



**Πανεπιστήμιο Μακεδονίας**

**University of Macedonia**

**ΔΠΜΣ Πληροφορικά Συστήματα**

**Master in Information Systems**

**Μάθημα: Δίκτυα Υπολογιστών**

**Course: Computer Networks**

**Καθηγητής Α.Α. Οικονομίδης**

**Professor A.A. Economides**

Εργασία:

**Ασύρματα δίκτυα αισθητήρων για παρακολούθηση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης.**

**Wireless sensor networks for air pollution monitoring.**



**Μεταπτυχιακός Φοιτητής: Μπέλης Αντώνιος**

**Θεσσαλονίκη, Μάιος 2019**

## Περίληψη

Το φαινόμενο της περιβαλλοντικής ρύπανσης αποτελεί καθημερινό θέμα συζήτησης. Η εργασία αυτή αναφέρεται στην παρακολούθηση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης μέσω των ασύρματων δικτύων αισθητήρων. Στην αρχή παρουσιάζονται οι αρχές σχεδιασμού που διέπουν αυτές τις συσκευές κάνοντας αναφορά σε δύο εταιρίες που παράγουν ασύρματους αισθητήρες, αναλύοντας τα τεχνικά χαρακτηριστικά και την αρχιτεκτονική τους. Στη συνέχεια γίνεται αναφορά σε πραγματικές περιπτώσεις όπου έγινε εφαρμογή τους. Επιπλέον παρουσιάζεται η ανάλυση SWOT των ασύρματων δικτύων περιβαλλοντικής παρακολούθησης. Τέλος γράφονται τα συμπεράσματα της εργασίας και παρατίθεται η βιβλιογραφία.

## Abstract

The phenomenon of environmental pollution is a daily topic of discussion. This paper refers to the monitoring of air pollution through wireless sensor networks. At first, the design principles governing these devices are presented by referring to two companies that produce wireless sensors, analyzing their technical characteristics and architecture. Then reference is made to real cases where they were applied. In addition, the SWOT analysis of wireless environmental monitoring networks is presented. Finally, the conclusions of the paper are written and the bibliography is presented.

## Εισαγωγή

*«Ατμοσφαιρική ρύπανση καλείται, η παρουσία στην ατμόσφαιρα κάθε είδους ουσιών, σε συγκέντρωση ή διάρκεια που μπορούν να προκαλέσουν αρνητικές επιπτώσεις στην υγεία, στους ζωντανούς οργανισμούς και στα οικοσυστήματα και γενικά να καταστήσουν το περιβάλλον ακατάλληλο για τις επιθυμητές χρήσεις του. Κάτω από ορισμένες συνθήκες, η ατμοσφαιρική ρύπανση μπορεί να φτάσει σε επίπεδα που μπορεί να δημιουργήσουν ανεπιθύμητες συνθήκες διαβίωσης.» (ypeka.gr)*

Η ατμοσφαιρική ρύπανση θεωρείται ως πολύ σοβαρό περιβαλλοντικό ζήτημα λόγω των τεράστιων επιπτώσεων που δημιουργεί στη δημόσια υγεία, το περιβάλλον και την οικονομία. Είναι αναγκαία λοιπόν η παρακολούθηση της περιβαλλοντικής ρύπανσης με την μέγιστη χρονική και χωρική ακρίβεια που δύναται να πραγματοποιηθεί. Μέχρι τώρα, οι συμβατικοί μέθοδοι παρακολούθησης που χρησιμοποιούσαμε δεν μπορούσαν να προσφέρουν τόσο μεγάλη ακρίβεια που χρειαζόμαστε. (Wei Ying, 2015)

Η τεχνολογική καινοτομία των WSNs έχει δημιουργήσει νέα είδη εφαρμογών οι οποίες οφελούν πολλά πεδία της καθημερινότητας μας. Ένα από τα πεδία εφαρμογών τους είναι η παρακολούθηση περιβαλλοντικών δεικτών με σκοπό τον έλεγχο της περιβαλλοντικής μόλυνσης. Ο έλεγχος και η παρακολούθηση των οικοτόπων μέσω σύγχρονων ψηφιακών εφαρμογών, αποτελεί ένα τεράστιο όφελος για τις επιστημονικές κοινότητες. (Raghavendra, Krishna, 2006)

Εξοπλίζοντας το περιβάλλον με πολυάριθμους αισθητήρες, είναι δυνατή η μακροχρόνια συλλογή δεδομένων μετρήσεων και αναλυτικών πληροφοριών σε κλίμακες και ανάλυση που είναι δύσκολο να αποκτηθούν με άλλο τρόπο.

Για να αναπτύξουμε ένα πυκνό δίκτυο αισθητήρων ικανό να καταγράφει, αποθηκεύει, και να μεταδίδει περιβαλλοντικά δεδομένα, πρέπει να δημιουργηθεί ένα ολοκληρωμένο σύστημα που αποτελείται από πρωτόκολλα επικοινωνίας, δειγματοληπτικούς μηχανισμούς και είναι ενεργειακά διαχειρίσιμο. Ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων επιτρέπει τον κάθε κόμβο να επικοινωνεί με άλλους και όλοι να ελέγχονται ταυτόχρονα. Δεν χρειάζονται καλώδια τροφοδοσίας ενέργειας και συνδέσεων. Ακόμα και τοποθεσίες που απαιτούν μακρόχρονες παρατηρήσεις για την ανίχνευση οποιασδήποτε περιβαλλοντικής επιδείνωσης, είναι δυνατόν να τις παρακολουθούμε συνδέοντας απλά έναν αισθητήρα. Το δίκτυο αισθητήρων, παρόλο που δεν απαιτεί ιδιαίτερη συντήρηση, συλλέγει αξιόπιστα δεδομένα. Αυτή η προηγμένη τεχνολογία βελτιστοποιεί την περιβαλλοντική ευημερία. Οι πιο σημαντικοί συντελεστές αυτής της τεχνολογίας είναι η δημιουργία ενός χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης αυτόνομου δικτύου. (Raghavendra, Krishna, 2006)

## Ανάλυση του WNS

Το ασύρματο δίκτυο αισθητήρων αποτελείται από ενσωματωμένους μικροαισθητήρες με μεγάλο βαθμού ευαισθησίας σε συγκεκριμένους ρύπους. Αυτοί οι μικροηλεκτρομηχανικοί αισθητήρες μπορούν να ενσωματωμαθούν σε έναν ασύρματο πομποδέκτη σε ένα πρότυπο συμπληρωματικό οξειδίο μετάλλου ημιαγωγού, παρέχοντας μια χαμηλού κόστους λύση στην παρακολούθηση βιοχημικών συντελεστών. (Edgar, Callaway, 2004)

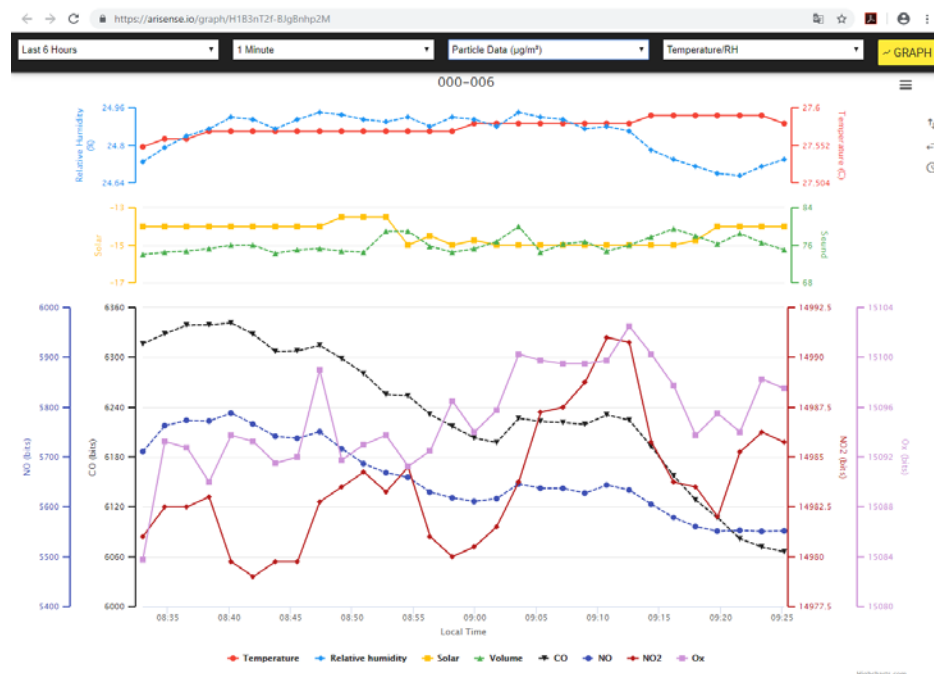
Είναι γνωστό ότι η περιβαλλοντική ρύπανση προκαλεί διάφορα ιατρικά προβλήματα στους κατοίκους μιας περιοχής. Ως εκ τούτου είναι επιτακτική η ανάγκη να παρακολουθούμε με ακρίβεια την ποιότητα του αέρα που αναπνέουμε, για την ύπαρξη τοξίνων και διάφορων επιβλαβών σωματιδίων. Αρκετές εταιρίες δραστηριοποιήθηκαν πάνω σε αυτό το ζήτημα, και δημιούργησαν προηγμένες τεχνολογικά ηλεκτρονικές συσκευές (αισθητήρες) που θα διευκολύνουν την παρακολούθηση της περιβαλλοντικής ρύπανσης. Μία τέτοια εταιρία είναι και η Particles Plus, Inc. ([sensorsmag.com](http://sensorsmag.com))

Η συσκευή αυτή περιέχει αισθητήρες που κάνουν ηλεκτροχημικές μετρήσεις ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Συγκεκριμένα μετράει τις τιμές των χημικών ενώσεων οξειδίο του αζώτου (NO), διοξειδίο του αζώτου (NO<sub>2</sub>), μονοοξειδίο του άνθρακα (CO) ολικό οξειδωτικό (O<sub>3</sub> + NO<sub>2</sub>) καθώς και αισθητήρα NDIR για τη μέτρηση του διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) που συγκεντρώνονται στον αέρα. Επιπλέον μετράει την ηχορύπανση και τον θόρυβο της περιοχής που είναι τοποθετημένη. Οι χρονικοί ρυθμοί των μετρήσεων καθορίζονται από τον χρήστη. Υπάρχει η δυνατότητα μετρήσεων ανά 5 δευτερόλεπτα. Τα δεδομένα που παράγουν οι αισθητήρες παρακολούθησης, αποθηκεύονται σε μια εσωτερική μονάδα αποθήκευσης, η οποία στην συνέχεια αποθηκεύεται και στο cloud στο διαδίκτυο όπου μπορεί να γίνει η συλλογή των δεδομένων από τους χρήστες. Η παρακολούθηση των δεδομένων σε πραγματικό χρόνο επιτρέπει την άμεση και γρήγορη γνώση οποιασδήποτε περιβαλλοντικής αλλαγής στις συγκεντρώσεις των τιμών των ατμοσφαιρικών ρύπων. Το μέγεθος κάθε συσκευής αισθητήρων είναι 21.8 cm x 13 cm x 21.8 cm, και ζυγίζει 2.3 kg. ([particlesplus.com](http://particlesplus.com))



Αισθητήρας παρακολούθησης ποιότητας αερά σε εξωτερικό χώρο της εταιρείας Particles Plus

Πηγή: <https://particlesplus.com/ambient-air-monitoring/>



Γραφική αναπαράσταση περιβαλλοντικών μετρήσεων σε πραγματικό χρόνο στο cloud Πηγή: <https://arisense.io/graph/H1B3nT2f-BJgBnhp2M>

Μια άλλη μεγάλη εταιρία που δραστηριοποιείται και αυτή στον τομέα αυτό, είναι η Libelium η οποία έχει έδρα στην Ισπανία. Συγκεκριμένα η συσκευή που σχεδιάστηκε για την παρακολούθηση της περιβαλλοντικής μόλυνσης έχει την δυνατότητα να μετράει τις τιμές των παρακάτω αερίων με εύρος :

Μονοξείδιο του άνθρακα CO (0-500 ppm)

Διοξείδιο του άνθρακα CO<sub>2</sub> ( 0-5000 ppm)

Μοριακό οξυγόνο O<sub>2</sub> (0-30%)

Όζον O<sub>3</sub> (0-18 ppm)

Νιτρικό οξείδιο NO (0-18 ppm)

Διοξείδιο του αζώτου NO<sub>2</sub> (0-20 ppm)

Διοξείδιο του θείου SO<sub>2</sub> (0-20 ppm)

Αμμωνία NH<sub>3</sub> (0-500 ppm)

Μεθάνιο και άλλα εύφλεκτα αέρια CH<sub>4</sub> (0-100% / LEL)

Μοριακό υδρογόνο H<sub>2</sub> (0-1000 ppm)

Θειούχο υδρογόνο H<sub>2</sub>S (0-100 ppm)

Χλωριούχο υδρογόνο HCl (0-50 ppm)

Κυανιούχο υδρογόνο HCN (0-50 ppm)

Φωσφίνη PH<sub>3</sub> (0-20 ppm)

Οξείδιο αιθυλενίου ETO (0-100 ppm)

Χλώριο Cl<sub>2</sub> (0-50 ppm)

([http://www.libelium.com/downloads/documentation/gases\\_sensor\\_board\\_pro.pdf](http://www.libelium.com/downloads/documentation/gases_sensor_board_pro.pdf))

## 802.15.4/ZigBee

Radio version	Frequency	Transmission power	Sensitivity	Range*
XBee-PRO 802.15.4 EU	2.4 GHz	10 dBm	-100 dBm	750 m
XBee-PRO 802.15.4	2.4 GHz	18 dBm	-100 dBm	1600 m
XBee-PRO DigiMesh	2.4 GHz	18 dBm	-100 dBm	1500 m
XBee-PRO ZigBee	2.4 GHz	17 dBm	-102 dBm	3200 m
XBee 868LP	863 - 870 MHz	14 dBm	-106 dBm	8.4 km
XBee-PRO 900HP US	902 - 928 MHz	24 dBm	-110 dBm	15.5 km
XBee-PRO 900HP BR	902 - 906.8 MHz 915.6 - 928 MHz	24 dBm	-110 dBm	15.5 km
XBee-PRO 900HP AU	915.6 - 928 MHz	24 dBm	-110 dBm	15.5 km

Πηγή: <http://www.libelium.com/development/waspmote/documentation/gases-pro-board-technical-guide/>

Η παραπάνω εικόνα παρουσιάζει τα πρωτόκολλα που χρησιμοποιεί η συσκευή των αισθητήρων για να επικοινωνεί με την συσκευή gateway.



Πηγή: <http://www.libelium.com/development/waspmote/documentation/gases-pro-board-technical-guide/>

Στο παραπάνω σχήμα απεικονίζεται η αρχιτεκτονική ολόκληρου του δικτύου. Παρατηρούμε ότι είναι παρόμοια με την αρχιτεκτονική των δικτύων της εταιρίας Particles Plus.

## ΜΕΛΕΤΕΣ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ

### Togliatti (Russia)



Συσκευή αισθητήρων περιβαλλοντικών μετρήσεων της εταιρίας Libelium

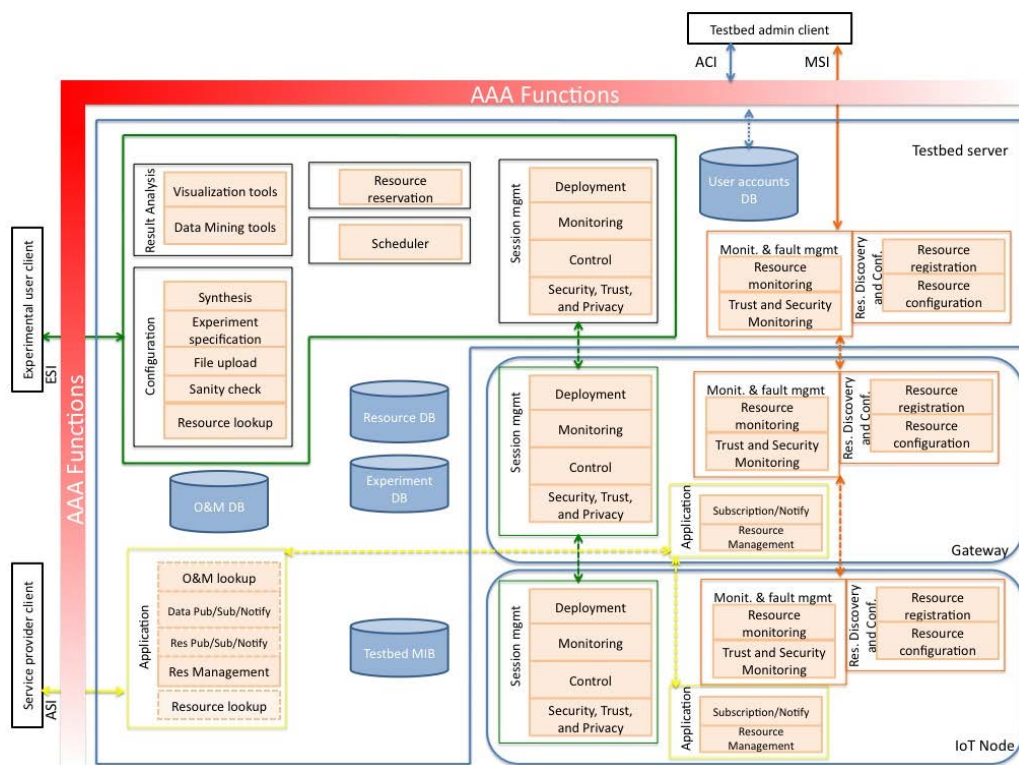
Πηγή: <http://www.smartsantander.eu/index.php/testbeds/item/132-santander-summary>

Στη πόλη Togliatti της Ρωσίας, στόχος ήταν η μείωση ποσοστών στο παιδικό άσθμα μέσω βελτίωσης της ποιότητας του αέρα. Για αυτόν τον λόγο το 2018 τοποθετήθηκαν δέκα δίκτυα ασύρματων συσκευών της εταιρίας Libelium σε κατοικημένες περιοχές της πόλης και πιο συγκεκριμένα κοντά σε (σχολεία, νοσοκομεία, παιδικά πάρκα). Η συχνότητα μετρήσεων γίνεται ανα δέκα λεπτά. (<http://www.libelium.com/preventing-asthma-sensor-network-air-quality-pm10-dust-in-play-area/>)

## Santander(Spain)

Στο πλαίσιο επίτευξης του στόχου της βιώσιμης αστικής ανάπτυξης σε αυτή τη μικρή πόλη της Ισπανίας, αναπτύχθηκε ασύρματο δίκτυο αισθητήρων που εκτός των άλλων εφαρμογών του χρησιμοποιήθηκε και για την παρακολούθηση της περιβαλλοντικής ρύπανσης. Συγκεκριμένα, 2000 συσκευές ασύρματων αισθητήρων που εγκαταστάθηκαν κυρίως στο κέντρο της πόλης, παρείχαν μετρήσεις πάνω σε διάφορες περιβαλλοντικές τιμές. Εδώ έχουμε δύο κατηγορίες, τις στατικές μετρήσεις από συσκευές σταθερά τοποθετημένες στο κέντρο της πόλης, και τις μη στατικές μετρήσεις, από συσκευές τοποθετημένες σε δημόσια και ιδιωτικά μέσα μεταφοράς (λεωφορεία, δημοτικά οχήματα, ταξί). (smartsantander.eu)

Σχετικά με την αρχιτεκτονική του παραπάνω δικτύου, οι εμπλεκόμενες συσκευές χωρίζονται στους IOT κόμβους, στους Gateway κόμβους και στους κόμβους Testbed server. Η αλληλεπίδραση στον τρόπο λειτουργίας όλων αυτών συσκευών απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα





Η αρχιτεκτονική του δικτύου ασύρματων αισθητήρων. Πηγή:  
<http://www.smartsantander.eu/index.php/testbeds/item/132-santander-summary>

Τα τρία στοιχεία που αποτελούν την υποδομή του δικτύου είναι οι IoT κόμβοι, οι repeaters και οι gateways.

**IoT κόμβοι:** Είναι υπεύθυνοι για την ανίχνευση των περιβαλλοντικών παραμέτρων και την μέτρηση τους. Οι περισσότεροι είναι ενσωματωμένοι στους αναμεταδότες (repeaters) εκτός από κάποιους που επικοινωνούν ασύρματα μαζί τους. Η επικοινωνία μεταξύ τους στηρίζεται στο IEEE 802.15.4 πρότυπο. Το συγκεκριμένο πρότυπο δεν είναι πολύπλοκο, έχει χαμηλού ρυθμού μετάδοση δεδομένων, είναι αξιόπιστο, και το βασικό χαρακτηριστικό του είναι η ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας. Το πρότυπο αυτό επιτρέπει την ασύρματη επικοινωνία των κόμβων μεταξύ τους.

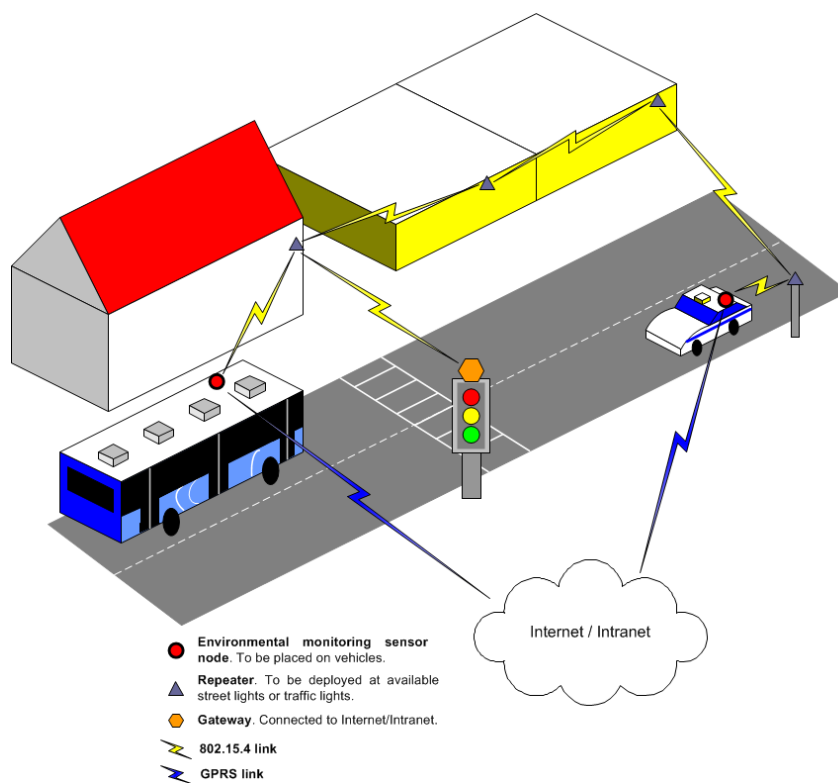
**Repeaters:** Είναι υπεύθυνοι για την μετάδοση και πρόωθηση των πληροφοριών που λαμβάνουν από τους αισθητήρες, προς τους κόμβους Gateways.

**Gateways:** Είναι υπεύθυνοι για την λήψη των δεδομένων από τους παραπάνω και πρόωθηση τους για αποθήκευση είτε σε κάποιο κεντρικό server είτε απευθείας στο διαδίκτυο για να μπορεί να έχει πρόσβαση ο κάθε ενδιαφερόμενος χρήστης.



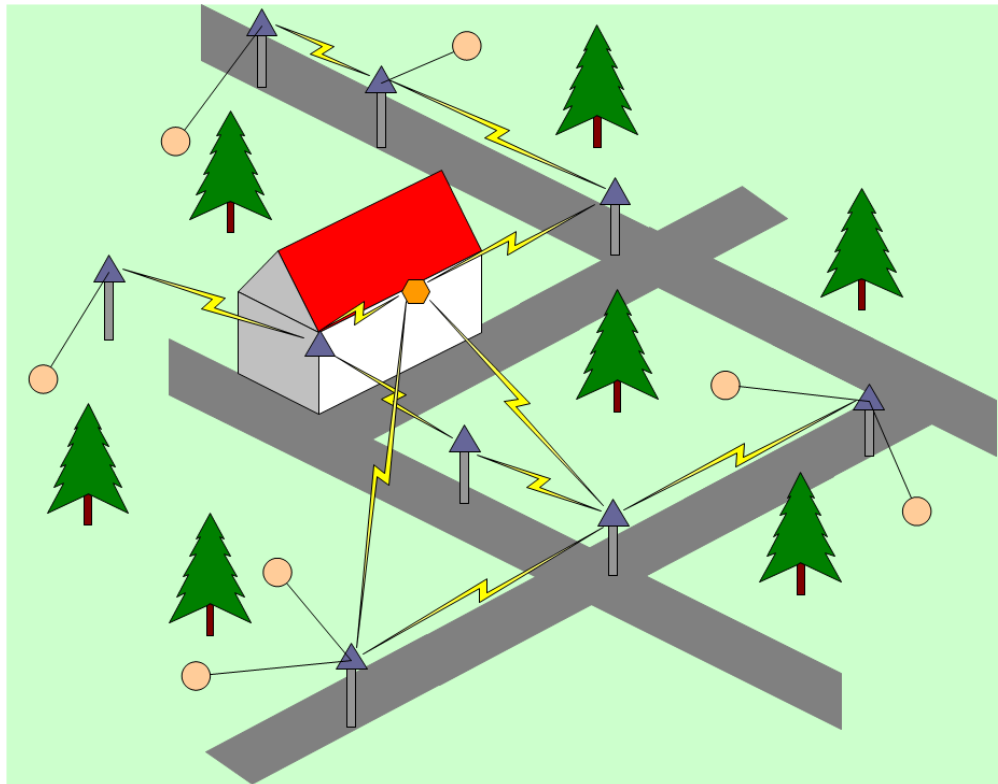
Gateways και IoT κόμβοι Πηγή:




<http://www.smartsantander.eu/index.php/testbeds/item/132-santander-summary>



Απεικόνιση της αρχιτεκτονικής του δικτύου (μη στατικές μετρήσεις) Πηγή:

<http://www.smartsantander.eu/index.php/testbeds/item/132-santander-summary>



-  **Park irrigation monitoring sensor.** To be deployed buried in the ground.
-  **Repeater.** To be deployed at available street lights or traffic lights.
-  **Gateway.** Connected to Internet/Intranet.

-  **Radio link**
-  **Wired link**

Απεικόνιση της αρχιτεκτονικής του δικτύου ( στατικές μετρήσεις) Πηγή:  
<http://www.smartsantander.eu/index.php/testbeds/item/132-santander-summary>

### **Bari (Ιταλία)**

Στο μπάρι εγκαταστάθηκε ένα δίκτυο αισθητήρων αποτελούμενο από έντεκα κόμβους (δέκα στατικούς και έναν κινητό πάνω σε δημοτικό λεωφορείο). Πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις με ηλεκτροχημικούς αισθητήρες αερίου χαμηλού κόστους (CO, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub>), με μετρητή οπτικών σωματιδίων (PM<sub>1.0</sub>, PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>), με αισθητήρα υπερύθρων NDIR (CO<sub>2</sub>), ανιχνευτή φωτο-ιονισμού (total VOCs), και μικροαισθητήρες για τη θερμοκρασία και τη σχετική υγρασία. Οι αισθητήρες-κόμβοι AIRBOX παρέχουν δεδομένα μετρήσεων ανά μία ώρα με δυνατότητα ρύθμισης ανά δεκαπέντε λεπτά. Οι αισθητήρες-κόμβοι στέλνουν δεδομένα σε έναν server βάση δεδομένων με το μόντεμ ραδιοσυστήματος (GPRS). (Penza, Suriano, Pfister, Prato, Cassano, 2017)

## SWOT ANALΥΣΗ

### Strengths:

- Χαμηλή κατανάλωση ενέργειας
- Ανεξάρτητο από δυσμενείς καιρικές συνθήκες
- Μπορεί να διαχειρίζεται από έναν απομακρυσμένο κεντρικό υπολογιστή
- Ευελιξία εγκατάστασης και συντήρησης
- Κατάλληλο για κάθε μορφής περιβάλλον
- Οικονομικά εφικτό
- Παρακολούθηση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο με μεγάλη χωρική ανάλυση και δυνατότητα άμεσης επέμβασης.

### Weaknesses:

- Περιορισμένη ισχύς της μπαταρίας
- Ενδεχόμενη αργοπορία σε σύγκριση με το ενσύρματο δίκτυο

### Opportunities:

- Δημιουργία νέων θέσεων εργασίας εξειδίκευσης
- Έρευνα για καινοτομία και τεχνολογική πρόοδο

### Threats:

- Επίθεση από χάκερς μέσω κακόβουλων λογισμικών

Όπως φαίνεται και στην παραπάνω ανάλυση SWOT, τα πλεονεκτήματα υπερτερούν σημαντικά των αδυναμιών.

## **Συμπεράσματα**

Χωρίς αμφιβολία από την επισκόπηση των περιπτώσεων όπου εφαρμόστηκε το ασύρματο δίκτυο αισθητήρων, συμπεραίνουμε ότι η χρήση σύγχρονης ψηφιακής τεχνολογίας έχει διευκολύνει αρκετά τις περιβαλλοντικές μετρήσεις και αυτές οι τεχνολογικές εφαρμογές έχουν συμβάλει στην ευημερία των κατοίκων της περιοχής που εφαρμόζονται. Τα επιτυχημένα παραδείγματα που εφαρμόστηκαν και δοκιμάστηκαν στην πράξη, δείχνουν ότι η νέα γενιά παρακολούθησης της περιβαλλοντικής ρύπανσης έχει σημειώσει μεγάλη πρόοδο. Συνεπώς απαντώντας στο ερευνητικό ερώτημα , είναι εφικτός ο έλεγχος και η παρακολούθηση της περιβαλλοντικής ρύπανσης σε πολύ υψηλή χρονική και χωρική ανάλυση. Όμως, υπάρχουν ακόμη μελλοντικές προκλήσεις και θέματα που πρέπει να μελετήσουν οι ερευνητές, όπως είναι η αποδοτικότερη ενεργειακή διαχείριση αυτών των συστημάτων και η αύξηση της αυτοματοποιημένης διαδικασίας στον τρόπο λειτουργίας τους.

## Βιβλιογραφία

- <http://www.ypeka.gr>
- Wei Ying Yi, Kin Ming Lo, Terrence Mak, Kwong Sak Leung, Yee Leung, & Mei Ling Meng,. (2015). A Survey of Wireless Sensor Network Based Air Pollution Monitoring Systems.  
<https://doi.org/10.3390/s151229859>
- Penza, M., Suriano, D., Pfister, V., Prato, M. & Cassano, G. (2017) Urban Air Quality Monitoring with Networked Low-Cost Sensor-Systems. ENEA—Italian National Agency for New Technologies, Energy and Sustainable Economic Development, Lab. Functional Materials and Technologies for Sustainable Applications, Brindisi Research Center.
- Raghavendra, C.S., Krishna, M., Sivalingam, & Taieb Znati, (2006). Wireless sensor networks (pp. 399-421). New York, Springer
- Edgar, H., Callaway, Jr. (2004). Wireless sensor networks : architectures and protocols (pp. 9). Boca Raton, FL : Auerbach Publications
- <https://www.sensorsmag.com/components/sensors-expo-conference-2019-air-quality-a-growing-concern>
- <https://particlesplus.com/>
- [http://www.libelium.com/downloads/documentation/gases\\_sensor\\_board\\_pro.pdf](http://www.libelium.com/downloads/documentation/gases_sensor_board_pro.pdf)
- <http://www.libelium.com/preventing-asthma-sensor-network-air-quality-pm10-dust-in-play-area/>
- <http://www.smartsantander.eu/index.php/testbeds/item/132-santander-summary>