κόμβο-καταβόθρα. Η αξιοπιστία της επικοινωνίας εφαρμογής (application communication reliability, ACR) αφορά την ικανότητα επικοινωνίας των αισθητήρων. Ο δεύτερος τύπος επικοινωνίας είναι η *επικοινωνία υποδομής* η οποία αφορά τα δεδομένα ελέγχου, διαμόρφωσης και συντήρησης. Η αξιοπιστία της επικοινωνίας υποδομής (infrastructure communication reliability, ICR) απαιτεί ότι ο κόμβος-καταβόθρα μπορεί να βρίσκεται σε επαφή με τους κόμβους-αισθητήρες για τη ρύθμιση του δικτύου, την αναδιάταξη και άλλα ζητήματα που αφορούν το δίκτυο. (Pall, 2018)

Για την παρακολούθηση του δικτύου προτιμήθηκε η χρήση του πρωτοκόλλου επικοινωνίας Zigbee Pro το οποίο προσφέρει τη δυνατότητα για μετάδοση δεδομένων σε μεγάλες αποστάσεις με τη βοήθεια ενδιάμεσων συσκευών. Η εμβέλεια του συγκεκριμένου προτύπου ασύρματης δικτύωσης έχει ως τυπική απόσταση κάλυψης τα 10 έως τα 1500 μέτρα, ανάλογα την έκδοση του κάθε προτύπου, την ισχύ του συστήματος και τα περιβαλλοντικά χαρακτηριστικά του τόπου εφαρμογής. Είναι ένα πρότυπο ιδανικό για την ευελιξία και την επεκτασιμότητα του δικτύου και λειτουργεί ομαλά ακόμα και σε ακραίες συνθήκες. Για τη λειτουργία του ορίζονται δύο συσκευές: ο συντονιστής Zigbee (Zigbee Coordinator, ZC) και ο δρομολογητής Zigbee (Zigbee Router, ZR). (Sheltami et al., 2016)

Το Zigbee βασίζεται στη σειρά τεχνικών προτύπων IEEE 802.15.4 που προτείνονται για την παρακολούθηση και τον έλεγχο από απόσταση για εφαρμογές δικτύου που στηρίζονται σε αισθητήρες. Το πρότυπο αυτό λειτουργεί στις ζώνες συχνοτήτων/ραδιοσυχνοτήτων των 2,4 GHz με ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων που κυμαίνονται στα 250 kilobits/second. Για την εφαρμογή προτείνονται οι υψηλές ζώνες συχνοτήτων. (Suárez Barón, 2013)

Το Zigbee εμφανίζει λιγότερα προβλήματα συμφόρησης συγκριτικά με άλλα πρωτόκολλα, δεν είναι επιρρεπές σε παρεμβολές, διατηρεί χαμηλό και σταθερό ρυθμό μεταφοράς δεδομένων και διακρίνεται για τη μεγάλη διάρκεια ζωής λόγω της χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας. Επομένως έχει την ικανότητα να ελαχιστοποιεί την κατανάλωση ενέργειας προσφέροντας ευελιξία, ασφάλεια και αξιοπιστία στο δίκτυο. Χαρακτηρίζεται από την γρήγορη και επιτυχημένη αποστολή και μεταφορά δεδομένων μεταξύ των κόμβων και του σταθμού βάσης. Επίσης, το χαμηλό κόστος επιτρέπει στη συγκεκριμένη τεχνολογία να αναπτυχθεί ευρέως σε εφαρμογές παρακολούθησης αγωγών μεγάλων αποστάσεων.

Υποστηρίζει την ανάπτυξη τοπολογίας πλέγματος για το δίκτυο (Tafa et al., 2018), όπως προτείνεται και στην παρούσα εργασία.



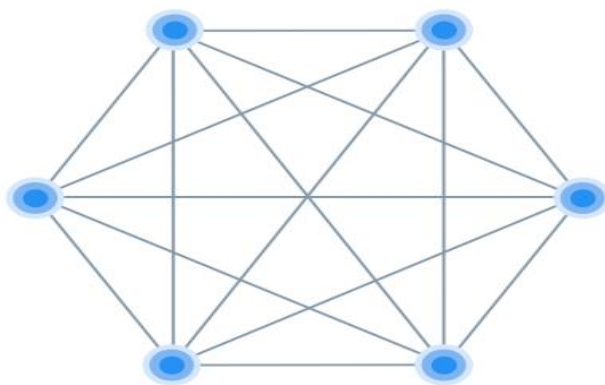
Διάγραμμα 14: Διάρκεια καθυστέρησης ανάλογα το μέγεθος του πακέτου στο πρωτόκολλο Zigbee (Πηγή:AN1138: Zigbee Mesh Network Performance)

6.7 Τοπολογία πλέγματος (mesh)

Μετά την ανάπτυξη των κόμβων και την επιλογή του πρωτοκόλλου επικοινωνίας, πρέπει να καθοριστεί η τοπολογία του δικτύου και να εκτιμηθεί η βέλτιστη στρατηγική δρομολόγησης δεδομένων σε ένα κεντρικό σημείο συλλογής. Μια ευνοϊκή τοπολογία για το δίκτυο συνεπάγεται ένα αξιόπιστο σύστημα με λιγότερη απώλεια πακέτων που δεν εμφανίζει καθυστερήσεις στη μεταφορά και δεν οδηγείται σε λανθάνουσες καταστάσεις.

Για την εφαρμογή προτιμήθηκε η τοπολογία πλέγματος (mesh) κατά την οποία ο κάθε κόμβος όχι μόνο παραλαμβάνει και διαδίδει τα δεδομένα αλλά συνεργάζεται και με τους υπόλοιπους κόμβους. Έτσι, λειτουργεί σαν συνδετικός κρίκος για να υπάρξει συνολική μεταφορά δεδομένων στο δίκτυο. Ο σχεδιασμός του δικτύου επιτυγχάνεται με την καθορισμένη δρομολόγηση κατά την οποία έχει προκαθοριστεί το μονοπάτι (path) το

οποίο θα ακολουθήσουν τα δεδομένα. Επίσης, για να φτάσουν στον τελικό προορισμό – στον κόμβο καταβόθρα ή στο σταθμό βάσης ανάλογα το σημείο της συνδεσμολογίας- ίσως χρειαστεί να περάσουν από άλλους κόμβους κάνοντας μικρά άλματα (hops). Σε αυτή την τεχνική λειτουργούν διαρκώς αλγόριθμοι που διορθώνουν τη λειτουργία του δικτύου σε περίπτωση που καταστραφεί η επικοινωνία κάποιου κόμβου ή κάποιο μονοπάτι. Ένα τέτοιο δίκτυο έχει ανθεκτικότητα στην επικοινωνία αλλά εμφανίζει υψηλότερη κατανάλωση ενέργειας όταν πρέπει να δημιουργήσει μια εναλλακτική διαδρομή για την αποστολή πακέτων δεδομένων (Chandanapalli et al. 2014, Shen et al. 2013, Zinonos et al. 2014).



Εικόνα 20: Τοπολογία πλέγματος

6.8 Ροόμετρα

Οι αλλαγές πίεσης και η μη σταθερή ροή του αερίου εντός του αγωγού, αποτελούν ένδειξη δυσλειτουργίας ή κάποιας διαρροής που πιθανόν έχει εμφανιστεί. Για το λόγο αυτό, πέραν των μετρητικών σταθμών της πίεσης και των ασυρμάτων αισθητήρων για την ανίχνευση διαρροών, ένα επιπλέον μέτρο που προτείνεται και ενισχύει την αξιοπιστία του συστήματος είναι η χρήση ροομέτρων.

Αυτά τοποθετούνται στα υπόγεια τμήματα του αγωγού, σε σταθερές θέσεις και σε συγκεκριμένα μήκη, στα σημεία όπου ενώνονται τμήματα του αγωγού. Καταμετρούν

διαρκώς την πίεση χωρίς να επηρεάζουν τη ροή του αερίου και να διαταράσσουν τη λειτουργία του δικτύου.

Τα ροόμετρα διαθέτουν αισθητήρες πίεσης που μετρούν τη διάδοση πίεσης κύματος και το καθένα, ανάλογα με το σημείο που είναι εγκατεστημένο, έχει ρυθμιστεί ώστε να δέχεται συγκεκριμένα όρια τιμών.

Στην παρούσα εργασία προτείνεται ο μετρητής ροής CIDRA SONARtrac ο οποίος διαθέτει οθόνη που αναγράφει την τιμή της πίεσης και μπορεί να συνδεθεί με το σταθμό βάσης για τη μεταφορά δεδομένων. Πρόκειται για έναν παθητικό μετρητή ροής που παρέχει ακριβείς και αξιόπιστες μετρήσεις χωρίς να απαιτείται συχνή συντήρηση λόγω της αντοχής τους σε αντίξοες συνθήκες.



Εικόνα 21: Το ροόμετρο SONARtrac Model VF/GVF-100 της εταιρίας CIDRA
(Πηγή: <http://cloudseven.azurewebsites.net/cidra/Sonartrac.aspx>)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία έγινε προσπάθεια να παρουσιαστεί και να εξεταστεί ποιοτικά η αξιοπιστία ενός μετεωρολογικού δικτύου για την παρακολούθηση διαφυγών σε ένα σύστημα μεταφοράς φυσικού αερίου.

Αρχικά, επισημαίνεται πως οι αγωγοί αποτελούν έναν από τους πιο πρακτικούς και αποδοτικούς τρόπους για τη μεταφορά μεγάλων όγκων αερίων από τους τόπους εξόρυξης μέχρι τους τελικούς καταναλωτές διανύοντας μεγάλες αποστάσεις. Ο σχεδιασμός ενός δικτύου μεταφοράς στο σύνολό του πραγματοποιείται ακολουθώντας καθορισμένα βήματα, πρότυπα και τεχνικές. Τα κυριότερα μέρη ενός συστήματος αγωγών πρέπει να συντηρούνται κατάλληλα και να παρακολουθούνται διαρκώς ώστε να εξασφαλίζεται η ορθή και αξιόπιστη λειτουργία του συστήματος.

Όλο και περισσότερα δίκτυα αγωγών αναπτύσσονται τις τελευταίες δεκαετίες, επιβάλλοντας ταυτόχρονα και την ανάπτυξη των δικτύων παρακολούθησης για την αποφυγή των κινδύνων και τη μείωση των απωλειών. Οι διαφυγές του αερίου εκτός του αγωγού αποτελούν το σημαντικότερο ζήτημα και για το λόγο αυτό έχει αναπτυχθεί πλήθος συστημάτων ανίχνευσης διαρροών, τεχνικές παρακολούθησης και συστήματα διαχείρισης της ασφάλειας.

Τα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων (ΑΔΑ) αποτελούν έναν αξιόπιστο τρόπο παρακολούθησης για ένα σύστημα αγωγών που μεταφέρει φυσικό αέριο. Αυτά εμφανίζουν το πλεονέκτημα ότι αναπτύσσονται σε δυσπρόσιτα μέρη, δεν απαιτείται η φυσική παρουσία ανθρώπου για τη λειτουργία τους, έχουν αντοχή σε αντίξοες συνθήκες και δεν απαιτούν υψηλή κατανάλωση ενέργειας. Επίσης, εμφανίζουν γρήγορη απόκριση και μεγάλο χρόνο ζωής με αποτέλεσμα να έχουν ομαλή λειτουργία και να χαρακτηρίζονται ως αξιόπιστα για τον εντοπισμό συγκεντρώσεων μεθανίου στην ατμόσφαιρα. Ωστόσο, ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στην επιλογή των εξαρτημάτων που αποτελούν ένα ΑΔΑ. Ειδικότερα, οι κόμβοι πρέπει να είναι συσκευές χαμηλής κατανάλωσης, να έχουν ικανότητες επεξεργασίας και αποθήκευσης δεδομένων καθώς επίσης και σχετικά μεγάλη μνήμη. Ένα επιπλέον στοιχείο που συμβάλλει στην αξιοπιστία του συστήματος είναι οι αισθητήρες. Αυτοί είναι πολύ σημαντικό να χαρακτηρίζονται από ακρίβεια, υψηλή διακριτική ικανότητα και ευαισθησία.

Τέλος, γίνεται παρουσίαση ενός συστήματος που χρησιμοποιείται για την αξιόπιστη παρακολούθηση διαρροών ενός αγωγού που διανύει εκατοντάδες χιλιόμετρα στο ηπειρωτικό μέρος της χώρας, χωρίς να λαμβάνονται υπόψη περιορισμοί για το κόστος εγκατάστασης. Το ΑΔΑ που αναπτύσσεται είναι ομοιογενές και αποτελείται από κόμβους οι οποίοι διαθέτουν ενσωματωμένους αισθητήρες ανίχνευσης και μέτρησης ποσοτήτων μεθανίου καθώς και GPS. Στην εργασία προτείνεται ο κόμβος Xbee-Pro (S2C) και το μοντέλο αισθητήρα Winsen MQ4. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στην επιλογή της τοπολογίας του δικτύου, του πρωτοκόλλου επικοινωνίας και της ασύρματης σύνδεσης.

Στα τμήματα του αγωγού που βρίσκονται πάνω από το έδαφος τοποθετούνται κόμβοι σε σταθερά σημεία και ο καθένας περιλαμβάνει τρεις αισθητήρες για τους οποίους έχουν οριστεί συγκεκριμένα όρια αποδοχής μεθανίου ανάλογα την περιοχή που βρίσκονται. Οι δύο αισθητήρες είναι διαρκώς σε λειτουργία και ο τρίτος (sleep mode) ενεργοποιείται όποτε λαμβάνει ειδοποίηση από το σύστημα. Για τα τμήματα του αγωγού που είναι θαμμένα, προτείνεται η τεχνική MISE-PIPE στα υπόγεια κομμάτια και η τοποθέτηση ενός τρίτου αισθητήρα πάνω στο έδαφος. Για την εξασφάλιση ακόμα μεγαλύτερης αξιοπιστίας, συνίσταται η εγκατάσταση ροομέτρων εσωτερικά του αγωγού στα υπόγεια τμήματα χωρίς να επηρεάζουν τη λειτουργία του συστήματος.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΕΛΛΗΝΟΓΛΩΣΣΗ

Κίκιρας, Π. (2008)., *Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων :Αρχιτεκτονική κόμβων και δικτύων*

Λέφας, Κ. (2004)., *Εισαγωγή στην τεχνολογία του φυσικού αερίου, Εκδ.ΣΕΛΚΑ-4Μ, Αθήνα*

Παπανίκας Δ. (1997), *Τεχνολογία Φυσικού Αερίου, Τόμος Ι : θεωρία, ιδιότητες, χρήση, μεταφορά, διανομή, αποθήκευση, μηχανές, συσκευές, εγκαταστάσεις, ορολογία, κανονισμοί,*

Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας (2019), *Οι χρήσεις του φυσικού αερίου και τα πλεονεκτήματά του*

Σπανίδης Φ. (2018),*Περιβαλλοντικά Συστήματα και Τεχνολογίες Φυσικού Αερίου*

ΞΕΝΟΓΛΩΣΣΗ

Aamo, O., Salvesen, J., Foss, B. (2006), *Observer design using boundary injections for pipeline monitoring and leak detection.* In: Proc. IFAC Symp. Adv. Control Chem. Process. pp. 2–5.

Akyildiz I., Su W., Sankarasubramaniam Y., E. Cayirci, (2002), *A survey on Sensor Networks,* IEEE Communications Magazine, vol. 40, Issue: 8, pp. 102-114

Al-Obaisat Y., Braun R. (2007), *On Wireless Sensor Networks: Architectures, Protocols, Applications, and Management*

Akyildiz I., Melodia T., Chowdhury K.(2006), *A survey on wireless multimedia sensor networks,*

American Society of Mechanical Engineers (2012), *Pipeline Transportation Systems for Liquids and Slurries*

Baccour N, Koubaa A, Mottola L, Zuniga M, Youssef H, Boano C, Alves A (2012)., *Radio link quality estimation in wireless sensor networks: a survey,* ACM Trans. on Sensor Networks 8 doi:10.1145/2240116.2240123

Chandanapalli, S. B., Reddy, E. S., Lakshmi, D. R. (2014). *Design and deployment of aqua monitoring system using wireless sensor networks and IAR-kick.* Journal of Aquaculture Research & Development, 5(7)

- Christodoulou S., Agathokleus A., Kounoudes A., Milis M. (2010). *Wireless sensor networks for water loss detection*, *European Water* 30:41-48,
- CCPS (1995), *Guidelines for Chemical Transportation Risk Analysis*, AIChE
- Cordell J., Vanzant H. (2003)., *Pipeline Pigging Handbook*, third ed., Clarion Technical Publishers,
- Dâmaso A., Rosa N., Maciel P. (2014), *Reliability of Wireless Sensor Networks*
- Deaves D.M (1992), *J. Loss Prevention Process Ind.* 5:219
- Dilmaghani R., Bobarshad H., Ghavami M., Choobkar S., Wolfe C. (2011.), *Wireless sensor networks for monitoring physiological signals of multiple patients*, *Biomedical Circuits and Systems*, IEEE Transactions on, vol. 5, no. 4, pp. 347–356,
- Deif D., Gadallah Y. (2017), *A comprehensive wireless sensor network reliability metric for critical Internet of Things applications*
- EGIG (2008.), *Gas Pipeline Incidents*. Tech. rep., European Gas Pipeline Incident Data Group, 7th EGIG-report 1970-2007
- EGIG *Gas Pipeline Incidents* (2015), 9th Report of the European Gas Pipeline Incident Data Group (period 1970–2013), Doc. Number EGIG 14.R.0403
- Fingas M.F. (2004), *Modeling evaporation using models that are not boundary-layer regulated*, *J. Hazard. Mater.* 107
- Folga S.M. (2007), *Natural gas pipeline technology overview*, Argon National Laboratory,
- Geiger, G., Werner, T., Matko, D. (2003). *Leak detection and locating-a survey*. In: *PSIG Annual Meeting*
- Gilmour T. (2019), *Pipeline leak detection: Tackling the uncertainties*
- Gonzalez R., Acosta M. (2010), *Evaluating the impact of acknowledgment strategies on message delivery rate in wireless sensor networks*
- Haibat A., Choi J. (2019), *A Review of Underground Pipeline Leakage and Sinkhole Monitoring Methods Based on Wireless Sensor Networking*
- Jin O., Lin H, Zhang Z, Zhang X. (2008), *Estimating the reliability and lifetime of wireless sensor network*, in Proceedings of Int. Conf. on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (WiCOM), China
- Jo Y.D & Ahn B.J (2002), *Analysis of hazard areas associated with high-pressure natural-gas pipelines*. *J. Loss Prevention Process Ind.* 15:179

- Kabashkin I, Kundler J. (2016), *Reliability of Sensor Nodes in Wireless Sensor Networks of Cyber Physical Systems*
- Koushanfar F, Potkonjak M, Sangiovanni-Vecentelli (2005), A, *Fault-tolerance in wireless sensor networks, in handbook of sensor networks*, 1st edn., ed. by M Ilyas, E Mahgoub (CRC Press, Boca Raton
- Klein W.R. (1993), *Acoustic leak detection*, American Society of Mechanical Engineers, Petrol. Div. 55 57–61.
- Kuo W, Zuo MJ, *Optimal reliability modeling: principles and applications*, 1st edn. (John Wiley, Hoboken, 2003), pp. 85–102
- Mahmood M., Seah W., Welch I. (2014), *Reliability in Wireless Sensor Networks: A Survey and Challenges Ahead*, Computer Networks
- Mahmood A., Winston K., Welch I. (2017), *Reliability in wireless sensor networks: a survey and challenges ahead*. Comput. Netw. 79, 166
- Mokhatab S. (2009). *Fundamentals of Gas Pipeline Metering Stations*, vol. 236, no. 1. Tehran Raymand Consulting Engineers/Greg Lamberson International Construction Consulting, LLC, Iran/Tulsa, OK USA
- Murway P.-S., Silea I. (2012), A survey on gas leak detection and localization techniques
- Okken.P.A (1990), *Methane leakage from natural gas*
- Pall.M(2018), *Wi-Fi is an important threat to human health*
- Park S.-J., Vedantham R., Sivakumar R., Akyildiz I. (2004), *A scalable approach for reliable downstream data delivery in wireless sensor networks*
- Rizzo L. (1997), *Effective erasure codes for reliable computer communication protocols*
- Rios-Mercado Roger Z., Conrado Borraz-Sanchez, (2014), *Optimization problems in natural gas transportation systems: A state-of-the-art review*
- Ruiz L., Nogueira J., Loureiro A, (2003), *MANNA: A Management Architecture for Wireless Sensor Networks*, ” IEEE Communication Magazine, vol. 41, no. 2
- Salman Ali, Adnan Ashraf, Saad Bin Qaisar, Muhammad Kamran Afridi, Husnain Saeed, Sidra Rashid (2016), *A Wireless Sensor Network Monitoring Platform for Oil and Gas Pipelines*
- Sheltami Tarek , Bala Abubakar, Shakshuki Elhadi. (2016), *Wireless sensor networks for leak detection in pipelines: a survey*

Shen Z., Man K.L., Liang, H.-N., Zhang, N., Afolabi, D.O., Lim, E.G (2013), *Porting LooCI Components into Zigduino*, *Procedia Computer Science*, 17, pp. 579-582

Schobert, H. (2013). *Chemistry of Fossil Fuels and Biofuels*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.

Siontorou C.G., Batzias F.A., Spanidis P.M. (2010), *Designing a reliable leak bio-detection system for natural gas pipelines*

Siontorou C., Nikolelis D., Krull U., Chiang. K. (1997) *A triazine herbicide minisensor based on surface stabilized bilayer lipid membranes*, *Anal. Chem.* 69 3109–3114.

Stoianov Ivan, Nachman Lama, Madden, S. (2007), *PIPENET: A Wireless Sensor Network for Pipeline Monitoring*

Suárez Barón Juan Carlos(2013), *Application of Zigbee Technology for Monitoring Environmental Variables in Greenhouses*

Sun Z., Akyildiz I., (2009), *Underground wireless communication using magnetic induction*

Sun Z., Wang P., Vuran M., Al-Rodhaan M, Al-Dhehaan A.and Akyildiz I. (2010), *MISE-PIPE: Magnetic induction-based wireless sensor networks for underground pipeline monitoring*, *Ad Hoc Networks* 9 218–227

Sun Z., Akyildiz I. (2010), *Magnetic induction communications for wireless underground sensor networks*

Tafa Z , Ramadani F , Cakolli B, (2018) *The design of a ZigBee-based greenhouse monitoring system*

Tang X., Xu J. (2006), *Extending Network Lifetime for PrecisionConstrained Data Aggregation in Wireless Sensor Networks*,

Tariq AL-Kadi, Ziyad AL-Tuwaijri, Abdullah AL-Omran (2013), *Wireless Sensor Networks for Leakage Detection in Underground Pipelines: A Survey Paper*

Tian (1994), *Leak detection: a transient flow simulation approach*, *American Society of Mechanical Engineers, Petrol. Div.* 60

Towler B. (2014) *The Future of Energy*

Trincherro D., Stefanelli R.(2009), *Microwave architectures for wireless mobile monitoring networks inside water distribution conduits*. *Micr. Theory and Tech., IEEE Trans.on*, vol.57, no.12, pp.3298-3306, Dec.

Virkki J, Zhu Y, Meng Y, Chen L (2012). *Reliability of WSN hardware*, *Int. J. of Embedded Sys.* 1 doi:10.5121/ijesa.2011.1201

Wan J., Yu N., Feng R, Wu Y. (2012), *Hierarchical Leak Detection and Localization Method in Natural Gas Pipeline Monitoring Sensor Networks*

Wang P ,Sun Z., Vuran M., Al-Rodhaan, Al-Dhelaan A, Akyildiz, I (2010), *MISE-PIPE: Magnetic induction-based wireless sensor networks for underground pipeline monitoring*

Yick J, Mukherjee B, Ghosal D. (2008), *Wireless sensor network survey*

Yick J., Mukherjee B, Ghosal D. (2008), *Wireless sensor network survey*, *Computer Networks*, vol. 52, no. 12, pp. 2292-2330

Zhang L.-B., Qin C.-Y., Wang Z.-H, Liang W. (2009), *Designing a reliable leak detection system for west products pipeline*

Zhu C., Zheng C., Shu L., Han G. (2017), *A survey on coverage and connectivity issues in wireless sensor networks*. *Network and Computer Appl.* 35, 619

Zinonos Z., Chrysostomou, Vassiliou, V. (2014.), *Wireless Sensor Networks Mobility Management using Fuzzy Logic*, *Ad-Hoc Networks*, 16, pp. 7087,