



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

Ενσωματωμένο Σύστημα για Πυροδότηση Φωτογραφικού ΦΛΑΣ

Διπλωματική Εργασία

του

ΚΟΡΔΑ ΣΩΤΗΡΗ

Εξεταστική Επιτροπή

Καθ. Δόλλας Απόστολος

Αν. Καθ. Κουτρούλης Ευτύχιος

Αν. Καθ. Παπαευσταθίου Ιωάννης (ΑΠΘ)

Ευχαριστίες

*Ευχαριστώ τον επιβλέποντα καθηγητή κο Δόλλα Απόστολο,
καθώς και τους αναπληρωτές καθηγητές κο Κουτρούλη Ευτύχιο
και κο Παπαευσταθίου Ιωάννη της εξεταστικής επιτροπής,
Τον κο Γαλανομμάτη Ιωάννη για την ιδέα του θέματος
της παρούσας διπλωματικής εργασίας
και για τη συνεχή βοήθεια σε όλη την διάρκεια της εκπόνησής της.
Τους κο Μπροκαλάκη Ανδρέα, κο Οικονομόπουλο Ευάγγελο
και την κα Τσιλιγιάννη Χρύσα για τον εξοπλισμό
που πρόθυμα μού παρείχαν,
Την κα Μπαρούνη Πέγκυ για την υποστήριξή της
και τη βοήθειά της,
Την οικογένειά μου για τη συμμετοχή τους στα πειράματα,
την υπομονή και την κατανόησή τους.*

Πίνακας περιεχομένων

Λίστα Εικόνων	5
Λίστα Γραφημάτων	7
Λίστα Πινάκων	8
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	9
2 ΣΧΕΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ.....	11
2.1 Οι πρώτες εφαρμογές high speed photography και η εξέλιξη του εξοπλισμού.....	11
2.2 Τα αντανεκλαστικά και ο χρόνος αντίδρασης των ανθρώπων	13
2.3 Συνηθισμένα φαινόμενα ενδιαφέροντος και ο χρόνος εξέλιξης τους.....	14
2.4 Παρόμοια συστήματα triggering.....	17
2.5 Σύγκριση και δομή των συστημάτων	19
3 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ.....	21
3.1 Δυνατότητες και τεχνικά χαρακτηριστικά.....	21
3.2 Ικανότητες και απαιτήσεις.....	22
3.3 Ιδιαίτερες περιπτώσεις και εξαιρέσεις.....	24
3.4 Επιλογή Τεχνολογίας Βασικής Μονάδας	25
3.4.1 CPU.....	25
3.4.2 FPGA	27
3.4.3 Μικροελεγκτές/Επιλογή για το σύστημα	29
3.5 Επιλογή Τεχνολογίας Ασύρματης Σύνδεσης.....	32
3.5.1 Οπτική ζεύξη.....	32
3.5.2 Bluetooth/Wi-Fi	33
3.5.3 Zigbee/Παραλλαγές του Zigbee.....	36
3.5.4 RF/Επιλογή για το σύστημα	37
3.6 Μοντέλο του συστήματος.....	39
3.6.1 Υποσύστημα βάσης.....	40
3.6.2 Υποσυστήματα αισθητήρα	41
3.6.3 Επικοινωνία υποσυστημάτων.....	42
3.7 Σύγκριση δομής με άλλα συστήματα	43
4 ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΚΑΙ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ	45
4.1 Επιλογές υλικού συστήματος και περιφερειακών.....	45
4.1.1 Μικροελεγκτής βάσης και μικροελεγκτές αισθητήρων	45
4.1.2 RF πομποί και δέκτες	46
4.1.3 Οθόνη και διεπαφή χρήστη	47
4.1.4 Υποστηριζόμενοι αισθητήρες	48
4.2 Εργαλεία ανάπτυξης του συστήματος.....	48
4.3 Πρωτόκολλο επικοινωνίας βάσης με αισθητήρες.....	49

4.3.1 Στάδιο Αρχικοποίησης	50
4.3.2 Στάδιο Αναγνώρισης.....	51
4.3.3 Στάδιο Ρυθμίσεων χρήστη	54
4.3.4 Στάδιο Πυροδότησης.....	58
4.3.5 Αδυναμίες της επικοινωνίας / Πιθανές αστοχίες.....	60
5 ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ, ΕΠΙΒΕΒΑΙΩΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ, ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ	63
5.1 Φωτογραφικός εξοπλισμός.....	63
5.2 Χώρος διεξαγωγής πειραμάτων.....	64
5.3 Πειράματα και φωτογραφίες	65
5.4 Χρόνος καθυστέρησης συστήματος	68
5.5 Συμπεράσματα	71
6 ΕΠΙΛΟΓΟΣ.....	73
6.1 Δυσκολίες που αντιμετωπίστηκαν	73
6.1.1 Δυσκολίες στον εξοπλισμό και τον χώρο.....	73
6.1.2 Αυξημένες απαιτήσεις βάσης και επανασχεδίαση με νέο μικροελεγκτή βάσης	73
6.2 Αδυναμίες του συστήματος	74
6.3 Future work/Πιθανές βελτιώσεις	75
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	77

Λίστα Εικόνων

Εικόνα 1: Το άλογο σε κίνηση σε διαδοχικά καρέ, του Eadwaerd Muybridge, Πηγή : E. Muybridge, Descriptive Zoopraxography	11
Εικόνα 2: Το Microflash 549, ένα από τα πρώτα flash κενού αέρος που βγήκε σε μεγάλη παραγωγή, Πηγή:wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Flash_(photography)	11
Εικόνα 3: Cheetah που τρέχει σε ταχύτητες μέχρι 114 km/h, Πηγή : Wikipedia	15
Εικόνα 4: Ποτήρι που σπάει κατά την διάρκεια της θραύσης του, Πηγή : Wikipedia	15
Εικόνα 5: Το πείραμα των Bennett Wilburn, Neel Joshi, Vaibhav Vaish, Marc Levoy και Mark Horowitz, Πηγή : B. Wilburn, N. Joshi, V. Vaish, M. Levoy, and M. Horowitz, “High-speed videography using a dense camera array,”	16
Εικόνα 6: Μπαλόνι φουσκωμένο με αέρα καθώς συρρικνώνεται μετά από τρύπημα με ιπτάμενο βελάκι, Πηγή : Wikipedia.....	16
Εικόνα 7: Αστραπές καθώς πέφτουν στο έδαφος κατοικήσιμης περιοχής γύρω από ποτάμι, Πηγή : Wikipedia	16
Εικόνα 8: Αστραπές που πέφτουν πάνω στον πύργο του Eiffel, Πηγή : Wikipedia	16
Εικόνα 9: Βλήμα που διαπερνάει ένα αυγό και η θραύση του αυγού, Πηγή : http://www.cameraaxe.com/wp/	17
Εικόνα 10 Φωτογραφία ενός ρεβόλβερ που ρίχνει μια σφαίρα. Λήψη σε σκοτεινό δωμάτιο, με το κλείστρο της κάμερας ανοιχτό από πριν, Πηγή : Wikipedia.....	17
Εικόνα 11: Το Camera Axe 5 του Maurice Ribble, Πηγή : http://www.cameraaxe.com/wp/	18
Εικόνα 12: Το SmarTrig 2.1, Πηγή : http://www.doc-diy.net/photo/smatrig21/	18
Εικόνα 13: Το Universal Photo Timer, Πηγή : http://www.universaltimer.com/info1.html	19
Εικόνα 14: Το TriggerTrap v1 ήταν η πρώτη έκδοση του TriggerTrap Ada, Πηγή : https://www.kickstarter.com/projects/triggertrap/triggertrap-redsnap-modular-camera-trigger	19
Εικόνα 15: Το Arduino Mega 2560, Πηγή : https://store.arduino.cc/arduino-mega-2560-rev3	46
Εικόνα 16: ATmega2560, Πηγή : https://www.microchip.com/wwwproducts/en/ATmega2560 ...	46
Εικόνα 17: Το Arduino Nano Πηγή: https://www.theengineeringprojects.com/2018/06/introduction-to-arduino-nano.html	47
Εικόνα 18: Μια υλοποίηση του nRF24L01+ από την Robotech Shop, Πηγή : http://robotechshop.com/shop/module/nrf24l01/?v=f214a7d42e0d	47
Εικόνα 19: Sony a6000, η βασική φωτογραφική μηχανή που χρησιμοποιήθηκε. Πηγή: https://www.sony.com/electronics/interchangeable-lens-cameras/ilce-6000-body-kit	64

Εικόνα 20: Fotomatic 140, το flash που χρησιμοποιήσαμε στις δοκιμές μας. Πηγή: https://www.pinterest.co.uk/pin/299630181460781731/	64
Εικόνα 21: Τρύπημα μπαλονιού.....	66
Εικόνα 22: Τρύπημα μπαλονιού με αλεύρι.....	66
Εικόνα 23: Σπάσιμο βάζου.....	66
Εικόνα 24: Σπάσιμο βάζου με delay.....	67
Εικόνα 25: Ρίψη νομίσματος σε δοχείο με νερό.....	67
Εικόνα 26: Σπάσιμο αυγού.....	67
Εικόνα 27: Αισθητήρας φωτός (φωτοδίοδος), Παράδειγμα 1	70
Εικόνα 28: Αισθητήρας φωτός (φωτοδίοδος), Παράδειγμα 2.....	70
Εικόνα 29: Αισθητήρας ήχου (μικρόφωνο), Παράδειγμα 3.....	70
Εικόνα 30: Αισθητήρας φωτός (συμπεριλαμβάνεται στην καθυστέρηση η απόκριση αισθητήρα), Παράδειγμα 4.....	71

Λίστα Γραφημάτων

Σχήμα 1: Γράφημα από την σελίδα IB Math Sources που δείχνει την κατανομή του μέσου χρόνου αντίδρασης όσων συμμετείχαν στο online πείραμα της σελίδας Human Benchmarks, Πηγή : https://www.humanbenchmark.com/tests/reactiontime	14
Σχήμα 2: Συχνότητες λειτουργίας CPU από 2000-2008, Πηγή: http://www.pcpitstop.com/research/cpu.asp	25
Σχήμα 3: Σχέση Συχνότητας Λειτουργίας και Κατανάλωσης Ενέργειας CPU, Πηγή : http://dougseadline.sys-con.com/node/193382/mobile	27
Σχήμα 4: Παρεχόμενο ρεύμα ως προς συχνότητα λειτουργίας για τον ATtiny85 της Atmel, Πηγή : Atmel.....	31
Σχήμα 5: Παρεχόμενο ρεύμα ως προς την συχνότητα λειτουργίας για τον ATmega328P, Πηγή: https://learn.sparkfun.com/tutorials/reducing-arduino-power-consumption/reducing-the-clock-speed	31
Σχήμα 6: Σύγκριση της υστέρησης για 4 Hop σε σχέση με το Payload, Πηγή : https://www.silabs.com/products/wireless/learning-center/mesh-performance	34
Σχήμα 7: Η υστέρηση σε σχέση με το ποσοστό επιτυχίας λήψης σε μικρά δίκτυα με μικρά payload, Πηγή : https://www.silabs.com/products/wireless/learning-center/mesh-performance ...	34
Σχήμα 8: Μοντέλο του συστήματος σε μορφή διαγράμματος.....	40
Σχήμα 9: Μοντέλο του υποσυστήματος βάσης σε μορφή διαγράμματος.....	41
Σχήμα 10: Μοντέλο του υποσυστήματος ενός αισθητήρα σε μορφή διαγράμματος.....	42
Σχήμα 11: Σχήμα Flowchart του σταδίου αναγνώρισης στην πλευρά των αισθητήρων	52
Σχήμα 12: Flowchart του σταδίου αναγνώρισης στην πλευρά της βάσης	53
Σχήμα 13: Flowchart της πλευράς του αισθητήρα στο στάδιο ρυθμίσεων χρήστη	55
Σχήμα 14: Flowchart της πλευράς της βάσης για το στάδιο των ρυθμίσεων χρήστη.....	57
Σχήμα 15: Flowchart για το στάδιο πυροδότησης στην πλευρά του αισθητήρα	58
Σχήμα 16: Flowchart για το στάδιο πυροδότησης στην πλευρά της βάσης του συστήματος.....	60

Λίστα Πινάκων

Πίνακας 1: Ορισμένα συστήματα triggering και σημαντικές ιδιότητες τους.....	18
Πίνακας 2: Τιμές CPU της οικογένειας i5 και i7 με Ivy Bridge, όπως κυμαινόταν το 2013, Πηγή: Hardwarezone.com.....	26
Πίνακας 3: Κατανάλωση ενέργειας σε διάσημες CPU σε αδράνεια αλλά και σε απαιτητική χρήση, Πηγή : https://www.guru3d.com/articles-pages/core-i7-4770k-review,11.html	27
Πίνακας 4: Σύγκριση αριθμού κύκλων ρολογιού για διάφορους μικροελεγκτές ανά είδος αλγορίθμου. Πηγή : Texas Instruments.....	30
Πίνακας 5: Σύγκριση μεταξύ CPU, FPGA, CPLD και Μικροελεγκτών ως προς την συχνότητα λειτουργίας, το κόστος και την κατανάλωση ενέργειας.....	31
Πίνακας 6: Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του Zigbee σε σύγκριση με άλλα πρωτόκολλα για παρόμοιες εφαρμογές, Πηγή : Data Reliability and Latency Test for Zigbee-based Smart Home Energy Management Systems, "Ince, A. T., Elma, O., Selamogullari, U.S., Vural, B.".....	37
Πίνακας 7: Συνοπτική σύγκριση μεταξύ οπτικής ζεύξης, Wi-Fi, Bluetooth, Zigbee και RF.....	39
Πίνακας 8: Κριτήρια επιλογής μικροελεγκτών βάσης και αισθητήρα.....	46
Πίνακας 9: Κριτήρια επιλογής του nRF24L01+.....	47
Πίνακας 10: Κριτήρια επιλογής οθόνης συστήματος.....	48
Πίνακας 11 : Περιορισμοί υποστηριζόμενων αισθητήρων με βάση τις προδιαγραφές του ATmega 328P.....	48
Πίνακας 12: Ο φωτογραφικός εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε, συνοπτικά.....	63
Πίνακας 13: Πειράματα που έγιναν και οι συνθήκες διεξαγωγής τους.....	65
Πίνακας 14: Μετρήσεις καθυστέρησης του συστήματος με χρήση παλμογράφου.....	69
Πίνακας 15: Βασικοί στόχοι του συστήματος και σύγκριση τους με το αποτέλεσμα.....	71

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η φωτογραφία είναι ένα αντικείμενο και μια τέχνη που συναρπάζει καθημερινά πολλούς ανθρώπους ανά τον κόσμο. Μεγάλος αριθμός ανθρώπων έχει πάθος με τις φωτογραφίες, και πολλοί έχουν την φωτογραφία ως επάγγελμα τους. Η τεχνολογία μέσω σύγχρονων καμερών και flash έχει βοηθήσει πάρα πολύ στο να μπορούν πλέον να απαθανατιστούν φαινόμενα, πρόσωπα και τοπία με εξαιρετικά μεγάλη ανάλυση και ευκρίνεια. Πολλές φορές όμως το αντικείμενο ενδιαφέροντος των φωτογράφων είναι ένα συναρπαστικό φαινόμενο, το οποίο μπορεί να συμβαίνει σε ταχύτητες στις οποίες τα αντανακλαστικά ενός ανθρώπου δεν επαρκούν για να γίνει η λήψη μιας φωτογραφίας την στιγμή που συμβαίνει το φαινόμενο αυτό. Τέτοια φαινόμενα είναι για παράδειγμα ένας κεραυνός, ένα ποτήρι που σπάει στο δάπεδο, σταγόνες που πέφτουν πάνω σε μια επιφάνεια και πολλά άλλα. Υπάρχουν και περιπτώσεις που είναι πρακτικό να απαθανατίζουμε κάποια πολύ γρήγορα γεγονότα. Τέτοια είναι για παράδειγμα η γρήγορη κίνηση ενός άγριου ζώου ή το photo finish σε αθλητικές οργανώσεις για να μπορεί να διευκρινιστεί ποιος αθλητής τερμάτισε πρώτος. Γενικά οποιοδήποτε φαινόμενο εξελίσσεται με ταχύτητες που ξεπερνούν τα αντανακλαστικά του ανθρώπου είναι περιοχή ενδιαφέροντος των φωτογράφων.

Η επιστήμη και μέθοδος μέσω της οποίας είναι εφικτό να έχουμε φωτογραφίες τέτοιων φαινομένων λέγεται φωτογραφία υψηλών ταχυτήτων. Για την υποστήριξη της εμφανίστηκαν και εξελίχθηκαν ειδικά ενσωματωμένα συστήματα, τα οποία λέγονται συστήματα triggering. Τα συστήματα triggering ως κύριο στόχο έχουν την αυτόματη πυροδότηση μιας φωτογραφικής μηχανής ή ενός flash με την χρήση μετρήσεων από κατάλληλους αισθητήρες, έτσι ώστε να μπορέσει να γίνει λήψη μιας φωτογραφίας ακριβώς την κατάλληλη στιγμή στην οποία συμβαίνει ένα φαινόμενο ενδιαφέροντος. Συχνή χρήση βρίσκουμε με αισθητήρες φωτός και ήχου, ενώ τα συστήματα αυτά επειδή είναι ειδικού σκοπού είναι συνήθως και πολύ ακριβά.

Σκοπός με αυτή την διπλωματική εργασία είναι να δημιουργηθεί ένα τέτοιο πρακτικό σύστημα triggering με αρκετές δυνατότητες, εύκολο στην χρήση, με ασύρματη σύνδεση των αισθητήρων, καθώς και με το όσο δυνατόν μικρότερο κόστος και κατανάλωση ενέργειας. Επιπλέον στόχος μας είναι το σύστημα μας να είναι ανοιχτού λογισμικού, με ευρέως διαθέσιμα εξαρτήματα, και να μπορεί να κατασκευαστεί εύκολα από κάποιον που θέλει να το χρησιμοποιήσει αυτούσιο ή ως πρώτο βήμα για την εκμάθηση ενσωματωμένων συστημάτων.

Η διπλωματική αυτή εργασία αποτελείται από 6 κεφάλαια και εδώ συνοπτικά θα δούμε τι θα εξετάσουμε σε κάθε ένα από αυτά. Το κεφάλαιο 1 είναι η παρούσα εισαγωγή στην εργασία και περιγράφει επίσης και τα επόμενα κεφάλαια. Στο κεφάλαιο 2 θα δούμε μια ιστορική διαδρομή της

φωτογραφίας υψηλών ταχυτήτων και της τεχνολογίας γύρω από αυτή, θα εξετάσουμε την χρονική διάρκεια των αντανάκλαστικών του ανθρώπου, θα δούμε ορισμένα φαινόμενα ενδιαφέροντος και την χρονική διάρκεια που αυτά είναι οπτικά παρατηρήσιμα, και τέλος συνοπτικά θα παρουσιάσουμε κάποια συστήματα triggering που υπάρχουν σήμερα και κυκλοφορούν στην αγορά.

Στο κεφάλαιο 3 της Μοντελοποίησης θα αναλύσουμε τις δυνατότητες, τα τεχνικά χαρακτηριστικά και τις απαιτήσεις για το σύστημα που σχεδιάζουμε. Με βάση αυτές θα επιλέξουμε τις τεχνολογίες που θα χρησιμοποιηθούν για την σχεδίαση του συστήματος και τους λόγους για τους οποίους τις επιλέξαμε και τέλος θα παρουσιάσουμε ένα σχεδιαστικό μοντέλο του συστήματος μας.

Το κεφάλαιο 4 είναι η Σχεδίαση και Υλοποίηση, στο οποίο θα αναφερθούμε στις επιλογές του υλικού και των εξαρτημάτων που κάναμε για κάθε κομμάτι του συστήματος ώστε να πετύχουμε την υλοποίηση του μοντέλου του κεφαλαίου 3. Επιπλέον θα εξηγήσουμε με ποιο τρόπο γίνεται η ασύρματη επικοινωνία των υποσυστημάτων και θα αναλύσουμε το πρωτόκολλο επικοινωνίας που αναπτύξαμε ώστε τα επιμέρους συστήματα να μπορούν να συνεργαστούν μεταξύ τους.

Το κεφάλαιο 5 αφορά τα πειράματα που έγιναν, την επιβεβαίωση λειτουργίας καθώς και την αξιολόγηση του συστήματος μας. Θα αναφερθούμε στο φωτογραφικό εξοπλισμό και τις μεθόδους που χρησιμοποιήθηκαν, στον χώρο διεξαγωγής των δοκιμών, ενώ θα παρουσιάσουμε τις φωτογραφίες που προέκυψαν με χρήση του συστήματος μας και θα αξιολογήσουμε ορισμένα από τα στοιχεία του με βάση τον στόχο που θέσαμε στην αρχή.

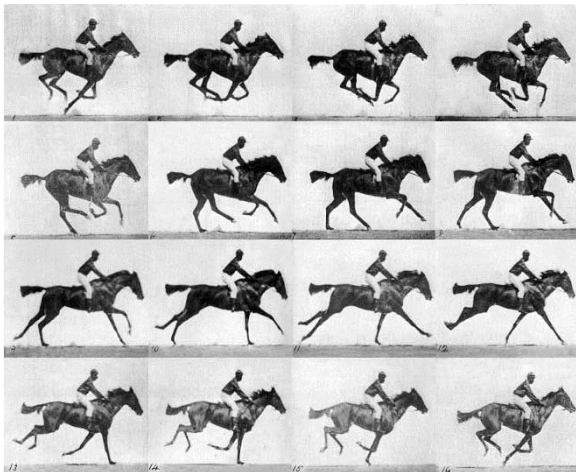
Τελευταίο είναι το κεφάλαιο 6 στο οποίο θα αναφερθούν κάποιες δυσκολίες που ξεπεράστηκαν κατά την διάρκεια της υλοποίησης, τα σημεία στα οποία το σύστημα έχει κάποιες αδυναμίες και τέλος θα σταθούμε και στο τι μπορεί να γίνει στο μέλλον ως εξέλιξη αυτού του συστήματος που σχεδιάστηκε και πώς αυτό μπορεί να βελτιωθεί.

2 ΣΧΕΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

Στο κεφάλαιο αυτό αρχικά θα κάνουμε μια ιστορική διαδρομή στην φωτογραφία υψηλών ταχυτήτων, και μετά θα δούμε γιατί τα αντανakλαστικά των ανθρώπων είναι πάρα πολύ αργά για να μπορέσουμε να έχουμε με χειροκίνητη πυροδότηση του flash ή της κάμερας, φωτογραφίες φαινομένων που έχουνε γρήγορη εξέλιξη. Θα δούμε μερικά τέτοια φαινόμενα και θα αναφέρουμε την διάρκεια τους, όπως αυτή προέκυψε από την υπάρχουσα βιβλιογραφία. Επιπλέον, θα παρουσιάσουμε μερικά από τα πιο δημοφιλή συστήματα triggering που υπάρχουν και είναι πιο κοντά στο δικό μας σύστημα.

2.1 Οι πρώτες εφαρμογές high speed photography και η εξέλιξη του εξοπλισμού

Η φωτογραφία υψηλών ταχυτήτων είναι μια επιστήμη που ασχολείται με τη φωτογράφιση γρήγορα εξελισσόμενων φαινομένων, και δημιουργήθηκε από την ανάγκη για λήψη φωτογραφιών γρήγορα εξελισσόμενων φαινομένων. Όταν κάποιος μιλάει για φωτογραφία υψηλών ταχυτήτων μπορεί να αναφέρεται είτε στην ίδια την φωτογραφία που θα τραβηχτεί, η οποία θα φαίνεται σαν να «παγώνει» τον χρόνο, είτε σε μια σειρά από φωτογραφίες με υψηλή συχνότητα δειγματοληψίας [1]. Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, ασχοληθήκαμε περισσότερο με την πρώτη περίπτωση.



Εικόνα 1: Το άλογο σε κίνηση σε διαδοχικά καρέ, του Eadwaerd Muybridge, Πηγή : E. Muybridge, *Descriptive Zoopraxography*



Εικόνα 2: Το Microflash 549, ένα από τα πρώτα flash κενού αέρος που βγήκε σε μεγάλη παραγωγή, Πηγή : Wikipedia
[https://en.wikipedia.org/wiki/Flash_\(photography\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Flash_(photography))

Μερικά ιστορικά σημεία είναι τα ακόλουθα:

- Φωτογράφιση του καλπασμού ενός αλόγου σε διαδοχικά καρέ το 1878 [\[2\]](#), [\[3\]](#), [\[4\]](#)
- Πρώτη φωτογραφία ιπτάμενης σφαίρας το 1886 [\[5\]](#)
- Ορίστηκε το 1948 από το SMPTE ως φωτογράφιση υψηλών ταχυτήτων το κάθε σετ από τουλάχιστον τρεις διαδοχικές φωτογραφίες τραβηγμένες από κάμερα ικανή για τουλάχιστον 69 fps [\[6\]](#)

Η χρήση του flash εξυπηρετεί το να έχουμε καλό φωτισμό σε συνθήκες σκοταδιού, έτσι ώστε η φωτογραφία που θα βγάλουμε να είναι καλής ποιότητας και να φαίνεται ξεκάθαρα το αντικείμενο ή φαινόμενο που μας ενδιαφέρει να απαθανατίσουμε. Καθώς το flash είναι βασικό για την φωτογραφία υψηλών ταχυτήτων εξελίχθηκε και αυτό με παράλληλα βήματα εκ των οποίων αναφέρουμε :

- Δημιουργία και μαζική παραγωγή μαγνησίου σε μορφή κορδέλας όπως τα ναυτικά καπνογόνα [\[7\]](#), [\[8\]](#)
- Χρήση μειγμάτων μαγνησίου, ποτάσσιου, οξυγόνου και άλλων υλικών σε μορφή σκόνης, για δημιουργία μικρής έκρηξης και λάμψη φωτός. Εγκαταλήφθηκαν σύντομα λόγω ατυχημάτων από την εν λόγω έκρηξη [\[9\]](#), [\[10\]](#)
- Μαζική παραγωγή το 1929 λυχνιών μαγνησίου μιας χρήσης με ηλεκτρική επαφή στο κλείστρο της κάμερας. Οι λυχνίες έφταναν σε μεγάλη φωτεινότητα σε πολύ αργό ρυθμό και λόγω σύνδεσης τους με το κλείστρο για να επιτευχθεί καλό συγχρονισμός απαιτούνταν χαμηλότερες ταχύτητες κλείστρου. [\[9\]](#), [\[11\]](#), [\[12\]](#)
- Το 1931 ο Harold Edgerton ξεκινάει την χρήση στροβοσκοπίου, το οποίο με την σειρά του εξελίχθηκε στα πρώτα ηλεκτρονικά flash [\[9\]](#), [\[13\]](#), [\[14\]](#), [\[15\]](#). Ο ίδιος, με την χρήση μιας ειδικής κάμερας και ηλεκτρονικών flash, κατάφερε να φωτογραφίσει πυρηνικές εκρήξεις μέσα σε ms από την έναρξη τους [\[16\]](#). Τα ηλεκτρονικά flash δεν ξεπέρασαν σε δημοφιλία τις λυχνίες μαγνησίου και τα flashcubes μέχρι τα μέσα της δεκαετίας του 70
- Δημιουργία των πρώτων flashcube το 1965 από την Kodak [\[9\]](#). Πρόκειται για συστοιχία τουλάχιστον τεσσάρων λυχνιών μαγνησίου τοποθετημένες σε 90 μοίρες γωνίας μεταξύ τους. Χρησιμοποιήθηκαν πάρα πολύ για την εξαφάνιση του φαινομένου των "κόκκινων ματιών"

Τα ηλεκτρονικά flash άρχισαν να επικρατούν καθώς προσέφεραν αρκετά μικρή διάρκεια λάμψης (τυπικά 1 ms) σε συνδυασμό με μεγάλη φωτεινότητα. Αυτό προσέφερε την δυνατότητα συγχρονισμού με μεγαλύτερες ταχύτητες κλείστρου. Στην σημερινή εποχή ερευνητές έχουν καταφέρει με χρήση ισχυρών Laser και με μια τεχνική που ονομάζεται High Harmonic Generation (HHG) να έχουν φωτογραφίες σε επίπεδο μορίων, με χρονική διάρκεια παλμού του φωτισμού της τάξης των as [17], [18]. Τα σημερινά σύγχρονα ηλεκτρονικά flash εμπορίου συνήθως έχουν διάρκεια παλμού περίπου 1/1000 έως 1/20000 s, ενώ για τις περιπτώσεις που δεν θέλουμε να υπάρχει θόλωμα εικόνας για κάποιο φαινόμενο που εξελίσσεται ακόμα πιο γρήγορα γίνεται η χρήση των πολύ ακριβότερων air-gap flash, τα οποία μπορούν να έχουν διάρκεια παλμού από 0.5 έως 10 μs [15], [19], [20].

2.2 Τα αντανakλαστικά και ο χρόνος αντίδρασης των ανθρώπων

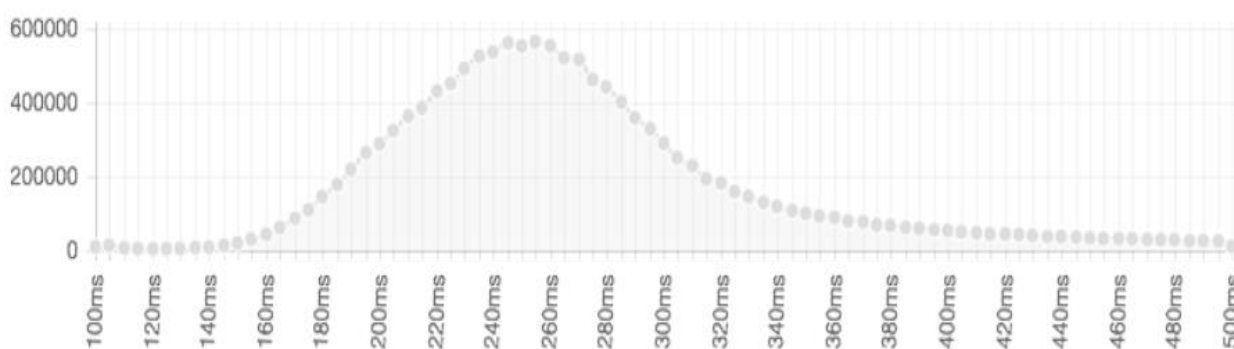
Τα αντανakλαστικά των ανθρώπων και ο χρόνος που χρειάζεται ο εγκέφαλος του ανθρώπου για να αντιδράσει σε ένα ερέθισμα είναι ένα αντικείμενο που έχει μελετηθεί αρκετά διεξοδικά εδώ και τουλάχιστον 100 χρόνια. Ως χρόνο αντίδρασης (reaction time) ορίζουμε το άθροισμα δύο διαφορετικών χρονικών περιόδων :

- Χρόνος που χρειάζεται ένα ερέθισμα να φτάσει στον εγκέφαλο μέσω του νευρικού συστήματος
- Χρόνος που χρειάζεται ο εγκέφαλος να δώσει εντολή στο σώμα να κάνει κάποια ενέργεια με βάση το ερέθισμα

Σε γενικές γραμμές οι έρευνες έχουν δείξει ότι παράγοντες όπως η ηλικία, η γενικότερη υγεία, το επίπεδο δραστηριότητας των ανθρώπων και το φύλο (οι άνδρες παρουσιάζουν λίγο πιο γρήγορα αντανakλαστικά) επηρεάζουν τον χρόνο αντίδρασης [21], [22]. Άλλες περιπτώσεις που επηρεάζουν τον χρόνο αντίδρασης είναι αυτές από ένστικτο, με μειωμένο χρόνο αντίδρασης λόγω παράκαμψης της διαδικασίας επεξεργασίας του ερεθίσματος από τον εγκέφαλο, καθώς και πιο σύνθετες συνθήκες κατά τις οποίες χρειάζεται περισσότερη ώρα ο εγκέφαλος για την διαδικασία αυτή με τον χρόνο αντίδρασης συνεπώς να αυξάνεται [23], [24]. Ενδιαφέρον παρουσιάζουν περιπτώσεις όπου υπάρχει συχνή επανάληψη ίδιου ερεθίσματος και αντίδρασης, όπου ο εγκέφαλος μετά από ένα διάστημα ανταποκρίνεται ταχύτερα και έχουμε μειωμένο χρόνο αντίδρασης [25]. Μελέτη τέτοιας περίπτωσης έχει γίνει σε άτομα που παίζουν για πολλές ώρες video games με το χρόνο αντίδρασης τους σε συγκεκριμένα ερεθίσματα εντός παιχνιδιού να μειώνεται [26], [27].

Στο Σχήμα 1 παρακάτω φαίνεται το γράφημα από την σελίδα IB Math Sources [28] από online πείραμα που διεξάγει η σελίδα Human Benchmarks [29], βάζοντας τον χρήστη μπροστά στην οθόνη του υπολογιστή να αντιδράσει με ένα πάτημα στο ποντίκι μετά από μια αλλαγή χρώματος στην οθόνη. Μπορούμε μάλιστα να θεωρήσουμε ότι αυτό είναι πάρα πολύ κοντινό παράδειγμα ενέργειας με αυτή της αντίδρασης ενός ανθρώπου όταν θέλει να πατήσει το κουμπί πυροδότησης του flash ή της κάμερας, καθώς περιλαμβάνει όμοια κίνηση, από όμοιο ερέθισμα (οπτικό συνήθως ερέθισμα φωτογράφου). Όπως φαίνεται και παρακάτω το γράφημα σχηματίζει περίπου μια καμπύλη Gauss όπου η μέση κατανομή όσων έχουν συμμετέχει κυμαίνεται γύρω στα 250 ms.

All-time



Σχήμα 1: Γράφημα από την σελίδα IB Math Sources που δείχνει την κατανομή του μέσου χρόνου αντίδρασης όσων συμμετείχαν στο online πείραμα της σελίδας Human Benchmarks, Πηγή :

<https://www.humanbenchmark.com/tests/reactiontime>

Από το σχήμα, μπορούμε να βγάλουμε το συμπέρασμα ότι ο συνολικός χρόνος αντίδρασης, ακόμα και στις γρηγορότερες περιπτώσεις, δεν πέφτει κάτω από τα 120-150 ms με τον μέσο όρο να είναι περίπου 230-250 ms, κάτι με το οποίο συμφωνεί και η σχετική έρευνα που έχει γίνει [22], [30].

2.3 Συνηθισμένα φαινόμενα ενδιαφέροντος και ο χρόνος εξέλιξης τους

Σε αυτό το σημείο θα αναλύσουμε μερικά από τα φαινόμενα που συνήθως ενδιαφέρουν τους φωτογράφους, και πόσο διαρκούν. Με αυτό τον τρόπο θα καταλήξουμε εύκολα στο συμπέρασμα ότι πράγματι ένας άνθρωπος χειροκίνητα δεν μπορεί να προλάβει να πατήσει το κουμπί ενός flash ή μια κάμερας έγκαιρα, καθιστώντας έτσι την χρήση της τεχνολογίας απαραίτητη. Θα αναφερθούμε σε αυτό το σημείο λίγο στα παρακάτω:

- Κίνηση άγριων ζώων, όπου οι ταχύτητες κίνησης σε ζώα που θεωρούνται πολύ γρήγορα μπορεί να κυμαίνονται από 98-389 km/h

- Διάφορα αντικείμενα κατά την διάρκεια της θραύσης τους. Εδώ δεν μπορούμε να έχουμε συγκεκριμένη διάρκεια του οπτικού φαινομένου καθώς, ανάλογα με το αντικείμενο, η θραύση διαρκεί διαφορετικό χρονικό διάστημα
- Τρύπημα μπαλονιού, όπου η οπτική διάρκεια του φαινομένου όπως θα δούμε παρακάτω είναι περίπου 5-10 ms
- Αστραπές και κεραυνοί που είναι οπτικά παρατηρήσιμα μέχρι και για 200 ms
- Ιπτάμενα βλήματα και σφαίρες τα οποία έχουν ταχύτητες από 120-1700 m/s

Στην περίπτωση των άγριων ζώων κάποια από τα ταχύτερα θεωρούνται η Cheetah (115 km/h) [31], [32], η νυχτερίδα της Βραζιλίας (160 km/h) [33], το μαύρο Μάρλιν (130 km/h) [34], και το γεράκι Peregrin (μέχρι και 389 km/h) [35], [36]. Πέρα από την ταχύτητα τους, ένας ακόμα λόγος χρήσης συστήματος triggering είναι η πιθανή επικινδυνότητα κάποιων ζώων. Στην παρούσα διπλωματική εργασία δεν έγιναν δοκιμές για λήψη φωτογραφιών άγριων ζώων λόγω επικινδυνότητας και έλλειψης υποκειμένων.



Εικόνα 3: Cheetah που τρέχει σε ταχύτητες μέχρι 114 km/h, Πηγή : Wikipedia



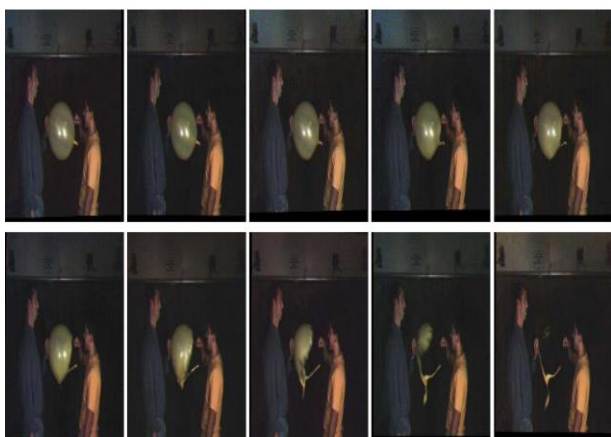
Εικόνα 4: Ποτήρι που σπάει κατά την διάρκεια της θραύσης του, Πηγή : Wikipedia

Για το τρύπημα μπαλονιών χρειάστηκε περισσότερη δουλειά από μέρους μας για να μπορέσουμε να δούμε πόσο διαρκεί οπτικά το φαινόμενο.

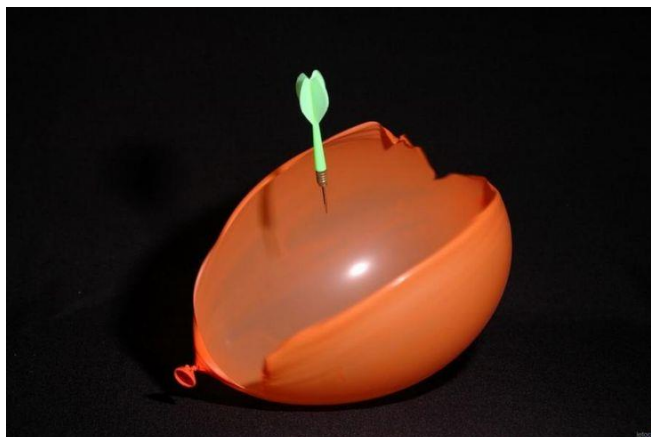
Συγκεκριμένα συνδυάσαμε τις δουλειές των Bennett Wilburn, Neel Joshi, Vaibhav Vaish, Marc Levoy και Mark Horowitz [37], καθώς και αυτή των Sébastien Moulinet και Mokhtar Adda-Bedia [38]. Οι πρώτοι στην δική τους εργασία χρησιμοποίησαν ένα πλέγμα 52 καμερών των 1560 fps για να βιντεοσκοπήσουν φαινόμενα σε αργή κίνηση. Στην εργασία τους παρουσιάζεται ένα τρύπημα μπαλονιού που ολοκληρώνεται μέσα σε 8 καρέ, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.

Υπολογίζοντας πόση διάρκεια έχει το κάθε καρτέ μπορούμε να εκτιμήσουμε συνολική διάρκεια 5.128 ms. Οι δεύτεροι μελέτησαν πως διαδίδονται οι ρωγμές σε latex υλικό με πάχος 1.1mm και διάμετρο 52mm.

Στα δικά τους πειράματα το φαινόμενο διαρκούσε μέχρι και 1.5 ms, που σε αντιστοιχία με ένα μπαλόνι φυσιολογικού μεγέθους δείχνει πως συμφωνεί σε γενικές γραμμές με τον χρόνο που υπολογίσαμε εμείς από την πρώτη εργασία. Για την δική μας εργασία θεωρούμε ένα κατώτερο χρονικό περιθώριο των 5 ms για την διάρκεια συρρίκνωσης ενός μπαλονιού.



Εικόνα 5: Το πείραμα των Bennett Wilburn, Neel Joshi, Vaibhav Vaish, Marc Levoy και Mark Horowitz, Πηγή : B. Wilburn, N. Joshi, V. Vaish, M. Levoy, and M. Horowitz, “High-speed videography using a dense camera array,”



Εικόνα 6: Μπαλόνι φουσκωμένο με αέρα καθώς συρρικνώνεται μετά από τρύπημα με ιπτάμενο βελάκι, Πηγή : Wikipedia

Δύο άλλα πολύ συναρπαστικά φυσικά φαινόμενα που ενδιαφέρουν τους φωτογράφους είναι αυτά της αστραπής και των κεραυνών. Συνήθως μια αστραπή αποτελείται από πολλές μικρότερες εκκενώσεις ηλεκτρικού φορτίου οι οποίες διαρκούν περίπου 60-70 μs η κάθε μια [39], [40]. Το φαινόμενο όμως αυτό είναι οπτικά παρατηρήσιμο για μια διάρκεια της τάξης των 200 ms [41], [42].



Εικόνα 7: Αστραπές που πέφτουν στο έδαφος κατοικήσιμης περιοχής σε ποτάμι, Πηγή : Wikipedia



Εικόνα 8: Αστραπές που πέφτουν πάνω στον πύργο του Eiffel, Πηγή : Wikipedia

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να πούμε και δυο λόγια παραπάνω για τις περιπτώσεις ιπτάμενων βλημάτων και σφαιρών. Όσον αφορά την ταχύτητα τους αυτή κυμαίνεται από τα 120 m/s μέχρι και 1700 m/s [43], [44], [45]. Οι περισσότερες φωτογραφίες που υπάρχουν ήδη από ιπτάμενα βλήματα και σφαίρες δεν έχουν γίνει με συστήματα triggering, αλλά κατά βάση με βιντεοκάμερες υψηλών ταχυτήτων (μέχρι και 60.000 fps) από τις οποίες έχει απομονωθεί ένα καρέ. Εξαιρέσεις υπάρχουν για βλήματα με ταχύτητες μικρότερες του ήχου. Για τα βλήματα που κινούνται με ταχύτητες μεγαλύτερες του ήχου είναι εμφανές ότι δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένας αισθητήρας ήχου, αλλά κάποιος άλλος πιο γρήγορος αισθητήρας. Γενικότερα για φωτογράφιση βλημάτων και σφαιρών χρειάζεται και ειδικός εξοπλισμός όπως πολύ ακριβά flash που η διάρκεια λάμψης τους μπορούν να φτάσουν μέχρι και 0.5 μ s [15], [19], [20]. Με χρήση συμβατικών flash που έχουμε διαθέσιμα, το σύστημα μπορεί να προλάβει να πυροδοτήσει σε κατάλληλη στιγμή αλλά η εικόνα θα έχει έντονο blurring. Επιπλέον αυτά τα flash έχουν τεράστιο κόστος και μπορούν να είναι επικίνδυνα καθώς λειτουργούν συνήθως με τάσεις 16-20 kV. Για τους παραπάνω λόγους στο πλαίσιο της εργασίας μας δεν θα γίνουν λήψεις ιπτάμενων βλημάτων ή σφαιρών.



Εικόνα 9: Βλήμα που διαπερνάει ένα αυγό και η θραύση του αυγού, Πηγή : <http://www.cameraaxe.com/wp/>



Εικόνα 10: Φωτογραφία ενός ρεβόλβερ που ρίχνει μια σφαίρα, Πηγή : Wikipedia

2.4 Παρόμοια συστήματα triggering

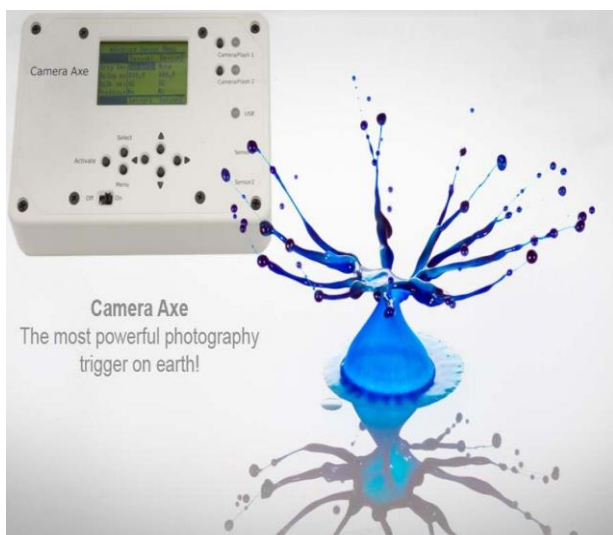
Στον Πίνακα 1 παρουσιάζονται ορισμένα συστήματα triggering και κάποιες ιδιότητες τους που μας ενδιαφέρουν, ενώ στις Εικόνες 11-14 μπορούμε να δούμε τα εν λόγω συστήματα triggering.

Σύστημα Triggering	Τεχνολογία	Σύνδεση Αισθητήρα	Ανοιχτού Κώδικα	Κόστος
Camera Axe 5	Arduino Uno	Ενσύρματη	Ναι	300\$
SmarTrig 2.1	ATmega88V	Ενσύρματη	Ναι	Δεν πωλείται
Universal Photo Timer	Άγνωστος Μικροελεγκτής	Ενσύρματη	Όχι	145\$ (χωρίς φόρο)
TriggerTrap Ada	Άγνωστος Μικροελεγκτής	Ενσύρματη	Όχι	Δεν πωλείται

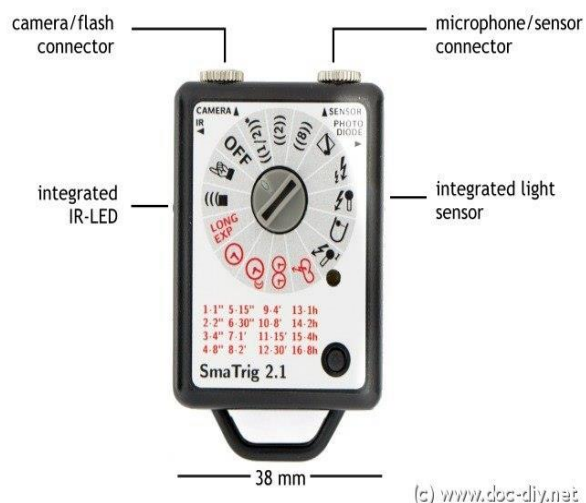
Πίνακας 1 : Ορισμένα συστήματα triggering και σημαντικές ιδιότητες τους

Το Camera Axe έχει δύο εισόδους για αισθητήρες και δύο εξόδους για κάμερα ή flash. Μπορεί να λειτουργήσει με οποιονδήποτε αισθητήρα πληροί τις προδιαγραφές του Camera Axe ενώ η καθυστέρηση του συστήματος είναι περίπου 250 μ s [46], [47], [48], [49].

Το SmarTrig 2.1 [50] διαθέτει έναν ενσωματωμένο αισθητήρα φωτός, μια θύρα εισόδου για άλλο αισθητήρα, καθώς και μια έξοδο για Camera/Flash. Το σύστημα έχει ηχητικό feedback για να καταλαβαίνει ο χρήστης ότι έχει δώσει έγκυρη επιλογή και όχι κάποιο μενού σε οθόνη. Δεν είναι προς πώληση καθώς οι δημιουργοί του δεν το έφτιαξαν ως προϊόν.



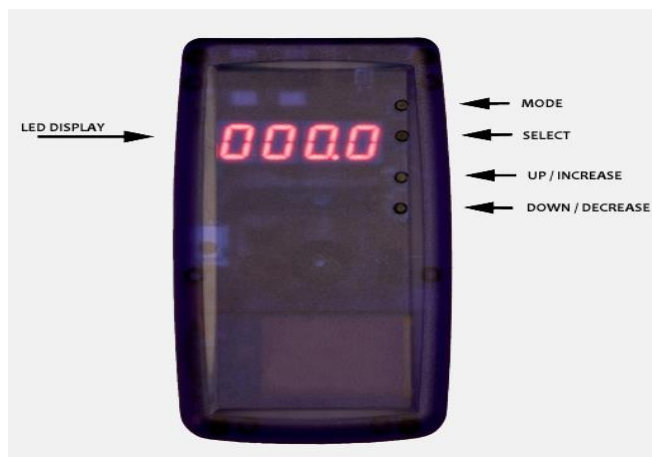
Εικόνα 11: Το Camera Axe 5 του Maurice Ribble, Πηγή : <http://www.cameraaxe.com/wp/>



Εικόνα 12: Το SmarTrig 2.1, Πηγή : <http://www.doc-diy.net/photo/smatrig21/>

Ένα άλλο δημοφιλές σύστημα πυροδότησης είναι το Universal Photo Timer το οποίο είναι proprietary, κλειστού κώδικα και hardware. Συνεπώς δεν ήταν εύκολο να βρούμε ακριβώς την δομή του, αλλά ακολουθεί παρόμοια λογική με τα προηγούμενα δύο. Το Universal Photo Timer, διαθέτει δυο εισόδους για αισθητήρες, μια μικρή οθόνη, μερικά buttons για την ρύθμιση σε κατώφλια πυροδότησης, και δύο εξόδους για flash ή κάμερα. Παρέχει στον χρήστη και εισαγωγή επιθυμητής καθυστέρησης της πυροδότησης μετά την μέτρηση του αισθητήρα [51].

Τέλος, το TriggerTrap Ada υπάρχει μόνο ως ένα πρωτότυπο, καθώς η χρηματοδότηση για την παραγωγή του απέτυχε. Οι δημιουργοί του ισχυρίζονται ότι η χρονική του απόκριση είναι μικρότερη από 60 μ s. Το TriggerTrap Ada είναι σύστημα κλειστού κώδικα και κλειστού hardware, και δεν μπορέσαμε να βρούμε ποιον μικροελεγκτή χρησιμοποιεί. [52]



Εικόνα 13: Το Universal Photo Timer, Πηγή : <http://www.universaltimer.com/info1.html>



Εικόνα 14: Το TriggerTrap v1 ήταν η πρώτη έκδοση του TriggerTrap Ada, Πηγή : <https://www.kickstarter.com/projects/triggertrap/triggertrap-redsnap-modular-camera-trigger>

2.5 Σύγκριση και δομή των συστημάτων

Αν δούμε κάθε ένα από τα συστήματα που αναφέραμε παραπάνω, παρόλο που έχουν επιμέρους διαφορές, μπορούμε να παρατηρήσουμε μερικές πολύ βασικές ομοιότητες που υπάρχουν σε όλα αυτά τα συστήματα, όσον αφορά την δομή και αρχιτεκτονική τους. Αυτές οι βασικές ομοιότητες είναι οι παρακάτω :

- Χρήση ενός ή παραπάνω αισθητήρων για την συλλογή δεδομένων από το περιβάλλον
- Κεντρική μονάδα που αποτελείται από ένα μικροελεγκτή και αναλαμβάνει την συλλογή των δεδομένων των αισθητήρων, καθώς και την σύγκριση των μετρήσεων με τα κατώφλια ενεργοποίησης. Η κεντρική μονάδα επίσης είναι που πυροδοτεί το flash

- Διεπαφή με τον χρήστη είτε με χρήση μικρής οθόνης και πλήκτρων επιλογής, είτε με ηχητικό feedback

Υπάρχουν επομένως κοινές πρακτικές σχεδίασης αλλά και όμοια αρχιτεκτονική τέτοιων συστημάτων. Στο κεφάλαιο 3 θα δούμε πώς διαφέρει το δικό μας σύστημα σε σχέση με όσα αναφέραμε, όσον αφορά την αρχιτεκτονική του και τον βασικό του σχεδιασμό, αλλά και ποιες είναι οι δυνατότητες και τα χαρακτηριστικά του.

3 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ

Για να μπορέσουμε να αναπτύξουμε και να υλοποιήσουμε ένα triggering σύστημα θα χρειαστεί να θέσουμε συγκεκριμένες δυνατότητες που θέλουμε αυτό να έχει. Αυτές οι δυνατότητες θα καθορίσουν προδιαγραφές και απαιτήσεις του συστήματος μας, τις οποίες θα πρέπει να ικανοποιήσουμε. Επιπλέον θα καθοριστούν και κάποια προβλήματα που θα χρειαστεί να λυθούν για να μπορέσει να αναπτυχθεί το σύστημα μας. Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιάσουμε όλα τα παραπάνω πιο συγκεκριμένα, θα δώσουμε ένα μοντέλο το οποίο θα αντιμετωπίζει αυτά τα ζητήματα και θα αποτελέσει την βάση για την ανάπτυξη του συστήματος μας, και τέλος θα εξηγήσουμε για ποιο λόγο αυτό το μοντέλο μπορεί να ικανοποιήσει τις αυστηρές απαιτήσεις του συστήματος και να παρέχει όλες τις επιθυμητές δυνατότητες.

3.1 Δυνατότητες και τεχνικά χαρακτηριστικά

Σε αυτή την ενότητα θα παρουσιάσουμε τους στόχους που έχουμε για τις δυνατότητες του συστήματος μας και για τα τεχνικά χαρακτηριστικά του.

Το σύστημα που θα αναπτύξουμε θα έχει τις παρακάτω βασικές λειτουργίες :

- Χρήση μετρήσεων αισθητήρων για πυροδότηση flash ή κάμερας
- Δυνατότητα σύνδεσης μέχρι και δύο αισθητήρων ταυτόχρονα
- Χρήση οποιουδήποτε είδους αναλογικού αισθητήρα επιθυμεί ο χρήστης αρκεί να ταιριάζει σε τάσεις 3-5 V (με 2 ή 3 pin σύνδεσης)
- Πυροδότηση ενός flash ή μιας κάμερας
- Δυνατότητα αλλαγής κατωφλίου σε κάθε αισθητήρα
- Εισαγωγή επιθυμητής υστέρησης από τον χρήστη από την στιγμή της μέτρησης του αισθητήρα, μέχρι την στιγμή της πυροδότησης (50 ms , 100 ms, 150 ms, 200 ms και 300 ms επιλογές)
- Ασύρματη επικοινωνία των αισθητήρων με την βάση του συστήματος

Στο σημείο αυτό θα αναλύσουμε τα τεχνικά χαρακτηριστικά του συστήματος, τα οποία μαζί με τις λειτουργίες που είδαμε πιο πάνω θα καθορίσουν τις προδιαγραφές και τις απαιτήσεις που πρέπει οπωσδήποτε να καλύψουμε.

- Έξοδοι συστήματος: Το σύστημα μας θα έχει μία έξοδο. Η έξοδος αυτή θα έχει την δυνατότητα να πυροδοτεί είτε κάποιο flash είτε μια κάμερα
- Διεπαφή με τον χρήστη: Το σύστημα θα έχει μια OLED οθόνη 0.9 ιντσών για την εμφάνιση του μενού και των επιλογών του χρήστη. Η περιήγηση στο μενού θα γίνεται μέσω ενός και μόνο πλήκτρου που ανάλογα με πόσες φορές ή για πόση διάρκεια το πατάει ο χρήστης, θα συμπεριφέρεται διαφορετικά. Μέσω του μενού ο χρήστης θα μπορεί να αλλάζει και τα κατώφλια ενεργοποίησης για τους αισθητήρες. Το στάδιο της διαδικασίας στο οποίο βρισκόμαστε θα φαίνεται στο επάνω μέρος της οθόνης
- Αισθητήρες: Το σύστημα θα μπορεί να υποστηρίζει σύνδεση μέχρι και δύο αισθητήρων ταυτόχρονα. Η σύνδεση του με την βάση πυροδότησης θα γίνεται ασύρματα μέσω ενός RF module, ενώ η αλλαγή του κατωφλίου για τον εκάστοτε αισθητήρα θα γίνεται μέσω του μενού στην βάση. Οι αισθητήρες που μπορεί να χρησιμοποιήσει ο χρήστης θα πρέπει να λειτουργούν σε τάσεις μεταξύ 3.3-5 V
- Τάσεις λειτουργίας: Η τάση λειτουργίας του συστήματος θα γίνεται και στην πλευρά των αισθητήρων αλλά και στο κεντρικό σύστημα με τάσεις των 5 V.

3.2 Ικανότητες και απαιτήσεις

Το σύστημα μας θέλουμε να μπορεί να υποστηρίξει κάποιες λειτουργίες για κάποιες συγκεκριμένες χρήσεις και περιπτώσεις φωτογραφιών. Παρουσιάζουμε παρακάτω φαινόμενα που θέλουμε οπωσδήποτε να μπορεί να φωτογραφίσει το σύστημα μας.

- Σπάσιμο αντικειμένων : Εδώ μπορούμε να έχουμε ένα οποιοδήποτε αντικείμενο κατά την θραύση του, όπως ένα κομμάτι γυαλί που πέφτει στο έδαφος, δυο ποτήρια που συγκρούονται κατά την διάρκεια μιας πρόποσης, κτλ. Γενικά οτιδήποτε ο χρήστης επιθυμεί να απαθανάτισει θα μπορεί να το κάνει
- Μπαλόνια που τρυπάνε : Αυτό το φαινόμενο είναι οπτικά εμφανές όπως είδαμε για περίπου 5 ms. Ουσιαστικά θα καθορίζει την πιο αυστηρή απαίτηση του συστήματος όσον αφορά τον χρόνο καθυστέρησης
- Αντικείμενα που πέφτουν σε υγρό: Εδώ επιθυμούμε ουσιαστικά να έχουμε λήψη φωτογραφίας του υγρού, καθώς αυτό διαταράσσεται όταν ένα αντικείμενο πέφτει στην επιφάνεια του

Εδώ θα πρέπει να σταθούμε στο γεγονός ότι το σύστημα σίγουρα θα μπορεί να υποστηρίξει λήψη φωτογραφιών άγριων ζώων σε κίνηση. Επιπλέον, υπό κατάλληλες συνθήκες και με την χρήση του σωστού εξοπλισμού ειδικών flash, θα ήταν εφικτή και η λήψη φωτογραφιών από ιπτάμενα βλήματα ή σφαίρες μικρής ταχύτητας. Όπως όμως αναφέραμε και προηγουμένως λόγω επικινδυνότητας τέτοιων δοκιμών σε αυτή την διπλωματική εργασία τέτοιες δοκιμές δεν θα γίνουν, γι' αυτό και δεν αναφέρονται συγκεκριμένα πιο πάνω.

Σύμφωνα με τις λειτουργίες, τα τεχνικά χαρακτηριστικά και τις προδιαγραφές που θέσαμε παραπάνω, προκύπτουν ως λογικά επακόλουθες κάποιες ελάχιστες απαιτήσεις σε ορισμένα ζητήματα, που το σύστημα μας θα πρέπει να ικανοποιεί οπωσδήποτε για να μπορέσει να λειτουργήσει επιθυμητά.

- Χρονική απαίτηση στην καθυστέρηση συστήματος: Σύμφωνα με τα φαινόμενα που επιθυμούμε να καλύψουμε θα πρέπει υποχρεωτικά το σύστημα μας να μπορεί να ολοκληρώνει την διαδικασία πυροδότησης με συνολική υστέρηση μικρότερη των 5 ms. Θα δούμε παρακάτω ότι όταν χρησιμοποιούμε ταυτόχρονα δύο αισθητήρες αυτό δεν είναι πάντοτε εφικτό και ποικίλλει ανάλογα με το φαινόμενο και τους αισθητήρες
- Απαιτήσεις σε υλικό: Από τα τεχνικά χαρακτηριστικά προκύπτουν σίγουρα οι παρακάτω απαιτήσεις σε υλικό : 1 push button για την περιήγηση σε μενού, 1 οθόνη OLED, 3 RF πομποδέκτες για την ασύρματη επικοινωνία, 3 μικροελεγκτές για την βάση του συστήματος και έλεγχο των αισθητήρων
- Κόστος: Θα πρέπει να καταφέρουμε το συνολικό κόστος των εξαρτημάτων να μην ξεπερνάει τα 60\$. Αυτό το ποσό το καθορίσαμε αυθαίρετα συγκρίνοντας τα συστήματα που παρουσιάσαμε πριν και την μέση τιμή πώλησης τους, η οποία είναι μεγαλύτερη των 150\$
- Απαιτήσεις τροφοδοσίας: Όλα τα επιμέρους εξαρτήματα που θα χρησιμοποιήσουμε θα πρέπει να μπορούν να τροφοδοτηθούν με ίδια τιμή τάσης, η οποία θα πρέπει να είναι μέσα στα επιτρεπτά όρια λειτουργίας τους. Επιλέγουμε τάση 5 V καθώς είναι πολύ διαδεδομένη και υποστηρίζεται από την πλειοψηφία των διαθέσιμων εξαρτημάτων
- Απαιτήσεις I/O μικροελεγκτών: Για να μπορέσουν οι μικροελεγκτές να έχουν τις σύνδεση με τα επιμέρους εξαρτήματα, θα χρειαστεί να έχουν έναν ελάχιστο αριθμό από I/O. Αυτός ο αριθμός προκύπτει από τον μέγιστο αριθμό συσκευών που θα συνδεθούν ταυτόχρονα. Για την βάση χρειαζόμαστε συνολικά το λιγότερο 9 pins I/O και για τους αισθητήρες 8

3.3 Ιδιαίτερες περιπτώσεις και εξαιρέσεις

Θα πρέπει να σημειώσουμε ότι στα πλαίσια αυτής της εργασίας δεν θα ασχοληθούμε με κάποιες περιπτώσεις χρήσης και συνεπώς το μοντέλο μας δεν θα καλύπτει τέτοιες εξαιρέσεις. Επίσης περιπτώσεις σαν αυτές δεν θα εξετασθούν και πειραματικά, είτε λόγω δυσκολίας εύρεσης κατάλληλου χώρου και εξοπλισμού, είτε επειδή δεν είναι στα πλαίσια των στόχων του συστήματος μας.

Τέτοια περίπτωση είναι οι εφαρμογές που αφορούν τις βιντεοκάμερες υψηλών ταχυτήτων, στις οποίες απομονώνεται ένα καρέ από το σύνολο μιας σύντομης λήψης βίντεο για να έχουμε μια φωτογραφία του φαινομένου. Εμείς θα επικεντρωθούμε αποκλειστικά στο να φτιάξουμε ένα σύστημα που θα “αντιλαμβάνεται” το φαινόμενο, όταν αυτό αρχίζει να συμβαίνει, μέσω της μέτρησης κάποιου αισθητήρα, και κατόπιν θα πυροδοτεί το flash της κάμερας για να γίνει λήψη φωτογραφίας. Τέλος θα πρέπει να αναφερθεί ότι λόγω αυτού του αυστηρού χρονικού περιθωρίου, που θα καθοριστεί από τα φαινόμενα που μας ενδιαφέρουν να φωτογραφίσουμε, ο χρόνος που χρειάζεται το κλείστρο της κάμερας για να ανοίξει και να κλείσει ώστε να γίνει η λήψη της φωτογραφίας, δεν θα ληφθεί υπόψιν στον υπολογισμό του χρόνου απόκρισης του συστήματος μας. Στην περίπτωση που ο χρήστης στο σύστημα μας επιθυμεί να κάνει πυροδότηση της ίδιας της κάμερας, και όχι κάποιου flash όταν έχουμε ήδη το κλείστρο ανοιχτό στην κάμερα, θα πρέπει να λάβει υπόψιν του τον χρόνο καθυστέρησης που χρειάζεται το κλείστρο της κάμερας του για να ανοίξει και να κλείσει ώστε να γίνει η λήψη της φωτογραφίας. Το σύστημα αυτό ουσιαστικά θα μπορεί να “προλαβαίνει” να κάνει έγκαιρα πυροδότηση της κάμερας αυτής καθαυτής, όταν η διάρκεια του φαινομένου είναι μεγαλύτερη από το άθροισμα του χρόνου απόκρισης του συστήματος μας συν τον χρόνο του κλείστρου της κάμερας.

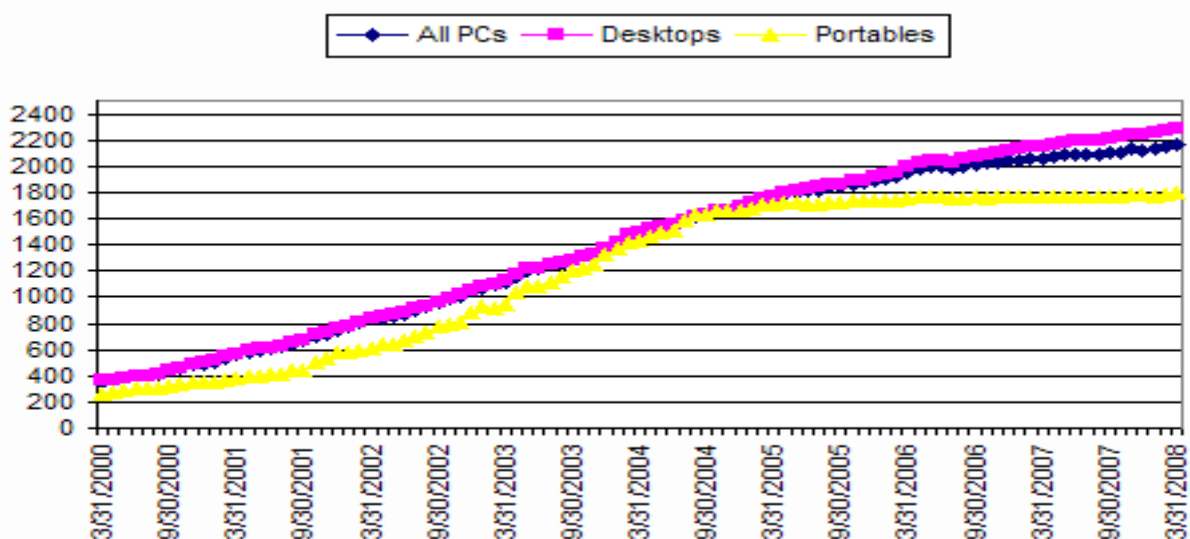
Αντιθέτως, το σύστημα μας θα μπορεί να βρει πολύ καλή και εύχρηστη εφαρμογή στις περιπτώσεις που ήδη έχουμε προετοιμάσει κάποια κάμερα με το κλείστρο ανοιχτό για την κατάλληλη έκθεση φωτός, και αυτό που θα μας λείπει είναι η πυροδότηση του flash την κατάλληλη στιγμή. Αυτό επιτρέπει λοιπόν, την λήψη φωτογραφιών με κατάλληλο φωτισμό διότι το κλείστρο είναι ήδη ανοιχτό και η έκθεση στο φως είναι η κατάλληλη για να είναι ωραίο το τελικό αποτέλεσμα. Παρόλα αυτά, λόγω έλλειψης κατάλληλου χώρου και εξοπλισμού ή λόγω επικινδυνότητας, δεν θα γίνουν δοκιμές για λήψη φωτογραφίας σφαιρών και άγριων ζώων.

3.4 Επιλογή Τεχνολογίας Βασικής Μονάδας

Όπως είδαμε και στο Κεφάλαιο 2, τα περισσότερα συνηθισμένα αντίστοιχα συστήματα για την βασική μονάδα λειτουργίας τους χρησιμοποιούν κάποιον μικροελεγκτή ή πλατφόρμα ανάπτυξης βασισμένη σε μικροελεγκτή. Σε αυτή την επιλογή καταλήγουμε και εμείς μετά από συγκρίσεις που θα δείξουμε παρακάτω με CPU γενικής χρήσης και FPGA σε τομείς όπως η απόδοση, το κόστος, η κατανάλωση ενέργειας, καθώς και η ευχρηστία και το πόσο πρακτικές θα ήταν αυτές οι επιλογές για να ενσωματωθούν σε ένα μικρό, οικονομικό σύστημα.

3.4.1 CPU

Τα τελευταία χρόνια οι CPU γίνονται όλο και ισχυρότερες με μικρότερη λιθογραφία και μέση συχνότητα 1-3.5 GHz, ενώ οι πυρήνες γίνονται περισσότεροι [53]. Στο Σχήμα 2 φαίνεται η πορεία των συχνοτήτων λειτουργίας των CPU της Intel και AMD μέχρι και το 2008, τόσο για σταθερούς όσο και για φορητούς υπολογιστές. Πλέον η προσπάθεια βελτίωσης τους δεν επικεντρώνεται τόσο στην συχνότητα αλλά στην προσθήκη πυρήνων αυτό όμως δεν σημαίνει ότι η συχνότητα λειτουργίας δεν αξίζει να μελετηθεί [54], [55], [56]. Ακόμα και για παλιές CPU από το 2008 και πίσω, ισχύει κάτι τέτοιο όπως μπορούμε να δούμε από το αντίστοιχο εγχειρίδιο αναφοράς της Intel [57]. Αν κοιτάξουμε κάποια σημερινά στατιστικά από σελίδες με benchmark μπορούμε να δούμε ότι αυτά ισχύουν και για τις σημερινές CPU, ακόμα και αυτές χαμηλού κόστους [58]. Οι επιδόσεις που μπορούμε να δούμε είναι τάξη μεγέθους ταχύτερες από τις ανάγκες του συστήματος μας συνεπώς μια σύγχρονη CPU τις καλύπτει όχι απλά ικανοποιητικά αλλά θα λέγαμε ότι είναι και περιττή η χρήση μιας CPU.



Σχήμα 2: Συχνότητες λειτουργίας CPU από 2000-2008,

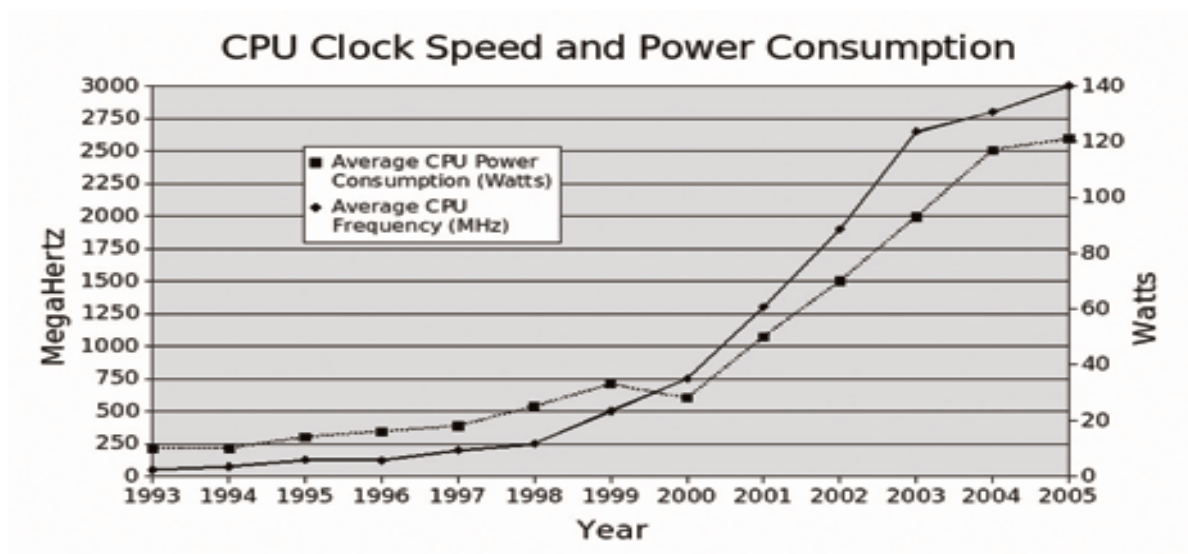
Πηγή : <http://www.pcpitstop.com/research/cpu.asp>

Όσον αφορά το κόστος, σήμερα ακόμα και αν πρόκειται να ψάξουμε για τις πιο οικονομικές CPU της αγοράς, οι τιμές τους είναι απαγορευτικές για να πετύχουμε τον σκοπό μας για το συνολικό κόστος του συστήματος μας. Οι πιο οικονομικές από αυτές σήμερα ξεκινάνε στα 45\$ ενώ μπορούν να ξεπεράσουν και τα 1000\$, σύμφωνα με διεθνείς σελίδες παρακολούθησης εξελίξεων στο hardware [59], [60]. Στον Πίνακα 2 μπορούμε να δούμε μια λίστα με CPU της Intel της οικογένειας i5 και i7, με τεχνολογία Ivy Bridge. Όπως είναι φανερό ακόμα και η πιο οικονομική CPU παλιότερων ετών έχει πολύ μεγάλο κόστος για τον στόχο που έχουμε βάλει για το σύστημα μας.

Model	Cores	Threads	Frequency	Turbo Frequency	L3 cache	TDP	Announcement price	Current price
Core i5-3450	4	4	3.1 GHz	3.5 GHz	6 MB	77 Watt	174\$	184\$
Core i5-3450S	4	4	2.8 GHz	3.5 GHz	6 MB	65 Watt	174\$	184\$
Core i5-3550	4	4	3.3 GHz	3.7 GHz	6 MB	77 Watt	194\$	205\$
Core i5-3550S	4	4	3 GHz	3.7 GHz	6 MB	65 Watt	194\$	205\$
Core i5-3570K	4	4	3.4 GHz	3.8 GHz	6 MB	77 Watt	212\$	225\$
Core i5-3570T	4	4	2.3 GHz	3.3 GHz	6 MB	45 Watt	205\$	205\$
Core i7-3770	4	8	3.4 GHz	3.9 GHz	8 MB	77 Watt	278\$	294\$
Core i7-3770K	4	8	3.5 GHz	3.9 GHz	8 MB	77 Watt	313\$	332\$
Core i7-3770S	4	8	3.1 GHz	3.9 GHz	8 MB	65 Watt	278\$	294\$
Core i7-3770T	4	8	2.5 GHz	3.7 GHz	8 MB	45 Watt	278\$	294\$
Core i7-3720QM	4	8	2.6 GHz	3.6 GHz	6 MB	45 Watt	378\$	378\$
Core i7-3820QM	4	8	2.7 GHz	3.7 GHz	8 MB	45 Watt	568\$	568\$
Core i7-3920XM	4	8	2.9 GHz	3.8 GHz	8 MB	55 Watt	1096\$	1096\$

Πίνακας 2: Τιμές CPU της οικογένειας i5 και i7 με Ivy Bridge, όπως κυμαινόταν το 2013, Πηγή: Hardwarezone.com

Όταν θέσαμε τους στόχους του συστήματος, καθορίσαμε ότι αυτό θα πρέπει να είναι εύχρηστο και φορητό, συνεπώς η λειτουργία του από φορητές πηγές τροφοδοσίας είναι κάτι που πρέπει να μπορεί να ικανοποιηθεί. Οι CPU από την άλλη πλευρά, έχουν πολύ υψηλές ενεργειακές απαιτήσεις και για να λειτουργήσουν χρειάζονται εξωτερικό τροφοδοτικό ή πολύ μεγάλης χωρητικότητας μπαταρίες. Η αύξηση των συχνοτήτων και αριθμών πυρήνων είχε ως αποτέλεσμα παλιότερα την αύξηση της κατανάλωσης όπως φαίνεται στο Σχήμα 3. Τα επόμενα χρόνια βέβαια η κατανάλωση αυτή μειώθηκε, με χαρακτηριστικό ότι πλέον οι μέσες τιμές με μέσο φόρτο εργασίας για μια τυπική CPU των τεσσάρων πυρήνων κυμαίνεται περίπου στα 65 W [61], [62], [63], [64]. Σε CPU για φορητούς υπολογιστές, η διαφορά μπορεί να είναι τεράστια με κάποιες CPU να έχουν χαμηλή κατανάλωση ως 5 W [61], [63], [64]. Πάλι όμως έχουμε να κάνουμε με τιμές τέτοιες που δεν μπορούν να ικανοποιήσουν τις απαιτήσεις για τροφοδοσία από . Στον Πίνακα 3 φαίνεται η κατανάλωση ενέργειας για κάποιες παλιότερες CPU και σε κατάσταση αδράνειας, αλλά και σε μέγιστες επιδόσεις.



Σχήμα 3: Σχέση Συχνότητας Λειτουργίας και Κατανάλωσης Ενέργειας CPU,
 Πηγή : <http://dougaseadline.sys-con.com/node/193382/mobile>

CPU	Power Idle in Watt	Power Load in Watt
Intel Celeron 847 – NM70	29	38
Core i7 4770K IGP	39	104
AMD A10 5700K IGP	35	108
AMD A8-3850 IGP	39	111
Core i5 3570K IGP	49	112
Core i7 3770K IGP	46	113
AMD A8 5600K	34	133
AMD A10 5800 IGP	39	138

Πίνακας 3: Κατανάλωση ενέργειας σε διάσημες CPU σε αδράνεια αλλά και σε απαιτητική χρήση, Πηγή : <https://www.guru3d.com/articles-pages/core-i7-4770k-review,11.html>

Τέλος θα πρέπει να αναφέρουμε ότι σε σύγκριση με έναν μικροελεγκτή η χρήση μιας CPU δεν θα ήταν ιδανική και για άλλους λόγους όπως η έλλειψη μνήμης EPROM, SRAM και δυνατότητα σύνδεσης με διάφορα περιφερειακά χωρίς την βοήθεια μιας Motherboard, πράγματα διαθέσιμα σε μικροελεγκτές και απαραίτητα για την υλοποίηση του συστήματος που επιθυμούμε.

3.4.2 FPGA

Είναι δύσκολο να κάνουμε για τις FPGA ό,τι κάναμε για τις CPU όσον αφορά την απόδοση τους, και να συγκρίνουμε με τις απαιτήσεις του συστήματος μας. Παρόλα αυτά γνωρίζουμε πως ούτως ή άλλως οι FPGA βρίσκουν πρόσφορο έδαφος σε συγκεκριμένου είδους εφαρμογές όπως:

- Όσες απαιτούν παράλληλο προγραμματισμό ή βελτιστοποίηση σε επίπεδο αριθμού πυλών [\[65\]](#), [\[66\]](#)
- Χρησιμοποιούνται πολλές φορές ταυτόχρονα με γενικής φύσεως CPU για την επιτάχυνση κομματιών αλγορίθμων [\[66\]](#), [\[67\]](#), [\[68\]](#), [\[69\]](#), με κλασικότερο παράδειγμα αυτό της Microsoft, που από το 2014 τις χρησιμοποιεί για την μηχανή αναζήτησης Bing
- Τέλος ένα σημαντικό πεδίο χρήσης τους είναι τα νευρωνικά δίκτυα και η τεχνητή νοημοσύνη [\[70\]](#), [\[71\]](#)

Γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι μια FPGA τυπικών τεχνικών χαρακτηριστικών μπορεί να καλύψει τις ανάγκες του συστήματος μας παρόλα αυτά όμως δεν υπάρχει λόγος για χρήση μιας τέτοιας τεχνολογίας, καθώς οι απαιτήσεις είναι πολύ πιο περιορισμένες και μια τυπική FPGA τις υπερκαλύπτει. Πέραν τούτου, τα πλεονεκτήματα μιας FPGA δεν θα μπορούσαν να γίνουν εκμεταλλεύσιμα στα πλαίσια της δικής μας εργασίας και του συστήματος που θέλουμε να φτιάξουμε.

Σε αυτό το σημείο θα εξετάσουμε το ζήτημα του κόστους και θα δούμε ότι ο σημαντικότερος λόγος για τον οποίο μια FPGA δεν μπορεί να καλύψει τις απαιτήσεις που έχουμε για αυτό το σύστημα είναι το κόστος που οι FPGA έχουν. Ακόμα και οι πιο βασικές και οικονομικότερες εξ αυτών, έχουν τιμές που τις κάνουν μη επιτρεπτές για το συνολικό κόστος συστήματος που έχουμε θέσει σαν στόχο καθώς η οικονομικότερη κοστίζει περισσότερο από 30\$, ενώ για μια FPGA μέτριων δυνατοτήτων η τιμή δύσκολα θα πέσει κάτω από τα 85\$. Συνήθως οι ισχυρές FPGA κοστίζουν από 200\$ και πάνω [\[72\]](#), [\[73\]](#), [\[74\]](#).

Οι FPGA από πρακτική άποψη θα ήταν μια πάρα πολύ κακή επιλογή για το σύστημα μας για τους λόγους που αναφέρονται συνοπτικά παρακάτω:

- Οι FPGA συνήθως έρχονται με μεγάλα σε μέγεθος development boards, τα οποία δεν είναι κατάλληλα για να ενσωματωθούν σε ένα τέτοιο σύστημα αν θέλουμε αυτό να μπορεί να μεταφερθεί εύκολα
- Για να μπορεί ο χρήστης να αλλάξει κάποιες παραμέτρους σε όποιες τιμές επιθυμεί, αν χρησιμοποιούσαμε FPGA θα έπρεπε να γίνει επαναπρογραμματισμός της κάτι που δεν είναι καθόλου βολικό και εύχρηστο για έναν χρήστη χωρίς σχετικές γνώσεις

3.4.3 Μικροελεγκτές/Επιλογή για το σύστημα

Σε αυτή την ενότητα θα παραθέσουμε αντίστοιχα τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των μικροελεγκτών για χρήση στο σύστημα μας, και θα δούμε γιατί και εμείς, όπως και τα προηγούμενα υπαρκτά συστήματα, καταλήγουμε στην χρήση μικροελεγκτή για το σύστημα μας.

Η επιλογή ενός μικροελεγκτή φαντάζει ίσως ότι έχει κόστος ως προς την επεξεργαστική ισχύ και τις επιδόσεις του. Με δεδομένο ότι για τις πιο αυστηρές περιπτώσεις οι χρόνοι των ρεαλιστικών φαινομένων που μας ενδιαφέρουν βρίσκονται στην τάξη των μερικών ms, θα χρειαστεί να κρίνουμε κατά πόσο ένας μικροελεγκτής μπορεί να έχει το επιθυμητό αποτέλεσμα. Αναφέρουμε εδώ μερικά κρίσιμα δεδομένα:

- Οι συχνότητες λειτουργίας των μικροελεγκτών βρίσκονται συνήθως στις τάξεις των μερικών MHz έως και μερικών εκατοντάδων MHz. Αν λάβουμε υπόψιν μας ένα μέσο μικροελεγκτή θα μπορούσαμε να μιλήσουμε για ταχύτητες 8-16 MHz. Υποθέτοντας λοιπόν 16 MHz, ο κάθε κύκλος ρολογιού διαρκεί περίπου 62.5 ns
- Ένας μέσος μικροελεγκτής σήμερα σπανίως χρειάζεται περισσότερους από τέσσερις κύκλους ρολογιού για να ολοκληρώσει μια εντολή. Υποθέτουμε λοιπόν ότι μια εντολή θα χρειαστεί περίπου 250 ns στην χειρότερη περίπτωση για να ολοκληρωθεί
- Από τα προηγούμενα προκύπτει ότι ακόμα και αν για να γίνει η πυροδότηση μας χρειάζονται εκατοντάδες ή και χιλιάδες εντολές, πάλι ένας μέσος μικροελεγκτής των 16 MHz επαρκεί

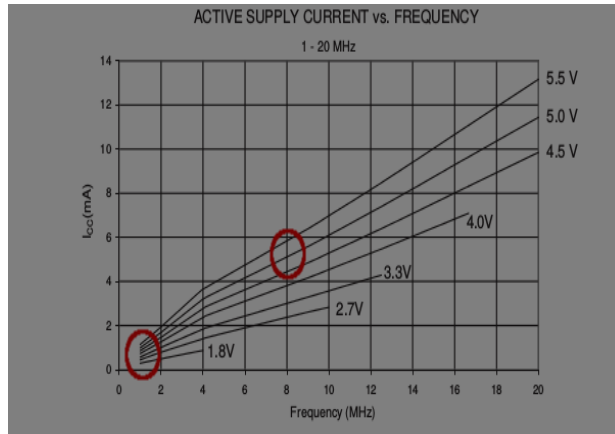
Μπορούμε λοιπόν ακόμα και με τις επιδόσεις ενός μικροελεγκτή να έχουμε ικανοποίηση των απαιτήσεων μας. Σε ένα benchmark που έφτιαξε η Texas Instruments το 2005 [\[75\]](#) για να συγκρίνει κάποιους μικροελεγκτές μπορούμε να δούμε ότι οι κύκλοι ρολογιού ακόμα και για FIR φίλτρο, που είναι μια απαιτητική εργασία, καθώς και για πολλαπλασιασμό πινάκων, δεν ξεπερνούν τις μερικές εκατοντάδες χιλιάδες, πράγμα που σημαίνει ότι είμαστε μέσα σε ασφαλή πλαίσια για την ανάπτυξη του συστήματος που εμείς επιθυμούμε να φτιάξουμε. Στον Πίνακα 4 φαίνονται ανά μικροελεγκτή και ανά είδος κώδικα οι κύκλοι ρολογιού που χρειάστηκε ο κάθε μικροελεγκτής για να ολοκληρώσει την διαδικασία. Επιπλέον υπάρχουν στους μικροελεγκτές ενσωματωμένα I/O ports για σύνδεση περιφερειακών, και που δεν ισχύει στις άλλες τεχνολογίες που εξετάσαμε.

Application	MSP430F135	ATmega8	PIC18F242	8051	H8/300L	MC68HC11	MaxQ20	ARM7
8-bit Math	299	157	318	112	680	387	421	185
8-bit Matrix	2899	5300	20045	17744	9098	15412	31691	2227
8-bit Switch	50	131	109	84	388	214	58	146
16-bit Math	343	319	625	426	802	508	815	259
16-bit Matrix	5784	24426	27021	29468	15280	23164	60214	2998
16-bit Switch	49	144	163	120	398	230	51	146
32-bit Math	792	782	1818	2937	1756	1446	1034	115
Floating-point Math	1207	1601	1599	2487	2458	4664	1943	108
FIR Filter	152193	164793	248655	206806	245588	567139	464558	43191
Matrix Multiplication	6633	16027	36190	9454	26750	26874	66534	2918
Total	170249	213680	336543	269638	303198	640038	627319	52293

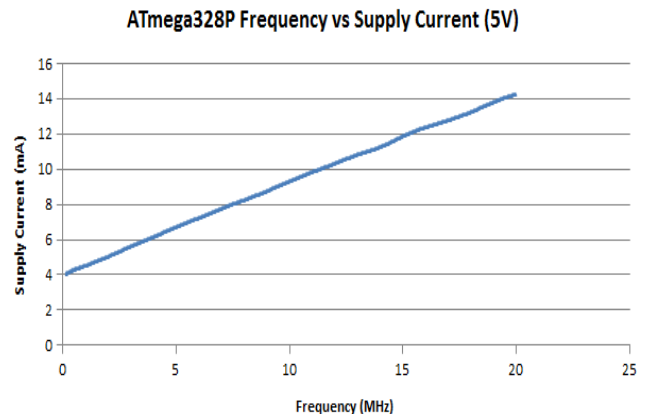
Πίνακας 4: Σύγκριση αριθμού κύκλων ρολογιού για διάφορους μικροελεγκτές ανά είδος αλγορίθμου. Πηγή : Texas Instruments

Ένα από τα μεγαλύτερα πλεονεκτήματα της χρήσης μικροελεγκτών για μικρά ενσωματωμένα συστήματα είναι το γεγονός ότι το κόστος τους σε σχέση με άλλες τεχνολογίες είναι αρκετά μικρό. Υπάρχουν μικροελεγκτές με δεκάδες I/O, συχνότητα λειτουργίας μεγαλύτερη των 20 MHz, οι οποίοι μπορεί να κοστίζουν λιγότερο και από 5\$ [76], ενώ υπάρχουν και επιλογές με λιγότερο κόστος και από 1\$ [77]. Σύμφωνα με την Wikipedia [78], το 2015 το κόστος για 8-bit μικροελεγκτή ήταν περίπου 0.311\$ σε πωλήσεις των 1000 κομματιών, ενώ η αντίστοιχη τιμή για 16-bit μικροελεγκτή ήταν 0.385\$. Οι αντίστοιχες τιμές σήμερα για τους ίδιους μικροελεγκτές που παραθέτει η Wikipedia είναι σήμερα κάπως υψηλότερες [79], [80]. Εφόσον λοιπόν οι ανάγκες μας καλύπτονται από έναν μικροελεγκτή τότε η επιλογή του έναντι CPU και FPGA όχι μόνο είναι λογική αλλά μάλλον επιβεβλημένη.

Ένα φυσικό επακόλουθο της χαμηλότερης συχνότητας λειτουργίας ενός μικροελεγκτή είναι φυσικά και η χαμηλότερη κατανάλωση του. Πράγματι σε γενικές γραμμές οι μικροελεγκτές έχουν πολύ μικρότερη κατανάλωση ενέργειας σε σχέση με μια FPGA ή CPU. Στο Σχήμα 4 φαίνεται η παροχή απαιτούμενου ρεύματος σε σχέση με την συχνότητα και την τάση λειτουργίας σε έναν μικροελεγκτή Attiny85, που ισχυρίζεται να έχει στο 1 MHz και για 1.8 V μόλις 300 μ A απαιτούμενο ρεύμα [81]. Με κόκκινο είναι σημειωμένες οι περιοχές λειτουργίας του με την βασική συχνότητα στα 8 MHz καθώς και με συχνότητα 1 MHz. Αντίστοιχα στο Σχήμα 5 μπορούμε να δούμε το ίδιο γράφημα για έναν Atmega328P [48]. Αν κάνουμε τον υπολογισμό σε W μέσω των τιμών που μας δίνουν τα γραφήματα μπορούμε να δούμε ότι μιλάμε για επίπεδο των μερικών δεκάδων mWatt σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας.



Σχήμα 4: Παρεχόμενο ρεύμα ως προς συχνότητα λειτουργίας για τον ATtiny85 της Atmel, Πηγή : Atmel



Σχήμα 5: Παρεχόμενο ρεύμα ως προς την συχνότητα λειτουργίας για τον ATmega328P, Πηγή: <https://learn.sparkfun.com/tutorials/reducing-arduino-power-consumption/reducing-the-clock-speed>

Σε αυτή την παράγραφο θα κάνουμε μια τελική σύγκριση όσον αφορά κάποια χαρακτηριστικά των μικροελεγκτών σε σχέση με τις άλλες τεχνολογίες που είδαμε. Στον Πίνακα 5 μπορούμε να δούμε λίγο πιο συνοπτικά κάποια πεδία σύγκρισης των διάφορων τεχνολογιών. Σε ορισμένες περιπτώσεις υπάρχει μόνο μονάδα μέτρησης για να είναι σαφές για τι τάξη μεγέθους πρόκειται. Επιπλέον αξίζει να σημειωθεί ότι υπήρξαμε αρκετά αυστηροί στην παρουσίαση κάποιων από αυτές τις μέσες τιμές, καθώς επιλέξαμε σε κάθε περίπτωση την πιο “ευνοϊκή” για την εκάστοτε τεχνολογία περίπτωση, ενώ για την περίπτωση των μικροελεγκτών κάναμε το αντίθετο, επιλέξαμε δηλαδή τις τιμές με βάση μια πιο αυστηρή προσέγγιση. Από αυτό προκύπτει ότι δεν τίθεται κανένα θέμα αμφιβολίας της ανωτερότητας της επιλογής μας, σύμφωνα με τους αντίστοιχους στόχους που έχουμε θέσει.

Τεχνολογία	Συχνότητα Λειτουργίας	Κόστος	Κατανάλωση Ενέργειας
CPU	> 1 GHz	> 40\$	> 25 W
FPGA	> 100 MHz	> 80\$	W
CPLD	> 20 MHz	> 15\$	W
MCU	> 1 MHz	> 1\$	< 500 mW
Στόχος	> 1 MHz	< 60\$	< W

Πίνακας 5: Σύγκριση μεταξύ CPU, FPGA, CPLD και Μικροελεγκτών ως προς την συχνότητα λειτουργίας, το κόστος και την κατανάλωση ενέργειας

Αν δούμε τον πίνακα μπορούμε να κατανοήσουμε γιατί η πιο δημοφιλής επιλογή για τέτοια ενσωματωμένα συστήματα είναι αυτή των μικροελεγκτών. Επίσης άλλοι λόγοι για την επιλογή μικροελεγκτή είναι η ενσωματωμένη μνήμη του, οι υπάρχουσες I/O που δεν είναι διαθέσιμες στις

άλλες τεχνολογίες και το μικρό του φυσικό μέγεθος που εξυπηρετεί την ευκολία χρήσης και την ευελιξία.

3.5 Επιλογή Τεχνολογίας Ασύρματης Σύνδεσης

Σε προηγούμενο κεφάλαιο θέσαμε ως στόχο να γίνεται ασύρματα η σύνδεση των αισθητήρων. Αυτό σημαίνει ότι θα πρέπει να εξασφαλίσουμε ταυτόχρονα ότι η υστέρηση που θα εισάγει η ασύρματη επικοινωνία, δεν θα είναι τόσο μεγάλη ώστε να μπορεί να θέσει σε κίνδυνο την ικανοποίηση των χρονικών απαιτήσεων. Συνεπώς, η καθυστέρηση της ασύρματης επικοινωνίας θα πρέπει να περιορίζεται όσο το δυνατόν περισσότερο για να έχουμε συνολική καθυστέρηση μικρότερη από 5 ms. Θα εξετάσουμε παρακάτω μερικές τεχνολογίες ασύρματης επικοινωνίας που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν και θα δούμε αν αυτές καλύπτουν ή όχι τις ανάγκες μας και πως αυτό καθορίζει την τελική επιλογή μας

3.5.1 Οπτική ζεύξη

Μια ιδέα για την προσέγγιση αυτού του προβλήματος είναι η χρήση μια οπτικής ζεύξης για την ασύρματη επικοινωνία του συστήματος με τους αισθητήρες. Θα εξετάσουμε την περίπτωση αυτή και από άποψη υστέρησης, αλλά και από άποψη πρακτικών ζητημάτων που μπορούν να προκληθούν με την χρήση της.

Η χρήση μιας οπτικής ζεύξης για την ασύρματη σύνδεση των αισθητήρων με το σύστημα έχει νόημα αν επιθυμούμε να μειώσουμε την καθυστέρηση του συστήματος. Θα μελετήσουμε την περίπτωση οπτικής ζεύξης με laser. Λόγω του ότι το laser είναι ένα οπτικό κύμα, καταλαβαίνουμε ότι η καθυστέρηση στο κομμάτι της ασύρματης επικοινωνίας αυτής καθαυτής είναι αμελητέα, όπως και στην περίπτωση χρήσης καλωδίου. Συνεπώς, βεβαίως και μας καλύπτει από απαίτηση σε χρονικό περιορισμό μια οπτική ζεύξη. Βέβαια, θα πρέπει να σημειωθεί ότι η ζεύξη αυτή θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί μόνο για να μεταδώσουμε προς το υπόλοιπο σύστημα το γεγονός ότι κάποιος αισθητήρας είχε μέτρηση που ξεπέρασε το κατώφλι, έτσι ώστε η βάση του συστήματος να μπορεί να κάνει τις αντίστοιχες διαδικασίες για την πυροδότηση. Δεν θα μπορούσε δηλαδή μέσω μιας απλής τέτοιας ζεύξης να έχουμε μεταφορά των μεταδεδομένων προς το κεντρικό σύστημα.

Θα πρέπει να εξετασθεί και το ζήτημα του κόστους μιας οπτικής ζεύξης. Για να μπορέσουμε να έχουμε οπτική ζεύξη για την επικοινωνία των αισθητήρων με την βάση για δύο αισθητήρες θα χρειαζόμασταν:

- 2 πομπούς laser με την μέση τιμή για καθένα να είναι 0.3-0.6\$ [\[82\]](#)

- 2 αισθητήρες ως δέκτες laser με αντίστοιχη τιμή 0.7-1\$ [83]
- Ή εναλλακτικά στα προηγούμενα, 4 συνολικά modules που μπορούν να είναι και πομποί και δέκτες laser με την τιμή του καθενός να είναι 0.8-2\$ [84]

Να σημειωθεί εδώ ότι αυτό αφορά τις πιο οικονομικές επιλογές, συνεπώς η ακρίβεια και συνέπεια τους είναι αμφίβολη για μια ομαλή λειτουργία. Συνολικά, και αν θεωρήσουμε τις χαμηλότερες τιμές, έχουμε ένα κόστος περίπου 5\$. Η κατασκευή έναντι της αγοράς τέτοιων laser πομποδεκτών δεν αλλάζει το συνολικό κόστος μιας οπτικής ζεύξης παρά μόνο ελάχιστα.

Να σημειωθεί εδώ ότι αυτό αφορά τις πιο οικονομικές επιλογές, συνεπώς η ακρίβεια και συνέπεια τους είναι αμφίβολη για μια ομαλή λειτουργία. Συνολικά, και αν θεωρήσουμε τις χαμηλότερες τιμές, έχουμε ένα κόστος περίπου 5\$. Η κατασκευή έναντι της αγοράς τέτοιων laser πομποδεκτών δεν αλλάζει το συνολικό κόστος μιας οπτικής ζεύξης παρά μόνο ελάχιστα.

Ενώ το κόστος λοιπόν φαίνεται ότι καλύπτει τις ανάγκες μας υπάρχουν ορισμένοι σημαντικοί λόγοι που από πρακτικής άποψης η επιλογή αυτή δεν έχει κανένα νόημα:

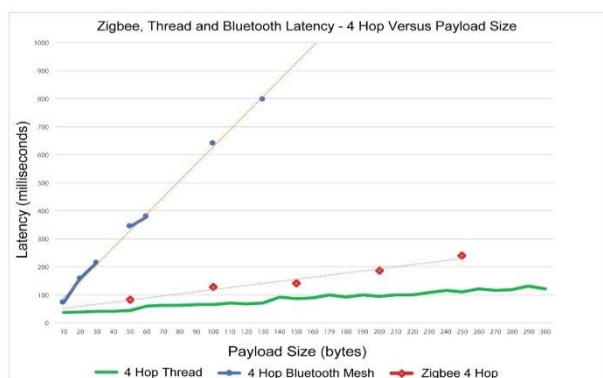
- Η ανάγκη ακριβούς οπτικής επαφής ανάμεσα στον πομπό και τον δέκτη. Καταλαβαίνουμε εύκολα ότι αυτό δεν είναι καθόλου πρακτικό σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας, ειδικά αν για παράδειγμα ο αισθητήρας θέλουμε να βρίσκεται σε σημείο που δεν έχει άμεση οπτική επαφή με το υπόλοιπο σύστημα ή αν παρεμβάλλονται εμπόδια
- Η διακοπή της οπτικής ζεύξης μπορεί να επιφέρει εύκολα λανθασμένα μηνύματα πυροδότησης
- Η σωστή εστίαση της ζεύξης απαιτεί χρόνο και είναι εύκολο να απορρυθμιστεί
- Είναι πιο ευάλωτο σε παρεμβολές από εξωτερικές πηγές φωτός
- Η μη δυνατότητα μετάδοσης των μετρήσεων του αισθητήρα ως μεταδεδομένα αποκλείει την ικανότητα να γνωρίζουμε σε τιμή ξεπέρασε το κατώφλι ο αισθητήρας, καθώς και την ικανότητα ο χρήστης να μπορεί να βλέπει τις τωρινές μετρήσεις όταν θα θέλει να επιλέξει κατάλληλο κατώφλι πυροδότησης

3.5.2 Bluetooth/Wi-Fi

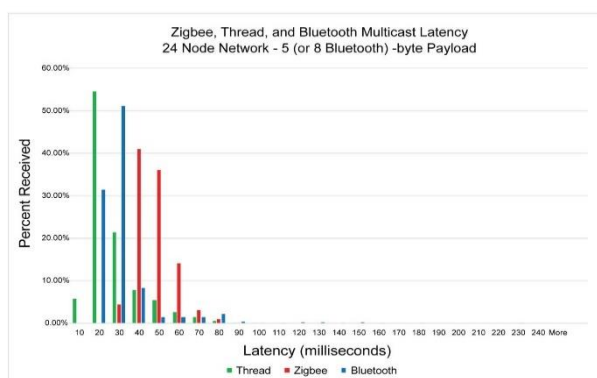
Πιθανή λύση στο πρόβλημα της ασύρματης επικοινωνίας θα μπορούσε να είναι η χρήση Bluetooth ή Wi-Fi. Θα εξετάσουμε παρακάτω την περίπτωση όπως και αυτή την ασύρματης ζεύξης. Η λύση του Bluetooth ή του Wi-Fi είναι μια από αυτές που φαίνεται να μας καλύπτει θεωρητικά.

Με τα σημερινά δεδομένα για το Bluetooth 5, καθώς και για το Wi-Fi, οι δυνατότητες φαίνεται να καλύπτουν τις ανάγκες μας σε περιορισμούς ρυθμού μετάδοσης. Το Bluetooth μπορεί να πετύχει ρυθμό μετάδοσης δεδομένων μέχρι και 2 Mbps, αλλά και πραγματικό on air throughput μέχρι 1400 Kbps [85], [86]. Παρομοίως ισχύει και για το Wi-Fi, του οποίου οι ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων μπορεί να ξεπεράσει και 1.3 Gbps [87], [88], ενώ θεωρητικά ίσως φτάνει και παραπάνω από 6 Gbps [89]. Φαίνεται λοιπόν, ότι οι ανάγκες μας από άποψη αυστηρού ρυθμού μετάδοσης καλύπτονται και στις δύο περιπτώσεις.

Παρόλα αυτά, δεν είναι γνωστό τι συμβαίνει με την καθυστέρηση. Χρειαζόμαστε να έχουμε ένα καθορισμένο ανώτατο όριο, έχουμε την ανάγκη δηλαδή για real time απόκριση του συστήματος και σχετικό ντετερμινισμό όσον αφορά την μέγιστη καθυστέρηση. Το Bluetooth και το Wi-Fi μπορούν δεν είναι κατάλληλα για real time απόκριση και άμεση μετάδοση μικρών πακέτων διότι δεν έχει κάποιο καθορισμένο άνω φράγμα, με αποτέλεσμα σε ορισμένες περιπτώσεις να μην μπορεί πιθανώς να καλύψει τις ανάγκες μας. Στα παρακάτω Σχήματα φαίνονται ποσοτικά σε διαγράμματα οι καθυστερήσεις του Bluetooth έναντι άλλων τεχνολογιών, μεταξύ των οποίων το Zigbee το οποίο θα εξετάσουμε αργότερα και μια παραλλαγή του, το Thread Fragmentation. Τα Σχήματα 6 και 7 που παρουσιάζονται αφορούν κυρίως τα μικρά δίκτυα με μικρά payload [90]. Από τις καθυστερήσεις που φαίνονται παρακάτω προκύπτει ότι είναι αρκετά μεγάλες σε σύγκριση με τον δικό μας στόχο. Ακριβώς ίδιο συμπέρασμα προκύπτει και από έρευνα του 2018, πάνω σε δίκτυα αισθητήρων [91].



Σχήμα 6: Σύγκριση της υστέρησης για τέσσερα Hop σε σχέση με το Payload, Πηγή : <https://www.silabs.com/products/wireless/learning-center/mesh-performance>



Σχήμα 7: Η υστέρηση σε σχέση με το ποσοστό επιτυχίας λήψης σε μικρά δίκτυα με μικρά payload, Πηγή : <https://www.silabs.com/products/wireless/learning-center/mesh-performance>

Οι συγκεκριμένες τεχνολογίες είναι πάρα πολύ ισχυρές και υψηλού επιπέδου, είναι εξαιρετικές για πολλές εφαρμογές όπως σύνδεση στο διαδίκτυο ή σύνδεση κάποιων συσκευών μεταξύ τους, όμως έχουνε κάποια ζητήματα πρακτικά που τις κάνουν ακατάλληλες για το δικό μας σύστημα:

- Ακολουθούν συγκεκριμένες διαδικασίες για την σύνδεση δύο ή περισσότερων σημείων, το handshake δηλαδή έχει μεγάλη συνθετότητα, κάτι που απαιτεί μεγαλύτερη επεξεργαστική ισχύ, και επιπλέον ανεβάζει την καθυστέρηση. Εμείς δεν χρειαζόμαστε καν handshake καθώς δεν αφορά το σύστημα μας την επικοινωνία άγνωστων κόμβων μεταξύ τους, αλλά προκαθορισμένων κόμβων
- Επιπλέον, ακολουθούνται αυστηρά κάποιοι κανόνες που αφορούν την πληροφορία που υπάρχει σε κάθε πακέτο, το μέγεθος του, τους headers κτλ. Εμείς χρειαζόμαστε όμως για τις δικές μας ανάγκες μια προσέγγιση πιο custom, κάτι που θα μας αφήνει την δυνατότητα να ελέγχουμε εμείς αυτές τις παραμέτρους, καθώς πολλές φορές το μόνο που θα χρειαστεί για την επικοινωνία των υποσυστημάτων μας θα είναι μόλις ελάχιστα byte
- Οι μηχανισμοί ανάνηψης από σφάλματα και στις δύο αυτές τεχνολογίες θα υπάρχουν χωρίς να το χρειαζόμαστε και χωρίς να θέλουμε μεταδόσεις έξτρα μηνυμάτων για την ανάνηψη από σφάλματα, καθώς και αναμεταδόσεις των ίδιων μηνυμάτων. Οι μηχανισμοί ανάνηψης από σφάλματα στην δικιά μας περίπτωση είναι περιττοί, διότι στην πραγματικότητα, σε περίπτωση που όντως γίνει σφάλμα, το φαινόμενο ενδιαφέροντος θα έχει παρέλθει και άρα η εξασφάλιση ότι το μήνυμα θα φτάσει δεν έχει κανένα νόημα
- Όλα τα προηγούμενα που αναφέραμε δεν είναι δυνατόν να τα παρακάμψουμε
- Το Wi-Fi απαιτεί και μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας, αν και αυτό δεν ισχύει για το Bluetooth που έχει εκδόσεις του που είναι κατάλληλες για χαμηλή κατανάλωση (BLE) [\[92\]](#)

Όσον αφορά το κόστος, αυτό δεν είναι ιδιαίτερα μεγάλο καθώς υπάρχουν αρκετές οικονομικές επιλογές για Wi-Fi και Bluetooth στην κινεζική αγορά. Συγκεκριμένα για Wi-Fi υπάρχουν επιλογές που μπορούμε να βρούμε, οι οποίες κυμαίνονται από 1.2-3.5\$ ανά κομμάτι, ενώ υπάρχουν και πολύ ακριβότερες επιλογές [\[93\]](#). Αν χρησιμοποιήσουμε συνολικά τρία τέτοια modules θα έχουμε ένα συνολικό κόστος περίπου στα 3.6-5\$. Αντίστοιχα για Bluetooth πομποδέκτες έχουμε τιμές που ξεκινάνε από τα 2.1\$ και μπορούν να φτάσουν μέχρι και πάνω από 5\$ [\[94\]](#). Συνολικά θα είχαμε

λοιπόν για τρεις τέτοιες μονάδες ένα κόστος περίπου στα 6.3\$. Μπορούμε να δούμε λοιπόν ότι το κόστος αυτό δεν είναι απαγορευτικό για την χρήση μιας από αυτές τις τεχνολογίες.

3.5.3 Zigbee/Παραλλαγές του Zigbee

Το Zigbee είναι μια προδιαγραφή βασισμένη στο IEEE 802.15.4 για μια μερίδα πρωτόκολλων επικοινωνίας υψηλού επιπέδου που χρησιμοποιείται συνήθως για δημιουργία προσωπικών δικτύων με μικρούς, χαμηλούς σε κατανάλωση ψηφιακούς πομποδέκτες. Χρησιμοποιείται λοιπόν για εφαρμογές που απαιτούν μικρή απόσταση, μικρή κατανάλωση και μικρό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων [\[95\]](#).

Η καθυστέρηση για το Zigbee δεν είναι γνωστή, όμως χρησιμοποιείται ευρέως σε εφαρμογές που βασίζονται σε αισθητήρες, όπως σε έξυπνα σπίτια, ή σε μεγάλα δίκτυα αισθητήρων. Το Zigbee έχει ρυθμό μετάδοσης μέχρι και 250 kbps και μπορεί να χρησιμοποιήσει μόνες συχνότητες στα 868 MHz, 915 MHz και 2.4 GHz [\[95\]](#), [\[96\]](#). Γενικά οι προδιαγραφές του Zigbee φαίνεται πως καλύπτουν τις ανάγκες μας από ρυθμό μετάδοσης, όμως το ζήτημα της καθυστέρησης είναι λιγότερο ξεκάθαρο. Γενικότερα χρησιμοποιείται σε εφαρμογές που έχουν ανοχή σε μεγάλη καθυστέρηση [\[97\]](#), αλλά υπάρχουν και άλλες εφαρμογές που έχει λειτουργήσει με μικρή καθυστέρηση [\[98\]](#). Στον Πίνακα 6 φαίνονται κάποια τεχνικά χαρακτηριστικά του σε σύγκριση με άλλα δημοφιλή πρωτόκολλα και μερικά παρόμοια του (6LoWPAN, One-NET). Τα πρωτόκολλα κυρίως αφορούν εφαρμογές Smart Home. Αυτό το συμπέρασμα συμπίπτει και με την έρευνα που εξετάσαμε προηγουμένως για την περίπτωση του Bluetooth [\[91\]](#).

Οι Meng-Shiuan Pan και Ping-Lin Liu, με τοπολογία δένδρου και 30 κόμβους, με δικές τους δρομολογήσεις που βελτιώνουν την καθυστέρηση, η χαμηλότερη καθυστέρηση που επιτυγχάνουν είναι περίπου 6.74 s για διάδοση σε όλο το δένδρο. Μπορούμε να καταλάβουμε λοιπόν ότι η καθυστέρηση θα είναι μεγαλύτερη από όση επιθυμούμε, καθώς εδώ μιλάμε για διαφορά τάξης μεγέθους, ενώ ο αριθμός των κόμβων δεν είναι πάρα πολύ μεγάλος [\[98\]](#).

Όσον αφορά πιο πρακτικά θέματα το Zigbee και οι παραλλαγές του έχουν παρόμοια μειονεκτήματα με το Bluetooth και το Wi-Fi. Συνοπτικά αναφέρουμε:

- Ύπαρξη handshake που δεν μας είναι απαραίτητα
- Χρήση συγκεκριμένων κανόνων για το μέγεθος των πακέτων, τα payload, τους headers που δεν μπορούμε να παρακάμψουμε
- Μηχανισμοί ανάνηψης από σφάλματα που στην περίπτωση μας είναι περιττοί

Technology	Data Rate	Coverage Distance	Frequency	Modulation	Spectrum Spread	Network	Energy Needed
Wi-Fi (802.11n)	54Mbps to 600 Mbps	100m	2.4 GHz, 5 GHz	BPSK, QPSK, QAM	DSSS	P2P-Multicast; Star and Ad-Hoc Network	Very High
ZigBee (802.15.4g)	20Kbps, 40Kbps, 240Kbps	75m	2.4 GHz	BPSK, O-QPSK	DSSS	P2P-Multicast; Star, Tree and Mesh Network	Medium
Wireless HART	250Kbps	75m	2.4 GHz	O-QPSK	DSSS	P2P-Multitask; Star and Mesh Network	Medium
6LoWPAN	20Kbps, 40Kbps, 250Kbps	75m	868 MHz, 915 MHz, 2.4 GHz	BPSK, O-QPSK	DSSS	P2P-Multitask; Star and Mesh Network	Medium
ISA100.11a	250Kbps	75m	2.4 GHz	O-QPSK	DSSS	P2P-Multitask; Star and Mesh Network	Medium
One-NET	38.4Kbps-230Kbps	Up to 100m	433 MHz, 868 MHz, 915 MHz, 2.4 GHz	FSK, BPSK, O-QPSK	FHSS, DSSS	P2P-Multitask; Star and Mesh Network	Medium

Πίνακας 6: Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του Zigbee σε σύγκριση με άλλα πρωτόκολλα για παρόμοιες εφαρμογές, Πηγή : Data Reliability and Latency Test for Zigbee-based Smart Home Energy Management Systems, "Ince, A. T., Elma, O., Selamogullari, U.S., Vural, B."

Ενώ καλύπτει τις υπόλοιπες ανάγκες μας το Zigbee έχει ένα μειονέκτημα στο ζήτημα του κόστους. Ενδεικτικά ένα πιστοποιημένο bundle με τρεις μονάδες, μια πλατφόρμα ανάπτυξης και κάποια καλώδια μπορεί να κοστίσει από μόνο του περισσότερα από 70\$ [99], [100], ενώ για ένα μόνο κομμάτι η τιμή με πιστοποίηση του Zigbee δεν πέφτει κάτω από 15\$ [101], [102], [103]. Βεβαίως είναι εύκολα αντιληπτό ότι οι τιμές αυτές είναι απαγορευτικές για τον στόχο που έχουμε δώσει εμείς για το κόστος του συστήματος που θέλουμε να αναπτύξουμε. Οι κλώνοι που κυκλοφορούν στην κινεζική αγορά κυμαίνονται στα 3-4\$, που και πάλι αν χρειαζόμαστε 3 από αυτά δεν είναι ένα αμελητέο ποσό. Θα δούμε άλλωστε πως υπάρχουν άλλες επιλογές πολύ πιο οικονομικές που μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε. Για παραλλαγές του Zigbee οι τιμές είναι εξίσου υψηλές είτε για πιστοποιημένες μονάδες είτε για κλώνους.

3.5.4 RF/Επιλογή για το σύστημα

Όπως είδαμε και πριν, μια επιλογή σαν το Zigbee φαίνεται να καλύπτει τις ανάγκες μας, όμως παρουσιάζει το ζήτημα του κόστους και επιπλέον κάποια πρακτικά θέματα όσον αφορά την επικοινωνία όπως αυτά του Bluetooth και του Wi-Fi. Εναλλακτικά λοιπόν θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί η τεχνολογία των RF πομποδεκτών, η οποία είναι επιλογή που τελικά κάνουμε για το σύστημα μας. Η λύση αυτή μας προσφέρει τα παρακάτω:

- Με RF πομποδέκτες θα μπορούμε εμείς να θέσουμε τους κανόνες επικοινωνίας μεταξύ των κόμβων μας όπως μας εξυπηρετεί για την διαμόρφωση της μικρότερης δυνατής χρονικής

καθυστερήσης, καθώς δεν χρειάζεται αναγκαστικά να υπάρχουν handshakes και κανόνες για το μέγεθος πακέτων

- Ως αποτέλεσμα του προηγούμενου μπορούμε να έχουμε και ένα άνω προβλεπόμενο όριο στο πόσο μεγάλη καθυστέρηση θα εισάγει η ασύρματη επικοινωνία και άρα να έχουμε προβλεψιμότητα για το μέγιστο χρονικό διάστημα το οποίο θα χρειαστεί για πυροδότηση του flash
- Λόγω του ότι υπάρχουν αρκετές επιλογές για τέτοια RF συστήματα και είναι σχετικά απλοϊκά, το κόστος τους ανά κομμάτι μπορεί να είναι αρκετά μικρότερο από αυτό που είδαμε για το Zigbee ή τις παραλλαγές του. Πράγματι στην κινεζική αγορά μπορούν να βρεθούν RF μονάδες πομποδεκτών με κόστος μικρότερο των 0.8\$ ανά κομμάτι που παρόλα αυτά καλύπτουν τις ανάγκες μας [\[104\]](#)

Αυτό που όμως αξίζει να σημειωθεί εδώ, είναι ότι για να μπορέσει το σύστημα να εισέρχεται από μια φάση λειτουργίας σε μια άλλη, θα πρέπει να οριστεί από εμάς ένα πρωτόκολλο επικοινωνίας μεταξύ αισθητήρων και βασικής μονάδας, το οποίο θα βασίζεται σε κάποια γεγονότα για να γίνουν οι εναλλαγές των σταδίων λειτουργίας όπως επιθυμούμε.

Στον Πίνακα 7 μπορούμε να δούμε περιληπτικά για κάθε τεχνολογία τι μπορεί να μας προσφέρει όσον αφορά το κόστος, την ευελιξία, και μια εκτίμηση μέσης καθυστέρησης. Επίσης, ο πίνακας παρουσιάζει αν είναι απαραίτητη η ύπαρξη οπτικής επαφής της μιας πλευράς με την άλλη για να λειτουργήσει η τεχνολογία αυτή. Ως ευελιξία εννοούμε την δυνατότητα να παρακάμψουμε κάποιες λειτουργίες συγκεκριμένων τεχνολογιών για να τις προσαρμόσουμε στις δικές μας ανάγκες. Σε κάθε στήλη, με έντονα γράμματα μπορούμε να δούμε ποια επιλογή μας προσφέρει καλύτερα αυτό που επιθυμούμε. Βλέπουμε λοιπόν ότι η λύση χρήσης RF μονάδων με προσαρμοσμένο πρωτόκολλο είναι αυτή που μας καλύπτει περισσότερο από τις υπόλοιπες, καθώς και στις πέντε κατηγορίες καλύπτει αρκετά καλά τις απαιτήσεις.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι το άνω φράγμα που αναφέρεται είναι ανέφικτο να είναι 100% ακριβές για μια ασύρματη επικοινωνία, αλλά μπορούμε να έχουμε μια καλή εκτίμηση. Σύμφωνα με τα γραφήματα που παραθέσαμε πιο πάνω, ενώ δεν έχουμε ακριβή τιμή της καθυστέρησης για κάποιες τεχνολογίες, μπορούμε να έχουμε μια πολύ καλή προσέγγιση για την καθυστέρηση της αποστολής ενός μηνύματος μεταξύ δύο κόμβων. Όπως είδαμε, με το Wi-Fi, Bluetooth και Zigbee η καθυστέρηση είναι τουλάχιστον μερικές δεκάδες ms, ενώ μπορεί να φτάσει και εκατοντάδες ms. Αντίθετα, η περίπτωση απλών RF πομποδεκτών, μπορεί θεωρητικά να μας προσφέρει κάτι που δεν

ξεπερνάει το 1 ms. Η διαφορά σε κόστος, αν και δεν είναι απαγορευτική αν συγκρίνουμε RF με Bluetooth ή Wi-Fi, δεν είναι αμελητέα, αν συνυπολογίσουμε ότι μέσα στο συνολικό κόστος θα συμπεριληφθούν και άλλα επιμέρους εξαρτήματα του συστήματος.

Τεχνολογία	Προβλεπόμενο Άνω Φράγμα Υστέρησης	Απαραίτητη Οπτική Επαφή	Κόστος	Ευελιξία	Εκτίμηση μέσης Υστέρησης
Οπτική ζεύξη	Ναι	Ναι	> 3\$	Όχι	<10 μ s
WiFi	Όχι	Όχι	> 3.6\$	Όχι	> 25 ms
Bluetooth	Όχι	Όχι	> 6.3\$	Όχι	> 25 ms
Zigbee/Παραλλαγές	Όχι	Όχι	> 45\$	Όχι	> 25 ms
RF(nRF24L01+)	Ναι (προσαρμοσμένο πρωτόκολλο)	Όχι	> 2.4\$	Ναι	< 1 ms

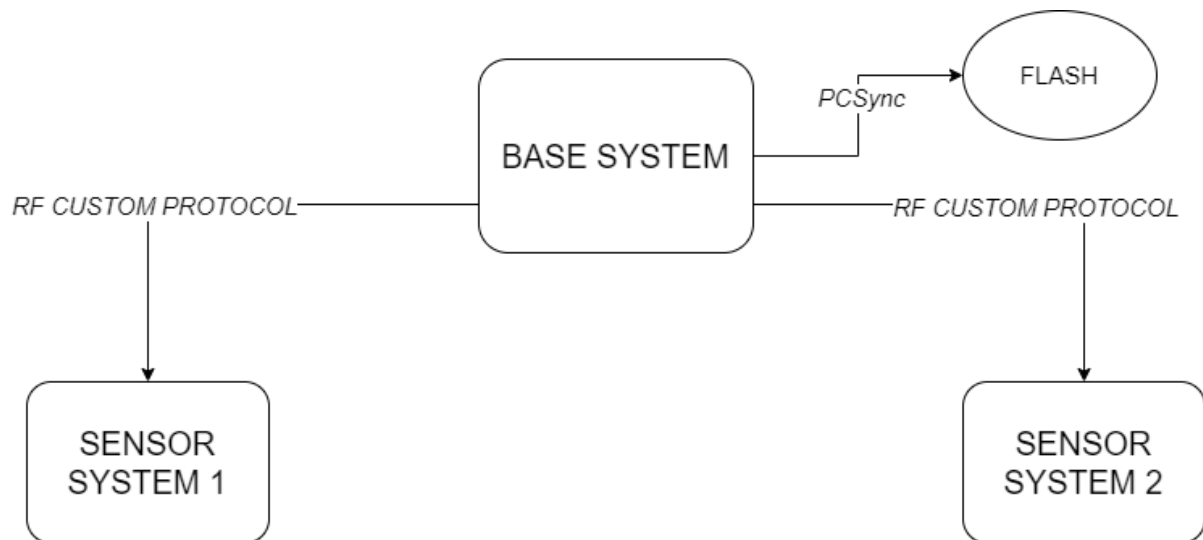
Πίνακας 7: Συνοπτική σύγκριση μεταξύ οπτικής ζεύξης, Wi-Fi, Bluetooth, Zigbee και RF

3.6 Μοντέλο του συστήματος

Στην υποενότητα αυτή θα ασχοληθούμε με την περιγραφή του μοντέλου του συστήματος με βάση το οποίο θα αναπτύξουμε το σύστημα μας, μοντέλο που θα μας επιτρέπει να καλύψουμε όλες τις απαιτήσεις που έχουμε ορίσει παραπάνω. Αρχικά θα πρέπει να γίνει σαφές ότι εφόσον έχουμε απαίτηση για ασύρματη επικοινωνία των αισθητήρων με την πυροδότηση του flash/κάμερας, είναι εξ ορισμού απαραίτητο να υπάρχει για κάθε αισθητήρα ένας μικροελεγκτής, για να μπορεί να συλλέγει τα δεδομένα από τον εκάστοτε αισθητήρα. Μιλάμε συνεπώς, για ένα ξεχωριστό υποσύστημα για κάθε αισθητήρα, άρα δύο υποσυστήματα για αισθητήρες. Επιπλέον, για να μπορεί να αποσταλεί η μέτρηση του αισθητήρα και να γίνει η πυροδότηση, θα πρέπει να υπάρχει άλλο ένα υποσύστημα βάση που θα αναλαμβάνει να δέχεται αυτές τις μετρήσεις των αισθητήρων καθώς και να πυροδοτεί με την σειρά του το flash/κάμερα. Άρα συμπερασματικά μπορούμε να πούμε ότι το σύστημα μας αποτελείται από :

- 1 υποσύστημα για κάθε αισθητήρα που συλλέγει τα δεδομένα του
- 1 υποσύστημα βάση υπεύθυνο για όλες τις άλλες λειτουργίες

Παρακάτω, στο Σχήμα 8 φαίνεται μια εικόνα μοντέλου του συστήματος μας με την μορφή ενός διαγράμματος.

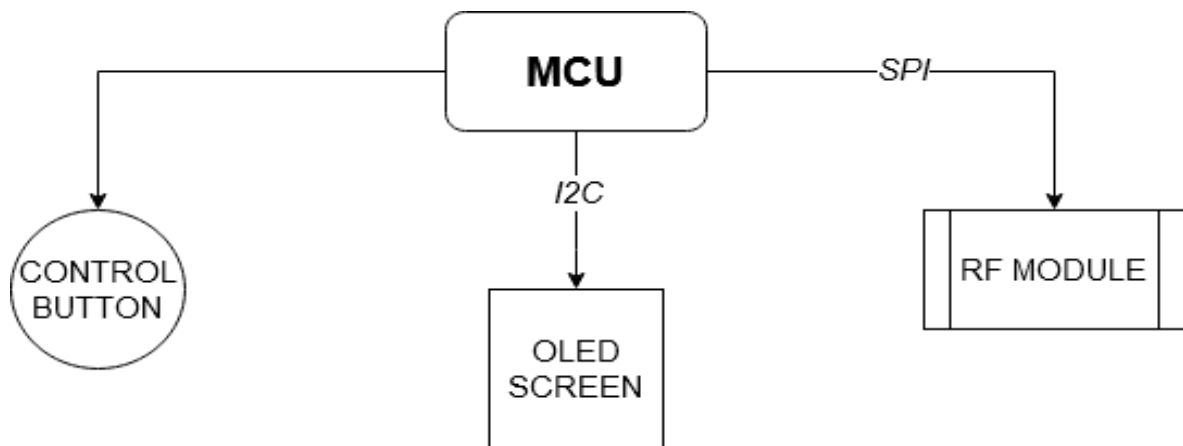


Σχήμα 8: Μοντέλο του συστήματος σε μορφή διαγράμματος

3.6.1 Υποσύστημα βάσης

Για να καλύψουμε τις ανάγκες που αναφέρθηκαν παραπάνω καθορίζουμε ένα μοντέλο που διαφορετικό υποσύστημα του θα χειρίζεται τις εξόδους προς το flash/κάμερα καθώς και τις συνθήκες πυροδότησης, από αυτά που θα αναλαμβάνουν να συλλέγουν τις μετρήσεις από τους αισθητήρες. Στο σημείο αυτό θα αναλύσουμε το υποσύστημα για τις εξόδους και τον έλεγχο της συνθήκης πυροδότησης, το οποίο θα αναφέρουμε στο εξής ως σύστημα “βάσης”, καθώς και τι θα περιλαμβάνει αυτό για να κάνει όσα απαιτούνται με σωστό τρόπο. Το σημαντικότερο κομμάτι αυτού του συστήματος θα είναι ένας μικροελεγκτής για την επεξεργασία των δεδομένων, την επιβεβαίωση των συνθηκών πυροδότησης, καθώς και την ρύθμιση και έλεγχο των υπόλοιπων ρυθμίσεων που καθορίζει ο χρήστης. Για να μπορεί να έχει ο χρήστης αλληλεπίδραση με το σύστημα, ο μικροελεγκτής θα συνδέεται με πρωτόκολλο I2C με μια οθόνη OLED 0.9 ιντσών. Στην οθόνη αυτή, θα εμφανίζεται ένα μενού με τις ρυθμίσεις του συστήματος και τις επιλογές που έχει στην διάθεση του ο χρήστης, ενώ η περιήγηση στο μενού θα γίνεται με ένα μοναδικό push button. Μέσα από το μενού αυτό θα μπορεί να γίνει και η αλλαγή κατωφλίου στον κάθε αισθητήρα, καθώς και να βλέπει ο χρήστης την τωρινή τιμή που δίνει ο αισθητήρας ανά τακτά χρονικά διαστήματα. Μετά από κάποια πυροδότηση, στην οθόνη θα εμφανίζεται η τιμή στην οποία ο αισθητήρας ικανοποίησε το κατώφλι. Το block diagram του μοντέλου του υποσυστήματος βάσης μπορούμε να το δούμε στο Σχήμα 9 παρακάτω.

Για να μπορεί ο μικροελεγκτής να δέχεται τα δεδομένα των αισθητήρων ασύρματα, θα χρησιμοποιηθεί RF δέκτης, ο οποίος θα επικοινωνεί με τον μικροελεγκτή μέσω SPI πρωτοκόλλου. Εδώ πρέπει να σημειωθεί, ότι για να μειώσουμε την χρονική καθυστέρηση του συστήματος, ο μικροελεγκτής δεν θα χρειάζεται να διαβάσει, και να επεξεργαστεί ολόκληρο το μήνυμα του RF πομπού, καθώς αυτό θα εισάγει επιπλέον υστέρηση από το συγκεκριμένο RF πρωτόκολλο. Αντί αυτού, ο RF δέκτης θα πρέπει να έχει την δυνατότητα να δίνει σήματα στον μικροελεγκτή, όταν υπάρχει κάποια δραστηριότητα του, έτσι ώστε εκείνος με την σειρά να κάνει την επαλήθευση συνθήκης πυροδότησης. Αυτό μπορεί να γίνεται είτε με interrupt, είτε με polling. Λόγω του ότι ήδη με την επιλογή μας να χρησιμοποιήσουμε κάποιο RF module έχουμε περιορίσει την καθυστέρηση για μετάδοση ενός μηνύματος κάτω από 1 ms , θα προτιμήσουμε την χρήση του polling.

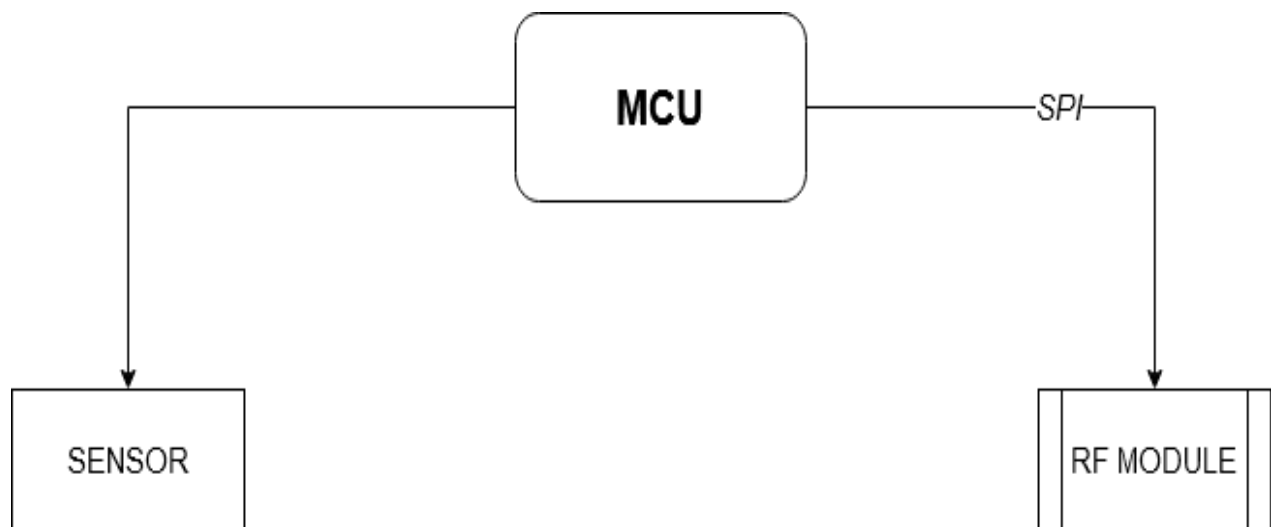


Σχήμα 9: Μοντέλο του υποσυστήματος βάσης σε μορφή διαγράμματος

3.6.2 Υποσυστήματα αισθητήρα

Όπως είδαμε το μοντέλο της βάσης του συστήματος στην ενότητα 3.4.1, στην παρούσα ενότητα αντίστοιχα θα αναλύσουμε περισσότερο τα υποσυστήματα των αισθητήρων. Πρόκειται για δυο ίδια υποσυστήματα, τα οποία θα αφορούν τον κάθε αισθητήρα αντίστοιχα. Λόγω της απαίτησης που έχουμε θέσει για ασύρματη επικοινωνία των αισθητήρων, θα χρειαστεί με κάποιο τρόπο η συλλογή δεδομένων από τους αισθητήρες να μπορεί να μεταδοθεί χωρίς σύνδεση καλωδίου με τον βασικό μικροελεγκτή. Συνεπώς, στην πλευρά του κάθε αισθητήρα θα χρειαστεί να έχουμε έναν μικροελεγκτή, ενώ η μεταφορά των μετρήσεων του αισθητήρα θα γίνεται μέσω input pin του μικροελεγκτή. Ο μικροελεγκτής αυτός θα λαμβάνει τις μετρήσεις του αισθητήρα και θα κάνει την σύγκριση με το κατώφλι που ο χρήστης έχει δώσει. Σε περίπτωση που η μέτρηση του αισθητήρα ικανοποιεί το κατώφλι, τότε θα πρέπει να γίνει μια ασύρματη επικοινωνία με το σύστημα βάσης, έτσι ώστε αυτό να μπορεί να κάνει την επαλήθευση ή όχι της συνθήκης πυροδότησης. Ο μικροελεγκτής λοιπόν, θα πρέπει να συνδέεται με RF πομπό, ο οποίος θα μπορεί να επικοινωνεί με

τον RF δέκτη. Άρα το υποσύστημα αισθητήρα θα περιλαμβάνει και έναν RF πομπό, ο οποίος θα επικοινωνεί με τον μικροελεγκτή του αισθητήρα με πρωτόκολλο SPI. Επειδή δεν μπορεί από πριν να καθοριστεί πότε μια τιμή μέτρησης θα ξεπεράσει ένα κατώφλι, ούτε αυτό να το ξέρουμε μέσω κάποιου interrupt, ο μικροελεγκτής θα παίρνει μετρήσεις από τον αισθητήρα με την χρήση polling και μετά σε κάθε περίπτωση θα συγκρίνει με το κατώφλι που του έχει δοθεί. Στο Σχήμα 10 έχουμε ένα μοντέλο του υποσυστήματος αισθητήρα σε μορφή block diagram.



Σχήμα 10: Μοντέλο του υποσυστήματος ενός αισθητήρα σε μορφή διαγράμματος

3.6.3 Επικοινωνία υποσυστημάτων

Για την επικοινωνία των επί μέρους υποσυστημάτων θα χρειαστεί η ενσωμάτωση RF πομπών και δεκτών στα υποσυστήματα αυτά. Στην πλευρά του κάθε υποσυστήματος αισθητήρα θα έχουμε έναν πομπό RF για την αποστολή μηνυμάτων όταν έχει ξεπεραστεί το κατώφλι ενεργοποίησης που έχει δώσει ο χρήστης. Ο πομπός αυτός θα δέχεται εντολές για την αποστολή πακέτων από τον μικροελεγκτή μέσω πρωτοκόλλου SPI, τα οποία θα αποστέλλει προς RF δέκτη του συστήματος βάσης. Ο μικροελεγκτής της βάσης θα χρειαστεί να συνδέεται με έναν RF δέκτη. Ομοίως, όπως και στα υποσυστήματα αισθητήρων, θα γίνει χρήση SPI, άρα ο μικροελεγκτής μας θα πρέπει να έχει την δυνατότητα σύνδεσης τουλάχιστον ενός SPI περιφερειακού.

Επειδή η μετάδοση πακέτων απαιτεί την χρήση ενός RF πρωτοκόλλου, εισάγεται στην χρονική καθυστέρηση του συστήματος επιπλέον χρόνος για την επεξεργασία αυτών των πακέτων, και το διάβασμα της χρήσιμης πληροφορίας (στην περίπτωση μας της τιμής ενεργοποίησης ενός

αισθητήρα) από τον μικροελεγκτή της βάσης. Για να μειώσουμε τον χρόνο απόκρισης του συστήματος μας, αντί να στέλνονται συνεχώς πακέτα με τις τωρινές μετρήσεις του αισθητήρα προς την βάση και εκείνη να κάνει τις συγκρίσεις με το αντίστοιχο κατώφλι, ο μικροελεγκτής βάσης θα δέχεται κάποιο πακέτο από έναν αισθητήρα μόνο αν έχει ξεπεραστεί το αντίστοιχο κατώφλι. Ο μικροελεγκτής βάσης θα ελέγχει στο στάδιο πυροδότησης συνεχώς αν υπάρχει κάτι διαθέσιμο προς ανάγνωση από τους αισθητήρες. Με την σειρά τους τα υποσυστήματα των αισθητήρων θα στέλνουν πακέτο προς την βάση μόνο αν έχει ξεπεραστεί το κατώφλι τους, και όχι συνεχώς. Σε επόμενη ενότητα θα εξηγήσουμε πώς γίνεται αυτό εφικτό από το RF που θα επιλέξουμε, χωρίς να είναι απαραίτητη η χρήση interrupt. Με αυτό τον τρόπο αποφεύγεται η συνεχόμενη αποστολή πακέτων ανά πάσα στιγμή, και άρα κάποια πιθανή σύγκρουση και απώλεια μηνυμάτων, καθώς επίσης γίνεται πιο γρήγορη η διαδικασία της πυροδότησης, καθώς ο μικροελεγκτής βάσης θα πρέπει μόνο να ελέγξει αν έχει λάβει από κάποιον αισθητήρα μήνυμα πυροδότησης, και όχι να κάνει εκείνος τις συγκρίσεις με το κατώφλι από πακέτα που στέλνονται αδιάκοπα. Έτσι μπορούμε να έχουμε ένα σύστημα με μικρή χρονική καθυστέρηση που να έχει ταυτόχρονα και ασύρματη επικοινωνία μεταξύ των αισθητήρων και της βάσης του συστήματος.

Για την ανάγκη της ρύθμισης κατωφλίων και την αλλαγή κάποιων ρυθμίσεων, το σύστημα θα πρέπει να υποστηρίζει και ανταλλαγή πακέτων και από την βάση προς τους αισθητήρες, αλλά και αντίστροφα. Συνεπώς οι RF μονάδες που θα χρησιμοποιηθούν θα πρέπει να μπορούν να έχουν την δυνατότητα να είναι και πομποί και δέκτες. Πέραν αυτού, για την αρχικοποίηση του συστήματος, και για να μπορούν οι αισθητήρες να μεταβούν από κατάσταση αναμονής κατωφλίου σε κατάσταση αποστολής ερεθισμάτων θα χρειαστεί να μεταδοθούν μηνύματα από και προς την βάση με κατάλληλο τρόπο, για να μπορούν να αντιλαμβάνονται τα υποσυστήματα σε τι κατάσταση βρίσκονται τα υπόλοιπα. Θα χρειαστεί λοιπόν να καθιερωθεί ένας κοινός κώδικας επικοινωνίας μηνυμάτων και αλλαγής καταστάσεων, συνεπώς ένα πρωτόκολλο επικοινωνίας των υποσυστημάτων το οποίο θα πατάει πάνω στο εγγενές πρωτόκολλο επικοινωνίας των RF πομποδεκτών.

3.7 Σύγκριση δομής με άλλα συστήματα

Είδαμε στο κεφάλαιο της Σχετικής Έρευνας πως τα συνηθέστερα συστήματα για πυροδότηση flash διαθέτουν κάποια κοινά στοιχεία στην δομή τους και ορισμένες ομοιότητες. Συνοπτικά αυτές περιλαμβάνουν την χρήση ενός κεντρικού συστήματος που αποτελείται από έναν μικροελεγκτή, ο οποίος μέσω I/O pins δέχεται σαν εισόδους τους αισθητήρες και δίνει ως έξοδο το σήμα για την πυροδότηση του flash ή της κάμερας. Ο μικροελεγκτής αυτός αναλαμβάνει την συλλογή των

δεδομένων από τους αισθητήρες και την σύγκριση των τιμών αυτών με τα κατώφλια για επαλήθευση της συνθήκης πυροδότης. Επιπλέον, υπάρχει διεπαφή με τον χρήστη μέσω οθόνης ή ηχητικών μηνυμάτων και πλήκτρα για την περιήγηση στο μενού και για τις επιλογές του χρήστη. Ουσιαστικά ο μικροελεγκτής αναλαμβάνει να κάνει όλες τις εργασίες που χρειάζονται χειριζόμενος τα απαραίτητα περιφερειακά.

Το σύστημα που σχεδιάζουμε εμείς έχει κάποιες σημαντικές δομικές διαφορές σε σχέση με αυτή την προσέγγιση. Λόγω της απαίτησης για ασύρματη επικοινωνία αισθητήρων, εξ ορισμού δεν μπορούμε να έχουμε την ίδια δομή. Στην δικιά μας περίπτωση το σύστημα δεν είναι τόσο κεντρικοποιημένο, και ο μικροελεγκτής δεν είναι αυτός που αναλαμβάνει την διαχείριση όλων των περιφερειακών. Εμείς έχουμε έναν μικροελεγκτή βάσης που συνδέεται με τις εξόδους για πυροδότηση, με την οθόνη και τα πλήκτρα περιήγησης στο μενού, καθώς και με RF δέκτες για να μπορεί να υποστηριχθεί η ασύρματη επικοινωνία. Για να μπορούν να συλλεχθούν τα δεδομένα από τους αισθητήρες εμείς χρησιμοποιούμε για κάθε αισθητήρα έναν άλλο μικροελεγκτή, ο οποίος αναλαμβάνει να συλλέγει τα δεδομένα και να κάνει εκείνος την σύγκριση με το κατώφλι ενεργοποίησης. Επιπλέον, μέσω αυτών γίνεται και η αποστολή των δεδομένων των αισθητήρων στον μικροελεγκτή βάσης του συστήματος.

4 ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΚΑΙ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ

Σε αυτό το κεφάλαιο θα δούμε πώς το μοντέλο του προηγούμενου κεφαλαίου θα υλοποιηθεί στην πράξη. Θα δούμε πιο αναλυτικά τι hardware θα χρησιμοποιήσουμε για κάθε υπομονάδα του μοντέλου μας, ποια εργαλεία ανάπτυξης θα χρησιμοποιηθούν για την υλοποίηση καθώς και τι αισθητήρες θα χρησιμοποιηθούν για να γίνεται ο έλεγχος των συνθηκών triggering του flash ή της κάμερας. Θα αναλυθούν επίσης οι λόγοι για τους οποίους έγιναν αυτές οι επιλογές. Τέλος θα γίνει αναφορά στον κώδικα που θα χρειαστεί να γραφτεί για να μπορέσει να λειτουργήσει το σύστημα μας, ιδίως σε όσα σημεία χρειάζεται να δώσουμε μεγαλύτερη προσοχή.

4.1 Επιλογές υλικού συστήματος και περιφερειακών

Στο προηγούμενο κεφάλαιο δώσαμε ένα μοντέλο για το σύστημα μας, έτσι ώστε να μπορεί να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις που υπάρχουν για να λειτουργήσει με όλες τις δυνατότητες που θέσαμε ως στόχο. Θα πρέπει για κάθε εξάρτημα που το μοντέλο μας απαιτεί για την λειτουργία του, να γίνει μια συγκεκριμένη επιλογή για το τι υλικό θα χρησιμοποιηθεί και ποια συγκεκριμένα εξαρτήματα. Παρακάτω θα παρουσιάσουμε αναλυτικά καθένα από αυτά, και θα παρουσιάσουμε τους λόγους για τους οποίους αυτή η επιλογή πιστεύουμε ότι είναι σωστή και καλύπτει τις ανάγκες μας.

4.1.1 Μικροελεγκτής βάσης και μικροελεγκτές αισθητήρων

Ο μικροελεγκτής του συστήματος βάσης είναι επί της ουσίας το σημαντικότερο κομμάτι του συστήματος και θα αναλαμβάνει το μεγαλύτερο κομμάτι της επεξεργασίας δεδομένων που απαιτείται για να λειτουργεί το σύστημα μας σύμφωνα με τις προδιαγραφές. Η επιλογή μας είναι το Arduino Mega 2560 rev.3 [\[105\]](#) σαν πλατφόρμα ανάπτυξης, το οποίο χρησιμοποιεί έναν 8 bit μικροελεγκτή AVR της Microchip [\[106\]](#), συγκεκριμένα τον ATmega2560 [\[107\]](#), [\[108\]](#). Ο μικροελεγκτής στην πλευρά των αισθητήρων δεν απαιτεί εξίσου μεγάλη επεξεργαστική ισχύ όσο αυτός της βάσης ούτε και μεγάλες απαιτήσεις flash και SRAM μνήμης και έτσι έγινε η επιλογή μιας μικρότερης επιλογής της οικογένειας Arduino, το Arduino Nano V3 [\[109\]](#) που βασίζεται σε μικροελεγκτή ATmega328P [\[110\]](#), [\[111\]](#). Στον Πίνακα 8 μπορούμε να δούμε συνοπτικά τα τεχνικά χαρακτηριστικά τα οποία μας οδήγησαν σε αυτές τις επιλογές.

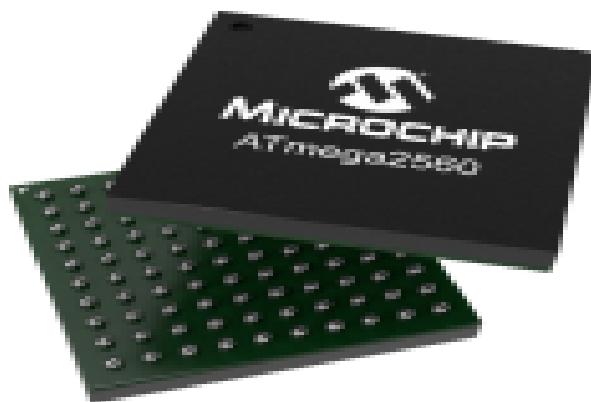
	Συχνότητα /bit	Αναλογικά/ Ψηφιακά (I/O)	Flash memory/ SRAM	Τάσεις λειτουργίας	Κατανάλωση ενέργειας (max)	Κόστος (κλώνου)
Arduino Mega 2560 (βάση)	16MHz/8 bit	16/54	256 KB/ 8 KB	7-12 V	50 mA	8\$
Arduino Nano V3 (αισθητήρας)	16MHz/8 bit	8/22	32 KB/ 2KB	7-12 V	19 mA	3\$

Πίνακας 8: Κριτήρια επιλογής μικροελεγκτών βάσης και αισθητήρα

Επιπλέον, η πλατφόρμα ανάπτυξης του Arduino μας δίνει την δυνατότητα να έχουμε πρόσβαση σε πάρα πολλές βιβλιοθήκες για σύνδεση περιφερειακών με πολλά διαφορετικά πρωτόκολλα.



Εικόνα 15: Το Arduino Mega 2560, Πηγή : <https://store.arduino.cc/arduino-mega-2560-rev3>



Εικόνα 16: ATmega2560, Πηγή : <https://www.microchip.com/wwwproducts/en/ATmega2560>

4.1.2 RF πομποί και δέκτες

Όπως είδαμε από το κεφάλαιο της μοντελοποίησης, το σύστημα μας θα πρέπει να μπορεί να συνδέεται ασύρματα με τους αισθητήρες. Αυτό θα επιτυγχάνεται μέσω RF πομπών στην πλευρά των αισθητήρων και RF δέκτη για την πλευρά της βάσης. Εδώ και για τις δυο πλευρές θα γίνει χρήση του nRF24L01+ [104] της Nordic Semiconductors [112]. Τα κριτήρια με τα οποία επιλέχθηκε φαίνονται συνοπτικά στον Πίνακα 9 παρακάτω.

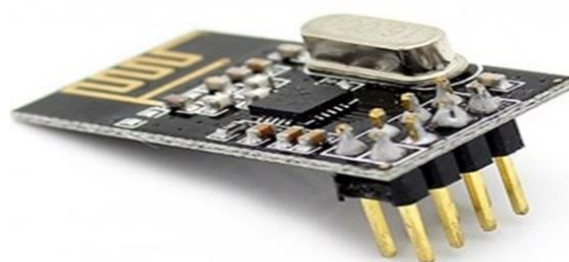
	Ζώνη συχνοτήτων/ Ρυθμός μεταφοράς	Τάση λειτουργίας	Σύνδεση	Χρόνος προετοιμασίας πακέτου (max)	Κατανάλωση η ενέργειας (max/sleep)	Κόστος (κλώνος)
nRF24L01+	2.4 GHz/2 Mbps (max)	1.9-3.6 V	SPI	230 μ s	14 mA/1 μ A	0.8\$

Πίνακας 9: Κριτήρια επιλογής του nRF24L01+

Αξίζει να σημειωθεί το nRF24L01+ διαθέτει δικό του πρωτόκολλο επικοινωνίας, το οποίο ονομάζεται Enhanced ShockBurst, και έχει δυνατότητα αυτόματων acknowledgment και επαναποστολής πακέτων. Εμείς δεν θα κάνουμε χρήση αυτών των δυνατοτήτων και θα παρακάμψουμε αυτό το πρωτόκολλο.



Εικόνα 17: Το Arduino Nano, Πηγή : <https://store.arduino.cc/arduino-nano>



Εικόνα 18: Μια υλοποίηση του nRF24L01+ από την Robotech Shop, Πηγή : <http://robotechshop.com/shop/module/nrf24l01/?v=f214a7d42e0d>

4.1.3 Οθόνη και διεπαφή χρήστη

Όπως είδαμε και στα προηγούμενα κεφάλαια, ο χρήστης θα πρέπει να έχει την δυνατότητα να αλληλοεπιδρά με το σύστημα για να επιλέγει τις λειτουργίες που επιθυμεί. Σε αυτή την υποενότητα θα δούμε αναλυτικότερα με τι εξαρτήματα θα υλοποιήσουμε την διεπαφή χρήστη.

Το βασικότερο στοιχείο της αλληλεπίδρασης του χρήστη με το σύστημα θα είναι μια οθόνη από την αγορά της Κίνας η οποία πληροί τις προδιαγραφές που φαίνονται στον Πίνακα 10.

Τεχνολογία οθόνης	Μέγεθος οθόνης	Ευκρίνεια (pixel)	Σύνδεση	Κόστος
OLED	0.9 inch	128X64	I2C	3\$

Πίνακας 10: Κριτήρια επιλογής οθόνης συστήματος

Θα χρειαστούμε τέλος και ένα push button η επιλογή του οποίου δεν έχει καθοριστική σημασία καθώς το κόστος είναι αμελητέο. Η επιλογή τεχνολογίας OLED έχει το επιπλέον πλεονέκτημα μεγάλης αντίθεσης αλλά και χαμηλότερης κατανάλωσης.

4.1.4 Υποστηριζόμενοι αισθητήρες

Όπως είδαμε και στο Κεφάλαιο της Μοντελοποίησης, αυτό που επιθυμούμε να πετύχουμε, είναι να μπορεί ο χρήστης να επιλέξει ο ίδιος τι είδους αισθητήρα μπορεί να χρησιμοποιήσει. Για το λόγο αυτό, και επειδή το Arduino Nano έχει συγκεκριμένες ανοχές τάσεων και ρευμάτων στα Pin εισόδου, θα πρέπει οι αισθητήρες που θα χρησιμοποιήσει ο χρήστης να δίνει σήματα περιορισμένα σε αυτές τις προδιαγραφές. Οι αισθητήρες θα πρέπει να έχουν τρεις ακροδέκτες. Έναν γείωσης, έναν τροφοδοσίας και έναν για την έξοδο που θα δίνουν προς το pin του μικροελεγκτή. Συνοπτικά μπορούμε να δούμε τους περιορισμούς αυτούς στον Πίνακα 11 που φαίνεται παρακάτω.

Εμείς για τις ανάγκες του δικού μας συστήματος θα χρησιμοποιήσουμε κυρίως βασικούς αισθητήρες φωτός και ήχου, τους οποίους προμηθευτήκαμε από την αγορά της Κίνας [\[113\]](#).

Pin	Voltage Range	Max DC Current
Αναλογικά I/O pin	0 - 5 V	40 mA
Ψηφιακά I/O pin	0 - 5 V(0 = false, 5 = true)	40 mA
3.3 V pin εξόδου	0 - 3.3 V	50 mA

Πίνακας 11 : Περιορισμοί υποστηριζόμενων αισθητήρων με βάση τις προδιαγραφές του ATmega 328P

4.2 Εργαλεία ανάπτυξης του συστήματος

Τα βασικότερα εργαλεία ανάπτυξης του συστήματος μας είναι τα περιβάλλοντα που μας επιτρέπουν να προγραμματίσουμε τους μικροελεγκτές της βάσης και των αισθητήρων. Λόγω του ότι επιλέξαμε την πλατφόρμα του Arduino, έγινε χρήση των αντίστοιχων εργαλείων για

προγραμματισμό Arduino. Η δημοφιλέστερη πλατφόρμα είναι το Arduino IDE, η οποία ήταν η βασική μας πλατφόρμα ανάπτυξης. Το Arduino IDE μας δίνει την δυνατότητα να προγραμματίσουμε μικροελεγκτές της πλατφόρμας Arduino ή άλλες συμβατές με το IDE, σε υψηλότερο επίπεδο, χωρίς να χρειαστεί να γράψεις πολλές εντολές απ' ευθείας στους καταχωρητές των μικροελεγκτών. Παρέχει λοιπόν ένα layer μεταξύ του χαμηλού επιπέδου προγραμματισμού των μικροελεγκτών και του χρήστη, χρησιμοποιώντας κυρίως γλώσσα C/C++. Αυτό ναι μεν έχει τα προφανή πλεονεκτήματα, αλλά περιορίζει κάπως τον απόλυτο έλεγχο των πραγμάτων που μπορεί να επιθυμούμε.

4.3 Πρωτόκολλο επικοινωνίας βάσης με αισθητήρες

Όπως είπαμε και προηγουμένως, οι αισθητήρες με την βάση επικοινωνούν μεταξύ τους με ασύρματο τρόπο. Για να μπορούν να υποστηριχθούν όλες οι δυνατότητες του συστήματος όμως, θα πρέπει να είναι σε θέση να γνωρίζουν και οι δυο πλευρές σε ποιο στάδιο της διαδικασίας βρισκόμαστε ανά πάσα στιγμή, για να μπορούν να κάνουν τις αντίστοιχες ενέργειες που απαιτούνται ανά περίπτωση. Για τον λόγο αυτό αναπτύχθηκε ένα πρωτόκολλο για τις ανάγκες του οποίου χρειάστηκε να παρακάμψουμε κάποιες από τις δυνατότητες τους εγγενούς πρωτοκόλλου Enhanced ShockBurst που είναι ενσωματωμένο στους RF πομποδέκτες μας. Η όλη λειτουργία του πρωτοκόλλου βασίζεται στους παρακάτω μηχανισμούς:

- Αλλαγή σταδίων λειτουργίας μέσω κάποιων γεγονότων σταθμών
- Κύριοι αποστολείς μηνυμάτων είναι τα υποσυστήματα αισθητήρων ενώ κύριος παραλήπτης αυτό της βάσης. Αυτό αλλάζει κάποιες φορές κατά την διαδικασία μετάβασης από ένα στάδιο σε άλλο
- Σε κάθε στάδιο λειτουργίας και για κάθε υποσύστημα γίνονται κατάλληλοι έλεγχοι για την ύπαρξη γεγονότων που σηματοδοτούν αλλαγή σταδίου και αντιστοίχως οι αντίστοιχες ενέργειες
- Οι αλλαγές των καταστάσεων γίνονται μέσω κάποιων κατάλληλων προκαθορισμένων μηνυμάτων μεταξύ των RF, τα οποία ανταλλάσσονται όταν συμβεί το αντίστοιχο γεγονός που σηματοδοτεί την αλλαγή από την μια κατάσταση στην άλλη

Οι λόγοι για τους οποίους θέλουμε να παρακάμψουμε το ενσωματωμένο πρωτόκολλο συνοπτικά είναι οι παρακάτω:

- Το ενσωματωμένο πρωτόκολλο του nRF24L01+ χρησιμοποιεί αυτόματα ACK μηνύματα για απάντηση από τον δέκτη προς τον αποστολέα. Αυτό όμως δεν μας δίνει απόλυτο έλεγχο στην διαδικασία, ούτε ντετερμινισμό στην χρονική διάρκεια που απαιτείται για να γίνει αποστολή ενός μηνύματος και λήψη του ACK για το αντίστοιχο μήνυμα
- Επιπλέον, όταν γίνεται χρήση αυτών των δυνατοτήτων, το εκάστοτε RF “φορτώνει” από πριν σε μια FIFO το ACK μήνυμα που θα στείλει, το οποίο αποστέλλει όταν λάβει το επόμενο μήνυμα από τον αποστολέα. Αυτό θα καθιστούσε αδύνατο να έχουμε αξιόπιστη λειτουργία και αλλαγή καταστάσεων μέσω γεγονότων, καθώς το ACK που θα επιβεβαιώνει ένα γεγονός που σηματοδοτεί αλλαγή σε επόμενη κατάσταση θα πρέπει να φορτωθεί στην FIFO πριν συμβεί αυτό το γεγονός
- Εναλλακτικά ο χειρισμός των μηνυμάτων ACK μπορεί να γίνει χειροκίνητα μόλις συμβεί ένα γεγονός έτσι ώστε να έχουμε τον έλεγχο στο πότε μια αλλαγή κατάστασης πρέπει να συμβεί με βάση ένα γεγονός

Για την υλοποίηση αυτού του πρωτοκόλλου χρησιμοποιείται η συμβατή με το Arduino βιβλιοθήκη RF24, η οποία έχει υλοποιηθεί από την ομάδα TmRh20 [\[114\]](#). Κάθε ένα από τα στάδια θα αναλυθεί παρακάτω και θα υπάρχουν και επεξηγηματικά flowchart. Το στάδιο Αρχικοποίησης δεν είναι εν γένει μέρος του πρωτοκόλλου επικοινωνίας, καθώς περιλαμβάνει και άλλες αρχικοποιήσεις που δεν έχουν να κάνουν με την επικοινωνία των RF αυτών καθ'αυτών, όμως περιλαμβάνει κάποιες πολύ σημαντικές αρχικοποιήσεις για να είναι εφικτή η επικοινωνία μεταξύ των πομποδεκτών. Για αυτό το λόγο, παρακάτω γίνεται αναλυτική περιγραφή του όσον αφορά τα ζητήματα που έχουν να κάνουν με την αρχικοποίηση των πομποδεκτών και τις αρχικές ρυθμίσεις που γίνονται σε αυτά.

4.3.1 Στάδιο Αρχικοποίησης

Αυτό αποτελεί το αρχικό στάδιο στο οποίο βρίσκεται και η βάση, αλλά και οι αισθητήρες μας, όταν ενεργοποιήσουμε το σύστημα. Σε αυτό το στάδιο θα πρέπει σε κάθε πομποδέκτη να γίνουν κάποιες κατάλληλες ρυθμίσεις ώστε να μπορέσουν να επικοινωνούν μεταξύ τους. Μεταξύ αυτών των ρυθμίσεων περιλαμβάνονται :

- Σωστή αρχικοποίηση των διευθύνσεων εγγραφής και ανάγνωσης τόσο στην πλευρά της βάσης όσο και σε αυτή των αισθητήρων. Το RF module που χρησιμοποιούμε μπορεί να δεχτεί μηνύματα από άλλα 6, αρκεί να μην συμβαίνει αυτό ταυτόχρονα καθώς έτσι καταστρέφονται τα μηνύματα. Το μέγεθος των διευθύνσεων μπορεί να είναι από 3 ως 5 byte και εμείς επιλέξαμε 5 byte. Για κάθε αισθητήρα, η διεύθυνση γραφής του πρέπει να

αντιστοιχεί σε μια από τις διευθύνσεις ανάγνωσης της βάσης, ενώ η διεύθυνση ανάγνωσης στην αντίστοιχη διεύθυνση γραφής της βάσης

- Ρύθμιση των επιπέδων ισχύος, του ρυθμού μετάδοσης και του καναλιού που επιθυμούμε για την επικοινωνία μας. Για τον ρυθμό μετάδοσης το RF μας δίνει την επιλογή να έχουμε 250 Kbps, 1 Mbps ή 2 Mbps, ενώ υπάρχουν διαθέσιμα και 150 κανάλια μετάδοσης. Αντίστοιχα τα επιτρεπτά επίπεδα ισχύος είναι 4 και όσο μειώνουμε την ισχύ, έχουμε μικρότερη πιθανότητα παρεμβολών, και άρα χαμένων πακέτων, με κόστος όμως την μικρότερη εμβέλεια μεταξύ των κόμβων. Σε όλες τις ρυθμίσεις επιλέγουμε τις προκαθορισμένες, εκτός από την ισχύ, όπου επιλέγουμε το 2ο χαμηλότερο επίπεδο ισχύος ως την πιο ισορροπημένη επιλογή για τις ανάγκες μας
- Ενεργοποίηση δυναμικών payload και απενεργοποίηση αυτόματων ACK. Το ενσωματωμένο πρωτόκολλο των συγκεκριμένων RF πομποδεκτών, έχει ενεργοποιημένα ACK ως προκαθορισμένη επιλογή και επιπλέον αν δεν ενεργοποιηθούν τα δυναμικά payload τότε ανεξαιρέτως του μεγέθους των δεδομένων που θέλουμε να στείλουμε, κάθε φορά θα αποστέλλει 32 byte. Αυτό θα μας δημιουργούσε latency λόγω μετάδοσης περισσότερων δεδομένων από το απαραίτητο και τα ACK είδαμε ότι με τον τρόπο που υλοποιούνται καθιστούν αδύνατη την μετάβαση από το ένα στάδιο λειτουργίας στο άλλο με σωστό τρόπο

4.3.2 Στάδιο Αναγνώρισης

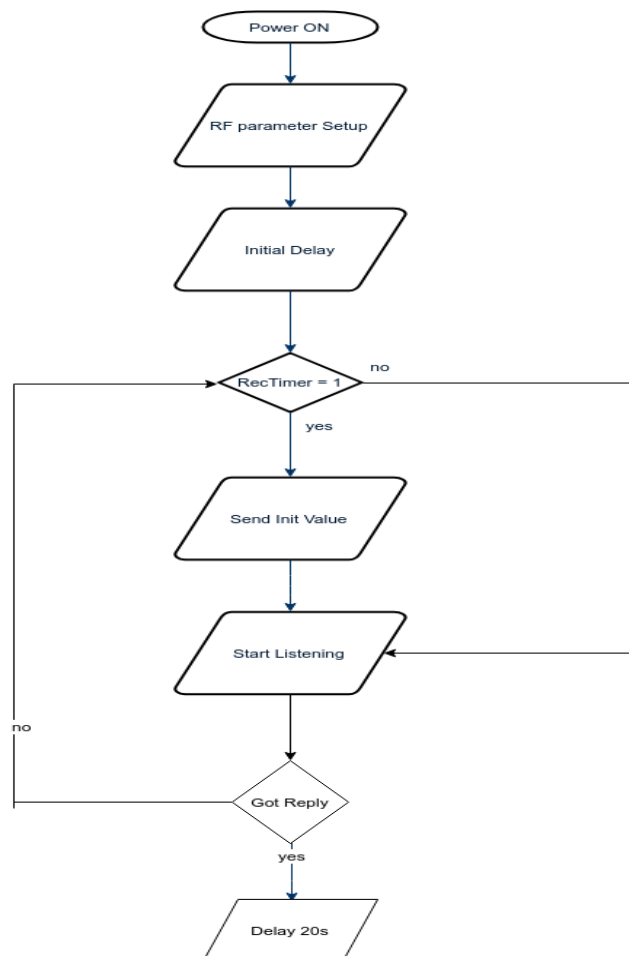
Το επόμενο βήμα είναι η αναγνώριση των υπαρκτών αισθητήρων. Για να γίνει μετάβαση σε αυτό το στάδιο, δεν χρειάζεται να γίνει κάποιο γεγονός. Αφού ενεργοποιηθεί η τροφοδοσία στα υποσυστήματα και ρυθμιστούν μέσω του μικροελεγκτή, τόσο οι κόμβοι/αισθητήρες όσο και η βάση αυτομάτως εισέρχονται σε αυτό το στάδιο.

Σε αυτό το στάδιο ο κάθε αισθητήρας ακολουθεί τα παρακάτω βήματα :

- Εισαγωγή τυχαίας καθυστέρησης λίγων ms (max 300)
- Επιλογή ενός χρονικού βήματος (900-1100 ms) το οποίο κάθε φορά που θα παρέρχεται ο αισθητήρας θα αποστέλλει ένα ειδικό αναγνωριστικό μήνυμα επαναλαμβανόμενα. Η χρονική διαφορά από αισθητήρα σε αισθητήρα για την αποστολή αυτού του μηνύματος υπάρχει έτσι ώστε να εξασφαλιστεί ότι δεν θα υπάρξει κατά αυτό το στάδιο σύγκρουση μηνυμάτων ανάμεσα σε δυο αισθητήρες

- Στο χρονικό διάστημα που μεσολαβεί μεταξύ δυο αποστολών αναγνωριστικών μηνυμάτων το κάθε υποσύστημα αισθητήρα από αποστολέας περνάει σε λειτουργία παραλήπτη και αναμένει μήνυμα απάντηση από την το οποίο έχει ίδια τιμή με το αναγνωριστικό μήνυμα που έστειλε. Σε περίπτωση λήψης τέτοιου μηνύματος πλέον σταματάει η επαναλαμβανόμενη αποστολή αναγνωριστικού μηνύματος
- Αναμονή για 20 s. Αυτή η χρονική καθυστέρηση εισάγεται για να βεβαιωθούμε ότι θα ολοκληρωθεί η διαδικασία της αναγνώρισης και για τους υπολοίπους αισθητήρες, χωρίς στο μεταξύ ο αισθητήρας αυτός να στέλνει πακέτα χωρίς λόγο και να υπάρχει συμφόρηση ή και πιθανές συγκρούσεις
- Μετάβαση στο επόμενο στάδιο λειτουργίας

Στο Σχήμα 11 βλέπουμε ένα flowchart το οποίο περιγράφει συνοπτικά τις διαδικασίες που γίνονται στην πλευρά του μικροελεγκτή ενός αισθητήρα για το στάδιο αναγνώρισης.

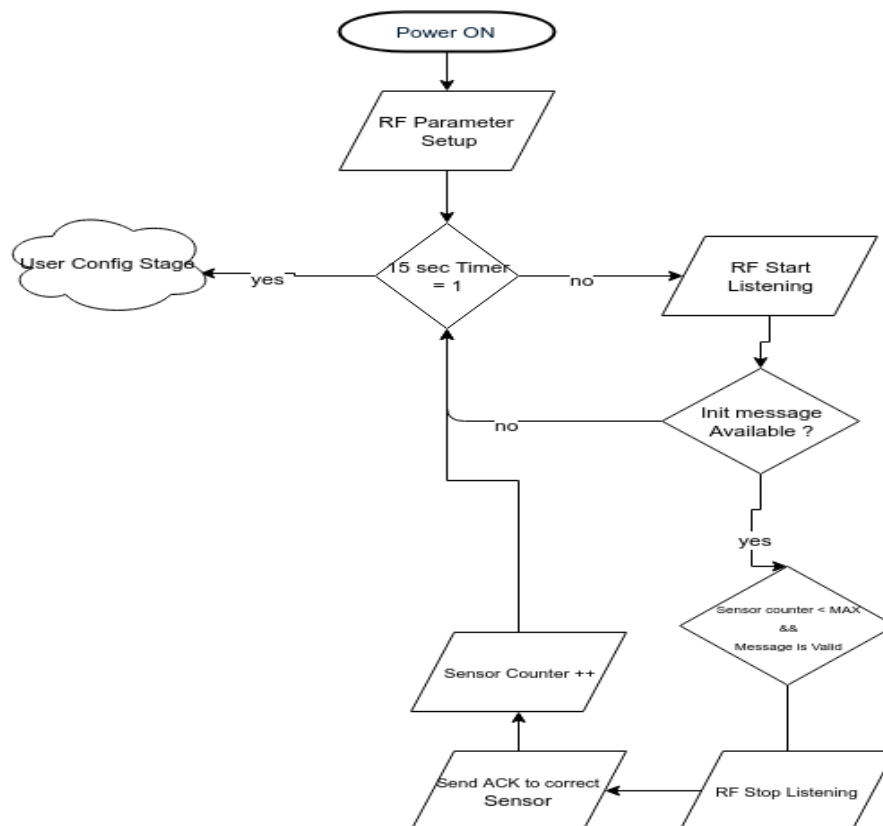


Σχήμα 11: Σχήμα Flowchart του σταδίου αναγνώρισης στην πλευρά των αισθητήρων

Αντίστοιχα στην πλευρά της βάσης έχουμε τις παρακάτω ενέργειες :

- Αρχικοποίηση ενός timer που θα μετρήσει 15 s. Όταν περάσει αυτό το χρονικό διάστημα τότε η βάση αυτόματα θα μεταβεί στο επόμενο στάδιο. Το χρονικό διάστημα που η βάση περιμένει είναι μικρότερο από το διάστημα το οποίο ένας αισθητήρας αναμένει μετά την αναγνώριση του για να εξασφαλιστεί ότι η βάση θα διαβάσει μηνύματα από κάθε ενεργό αισθητήρα
- Καθ' όλη την διάρκεια αυτή η βάση είναι σε λειτουργία αποδέκτη και περιμένει να λάβει μηνύματα αναγνώρισης. Μόλις λάβει ένα, αναγνωρίζει τον αποστολέα από την διεύθυνση που αναφέραμε προηγουμένως και μπαίνει σε λειτουργία αποστολέα
- Αποστολή επιβεβαίωσης στον αντίστοιχο αισθητήρα. Μόλις γίνει αυτό επανέρχεται σε λειτουργία αποδέκτη
- Με το πέρας των 15 s η βάση μεταβαίνει στο επόμενο στάδιο και αναγνωρίζει ως έγκυρους αισθητήρες μόνο όσους έλαβε αναγνώριση

Στο Σχήμα 12 μπορούμε να δούμε το αντίστοιχο flowchart της πλευράς της βάσης.



Σχήμα 12: Flowchart του σταδίου αναγνώρισης στην πλευρά της βάσης

4.3.3 Στάδιο Ρυθμίσεων χρήστη

Θεωρώντας ότι τα προηγούμενα βήματα έχουν ολοκληρωθεί σωστά, μετά την αναμονή ορισμένου χρονικού διαστήματος σε υποσύστημα βάσης και αισθητήρων αντίστοιχα, γίνεται μετάβαση αυτόματα στο στάδιο ρυθμίσεων χρήστη. Κατά την διάρκεια αυτού του σταδίου λειτουργίας για να είναι εφικτό να γίνει σωστή επιλογή κατώφλιου και συγκριτή ο αισθητήρας πρέπει να στέλνει τις μετρήσεις τους προς την βάση για ανάγνωση. Αυτό επιτυγχάνεται από την πλευρά των αισθητήρων πάλι με την εξής διαδικασία:

- Αρχικοποίηση ενός timer με το ίδιο ακριβώς χρονικό βήμα όπως και στο στάδιο αναγνώρισης. Κάθε φορά που ο timer μηδενίζει το υποσύστημα αισθητήρα θα συλλέγει από τον αισθητήρα μέτρηση και θα την στέλνει προς την βάση
- Στο διάστημα μεταξύ δυο αποστολών μετρήσεων το υποσύστημα αισθητήρα επανέρχεται σε λειτουργία δέκτη και αναμένει μέχρι να λάβει ένα πακέτο. Όταν το λάβει, παίρνει τα δεδομένα του πακέτου και θεωρεί ότι η τιμή που έλαβε είναι το κατώφλι
- Μόλις ληφθεί ένα κατώφλι, ο μικροελεγκτής βάζει εκ νέου τον αισθητήρα σε ρόλο αποστολέα, και στέλνει προς την βάση ένα συγκεκριμένο μήνυμα με τιμή ίση με αυτή που έλαβε σαν κατώφλι για να δηλώσει προς την βάση ότι έχει λάβει το κατώφλι. Αυτό το μήνυμα στέλνεται 6 φορές απανωτά
- Ο timer σταματάει, ο μικροελεγκτής επανέρχεται σε ρόλο παραλήπτη αλλά αυτή την φορά δεν αποστέλλει ξανά μετρήσεις. Τώρα περιμένει να λάβει νέο πακέτο με την τιμή που θα του δηλώνει τον συγκριτή με το κατώφλι
- Μόλις το παραλάβει επαναλαμβάνει την ίδια διαδικασία επιβεβαίωσης με τα 6 σερί μηνύματα όπως και για το κατώφλι και επιστρέφει σε ρόλο παραλήπτη
- Επανάληψη ακριβώς των ίδιων βημάτων για μια τρίτη τιμή, αυτή που θα δείχνει στο υποσύστημα αισθητήρα, πόσοι συνολικά αισθητήρες αναγνωρίστηκαν
- Όταν λάβει αυτή την τιμή ο μικροελεγκτής του αισθητήρα, αναλόγως με το αν είναι ο μοναδικός που αναγνωρίστηκε ή υπάρχουν άλλοι, εισάγει ή όχι μια επιτηδευμένη καθυστέρηση και ύστερα μεταβαίνει σε επόμενο στάδιο

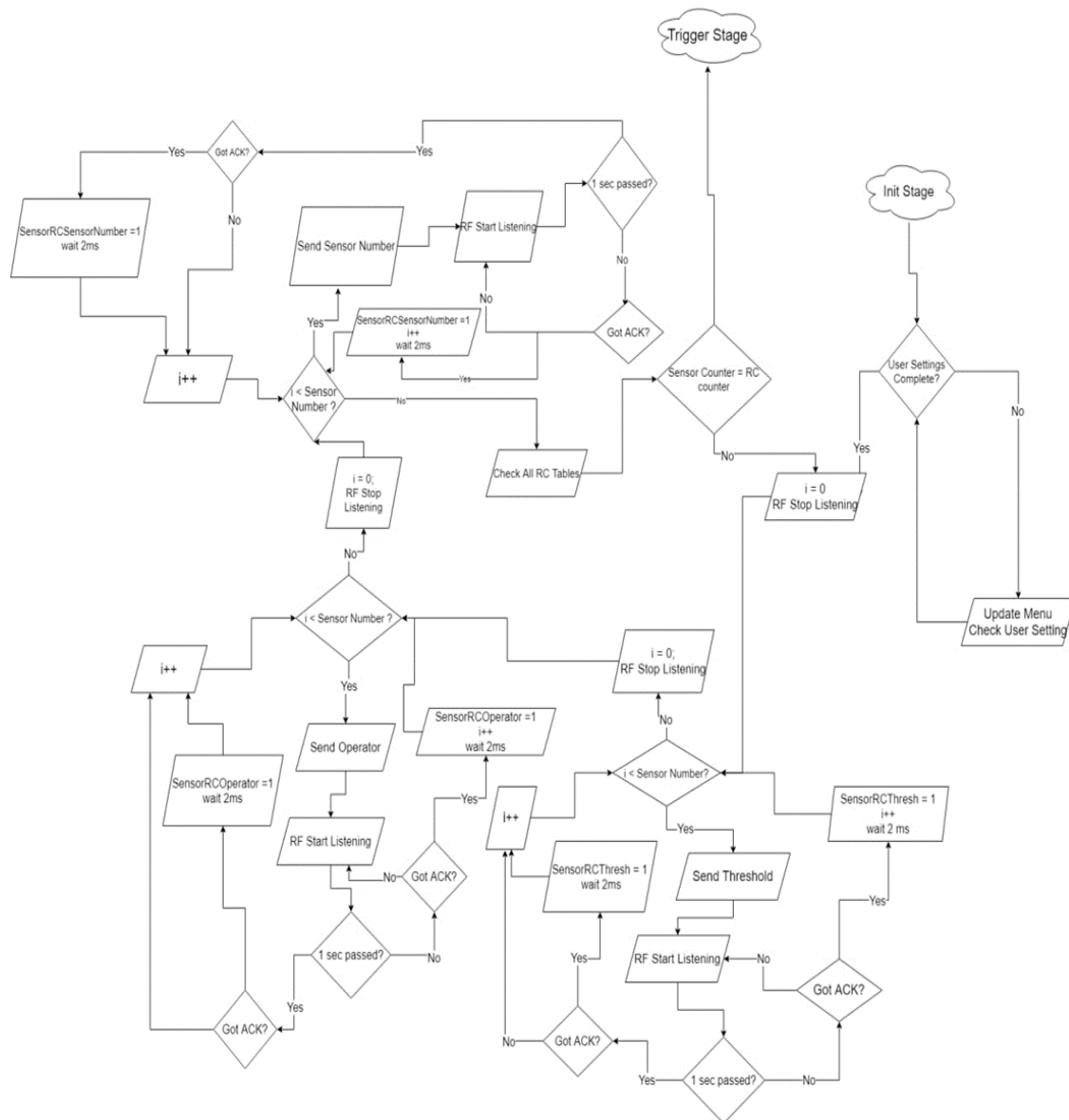
Θέλουμε αυτή την καθυστέρηση ώστε όταν οι αισθητήρες είναι παραπάνω από ένας, να μειώσουμε την πιθανότητα να γίνεται η διαδικασία μετάβασης ενός άλλου υποσυστήματος αισθητήρα την ίδια στιγμή που ο πρώτος αισθητήρας έχει ήδη μεταβεί σε κατάσταση πυροδότησης και είναι έτοιμος

επόμενο στάδιο. Θεωρούμε ότι όλα τα προηγούμενα βήματα έχουν ολοκληρωθεί επιτυχώς και πλέον είμαστε στο σημείο όπου η βάση λαμβάνει μηνύματα από τους αισθητήρες που περιλαμβάνουν τις μετρήσεις τους. Η μετάβαση της βάσης στο επόμενο στάδιο ξεκινάει μόλις ο χρήστης επιβεβαιώσει τις ρυθμίσεις. Μέχρι αυτό να συμβεί, η βάση συνεχίζει να δέχεται τα μηνύματα με τις μετρήσεις από τους αισθητήρες και να τα εμφανίζει προς τον χρήστη. Για να πετύχουμε ότι όλες οι πλευρές θα μεταβούν στην επόμενη κατάσταση και θα έχουν γίνει σωστά οι ρυθμίσεις του συστήματος, η βάση θα πρέπει να κάνει τα παρακάτω:

- Αποστολή μηνύματος που περιλαμβάνει το κατώφλι στον πρώτο αισθητήρα
- Πέρασμα σε λειτουργία παραλήπτη και αναμονή απάντησης για 1 s (χρόνος ικανός να βεβαιώσει ότι θα λάβουμε την επιβεβαίωση του αισθητήρα τουλάχιστον μια από τις 6 φορές)
- Για κάθε αισθητήρα που απαντάει στην βάση για να επιβεβαιώσει την λήψη του κατωφλίου, η βάση αλλάζει τιμή σε μια μεταβλητή ενός πίνακα, οι θέσεις του οποίου αντιστοιχούν σε κάθε αισθητήρα. Ο πίνακας αυτός περιέχει για κάθε αισθητήρα μια μεταβλητή flag, η οποία όταν γίνει ίση με 1 θα σημαίνει πως ο αισθητήρας έχει λάβει το κατώφλι και έχει επιβεβαιώσει την λήψη με την απάντηση του. Όταν η βάση λάβει την επιβεβαίωση αυτή για τα επόμενα 2 ms παραμένει αδρανής διότι δεν γνωρίζουμε αν έλαβε την πρώτη επιβεβαίωση ή κάποια από τις επόμενες και θέλουμε να αποφύγουμε οι επόμενες επαναλήψεις αυτών των μηνυμάτων να συμπέσουν με ανταλλαγή μηνυμάτων με άλλο υποσύστημα. Το βήμα αυτό επαναλαμβάνεται για κάθε υποσύστημα αισθητήρα που έχει αναγνωριστεί. Αν ένα υποσύστημα αισθητήρα δεν στείλε επιβεβαίωση ή δεν την λάβει η βάση, τότε προχωράει στην αποστολή κατωφλίου στο επόμενο υποσύστημα αισθητήρα
- Αμέσως μετά η βάση φέρει σε πέρας μια ίδια διαδικασία με τα ίδια ακριβώς βήματα για κάθε αισθητήρα που της έστειλε επιβεβαίωση για το κατώφλι, αυτή την φορά όμως για τον συγκριτή κατωφλίου. Η διαδικασία περιλαμβάνει τις αντίστοιχες αλλαγές σε έναν αντίστοιχο πίνακα όπως και στην διαδικασία για το κατώφλι καθώς και τις αντίστοιχες αναμονές και επιτηδευμένες καθυστερήσεις
- Σε όσους αισθητήρες έστειλαν επιβεβαίωση και για τον συγκριτή επαναλαμβάνεται μια ακριβώς ίδια διαδικασία που αφορά την αποστολή του συνολικού αριθμού αναγνωρισμένων υποσυστημάτων αισθητήρα. Πάλι έχουμε αντίστοιχο πίνακα και αντίστοιχες αναμονές και καθυστερήσεις

- Μετά από αυτό το υποσύστημα βάσης ελέγχει για κάθε αισθητήρα πόσα από τα flags των αντίστοιχων πινάκων έχει αλλάξει τιμή και αν όλα έχουν αλλάξει ανεβάζει την τιμή σε έναν μετρητή. Όταν ο μετρητής έχει ίδια τιμή με αυτή των αναγνωρισμένων αισθητήρων η βάση πλέον πηγαίνει στο επόμενο στάδιο λειτουργίας. Σε περίπτωση που για κάποιο υποσύστημα αισθητήρα δεν έχουν αλλάξει τιμές όλοι οι πίνακες, τότε για αυτό τον αισθητήρα γίνεται επανάληψη των βημάτων που αφορούν αυτό τον πίνακα

Στο Σχήμα 14 φαίνεται το διάγραμμα ροής για το στάδιο ρυθμίσεων χρήστη, αυτή την φορά στην πλευρά της βάσης. Θα δούμε στην επόμενη ενότητα πως τα βήματα που περιγράψαμε παραπάνω είναι τα κρισιμότερα, καθώς σε περίπτωση που μια επιβεβαίωση από έναν αισθητήρα χαθεί τότε το σύστημα θα κολλήσει μεταξύ διαφορετικών σταδίων.



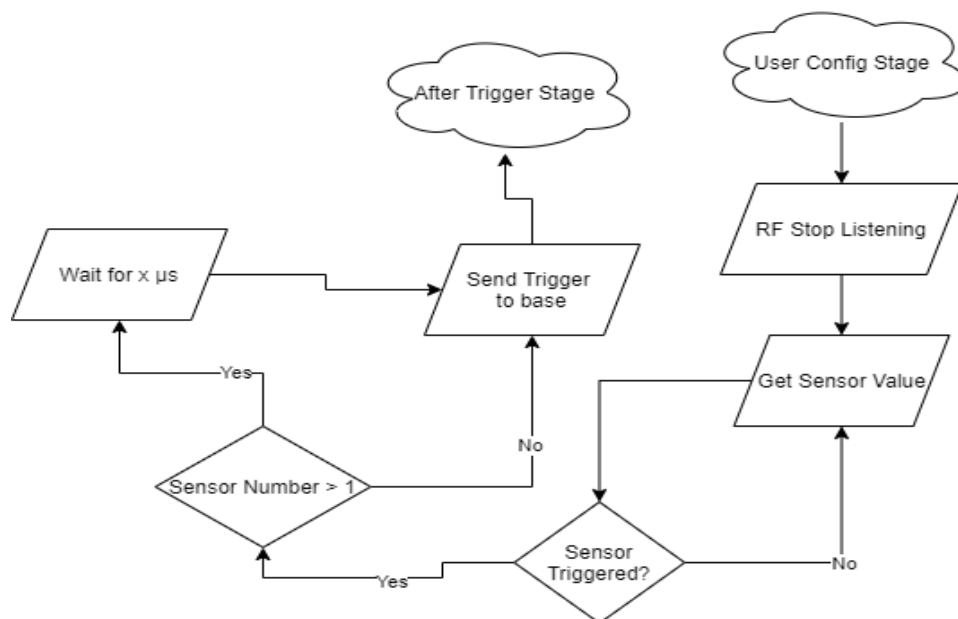
Σχήμα 14: Flowchart της πλευράς της βάσης στο στάδιο των ρυθμίσεων χρήστη

4.3.4 Στάδιο Πυροδότησης

Αφού έχουν ολοκληρωθεί όλα τα προηγούμενα βήματα και οι μεταβάσεις καταστάσεων, πλέον το σύστημα βρίσκεται στην κρίσιμη φάση της πυροδότησης. Εδώ είναι το πιο σημαντικό σημείο για την λειτουργία, καθώς σε αυτή την φάση θα γίνει η πυροδότηση μας όταν συμβεί φαινόμενο ενδιαφέροντος. Οι μικροελεγκτές των αισθητήρων σε αυτό το στάδιο λειτουργίας κάνουν τα παρακάτω:

- Ελέγχουν συνεχώς τις τιμές μέτρησης που δίνουν οι αισθητήρες και επίσης αν ικανοποιείται η συνθήκη για το κατώφλι. Όσο δεν ικανοποιείται τότε επαναλαμβάνουν αδιάκοπα την λήψη μετρήσεων
- Όταν μια μέτρηση ικανοποιήσει την συνθήκη τότε, αν ο αισθητήρας είναι σειριακά ο πρώτος, περιμένει για περίπου 200 μ s. Ύστερα ετοιμάζει ένα πακέτο προς αποστολή στην βάση που περιλαμβάνει αυτή την μέτρηση και το αποστέλλει μόνο μια φορά. Αν δεν είναι ο πρώτος σειριακά αισθητήρας, τότε κάνει ακριβώς τα ίδια βήματα χωρίς όμως να περιμένει καθόλου. Εδώ δεν αναμένει καμία επιβεβαίωση ο αισθητήρας καθώς δεν υπάρχει χρονικό περιθώριο

Στο Σχήμα 15 μπορούμε να δούμε το αντίστοιχο flowchart για την πλευρά των αισθητήρων, όπου το x μ s αναφέρεται στην καθυστέρηση που αναφέραμε για τον πρώτο αισθητήρα πιο πάνω. Η καθυστέρηση είναι 200 ή 0 μ s, στην περίπτωση που έχουμε μέχρι δύο αισθητήρες, για τον πρώτο και τον δεύτερο αισθητήρα αντίστοιχα.

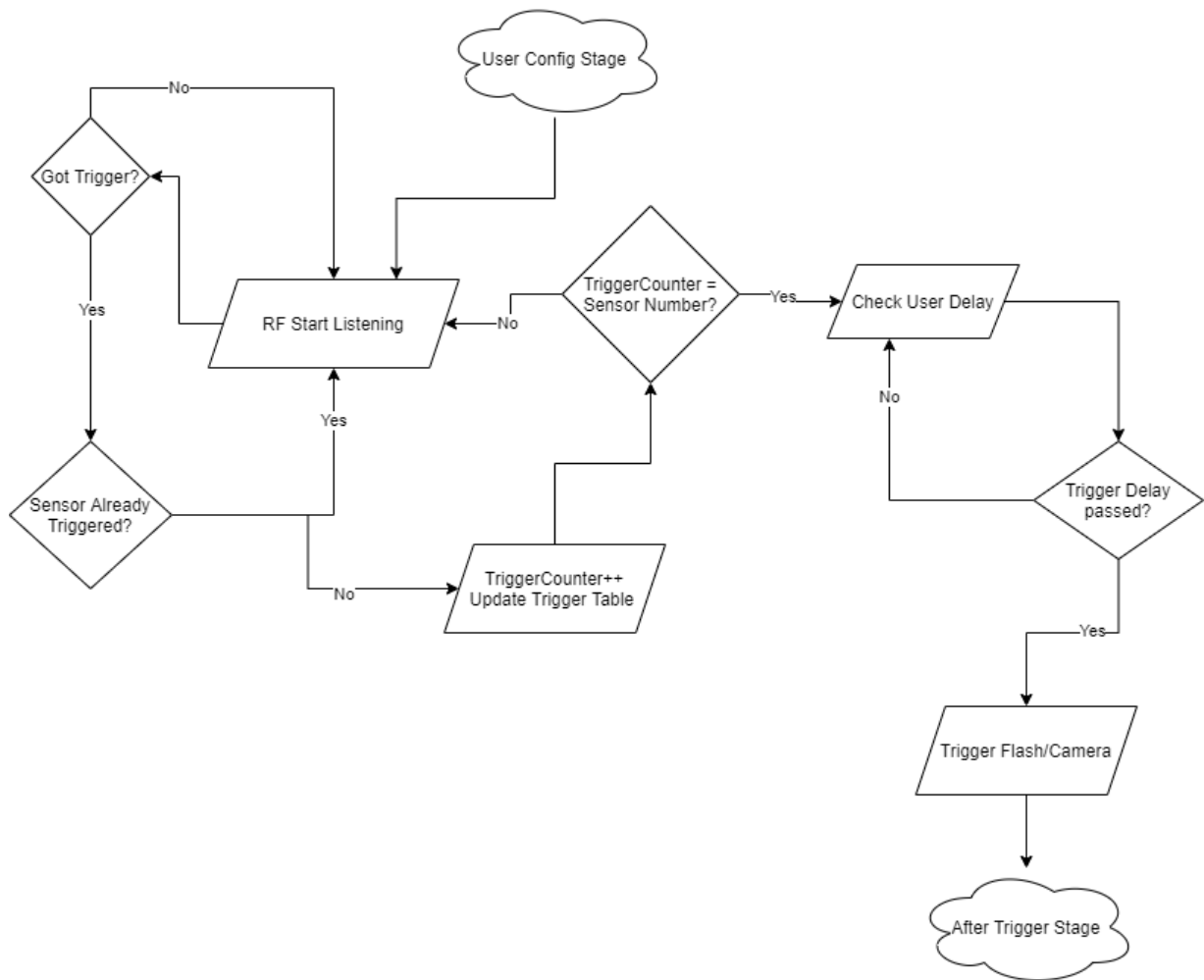


Σχήμα 15: Flowchart για το στάδιο πυροδότησης στην πλευρά του αισθητήρα

Από την πλευρά της η βάση κατά την διάρκεια αυτού του σταδίου είναι λογικό να είναι μόνιμα σε λειτουργία παραλήπτη. Τα βήματα που εκτελεί είναι τα εξής :

- Αναμονή για την λήψη μηνύματος πυροδότησης
- Σε περίπτωση που λάβει, τότε ελέγχει πόσοι αισθητήρες έχουν αναγνωριστεί. Αν είναι ένας τότε ελέγχει αν έχει επιλέξει ο χρήστης επιθυμητό delay, περιμένει το αντίστοιχο χρονικό διάστημα (αν δεν έχει επιλεγθεί delay το διάστημα αυτό θεωρείται μηδενικό) και τότε πυροδοτεί το flash/κάμερα
- Αν είναι περισσότεροι από ένας τότε ελέγχει αν ο λογικός τελεστής ανάμεσα στους αισθητήρες είναι and ή or. Αν είναι or ελέγχει πάλι για delay, αν χρειαστεί περιμένει το αντίστοιχο διάστημα και πυροδοτεί
- Αν πρόκειται για and τότε ελέγχει τότε ενεργοποιεί έναν timer για 50 ms και σημειώνει σε ένα flag ότι το συγκεκριμένο υποσύστημα αισθητήρα έχει στείλει μήνυμα πυροδότησης
- Στην συνέχεια επιστρέφει στην αναμονή λήψης νέου μηνύματος πυροδότησης
- Αν λάβει μήνυμα πυροδότησης από επόμενο υποσύστημα αισθητήρα σημειώνει και για αυτόν σε ένα flag ότι έχει πυροδοτήσει. Ελέγχει αν αυτή την φορά ικανοποιείται η συνθήκη πυροδότησης. Αν ικανοποιείται κάνει τις αντίστοιχες διαδικασίες όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις για να πυροδοτήσει το flash/κάμερα (με αντίστοιχη επιτηδευμένη καθυστέρηση αν έχει επιλεγθεί delay).
- Αν ο timer λήξει πριν ικανοποιηθεί η συνθήκη πυροδότησης τότε το σύστημα θεωρείται ότι απέτυχε να πυροδοτήσει έγκαιρα το flash/κάμερα

Η τιμή των 50 ms επιλέχθηκε με βάση ρεαλιστικές συνθήκες για διαφορετικούς αισθητήρες. Για παράδειγμα ένας αισθητήρας ήχου χρειάζεται για απόσταση 10 μέτρων, 30 ms για να φτάσει το ηχητικό σήμα, και χρειάζεται και τάξη μεγέθους μεγαλύτερο χρονικό διάστημα για να αντιληφθεί την αλλαγή σε σύγκριση με μια φωτοδίοδο, διότι περιλαμβάνεται μηχανική κίνηση μιας μεμβράνης μικροφώνου. Σε περίπτωση δηλαδή που έχουμε έναν αισθητήρα φωτός και έναν ήχου σε απόσταση μεταξύ τους 10 μέτρων (απόσταση που υποστηρίζεται από το σύστημα μας), τότε για να έχουμε και τα δύο ερεθίσματα των αισθητήρων στην βάση χρειαζόμαστε το λιγότερο 30 ms. Στο Σχήμα 16 φαίνεται το flowchart για την πλευρά της βάσης σε αυτό το στάδιο.



Σχήμα 16: Flowchart για το στάδιο πυροδότησης στην πλευρά της βάσης

4.3.5 Αδυναμίες της επικοινωνίας / Πιθανές αστοχίες

Στην ενότητα αυτή περιγράφουμε κάποιες από τις αδυναμίες στην διαδικασία επικοινωνίας που περιγράψαμε, οι οποίες υπό συνθήκες μπορεί να δημιουργήσουν προβλήματα σε σημείο ολόκληρο το σύστημα να σταματήσει να δουλεύει.

Κατά το στάδιο αναγνώρισης αισθητήρων είδαμε πως οι πομποί των αισθητήρων αποστέλλουν αναγνωριστικό μήνυμα προς την βάση, έως ότου λάβουν από αυτήν απάντηση για το ότι έχουν αναγνωριστεί. Αυτό μπορεί να μας οδηγήσει σε σφάλματα σε τρεις περιπτώσεις :

- Περίπτωση στην οποία το μήνυμα επιβεβαίωσης της βάσης προς τον αισθητήρα δεν λαμβάνεται από τον αισθητήρα. Σε αυτή την περίπτωση η πλευρά του αισθητήρα δεν θα μεταβεί στο επόμενο στάδιο με σωστό τρόπο. Η περίπτωση αυτή θα συμβεί μόνο αν τύχει η βάση να στείλει απάντηση σε αναγνωριστικό μήνυμα την ίδια ακριβώς στιγμή που ο ίδιος

αποστολέας προσπαθήσει να στείλει ξανά το αναγνωριστικό μήνυμα. Κάτι τέτοιο είναι εξαιρετικά απίθανο να συμβεί καθώς κάθε αισθητήρας αναμένει απάντηση από την βάση για το αναγνωριστικό μήνυμα που έστειλε για χρονικό διάστημα 1 s μέχρι να ξαναστείλει το αναγνωριστικό μήνυμα. Το χρονικό διάστημα αυτό είναι δυο τάξεις μεγέθους μεγαλύτερο από όσο χρειάζεται για να σταλεί ένα αναγνωριστικό μήνυμα

- Όταν η βάση δεν έχει προλάβει να λάβει μήνυμα επιβεβαίωσης από κάποιον αισθητήρα κατά την διάρκεια των 15 s που θέσαμε ως χρονικό διάστημα αναμονής για τα αναγνωριστικά μηνύματα. Η λύση σε αυτό το πρόβλημα είναι να γίνεται ενεργοποίηση των υποσυστημάτων των αισθητήρων πριν από αυτό της βάσης. Ουσιαστικά με αυτό τον τρόπο μπορούμε να βεβαιωθούμε σίγουρα ότι η βάση δεν θα χάσει το αναγνωριστικό μήνυμα κάποιου αισθητήρα επειδή πέρασε αυτό το χρονικό διάστημα των 15 s. Φυσικά μπορεί να ενεργοποιηθεί πρώτα η βάση και πάλι να υπάρχει σωστή αναγνώριση αν εντός 15 s ενεργοποιηθούν και όλοι οι επιθυμητοί αισθητήρες
- Τέλος, ένα πρόβλημα που μπορεί να προκύψει κατά την διάρκεια της αναγνώρισης είναι αν τύχει κάποιοι αισθητήρες να στείλουν τα αναγνωριστικά τους μηνύματα ακριβώς ταυτόχρονα προς την βάση. Για να μην συμβεί αυτό, οι πομποδέκτες των αισθητήρων έχουν ρυθμιστεί να στέλνουν τα μηνύματα τους σε διαφορετικά χρονικά διαστήματα, αυτό όμως δεν μπορεί να αποκλείσει 100% την πιθανότητα να συμπέσουν οι αποστολές μηνυμάτων λόγω χρονικής διαφοράς στην ενεργοποίηση των αισθητήρων.

Στο στάδιο των ρυθμίσεων χρήστη υπάρχουν δυο περιπτώσεις όπου μπορεί να έχουμε λάθος λειτουργία σε περίπτωση σφάλματος :

- Το σημαντικότερο πρόβλημα που μπορεί να προκύψει είναι κατά την διάρκεια της μετάβασης στο επόμενο στάδιο, δηλαδή αφού ο χρήστης έχει επιλέξει να στείλει κατώφλια προς τους αισθητήρες. Κατά την διάρκεια αυτής της μετάβασης, η βάση ξεκινάει να στέλνει κατά σειρά σε όλους του αισθητήρες που αναγνώρισε το κατώφλι, μέχρι να λάβει από καθέναν από αυτούς επιβεβαίωση ότι έλαβαν το κατώφλι. Όπως είδαμε, ο κάθε αισθητήρας όταν λάβει ένα κατώφλι αποστέλλει επιβεβαίωση 6 φορές συνεχόμενα, χωρίς καθυστέρηση ανάμεσα σε κάθε αποστολή της επιβεβαίωσης. Τα ίδια βήματα συμβαίνουν και για την αποστολή των τελεστών. Το πρόβλημα που μπορεί να προκύψει είναι σε περίπτωση που η βάση δεν λάβει πίσω ποτέ το μήνυμα επιβεβαίωσης, καθώς το υποσύστημα της βάσης δεν θα κάνει ποτέ σωστή μετάβαση στο επόμενο στάδιο, ενώ στα αντίστοιχα υποσυστήματα αισθητήρων αυτό θα έχει συμβεί. Αυτό θα μπορούσε να συμβεί αν για παράδειγμα

υπάρξουν παρεμβολές από άλλα σήματα κατά την διάρκεια και των 6 προσπαθειών αποστολής της επιβεβαίωσης. Για να μειωθεί πολύ σημαντικά η πιθανότητα τέτοιας περίπτωσης, η βάση αφού στείλει σε κάθε αισθητήρα το κατώφλι περιμένει για τουλάχιστον 1 s για να λάβει επιβεβαίωση από τον αισθητήρα. Λόγω διαφορά τάξης μεγέθους αυτού του διαστήματος αναμονής και της διάρκειας που χρειάζεται για να σταλούν από τον αισθητήρα 6 μηνύματα σερί, μειώνουμε πολύ την πιθανότητα να έχουμε τέτοια κατάσταση.

- Σπάνια περίπτωση μπορεί να συμβεί ακόμα και αν η διαδικασία αποστολής και λήψης των κατωφλίων γίνει επιτυχώς. Σε περίπτωση που έχουμε ενεργοποιημένους δύο αισθητήρες και ταυτόχρονα ο χρήστης έχει επιλέξει συνθήκη AND, αν κάποιος από τους αισθητήρες βρίσκεται ήδη σε τιμή διέγερσης με το που μεταβεί στο επόμενο στάδιο λειτουργίας θα στείλει trigger προς την βάση. Όμως αυτό το trigger θα χαθεί καθώς η βάση ακόμα θα βρίσκεται σε διαδικασία ανταλλαγής κατωφλίων με τους υπόλοιπους αισθητήρες. Για αποφυγή τέτοιας περίπτωσης όταν έχουμε δυο αισθητήρες, το καθένα από τα υποσυστήματα αισθητήρα θα εισάγει μια αυθαίρετη χρονική καθυστέρηση πριν μεταβεί σε στάδιο πυροδότησης. Στην ουσία αυτή η περίπτωση δεν συμβαίνει ποτέ διότι δεν υπάρχει πρακτική εφαρμογή στην εκ των προτέρων διέγερση των αισθητήρων πριν την προσπάθεια λήψης φωτογραφίας.

Τέλος στο στάδιο της πυροδότησης μπορεί να υπάρξει μια απειροελάχιστη πιθανότητα τα μηνύματα πυροδότησης από δυο αισθητήρες να φτάσουν στην βάση ακριβώς ταυτόχρονα και έτσι να χαθεί το trigger. Προσπαθούμε να μειώσουμε αυτή την πιθανότητα με εισαγωγή μικρής καθυστέρησης στην αποστολή των μηνυμάτων πυροδότησης που κυμαίνεται ως και 200 μ s, ανάλογα με τον αισθητήρα.

Σε κάθε μια από τις παραπάνω περιπτώσεις, ανεξαρτήτως του σταδίου δεν υπάρχει δυνατότητα ανάνηψης, και άρα κάθε φορά αν συμβεί κάτι από αυτά, θα πρέπει να γίνει επανεκκίνηση όλων των υποσυστημάτων χειροκίνητα.

5 ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ, ΕΠΙΒΕΒΑΙΩΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ, ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ

Για να μπορέσουμε να επιβεβαιώσουμε την σωστή λειτουργία και το επιθυμητό αποτέλεσμα στο σύστημα μας θα πρέπει να γίνουν κάποια πειράματα στην πράξη και να γίνει λήψη φωτογραφιών. Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστεί ο φωτογραφικός εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε καθώς και ο χώρος διεξαγωγής των πειραμάτων. Στην συνέχεια θα παρουσιάσουμε τι φαινόμενα προσπαθήσαμε να απαθανατίσουμε εμείς για να δείξουμε την σωστή λειτουργία του συστήματος μας και έπειτα θα δείξουμε μερικές από τις φωτογραφίες που καταφέραμε να τραβήξουμε. Θα δούμε τέλος αν καταφέραμε να επιτύχουμε τις απαιτήσεις που είχαμε θέσει και θα αξιολογήσουμε συνολικά το σύστημα μας συγκριτικά με αυτά που ήδη κυκλοφορούν.

5.1 Φωτογραφικός εξοπλισμός

Για την επιβεβαίωση σωστής λειτουργίας του συστήματος είναι προφανές ότι θα χρειαζόταν φωτογραφικός εξοπλισμός. Τουλάχιστον μια φωτογραφική μηχανή με δυνατότητα ρύθμισης στην έκθεση φωτός και επιπλέον ένα flash με σύνδεση PC Sync ή mini jack. Στον Πίνακα 12 φαίνονται οι φωτογραφικές μηχανές και τα flash που χρησιμοποιήθηκαν.

Μοντέλο	Flash/Camera	PC Sync	Mini Jack	HotShoe
Sony a6000	Camera	Όχι	Όχι	Ναι
Canon EOS 300D	Camera	Όχι	Ναι	Ναι
Fotomatic 140	Flash	Όχι	Ναι	Ναι
Yongnuo Speedlite YN560 IV	Flash	Ναι	Όχι	Ναι

Πίνακας 12: Ο φωτογραφικός εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε, συνοπτικά

Στον πίνακα, οι αναφορές σε PC Sync, mini jack και HotShoe αφορούν το αν διαθέτουν τέτοια είσοδο, όμως ουσιαστικά και οι τρεις συνδέσεις για απλή πυροδότηση απαιτούν μόνο δύο ακροδέκτες που γεφυρώνονται και μπορούν με αντάπτορες να χρησιμοποιηθεί οτιδήποτε από τα τρία, ασχέτως τι είσοδο διαθέτει το κάθε flash ή φωτογραφική μηχανή.

Για τις δοκιμές και την λήψη φωτογραφιών που κάναμε εμείς χρησιμοποιήθηκαν η φωτογραφική μηχανή Sony a6000 με κατάλληλη ρύθμιση έκθεσης φωτός, και το fotomatic 140 flash, το οποίο την κατάλληλη στιγμή δεχόταν πυροδότηση. Η Canon EOS 300D, καθώς και το flash Yungnuo Speedlite YN560 χρησιμοποιήθηκαν για επιβεβαίωση λειτουργίας με ποικιλία εξοπλισμού, αρκεί να διαθέτει δυνατότητα πυροδότησης μέσω mini jack ή PC Sync εισόδου. Επιπλέον επειδή το

Fotomatic 140 είναι flash που λειτουργεί σε υψηλές τάσεις της τάξης των 230 V (η τάση αυτή μετρήθηκε με χρήση πολύμετρου), επιβεβαιώσαμε ότι δεν υπάρχει κίνδυνος χρήσης του συστήματος σε τέτοιες τάσεις. Συγκεκριμένα το σύστημα μπορεί να υποστηρίξει πυροδότηση συσκευών μέχρι και 300 V.



Εικόνα 19: Sony a6000, η βασική φωτογραφική μηχανή που χρησιμοποιήθηκε. Πηγή: <https://www.sony.com/electronics/interchangeable-lens-cameras/ilce-6000-body-kit>



Εικόνα 20: Fotomatic 140, το flash που χρησιμοποιήσαμε στις δοκιμές μας. Πηγή: <https://www.pinterest.co.uk/pin/299630181460781731/>

5.2 Χώρος διεξαγωγής πειραμάτων

Για τον χώρο διεξαγωγής των πειραμάτων αντιμετωπίστηκαν κάποιες δυσκολίες που ήταν αναπάντεχες και έτσι έπρεπε να συμβιβαστούμε σε μια λύση που δεν ήταν η καλύτερη δυνατή.

Αρχικά, δεν υπήρχε κάποιος προσωπικός ιδιωτικός ειδικός χώρος studio φωτογράφισης για να αξιοποιηθεί, και αν επιθυμούσαμε κάτι τόσο εξειδικευμένο θα έπρεπε να απευθυνθούμε σε κάποιον τρίτο ιδιώτη επί πληρωμή, κάτι το οποίο δεν υπήρχε δυνατότητα να γίνει. Υπήρξε η ιδέα να διαμορφωθεί κατάλληλα κάποιος χώρος σε εργαστήριο ή σε ιδιωτική κατοικία. Το πρώτο εν τέλει δεν ήταν εφικτό διότι η φάση της διαδικασίας των πειραμάτων συνέπεσε με την περίοδο της πανδημίας και του γενικευμένου lockdown με αποτέλεσμα να μην υπάρχει δυνατότητα εύκολης μετακίνησης σε χώρο του Πολυτεχνείου, ιδίως σε ώρες που η προσπάθεια μας να αναπαραστήσουμε κάποια φαινόμενα δεν θα ήταν εμπόδιο για συναδέλφους. Επιπλέον και η ίδια η πρόσβαση στους χώρους του Πολυτεχνείου ήταν περιορισμένη και όχι εφικτή για όλους.

Έτσι λοιπόν, οι περισσότερες δοκιμές έγιναν στον δικό μου προσωπικό χώρο της οικίας μου, με ό,τι αυτό συνεπάγεται όσον αφορά τις συνθήκες φωτισμού, μεγέθους χώρου και την δυνατότητα ή όχι να αναπαρασταθούν κάποια φαινόμενα εντός μιας κατοικίας. Για παράδειγμα ήταν σαφώς ανέφικτο να γίνει δοκιμή για φωτογράφιση σφαίρας ή άγριων ζώων.

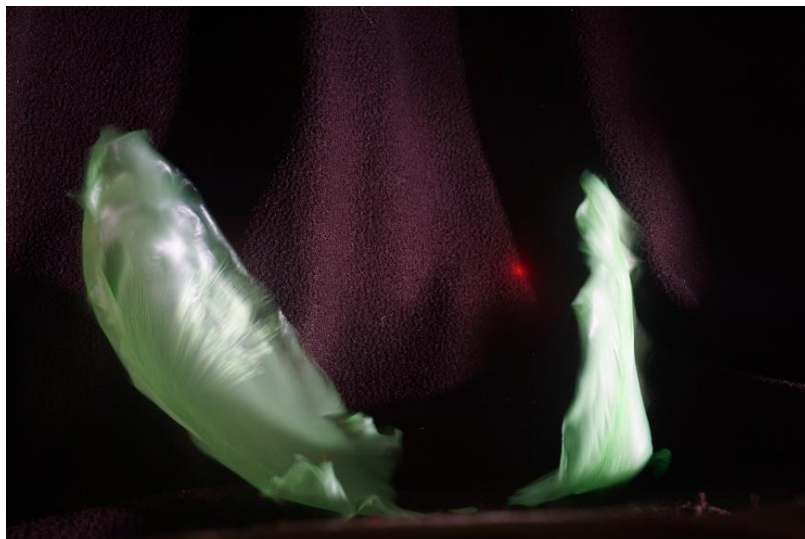
5.3 Πειράματα και φωτογραφίες

Στο πλαίσιο αυτής της διπλωματικής εργασίας έγιναν πειράματα και δοκιμές για λήψη φωτογραφίας των φαινομένων που φαίνονται στον παρακάτω πίνακα. Σε μια από τις περιπτώσεις, για καλύτερο οπτικό αποτέλεσμα και για επιβεβαίωση λειτουργίας αυτής της δυνατότητας, κάναμε και χρήση του επιθυμητού delay. Στις Εικόνες 21-26 φαίνονται τα παραπάνω πειράματα με την σειρά που εμφανίζονται στον Πίνακα 13. Χρησιμοποιήθηκε σε όλα τα πειράματα ένα μικρόφωνο ως αισθητήρας ήχου για τους εξής λόγους:

- Τα μικρόφωνα ως αισθητήρες ήχου έχουν αργή απόκριση λόγω μηχανικών κινήσεων που πρέπει να γίνουν στην κάψουλα του μικροφώνου, συνεπώς με αυτό τον τρόπο μπορούμε να επιβεβαιώσουμε την ορθή λειτουργία του συστήματος με μη βέλτιστους αισθητήρες. Σπάσιμο διάφορων αντικειμένων. Συγκεκριμένα έγιναν λήψεις σπασίματος βάζων με σφυρί αλλά και σπάσιμο αυγών στο δάπεδο.
- Με την χρήση αισθητήρα ήχου μπορούμε να εξετάσουμε πολλές περιπτώσεις με διαφορετικές αποστάσεις του αισθητήρα από το φαινόμενο και να δούμε πώς αυτό επηρεάζει το τελικό αποτέλεσμα

Είδος πειράματος	Αριθμός αισθητήρων	Απόσταση αισθητήρα	Επιλεγμένο επιθυμητό delay	Πετυχημένη λήψη
Τρύπημα μπαλονιού	1	5 cm	0 ms	Ναι
Τρύπημα μπαλονιού (με αλεύρι)	1	25 cm	0 ms	Ναι
Σπάσιμο βάζου	1	15 cm	0 ms	Ναι
Σπάσιμο βάζου με delay	1	15 cm	50 ms	Ναι
Ρίψη νομίσματος σε δοχείο με νερό	2	30 cm/45 cm	0 ms	Ναι
Σπάσιμο αυγού	1	30 cm	0 ms	Ναι

Πίνακας 13: Πειράματα που έγιναν και οι συνθήκες διεξαγωγής τους



Εικόνα 21: Τρύπημα μπαλονιού



Εικόνα 22: Τρύπημα μπαλονιού με αλεύρι



Εικόνα 23: Σπάσιμο βάζου



Εικόνα 24: Σπάσιμο βάζου με delay



Εικόνα 25: Ρίψη νομίσματος σε δοχείο με νερό



Εικόνα 26: Σπάσιμο αυγού

Μερικά από τα φαινόμενα που θέλαμε όντως να συμπεριληφθούν στις δοκιμές μας αλλά αυτό δεν ήταν εφικτό ήταν τα ακόλουθα :

- Άγρια ζώα σε κίνηση
- Ιπτάμενα βλήματα/σφαίρες
- Αστραπές και κεραυνοί

Για τα άγρια ζώα και τις σφαίρες αυτό δεν ήταν εφικτό για λόγους ασφάλειας, αλλά και έλλειψης κατάλληλου εξοπλισμού και χώρου. Επιπλέον για τους κεραυνούς και τις αστραπές δυστυχώς κατά την διάρκεια διεξαγωγής των δοκιμών δεν το επέτρεψαν καθόλου οι καιρικές συνθήκες.

5.4 Χρόνος καθυστέρησης συστήματος

Ένα από τα σημαντικά θέματα που έπρεπε να εξετάσουμε για σωστή λειτουργία του συστήματος είναι η καθυστέρηση που αυτό εισάγει από την στιγμή που ένας αισθητήρας θα διεγερθεί από ένα επιθυμητό φαινόμενο που ικανοποιεί το κατώφλι, μέχρι την στιγμή που το flash/κάμερα θα πυροδοτηθεί. Ο συνολικός αυτός χρόνος αποτελείται από τρεις βασικές διαφορετικές χρονικές περιόδους :

- Τον χρόνο που θα χρειαστεί ο μικροελεγκτής του αισθητήρα να επεξεργαστεί την μέτρηση, να την συγκρίνει με το κατώφλι και να ετοιμάσει ένα πακέτο που μέσω του RF θα αποσταλεί
- Τον χρόνο που θα χρειαστεί το μήνυμα να μεταδοθεί προς το αντίστοιχο RF της βάσης, δηλαδή το on air time
- Τον χρόνο που θα χρειαστεί ο μικροελεγκτής βάσης να επεξεργαστεί το πακέτο που θα λάβει από έναν αισθητήρα, να ελέγξει αν πρόκειται για νέο trigger ή όχι, να κάνει την σύγκριση με τους κατάλληλους πίνακες που περιεγράφηκαν στην υποενότητα του πρωτόκολλου επικοινωνίας, ώστε να γνωρίζει αν όντως ικανοποιείται η συνθήκη πυροδότησης και τέλος την χρονική περίοδο που χρειάζεται για να δώσει σήμα ώστε να πυροδοτηθεί το flash/φωτογραφική μηχανή.

Με την χρήση ενός παλμογράφου δύο καναλιών έγιναν κάποιες δοκιμές για να μπορέσουμε να υπολογίσουμε την καθυστέρηση του συστήματος. Στο ένα κανάλι η είσοδος ήταν η τάση που έδινε στην έξοδο του ο αισθητήρας, ενώ στο δεύτερο κανάλι είσοδος ήταν η αντίστοιχη τάση στην έξοδο της βάσης που έδινε σήμα προς το flash να πυροδοτήσει. Με αυτό τον τρόπο ήταν εφικτή η μέτρηση του χρόνου από την στιγμή στην οποία έγινε αλλαγή τάσης στον ακροδέκτη του αισθητήρα, μέχρι

την στιγμή που έγινε η αντίστοιχη αλλαγή τάσης στην έξοδο προς το flash. Συνεπώς δεν έχουμε μια μέτρηση της καθυστέρησης για καθένα ένα από τα τρία χρονικά διαστήματα που αναφέρθηκαν πιο πάνω, αλλά για μέτρηση του συνολικού χρόνου καθυστέρησης.

Λόγω διαφορετικών φυσικών χαρακτηριστικών του κάθε αισθητήρα, αλλά και παραγόντων στην ασύρματη επικοινωνία που μπορούν σε κάθε δοκιμή να είναι διαφορετικές, δεν ήταν δυνατόν να υπάρχει κάθε φορά ακριβώς καθορισμένη χρονική καθυστέρηση, όμως με αρκετές δοκιμές και με χρήση διαφορετικών ειδών αισθητήρων μπορέσαμε να επιβεβαιώσουμε πως η καθυστέρηση δεν ξεπερνούσε ποτέ το χρονικό άνω όριο που είχαμε θέσει στις προδιαγραφές του συστήματος, το οποίο ήταν τα 5 ms. Από τον Πίνακα 14 που παρουσιάζει κάποια παραδείγματα κυματομορφών μπορούμε να δούμε ότι σε κάθε περίπτωση η καθυστέρηση του συστήματος είναι πολύ μικρότερη από τον στόχο μας των 5 ms.

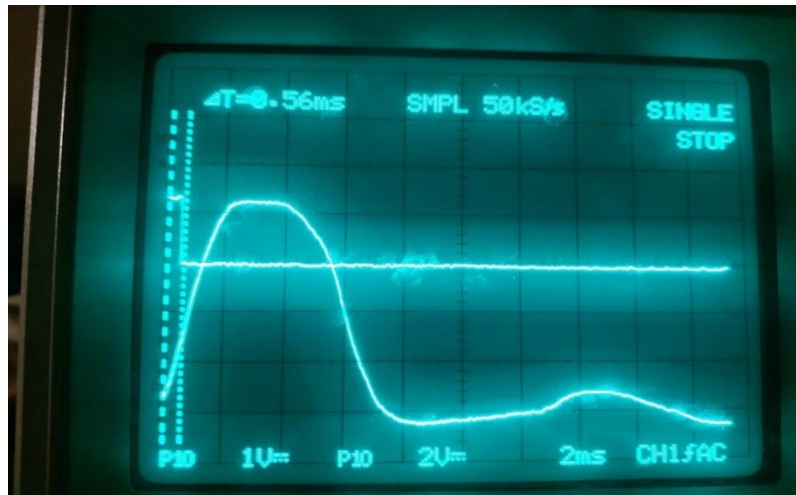
	Είδος αισθητήρα	Μέτρηση καθυστέρησης	Συνυπολογισμός χρόνου απόκρισης αισθητήρα
Παράδειγμα 1	Φωτοδίοδος	0.56 ms	Όχι
Παράδειγμα 2	Φωτοδίοδος	0.8 ms	Όχι
Παράδειγμα 3	Μικρόφωνο	0.56 ms	Όχι
Παράδειγμα 4	Φωτοδίοδος	3.12 ms	Ναι

Πίνακας 14: Μετρήσεις καθυστέρησης του συστήματος με χρήση παλμογράφου

Στις Εικόνες 27-30 φαίνονται τα παραπάνω παραδείγματα κυματομορφών που μας έδωσε ο παλμογράφος. Η πτώση τάσης στο κανάλι 2 σηματοδοτεί την πυροδότηση του LED.

Πρέπει να σημειωθεί ότι ο χρόνος που μετρήθηκε στο σύστημα μας δεν περιλαμβάνει τους παραπάνω χρόνους :

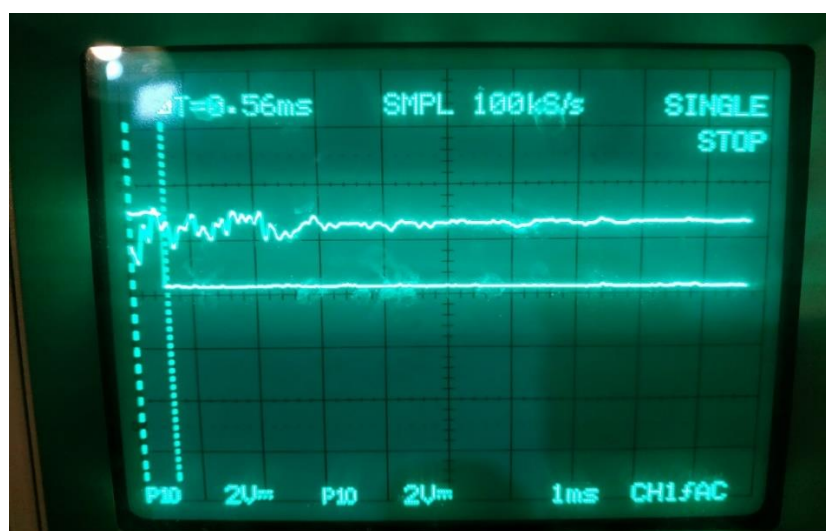
- Τη διάρκεια παλμού του flash γιατί σε κάθε flash είναι διαφορετική και δεν είναι κομμάτι της καθυστέρησης που εισάγει το σύστημα μας
- Τον χρόνο απόκρισης του αισθητήρα, καθώς ούτε αυτός ο χρόνος είναι κομμάτι εγγενούς καθυστέρησης του συστήματος μας και είναι διαφορετικός για κάθε αισθητήρα. Εξάιρεση σε αυτό αποτελεί το παράδειγμα 4 όπου συμπεριλήφθηκε αυτό το χρονικό διάστημα για περαιτέρω επιβεβαίωση των επιδόσεων του συστήματος.



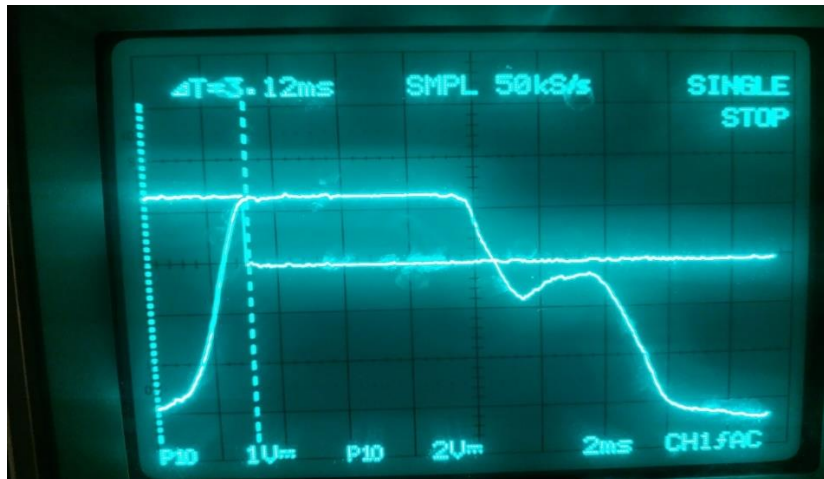
Εικόνα 27: Αισθητήρας φωτός (φωτοδίοδος), Παράδειγμα 1



Εικόνα 28: Αισθητήρας φωτός (φωτοδίοδος), Παράδειγμα 2



Εικόνα 29: Αισθητήρας ήχου (μικρόφωνο), Παράδειγμα 3



Εικόνα 30: Αισθητήρας φωτός (συμπεριλαμβάνεται στην καθυστέρηση η απόκριση αισθητήρα), Παράδειγμα 4

5.5 Συμπεράσματα

Σε αυτό το σημείο θα εξετάσουμε κατά πόσο τελικά πετύχαμε τους στόχους μας όταν ξεκίνησε αυτή η διπλωματική εργασία και σε τι βαθμό αυτό έγινε.

Ο Πίνακας 15 παρουσιάζει συνοπτικά τους βασικούς στόχους μας για το αντίστοιχο θέμα και τα δικά μας αποτελέσματα.

	Σύνδεση Αισθητήρα	Αριθμός Υποστηριζόμενων αισθητήρων	Καθυστέρηση Συστήματος	Τάση Λειτουργίας	Συνολικό Κόστος
Στόχος	Ασύρματη	2	< 5 ms	3.3-5 V	< 60\$
Το σύστημα μας	Ασύρματη	2	< 1 ms	3.3-5 V	< 30\$
Επιτυχές	Ναι	Ναι	Ναι	Ναι	Ναι

Πίνακας 15: Βασικοί στόχοι του συστήματος και σύγκριση τους με το αποτέλεσμα

Υπήρχαν και άλλοι στόχοι που είχαμε θέσει οι οποίοι όμως δεν είναι δυνατόν να ποσοτικοποιηθούν και έτσι δεν μπορούμε με βεβαιότητα να πούμε ντετερμινιστικά αν ήταν επιτυχές το σύστημα σε όλους. Για παράδειγμα δεν μπορούμε να δούμε με μορφή αριθμών αν καταφέραμε το σύστημα να είναι εύκολο στην χρήση καθώς εξαρτάται από παράγοντες που δεν είναι μετρήσιμοι.

Ορισμένοι μη μετρήσιμοι στόχοι που όμως επιτεύχθηκε να ικανοποιηθούν ήταν οι παρακάτω :

- Σύστημα ανοιχτού κώδικα
- Ευκολία εύρεσης όλων των εξαρτημάτων που χρειάζονται για κατασκευή του συστήματος
- Χρήση του ως εργαλείο εκμάθησης εισαγωγικών εννοιών σε ενσωματωμένα συστήματα
- Λειτουργία με μεγάλη ποικιλία flash, τόσο παλιότερων flash με υψηλές τάσεις (ως 300 V), όσο και πιο καινούριων με μικρές τάσεις
- Ευελιξία στην ποικιλία των φαινομένων για τα οποία μπορεί να γίνει χρήση του συστήματος για λήψη φωτογραφίας

Τέλος ένα σημαντικό συμπέρασμα που προκύπτει παρόλο που πετύχαμε τους περισσότερους στόχους, είναι ότι η βασική μας διαφοροποίηση από άλλα συστήματα, δηλαδή η χρήση ασύρματης σύνδεσης των αισθητήρων με το βασικό σύστημα, έχει και κάποια μειονεκτήματα :

- Ακόμα και στις καλύτερες περιπτώσεις το σύστημα μας είχε μεγαλύτερη καθυστέρηση από ενσύρματα συστήματα που είδαμε παραπάνω, όπως το Camera Axe
- Η χρήση ασύρματης επικοινωνίας εισάγει τον κίνδυνο σφάλματος στην μετάδοση πακέτων και άρα αυτό με την σειρά του μπορεί να οδηγήσει σε αποτυχία έγκαιρης πυροδότησης ή να μην πυροδοτήσει το σύστημα καθόλου. Ασχέτως που ο κίνδυνος αυτός είναι μικρός, οφείλει να αναφερθεί διότι δεν μπορεί 100% να εγγυηθεί ότι δεν θα συμβεί κάτι τέτοιο
- Παρόλο που ο στόχος για το κόστος στέφθηκε με επιτυχία ο αριθμός των απαραίτητων εξαρτημάτων ήταν μεγαλύτερος. Χρειάζεται περισσότερους μικροελεγκτές, περισσότερες πηγές τροφοδοσίας, RF πομποδέκτες και γενικότερα περισσότερους υλικούς πόρους
- Η κατασκευή του συστήματος μπορεί να είναι εύκολη όμως η πολυπλοκότητα του σε σχέση με ένα σύστημα που λειτουργεί ενσύρματα είναι σαφώς μεγαλύτερη. Επιπλέον η ανάγκη ύπαρξης ξεχωριστών υποσυστημάτων μπορεί να θεωρηθεί σε πολλές περιπτώσεις ως μειονέκτημα και όχι ως πλεονέκτημα, από πρακτικής άποψης (πχ η ανάγκη περισσότερων μπαταριών)

6 ΕΠΙΛΟΓΟΣ

Στο τελευταίο αυτό κεφάλαιο θα κάνουμε μια συνολική σύγκριση του συστήματος μας με τα ήδη υπάρχοντα, θα δούμε κατά πόσο όντως πετύχαμε το επιθυμητό αποτέλεσμα και σε ποιο βαθμό, αν δεν ικανοποιήσαμε κάποια απαίτηση και για ποιο λόγο συνέβη αυτό. Θα ασχοληθούμε αναλυτικά με κάποιες από τις σημαντικές δυσκολίες που αντιμετωπίσαμε, πώς τις ξεπεράσαμε και τι αδυναμίες έχει το σύστημα μας. Τέλος θα προτείνουμε πιθανές βελτιώσεις για το σύστημα μας που θα μπορούσαν να γίνουν στο μέλλον καθώς και πώς θα μπορούσαν αυτές να υλοποιηθούν.

6.1 Δυσκολίες που αντιμετωπίστηκαν

6.1.1 Δυσκολίες στον εξοπλισμό και τον χώρο

Μια από τις σημαντικότερες δυσκολίες στις οποίες έπρεπε να βρεθεί λύση ήταν η εύρεση κατάλληλου εξοπλισμού για την διεξαγωγή των δοκιμών λειτουργίας. Συγκεκριμένα κάποια εμπόδια που συναντήσαμε ήταν :

- Η μη κατοχή φωτογραφικού εξοπλισμού, καθώς δεν υπήρχαν άμεσα διαθέσιμα για δοκιμές ούτε flash, ούτε και φωτογραφική μηχανή
- Η μειωμένη διαθεσιμότητα του κατάλληλου hardware για την υλοποίηση του συστήματος (Μικροελεγκτές, αισθητήρες,) καθώς και το κόστος απόκτησης τους
- Η έλλειψη κατάλληλου χώρου για δοκιμές του συστήματος, καθώς δεν υπήρχε στην κατοχή μας φωτογραφικό studio ούτε η δυνατότητα ενοικίασης τέτοιου επαγγελματικού χώρου

Για το πρώτο από αυτά τα προβλήματα δανειστήκαμε τον αντίστοιχο εξοπλισμό, ενώ για την απόκτηση των επιμέρους εξαρτημάτων του συστήματος η λύση ήταν η αγορά τους από την Κίνα, το οποίο είχε και αυξημένο χρόνο αναμονής για την απόκτηση τους. Τέλος για τον χώρο διεξαγωγής των πειραμάτων διαμορφώθηκε κατάλληλα χώρος σε προσωπική οικία.

6.1.2 Αυξημένες απαιτήσεις βάσης και επανασχεδίαση με νέο μικροελεγκτή βάσης

Κατά την διάρκεια την αρχικής υλοποίησης του μοντέλου του συστήματος δεν προβλέφθηκε σωστά η απαίτηση του μικροελεγκτή βάσης σε μνήμη. Συγκεκριμένα η αρχική υλοποίηση

χρησιμοποιούσε στην βάση ένα Arduino Nano με μόλις 2048 byte μνήμης SRAM. Διαπιστώθηκε στην πορεία πως αυτό δεν ήταν αρκετό διότι :

- Με την χρήση οθόνης μεγέθους 128x64 pixel η ελάχιστη απαίτηση μνήμης SRAM ήταν 1024 byte, διότι κάθε βιβλιοθήκη απαιτούσε δέσμευση 1 bit μνήμης για κάθε pixel της οθόνης
- Η χρήση των υπόλοιπων απαραίτητων μεταβλητών στον κώδικα που συνολικά ξεπερνούσαν επίσης σε μέγεθος τα 1024 bit

Η λύση σε αυτό το πρόβλημα ήταν να χρησιμοποιήσουμε έναν άλλο μικροελεγκτή πιο ισχυρό και με περισσότερη μνήμη. Υπήρξε η ιδέα να χρησιμοποιηθεί ο STM32F103C8 που είναι βασισμένος σε ARM®Cortex®-M3 32-bit RISC μικροελεγκτή [\[115\]](#), [\[116\]](#), [\[117\]](#), [\[118\]](#). Εν τέλει όμως για λόγους άμεσης διαθεσιμότητας και ομοιομορφίας στην αρχιτεκτονική με τους μικροελεγκτές των αισθητήρων έγινε χρήση ενός Arduino Mega 2560 [\[105\]](#). Αυτό ήταν το δυσκολότερο εμπόδιο που εμφανίστηκε κατά την διάρκεια της υλοποίησης, καθώς χρειάστηκε να γίνει επανασχεδιασμός του κώδικα εκ νέου.

6.2 Αδυναμίες του συστήματος

Μέσα από τις δοκιμές που έγιναν για την επιβεβαίωση λειτουργίας του συστήματος αναδείχτηκαν και κάποιες αδυναμίες που αφορούν την χρήση του. Οι κυριότερες από αυτές αφορούν το πρωτόκολλο που αναπτύξαμε και περιγράφονται αναλυτικά στο 4.3.2. Υπάρχουν και κάποιες ακόμα όμως που αφορούν κυρίως κάποια πρακτικά θέματα. Εν συντομία αναφέρονται ορισμένες από τις αδυναμίες του συστήματος παρακάτω :

- Υποχρεωτική ενεργοποίηση πρώτα των αισθητήρων και μετά της βάσης λόγω δομής του πρωτοκόλλου
- Σε περίπτωση σύγκρουσης μηνυμάτων επιβεβαίωσης στο στάδιο αναγνώρισης τουλάχιστον ένα από τα επιμέρους συστήματα δεν κάνει σωστή μετάβαση σε επόμενο στάδιο λειτουργίας με αποτέλεσμα να είναι ανέφικτο να χρησιμοποιηθεί το σύστημα αν γίνει επανεκκίνηση σε όλα τα υποσυστήματα
- Κατά την διάρκεια της μετάβασης από το στάδιο των ρυθμίσεων χρήστη στο στάδιο της πυροδότησης υπάρχει πάλι ο κίνδυνος να μην γίνει σωστή ανταλλαγή κρίσιμων μηνυμάτων και να έχει ως αποτέλεσμα ορισμένα υποσυστήματα να περάσουν σε επόμενο στάδιο λειτουργίας ενώ τα υπόλοιπα όχι

- Σε περίπτωση που συμβεί κάτι από τα προηγούμενα θα πρέπει αναγκαστικά να γίνει χειροκίνητη επανεκκίνηση όλων των υποσυστημάτων καθώς δεν έχει προβλεφθεί μια διαδικασία ανάνηψης σφάλματος σε αυτά τα κρίσιμα βήματα.
- Από την στιγμή που θα γίνει η ανταλλαγή κατωφλίων και μετά, τότε δεν είναι εφικτό να υπάρξει επαναπροσδιορισμός του χωρίς να γίνει επανεκκίνηση των επιμέρους υποσυστημάτων
- Λόγω χρήσης της ζώνης συχνοτήτων των 2.4 GHz δεν μπορεί να αποκλειστεί η παρεμβολή από άλλες ηλεκτρονικές συσκευές στην ίδια ζώνη συχνοτήτων αλλά ούτε και η παρεμβολή ηλεκτρομαγνητικού θορύβου

Τα παραπάνω που αναφέρθηκαν δεν είναι εύκολο να συμβούν, και ειδικά για το τελευταίο σε οποιαδήποτε δοκιμή κάναμε δεν έγινε ποτέ. Όμως αν και ήταν πολύ λίγες οι φορές που αυτό συνέβη, τα τρία πρώτα που αναφέρθηκαν παραπάνω τα συναντήσαμε και κατά την διάρκεια ανάπτυξης και κατά τις δοκιμές μας.

6.3 Future work/Πιθανές βελτιώσεις

Αναμφίβολα μέσα από όσα αναφέραμε στην αμέσως προηγούμενη ενότητα γίνονται φανερά και ορισμένα πεδία στα οποία θα μπορούσαν να γίνουν διορθώσεις. Θα αναφέρουμε εδώ ορισμένες από αυτές καθώς και κάποιες βελτιώσεις που μπορούν να κάνουν το σύστημα ακόμα καλύτερο και αξιόπιστο.

Όσον αφορά διορθώσεις που αφορούν τις παραπάνω αδυναμίες αναφέρουμε συνοπτικά παρακάτω :

- Δημιουργία μεθόδου ανάνηψης σφαλμάτων από λανθασμένη ανταλλαγή μηνυμάτων κατά την διάρκεια μετάβασης από μια κατάσταση σε μια άλλη. Αυτό θα έλυνε το πρόβλημα της μη σωστής μετάβασης σε επόμενο στάδιο για κάθε επιμέρους υποσύστημα κάνοντας το σύστημα μας πιο αξιόπιστο και εύχρηστο
- Ανάπτυξη μεθόδου αλλαγής ρυθμίσεων χωρίς αναγκαστική επανεκκίνηση

Για τις πιθανές βελτιώσεις υπάρχουν ήδη κάποια χαρακτηριστικά του συστήματος που μπορούν να υποστηρίξουν τα παρακάτω :

- Προσθήκη περισσότερων αισθητήρων (μέχρι 6)
- Αύξηση εμβέλειας της λειτουργίας με χρήση των ίδιων πομποδεκτών με άλλη ρύθμιση ενέργειας ή/και άλλες κεραίες

- Χρήση μεγαλύτερης οθόνης για περισσότερο πρακτικό αποτέλεσμα
- Βελτίωση του μενού για μεγαλύτερη ευκολία ρυθμίσεων
- Πρόβλεψη για δυνατότητα σύνδεσης αισθητήρων με περισσότερες ακροδέκτες/εξόδους
- Ανάπτυξη app για έλεγχο των ρυθμίσεων μέσω κινητού
- Αντικατάσταση των Arduino Mega 2560 και Arduino Nano με τους απλούς αντίστοιχους AVR μικροελεγκτές που βασίζεται το καθένα σε συνδυασμό με κατάλληλους κρυστάλλους συχνοτήτων. Αυτό θα επιφέρει σημαντική μείωση στην κατανάλωση ενέργειας, αλλά και μια μη αμελητέα μείωση στο κόστος

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] J. E. Field, “High-speed photography,” *Contemporary Physics*, 1983. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/High-speed_photography#Notes.
- [2] E. Muybridge, *Muybridge’s Complete human and animal locomotion : all 781 plates from the 1887 Animal locomotion by Eadweard Muybridge*. .
- [3] E. Muybridge, *Descriptive Zoopraxography, or the Science of Animal Locomotion Made Popular*. The Library of Alexandria, 1893.
- [4] B. Clegg, *The man who stopped time : the illuminating story of Eadweard Muybridge : pioneer photographer, father of the motion picture, murderer*. Joseph Henry Press, 2007.
- [5] W. G. Pohl, “Peter Salcher und Ernst Mach Schlierenfotografie von Überschall-Projektilen,” pp. 22–26, 2003.
- [6] SMPTE, “Society of Motion Picture and Television Engineers,” www.smpte.org/home, 2007. [Online]. Available: <http://www.smpte.org/home>
- [7] I. McNeil, *An Encyclopedia of the History of Technology - Βιβλία Google*. .
- [8] J. G. Chapman, *Manchester and Photography*. Manchester: Palatine Press, 1934.
- [9] “Flash (photography),” *Wikipedia*. [Online]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Flash_\(photography\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Flash_(photography)).
- [10] B. Jay, “Dangers in the Dark.”
- [11] O. N. Solbert, B. Newhall, and J. G. Card, “The First Flash Bulb,” *J. Photogr. Georg. Eastman House. Rochester, N.Y*, vol. II, no. 6, 1953.
- [12] E. P. Wightman, *Photoflash 62 Years Ago*, vol. IV, no. 7. Journal of Photography of the George Eastman House, 1955.
- [13] I. Tolmachev, “A Brief History of Photographic Flash,” 2011. [Online]. Available: <https://photography.tutsplus.com/articles/a-brief-history-of-photographic-flash--photo-4249>.
- [14] H. E. EDGERTON and J. R. KILLIAN, *Moments of vision - The stroboscopic revolution in photography*. MIT Press, 1984.
- [15] H. E. Edgerton, *Electronic flash, strobe*. McGraw-Hill, 1970.

- [16] "EG&G the Company: 1947 Onwards." [Online]. Available: <http://edgerton-digital-collections.org/docs-life/egg-the-company>.
- [17] "Latest Features | physics.org." [Online]. Available: <http://www.physics.org/featuredetail.asp?NewsId=21>.
- [18] "Attosecond Technology - the project." [Online]. Available: <http://www.attosecond.org/the-project/index.asp>.
- [19] Wikipedia, "Air-gap flash," *Wikipedia*. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Air-gap_flash#cite_ref-3.
- [20] C. L. Stong, "An air flash lamp advances color schlieren photography," *Scientific American*, vol. 231, no. 2, pp. 104–109, 1974.
- [21] J. J. ADAM, F. G. Paas, M. J. Buekers, I. J. Wuyts, W. A. Spijkers, and P. Wallmeyer, "Gender differences in choice reaction time: evidence for differential strategies," *Ergonomics*, vol. 42, no. 2, pp. 327–335, Feb. 1999.
- [22] A. Jain, R. Bansal, A. Kumar, and K. D. Singh, "A comparative study of visual and auditory reaction times on the basis of gender and physical activity levels of medical first year students.," *Int. J. Appl. basic Med. Res.*, vol. 5, no. 2, pp. 124–7, 2015.
- [23] W. A. Wickelgren, "Speed-accuracy tradeoff and information processing dynamics," *Acta Psychol. (Amst)*, vol. 41, no. 1, pp. 67–85, Feb. 1977.
- [24] A. T. Welford, "Speed-accuracy trade-off and information processing dynamics," Academic Press, 1934.
- [25] F. Mawase, D. Lopez, P. A. Celnik, and A. M. Haith, "Movement Repetition Facilitates Response Preparation," 2018.
- [26] B. ; Richardson, D. ; Ellis, R. Greenwald, A. ; Celori, J. ; Cherry, and C. Meador, "Reaction Times Differences in Video Game and Non Video Game Players."
- [27] J. McPherson and N. R. Burns, "Assessing the validity of computer-game-like tests of processing speed and working memory," *Behav. Res. Methods*, vol. 40, no. 4, pp. 969–981, Nov. 2008.
- [28] "Reaction times – How fast are you? | IB Maths Resources from British International School Phuket." [Online]. Available: <https://ibmathsresources.com/2015/03/20/reaction-times-how-fast-are-you/>.

- [29] "Human Benchmark - Reaction Time Test." [Online]. Available: <https://www.humanbenchmark.com/tests/reactiontime>.
- [30] R. J. Kosinski, "A Literature Review on Reaction Time."
- [31] N. C. C. Sharp, "Timed running speed of a cheetah (*Acinonyx jubatus*)," *J. Zool.*, vol. 241, no. 3, pp. 493–494, Mar. 1997.
- [32] A. M. Wilson, J. C. Lowe, K. Roskilly, P. E. Hudson, K. A. Golabek, and J. W. McNutt, "Locomotion dynamics of hunting in wild cheetahs," *Nature*, vol. 498, no. 7453, pp. 185–189, Jun. 2013.
- [33] G. F. McCracken, K. Safi, T. H. Kunz, D. K. N. Dechmann, S. M. Swartz, and M. Wikelski, "Airplane tracking documents the fastest flight speeds recorded for bats," *R. Soc. Open Sci.*, vol. 3, no. 11, p. 160398, Nov. 2016.
- [34] B. A. Block, D. Booth, and F. G. Carey, "DIRECT MEASUREMENT OF SWIMMING SPEEDS AND DEPTH OF BLUE MARLIN," 1992.
- [35] "Falling with the Falcon | Flight Today | Air & Space Magazine," *Air Space Magazine*, 2005. [Online]. Available: <https://www.airspacemag.com/flight-today/falling-with-the-falcon-7491768/>.
- [36] "High-Velocity Falcon | National Geographic," *National Geographic*, 2007. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=j3mTPEuFcWk>.
- [37] B. Wilburn, N. Joshi, V. Vaish, M. Levoy, and M. Horowitz, "High-speed videography using a dense camera array," *Proc. 2004 IEEE Comput. Soc. Conf. Comput. Vis. Pattern Recognition, 2004. CVPR 2004.*, vol. 2, pp. 294–301, 2004.
- [38] S. Moulinet and M. Adda-Bedia, "Popping Balloons: A Case Study of Dynamical Fragmentation," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 115, no. 18, pp. 1–5, 2015.
- [39] "Lightning," *Wikipedia*. [Online]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/Lightning#Uman>.
- [40] V. P. Idone, R. E. Orville, D. M. Mach, and W. D. Rust, "The propagation speed of a positive lightning return stroke," *Geophys. Res. Lett.*, vol. 14, no. 11, pp. 1150–1153, Nov. 1987.
- [41] "Lightning flashes and strokes." [Online]. Available: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/electric/lightning2.html>.
- [42] M. A. Uman, *All about lightning*. Dover Publications, 1986.
- [43] M. J. Willegal, "The Accuracy Of Black Powder Muskets," p. 13, 1999.

- [44] "Speed of a Bullet - The Physics Factbook." [Online]. Available: <https://hypertextbook.com/facts/1999/MariaPereyra.shtml>.
- [45] Wikipedia, "Muzzle Velocity." [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Muzzle_velocity#cite_note-5.
- [46] M. Ribble, "Camera Axe." [Online]. Available: <http://www.cameraaxe.com/wp/>.
- [47] Arduino, "Arduino," *Arduino*. [Online]. Available: <https://www.arduino.cc/>.
- [48] Atmel, "ATmega328 / P," 2016.
- [49] A. Morgan, "Camera Axe 5 User Manual," 2013.
- [50] "SmaTrig 2.1 - The improved smart 15-in-1 trigger for DSLRs." [Online]. Available: <http://www.doc-diy.net/photo/smatrig21/>.
- [51] "Universal Photo Timer - Hand-held Flash Trigger and Camera Timer." [Online]. Available: <http://www.universaltimer.com/home.html>.
- [52] TriggerTrap, "Triggertrap Ada: Modular Camera Trigger by Triggertrap — Kickstarter," *Kickstarter*. [Online]. Available: <https://www.kickstarter.com/projects/triggertrap/triggertrap-redsnap-modular-camera-trigger>.
- [53] Wikipedia, "Central Processing Unit." [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Central_processing_unit#Microprocessors.
- [54] V. Zhislina, *Why has CPU frequency ceased to grow?* Intel.
- [55] M. Rouse, *Definition: multi-core processor*. TechTarget, 2007.
- [56] R. Birkby, "A Brief History of the Microprocessor," *computermuseum.li*.
- [57] Intel Corporation, "Intel Microprocessor Quick Reference Guide - Product Family." [Online]. Available: <https://www.intel.com/pressroom/kits/quickreffam.htm>.
- [58] cpubenchmars.net, "PassMark CPU Benchmarks - Low End CPUs." [Online]. Available: https://www.cpubenchmark.net/low_end_cpus.html.
- [59] https://www.cpubenchmark.net/cpu_value_available.html
- [60] <https://pangoly.com/en/chart/cpu>
- [61] Wikipedia, "List of CPU power dissipation figures." [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_CPU_power_dissipation_figures.

- [62] N. Brown, "Computer Power Consumption: How Much Energy Computers Consume." [Online]. Available: <https://www.kompulsa.com/much-power-computers-consume/>.
- [63] Advanced Micro Devices, "Processor Specifications | AMD." [Online]. Available: <https://www.amd.com/en/products/specifications/processors>.
- [64] Intel®, "Intel® Product Specifications." [Online]. Available: <https://ark.intel.com/#@Processors>.
- [65] Xilinx, "XILINX INC (Form Type: 8-K, Filing Date: 04/26/2006)." [Online]. Available: <http://edgar.secdatabase.com/657/110465906027899/filing-main.htm>.
- [66] Wikipedia, "Field-programmable gate array." [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Field-programmable_gate_array.
- [67] S. Mittal, "A survey of FPGA-based accelerators for convolutional neural networks," *Neural Comput. Appl.*, Oct. 2018.
- [68] "How Microsoft Is Using FPGAs To Speed Up Bing Search." [Online]. Available: <https://www.enterprisetech.com/2014/09/03/microsoft-using-fpgas-speed-bing-search/>.
- [69] D. Wang, J. An, and K. Xu, "PipeCNN: An OpenCL-Based FPGA Accelerator for Large-Scale Convolution Neuron Networks," Nov. 2016.
- [70] A. X. M. Chang, A. Zaidy, V. Gokhale, and E. Culurciello, "Compiling Deep Learning Models for Custom Hardware Accelerators," Jul. 2017.
- [71] C. Baskin, N. Liss, E. Zheltonozhskii, A. M. Bronshtein, and A. Mendelson, "Streaming Architecture for Large-Scale Quantized Neural Networks on an FPGA-Based Dataflow Platform," Jul. 2017.
- [72] Intel, "FPGA/CPLD Product Search." [Online]. Available: <https://www.intel.com/content/www/us/en/programmable/buy.html>.
- [73] Xilinx, "Boards, Kits, and Modules." [Online]. Available: <https://www.xilinx.com/products/boards-and-kits.html>.
- [74] W. Joel, "Cheap FPGA Development Boards | Joel's Compendium of Total Knowledge." [Online]. Available: <https://joelw.id.au/FPGA/CheapFPGADevelopmentBoards>
- [75] G. Morton and K. Venkat, "Msp430 competitive benchmarking," 2005.

- [76] AliExpress, "STM32 Family." [Online]. Available: https://www.aliexpress.com/wholesale?catId=0&initiative_id=SB_20181214113828&origin=y&SearchText=stm32.
- [77] Microchip, "PIC10F200 - 8-bit Microcontrollers - Microcontrollers and Processors." [Online]. Available: <https://www.microchip.com/wwwproducts/en/PIC10F200>.
- [78] Wikipedia, "Microcontroller." [Online]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/Microcontroller>.
- [79] Mouser Greece, "EFM8BB10F2G-A-QFN20 Silicon Labs." [Online]. Available: <https://gr.mouser.com/ProductDetail/Silicon-Labs/EFM8BB10F2G-A-QFN20/?qs=sGAEpiMZZMu9ReDVvI6ax9sqO0qrXIDW4ZuhKcnb2c%252bQvyUXU1UbuQ%3D%3D>.
- [80] Mouser Greece, "MSP430G2001IPW14R Texas Instruments." [Online]. Available: <https://gr.mouser.com/ProductDetail/Texas-Instruments/MSP430G2001IPW14R/?qs=sGAEpiMZZMvfhsTlJjecML5mLnp8Cec4esZ6%2F1aK7FQ%3D>.
- [81] Atmel, "Microcontroller Bytes In-System Programmable Flash ATtiny25 / V * ATtiny45 / V ATtiny85 / V * * Preliminary."
- [82] AliExpress, "laser transmitter on AliExpress.com." [Online]. Available: https://www.aliexpress.com/wholesale?catId=400103&initiative_id=AS_20181204121411&SearchText=laser+transmitter.
- [83] AliExpress, "laser receiver module on AliExpress.com." [Online]. Available: https://www.aliexpress.com/wholesale?catId=400103&initiative_id=AS_20181204121614&SearchText=laser+receiver+module.
- [84] AliExpress, "laser transmitter receiver on AliExpress.com." [Online]. Available: https://www.aliexpress.com/wholesale?catId=0&initiative_id=AS_20181204121949&SearchText=laser+transmitter+receiver.
- [85] Wikipedia, "Bluetooth." [Online]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/Bluetooth>.
- [86] M. Collotta, G. Pau, T. Talty, and O. K. Tonguz, "Bluetooth 5: A Concrete Step Forward toward the IoT," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 56, no. 7, pp. 125–131, 2018.
- [87] S. Gmbh and C. Kg, "Satellite Navigation Digital Standards for R & S ® SMBV Operating Manual," vol. 09.

- [88] P. Chatzimisios, A. Iossifides, and J. Alonso-Zarate, "Past , Present and Future of IEEE 802 . 11 Toward Wireless Gigabit Experience," 2005.
- [89] Wikipedia, "IEEE 802.11ac." [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/IEEE_802.11ac.
- [90] Silicon Labs, "Bluetooth Mesh, Thread, and Zigbee Mesh Network Performance Benchmarking | Silicon Labs." [Online]. Available: <https://www.silabs.com/products/wireless/learning-center/mesh-performance>.
- [91] R.Andrei Gheorghiu, V. Iordache "Use of Energy Efficient Sensor Networks to Enhance Dynamic Data Gathering Systems: A Comparative Study between Bluetooth and ZigBee", 2018
- [92] Bluetooth Special Interest Group, "SIG INTRODUCES BLUETOOTH LOW ENERGY WIRELESS TECHNOLOGY THE NEXT GENERATION OF BLUETOOTH WIRELESS TECHNOLOGY | Bluetooth Technology Website."
- [93] AliExpress.com, "Wifi modules." [Online]. Available: https://www.aliexpress.com/wholesale?catId=400103&initiative_id=AS_20181225101506&origin=y&SearchText=wifi+arduino.
- [94] AliExpress, "bluetooth transceiver." [Online]. Available: https://www.aliexpress.com/wholesale?catId=400103&initiative_id=AS_20181205133230&SearchText=bluetooth+transceiver.
- [95] Wikipedia, "Zigbee." .
- [96] B. Ince, A. T., Elma, O., Selamogullari, U.S., Vural, "Data Reliability and Latency Test for ZigBee-based Smart Home Energy Management Systems," *7th Int. Ege Energy Symp. Exhib.*, no. November 2015, 2014.
- [97] M. S. Saraireh and C. Engineering, "Performance Analysis of Guaranteed Time Slots Allocation in IEEE 802 . 15 . 4 Protocol over Radio," *Middle-East J. Sci. Res.*, vol. 13, no. 9, pp. 1137–1143, 2013.
- [98] M. S. Pan and P. L. Liu, "Low latency scheduling for convergecast in ZigBee tree-based wireless sensor networks," *J. Netw. Comput. Appl.*, vol. 46, pp. 252–263, 2014.
- [99] Mouser Greece, "XKB2-Z7T-WTZM Digi International." [Online]. Available: https://gr.mouser.com/ProductDetail/Digi-International/XKB2-Z7T-WTZM?qs=%2FPVulymFwT1RkG4ou5dviA%3D%3D&utm_source=eciaauthorized&utm_

medium=aggregator&utm_campaign=XKB2-Z7T-WTSM&utm_term=XKB2-Z7T-WTSM&utm_content=Digi-International

- [100] Arrow.com, “XKB2-Z7T-WTSM by Digi International.” [Online]. Available: https://www.arrow.com/en/products/xkb2-z7t-wtzm/digi-international?utm_source=eciaauthorized&utm_medium=aggregator&utm_campaign=acna_ecia_2018&utm_content=inv_listing&utm_keyword=XKB2-Z7T-WTSM.
- [101] DigiKey, “XBP24CZ7PIT-004.” [Online]. Available: https://www.digikey.com/product-detail/en/digi-international/XBP24CZ7PIT-004/602-1561-ND/5322375?WT.z_cid=ref_neda_dkc_buynow_digiintl&utm_source=ecia&utm_medium=aggregator&utm_campaign=digiintl.
- [102] Mouser Greece, “XB24CZ7PIT-004.” [Online]. Available: https://gr.mouser.com/ProductDetail/Digi-International/XB24CZ7PIT-004?qs=3VJ0tGt%252bi1yrO1ndfRTb8g%3D%3D&utm_source=eciaauthorized&utm_medium=aggregator&utm_campaign=XB24CZ7PIT-004&utm_term=XB24CZ7PIT-004&utm_content=Digi-International
- [103] DigiKey, “XB24CZ7PIT-004.” [Online]. Available: https://www.digikey.com/product-detail/en/digi-international/XB24CZ7PIT-004/602-1557-ND/5322371?WT.z_cid=ref_neda_dkc_buynow_digiintl&utm_source=ecia&utm_medium=aggregator&utm_campaign=digiintl.
- [104] Nordic, “nRF24L01+ Single Chip 2.4GHz Transceiver Product Specification v1.0,” *Build. Res.*, no. 1, p. 78, 2008.
- [105] Arduino, “Arduino Mega 2560 Rev3 | Arduino Official Store,” *Arduino*. [Online]. Available: <https://store.arduino.cc/arduino-mega-2560-rev3>.
- [106] Microchip, “Home | Microchip Technology.” [Online]. Available: <https://www.microchip.com/>.
- [107] Microchip Technology Inc., “ATmega2560.” Microchip Technology Inc.
- [108] Microchip Technology Inc., “ATmega640/V-1280/V-1281/V-2560/V-2561/V.” Microchip Technology Inc., p. 436.
- [109] Arduino, “Arduino Nano.” [Online]. Available: <https://store.arduino.cc/arduino-nano>.
- [110] Microchip Technology Inc., “ATmega328P.” [Online]. Available: ATmega328P.
- [111] Microchip Technology Inc., “ATmega328P 8-bit AVR.” Microchip Technology Inc., p. 294.

- [112] Nordic Semiconductor, “Home - Ultra Low Power Wireless Solutions from NORDIC SEMICONDUCTOR.” [Online]. Available: <https://www.nordicsemi.com/>.
- [113] AliExpress, “37 IN 1 SENSOR KIT.” [Online]. Available: <https://www.aliexpress.com/item/37-IN-1-SENSOR-KITS-FOR-ARDUINO-HIGH-QUALITY-FREE-SHIPPING-Works-with-Official-for-Arduino/32649847420.html?spm=a2g0s.9042311.0.0.27424c4dTnYzec>.
- [114] TMRH20, “RF24.” TMRH20.
- [115] STMicroelectronics, “STM32F103C8 - Mainstream Performance line, ARM Cortex-M3 MCU with 64 Kbytes Flash, 72 MHz CPU, motor control, USB and CAN - STMicroelectronics.” [Online]. Available: <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32f103c8.html>.
- [116] STMicroelectronics, “STM32F103x8 STM32F103xB: Medium-density performance line ARM®-based 32-bit MCU with 64 or 128 KB Flash, USB, CAN, 7 timers, 2 ADCs, 9 com. interfaces [datasheet],” no. August, pp. 1–117, 2015.
- [117] J. Daemen *et al.*, “The RISC-V Instruction Set Manual, Volume I: User-Level ISA, Version 2.0,” *Sci. Technol.*, vol. 226, no. January, p. 3, 2014.
- [118] Mouser.com, “STM32F103C8T6 Mouser Price.” [Online]. Available: https://gr.mouser.com/_/?Keyword=STM32F103C8T6&bws=1.