



**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**  
**ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ**  
**ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

## **Ασύρματο Σύστημα Αισθητήρων Βασισμένο στο Arduino για το Αυτόματο Πότισμα των Φυτών**

Arduino Wireless Sensor Based Automatic Plant Watering System

**Βρατσάνος Γιώργος**

**Εξεταστική Επιτροπή:**

Καλαϊτζάκης Κωνσταντίνος

Κουτρούλης Ευτύχης

Δεληγιαννάκης Αντώνιος

**Χανιά Ιανουάριος 2020**

## Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελεί την υλοποίηση του ενσωματωμένου συστήματος άρα και το πρώτο μέρος σε σειρά της εργασίας « IoT εφαρμογή για τη διαχείριση ασύρματου δικτύου αισθητήρων με τη χρήση Arduino για την αυτόματη υδροδότηση αγροκτήματος » του Σμυρναίου Δημήτρη. Δεν θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί χωρίς τη συνεργασία και τη συνεχή επικοινωνία μας. Επίσης σημαντική ως προς την εκπόνηση της εργασίας ήταν η καθοδήγηση του επιβλέποντα καθηγητή Κωνσταντίνου Καλαϊτζάκη.

## Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η σχεδίαση, η υλοποίηση ενός ενσωματωμένου συστήματος αυτόματης άρδευσης, καθώς και της διασύνδεσης του σε έναν διακομιστή (server).

Στα επόμενα κεφάλαια αρχικά περιγράφονται τα ενσωματωμένα συστήματα ως προς την καθημερινή τους χρήση, τα υλικά που το αποτελούν, καθώς και οι τεχνολογίες υλοποίησης τους ανάλογα με τις διεργασίες που είναι υποχρεωμένα να εκτελούν. Έπειτα περιγράφονται αναλυτικά όλα τα μέρη του παρόντος ενσωματωμένου συστήματος τόσο σε επίπεδο υλικού (hardware) όσο και σε επίπεδο λογισμικού (software), καθώς και οι προδιαγραφές, τα επίπεδα σχεδίασης και υλοποίησης του. Το αυτόματο σύστημα αποτελείται από απομακρυσμένες συσκευές (Wireless Sensors Unit) όπου περιέχουν αισθητήρες (temperature, humidity, etc.), σταθμό βάσης (Wireless Base Unit), ηλεκτροβάνες, με στόχο την καταγραφή των συνθηκών του χωραφιού αλλά και την διαχείρισή του σε επίπεδο άρδευσης.

Με την υλοποίηση του συστήματος εξάγονται συμπεράσματα τόσο για την ίδια την ύπαρξη του, όσο και για την βελτίωσή του. Συμπεράσματα για την χρήση ενός ενσωματωμένου στην άρδευση σε σχέση με τον παραδοσιακό τρόπο με στόχο την μείωση της κατανάλωσης του νερού, αλλά και για την μείωση της κατανάλωσης του ίδιου του ενσωματωμένου και την χρήση ηλιακής ενέργειας.

Στο τελευταίο κεφάλαιο της εργασίας παρουσιάζονται βελτιώσεις του συστήματος όπως στην επικοινωνία του ενσωματωμένου με τον διακομιστή, καθώς και μελλοντικές προεκτάσεις όπως η απομακρυσμένη ανάπτυξη του (remote development).

## Περιεχόμενα

<b>1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....</b>	<b>5</b>
<b>1. Γενικά.....</b>	<b>5</b>
<b>2. ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ.....</b>	<b>7</b>
<b>1. Ενσωματωμένα Συστήματα.....</b>	<b>7</b>
1.1 Δομικά χαρακτηριστικά .....	8
1.1.1 Μικροεπεξεργαστής/Μικροελεγκτής.....	10
1.1.2 Μνήμες volatile/ non-volatile .....	11
1.1.3 Διεπαφές επικοινωνίας .....	12
1.2 Αρχές Σχεδίασης Ενσωματωμένων Συστημάτων .....	18
1.3 Σχεδιασμός ενσωματωμένου συστήματος .....	20
<b>2. Ασύρματο Δίκτυο Αισθητήρων .....</b>	<b>21</b>
2.1 Δομικά χαρακτηριστικά .....	21
2.2 Επίπεδα λειτουργίας ασύρματων δικτύων .....	24
2.3 Σχεδιασμός ασύρματου δικτύου αισθητήρων .....	25
2.4 Τεχνικές εξοικονόμησης ενέργειας.....	27
<b>3. Ενσωματωμένο σύστημα αυτόματου ποτίσματος .....</b>	<b>29</b>
<b>3. Τα μέρη του συστήματος.....</b>	<b>30</b>
3.1 Απομακρυσμένη Συσκευή Αίσθησης(WSU).....	30
3.1.1 Αισθητήρες 30	
3.1.2 RF Transmitter .....	32
3.1.3 Μικροελεγκτής ATMEGA328P-PU.....	36
3.1.4 Λειτουργικότητα Απομακρυσμένης Συσκευής (WSU) .....	39
3.1.5 Ηλεκτρικά Χαρακτηριστικά.....	41
3.2 Σταθμός Βάσης (WIU) .....	48
3.2.1 Περιφερειακές συσκευές.....	48
3.2.2 GSM-GPRS.....	50
3.2.3 Arduino Mega .....	53
3.2.4 Λειτουργικότητα Σταθμού Βάσης .....	54
3.2.5 Ηλεκτρικά Χαρακτηριστικά.....	57
<b>4. Συμπεράσματα .....</b>	<b>59</b>
<b>5. Παράρτημα Α.....</b>	<b>61</b>
<b>6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>	<b>66</b>

# 1.

# ΕΙΣΑΓΩΓΗ

---

## 1. Γενικά

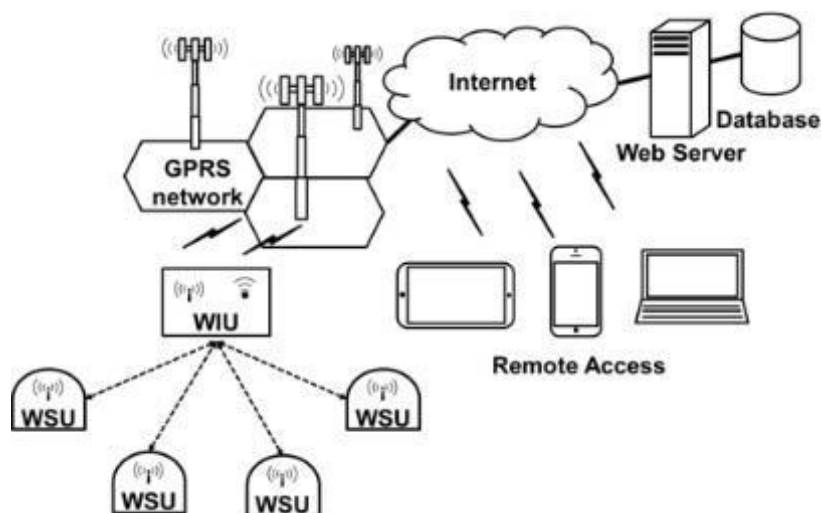
Καθώς ο πληθυσμός της γης αυξάνεται - υπολογίζεται πως μέχρι το 2030 η αύξηση αυτή θα είναι της τάξης του 35% [1] - και η ποιότητα ζωής του μέσου ανθρώπου βελτιώνεται, η ζήτηση για τροφή και νερό συνεχώς μεγαλώνει. Η ολοένα μεγαλύτερη κατανάλωση νερού, ιδιαίτερα τους καλοκαιρινούς μήνες, είτε σε κλίμακα μικρής οικίας είτε σε κλίμακά μεγάλων αγροτικών καλλιεργειών και εξωτερικής χρήσης συμβάλει στην παγκόσμια κατανάλωση και παραγωγικότητα του νερού. Ειδικότερα εάν συνυπολογισθεί πως το  $\frac{1}{3}$  της συνολικής παραγωγής παγκοσμίως στηρίζεται στις αρδευόμενες καλλιέργειες[2], είναι επιτακτική ανάγκη η μείωση της κατανάλωσης του νερού χωρίς να μειωθεί η παραγωγικότητά του. Σύμφωνα με τον International Food Policy Research Institute (IFPRI) η αύξηση της αποδοτικής χρήσης των καλλιεργειών σε ποσοστό 1% το χρόνο για την περίοδο 1995-2020 θα συνεισφέρει στην αύξηση της παραγωγικότητας του νερού σε παγκόσμια κλίμακα[1]. Με λίγα λόγια όσο ο σύγχρονος άνθρωπος χρησιμοποιεί αποδοτικά το νερό αυξάνοντας την απόδοση των καλλιεργήσιμων εκτάσεων τόσο θα αυξάνεται η παραγωγικότητα του νερού αλλά και η τροφή σε παγκόσμιο επίπεδο.

Για την βελτίωση του τομέα της άρδευσης γίνεται χρήση νέων τεχνολογιών συνδυάζοντας την επιστήμη της πληροφορικής. Με αυτό τον τρόπο είναι δυνατόν να υπολογιστούν παράμετροι όπως οι περιβαλλοντικές συνθήκες, το απαιτούμενο - διαθέσιμο νερό, το κόστος του νερού, η προγραμματισμένη άρδευση κ.α. Ένα σύγχρονο εργαλείο για την αποδοτική χρήση των καλλιεργειών είναι τα ενσωματωμένα συστήματα αυτόματου ποτίσματος με την χρήση αισθητήρων[3]. Το αυτόματο σύστημα πλέον θα είναι προγραμματισμένο να προσαρμόζει το πότισμα είτε σε ποσότητα είτε σε διάρκεια σύμφωνα με τις ανάγκες των φυτών όπως είναι η εποχή, η συχνή βροχόπτωση, το είδος της καλλιέργειας, το υψόμετρο, η υγρασία.

Στην παρούσα διπλωματική προτείνεται ένα ενσωματωμένο αυτόματο σύστημα άρδευσης με χρήση αισθητήρων και διασύνδεσης σε έναν διακομιστή μέσω κεραίας GSM-GPRS. Το παρόν σύστημα υλοποιεί τον αλγόριθμο αυτόματου ποτίσματος που περιγράφει τον έλεγχο των περιβαλλοντικών συνθηκών, τις συνθήκες εδάφους, τις συνθήκες έναρξης του ποτίσματος με χρήση ηλεκτρικής βάνας. Η διαχείριση του ενσωματωμένου συστήματος πραγματοποιείται από μια διαδικτυακή εφαρμογή όπου αποτελεί κομμάτι μιας συμπληρωματικής διπλωματικής

εργασίας. Στο Σχήμα 1.1 Διάγραμμα αναπαράστασης λειτουργίας του αυτοματοποιημένου συστήματος ύδρευσης Σχήμα 1.1 φαίνονται τα κομμάτια (hardware & software) που συνεργάζονται για την παραγωγή της τελικής λύσης. Η σχεδίαση αλλά και οι βελτιώσεις που προτείνονται έχουν ως στόχο τόσο την χαμηλή κατανάλωση όσο και το χαμηλό κόστος του συστήματος.

- **Κεφάλαιο 1:** Περιγράφονται τα δομικά μέρη ενός ενσωματωμένου συστήματος, οι αρχές σχεδίασης καθώς και η συμβολή τους στην καθημερινότητα του ανθρώπου.
- **Κεφάλαιο 2:** Αναλύονται τα δομικά μέρη ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων, τα επίπεδα λειτουργίας καθώς και οι τεχνικές σχεδίασης και εξοικονόμησης ενέργειας
- **Κεφάλαιο 3:** Περιγράφεται το παρόν σύστημα, τα μέρη που το αποτελούν, τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά καθώς η λειτουργικότητά του.
- **Κεφάλαιο 4:** Παρουσιάζονται οι βελτιώσεις που πραγματοποιήθηκαν κατά την διάρκεια του σχεδιασμού του συστήματος, οι μελλοντικές βελτιώσεις με απώτερο στόχο την μείωση της κατανάλωσης, την διασφάλιση της ομαλής λειτουργίας και τον απομακρυσμένο επανα-προγραμματισμό του συστήματος.



Σχήμα 1.1 Διάγραμμα αναπαράστασης λειτουργίας του αυτοματοποιημένου συστήματος ύδρευσης

# 2.

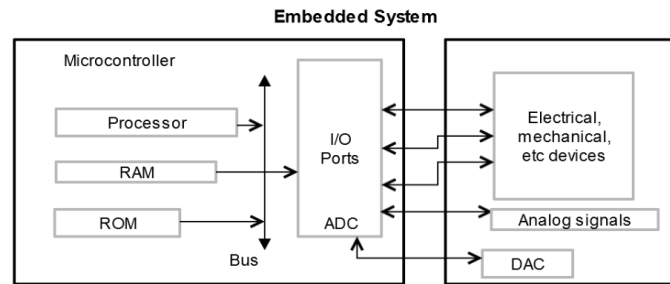
## ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

---

### 1. Ενσωματωμένα Συστήματα

Ενσωματωμένο σύστημα είναι ένα υπολογιστικό σύστημα που στόχο έχει τον έλεγχο μεγάλου εύρους λειτουργιών, χωρίς όμως να έχει σχεδιαστεί να μπορεί να προγραμματιστεί από έναν χρήστη όπως συμβαίνει με τον προσωπικό υπολογιστή (PC) [4]. Είναι ενσωματωμένο ως μέρος μιας πλήρους συσκευής που συχνά περιλαμβάνει υλικό και μηχανικά μέρη. Για το λόγο αυτό συνήθως χαρακτηρίζεται από το μικρό του μέγεθος και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του ως προς την κατανάλωση ισχύος, την απόδοση σε συγκεκριμένες εφαρμογές και το χαμηλό του κόστος. Τα ενσωματωμένα συστήματα υπολογιστών αποτελούν ένα διαδεδομένο κομμάτι της καθημερινής ζωής, όπου χρησιμοποιούνται για εργασίες από την παροχή ψυχαγωγίας μέχρι την υποβοήθηση στην λειτουργία βασικών ανθρώπινων οργάνων [5]. Η εφαρμογή τους εκτείνεται από τις οικιακές συσκευές όπως ένα πλυντήριο που μπορεί να περιέχει ένα ενσωματωμένο σύστημα ώστε να ελέγχει τα διάφορα προγράμματα πλύσης, τα κινητά τηλέφωνα, ηλεκτρονικά παιχνίδια, αυτοματισμούς στην αυτοκινητοβιομηχανία μέχρι τα βιομηχανικά ρομπότ.

Τα ενσωματωμένα συστήματα εμφανίστηκαν την δεκαετία το 60' αντικαθιστώντας τα συστήματα τα οποία αποτελούνταν από ένα μεγάλο πλήθος λογικών κυκλωμάτων ενοποιώντας τα τελευταία σε μεγαλύτερα επίπεδα λειτουργίας.

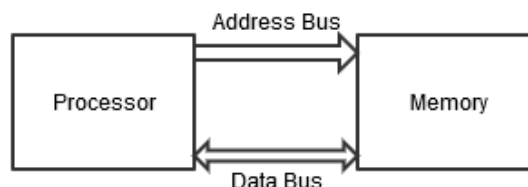


Σχήμα 1-2. Embedded System

## 1.1 Δομικά χαρακτηριστικά

Βασικά δομικά στοιχεία ενός ενσωματωμένου συστήματος είναι ο μικροεπεξεργαστής/μικροελεγκτής ο οποίος βρίσκεται συνδεδεμένος μέσω μιας ιεραρχίας διαύλων με στοιχεία προσωρινής και μόνιμης αποθήκευσης (μνήμες RAM, EEPROM, Flash, non-Volatile), οι μονάδες I/O, το σύστημα χρονισμού (ρολόι - timer). Η σύνδεση της μνήμης με τον επεξεργαστή καθορίζει την αποδοτικότητα της εκτέλεσης των αλγορίθμων τόσο για την αποθήκευση των δεδομένων όσο και τον υπολογισμό των εντολών προγράμματος (program instructions). Η σύνδεση ενός μικροεπεξεργαστή με τις μνήμες υλοποιείται αναπτύσσοντας μία από τις 3 βασικές αρχιτεκτονικές Von Neumann, Harvard και Super-Harvard (SHARC).

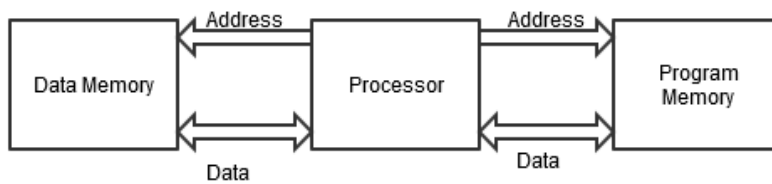
**Η αρχιτεκτονική Von Neumann** παρέχει μία μόνο μνήμη η οποία χρησιμοποιείται τόσο για τα δεδομένα όσο και για τις εντολές προγράμματος (program instructions). Παρέχει ένα δίαυλο μεταφοράς δεδομένων μεταξύ του επεξεργαστή και της μνήμης. Συνεπώς αυτή η αρχιτεκτονική παρέχει μεγάλο χρόνο επεξεργασίας (πολύ αργή ταχύτητα επεξεργασίας) καθώς για κάθε μεταφορά των δεδομένων χρειάζεται ξεχωριστός κύκλος ρολογιού.



Σχήμα 1-3. The Von Neumann architecture

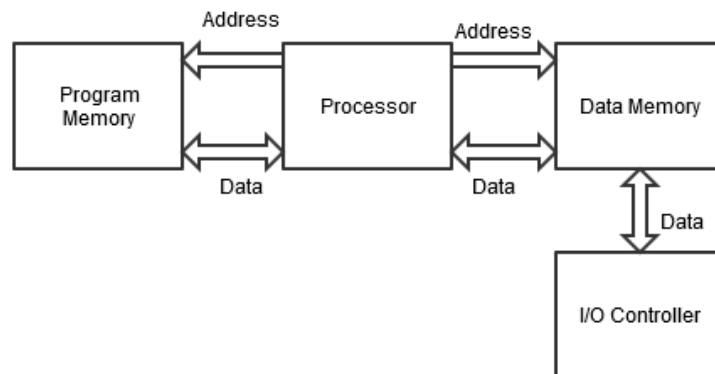
**Η αρχιτεκτονική Harvard** παρέχει διαφορετική μνήμη για την αποθήκευση των εντολών προγράμματος και των δεδομένων. Κάθε μνήμη επικοινωνεί με τον επεξεργαστή με διαφορετικό δίαυλο και συνεπώς μπορούν να χρησιμοποιηθούν ταυτόχρονα τόσο οι εντολές προγράμματος όσο και τα δεδομένα. Σε αυτή την αρχιτεκτονική υλοποιούνται ειδικές εντολές προγράμματος SIMD (Single instruction multiple data) όπου πραγματοποιεί παράλληλους υπολογισμούς με μία μόνο εντολή.





Σχήμα 1-4. Harvard architecture

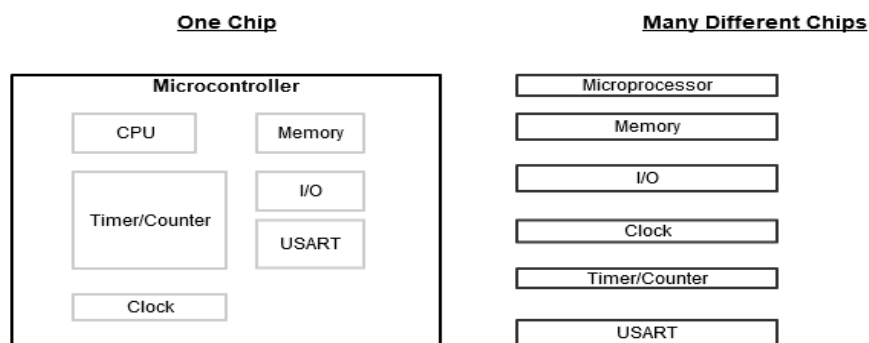
**Η αρχιτεκτονική Super Harvard (SHARC)** παρέχει δύο επιπλέον μέρη σε σχέση με την αρχιτεκτονική Harvard. Το ένα μέρος αποτελεί την διασύνδεση συσκευών εισόδου/εξόδου και το άλλο η χρησιμοποίηση κρυφής μνήμης (cache). Η κρυφή μνήμη εντολών αποθηκεύει τις πιο συχνά χρησιμοποιούμενες εντολές μειώνοντας τις προσβάσεις στην μνήμη εντολών προγράμματος και ενισχύοντας την επίδοση του επεξεργαστή. Στην αρχιτεκτονική SHARC χρησιμοποιείται το πρότυπο άμεσης πρόσβασης μνήμης (Direct Memory Access) όπου οι συσκευές εισόδου/εξόδου συνδέονται κατ' ευθείαν στην μνήμη με την χρήση ενός I/O ελεγκτή χωρίς την μεσολάβηση του μικροελεγκτή. Προτιμάται η χρήση του DMA λόγω το ότι οι κύκλοι του επεξεργαστή δεν θα χρησιμοποιούνται για την επικοινωνία με τις I/O συσκευές αλλά θα διατίθενται για άλλους υπολογισμούς. Τέλος με την χρήση του DMA τόσο ο δίαυλος των δεδομένων όσο και των εντολών προγράμματος είναι διαθέσιμος παρέχοντας τον ως διεπαφή με τα περιφερειακά.



Σχήμα 1-5. Super Harvard architecture

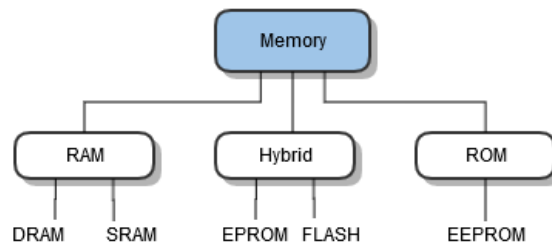
### 1.1.1 Μικροεπεξεργαστής/Μικροελεγκτής

Ένας μικροελεγκτής είναι ένας υπολογιστής σε ένα ενιαίο ολοκληρωμένο κύκλωμα το οποίο αποτελείται από μονάδες μνήμης, διαύλους, ρολόι, μετατροπείς τάσης. Ένας μικροεπεξεργαστής γενικά δεν διαθέτει RAM, ROM, I/O. Συνήθως χρησιμοποιεί τις ακίδες του ως δίαυλο για να διασυνδέεται με τα περιφερειακά όπως η RAM, ROM. Συνήθως οι μικροεπεξεργαστές χρησιμοποιούνται στα κοινά υπολογιστικά συστήματα (PC) όπου δίνεται έμφαση στην υπολογιστική ισχύ. Αντίθετα ένας μικροελεγκτής είναι μια ‘all in one’ λύση όπου περιέχει τον επεξεργαστή, την RAM, ROM, I/O σε ένα chip και άρα δεν είναι δυνατή η αύξηση της RAM ή ο αριθμός των I/O θυρών. Ο δίαυλος ελέγχου είναι εσωτερικός και δεν είναι διαθέσιμος στον σχεδιαστή. Αυτό σημαίνει ότι ένας μικροεπεξεργαστής μπορεί γενικά να ενσωματωθεί σε μεγαλύτερες εφαρμογές γενικού σκοπού από ότι ένας μικροελεγκτής όπου χρησιμοποιείται για πιο εξειδικευμένες εφαρμογές. Αναμφίβολα ένας μικροελεγκτής είναι πολύ φθηνότερος από έναν μικροεπεξεργαστή και καθώς ο μικροεπεξεργαστής δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνος του ένα σύστημα σχεδιασμένο γύρω από αυτόν είναι αρκετά δαπανηρό.



Σχήμα 1-6 Microcontroller vs Microprocessor

Ωστόσο οι μικροελεγκτές δεν είναι αρκετά ισχυροί και αποδοτικοί για συγκεκριμένες εφαρμογές, όπου προτιμώνται οι επεξεργαστές ψηφιακού σήματος DSP (Digital Signal Processors), το ολοκληρωμένο κύκλωμα FPGA (Field-Programmable Gate Array) και άλλα προσαρμοσμένα ολοκληρωμένα κυκλώματα ASICs (application-specific integrated circuit). Λόγο της αποδοτικότητας των DSP επεξεργαστών στον υπολογισμό μαθηματικών εργασιών ο ρόλος τους εστιάζεται στην μέτρηση, την συμπίεση ψηφιακών ή αναλογικών σημάτων μετατρέποντας τα αναλογικά σήματα του πραγματικού κόσμου σε ψηφιακή μορφή και το αντίστροφο. Σε σύγκριση με τους μικροελεγκτές οι DSP είναι αρκετά πιο ακριβοί, μεγαλύτεροι σε μέγεθος και λιγότερο ευέλικτοι. Τέλος τα FPGA είναι ολοκληρωμένα γενικού σκοπού όπου προσφέρουν ευελιξία στην προσαρμογή του υλικού καθώς δεν έχουν σχεδιαστεί να εκτελούν συγκεκριμένες διεργασίες αλλά να είναι επαναρυθμίσιμα. Αυτού του είδους τα ολοκληρωμένα λειτουργούν πιο γρήγορα και με μικρότερη καθυστέρηση από τους μικροελεγκτές και τα DSP Συνεπώς χρησιμοποιούνται για την εκτέλεση παράλληλων διεργασιών, την δημιουργία πρωτοτύπων όπου τα λάθη είναι ανεκτά μέχρις ότου μετατραπεί σε ένα μόνιμο ολοκληρωμένο κύκλωμα ASIC.



Σχήμα 1-7. Types of memory

### 1.1.2 Μνήμες volatile/ non-volatile

Παραδοσιακά η τεχνολογία της μνήμης διαιρείται σε δύο κατηγορίες, volatile και non-volatile. Οι μνήμες volatile συνήθως ονομάζονται RAM (Random Access Memory). Αυτή η μνήμη λειτουργεί μόνο όταν είναι ενεργοποιημένη, όταν η τροφοδοσία διακοπεί τότε χάνει τις αποθηκευμένες τιμές και έτσι μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως προσωρινή αποθήκευση δεδομένων. Οι volatile μνήμες όπως είναι η SRAM συνήθως είναι διαθέσιμες εσωτερικά του μικροελεγκτή αλλά στην περίπτωση επέκτασης, χρησιμοποιείται εξωτερική μνήμη η οποία συνδέεται με τον δίαυλο των περιφερειακών του μικροελεγκτή. Συνήθως προτιμώνται όταν απαιτείται γρήγορη πρόσβαση στην μνήμη άρα και στα δεδομένα. Παρόλο που οι volatile μνήμες δεν λειτουργούν όταν κοπεί η τροφοδοσία σε πολλές εφαρμογές με την παρουσία εφεδρικής μπαταρίας την μετατρέπουν σε non-volatile με το κόστος μια λιγότερο αποδοτικά οικονομικής λύσης. Γενικά αυτού του είδους η μνήμη χρησιμοποιεί την τεχνολογία ημιαγωγών και είναι ευκολότερο να γραφτεί από ηλεκτρική άποψη.

Οι μνήμες non-volatile συνήθως ονομάζονται ROM (Read-Only Memory). Αυτού του είδους η μνήμη διατηρεί τις τιμές της ακόμη και όταν η τροφοδοσία αφαιρεθεί. Αυτός ο τύπος της μνήμης είναι πιο δύσκολο να γραφτεί όσον αφορά τον χρόνο ή την ισχύ ή την πολυπλοκότητα και χρησιμοποιείται για την αποθήκευση του λογισμικού συστήματος (firmware). Τόσο από την εικόνα όσο και από τον πίνακα περιγράφονται διάφορα είδη μνημών καθώς και τα χαρακτηριστικά τους.

Όταν ένα ενσωματωμένο σύστημα είναι ενεργοποιημένο, ο μικροεπεξεργαστής διαβάζει τις εντολές (software instructions) όπου έχουν αποθηκευτεί στην μνήμη, εκτελεί αυτές τις εντολές με σκοπό την επεξεργασία των σημάτων εισόδου από τις περιφερειακές μονάδες (αισθητήρες, κουμπιά κτλ.) και τέλος την παραγωγή σημάτων εξόδου για την κάλυψη των αναγκών του ενσωματωμένου συστήματος [6].

Πίνακας 1-1. Memory characteristics

Parameter	Flash	EEPROM	SRAM
Non-volatile	X	X	
Byte Programmable		X	X
No Battery Needed	X	X	X
Random Access			X

Η χρησιμοποίηση οποιασδήποτε μνήμης είναι αποδεκτή στα ενσωματωμένα συστήματα ωστόσο η τελική εφαρμογή και το κόστος είναι οι παράγοντες που θα επηρεάσουν αυτή την επιλογή. Για παράδειγμα σε ένα Personal Digital Assistant (PDA) χρησιμοποιούνται τόσο volatile όσο και non-volatile μνήμες για την αποθήκευση των δεδομένων και των εντολών προγράμματος αντίστοιχα.

### 1.1.3 Διεπαφές επικοινωνίας

Ένα ενσωματωμένο σύστημα επικοινωνεί με τον έξω κόσμο μέσω των περιφερειακών του. Όπως η επιλογή ενός μικροελεγκτή είναι ζωτικής σημασίας για τον ενσωματωμένο σύστημα έτσι και ο τρόπος σύνδεσης με τα περιφερειακά συμβάλει στην αποδοτική λειτουργία του ειδικότερα εάν ληφθούν υπόψη οι περιορισμοί στο μέγεθος του ενσωματωμένου. Η σύνδεση με τα περιφερειακά μπορεί να είναι ασύγχρονη ή σύγχρονη (I2C, SPI) η οποία είναι και η συνηθέστερη καθώς και σειριακή ή παράλληλη.

#### Σύγχρονη / Ασύγχρονη

Στην σύγχρονη επικοινωνία δυο ή περισσότερες συσκευές ανταλλάσσουν δεδομένα χρησιμοποιώντας μια κοινή γραμμή ρολογιού. Μια συσκευή, συνήθως αναφέρεται ως master, θα μεταφέρει το σήμα ως έξοδο, ενώ η άλλη συσκευή θα διαβάσει το σήμα ρολογιού ως είσοδο. Με αυτό τον τρόπο ο κοινός δίαυλος θα κρατάει τις συσκευές συγχρονισμένες διασφαλίζοντας ότι τα δεδομένα θα λαμβάνονται στις σωστές ώρες.

#### Σειριακή επικοινωνία

Στην σειριακή επικοινωνία η σειριακή θύρα στέλνει/λαμβάνει πληροφορία από bytes ένα bit την φορά. Είναι πιο αργή από την παράλληλη επικοινωνία όπου αφήνει την μεταφορά ενός ολόκληρου byte την φορά ωστόσο είναι πιο απλή και προτιμάται για μεγάλες αποστάσεις. Για την ολοκλήρωση της επικοινωνίας χρησιμοποιούνται 3 γραμμές μετάδοσης (γείωση, μετάδοση, λήψη). Μία πλήρης αμφίδρομη επικοινωνία χρησιμοποιεί τις γραμμές μετάδοσης και λήψης ασύγχρονα τόσο για την αποστολή όσο και για την λήψη bytes χρησιμοποιώντας σήματα όπως clear to send, request to send. Τα βασικά χαρακτηριστικά μιας σειριακής σύνδεσης είναι το baud rate, data bits, stop bits, parity.

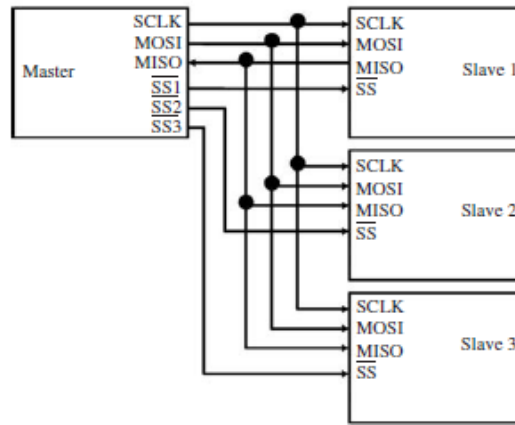
Frame	Start	Data	Parity	Stop
Size (bits)	1	5-9	0-1	1-2

Σχήμα 1-8. Serial Communication Frame

- ❖ **Baud rate** είναι η ταχύτητα αποστολής δεδομένων, υποδηλώνει τον αριθμό των bits που αποστέλλονται το δευτερόλεπτο. Για μία κλήση ενός πρωτόκολλου στα 4800 baud rate η σειριακή θύρα δειγματοληπτεί τα δεδομένα στα 4800Hz. Όσο υψηλότερη είναι η ταχύτητα μετάδοσης, τόσο πιο ευαίσθητο είναι το καλώδιο στην ποιότητα της εγκατάστασης.

- ❖ **Data bits** είναι η μέτρηση των πραγματικών δεδομένων σε bits. Σε μία αποστολή ενός πακέτου περιέχεται πληροφορία όπως bit ισοτιμίας, start/stop bits, καθώς και η πραγματική πληροφορία σε μορφή ASCII. Οι τιμές που μπορεί να πάρει το πρότυπο ASCII είναι από το 0 έως το 127 και για το εκτεταμένο ASCII από 0 έως το 255. Συνεπώς η αποστολή 7 bits (ένα σύμβολο ASCII) ανά πακέτο είναι επαρκής για την επικοινωνία
- ❖ **Stop bits** χρησιμοποιούνται για να υποδείξουν το τέλος της αποστολής ενός πακέτου. Οι τιμές που μπορούν να πάρουν είναι το 1, 1.5, 2 bits. Όσο περισσότερα bits χρησιμοποιούνται για τα stop bits, τόσο μεγαλύτερη είναι η επιείκεια κατά το συγχρονισμό της επικοινωνίας επιβραδύνοντας τον ρυθμό μετάδοσης δεδομένων.
- ❖ **Parity** αποτελεί τα bit ισοτιμίας όπου λειτουργούν ως μηχανισμός ελέγχου στην σειριακή επικοινωνία. Υπάρχουν 4 είδη bit ισοτιμίας, even, odd, marked και spaced. Στην περίπτωση της περιττής/άρτιας, bit ισοτιμίας προστίθενται στο τέλος του πακέτου για να διαβεβαιώσει αντίστοιχα το περιττό ή άρτιο πλήθος των bits. Αντίθετα η ισοτιμία marked/spaced δεν ελέγχει το πλήθος των bits αλλά περιγράφει εάν τα δεδομένα είναι κατεστραμμένα λόγω θορύβου ή τα ρολόγια των συσκευών εκπομπής και λήψης είναι εκτός συγχρονισμού.

Η RS-232 σειριακή επικοινωνία αποτελεί την πιο παλιά και διαδεδομένη επικοινωνία η οποία χρησιμοποιήθηκε στους πρώτους υπολογιστές της IBM. Χρησιμοποιήθηκε για πολλά χρόνια στην σύνδεση περιφερειακών όπως το ποντίκι, το πληκτρολόγιο. Το RS-232 περιορίζεται στις συνδέσεις από σημείο μεταξύ των σειριακών θυρών του υπολογιστή και των συσκευών και συνεπώς μπορεί να χρησιμοποιηθεί για σειριακή επικοινωνία κοντινής απόστασης. Επίσης μια σημαντική λειτουργία που πραγματοποιείται μέσω της σειριακής επικοινωνίας είναι η σύνδεση ενός υπολογιστή με έναν μικροελεγκτή με στόχο τον προγραμματισμό και τον έλεγχο του. Ωστόσο σήμερα για αυτές τις λειτουργίες χρησιμοποιείται η τεχνολογία του USB όπου αποτελεί ένα πιο πολύπλοκο πρωτόκολλο σειριακής επικοινωνίας. Το USB χρησιμοποιεί και πρωτόκολλα λογισμικού εκτός από πρωτόκολλα υλικού εν αντίθεση με το RS-232. Αποτελεί μια master/slave συνδέοντας N περιφερειακά παρά μια peer-to-peer επικοινωνία 1:1.



Σχήμα 1-9. SPI architecture

## SPI

Το SPI είναι ένας υψηλής ταχύτητας διάυλος σύγχρονης επικοινωνίας όπου αναπτύχθηκε από την Motorola με σκοπό την αμφίδρομη επικοινωνία. Ο διάυλος SPI χρησιμοποιεί 4 σήματα για την επικοινωνία της συσκευής με τα περιφερειακά το MOSI (Master-Out/Slave-In), MISO (Master-In/Slave-Out), SS (Slave Select), SCLK. Με αυτά τα σήματα ο διάυλος μέσω του ρολογιού συγχρονίζει την επικοινωνία μεταξύ master και ενός ή περισσότερων slave. Κάθε slave θα πρέπει να έχει ένα μοναδικό σήμα SS όπου θα συνδέεται με το master. Όταν το σήμα SS θα είναι λογικό μηδέν τότε το slave θα ακούει στον διάυλο και το master θα είναι έτοιμο να στείλει δεδομένα. Όπως υποδηλώνουν και τα ονόματά τους το σήμα MOSI χρησιμοποιείται για την αποστολή δεδομένων στο slave, ενώ το σήμα MISO για την ανάγνωση δεδομένων από το slave για συσκευές όπου έχουν ρυθμιστεί ως master. Όταν η συσκευή έχει ρυθμιστεί ως slave η σημασιολογία των σημάτων αντιστρέφεται. Επίσης σημαντικό ρόλο για την λειτουργία του διαύλου παίζουν άλλα 2 σήματα το clock polarity (CPOL) και το clock phase (CPHA) όπου σχετίζονται με το ρολόι. Το CPOL ορίζει την προεπιλεγμένη τιμή του σήματος SCLK στο 0 ή στο 1 καθορίζοντας εάν το ρολόι χρησιμοποιείται σε υψηλές ή χαμηλές λογικές καταστάσεις. Το CPHA αντιπροσωπεύει την φάση ή αλλιώς την ακμή του ρολογιού, δηλαδή την στιγμή που θα διαβαστούν ή θα καταχωρηθούν δεδομένα στους καταχωρητές για αλλαγές του ρολογιού από 0 σε 1 και το αντίστροφο. Συνεπώς υπάρχουν 4 διαφορετικές καταστάσεις λειτουργίας του διαύλου όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα.

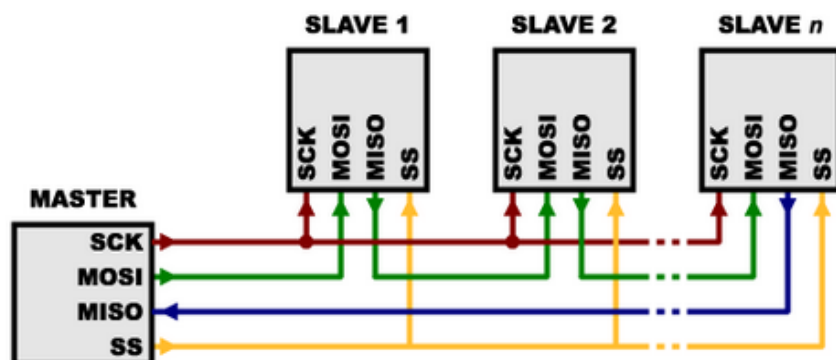
Πίνακας 1-2. SPI signals

SPI mode	CPOL	CPHA	Description
0	0	0	SCLK is low-active. Sampling is allowed on odd clock edges. Data changes on even clock edges.
1	0	1	SCLK is low-active. Sampling is allowed on even clock edges. Data changes on odd clock edges.
2	1	0	SCLK is high-active. Sampling is allowed on odd clock edges. Data changes on even clock edges.
3	1	1	SCLK is high-active. Sampling is allowed on even clock edges. Data changes on odd clock edges.

Όπως φαίνεται από το διάγραμμα εάν το CPHA είναι 0 τα δεδομένα λαμβάνονται στην μετάβαση από 0 σε 1 του ρολογιού ενώ εάν το CPHA είναι 1 τα δεδομένα λαμβάνονται στην μετάβαση από 1 σε 0.

Όπως αναφέρθηκε σε ένα SPI δίαυλο η επικοινωνία είναι αμφίδρομη και συνεπώς τα δεδομένα από τον master στον slave και αντίστροφα στέλνονται ταυτόχρονα. Σε περιπτώσεις που η επικοινωνία είναι μονόδρομη απλά αποστέλλονται ψεύτικα δεδομένα στον δίαυλο. Τόσο η συσκευή master όσο και η slave περιέχουν καταχωρητές. Η επικοινωνία ξεκινάει με την αποστολή του MSB (most significant bit) όπου κατά την διάρκεια ενός κύκλου το MSB bit μεταφέρεται από τον master στο LSB (less significant bit) του slave καταχωρητή και στον ίδιο κύκλο ρολογιού το MSB του slave μεταφέρεται στο LSB του master καταχωρητή. Όταν αποσταλούν όλα τα bytes ο καταχωρητής του master περιέχει την πληροφορία του slave και αντίστροφα.

Τέλος σε περιπτώσεις που δεν είναι απαραίτητη η αποστολή δεδομένων από ένα περιφερειακό slave στον master αλλά το αντίθετο όπως είναι η σύνδεση leds, lcd ακολουθείται η αλυσιδωτή επικοινωνία των slaves. Σε μία τέτοια διάταξη υπάρχει ένα κοινό SS σήμα για όλες τις slave συσκευές και τα σήματα MOSI συνδέονται από το ένα slave στο άλλο. Συνεπώς με την ενεργοποίηση του σήματος SS αμέσως ενεργοποιούνται όλες οι slave συσκευές και θα πρέπει η αποστολή δεδομένων από τον master να είναι επαρκής μέχρι να φτάσει σε όλες τις slave συσκευές. Σε περίπτωση που τα δεδομένα πρέπει να επιστραφούν στον master το βραχυκυκλωμένο σήμα MISO (μπλε γραμμή) είναι υπεύθυνο γι' αυτή την επικοινωνία. Ωστόσο τα δεδομένα επιστροφής από το slave1 θα πρέπει να περάσουν απ' όλα τα slaves.



Σχήμα 1-10. SPI chain

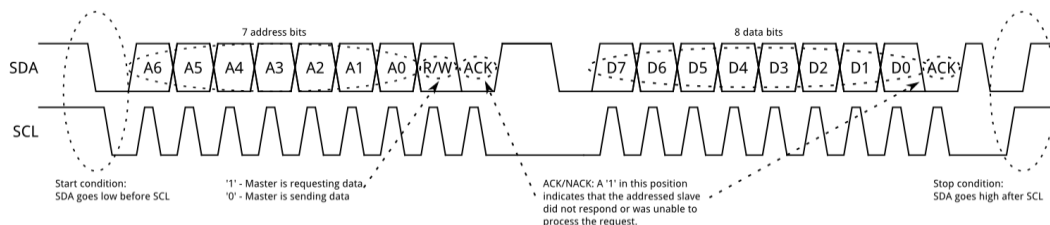


Σχήμα 1-11. I2C serial bus

## I2C

Το I2C είναι ένας σύγχρονος σειριακός διάυλος όπου αναπτύχθηκε από την Philips Semiconductors με σκοπό την επικοινωνία master-slave συσκευών. Αντίθετα με το SPI χρησιμοποιεί δυο αμφίδρομες γραμμές πραγματοποιώντας χαμηλότερες ταχύτητες μετάδοσης, είτε μέχρι τα 400 kbps (Fast Mode) είτε μέχρι τα 3.4 Mbps (High Speed Mode). Σε ένα διάυλο I2C οι συσκευές μπορεί να είναι είτε master είτε slave. Ενώ η συσκευή master ρυθμίζει το σήμα SCL όπου αποτελεί και το ρολόι, η συσκευή slave απαντά και συνεπώς η αρχικοποίηση της επικοινωνίας πραγματοποιείται από τις master συσκευές. Αντίθετα με το SPI η επιλογή της slave συσκευής από τον master δεν γίνεται με κάποιο σήμα αλλά με την αντίστοιχη διευθυνσιοδότηση της συσκευής μέσω της γραμμής SDA. Στις αρχικές εκδόσεις του πρωτοκόλλου χρησιμοποιούνταν 7 bit διεύθυνση όμως η αύξηση των slave συσκευών οδήγησε στην διευθυνσιοδότηση των 10 bit.

Τα μηνύματα που αποστέλλονται μέσω της γραμμής SDA αποτελούνται από την δομή της διεύθυνσης (7 bits), όπου η master συσκευή υποδεικνύει σε ποια slave συσκευή θα αποσταλεί το μήνυμα και από την δομή των δεδομένων όπου αποτελεί τα πραγματικά δεδομένα (8 bits) [12].



Σχήμα 1-12. I2C frame

Όπως φαίνεται και στο διάγραμμα τα δεδομένα τοποθετούνται στην γραμμή SDA όταν αυτή βρίσκεται στο λογικό μηδέν και δειγματοληπτούνται για κάθε θετικό χτύπο ρολογιού. Για την αρχικοποίηση αλλά και την ολοκλήρωση της επικοινωνίας χρησιμοποιούνται συνθήκες έναρξης και τερματισμού αντίστοιχα. Όταν η master συσκευή θέσει το σήμα SDA στο λογικό μηδέν την στιγμή που το σήμα SCL βρίσκεται στο λογικό μηδέν τότε ειδοποιεί τις slave συσκευές ότι η μετάδοση δεδομένων πρόκειται να ξεκινήσει. Σε περίπτωση που παραπάνω από μια συσκευή master θέλει να μεταδώσει ταυτόχρονα, αποκτά τον έλεγχο του διαύλου εκείνη η συσκευή που θα θέσει πρώτη την γραμμή SDA στο λογικό μηδέν. Αντίστοιχα κατά την διάρκεια της συνθήκης τερματισμού, η master συσκευή θέτει σε λογικό ένα την γραμμή SDA την στιγμή που η γραμμή SCL μεταβαίνει από την κατάσταση 0->1. Σε μια επικοινωνία με δομή (frame) διεύθυνσης 7 bits το MSB αποστέλλεται πρώτο και έπειτα ακολουθούν bit λειτουργίας εγγραφής/διαβάσματος, επιβεβαίωσης. Το bit επιβεβαίωσης ACK/NACK χρησιμοποιείται ως bit επαλήθευσης τόσο για την αντιστοίχιση της διεύθυνσης μεταξύ master και slave συσκευής όσο και για την περάτωση

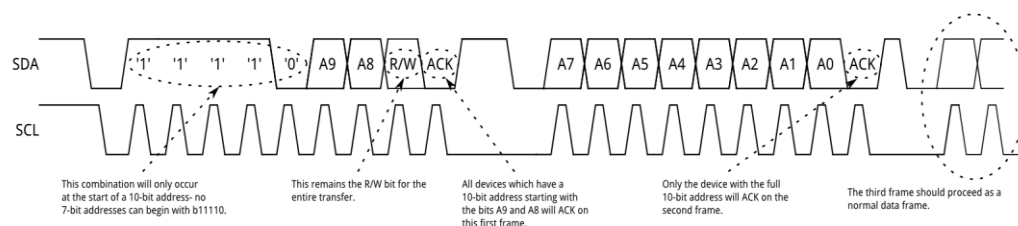


των λειτουργιών ανάγνωσης/εγγραφής. Αφού σταλούν τα bit διεύθυνσης και επαλήθευσης ακολουθεί η αποστολή των πραγματικών δεδομένων.

Τα δεδομένα τοποθετούνται στην γραμμή SDA είτε από την συσκευή master εφόσον πρόκειται για εγγραφή είτε από την συσκευή slave εάν πρόκειται για ανάγνωση. Συνοψίζοντας η βασική ακολουθία εντολών μεταξύ master και slave συσκευής είναι :

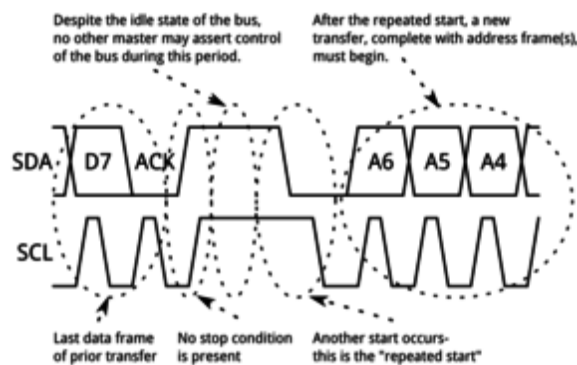
1. Αποστολή START bit
2. Αποστολή slave address
3. Αποστολή bit ανάγνωσης/εγγραφής 1/0
4. Αναμονή bit επαλήθευσης (Acknowledgment)
5. Αποστολή πραγματικών δεδομένων (8 bits)
6. Αναμονή bit επαλήθευσης
7. Αποστολή STOP bit

Σε προχωρημένα πρωτόκολλα που χρησιμοποιούν 10 bits για την διευθυνσιοδότηση, η επικοινωνία master-slave συσκευών απαιτεί την αποστολή δυο δομών διευρύνοντας τον αριθμό των πιθανών συσκευών. Τόσο οι διευθύνσεις των 10bit όσο και των 7bit μπορούν να συνδεθούν στον ίδιο δίαυλο I2C. Η πρώτη δομή περιέχει 5 bits (1110), τα οποία αρχικοποιούν την δομή ακολουθούμενα από το MSB και το 8<sup>ο</sup> bit της διεύθυνσης της slave συσκευής. Συνεπώς όλες οι slave συσκευές που η διεύθυνση τους ξεκινάει με τα δυο bit του πρώτης δομής (6<sup>ο</sup> και 7<sup>ο</sup> bit) θα αποστείλουν μια επιβεβαίωση λήψης (ACK). Όταν ολοκληρωθεί η επαλήθευση των πρώτων bits διεύθυνσης αμέσως ξεκινάει η μετάδοση μιας δεύτερης δομής όπου περιέχει τα υπόλοιπα (7:0) bits διεύθυνσης της slave συσκευής. Εν τέλει μόνο η συσκευή που θα περιέχει ακριβώς και τα δέκα bit διεύθυνσης θα αποστείλει επιβεβαίωση στην master συσκευή για να ξεκινήσει η αποστολή των πραγματικών δεδομένων από ή προς την master συσκευή ανάλογα με το bit ανάγνωσης/εγγραφής.



Σχήμα 1-13. I2C 10bits

Σε πολλές περιπτώσεις η master συσκευή θα πρέπει να συνεχίσει να στέλνει δεδομένα χωρίς να αφήνει άλλες master συσκευές να παρέμβουν στον δίαυλο και χωρίς να θέτει κάποια συνάρτηση τερματισμού. Σε μια τέτοια περίπτωση εφαρμόζεται η επαναλαμβανόμενη συνθήκη έναρξης. Η συσκευή master θέτει την γραμμή SDA σε λογικό ένα την στιγμή που το ρολόι βρίσκεται στο λογικό μηδέν, ώστε έπειτα να δημιουργήσει και πάλι μια συνθήκη έναρξης θέτοντας την γραμμή SDA στο λογικό μηδέν για θετικό χτύπο ρολογιού της γραμμής SCL. Συνεπώς η προηγούμενη επικοινωνία δεν τερματίστηκε και η master συσκευή συνεχίζει να διατηρεί δεσμευμένο τον δίαυλο. Στην συνέχεια συνεχίζεται η μετάδοση των πραγματικών δεδομένων όπως έχει προαναφερθεί.



Σχήμα 1.14 I2C repeated start condition

Τέλος υπάρχουν περιπτώσεις που οι slave συσκευές είτε αδυνατούν να απαντήσουν είτε απαιτούν περισσότερο χρόνο για να διαθέσουν τα δεδομένα τους προς τις master συσκευές. Τέτοιες μπορεί να είναι η αναμονή του slave για μια μετατροπή analog-to-digital ή μια EEPROM μνήμη να χρειάζεται περισσότερο χρόνο για την εγγραφή κ.α. Το “τέντωμα” του ρολογιού (clock stretching) αποτελεί μία τεχνική αντιμετώπισης όπου το σήμα του ρολογιού διατηρείται στο λογικό μηδέν για ένα χρονικό διάστημα. Παρόλο που την γραμμή SCL την χειρίζεται η master συσκευή, η απευθυνόμενη slave συσκευή είναι αυτή που θα διατηρήσει την γραμμή στο λογικό μηδέν μέχρις ότου ολοκληρώσει τις λειτουργίες της.

## 1.2 Αρχές Σχεδίασης Ενσωματωμένων Συστημάτων

Διαφορετικά ενσωματωμένα συστήματα έχουν απαιτήσεις που διαφέρουν σημαντικά τόσο σε επίπεδο εφαρμογής όσο και σε επίπεδο υλικού. Οι απαιτήσεις της εφαρμογής καθορίζουν το σχεδιασμό του ενσωματωμένου συστήματος και έτσι η διεπαφή του με εξωτερικό εξοπλισμό κυριαρχούν στο σχεδιασμό του συστήματος. Με λίγα λόγια το τι λειτουργίες θα πραγματοποιεί το ενσωματωμένο σύστημα, το πώς και για πόσο διάστημα είναι μερικοί παράμετροι που αποτελούν μια σημαντική πηγή δυσκολίας στην σχεδίαση του ενσωματωμένου συστήματος. Μερικοί παράμετροι που πρέπει να υπολογισθούν είναι η επιλογή του υλικού, η μείωση της κατανάλωσης, η επεκτασιμότητα, η αξιοπιστία [7].

### Επιλογή του υλικού

Η επιλογή του υλικού είναι συνυφασμένη με την ποσότητα της υπολογιστικής ισχύος που εφαρμόζεται σε ένα ενσωματωμένο σύστημα. Η επιλογή μπορεί να γίνει όχι μόνο όσον αφορά τον μικροελεγκτή αλλά και την ποσότητα της μνήμης, τις περιφερειακές συσκευές. Έτσι οι περιορισμοί στο κόστος αλλά και την απόδοση προϋποθέτει την σωστή επιλογή του υλικού. Συνεπώς η επιλογή ενός συστήματος με περιορισμένο υλικό μπορεί να αποτύχει στις απαιτήσεις (business requirements) αλλά από την άλλη η επιλογή ενός συστήματος με αυξημένο υλικό μπορεί να οδηγήσει σε πολύ μεγάλο κόστος.

### Μείωση της κατανάλωσης

Σε ενσωματωμένα συστήματα που χρησιμοποιούν μπαταρίες η κατανάλωση ενέργειας είναι εξαιρετικά σημαντική τόσο για το κόστος όσο και για την εκροή θερμότητας. Έτσι ένας τρόπος για την μείωση της κατανάλωσης είναι είτε η επιβράδυνση της λειτουργίας του ενσωματωμένου συστήματος είτε η περιοδική λειτουργία του, θέτοντας το σε κατάσταση ύπνου (sleep mode). Όμως απαιτείται προσεκτικός σχεδιασμός για την επιβράδυνση των μη κρίσιμων τμημάτων του ενσωματωμένου συστήματος έτσι ώστε να εξακολουθεί να είναι λειτουργικό και να πληροί τις απαραίτητες επιδόσεις.

### Επεκτασιμότητα

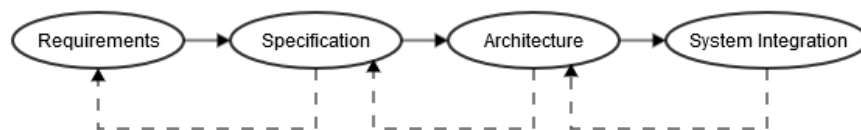
Ένα ενσωματωμένο σύστημα μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πολλά διαφορετικά προϊόντα ή για πολλές διαφορετικές εκδόσεις του ίδιου προϊόντος με μικρές ή μεγάλες αλλαγές. Ωστόσο θα πρέπει να υπάρχει η δυνατότητα να προστεθούν επιπρόσθετες λειτουργίες μεταβάλλοντας το λογισμικό. Συνεπώς θα πρέπει να σχεδιαστεί με τέτοιο τρόπο όπου θα παρέχει την απαιτούμενη επίδοση και για μελλοντικές αλλαγές.

### Αξιοπιστία-Real Time χρήση

Σε επίπεδο παραγωγής ο χρήστης-καταναλωτής απαιτεί το ενσωματωμένο σύστημα όχι απλά να δουλεύει αλλά να το κάνει και σωστά ιδιαίτερα σε συστήματα κρίσιμης σημασίας για την ασφάλεια. Τα ενσωματωμένα συστήματα θα πρέπει να λειτουργούν σε πραγματικό χρόνο (real-time). Ο χρόνος της παραγωγής και της διάθεσης των δεδομένων είτε σε μια άλλη συσκευή είτε στον τελικό χρήστη είναι κρίσιμος παράγοντας σε τομείς όπως η αυτοματοποιημένη παραγωγή, η ιατρική ο οποίος μπορεί να θέσει σε κίνδυνο ζωές.

### Φυσικό μέγεθος

Το φυσικό μέγεθος των ενσωματωμένων συστημάτων διαφέρει και εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το είδος των εφαρμογών. Μια φορητή συσκευή, όπως και ένα βιομηχανικό εξάρτημα στην γραμμή παραγωγής ακολουθούν αυστηρούς περιορισμούς τόσο στο φυσικό μέγεθος όσο και στο βάρος.



Σχήμα 1.15 Embedded System Design Flow

## 1.3 Σχεδιασμός ενσωματωμένου συστήματος

Ο σχεδιασμός ενός ενσωματωμένου συστήματος περιλαμβάνει μια σειρά βημάτων τα οποία συμβάλουν στην αποδοτική ανάπτυξη του συστήματος. Διαιρώντας και ελέγχοντας σε βήματα την ανάπτυξη του συστήματος καθ' όλη την διάρκεια μέχρι το επίπεδο της παραγωγής συμβάλλει στην καταγραφή των αποτελεσμάτων, στον έλεγχο του καθώς και τα άτομα που συμμετέχουν στην σχεδίαση του επικοινωνούν καλύτερα.

### Requirements

Η συλλογή των απαιτήσεων αποτελεί το πρώτο βήμα για το σχεδιασμό ενός ενσωματωμένου συστήματος. Εμπεριέχει όλες τις πληροφορίες, όπως περιγράφονται από τους πελάτες, για τον προσδιορισμό των αναγκών των χρηστών δηλαδή όλες τις περιπτώσεις χρήσης του ενσωματωμένου.

### Requirements Analysis and Specification

Μετά την συλλογή των απαιτήσεων ακολουθεί η ανάλυση τους και η παραγωγή των προδιαγραφών. Ο διαχωρισμός αυτός γίνεται διότι πολλές φορές οι απαιτήσεις των πελατών μπορεί να είναι μη-ρεαλιστικοί είτε αφορά την υλοποίηση είτε το κόστος. Με λίγα λόγια αποτελεί την μετάφραση από την γλώσσα του πελάτη στην γλώσσα του σχεδιαστή. Με την παραγωγή των προδιαγραφών (specification) γίνεται λεπτομερής αναπαράσταση των περιπτώσεων χρήσης του ενσωματωμένου. Συνεπώς με την ολοκλήρωση αυτού του βήματος τόσο ο πελάτης είναι σίγουρος για την ικανοποίηση των αναγκών του όσο και ο σχεδιαστής για την σχεδίαση του συστήματος.

### Architecture - Components

Η αρχιτεκτονική αποτελεί το πρώτο βήμα για τον σχεδιαστή. Ενώ στην περίπτωση του requirements analysis and specification περιγράφεται το τι κάνει το σύστημα, στο βήμα αυτό η αρχιτεκτονική περιγράφει την συνολική δομή, το πώς το σύστημα υλοποιεί αυτές τις προδιαγραφές και εν τέλει τα εξαρτήματα (components) του συστήματος. Μια πλήρης αρχιτεκτονική περιγράφει εξίσου τα επίπεδα σχεδίασης του υλικού (hardware) και του λογισμικού (software). Οι αρχιτεκτονικές περιγραφές θα πρέπει να σχεδιαστούν να ικανοποιούν τόσο τις λειτουργικές όσο και τις μη λειτουργικές απαιτήσεις συνδέοντας ένα πλήθος από εξαρτήματα. Μερικά από τα εξαρτήματα είτε εμφανίζονται ως έτοιμες λύσεις όπως είναι ένας μικροελεγκτής, ένας δέκτης GPS είτε σαν προσαρμοσμένα ολοκληρωμένα κυκλώματα όπως η δημιουργία ενός κυκλώματος για την διασύνδεση διάφορων εξαρτημάτων.

### System Integration

Όταν τα εξαρτήματα κατασκευαστούν το επόμενο βήμα περιλαμβάνει την διασύνδεση των εξαρτημάτων μεταξύ τους καθώς και τον έλεγχο τους. Αποτελεί μια αρκετά απαιτητική διαδικασία η οποία φέρνει στην επιφάνεια προβλήματα στην υλοποίηση (bugs) και η επίλυση αυτών εξαρτάται από την σωστή οργάνωση (architecture) του ενσωματωμένου συστήματος. Η μείωση των bugs κατά το integration μπορεί να επιτευχθεί με τον σταδιακό έλεγχο και την πιθανή λύση των επιμέρους bugs από τα αρχικά κίολας βήματα για τον σχεδιασμό ενός ενσωματωμένου συστήματος.

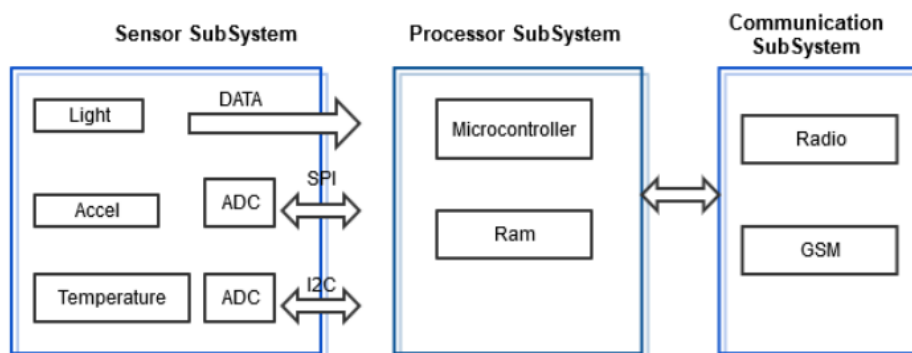
## 2. Ασύρματο Δίκτυο Αισθητήρων

Ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων (WSN) είναι ένα δίκτυο όπου αποτελείται από αυτόνομες συσκευές που χρησιμοποιούν αισθητήρες με σκοπό την καταγραφή και παρακολούθηση φυσικών και περιβαλλοντικών φαινομένων. Τα ασύρματα δίκτυα με αισθητήρες έχουν εφαρμογή σε τομείς όπως η υγειονομική περίθαλψη, βελτιώνοντας την παρακολούθηση και περίθαλψη των ασθενών, οι επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας όπως το ηλεκτρικό δίκτυο, η ηλεκτροδότηση των δρόμων, ο έλεγχος ατμοσφαιρικών ρύπων, ο έλεγχος ποιότητας του νερού, τα αρδευτικά συστήματα.

Τα πρώτα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων αναπτύχθηκαν για στρατιωτικούς σκοπούς από τον στρατό των Η.Π.Α οργανώνοντας το 1978 το τμήμα Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA) με σκοπό την έρευνα τεχνολογιών δικτύωσης, τεχνικές επεξεργασίας σήματος, καταγεγραμμένων αλγορίθμων μέσα από το πρόγραμμα Distributed Sensor Networks (DSN). Στην συνέχεια ακολούθησαν αυτή την έρευνα και ακαδημαϊκά ιδρύματα όπως το University of California στο Los Angeles, όπου το 1996 κατασκεύασε ένα χαμηλής κατανάλωσης ασύρματο δίκτυο, το University of California στο Berkley δημιουργώντας ένα ολοκληρωμένο σύστημα αισθητήρων μικρού μεγέθους με την ονομασία mote. Η έρευνα συνεχίστηκε δημιουργώντας ασύρματα δίκτυα αισθητήρων των οποίων η κατανάλωση ενέργειας ήταν τόσο μικρή ώστε να μπορούν να τροφοδοτηθούν από πηγές του περιβάλλοντος όπως είναι η ηλιακή ή η δόνηση. Ήδη από το 2000 αυτή η έρευνα χρησιμοποιήθηκε και από εταιρείες με σκοπό την εμπορική χρήση των ασύρματων δικτύων αισθητήρων παρέχοντας ολοκληρωμένα συστήματα αισθητήρων μαζί με διάφορα εργαλεία διαχειρίσεις, προγραμματισμού και συντήρησης τους για την κατασκευή διάφορων εφαρμογών [8].

### 2.1 Δομικά χαρακτηριστικά

Στην σημερινή εποχή έχουν αναπτυχθεί εκατομμύρια δίκτυα αισθητήρων αποτελούμενα από κόμβους. Η εφαρμογή τους ποικίλει για διαφορετικές εφαρμογές είτε αφορά την συλλογή δεδομένων είτε τον έλεγχο πολύπλοκων συστημάτων. Ωστόσο η λειτουργικότητα τους στηρίζεται σε 3 βασικά μέρη, το υποσύστημα αισθητήρων για την απόκτηση των δεδομένων, το υποσύστημα για την επεξεργασία των δεδομένων και το υποσύστημα επικοινωνίας για την μεταφορά των δεδομένων.



Σχήμα 2-1. Wireless Sensor Network

- **Υποσύστημα αισθητήρων**

Αποτελείται από τους ίδιους τους αισθητήρες (φωτός, θερμοκρασίας, πίεσης), όπου στόχο έχουν την καταγραφή των συνθηκών. Συνεπώς ποσοτικοποιεί το φυσικό φαινόμενο σε ηλεκτρική ενέργεια μετατρέποντας το σε ένα αναλογικό σήμα. Οι αισθητήρες είτε είναι ψηφιακοί όπου στην περίπτωση των ψηφιακών εμπεριέχουν έναν μετατροπέα αναλογικού σήματος σε ψηφιακό (analog to digital converter ADC) είτε είναι αναλογικοί όπου η επιλογή του ADC μετατροπέα έχει άμεση συνέπεια με την ακρίβεια της μέτρησης. Για παράδειγμα εάν απαιτείται η παρακολούθηση της διαφοράς θερμοκρασίας με προσέγγιση αρκετών δεκαδικών θα πρέπει να επιλεγεί ADC μετατροπέας αντίστοιχων bit.

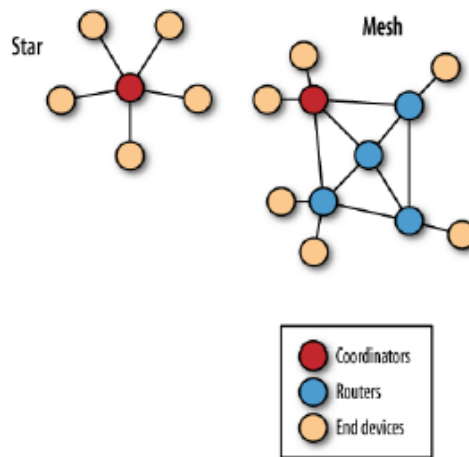
- **Υποσύστημα επεξεργασίας**

Αυτό το σύστημα είναι η βασική μονάδα ενός κόμβου ενοποιώντας όλα τα υποσυστήματα. Αποτελείται από τον μικροελεγκτή όπου περιέχει μέσα αποθήκευσης τόσο για την εκτέλεση των εντολών του ολοκληρωμένου κυκλώματος όσο και για την αποθήκευση των δεδομένων από τους αισθητήρες. Όπως η επιλογή ενός μικροελεγκτή είναι ζωτικής σημασίας για την απόδοση και κατανάλωση του κόμβου έτσι και ο τρόπος διασύνδεσης των υποσυστημάτων με αυτόν αποτελεί σημαντικό παράγοντα. Συνεπώς μια παράλληλη επικοινωνία είναι αρκετά πιο γρήγορη αλλά απαιτεί περισσότερο χώρο σε αντίθεση με έναν συριακό δίαυλο όπου χρειάζεται μία γραμμή δεδομένων. Οι πιο διαδεδομένοι τρόποι διασύνδεσης είναι το Serial Peripheral Interface (SPI) και το I2C (Inter-Integrated Circuit) ωστόσο υπάρχουν και το General purpose input/output (SDIO) και Universal Serial Bus (USB).

- **Υποσύστημα επικοινωνίας**

Εμπεριέχει τον πομποδέκτη τόσο για την μεταφορά των δεδομένων όσο και για την ανίχνευση της θέσης, της κατάστασης του κόμβου μέσα στο δίκτυο. Διαφορετικά συστήματα επικοινωνίας (Bluetooth, ZigBee, GPS-GPRS, WIFI) χρησιμοποιούνται ανάλογα με την απόσταση επικοινωνίας του δικτύου τόσο με τον ίδιο του τον εαυτό όσο και με τον έξω κόσμο. Τα πρωτόκολλα επικοινωνίας που χρησιμοποιούνται καταναλώνουν την περισσότερη ενέργεια στον κόμβο και συνεπώς έχουν αναπτυχθεί τεχνικές αδράνειας για την περίοδο που δεν υπάρχουν δεδομένα προς αποστολή ή προς λήψη.

Μέχρι πριν από λίγα χρόνια χρησιμοποιούνταν το γνωστό πρωτόκολλο IEEE 802.11 για την επικοινωνία των κόμβων χρησιμοποιώντας συχνότητες των 2.4GHz και 5GHz και το οποίο χρησιμοποιείται σήμερα μόνο όταν απαιτείται υψηλός ρυθμός μεταφοράς δεδομένων (high bandwidth). Ωστόσο η υψηλή κατανάλωση ενέργειας του IEEE 802.11 καθιστά αυτό το πρότυπο ακατάλληλο για δίκτυα αισθητήρων χαμηλής ενέργειας και αυτό οδήγησε στην δημιουργία διαφορετικών πρωτοκόλλων με χαμηλή κατανάλωση και ρυθμό δεδομένων όπως το IEEE 802.15.4. Εκτός από τα πρότυπα επικοινωνίας ένα επιπλέον χαρακτηριστικό είναι ο τρόπος που επικοινωνούν οι κόμβοι δηλαδή η λογική σύνδεση μεταξύ αυτών ο οποίος καθορίζει και την τοπολογία του δικτύου.



Σχήμα 2-2. WSN Topology

### Τοπολογία Αστέρα (Star)

Αυτού του είδους η τοπολογία χρησιμοποιεί ένα συντονιστή (coordinator) και διάφορες απομακρυσμένες συσκευές. Ο συντονιστής συνήθως βρίσκεται στο κέντρο με σκοπό την λήψη και την προώθηση των μηνυμάτων μεταξύ των απομακρυσμένων συσκευών όπου βρίσκονται σε κυκλική διάταξη και άρα λειτουργεί σαν αναμεταδότης των μηνυμάτων. Συνεπώς οι απομακρυσμένες συσκευές δεν επικοινωνούν μεταξύ τους αλλά μόνο μέσω του συντονιστή. Η τοπολογία αστέρα θεωρείται η ευκολότερη τοπολογία τόσο στον σχεδιασμό όσο και στην υλοποίηση με βασικό πλεονέκτημα την απλότητα της προσθήκης επιπλέον κόμβων. Μερικά μειονεκτήματα αυτής της τοπολογίας είναι η συμφόρηση που μπορεί να δημιουργηθεί αυξάνοντας τον αριθμό των απομακρυσμένων συσκευών, η δυσκολία ένωσης του δικτύου με άλλες τοπολογίες καθώς και ενδεχόμενο πρόβλημα σε έναν κόμβο μπορεί να οδηγήσει σε κατάρρευση του δικτύου.

### Τοπολογία Πλέγματος (Mesh)

Αυτού του είδους η τοπολογία χρησιμοποιεί ένα συντονιστή (coordinator), δρομολογητές (routers) και διάφορες απομακρυσμένες συσκευές. Ένα δίκτυο πλέγματος μπορεί είτε να είναι πλήρως συνδεδεμένο ( Fully connected network) είτε μερικώς συνδεδεμένο (Partially connected network). Σε ένα πλήρως συνδεδεμένο όλοι οι κόμβοι είναι συνδεδεμένοι μεταξύ τους και οι απαιτούμενες ζεύξεις δίνονται από τον τύπο και άρα αποτελεί κακή πρακτική για μεγάλα δίκτυα. Σε ένα μερικώς συνδεδεμένο δίκτυο μερικοί κόμβοι είναι συνδεδεμένοι ένα προς ένα και άλλοι συνδέουν δύο και περισσότερους κόμβους. Τα μηνύματα αποστέλλονται από και προς τον συντονιστή διαμέσου των δρομολογητών. Συνήθως χρησιμοποιείται αυτή η τοπολογία όταν οι απομακρυσμένες συσκευές απέχουν αρκετά μέτρα από τον συντονιστή αλλά και για την ασφάλεια του δικτύου καθώς μια βλάβη σε έναν κόμβο δεν αποτελεί κίνδυνο για το δίκτυο.

$$c = \frac{n(n-1)}{2}$$

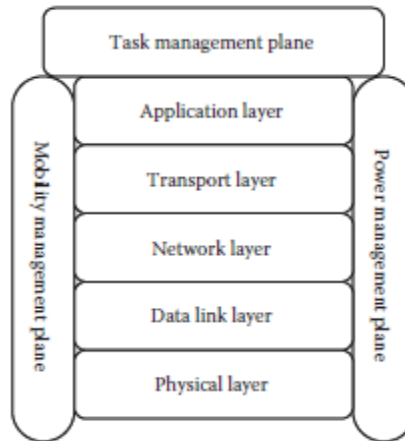
Όπου:

c : ο αριθμός των ζεύξεων

n : ο αριθμός των κόμβων

## 2.2 Επίπεδα λειτουργίας ασύρματων δικτύων

Ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων όπως αναφέρθηκε αποτελείται από κόμβους όπου επικοινωνούν μεταξύ τους, ωστόσο τόσο η επικοινωνία όσο και η λειτουργία του βασίζεται σε διάφορα επίπεδα λειτουργίας ή αλλιώς μια σωρό πρωτοκόλλων (protocol stack)[9].



Σχήμα 2-3. WSN protocol

- *Physical Layer*

Σκοπός του φυσικού επιπέδου είναι να αυξάνει την αξιοπιστία του μέσου μειώνοντας τις απώλειες κατά την μετάδοση. Μετατρέπει μια σειρά bits από το data link layer σε σήμα κατάλληλο προς μετάδοση στην ζώνη των 915MHZ (industrial band for WSN). Αυτό το επίπεδο είναι υπεύθυνο για την δημιουργία σύνδεσης, των ρυθμό των δεδομένων, την διαμόρφωση, την κρυπτογράφηση, την ανίχνευση σήματος και την παραγωγή συχνότητας. Συνεπώς το υλικό που αναπτύσσεται για αυτές τις λειτουργίες θα πρέπει να είναι χαμηλής κατανάλωσης, μικρό σε μέγεθος και φθινό σε κόστος.

- *Data Link Layer*

Ο στόχος αυτού του επιπέδου είναι να εξασφαλίζει την λειτουργικότητα της επικοινωνίας μεταξύ των κόμβων όντας υπεύθυνο για την ανίχνευση σφαλμάτων, την πολυπλεξία, την πρόληψη της σύγκρουσης πακέτων, την επαναλαμβανόμενη μετάδοση. Χρησιμοποιώντας την διεύθυνση ελέγχου προσπέλασης στο μέσο (Media Access Control) εγκαθιστά την επικοινωνία μεταξύ των κόμβων.

- *Network Layer*

Ο στόχος αυτού του επιπέδου είναι να αναζητά την βέλτιστη διαδρομή αποστολής των δεδομένων για αποτελεσματική δρομολόγηση. Η δρομολόγηση μπορεί να αφορά την επικοινωνία μιας απομακρυσμένης συσκευής κατευθείαν με τον σταθμό βάσης ή μέσω ενός δρομολογητή (single – multi hop communication). Οι κόμβοι αναπτύσσονται με τέτοιο τρόπο ώστε να υπάρχει μικρή απόσταση μεταξύ τους. Τέλος τεχνικές κρυπτογράφησης και αποκρυπτογράφησης χρησιμοποιούνται για ασφαλή δρομολόγηση.



- *Transport Layer*

Σκοπός αυτού του επιπέδου είναι η διασύνδεση του ασύρματου δικτύου αισθητήρων με εξωτερικά δίκτυα όπως το Internet. Η σύνδεση μεταξύ του δικτύου αισθητήρων και του Internet μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω TCP/UDP πρωτόκολλο αλλά η επικοινωνία μεταξύ των αισθητήρων γίνεται αποκλειστικά μόνο μέσω UDP πρωτόκολλο. Το TCP χρησιμοποιεί διάφορους μηχανισμούς ούτως ώστε να διασφαλιστεί ότι τα πακέτα που μεταδίδονται από τον αποστολέα θα φτάσουν σίγουρα στον παραλήπτη και στην σωστή σειρά. Ωστόσο θεωρείται ιδιαίτερα βαρύ σε σχέση με το UDP το οποίο δεν εφαρμόζει όλους τους μηχανισμούς αξιόπιστης επικοινωνίας και συνεπώς το κάνει πιο γρήγορο.

- *Application Layer*

Το επίπεδο εφαρμογής χρησιμοποιεί τα πρωτόκολλα διαχείρισης αισθητήρων (SMPs, TADAP), τα οποία χρησιμοποιούνται για την διαχείριση των εργασιών των αισθητήρων. Τα πρωτόκολλα αυτά παρέχουν τη διάδοση ερωτήσεων στους κόμβους, την ασφάλεια των δεδομένων, τον εντοπισμό και τον συγχρονισμό των κόμβων του δικτύου. Στην περίπτωση του SMP οι αισθητήρες μπορούν να προσπελαστούν χρησιμοποιώντας χαρακτηριστικά ονοματοδοσίας για την διεκπεραίωση των λειτουργιών. Το TADAP αντίστοιχα είναι ένας τρόπος ενημέρωσης του κόμβου ότι υπάρχουν ερωτήματα προς αποστολή και εν τέλει την αναμονή της απάντησης από τον κόμβο.

## 2.3 Σχεδιασμός ασύρματου δικτύου αισθητήρων

Ο σχεδιασμός ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων αποτελεί μια πολυδιάστατη διαδικασία καθώς συνδυάζει τεχνολογίες από διάφορα πεδία όπως είναι οι τηλεπικοινωνίες, η ηλεκτρονική, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Ο αποδοτικός σχεδιασμός τόσο σε επίπεδο υλικού όσο και λογισμικού (πρωτόκολλα επικοινωνίας) επηρεάζει την ζωή και την λειτουργία του. Συνεπώς παράμετροι όπως η κίνηση του δικτύου, η τοπολογία, η ανοχή στα σφάλματα, η κατανάλωση, το κόστος παραγωγής θα πρέπει να συνυπολογιστούν κατά την σχεδίαση ενός αποδοτικού ενεργειακά συστήματος

- *Περιορισμοί στο υλικό*

Το υλικό όπως οι μικροελεγκτές, οι αισθητήρες, οι ραδιοπομποί, οι μετατροπείς (ADC) αποτελούν τα κύρια μέρη ενός ΑΔΑ και η επιλογή τους σχετίζεται με την κατανάλωση στο χρόνο. Τεχνικές σχεδίασης όπως η κατάσταση ύπνου συσκευής (sleep mode) ενδέχεται η ύπαρξη επιπλέον μνήμης να είναι απαραίτητη. Τέλος ο έλεγχος του υλικού τόσο στο εργαστήριο όσο και στις πραγματικές συνθήκες (το μέρος που θα εγκατασταθεί το ΑΔΑ) είναι απαραίτητος καθώς ένας δοκιμασμένος αισθητήρας στο εργαστήριο μπορεί να μην λειτουργεί το ίδιο σωστά και σε διαφορετικές συνθήκες.

- *Κίνηση και τοπολογία δικτύου*

Η κίνηση του δικτύου μπορεί να είναι συνεχής ή περιοδική και συνεπώς στις περιπτώσεις που δεν υπάρχουν δεδομένα να “ρέουν” στο δίκτυο, ορισμένοι κόμβοι μπορούν να τεθούν σε κατάσταση ύπνου προς εξοικονόμηση ενέργειας. Ωστόσο για εφαρμογές που απαιτείται συνεχής παρακολούθηση των συνθηκών κάτι τέτοιο δεν μπορεί να συμβεί και έτσι επιλέγεται η ομοιόμορφη κατανομή του φορτίου στο δίκτυο. Αυτή η κατανομή μπορεί να επιτευχθεί μέσα από

ένα δίκτυο τοπολογίας πλέγματος στο οποίο η δειγματοληψία από πολλούς κόμβους οι οποίοι επικοινωνούν όλοι μεταξύ τους αυξάνει την κατανάλωση ενέργειας. Εν τέλει ο τύπος της εφαρμογής θα καθορίσει το είδος της τοπολογίας.

- *Ποιότητα της υπηρεσίας και αξιοπιστία*

Ο χρόνος από την καταγραφή μέχρι την αποστολή των μετρήσεων από τους αισθητήρες καθορίζει την ποιότητα της υπηρεσίας σε ένα ΑΔΑ. Ωστόσο δεν αρκεί οι μετρήσεις να αποστέλλονται γρήγορα αλλά να είναι και αξιόπιστες. Όσο ο χρόνος εκτέλεσης και παράδοσης μειώνεται αυξάνεται η ποιότητα, το κόστος και η καταναλισκόμενη ενέργεια. Συνεπώς η ποιότητα των υπηρεσιών και η κατανάλωση ισχύος επηρεάζουν το ένα το άλλο. Η τελική επιλογή του ορίου αντιστάθμισης μεταξύ μιας ποιοτικής υπηρεσίας με μεγάλη κατανάλωση εν αντιθέσει της χαμηλής κατανάλωσης με κόστος την ποιότητα εξυπηρέτησης εξαρτάται από την εφαρμογή.

- *Αυτοδιαχείριση*

Σε περιπτώσεις που κάποιος κόμβος δυσλειτουργεί, το σύστημα δεν θα πρέπει να καταρρεύσει αλλά να συνεχίσει να δουλεύει και να αποστέλλει σωστά δεδομένα και άρα να είναι αυτορρυθμιζόμενο. Συνεπώς θα πρέπει είτε να προσαρμόζει έναν νέο κόμβο στο δίκτυο είτε να διατηρεί την υπάρχουσα τοπολογία όπου στην περίπτωση ενός κόμβου δρομολογητή θα αναθέτει τις δρομολογήσεις σε άλλους κόμβους.

- *Ευελιξία και πυκνότητα δικτύου*

Πυκνότητα δικτύου ορίζεται ο αριθμός των κόμβων ανά τετραγωνικό εντός του εύρους του δικτύου. Εξαρτάται από το εύρος μετάδοσης των κόμβων, του δικτύου και την περιοχή κάλυψης. Σε ένα πυκνό δίκτυο με πολλούς κόμβους υπάρχει τόσο η ανοχή της δυσλειτουργίας των κόμβων με το κόστος της αύξησης της καταναλισκόμενης ενέργειας όσο και της ακριβής μέτρηση των φαινομένων.

- *Κόστος παραγωγής*

Το κόστος παραγωγής ενός κόμβου επηρεάζει το κόστος ολόκληρου του ΑΔΑ. Συνεπώς ο κάθε κόμβος θα πρέπει να είναι όσο το δυνατό λιγότερο ακριβός, στην παραγωγή αλλά και στην συντήρηση του διατηρώντας την αξιοπιστία, και την χαμηλή κατανάλωση. Συνεπώς το κόστος παραγωγής επηρεάζει την σχεδίαση του τόσο στο υλικό όσο και στο λογισμικό.

- *Ασφάλεια*

Ο σχεδιασμός ενός ασφαλούς ΑΔΑ περιλαμβάνει την προστασία από απειλές όπως η φθορά των μηνυμάτων και η δυσλειτουργία των κόμβων, η υποκλοπή εμπιστευτικών δεδομένων, η ύπαρξη εικονικών κόμβων. Επομένως χρειάζεται ένας κατάλληλος μηχανισμός ασφαλείας πιστοποίησης ταυτότητας, ακεραιότητας των δεδομένων λαμβάνοντας υπόψη παράγοντες όπως η απόδοση του συστήματος, η χωρητικότητα μνήμης, η καταναλισκόμενη ενέργεια, το περιβάλλον και η περίπτωση χρήσης του ΑΔΑ.

- *Καταναλισκόμενη ενέργεια*

Η διάρκεια ζωής ενός κόμβου σε ένα δίκτυο εξαρτάται από την πηγή τροφοδοσίας δηλαδή την μπαταρία. Κάθε διεργασία που εκτελείται σε ένα ΑΔΑ από την συλλογή, την επεξεργασία μέχρι και την αποστολή των δεδομένων καταναλώνει ενέργεια. Η κατανάλωση ενέργειας κατά την μετάδοση ενός δυαδικού ψηφίου είναι περίπου ίση με την ενέργεια που απαιτείται για τον υπολογισμό μερικών χιλιάδων εντολών του μικροελεγκτή [10]. Συνεπώς η ενέργεια που καταναλώνει το υποσύστημα επικοινωνίας (2.1) ενός κόμβου είναι σημαντικά μεγαλύτερη από αυτή του υποσυστήματος επεξεργασίας.

## 2.4 Τεχνικές εξοικονόμησης ενέργειας

Ο χρόνος ζωής ενός ΑΔΑ εξαρτάται από την χωρητικότητα της μπαταρίας και το φορτίο που καταναλώνει το σύστημα. Ωστόσο το φορτίο που καταναλώνει το σύστημα είναι μεταβλητό ανάλογα τον τρόπο δόμησης και λειτουργίας του. Όπως φαίνεται στο διάγραμμα τεχνικές εξοικονόμησης ενέργειας μπορούν να εφαρμοστούν σε όλα τα επίπεδα σχεδίασης και δομικών χαρακτηριστικών του ΑΔΑ.

$$Lifetime = \frac{Battery\ capacity\ (mA_{hr})}{Current\ consumption\ of\ load\ (mA)}$$

- *Διαχείριση ενέργειας*

Η διαχείριση ενέργειας σε ένα ΑΔΑ περιλαμβάνει τεχνικές δυναμικής κατανάλωσης ανάλογα με το φόρτο εργασίας. Για εφαρμογές στην ιατρική ο αισθητήρας όπου θα πρέπει να λειτουργεί γρηγορότερα η κατανάλωση ενέργειας είναι σαφώς μεγαλύτερη από αισθητήρες μέτρησης καιρικών φαινομένων. Η δυναμική διαχείριση ενέργειας εφαρμόζεται τόσο σε επίπεδο υλικού όσο και σε επίπεδο λογισμικού, αλλάζοντας την λειτουργική κατάσταση του συστήματος ανάλογα με το φορτίο και θέτοντας διάφορα εξαρτήματα εκτός λειτουργίας ή σε αδράνεια. Μια δεύτερη τεχνική αποτελεί η δυναμική κλιμάκωση της συχνότητας του μικροελεγκτή καθώς για διαφορετικές συχνότητες υπάρχουν αντίστοιχα επίπεδα τάσης άρα και κατανάλωσης ενέργειας. Όσον αφορά το λογισμικό τεχνικές χρονοδρομολόγησης (scheduling) των διεργασιών αναπτύσσονται κατά τρόπο που να ενισχύει την ενεργειακή απόδοση. Τέλος ο αισθητήρας που υλοποιείται από την δυναμική διαχείριση ενέργειας παρακολουθεί το φορτίο εισόδου, το ρυθμό άφιξης καθώς και την ταχύτητα εκ φόρτισης της μπαταρίας του κόμβου με σκοπό την μετάδοση των πληροφοριών σε γειτονικό κόμβο όταν πρόκειται να εκφορτιστεί πλήρως.

- *Συλλογή ενέργειας*

Η μείωση της κατανάλωσης σε ένα ΑΔΑ οδήγησε στην ανάπτυξη τεχνικών συλλογής ενέργειας όπως η ηλιακή, η αιολική, η θερμική καθώς και η ενέργεια από ραδιοσυχνότητες. Σε ένα ΑΔΑ η ενέργεια συλλαμβάνεται και αποθηκεύεται σε ηλεκτρική μορφή και με την χρησιμοποίηση επαναφορτιζόμενων μπαταριών πετυχαίνει την αυτοτροφοδότηση του συστήματος. Στην περίπτωση της ηλιακής ενέργειας διάφοροι παράμετροι πρέπει να συνυπολογισθούν όπως η συνολική κατανάλωση τόσο για την μέρα όσο και για την νύχτα, το υψόμετρο, η ατμοσφαιρική πίεση για την σχεδίαση ενός αποδοτικού συστήματος παρακολούθησης μέγιστου σημείου ισχύος (Maximum Power Point Tracking - MPPT). Τέλος ένα μετατροπέας DC-DC χρησιμοποιείται για την παροχή σταθερής τάσης στο σύστημα.

- *Αποδοτική επικοινωνία*

Η αποδοτική επικοινωνία μεταξύ των κόμβων περιλαμβάνει τεχνικές όπως η συγκέντρωση των δεδομένων (data aggregation) σε ενδιαμέσους κόμβους, οι δρομολογήσεις δικτύου, ο έλεγχος της ισχύος μετάδοσης. Σε ένα ΑΔΑ καθώς αυξάνεται ο αριθμός των κόμβων αυξάνεται και ο όγκος των δεδομένων είτε αφορά την μετάδοση είτε την επεξεργασία τους.

Με την συγκέντρωση των δεδομένων δημιουργούνται εσωτερικά στο δίκτυο συμπλέγματα (clusters) τα οποία αναλαμβάνουν την συγκέντρωση των δεδομένων, την επεξεργασία και την αποστολή τους στον κεντρικό κόμβο. Στα δίκτυα clusters ορίζεται δυναμικά ένας κόμβος head όπου αναλαμβάνει να συνδέει το εσωτερικό δίκτυο είτε με το υπόλοιπο δίκτυο είτε με τον κόμβο βάσης. Ο ορισμός του κόμβου ως head γίνεται τόσο με τον υπολογισμό της εναπομείνουσας ενέργειας στο σύμπλεγμα, δηλαδή ο κόμβος που είναι ο πιο ενεργειακά ικανός για δρομολόγηση, όσο και με γεωγραφικά κριτήρια. Συνεπώς σε ένα ΑΔΑ με αρκετούς κόμβους εφαρμόζοντας τοπικά clusters η πληροφορία που αποστέλλετε στον κεντρικό κόμβο είναι αποτέλεσμα συμπιεσμένων συγκεντρωτικών δεδομένων είτε με την μορφή μεγίστου, μέσου όρου, αθροίσματος αναλόγως πάντα και την εφαρμογή.

Οι δρομολογήσεις σε ένα αρκετά μεγάλο ΑΔΑ καθορίζουν σημαντικό ρόλο στην κατανάλωση καθώς υπολογίζουν την βέλτιστη διαδρομή των δεδομένων είτε από τους απομακρυσμένους κόμβους είτε από τα τοπικά δίκτυα στον σταθμό βάσης (κεντρικός κόμβος). Με τον τρόπο αυτό δημιουργείται ένας μηχανισμός ενεργειακής ισοστάθμισης καθώς επιλέγεται κάθε φορά εκείνο το μονοπάτι στο δίκτυο με την μεγαλύτερη ενεργειακή ικανότητα λήψης και μετάδοσης μέχρι τον σταθμό βάσης (Genetic Algorithm-based Routing)[11]. Έτσι οι υπόλοιποι κόμβοι παραμένουν σε κατάσταση ύπνου (sleep mode) ως ότου αποκτήσουν ενεργειακή ικανότητα τουλάχιστον ίση με το μέσο όρο κατανάλωσης ενέργειας του συστήματος.

Πίνακας 2-1. Μηχανισμοί εξοικονόμησης ενέργειας

Διαχείριση Ενέργειας	Συλλογή Ενέργειας	Αποδοτική Επικοινωνία	Κύκλος λειτουργίας
Δυναμική τάση εισόδου	Ηλιακοί συλλέκτες	Δρομολόγηση Δικτύου	MAC protocol
Δυναμική κατανάλωση	Δόνηση	Ομαδοποίηση δεδομένων προς αποστολή	Τεχνικές sleep-wake
Χρονοπρογραμματισμός λειτουργιών	Θερμότητα Ραδιοσυχνότητες	Έλεγχος ισχύος μετάδοσης	

# 3.

## Ενσωματωμένο σύστημα αυτόματου ποτίσματος

---

Στο παρόν κεφάλαιο περιγράφονται αναλυτικά τα μέρη του ενσωματωμένου συστήματος τόσο σε επίπεδο υλικού (hardware) όσο και σε επίπεδο λογισμικού (software). Σκοπός του συστήματος δεν είναι μόνο η καταγραφή των συνθηκών της καλλιεργήσιμης γης, αλλά και η διαδραστική – αμφίδρομη επικοινωνία με τον χρήστη. Ωστόσο η σχεδίαση του ενσωματωμένου συστήματος συνδέεται άρρηκτα από τον τόπο, το είδος και την έκταση της περιοχής. Όπως είναι λογικό η εγκατάσταση ενός ενσωματωμένου συστήματος σε μία απομακρυσμένη περιοχή απαιτεί την αυτονομία σε επίπεδο λειτουργίας και κατανάλωσης ενέργειας. Η περιοχή που εφαρμόστηκε το ενσωματωμένο σύστημα καλύπτει μία έκταση του ενός στρέμματος στα Λουκίσια Ευβοίας, ένα χωριό κτισμένο στα βόρεια του όρους Μεσσήπιου στο νομό Ευβοίας.

### 3. Τα μέρη του συστήματος

Όπως φαίνεται και στο σχήμα 1.1, το σύστημα αποτελείται από τρεις απομακρυσμένες συσκευές αίσθησης (Wireless Sensor Unit) όπου περιέχουν αισθητήρες και είναι υπεύθυνες για την μέτρηση και την ποσοτικοποίηση των περιβαλλοντικών συνθηκών της περιοχής. Την συλλογή των περιβαλλοντικών συνθηκών (εν τέλει των μετρήσεων) την αναλαμβάνει η ασύρματη μονάδα πληροφοριών (Wireless Information Unit). Στη συνέχεια αναλαμβάνει να αποστείλει τις μετρήσεις – δεδομένα σε έναν διακομιστή (server) μέσω του GPRS και του 3G δικτύου. Το WIU αποτελεί το σύστημα ελέγχου αλλά και εντολών του χρήστη όπως είναι η έναρξη του άμεσου ποτίσματος, η συλλογή μετρήσεων, η ρύθμιση αυτόματου αλγορίθμου ποτίσματος. Το συνολικό σύστημα έχει ως βασική πηγή ενέργειας επαναφορτιζόμενες μπαταρίες σε συνδυασμό με ηλιακά πάνελ με στόχο την αυτόνομη ενεργειακή του λειτουργία.

#### 3.1 Απομακρυσμένη Συσκευή Αίσθησης (WSU)

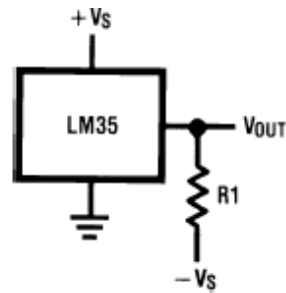
Τα βασικά μέρη που αποτελούν την απομακρυσμένη συσκευή είναι οι αισθητήρες υγρασίας, θερμοκρασίας, υγρασίας εδάφους, καθώς και ένας μικροελεγκτής 8bit της ATMEL της σειράς ATMEGA328P-PU [14]. Ο ρόλος τους μικροελεγκτή είναι τόσο η ενεργοποίηση των αισθητήρων όσο και η ποσοτικοποίηση του φαινομένου σε αριθμητικά μεγέθη. Στη συνέχεια όταν ο μικροελεγκτής αποκτήσει τιμές από τους αισθητήρες, αναλαμβάνει την αποστολή τους στο σταθμό βάσης (WIU) μέσω ραδιοσυχνοτήτων και συγκεκριμένα μέσω ενός ZigBee υλοποιώντας το IEEE 802.15 πρότυπο.

##### 3.1.1 Αισθητήρες

Η απομακρυσμένη συσκευή (WSU) διαθέτει συνολικά τρεις αισθητήρες, έναν ψηφιακό και δύο αναλογικούς. Οι αισθητήρες καταγράφουν την υγρασία του εδάφους, καθώς και την υγρασία και θερμοκρασία τόσο του περιβάλλοντος όσο και της ίδιας της συσκευής.

##### Θερμοκρασία περιβάλλοντος

Για την μέτρηση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος χρησιμοποιήθηκε ο αναλογικός αισθητήρας LM35. Η σειρά LM35 είναι ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα ακριβείας, μέτρησης θερμοκρασίας, όπου η τάση εξόδου είναι γραμμικώς ανάλογη της θερμοκρασίας Κελσίου. Το εύρος λειτουργίας του αισθητήρα είναι από  $-60^{\circ}\text{C}$  ως  $+180^{\circ}\text{C}$  παρέχοντας ακρίβεια μέτρησης  $\pm 3/4^{\circ}\text{C}$  και  $\pm 1/4^{\circ}\text{C}$  για θερμοκρασίες δωματίου [15]. Ο LM35 όπως και κάθε άλλος αισθητήρας θερμοκρασίας μπορεί να τοποθετηθεί σε κάθε επιφάνεια έχοντας απόκλιση  $\pm 0.01^{\circ}\text{C}$  από τη θερμοκρασία της επιφανείας. Σε περίπτωση που η θερμοκρασία του αέρα είναι μεγαλύτερη ή μικρότερη από αυτή της επιφανείας εφαρμογής του αισθητήρα, η πραγματική θερμοκρασία του LM35 θα είναι μια ενδιάμεση τιμή. Για τους παραπάνω λόγους χρησιμοποιήθηκε η αδιάβροχη έκδοση του LM35 έτσι ώστε να είναι ανθεκτικός σε εξωγενείς παράγοντες όπου θα μπορούσαν να επηρεάσουν τις μετρήσεις που πραγματοποιεί (βροχή, υγρασία, διάβρωση, rf transmitters, πηνία).



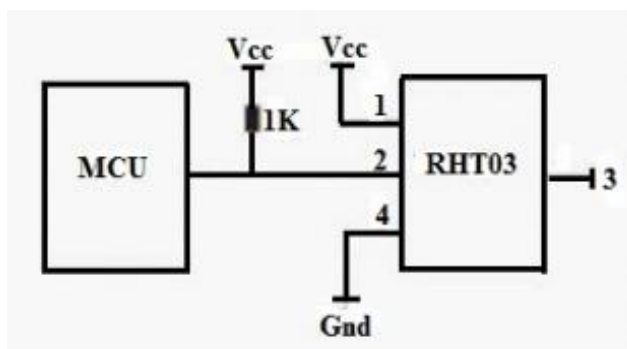
Σχήμα 3-1. Lm35



Σχήμα 3-2. Waterproof Analog lm35

### Υγρασία περιβάλλοντος – Θερμοκρασία συσκευής

Για την μέτρηση της υγρασίας του περιβάλλοντος και της θερμοκρασίας της απομακρυσμένης συσκευής (WSU) χρησιμοποιήθηκε ο ψηφιακός αισθητήρας DHT22-AM2302. Αποτελεί ένα ψηφιακό αισθητήρα υψηλής ακρίβειας με εφαρμογή σε μετεωρολογικούς σταθμούς, οικιακές συσκευές, αυτοκινητοβιομηχανία κ.α. Ο DHT22 αποτελείται από έναν υγρό χωρητικό αισθητήρα, από έναν υψηλής ακρίβειας αισθητήρα θερμοκρασίας οι οποίοι είναι συνδεδεμένοι σε έναν 8bit microcontroller [16]. Σύμφωνα με το εγχειρίδιο χρήσης από τον κατασκευαστή η απόσταση του αισθητήρα από το μικροελεγκτή δεν θα πρέπει να ξεπερνάει τα 100cm διότι θα οδηγήσει σε λανθασμένες μετρήσεις. Για την ακρίβεια της μέτρησης συνιστάται η μέτρηση του φαινομένου τουλάχιστον δύο φορές με ένα διάστημα των 2 δευτερολέπτων. Η επικοινωνία του αισθητήρα με τον μικροελεγκτή πραγματοποιείται με ένα μονό δίαυλο ανταλλαγής δεδομένων με μία δομή master-slave. Ο μικροελεγκτής καλεί τον αισθητήρα και έπειτα ο αισθητήρας απαντά στέλνοντας ένα σήμα των 40 bits όπου περιέχει τις τιμές της υγρασίας και της θερμοκρασίας όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.

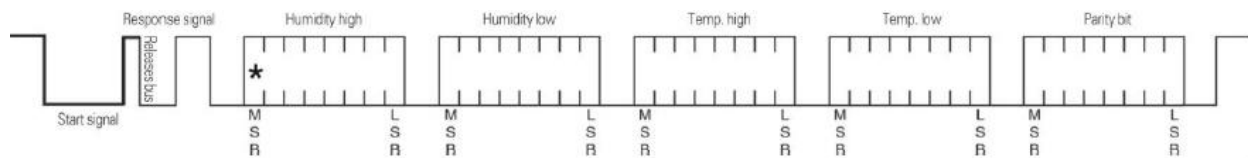


Σχήμα 3-3. Dht22 pins output

DHT22 pins	
1	VCC
2	DATA
3	NC
4	GND



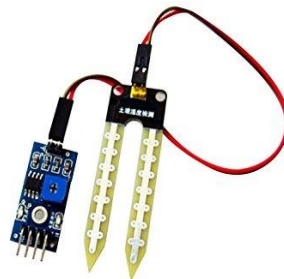
Σχήμα 3-4. Dht22 Sensor



Σχήμα 3-5. Dht22 Stream of sent bytes

### Υγρασία εδάφους

Για τη μέτρηση της υγρασίας του εδάφους χρησιμοποιήθηκε ο αισθητήρας FC-28. Αυτός ο αισθητήρας μετρά την ογκομετρική περιεκτικότητα του νερού στο έδαφος και δίνει το επίπεδο της υγρασίας ως έξοδο. Ο αισθητήρας διαθέτει τόσο αναλογική όσο και ψηφιακή έξοδο, ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο σε αναλογική όσο και σε ψηφιακή λειτουργία. Ο αισθητήρας υγρασίας του εδάφους αποτελείται από δύο ανιχνευτές (probes) οι οποίοι χρησιμοποιούνται για την μέτρηση του ογκομετρικού περιεχομένου του νερού. Όταν υπάρχει περισσότερο νερό, το έδαφος άγει περισσότερη ηλεκτρική ενέργεια και άρα η αντίσταση θα είναι μικρότερη και το επίπεδο υγρασίας θα είναι υψηλότερο. Σε ένα ξηρό έδαφος όπου η ποσότητα του νερού είναι σαφώς λιγότερη θα άγει με μικρότερη ηλεκτρική ενέργεια και άρα το επίπεδο υγρασίας θα είναι χαμηλότερο. Η αναλογική έξοδος του αισθητήρα δίνει τάσεις 0-5V και συνδέοντας τον σε έναν ADC δίνει ποιο ακριβείς μετρήσεις σε ψηφιακή μορφή. Η ψηφιακή έξοδος δίνει τάσεις 5V ή 0V. χρησιμοποιώντας τον συγκριτή τάσης LM393 [17] και ένα ποτενσιόμετρο, συγκρίνοντας τη τιμή εξόδου του αισθητήρα και τη τιμή του κατωφλίου. Ο LM393 περιέχει δύο ανεξάρτητα κανάλια συγκρίτων οι οποίοι χρησιμοποιούν μικρές δίοδοι Schottky βελτιώνοντας την απόδοσή του.



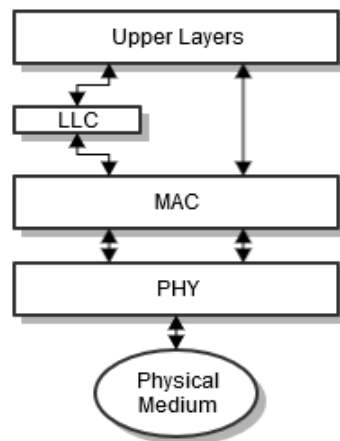
Σχήμα 3-6. Soil Moisture Sensor

### 3.1.2 RF Transmitter

Στην απομακρυσμένη συσκευή χρησιμοποιήθηκε ένας ραδιοπομπός ZigBee για την αποστολή των μετρήσεων σε ένα σταθμό βάσης (WIU) σε απόσταση 100 μέτρων. Το ZigBee είναι ένας ραδιοπομπός βασισμένος στο IEEE 802.15.4 πρωτόκολλο επικοινωνίας, κατάλληλο για τη δημιουργία τοπικών δικτύων χαμηλού κόστους και κατανάλωσης [18]. Αποτελεί μέρος της μεγάλης ομάδας του 802.15 υλοποιώντας διάφορα προσωπικά ασύρματα δίκτυα (Wireless Personal Area Networks, 802.15.1 Bluetooth, 802.15.3 UWB, 802.15.6 BAN). Τα βασικά χαρακτηριστικά αυτού του πρωτοκόλλου είναι ο χαμηλός κύκλος λειτουργίας (low duty cycle) καθώς και ο υψηλός ρυθμός αποστολής δεδομένων (high data rate) όπου φτάνει τα 250 kbps. Συνεπώς ο χρόνος αποστολής των δεδομένων είναι της τάξης των milliseconds και η κατάσταση της συσκευής παραμένει σε κατάσταση χαμηλής κατανάλωσης (sleep mode) για μεγαλύτερο



διάστημα. Σύμφωνα με το διάγραμμα το πρωτόκολλο αποτελείται από 2 επίπεδα, το φυσικό επίπεδο (PHY) και το επίπεδο ελέγχου πρόσβασης στο μέσο (MAC). Στο φυσικό επίπεδο καθορίζονται τα μηχανικά και ηλεκτρικά χαρακτηριστικά της διασύνδεσης, η κωδικοποίηση όπως η διαμόρφωση και αποδιαμόρφωση των ψηφιακών δεδομένων, ο συγχρονισμός των bit σε σύγχρονες σειριακές επικοινωνίες και τέλος η έναρξη-τερματισμός της ηλεκτρικής σύνδεσης μιας μετάδοσης.

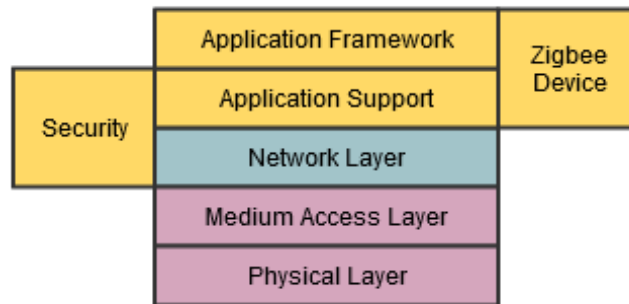


Πίνακας 3-1.	Frequency Band		
	868.3	902-928	2400-2483.5
Channels	1	10	16
Bandwidth	600	2000	5000
Data Rate (kbps)	20	40	250

Σχήμα 3-7. Network Communication Layers

Το επίπεδο ελέγχου πρόσβασης (MAC) μαζί με το επίπεδο λογικού ελέγχου (Logical Link Control - LLC) είναι υπεύθυνα για την μεταφορά της πληροφορίας στο μέσο. Περιέχει όλους εκείνους τους μηχανισμούς ελέγχου έτσι ώστε περισσότερες συσκευές να συνδέονται στο κοινό μέσο. Συνεπώς για την ομαλή επικοινωνία διαφόρων συσκευών αναπτύσσει τεχνικές ελέγχου ροής, αποφυγής συγκρούσεων, ελέγχου εύρεσης λάθους. Το επίπεδο MAC χρησιμοποιεί την διευθυνσιοδότηση για την διασύνδεση μιας συσκευής κάθε φορά στο μέσο γνωστή και ως MAC address. Η επικοινωνία βασίζεται στον αλγόριθμο ανίχνευσης συγκρούσεων (Carrier Sense Multiple Access / Collision Avoidance - CSMA/CA). Στην αρχή της επικοινωνίας ο αποστολέας ελέγχει εάν η γραμμή είναι ελεύθερη και στην συνέχεια ξεκινάει την μετάδοση. Στην περίπτωση που δυο συσκευές προσπαθήσουν να στείλουν δεδομένα ταυτόχρονα, τότε όλες οι συσκευές ανιχνεύουν ότι υπάρχει σύγκρουση και η μετάδοση σταματάει. Μετά από κάποιο χρονικό διάστημα οι συσκευές προσπαθούν και πάλι να ξεκινήσουν την μετάδοση ανιχνεύοντας και πάλι την κατάσταση του καναλιού χρησιμοποιώντας τα σήματα Request To Send (RTS) και Clear To Send (CTS).

Όπως φαίνεται και στην εικόνα το ZigBee χρησιμοποιεί το πρωτόκολλο επικοινωνίας 802.15.4 καθώς και επιπρόσθετα επίπεδα για να επιτύχει την επικοινωνία μεταξύ της απομακρυσμένης συσκευής (WSU) και του σταθμού βάσης (WIU).



Σχήμα 3-8. ZigBee protocol layers

Το επίπεδο Network Layer περιέχει τεχνικές εγκατάστασης δικτύου, σύνδεσης στο δίκτυο, δρομολόγησης. Τα υπόλοιπα επίπεδα χρησιμοποιούνται για την επικοινωνία με τον έξω κόσμο έτσι ώστε ο χρήστης να διαχειριστεί το πρωτόκολλο ανάλογα με τις ανάγκες της εφαρμογής. Το ZigBee είναι ικανό να υλοποιήσει τοπολογίες δικτύου όπως αστέρα, πλέγματος. (κεφάλαιο 2.1). Στο συγκεκριμένο αυτόματο σύστημα χρησιμοποιήθηκε τοπολογία αστέρα όπου οι απομακρυσμένες συσκευές αίσθησης (WSU) λειτουργήσαν σαν τελικές συσκευές όπου επικοινωνούσαν μόνο με τον σταθμό βάσης (WIU) και όχι αναμεταξύ τους. Εκτός από την επικοινωνία μεταξύ των ZigBee, καθορίζεται επίσης και η διασύνδεση τους με τους μικροελεγκτές διακρίνοντας την σε AT και API mode. Στην λειτουργία API ο προγραμματιστής δημιουργεί πακέτα δεδομένων όπου εμπεριέχουν πληροφορίες όπως η διεύθυνση προορισμού, ο τύπος πακέτου, την ισχύ του σήματος, τα πραγματικά δεδομένα και την τιμή ελέγχου αθροίσματος για την επιβεβαίωση της σωστής λήψης. Ένα τυπικό πακέτο δεδομένων παρουσιάζεται στην εικόνα παρακάτω [19].

Πίνακας 3-2. ZigBee Stream of sent bytes

Start delimiter	Length		Frame data		Checksum
Byte 1	Byte 2	Byte 3	Byte 4	Byte n	Byte n+1
07x7E	MSB	LSB	Payload		Single byte

Κάθε πακέτο ξεκινάει με 1 start byte όπου υποδεικνύει την αρχή του πακέτου. Τα επόμενα 2 bytes καθορίζουν το συνολικό μέγεθος του πακέτου όπου σε συνδυασμό με το start delimiter υπολογίζεται το τέλος του. Τα επόμενα bytes καθορίζουν το είδος του πακέτου, το αναγνωριστικό (id) του πακέτου και την καθ' αυτή πληροφορία. Η πραγματική πληροφορία μπορεί να είναι ένα AT Command για την αλλαγή λειτουργίας ενός καταχωρητή ή δεδομένα προς λήψη-αποστολή σε συνδυασμό με bits επιβεβαίωσης (acknowledgments) και 64 bits διεύθυνση είτε του αποστολέα είτε του παραλήπτη. Στους παρακάτω πίνακες φαίνονται τόσο το είδος ενός πακέτου όσο και η αναλυτική περιγραφή ενός πακέτου προς λήψη. Το τελευταίο byte (checksum) αποτελεί το άθροισμα των bytes του Frame data με το checksum και λειτουργεί ως έλεγχος για την σωστή μετάδοση του πακέτου.

Πίνακας 3-3. Type of ZigBee frames

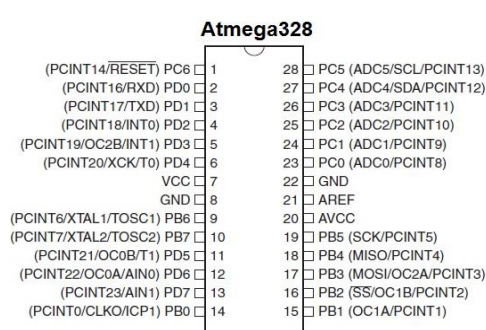
Frame type	Description
0x10	Tx request
0x8B	Tx response
0x90	Rx received
0x92	RX I/O data received
0x95	Node Identification indicator
0x97	Remote Command Response

Πίνακας 3-4. Stream of received bytes

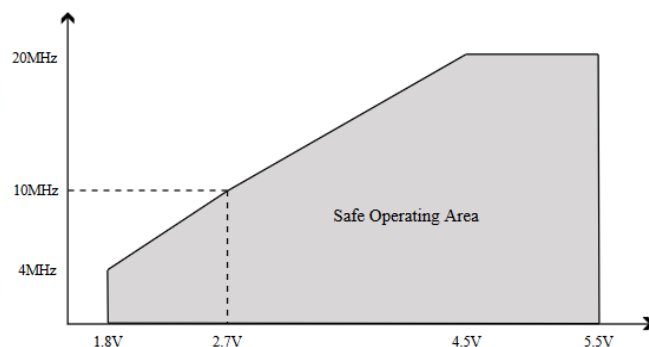
	Frame Fields	Offset	Example	Description
A P I P a c k e t	Start Delimiter	0	0x7E	
	Length	MSB 1	0x00	Number of bytes between the length and the checksum
		LSB 2	0x11	
	Frame-specific Data	Frame Type	3 0x90	
		64-bit Source Address	MSB 4 0x00	64-bit address of sender. Set to 0xFFFFFFFFFFFFFFF (unknown 64-bit address) if the sender's 64-bit address is unknown.
			5 0x13	
			6 0xA2	
			7 0x00	
			8 0x40	
			9 0x52	
			10 0x2B	
			LSB 11 0xAA	
		16-bit Source Network Address	MSB 12 0x7D	16-bit address of sender
			LSB 13 0x84	
		Receive Options	14 0x01	0x01 - Packet Acknowledged 0x02 - Packet was a broadcast packet 0x20 - Packet encrypted with APS encryption 0x40 - Packet was sent from an end device (if known) Note: Option values can be combined. For example, a 0x40 and a 0x01 will show as a 0x41. Other possible values 0x21, 0x22, 0x41, 0x42, 0x60, 0x61, 0x62.
	Received Data		15 0x52	Received RF data
			16 0x78	
			17 0x44	
			18 0x61	
			19 0x74	
			20 0x61	
	Checksum	21	0x0D	0xFF - the 8 bit sum of bytes from offset 3 to this byte.

### 3.1.3 Μικροελεγκτής ATMEGA328P-PU

Βασική μονάδα της απομακρυσμένης συσκευής, όπου αποτελεί και τον “εγκέφαλο” της, είναι ο μικροελεγκτής ATMEGA328P-PU. Είναι ένας 8bit μικροελεγκτής με 28 pins, 32K Bytes Flash program memory με δυνατότητες Read-While-Write, 1K Bytes EEPROM, 2K SRAM. Διαθέτει 23 γραμμές εισόδου/εξόδου γενικού ενδιαφέροντος, τις οποίες κατηγοριοποιεί σε θύρες Port B,C,D και χρησιμοποιεί 32 καταχωρητές (registers) με άμεση σύνδεση κατ’ ευθείαν στην μονάδα αριθμητικών και λογικών πράξεων (Arithmetic Logic Unit- ALU). Επίσης διαθέτει Real Time Counter (RTC), 3 Timers/Counters, συγκριτές τάσης, 10-bit μετατροπέα αναλογικού/ψηφιακού (ADC), χρονοδιακόπτες, κανάλια Pulse Width Modulation, εξωτερικούς και εσωτερικούς ταλαντωτές. Ακόμα ο μικροελεγκτής υποστηρίζει συνδέσεις USART, SPI και I2C με τα περιφερειακά. Μερικά ακόμα σημαντικά χαρακτηριστικά του μικροελεγκτή είναι η ύπαρξη των watchdog timers με την ύπαρξη εσωτερικού ταλαντωτή, οι διακοπές (interrupts), και η ενεργοποίηση (wake up) στην αλλαγή ενός pin. Σύμφωνα με τον κατασκευαστή η τάση λειτουργίας του μικροελεγκτή κυμαίνεται από τα 1.8 V ως τα 5 V. Η διακύμανση στην τάση οφείλεται στην ταχύτητα του ταλαντωτή και εν τέλει την εκτέλεση των εντολών του μικροελεγκτή. Εκτελώντας τις εντολές σε ένα κύκλο του ρολογιού ο ATMEGA πετυχαίνει διαπερατότητα στο 1MIPS ανά MHz. Στην παρούσα συσκευή χρησιμοποιήθηκε εξωτερικός ταλαντωτής 16MHz και άρα η τάση λειτουργίας κυμάνθηκε στα 5 V. Συνεπώς πραγματοποιούνται  $16 \times 10^6$  κύκλους το δευτερόλεπτο και άρα υλοποιούνται  $16 \times 10^6$  εντολές το δευτερόλεπτο ή η εκτέλεση μιας εντολής παίρνει 62.5 nanoseconds. Προφανώς αυτές οι εντολές αποτελούν εντολές γλώσσας μηχανής assembly και όχι εντολές μια υψηλότερης επιπέδου γλώσσας π.χ. C ή C++.



Σχήμα 3-9. ATMEGA328 pins



Σχήμα 3-10. ATMEGA Safe Operating Area

Στον μικροελεγκτή χρησιμοποιήθηκαν τόσο οι αναλογικές εισοδοί όσο και οι ψηφιακοί εισοδοί για τη διασύνδεση του με τους αισθητήρες. Στις αναλογικές εισοδοί χρησιμοποιήθηκε ο 10bit ADC, ο οποίος είναι συνδεδεμένος σε έναν 8-κάναλο αναλογικό πολυπλέκτη. Συνεπώς επιτρέπει την ύπαρξη 8 εισόδων τάσης προερχόμενων από την περιοχή των PORTC καταχωρητών. Η τελική τιμή βρίσκεται στον καταχωρητή ADC και δίνεται από τον παρακάτω τύπο.

$$ADC = \frac{V_{in} * 1024}{V_{ref}}$$

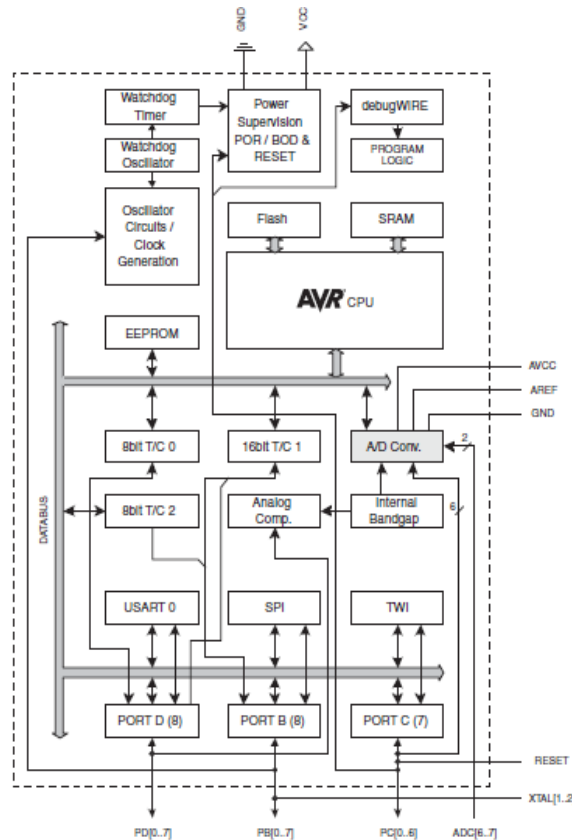
Όπου:

$V_{in}$  : τάση εισόδου

$V_{ref}$  : μέγιστη τάση που μπορεί να μετατρέψει ο ADC

ADC : ακέραια τιμή πχ 0-1023 για 10 bit

Συνεπώς σημαίνει πως θα αντιστοιχίσει τάσεις εισόδου μεταξύ 0 V και 5 V σε ακέραιες τιμές μεταξύ 0 και 1023. Σε περίπτωση που απαιτηθεί περισσότερη ακρίβεια και άρα ανάλυση των 10 bits του ADC υπάρχει η δυνατότητα αύξησης της συχνότητας του ρολογιού πάνω από τα 200 kHz. Κατά την εκκίνηση του ADC η πρώτη μετατροπή απαιτεί περισσότερους κύκλους ρολογιού από μία καθιερωμένη μετατροπή. Τέλος ο ADC περιέχει ένα κύκλωμα δειγματοληψίας και συγκράτησης (sample and hold) το οποίο εξασφαλίζει ότι η τάση εισόδου ( $AVCC \geq \pm 0.3 VCC$ ) είναι σε σταθερό επίπεδο κατά τη διάρκεια της μετατροπής αλλά και για την ενημέρωση των πολυπλεκτών και των καταχωρητών για τις επόμενες μετατροπές.



Σχήμα 3-11. ATMEGA components

Όσον αφορά την κατανάλωση ενέργειας του ATMEGA μικροελεγκτή υπάρχουν 6 καταστάσεις λειτουργίας, όπου απενεργοποιούνται δίαυλοι και τμήματα του με στόχο την μείωσή της. Οι καταστάσεις λειτουργίας όπως φαίνεται και στην εικόνα είναι η Idle, ADC Noise Reduction, Power-down, Power-save, Standby, Extended Standby. Στην Idle κατάσταση ο επεξεργαστής σταματάει να λειτουργεί σε αντίθεση με την SRAM, τους Timers/Counters, την SPI θύρα, τις διακοπές (interrupts) όπου συνεχίζουν κανονικά την λειτουργία τους. Η Power-down κατάσταση παγώνει τον ταλαντωτή καθώς και τα υπόλοιπα μέρη του microcontroller μέχρι το επόμενο interrupt ή κάποιο hardware reset αφήνοντας ενεργά μόνο τα pins 4,5 του ελεγκτή. Συνεπώς αποτελεί την κατάσταση με την λιγότερη κατανάλωση ενέργειας. Στην συνέχεια η κατάσταση Power-save χρησιμοποιεί έναν ασύγχρονο timer, όπου αποφασίζει για την ενεργοποίηση του μικροελεγκτή, την ώρα που τα υπόλοιπα μέρη του παραμένουν ανενεργά. Η ADC Noise Reduction σταματάει τόσο την CPU όσο και όλα τα μέρη που συσχετίζονται με pins εισόδου/εξόδου, εκτός από τον ADC μετατροπέα και τον ασύγχρονο timer μειώνοντας τον θόρυβο που προκαλείται από τις μετατροπές. Τέλος στην Standby κατάσταση ο ταλαντωτής συνεχίζει να λειτουργεί ενώ τα υπόλοιπα μέρη βρίσκονται σε κατάσταση αδράνειας, σε αντίθεση με την Extended Standby κατάσταση, όπου τόσο ο ταλαντωτής όσο και το ασύγχρονο timer συνεχίζει να λειτουργεί. Όπως θα περιγραφεί παρακάτω στη λειτουργικότητα της απομακρυσμένης συσκευής, επιλέχθηκε η Power-down κατάσταση την περίοδο όπου ο μικροελεγκτής θα παραμένει σε ανενεργή κατάσταση για την μείωση της καταναλισκόμενης ενέργειας.

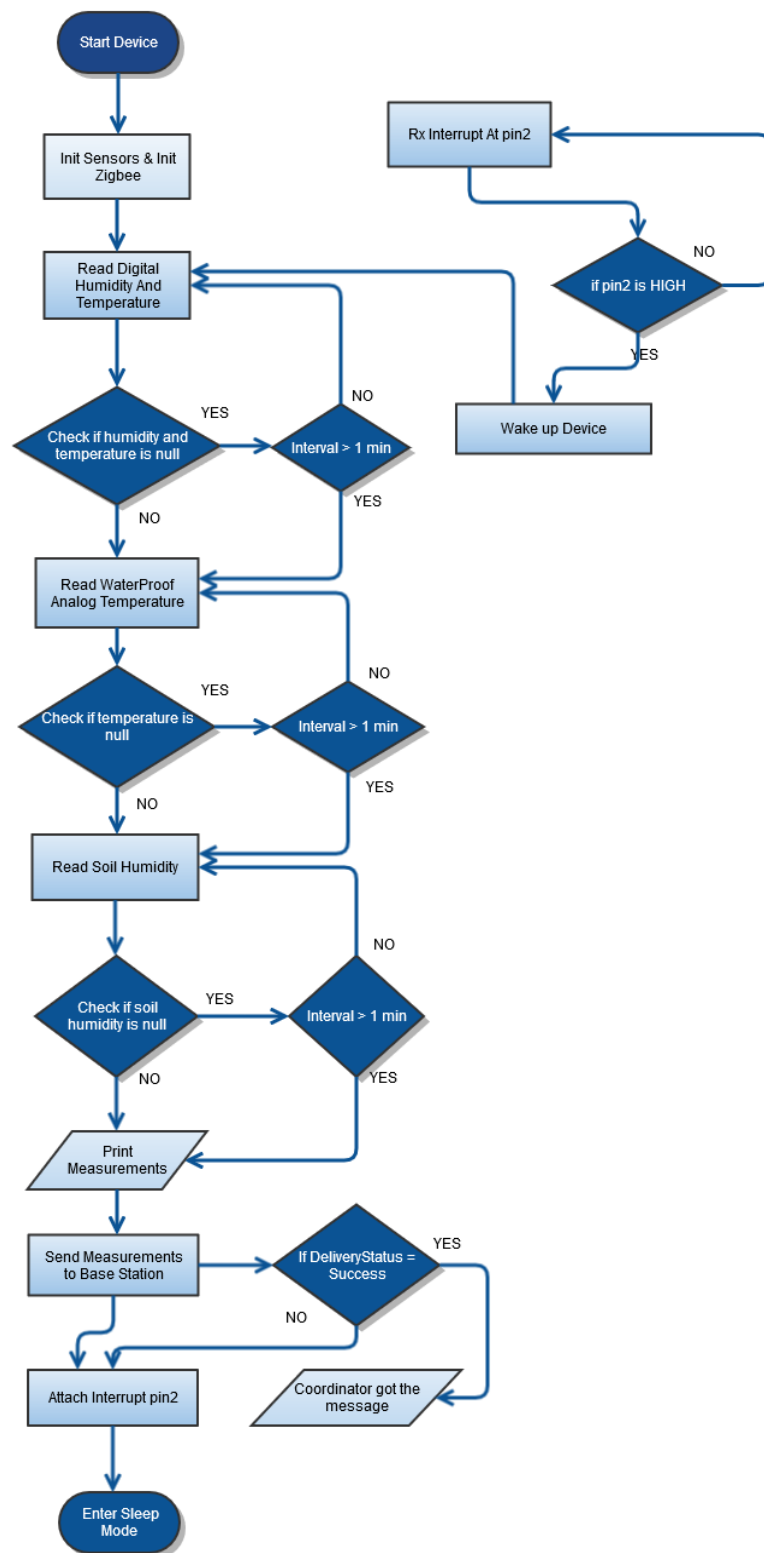
Πίνακας 3-5. ATMEGA Wake-up sources

Sleep Mode	Main Clock Source Enabled	Timer Oscillator	IN1.INT0 And pin change	ADC	WDT	OTHER I/O
Idle	X	X	X	X	X	X
ADC Noise Reduction	X	X	X	X	X	
Power-down			X		X	
Power-save		X	X		X	
Standby	X		X		X	
Extended Standby	X	X	X		X	

### 3.1.4 Λειτουργικότητα Απομακρυσμένης Συσκευής (WSU)

Οι βασικές λειτουργίες της απομακρυσμένης συσκευής είναι η καταγραφή των μετρήσεων από τους αισθητήρες και η αποστολή τους στον σταθμό βάσης. Από την μέτρηση μέχρι και την αποστολή χρειάζονται το λιγότερο 5 secs, την υπόλοιπη ώρα η συσκευή παραμένει σε κατάσταση αδράνειας. Κατά την εκκίνηση της συσκευής αρχικοποιούνται τόσο οι αισθητήρες όσο και ο ραδιοπομπός ZigBee. Στην συνέχεια γίνεται ανάγνωση της θερμοκρασίας και της υγρασίας από τον ψηφιακό αισθητήρα. Σε περίπτωση που η τιμές είναι κενές πραγματοποιείται ξανά ανάγνωση των τιμών με ένα διάστημα χρόνου (interval) 10 seconds. Η ίδια πρακτική ακολουθείται και κατά την ανάγνωση των υπολοίπων αισθητήρων (Waterproof Analog Temperature, Soil Humidity). Όταν ολοκληρωθεί η διαδικασία ανάγνωσης οι τιμές συγκεντρώνονται προς αποστολή. Η απομακρυσμένη ελέγχει εάν οι μετρήσεις έφτασαν στον σταθμό βάσης και στην συνέχεια εκτυπώνει μήνυμα επιτυχίας.

Στα τελευταία 2 βήματα του αλγορίθμου το σύστημα οδηγείται σε κατάσταση αδράνειας (sleep mode). Όπως έχει ήδη αναφερθεί επιλέχθηκε η Power-down κατάσταση όπου παραμένει ενεργό το pin2 του μικροελεγκτή κατά την διάρκεια που παραμένει αδρανής. Συνεπώς δημιουργείται hardware interrupt στο χαμηλό δυναμικό (LOW), όπου ενεργοποιείται με υψηλό δυναμικό (HIGH). Ένα hardware interrupt είναι ένα ηλεκτρικό σήμα όπου στέλνεται από μία εξωτερική συσκευή ώστε να ξεκινήσει μια διαδικασία πχ το πάτημα ενός κουμπιού από το πληκτρολόγιο. Στην περίπτωση της απομακρυσμένης συσκευής χρησιμοποιείται το Rx σήμα του ραδιοπομπού ως η εξωτερική συσκευή που θα ενεργοποιήσει το interrupt και συνεπώς την συσκευή. Αυτό δίνει την δυνατότητα στο σύστημα να ενεργοποιείται μόνο όταν ο ραδιοπομπός έχει λάβει κάποιο μήνυμα. Τέλος απενεργοποιούνται οι αισθητήρες, ο μικροελεγκτής, θέτοντας του εκτός λειτουργίας τα περισσότερα μέρη και το σύστημα πλέον βρίσκεται σε κατάσταση ύπνου (sleep mode).



Σχήμα 3-12. End Device Flowchart



### 3.1.5 Ηλεκτρικά Χαρακτηριστικά

Για την τροφοδοσία της απομακρυσμένης συσκευής χρησιμοποιήθηκε μπαταρία λιθίου τάσης 3.7 V και χωρητικότητας 3350 mAh. Όπως φαίνεται αναλυτικότερα στους παρακάτω πίνακες τόσο ο μικροελεγκτής όσο και οι αισθητήρες έχουν τάση εισόδου τα 5 V. Συνεπώς για την ενίσχυση της τάσης εισόδου χρησιμοποιήθηκε ένας dc-dc step up regulator και συγκεκριμένα ο LM2577S. Οι switching power regulators όπως και ο LM2577, είναι ολοκληρωμένα κυκλώματα όπου χρησιμοποιούν ένα διακόπτη ρεύματος, πηνίο, δίοδο για την μεταφορά ενέργειας από την είσοδο στην έξοδο. Μια τυπική εφαρμογή του φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Αυτού του είδους το κύκλωμα έχει την δυνατότητα της ενίσχυσης, μείωσης, αντιστροφής της τάσης εισόδου, αποθηκεύοντας την ενέργεια από το ρεύμα εισόδου σε ένα πηνίο. Η ενέργεια δίνεται από τον παρακάτω τύπο και μετριέται σε Joules



Σχήμα 3-13. 3.6V Lithium battery

$$E = \frac{1}{2}LI^2$$

Όπου :

E : ηλεκτρική ενέργεια πηνίου

L: συντελεστής αυτεπαγωγής

I : ένταση ηλεκτρικού ρεύματος

Επιλέχθηκε ένας switch regulator έναντι ενός linear λόγω της υψηλότερης απόδοσης και της μειωμένης θερμότητας από την πτώση της τάσης. Η διαδικασία ενίσχυσης της τάσης εξόδου πραγματοποιείται σε δύο φάσεις. Στην πρώτη φάση ο διακόπτης είναι κλειστός και το ρεύμα που ρέει το πηνίο παράγει ενέργεια με ρυθμό  $V_{in}/L1$  αποθηκεύοντας την στο πηνίο. Κατά την δεύτερη φάση ο διακόπτης είναι ανοιχτός και το πηνίο αποφορτίζεται αποθηκεύοντας την ενέργεια σε έναν πυκνωτή με ρυθμό  $(V_{out}-V_{in})L1$ . Ο έλεγχος της τάσης εξόδου πραγματοποιείται από ένα σύστημα ανάδρασης όπου συγκρίνει μελλοντικές τιμές τάσεων με μία τάση αναφοράς 1.23 V [20]. Τέλος η τάση εξόδου δίνεται από τον τύπο.

$$V_{out} = 1.23 * V_{in} * \left(1 + \frac{R_2}{R_3}\right)$$

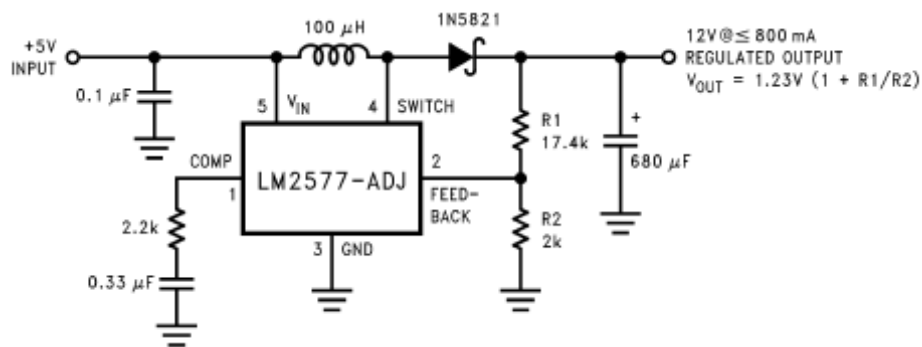
Όπου :

$V_{out}$  : Τάση εξόδου regulator

$V_{in}$  : Τάση εισόδου

$R_2, R_3$  : αντιστάσεις regulator

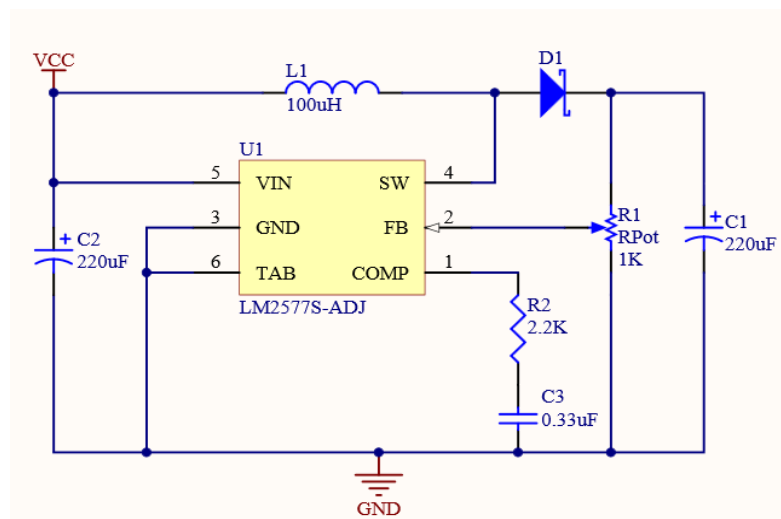
Όπως φαίνεται και στο ηλεκτρικό σχέδιο της απομακρυσμένης συσκευής, η τροφοδοσία του κάθε αισθητήρα έχει συνδεθεί με τις ψηφιακές εξόδους του μικροελεγκτή. Συνεπώς με αυτό τον τρόπο απενεργοποιείται η τροφοδοσία των αισθητήρων όταν ο μικροελεγκτής βρίσκεται σε κατάσταση αδράνειας. Σύμφωνα με τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του μικροελεγκτή η μέγιστη τάση εξόδου για ένα pin είναι τα 5 V και το μέγιστο ρεύμα είναι 40 mA, όπου είναι αρκετό για την τροφοδοσία των αισθητήρων. Στους παρακάτω πίνακες περιγράφονται τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά της κάθε μονάδας ξεχωριστά αλλά και της ίδιας της απομακρυσμένης συσκευής.



Σχήμα 3-14. Lm2477 Typical Application

Πίνακας 3-6. Dc Step-Up Regulator LM2577S-ADJ

LM2577	
Supply Voltage	$3.5V \leq V_{in} \leq 40V$
Output Switch Voltage	$0V \leq V_{switch} \leq 60V$
Output Switch Current	$I_{switch} \leq 3A$
Junction Temperature Range	$5 \leq T_j \leq 150C$



Σχήμα 3-15. Lm2577 end device application

**Πίνακας 3-7. LM35 Analog Temperature Sensor**

LM35	
Supply Voltage	$0 \leq V \leq 35V$
Output Voltage	$1 \leq V \leq 6V$
Output Current	10mA
Temperature	$-60C \leq T \leq 180C$

**Πίνακας 3-8. Soil Moisture LM393**

Soil Moisture	
Supply Voltage	35V
Input Current	50mA
Power	780mW
Temperature	$-50C \leq T \leq 180C$

**Πίνακας 3-9. DHT22 Digital Sensor electrical characteristics**

DHT22 Sensor	min	typ	max	unit
Voltage	3.3	5	5.5	V
Power Consumption		300		$\mu A$
Temperature	-50		180	C

**Πίνακας 3-10. ZigBee S2 electrical characteristics**

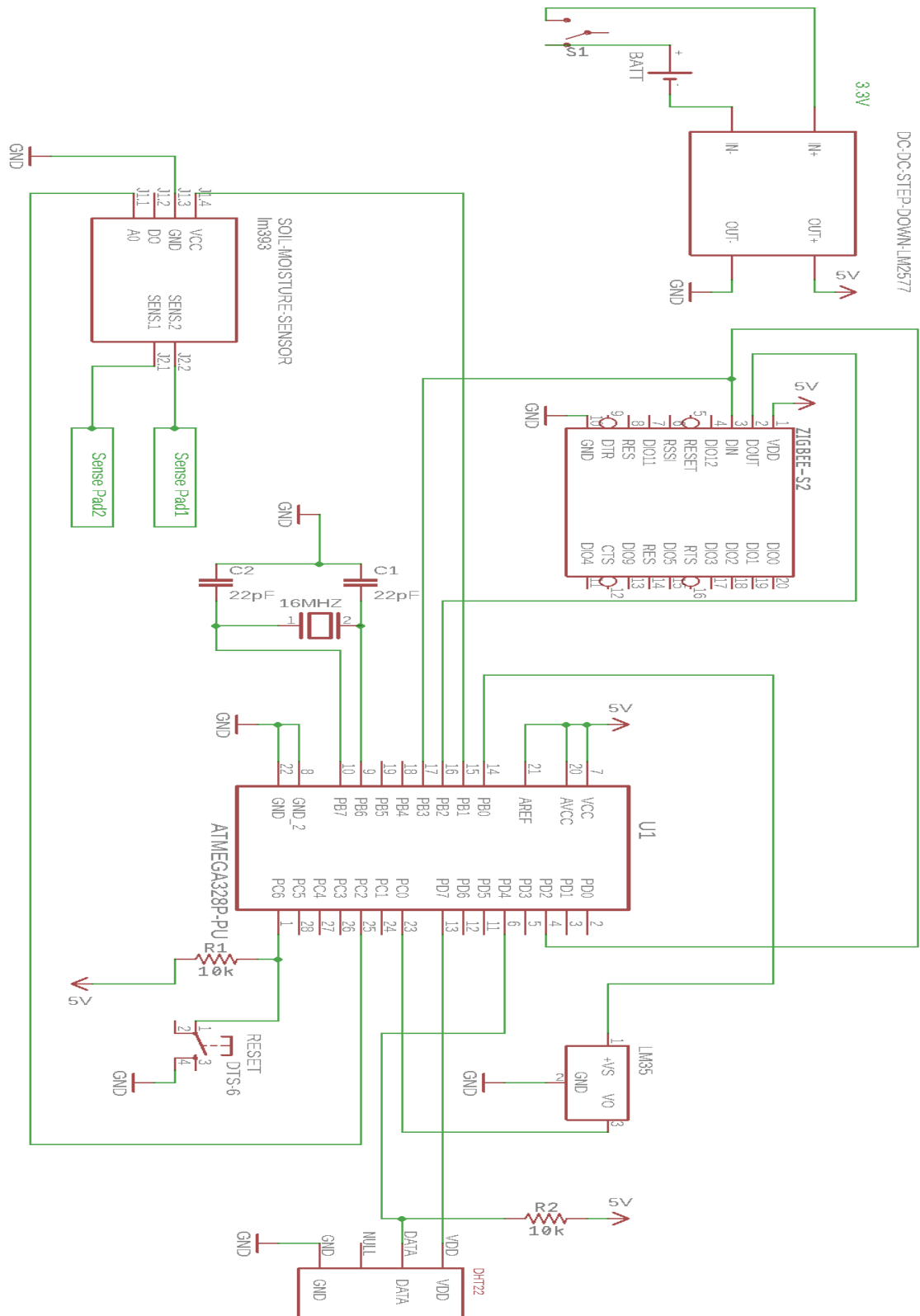
ZigBee S2	
Supply Voltage	3 - 3.4V
Operating Current receive on	45mA
Operating Current receive off	15mA
Power-down current	3.5 $\mu A$
Temperature	$-50C \leq T \leq 180C$

**Πίνακας 3-11. ATMEGA328P-PU electrical requirements**

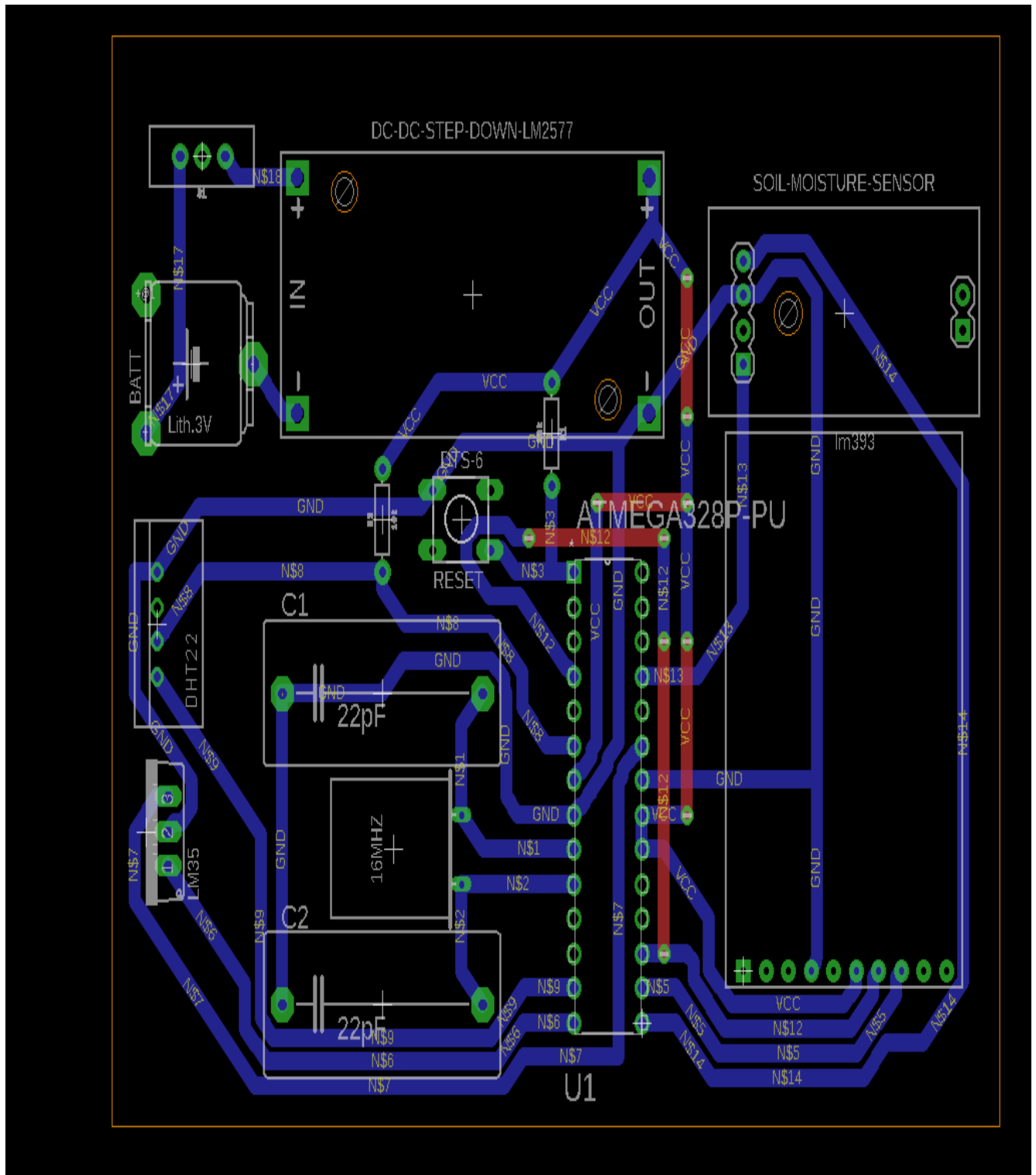
ATMEGA3288p-pu	
Operating Temperature	-55C ≤ T ≤ 125C
Maximum Operating Voltage	6V
Dc Current per I/O pin	40mA
Dc Current Vcc and GND	200mA

**Πίνακας 3-12. Wireless Sensor Unit electrical requirements**

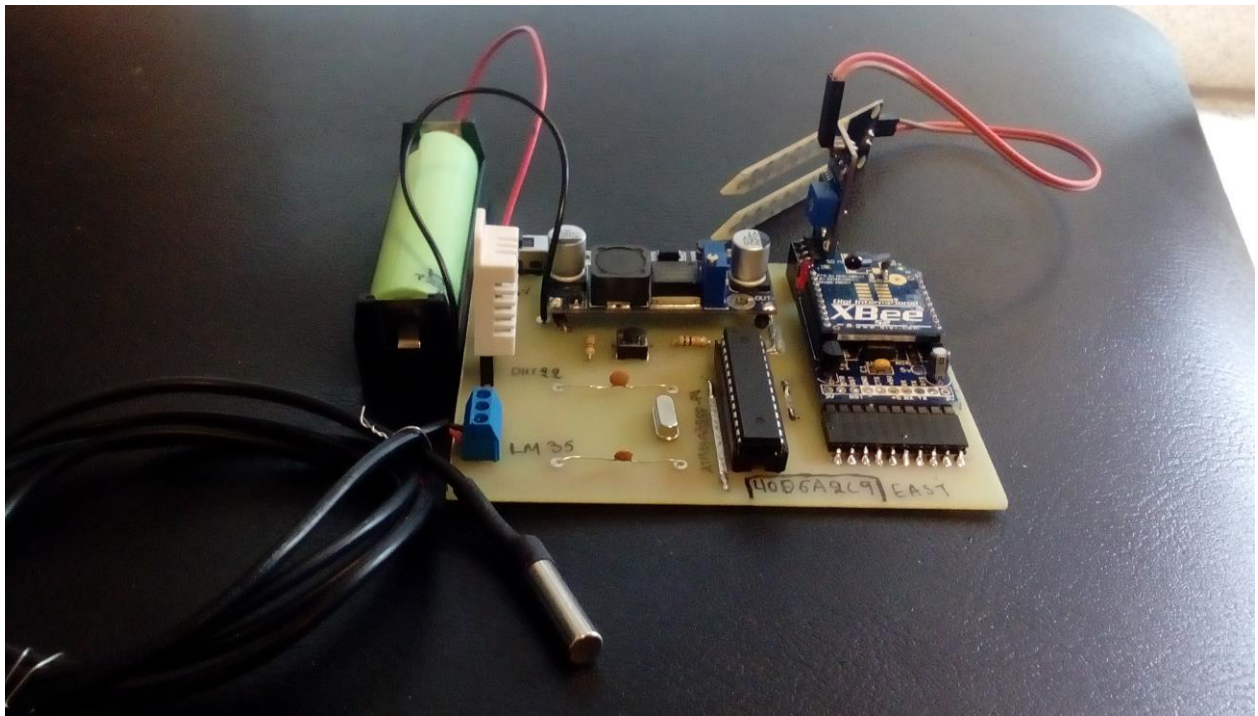
	Operating Mode	Sleep Mode
Input Voltage	3.7V	3.7V
Operating Current	30mA	12mA



Σχήμα 3-16. End device electrical diagram



Σχήμα 3-17. End Device printed circuit diagram



Σχήμα 3-18. End Device PCB

Πίνακας 3-13. End Device Total Cost

End Device Total Cost	56Euro
ATMEGA328p	6€
ZigBeeS2	30€
LM2577 regulator	4€
DHT22	7€
LM35	5€
Soil Moisture	2€
other parts	2€

## 3.2 Σταθμός Βάσης (WIU)

Τα βασικά μέρη που αποτελούν τον σταθμού βάσης είναι ο μικροελεγκτής ATMEGA 2560 ενσωματωμένος στο Arduino mega, ένα GSM/GPRS shield με το ενσωματωμένο chip της Quectel, ένα ZigBee S2, ένα RTC ρολόι, ένα 7-segment display τεσσάρων ψηφίων, ένα πληκτρολόγιο και μερικές ηλεκτροβάνες. Οι βασικές λειτουργίες του σταθμού βάσης είναι η εκτέλεση ενός αλγορίθμου για την αυτόματη ύδρευση καθώς και η αλληλεπίδραση με έναν χρήστη. Κατά την διάρκεια εκτέλεσης του αλγορίθμου ο σταθμός βάσης ενεργοποιεί τις απομακρυσμένες συσκευές (WSU), συλλέγει τις μετρήσεις, τις επεξεργάζεται και εν τέλει παίρνει αποφάσεις για την έναρξη ή τον τερματισμό της ύδρευσης. Συνεπώς για την ενεργοποίηση και την συλλογή των μετρήσεων από τις απομακρυσμένες συσκευές ο σταθμός βάσης χρησιμοποιεί ένα ZigBee S2 και αντίστοιχα για τον έλεγχο του νερού ηλεκτροβάνες τάσης 9V. Εκτός από τον αυτόματο αλγόριθμο ο σταθμός βάσης επικοινωνεί με έναν διακομιστή μέσω του δικτύου κινητής τηλεφωνίας και συγκεκριμένα του δικτύου 3G. Συνεπώς με αυτό τον τρόπο ένας χρήστης μέσω μιας διαδικτυακής εφαρμογής και μίας βάσης δεδομένων, αλληλοεπιδρά δια δραστικά με τον σταθμό βάσης. Ενώ ο αυτόματος αλγόριθμος είναι προκαθορισμένος από τον χρήστη να εκτελείται για ορισμένες ώρες της μέρας, κατά την δια δραστική επικοινωνία ο χρήστης απαιτεί την άμεση ύδρευση καθώς και την συλλογή των μετρήσεων από τις απομακρυσμένες συσκευές.

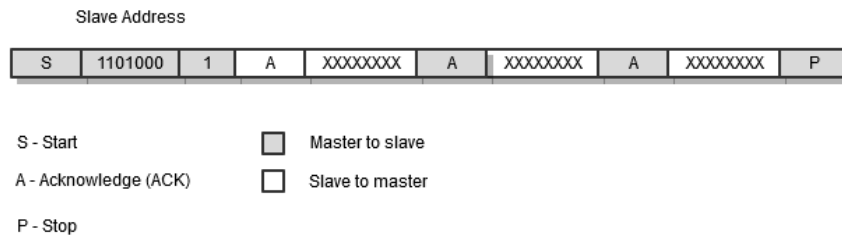
### 3.2.1 Περιφερειακές συσκευές

Οι περιφερειακές συσκευές είναι όλες εκείνες οι συσκευές, που συνδέονται με το βασικό υπολογιστικό σύστημα δηλαδή τον μικροελεγκτή ATMEGA2650 και έχουν ως στόχο την διεύρυνση των λειτουργιών του σταθμού βάσης. Παρακάτω γίνεται περιγραφή των βασικών περιφερειακών συσκευών όπως είναι το DS1307 RTC, το 4digit 7-segment display και οι ηλεκτροβάνες.

#### RTC DS1307

Ένα RTC ρολόι χρησιμοποιείται για την καταγραφή του ακριβούς χρόνου ενός συστήματος, όπως χρησιμοποιούνται τα κοινά ρολόγια στην καθημερινή ζωή. Το DS1307 έχει την δυνατότητα να παρέχει δευτερόλεπτα, λεπτά, ώρες, μήνες, χρόνια μέχρι το 2100 καθώς και χαρακτηριστικές συναρτήσεις όπως η εύρεση της μέρας ανά βδομάδα ή μήνα. Αν και στα περισσότερα συστήματα ο μικροελεγκτής που διαθέτουν, παρέχει εσωτερικά ρολόγια, προτιμάται η ύπαρξη εξωτερικής συσκευής όπως το DS1307 για τις κρίσιμες στο χρόνο εργασίες. Συνεπώς για κάποιο λόγο που απαιτείται η επανεκκίνηση του μικροελεγκτή, το ds1307 συνεχίζει να λειτουργεί σταθερά καταγράφοντας τον χρόνο χρησιμοποιώντας, έναν εξωτερικό ταλαντωτή των 32MHz και δική του πηγή τροφοδοσίας [21]. Όλες οι πληροφορίες που αφορούν τον χρόνο ανακτώνται κατά την ανάγνωση των κατάλληλων καταχωρητών. Στο παρών σύστημα η αρχικοποίηση του ds1307 πραγματοποιήθηκε με την εγγραφή των καταχωρητών από την σειριακή θύρα (USB) ενός υπολογιστή. Η σύνδεση του ds1307 με τον μικροελεγκτή πραγματοποιείται με το I2C πρωτόκολλο. Όπως έχει αναφερθεί η master συσκευή ξεκινάει την μετάδοση με την συνθήκη έναρξης και την αποστολή της διεύθυνσης της slave συσκευής στον δίαυλο. Στην συνέχεια η slave συσκευή στέλνει επιβεβαίωση, καθώς και τα πραγματικά δεδομένα δηλαδή τον χρόνο και ολοκληρώνεται η επικοινωνία με την συνθήκη τερματισμού. Παρακάτω φαίνεται η ροή των bytes όπου απαιτούνται για την ανάγνωση του χρόνου από τον μικροελεγκτή.





Σχήμα 3-19. RTC stream of bytes

#### 4digit 7-segment display

Άλλη μια περιφερειακή συσκευή που χρησιμοποιήθηκε στο σύστημα ήταν ένα πάνελ τεσσάρων ψηφίων για την προβολή κωδικών κατάστασης. Για την κάθε κατάσταση του συστήματος είτε ποτίσματος, είτε συλλογής των μετρήσεων έχει αντιστοιχηθεί και ένας κωδικός όπως φαίνεται και αναλυτικότερα κατά την περιγραφή της λειτουργικότητας του σταθμού βάσης. Για κάθε ψηφίο μαζί με την υποδιαστολή χρειάζονται 8 bit ενεργοποίησης όσα και τα led. Για την σύνδεση του 7-segment display με τον μικροελεγκτή χρησιμοποιήθηκε το I2C πρωτόκολλο αποστέλλοντας συνολικά 4 Byte όσα και τα segments.



Σχήμα 3-20. 4digit display

#### Ηλεκτροβάνες

Η ηλεκτροβάννα είναι μια ηλεκτρομαγνητική βαλβίδα η οποία με το ηλεκτρικό ρεύμα και ένα ηλεκτρομαγνητικό πηνίο έχει ως στόχο τον έλεγχο της ροής των υγρών αλλά και των αερίων. Όταν ρέει ρεύμα στο πηνίο παράγεται ηλεκτρομαγνητική δύναμη η οποία μετατοπίζει την βαλβίδα. Μια ηλεκτρομαγνητική βαλβίδα δύο θυρών είτε ενεργοποιεί είτε απενεργοποιεί την ροή του υγρού. Αντίστοιχα ηλεκτροβάνες τριών θυρών μεταβάλλουν την εκροή του υγρού μεταξύ των δύο θυρίδων εξόδου. Η δύναμη που παράγεται θα πρέπει να είναι ικανή να μετατοπίσει την βαλβίδα και άρα θα εξαρτάται από την πίεση του υγρού αλλά και την διατομή του σωληνοειδούς. Όπως φαίνεται και στον παρακάτω τύπο η δύναμη μετριέται σε Newton και όπου P αποτελεί την πίεση και όπου A το εμβαδόν της διατομής του σωληνοειδούς. Οι διάφορες ηλεκτροβάνες στο εμπόριο κατηγοριοποιούνται βάση της πίεσης κατά την λειτουργία τους η οποία μετριέται σε psi (pound-force per square inch). Στον συγκεκριμένο σταθμό βάσης χρησιμοποιήθηκε ηλεκτροβάννα τάσης 12 V και πίεσης 0.02 MPa - 0.8 MPa.



Σχήμα 3-21. Solenoid

$$F = PA = P\pi \frac{d^2}{4} \quad 1P = \frac{N}{m^2} = \frac{J}{m^3}$$

Όπου :

F : απαιτούμενη δύναμη ηλεκτροβάνας

P : πίεση του υγρού

A : εμβαδόν διατομής ηλεκτροβάνας

## ZigBee S2

Όπως και στις απομακρυσμένες συσκευές έτσι και στον σταθμό βάσης χρησιμοποιήθηκε ένα ZigBee S2 για την μεταξύ τους επικοινωνία. Τόσο η δομή όσο και τα πρωτόκολλα επικοινωνίας παραμένουν ίδια ενώ αυτό που αλλάζει είναι ότι πλέον το ZigBee λειτουργεί ως συντονιστής του ασύρματου δικτύου αισθητήρων. Συνεπώς είναι η συσκευή που αναλαμβάνει την αποστολή του σήματος για την ενεργοποίηση των απομακρυσμένων συσκευών καθώς και την ανάγνωση των μετρήσεων από αυτές. (Για αναλυτικότερη περιγραφή του ZigBee και του πρωτοκόλλου επικοινωνίας βλέπε 3.1.2) .



Σχήμα 3-22. Arduino GSM Shield

### 3.2.2 GSM-GPRS

Για την αποστολή των δεδομένων των μετρήσεων σε μία βάση αλλά και για την επικοινωνία με μία εφαρμογή χρησιμοποιήθηκε ένα GSM-GPRS shield της εταιρείας Arduino, βασισμένο στο modem M10 της εταιρείας Quectel. Το συγκεκριμένο shield μπορεί να αποστέλλει και να λαμβάνει κλήσεις ήχου και γραπτά μηνύματα καθώς και να συνδέεται στο διαδίκτυο υλοποιώντας το HTTP πρωτόκολλο μέσω του GPRS και μίας κεραίας. Στο συγκεκριμένο σύστημα χρησιμοποιήθηκε μόνο η λειτουργία σύνδεσης στο Internet, υλοποιώντας τις μεθόδους του HTTP πρωτοκόλλου, μέσω του δικτύου 3G και της χρήσης μίας sim κάρτας.

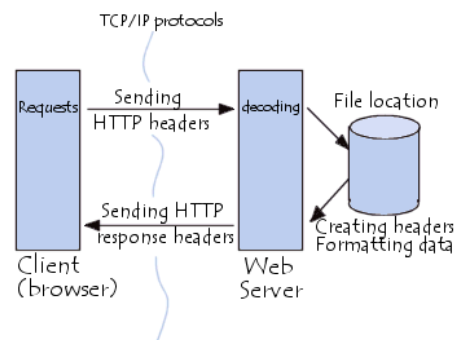
Το Global System Mobile (GSM) είναι το πρωτόκολλο επικοινωνίας που χρησιμοποιούν όλες οι κινητές συσκευές (κινητά, tablets) κατά την κυψελωτή τηλεφωνία για την διασύνδεσή τους με τις κεραίες της κινητής τηλεφωνίας ανά τον κόσμο. Πρώτη φορά δημιουργήθηκε τον Δεκέμβριο του 1991 στην Φινλανδία [23] και ουσιαστικά αποτελεί ένα ψηφιακό κύκλωμα, αποδεκτό από το 90% της αγοράς της κινητής τηλεφωνίας σε περισσότερο από 193 χώρες. Οι υπηρεσίες που καλύπτει το GSM είναι η τηλεφωνική επικοινωνία, η μεταφορά δεδομένων καθώς και επιπλέον υπηρεσίες όπως αναγνώριση, αναμονή, φραγή, προώθηση κλήσης. Το ψηφιακό κύκλωμα GSM υποστηρίζει συχνότητες από 900 MHz έως 1800 MHz [24]. Λόγο του μεγάλου όγκου χρηστών εφαρμόζονται στην κυψελωτή τηλεφωνία τεχνικές διαίρεσης του χρόνου και της συχνότητας για

την πρόσβαση στο μέσο ανά γεωγραφική περιοχή, γνωστές και ως Time Division Multiple Access (TDMA) και Frequency Division Multiple Access (FDMA). Εν τέλει διαιρεί την συχνότητα σε 124 φορείς των 200 kHz και έπειτα διαιρεί την κάθε συχνότητα σε 8 ανεξάρτητες χρονικές σχισμές καλύπτοντας μια συγκεκριμένη περιοχή. Οι χρονικές σχισμές διαχωρίζονται βάση χρόνου έτσι ώστε η συσκευή να μην λαμβάνει και αποστέλλει την ίδια χρονική στιγμή. Συνεπώς στην κυψελωτή τηλεφωνία υπάρχει μεγαλύτερη γεωγραφική κάλυψη, αύξηση της χωρητικότητας του δικτύου και μείωση του κόστους.

Λόγο του ότι το GSM υποστηρίζει δεύτερης γενιάς (2G) δίκτυο κινητής τηλεφωνίας, με ρυθμό που φτάνει τα 50 kbit/s, η συνεχής αύξηση του όγκου των δεδομένων έφερε στο προσκήνιο την ανάγκη για μεγαλύτερες ταχύτητες μετάδοσης. Μια αναβάθμιση του GSM αποτελεί το General Packet Radio Service (GPRS) όπου χρησιμοποιεί το δίκτυο τρίτης γενιάς (3G) και είναι ικανό να μεταφέρει δεδομένα σε πολύ υψηλές ταχύτητες. Αυτοί οι ρυθμοί επιτρέπουν την πλήρη χρήση του Internet, την μεταφορά αρχείων FTP, chat, e-mail, web browsing, κλπ. Αρχικά το GPRS χρησιμοποιούσε το 3G δίκτυο με ταχύτητες 114 kbit/s και σταδιακά με την αναβάθμιση του όπως φαίνεται και από τον πίνακα έφτασε ταχύτητες μέχρι τα 42 Mbps. (edge 236kbit/s, hspa 14Mbps). Πλέον για ταχύτητες μεγαλύτερες των 100 Mbps προτιμάται το 4G δίκτυο για μεταφορά HD video streaming όπου φτάνουν τα 300 Mbps.

Πίνακας 3-14. GPRS data transmission rates

	Value	Unit
GPRS	114	kbit/s
EDGE	386	kbit/s
HSPA	7.2	Mbit/s
HSPA+	56	Mbit/s



Σχήμα 3-23. Server-Client Communication

Καθώς η χρήση του modem, του GPRS και του δικτύου 3G αποτελούν τα μέσα για την επικοινωνία του συστήματος με το διαδίκτυο, η υλοποίηση του πρωτοκόλλου HTTP αποτελεί το τρόπο της επικοινωνίας. Το πρωτόκολλο μεταφοράς υπερκειμένου (HTTP) είναι ένα πρωτόκολλο επικοινωνίας όπου χρησιμοποιείται για την μεταφορά δεδομένων ανάμεσα σε έναν διακομιστή (server) και έναν πελάτη (client) [25]. Στην προκειμένη περίπτωση τον ρόλο του πελάτη τον υλοποιεί το ενσωματωμένο σύστημα και τον ρόλο του διακομιστή ένα virtual machine. Το ενσωματωμένο σύστημα ανοίγει μία σύνδεση θέτοντας ερωτήματα στον διακομιστή και έπειτα περιμένει έως ότου λάβει απάντηση. Αντίστοιχα ο διακομιστής απαντά είτε παρέχοντας περιεχόμενο είτε κάποιους κωδικούς κατάστασης. Σε αυτό το πρωτόκολλο βασικό χαρακτηριστικό είναι η δυναμική του κατάσταση κατά την οποία η σύνδεση διατηρείται για όσο διάστημα διαρκεί ένα αίτημα.

Για την επικοινωνία το HTTP πρωτόκολλο χρησιμοποιεί μία διεύθυνση γνωστή με το όνομα Uniform Resource Identifiers (URI), η οποία είναι μια συμβολοσειρά από πληροφορίες όπως η τοποθεσία, η θύρα του διακομιστή με στόχο την κατανάλωση συγκεκριμένων υπηρεσιών. Αυτή η συμβολοσειρά περιέχει επίσης πληροφορίες για το είδος του ερωτήματος. Ο διακομιστής θα αναγνωρίσει το είδος του ερωτήματος και θα απαντήσει υλοποιώντας τις μεθόδους του πρωτοκόλλου GET, POST, PUT, DELETE.

Παρακάτω φαίνονται τόσο GET όσο και POST ερωτήματα του ενσωματωμένου συστήματος στον διακομιστή. Επιπρόσθετες πληροφορίες μπορούν να αποσταλούν μαζί με το

ερώτημα όπως είναι το είδος του περιεχομένου (content-type), το μέγεθος (content-length), τις γλώσσες κωδικοποίησης (accept-language, accept-encoding). Τέλος σε μία απάντηση του διακομιστή εμπεριέχεται και ένας τριψήφιος αριθμός όπου υποδηλώνει την κατάσταση του ερωτήματος, παρέχοντας την δυνατότητα διαχείρισής του σε περίπτωση σφάλματος. Στον παρακάτω πίνακα περιγράφονται τα γενικά μηνύματα για τους αντίστοιχους κωδικούς κατάστασης.

```
POST /FarmCloud/embedded/manualwatering/save/ HTTP/1.1
User-Agent: Arduino/1.0
Host: **.**.**.**
Content-Type: application/json;charset=UTF-8
Content-Length: 88
Accept-Language: en-us
Connection: close

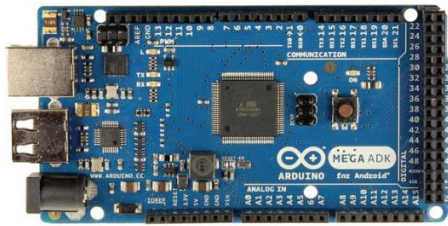
{
    "autoIrrigFromTime": "",
    "autoIrrigUntilTime": "",
    "waterConsumption": "",
    "identifier": ""
}
```

```
GET /FarmCloud/embedded/setup?identifier="" HTTP/1.1
User-Agent: Arduino/1.0
Host: **.**.**.**
Accept-Language: en-us
Connection: close
```

Πίνακας 3-15. Http codes

S.N.	Code and Description
1	1xx : <b>Informational</b> . This means request received and continuing process
2	2xx : <b>Success</b> . This means the action was successfully received, understood, and accepted.
3	3xx : <b>Redirection</b> . This means further action must be taken in order to complete the request
4	4xx : <b>Client Error</b> . This means the request contains bad syntax or cannot be fulfilled
5	5xx : <b>Server Error</b> . The server failed to fulfill an apparently valid request

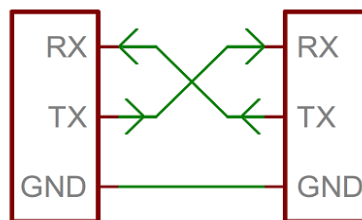
Η υλοποίηση του διακομιστή για το παρόν σύστημα αποτελεί υλοποίηση της διπλωματικής του Σμυρναίου Δημήτρη με θέμα «A Web of Things integrated Arduino Wireless Sensor Based Automatic Plant Watering System». Συνοπτικά αποτελεί ένα virtual machine στο οποίο έχει εγκατασταθεί ένας docker και πάνω στον docker μία βάση δεδομένων καθώς και το Java Runtime Environment για την εκτέλεση Java εφαρμογών.



Σχήμα 3-24. Arduino Mega ADK

### 3.2.3 Arduino Mega

Το Arduino mega αποτελεί την βασική μονάδα του σταθμού βάσης το οποίο είναι μία ολοκληρωμένη λύση βασισμένο στον μικροελεγκτή ATmega 2560. Διαθέτει 54 ψηφιακές εισόδους/εξόδους ομαδοποιημένες σε ports A-J, από τις οποίες οι 15 μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν εξόδους PWM. Επίσης περιέχει 16 αναλογικές εισόδους, 4 UARTs, έναν 16 MHz ταλαντωτή, flash memory, SRAM και EEPROM [22]. Βασικός σκοπός του Arduino mega όπως και κάθε μικροελεγκτή είναι η διασύνδεση των περιφερειακών συσκευών του συστήματος σύμφωνα με τις απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής. Στον παρόν σύστημα το ZigBee, το RTC, το 7-segment display, οι ηλεκτροβάνες και το GSM shield διασυνδέονται στο Arduino mega υλοποιώντας τον αλγόριθμο του συστήματος όπως περιγράφεται στο 3.2.4. Για την διασύνδεση του RTC και των segment χρησιμοποιήθηκε το πρωτόκολλο I2C (1.1.3) σε διευθύνσεις 0X68 και 0X80 αντίστοιχα, ενώ όσον αφορά τις ηλεκτροβάνες, δεσμεύτηκαν 8 pins από τον μικροελεγκτή ως ψηφιακά pins εξόδου, όπου αποτελούν και το μέγιστο αριθμό που το σύστημα υποστηρίζει. Τόσο για το ZigBee όσο και για το GSM shield επιλέχθηκε η σειριακή σύνδεση UART από την ώρα που ο μικροελεγκτής υποστηρίζει 4 ανεξάρτητες UART γραμμές.



Σχήμα 3-25. UART pin connections

Το Universal Asynchronous Receiver/Transmitter είναι ένα πρωτόκολλο σειριακής επικοινωνίας, όπου τα bits αποστέλλονται ακολουθιακά και ασύγχρονα. Συνεπώς η επικοινωνία δεν εξαρτάται από ένα κοινό ρολόι, αλλά από σήματα έναρξης και τερματισμού της επικοινωνίας. Στους περισσότερους μικροελεγκτές το UART βρίσκεται εσωτερικά ως ολοκληρωμένο κύκλωμα. Όπως έχει ήδη αναφερθεί στην σειριακή επικοινωνία (1.1.3), τα σήματα έναρξης και τερματισμού καθώς και η πραγματική πληροφορία αποτελούν τα πακέτα πληροφορίας που αποστέλλονται στον δίαυλο. Στο UART ο σειριακός δίαυλος αποτελείται από 2 καλώδια, ένα για να στέλνει και ένα για να λαμβάνει (Tx, Rx αντίστοιχα). Κατά την αποστολή το UART δημιουργεί το πακέτο πληροφορίας και το τοποθετεί στην Tx γραμμή, ενώ κατά την λήψη δειγματοληπτει την γραμμή Rx με ρυθμό ίδιο με το baud rate της αποστολής. Τέλος το UART χρησιμοποιεί πίνακες για την αποθήκευση των δεδομένων έως ότου τα παραλάβει ο μικροελεγκτής χρησιμοποιώντας First In First Out (FIFO) δομές.

Η συνεχής λειτουργία όλων των περιφερειακών, η επεξεργασία, η αποθήκευση των δεδομένων καθώς και η λήψη αποφάσεων απαιτούν αρκετό χώρο μνήμης είτε volatile είτε non-volatile

μορφής. Το Arduino mega διαθέτει μία 256KB flash μνήμη για την αποθήκευση των εντολών του συστήματος καθώς και μία 8KB SRAM μνήμη για την αποθήκευση των μεταβλητών κατά την διάρκεια λειτουργίας του. Επίσης διαθέτει μια 4KB EEPROM μνήμη για την αποθήκευση τιμών ακόμα και εάν το Arduino mega είναι κλειστό, λειτουργώντας ουσιαστικά σαν μικρός σκληρός δίσκος.

Όπως έχει περιγραφεί το Arduino mega αποτελεί μια all in one λύση ενός μικροελεγκτή με αρκετές εξόδους. Οι εξόδοι βρίσκονται ήδη συγκολλημένοι σε ένα board, παρέχοντας άμεσα διάφορες συνδέσεις για τα περιφερειακά. Αποτελεί μία καλή λύση για την κατασκευή συστημάτων περισσότερο προσωπικής χρήσης ή ελέγχου ενός συστήματος. Ωστόσο τα πολλά διαφορετικά εξαρτήματα από leds, adc converters, USB connector που διαθέτει το κάνουν λιγότερο αποδοτικό ως προς την κατανάλωση και σε συνδυασμό με την μέτρια ποιότητα των pins headers και τον περιορισμό των 12 V ως τάση εισόδου το καθιστά λιγότερο αξιόπιστο για εμπορική χρήση.

### 3.2.4 Λειτουργικότητα Σταθμού Βάσης

Η λειτουργικότητα του σταθμού βάσης αποτελεί και τον βασικό αλγόριθμο του ενσωματωμένου συστήματος. Ο αλγόριθμος αποτελείται από 4 καταστάσεις την Setup, Automated Irrigation Algorithm, User Request και Error Weekly Irrigation. Το σύστημα ξεκινάει από την κατάσταση Setup και όταν ολοκληρωθεί επιτυχώς ακολουθούν οι καταστάσεις Automated Irrigation Algorithm όπου εκτελείται το αυτόματου πότισμα, και User request όπου γίνεται έλεγχος των αιτημάτων του χρήστη. Σε κάθε κατάσταση υπάρχουν σήματα ελέγχου σωστής λειτουργίας του ενσωματωμένου και στην περίπτωση που κάποια από τα κρίσιμα τμήματα του συστήματος καταρρεύσει πραγματοποιείται αυτόματο πότισμα κάθε Παρασκευή στις 19:30 για μισή ώρα μεταβαίνοντας στην κατάσταση Error Weekly Irrigation.

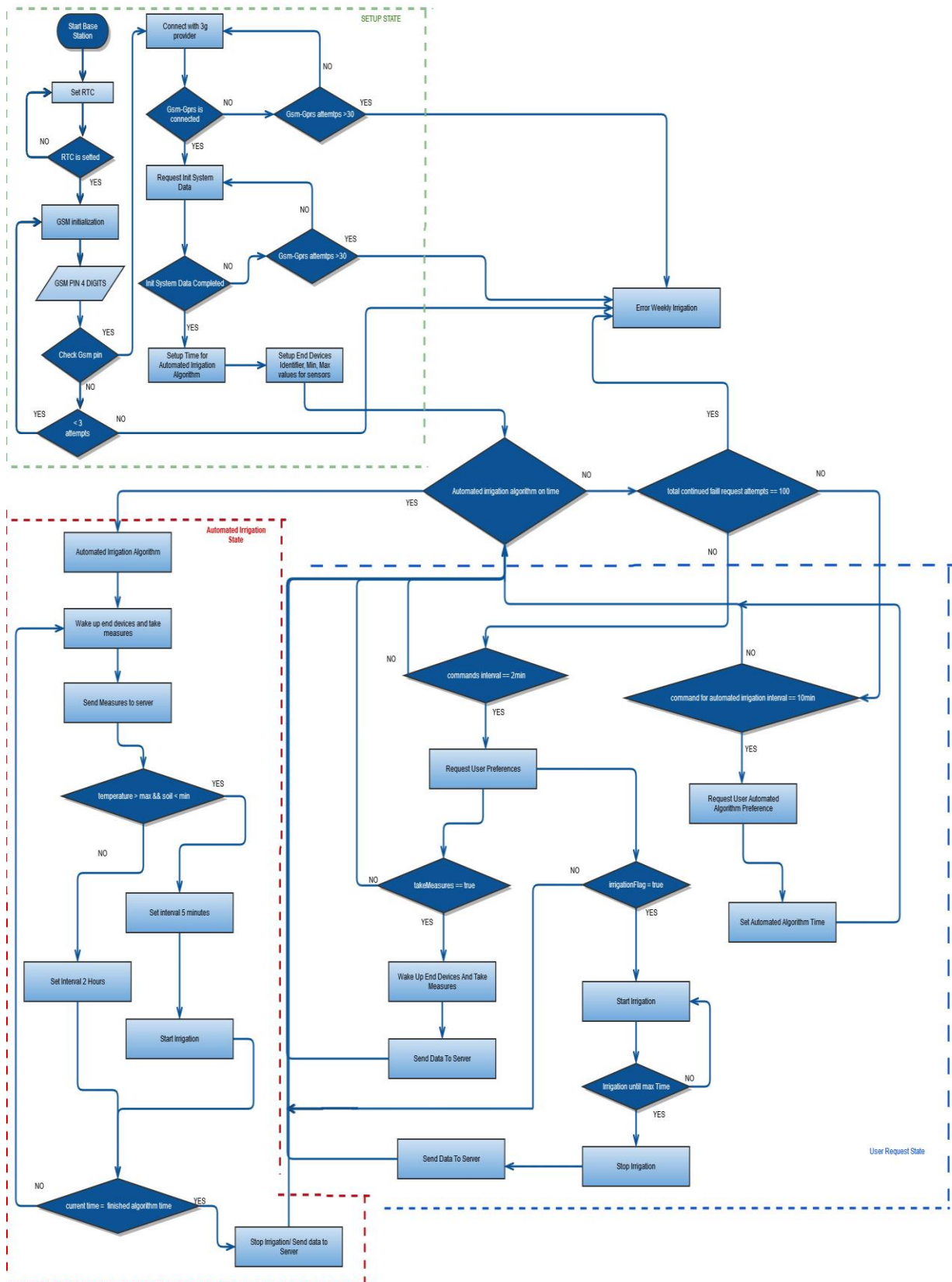
Κατά την κατάσταση εγκατάστασης ενεργοποιείται το RTC ρολόι θέτοντας του τιμές για την πρώτη φορά από έναν υπολογιστή μέσω μιας σειριακής θύρας USB. Αυτό συμβαίνει μόνο την πρώτη φορά λόγω της ικανότητας του RTC να κρατά τις τιμές ακόμα και σε ενδεχόμενο τερματισμό ή επανεκκίνηση του συστήματος χρησιμοποιώντας μια μπαταρία των 3.3 V. Η επιτυχής ρύθμιση του RTC αποτελεί το πιο σημαντικό κομμάτι του αλγορίθμου καθώς καμία περεταίρω λειτουργία δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί μέχρι την αντιμετώπιση του προβλήματος. Στην συνέχεια πραγματοποιείται η ρύθμιση του GSM και η σύνδεση του σε έναν πάροχο 3G μέσω μίας κάρτας SIM, θέτοντας έναν 4ψήφιο αριθμό. Η τοποθέτηση του 4ψήφιου αριθμού γίνεται μέσω ενός πληκτρολογίου και παρουσιάζεται σε ένα 4ψήφιο πάνελ. Ο χρήστης έχει 3 επιλογές για σωστή καταχώρηση του 4ψήφιου αριθμού σε κάθε άλλη περίπτωση η SIM κάρτα κλειδώνει και το σύστημα μεταβαίνει στην κατάσταση Error Weekly Irrigation. Όταν το GSM συνδεθεί επιτυχώς στο δίκτυο το σύστημα είναι έτοιμο για την επικοινωνία με τον διακομιστή. Το τελευταίο βήμα της κατάστασης Setup περιλαμβάνει την αποστολή του πρώτου ερωτήματος προς τον διακομιστή και την λήψη και την διαχείριση της απάντησης. Η απάντηση περιέχει τιμές αρχικοποίησης για το σύστημα όπως τον αριθμό, την διεύθυνση των απομακρυσμένων συσκευών, τις ώρες του αυτόματου αλγορίθμου ποτίσματος, καθώς και τις μέγιστες και ελάχιστες τιμές των αισθητήρων που ικανοποιούν τις συνθήκες ποτίσματος. Συνεπώς για κάθε χρήστη υπάρχουν προκαθορισμένες τιμές σε μία βάση η οποίες λειτουργούν για την δυναμική εγκατάσταση του συστήματος πάντα με κάποιους περιορισμούς λόγω ύπαρξης και υλικού πέρα του λογισμικού. Τέλος αν κατά την διαδικασία λήψης των αρχικών τιμών υπάρξει κάποιο σφάλμα όπως ένα timeout στο αίτημα ή πρόβλημα στον διακομιστή ή την βάση πραγματοποιούνται 30 προσπάθειες σύνδεσης στον διακομιστή και έπειτα μεταβαίνει στην κατάσταση Error Weekly Irrigation.

Πλέον το σύστημα έχει αρχικοποιηθεί και είναι έτοιμο για την εκτέλεση των δυο βασικών του καταστάσεων βάση της ώρας έναρξης και λήξης του αλγορίθμου αυτόματου ποτίσματος που έχει δώσει ο χρήστης. Κάθε στιγμή το σύστημα ελέγχει την τρέχουσα ώρα εάν βρίσκεται στα όρια



της δοθείσας τιμής και αποφασίζει την μετάβαση είτε στην κατάσταση Automated Irrigation ή User Request. Κατά την διάρκεια της κατάστασης του αυτόματου ποτίσματος το σύστημα ελέγχει και αξιολογεί την κατάσταση της περιοχής και αποφασίζει την έναρξη και λήξη του ποτίσματος. Συγκεκριμένα ενεργοποιεί και συλλέγει τις τιμές των μετρήσεων όλων των απομακρυσμένων συσκευών. Στην συνέχεια αποστέλλει τις μετρήσεις στον διακομιστή και τις συγκρίνει με τις τιμές αρχικοποίησης του συστήματος για κάθε απομακρυσμένη συσκευή. Οι τιμές για τις συνθήκες έναρξης του ποτίσματος μπορούν να διαφέρουν για κάθε απομακρυσμένη συσκευή σε περιπτώσεις υψομετρικών διαφορών κατά μήκος της έκτασης. Στην περίπτωση που ικανοποιούνται τα όρια τόσο της θερμοκρασίας και της υγρασίας του χώματος ξεκινάει το πότισμα ανοίγοντας την ηλεκτροβάννα για την αντίστοιχη απομακρυσμένη συσκευή. Για όση ώρα οι ηλεκτροβάννες είναι ανοιχτές επαναλαμβάνει την ίδια διαδικασία δηλαδή την ενεργοποίηση των συσκευών την συλλογή και αξιολόγηση μετρήσεων κάθε 5 λεπτά. Η συνεχής συλλογή των μετρήσεων εκτελείται λόγω της μεταβολής τόσο της θερμοκρασίας όσο και της υγρασίας και άρα των μετρήσεων κατά την διάρκεια του ποτίσματος. Με την πάροδο της ώρας η θερμοκρασία μειώνεται και η υγρασία αυξάνεται και άρα παύουν να ικανοποιούνται οι συνθήκες ποτίσματος. Συνεπώς τότε σταματάει το πότισμα για την αντίστοιχη απομακρυσμένη συσκευή, αποστέλλονται οι χρόνοι ποτίσματος στον διακομιστή και η ενεργοποίηση των συσκευών και η αξιολόγηση πραγματοποιούνται κάθε 2 ώρες μέχρι την λήξη του αλγορίθμου. Όπως συμβαίνει σε όλες τις καταστάσεις έτσι και εδώ σήματα ελέγχουν υλοποιούνται για την ορθή αποστολή των μετρήσεων από τις απομακρυσμένες συσκευές στον σταθμό βάσης .

Όταν το σύστημα μεταβαίνει στην κατάσταση User Request, δηλαδή εκτός των ορίων της ώρας του αυτόματου ποτίσματος, πραγματοποιεί ερωτήματα προς τον διακομιστή για την ενημέρωση του συστήματος για τυχόν απαιτήσεις του χρήστη. Με διάστημα χρόνου ανά 2 λεπτά ελέγχει την απαίτηση του χρήστη για άμεση ενεργοποίηση των απομακρυσμένων συσκευών και την συλλογή των μετρήσεων. Για το ίδιο διάστημα το σύστημα ελέγχει την αίτηση του χρήστη για άμεσο πότισμα με προκαθορισμένο χρόνο και διάρκεια για την τρέχουσα μέρα ενεργοποιώντας τις αντίστοιχες ηλεκτροβάννες. Στο τέλος του ποτίσματος των περιοχών όπου έδωσε εντολή ο χρήστης αποστέλλονται στον διακομιστή οι χρόνοι ποτίσματος για επιβεβαίωση και για τον υπολογισμό της συνολικής κατανάλωσης του νερού. Ένας ακόμα έλεγχος που πραγματοποιείται με διάστημα χρόνου ανά 10 λεπτά είναι η απαίτηση του χρήστη για αλλαγή της έναρξης και λήξης του αλγόριθμου αυτόματου ποτίσματος. Όταν το σύστημα βρίσκεται στην κατάσταση User Request και αποτυγχάνει 100 συνεχόμενες φορές να λάβει απαντήσεις από τον διακομιστή που αφορούν τις απαιτήσεις του χρήστη είτε λόγω δυσλειτουργίας του διακομιστή ή της συγκεκριμένης υπηρεσίας τότε το σύστημα μεταβαίνει στην κατάσταση Error Weekly Irrigation. Το σύστημα μέσω ενός 4ψήφιου πάνελ ενημερώνει τον χρήστη σε ποια κατάσταση βρίσκεται κάθε φορά ο αλγόριθμος, αναφέροντας και συγκεκριμένες λειτουργίες όπως η αποστολή μετρήσεων, έναρξη ποτίσματος, ενεργοποίηση απομακρυσμένων συσκευών κτλ. Εκτός από τις διεργασίες ο χρήστης ενημερώνεται και για τις καταστάσεις λάθους του συστήματος και την μετάβαση στην κατάσταση Error Weekly Irrigation ενεργοποιώντας και συγκεκριμένα leds. Η ενημέρωση που λαμβάνει ο χρήστης για το σύστημα πραγματοποιείται εν τέλει αντιστοιχίζοντας όλες τις διεργασίες και τις καταστάσεις λάθους σε κωδικούς διεργασιών και λάθους αντίστοιχα όπως φαίνεται και στον παρακάτω πίνακα.



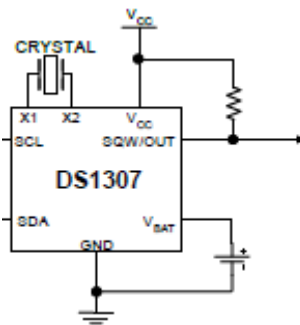
Σχήμα 3-26. Base station flow diagram



### 3.2.5 Ηλεκτρικά Χαρακτηριστικά

**Πίνακας 3-16. DS1307 electrical characteristics**

	min	typical	max	units
Supply Voltage VCC	4.5	5	5.5	V
Battery Voltage Vbat	2	3	3.5	V
Operating current			200	μA
Temperature	-40		85	C



*Σχήμα 3-27. Ds1307 electrical circuit*

**Πίνακας 3-17. 4Digit Display characteristics**

	value	unit
Supply Voltage	5	V
Operating current	12	mA
Temperature	- 50 ≤ T ≤ 80	C

**Πίνακας 3-18. Solenoid electrical characteristics**

Solenoid AQ15SP			
Supply Voltage	12V		
Flow Rate	0.02MPa ≥ 3 L/min	0.1MPa ≥ 12 L/min	0.8MPa ≥ 35 L/min
Resistance Coil	4.75 KΩ		
Water Temperature	0 ≤ 60C		
Operating Current	230mA		

**Πίνακας 3-19. Arduino Mega electrical characteristics**

	min	typical	max	unit
Supply Voltage		5		V
Input Voltage	6		20	V
Dc current per I/O pin		20		mA
Recommended Input Voltage	7		12	V
Temperature	-55		180	C

**Πίνακας 3-20. Base station electrical characteristics**

	Description	Value	Unit
Supply Voltage		12	V
Operating Current	idle	110	mA
	GSM operating	250	mA
	Watering operating (1 solenoid)	340	mA
	Communication with End Devices	135	mA
	Max operating (1 solenoid)	500	mA
Temperature	- 55 ≤ T ≤ 80		C

## 4. Συμπεράσματα

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται οι βελτιώσεις που πραγματοποιήθηκαν κατά την διάρκεια του σχεδιασμού του συστήματος, καθώς και μελλοντικές βελτιώσεις όπου μπορούν να γίνουν, με απώτερο στόχο την μείωση της κατανάλωσης, την διασφάλιση της ομαλής λειτουργίας και τον απομακρυσμένο επανα-προγραμματισμό του συστήματος.

Κατά τον πρώτο σχεδιασμό της απομακρυσμένης συσκευής χρησιμοποιήθηκε τροφοδοσία 12V. Λόγω του ότι η τάση εισόδου τόσο του μικροελεγκτή όσο και των αισθητήρων ήταν στα 5V χρησιμοποιήθηκε σταθεροποιητής τάσης (linear regulator). Ως συνέπεια της πτώσης τάσης (7V drop voltage) διαπιστώθηκε αύξηση της θερμότητας (heat). Μια πρώτη βελτίωση ήταν η επιλογή τάσης εισόδου στα 9V σε συνδυασμό με έναν step-down regulator. Η χρήση ενός switch regulator συμβάλλει στην εξομάλυνση της τάσης με την χρήση ενός πηνίου και ενός πυκνωτή διοχετεύοντας και αποθηκεύοντας από το πρώτο στο δεύτερο το ρεύμα με απόδοση 80-90% χωρίς αύξηση της θερμότητας. Στο παρακάτω πίνακα φαίνεται ο μέγιστος χρόνος όπου η απομακρυσμένη συσκευή μπορεί να λειτουργεί συνεχόμενα χωρίς την ενεργοποίηση του sleep mode τόσο με την χρήση αλκαλικών μπαταριών όσο και μπαταριών λιθίου. Η αλλαγή της πηγής από αλκαλικές μπαταρίες σε λιθίου με τάση εισόδου 3.7V, οδήγησε στην χρησιμοποίηση ενός step-up regulator ώστε να πλήρη τις απαιτήσεις της συσκευής με λειτουργία τάσης τα 5V.

**Πίνακας 4-1. End Device Life Batteries**

		8battery pack AA Alkaline	3.7 V Lithium battery 3350 mAh
Total Current	30mA		
Total Power	$30\text{mA} * 12\text{V} = 360\text{mW}$		
Battery Lasts		$2600\text{mAh} / 30\text{mA} = 87\text{Hours}$	$3350\text{mAh} / 30\text{mA} = 112\text{Hours}$

Όπως ήδη έχει αναφερθεί σε ένα WSN οι απομακρυσμένες συσκευές σε αντίθεση με τον σταθμό βάσης μπορούν να λειτουργούν σε sleep mode για την μείωση της κατανάλωσης. Στον παρακάτω πίνακα φαίνεται η ένταση των ρευμάτων για τα διαφορετικά modes wake/sleep τόσο του μικροελεγκτή όσο και του rf transmitter και ολόκληρης της συσκευής.

**Πίνακας 4-2. Components Current Consumption**

	Wake Up	Sleep
Microcontroller	14mA	0.5mA
ZigBee	15mA - 45mA (on send data)	
EndDevice	30mA	15mA

Εν τέλει για να υπολογιστεί ο μέγιστος χρόνος λειτουργίας της απομακρυσμένης συσκευής θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ο αλγόριθμος του ποτίσματος και η λειτουργικότητα του σταθμού βάσης (βλ. 3.2.6 Λειτουργικότητα Σταθμού Βάσης) για το αν και για πόσο θα ενεργοποιείται η απομακρυσμένη συσκευή. Δηλαδή έχει να κάνει, τόσο με τις καιρικές συνθήκες όσο και με τις ώρες που έχει επιλέξει ο χρήστης για το αυτόματο πότισμα αλλά και για το πότισμα πραγματικού χρόνου (real time irrigation). Συνεπώς λόγω των τόσο διαφορετικών παραμέτρων που συμβάλλουν στην συνολική κατανάλωση θα ήταν αναγκαία η χρήση ηλιακών πάνελ συνδυάζοντας αισθητήρες μέτρησης έντασης του ρεύματος για την διασφάλιση της ομαλής λειτουργίας της απομακρυσμένης συσκευής.

Μια επιπλέον σημαντική βελτίωση της απομακρυσμένης συσκευής θα μπορούσε να είναι τόσο η αφαίρεση τους σταθεροποιητή τάσης όσο και του ίδιου του μικροελεγκτή. Η πρώτη περίπτωση επιτυγχάνεται με την αλλαγή των αισθητήρων σε αντίστοιχους με λειτουργία τάσης τα 3.7 V. Κατά την δεύτερη περίπτωση η χρήση μόνο του ZigBee για συγκεκριμένο αριθμό αισθητήρων θα μείωνε την κατανάλωση του συστήματος, καθώς το ίδιο το ZigBee εμπεριέχει έναν μικροελεγκτή με περιορισμένο αριθμό αναλογικών/ψηφιακών εισόδων/εξόδων καθώς και έναν ADC.

Τέλος μια μελλοντική βελτίωση όπου είναι σε θεωρητικό ακόμα επίπεδο και αφορά τόσο το ίδιο το σύστημα όσο και γενικότερα το IOT και τα WSN είναι ο απομακρυσμένος επαναπρογραμματισμός του συστήματος. Δηλαδή τον τρόπο που θα «φορτώσουμε» με νέα «λογική» το σύστημά μας απομακρυσμένα. Σε αυτή την περίπτωση θα μπορούσε παράλληλα με το εκάστοτε ολοκληρωμένο να υπάρχει ένας δεύτερος μικροελεγκτής όπου θα λειτουργεί ως AVR και μέσω μιας διαδικτυακής πλατφόρμας (Software AS Service) θα αποστέλλεται ο παραγόμενος κώδικας (HEX file).

# 5.

## Παράρτημα Α

---

- **List of acronyms and abbreviations**

IFRPI	International Food Policy Research Institute
GSM	Global System for Mobile Communications
GPRS	Global Packet Radio Service
WSN	Wireless Sensor Networks
WSU	Wireless Sensors Unit
WBU	Wireless Base Unit
RTC	Real Time Clock
MQTT	Message Queue Telemetry Transport
REST	Representational State Transfer.
GPIO	General Purpose Input/Output
RAM	Random Access Memory
ROM	Read-Only Memory
DSN	Distributed Sensor Networks
DARPA	Defense Advanced Research Projects Agency
ADC	Analog to Digital Converter
SPI	Serial Peripheral Interface
I2C	Inter-Integrated Circuit
SDIO	General purpose input/output
USB	Universal Serial Bus
MAC	Media Access Control
UDP	User Datagram Protocol
TCP	Transmission Control Protocol
SMP	Sensor Management Protocol
TADAP	Task Assignment and Data Advertisement Protocol
MPPT	Maximum Power Point Tracking
GAR	Genetic Algorithm-based Routing
DMA	Direct Memory Access
FPGA	Field-Programmable Gate Array

DSP	Digital Signal Processors
ASIC	Application-Specific Integrated Circuit
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
CPHA	Clock Phase
CPOL	Clock Polarity
WSU	Wireless Sensor Unit
WIU	Wireless Information Unit
PWM	Pulse Width Modulation
MIPS	Microprocessor without Interlocked Pipeline Stages
WPAN	Wireless Personal Area Networks
LLC	Logical Link Control
CSMA/CA	Carrier Sense Multiple Access / Collision Avoidance
CTS	Clear To Send
RTS	Ready To Send
UART	Universal Asynchronous Receiver/Transmitter
FIFO	First In First Out
HTTP	Hypertext Transfer Protocol
URI	Uniform Resource Identifiers

- **List of tables**

Πίνακας 1-1. Memory characteristics

Πίνακας 1-2. SPI signals

Πίνακας 2-1. Μηχανισμοί εξοικονόμησης ενέργειας

Πίνακας 3-1. Frequency Band

Πίνακας 3-2. ZigBee Stream of sent bytes

Πίνακας 3-3. Type of ZigBee frames

Πίνακας 3-4. Stream of received bytes

Πίνακας 3-5. ATMEGA Wake-up sources

Πίνακας 3-6. Dc Step-Up Regulator LM2577S-ADJ

Πίνακας 3-7. LM35 Analog Temperature Sensor

Πίνακας 3-8. Soil Moisture LM393

Πίνακας 3-9. DHT22 Digital Sensor electrical characteristics

Πίνακας 3-10. ZigBee S2 electrical characteristics

Πίνακας 3-12. Wireless Sensor Unit electrical requirements

Πίνακας 3-13. End Device Total Cost

Πίνακας 3-14. GPRS data transmission rates

Πίνακας 3-15. Http codes

Πίνακας 3-16. DS1307 electrical characteristics

Πίνακας 3-17. 4Digit Display

Πίνακας 3-18. Solenoid electrical characteristics

Πίνακας 4-1. End Device Life Batteries

Πίνακας 4-2. Components Current Consumption

## List of figures

Σχήμα 1-1. Διάγραμμα αναπαράστασης λειτουργίας του αυτοματοποιημένου συστήματος ύδρευσης

Σχήμα 1-2. Embedded System

Σχήμα 1-3. The Von Neumann architecture

Σχήμα 1-4. Harvard architecture

Σχήμα 1-5. Super Harvard architecture

Σχήμα 1-6 Microcontroller vs Microprocessor

Σχήμα 1-7. Types of memory

Σχήμα 1-8. Serial Communication Frame

Σχήμα 1-9. SPI architecture

Σχήμα 1-10. SPI chain

Σχήμα 1-11. I2C serial bus

Σχήμα 1-12. I2C frame

Σχήμα 1-13. I2C 10bits

Σχήμα 1-14 I2C repeated start condition

Σχήμα 1-15 Embedded System Design Flow

Σχήμα 2-1 Wireless Sensor Network

Σχήμα 2-2 WSN Topology

Σχήμα 2-3 WSN protocol

Σχήμα 3-1 Lm35

Σχήμα 3-2 Waterproof Analog lm35

Σχήμα 3-3. Dht22 pins output

Σχήμα 3-4. Dht22 Sensor

Σχήμα 3-5. Dht22 Stream of sent bytes

Σχήμα 3-6. Soil Moisture Sensor

Σχήμα 3-7. Network Communication Layers

Σχήμα 3-8. ZigBee protocol layers

Σχήμα 3-9. ATMEGA328 pins

Σχήμα 3-10. ATMEGA Safe Operating Area

- Σχήμα 3-11. ATMEGA components
- Σχήμα 3-12. End Device Flow Chart
- Σχήμα 3-13. 3.6V Lithium battery
- Σχήμα 3-14. Lm2477 Typical Application
- Σχήμα 3-15. Lm2577 end device application
- Σχήμα 3-16. End device electrical diagram
- Σχήμα 3-17. End Device printed circuit diagram
- Σχήμα 3-18. End Device PCB
- Σχήμα 3-19. RTC stream of bytes
- Σχήμα 3-20. 4digit display
- Σχήμα 3-21. Solenoid
- Σχήμα 3-22. Arduino GSM Shield
- Σχήμα 3-23. Server-Client Communication
- Σχήμα 3-24. Arduino Mega ADK
- Σχήμα 3-25. UART pin connections
- Σχήμα 3-26. Base station flow diagram
- Σχήμα 3-27. Ds1307 electrical circuit





# 6.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

---

- [1] Enrique Playan, Luciano Mateos. "Modernization and optimization of irrigation systems to increase water productivity", 2005
- [2] Shri Prakash R. Kolhe, Shri Pradip P Kolhe, M.H Tharkar. "Role of information technology in modern irrigation sector", 2014
- [3] Rose Mary Seymour, Sheryl Wells. "Using Water Wisely with Automated Irrigation Systems", The University of Georgia 2012
- [4] Steve Heath. "Embedded Systems Design", 2003
- [5] Vijaykrishnan Narayanan, Yuan Xie. "Reliability Concerns in Embedded System Designs", The Pennsylvania State University 2006
- [6] Xiacong Fan. "Introduction to Embedded and Real-Time Systems", 2015
- [7] Wayne Wolf. "Computers as Components, Principles of Embedded Computing System Design", 2η Έκδοση, 2008
- [8] Waltenegus Dargie and Christian Poellabauer "Fundamentals Of Wireless Sensor Networks Theory And Practice", Technical University of Dresden, Germany, University of Notre Dame USA, 2010
- [9] Vidushi Sharma and Anuradha Pughat "Energy-Efficient Wireless Sensor Networks", 2017
- [10] Pottie G. J., Kaiser W. J. "Wireless Integrated Network Sensors Communications of the ACM", 2000
- [11] Suneet K. Gupta, Pratyay Kuila, and Prasanta K. Jana, GAR: An energy efficient GA-Based routing for wireless sensor networks
- [12] I2C-bus specification and user manual, April 2014
- [13] Καλαϊτζάκη Κ., Κουτρούλη Ε. "Ηλεκτρικές Μετρήσεις και Αισθητήρες", 2010
- [14] ATMEGA48A/48PA/88A/88PA/168A/168PA/328/328P, ATMEL Datasheet Reference

- [15] Texas Instruments "LM35 Precision Centigrade Temperature Sensors Datasheet", November 2000
- [16] AOSONG, "Temperature and humidity module AM2302 Datasheet"
- [17] Texas Instruments "LMx93-N, LM2903-N Low-Power, Low-Offset Voltage, Dual Comparators", December 2014
- [18] ZigBee Alliance, "ZigBee Specification", September 2012
- [19] Robert Faludi, O'REILLY, "Building Wireless Sensor Networks", December 2010
- [20] Texas Instruments, "LM1577/LM2577 Simple Switcher Step-up Voltage Regulator", April 2013
- [21] DS1307 RTC Maxim Integrated Datasheet 2015
- [22] Atmel, "Atmel ATMEGA640/V-1280/V-1281/v-2560/V-2561/V datasheet 2014"
- [23] Anton A. Huurdeman, "The Worldwide History of Telecommunications", July 2003
- [24] Digital cellular telecommunications system, GSM0501, April 1998
- [25] Hypertext Transfer Protocol – HTTP/1.1, The Internet Society 1999, <https://tools.ietf.org/html/rfc2616>