



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

**Ανάπτυξη ενός IoT συστήματος αισθητήρα
ανίχνευσης του COVID-19 με χρήση LoRaWAN για
την παρακολούθηση της εξάπλωσης του ιού στις
υπαίθριες περιοχές**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ηλίας Δ. Εξουζίδης

Επιβλέπων Καθηγητής:

Ευάγγελος Β. Χριστοφόρου

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Νοέμβριος 2022



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

**Ανάπτυξη ενός IoT συστήματος αισθητήρα ανίχνευσης του COVID-19 με χρήση
LoRaWAN για την παρακολούθηση της εξάπλωσης του ιού στις υπαίθριες
περιοχές**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ηλίας Εξουζίδης

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 15^η Νοεμβρίου 2022.

.....
Ευάγγελος Χριστοφόρου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Ιωάννης Γκόνος
Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Γιώργος Ματσόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Ηλίας Δ. Εξουζίδης

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Ηλίας Εξουζίδης, 2022.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ' ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η πανδημία του COVID-19 έχει αποδειχθεί ότι αποτελεί μείζονα και συνεχή απειλή για την ανθρωπότητα, ακόμα και περίπου δύο χρόνια μετά την έξαρση της, καθώς οι πολυποίκιλες μεταλλάξεις, σε συνδυασμό με την ταχύτατη μετάδοση του ιού, συμβάλλουν στη διαρκή αναζωπύρωση του αριθμού των μολύνσεων. Ειδικότερα, στις απομακρυσμένες υπαίθριες περιοχές του πλανήτη οι επιπτώσεις καθίστανται ισχυρότερες, εξαιτίας της έλλειψης ιατροφαρμακευτικού προσωπικού, των ανεπαρκών εγκαταστάσεων υγειονομικής περίθαλψης και της δυσμενής πρόσβασης σε αυτές, καθώς και του δημογραφικού χαρακτήρα που παρουσιάζεται (υψηλότερα ποσοστά ηλικιωμένων κατοίκων). Η ανάδυση και ραγδαία εξέλιξη της τεχνολογίας του Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT), έχει επεκτείνει το φάσμα εφαρμογών των δικτύων επικοινωνίας δεδομένων σε νέους καινοτόμους τομείς. Συγκεκριμένα, η αιφνίδια εμφάνιση του νέου κορονοϊού ανέδειξε την δυνατότητα αξιοποίησης του IoT στον τομέα διαχείρισης εφαρμογών που σχετίζονται με την ηλεκτρονική υγεία, ως ένα δίκτυο αποτελούμενο από ενσωματωμένους αισθητήρες λήψης και αποθήκευσης δεδομένων. Η τεχνολογία του Διαδικτύου των Πραγμάτων διαθέτει ικανότητες μετάδοσης δεδομένων σε μεγάλη εμβέλεια και επιτρέπει στον ιατρικό κλάδο να ελέγχει από απόσταση τους ηλικιωμένους ασθενείς, τις ζωτικές τους ενδείξεις καθώς και την εφαρμογή των μέτρων της καραντίνας, μέσω της συλλογής κατάλληλων τιμών και πληροφοριών από τις αισθητήριες διατάξεις. Στην παρούσα διπλωματική εργασία, αφού εξετάστηκαν τα βασικά χαρακτηριστικά και οι κοινωνικές επιπτώσεις του SARS-CoV-2, ερευνήθηκε εν συντομία η αρχή των βιοαισθητήρων ανίχνευσης και αναλύθηκε εκτενώς η τεχνολογία του IoT, καθώς και οι εφαρμογές του στην προσπάθεια περιορισμού της εξάπλωσης του ιού. Τέλος, στο πλαίσιο της εργασίας, αναπτύχθηκε μια IoT διάταξη βιοαισθητήρα ανίχνευσης COVID-19, αποτελούμενη από έναν πυκνωτή ενδοδιαπλεκόμενων ηλεκτροδίων, με χρήση του πρωτοκόλλου επικοινωνίας LoRaWAN, του διακομιστή δικτύου The Things Stack Community Edition και της Cloud πλατφόρμας TagoIO.

Λέξεις Κλειδιά: Βιοαισθητήρας COVID-19, Πανδημία στις υπαίθριες περιοχές, Διαδίκτυο των Πραγμάτων, LoRaWAN, Εφαρμογές IoT στον COVID-19

ABSTRACT

The COVID-19 pandemic has proven to be a major and ongoing threat to humanity, even nearly two years after its outbreak, as the diverse mutations, combined with the rapid transmission of the virus, contribute to the constant resurgence in the number of infections. In particular, in the alienated rural areas of the world, the impact is more severe due to the lack of medical personnel, the inadequate health care facilities with unfavorable access, and the demographic nature of these lands (higher proportion of elderly residents). The emergence and rapid development of the Internet of Things (IoT) technology has expanded the range of applications of data communication networks into new innovative areas. In particular, the sudden emergence of the new coronavirus has highlighted the potential of exploiting the IoT in the field of e-Health related application management, as a network consisting of embedded sensors for data acquisition and storage. IoT technology has long-range data transmission capabilities and allows the medical industry to remotely monitor elderly patients, their vital signs, as well as the application of quarantine measures by collecting appropriate values and information from its sensor devices. In this thesis, after reviewing the key characteristics and societal implications of SARS-CoV-2, the principle of biosensor detection was briefly explored and the IoT technology, along with its applications in the effort to limit the spread of the virus were extensively discussed. Finally, as part of this thesis, an IoT device comprised of a COVID-19 biosensor, consisting of an interconnected electrode capacitor, was developed using the LoRaWAN communication protocol, The Things Stack Community Edition network server and the TagoIO Cloud platform.

Keywords: COVID-19 biosensor, Pandemic in rural areas, Internet of Things, LoRaWAN, IoT applications in COVID-19

Πρόλογος - Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε το έτος 2022 στον Τομέα Επικοινωνιών, Ηλεκτρονικής και Συστημάτων Πληροφορικής της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου και ολοκληρώθηκε τον Οκτώβριο του συγκεκριμένου έτους. Το θέμα της εργασίας αποτελεί η τεχνολογία των βιοαισθητήρων και του Διαδικτύου των Πραγμάτων(Internet of Things), καθώς και οι εφαρμογές τους στην αντιμετώπιση της νέας πανδημίας του COVID-19.

Επιβλέποντας καθηγητής μου ήταν ο κύριος Ευάγγελος Χριστοφόρου, τον οποίο θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά για την συνεχή καθοδήγηση και εμπιστοσύνη του στην εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας, καθώς και για την ευκαιρία που μου προσέφερε με την ανάθεση της, να ασχοληθώ με ένα εξαιρετικά επίκαιρο και σύγχρονο ερευνητικό πεδίο. Επιπλέον, οφείλω να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον υποψήφιο διδάκτορα κύριο Αντώνη Γεωργά, για την εξαιρετική συνεργασία και υποστήριξη που μου παρείχε, καθώς και για τις ανεκτίμητες συμβουλές του στα προβλήματα που εμφανίστηκαν κατά την διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας. Παράλληλα, θα ήθελα να ευχαριστήσω την κοπέλα μου και τους φίλους μου για την έμπρακτη συμπαράσταση τους όλα αυτά τα χρόνια. Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στην οικογένεια μου για την στήριξή της και όλα τα εφόδια που μου προσέφερε, ώστε να πραγματοποιήσω τους στόχους μου.

Εξουζίδης Ηλίας
24 Οκτωβρίου 2022

Πίνακας Περιεχομένων

ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ	1
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο	1
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
<i>1.1 Περιγραφή και προέλευση του SARS-CoV-2</i>	<i>1</i>
<i>1.2 Δομή του SARS-CoV-2.....</i>	<i>3</i>
<i>1.3 Το ένζυμο ACE-2.....</i>	<i>4</i>
<i>1.4 Μέθοδοι ανίχνευσης του COVID-19</i>	<i>6</i>
<i>1.5 Η κρίση του COVID-19 στην παγκόσμια κοινότητα.....</i>	<i>11</i>
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο	21
ΒΙΟΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ.....	21
<i>2.1 Ορισμός και δομικά στοιχεία βιοαισθητήρων</i>	<i>21</i>
<i>2.2 Κατηγορίες βιοαισθητήρων</i>	<i>23</i>
<i>2.3 Χωρητικοί βιοαισθητήρες.....</i>	<i>27</i>
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο	28
ΤΟ ΔΙΑΔΙΚΤΥΟ ΤΩΝ ΠΡΑΓΜΑΤΩΝ (ΙΟΤ)	28
<i>3.1 Αρχιτεκτονική του Διαδικτύου των Πραγμάτων</i>	<i>30</i>
<i>3.2 Το Οικοσύστημα του ΙοΤ</i>	<i>34</i>
<i>3.3 Εξοπλισμός του ΙοΤ.....</i>	<i>38</i>
<i>3.4 Πρωτόκολλα επικοινωνίας.....</i>	<i>49</i>
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο	59
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΚΑΙ ΙΟΤ ΣΤΗΝ COVID-19 ΕΠΟΧΗ	59

4.1	<i>Healthcare IoT για την διαχείριση της πανδημίας.....</i>	61
4.2	<i>Προσπάθειες έρευνας και ανάπτυξης του IoT υγειονομικής φροντίδας στην περίοδο της πανδημίας του COVID-19.....</i>	64
	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ.....	72
	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο	72
5.1	<i>Στοιχεία πειραματικής διάταξης.....</i>	72
5.1.1	<i>Η γλώσσα προγραμματισμού Python και η βιβλιοθήκη pySerial</i>	73
5.1.2	<i>Μικροελεγκτής και Gateway.....</i>	78
5.1.3	<i>Πρωτόκολλο επικοινωνίας LoRaWAN.....</i>	84
5.1.4	<i>Τα δίκτυα The Things Stack και The Things Network</i>	109
5.2	<i>Διαδικασία Πειράματος</i>	117
5.2.1	<i>Ανάλυση λειτουργίας του βιοαισθητήρα και του κυκλώματος ανάγνωσής του ...</i>	117
5.2.2	<i>Διαδικασία λήψης, επεξεργασίας και αποστολής δεδομένων μέσω Python</i>	118
5.2.3	<i>Δημιουργία εφαρμογής στο The Things Stack.....</i>	124
5.2.4	<i>Λήψη δεδομένων από τη συσκευή και αποστολή στο δίκτυο</i>	131
5.2.5	<i>Αποκωδικοποίηση δεδομένων και integration με το TagoIO.....</i>	139
5.2.6	<i>Μετρήσεις και σχολιασμός αποτελεσμάτων.....</i>	149
	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο	154
	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΑΝΑΦΟΡΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΩΝ ΕΠΕΚΤΑΣΕΩΝ ΤΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ.....	154
6.1	<i>Αξιολόγηση της προτεινόμενης διάταξης.....</i>	154
6.2	<i>Προκλήσεις και μελλοντικές βελτιώσεις.....</i>	156
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ	159

ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Περιγραφή και προέλευση του SARS-CoV-2

Τον Δεκέμβριο του 2019, μια σειρά από οξείες άτυπες αναπνευστικές νόσους εμφανίστηκε στη επαρχία της Γουχάν στην Κίνα και εξαπλώθηκε ραγδαία σε άλλες περιοχές. Σύντομα ανακαλύφθηκε ότι υπεύθυνος ήταν ένας νέος κορονοϊός, ο οποίος ονομάστηκε κορονοϊός σοβαρού οξέος αναπνευστικού συνδρόμου-2(SARS-CoV-2, 2019-nCoV) λόγω της υψηλής ομολογίας(~80%) με τον SARS-CoV, που προκάλεσε σύνδρομο οξείας αναπνευστικής δυσχέρειας (ARDS) και υψηλή θνησιμότητα κατά την περίοδο 2002-2003. Η επιδημία του SARS-CoV-2 θεωρήθηκε ότι ξεκίνησε αρχικά μέσω μιας ζωνοσολογικής μετάδοσης που σχετίζεται με την αγορά θαλασσιών στη περιοχή της Γιουχάν. Μετέπειτα αναγνωρίστηκε ότι η μετάδοση από άνθρωπο σε άνθρωπο διαδραμάτισε καθοριστικό ρόλο στην επακόλουθη επιδημία. Η νόσος που προκλήθηκε από τον ιό ονομάστηκε COVID-19 και κηρύχθηκε πανδημία από τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας(ΠΟΥ) [1].

Οι κορονοϊοί(CoVs) είναι περιβαλλόμενοι, θετικά κατευθυνόμενοι, μονόκλωνοι ιοί RNA. Το μέγεθος του γονιδιώματος των κορονοϊών κυμαίνεται από περίπου 26 έως 32 χιλιοβάσεις, το οποίο είναι το μεγαλύτερο γνωστό γονιδίωμα ενός RNA-ιού [2]. Οι κορονοϊοί ταξινομούνται σε τέσσερις υποοικογένειες, δηλαδή στους α-, β-, γ- και δέλτα-κορονοϊούς. Ενώ οι α- και β-κορονοϊοί προέρχονται από θηλαστικά, ιδίως από νυχτερίδες, οι γ- και δ-κορονοϊοί δημιουργούνται από γουρούνια και πτηνά. Οι β-κορονοϊοί ενδέχεται να προκαλέσουν σοβαρές ασθένειες και θανάτους, ενώ οι α-κορονοϊοί προκαλούν ασυμπτωματικές ή ήπιες συμπτωματικές λοιμώξεις [3].

Οι κορονοϊοί προκαλούν αναπνευστικές, ηπατικές, εντερικές και νευρολογικές ασθένειες. Μέχρι το τέλος του 2019, ταυτοποιήθηκαν έξι είδη κορονοϊών που βρίσκονται σε θέση να προκαλέσουν ασθένειες στον άνθρωπο. Τέσσερα από αυτά (229E, OC43, HKU1, και NL63) είναι κοινά και συνήθως προκαλούν τα τυπικά συμπτώματα μιας ασθένειας που σχετίζεται με το κρυολόγημα, σε ανθρώπους με φυσιολογική ανοσία. Τα άλλα δύο στελέχη - ο κορονοϊός του αναπνευστικού συνδρόμου της Μέσης Ανατολής(MERS-CoV) και ο κορονοϊός του σοβαρού οξέος αναπνευστικού συνδρόμου(SARS-CoV)-είναι ζωνοσογόνα και σχετίζονται με θανατηφόρες ασθένειες . Ο SARS-CoV προκάλεσε κρούσματα σοβαρού οξέος αναπνευστικού συνδρόμου το 2002 και το 2003 στην επαρχία Guangdong, στη νότια Κίνα, τα οποία εξαπλώθηκαν στη Νοτιοανατολική Ασία, τη Βόρεια Αμερική και την Ευρώπη, ξεκινώντας την πρώτη πανδημία του 21ου αιώνα. Ο MERS-CoV εμφανίστηκε στη Σαουδική Αραβία το 2012 και οδήγησε σε επιδημία στη Μέση Ανατολή. Ο ιός παρήγαγε σοβαρή και προοδευτική πνευμονία, η οποία συχνά συνοδεύεται από νεφρική ανεπάρκεια. Επιπλέον, μια ανάλυση ανέδειξε την ομοιότητα του SARS-CoV-2 με τον SARS-CoV, σε ποσοστό ~79%, ενώ με τον MERS-CoV, σε ποσοστό ~50% [2].

Η παλαιότερη μελέτη από το νοσοκομείο Jīn-yīn-tān στη Γιουχάν περιέγραψε τα κλινικά χαρακτηριστικά των πρώτων 41 εργαστηριακά επιβεβαιωμένων ασθενών με COVID-19, συμπεριλαμβανομένων 30 ανδρών και 11 γυναικών με διάμεση ηλικία τα 49 έτη. Συνολικά, το 66% των ασθενών είχε εκτεθεί στη αγορά θαλασσινών Huanan Seafood Market της περιοχής, ενώ παράλληλα παρατηρήθηκε 1 οικογενειακό σύμπλεγμα λοίμωξης SARS-CoV-2. Σε αυτό το δείγμα ανθρώπων, 13 εισήχθησαν σε μονάδα εντατικής θεραπείας και 6 κατέληξαν. Ορισμένοι ασθενείς είχαν άλλα προβλήματα υγείας, όπως διαβήτη, υπέρταση, καρδιαγγειακή νόσο, χρόνια αποφρακτική πνευμονοπάθεια, χρόνια ηπατική νόσο, και καρκίνο. Τα κλινικά συμπτώματα παρουσιάζονταν συναφή μ' άλλες οξείες αναπνευστικές λοιμώξεις, συμπεριλαμβανομένων των SARS-COV και MERS-COV. Στην περίπτωση του COVID-19, οι ασθενείς διαθέτουν συνήθως πυρετό, βήχα, δύσπνοια και μυαλγία ή κόπωση . Παράλληλα, υπάρχει πιθανότητα να εμφανιστούν και άλλα συμπτώματα, όπως παραγωγή πτυέλων, πονοκέφαλος, αιμόπτυση και διάρροια. Ο διάμεσος χρόνος από την έναρξη των συμπτωμάτων έως την πρώτη εισαγωγή στο νοσοκομείο, τη δύσπνοια, το σύνδρομο οξείας αναπνευστικής δυσχέρειας(ARDS), τον μηχανικό αερισμό και την εισαγωγή στη MEΘ υπολογίστηκε στις 7, 8, 9, 10.5 και 10.5 ημέρες, αντίστοιχα [4]. Η λοίμωξη ενδέχεται να εξελιχθεί σε σοβαρή νόσο με δύσπνοια και ισχυρά θωρακικά συμπτώματα, που

αντιστοιχούν σε πνευμονία σε ποσοστό περίπου 75% των προσβεβλημένων ανθρώπων, όπως φαίνεται από την υπολογιστική τομογραφία κατά την εισαγωγή του κάθε ασθενούς. Η πνευμονία εμφανίζεται κυρίως στην δεύτερη ή τρίτη εβδομάδα μιας συμπτωματικής λοίμωξης. Τα εμφανή σημεία της ιογενούς πνευμονίας περιλαμβάνουν μειωμένο κορεσμό οξυγόνου, αποκλίσεις των αερίων του αίματος, και ορατές αλλαγές μέσω των ακτινογραφιών θώρακος και άλλων απεικονιστικών τεχνικών, που τελικά υποδηλώνουν επιδείνωση [3].

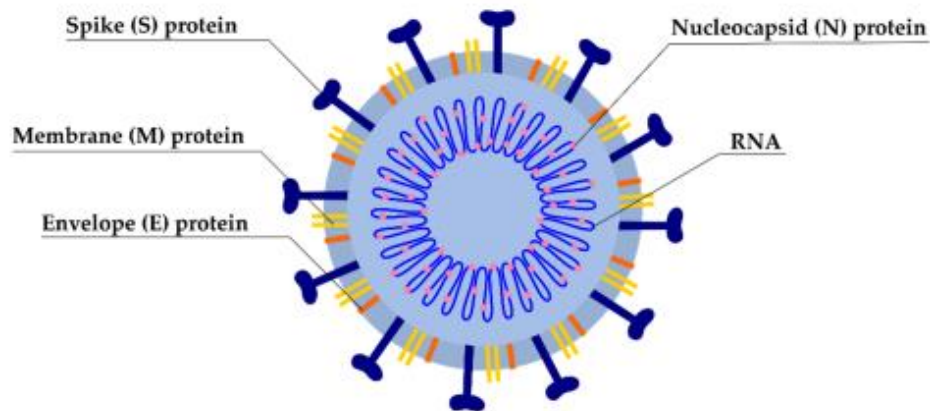
1.2 Δομή του SARS-CoV-2

Ο SARS-CoV-2 είναι ένας Betacoronavirus που κατατάσσεται στο υπογένος Sarbecovirus της οικογένειας Coronaviridae, διαφέροντας έτσι από τον ιό SARS-CoV. Ωστόσο, όπως ισχύει για τους ιούς SARS-CoV και MERS-CoV, οι νυχτερίδες ενδέχεται να αποτέλεσαν τη φυσική προέλευση και του SARS-CoV-2. Ο νέος κορονοϊός διαθέτει από 86,9% έως και 96% ομοιότητα στην νουκλεοτιδική αλληλουχία του με πολλαπλά στελέχη ιών νυχτερίδων, πανομοιότυπα δομημένων με αρκετούς SARS κορονοϊούς, όπως οι ZC45, ZXC21 και RaTG3, οι οποίοι εντάσσονται στην ίδια γενεαλογική γραμμή ιών(B), αλλά βρίσκονται σε διαφορετικούς κλάδους [4].

Τα σωματίδια του SARS-CoV-2 περιτυλίσσονται με εμφανείς ακίδες(spikes), ενώ είναι σφαιρικά και το μέγεθός τους κυμαίνεται από 65 έως 125 νανόμετρα. Ο ιός διαθέτει τέσσερις κύριες δομικές πρωτεΐνες, συμπεριλαμβανομένης της ακιδωτής γλυκοπρωτεΐνης(S), της πρωτεΐνης του μεμβρανοειδούς φακέλου(E), της μεμβρανικής γλυκοπρωτεΐνης(M) και της πρωτεΐνης του νουκλεοκαψιδίου(N). Παράλληλα, περιλαμβάνει 16 μη δομικές πρωτεΐνες (NSPs) καθώς και πολυάριθμες άλλες με υποστηρικτικό χαρακτήρα. Η γλυκοπρωτεΐνη(S) αποτελεί μια σημαντική πρωτεΐνη, η οποία διαδραματίζει κρίσιμο ρόλο στην προσκόλληση, τη σύντηξη, την είσοδο και τη μετάδοση του ιού. Η πρωτεΐνη(S) διασπάται στο κύτταρο-ξενιστή, από την πρωτεάση, σε δύο υπομονάδες που ονομάζονται S1 και S2. Η S1 χαρακτηρίζεται υπεύθυνη για τον προσδιορισμό του εύρους του ιού ξενιστή και τον κυτταρικό τροπισμό με την περιοχή πρόσδεσης του υποδοχέα. Η S2 λειτουργεί ως ενδιάμεσος παράγοντας στην ιική σύντηξη κατά τη μετάδοση στο κύτταρο ξενιστή [2]. Η υπομονάδα S1, που περιέχει την περιοχή πρόσδεσης του υποδοχέα(RBD), απελευθερώνεται κατά τη μετάβαση στη διαμόρφωση, μετά τη διαδικασία

σύντηξης, ενώ η αγκυρωμένη στην μεμβράνη υπομονάδα S2 περιλαμβάνει τον μηχανισμό συγχώνευσης [4].

Η πρωτεΐνη N συνδέεται με το RNA και εμπλέκεται σε διεργασίες που σχετίζονται με το ιικό γονιδίωμα, τον κύκλο αντιγραφής του ιού, την ιογενή λοίμωξη και την κυτταρική απόκριση του ξενιστή. Η M πρωτεΐνη αποτελεί την πιο δομημένη πρωτεΐνη και διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στον καθορισμό του σχήματος φακέλου του ιού. Η σύνδεση με την πρωτεΐνη αυτή καθίσταται απαραίτητη για τη σταθεροποίηση του νουκλεοκαψιδίου ή της πρωτεΐνης N και προάγει την ολοκλήρωση της συναρμολόγησης του ιού, μέσω της σταθεροποίησης της πρωτεΐνης N-RNA στο εσωτερικό του. Η λειτουργία της πρωτεΐνης E, η οποία θεωρείται η μικρότερη πρωτεΐνη του ιού, είναι να συμμετέχει στην παραγωγή και την ωρίμανση του [2]. Στο Σχήμα 1.1 απεικονίζεται η δομή του μορίου του COVID-19.



Σχήμα 1.1: Σχηματική δομή του SARS-CoV-2 [2].

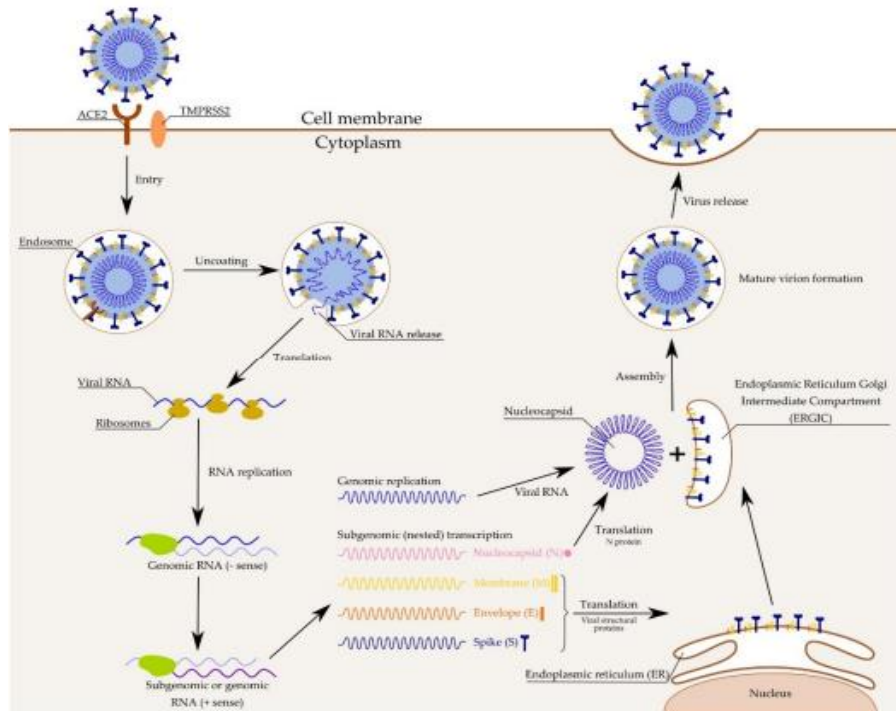
1.3 Το ένζυμο ACE-2

Η ανθρώπινη καρβοξυπεπτιδάση ACE-2, που σχετίζεται με το μετατρεπτικό ένζυμο της αγγειοτενσίνης, κωδικοποιείται από το γονίδιο ACE-2, το οποίο χαρτογραφείται στο χρωμόσωμα Xp22. Η ACE-2 είναι μια διαμεμβρανική πρωτεΐνη τύπου I, η οποία αποτελείται από μια

εξωκυτταρική περιοχή, που περιλαμβάνει την τοποθεσία της καρβοξυπεπτιδάσης και μια σύντομη ενδοκυτταρική, C-τελική, κυτταροπλασματική ουρά [5].

Το μετατρεπτικό ένζυμο-2 της αγγειοτενσίνης(ACE-2) είναι ο κύριος υποδοχέας του SARS-CoV-2 και διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην κυτταρική είσοδο. Έχει αναφερθεί ότι το ACE-2 βρίσκεται στα κυψελιδικά κύτταρα τύπου II των πνευμόνων(AT2), στον ανώτερο οισοφάγο, στα στρωματοποιημένα επιθηλιακά κύτταρα, στα απορροφητικά εντεροκύτταρα του παχέος εντέρου και του ειλεού, στα κύτταρα των εγγύς σωληναρίων των νεφρών, στα ουροθηλιακά κύτταρα της ουρουδόχου κύστης και στα κύτταρα του μυοκαρδίου. Η διαδικασία εισόδου του ιού στο κύτταρο ξεκινά όταν η πρωτεΐνη(S) του μορίου του COVID-19 συνδέεται με την ACE-2 στα κύτταρα του ξενιστή. Στη συνέχεια, η μεμβράνη του ιού συγχωνεύεται με το κύτταρο ξενιστή. Ακολούθως, η διαμεμβρανική πρωτεάση σερίνης τύπου II(TMPRSS2), η οποία βρίσκεται στην επιφάνεια του κυττάρου ξενιστή αφαιρεί το ένζυμο ACE-2 και ενεργοποιεί τον υποδοχέα, προσκολλώντας με τρόπο ανάλογο των (S) πρωτεϊνών. Η ενεργοποίηση των (S) πρωτεϊνών οδηγεί σε μεταβολές διαμόρφωσης και επιτρέπει στον ιό να εισέλθει στα κύτταρα μέσω του ενδοσωματικού μονοπατιού. Συνεπώς, οι TMPRSS2 και ACE-2 αποτελούν τους καθοριστικούς παράγοντες της εισόδου του ιού στον ανθρώπινο οργανισμό [2].

Παράλληλα, καθώς ο SARS-CoV-2 εκμεταλλεύεται το ACE-2 για την είσοδο στον ανθρώπινο οργανισμό, συγκεκριμένοι επιστήμονες ανησυχούν ότι η έκφραση του ενζύμου ενδέχεται να παρέχει πιθανές πλεονεκτικές οδούς διέλευσης του ιού. Συνεπώς, συνιστούν στους ασθενείς με υπέρταση, διαβήτη και καρδιαγγειακά νοσήματα να ελαττώσουν τη χρήση των αναστολέων του MEA και των Ang II-AT1 αποκλειστών, καθώς τα φάρμακα αυτά δύναται να αυξήσουν την ποσότητα του ACE-2, που διατίθεται στον οργανισμό. Επιπλέον, η ιβουπροφαίνη και οι θειαζολιδινεδιόνες χαρακτηρίστηκαν ύποπτες για την ενίσχυση του κινδύνου εμφάνισης του COVID-19 για παρόμοιο λόγο. Ωστόσο, αξίζει να αναφερθεί ότι δεν έχουν εξακριβωθεί ενδείξεις πως τα εν λόγω φάρμακα μπορούν να διευκολύνουν τη μόλυνση από τον νέο κορονοϊό. Τέλος, η έκφραση του ACE-2 αποδείχθηκε πως προστατεύει από σοβαρή οξεία πνευμονική ανεπάρκεια έπειτα από έρευνα που αναπτύχθηκε σε ερευνητικό μοντέλο ποντικού [5]. Στο Σχήμα 1.2 παρουσιάζεται ο μηχανισμός εισόδου του COVID-19 στο κύτταρο ξενιστή.



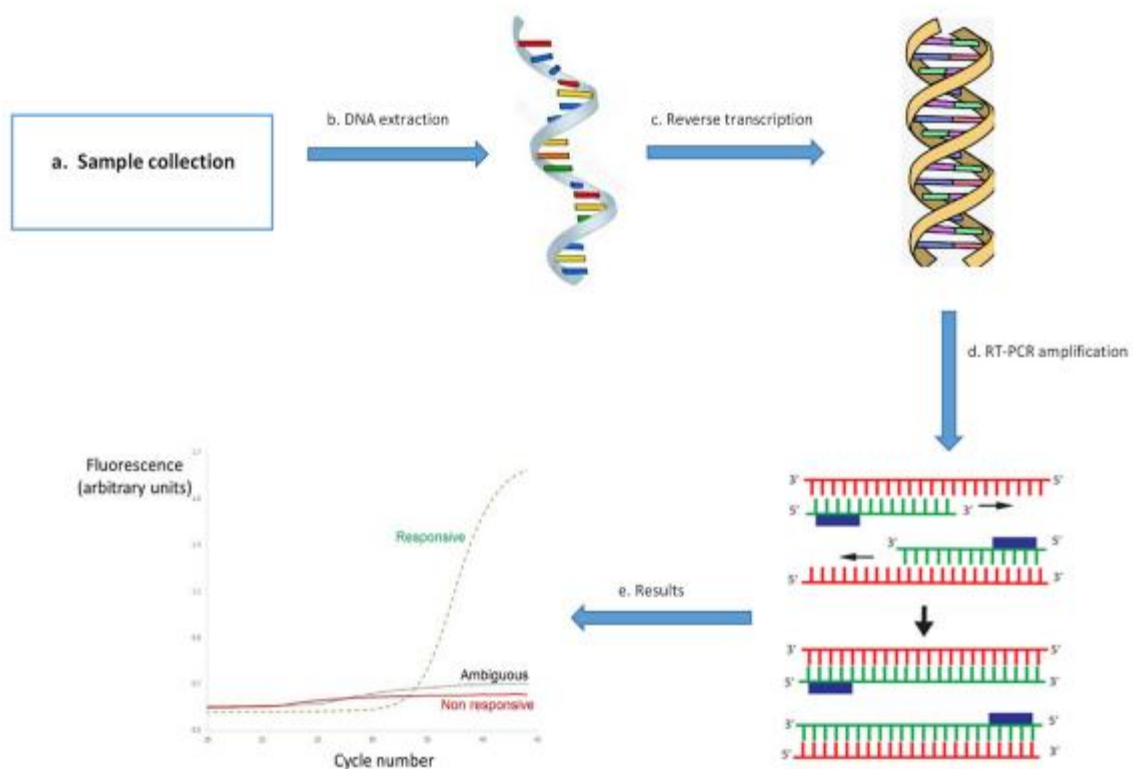
Σχήμα 1.2: Μηχανισμός δράσης του SARS-CoV-2 [2].

1.4 Μέθοδοι ανίχνευσης του COVID-19

Με γνώμονα ότι ο ιός αυτός είναι πρωτοφανής και λόγω έλλειψης εγκεκριμένου φαρμάκου, υπάρχει επείγουσα ανάγκη για πολύ συγκεκριμένα και ευαίσθητα διαγνωστικά μέτρα για τον εντοπισμό των μολυσμένων ατόμων και την απομόνωσή τους με στόχο την αποφυγή της περαιτέρω εξάπλωσης του ιού. Οι δοκιμές ανίχνευσης επισημαίνονται ως υψίστης σημασίας για την επιβράδυνση και την ελαχιστοποίηση της μετάδοσης του COVID-19. Επί του παρόντος, είναι διαθέσιμες πολυάριθμες διαγνωστικές τεχνολογίες για την ανίχνευση του SARS-CoV-2 και αρκετές άλλες οι οποίες βρίσκονται ακόμα υπό ανάπτυξη [6]. Παρακάτω αναλύονται σύντομα ορισμένες από αυτές:

➤ ΕΞΕΤΑΣΗ RT- qPCR

Η εξέταση PCR αποτελεί την πιο χρησιμοποιούμενη μέθοδο ανίχνευσης για τον COVID-19, καθώς η αξιοπιστία της υπερβαίνει τις αντίστοιχες των άλλων διαγνωστικών μεθόδων. Η RT-PCR ή qPCR περιλαμβάνει μια τεχνική μοριακής βιολογίας που αξιοποιείται για τη μελέτη της γονιδιακής έκφρασης σε επίπεδο μεταγραφής. Αρχικά, συλλέγεται ένα βιολογικό δείγμα για την εξαγωγή του ιικού RNA. Κατόπιν σύστασης των Κέντρων Ελέγχου και Πρόληψης Νοσημάτων των ΗΠΑ(CDC), τα δείγματα επιτρέπεται να συλλέγονται τόσο από την ανώτερη αναπνευστική οδό, μέσω ρινοφαρυγγικού ή στοματοφαρυγγικού επιχρίσματος, όσο και από την κατώτερη αναπνευστική οδό. Μετά την απομόνωση του RNA, η ανάλυση του δείγματος αποτελείται από μια διαδικασία δύο βημάτων: μια αντίστροφη μεταγραφή, η οποία μετατρέπει το ιικό RNA σε cDNA, ακολουθούμενη από την ενίσχυση ορισμένων ιικών περιοχών με τη χρήση ειδικών εκκινητών και ανιχνευτών. Ο σχεδιασμός των εκκινητών και των ανιχνευτών καθίσταται θεμελιώδης, λόγω των υψηλών ποσοστών μετάλλαξης του SARS-CoV-2. Επομένως, οφείλει να επιλεγεί μια σχετικά συντηρημένη περιοχή-στόχος προκειμένου να αποφευχθεί η εμφάνιση ψευδώς αρνητικών αποτελεσμάτων. Παράλληλα, η RT-PCR επικεντρώνεται συνήθως σε πολλαπλές περιοχές προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η πιθανότητα εμφάνισης ψευδών αποτελεσμάτων λόγω της ενδεχόμενης διαμόρφωσης μεταλλάξεων του ιού σε μια περιοχή ή άλλων απρόβλεπτων σφαλμάτων. Το αποτέλεσμα της συγκεκριμένης εξέτασης, όπως τονίστηκε εξαρχής, θεωρείται το πιο αξιόπιστο, ακριβώς επειδή βασίζεται σε δύο-τρεις στόχους. Παράλληλα, στοχεύει συνήθως την ανθρώπινη ριβονουκλεάση P, ως έναν εσωτερικό έλεγχο, προκειμένου να διασφαλιστεί ότι η εκχύλιση του RNA έχει πραγματοποιηθεί ορθά και πως δεν εμφανίστηκαν δυσλειτουργίες με τον εξοπλισμό [7]. Τα βήματα της διαδικασίας ανίχνευσης με τη μέθοδο PCR φαίνονται στο Σχήμα 1.3.



Σχήμα 1.3: Διάγνωση Covid-19 με PCR [6].

➤ ΕΞΕΤΑΣΗ ΑΝΤΙΣΩΜΑΤΩΝ

Τα αντισώματα(Abs), που ονομάζονται επίσης ανοσοσφαιρίνες, είναι πρωτεΐνες σχήματος Y, οι οποίες παράγονται από το ανοσοποιητικό σύστημα όταν μια ξένη ουσία, όπως ένα ιός, εισέρχεται στον ανθρώπινο οργανισμό και στη συνέχεια δεσμεύονται με την ουσία αυτή εξουδετερώνοντάς την [6]. Τα τεστ αντισωμάτων αποτελούν ορολογικές εξετάσεις που αναλύουν δείγματα αίματος ή ορού για την ανίχνευση των ειδικών αντισωμάτων του SARS-CoV-2. Οι εξετάσεις αυτές θα πληροφορήσουν εάν ένα άτομο έχει μολυνθεί από τον COVID-19 ανιχνεύοντας την παρουσία είτε ανοσοσφαιρίνης G(IgG) είτε ανοσοσφαιρίνης M(IgM). Τα αντισώματα αυτά στρέφονται κατά των πρωτεϊνών της γλυκοπρωτεΐνης Spike(S) και της πρωτεΐνης του νουκλεοκαψιδίου(N), ενώ διαθέτουν τα υψηλότερα επίπεδά τους 2 εβδομάδες μετά την έναρξη των συμπτωμάτων στην περίπτωση της IgM και 3 εβδομάδες μετά την έναρξη των συμπτωμάτων στην περίπτωση της IgG, με την τελευταία να παρέχει επίσης μακροχρόνια ανοσία.












Οι πλέον διαδεδομένες τεχνικές για την ανίχνευση των αντισωμάτων του SARS-CoV-2 είναι η ενζυμική δοκιμή ανοσοπροσρόφησης(ELISA) και η ανοσολογική δοκιμασία πλευρικής ροής(LFIA). Η ELISA είναι μια ανοσολογική εργαστηριακή διαδικασία που χρησιμοποιεί πλάκες επικαλυμμένες με ικές πρωτεΐνες, συνήθως την πρωτεΐνη N ή S, για την ανίχνευση ειδικών αντισωμάτων. Έπειτα από την προσθήκη του βιολογικού δείγματος, λαμβάνει χώρα η πρόσδεση τυχόν αντισωμάτων στις ικές πρωτεΐνες. Σε περίπτωση θετικού δείγματος, η παρουσία του συμπλόκου αντισώματος-πρωτεΐνης θα ανιχνευθεί μέσω της αλλαγής χρώματος ή φθορισμού μετά την προσθήκη ενός σημαδεμένου αντισώματος. Προκειμένου να επιτευχθεί ακριβέστερο αποτέλεσμα, συνιστάται η ανίχνευση τόσο της IgM όσο και της IgG, καθώς και καθώς και χρόνος αναμονής τουλάχιστον 14 ημερών μετά την έναρξη των συμπτωμάτων. Αυτή η εξέταση είναι ταχύτερη από την RT-qPCR και απαιτεί ελάχιστο εξοπλισμό. Ωστόσο, επισημαίνεται πως η μέθοδος ανίχνευσης αντισωμάτων διαθέτει κίνδυνο διασταυρούμενης αντιδραστικότητας με αντισώματα από άλλους κορονοϊούς [7].

➤ ΕΞΕΤΑΣΗ ΑΝΤΙΓΟΝΟΥ

Ένα αντιγόνο είναι ένα σωματίδιο ή μόριο που διαθέτει την ικανότητα να ενεργοποιήσει το ανοσοποιητικό σύστημα και να προκαλέσει την παραγωγή αντισωμάτων για να εξουδετερώσει τους παθογόνους εισβολείς, προστατεύοντας με τον τρόπο αυτό τον οργανισμό. Οι εξετάσεις αντιγόνου, σε αντίθεση με τις μεθόδους ανίχνευσης οι οποίες βασίζονται στην PCR, εντοπίζουν συστατικά του ιού (π.χ. γλυκοπρωτεΐνη S, πρωτεΐνη M ή απελευθερωμένη πρωτεΐνη N) ή τον ιό απευθείας παρακάμπτοντας τα βήματα θερμικής ενίσχυσης. Όπως και οι τεχνικές που βασίζονται στην PCR, οι δοκιμές αντιγόνου αποκαλύπτουν μόνο την ενεργή ιογενή λοίμωξη και όχι την κατάσταση ανάκαμψης. Καθώς, τα αντιγόνα προηγούνται των αντισωμάτων και είναι εξειδικευμένα ανάλογα με το στόχο, θα μπορούσαν να αποτελέσουν πιο αξιόπιστες δοκιμές απ' αυτές των αντισωμάτων. Οι δοκιμασίες αντιγόνου μπορούν να λειτουργήσουν σε λωρίδες LFA για σκοπούς ταχείας ανίχνευσης ή σε μορφή ELISA για μεγαλύτερη ευαισθησία, και χρήσεις υψηλής απόδοσης (ταυτόχρονη μέτρηση 96 δειγμάτων). Παρόλο που οι τεχνικές ELISA και LFA έχουν καθιερωθεί και οι δοκιμές αντιγόνου θεωρούνται επειγόντως απαραίτητες, διατίθεται μόνο μία δοκιμή αντιγόνου που έχει εκδοθεί από τον FDA στην αγορά μέχρι στιγμής για την ανίχνευση

του SARS-COV-2, η οποία είναι το "Sofia 2 SARS Antigen Test Kit", που αναπτύχθηκε από την QUIDEL. Ο εξοπλισμός ταχείας δοκιμασίας αντιγόνου Sofia 2 βασίζεται σε μια τεχνολογία ταινιών ανοσοφθορισμού, τύπου “σάντουιτς”, που χρησιμοποιείται για την ανίχνευση της πρωτεΐνης N τόσο του SARS-CoV όσο και του SARS-CoV-2, πράγμα που σημαίνει ότι αδυνατεί να διακρίνει τα δύο συγγενικά είδη ιών. Επιπλέον, ο εξοπλισμός του τεστ ανίχνευσης χρησιμοποιεί δείγματα ρινικού και ρινοφαρυγγικού επιχρίσματος και προορίζεται για αξιοποίηση μόνο από ιατρικούς επαγγελματίες. Η κλινική ευαισθησία του εξοπλισμού βρέθηκε στο 80%, ενώ η ακρίβεια ήταν 100% σε 47 θετικά και 96 αρνητικά κλινικά δείγματα [8].

Στο Σχήμα 1.4 παρουσιάζονται οι διαφορετικές διαγνωστικές δοκιμές, ο τύπος των δειγμάτων που εξετάζουν και ο χρόνος μετά την μόλυνση στον οποίο ανιχνεύονται οι επιμέρους αναλυτές τους.

Analyte	Sample	Test	Time After Infection
 IgG	 Blood, serum or plasma	 LFIA	After 3 weeks
 IgM			3 to 5 weeks
 Antigen	 URT/LRT swab Blood	 ELISA	1 to 3 weeks
 RNA	 URT/LRT swab or saliva	 PCR	4 days to 3 weeks
	 Urine and stool		After 4 weeks (in the case of prolonged symptomatic infection)

Σχήμα 1.4: Σχήμα στο οποίο απεικονίζονται οι καταλληλότερες επιλογές όσον αφορά τον τύπο του δείγματος, τη διαγνωστική δοκιμή, και το χρόνο μετά τη μόλυνση για την ανίχνευση κάθε αναλύτη: RNA, αντιγόνα ή αντισώματα (IgM και IgG) [7].

1.5 Η κρίση του COVID-19 στην παγκόσμια κοινότητα

Από τότε που ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας (ΠΟΥ) κήρυξε τον ιό του COVID-19 ως "έκτακτη ανάγκη δημόσιας υγείας, διεθνούς ενδιαφέροντος", η πανδημία έχει προκαλέσει μια παγκόσμια κρίση, με πολλαπλές επιπτώσεις στις οικονομίες και τις κοινωνίες των χωρών, καθιστώντας τη συστημική. Οι συνέπειες αυτές διαφέρουν έντονα μεταξύ διαφορετικών περιοχών, ακόμα και αν εκείνες βρίσκονται στην ίδια χώρα. Κάτι τέτοιο ισχύει τόσο για την εξάπλωση του ιού και τις επιπτώσεις του στην υγεία όσο και για τα αποτελέσματα της επακόλουθης οικονομικής κρίσης και τις συνέπειες που αυτή θα φέρει στην εργασία και τη φτώχεια. Επομένως, η πανδημία του SARS-CoV-2, προσφέρει διδάγματα για την πρόληψη και την αντιμετώπιση συστημικών κρίσεων στο μέλλον.

➤ Ο ιός του COVID-19 έπληξε νωρίς τις αστικές περιοχές

Στην αρχή της πανδημίας, ορισμένες από τις μεγαλύτερες πόλεις του κόσμου (π.χ. Λονδίνο, Μαδρίτη, Μιλάνο, Νέα Υόρκη) είχαν τον υψηλότερο αριθμό θετικών διαγνώσεων COVID-19 ανά κάτοικο. Τα επιδημιολογικά μοντέλα προέβλεπαν ότι χωρίς στρατηγικές μετριασμού, η ασθένεια θα εξαπλωνόταν ταχύτερα στις αστικές μητροπολιτικές περιοχές απ' ό,τι στις υπαίθριες. Ωστόσο, πολλές περιοχές που είχαν αρχικά πληγεί σοβαρά από το COVID-19 θέσπισαν μέτρα περιορισμού, όπως εκτεταμένο κλείσιμο του εμπορίου και αυστηρούς περιορισμούς στα ταξίδια. Αυτοί οι κανόνες, σε συνδυασμό με την εθελοντική κοινωνική απομάκρυνση, οδήγησαν σε μεγάλη μείωση της κινητικότητας με τα πόδια, το αυτοκίνητο και τα μέσα μαζικής μεταφοράς, ιδίως στις μεγαλύτερες πόλεις.

Πράγματι, ορισμένες από τις πιο πυκνοκατοικημένες πόλεις του κόσμου κατάφεραν να θέσουν υπό έλεγχο τα αρχικά κρούσματα του ιού, με πολύ χαμηλή επίπτωση λοιμώξεων και θανάτων. Για παράδειγμα, στην Αυστραλία, την Ιαπωνία και τη Νότια Κορέα ο επιπολασμός μειώθηκε δραματικά καθώς δόθηκε έμφαση στην πρόβλεψη, την έγκαιρη προετοιμασία και την προληπτική προσέγγιση, όταν ο όγκος των κρουσμάτων βρισκόταν ακόμα σε χαμηλά επίπεδα, ενώ παράλληλα αξιοποιήθηκαν μέτρα άμβλυνσης της μετάδοσης, όπως η χρήση μάσκας. Η ίδια η πληθυσμιακή πυκνότητα δεν διαφαίνεται να αποτελεί καθοριστικό παράγοντα μετάδοσης του ιού, αντανακλώντας σ' ένα βαθμό τις ισχυρές πολιτικές αντιδράσεις που δημιουργούνται στις μεγάλες

πόλεις όπως στις Βρυξέλλες, στην Πόλη του Μεξικού ή το Παρίσι. Οι αστικές περιοχές που χαρακτηρίζονται από κοινωνικές ανισότητες και υψηλή συγκέντρωση ανθρώπων, οι οποίοι διαβιώνουν σε πολυπληθείς κατοικίες κάτω από το όριο της φτώχειας, κρίνονται πιο ευάλωτες από εκείνες που διαθέτουν πλεόνασμα πόρων, λιγότερο αριθμό ατόμων και κατοχυρωμένα κοινά δικαιώματα [9].

Η πλειονότητα των αστικών εκτάσεων βασίζεται σε δίκτυα δημόσιων συγκοινωνιών, δίχως όμως να αποδεικνύεται πως εκείνα αποτελούν σημαντικό φορέα μετάδοσης του ιού. Συγκεκριμένα, οι προσπάθειες ιχνηλάτησης επαφών στη Γαλλία και την Ιαπωνία δεν έχουν εντοπίσει συμπλέγματα κορονοϊού από τη χρήση των μέσων μεταφοράς. Το συγκεκριμένο φαινόμενο μπορεί να ερμηνευθεί από την παρουσία προηγμένων συστημάτων εξαερισμού στα μέσα μαζικής μεταφοράς, γεγονός που μειώνει τη μεταδοτικότητα του κορονοϊού στα τρένα και το μετρό από ό,τι σε άλλους κλειστούς χώρους. Παράλληλα, οι επιβάτες παραμένουν στα μέσα μεταφοράς για σύντομες χρονικές περιόδους και συνήθως αποφεύγουν να μιλούν και να κοινωνικοποιούνται. Στις περισσότερες πόλεις του Ο.Ο.Σ.Α, η εκτεταμένη αποφυγή των δημόσιων μέσων μεταφοράς συνεχίζεται από την έναρξη εξάπλωσης του COVID-19, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται συνθήκες λιγότερου συνωστισμού στις μετακινήσεις, σε συνδυασμό με μέτρα περιορισμού της μετάδοσης, όπως οι κανόνες επιβολής της χρήσης μάσκας. Παρόλα αυτά, τα υψηλά ποσοστά μόλυνσης μεταξύ των οδηγών και των χειριστών των μέσων μαζικής μεταφοράς αποτελούν προειδοποιητικό σήμα, τουλάχιστον όσον αφορά τους μεγάλους χρόνους ταξιδιού. Ωστόσο, τα στοιχεία υποδεικνύουν έντονα πως οι ενδοοικογενειακές μολύνσεις αποτελούν την κύρια πηγή μετάδοσης, ακολουθούμενοι από τους χώρους εργασίας.

Με στόχο την επιβράδυνση της εξάπλωσης του νέου κορονοϊού, όταν ξεκίνησε η πανδημία τον Μάρτιο του 2020, πολυάριθμοι εργασιακοί χώροι οδηγήθηκαν στο μοτίβο της τηλεργασίας και έκτοτε συνέχισαν να ενθαρρύνουν την εξ-αποστάσεως απασχόληση. Ωστόσο, ένα μεγάλο ποσοστό των εργαζομένων με χαμηλότερους μισθούς στις αστικές περιοχές κατέχει θέσεις εργασίας στον τομέα των υπηρεσιών φιλοξενίας, της παιδικής μέριμνας, του λιανικού εμπορίου και των προσωπικών υπηρεσιών, που εξαρτώνται από τις δια ζώσης αλληλεπιδράσεις. Διαμένουν σε λιγότερο εύπορες, πιο πολυσύχναστες, περιφερειακές περιοχές και καθίστανται πιο ευάλωτοι στη μόλυνση. Ορισμένες από αυτές τις θέσεις εργασίας παροχής υπηρεσιών κηρύχθηκαν

απαραίτητες και συνέχισαν να πραγματοποιούνται αυτοπροσώπως, ενώ άλλες περιορίστηκαν λόγω της κοινωνικής απομόνωσης.

Η καλύτερη κάλυψη του Διαδικτύου υψηλής ταχύτητας στις αστικές περιοχές, προσφέρει τη δυνατότητα στους κατοίκους τους να χρησιμοποιήσουν το Internet για να αντικαταστήσουν τις προσωπικές αλληλεπιδράσεις με τις ψηφιακές. Η στροφή προς τις εικονικές αλληλεπιδράσεις έχει εφαρμοστεί τόσο σε εκπαιδευτικούς όσο και σε κοινωνικούς σκοπούς (π.χ. σχολείο, βιντεοκλήσεις με φίλους και οικογένεια). Τα υψηλότερα ποσοστά ψηφιοποίησης διευκόλυναν ορισμένες πόλεις να αντισταθμίσουν τους φυσικούς περιορισμούς του χώρου, προκαλώντας ταυτόχρονα ριζικές μεταβάσεις από τις δια ζώσης στις ηλεκτρονικές αγορές, ιδίως για τα παντοπωλεία και τα φαρμακεία. Οι περιοχές με ασθενέστερη ψηφιακή υποδομή βρέθηκαν λιγότερο ικανές να αντικαταστήσουν τις φυσικές επαφές με τις εικονικές, γεγονός που οδήγησε σε συχνότερες μολύνσεις.

➤ **Οι περιοχές της υπαίθρου αντιμετωπίζουν σημαντικότερους και διακριτούς κινδύνους σοβαρών αποτελεσμάτων από τον ιό του COVID-19**

Θεωρητικά, η χαμηλότερη πληθυσμιακή πυκνότητα θα έπρεπε να καθιστά τον κίνδυνο μετάδοσης του COVID-19 μικρότερο στις επαρχιακές περιοχές. Ωστόσο, δεδομένου ότι ο ιός έφτασε στις υπαίθριες περιοχές μεταγενέστερα, οι κάτοικοι ενδέχεται να ανέπτυξαν μια λανθασμένη αίσθηση ασφάλειας, λαμβάνοντας έτσι περιορισμένες προφυλάξεις. Οι εκδηλώσεις υπερ-μετάδοσης του ιού, συμπεριλαμβανομένων των γαμήλιων εκδηλώσεων και των θρησκευτικών τελετών, τροφοδότησαν την εξάπλωση του COVID-19 παγκοσμίως σ' όλες τις επαρχιακές περιοχές. Τα εργοστάσια συσκευασίας κρέατος αναδείχθηκαν σε εστίες του ιού στην επαρχία της Γερμανίας, της Ιρλανδίας και των ΗΠΑ. Στις ΗΠΑ, τα ποσοστά κρουσμάτων COVID-19 στις περιοχές αυτές ξεπέρασαν τα αντίστοιχα των αστικών περιοχών από τον Αύγουστο του 2020 και μετά. Επίσης, οι κολεγιακές πόλεις στις ΗΠΑ, επηρεάστηκαν δυσανάλογα από τα κρούσματα, ενώ παράλληλα διαπιστώθηκε ισχυρότερη αντίσταση στη χρήση μάσκας στις υπαίθριες περιοχές από ό,τι στις αστικές [9].

Ο πληθυσμός της επαρχίας διατρέχει μεγαλύτερο κίνδυνο επιλοκών και θνησιμότητας από τον COVID-19. Ο ιός χαρακτηρίζεται ιδιαίτερα επικίνδυνος για τα ηλικιωμένα άτομα και οι περιοχές της υπαίθρου διαθέτουν γενικά υψηλότερα ποσοστά ηλικιωμένων κατοίκων.

Παράλληλα, οι άνθρωποι που διαβιώνουν στην επαρχία κατέχουν υψηλότερο επιπολασμό προϋπαρχουσών παθήσεων και συννοσηρότητων (π.χ. διαβήτη, καρδιοπάθεια, παχυσαρκία και κάπνισμα), διατρέχοντας έτσι μεγαλύτερο κίνδυνο εμφάνισης σοβαρών επιπλοκών από τον COVID-19. Ορισμένες απομακρυσμένες και αυτόχθονες κοινότητες αντιμετωπίζουν πρόσθετα εμπόδια, όπως η περιορισμένη πρόσβαση σε πληροφορίες, για τη δημόσια υγεία (συμπεριλαμβανομένης της συλλογής δεδομένων με βάση την κοινότητα), την υγειονομική περίθαλψη και την αποχέτευση [9].

Τα νοσοκομεία της επαρχίας αδυνατούν να αντιμετωπίσουν την αυξανόμενη εισροή ασθενών COVID-19, επειδή τείνουν να διαθέτουν λιγότερους ειδικούς, περιορισμένη τεχνολογία και δυναμικότητα. Στις ΗΠΑ, πριν την εμφάνιση του νέου κορονοϊού, η θνησιμότητα από καρκίνο, διαβήτη και γρίπη ήταν γενικά υψηλότερη στις υπαίθριες περιοχές. Παράλληλα, σε διάφορες χώρες, αρκετοί κάτοικοι απομακρύνθηκαν από τις πόλεις προκειμένου να περάσουν τον εγκλεισμό τους σε δευτερεύουσες κατοικίες ή με τις οικογένειές τους στην επαρχία. Η μετακίνηση αυτή των ανθρώπων ενίσχυσε τον κίνδυνο εξάπλωσης του ιού στις αραιοκατοικημένες περιοχές. Η έλλειψη νοσοκομείων στην ύπαιθρο, διευκολύνει τις εστίες του ιού να κατακλύσουν ένα μόνο κέντρο περίθαλψης. Αντίθετα, τα αστικά νοσοκομειακά συστήματα διαθέτουν περισσότερη ικανότητα να διαχειρίζονται ιδιοσυγκρασιακές εξάρσεις. Για παράδειγμα, εάν μια επιδημία εκδηλωθεί σε ένα τμήμα μιας μεγάλης πόλης, οι γιατροί και οι υπηρεσίες έκτακτης ανάγκης κατευθύνουν τους ασθενείς σε ένα κοντινό νοσοκομείο με πλεονάζουσα χωρητικότητα. Από την άλλη πλευρά, στις επαρχιακές περιοχές, το αμέσως επόμενο νοσοκομείο ενδέχεται να βρίσκεται σε απαγορευτική για τους ασθενείς απόσταση [9].

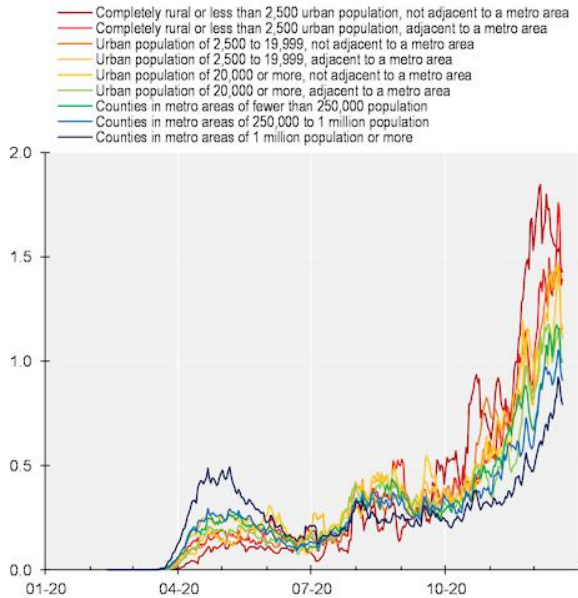
Παράλληλα, οι εγκαταστάσεις υγειονομικής περίθαλψης στις κοινότητες της επαρχίας διαθέτουν λιγότερους πόρους και δυσκολεύονται να αποκτήσουν πρόσβαση σε εξετάσεις, ατομικό προστατευτικό εξοπλισμό, κρεβάτια για τις μονάδες εντατικής θεραπείας και τα απαραίτητα εφόδια για την εξυπηρέτηση των ατόμων που έχουν πληγεί περισσότερο από τον ιό, η πλειονότητα των οποίων βρίσκεται σε προχωρημένη ηλικία. Ως αποτέλεσμα, πολυάριθμα περιφερειακά νοσοκομεία, συμπεριλαμβανομένων των κέντρων υγείας κρίσιμης πρόσβασης, ωθούνται στη μεταφορά των κατοίκων, που βρίσκονται σε δυσμενέστερη υγειονομική κατάσταση, έπειτα από μόλυνση τους από τον ιό COVID-19, σε μεγαλύτερες εγκαταστάσεις αστικών περιοχών για θεραπεία. Οι εγκαταστάσεις μακροχρόνιας φροντίδας σε υπαίθριες περιοχές αντιμετωπίζουν

καθοριστικές προκλήσεις, συμπεριλαμβανομένης της πρόσληψης και διατήρησης του εργατικού δυναμικού, αλλά και των ανισοτήτων στην ποιότητα της περίθαλψης σε σχέση με τις αστικές περιοχές. Οι εργαζόμενοι στον τομέα της υγειονομικής περίθαλψης αντιμετωπίζουν αυξημένο κίνδυνο έκθεσης στο COVID-19 και οι υγειονομικές υποδομές της επαρχίας δεν περιλαμβάνουν πάντα έναν ευρύ πάγκο, από τον οποίο μπορεί να αντληθεί πρόσθετη βοήθεια [10]. Συνοψίζοντας, ο περιορισμένος αριθμός ιατρών, η έλλειψη ευκαιριών εκπαίδευσης στον τομέα της υγειονομικής φροντίδας, η καθυστερημένη περίθαλψη, οι ανισότητες στα δημογραφικά χαρακτηριστικά των ασθενών (μεγαλύτερης ηλικίας πληθυσμός) και η υποβαθμισμένη ποιότητα της υγειονομικής περίθαλψης αντικατοπτρίζονται ήδη στα συνολικά αποτελέσματα της υγείας, καθώς η θνησιμότητα είναι υψηλότερη στους επαρχιακούς πληθυσμούς [11].

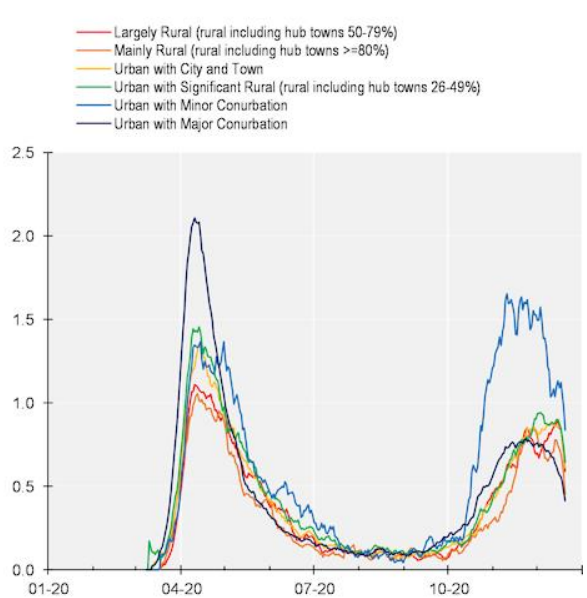
Επιπλέον, λόγω των χαμηλότερων κοινωνικοοικονομικών πόρων σε ένα επαρχιακό περιβάλλον, συναντάται περιορισμένος αλφαριθμητισμός, ειδικά αναφορικά με τον τομέα της υγείας, γεγονός που ενδέχεται να επιδεινώσει τον αντίκτυπο του ιού στις περιοχές αυτές. Μια αθροιστική σειρά στοιχείων έχει καταδείξει, ότι ο χαμηλός αλφαριθμητισμός των ενηλίκων συσχετίζεται στενά με μειωμένες γνώσεις υγείας και δεξιότητες αυτοδιαχείρισης, μειωμένη σωματική και ψυχική υγεία, υψηλότερα ποσοστά νοσηλειών και αυξημένη νοσηρότητα και θνησιμότητα. Ως εκ τούτου, οι συνέπειες της πανδημίας του COVID-19 για τον πληθυσμό της επαρχίας εξαρτώνται εν μέρει από την γνωστοποίηση του κινδύνου και την ευαισθητοποίηση σχετικά με τον ιό. Τα κενά στην επικοινωνία σχετικά με την πανδημία αύξησαν την ευπάθεια των απομακρυσμένων πληθυσμών και προκάλεσαν, παρανοήσεις σχετικά με τη νόσο, μη ενημερωμένες πολιτικές και ανεπαρκή σχεδιασμό, ωθώντας τον πληθυσμό σε μεταδοτικούς κινδύνους [11].

Στο Σχήμα 1.5 επισημαίνονται γραφικά, τα ποσοστά θνησιμότητας σε 4 διαφορετικές χώρες, ανάλογα με την πληθυσμιακή πυκνότητα των περιοχών της κάθε χώρας.

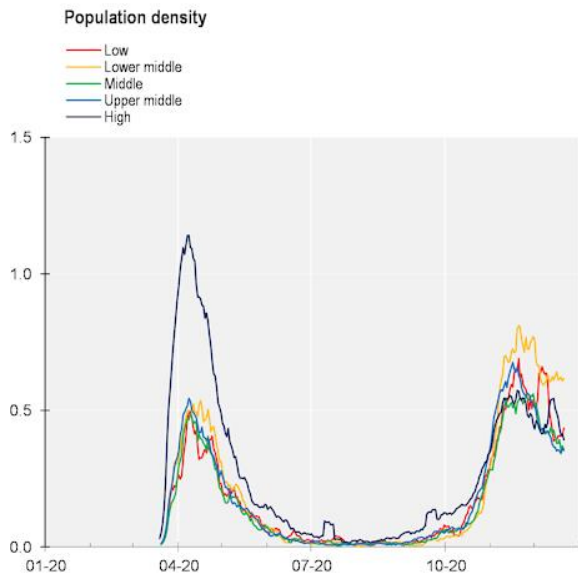
United States, average daily COVID-19 deaths by county (TL3) (7-day rolling average), by rural-urban classification groups



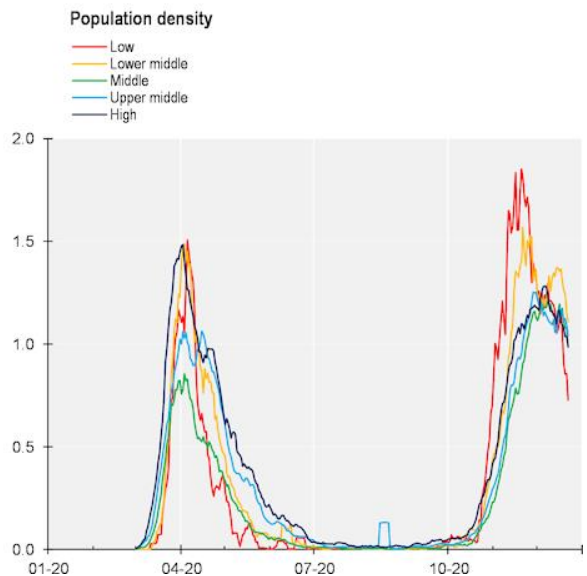
United Kingdom, average daily COVID-19 deaths by LTLA (7-day rolling average), by rural-urban classification groups



France, average daily COVID-19 deaths by départements (TL3) (7-day rolling average), by population density groups



Italy, average daily COVID-19 deaths by regione (TL2) (7-day rolling average), by population density groups



Σχήμα 1.5: Θνησιμότητα του COVID-19 ανά 100.000 κατοίκους, ημερήσιος μέσος όρος [9].

Επιπρόσθετα, ο οικονομικός αντίκτυπος αυτής της πανδημίας θεωρείται καταστροφικός σε πολυάριθμες υπαίθριες κοινότητες. Η στέγαση στους επαρχιακούς οικισμούς περιλαμβάνει παλαιότερα σπίτια, κατώτερης ποιότητας από τα αντίστοιχα στις αστικές περιοχές, γεγονός που διέγειρε προβληματισμό, ειδικά για όσους ηλικιωμένους ζούσαν μόνοι τους, απομονωμένοι στα

σπίτια τους, χωρίς επισκέπτες κατά τη διάρκεια της πανδημίας. Η χειρότερη ποιότητα στέγασης συνδέεται με τον αυξανόμενο κίνδυνο αρνητικών αποτελεσμάτων για την υγεία των ηλικιωμένων και με την εμφάνιση ζητημάτων ασφαλείας(π.χ. πτώσεις), που μπορεί να προκύψουν για εκείνους που αντιμετωπίζουν λειτουργικούς περιορισμούς, εάν πρέπει να περιηγηθούν σε πολλούς ορόφους ή σε σπίτια χωρίς τα κατάλληλα χαρακτηριστικά ασφαλείας, κατά την περίοδο απομόνωσής τους. Συνολικά, διατέθηκαν λιγότερες δυνατότητες για την απορρόφηση των οικονομικών απωλειών στις επαρχιακές περιοχές. Συνεπώς, για τους ηλικιωμένους ενήλικες της υπαίθρου, αρκετοί από τους οποίους βρισκόντουσαν ήδη στα όρια της φτώχειας, η οικονομική διαταραχή που προκλήθηκε εξαιτίας της πανδημίας στις κοινότητες τους επιδείνωσε την οικονομική τους κατάσταση [11].

➤ **Η συμβολή της τεχνολογίας στις υπαίθριες περιοχές την περίοδο του COVID-19**

Οι ψηφιακές τεχνολογίες υγείας έχουν φέρει επανάσταση στην παροχή υγειονομικής περίθαλψης σε όλα τα μέρη του κόσμου. Μετά τον νόμο HITECH (Health Information Technology for Economic and Clinical Health) του 2009, οι εφαρμογές εντός των μονάδων υγείας, που αφορούν την αποθήκευση και την ανάκτηση πληροφοριών, έχουν αυξηθεί εκθετικά και οι περισσότερες αστικές, δημόσιες και ιδιωτικές, μονάδες υγείας, ισχυρίζονται πως είναι ψηφιοποιημένες. Οι επιπτώσεις στην παροχή υπηρεσιών υγείας, από ουσιαστική εκπαίδευση και πληροφόρηση σε θέματα υγειονομικού ενδιαφέροντος, έως την κράτηση ραντεβού και τον ηλεκτρονικό έλεγχο των αποτελεσμάτων των ερευνών, έχουν καταστήσει την τηλεϊατρική ελκυστική πρόταση για την υγεία στην ύπαιθρο και τις απομακρυσμένες περιοχές. Αρχικά, τα επιτυχημένα προγράμματα περιλαμβάνουν την υπαίθρια τηλεϊατρική, με ανταλλαγή πληροφοριών και βελτιωμένη επικοινωνία μεταξύ των παρόχων υγείας, των φορέων χάραξης πολιτικής και των επαρχιακών κοινοτήτων. Παράλληλα, συμβάλλουν στην δημιουργία καινοτόμων λύσεων, για την υγεία των γυναικών και την προγεννητική φροντίδα, ενώ παρέχουν διαβουλεύσεις στους ασθενείς μέσω βιντεοσυνομιλιών. Επίσης, οι υφιστάμενες ανισότητες που επικρατούν, ιδίως όσον αφορά την πρόσβαση σε πληροφορίες για την υγεία, αντιμετωπίζονται με επιτυχία, αξιοποιώντας ψηφιοποιημένους φακέλους ασθενών και τεχνολογία πληροφοριών, όπως αποτελούν τα μέσα κοινωνικής δικτύωσης και οι ιστότοποι υποστήριξης ασθενών [12].

Τα προγράμματα τηλεϊατρικής υπόσχονται εδώ και αρκετό καιρό την αντιμετώπιση των ανισοτήτων στον τομέα της υγείας, οι οποίες διαιωνίζονται εξαιτίας της ανεπαρκούς πρόσβασης στην υγειονομική περίθαλψη. Πράγματι, η πανδημία του COVID-19 και τα συνοδευτικά μέτρα κοινωνικής αποστασιοποίησης, επιτάχυναν την εφαρμογή των προγραμμάτων τηλεϊατρικής σε νοσοκομειακά συστήματα σε ολόκληρο τον κόσμο. Πολλά από τα προγενέστερα εμπόδια για την εφαρμογή της τηλεϊατρικής (π.χ. περιορισμένη αποζημίωση και ανησυχίες για την προστασία της ιδιωτικής ζωής), τα οποία περιόριζαν την πλήρη διείσδυση αυτών των τεχνολογιών στην πράξη, έχουν προσωρινά χαλαρώσει σε μια προσπάθεια να αποτραπεί η μετάδοση του κορονοϊού. Τα προγράμματα τηλεϊατρικής αξιοποιούνται για να παρέχουν συνεχή πρόσβαση στη φροντίδα ασθενών, καθώς και για να διαχειριστούν την πιθανή αύξηση των επισκέψεων, από ανησυχίες που σχετίζονται με τον ιό, αλλά και το κλείσιμο των εξωτερικών ιατρείων [13].

Για την αντιμετώπιση της έξαρσης της πανδημίας, το Munson Healthcare (MHC), ένα περιφερειακό νοσοκομειακό σύστημα στο βόρειο Μίσιγκαν, όπως και αρκετά άλλα σε ολόκληρη την Αμερική, εργάστηκε με γρήγορους ρυθμούς για την επέκταση των υπηρεσιών ηλεκτρονικής υγείας. Το MHC προχώρησε σε μείωση των προσωπικών επισκέψεων εφαρμόζοντας πολλαπλά προγράμματα τηλεϊατρικής προκειμένου να εξυπηρετήσει τις ανάγκες των ασθενών και να περιορίσει τις αρνητικές επιπτώσεις στην υγεία τους, αλλά και σ' εκείνη των παρόχων και του προσωπικού. Συγκεκριμένα, στο δίκτυο του συστήματος υγείας MHC, προσφέρονται εικονικές επισκέψεις τηλεϊατρικής στους ασθενείς, μέσω βίντεο ή τηλεφώνου, κάτι που αποτελεί πλήρη και πρωτοφανή μεταμόρφωση του συστήματος υγείας, αν αναλογιστεί κανείς ότι σχεδόν κανένας από αυτούς τους επαρχιακούς υγειονομικούς παρόχους δεν συμμετείχε στην τηλεϊατρική πριν από την εξάπλωση της πανδημίας. Παράλληλα, το MHC διερευνά τον τρόπο με τον οποίο θα χρησιμοποιηθούν οι εικονικές υπηρεσίες για τον αποτελεσματικό έλεγχο και τη διαλογή ασθενών πριν την άφιξή τους στο νοσοκομείο. Οι προσπάθειες αυτές επικεντρώνονται στον ασθενή, ενώ χαρακτηρίζονται ευνοϊκές για την κοινωνική αποστασιοποίηση και αξιοποιούνται στην προστασία των ασθενών, των κλινικών ιατρών και της κοινότητας, από έκθεση στον ιό. Επιπλέον, αυτές οι ψηφιακές πλατφόρμες ελέγχου με την ενίσχυση του συστήματος από εμπειρογνώμονες, μπορούν να διευκολύνουν τις προσπάθειες συνδρομικής επιτήρησης για επιδημιολογικές έρευνες. Οι πλατφόρμες τηλεϊατρικής χρησιμοποιούνται επί του παρόντος για τον έλεγχο των ασθενών που προσέρχονται στο τμήμα επειγόντων περιστατικών σε μια προσπάθεια να μειωθεί η επαφή με το υγειονομικό προσωπικό. Ως εκ τούτου, οι ασθενείς που δεν χρειάζονται επείγουσα φροντίδα

καλούνται να χρησιμοποιήσουν τα δικά τους smartphones ή tablets, για να ολοκληρώσουν μία επίσκεψη μέσω βίντεο με έναν φορέα παροχής υπηρεσιών έκτακτης ανάγκης απ' το αυτοκίνητό τους, έξω από το νοσοκομείο, περιορίζοντας την έκθεση των ασθενών και των παρόχων, μειώνοντας παράλληλα την περιττή χρήση ατομικού προστατευτικού εξοπλισμού. Οι προσεγγίσεις τηλεϊατρικής χρησιμοποιούνται ακόμα σε νοσοκομειακά δωμάτια ειδικά προσαρμοσμένα για τον κορονοϊό με στόχο τη διευκόλυνση της επικοινωνίας με τους συμβουλευτικούς παρόχους, τις υπηρεσίες υποστήριξης, όπως το φαρμακείο και το διαιτολόγιο, και την οικογένεια του ασθενούς. Επιπρόσθετα, τα προγράμματα τηλεϊατρικής αξιοποιούνται για την προστασία των εργαζομένων στον τομέα της υγειονομικής περίθαλψης, επιτρέποντας τους να εργάζονται εξ αποστάσεως, περιορίζοντας έτσι τον βαθμό έκθεσης στον ιό και μειώνοντας τον κίνδυνο, ιδίως για τους ευάλωτους απασχολούμενους. Τέλος, το ΜΗC, σχεδιάζει να εφαρμόσει λύσεις τηλεϊατρικής στις 4 τοποθεσίες μακροχρόνιας φροντίδας που διαθέτει, ώστε στους συγκεκριμένους ασθενείς να προσφέρεται η δυνατότητα επικοινωνίας, μέσω βιντεοσυνομιλιών, με εγκεκριμένους ειδικούς. Συνεπώς, μ' αυτή τη μέθοδο διευκολύνονται οι ασθενείς, καθώς δεν χρειάζεται να μεταβούν στις ιατρικές μονάδες των ειδικών που τους παρακολουθούν, περιορίζοντας έτσι τις επισκέψεις στα επείγοντα περιστατικά, μειώνοντας παράλληλα το συγχρωτισμό και άρα αμβλύνοντας τον κίνδυνο εξάπλωσης του νέου κορονοϊού [13].

➤ **ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ ΕΥΡΥΖΩΝΙΚΗΣ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ**

Πράγματι, οι πρωτοβουλίες τηλεϊατρικής αποδεικνύονται ουσιαστικές στις προσπάθειες μετριασμού της εξάπλωσης του COVID-19 μεταξύ των ασθενών και των υγειονομικών παρόχων τους και πιθανότατα θα συνεχίσουν να χρησιμοποιούνται για μεγάλο χρονικό διάστημα μετά την υποχώρηση της πανδημίας, με στόχο την άμβλυνση των προβλημάτων απόστασης και πρόσβασης, που επικρατούν στις υπαίθριες και απομακρυσμένες περιοχές. Ωστόσο, τα προγράμματα τηλεϊατρικής απαιτούν επαρκή ευρυζωνική πρόσβαση, η οποία συχνά χαρακτηρίζεται περιορισμένη στα επαρχιακά και ανεπαρκώς εξυπηρετούμενα περιβάλλοντα. Στην πραγματικότητα, το 33% των Αμερικανών που διαβιώνουν σε υπαίθριες περιοχές αδυνατούν να υποστηρίξουν τηλεϊατρικές επισκέψεις μέσω βίντεο, καθώς δεν διαθέτουν πρόσβαση σε ευρυζωνικό διαδίκτυο υψηλής ταχύτητας, που ορίζεται από την Ομοσπονδιακή Επιτροπή Επικοινωνιών ως ταχύτητα λήψης τουλάχιστον 25 Mbps. Στο Μίσιγκαν, σχεδόν το 40% των κατοίκων της υπαίθρου αδυνατούν να αποκτήσουν πρόσβαση σε ευρυζωνικό δίκτυο υψηλής

ταχύτητας, σε σύγκριση με το 3% εκείνων που κατοικούν στις αστικές περιοχές της συγκεκριμένης πολιτείας. Η μαζική στροφή προς την τηλεϊατρική και η εξάρτηση από εικονικές συνδέσεις σ' αυτούς τους καιρούς της κοινωνικής απομόνωσης έχει διαμορφώσει μια πρόσθετη ανισότητα στην υγεία για τα εκατομμύρια των κατοίκων που μένουν σε απομακρυσμένες περιοχές και δεν έχουν πρόσβαση στην απαραίτητη ευρυζωνικότητα, για να αναπτύξουν ψηφιακές τεχνολογίες. Οι απομονωμένες περιοχές της Αμερικής, με περιορισμένη ευρυζωνική πρόσβαση, διαθέτουν παράλληλα υψηλότερο επιπολασμό παχυσαρκίας, διαβήτη, και χρόνιων ασθενειών, γεγονός που υποδηλώνει μια διπλή επιβάρυνση, όπου όσοι κατέχουν χαμηλότερη συνδεσιμότητα διαθέτουν μεγαλύτερες ανάγκες. Τέλος, σε μια εποχή εκτεταμένης κοινωνικής απομάκρυνσης, η έλλειψη ευρυζωνικής πρόσβασης εμποδίζει τα άτομα να συνδεθούν διαδικτυακά με την οικογένεια και τους φίλους τους και, ως εκ τούτου, μπορεί να συμβάλει σε άλλα δυσμενή αποτελέσματα για την ψυχική υγεία των ανθρώπων στις επαρχιακές περιοχές [13].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

ΒΙΟΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ

2.1 Ορισμός και δομικά στοιχεία βιοαισθητήρων

Οι βιοαισθητήρες αποτελούν συσκευές μέτρησης βιολογικών ή χημικών αντιδράσεων, μέσω παραγωγής σημάτων, ανάλογα με τη συγκέντρωση ενός αναλυτή σ' αυτές. Οι συγκεκριμένοι αισθητήρες χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές, όπως η παρακολούθηση ορισμένων ασθενειών, η ανακάλυψη καινοτόμων φαρμάκων, η ανίχνευση ρύπων αλλά και μικροοργανισμών που προκαλούν ασθένειες. Παράλληλα, οι βιοαισθητήρες αξιοποιούνται στον έλεγχο των δεικτών, οι οποίοι συνιστούν σημάδια επικείμενης νόσου στα σωματικά υγρά του ανθρώπου(αίμα, ούρα, σάλιο, ιδρώτας) [14].

Ο βιοαισθητήρας περιλαμβάνει ορισμένα βασικά δομικά στοιχεία, τα οποία επεξηγούνται περιληπτικά στις παρακάτω παραγράφους και απεικονίζονται στο Σχήμα 2.1.

➤ ΑΝΑΛΥΤΗΣ

Ο αναλυτής αποτελεί την ουσία ενδιαφέροντος που χρειάζεται ανίχνευση. Για παράδειγμα, η γλυκόζη είναι ένας “αναλυτής” σε έναν βιοαισθητήρα που έχει σχεδιαστεί για την ανίχνευση γλυκόζης.

➤ ΒΙΟΥΠΟΔΟΧΕΑΣ

Το μόριο που αναγνωρίζει ειδικά τον αναλυτή είναι γνωστό ως βιοϋποδοχέας. Τα ένζυμα, τα κύτταρα, τα απταμερή, το δεοξυριβονουκλεϊκό οξύ (DNA) και τα αντισώματα είναι μερικά παραδείγματα βιοϋποδοχέων. Η διαδικασία παραγωγής σήματος (με τη μορφή φωτός, θερμότητας, pH, αλλαγής φορτίου ή μάζας κ.λπ.) κατά την αλληλεπίδραση του βιοϋποδοχέα με τον αναλυτή ονομάζεται βιοαναγνώριση.

➤ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑΣ

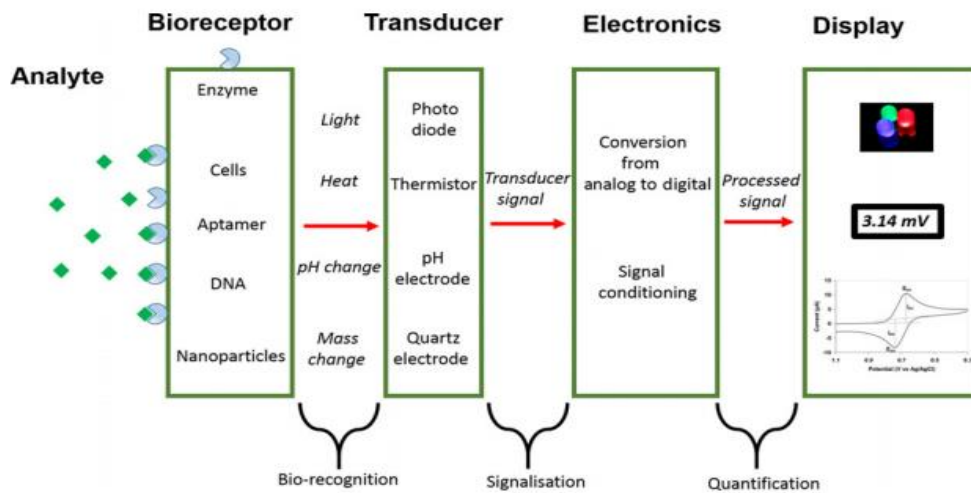
Ο μετατροπέας αποτελεί ένα στοιχείο που μετατρέπει μια μορφή ενέργειας σε άλλη. Σε έναν βιοαισθητήρα ο ρόλος του μετατροπέα περιλαμβάνει να μετατρέπει τη διαδικασία της βιοαναγνώρισης σε μετρήσιμο σήμα. Η διαδικασία μετατροπής ενέργειας αναφέρεται ως σηματοδότηση. Οι περισσότεροι μετατροπείς παράγουν είτε οπτικά είτε ηλεκτρικά σήματα, τα οποία είναι συνήθως ανάλογα με την ποσότητα των αλληλεπιδράσεων μεταξύ αναλυτή και βιοϋποδοχέα.

➤ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ

Τα ηλεκτρονικά συνιστούν το τμήμα ενός βιοαισθητήρα που επεξεργάζεται το μετατρεπόμενο σήμα και το προετοιμάζει για παρουσίαση. Αποτελείται από ηλεκτρονικά κυκλώματα που εκτελούν επεξεργασία σήματος, όπως ενίσχυση και μετατροπή των σημάτων από αναλογική σε ψηφιακή μορφή. Στη συνέχεια, τα επεξεργασμένα σήματα ποσοτικοποιούνται από τη μονάδα απεικόνισης του βιοαισθητήρα.

➤ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΤΙΚΗ ΜΟΝΑΔΑ

Η απεικονιστική μονάδα αποτελείται από ένα σύστημα ερμηνείας του χρήστη, όπως η οθόνη υγρών κρυστάλλων ενός υπολογιστή, που παράγει αριθμούς ή γραφήματα κατανοητά από τον χρήστη. Αυτό το τμήμα συχνά αποτελείται από ένα συνδυασμό υλικού και λογισμικού που παράγει τα αποτελέσματα του βιοαισθητήρα με ένα φιλικό προς τον χρήστη τρόπο. Το σήμα εξόδου στην απεικονιστική μονάδα ενδέχεται να είναι αριθμητικό, γραφικό, σε μορφή πίνακα ή εικόνας, ανάλογα με τις απαιτήσεις του τελικού χρήστη [14].



Σχήμα 2.1: Σχηματική αναπαράσταση βιοαισθητήρα [14].

2.2 Κατηγορίες βιοαισθητήρων

Οι βιοαισθητήρες ξεκίνησαν να δημιουργούνται τη δεκαετία του 1960 από τους πρωτοπόρους επιστήμονες Clark και Lyons [15]. Οι βιοαισθητήρες κατηγοριοποιούνται με βάση τους φυσικοχημικούς μετατροπείς που χρησιμοποιούνται, σε ενζυμικούς, ιστικούς, οπτικούς, μαγνητικούς, ανοσοαισθητήρες, βιοαισθητήρες DNA, θερμικούς και πιεζοηλεκτρικούς. Μία άλλη ταξινόμηση, η οποία επιτυγχάνεται σύμφωνα με τα στοιχεία βιοαναγνώρισης, διαχωρίζει τους αισθητήρες, σε καταλυτικούς και βιοαισθητήρες συγγένειας [16].

➤ ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΣ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟΥΣ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΙΣ

✚ ENZYMΙΚΟΙ ΒΙΟΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ

Ο πρώτος βιοαισθητήρας που δημιουργήθηκε με βάση τα ένζυμα δημοσιεύθηκε από τους Urdike και Hicks το 1967. Οι ενζυμικοί βιοαισθητήρες έχουν αναπτυχθεί με μεθόδους ακινητοποίησης, δηλαδή με προσρόφηση των ενζύμων από δυνάμεις van der Waals, καθώς και με τη δημιουργία ιοντικού ή ομοιοπολικού δεσμού. Τα ένζυμα που χρησιμοποιούνται συνήθως για το σκοπό αυτό είναι οι οξειδοαναγωγάσες, οι οξειδάσες των πολυφαινολών, οι υπεροξειδάσες και οι αμινοξειδάσες.

ΚΥΤΤΑΡΙΚΟΙ- ΒΙΟΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ ΙΣΤΟΥ

Οι ιστοί των κυτταρικών βιοαισθητήρων προκύπτουν από φυτικές και ζωικές πηγές. Επιπλέον, ο αναλυτής ενδιαφέροντος ενδέχεται να αποτελεί αναστολέα ή υπόστρωμα των διεργασιών αυτών. Ο Rechnitz ανέπτυξε τον πρώτο ιστικό βιοαισθητήρα για τον προσδιορισμό του αμινοξέος αργινίνη. Επιπρόσθετα, επισημαίνεται, πως οι βασισμένοι στα οργανίδια αισθητήρες, κατασκευάστηκαν χρησιμοποιώντας μεμβράνες, χλωροπλάστες, μιτοχόνδρια και μικροσώματα. Ο συγκεκριμένος τύπος βιοαισθητήρα, διακρίνεται για την υψηλή του σταθερότητα, σ' αντίθεση με την ειδικότητα του, η οποία εντοπίζεται μειωμένη. Τέλος, οι κυτταρικοί βιοαισθητήρες παρουσιάζουν μεγάλο χρόνο ανίχνευσης.

ΑΝΟΣΟΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ

Οι ανοσοαισθητήρες δημιουργήθηκαν στηριζόμενοι στο γεγονός ότι τα αντισώματα έχουν υψηλή συγγένεια προς τα αντίστοιχα αντιγόνα τους, δηλαδή δεσμεύονται σε παθογόνους οργανισμούς ή τοξίνες, ή αλληλεπιδρούν με συστατικά του ανοσοποιητικού συστήματος του ξενιστή.

ΒΙΟΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ DNA

Οι βιοαισθητήρες DNA επινοήθηκαν με βάση την ιδιότητα, ότι το μόριο του νουκλεϊκού οξέος μίας αλυσίδας, είναι σε θέση να αναγνωρίζει και να μπορεί να συνδεθεί με τη συμπληρωματική του αλυσίδα σε ένα δείγμα. Η συγκεκριμένη αλληλεπίδραση οφείλεται στο σχηματισμό σταθερών δεσμών υδρογόνου μεταξύ των δύο αλυσίδων νουκλεϊκού οξέος.

ΘΕΡΜΙΚΟΙ ΒΙΟΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ

Οι θερμικοί ή θερμιδομετρικοί βιοαισθητήρες αναπτύσσονται με την απορρόφηση υλικών βιοαισθητήρων σε ένα φυσικό μετατροπέα.

ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟΙ ΒΙΟΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ

Οι πιεζοηλεκτρικοί βιοαισθητήρες διακρίνονται σε δύο τύπους: το μικροζυγό κρυστάλλου χαλαζία και τη συσκευή επιφανειακών ακουστικών κυμάτων. Οι αισθητήρες αυτοί βασίζονται στη

μέτρηση των μεταβολών της συχνότητας συντονισμού ενός πιεζοηλεκτρικού κρυστάλλου, λόγω των μεταπτώσεων της μάζας στην κρυσταλλική δομή.

ΟΠΤΙΚΟΙ ΒΙΟΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ

Οι οπτικοί βιοαισθητήρες αποτελούνται από μια πηγή φωτός, καθώς και από πολυάριθμα οπτικά εξαρτήματα, για την παραγωγή φωτεινής δέσμης με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά, και την κατεύθυνση εκείνης σ' ένα ρυθμιστικό παράγοντα. Τέλος, περιλαμβάνουν μια τροποποιημένη κεφαλή ανίχνευσης μαζί με έναν φωτοανιχνευτή.

ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΙ ΒΙΟΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ

Οι μαγνητικοί βιοαισθητήρες αποτελούν μικροσκοπικούς βιοαισθητήρες ανίχνευσης μαγνητικών μικρο- και νανο- σωματιδίων, σε μικρορευστονικά κανάλια, χρησιμοποιώντας το φαινόμενο της μαγνητοαντίστασης, ενώ παράλληλα διαθέτουν μεγάλες δυνατότητες όσον αφορά την ευαισθησία και το μέγεθός τους [15].

➤ **ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΣ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΒΙΟΑΝΑΓΝΩΡΙΣΗΣ**

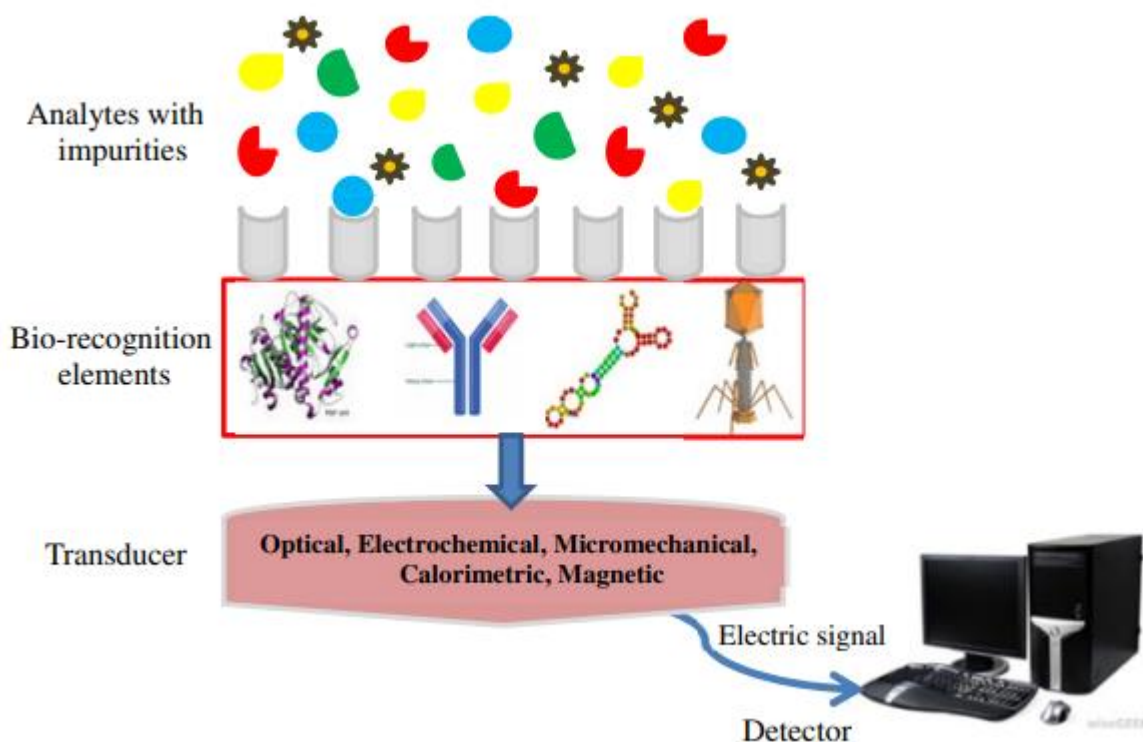
ΚΑΤΑΛΥΤΙΚΟΙ ΒΙΟΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ

Οι καταλυτικοί βιοαισθητήρες περιλαμβάνουν ένζυμα ως στοιχεία βιοαναγνώρισης, τα οποία αξιοποιούν την καταλυτική τους αποδοτικότητα προς έναν αναλυτή, όπως για παράδειγμα οι βιοαισθητήρες γλυκόζης, οι οποίοι είναι ειδικοί προς τη γλυκόζη, ή μια ομάδα αναλυτών, όπως συμβαίνει στους βιοαισθητήρες φυτοφαρμάκων, που είναι εξειδικευμένοι για οργανοφωσφορικές ενώσεις.

ΒΙΟΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ ΣΥΓΓΕΝΕΙΑΣ

Ο αισθητήρας που θα χρησιμοποιηθεί στην παρούσα εργασία για την ανίχνευση των δειγμάτων του νέου κορονοϊού εντάσσεται στην κατηγορία των βιοαισθητήρων συγγένειας ή όπως αλλιώς ονομάζονται, affinity biosensors. Οι βιοαισθητήρες συγγένειας περιλαμβάνουν αντισώματα, DNA, απταμερή και φάγους (συνθετικούς ή φυσικούς υποδοχείς), ως στοιχεία

βιοαναγνώρισης. Οι συσκευές αυτές αποτελούνται από σύμπλοκα στοιχείων ανίχνευσης που υφίστανται σημαντικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ του υποδοχέα και του προσδέτη, μέσω της μη ομοιοπολικής πρόσδεσης των διαφόρων λειτουργικών ομάδων. Τέτοια σύμπλοκα συγγένειας συνιστούν το αντιγόνο-αντίσωμα, το DNA ή ακόμα και το σύμπλεγμα πρωτεΐνη-πρωτεΐνη. Η αρχή των βιοαισθητήρων συγγένειας (Σχήμα 2.2), έγκειται στο γεγονός ότι σχηματίζεται ένα σταθερό, επιλεκτικό σύμπλεγμα μεταξύ ενός κατάλληλου στοιχείου αναλυτή-υποδοχέα, σε σύντομο χρονικό διάστημα, και μετέπειτα ανιχνεύεται ένα μετρήσιμο ηλεκτρικό σήμα [16].



Σχήμα 2.2: Σχηματική απεικόνιση της αρχής των βιοαισθητήρων συγγένειας [16].

Οι βιοαισθητήρες συγγένειας μπορούν να διαχωριστούν σε δύο κύριες ομάδες: εκείνους που μετρούν την άμεση δέσμευση μεταξύ του μορίου-στόχου και της επιφάνειας συγγένειας του αισθητήρα, και σ' αυτούς που έχουν υιοθετηθεί σε δοκιμασίες πρόσδεσης με τη χρήση επισημασμένων αντιδραστηρίων. Οι βιοαισθητήρες, οι οποίοι λειτουργούν με επισημασμένα αντιδραστήρια συγγένειας, αποτελούν παραλλαγές της συμβατικής τεχνολογίας ανοσολογικών δοκιμών, στις οποίες χρησιμοποιούνται φθορίζοντες δείκτες, ενεργά ένζυμα, μαγνητικά

σφαιρίδια, ραδιενεργά είδη ή κβαντικές κουκίδες, που αξιοποιούνται ως σηματοδότες για τον καθορισμό των μορίων-στόχων [17].

2.3 Χωρητικοί βιοαισθητήρες

Ο βιοαισθητήρας συγγένειας της εργασίας μας αποτελεί παράλληλα έναν αισθητήρα μέτρησης χωρητικότητας. Οι χωρητικοί βιοαισθητήρες ανήκουν στην ομάδα των βιοαισθητήρων συγγένειας, που λειτουργούν καταγράφοντας άμεση σύνδεση μεταξύ της επιφάνειας του αισθητήρα και του μορίου-στόχου. Αυτός ο τύπος βιοαισθητήρων μετρά τις μεταβολές των διηλεκτρικών ιδιοτήτων και του πάχους του διηλεκτρικού στρώματος, στη διεπιφάνεια του ηλεκτρολύτη ή του ηλεκτροδίου. Οι χωρητικοί βιοαισθητήρες χρησιμοποιούνται μέχρι σήμερα με επιτυχία για την ανίχνευση πρωτεϊνών, νουκλεοτιδίων, βαρέων μετάλλων, σακχαριτών, μικρών οργανικών μορίων και μικροβιακών κυττάρων [17].

Η ηλεκτρική χωρητικότητα μεταξύ του ηλεκτροδίου εργασίας (ηλεκτρολυτικός πυκνωτής/πρώτη πλάκα) και του ηλεκτρολύτη (δεύτερη πλάκα) δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$C = \frac{\epsilon_0 \times \epsilon \times A}{d} \quad (2.3.1)$$

, όπου ϵ είναι η διηλεκτρική σταθερά του μέσου μεταξύ των πλακών, ϵ_0 είναι η διαπερατότητα του ελεύθερου χώρου ($8,85 \times 10^{-12}$ F/m), A είναι η επιφάνεια των πλακών (m^2) και d είναι το πάχος του μονωτικού στρώματος(m).

Σύμφωνα με την παραπάνω εξίσωση, όταν η απόσταση μεταξύ των πλακών αυξάνεται, η συνολική χωρητικότητα μειώνεται. Με άλλα λόγια, όταν ένα μόριο-στόχος δεσμεύεται στον υποδοχέα, η μετατόπιση των αντίθετων ιόντων γύρω από το χωρητικό ηλεκτρόδιο, έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της χωρητικότητας. Όσο μεγαλύτερη είναι η ποσότητα των μορίων-στόχων που συνδέεται στον υποδοχέα, τόσο μεγαλύτερη είναι η επιτευχθείσα μετατόπιση και η μείωση της εγγεγραμμένης χωρητικότητας [17].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

ΤΟ ΔΙΑΔΙΚΤΥΟ ΤΩΝ ΠΡΑΓΜΑΤΩΝ (ΙΟΤ)

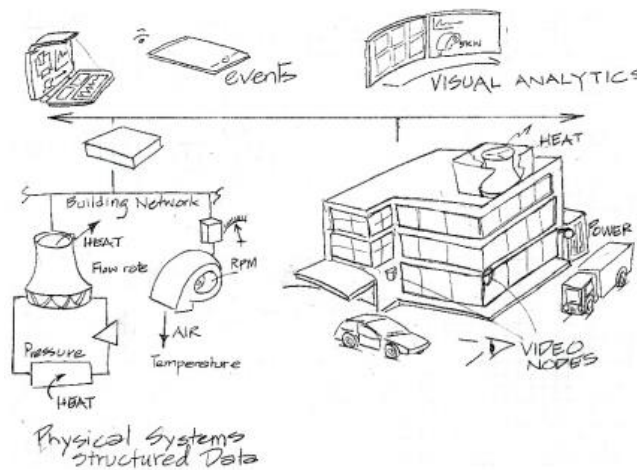
Το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT) είναι μια αναδυόμενη τεχνολογία που αναφέρεται σε μια διάχυτη παρουσία διασυνδεδεμένων και μοναδικά αναγνωρίσιμων φυσικών συσκευών, οι οποίες περιλαμβάνουν μια εκτεταμένη ποικιλία μηχανημάτων, πρωτοκόλλων, τομέων και εφαρμογών. Το IoT αποτελείται από συσκευές που συλλέγουν δεδομένα και οδηγούνται σε ενέργειες βελτίωσης της παραγωγικότητας, ώστε τελικά να μειώσουν ή να εξαλείψουν την εξάρτηση από την ανθρώπινη παρέμβαση στην απόκτηση, την ερμηνεία και την αξιοποίηση των δεδομένων. Το Διαδίκτυο των Πραγμάτων περιγράφεται ως μία από τις πιο ανατρεπτικές τεχνολογίες που θα μεταμορφώσουν τη ζωή, τις επιχειρήσεις και την παγκόσμια οικονομία. Με βάση την ανάλυση των πιθανών περιπτώσεων χρήσης του IoT (π.χ. υγειονομική περίθαλψη, έξυπνες πόλεις, έξυπνο σπίτι, μεταφορές, μεταποίηση κ.λπ.) εκτιμήθηκε ότι μέχρι το 2020, το Διαδίκτυο των Πραγμάτων θα έχει διαμορφώσει οικονομικό αντίκτυπο αξίας ενός τρισεκατομμυρίου δολαρίων και θα περιλαμβάνει περισσότερες από 50 δισεκατομμύρια συσκευές χαμηλής ισχύος, οι οποίες θα παράγουν petabytes δεδομένων [18]. Στο Σχήμα 3.1 απεικονίζονται τα βασικά στοιχεία του IoT.

Οι πολλαπλοί ορισμοί του Διαδικτύου των Πραγμάτων που εντοπίζονται στην ερευνητική κοινότητα μαρτυρούν το έντονο ενδιαφέρον για το θέμα του IoT και τη ζωντάνια των σχετικών συζητήσεων. Με μία απλή περιήγηση στη βιβλιογραφία, ένας ενδιαφερόμενος αναγνώστης μπορεί να αντιμετωπίσει πραγματική δυσκολία στην κατανόηση του τι πραγματικά δηλώνει το IoT, ποιες βασικές ιδέες κρύβονται πίσω από αυτή την έννοια και ποιες είναι οι κοινωνικές, οικονομικές αλλά και τεχνικές επιπτώσεις της πλήρους ανάπτυξης του Διαδικτύου των Πραγμάτων [19].

Θα αναλύσουμε σύντομα τους δύο πιο δημοφιλείς ορισμούς που αποδίδονται στο Διαδίκτυο των Πραγμάτων. Σύμφωνα με τη δημοσίευση [20], το IoT ορίζεται ως μια απλή αλληλεπίδραση μεταξύ του φυσικού και του ψηφιακού κόσμου, μέσα από την αξιοποίηση πληθώρας αισθητήρων(sensors) και ενεργοποιητών(actuators). Ο δεύτερος χαρακτηρισμός για το Διαδίκτυο των Πραγμάτων προσδίδεται στην δημοσίευση που συντάχθηκε από τον Pena-Lopez, ο οποίος το

ορίζει ως ένα παράδειγμα στο οποίο οι υπολογιστικές και δικτυακές δυνατότητες ενσωματώνονται σε κάθε είδους αντικείμενο. Οι δυνατότητες εκείνες χρησιμοποιούνται για να αιτηθούμε την κατάσταση του αντικειμένου και να την μεταβάλλουμε εφόσον αυτό καθίσταται δυνατό. Στην κοινή γλώσσα, το Διαδίκτυο των Πραγμάτων αναφέρεται σε ένα νέο είδος κόσμου, όπου σχεδόν όλες οι συσκευές και οι διατάξεις που χρησιμοποιούνται είναι συνδεδεμένες σε ένα δίκτυο στο οποίο αξιοποιούνται συλλογικά προκειμένου να επιτευχθούν πολύπλοκες εργασίες που απαιτούν υψηλό βαθμό νοημοσύνης [21].

Εξαιτίας αυτού του επιπέδου πληροφορίας και διασύνδεσης, οι συσκευές IoT είναι εξοπλισμένες με ενσωματωμένους αισθητήρες, ενεργοποιητές, επεξεργαστές και πομποδέκτες. Το IoT δεν αποτελεί μια ενιαία τεχνολογία, αλλά μια συσσώρευση διαφόρων τεχνολογιών που συνεργάζονται συλλογικά. Οι αισθητήρες και οι ενεργοποιητές περιλαμβάνουν τις συσκευές που συνδράμουν στην αλληλεπίδραση με το φυσικό περιβάλλον. Τα δεδομένα που συλλέγονται από τους αισθητήρες επιβάλλεται να αποθηκεύονται και να επεξεργάζονται με έξυπνο τρόπο προκειμένου να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα από αυτά. Αξίζει να επισημανθεί, πως ένα κινητό τηλέφωνο ή ακόμη και ένας φούρνος μικροκυμάτων ενδέχεται να θεωρηθεί αισθητήρας εφόσον παρέχει δεδομένα σχετικά με την τρέχουσα κατάσταση, δηλαδή αναφορικά με την εσωτερική κατάσταση και το περιβάλλον αυτής. Ένας ενεργοποιητής ορίζεται ως μια συσκευή που χρησιμοποιείται για να επιφέρει μια μεταβολή στο περιβάλλον, όπως ο ρυθμιστής θερμοκρασίας ενός κλιματιστικού [21].



Σχήμα 3.1: Απεικόνιση των στοιχείων υψηλού επιπέδου του Διαδικτύου των πραγμάτων [18].

Η ραγδαία εξάπλωση του Διαδικτύου των Πραγμάτων επιφέρει σημαντικές εφαρμογές στον τεχνολογικό κλάδο. Οι επιχειρήσεις θα επενδύσουν στο IoT για να επανασχεδιάσουν τις ροές εργασίας στο εργοστάσιο, βελτιώνοντας έτσι την παρακολούθηση των υλικών και τη βελτιστοποίηση του κόστους διανομής. Για παράδειγμα, τόσο η John Deere(αμερικανική κατασκευαστική εταιρεία) όσο και η UPS(αμερικανική πολυεθνική εταιρεία μεταφορών και παράδοσης), χρησιμοποιούν ήδη IoT-enabled τεχνολογίες εντοπισμού στόλου για να ελαττωθεί το κόστος και να βελτιωθεί η αποδοτικότητα της προμήθειας. Εκτός από την υιοθέτηση του Διαδικτύου των Πραγμάτων από τους κατασκευαστές, πολλαπλές βιομηχανίες παροχής υπηρεσιών έχουν ήδη ξεκινήσει την εφαρμογή IoT τεχνολογίας, με στόχο την μεγέθυνση των εσόδων τους μέσω των αναβαθμισμένων υπηρεσιών, που αυτή προσφέρει. Το MagicBand της Disney αποτελεί ένα νέο βραχιολάκι με μικροτσιπ RFID(ταυτοποίηση μέσω ραδιοσυχνοτήτων), που χρησιμεύει ως εισιτήριο και συνδέεται με το κέντρο δεδομένων της Disney καταγράφοντας τους επισκέπτες του πάρκου. Το νέο σύστημα της Kroger, που βασίζεται στο IoT και ονομάζεται Retail Site Intelligence, αποτελεί μια ολοκληρωμένη πλατφόρμα λιανικής πώλησης με βίντεο analytics, ασύρματες συσκευές, συσκευές POS, φορητές συσκευές αισθητήρων, κάμερες IP και λογισμικό διαχείρισης βίντεο, το οποίο σχεδιάστηκε για να εξυπηρετήσει τους πελάτες, βελτιστοποιώντας την αγοραστική τους εμπειρία, μέσω ταχύτερης εύρεσης προϊόντων και εξοικονόμησης του χρόνου που δαπανούν στο ταμείο [22].

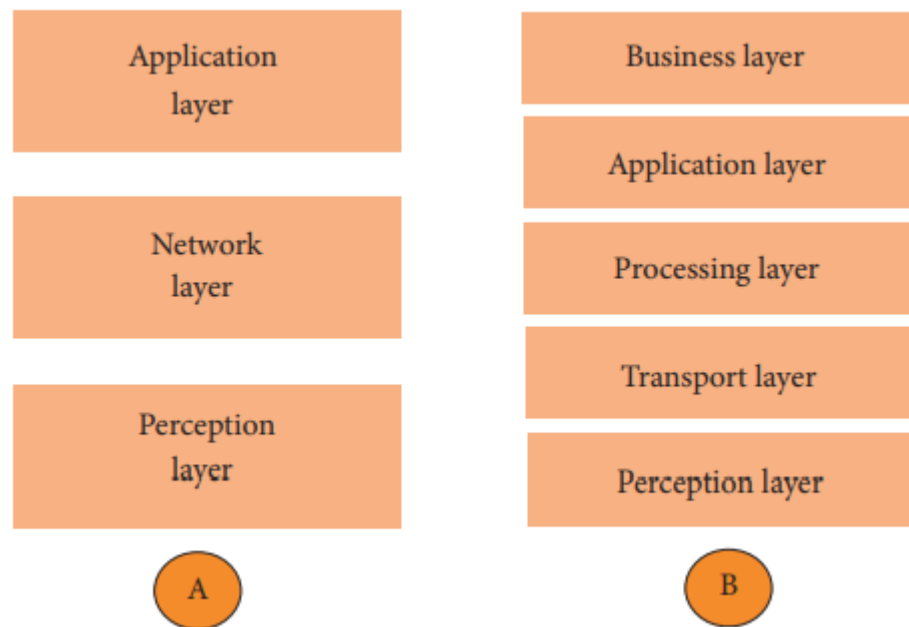
3.1 Αρχιτεκτονική του Διαδικτύου των Πραγμάτων

Αναφορικά με την αρχιτεκτονική δομή του IoT, η επιστημονική και ερευνητική κοινότητα αδυνατεί να συναινέσει σε ένα καθολικά αποδεκτό πρότυπο. Συνεπώς, αλλιώτικες αρχιτεκτονικές διαρθρώσεις του Διαδικτύου των Πραγμάτων έχουν αποδοθεί από διαφορετικούς ερευνητές, που ασχολούνται με τη μελέτη του IoT.

➤ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΤΡΙΩΝ ΚΑΙ ΠΕΝΤΕ ΕΠΙΠΕΔΩΝ

Η πιο βασική αρχιτεκτονική είναι η αρχιτεκτονική τριών και πέντε επιπέδων, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 3.2. Η αρχιτεκτονική τριών επιπέδων εισήχθη στα πρώτα στάδια της έρευνας στον τομέα αυτό και διαθέτει τα επίπεδα της αντίληψης, του δικτύου και των εφαρμογών.

- Το στρώμα αντίληψης αποτελεί το φυσικό στρώμα, το οποίο διαθέτει αισθητήρες για την ανίχνευση και τη συλλογή πληροφοριών σχετικά με το περιβάλλον. Το επίπεδο αυτό αντιλαμβάνεται ορισμένες φυσικές παραμέτρους ή εντοπίζει άλλα έξυπνα αντικείμενα στο περιβάλλον.
- Το στρώμα δικτύου είναι υπεύθυνο για τη σύνδεση με άλλα έξυπνα αντικείμενα, συσκευές δικτύου και διακομιστές. Τα χαρακτηριστικά του χρησιμοποιούνται επίσης για τη μετάδοση και την επεξεργασία δεδομένων των αισθητήρων.
- Το επίπεδο εφαρμογών είναι υπεύθυνο για την παροχή υπηρεσιών συγκεκριμένης εφαρμογής στον χρήστη. Καθορίζει διάφορες εφαρμογές στις οποίες αναπτύσσεται το Διαδίκτυο των Πραγμάτων, όπως για παράδειγμα, έξυπνα σπίτια, έξυπνες πόλεις και έξυπνη υγεία [21].



Σχήμα 3.2: Αρχιτεκτονική του IoT (A: τρία επίπεδα) (B: πέντε επίπεδα) [21].

Η αρχιτεκτονική τριών επιπέδων ορίζει την κύρια ιδέα του Διαδικτύου των Πραγμάτων, αλλά καθίσταται ανεπαρκής για την έρευνα στο IoT, καθώς εκείνη επικεντρώνεται συχνά σε πιο λεπτομερείς πτυχές της τεχνολογίας του. Για το σκοπό αυτό, διατίθενται περισσότερες πολυεπίπεδες αρχιτεκτονικές που προτείνονται στη βιβλιογραφία. Μία από αυτές αποτελεί η αρχιτεκτονική πέντε επιπέδων, στην οποία τα πέντε επίπεδα περιλαμβάνουν την αντίληψη, τη μεταφορά, την επεξεργασία, την εφαρμογή και τα επιχειρηματικά στρώματα (Σχήμα 3.2B). Ο

ρόλος των στρωμάτων αντίληψης και εφαρμογής είναι πανομοιότυπος με αυτόν που διαθέτουν στην αρχιτεκτονική τριών επιπέδων. Παρακάτω, περιγράφεται η λειτουργία των υπόλοιπων τριών στρωμάτων [21].

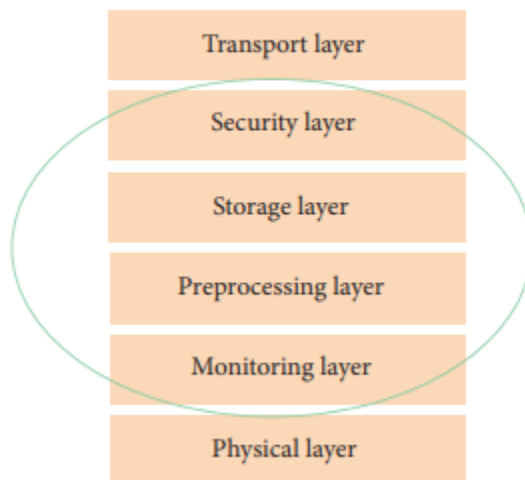
- Το στρώμα μεταφοράς μεταφέρει τα δεδομένα του αισθητήρα από το στρώμα αντίληψης στο στρώμα επεξεργασίας και αντίστροφα μέσω δικτύων όπως ασύρματα, 3G, LAN, Bluetooth, RFID και NFC.
- Το επίπεδο επεξεργασίας αναφέρεται επίσης ως το ενδιάμεσο λογισμικό επίπεδο. Αποθηκεύει, αναλύει και επεξεργάζεται τεράστιες ποσότητες δεδομένων που προέρχονται από το επίπεδο μεταφοράς. Χαρακτηρίζεται ικανό να διαχειριστεί και να παρέχει ένα ευρύ σύνολο υπηρεσιών στα χαμηλότερα στρώματα. Χρησιμοποιεί πολυποίκιλες τεχνολογίες, όπως βάσεις δεδομένων, υπολογιστικό νέφος και μονάδες επεξεργασίας μεγάλων δεδομένων.
- Το επιχειρηματικό επίπεδο διαχειρίζεται ολόκληρο το σύστημα IoT, συμπεριλαμβανομένων των εφαρμογών, των επιχειρηματικών και κερδοσκοπικών μοντέλων, διασφαλίζοντας παράλληλα την ιδιωτικότητα των χρηστών.

➤ **ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΝΕΦΟΥΣ ΚΑΙ ΟΜΙΧΛΗΣ**

Σε ορισμένες αρχιτεκτονικές συστημάτων, η επεξεργασία δεδομένων γίνεται με μεγάλο συγκεντρωτικό τρόπο από υπολογιστές νέφους (cloud computing). Μια τέτοια αρχιτεκτονική διαθέτει το cloud στο επίκεντρο, ενώ οι εφαρμογές βρίσκονται από πάνω του και το δίκτυο των έξυπνων πραγμάτων κάτω από αυτό. Το υπολογιστικό νέφος αποκτά πρωτεύουσα σημασία επειδή παρέχει μεγάλη ευελιξία και επεκτασιμότητα. Προσφέρει υπηρεσίες όπως τη βασική υποδομή, την πλατφόρμα, το λογισμικό και την αποθήκευση. Οι προγραμματιστές μπορούν να παρέχουν τα όργανα αποθήκευσης, τα εργαλεία λογισμικού τους, τον εξοπλισμό εξόρυξης δεδομένων και μηχανικής μάθησης, καθώς και υπηρεσίες οπτικοποίησης μέσω του cloud.

Το τελευταίο χρονικό διάστημα, αναδύεται μια κίνηση προς μια άλλη αρχιτεκτονική συστήματος, η οποία ονομάζεται fog computing (υπολογιστική ομίχλης), όπου οι αισθητήρες και οι πύλες δικτύου αναλαμβάνουν μέρος της επεξεργασίας δεδομένων και των αναλύσεων. Η

αρχιτεκτονική ομίχλης παρουσιάζει μια πολυεπίπεδη προσέγγιση, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.3, η οποία εισάγει τα στρώματα παρακολούθησης, προεπεξεργασίας, αποθήκευσης και ασφάλειας μεταξύ των φυσικών στρωμάτων και των στρωμάτων μεταφοράς. Το στρώμα παρακολούθησης παρακολουθεί την ισχύ, τους πόρους, τις αποκρίσεις και τις υπηρεσίες. Το στρώμα προεπεξεργασίας εκτελεί φιλτράρισμα, επεξεργασία και ανάλυση των δεδομένων των αισθητήρων. Το στρώμα προσωρινής αποθήκευσης παρέχει λειτουργίες αποθήκευσης όπως αντιγραφή, διανομή και συλλογή δεδομένων. Τέλος, το στρώμα ασφαλείας εκτελεί κρυπτογράφηση-αποκρυπτογράφηση εξασφαλίζοντας την ακεραιότητα και την ιδιωτικότητα των δεδομένων. Η παρακολούθηση και η προεπεξεργασία γίνεται στην άκρη του δικτύου πριν την αποστολή των δεδομένων στο cloud.



Σχήμα 3.3: Αρχιτεκτονική ομίχλης [21].

Τις περισσότερες φορές οι όροι “fog computing” και “edge computing” χρησιμοποιούνται ως ισοδύναμοι. Ο τελευταίος όρος προηγείται του πρώτου και ερμηνεύεται ως πιο γενικός. Η υπολογιστική ομίχλης, όπως ονομάστηκε αρχικά από τη Cisco, αναφέρεται σε έξυπνες πύλες και αισθητήρες, ενώ το edge computing(υπολογιστική ακμής) χαρακτηρίζεται ελαφρώς πιο διεισδυτικό στη φύση. Η ιδεολογική δομή του edge computing προβλέπει την προσθήκη έξυπνης προεπεξεργασίας δεδομένων σε φυσικές συσκευές, όπως κινητήρες, αντλίες ή φώτα. Ο στόχος είναι να επιτευχθεί όσο το δυνατόν μεγαλύτερη προεπεξεργασία δεδομένων σ’ αυτές τις συσκευές, οι οποίες χαρακτηρίζονται ως ακμές(edges) του δικτύου. Όσον αφορά την αρχιτεκτονική του

συστήματος, το δομικό της διάγραμμα δεν διαφέρει αισθητά από το Σχήμα 3.3. Ως αποτέλεσμα, το edge computing δεν περιγράφεται ξεχωριστά από το fog computing [21].

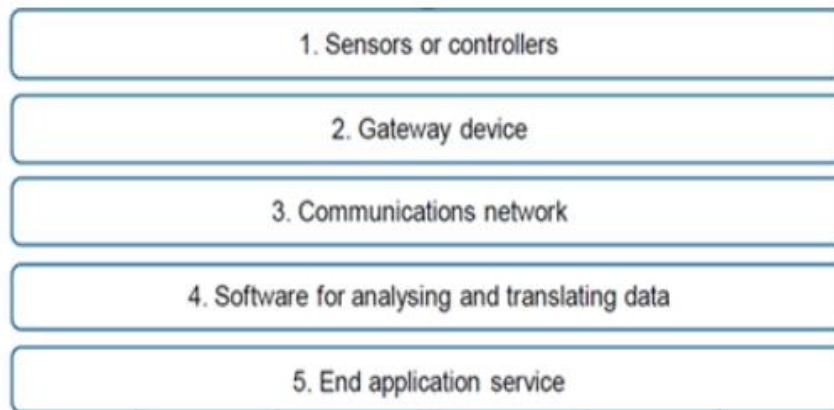
➤ **ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ IoT**

Τέλος, θα αναλυθεί η τελευταία αρχιτεκτονική δομή για το Διαδίκτυο των Πραγμάτων, που ονομάζεται Κοινωνικό IoT(SIoT). Στην συγκεκριμένη διάρθρωση, οι κοινωνικές σχέσεις μεταξύ των αντικειμένων εξετάζονται με τον ίδιο τρόπο που διαμορφώνονται οι ανθρώπινοι κοινωνικοί δεσμοί. Παρακάτω, επισυνάπτονται οι τρεις κύριες πτυχές ενός συστήματος Social IoT:

- Το SIoT είναι πλοηγήσιμο, δηλαδή δίνεται η δυνατότητα στο χρήστη να ξεκινήσει με μία συσκευή και να οδηγηθεί σε όλες τις συσκευές που συνδέονται μ' αυτήν. Μ' αυτόν τον τρόπο καθίσταται απλό να ανακαλυφθούν νέες συσκευές και υπηρεσίες χρησιμοποιώντας ένα τέτοιο κοινωνικό δίκτυο συσκευών IoT.
- Η ανάγκη αξιοπιστίας που επικρατεί μεταξύ των συσκευών του SIoT (παρόμοια με τους φίλους στο Facebook).
- Χρησιμοποιούνται μοντέλα παρόμοια με εκείνα που είναι υπεύθυνα για τη μελέτη των ανθρώπινων κοινωνικών δικτύων, με στόχο την ενδεδειγμένη εξέταση των SIoT συσκευών [21].

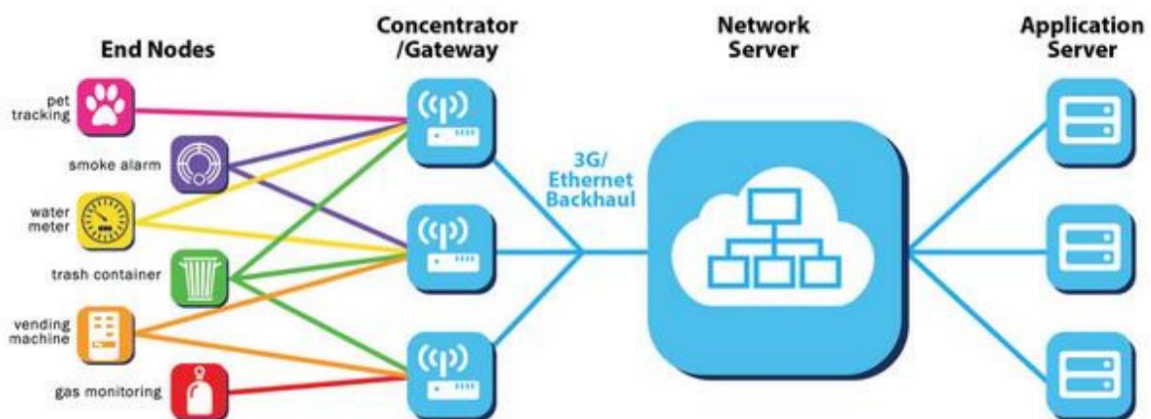
3.2 Το Οικοσύστημα του IoT

Ο όρος IoT χρησιμοποιείται για να περιγράψει ένα ευρύ και πολυποίκιλο οικοσύστημα, το οποίο περιλαμβάνει ένα εκτεταμένο φάσμα διαφορετικών τύπων συνδεσιμότητας και περιπτώσεων χρήσης. Ως εκ τούτου, δεν θεωρείται σκόπιμο να διερευνηθεί το οικοσύστημα IoT στο σύνολό του, αλλά για να κατανοηθεί ενδελεχώς, απαιτείται η ανάλυσή του σε στρώματα. Το περιβάλλον του Διαδικτύου των Πραγμάτων, όπως επισημάνθηκε με γενικότερο τρόπο και στην προηγούμενη ενότητα, με βάση την πιο δημοφιλή αρχιτεκτονική δομή του, διαθέτει πέντε οριζόντια στοιχειώδη επίπεδα. Τα βασικά στοιχεία των επιπέδων αυτών, είναι κοινά σε όλες τις περιπτώσεις χρήσης του IoT, ανεξάρτητα από το κάθετο τμήμα σύνδεσής τους, και απεικονίζονται στο Σχήμα 3.4 [23]. Οι βασικές λειτουργίες των θεμελιωδών στοιχείων, που παρουσιάζονται στο παρακάτω Σχήμα, ερμηνεύονται επιγραμματικά παρακάτω:



Σχήμα 3.4: Επίπεδα οικοσυστήματος IoT [23].

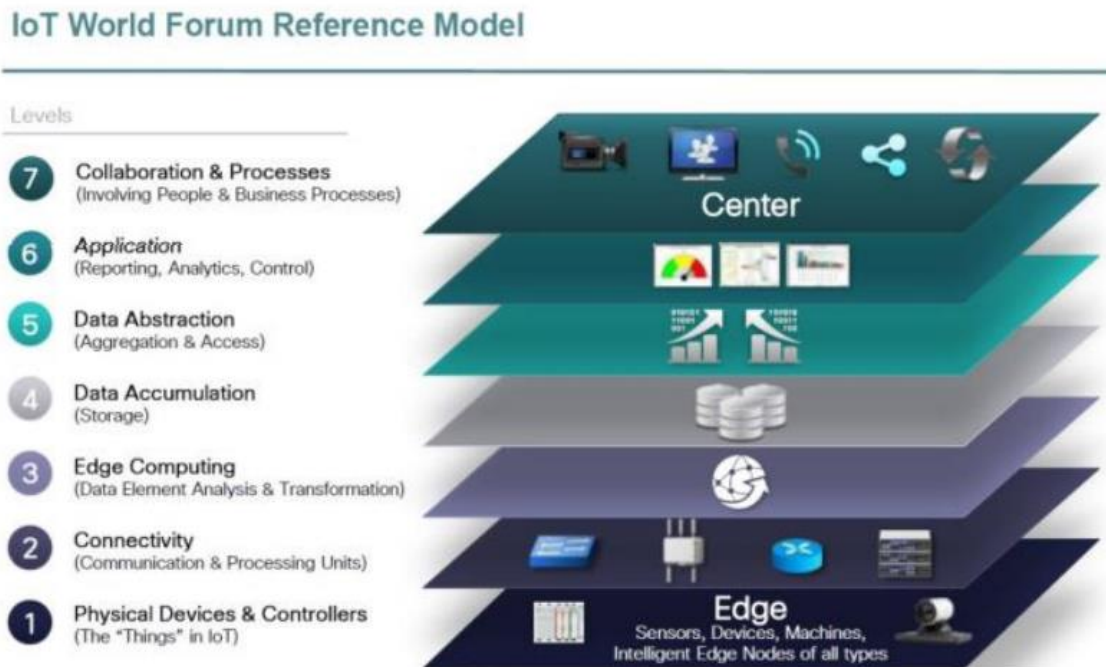
- 1) Αισθητήρες ή ελεγκτές, οι οποίοι παρουσιάζονται ενσωματωμένοι σε συνδεδεμένες συσκευές και αποτελούν τα "πράγματα" του Διαδικτύου των Πραγμάτων.
- 2) Μια συσκευή πύλης για τη συγκέντρωση και τη μετάδοση δεδομένων με κατεύθυνση από και προς το δίκτυο δεδομένων.
- 3) Ένα δίκτυο επικοινωνιών για την αποστολή δεδομένων.
- 4) Λογισμικό για την ανάλυση και την αποκωδικοποίηση των δεδομένων.
- 5) Η υπηρεσία της τελικής εφαρμογής.



Σχήμα 3.5: Τοπολογία συστήματος IoT [23].

Το οικοσύστημα του Διαδικτύου των Πραγμάτων θα μπορούσε να θεωρηθεί ως ένα σύστημα πολλαπλών επιπέδων με βαθύτερη θεώρηση των στρωμάτων του συστήματος, όπως περιγράφεται

στην πολυεπίπεδη αρχιτεκτονική του Μοντέλου του Παγκόσμιου Φόρουμ Αναφοράς του IoT. Το συγκεκριμένο μοντέλο παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον και απεικονίζεται στο Σχήμα 3.6.



Σχήμα 3.6: Μοντέλο αναφοράς του Παγκόσμιου Φόρουμ IoT [23].

Αναλύοντας την δομή του παραπάνω μοντέλου, επεξηγούνται εν συντομία τα επίπεδα της διάρθρωσής του:

- 1) Φυσικές συσκευές και ελεγκτές: Το μοντέλο ορίζει το επίπεδο αυτό ως τα "πράγματα" του Διαδικτύου των Πραγμάτων. Από την προοπτική σχεδιασμού ενός συστήματος, τα "πράγματα" περιλαμβάνουν τους αισθητήρες και τις συσκευές που διαχειρίζεται άμεσα η αρχιτεκτονική του IoT. Μια σημαντική έννοια του IoT, η Edge Intelligence, απαιτείται να υλοποιηθεί σ' αυτό το επίπεδο, προκειμένου να επιτραπεί αντίδραση χαμηλής καθυστέρησης σε συμβάντα πεδίου, μαζί με υψηλότερα επίπεδα αυτονομίας και καταναμημένης επεξεργασίας.
- 2) Συνδεσιμότητα: Το επίπεδο αυτό παρεμβάλλεται ανάμεσα σε μια Edge Node device (Συσκευή Ακραίου κόμβου) και τη μεταφορά δεδομένων στο cloud. Στο κομμάτι των επικοινωνιών δύναται να χρησιμοποιηθούν πολυάριθμες εναλλακτικές λύσεις.

Παράλληλα, στο συγκεκριμένο στρώμα περιλαμβάνεται η αντιστοίχιση των δεδομένων πεδίου στις λογικές και φυσικές τεχνολογίες που αξιοποιούνται, καθώς και το δίκτυο backhaul προς την εγκατάσταση ή το cloud και το επόμενο επίπεδο, που είναι το Edge Computing.

- 3) Edge Computing: Το επόμενο στρώμα στο μοντέλο δομής του Παγκόσμιου Φόρουμ αποτελεί το Edge Computing, ή όπως αναφέρεται πιο ορθά το “Cloud Edge” ή “Cloud Gateway” computing. Το επίπεδο αυτό χαρακτηρίζεται απαραίτητο, σε συγκεκριμένο βαθμό, σε κάθε σύστημα IoT, καθώς διασυνδέει τα επίπεδα δεδομένων και ελέγχου με τα υψηλότερα στρώματα του cloud ή του επιχειρησιακού λογισμικού. Επιπλέον, συμβάλλει στη μετατροπή πρωτοκόλλων, στη δρομολόγηση λειτουργιών λογισμικού υψηλότερου επιπέδου, αλλά και στην υλοποίηση της λογικής της “γρήγορης διαδρομής”, με στόχο τη λήψη αποφάσεων με χαμηλή καθυστέρηση.
- 4) Συσσώρευση δεδομένων: Δεδομένης της ταχύτητας, του όγκου και της ποικιλίας, που προσφέρεται από τα IoT συστήματα, καθίσταται απαραίτητη η παροχή αποθήκευσης των εισερχόμενων δεδομένων, η κανονικοποίηση τους, καθώς και η ενσωμάτωση και προετοιμασία τους για μετέπειτα εφαρμογές.
- 5) Αφαίρεση δεδομένων: Στο επίπεδο αφαίρεσης δεδομένων ερμηνεύονται τα δεδομένα, συλλέγοντας πληροφορίες από πολλαπλούς αισθητήρες ή μετρήσεις IoT. Παράλληλα, επιταχύνεται η κίνηση υψηλής προτεραιότητας και οργανώνονται τα εισερχόμενα δεδομένα από τη λίμνη δεδομένων σε κατάλληλα σχήματα και ροές για upstream επεξεργασία.
- 6) Επίπεδο εφαρμογής: Η ουσία και η χρήση του επιπέδου αυτού είναι αυτονόητη. Αποτελεί το χώρο στον οποίο εκτελείται η λογική εφαρμογής του επιπέδου ελέγχου και του επιπέδου δεδομένων. Η παρακολούθηση, η βελτιστοποίηση διαδικασιών, η διαχείριση συναγερμών, η στατιστική ανάλυση, η λογική ελέγχου και τα καταναλωτικά πρότυπα, περιλαμβάνουν μερικά μόνο παραδείγματα εφαρμογών IoT.
- 7) Συνεργασία και διαδικασίες: Σ’ αυτό το επίπεδο, η επεξεργασία της εφαρμογής παρουσιάζεται στους χρήστες και τα δεδομένα που μορφοποιούνται σε χαμηλότερα στρώματα ενσωματώνονται σε επιχειρηματικές εφαρμογές. Το συγκεκριμένο στρώμα ασχολείται με την ανθρώπινη αλληλεπίδραση σ’ όλα τα επίπεδα του συστήματος IoT και οπουδήποτε παρέχεται οικονομική αξία. Η πρόκληση στο στρώμα αυτό χαρακτηρίζεται η

αποτελεσματική εκμετάλλευση της αξίας του Διαδικτύου των Πραγμάτων, αλλά και των στρωμάτων υποδομής και υπηρεσιών κάτω από αυτή, σε συνδυασμό με την εφαρμογή τους στην οικονομική ανάπτυξη, την επιχειρηματική βελτιστοποίηση ταυτόχρονα με το κοινωνικό καλό [23].

3.3 Εξοπλισμός του IoT

Η ιδεολογία στην οποία ορίζεται το Διαδίκτυο των Πραγμάτων χαρακτηρίζεται ως ένα εξαιρετικά δυναμικό και ριζικά κατανομημένο δικτυωμένο σύστημα, που αποτελείται από έναν ευρύ όγκο αναγνωρίσιμων έξυπνων αντικειμένων. Οι συνδεδεμένες συσκευές υλικού αποτελούν την καρδιά του Διαδικτύου των Πραγμάτων, ενεργώντας ως σημείο διεπαφής μεταξύ του πραγματικού και του ψηφιακού κόσμου. Ένας από τους κύριους στόχους μιας συσκευής, από την προοπτική του Διαδικτύου των Πραγμάτων, αποτελεί η συλλογή δεδομένων. Συνεπώς, οφείλουμε να πληροφορηθούμε σχετικά με το είδος δεδομένων που θα συλλέγεται για να οδηγηθούμε στην κατάλληλη επιλογή υλικού ώστε να το επιτύχουμε. Έτσι, εισερχόμενοι στην εποχή εξάπλωσης του IoT, η αξιοποίηση μικρού, φθηνού και ευέλικτου υλικού υπολογιστών που επιτρέπει τον προγραμματισμό του από τον τελικό χρήστη άρχισε να ενισχύεται όλο και περισσότερο [24].

Ο βασικός εξοπλισμός μίας συσκευής IoT, όπως επισημάνθηκε και σε προηγούμενη ενότητα, αποτελείται από αισθητήρες, πύλες(gateways) και μικροελεγκτές. Παρακάτω, θα επεξηγήσουμε τα υλικά αυτά στοιχεία, αναλύοντας την δομή και τις δυνατότητές τους.

➤ ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ

Όλες οι εφαρμογές του Διαδικτύου των Πραγμάτων απαιτείται να διαθέτουν έναν ή περισσότερους αισθητήρες για να συλλέγουν δεδομένα από το περιβάλλον. Οι αισθητήρες αποτελούν αναπόσπαστο συστατικό των έξυπνων αντικειμένων. Μια από τις πιο καθοριστικές πτυχές του IoT, αποτελεί η επίγνωση πλαισίου, η οποία καθίσταται ανέφικτη χωρίς την τεχνολογία αισθητήρων. Οι αισθητήρες IoT χαρακτηρίζονται στην πλειονότητά τους μικροί σε μέγεθος, ενώ διαθέτουν χαμηλό κόστος και καταναλώνουν ελάχιστη ενέργεια. Ωστόσο, περιορίζονται από συγκεκριμένους παράγοντες, όπως τη χωρητικότητα της μπαταρίας και την ευκολία ανάπτυξής τους. Στην συνέχεια, ακολουθεί μια σύντομη επισκόπηση των διαφόρων τύπων αισθητήρων που χρησιμοποιούνται για τη διαμόρφωση έξυπνων εφαρμογών [21].

- *Αισθητήρες βασισμένοι στα κινητά τηλέφωνα*

Η ραγδαία αυξανόμενη δημοτικότητα των smartphones μεταξύ των ανθρώπων, οδήγησε τους ερευνητές να επιδείξουν έντονο ενδιαφέρον στη διαμόρφωση έξυπνων λύσεων IoT με την αξιοποίηση σύγχρονων τηλεφώνων, λόγω των ενσωματωμένων αισθητήρων που διαθέτουν. Επιπλέον, όπου κρίνεται αναγκαίο χρησιμοποιούνται ορισμένοι πρόσθετοι αισθητήρες ανάλογα με τις απαιτήσεις της προτεινόμενης λύσης. Οι εφαρμογές κατασκευάζονται με βάση τα smartphones, τα οποία συλλέγουν δεδομένα αισθητήρων με στόχο την παραγωγή ουσιαστικών αποτελεσμάτων. Μερικοί αισθητήρες που βρίσκονται μέσα σ' ένα σύγχρονο έξυπνο τηλέφωνο αποτελούν το επιταχυνσιόμετρο, το γυροσκόπιο, η κάμερα και το μικρόφωνο, το μαγνητόμετρο, το GPS, ο αισθητήρας απόστασης και φωτός.

Αξίζει να επισημανθεί, πως έχουν μελετηθεί εφαρμογές, οι οποίες χρησιμοποιούν δεδομένα από αισθητήρες, που προέρχονται από smartphones. Για παράδειγμα, η ανίχνευση δραστηριότητας επιτυγχάνεται με την εφαρμογή αλγορίθμων μηχανικής μάθησης (machine learning) στα δεδομένα που συλλέγονται από αισθητήρες έξυπνων κινητών τηλεφώνων. Η εφαρμογή ανιχνεύει δραστηριότητες όπως τρέξιμο, ανέβασμα και κατέβασμα σκάλας, περπάτημα, οδήγηση και ποδηλασία. Παράλληλα, εκπαιδεύεται με μοτίβα δεδομένων, χρησιμοποιώντας σύνολα πληροφοριών που καταγράφονται από αισθητήρες όταν εκτελούνται αυτές οι δραστηριότητες. Επιπλέον, πολλές εφαρμογές υγείας και φυσικής κατάστασης κατασκευάζονται για να παρακολουθούν συνεχώς την υγεία ενός ατόμου χρησιμοποιώντας τα smartphones. Οι συγκεκριμένες εφαρμογές ελέγχουν διαρκώς τις σωματικές δραστηριότητες των χρηστών, τη διατροφή, τις ασκήσεις και τον τρόπο ζωής τους, για να προσδιορίσουν το επίπεδο φυσικής τους κατάστασης, προσφέροντας ταυτόχρονα προτάσεις στους χρήστες ανάλογα με τα στοιχεία που συλλέγουν. Τέλος, διαμορφώθηκε μια εφαρμογή για κινητά τηλέφωνα που βασίζεται πλήρως σ' ένα smartphone και αξιοποιείται για την αξιολόγηση της συνολικής ψυχικής υγείας και των επιδόσεων ενός φοιτητή, ενώ ταυτόχρονα συμβάλλει στην παρακολούθηση της θέσης και των δραστηριοτήτων στις οποίες συμμετέχει, μέσω του επιταχυνσιομέτρου και των δεδομένων του GPS [21].

- *Ιατρικοί αισθητήρες*

Το Διαδίκτυο των Πραγμάτων μπορεί να είναι πραγματικά ευεργετικό για τις εφαρμογές υγειονομικής περίθαλψης, καθώς χρησιμοποιούνται αισθητήρες ικανοί να μετρήσουν και να παρακολουθήσουν διάφορες ιατρικές παραμέτρους στο ανθρώπινο σώμα. Αυτές οι εφαρμογές στοχεύουν στην παρακολούθηση της υγείας ενός ασθενούς όταν εκείνος δεν βρίσκεται στο νοσοκομείο ή είναι μόνος του. Παράλληλα, μπορούν να παρέχουν σε πραγματικό χρόνο αναφορά στον γιατρό, τους συγγενείς ή τον ίδιο τον ασθενή. Διατίθενται πολλές φορητές συσκευές ανίχνευσης στην αγορά, οι οποίες είναι εξοπλισμένες με ιατρικούς αισθητήρες, που μπορούν να μετρήσουν διάφορες παραμέτρους, όπως τον καρδιακό ρυθμό, τον παλμό, την αρτηριακή πίεση, τη θερμοκρασία του σώματος, την αναπνοή και τα επίπεδα γλυκόζης στο αίμα. Τα συγκεκριμένα wearables περιλαμβάνουν έξυπνα ρολόγια, βραχιόλια, επιφάνειες παρακολούθησης και έξυπνα κλωστοϋφαντουργικά προϊόντα(Σχήμα 3.7). Μια ακόμη νέα, πολλά υποσχόμενη συσκευή IoT αποτελεί το έμπλαστρο παρακολούθησης που ενσωματώνεται στο δέρμα. Είναι ελαστικό και μίας χρήσης, ενώ βρίσκεται σε εξαιρετικά χαμηλή τιμή. Τα έμπλαστρα πρέπει να φορεθούν από τον ασθενή για λίγες ημέρες με σκοπό την συνεχή παρακολούθηση μιας παραμέτρου ζωτικής σημασίας για την υγεία του. Τα δεδομένα που συλλέγονται από τους ιατρικούς αισθητήρες οφείλουν να συνδυάζονται με σχετικές πληροφορίες, όπως η σωματική δραστηριότητα του ασθενούς [21].



Σχήμα 3.7: Έξυπνα ρολόγια και συσκευές παρακολούθησης φυσικής κατάστασης [21].

- *Νευρωνικοί αισθητήρες*

Η τεχνολογία που χρησιμοποιείται για την ανάγνωση εγκεφαλικών σημάτων ονομάζεται EEG (ηλεκτροεγκεφαλογράφημα) ή αλλιώς διασύνδεση εγκεφάλου-υπολογιστή. Οι νευρώνες στο εσωτερικό του εγκεφάλου επικοινωνούν ηλεκτρονικά και δημιουργούν ένα ηλεκτρικό πεδίο, το οποίο μπορεί να μετρηθεί απ' έξω σε μονάδες συχνοτήτων. Τα εγκεφαλικά κύματα διαχωρίζονται σε τύπους ανάλογα με τη συχνότητα. Με βάση τον τύπο του κύματος, εξάγεται το συμπέρασμα αν ο εγκέφαλος βρίσκεται σε ηρεμία ή περιπλανιέται στις σκέψεις του. Ο συγκεκριμένος τύπος νευρικής αντίδρασης λαμβάνεται σε πραγματικό χρόνο και χρησιμοποιείται για την εκμάθηση του εγκεφάλου στην εστίαση, στην αφιέρωση περισσότερης προσοχής στις λεπτομέρειες καθώς και στη διαχείριση του άγχους, διαθέτοντας παράλληλα βελτιωμένη ψυχική υγεία [21].

- *Περιβαλλοντικοί και χημικοί αισθητήρες*

Οι περιβαλλοντικοί αισθητήρες χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση παραμέτρων στο φυσικό περιβάλλον, όπως η θερμοκρασία, η υγρασία, η πίεση, η μόλυνση του νερού και η ατμοσφαιρική ρύπανση. Παράμετροι όπως η θερμοκρασία και η πίεση μετρούνται με θερμόμετρο και βαρόμετρο αντίστοιχα. Οι χημικοί αισθητήρες χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση χημικών και βιοχημικών ουσιών. Αυτοί οι αισθητήρες αποτελούνται από ένα στοιχείο αναγνώρισης και έναν μετατροπέα. Επιπλέον, αξιοποιούνται σε πληθώρα εφαρμογών όπως για παράδειγμα στην παρακολούθηση του επιπέδου ρύπανσης σε έξυπνες πόλεις, στον έλεγχο της ποιότητας των τροφίμων σε έξυπνες κουζίνες, αλλά και στην διασφάλιση των γεωργικών προϊόντων σε εφαρμογές εφοδιαστικής αλυσίδας [21].

- *Αναγνώριση ραδιοσυχνοτήτων (RFID)*

Το RFID αποτελεί μια τεχνολογία αναγνώρισης στην οποία μια ετικέτα RFID (ένα μικρό τσιπ μαζί με μια κεραία) μεταφέρει δεδομένα, τα οποία διαβάζονται από έναν αναγνώστη RFID. Η ετικέτα μεταδίδει τα δεδομένα που βρίσκονται αποθηκευμένα σε αυτήν μέσω ραδιοκυμάτων. Η τεχνολογία είναι παρόμοια μ' αυτή του ραβδωτού κώδικα αλλά σ' αντίθεση με εκείνον, δεν απαιτείται επικοινωνία οπτικής επαφής μεταξύ της ετικέτας και της συσκευής ανάγνωσης. Συνεπώς, αναγνωρίζεται από απόσταση ακόμη και χωρίς την παρέμβαση ανθρώπινου χειριστή. Η εμβέλεια της τεχνολογίας RFID ποικίλλει ανάλογα με τη συχνότητα και ενδέχεται να διαθέτει εύρος έως και εκατοντάδες μέτρα. Η τεχνολογία RFID χρησιμοποιείται σε διάφορες εφαρμογές όπως στη διαχείριση της εφοδιαστικής αλυσίδας, στον έλεγχο πρόσβασης, στην επαλήθευση

ταυτότητας και τη παρακολούθηση αντικειμένων. Η ετικέτα RFID προσαρτάται στο αντικείμενο, που πρόκειται να εντοπιστεί, με τον αναγνώστη να ανιχνεύει και να καταγράφει την παρουσία της όταν το αντικείμενο περνά από αυτόν. Μ' αυτόν τον τρόπο παρακολουθείται η κίνηση του αντικειμένου και η RFID μπορεί να χρησιμεύσει ως μηχανή αναζήτησης για έξυπνα πράγματα. Τα δεδομένα χαμηλού επιπέδου που συλλέγονται από τις ετικέτες RFID μετατρέπονται σε πληροφορίες υψηλότερου επιπέδου στις εφαρμογές του Διαδικτύου των Πραγμάτων [21].

➤ ΜΙΚΡΟΕΛΕΓΚΤΕΣ

Ένας μικροελεγκτής επικεντρώνεται στην ενσωμάτωση περιφερειακών συσκευών που απαιτούνται για την υποστήριξη γρήγορου ελέγχου σε ένα ενσωματωμένο περιβάλλον. Με απλά λόγια, ένας μικροελεγκτής αποτελεί ένα ενιαίο ολοκληρωμένο κύκλωμα που περιέχει τουλάχιστον τα απαραίτητα στοιχεία ενός πλήρους υπολογιστικού συστήματος όπως Κεντρική Μονάδα Επεξεργασίας, μνήμη, ταλαντωτή ρολογιού, είσοδο και έξοδο. Όταν αναπτύσσονται νέες λύσεις IoT, τα στοιχεία υλικού και λογισμικού σχεδιάζονται και βελτιώνονται μέσω μιας επαναληπτικής διαδικασίας ανατροφοδότησης και αξιολόγησης. Οι ερασιτεχνικές πλατφόρμες υλικού, όπως το Arduino και το Raspberry Pi, μπορούν να συνδράμουν στην εκκίνηση αυτής της διαδικασίας ταχείας πρωτοτυποποίησης και τελειοποίησης, καθώς διατίθενται άμεσα και απαιτούν λιγότερες επενδύσεις από το σχεδιασμό και την κατασκευή προσαρμοσμένων πλακετών τυπωμένων κυκλωμάτων(PCB) [24].

Η πλακέτα ανάπτυξης εφαρμογής του Διαδικτύου των Πραγμάτων επιλέγεται με βάση τα παρακάτω:

- A. Κόστος.
- B. Προδιαγραφές: Μνήμη, επεξεργαστής, δυνατότητες εισαγωγής-εξαγωγής δεδομένων.
- C. Υποστήριξη-επιλογές προγραμματισμού.
- D. Αξιοπιστία του προμηθευτή.
- E. Συμβατότητα με αισθητήρες και ενεργοποιητές.

Νέες συσκευές και πλατφόρμες συσκευών κυκλοφορούν διαρκώς καθώς το τοπίο του IoT αναπτύσσεται δραστικά. Οι συσκευές του IoT χαρακτηρίζονται με βάση τις παρακάτω δυνατότητες υψηλού επιπέδου:

- 1) Απόκτηση και έλεγχος δεδομένων.
- 2) Συνδεσιμότητα.
- 3) Διαχείριση ενέργειας.
- 4) Επεξεργασία και αποθήκευση δεδομένων.

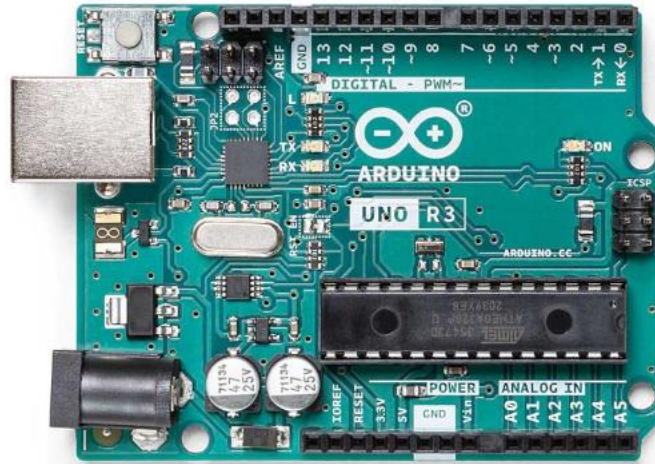
Στη συνέχεια θα αναλυθούν οι βασικές κατηγορίες IoT μικροελεγκτών, καθώς και οι δυνατότητες τους.

1. ARDUINO UNO

Το Arduino UNO αποτελεί μια πλατφόρμα πρωτοτύπου ανοικτού κώδικα και ένα εξαιρετικό μέρος για να ξεκινήσει κανείς την ενασχόληση με τα ηλεκτρονικά και τον προγραμματισμό. Το UNO είναι η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη και καταγεγραμμένη πλακέτα ολόκληρης της οικογένειας Arduino. Το ευπροσάρμοστο και εύχρηστο υλικό και λογισμικό του UNO δίνει στον προγραμματιστή την ελευθερία να δημιουργήσει με μεγάλη ταχύτητα, συνδεδεμένα περιβάλλοντα και να εφαρμόσει μια προσέγγιση ανάπτυξης υψηλής ποιότητας που θα προσανατολίζεται στο υλικό. Το Arduino χαρακτηρίζεται εξαιρετικό στο χειρισμό της διαμόρφωσης του υλικού και στην προώθηση των δεδομένων σε μια εξωτερική συσκευή για αναπαράσταση. Για την έναρξη της λειτουργίας του, χρειάζεται να συνδεθεί σ' έναν υπολογιστή με ένα καλώδιο USB ή να τροφοδοτηθεί με έναν προσαρμογέα AC σε DC ή με μια μπαταρία [24].

Το Arduino UNO τροφοδοτείται από έναν μικροελεγκτή Atmel 8-bit AVR και συγκεκριμένα από τον ATMega328P. Χαρακτηρίζεται η δημοφιλέστερη επιλογή μέσα στην κοινότητα των πλακετών λόγω του χαμηλού κόστους, της ευκολίας στην εκμάθηση και τη χρήση, καθώς και της ποικιλίας από προκατασκευασμένες μονάδες που διατίθενται για εκείνο, γεγονός που το καθιστά προτιμότερο για την ανάπτυξη νέων έργων ή πρωτοτύπων. Αποτελείται από 14 ψηφιακά pins εισόδου/εξόδου (I/O), από τα οποία τα 6 είναι PWM(Διαμόρφωσης Εύρους Παλμών) pins των 8-bit. Παράλληλα, διαθέτει 6 ακροδέκτες που ορίζονται ως αναλογικές εισοδοί των 10-bit, έναν ταλαντωτή συχνότητας 16 MHz από κρύσταλλο χαλαζία, μια σύνδεση USB, μια υποδοχή τροφοδοσίας, μια επικεφαλίδα ICSP και ένα κουμπί επαναφοράς(reset button) [25]. Στο σχήμα 3.8 απεικονίζεται το μοντέλο Arduino UNO R3.

Arduino UNO R3



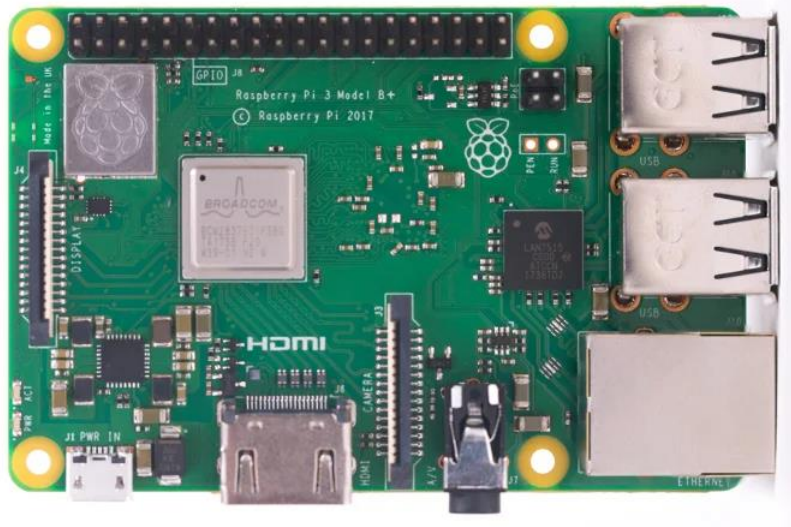
Σχήμα 3.8: Απεικόνιση της πλακέτας του ARDUINO UNO R3 [25].

Το ολοκληρωμένο περιβάλλον ανάπτυξης Arduino ή λογισμικό του Arduino (Arduino IDE), όπως αλλιώς ονομάζεται, περιέχει έναν επεξεργαστή κειμένου για τη συγγραφή κώδικα, μια περιοχή μηνυμάτων, μια κονσόλα κειμένου, μια γραμμή εργαλείων με κουμπιά για κοινές λειτουργίες και μια σειρά μενού. Συνδέεται με το υλικό της πλακέτας Arduino για να φορτώσει τα προγράμματα και να επικοινωνήσει μαζί της [26].

2. RASPBERRY PI

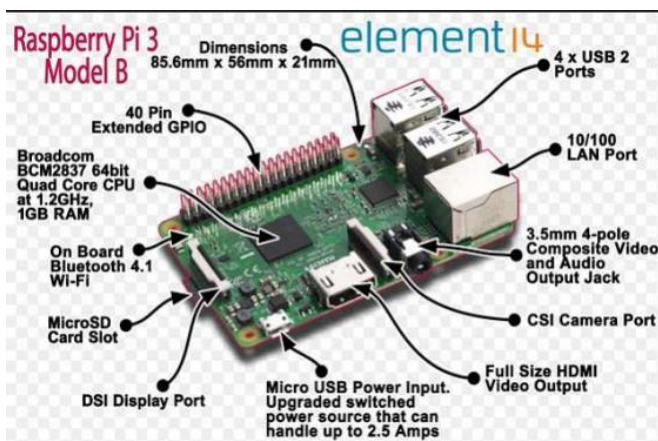
Raspberry Pi ονομάζεται μια σειρά υπολογιστών μονής πλακέτας, που κατασκευάζονται από το ομώνυμο Ίδρυμα Raspberry Pi, μια βρετανική φιλανθρωπική οργάνωση που έχει ως στόχο να εκπαιδεύσει τους ανθρώπους στην πληροφορική και να δημιουργήσει ευκολότερη πρόσβαση στην εκμάθηση σύνταξης κώδικα προγραμματισμού.

Η πρώτη πλακέτα Raspberry Pi κυκλοφόρησε το 2012 και έκτοτε έχουν διανεμηθεί αρκετές νέες παραλλαγές της. Ο αρχικός υπολογιστής διέθετε μονοπύρηνο επεξεργαστή CPU, συχνότητας 700MHz και μνήμη RAM χωρητικότητας μόλις 256MB [27]. Στο Σχήμα 3.9 απεικονίζεται το μοντέλο Raspberry Pi 3 Model B+.



Σχήμα 3.9: Φωτογραφία του Raspberry Pi 3 Model B+ [27].

Το Raspberry Pi 3 αποτελεί αδιαμφισβήτητα την πιο προσιτή και ισχυρή υπολογιστική πλατφόρμα της συγκεκριμένης τεχνολογίας. Διαθέτει τετραπύρρηνο, 64-bit επεξεργαστή(CPU), με συχνότητα λειτουργίας 1,2GHz. Παράλληλα, περιλαμβάνει μνήμη RAM χωρητικότητας 1GB, 4 θύρες USB, 40 ακίδες GPIO, πλήρη θύρα HDMI, συνδυασμένη υποδοχή ήχου μήκους 3,5mm, διεπαφή κάμερας(CSI) και οθόνης(DSI), υποδοχή κάρτας Micro SD και πυρήνα γραφικών videoCore IV 3D. Τέλος, διαθέτει ασύρματο δίκτυο LAN προτύπου 802.11n, καθώς και τεχνολογία Bluetooth χαμηλής ενέργειας [24]. Στο σχήμα 3.10 παρουσιάζονται οι σύνδεσμοι και τα ολοκληρωμένα κυκλώματα του μοντέλου Raspberry Pi 3 Model B.

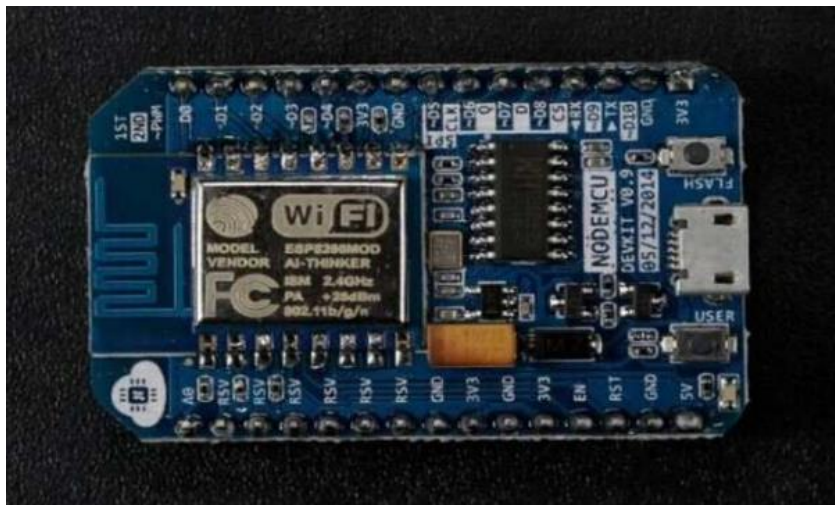


Σχήμα 3.10: Τοποθεσία συνδέσμων και ολοκληρωμένων κυκλωμάτων στην πλακέτα του Raspberry Pi 3 Model B [24].

Αναφορικά με την ικανότητα του λογισμικού που προσφέρεται από την πλακέτα, το Raspberry Pi εκτελείται σε προσαρμοσμένο λειτουργικό σύστημα Debian Linux, το οποίο ονομάζεται Raspbian, για την εγκατάσταση διαφορετικών πακέτων, συμπεριλαμβανομένων του Node.js, της Java, της στοίβας LAMP, της Python και πολλών άλλων [24].

3. NodeMCU

Το Arduino και το Raspberry Pi δεν διαθέτουν ενσωματωμένη υποστήριξη για ασύρματα δίκτυα. Οι προγραμματιστές θα πρέπει να προσθέσουν μια μονάδα Wifi ή κινητής τηλεφωνίας στην πλακέτα και να γράψουν κώδικα με στόχο την πρόσβαση στην ασύρματη μονάδα. Έτσι, δημιουργήθηκε μια αναπτυξιακή πλακέτα IoT ανοικτού κώδικα που ονομάζεται NodeMCU και χρησιμοποιείται επιτρέποντας στους χρήστες να κωδικοποιήσουν τη συσκευή τους αξιοποιώντας προγραμματιστικά σενάρια γλώσσας Lua. Ένα από τα εξέχοντα χαρακτηριστικά της συγκεκριμένης πλακέτας καθίσταται η παροχή ενσωματωμένης υποστήριξης για σύνδεση στο Wifi. Πρόκειται για ένα εξαιρετικά φθηνό σύστημα-σε-ένα-τσιπ (SoC) που ονομάζεται ESP8266. Το ESP8266, που σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε από την εταιρεία Espressif Systems, περιέχει όλα τα κρίσιμα στοιχεία του σύγχρονου υπολογιστή: Κεντρική μονάδα Επεξεργασίας(CPU), Μνήμη(RAM), σύνδεση στο δίκτυο(Wifi), ένα σύγχρονο λειτουργικό σύστημα και SDK. Τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά καθιστούν το NodeMCU μια έξυπνη επιλογή για να δημιουργήσει ο χρήστης εφαρμογές με το Διαδίκτυο των Πραγμάτων [24]. Η παρακάτω πλακέτα, που φαίνεται στο Σχήμα 3.11 αποτελεί το μοντέλο NodeMCU DEVKIT3.

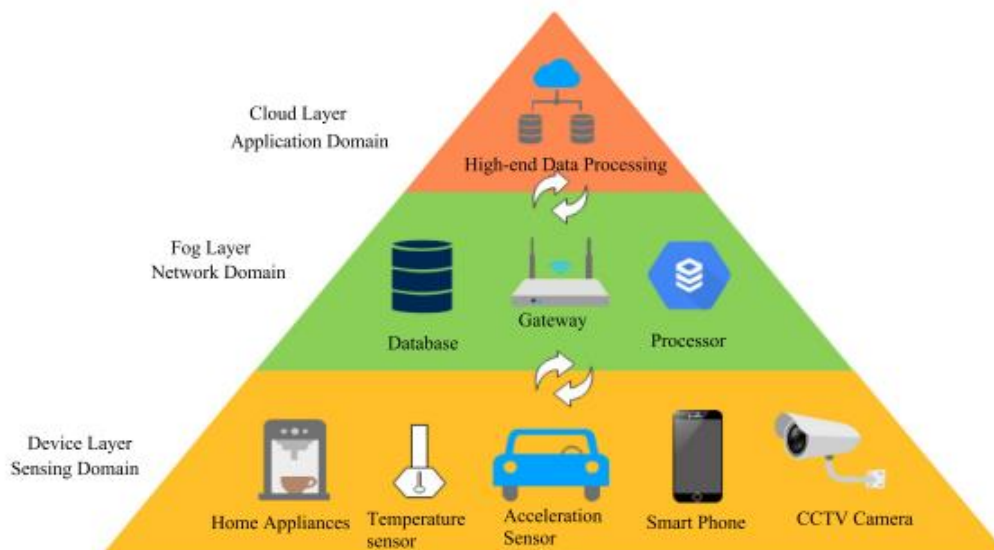


Σχήμα 3.11: Η πλακέτα NodeMCU DEVKIT3 [24].

Η πλακέτα διαθέτει 64 KiB(2^{10} bytes) μνήμης ROM εκκίνησης, 32 KiB μνήμης εντολών RAM και 80 KiB μνήμης δεδομένων χρήστη. Η εξωτερική μνήμη flash μπορεί να προσπελαστεί μέσω SPI. Το ίδιο το τσιπ πυριτίου στεγάζεται μέσα σε ένα πλαίσιο συσκευασίας QFN(Quad Flat No-Leads) διαστάσεων 5 mm × 5 mm με 33 συνδετικά pads όπου 8 από αυτά βρίσκονται κατά μήκος κάθε πλευράς. Στο κύκλωμα περιλαμβάνεται USB-TTL, 10 ακίδες GPIO(D0-D10), ενώ παράλληλα υποστηρίζεται η λειτουργία PWM και οι μέθοδοι επικοινωνίας IIC και SPI. Τέλος, διατίθεται κεραία PCB και ένα ADC pin(A0) [24]. Ο σχεδιασμός της πλακέτας βασίστηκε αρχικά στη μονάδα ESP-12 του ESP8266, η οποία αποτελεί ένα Wi-Fi SoC ενσωματωμένο με πυρήνα Tensilica Xtensa LX106, που χρησιμοποιείται ευρέως σε εφαρμογές του Διαδικτύου των Πραγμάτων.

➤ GATEWAYS

Τα έξυπνα πράγματα, συμπεριλαμβανομένων των αισθητήρων και των ενεργοποιητών, συλλέγουν δεδομένα από το περιβάλλον και τα αποστέλλουν σε gateways(πύλες). Η πύλη συγκεντρώνει τα δεδομένα που μεταδίδονται από ετερογενείς συσκευές χρησιμοποιώντας διάφορα πρωτόκολλα επικοινωνίας και τα αποστέλλει περαιτέρω σε κέντρα δεδομένων ομίχλης(fog computing) ή νέφους(cloud computing) για επεξεργασία υψηλής απόδοσης. Έτσι, μια πύλη αποτελεί καθοριστικό μέρος του Διαδικτύου των Πραγμάτων. Λειτουργεί ως μετατροπέας πρωτοκόλλων και καλείται να οικοδομήσει ένα δικτυακό τομέα με υψηλή απόδοση, αξιοπιστία και κατανάλωση ενέργειας, που θα διαθέτει ταυτόχρονα χαμηλό χρόνο απόκρισης. Η τοποθέτηση της πύλης στην αρχιτεκτονική του IoT απεικονίζεται στο Σχήμα 3.12. Σύμφωνα με την δομή του Διαδικτύου των Πραγμάτων, η πύλη αποτελεί μια συσκευή που λειτουργεί ως σημείο σύνδεσης μεταξύ των έξυπνων IoT συσκευών και των εφαρμογών τους. Χαρακτηρίζεται ως μια ουσιαστική πτυχή ενός συστήματος IoT, καθότι οι περισσότερες έξυπνες συσκευές αδυνατούν να συνδεθούν απευθείας με το cloud, καθώς βασίζονται σε τεχνολογία κοντινής εμβέλειας [28].



Σχήμα 3.12: Τοποθέτηση πύλης στην αρχιτεκτονική του IoT [28].

Η πύλη στο χώρο του Διαδικτύου των Πραγμάτων λειτουργεί ως ενδιάμεσος κόμβος μεταξύ των πολυάριθμων δικτύων ανίχνευσης και των πλατφορμών cloud ή δεδομένων. Στόχος της είναι ο έλεγχος της ετερογένειας που δημιουργείται από διαφορετικές συσκευές, οι οποίες συλλέγουν τεράστιες ποσότητες δεδομένων σε εναλλακτικές μορφές και τα προωθούν σε μια ανώτερη πλατφόρμα. Για τη σωστή λειτουργία και διαχείριση των συστημάτων IoT, τα δεδομένα που συλλέγονται θα πρέπει να καθαρίζονται, να προεπεξεργάζονται και να φιλτράρονται πριν από την αποστολή τους σε κέντρα δεδομένων με βάση τις απαιτούμενες εφαρμογές. Οι πύλες διακρίνονται σε δύο τύπους, τις βασικές και τις έξυπνες πύλες. Οι βασικές πύλες ενεργούν ως μεσάζοντες μεταξύ των συσκευών IoT χαμηλού επιπέδου και των κέντρων δεδομένων, προωθώντας τα εισερχόμενα δεδομένα στο ανώτερο στρώμα. Αντίθετα, μια έξυπνη πύλη χειρίζεται αποτελεσματικά τα δεδομένα με προεπεξεργασία, φιλτράρισμα και ανάλυση παραδίδοντας μόνο τα σχετικά ή απαραίτητα δεδομένα στην πλατφόρμα του cloud [28].

Οι πύλες αποτελούνται από ένα μικρό λειτουργικό σύστημα που συμβάλλει στη διαχείριση των κόμβων, την μεταποίηση και την αποθήκευση τους. Επιπλέον, το gateway επιτρέπει την δημιουργία ενός μικρού εφεδρικού αντιγράφου ασφαλείας για την επίλυση του προβλήματος αποτυχίας του δικτύου, αποθηκεύοντας την τρέχουσα κατάσταση του συστήματος και προχωρώντας σε εκτέλεσή του με λειτουργία φωλιάσματος με στόχο την ανάκτηση της τελευταίας

κατάστασης και συνέχεια της λειτουργίας του από το ίδιο σημείο αποτυχίας χωρίς καμία απώλεια δεδομένων.

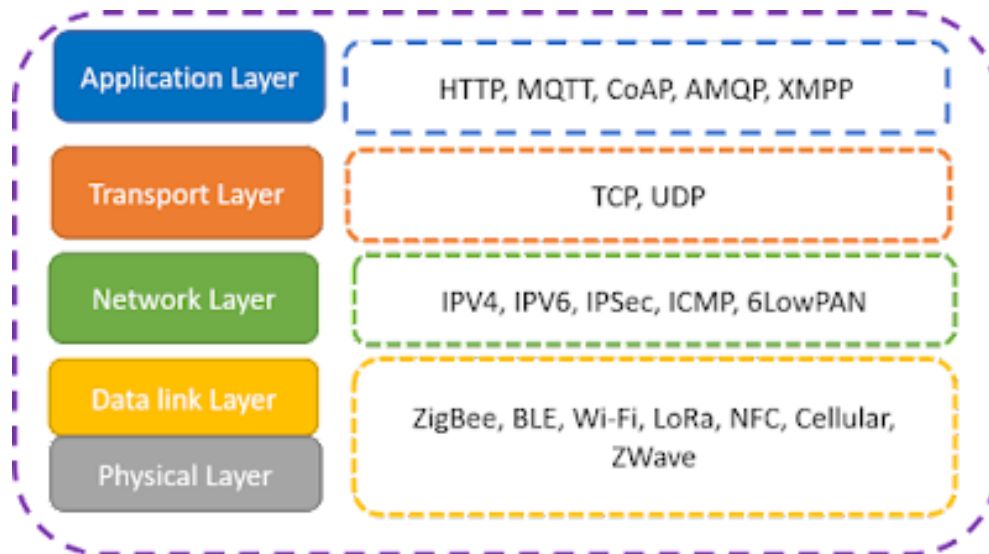
Οι ερευνητές επικεντρώνονται στην κατασκευή αρκετά ευφών πυλών ώστε να παρέχουν στους χρήστες καλύτερες επιδόσεις και ποιότητα υπηρεσιών(QoS). Οι διάφορες παράμετροι ποιότητας για τις πύλες περιλαμβάνουν :

- ✓ Αξιοπιστία: Η ικανότητα μιας πύλης να ολοκληρώσει την απαιτούμενη εργασία σε καθορισμένο χρονικό διάστημα με συγκεκριμένες συνθήκες.
- ✓ Καθυστέρηση: Ο χρόνος που απαιτείται για τη μεταφορά των δεδομένων από ένα σημείο σε ένα άλλο, μέσω του δικτύου.
- ✓ Απόδοση: Η ποσότητα μεταφοράς δεδομένων ανά μονάδα χρόνου.
- ✓ Εύρος ζώνης δικτύου: Καθορίζει τον μέγιστο ρυθμό σήματος που απαιτείται για την αποστολή των δεδομένων.
- ✓ Χρόνος εκτέλεσης: Ο χρόνος που απαιτείται για την εκτέλεση ενός προγράμματος.
- ✓ Κόστος: Περιλαμβάνει το κόστος υπολογισμού, το κόστος αποθήκευσης και το κόστος επικοινωνίας σε ένα καθορισμένο χρονικό διάστημα.
- ✓ Κατανάλωση ενέργειας: Ενέργεια που καταναλώνεται για την εκτέλεση της καθορισμένης εργασίας.
- ✓ Χρόνος απόκρισης: Το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί μεταξύ του αιτήματος του χρήστη και της απάντησής του. Εξαρτάται από την ταχύτητα λειτουργίας της πύλης.
- ✓ Ασφάλεια: Προστασία του συστήματος από μη εξουσιοδοτημένη πρόσβαση και χρήστες.
- ✓ Επεκτασιμότητα: Ικανότητα της πύλης να αποδίδει λειτουργικά με τον αυξανόμενο αριθμό συνδεδεμένων συσκευών ή εφαρμογών των πόρων [28].

3.4 Πρωτόκολλα επικοινωνίας

Το περιβάλλον του Διαδικτύου των Πραγμάτων αποτελείται από έναν τεράστιο αριθμό έξυπνων συσκευών, αλλά με σύνθετους περιορισμούς. Η ικανότητα επεξεργασίας δεδομένων, ο όγκος αποθήκευσης τους, παράλληλα με τη μικρή διάρκεια ζωής και εμβέλειας των ραδιοσυχνοτήτων περιλαμβάνουν ορισμένες από τις δυσκολίες του οικοσυστήματος του ΙοΤ. Ως εκ τούτου, η υλοποίηση του Διαδικτύου των Πραγμάτων απαιτεί πρωτόκολλα επικοινωνίας που

οφείλουν να διαχειρίζονται αποτελεσματικά τις συγκεκριμένες συνθήκες [29]. Στο Σχήμα 3.13 κατηγοριοποιούνται τα πρωτόκολλα επικοινωνίας σε σχέση με το επίπεδο εφαρμογής τους.



Σχήμα 3.13: Απεικόνιση των πρωτοκόλλων που χρησιμοποιούνται μεταξύ των επιπέδων του IoT [30].

➤ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΑ ΦΥΣΙΚΟΥ ΕΠΙΠΕΔΟΥ ΚΑΙ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Οι συσκευές IoT συνδέονται συνήθως στο διαδίκτυο μέσω της στοίβας IP (Internet Protocol). Η συγκεκριμένη στοίβα είναι ιδιαίτερα περίπλοκη και απαιτεί σημαντική ποσότητα ισχύος και μνήμης από τις συσκευές που συνδέονται. Παράλληλα, οι συσκευές του Διαδικτύου των Πραγμάτων είναι ικανές να συνδέονται τοπικά μέσω άλλων δικτύων εκτός του IP, τα οποία καταναλώνουν λιγότερη ενέργεια, και εισέρχονται στο διαδίκτυο μέσω μιας έξυπνης πύλης. Τα κανάλια επικοινωνίας μη-IP, όπως το Bluetooth, το RFID και το NFC, είναι αρκετά δημοφιλή, αλλά έχουν περιορισμένη εμβέλεια (έως μερικά μέτρα). Ως εκ τούτου, οι εφαρμογές τους περιορίζονται σε μικρά προσωπικά δίκτυα. Τα δίκτυα προσωπικής περιοχής (PAN) χρησιμοποιούνται ευρέως σε εφαρμογές IoT, όπως τα wearables που συνδέονται με smartphones. Προκειμένου να ενισχυθεί η εμβέλεια αυτών των τοπικών δικτύων, η στοίβα IP τροποποιήθηκε έτσι ώστε να διευκολύνεται η επικοινωνία χαμηλής ισχύος με τη χρησιμοποίησή της. Μια από τις λύσεις αποτελεί το 6LoWPAN, το οποίο ενσωματώνει το IPv6, με χαμηλής ισχύος προσωπικά δίκτυα περιοχής. Η εμβέλεια ενός PAN με 6LoWPAN είναι παρόμοια με τα τοπικά δίκτυα, όμως η ισχύς κατανάλωσης υπολογίζεται σημαντικά χαμηλότερη. Οι κορυφαίες τεχνολογίες επικοινωνίας που χρησιμοποιούνται στο IoT είναι το IEEE 802.15.4, το WiFi χαμηλής ισχύος, το

6LoWPAN, το RFID, το NFC, το Sigfox, το LoRaWAN και άλλα ιδιόκτητα πρωτόκολλα για ασύρματα δίκτυα [21].

Τα πρωτόκολλα επικοινωνίας για το IoT κατηγοριοποιούνται σε: (1) Cellular, (2) LPWAN και (3) δίκτυα μικρής εμβέλειας.

1) Cellular

Η τεχνολογία κινητής τηλεφωνίας αποτελεί ένα Δίκτυο Ευρύτερης Περιοχής(WAN) παρέχοντας δυνατότητα σύνδεσης σε μεγάλο εύρος, σε παγκόσμιο επίπεδο, με τη χρήση ραδιοκυμάτων που αποστέλλονται και λαμβάνονται μέσω πύργων τηλεφωνίας. Επιπρόσθετα, αξίζει να επισημανθεί πως με την συγκεκριμένη τεχνολογία καθίσταται δυνατή η πραγματοποίηση ισχυρών συνδέσεων μεταξύ μιας συσκευής και ενός πύργου κινητής τηλεφωνίας σε απόσταση μέχρι 16 χιλιομέτρων. Παράλληλα, επιτυγχάνεται συνδεσιμότητα σε δίκτυα τηλεφωνίας μέσω δορυφόρου, εξαλείφοντας περαιτέρω επικοινωνιακά εμπόδια στις απομακρυσμένες περιοχές. Η οικογένεια των δικτύων κινητής τηλεφωνίας 3GPP είναι η κορυφαία πλατφόρμα για την ασύρματη επικοινωνία παγκοσμίως. Αυτό που ξεκίνησε ως ένα ενιαίο παγκόσμιο πρότυπο για την κινητή τηλεφωνία έχει εξελιχθεί σε ένα ευρύ φάσμα τεχνολογιών δικτύων 2G, 3G και 4G που λειτουργούν σε ένα συνεχώς διευρυνόμενο φάσμα ζωνών συχνοτήτων, υποστηρίζοντας πολλαπλούς τρόπους λειτουργίας. Η οικογένεια προτύπων 3GPP διακρίνεται σε τρεις κύριες κατηγορίες: τα παλαιά πρότυπα 2G, όπως οι General Packet Radio Services (GPRS), τα τρέχοντα 3G/4G High Speed Packet Access (HSPA), το Long-Term Evolution (LTE) και τα διαρκώς αυξανόμενης δημοφιλίας 4G-MTC (Machine Type Communication) πρότυπα, LTE-M και Narrow Band IoT (NB-IoT) [23].

2) Low Power Wide Area Network (LPWAN)

- **SigFox**

Το SigFox είναι μια τεχνολογία χαμηλής ισχύος για ασύρματη επικοινωνία ποικίλων αντικειμένων χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας, όπως αισθητήρες και εφαρμογές Machine-to-Machine(M2M). Επιτρέπει τη μεταφορά μικρών ποσοτήτων δεδομένων σε απόσταση έως και 50 χιλιομέτρων. Το SigFox χρησιμοποιεί την τεχνολογία Ultra-Narrow Band (UNB), η οποία έχει

σχεδιαστεί για να διαχειρίζεται μειωμένες ταχύτητες μεταφοράς δεδομένων από 10 έως 1.000 bits ανά δευτερόλεπτο και μπορεί να λειτουργήσει με μια μικρή μπαταρία. Η τεχνολογία του SigFox αξιοποιείται σε έξυπνους μετρητές, οθόνες ασθενών, στις γεωργικές καλλιέργειες, στις συσκευές ασφαλείας, στον φωτισμό των δρόμων και τους περιβαλλοντικές αισθητήρες. Παράλληλα, αξίζει να επισημανθεί ότι το SigFox υποστηρίζει τοπολογία δικτύου αστέρα [29].

- **Long Range Radio (LoRa)**

Το δίκτυο ευρείας περιοχής LoRa(LoRaWAN) είναι μια προδιαγραφή LPWAN, η οποία προορίζεται για ασύρματες συσκευές χαμηλού κόστους, που λειτουργούν με μπαταρίες σε περιφερειακά, εθνικά ή παγκόσμια δίκτυα. Το LoRaWAN είναι προϊόν της LoRa Alliance(Συμμαχίας LoRa), μιας ανοικτής, μη κερδοσκοπικής ένωσης ηγετών του κλάδου, οι οποίοι υποστηρίζουν ότι διανύεται η εποχή εκτίναξης του Διαδικτύου των Πραγμάτων και δημιούργησαν το συγκεκριμένο δίκτυο ειδικά για συνδεσιμότητα IoT/Machine-to-Machine (M2M). Στόχος της συμμαχίας αποτελεί η τυποποίηση των LPWAN, που αναπτύσσονται σε ολόκληρο τον κόσμο, προκειμένου να ενεργοποιηθούν οι εφαρμογές IoT και M2M, καθώς και να ξεκινήσει η διαμόρφωση έξυπνων πόλεων. Η λύση έχει σχεδιαστεί για σύνδεση σε μεγάλες αποστάσεις(έως και 16 χιλιόμετρα μακριά), σε σκληρά περιβάλλοντα και σε απομονωμένες περιοχές. Το LoRa παρέχει αμφίδρομη επικοινωνία μεταξύ των τελικών συσκευών και των επιχειρήσεων μέσω μιας πύλης. Συνεπώς, καθίσταται αδύνατη η σύνδεση συσκευών ως αυτόνομων υπηρεσιών, και οι επιχειρήσεις εξακολουθούν να χρειάζονται μια σύνδεση σε Wi-Fi ή σε δίκτυο κινητής τηλεφωνίας για να επιτραπεί η επικοινωνία της πύλης στο δίκτυο διακομιστή [23].

3) Short Range Network

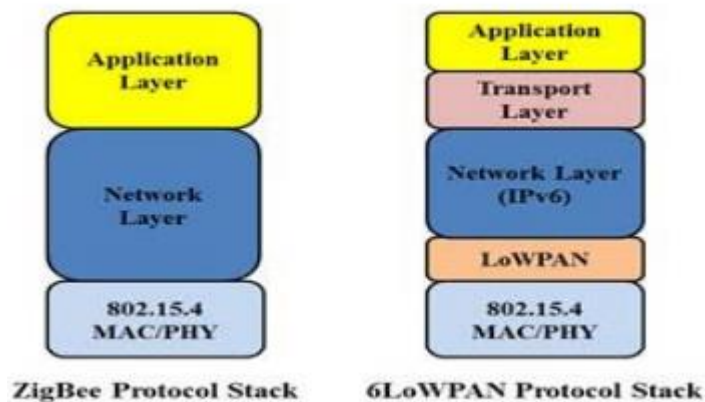
- **6LoWPAN**

Το 6LoWPAN είναι το πρώτο και πιο συχνά χρησιμοποιούμενο πρότυπο στα πρωτόκολλα επικοινωνίας IoT, καθώς αποτελεί ένα πρότυπο πρωτόκολλο διαδικτυακής δικτύωσης βασισμένο σε IP. Συνδέεται απευθείας με ένα άλλο δίκτυο IP χωρίς ενδιάμεσες οντότητες, όπως πύλες μετάφρασης ή proxy. Το πρότυπο αυτό έχει δημιουργηθεί από την Ομάδα Εργασίας Μηχανικής Διαδικτύου (IETF), και ορίζεται ως πρότυπο επικοινωνίας πρωτοκόλλου διαδικτύου (IP), μέσω

ασύρματων δικτύων χαμηλής ισχύος IEEE802.15.4, τα οποία χρησιμοποιούν το IPv6. Υποστηρίζει 2128 διευθύνσεις IP, γεγονός που αποσκοπεί στην υποστήριξη διαφορετικού μήκους διευθύνσεων. Παράλληλα, χαρακτηρίζεται από χαμηλό κόστος, εύρος ζώνης ισχύος και κατανάλωση ενέργειας. Το 6LoWPAN υποστηρίζει διαφορετικούς τύπους τοπολογιών, όπως τοπολογία πλέγματος και αστέρα. Ακόμη, προτείνει ένα στρώμα προσαρμογής μεταξύ του στρώματος MAC και του στρώματος δικτύου (IPv6), προκειμένου να αντιμετωπιστεί η διαλειτουργικότητα μεταξύ του IEEE 802.15.4 και του IPv6. Η πιο ανταγωνιστική εναλλακτική λύση για το 6LoWPAN αποτελεί το ZigBee, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.14, καθώς και τα δύο χρησιμοποιούν το ίδιο πρωτόκολλο IEEE 802.15.4 στο φυσικό επίπεδο [29].

- **ZigBee**

Το πρωτόκολλο ZigBee διαμορφώθηκε από την ZigBee Alliance με βάση το πρότυπο ασύρματων δικτύων χαμηλής ισχύος IEEE802.15.4. Το ZigBee δημιουργήθηκε με σκοπό να αποτελέσει πρότυπο εξυπηρέτησης πρωτοκόλλων επικοινωνίας υψηλού επιπέδου και χαμηλού κόστους, τα οποία παράγουν προσωπικά δίκτυα περιοχής ή ψηφιακά ραδιόφωνα μικρού μεγέθους και χαμηλής ισχύος, που μεταδίδουν δεδομένα σε μεγαλύτερες αποστάσεις. Ταυτόχρονα, αξιοποιείται σε εφαρμογές που προϋποθέτουν χαμηλό ρυθμό δεδομένων, μεγαλύτερη διάρκεια ζωής μπαταρίας και ασφαλείς συσκευές δικτύωσης. Τέλος, το ZigBee υποστηρίζει διαφορετικούς τύπους τοπολογιών δικτύου, όπως πλέγματος(mesh), αστέρα και δέντρου [29].



Σχήμα 3.14: Πρωτόκολλο ZigBee και 6LoWPAN [29].

- **BLE**

Το BLE είναι επίσης γνωστό ως Bluetooth smart, και αποτελεί ένα σημαντικό πρωτόκολλο για εφαρμογές του Διαδικτύου των Πραγμάτων. Είναι σχεδιασμένο και βελτιωμένο για εφαρμογές IoT μικρής εμβέλειας, χαμηλού εύρους ζώνης και χαμηλής καθυστέρησης. Τα πλεονεκτήματα του BLE classic Bluetooth περιλαμβάνουν χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας, χαμηλότερο χρόνο εγκατάστασης και την υποστήριξη τοπολογίας δικτύου αστέρα με απεριόριστο αριθμό κόμβων [29].

- **RFID**

Η τεχνολογία RFID διαθέτει μια ποικιλία προτύπων, όπως ISO, IEC, ASTM International, DASH7 Alliance και EPC-global. Τα συστήματα RFID αποτελούνται από μια συσκευή ανάγνωσης που ονομάζεται αναγνώστης και ένα μικρό αναμεταδότη ραδιοσυχνότητας που ονομάζεται ετικέτα RF. Αυτή η ετικέτα είναι ηλεκτρονικά προγραμματισμένη με μοναδικές πληροφορίες που διαθέτουν χαρακτηριστικά ανάγνωσης από απόσταση. Οι τεχνολογίες των ετικετών RFID διακρίνονται σε δύο κατηγορίες: Η πρώτη ονομάζεται σύστημα ετικετών ενεργού αναγνώστη και η δεύτερη σύστημα ετικετών παθητικού αναγνώστη. Οι ενεργές ετικέτες τροφοδοτούνται από μπαταρίες, είναι πιο ακριβές και χρησιμοποιούν υψηλότερες συχνότητες, ενώ οι παθητικές ετικέτες χρησιμοποιούν χαμηλότερες συχνότητες και δεν διαθέτουν εσωτερικές πηγές ενέργειας. Επειδή οι πληροφορίες RFID είναι στατικές και οφείλουν να προγραμματιστούν στην ετικέτα, δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν άμεσα για τη μέτρηση ή την διάγνωση δεδομένων. Ορισμένες από τις εφαρμογές IoT, στις οποίες χρησιμοποιείται το πρότυπο RFID, αποτελούν οι έξυπνες αγορές, η υγειονομική περίθαλψη, η εθνική ασφάλεια και η γεωργία. Ακόμη, το RFID θεωρείται ικανό να υποστηρίξει τοπολογία δικτύου P2P [29].

- **NFC**

Το NFC αποτελεί μια τεχνολογία ασύρματης επικοινωνίας πολύ μικρής εμβέλειας, η οποία επιτρέπει τη μετάδοση δεδομένων μεταξύ συσκευών με το άγγιγμά τους ή με την προσέγγισή τους σε απόσταση όχι μεγαλύτερη από μερικές ίντσες. Επιπλέον, το NFC χρησιμοποιεί παρόμοιες αρχές τεχνολογίας με την τεχνολογία RFID. Ωστόσο, δεν χρησιμοποιείται μόνο για ταυτοποίηση

αλλά και για περιπλοκότερη αμφίδρομη επικοινωνία. Αξίζει να αναφερθεί, πως διαθέτει μια ετικέτα που ενδέχεται να περιέχει μικρή ποσότητα δεδομένων. Η ετικέτα εκείνη διαβάζεται ή επανεγγράφεται και τροποποιείται αργότερα από τη συσκευή. Υποστηρίζονται τρεις κύριοι τρόποι λειτουργίας για το NFC: η λειτουργία εξομοίωσης κάρτας(παθητική λειτουργία), η λειτουργία αναγνώστη/εγγραφέα(ενεργή λειτουργία) και η λειτουργία peer-to-peer. Η τεχνολογία NFC εφαρμόζεται ευρέως στα κινητά τηλέφωνα, στις βιομηχανικές εφαρμογές και τις ανέπαφες πληρωμές [29].

- **Z-Wave**

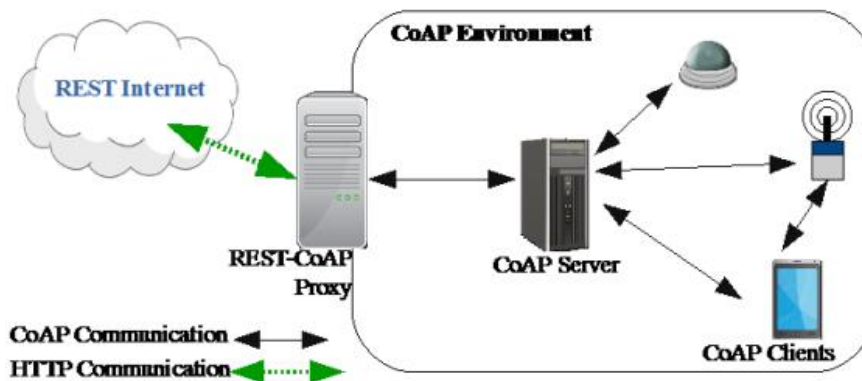
Το Z-Wave ορίζεται ως ένα πρωτόκολλο MAC χαμηλής ισχύος, που αναπτύχθηκε από την Zensys και αξιοποιεί τον ασύρματο οικιακό αυτοματισμό για τη σύνδεση 30-50 κόμβων, ενώ έχει χρησιμοποιηθεί για την επικοινωνία IoT, κυρίως σε εφαρμογές έξυπνων σπιτιών και σε μικρούς εμπορικούς τομείς. Η τεχνολογία αυτή έχει σχεδιαστεί για μικρά πακέτα δεδομένων σε σχετικά χαμηλές ταχύτητες έως 100 kb/s και επικοινωνία 30 μέτρων από σημείο σε σημείο. Ως εκ τούτου, είναι κατάλληλη για την αποστολή μικρού μήκους μηνυμάτων σε εφαρμογές IoT, όπως ο έλεγχος του φωτισμού, της ενέργειας και της υγειονομικής περίθαλψης. Το Z-Wave εξαρτάται από δύο τύπους συσκευών, του ελεγκτή και του σκλάβου(slave). Οι κόμβοι σκλάβων αποτελούν συσκευές χαμηλού κόστους που δεν είναι σε θέση να ξεκινήσουν την μεταφορά μηνυμάτων. Χαρακτηρίζονται ικανές μόνο για την απάντηση και τη διεκπεραίωση εντολών, που τους αποστέλλονται από τους ελεγκτές, οι οποίοι είναι εκείνοι που δρομολογούν τα μηνύματα εντός του δικτύου. Ολοκληρώνοντας, το Z-Wave υποστηρίζει την τοπολογία δικτύου πλέγματος [29].

➤ ***ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΑ ΕΠΙΠΕΔΟΥ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ***

- **Constrained Application Protocol (CoAP)**

Η ομάδα εργασίας Constrained RESTful Environments (CoRE) της IETF δημιούργησε το CoAP, το οποίο είναι ένα πρωτόκολλο επιπέδου εφαρμογής που αξιοποιείται στο Διαδίκτυο των Πραγμάτων. Το CoAP ορίζει ένα πρωτόκολλο διαδικτυακής μεταφοράς που βασίζεται στην REpresentational State Transfer (REST) πάνω από τις λειτουργίες του HTTP. Το REST αντιπροσωπεύει έναν απλούστερο τρόπο ανταλλαγής δεδομένων μεταξύ πελατών και διακομιστών μέσω του HTTP. Ακόμη, το REST θεωρείται ένα πρωτόκολλο σύνδεσης με

δυνατότητα προσωρινής αποθήκευσης, που βασίζεται στην αρχιτεκτονική πελάτη-εξυπηρετητή, χωρίς την παρουσία καταστάσεων. Χρησιμοποιείται στο πλαίσιο εφαρμογών κινητών τηλεφώνων και κοινωνικών δικτύων, εξαλείφοντας την ασάφεια, με τη χρήση των μεθόδων HTTP get, post, put και delete. Επιπρόσθετα, το REST επιτρέπει στους πελάτες και τους διακομιστές να εκμεταλλεύονται υπηρεσίες ιστού, όπως το πρωτόκολλο SOAP(Simple Object Access Protocol), αλλά με ευκολότερο τρόπο, χρησιμοποιώντας τα URLs(Uniform Resource Identifiers) ως ουσιαστικά και τις μεθόδους HTTP get, post, put και delete ως ρήματα. Παράλληλα, το REST δεν απαιτεί XML για την ανταλλαγή μηνυμάτων. Σε αντίθεση με το REST, το CoAP δεσμεύεται από προεπιλογή στο UDP (όχι στο TCP), γεγονός που το καθιστά καταλληλότερο για εφαρμογές IoT. Επιπλέον, το CoAP τροποποιεί ορισμένες λειτουργίες του HTTP για να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις του IoT, όπως χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και λειτουργία με την παρουσία απωλειών και θορυβωδών συνδέσεων. Ωστόσο, δεδομένου ότι ο CoAP έχει σχεδιαστεί με βάση το REST, η μετατροπή μεταξύ αυτών των δύο πρωτοκόλλων σε διακομιστές REST-CoAP αποτελεί απλή διαδικασία. Η συνολική λειτουργικότητα του πρωτοκόλλου CoAP παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.15 [31].



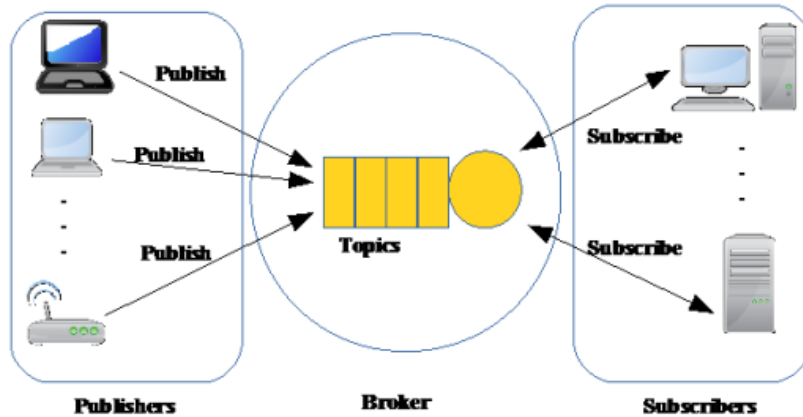
Σχήμα 3.15: Λειτουργία CoAP [31].

Το πρωτόκολλο CoAP προσδοκά να δώσει την ευκαιρία σε μικροσκοπικές συσκευές με χαμηλή ισχύ, υπολογιστικές και επικοινωνιακές δυνατότητες, ώστε να χρησιμοποιούν αλληλεπιδράσεις RESTful. Το CoAP διακρίνεται σε δύο υποεπίπεδα, στο υποεπίπεδο ανταλλαγής μηνυμάτων και το υποεπίπεδο αίτησης/απάντησης. Το υποεπίπεδο ανταλλαγής μηνυμάτων ανιχνεύει τις αντιγραφές και παρέχει αξιόπιστη επικοινωνία μέσω του επιπέδου μεταφοράς UDP, χρησιμοποιώντας εκθετικό backoff, δεδομένου ότι το UDP δεν διαθέτει ενσωματωμένο

μηχανισμό ανάκτησης σφαλμάτων. Το υποεπίπεδο αίτηση/απάντησης από την άλλη πλευρά χειρίζεται τις REST επικοινωνίες. Το CoAP χρησιμοποιεί τέσσερις τύπους μηνυμάτων: επιβεβαιωμένα, μη επιβεβαιωμένα, τα μηνύματα επαναφοράς(reset) και επιβεβαίωσης [31].

- **Message Queue Telemetry Transport (MQTT)**

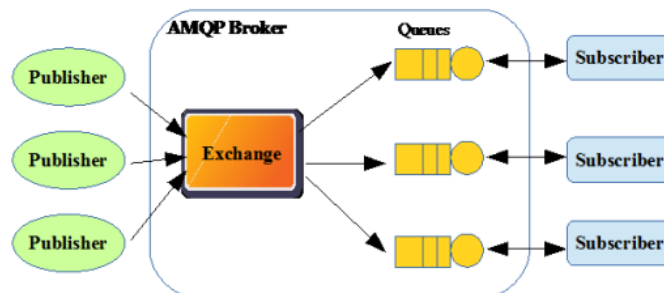
Το MQTT αποτελεί πρωτόκολλο ανταλλαγής μηνυμάτων, που στοχεύει στη σύνδεση ενσωματωμένων συσκευών και δικτύων, με εφαρμογές και ενδιάμεσο λογισμικό. Η σύνδεση διαμορφώνει ένα μηχανισμό δρομολόγησης(one-to-one, one-to-many, many-to-many) και επιτρέπει στο MQTT να αποτελέσει το βέλτιστο πρωτόκολλο επικοινωνίας για το IoT και το M2M. Το MQTT χρησιμοποιεί το μοτίβο δημοσίευσης/εγγραφής για την παροχή ευελιξίας μετάβασης και απλότητας υλοποίησης, όπως ακριβώς απεικονίζεται στο Σχήμα 3.16. Επίσης, το MQTT χαρακτηρίζεται κατάλληλο για συσκευές με περιορισμένο αριθμό πόρων, οι οποίες εκμεταλλεύονται αναξιόπιστες ή χαμηλού εύρους ζώνης συνδέσεις. Το MQTT βασίζεται στο πρωτόκολλο TCP. Επιπλέον, παρέχει μηνύματα μέσω τριών επιπέδων QoS. Παράλληλα, για το MQTT αναγράφονται δύο σημαντικές προδιαγραφές: η MQTT v3.1 και η MQTT-SN(παλαιότερα γνωστή ως MQTT-S) V1.2. Η τελευταία ορίζεται ειδικά για δίκτυα αισθητήρων και διαμορφώνει μια UDP χαρτογράφηση του MQTT, προσθέτοντας υποστήριξη μεσίτη(broker), για την ευρετηρίαση θεματικών ονομάτων. Οι προδιαγραφές προβλέπουν τρία στοιχεία: σημασιολογία σύνδεσης, δρομολόγηση και τελικό σημείο. Το MQTT αποτελείται από τρία συστατικά: τον συνδρομητή, τον εκδότη και τον μεσίτη. Μια συσκευή θα εγγραφεί ως συνδρομητής για συγκεκριμένα θέματα, προκειμένου να ενημερώνεται από τον μεσίτη όταν οι εκδότες δημοσιεύουν τα θέματα που τους ενδιαφέρουν. Τότε, ο εκδότης ενεργεί ως παραγωγός των δεδομένων. Μετά από αυτό, ο εκδότης διαβιβάζει τις πληροφορίες στις ενδιαφερόμενες οντότητες (συνδρομητές) μέσω του διαμεσολαβητή(broker) [31].



Σχήμα 3.16: Η αρχιτεκτονική του MQTT [31].

- **Advanced Message Queuing Protocol (AMQP)**

Το AMQP αποτελεί ένα ανοικτό πρότυπο πρωτόκολλο επιπέδου εφαρμογής για το IoT, που επικεντρώνεται σε περιβάλλοντα προσανατολισμένα σε μηνύματα. Το συγκεκριμένο πρωτόκολλο υποστηρίζει αξιόπιστη επικοινωνία, μέσω πρωτοτύπων εγγύησης παράδοσης μηνυμάτων, συμπεριλαμβανομένων των παραδόσεων at-most-once(το πολύ ένα), at-least-once(το λιγότερο ένα) και exactly once(ακριβώς ένα). Το AMQP απαιτεί ένα αξιόπιστο πρωτόκολλο μεταφοράς, όπως το TCP, για την ανταλλαγή μηνυμάτων. Με τον ορισμό ενός πρωτοκόλλου σε επίπεδο καλωδίου, οι υλοποιήσεις του AMQP βρίσκονται σε θέση να διαλειτουργούν μεταξύ τους. Οι επικοινωνίες διεκπεραιώνονται από δύο κύρια στοιχεία όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 3.17: ανταλλαγές και ουρές μηνυμάτων. Οι ανταλλαγές χρησιμοποιούνται για τη δρομολόγηση των μηνυμάτων στις κατάλληλες ουρές. Η δρομολόγηση μεταξύ ανταλλαγών και ουρών μηνυμάτων βασίζεται σε ορισμένους προκαθορισμένους κανόνες και συνθήκες. Τα μηνύματα μπορούν να αποθηκεύονται σε ουρές μηνυμάτων και στη συνέχεια να αποστέλλονται σε παραλήπτες [31].



Σχήμα 3.17: Μηχανισμός δημοσίευσης/εγγραφής του AMQP [31].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο

ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΚΑΙ ΙΟΤ ΣΤΗΝ COVID-19 ΕΠΟΧΗ

Τα τελευταία χρόνια, έχουμε γίνει μάρτυρες συνεχών συζητήσεων σχετικά με την έννοια του IoT (Internet of Things), η οποία περιλαμβάνει τη σύνδεση διαφόρων αντικειμένων, που μας περιβάλλουν στην καθημερινή μας ζωή, με τη χρήση του Διαδικτύου. Ο κύριος σκοπός της ιδέας του IoT συνδέεται στενά με το θέμα της έξυπνης πόλης, οδηγώντας σε βελτίωση της ποιότητας ζωής, συμβάλλοντας στην αποτελεσματική χρήση των πόρων και την προστασία του περιβάλλοντος. Οι τεχνολογίες του IoT είναι επαρκώς ενισχυμένες, ώστε να επιτρέπουν την ανάπτυξη ολοκληρωμένων λύσεων για τις προκλήσεις που αντιμετωπίζει σήμερα η ανθρωπότητα. Όλη αυτή η γνώση και τεχνολογική πρόοδος δεν φαίνεται να μας έχει προετοιμάσει αρκετά για το πλαίσιο της πανδημίας του ιού SARS-CoV-2, που διαμορφώνεται στην σημερινή κοινωνία. Μέχρι την έναρξη της πανδημίας, δεν είχε δημιουργηθεί ισχυρή σύνδεση μεταξύ του IoT και του κλάδου της υγειονομικής περίθαλψης. Η συγκεκριμένη πτυχή όφειλε να μεταβληθεί και να επιτρέψει την ενσωμάτωση των υπηρεσιών υγειονομικής φροντίδας στην τρέχουσα υφιστάμενη υποδομή του IoT. Συνεπώς, αποτελεί ευθύνη μας, ως ερευνητική κοινότητα, να αναπτύξουμε νέα συστήματα τεχνολογίας IoT, εντοπίζοντας λύσεις στα τρέχοντα προβλήματα, που έφερε η πανδημία του νέου κορονοϊού [32].

Η ικανότητα των υπηρεσιών IoT στην παροχή απομακρυσμένης συλλογής δεδομένων και παρακολούθησης των ασθενών σε καραντίνα, έχει καταστήσει το Διαδίκτυο των Πραγμάτων καθοριστικό παράγοντα στην καταπολέμηση της εξάπλωσης πανδημικών ιών. Οι εργαζόμενοι του τομέα της υγείας και οι αρχές χρειάζονται δεδομένα για να διαχειριστούν μια ταχέως εξαπλωμένη αναπνευστική πανδημία. Για τον COVID-19, τα δεδομένα μπορούν να αξιοποιηθούν για να ξεκινήσει η διάγνωση της λοίμωξης και να εντοπιστεί επίσης η κατεύθυνση της μετάδοσης στην κοινότητα. Τα πρωτεύοντα δεδομένα που απαιτούνται περιλαμβάνουν τη θερμοκρασία του σώματος, την τοποθεσία του ασθενούς και το ιστορικό ταξιδιών του. Αυτές οι παράμετροι

μπορούν να σηµάνουν συναγερµό στους υγειονοµικούς αξιωµατούχους, σχετικά µε το αν υπάρχει ανάγκη για περαιτέρω έρευνα και δοκιµές ή όχι. Αρχικά, οι εργαζόµενοι στον τοµέα της υγείας κατέφευγαν σε µια χειροκίνητη µέθοδο για τη µέτρηση των θερμοκρασιών µε τη χρήση θερμομέτρων υπέρυθρης ακτινοβολίας και προφορικές ερωτήσεις στους ανθρώπους σχετικά µε το ιστορικό και τις θέσεις τους. Όµως, η συγκεκριµένη πρακτική εγκυµονούσε κινδύνους για τους εργαζόµενους, λόγω της αυξηµένης επαφής µε δυνητικά µολυσµένα άτοµα, ενώ παράλληλα είχε καταστεί µια όλο και πιο δύσκολη προσέγγιση, καθώς τα ποσοστά μόλυνσης προσέγγιζαν τα εκατοµµύρια [33].

Οι ερευνητές πρότειναν τη αξιοποίηση ενός ήδη υπάρχοντος Διαδικτύου των Πραγµάτων για την αποτελεσµατική παρακολούθηση και τον έλεγχο των αυξανόµενων µολύνσεων του COVID-19. Το συγκεκριµένο δίκτυο, που αποτελείται από ετερογενείς αισθητήρες, οι οποίοι εμφανίζονται µε τη µορφή φορητών συσκευών, κινητών τηλεφώνων, φωτογραφικών µηχανών και µη επανδρωµένων αεροσκαφών, ενσωµατώθηκε ταχύτατα στις κοινότητες. Τα πρωτόκολλα επικοινωνίας µεγάλης εμβέλειας και χαµηλής ισχύος (LPWAN) έχουν επιτρέψει την δυνατότητα συλλογής δεδοµένων και παρακολούθησης σε πολύ µεγάλες περιοχές. Η διαχείριση χιλιάδων τέτοιων ετερογενών συσκευών που συλλέγουν δεδοµένα θέσης και θερμοκρασίας, για λογαριασµό των αρχών, βελτιώθηκε περαιτέρω µε την ασύρµατη δικτύωση αισθητήρων, που καθορίζεται από το λογισµικό (SDWSN). Η SDWSN σε συνδυασµό µε τεχνολογίες του LPWAN, όπως του πρωτοκόλλου επικοινωνίας LoRaWAN, έχει τη δυνατότητα να επιτρέπει στους εργαζόµενους στον τοµέα της υγείας να συλλέγουν δεδοµένα και να παρακολουθούν την εξάπλωση του κορονοϊού σε πολλαπλές τοποθεσίες και µεγάλες κοινότητες. [33].

Το Διαδίκτυο των Πραγµάτων που βασίζεται στην υγεία(Healthcare IoT) γίνεται ολοένα και περισσότερο µια στρατηγική εφαρµογή επιλογής µετά από τις κατευθυντήριες γραµµές του Π.Ο.Υ για την κοινωνική αποστασιοποίηση και τις διαδικασίες τόσο εντοπισµού όσο και παρακολούθησης των λοιµώξεων. Ως εκ τούτου, αναµένονται εξελίξεις, προσαρµογές και ολική ανάπτυξη των υποδοµών και πλαισίων του IoT για την ηλεκτρονική υγεία(E-health).

4.1 Healthcare IoT για την διαχείριση της πανδημίας

Η ανάπτυξη τεχνολογίας IoT για την καταπολέμηση μιας παγκόσμιας πανδημίας οδηγεί σε ένα σαφώς καθορισμένο οικοσύστημα υλικού, λογισμικού και συναφών πολιτικών. Παρακάτω, εξετάζεται ο ορισμός των συστατικών του συγκεκριμένου οικοσυστήματος υγειονομικής περίθαλψης με βάση τα ευρήματα της έρευνας που πραγματοποιήθηκε. Το ήθος της χρήσης του Διαδικτύου των Πραγμάτων για τη διαχείριση μιας πανδημίας δημιουργεί ένα εξειδικευμένο σύνολο ομοιόμορφα ενσωματωμένων στοιχείων. Τα στοιχεία αυτά λειτουργούν μαζί ως μέρος ενός περιβάλλοντος με γνώμονα την καταπολέμηση και την ελαχιστοποίηση της εξάπλωσης ενός ιού. Επιπρόσθετα πλεονεκτήματα της χρήσης του IoT για την καταπολέμηση της πανδημίας του COVID-19 αποτελούν η μεγαλύτερη ακρίβεια στη διαχείριση των ασθενών, το μειωμένο κόστος, ο αποτελεσματικός έλεγχος, η δραστική διάγνωση και η παροχή ευκαιριών για ανώτερη θεραπεία. Ένα τέτοιο οικοσύστημα διακρίνεται στα ακόλουθα κύρια συστατικά στοιχεία, όπως αυτά ορίζονται από διάφορες ερευνητικές συνεισφορές [33].

- **ΥΛΙΚΟ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ**

Το εγκατεστημένο υλικό αισθητήρων αποτελεί μια κρίσιμη πτυχή της υποδομής του Healthcare IoT(H-IoT). Το συγκεκριμένο υλικό χαρακτηρίζεται η πρωταρχική πηγή δεδομένων , που αξιοποιούνται στην προώθηση του σκοπού και των στόχων της υλοποίησης του Διαδικτύου των Πραγμάτων. Στην καταπολέμηση και τη διαχείριση μιας παγκόσμιας πανδημίας σαν αυτή του COVID-19 το υλικό αισθητήρων ενδέχεται να σχηματίζει τη μορφή φορητών συσκευών ιδανικών για BANs ή να βασίζεται στη δομή ενός smartphone με ενσωματωμένους αισθητήρες, όπως αποτελούν τα τσιπ γεωεντοπισμού, τα επιταχυνσιόμετρα, οι κάμερες κ.λπ. Οι αναπτυγμένες έξυπνες συσκευές δύναται να χρησιμοποιηθούν σε αεροπλάνα, αεροδρόμια, νοσοκομεία, ενώ παράλληλα να διατίθενται σε ιδιώτες, περιλαμβάνοντας εύκολες στη χρήση εφαρμογές. Για τη διευκόλυνση της διαχείρισης της πανδημίας, την περίοδο κοινωνικής αποστασιοποίησης, ένα δίκτυο υπολογιστών και έξυπνων κινητών τηλεφώνων καθίσταται απαραίτητο για την παροχή εικονικών επικοινωνιών. Μια δημοφιλής επιλογή για υλικό αισθητήρων χαμηλού κόστους με στόχο την καταπολέμηση της πανδημίας αποτελεί η χρήση της ήδη υπάρχουσας τεχνολογίας του έξυπνου κινητού τηλεφώνου(smartphone). Το επιταχυνσιόμετρο του smartphone, το μικρόφωνο, η κάμερα και οι αισθητήρες θερμοκρασίας χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με αλγορίθμους

μηχανικής μάθησης (MACHINE LEARNING) για την ανίχνευση πρώιμων συμπτωμάτων του COVID-19. Παράλληλα, στην ανίχνευση και τη διάγνωση του κορονοϊού χρησιμοποιείται τόσο η αναπτυγμένη τεχνολογία των drones όσο και οι αισθητήρες γεωγραφικού εντοπισμού. Στη συνέχεια αξίζει να αναφερθεί, η ερευνητική πρόταση αξιοποίησης ενός IoT drone με μηχανισμό θερμικής απεικόνισης για την ανίχνευση ύποπτων υψηλών θερμοκρασιών σώματος λόγω του COVID-19. Πρόσφατα, προτάθηκε ένας παρόμοιος αλγόριθμος εντοπισμού με τη χρήση ενός έξυπνου κράνους ως κύριο υλικό, που θα χρησιμοποιεί κάμερες θερμικής απεικόνισης και ετικέτες γεωεντοπισμού, προκειμένου να ανιχνεύσει και να αναφέρει ύποπτα συμπτώματα πυρετού, τα οποία ενδέχεται να προκληθούν από τον νέο κορονοϊό [33].

- **ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟ HEALTHCARE-IOT**

Εξαιτίας της έξαρσης του COVID-19, αναπτύσσονται διάφορα νέα εργαλεία λογισμικού και διαχείρισης, με σκοπό την καλύτερη προσπάθεια συλλογής και διήθησης των δεδομένων των αισθητήρων. Στους κύριους τομείς εστίασης περιλαμβάνονται, μεταξύ άλλων, η ενεργειακή αποδοτικότητα, οι ελαφροί μηχανισμοί, οι αποτελεσματικές και λιγότερο παρεμβατικές τεχνικές συλλογής δεδομένων. Οι πρόσφατες υλοποιήσεις λογισμικού τείνουν να επικεντρώνονται στην καλύτερη δυνατή αξιοποίηση του ήδη υπάρχοντος υλικού, όπως είναι τα smartphones, για να αποτελέσουν μέρος του οικοσυστήματος του H-IoT. Η πρώτη σειρά λύσεων λογισμικού για την παρακολούθηση και τον εντοπισμό μολύνσεων, έχει αναδειχθεί από τα λειτουργικά συστήματα κινητών τηλεφώνων android και ios. Και τα δύο συστήματα διαθέτουν ενσωματωμένα APIs για την ειδοποίηση του χρήστη σχετικά με πιθανό κίνδυνο έκθεσης του στον COVID-19. Χρησιμοποιώντας ενσωματωμένους αισθητήρες smartphone μικρού εύρους, το API παρέχει τη δυνατότητα ενημέρωσης του χρήστη, εάν κάποιος που βρίσκεται κοντά του έχει καταχωρηθεί πρόσφατα ως θετικά διαγνωσμένος. Κυβερνήσεις στην Ινδία και τη Σιγκαπούρη έχουν προωθήσει την ανάπτυξη εφαρμογών smartphone, για να διασφαλιστεί η αποτελεσματική παρακολούθηση και ο εντοπισμός των ατόμων, που έχουν βρεθεί θετικά προσβεβλημένα από το νέο κορονοϊό [33].

- **ΕΞΑΓΩΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ**

Η δομή αισθητήρων στον τομέα του IoT παράγει βασικά δεδομένα, που ανταποκρίνονται στους στόχους μιας εφαρμογής του Διαδικτύου των Πραγμάτων, για τη διαχείριση ενός κοινωνικού προβλήματος. Προκειμένου να επιτευχθεί η ενδεδειγμένη δυνατή επίβλεψη της

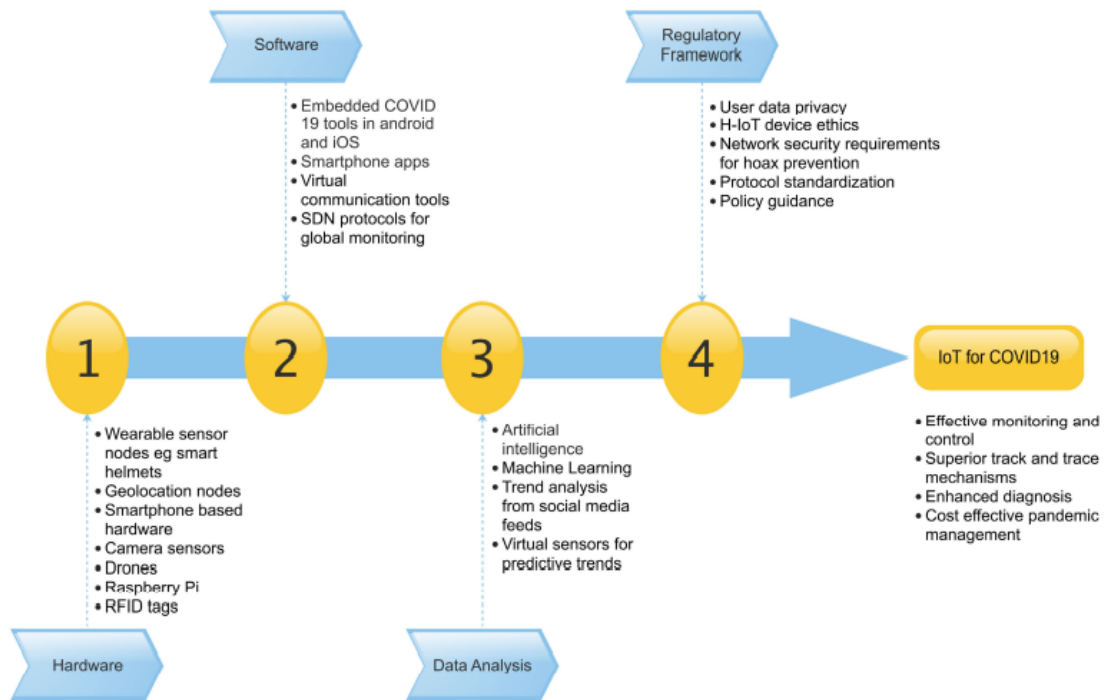
πανδημίας, οι ερευνητές χρειάζονται πληροφορίες σχετικά με την πρόοδο των λοιμώξεων και της κατάστασης της υγείας των ασθενών. Παράλληλα, καθοριστική θεωρείται η ανίχνευση των δεδομένων τοποθεσίας των ανθρώπων για σκοπούς εντοπισμού και παρακολούθησης. Ωστόσο, με την ραγδαία ανάπτυξη των αισθητήρων, η συσσώρευση πληροφοριών οδηγεί στην ανάγκη διήθησης χρήσιμων δεδομένων και την διαμόρφωση μηχανισμών διαχείρισης μεγάλων δεδομένων(big data). Η χρήση τεχνικών μηχανικής μάθησης(machine learning) και τεχνητής νοημοσύνης(artificial intelligence) καθίσταται μια δημοφιλής οδός στη διαδικασία ανάλυσης και λήψης αποφάσεων στα αισθητηριακά δεδομένα. Οι αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης έχουν χρησιμοποιηθεί στην εκπαίδευση θερμικών εικόνων, οι οποίες απεικονίζουν τόσο αρνητικές όσο και θετικές διαγνώσεις του COVID-19. Η έννοια της βαθιάς μάθησης(deep learning) αποτελεί ένα συστατικό της τεχνητής νοημοσύνης και χρησιμοποιείται αποτελεσματικά για τη διάγνωση των μολύνσεων του COVID-19, με βάση αξονικές τομογραφίες και εικόνες ακτίνων X, διαθέτοντας ελάχιστη πιθανότητα σφάλματος. Ένα άλλο σημαντικό χαρακτηριστικό ανάλυσης δεδομένων, που εφαρμόζεται στην αντιμετώπιση της εξάπλωσης του κορονοϊού, είναι η ανάλυση κοινωνικών τάσεων σε συνδυασμό με τη μηχανική μάθηση. Το COVIDSens αξιοποιεί τα μέσα κοινωνικής δικτύωσης και τη μηχανική μάθηση για την παρακολούθηση και τον εντοπισμό της διάδοσης του ιού. Με βάση τις εμπειρίες των χρηστών, οι οποίες δημοσιεύονται στα μέσα κοινωνικής δικτύωσης, η εφαρμογή φιλτράρει χρήσιμες νέες πληροφορίες προς όφελος της κυβέρνησης και της κοινότητας [33].

- **ΤΟ ΡΥΘΜΙΣΤΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ**

Η ανάπτυξη αισθητήρων στο συγκεκριμένο επιστημονικό πεδίο και στο ανθρώπινο σώμα οφείλει να τηρεί τη δεοντολογία και τους κανονισμούς. Οι ραδιοσυχνότητες και τα κανάλια επικοινωνίας διαμορφώνονται με στόχο την ασφάλεια για την τοποθέτηση συσκευών κοντά στο σώμα. Λαμβάνοντας υπόψη τον κίνδυνο μόλυνσης από ιούς, επικρατεί ανάγκη για διαμόρφωση κανονισμών σχετικά με την αλληλεπίδραση μεταξύ των ασθενών και των διαχειριστών των Η-ΙoT συστημάτων. Επιπλέον, ένα θεμελιώδες ζήτημα διαφαίνεται σχετικά με την ανάγκη τυποποίησης των πρωτοκόλλων για την αυξημένη ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ των διαφορετικών κοινοτήτων. Στις αρχές αρχίζει να αποτυπώνεται μια ολοένα και πιο αναπτυσσόμενη απαίτηση από τους πολίτες να παρέχουν το ιστορικό του ταξιδιού τους, με αντάλλαγμα τον έλεγχο και τη διαχείριση της εξάπλωσης του ιού. Η επείγουσα ανάγκη που επικρατεί σχετικά με την τυποποίηση

των πρωτοκόλλων επικοινωνίας στις έξυπνες πόλεις γίνεται προκειμένου να ενθαρρυνθεί η δίκαιη χρήση και η διαφάνεια των δεδομένων των χρηστών σε περιόδους παγκόσμιας πανδημίας. Παραμένουν ωστόσο πολυάριθμα ηθικά ζητήματα σχετικά με τη συλλογή δεδομένων από συσκευές IoT για τη διαχείριση πανδημιών. Συγκεκριμένα, προκύπτουν ερωτήματα σχετικά με το πόσο ασφαλείς, ηθικές και αποτελεσματικές είναι αυτές οι μέθοδοι συλλογής δεδομένων. Στο πλαίσιο του ρυθμιστικού πλαισίου, οι ερευνητές ζητούν από τους κυβερνητικούς φορείς να διαβεβαιώσουν το κοινό για την ασφάλεια των δεδομένων του [33].

Στο Σχήμα 4.1 απεικονίζεται η αλληλεπίδραση των βασικών στοιχείων, του περιβάλλοντος του Διαδικτύου των Πραγμάτων, για τον περιορισμό της εξάπλωσης του COVID-19.

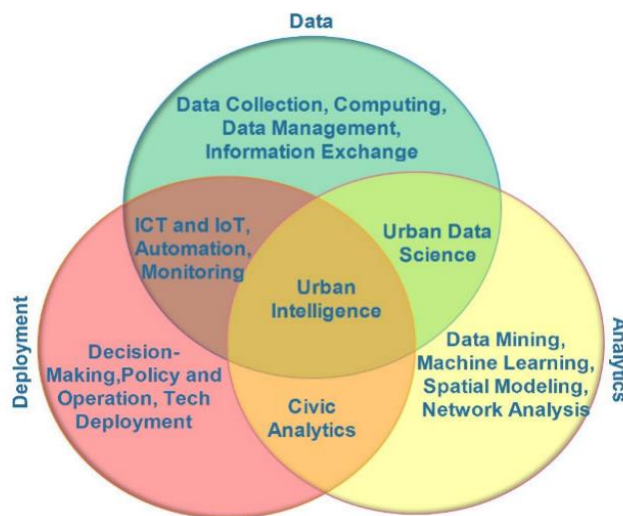


Σχήμα 4.1: IoT για το οικοσύστημα του COVID-19 [33].

4.2 Προσπάθειες έρευνας και ανάπτυξης του IoT υγειονομικής φροντίδας στην περίοδο της πανδημίας του COVID-19

Η συνδρομή του IoT, των big data και της τεχνητής νοημοσύνης, καθώς και η καινοτόμος εφαρμογή του Διαδικτύου των Πραγμάτων στην υγειονομική περίθαλψη σε έξυπνες πόλεις, σ'

ολόκληρη την Κίνα, την Ευρώπη και τις ΗΠΑ έχει βοηθήσει σημαντικά στην καταπολέμηση του COVID-19. Η νέα τεχνολογία έχει επιτρέψει τη συνεχή παρακολούθηση της μετάδοσης του ιού και την άμεση λήψη αποφάσεων. Στο Σχήμα 4.2 παρουσιάζονται τα βασικά στοιχεία αστικών πληροφοριών που καθίστανται απαραίτητα για την αντιμετώπιση της πανδημίας. Ταυτόχρονα, οι αρχές δεσμεύονται για την προώθηση διαφόρων πρωτοπόρων τεχνολογιών που θα συνδράμουν στην αντιμετώπιση πολλαπλών προκλήσεων που σχετίζονται με την πανδημία του νέου κορονοϊού. Παρακάτω, εξηγείται ο τρόπος με τον οποίο έχουν εξελιχθεί οι διάφορες τεχνολογίες στον τομέα υγειονομικής φροντίδας του IoT, με στόχο την καταπολέμηση και τη διαχείριση της πανδημίας του COVID-19 [33].

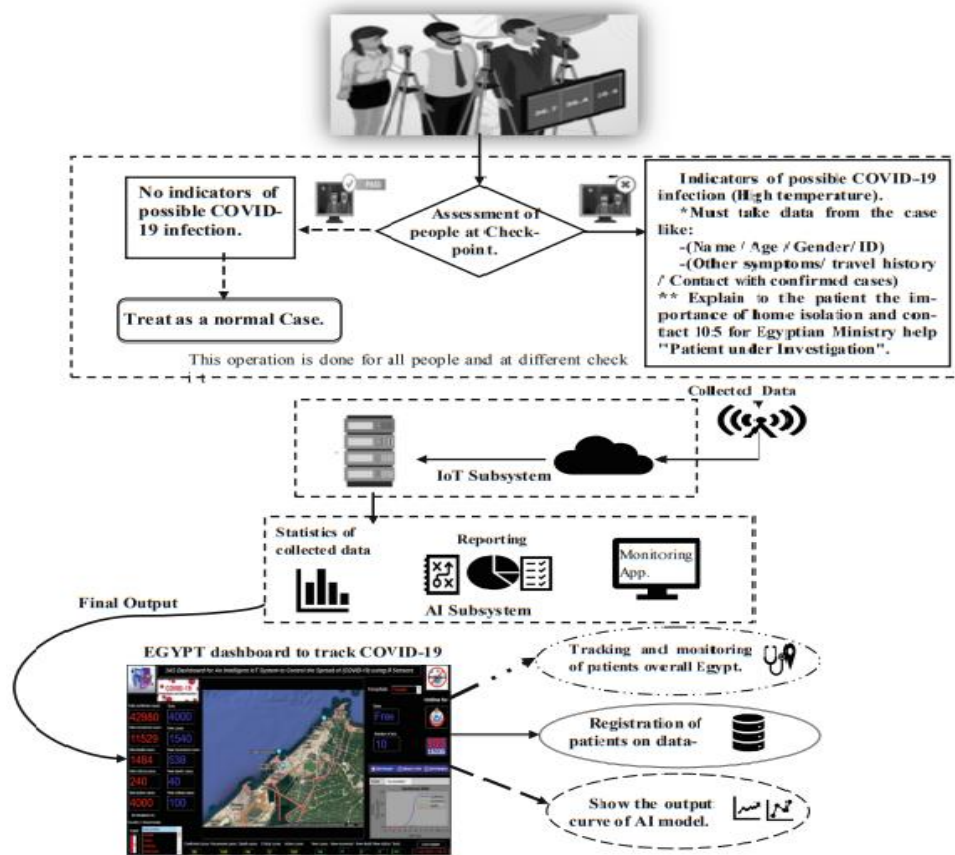


Σχήμα 4.2: Βασικές συνιστώσες αστικών πληροφοριών [33].

a) Πλατφόρμες IoT

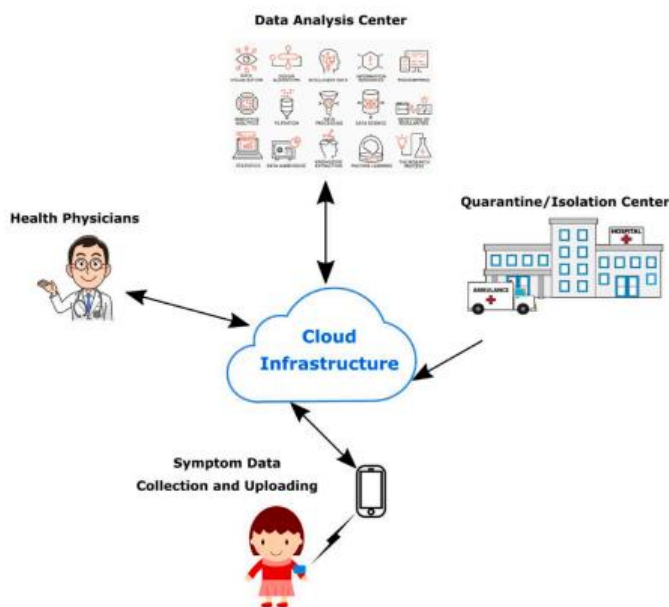
Για την εξασφάλιση της παρουσίας χρήσιμων πληροφοριών σχετικά με τον COVID-19, οι οποίες επεξεργάζονται από ακατέργαστα δεδομένα IoT, οι ερευνητές αναπτύσσουν το front end των πλατφορμών του Διαδικτύου των Πραγμάτων, προκειμένου να διαθέτουν πίνακες ελέγχου με λεπτομερείς στατιστικές αναφορές σχετικά με την εξάπλωση του νέου κορονοϊού. Τα ταμπλό IoT εφαρμόζονται ταχέως ως μέρος ενός αστικού παρατηρητηρίου για την καταγραφή και την εμφάνιση των αποτελεσμάτων των παρεμβάσεων της πόλης στην καταπολέμηση του COVID-19. Επισημαίνεται, επίσης ότι τα ταμπλό παρουσιάζουν πληροφορίες σχετικά με τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις των προγραμματισμένων μέτρων κοινωνικής αποστασιοποίησης από τις αρχές,

παρατηρώντας μάλιστα βελτιώσεις στην ποιότητα του αέρα. Οι ερευνητές Hossam, Fawzy κ.α. προτείνουν στη δημοσίευσή τους [34], μια ολοκληρωμένη πλατφόρμα IoT, η οποία λαμβάνει ως είσοδο, μεγάλα δεδομένα από πολλαπλούς αισθητήρες IoT και παράγει πληροφορίες σ' ένα διαδραστικό πίνακα. Η IoT πλατφόρμα, που αναλύεται από τους συγγραφείς, αποτελείται από τρία υποσυστήματα: έναν ενσωματωμένο μικροελεγκτή, ένα δίκτυο IoT και ένα σύστημα τεχνητής νοημοσύνης. Ο μικροελεγκτής χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με το IoT υποσύστημα για να συλλέγει δεδομένα χρήστη για το υποσύστημα τεχνητής νοημοσύνης, προκειμένου αυτό να αναλύσει και να προβλέψει το ρυθμό εξάπλωσης του ιού. Το σύστημα της τεχνητής νοημοσύνης ενημερώνει τους front end χρήστες σχετικά με την κατάσταση του ιού σε μια συγκεκριμένη περιοχή, μέσω της παροχής ενός διαδραστικού χάρτη. Στο Σχήμα 4.3 παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής της ολοκληρωμένης πλατφόρμας που προτάθηκε.



Σχήμα 4.3: Το διάγραμμα ροής του προτεινόμενου ενσωματωμένου συστήματος [34].

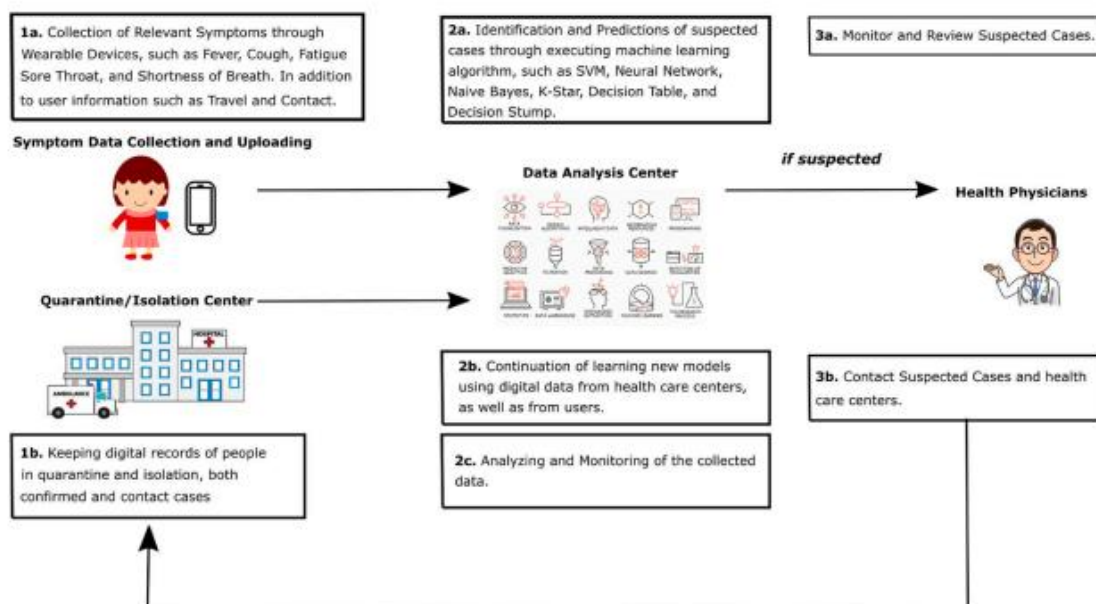
Παράλληλα, οι επιστήμονες του άρθρου [35], πρότειναν πρόσφατα ένα νέο πλαίσιο IoT με στόχο την έγκαιρη ανίχνευση και παρακολούθηση των κρουσμάτων του COVID-19. Το προτεινόμενο πλαίσιο περιλαμβάνει πέντε κύρια στοιχεία: το υλικό αισθητήρων, το οποίο αποτελείται από φορητές συσκευές, το κέντρο καραντίνας, το στοιχείο ανάλυσης δεδομένων, που χρησιμοποιεί τεχνολογία μηχανικής μάθησης(machine learning), τους εργαζόμενους στον τομέα της υγείας και μια cloud πλατφόρμα(Σχήμα 4.4). Η πλατφόρμα χρησιμοποιεί οκτώ αλγορίθμους μηχανικής μάθησης για να εντοπίζει αποτελεσματικά και γρήγορα πιθανά κρούσματα του νέου κορονοϊού. Πέντε από αυτούς τους αλγορίθμους διαπιστώθηκε ότι έχουν ακρίβεια πάνω από 90% [33].



Σχήμα 4.4: Το συνολικό πλαίσιο βασισμένο στο IoT για τον έγκαιρο εντοπισμό και την παρακολούθηση νέων ανθρώπινων κορονοϊών [35].

Ο στόχος των φορητών συσκευών αποτελεί η συλλογή δεδομένων συμπτωμάτων σε πραγματικό χρόνο, μέσω ενός συνόλου αισθητήρων που τοποθετούνται στο σώμα του χρήστη. Στην προηγούμενη μελέτη των ερευνητών του άρθρου, προσδιορίστηκαν τα πιο σημαντικά συμπτώματα του SARS-CoV-2, με βάση ένα πραγματικό σύνολο ασθενών του COVID-19. Τα αναγνωρισμένα αυτά συμπτώματα ήταν τα εξής: Πυρετός, βήχας, κόπωση, πονόλαιμος και δύσπνοια. Για την ανίχνευση αυτών των συμπτωμάτων χρησιμοποιήθηκαν διάφοροι

βιοαισθητήρες, οι οποίοι έχουν ήδη επισημανθεί και αναλυθεί στην εργασία μας [35]. Η ροή εργασιών του συγκεκριμένου πλαισίου παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.5.



Σχήμα 4.5: Ροή εργασιών του προτεινόμενου πλαισίου [35].

Επιπλέον, οι ερευνητές Howerton και Schenk [36], πρότειναν και υλοποίησαν ένα πλαίσιο IoT βασισμένο στο LoRAWAN για την παρακολούθηση της ποιότητας του αέρα πριν και κατά τη διάρκεια της επιδημίας COVID-19, με τα αποτελέσματα να παρουσιάζουν μια γενική μείωση των επιπέδων του διοξειδίου του άνθρακα [33].

b) Τεχνολογία Drone για το Διαδίκτυο των Πραγμάτων

Τα μη επανδρωμένα αεροσκάφη (drones) χρησιμοποιήθηκαν για τον εντοπισμό των εστιών έξαρσης του COVID-19, συμπεριλαμβανομένης της παρακολούθησης των ατόμων που ήρθαν σε επαφή με ασθενείς, οι οποίοι είχαν προσβληθεί από τον νέο κορονοϊό. Παράλληλα, τα drones αξιοποιήθηκαν για την επιβολή των μέτρων και τον εντοπισμό ασθενών που παραβιάζουν την καραντίνα, καθώς και για τη διασφάλιση της τήρησης της χρήσης μάσκας προσώπου. Για παράδειγμα, στην επαρχία του Hubei στην Κίνα, αλλά και σε περιοχές της Ευρώπης και των ΗΠΑ, τα drones χρησιμοποιήθηκαν προκειμένου να διασφαλιστεί ότι οι κάτοικοι τηρούσαν αυστηρά τους κανόνες του γενικού lockdown και της κοινωνικής αποστασιοποίησης. Επιπλέον,

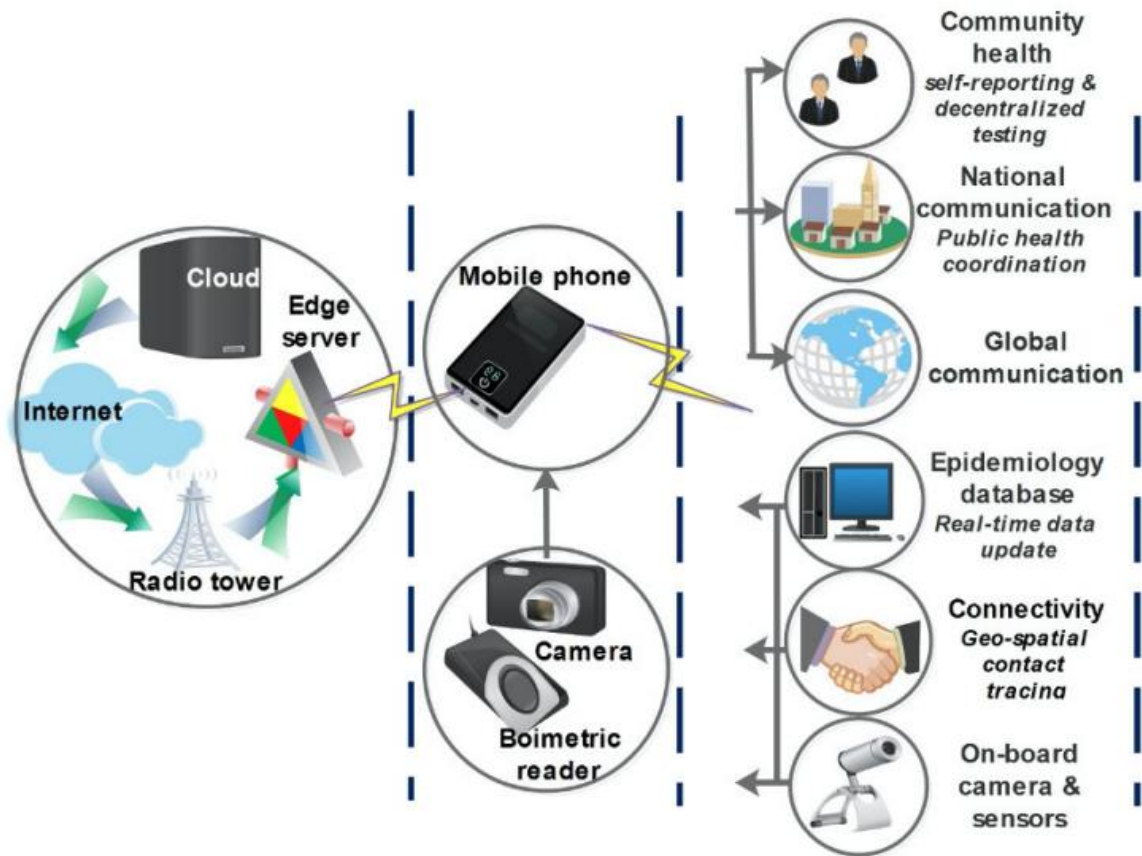
αναπτύχθηκαν μη επανδρωμένα αεροσκάφη εξοπλισμένα με κάμερες για την έκδοση οδηγιών και προειδοποιήσεων προς τους κατοίκους που δεν φορούσαν μάσκα προσώπου ή παραβίαζαν τα πρωτόκολλα έκτακτης ανάγκης. Τέλος, τα drones ενδέχεται να χρησιμοποιηθούν για την εξ αποστάσεως παρακολούθηση των οικιακών ασθενών μεγαλύτερης ηλικίας ή των ιδιαίτερα μολυσμένων περιοχών [33].

c) Τεχνητή νοημοσύνη(AI) με βάση το Η-IoT

Η τεχνητή νοημοσύνη χρησιμοποιήθηκε για την αξιολόγηση του κινδύνου μόλυνσης από τον ιό, αλλά και για τον έλεγχο των κατοίκων. Επιπλέον, με την τεχνητή νοημοσύνη να ενσωματώνεται στα συστήματα ελέγχου, λαμβάνονται οδηγίες για τη χρήση μοντέλων, που βασίζονται σε big data, με στόχο την αναγνώριση, την εξήγηση και την πρόβλεψη ενός μοτίβου στην εξάπλωση του ιού, καθώς και τη δημιουργία πραγματοποιήσιμης συνειδητοποίησης. Για παράδειγμα, εφαρμογές τεχνητής νοημοσύνης έχουν εφαρμοστεί για την παρακολούθηση και την αναφορά του ιστορικού ταξιδιών των κατοίκων, από περιοχές με υψηλή μόλυνση, στις αρμόδιες αρχές. Μια τέτοια ενέργεια καθίσταται ιδιαίτερα καθοριστική για την πρόβλεψη της εκδήλωσης επιδημίας του ιού, πέρα από την ελαχιστοποίηση και αναχαίτιση της μετάδοσής του. Παράλληλα, με την ύπαρξη παραπληροφόρησης, που κυριαρχεί σχετικά με τον ιό στα μέσα κοινωνικής δικτύωσης, τα δομημένα στην τεχνητή νοημοσύνη συστήματα, εκπαιδεύονται για να αφαιρούν τις λανθασμένες πληροφορίες από αυτά. Επιπρόσθετα, θεωρήθηκαν δυνατές οι βελτιστοποιημένες κλινικές δοκιμές φαρμάκων και εμβολίων με την ανάπτυξη της τεχνητής νοημοσύνης. Επίσης, η ΑΙ αξιοποιήθηκε για την κατασκευή ρομπότ που μπορούν να εκτελέσουν διαδικτυακές ιατρικές εξετάσεις ή διαγνώσεις στους κατοίκων, καθώς και για την απολύμανση και εξυγίανση του περιβάλλοντος. Στην Κίνα, για παράδειγμα, κάμερες CCTV με τεχνητή νοημοσύνη και δυνατότητες αναγνώρισης προσώπου εγκαταστάθηκαν στις πόρτες των διαμερισμάτων για να διασφαλίζουν πως τηρούνται οι κανόνες καραντίνας από τους κατοίκους. Τέλος, διάφοροι οργανισμοί όπως η Megvil technology limited, η Baidu και η SenseTime έχουν αναπτύξει συστήματα ελέγχου της θερμοκρασίας του σώματος, χωρίς επαφή, με χρήση τεχνητής νοημοσύνης, τα οποία διαθέτουν ικανότητα εγκατάστασης σε δημόσιους χώρους για τον εντοπισμό των μολυσμένων με COVID-19 ανθρώπων [33].

d) CLOUD ASSISTED IoT

Με την πρόοδο των ασύρματων και ψηφιακών τεχνολογιών, οι πόροι των υπολογιστικών συστημάτων, όπως οι βάσεις δεδομένων, τα δίκτυα, οι διακομιστές και οι πληροφορίες, παρέχονται σήμερα μέσω του διαδικτύου. Το cloud προσφέρει ταχύτερους και ευέλικτους πόρους, σε συνδυασμό με καινοτομία, καθώς και μία οικονομικά αποδοτική και αποτελεσματική λειτουργία των υποδομών. Κατά τη διάρκεια της πανδημίας του COVID-19, ενώ οι περισσότεροι άνθρωποι ήταν απομονωμένοι από την κανονική τους ζωή, συνεχίστηκε η κοινωνική τους αλληλεπίδραση, εξαιτίας εφαρμογών όπως το Zoom video, το Google Meet, το Google Cloud, το Slack, το Amazon Web Services και το Microsoft Azure. Παράλληλα, οι εργαζόμενοι στον τομέα της υγειονομικής περίθαλψης, κατόρθωσαν να διαχειριστούν ένα μεγάλο όγκο αιτημάτων που προέκυψαν από την πανδημία του νέου κορονοϊού με ειδικές εφαρμογές για την υγειονομική φροντίδα, όπως η αναπτυγμένη λύση Salesforce Care. Επιπλέον, συσκευές Η-ΙoT που λειτουργούν με περιορισμένους πόρους, όπως η ενέργεια και η υπολογιστική ισχύς, έχουν επωφεληθεί από τις υπηρεσίες του cloud. Μέσω του cloud computing, καθίσταται δυνατή η μετακίνηση ενέργειας και άλλων εργασιών με ισχυρό βάρος πόρων. Ουσιαστικά, οι τελικοί κόμβοι, οι οποίοι αποτελούνται από αισθητήρες, επιτελούν κυρίως το έργο της συλλογής των COVID-19 δεδομένων και της άμεσης μετάδοσής τους στο cloud. Ως εκ τούτου, η ενέργεια αυτών των συσκευών καταναλώνεται κυρίως κατά τη διάρκεια της μετάδοσης και λήψης των κεραιών. Αυτό, σε συνδυασμό με την αξιοποίηση κατάλληλων αλγορίθμων εξοικονόμησης ενέργειας, συμβάλλει στην παράταση της διάρκειας ζωής των ΙoT συσκευών. Σε έξυπνες πόλεις, τόσο στην Ευρώπη όσο και την Κίνα, κινητά τηλέφωνα με ενσωματωμένες κάμερες και βιοαισθητήρες, συνέβαλλαν στη συλλογή προσωπικών πληροφοριών, όπως ακτινογραφιών, εικόνων αξονικής τομογραφίας, καρδιακών παλμών και ήχων βήχα, οι οποίες στη συνέχεια κρυπτογραφούνται, συμπιέζονται και αποστέλλονται στο cloud για βαθιά μάθηση(Deep Learning) και εκπαίδευση. Άλλοι τρόποι με τους οποίους τα κινητά τηλέφωνα, στα οποία εφαρμόζεται πλαίσιο βασισμένο στην τεχνητή νοημοσύνη, αποτέλεσαν πολύτιμα εργαλεία κατά τη διάρκεια της πανδημίας του COVID-19, περιλαμβάνουν τον εντοπισμό των εστιών μετάδοσης, τον περιορισμό εξάπλωσης της νόσου, τη χορήγηση θεραπείας, καθώς και την ανίχνευση πιθανών κρουσμάτων. Στο Σχήμα 4.6 απεικονίζεται ο τρόπος με τον οποίο χρησιμοποιήθηκαν το cloud και τα κινητά τηλέφωνα για την καταπολέμηση της πανδημίας του COVID-19 [33].



Σχήμα 4.6: Το πλαίσιο IoT και cloud computing για την καταπολέμηση του COVID-19 [33].

Τέλος, επισημαίνεται πως στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκε το πλαίσιο του Cloud assisted IoT, για την αποστολή των δεδομένων ενός βιοαισθητήρα ανίχνευσης του COVID-19.

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο

5.1 Στοιχεία πειραματικής διάταξης

Στην παρούσα διπλωματική εργασία αναπτύχθηκε ένα IoT σύστημα αισθητήρα ανίχνευσης του COVID-19, με στόχο την παρακολούθηση και καταγραφή της εξάπλωσης του ιού στις απομακρυσμένες και υπαίθριες περιοχές του πλανήτη. Ο τελικός κόμβος (end node) αποτελείται από έναν χωρητικό βιοαισθητήρα, με διάταξη πυκνωτή ενδοδιαπλεκόμενων ηλεκτροδίων, ο οποίος ανιχνεύει τα μόρια του SARS-CoV-2 [37], ένα πρωτότυπο κύκλωμα ανάγνωσης, που αναπτύχθηκε στο εργαστήριο Ηλεκτρονικών Αισθητηρίων [38], και τον μικροελεγκτή LoRa32U4II V1.3 της εταιρίας BSFrance. Η επικοινωνία του τελικού κόμβου με το gateway(πύλη) επιτυγχάνεται με το πρωτόκολλο LoRaWAN. Στην συνέχεια, η πύλη, αφότου λάβει τα δεδομένα από την τελική συσκευή τα προωθεί στο διακομιστή δικτύου του The Things Stack Community Edition. Η συγκεκριμένη μεταφορά πληροφοριών εξυπηρετείται μέσω Internet. Έπειτα, τα δεδομένα συλλέγονται στο δίκτυο του The Things Stack, αποκωδικοποιούνται και επεξεργάζονται προκειμένου να αποκτήσουν την τελική τους μορφή για να αξιοποιηθούν στο επίπεδο της εφαρμογής. Στη συνέχεια, στο The Things Stack, διαμορφώνεται ένα integration μέσω webhook με την cloud πλατφόρμα του TagoIO, στην οποία επιτυγχάνεται η παρουσίαση και η αποθήκευση των δεδομένων. Τέλος, σχηματίστηκε μια εφαρμογή μέσω της ενότητας του TagoRUN, η οποία δίνει την δυνατότητα στους χρήστες να παρατηρούν τα οπτικοποιημένα δεδομένα, καθώς και τα εργαλεία διαχείρισης αλλά και απεικόνισής τους. Η αρχιτεκτονική της εργασίας περιγράφεται στο Σχήμα 5.1.



Σχήμα 5.1: Η αρχιτεκτονική της προτεινόμενης λύσης [39].

5.1.1 Η γλώσσα προγραμματισμού Python και η βιβλιοθήκη pySerial

Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκε η γλώσσα προγραμματισμού Python και ιδιαίτερα η βιβλιοθήκη της, pySerial, προκειμένου να επιτευχθεί η ανάλυση και επεξεργασία των δεδομένων χωρητικότητας, τα οποία συλλέγονται από το κύκλωμα ανάγνωσης, μετά την διαδικασία ανίχνευσης ή όχι των μορίων του COVID-19 από τον βιοαισθητήρα.

Η Python αποτελεί μια διερμηνευόμενη, διαδραστική και αντικειμενοστραφή γλώσσα προγραμματισμού, ενσωματώνοντας ενότητες, εξαιρέσεις, πολύ υψηλού επιπέδου δυναμικούς τύπους δεδομένων και κλάσεις. Παράλληλα, υποστηρίζει πολλαπλά παραδείγματα προγραμματισμού πέρα από τον αντικειμενοστραφή, όπως είναι ο διαδικαστικός και ο λειτουργικός προγραμματισμός. Με τη χρήση της Python επιτυγχάνεται αξιοσημείωτη ισχύς σε συνδυασμό με εξαιρετικά σαφές συντακτικό. Στην συγκεκριμένη γλώσσα παρέχονται διασυνδέσεις με πολυάριθμες κλήσεις συστήματος και βιβλιοθήκες, καθώς και με διάφορα συστήματα παραθύρων [40].



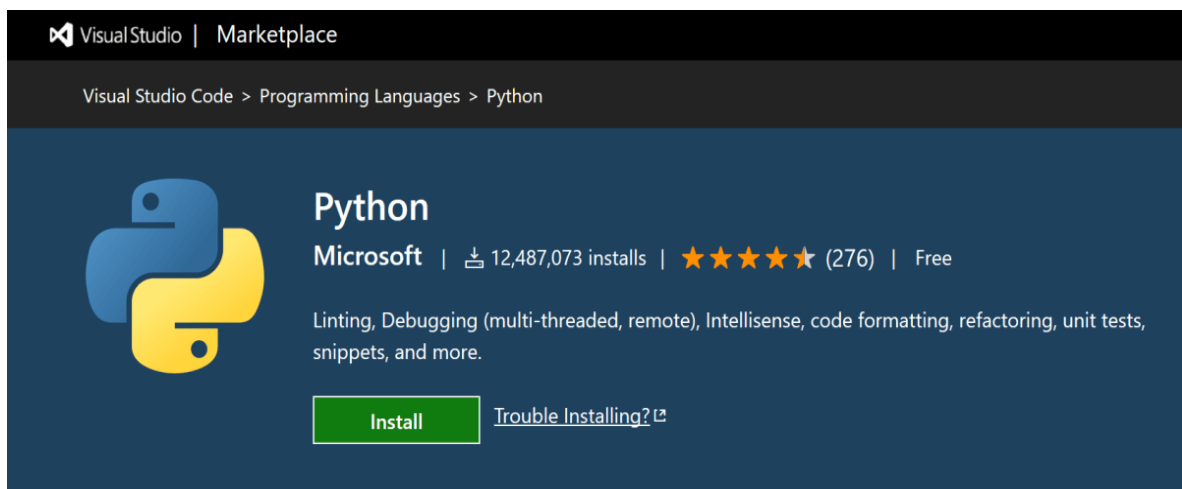
Σχήμα 5.2: Το λογότυπο της Python.

Οι διερμηνευτές της Python είναι διαθέσιμοι για εγκατάσταση σε πολυάριθμα λειτουργικά συστήματα, επιτρέποντας την εκτέλεση του κώδικα της σε ευρεία γκάμα συστημάτων. Η Python αναπτύσσεται ως ανοιχτό λογισμικό(open source) και η διαχείρισή της γίνεται από τον μη κερδοσκοπικό οργανισμό Python Software Foundation.

Για την σύνταξη του κώδικα σε Python αξιοποιείται το πρόγραμμα επεξεργασίας κειμένου Visual Studio Code ή VS Code, όπως συντομογραφικά αναφέρεται. Το Visual Studio Code αποτελεί ένα δωρεάν, ελαφρύ αλλά και ισχυρό επεξεργαστή πηγαίου κώδικα, που εκτελείται τόσο στην επιφάνεια εργασίας του υπολογιστή όσο και στο διαδίκτυο. Παράλληλα, επισημαίνεται πως διατίθεται στα λειτουργικά συστήματα των Windows, macOS, Linux και Raspberry Pi OS. Επιπρόσθετα, το Visual Studio Code περιλαμβάνει τεχνική συμπλήρωσης κώδικα IntelliSense για μεταβλητές, μεθόδους και εισαγόμενες ενότητες, ενώ επιπλέον παρέχει γραφικό εντοπισμό σφαλμάτων, επεξεργασία με πολλαπλούς δρομείς, υποδείξεις παραμέτρων και άλλες ισχυρές δυνατότητες μορφοποίησης [41]. Τέλος, στο VS Code διατίθεται ενσωματωμένη υποστήριξη για JavaScript, TypeScript και Node.js ενώ παράλληλα παρέχεται ένα πλούσιο οικοσύστημα επεκτάσεων για άλλες γλώσσες και προγράμματα εκτέλεσης(όπως C++, C#, Java, Python, PHP, Go, .NET) [42].

Προκειμένου να εκτελέσουμε σε Python τον κώδικα μας, μετά την ενσωμάτωση του VS Code στον υπολογιστή μας, οφείλουμε να εγκαταστήσουμε την επέκταση της γλώσσας από το Visual Studio Marketplace. Αφότου εγκατασταθεί το extension στο Visual Studio Code(Σχήμα 5.3),

απαιτείται και η εγκατάσταση ενός κατάλληλου διερμηνέα της Python. Στην συγγραφή του κώδικα της διπλωματικής μας εργασίας χρησιμοποιήθηκε η έκδοση 3.9.11 του Python Interpreter.



Σχήμα 5.3: Το extension της Python για το VS Code [42].

Η Python χαρακτηρίζεται ως διερμηνευόμενη γλώσσα. Συνεπώς, για να εκτελεστεί κώδικας Python οφείλει να ενημερωθεί το VS Code για τον τύπο του διερμηνέα που θα χρησιμοποιηθεί. Μέσα από το VS Code, επιλέγεται ένας διερμηνέας Python 3 με το άνοιγμα της παλέτας εντολών (Ctrl+Shift+P). Με την πληκτρολόγηση στην γραμμή αναζήτησης της εντολής Python: Select Interpreter(Επιλογή διερμηνέα) επιλέγεται η κατάλληλη έκδοση του διερμηνέα. Μάλιστα, γίνεται επίσης να χρησιμοποιηθεί η επιλογή Select Python Environment (Επιλογή περιβάλλοντος Python) στη γραμμή κατάστασης, αν αυτή είναι διαθέσιμη [42].

➤ BIBΛΙΟΘΗΚΗ PYSERIAL

Η βιβλιοθήκη της Python, pySerial διαθέτει άδεια χρήσης ελεύθερου λογισμικού και ενσωματώνει την πρόσβαση για τη σειριακή θύρα του ηλεκτρονικού υπολογιστή. Παρέχει αντίγραφα ασφαλείας για κώδικα Python που εκτελείται σε Windows, OSX, Linux, BSD (πιθανώς οποιοδήποτε σύστημα συμβατό με POSIX) και το IronPython. Η ενότητα που ονομάζεται "σειριακή" επιλέγει αυτόματα την κατάλληλη θύρα επικοινωνίας [43].

• ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ PYSERIAL

- Κοινή διεπαφή βασισμένη στις κλάσεις σ' όλες τις υποστηριζόμενες πλατφόρμες.

- ✚ Πρόσβαση στις ρυθμίσεις θύρας μέσω των ιδιοτήτων της Python.
- ✚ Υποστήριξη για διαφορετικά μεγέθη byte, stop bits, ισοτιμία(parity) και έλεγχο ροής με RTS/CTS ή/και Xon/Xoff.
- ✚ Εργασία με ή χωρίς χρονικό όριο λήψης.
- ✚ API που λειτουργεί σαν αρχείο με "ανάγνωση" και "εγγραφή" (εντολές "readline" κ.λπ. υποστηρίζονται επίσης).
- ✚ Τα αρχεία σ' αυτό το πακέτο είναι 100% αμιγώς γλώσσας Python.
- ✚ Η θύρα είναι ρυθμισμένη για δυαδική μετάδοση. Δεν υπάρχει απογύμνωση NULL byte, μετάφραση CR-LF κ.λπ.(τα οποία πολλές φορές ενεργοποιούνται για το POSIX.) Αυτό καθιστά την ενότητα καθολικά χρήσιμη.
- ✚ Συμβατή με την io βιβλιοθήκη.
- ✚ Το πρωτόκολλο RFC 2217 παρέχεται στα παραδείγματα [43].

- **ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ PYSERIAL**

Η pySerial εγκαθίσταται από τον PyPI (Python Package Index), είτε κατεβάζοντας χειροκίνητα τα αρχεία και εγκαθιστώντας τα, είτε χρησιμοποιώντας την εντολή: *pip install pyserial*. Το συγκεκριμένο ενσωματωμένο πακέτο αξιοποιείται από την Python με την εντολή *import serial*. Τα προαπαιτούμενα για την εγκατάσταση της pySerial αποτελούν η χρήση Python Interpreter έκδοσης 2.7 ή 3.4 και νεότερης, η λειτουργία σε Windows 7 ή νεότερης έκδοσης, εφόσον εκείνα αποτελούν το λειτουργικό μας σύστημα, καθώς και η ενσωμάτωση των "Java Communications" ή άλλης συμβατή επέκτασης για γλώσσα Java, εφόσον το σύστημα μας λειτουργεί σε Python [43].

Η pySerial αποτελεί μια ενότητα API της Python, που χρησιμοποιείται για την ανάγνωση και εγγραφή σειριακών δεδομένων στο Arduino ή σ' οποιονδήποτε άλλο μικροελεγκτή. Παράλληλα, επιτρέπει την επικοινωνία του υπολογιστή με το περιβάλλον Arduino IDE, στο οποίο προγραμματίστηκε η επικοινωνία του μικροελεγκτή LoRa32u4Π με το δίκτυο του The Things Stack Community Edition. Στην εργασία μας, ο υπολογιστής λειτουργεί ως ενδιάμεσος κόμβος, καθώς δέχεται ροή δεδομένων χωρητικότητας από το πρωτότυπο κύκλωμα ανάγνωσης, που έχει συνδεθεί σε μια COM θύρα του, μέσω σειριακής επικοινωνίας, αξιοποιώντας τη βιβλιοθήκη της Python, pySerial. Στην συνέχεια, αφότου συλλεχθούν τα δεδομένα χωρητικότητας, τα οποία

προέκυψαν από τον βιοαισθητήρα του COVID-19, οδηγούμαστε στην επεξεργασία και την ανάλυσή τους, με στόχο την καταχώρηση θετικού ή αρνητικού αποτελέσματος για κάθε μέτρηση. Κάτι τέτοιο επιτυγχάνεται με τη συγγραφή ενός κώδικα επεξεργασίας σε Python , ο οποίος συμπληρώνει την αρχική σειριακή επικοινωνία που επιτεύχθηκε με τη βοήθεια της pySerial. Τέλος, τα αποτελέσματα της επεξεργασίας των δεδομένων αποστέλλονται, και πάλι με την χρήση της βιβλιοθήκης pySerial, μέσω σειριακής επικοινωνίας, στον μικροελεγκτή LoRa32u4II, ο οποίος βρίσκεται συνδεδεμένος σε μια διαφορετική COM θύρα του υπολογιστή μας.

• PYSERIAL API

Αρχικά, για την ενεργοποίηση της σειριακής θύρας επικοινωνίας πρέπει να γίνει import η βιβλιοθήκη pySerial με την εντολή **import pySerial** στην αρχή του προγράμματος. Η pySerial διαθέτει αρκετές συναρτήσεις, όπως αναφέρονται και στην επίσημη ιστοσελίδα της, αλλά στην παρούσα εργασία θα αναλυθούν μόνο εκείνες που εφαρμόστηκαν στον κώδικά μας.

Για το άνοιγμα της σειριακής θύρας και την έναρξη της επικοινωνίας καλείται ο κατασκευαστής(constructor) της έτοιμης κλάσης Serial [44]. Η δομή του κατασκευαστή και οι παράμετροί του, οι οποίες αξιοποιήθηκαν στην εργασία μας παρουσιάζονται παρακάτω:

Stmdata=serial.Serial(port, baudrate, bytesize, parity, stopbits, timeout)

ΕΠΕΞΗΓΗΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΟΥ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΗ

- ✓ Port: Το όρισμα Port αναφέρεται στην θύρα USB μέσω της οποίας επικοινωνούν οι δύο συσκευές (ο υπολογιστής μας και ο αντίστοιχος μικροελεγκτής). Η θύρα αποτελεί ένα όνομα συσκευής: ανάλογα με το λειτουργικό σύστημα. π.χ. /dev/ttyUSB0 στο GNU/Linux ή COM3 στα Windows.
- ✓ Baudrate: Ορίζεται ως ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων, που συνήθως εκφράζεται σε bits ανά δευτερόλεπτο(bps). Η συγκεκριμένη παράμετρος ενδέχεται να είναι μία από τις τυπικές τιμές των: 50, 75, 110, 134, 150, 200, 300, 600, 1200, 1800, 2400, 4800, 9600, 19200, 38400, 57600, 115200 bps, καθώς αυτές υποστηρίζονται εξαιρετικά σε όλες τις πλατφόρμες.

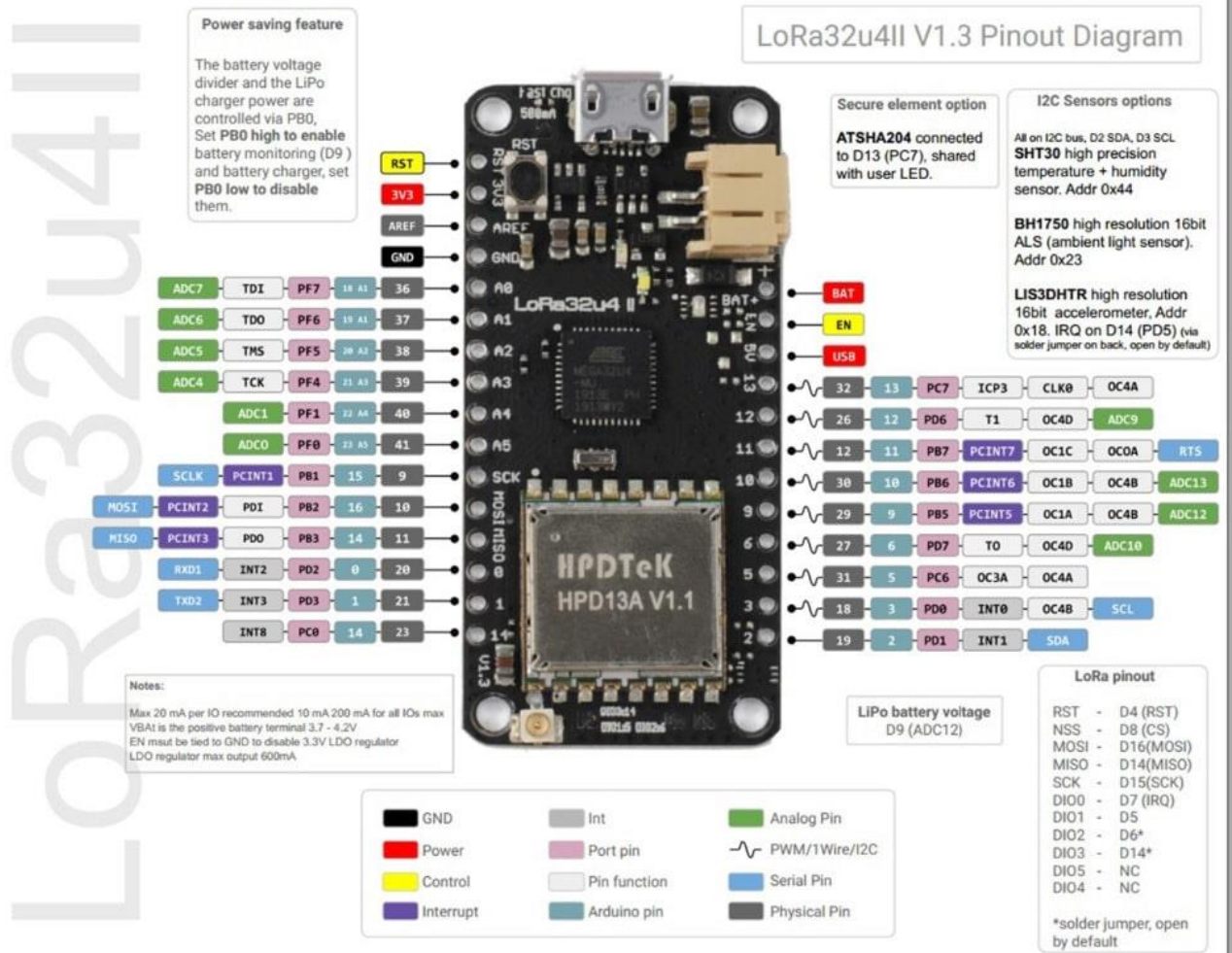
- ✓ Bytesize: Η συγκεκριμένη παράμετρος καθορίζει τον αριθμό των bits δεδομένων που μεταδίδονται. Ενδεικτικές τιμές αποτελούν οι *FIVEBITS*, *SIXBITS*, *SEVENBITS*, *EIGHTBITS*.
- ✓ Parity: Ενεργοποίηση ελέγχου ισοτιμίας, με πιθανές τιμές: *PARITY_NONE*, *PARITY_EVEN*, *PARITY_ODD*, *PARITY_MARK*, *PARITY_SPACE*.
- ✓ Stopbits: Αποτελεί τον αριθμό των stop bits με πιθανές τιμές: *STOPBITS_ONE*, *STOPBITS_ONE_POINT_FIVE*, *STOPBITS_TWO*.
- ✓ Timeout: Αποτελεί μια float τιμή χρονικού ορίου ανάγνωσης σε δευτερόλεπτα που ορίζεται από τον προγραμματιστή. Η παράμετρος *timeout* ελέγχει τη συμπεριφορά της συνάρτησης *read()*. Οι πιθανές της τιμές ορίζονται ως εξής:
 - *timeout = None*: αναμονή μέχρι να ληφθεί ο ζητούμενος αριθμός bytes.
 - *timeout = 0*: non-blocking mode, επιστρέφει αμέσως σε κάθε περίπτωση, δίνοντας μηδέν ή περισσότερα δευτερόλεπτα, μέχρι να ληφθεί ο ζητούμενος αριθμός bytes.
 - *timeout = x*: ορίζει το χρονικό όριο σε x δευτερόλεπτα (επιτρέπεται float τιμή). Επιστρέφει αμέσως όταν είναι διαθέσιμος ο ζητούμενος αριθμός bytes, διαφορετικά περιμένει μέχρι να λήξει το χρονικό όριο και επιστρέφει όλα τα bytes που ελήφθησαν μέχρι τότε [45].

5.1.2 Μικροελεγκτής και Gateway

- **ΜΙΚΡΟΕΛΕΓΚΤΗΣ LORA32U4II V1.3**

Το μοντέλο πλακέτας ανάπτυξης που χρησιμοποιήθηκε στην εργασία ονομάζεται Lora32u4II V1.3. και κατασκευάζεται από την εταιρία BSFrance. Η LoRa32u4II αποτελεί μια ελαφριά και χαμηλής κατανάλωσης πλακέτα, η οποία βασίζεται στη δομική μονάδα μικροελεγκτή LoRA Atmega32u4 και HPD13 συχνότητας 868MHz ,καθώς και σ' ένα κύκλωμα φόρτισης μπαταρίας USB. Χαρακτηρίζεται ιδανική για τη δημιουργία ασύρματων δικτύων μακρινής εμβέλειας που ενδέχεται να υπερβούν τα 2,4 GHz, ενώ καθίσταται πιο ευέλικτη από το Bluetooth και δεν απαιτεί υψηλή ισχύ σε αντίθεση με το WiFi. Το ATmega32u4 μικροτσιπ είναι χρονισμένο στα 8 MHz και

στα 3,3 V. Διαθέτει μνήμη ROM 32K, μνήμη RAM 2K και ενσωματωμένες δυνατότητες επικοινωνίας μέσω USB σε σειριακή σύνδεση. Παράλληλα, παρέχει δυνατότητες αποσφαλμάτωσης και προγραμματισμού χωρίς την ανάγκη εξωτερικού chip FTDI, ενώ χαρακτηρίζεται ικανό να λειτουργήσει ως διάταξη διεπαφής με τον άνθρωπο(ποντίκι, πληκτρολόγιο κ.λπ.). Παράλληλα, η πλακέτα εξοπλίζεται με ένα κύκλωμα φόρτισης LiPo και μια τυπική διεπαφή μπαταρίας, ενώ χαρακτηρίζεται πλήρως συμβατή με το Arduino. Ένα λευκό led χρήστη είναι συνδεδεμένο στο 13^ο pin. Ακόμη, ένα πορτοκαλί LED χρησιμοποιείται για την κατάσταση φόρτισης. Η ασύρματη μονάδα HPD13, η οποία είναι ενσωματωμένη στην πλακέτα, χρησιμοποιεί το υψηλής απόδοσης και εξαιρετικά ενοποιημένο chip πομποδέκτη RF SX1276. Η HPD13 παρέχει προηγμένη τεχνολογία επικοινωνίας διαδεδωμένου φάσματος LoRaTM για να διασφαλιστεί ότι η απόσταση επικοινωνίας της μονάδας και η ικανότητα διαμόρφωσης αντιμέτρων στις παρεμβολές βελτιώνονται σημαντικά, καθώς επιτυγχάνεται ταυτόχρονα εξαιρετικά χαμηλή κατανάλωση ρεύματος. Στη λειτουργία LoRaTM, το HPD13 προσδίδει υψηλότερες επιδόσεις ευαισθησίας λήψης, ισχυρότερη ικανότητα προστασίας από παρεμβολές, βελτιωμένη απόσταση επικοινωνίας και αξιοπιστία σε σύγκριση με παρόμοιες μονάδες εκπομπής και λήψης που διανέμονται στην αγορά. Τέλος, στην κανονική λειτουργία FSK, η πλακέτα προσφέρει ειδική για τη βιομηχανία ευαισθησία δέκτη, καθώς και πολύ υψηλούς ρυθμούς επικοινωνίας [46]. Στο Σχήμα 5.4 επεξηγείται η λειτουργία των ακροδεκτών του μικροελεγκτή μας:



Σχήμα 5.4: Διάγραμμα εξήγησης της λειτουργίας των pins του μικροελεγκτή LoRa32u4II V1.3 [46].

▪ ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ ΙΣΧΥΟΣ

- ✓ Τάση λειτουργίας : (3.3 - 5.0)V
- ✓ Σύνδεσμος μπαταρίας βήματος JST PHR 2.0mm
- ✓ Ρυθμιστής εξαιρετικά χαμηλής πτώσης τάσης με προδιαγραφές I=600mA και V=3.3V
- ✓ Ρεύμα μετάδοσης :128mA για 70ms
- ✓ Ρεύμα λήψης χωρίς ύπνο: 14mA
- ✓ Ρεύμα αδράνειας και ακρόασης: 11mA
- ✓ Ρεύμα λήψης και ύπνου: 1mA
- ✓ Ρεύμα φόρτισης LiPo : α) 100mA (προεπιλεγμένη ρύθμιση) β)1000mA (μέγιστο)
- ✓ Κανάλι παρακολούθησης τάσης μπαταρίας [47].

- ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ LoRa
- ✓ Σύστημα chipset: Semtech SX1276
- ✓ Υποδοχή κεραίας: uFL (IPEX)
- ✓ Οπή ακίδας που επιτρέπει τη χρήση συρμάτινης κεραίας
- ✓ Επικοινωνία υλικού SPI με MCU
- ✓ Ισχύς εκπομπής: +20dBm
- ✓ Ευαισθησία λήψης:
 - 139dBm LoRa 62.5Khz SF12 146bps
 - 136dBm LoRa 125Khz SF12 293bps
 - 118dBm LoRa 125Khz SF6 9380bps
 - 123dBm FSK 5Khz 1.2Kbps
 - 117dBm FSK 5Khz 4.8Kbps
 - 110dBm FSK 20Khz 38.4Kbps
- ✓ FIFO: 64 Bytes
- ✓ Ρυθμός δεδομένων : α) FSK 1.2K~300Kbps β) LoRa 0.018K~37.5Kbps
- ✓ Διαμορφώσεις : FSK, MSK, GFSK, GMSK, LoRa, OOK
- ✓ Συχνότητα λειτουργίας : 868MHz - 915MHz
- ✓ Ψηφιακή λειτουργία RSSI
- ✓ Αυτόματη διόρθωση συχνότητας
- ✓ Αυτόματος έλεγχος κέρδους
- ✓ Λειτουργία αφύπνισης RF
- ✓ Ανίχνευση χαμηλής τάσης και αισθητήρας θερμοκρασίας
- ✓ Γρήγορη αφύπνιση και μεταπήδηση συχνότητας
- ✓ Εξαιρετικά διαμορφώσιμη επεξεργασία πακέτων δεδομένων
- ✓ Έλεγχος ποικιλομορφίας κεραιών και εναλλαγής TX/RX [47].

- **THE THINGS GATEWAY**

Το gateway που χρησιμοποιήθηκε στην εργασία ονομάζεται The Things Gateway, καθώς αποτελεί το πρώτο μοντέλο πύλης που παράχθηκε από την εταιρία The Things Industries. Το συγκεκριμένο μοντέλο επιτρέπει σε συσκευές όπως αισθητήρες και ενσωματωμένους υπολογιστές να συνδεθούν στο διαδίκτυο. Η πύλη ενεργοποιείται σε μόλις 5 λεπτά και συμβάλλει στην δημιουργία τοπικών δικτύων από τους χρήστες. Παράλληλα, παρέχει δυνατότητα εξυπηρέτησης έως και 1000 κόμβων, με συχνότητα λειτουργίας στα 868MHz για χρήση στην Ε.Ε και στα 915MHz για χρήση στις Η.Π.Α. Η πύλη που αξιοποιήθηκε στην πειραματική διαδικασία κατέχει συχνότητα λειτουργίας 868MHz, καθώς χρησιμοποιείται στην Ευρώπη, και χαρακτηρίζεται συντομογραφικά TTN-GW-868(Σχήμα 5.5) [48].

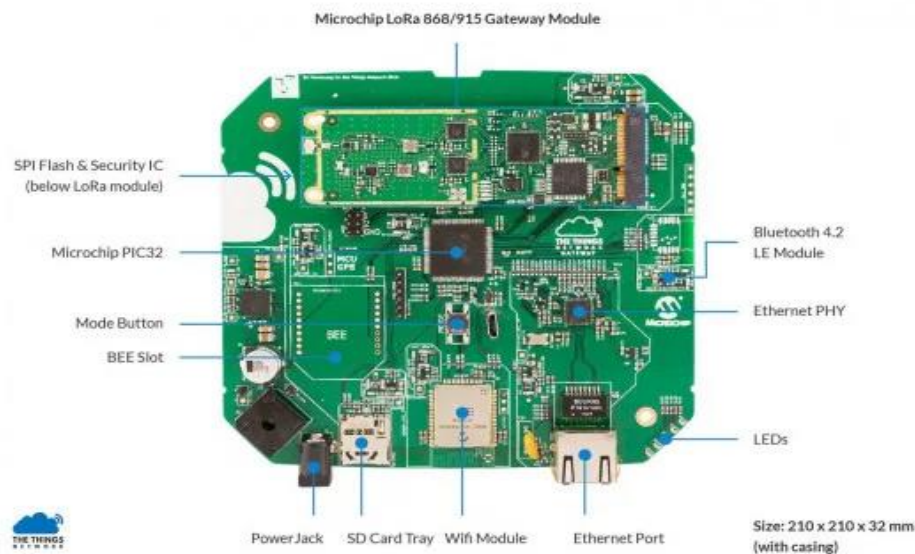


Σχήμα 5.5: Η πύλη TTN-GW-868 [49].

Η πύλη TTN-GW-868 αποτελεί σταθμό βάσης LoRaWAN για τη σύνδεση αισθητήρων IoT στο Διαδίκτυο μέσω Ethernet ή WiFi. Στο Σχήμα 5.6 περιγράφεται η εσωτερική τεχνολογία της πύλης, ενώ παρακάτω επισημαίνονται τα κύρια χαρακτηριστικά της:

- ✓ Χαρακτηρίζεται ως ο ταχύτερος τρόπος για να ξεκινήσουν οι χρήστες την επαφή με το πρωτόκολλο επικοινωνίας LoRaWAN(Long Range WAN).
- ✓ Συμβάλλει στην εγκατάσταση τοπικού δικτύου LoRaWAN σε μόλις 5 λεπτά.
- ✓ Συνδέεται εύκολα στο Διαδίκτυο μέσω WiFi ή Ethernet.

- ✓ Διαθέτει ασύρματη εμβέλεια έως και 10 km.
- ✓ Παρέχει συμμετοχή σε μια παγκόσμια κοινότητα προγραμματιστών του Διαδικτύου των Πραγμάτων.
- ✓ Προσφέρει εύκολη ενσωμάτωση στο cloud με δημοφιλείς πλατφόρμες IoT.
- ✓ Βασίζεται σε πρότυπα υλικού και λογισμικού ανοικτού κώδικα.
- ✓ Οι συσκευές επικοινωνούν ελεύθερα μέσω όλων των πυλών που είναι συνδεδεμένες στο The Things Network.
- ✓ Διαθέτει υποδοχή XBEE για μελλοντικά πρωτόκολλα συνδεσιμότητας ή homebrew add-ons.
- ✓ Παρέχει ασφάλεια μέσω της σύνδεσης https, η οποία είναι ενσωματωμένη στο πρωτόκολλο LoRaWAN.
- ✓ Αποτελεί ικανή να εξυπηρετήσει χιλιάδες κόμβους(ανάλογα με την κυκλοφορία των πακέτων πληροφορίας) [48].



Σχήμα 5.6: Περιγραφή της εσωτερικής μορφής της πύλης [49].

5.1.3 Πρωτόκολλο επικοινωνίας LoRaWAN

- **ΤΕΧΝΙΚΗ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ LoRa**

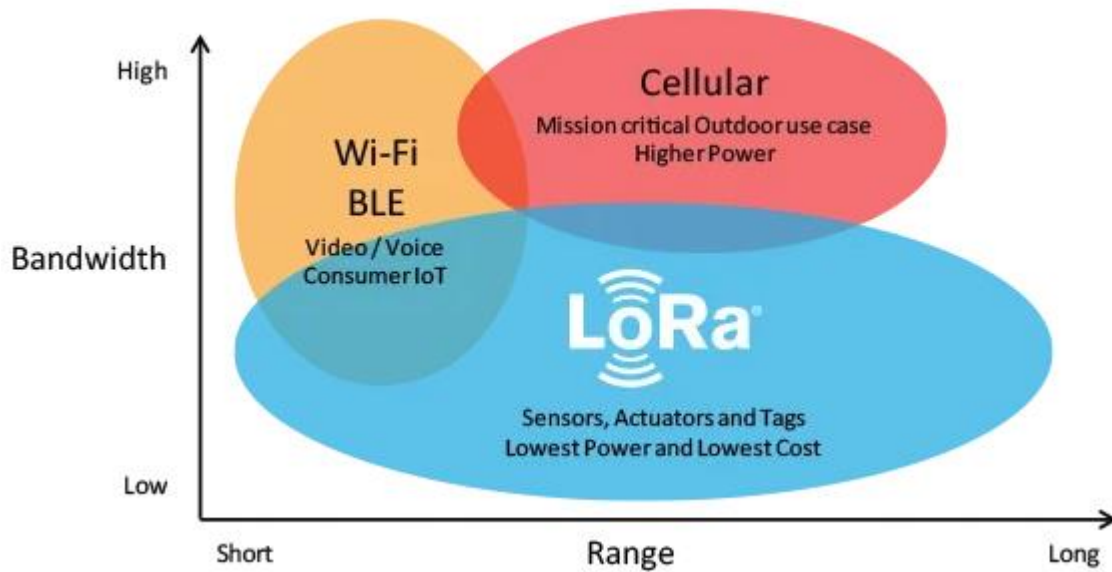
Το LoRa αποτελεί μια ασύρματη τεχνική διαμόρφωσης που προέρχεται από την τεχνολογία Chirp Spread Spectrum(CSS). Κωδικοποιεί πληροφορίες σε ραδιοκύματα χρησιμοποιώντας παλμούς “τιτιβίσματος”, παρόμοια με τον τρόπο επικοινωνίας των δελφινιών και των νυχτερίδων. Η διαμορφωμένη με LoRa μετάδοση είναι ανθεκτική σε διαταραχές και λαμβάνεται σε μεγάλες αποστάσεις. Το LoRa χαρακτηρίζεται ιδανικό για εφαρμογές που μεταδίδουν μικρά κομμάτια δεδομένων με χαμηλούς ρυθμούς bit. Τα δεδομένα μεταδίδονται σε μεγαλύτερη εμβέλεια σε σύγκριση με τεχνολογίες όπως το WiFi, το Bluetooth ή το ZigBee. Τα χαρακτηριστικά αυτά καθιστούν το LoRa κατάλληλο για αισθητήρες και ενεργοποιητές που λειτουργούν με χαμηλή κατανάλωση ισχύος. Παράλληλα, η διαμόρφωση LoRa αξιοποιείται σε ζώνες συχνοτήτων χαμηλότερες από το 1 GHz , που διαθέτουν ελεύθερη άδεια χρήσης, όπως για παράδειγμα εκείνες των 915 MHz, των 868 MHz και 433 MHz. Τέλος, ενδέχεται να λειτουργήσει και σε συχνότητες των 2,4 GHz για να επιτύχει υψηλότερους ρυθμούς δεδομένων σε σύγκριση με τις προαναφερθείσες ζώνες, γεγονός βέβαια που συμβάλλει σε μείωση της εμβέλειάς της. Οι συχνότητες αυτές ανήκουν στις ζώνες ISM, οι οποίες προορίζονται διεθνώς για βιομηχανικούς, επιστημονικούς και ιατρικούς σκοπούς [50].

- **ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟ LoRaWAN**

Το LoRaWAN αποτελεί ένα πρωτόκολλο επιπέδου Media Access Control (MAC) που βασίζεται στη διαμόρφωση LoRa. Πρόκειται για ένα επίπεδο λογισμικού το οποίο καθορίζει τον τρόπο με τον οποίο οι συσκευές χρησιμοποιούν το υλικό LoRa, δηλαδή τον χρόνο στον οποίο μεταδίδουν τα μηνύματα και τη μορφή αυτών. Το πρωτόκολλο LoRaWAN αναπτύσσεται και συντηρείται από την LoRa Alliance. Η πρώτη προδιαγραφή του LoRaWAN κυκλοφόρησε τον Ιανουάριο του 2015 [50].

Το LoRaWAN είναι κατάλληλο για τη μετάδοση μικρού μεγέθους ωφέλιμων φορτίων (όπως δεδομένα αισθητήρων) σε μεγάλες αποστάσεις. Η διαμόρφωση LoRa παρέχει σημαντικά μεγαλύτερη εμβέλεια επικοινωνίας με χαμηλό εύρος ζώνης σε σχέση με άλλες ανταγωνιστικές τεχνολογίες ασύρματης μετάδοσης δεδομένων. Στο Σχήμα 5.7 παρουσιάζονται ορισμένες

τεχνολογίες πρόσβασης που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ασύρματη μετάδοση δεδομένων και τα αναμενόμενα εύρη μετάδοσης σε σχέση με το εύρος ζώνης [50].



Σχήμα 5.7: Εύρος ζώνης συχνοτήτων και εμβέλεια των διάφορων πρωτοκόλλων επικοινωνίας [50].

- **ΣΗΜΑΝΤΙΚΑ ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΟΥ LoRaWAN**

- ✓ Εξαιρετικά χαμηλή ισχύς: Οι τελικές συσκευές LoRaWAN είναι βελτιστοποιημένες ώστε να λειτουργούν με κατανάλωση χαμηλής ισχύος και μπορούν να διαρκέσουν έως και 10 χρόνια με μία μόνο μπαταρία, σε σχήμα νομίσματος.
- ✓ Μεγάλη εμβέλεια: Οι πύλες του LoRaWAN μεταδίδουν και λαμβάνουν σήματα σε απόσταση άνω των 10 χιλιομέτρων σε υπαίθριες περιοχές και έως 3 χιλιόμετρα σε πυκνοκατοικημένες αστικές περιοχές.
- ✓ Βαθιά διείσδυση σε εσωτερικούς χώρους: Τα δίκτυα LoRaWAN παρέχουν βαθιά κάλυψη εσωτερικών χώρων και λειτουργούν εύκολα σε κτίρια πολλών ορόφων.
- ✓ Φάσμα ελεύθερης άδειας χρήσης: Η ανάπτυξη ενός τοπικού δικτύου LoRaWAN δεν προϋποθέτει την καταβολή υψηλών τιμών σε τέλη άδειας χρήσης του φάσματος των συχνοτήτων.
- ✓ Γεωεντοπισμός: Ένα δίκτυο δομής LoRaWAN θεωρείται ικανό να προσδιορίσει τη θέση των τελικών συσκευών χρησιμοποιώντας τριγωνισμό, χωρίς την ανάγκη

εξοπλισμού GPS. Μια τελική συσκευή LoRa εντοπίζεται εάν τουλάχιστον τρεις πύλες λαμβάνουν το σήμα της.

- ✓ Υψηλή χωρητικότητα: Οι διακομιστές δικτύου LoRaWAN διαχειρίζονται εκατομμύρια μηνύματα από χιλιάδες πύλες.
- ✓ Δημόσια και ιδιωτική ανάπτυξη: Είναι εύκολο να αναπτυχθούν δημόσια και ιδιωτικά δίκτυα LoRaWAN χρησιμοποιώντας το ίδιο υλικό (πύλες, τελικές συσκευές, κεραίες) και λογισμικό(προωθητές πακέτων UDP, λογισμικό Basic Station, στοίβες LoRaWAN για τις τελικές συσκευές).
- ✓ Ασφάλεια από άκρο σε άκρο: Το LoRaWAN εξασφαλίζει ασφαλή επικοινωνία μεταξύ της τελικής συσκευής και του διακομιστή εφαρμογών με κρυπτογράφηση AES-128.
- ✓ Ενημερώσεις υλικολογισμικού μέσω του αέρα: Το υλικολογισμικό(firmware) μιας μεμονωμένης τελικής συσκευής ή μίας ομάδας τελικών συσκευών αναβαθμίζεται εξ αποστάσεως.
- ✓ Περιήγηση: Οι τελικές συσκευές LoRaWAN διαθέτουν δυνατότητες εκτέλεσης απρόσκοπτων μεταβιβάσεων από ένα δίκτυο σε άλλο.
- ✓ Χαμηλό κόστος: Το LoRaWAN διαθέτει ελάχιστη υποδομή, τελικούς κόμβους χαμηλού κόστους και λογισμικό ανοικτού κώδικα.
- ✓ Πρόγραμμα πιστοποίησης: Το πρόγραμμα πιστοποίησης της LoRa Alliance επικυρώνει τις τελικές συσκευές και εφοδιάζει τους τελικούς χρήστες με τη βεβαιότητα πως είναι αξιόπιστες και συμβατές με τις προδιαγραφές του πρωτοκόλλου LoRaWAN.
- ✓ Οικοσύστημα: Το LoRaWAN περιλαμβάνει ένα πολύ μεγάλο περιβάλλον κατασκευαστών συσκευών, κατασκευαστών πυλών, κατασκευαστών κεραίων, παρόχων υπηρεσιών δικτύου και προγραμματιστών εφαρμογών [50].

- ***ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ ΧΡΗΣΗΣ ΤΟΥ LoRaWAN***

Ακολουθούν μερικές σπουδαίες περιπτώσεις χρήσης του LoRaWAN που παρέχονται από τη Semtech, δίνοντας μας μια εικόνα για το πώς δύναται να εφαρμοστεί το πρωτόκολλο LoRaWAN:

- ✓ Παρακολούθηση ψυκτικής αλυσίδας εμβολίων: Οι αισθητήρες LoRaWAN χρησιμοποιούνται για να διασφαλιστεί ότι τα εμβόλια διατηρούνται στις κατάλληλες θερμοκρασίες κατά τη μεταφορά.
- ✓ Προστασία ζώων: Οι αισθητήρες παρακολούθησης διαχειρίζονται απειλούμενα είδη όπως οι Μαύροι Ρινόκεροι και οι Λεοπαρδάλεις Αμούρ.
- ✓ Ασθενείς με άνοια: Οι αισθητήρες βραχιολιού παρέχουν ανίχνευση πτώσης και παρακολούθηση της φαρμακευτικής αγωγής των συγκεκριμένων ασθενών.
- ✓ Έξυπνες γεωργικές εφαρμογές: Οι πληροφορίες σε πραγματικό χρόνο για την υγρασία του εδάφους των καλλιεργειών και το βελτιστοποιημένο πρόγραμμα άρδευσης μειώνουν τη χρήση νερού έως και 30%.
- ✓ Εξοικονόμηση νερού: Εντοπισμός και ταχύτερη επισκευή διαρροών στο δίκτυο ύδρευσης μιας πόλης.
- ✓ Ασφάλεια τροφίμων: Η παρακολούθηση της θερμοκρασίας διασφαλίζει τη διατήρηση της ποιότητας των τροφίμων.
- ✓ Έξυπνοι κάδοι απορριμμάτων: Οι ειδοποιήσεις για τη στάθμη των κάδων απορριμμάτων που αποστέλλονται στο προσωπικό βελτιστοποιούν το πρόγραμμα αποκομιδής.
- ✓ Έξυπνα ποδήλατα: Οι ανιχνευτές ποδηλάτων παρακολουθούν τα ποδήλατα σε απομακρυσμένες περιοχές και πυκνά κτίρια.
- ✓ Παρακολούθηση αεροδρομίου: Η παρακολούθηση χωρίς GPS ελέγχει οχήματα, προσωπικό και αποσκευές.
- ✓ Αποδοτικοί χώροι εργασίας: Παρακολούθηση της πληρότητας των δωματίων, της θερμοκρασίας, της χρήσης ενέργειας και της διαθεσιμότητας χώρων στάθμευσης.
- ✓ Υγεία βοοειδών: Αισθητήρες παρακολουθούν την υγεία των βοοειδών, ανιχνεύουν ασθένειες και προβλέπουν το χρόνο παράδοσης των μοσχαριών.
- ✓ LoRa στο διάστημα: Αξιοποίηση δορυφόρων για παγκόσμια κάλυψη με βάση το LoRaWAN [50].

- ***ΣΥΜΜΑΧΙΑ LoRa Alliance***

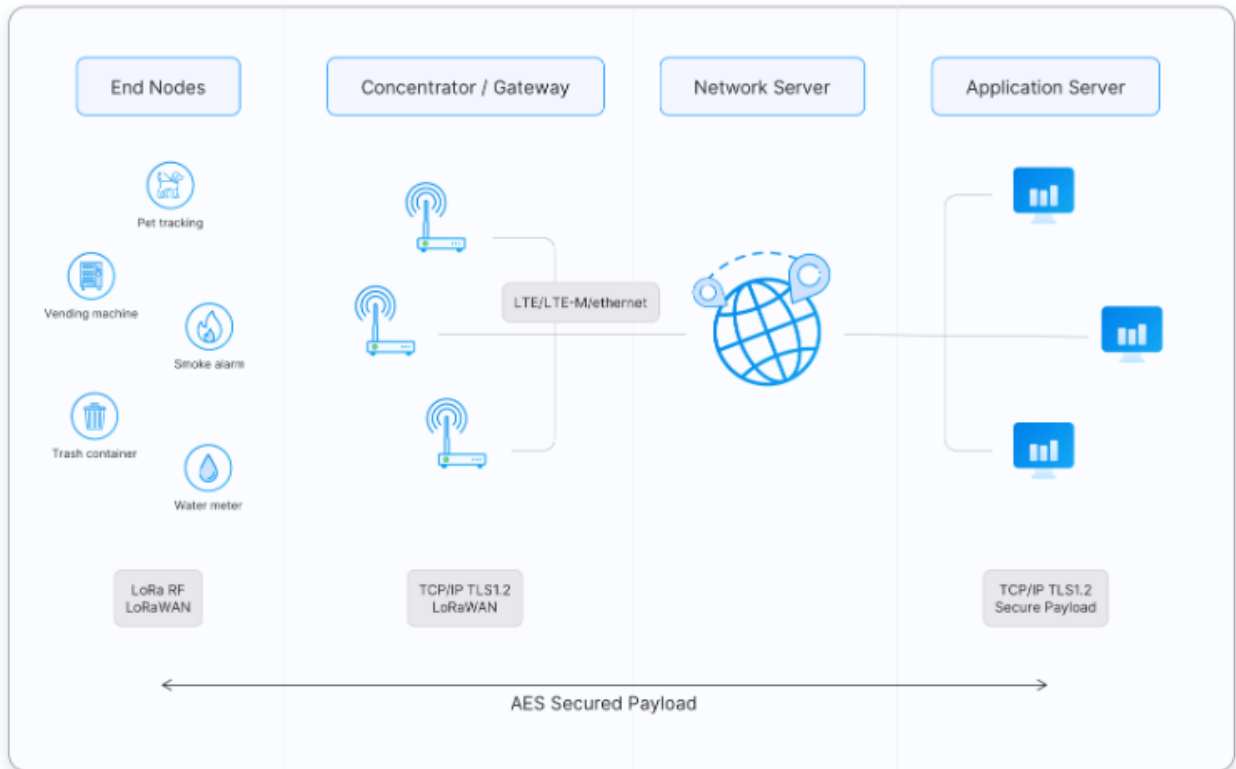
Η LoRa Alliance αποτελεί μια ανοικτή, μη κερδοσκοπική ένωση που ιδρύθηκε το 2015. Υποστηρίζει την ανάπτυξη του LoRaWAN και διασφαλίζει τη διαλειτουργικότητα όλων των προϊόντων και τεχνολογιών του πρωτοκόλλου επικοινωνίας. Σήμερα, η LoRa Alliance έχει πάνω από 500 μέλη σε όλο τον κόσμο. Παράλληλα, παρέχει πιστοποίηση LoRaWAN για τις τελικές συσκευές. Οι επικυρωμένες τελικές συσκευές προσφέρουν στους χρήστες τη βεβαιότητα ότι θεωρούνται αξιόπιστες και συμβατές με την προδιαγραφή του πρωτοκόλλου. Η πιστοποίηση διατίθεται μόνο για κατασκευαστές συσκευών που αποτελούν μέλη της LoRa Alliance. Μόλις η τελική συσκευή πιστοποιηθεί, το σήμα LoRaWAN Certified χρησιμοποιείται από τον κατασκευαστή στο προϊόν. Τέλος, όπως ανακοινώθηκε επίσημα από τη LoRa Alliance στις 7 Δεκεμβρίου 2021, το πρωτόκολλο LoRaWAN εγκρίθηκε επίσημα ως πρότυπο για το Low Power Wide Area Networking (LPWAN) από τη Διεθνή Ένωση Τηλεπικοινωνιών (ITU) [50].

- ***H APXITEKTONIKH TOY LoRaWAN***

Τα δίκτυα του LoRaWAN αναπτύσσονται σε τοπολογία αστέρα-αστέρα. Ένα τυπικό δίκτυο LoRaWAN αποτελείται από τα ακόλουθα στοιχεία.

- ✓ End Devices (Τελικές Συσκευές): Αισθητήρες ή ενεργοποιητές, οι οποίοι στέλνουν ασύρματα μηνύματα διαμορφωμένα με την παρέμβαση του πρωτοκόλλου LoRa στα gateways ή λαμβάνουν ασύρματα μηνύματα πίσω, από εκείνα.
- ✓ Gateways (Πύλες): Λαμβάνουν μηνύματα από τις τελικές συσκευές και τα προωθούν στον Network Server.
- ✓ Network Server (Διακομιστής Δικτύου): Αποτελεί ένα κομμάτι λογισμικού που εκτελείται σε έναν διακομιστή και διαχειρίζεται ολόκληρο το δίκτυο.
- ✓ Application Server (Διακομιστής Εφαρμογών): Περιλαμβάνει ένα κομμάτι λογισμικού που εκτελείται σε έναν διακομιστή και είναι υπεύθυνο για την ασφαλή επεξεργασία δεδομένων των εφαρμογών.
- ✓ Join Server (Διακομιστής Σύνδεσης): Ορίζεται ως ένα κομμάτι λογισμικού που εκτελείται σε έναν διακομιστή και επεξεργάζεται τα μηνύματα αίτησης σύνδεσης που αποστέλλονται από τις τελικές συσκευές (Ο Join Server δεν εμφανίζεται στο παρακάτω σχήμα) [51].

Στο Σχήμα 5.8 απεικονίζεται η δομή του πρωτοκόλλου LoRaWAN:



Σχήμα 5.8: Μια τυπική αρχιτεκτονική δικτύου LoRaWAN [51].

Οι τελικές συσκευές επικοινωνούν με τα πλησιέστερα gateways και κάθε ένα από αυτά συνδέεται με τον διακομιστή δικτύου. Τα δίκτυα LoRaWAN χρησιμοποιούν ένα πρωτόκολλο βασισμένο στο ALOHA, οπότε οι τελικές συσκευές δεν χρειάζεται να είναι συνδεδεμένες μόνο με συγκεκριμένες πύλες. Τα μηνύματα που αποστέλλονται από τις end devices προωθούνται μέσω όλων των πυλών εντός εμβέλειας. Τα μηνύματα αυτά λαμβάνονται από τον διακομιστή δικτύου. Εάν ο διακομιστής δικτύου έχει λάβει πολλαπλά αντίγραφα του ίδιου μηνύματος, διατηρεί μόνο ένα και απορρίπτει τα υπόλοιπα. Η τεχνική αυτή είναι γνωστή ως απαλοιφή επαναληψιμότητας μηνυμάτων.

Ακολούθως θα εξεταστεί σύντομα κάθε στοιχείο του δικτύου LoRaWAN.

- **END DEVICES**

Ένα end device του πρωτοκόλλου LoRaWAN ενδέχεται να είναι αισθητήρας, ενεργοποιητής ή και τα δύο. Συχνά οι τελικές συσκευές λειτουργούν με χρήση μπαταρίας, ενώ συνδέονται ασύρματα στο δίκτυο LoRaWAN μέσω πυλών χρησιμοποιώντας διαμόρφωση LoRa RF. Το

Σχήμα 5.9 δείχνει μια τελική συσκευή που αποτελείται από αισθητήρες θερμοκρασίας, υγρασίας και ανίχνευση πτώσης [51].



Σχήμα 5.9: Τελική συσκευή LoRaWAN - The Things Industries Generic Node Sensor Edition [51].

- GATEWAYS

Κάθε gateway είναι εγγεγραμμένο(με τη χρήση ρυθμίσεων διαμόρφωσης) σε έναν διακομιστή δικτύου LoRaWAN. Μια πύλη λαμβάνει μηνύματα LoRa από τις τελικές συσκευές και απλώς τα προωθεί στον διακομιστή δικτύου. Οι πύλες συνδέονται με τον Network Server χρησιμοποιώντας ένα backhaul όπως κινητή τηλεφωνία (3G/4G/5G), WiFi, Ethernet, οπτικές ίνες ή ραδιοζεύξεις συχνότητας 2,4 GHz.

Οι πύλες του LoRaWAN κατηγοριοποιούνται σε εσωτερικές και εξωτερικές. Τα gateways εσωτερικού χώρου είναι οικονομικά αποδοτικά και κατάλληλα για την παροχή κάλυψης σε χώρους, όπως τοποθεσίες βαθιά στο εσωτερικό του κτιρίου(χώρους που καλύπτονται από αυξημένο αριθμό τοίχων), υπόγεια και κτίρια πολλών ορόφων. Τα συγκεκριμένα gateways

διαθέτουν εσωτερικές κεραίες ή εξωτερικές κεραίες σε μορφή “rigtail”. Ωστόσο, ανάλογα με το εσωτερικό φυσικό περιβάλλον, ορισμένες πύλες εσωτερικού χώρου λαμβάνουν μηνύματα από αισθητήρες που βρίσκονται αρκετά χιλιόμετρα μακριά. Το Σχήμα 5.10 απεικονίζει το The Things Indoor gateway, που έχει σχεδιαστεί για να συνδέεται απευθείας σε μια πρίζα εναλλασσόμενου ρεύματος και αποτελεί εσωτερική πύλη [51].



Σχήμα 5.10: Η πύλη The Things Indoor gateway [51].

Οι εξωτερικές πύλες προσφέρουν μεγαλύτερη κάλυψη από τις εσωτερικές πύλες. Χαρακτηρίζονται κατάλληλες για την προμήθεια κάλυψης τόσο σε επαρχιακές όσο και σε αστικές περιοχές. Τα gateways αυτά τοποθετούνται σε πύργους κινητής τηλεφωνίας, σε στέγες πολύ υψηλών κτιρίων, σε μεταλλικούς σωλήνες(ιστούς) κ.λπ. Συνήθως μια εξωτερική πύλη διαθέτει εξωτερική κεραία(π.χ. κεραία από υαλοβάμβακα) που συνδέεται με ομοαξονικό καλώδιο. Το Σχήμα 5.11 απεικονίζει μια εξωτερική πύλη LoRaWAN. Διαθέτει υποδοχές για τη σύνδεση εξωτερικών κεραιών LoRaWAN, 3G/4G και GPS [51].



Σχήμα 5.11: Εξωτερική πύλη Tektelic Enterprise [51].

- NETWORK SERVER

Ο Network Server διαχειρίζεται τις πύλες, τις τελικές συσκευές, τις εφαρμογές και τους χρήστες σε ολόκληρο το δίκτυο του LoRaWAN. Ένας τυπικός διακομιστής δικτύου LoRaWAN διαθέτει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά :

- ✓ Δημιουργία ασφαλών συνδέσεων 128-bit AES για τη μεταφορά μηνυμάτων μεταξύ των τελικών συσκευών και του διακομιστή εφαρμογών (end-to-end security).
- ✓ Επικύρωση της αυθεντικότητας των τελικών συσκευών και της ακεραιότητας των μηνυμάτων.
- ✓ Απαλοιφή επαναληψιμότητας των μηνυμάτων ανερχόμενης ζεύξης.
- ✓ Επιλογή της καλύτερης πύλης για τη δρομολόγηση μηνυμάτων καθοδικής ζεύξης.

- ✓ Αποστολή εντολών ADR για τη βελτιστοποίηση του ρυθμού δεδομένων των συσκευών.
- ✓ Έλεγχος διεύθυνσης συσκευής.
- ✓ Παροχή αναγνώρισης επιβεβαιωμένων μηνυμάτων δεδομένων ανοδικής ζεύξης.
- ✓ Δρομολόγηση και προώθηση ωφέλιμων φορτίων εφαρμογών ανοδικής ζεύξης στους κατάλληλους διακομιστές εφαρμογών.
- ✓ Προώθηση των μηνυμάτων Join-request και Join-accept μεταξύ των συσκευών και του Join Server.
- ✓ Ανταπόκριση σε όλες τις εντολές επιπέδου MAC [51].

- **APPLICATION SERVER**

Ο Application Server επεξεργάζεται τα μηνύματα δεδομένων συγκεκριμένων εφαρμογών που λαμβάνονται από τις τελικές συσκευές. Επιπλέον, παράγει όλα τα ωφέλιμα φορτία κατερχόμενη ζεύξης του επιπέδου εφαρμογής και τα αποστέλλει στις συνδεδεμένες τελικές συσκευές μέσω του διακομιστή δικτύου. Ένα δίκτυο LoRaWAN προδιαγράφεται να διαθέτει περισσότερους από έναν διακομιστές εφαρμογών. Τα δεδομένα που συλλέγονται μπορούν να ερμηνευτούν με την εφαρμογή τεχνικών, όπως η μηχανική μάθηση και η τεχνητή νοημοσύνη, για την επίλυση επιχειρηματικών προβλημάτων [51].

- **JOIN SERVER**

Ο Join Server συμβάλλει στην ασφαλή ενεργοποίηση συσκευών, στην αποθήκευση του root key και στη δημιουργία του session key. Η διαδικασία σύνδεσης ξεκινά από την τελική συσκευή με την αποστολή του μηνύματος Join-Request στον Join Server μέσω του Network Server. Ο Join Server επεξεργάζεται το μήνυμα Join-Request, δημιουργεί τα session keys και μεταφέρει τα NwkSKey και AppSKey στον διακομιστή δικτύου και εφαρμογών αντίστοιχα. Ο Join Server εισήχθη για πρώτη φορά με το μοντέλο LoRaWAN v1.1. Είναι επίσης διαθέσιμος στο LoRaWAN v1.0.4 [51].

- **ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ LoRaWAN**

Το LoRaWAN λειτουργεί σ' ένα μη αδειοδοτημένο ραδιοφάσμα. Η συγκεκριμένη του ιδιότητα υποδηλώνει ότι οποιοσδήποτε μπορεί να χρησιμοποιήσει τις ραδιοσυχνότητες, δίχως να χρειάζεται να καταβάλλει τέλη εκατομμυρίων δολαρίων για δικαιώματα μετάδοσης. Η αξιοποίηση του πρωτοκόλλου λειτουργεί με παρόμοιο τρόπο μ' αυτόν του WiFi, το οποίο χρησιμοποιεί τις ζώνες ISM 2,4 GHz και 5 GHz παγκοσμίως. Ο κάθε χρήστης έχει τη δυνατότητα να εγκαταστήσει δρομολογητές WiFi και να μεταδώσει σήματα WiFi, χωρίς να απαιτείται άδεια ή εξουσιοδότηση. Το πρωτόκολλο επικοινωνίας LoRaWAN χρησιμοποιεί χαμηλότερες ραδιοσυχνότητες με μεγαλύτερη εμβέλεια, γεγονός που συνοδεύεται παράλληλα από περισσότερους περιορισμούς που συχνά αφορούν συγκεκριμένες χώρες. Οι περιορισμοί αυτοί αποτελούν πρόκληση για το LoRaWAN, το οποίο προσπαθεί να παραμένει όσο το δυνατόν πιο ομοιόμορφο σ' όλες τις διαφορετικές περιοχές του κόσμου. Ως αποτέλεσμα, στις περιοχές που παρουσιάζονται περιορισμοί, το πρωτόκολλο LoRaWAN προσδιορίζεται για πολυάριθμες ζώνες συχνοτήτων. Οι ζώνες αυτές διαθέτουν αρκετές ομοιότητες ώστε να υποστηρίζουν ένα πρωτόκολλο που δεν θα εξαρτάται από την τοποθεσία, αλλά κατέχουν ορισμένες συνέπειες για την υλοποίηση των backend συστημάτων [52].

Αυτές οι περιφερειακές προδιαγραφές του LoRaWAN δεν καθορίζουν το σύνολο των απαιτήσεων του δικτύου, αλλά καλύπτουν μόνο μια περιοχή, καθορίζοντας τον κοινό παρονομαστή που θα διαθέτει. Για παράδειγμα, οι περιφερειακές παράμετροι του LoRaWAN για την Ασία καθορίζουν μόνο ένα κοινό υποσύνολο καναλιών, καθώς υφίστανται διαφοροποιήσεις μεταξύ των κανονισμών στις ασιατικές χώρες. Επίσης, κάθε φορέας εκμετάλλευσης διακομιστή δικτύου είναι ελεύθερος να επιλέξει πρόσθετες παραμέτρους, όπως επιπλέον κανάλια εκπομπής. Ακόμη, σε ορισμένες χώρες ενδέχεται να χρησιμοποιούνται περισσότερα από ένα σχέδια συχνοτήτων. Για παράδειγμα, στην Ολλανδία χρησιμοποιείται τόσο το πλαίσιο EU868-870 όσο και το EU433. Οι περιφερειακές προδιαγραφές περιλαμβάνουν παραμέτρους φυσικού επιπέδου, όπως σχέδια συχνοτήτων(σχέδια καναλιών), υποχρεωτικές συχνότητες καναλιών και ρυθμούς δεδομένων για μηνύματα αίτησης σύνδεσης, ενώ παράλληλα, διαθέτουν παραμέτρους επιπέδου LoRaWAN, όπως το μέγιστο μέγεθος ωφέλιμου φορτίου [52].

Το LoRaWAN λειτουργεί στις μη αδειοδοτημένες ζώνες του ISM(βιομηχανικές, επιστημονικές και ιατρικές). Στο Σχήμα 5.12 παρατίθενται τα τελευταία σχέδια συχνοτήτων και οι κοινές ονομασίες τους.

Channel Plan	Common Name
EU863-870	EU868
US902-928	US915
CN779-787	CN779
EU433	EU433
AU915-928	AU915
CN470-510	CN470
AS923	AS923
KR920-923	KR920
IN865-867	IN865
RU864-870	RU864

Σχήμα 5.12: Τα τελευταία σχέδια συχνοτήτων [52].

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εφαρμόστηκε το πλάνο συχνοτήτων EU863-870, το οποίο αναφέρεται κοινώς ως EU868 και αποτελεί το σχέδιο που θα αναλύσουμε εκτενώς παρακάτω [52].

➤ *ZΩΝΗ ΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ EU863-870*

Η ζώνη συχνοτήτων EU863-870 εφαρμόζεται σε οποιαδήποτε περιοχή όπου η χρήση του ραδιοφάσματος ορίζεται από το πρότυπο ETSI(Ευρωπαϊκό Ινστιτούτο Τηλεπικοινωνιακών Προτύπων). Η ζώνη EU863-870 χρησιμοποιείται σε όλες τις ευρωπαϊκές χώρες και σε ορισμένες εκτός Ευρώπης, όπως για παράδειγμα στο Μπαχρέιν(BH), το οποίο βρίσκεται στη Μέση Ανατολή. Το πλάνο EU863-870 υποδηλώνει ότι η ζώνη συχνοτήτων κυμαίνεται από τα 863 MHz μέχρι τα 870 MHz. Ωστόσο, συγκεκριμένες χώρες λειτουργούν σε ελαφρώς διαφορετικές ζώνες, όπως για παράδειγμα η Αλβανία(AL), που χρησιμοποιεί το εύρος συχνοτήτων 863-873 MHz [52].

❖ *Προκαθορισμένα κανάλια EU863-870*

Τα ακόλουθα τρία προεπιλεγμένα κανάλια(Σχήμα 5.13) οφείλουν να εφαρμόζονται σε κάθε τελική συσκευή που υποστηρίζει τη ζώνη EU863-870. Τα συγκεκριμένα κανάλια χρησιμοποιούνται από την τελική συσκευή για τη μετάδοση του μηνύματος Join-Request. Το end

device επιλέγει τυχαία ένα από τα βασικά κανάλια για την αποστολή του μηνύματος Join-Request [52].

Channel Frequency (MHz)	Bandwidth (kHz)	LoRa data rate	Bit rate
868.10	125	DR0 – DR5	0.3 – 5 kbps
868.30	125	DR0 – DR5	0.3 – 5 kbps
868.50	125	DR0 – DR5	0.3 – 5 kbps

Σχήμα 5.13: Τα 3 προεπιλεγμένα κανάλια της ζώνης EU863-870 [52].

Για τελικές συσκευές που συμμορφώνονται με την έκδοση 1.0.x του LoRaWAN, τα παραπάνω τρία προεπιλεγμένα κανάλια οφείλουν να διατηρούνται αμετάβλητα, αλλά για συσκευές που λειτουργούν σύμφωνα με την έκδοση 1.1 του LoRaWAN και μετά, τα κανάλια δύναται να τροποποιηθούν μέσω της εντολής NewChannelReq. Παράλληλα, αξίζει να αναφερθεί πως η ζώνη EU863-870 υποστηρίζει μέχρι 16 κανάλια. Κατά την ενεργοποίηση της τελικής συσκευής μπορούν να καθοριστούν πρόσθετα κανάλια. Για παράδειγμα, το The Things Network χρησιμοποιεί τις ακόλουθες 5 πρόσθετες συχνότητες για uplink μηνύματα(μηνύματα ανερχόμενης ζεύξης).

- 1) 867,1 MHz
- 2) 867,3 MHz
- 3) 867,5 MHz
- 4) 867,7 MHz
- 5) 867,9 MHz

Για την αποστολή downlink μηνυμάτων(μηνυμάτων καθοδικής ζεύξης), το δίκτυο The Things Network χρησιμοποιεί μία επιπλέον σταθερή συχνότητα για τη θέση λήψης RX2:

- ✓ 869,525 MHz στο DR0 (SF12 / 125 kHz) [52].

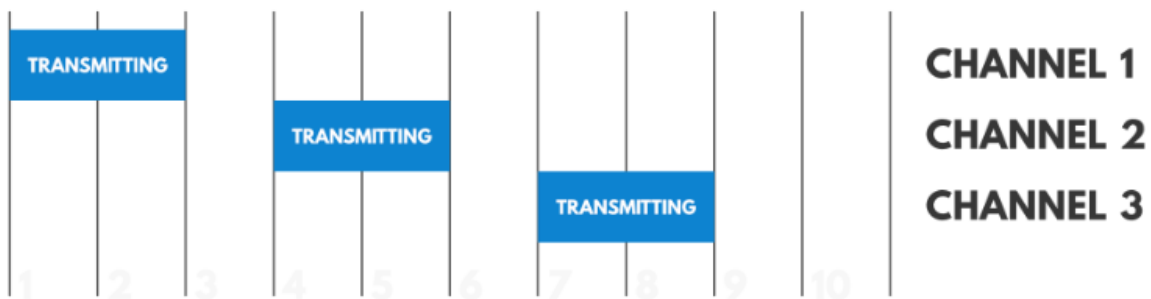
❖ EU863-870 Duty Cycle

Αρχικά, ως Duty Cycle(Κύκλος Λειτουργίας) ορίζεται το κλάσμα του χρόνου, στον οποίο ένας πόρος είναι απασχολημένος. Όταν μια μεμονωμένη συσκευή μεταδίδει σε ένα κανάλι συχνοτήτων για 2 χρονικές μονάδες κάθε 10 χρονικές μονάδες, αυτή η συσκευή διαθέτει duty cycle 20% (Σχήμα 5.14) [53].



Σχήμα 5.14: Duty Cycle 20% [53].

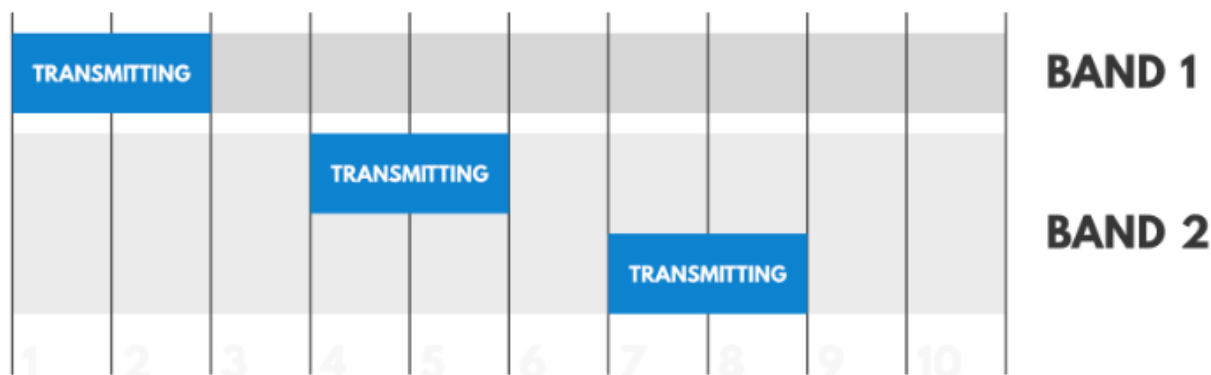
Εφόσον ληφθούν υπόψη περισσότερα του ενός κανάλια εκπομπής, τα πράγματα περιπλέκονται λίγο περισσότερο. Όταν διατίθεται μια συσκευή που εκπέμπει σε 3 κανάλια αντί για ένα, κάθε μεμονωμένο κανάλι εξακολουθεί να είναι κατειλημμένο για 2 χρονικές μονάδες κάθε 10 χρονικές μονάδες(άρα να διαθέτει κύκλο λειτουργίας 20%). Ωστόσο, η συσκευή μεταδίδει τώρα για 6 χρονικές μονάδες ανά 10 χρονικές μονάδες, δίνοντάς της έναν κύκλο λειτουργίας 60% (Σχήμα 5.15).



Σχήμα 5.15: Duty Cycle συσκευής που εκπέμπει σε 3 κανάλια [53].

Στο ευρωπαϊκό σχέδιο συχνοτήτων μας, τα κανάλια υπάγονται σε διαφορετικές υποζώνες(sub-bands), οπότε κατά την εξέταση του κύκλου λειτουργίας, χρειάζεται να ληφθούν υπόψη και αυτές. Ας υποθεθεί ότι τα 3 κανάλια που αξιοποιήθηκαν προηγουμένως, βρίσκονται σε

2 διαφορετικές sub-bands. Κάθε ξεχωριστό κανάλι εξακολουθεί να έχει κύκλο λειτουργίας 20%, η συσκευή εξακολουθεί να έχει κύκλο εργασίας 60%, αλλά τώρα παρατηρούμε ότι η ζώνη 1 χρησιμοποιείται για 2 χρονικές μονάδες ανά 10 χρονικές μονάδες, δίνοντας της ένα Duty Cycle 20%, ενώ η ζώνη 2 χρησιμοποιείται για 4 χρονικές μονάδες κάθε 10 χρονικές μονάδες κατέχοντας Duty Cycle 40 % (Σχήμα 5.16) [53].



Σχήμα 5.16: Duty Cycle με τα κανάλια εκπομπής σε διαφορετικές sub-bands [53].

Το Ευρωπαϊκό Ινστιτούτο Τηλεπικοινωνιακών Προτύπων (ETSI) ορίζει τον μέγιστο κύκλο λειτουργίας για τη ζώνη συχνοτήτων EU863-870 στο 1%, που αποτελεί το μέγιστο χρονικό διάστημα που γίνεται να δαπανήσει μια συσκευή για επικοινωνία. Στον πίνακα του Σχήματος 5.17 απεικονίζεται ο τρόπος υπολογισμού του επιτρεπόμενου χρόνου που δύναται να βρίσκονται τα απεσταλμένα μηνύματα στον αέρα(time-on-air) ανά ημέρα (24 ώρες), για κάθε τελική συσκευή σε κάποιους βασικούς κύκλους λειτουργίας [52].

Duty cycle (take the maximum)	Equation: Time-On-Air = number of seconds per day X duty cycle	Maximum allowed Time-On-Air per day, per device
0.1%	$86400 \times 0.1\%$	86 seconds per day
1%	$86400 \times 1\%$	864 seconds per day
10%	$86400 \times 10\%$	8640 seconds per day

Σχήμα 5.17: Μέγιστος επιτρεπόμενος χρόνος στον αέρα ανά ημέρα, ανά συσκευή [52].

Στην Ευρώπη, οι κύκλοι λειτουργίας ρυθμίζονται από το τμήμα 7.2.3 του προτύπου ETSI EN300.220. Το πρότυπο αυτό ορίζει τις ακόλουθες υποζώνες και τους κύκλους λειτουργίας τους:

- 1) **g (863.0 – 868.0 MHz): 1%**
- 2) **g1 (868.0 – 868.6 MHz): 1%**
- 3) **g2 (868.7 – 869.2 MHz): 0.1%**
- 4) **g3 (869.4 – 869.65 MHz): 10%**
- 5) **g4 (869.7 – 870.0 MHz): 1%**

Ωστόσο, επισημαίνεται πως στο δημόσιο κοινοτικό δίκτυο του The Things Network ισχύει μια πολιτική δίκαιης χρήσης που περιορίζει τον χρόνο εκπομπής για uplink μηνύματα σε 30 δευτερόλεπτα ανά ημέρα (24 ώρες), ανά κόμβο, και για downlink μηνύματα σε 10 μηνύματα ανά ημέρα (24 ώρες), ανά κόμβο. Εάν χρησιμοποιηθεί ιδιωτικό δίκτυο, οι περιορισμοί αυτοί δεν ισχύουν, αλλά ο χρήστης επιβάλλεται να συμμορφωθεί με τους κυβερνητικούς κανόνες και τα όρια του πρωτοκόλλου LoRaWAN [53].

❖ EU863-870 Data Rates

Ο ρυθμός δεδομένων(Data Rate) ορίζεται ως ο αριθμός των bits που μεταδίδονται ανά μονάδα χρόνου. Με τη διαμόρφωση LoRa, το Data Rate εξαρτάται από συγκεκριμένους παράγοντες όπως ο παράγοντας διασποράς(SF), το εύρος ζώνης(BW) και ο ρυθμός κωδικοποίησης(CR). Στο ακόλουθο Σχήμα 5.18 παρουσιάζεται ο ρυθμός μετάδοσης των bits για κάθε Data Rate(DR0 - DR6), που διαμορφώνεται ανάλογα με τον παράγοντα διασποράς και το εύρος ζώνης [52].

Data Rate	Configuration (SF + BW)	Bit rate (bit/s)
0	LoRa: SF12 / 125 kHz	250
1	LoRa: SF11 / 125 kHz	440
2	LoRa: SF10 / 125 kHz	980
3	LoRa: SF9 / 125 kHz	1760
4	LoRa: SF8 / 125 kHz	3125
5	LoRa: SF7 / 125 kHz	5470
6	LoRa: SF7 / 250 kHz	11000

Σχήμα 5.18: Data Rate σε αντιστοιχία με Bit Rate, Παράγοντα διασποράς και εύρος ζώνης [52].

Όπως εύκολα διαπιστώνεται, οι υψηλότεροι συντελεστές διασποράς προκαλούν χαμηλότερους ρυθμούς μετάδοσης, ενώ οι χαμηλότεροι συντελεστές διασποράς επιβάλλουν υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων. Ωστόσο, για τον ίδιο συντελεστή διασποράς, εάν το εύρος ζώνης διπλασιαστεί, ο ρυθμός δεδομένων επίσης διπλασιάζεται [52]. Για να αναλυθεί εκτενέστερα η εξάρτηση του ρυθμού δεδομένων από τον συντελεστή διασποράς απαιτείται να εντυπώσουμε περαιτέρω στην έννοια του Spreading Factor.

Έχει ήδη υπογραμμιστεί, ότι η τεχνική διαμόρφωσης του LoRa βασίζεται στην τεχνολογία Chirp Spread Spectrum(CSS), όπου τα chirps(επίσης γνωστά και ως σύμβολα) αποτελούν το φορέα των δεδομένων. Ο συντελεστής διασποράς ελέγχει το ρυθμό chirp με αποτέλεσμα να ρυθμίζει την ταχύτητα μετάδοσης των δεδομένων. Χαμηλότεροι συντελεστές διασποράς συνεπάγονται ταχύτερα chirps και επομένως υψηλότερο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων. Για κάθε αύξηση του παράγοντα διασποράς, ο ρυθμός σάρωσης των chirp μειώνεται στο μισό με αποτέλεσμα να υποδιπλασιάζεται ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων(Data Rate) [54].

Οι χαμηλότεροι συντελεστές διασποράς μειώνουν την εμβέλεια των μεταδόσεων LoRa, καθώς ελαττώνουν το κέρδος επεξεργασίας και αυξάνουν το ρυθμό μετάδοσης των bits. Η μεταβολή του spreading factor επιτρέπει στο δίκτυο να αυξήσει ή να μειώσει τον ρυθμό δεδομένων για κάθε τελική συσκευή με κόστος την εμβέλεια. Το δίκτυο χρησιμοποιεί επίσης τους συντελεστές διασποράς για τον έλεγχο της συμφόρησης. Οι παράγοντες διασποράς είναι ανεξάρτητοι, έτσι ώστε τα σήματα που διαμορφώνονται με διαφορετικούς spreading factors και μεταδίδονται στο ίδιο κανάλι συχνότητας την ίδια στιγμή να μην παρεμβάλλονται μεταξύ τους [54].

- **Επίδραση των παραγόντων διασποράς**

Η διαμόρφωση LoRa διαθέτει συνολικά 6 συντελεστές διασποράς από SF7 έως SF12. Οι παράγοντες διασποράς επηρεάζουν το ρυθμό δεδομένων, το χρόνο μηνυμάτων στον αέρα, τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας και την ευαισθησία του δέκτη, όπως περιγράφεται παρακάτω.

- i. **Ρυθμός Δεδομένων**

Σε σύγκριση με υψηλότερους spreading factors, ένας χαμηλότερος παράγοντας διασποράς παρέχει υψηλότερο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων για σταθερό εύρος ζώνης και ρυθμό

κωδικοποίησης. Για παράδειγμα, ο SF7 παρέχει υψηλότερο ρυθμό μετάδοσης από τον SF12. Ο διπλασιασμός του εύρους ζώνης διπλασιάζει επίσης τον ρυθμό μετάδοσης δεδομένων για σταθερό συντελεστή διασποράς και ρυθμό κωδικοποίησης. Στο Σχήμα 5.19 παρουσιάζεται ο ρυθμός μετάδοσης των bits, που υπολογίζεται με συντελεστή διασποράς SF7 και ρυθμό κωδικοποίησης (CR) = 1 για εύρη ζώνης, 125, 250 και 500 kHz [54].

Spreading Factor	Bandwidth	Bit rate (kbits/s)
7	125	5.5
7	250	10.9
7	500	21.9

Σχήμα 5.19: Σύγκριση ρυθμών bit για σταθερό παράγοντα διασποράς και μεταβλητό εύρος ζώνης [54].

ii. Απόσταση

Μεγαλύτεροι συντελεστές διασποράς υποδηλώνουν ενισχυμένο κέρδος επεξεργασίας. Συνεπώς, ένα σήμα διαμορφωμένο με μεγαλύτερο συντελεστή διασποράς λαμβάνεται με λιγότερα σφάλματα σε σύγκριση με ένα σήμα με μικρότερο συντελεστή διασποράς, και άρα χαρακτηρίζεται ικανό να διανύσει μεγαλύτερη απόσταση. Για παράδειγμα, ένα σήμα διαμορφωμένο με τον παράγοντα διασποράς SF12 μπορεί να διανύσει μεγαλύτερη απόσταση από ένα σήμα διαμορφωμένο με τον συντελεστή SF7 [54].

iii. Time-On-Air

Σε σύγκριση με έναν χαμηλότερο συντελεστή διασποράς, η αποστολή ενός σταθερού όγκου δεδομένων(ωφέλιμο φορτίο) με υψηλότερο συντελεστή εξάπλωσης και σταθερό εύρος ζώνης απαιτεί μεγαλύτερο χρόνο στον αέρα. Ο υπολογιστής του χρόνου μηνυμάτων στον αέρα του δικτύου του The Things Network συμβάλλει στον υπολογισμό του time-on-air χρησιμοποιώντας τα bytes εισόδου(δηλαδή το μέγεθος ωφέλιμου φορτίου), το εύρος ζώνης και τον παράγοντα διασποράς [54].

iv. Ευαισθησία δέκτη

Υψηλότεροι συντελεστές διασποράς παρέχουν υψηλότερη ευαισθησία δέκτη. Συνήθως, το πρωτόκολλο LoRa αξιοποιεί μεγαλύτερους συντελεστές διασποράς όταν το σήμα θεωρείται ασθενές. Στο Σχήμα 5.20 απεικονίζεται ο τρόπος με τον οποίο οι συντελεστές διασποράς επηρεάζουν την ευαισθησία του δέκτη [54].

Spreading factor	Receiver sensitivity for bandwidth fixed at 125 kHz
SF7	-123 dBm
SF8	-126 dBm
SF9	-129 dBm
SF10	-132 dBm
SF11	-134,5 dBm
SF12	-137 dBm

Σχήμα 5.20: Ευαισθησία δέκτη για σταθερό εύρος ζώνης στα 125 kHz και μεταβλητό παράγοντα διασποράς [54].

❖ EU863-870 Μέγιστο EIRP / ERP

Η αποτελεσματική ιστροπική ακτινοβολούμενη ισχύς (EIRP) αποτελεί τη συνολική ισχύ που εκπέμπεται από μια ιστροπική κεραία σε μια μόνο κατεύθυνση. Στις ιστροπικές κεραίες, το κέρδος της κεραίας εκφράζεται σε dBi. Το μέγιστο EIRP για το EU863-870 είναι +16dBm. Το Σχήμα 5.21 παρουσιάζει τον κατάλογο των τιμών EIRP που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μετάδοση δεδομένων [52].

TX Power	EIRP	Calculated value
0	Max EIRP	+16 dBm
1	Max EIRP - 2 dB	+16 dBm - 2 dB = +14 dBm
2	Max EIRP - 4 dB	+16 dBm - 4 dB = +12 dBm
3	Max EIRP - 6 dB	+16 dBm - 6 dB = +10 dBm
4	Max EIRP - 8 dB	+16 dBm - 8 dB = +8 dBm
5	Max EIRP - 10 dB	+16 dBm - 10 dB = +6 dBm
6	Max EIRP - 12 dB	+16 dBm - 12 dB = +4 dBm
7	Max EIRP - 14 dB	+16 dBm - 14 dB = +2 dBm

Σχήμα 5.21: Τιμές EIRP σε συνάρτηση με την ισχύ μετάδοσης [52].

❖ EU863-870 Maximum Payload Size

Το μέγιστο μέγεθος(μήκος) του ωφέλιμου φορτίου της εφαρμογής ποικίλλει ανάλογα με το ρυθμό δεδομένων. Ο παρακάτω πίνακας(Σχήμα 5.22) επισημαίνει το μέγιστο μέγεθος ωφέλιμου φορτίου εφαρμογής (FRMPayload) για διαφορετικούς ρυθμούς δεδομένων [52].

Data Rate	Configuration (SF+BW)	Maximum application payload size (bytes)
0	LoRa: SF12 / 125 kHz	51
1	LoRa: SF11 / 125 kHz	51
2	LoRa: SF10 / 125 kHz	51
3	LoRa: SF9 / 125 kHz	115
4	LoRa: SF8 / 125 kHz	242
5	LoRa: SF7 / 125 kHz	242
6	LoRa: SF7 / 250 kHz	242

Σχήμα 5.22: Μέγιστο μέγεθος ωφέλιμου φορτίου συναρτήσει του Data Rate [52].

- **MESSAGE TYPES**

- Uplink και Downlink Μηνύματα

Τα μηνύματα LoRa διαχωρίζονται σε μηνύματα ανοδικής(uplink) και καθοδικής(downlink) ζεύξης με βάση την κατεύθυνση στην οποία μεταδίδονται.

- Uplink Μηνύματα: Τα Uplink μηνύματα αποστέλλονται από τις τελικές συσκευές στον διακομιστή δικτύου μεταδιδόμενα από μία ή περισσότερες πύλες. Εάν το μήνυμα ανοδικής ζεύξης καταχωρείται στον Application Server ή στον Join Server, ο Network Server το προωθεί στον επιθυμητό παραλήπτη.
- Μηνύματα καθοδικής ζεύξης: Κάθε μήνυμα καθοδικής ζεύξης αποστέλλεται από τον διακομιστή δικτύου σε μία μόνο τελική συσκευή και αναμεταδίδεται από μία μόνο πύλη. Σ' αυτό συμπεριλαμβάνονται και ορισμένα μηνύματα που ξεκινούν από τον Application Server και τον Join Server [55].

- MAC Message Types

Το LoRaWAN καθορίζει διάφορους τύπους μηνυμάτων MAC. Στο Σχήμα 5.23 παρουσιάζονται οι τύποι των μηνυμάτων MAC που διατίθενται στην έκδοση LoRaWAN 1.0.x και 1.1.

LoRaWAN 1.0.x	LoRaWAN 1.1	Description
Join-request	Join-request	An uplink message, used by the over-the-air activation (OTAA) procedure
Join-accept	Join-accept	A downlink message, used by the over-the-air activation (OTAA) procedure
Unconfirmed Data Up	Unconfirmed Data Up	An uplink data frame, confirmation is not required
Unconfirmed Data Down	Unconfirmed Data Down	A downlink data frame, confirmation is not required
Confirmed Data Up	Confirmed Data Up	An uplink data frame, confirmation is requested
Confirmed Data Down	Confirmed Data Down	A downlink data frame, confirmation is requested
RFU	Rejoin-request	1.0.x - Reserved for Future Usage 1.1 - Uplink over-the-air activation (OTAA) Rejoin-request
Proprietary	Proprietary	Used to implement non-standard message formats

Σχήμα 5.23: Τύποι μηνυμάτων εκδόσεων LoRaWAN [55].

Στην έκδοση του LoRaWAN 1.0.x, οι δύο τύποι μηνυμάτων MAC που χρησιμοποιούνται στη διαδικασία ενεργοποίησης Over-The-Air-Activation (OTAA) αποτελούν τα Join-Request και Join-Accept μηνύματα. Αντίθετα, στην έκδοση 1.1 του LoRaWAN εκτός των συγκεκριμένων δύο μηνυμάτων αξιοποιείται και το μήνυμα Rejoin-Request [55].

- Join-Request μήνυμα

Το μήνυμα Join-Request ξεκινά πάντα από μια τελική συσκευή και αποστέλλεται στον διακομιστή δικτύου. Στις εκδόσεις LoRaWAN, οι οποίες προηγούνται της 1.0.4, το μήνυμα Join-Request προωθείται από τον Network Server στον Application Server. Στις εκδόσεις LoRaWAN 1.1, καθώς και τις μεταγενέστερες του 1.0.4, ο διακομιστής δικτύου αποστέλλει το μήνυμα Join-Request στον Join Server της συσκευής. Τέλος, το συγκεκριμένο μήνυμα δεν κρυπτογραφείται [55].

- Join-Accept μήνυμα

Σε εκδόσεις του LoRaWAN προγενέστερες της έκδοσης 1.0.4, το μήνυμα αποδοχής σύνδεσης παράγεται από τον διακομιστή εφαρμογών. Στις εκδόσεις LoRaWAN 1.1 και μεταγενέστερες της 1.0.4 το μήνυμα Join-Accept παράγεται από τον Join Server. Και στις δύο περιπτώσεις το μήνυμα διέρχεται από τον Network Sever. Στη συνέχεια, ο διακομιστής δικτύου δρομολογεί το μήνυμα Join-Accept στην κατάλληλη τελική συσκευή. Το μήνυμα αποδοχής σύνδεσης κρυπτογραφείται ως εξής [55].

- ✓ Στην έκδοση LoRaWAN 1.0, το μήνυμα Join-Accept κρυπτογραφείται με το AppKey.
- ✓ Στο LoRaWAN 1.1, το μήνυμα Join-Accept κρυπτογραφείται με διαφορετικά κλειδιά, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.24.

If triggered by	Encryption Key
Join-request	NwkKey
Rejoin-request type 0, 1, and 2	JSEncKey

Σχήμα 5.24: Κλειδί κρυπτογράφησης του Join-Accept μηνύματος στο LoRaWAN 1.1 [55].

- Rejoin-Request

Το μήνυμα Rejoin-Request δρομολογείται πάντα από μια τελική συσκευή και αποστέλλεται στον διακομιστή δικτύου. Τρεις τύποι μηνυμάτων Rejoin-Request υφίστανται: Τύπος 0, 1 και 2. Αυτοί οι τύποι μηνυμάτων συμβάλουν στην αρχικοποίηση του νέου πλαισίου συνόδου για την τελική συσκευή. Για το μήνυμα Rejoin-Request, το δίκτυο ανταποκρίνεται με ένα μήνυμα Join-Accept [55].

- Data Messages

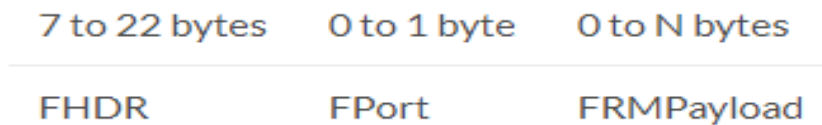
Τόσο στο μοντέλο LoRaWAN 1.0.x όσο και στο 1.1 καταγράφονται 4 τύποι μηνυμάτων δεδομένων που χρησιμοποιούνται. Οι συγκεκριμένοι τύποι μηνυμάτων συμβάλουν στη μεταφορά τόσο εντολών MAC όσο και δεδομένων εφαρμογής, τα οποία μπορούν να συνδυαστούν

μαζί σε ένα μόνο μήνυμα. Τα μηνύματα δεδομένων επιβεβαιώνονται ή παραμένουν αναπόδεικτα. Τα επιβεβαιωμένα μηνύματα δεδομένων οφείλουν να αναγνωρίζονται από τον παραλήπτη, σ' αντίθεση με τα ανεπιβεβίωτα, τα οποία δεν χρειάζονται αποδοχή. Ένα μήνυμα δεδομένων κατασκευάζεται όπως φαίνεται παρακάτω, στο Σχήμα 5.25:



Σχήμα 5.25: Μήνυμα δεδομένων LoRa [55].

Το ωφέλιμο φορτίο MAC των μηνυμάτων δεδομένων(Σχήμα 5.26) αποτελείται από μια επικεφαλίδα πλαισίου (FHDR), ακολουθούμενη από ένα προαιρετικό πεδίο θύρας(FPort) και ένα προαιρετικό ωφέλιμο φορτίο πλαισίου(FRMPayload) [55].



Σχήμα 5.26: MAC Payload LoRaWAN μηνύματος [55].

Η επικεφαλίδα πλαισίου(FHDR) του ωφέλιμου φορτίου MAC αποτελείται από τέσσερα πεδία, τα οποία παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.27.

4 bytes	1 byte	2 bytes	0 to 15 bytes
DevAddr	FCtrl	FCnt	FOpts

Σχήμα 5.27: Δομή επικεφαλίδας πλαισίου [55].

➤ Διευθυνσιοδότηση & ενεργοποίηση

Το LoRaWAN περιλαμβάνει έναν αριθμό αναγνωριστικών για συσκευές, εφαρμογές και πύλες, τα οποία αναφέρονται παρακάτω:

- ✓ **DevEUI:** μοναδικό αναγνωριστικό τελικής συσκευής μήκους 64 bit
- ✓ **DevAddr:** μη μοναδική διεύθυνση συσκευής μήκους 32 bit
- ✓ **AppEUI:** μοναδικό αναγνωριστικό εφαρμογής μήκους 64 bit
- ✓ **GatewayEUI:** μοναδικό αναγνωριστικό πύλης μήκους 64 bit

▪ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Οι εφαρμογές στο LoRaWAN και στο δίκτυο του The Things Network διαθέτουν ένα μοναδικό αναγνωριστικό μήκους 64 bit (AppEUI). Όταν δημιουργείται μια εφαρμογή, ο διακομιστής λογαριασμού του The Things Network κατανέμει ένα AppEUI από το μπλοκ διευθύνσεων του The Things Network Foundation. Συνεπώς, κάθε εφαρμογή έχει τουλάχιστον ένα AppEUI, το οποίο ξεκινά με την αλληλουχία συμβόλων 70B3D57ED. Παράλληλα, εφόσον ο χρήστης διαθέτει τα προσωπικά του AppEUI, του δίνεται η δυνατότητα να τα προσθέσει στην εφαρμογή του [56].

▪ ΠΥΛΕΣ

Τα gateways κατασκευάζονται με ενσωματωμένο αναγνωριστικό(EUI), το οποίο γίνεται στη συνέχεια να αξιοποιηθεί στη διαδικασία εγγραφής της πύλης στο δίκτυο του The Things Network. Παρόλο που τα αρχεία διαμόρφωσης ορισμένων gateways υποδηλώνουν την ικανότητα επιλογής ενός μόνο EUI, κάτι τέτοιο δεν υφίσταται. Εφόσον, η πύλη του χρήστη δεν διαθέτει ενσωματωμένο EUI, μπορεί να χρησιμοποιήσει ένα άλλο που βρίσκεται στην κατοχή του ή να

διαμορφώσει ένα AppEUI που έχει καταχωρηθεί στο λογαριασμό του. Τέλος, του δίνεται η δυνατότητα να αξιοποιήσει έναν προωθητή βασισμένο στο πρωτόκολλο MQTT, ο οποίος χρειάζεται μόνο ένα GatewayID (το οποίο επιλέγεται από τον χρήστη) αντί για ένα GatewayEUI [56].

5.1.4 Τα δίκτυα The Things Stack και The Things Network

Το The Things Network αποτελεί ένα παγκόσμιο συνεργατικό οικοσύστημα του Διαδικτύου των Πραγμάτων που διαμορφώνει δίκτυα, συσκευές και λύσεις χρησιμοποιώντας το πρωτόκολλο LoRaWAN. Από τον Ιανουάριο του 2021, το The Things Network χειρίζεται το The Things Stack Community Edition, το οποίο ορίζεται ως ένα πληθοπορισμένο, ανοιχτό και αποκεντρωμένο δίκτυο LoRaWAN. Το δίκτυο αυτό θεωρείται ένας εξαιρετικός τρόπος για να ξεκινήσει ένας χρήστης να δοκιμάζει συσκευές, εφαρμογές και ενσωματώσεις, αποκτώντας έτσι εξοικείωση με το LoRaWAN [57].

Το The Things Stack αποτελεί έναν διακομιστή δικτύου LoRaWAN εταιρικής βαθμίδας, ο οποίος βασίζεται σε έναν πυρήνα ανοικτού κώδικα και επιτρέπει στον χρήστη να δημιουργήσει και να διαχειριστεί δίκτυα πρωτοκόλλου LoRaWAN στο προσωπικό του υλικό ή στο cloud. Το The Things Stack, ορίζεται συντομογραφικά ως TTS και αποτελεί τη στοίβα διακομιστών του δικτύου LoRaWAN. Επιπλέον, βρίσκεται σήμερα στην τρίτη έκδοση της υλοποίησης ενός Network Server και, ως εκ τούτου, χαρακτηρίζεται ανεπίσημα ως V3. Τέλος, αξίζει να αναφερθεί πως το δίκτυο του The Things Stack αναπτύσσεται και συντηρείται από την εταιρία The Things Industries, η οποία προσφέρει επίσης ιδιωτικά δίκτυα LoRaWAN, που φιλοξενούνται στο cloud με πρόσθετα επιχειρηματικά χαρακτηριστικά, καθώς και πακέτα υποστήριξης ιδιαίτερης αξίας για τους εταιρικούς της πελάτες [57].

Το The Things Stack, σε σύγκριση με το The Things Network V2, είναι πιο επεκτάσιμο, ασφαλέστερο και υποστηρίζει όλες τις τελευταίες εξελίξεις του LoRaWAN, όπως τις πιο πρόσφατες εκδόσεις LoRaWAN 1.1 και 1.0.4. Η αρχιτεκτονική του The Things Stack βασίζεται σε microservices, γεγονός που επιτρέπει την καλύτερη κατανομή των υπηρεσιών, τη βελτιωμένη κλιμάκωση και τη διαλειτουργικότητα με άλλα δίκτυα LoRaWAN. Το The Things Stack υποστηρίζει όλες τις κλάσεις του πρωτοκόλλου LoRaWAN (A, B, C), τις ομάδες συσκευών

πολλαπλής εκπομπής, όλες τις υπάρχουσες εκδόσεις του LoRaWAN (συμπεριλαμβανομένων των v1.0.4 και v1.1) και όλες τις περιφερειακές παραμέτρους, όπως ορίζονται από την LoRa Alliance. Με συμμόρφωση με τα πρότυπα, το The Things Stack υποστηρίζει την παθητική περιήγηση και υπολογίζεται μελλοντικά να εξυπηρετεί την περιαγωγή με παράδοση. Οι ενημερώσεις υλικολογισμικού μέσω του αέρα, καθώς και οι προηγμένες τεχνικές ομαδοποίησης και εξισορρόπησης φορτίου, συνοδεύουν επίσης αυτή την αναβάθμιση. Τα προηγμένα API προσφέρουν ενσωματώσεις gRPC, HTTP και MQTT. Επιπρόσθετα, περιλαμβάνονται ροές συμβάντων βασισμένες σε API που μπορούν να εξυπηρετήσουν τους χρήστες στον εντοπισμό σφαλμάτων, στην παρακολούθηση της συμπεριφορά της συσκευής καθώς και στη λήψη χρήσιμων ειδοποιήσεων. Οι μορφές δεδομένων που αξιοποιούνται από το The Things Stack διαθέτουν διαφορετικό σχήμα και παρουσιάζουν πλουσιότερη υποστήριξη από metadata. Παράλληλα, για την αποθήκευση δεδομένων, υποστηρίζεται ένα integration αποθήκευσης. Οι χρήστες του The Things Stack έχουν τη δυνατότητα να χρησιμοποιήσουν τον παγκόσμιο Join Server για την αποθήκευση και την έκδοση κλειδιών ασφαλείας βελτιώνοντας μ' αυτόν τον τρόπο την ασφάλεια ανάπτυξης των αισθητήρων τους. Δεδομένου ότι αυτή η αρχιτεκτονική δικτύου είναι συμβατή με τα πρότυπα, οι προγραμματιστές μπορούν ακόμη και να χρησιμοποιήσουν έναν διακομιστή σύνδεσης που λειτουργεί από αξιόπιστο τρίτο μέρος. Ένα από τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά είναι η σύνδεση με τον Packet Broker, που επιτρέπει την ανταλλαγή κίνησης μηνυμάτων μεταξύ του The Things Stack Community Edition και ιδιωτικών δικτύων LoRaWAN, γεγονός που αυξάνει την κάλυψη, την απόδοση και τη χωρητικότητα του δικτύου LoRaWAN, παρατείνοντας τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας της τελικής συσκευής [58].

➤ ΟΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΟΥ THE THINGS STACK

Το The Things Stack διατίθεται σε πολλές ξεχωριστές μορφές για την κάλυψη διαφορετικών απαιτήσεων. Παρακάτω αναφέρονται επιγραμματικά οι αναπτύξεις του δικτύου The Things Stack και τα χαρακτηριστικά τους:

- ✚ **Cloud**: Η ανάπτυξη του Cloud χαρακτηρίζεται από έναν SLA υποστηριζόμενο διακομιστή δικτύου που φιλοξενείται από την εταιρία The Things Industries.
- ✚ **Dedicated Cloud**: Η συγκεκριμένη εφαρμογή περιλαμβάνει όλα τα οφέλη του Cloud σε ένα εξειδικευμένο σύμπλεγμα(cluster).

- ✚ **AWS Launcher**: Η αγορά AWS καθιστά απλούστερη την ανάπτυξη σε νέο ή υφιστάμενο σύμπλεγμα EC2. Ενσωματώνεται αβίαστα με το AWS IOT, ώστε να είναι ικανός ο χρήστης να συνεχίζει να χρησιμοποιεί τα εργαλεία με τα οποία έχει εξοικειωθεί.
- ✚ **Enterprise**: Η συγκεκριμένη ανάπτυξη προωθεί την εγκατάσταση του διακομιστή δικτύου στο προσωπικό υλικό του χρήστη, διαθέτοντας επαγγελματική υποστήριξη από την εταιρία The Things Industries.
- ✚ **Community Edition**: Η διαχείριση του Community Edition επιτυγχάνεται από το The Things Network. Αποτελεί έναν δωρεάν διακομιστή δικτύου, ο οποίος προσφέρει το μεγαλύτερο κοινοτικό δίκτυο LoRaWAN στον κόσμο.
- ✚ **Open Source**: Τέλος, στους χρήστες που ενδιαφέρονται για το DIY, αξίζει να επισημανθεί πως ο πυρήνας του The Things Stack αποτελεί ανοιχτού κώδικα [57].

Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκαν οι παροχές του The Things Stack Community Edition, καθώς αποτελεί μια δωρεάν, έξυπνη λύση για την διαμόρφωση του επιθυμητού IoT οικοσυστήματος μας, η οποία βασίζεται παράλληλα σ' ένα δημόσιο κοινοτικό δίκτυο πρωτοκόλλου LoRaWAN. Συνεπώς, παρακάτω αναλύονται ορισμένες βασικές πτυχές και χαρακτηριστικά του The Things Stack Community Edition.

➤ ΤΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ THE THINGS STACK COMMUNITY EDITION

Όπως επισημάνθηκε παραπάνω, από τον Ιανουάριο του 2021, το The Things Network ανέλαβε τη διαχείριση του The Things Stack Community Edition, μιας δωρεάν, κοινοτικής ανάπτυξης του The Things Stack. Πρόκειται για μια αναβάθμιση από την προηγούμενη έκδοση του The Things Network V2, η οποία έρχεται με μια σειρά από ολοκαίνουργια χαρακτηριστικά, έτοιμες ενσωματώσεις, εκτεταμένη κάλυψη και βελτιωμένη εμπειρία χρήστη. Η έκδοση The Things Stack Community Edition προσφέρει ένα δωρεάν και φιλικό προς τους προγραμματιστές τρόπο εξοικείωσης με την τεχνολογία του LoRaWAN. Παρέχει ένα δημόσιο κοινοτικό δίκτυο LoRaWAN, με πρωτοβουλία της εταιρίας The Things Industries, και υποστηρίζεται από περισσότερα από 100000 μέλη της κοινότητας του The Things Network, καθώς και από περισσότερες από 100 χώρες σε ολόκληρο τον κόσμο [58].

- **CLUSTERS**

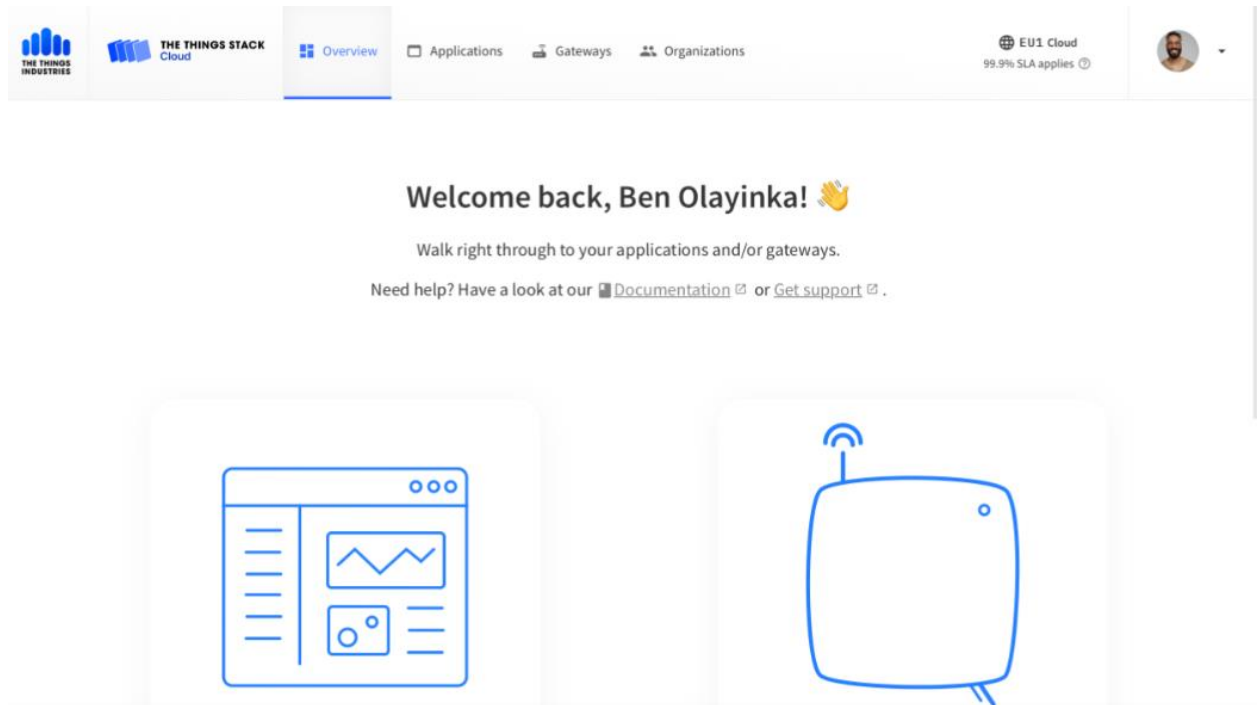
To The Things Stack Community Edition (που διαχειρίζεται το The Things Network) αποτελεί μια εγκατάσταση πολλαπλών συμπλεγμάτων(clusters). Κάτι τέτοιο υποδηλώνει, πως ενώ οι πληροφορίες του λογαριασμού του κάθε χρήστη αποθηκεύονται σε μια κεντρική τοποθεσία, εκείνος μπορεί να συνδέσει τις πύλες του σε ένα πλησιέστερο cluster δρομολογώντας όλη την κυκλοφορία του IoT σ' αυτό το σύμπλεγμα. Μ' αυτόν τον τρόπο μειώνεται σημαντικά η καθυστέρηση, καθώς τα μηνύματα που αποστέλλονται δεν θα χρειαστεί να διασχίσουν τον μισό πλανήτη [59]. Το The Things Stack Community Edition διαθέτει επί του παρόντος τρία clusters, τα οποία επισημαίνονται στο Σχήμα 5.28.

Cluster ID	Name	Location
au1	Australia 1	Sydney, Australia
eu1	Europe 1	Ireland
nam1	North America 1	California, USA

Σχήμα 5.28: Τα clusters του The Things Stack Community Edition [59].

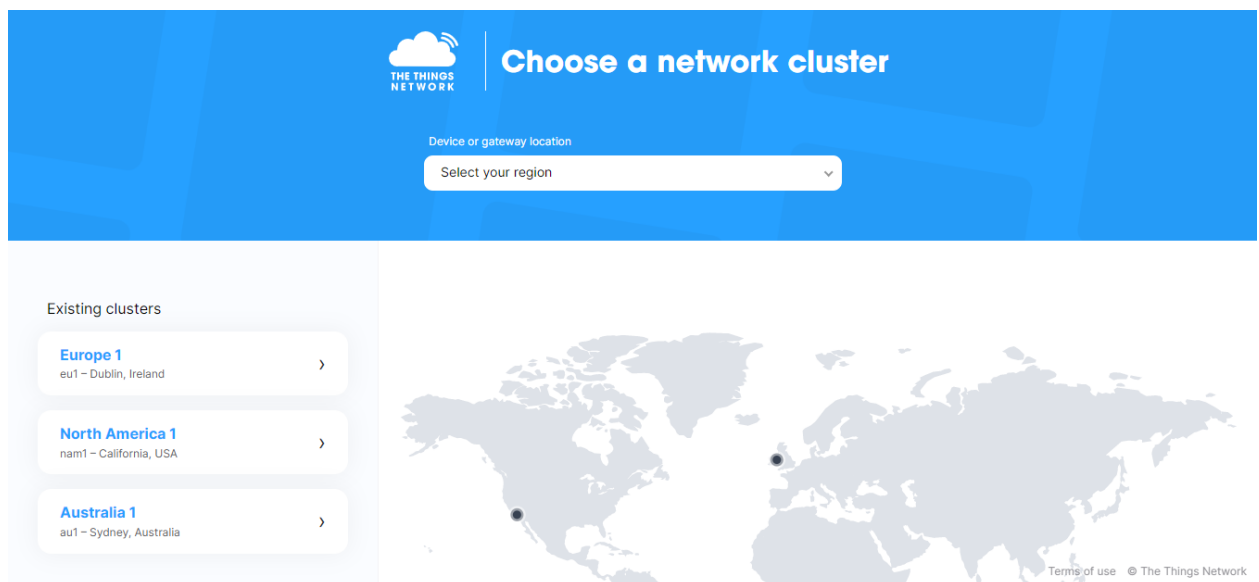
- **CONSOLE**

Η Κονσόλα(Σχήμα 5.29) είναι η εφαρμογή διαχείρισης του The Things Stack για το LoRaWAN. Πρόκειται για μια διαδικτυακή εφαρμογή η οποία, μεταξύ άλλων, χρησιμοποιείται για την εγγραφή εφαρμογών, τελικών συσκευών ή πυλών, την παρακολούθηση της κίνησης του δικτύου ή τη διαμόρφωση επιλογών που σχετίζονται με το δίκτυο [60].



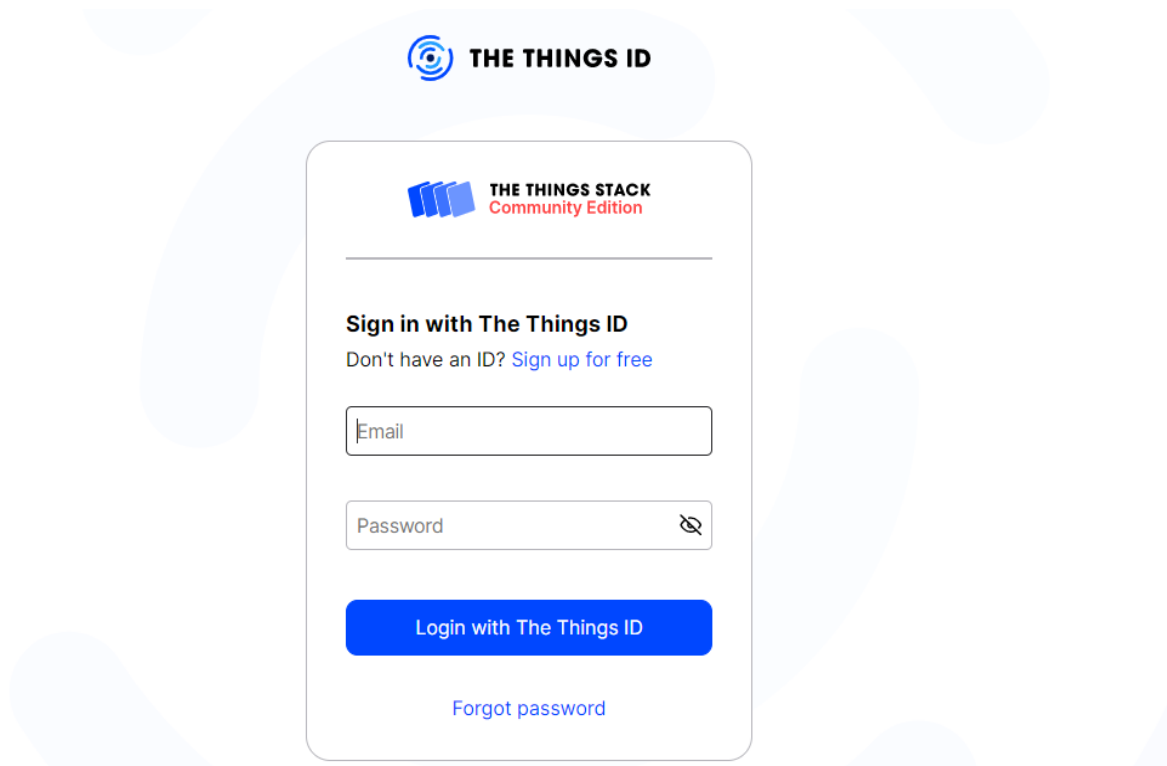
Σχήμα 5.29: Η Κονσόλα του The Things Stack [60].

Στην περίπτωση αξιοποίησης του The Things Stack Community Edition η κονσόλα βρίσκεται διαθέσιμη στη διεύθυνση *cloud.thethings.network* [60].



Σχήμα 5.30: Επιλογή κατάλληλου cluster για τη σύνδεση στην Console του The Things Stack Community Edition.

Κάθε cluster διαθέτει ένα Console στο οποίο ο χρήστης διαχειρίζεται τις πύλες και τις τελικές συσκευές του συγκεκριμένου συμπλέγματος(Σχήμα 5.30). Επειδή στην εργασία χρησιμοποιήθηκε το cluster Europe 1(eu1), της Ευρώπης, η διεύθυνση της κονσόλας είναι η εξής: <https://eu1.cloud.thethings.network/console> [61]. Έπειτα, για τη σύνδεση στην πλατφόρμα της κονσόλας απαιτείται εισαγωγή του email και του κωδικού του λογαριασμού που έχουμε δημιουργήσει στο The Things Stack(Σχήμα 5.31).



Σχήμα 5.31: Σύνδεση στο Console του cluster eu1.

- **ΕΝΣΩΜΑΤΩΣΕΙΣ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ**

Τα integrations και applications που προσφέρονται από το The Things Stack περιλαμβάνουν πλατφόρμες cloud ενσωματώσεων, MQTT servers, Webhooks, Payload Formatters και αρκετά άλλα.

- ❖ *Cloud Integrations*

Οι περισσότερες cloud ενσωματώσεις ενεργοποιούνται μόνο για uplink μηνύματα έπειτα από προεπιλογή, γεγονός το οποίο αντικατοπτρίζεται και στα περισσότερα από τα διαθέσιμα πρότυπα

Webhook. Συνεπώς, εφόσον αξιοποιηθούν από το χρήστη πρότυπα Webhook για τη δημιουργία αυτών των ενσωματώσεων, δίνεται η δυνατότητα ενεργοποίησης άλλων τύπων μηνυμάτων (όπως Join accept, Downlink ack, location solved κ.λπ.) κάνοντας κλικ στο integration της κονσόλας του The Things Stack, αφού εκείνη έχει διαμορφωθεί, ακολουθώντας τους οδηγούς ενοποίησης και επιλέγοντας έπειτα τα κουτάκια δίπλα στους συγκεκριμένους τύπους μηνυμάτων. Ωστόσο, εκτός από την ενεργοποίηση των επιθυμητών μηνυμάτων, ενδέχεται παράλληλα να χρειαστεί να ευρεθεί από το χρήστη ο τρόπος με τον οποίο η επιθυμητή πλατφόρμα IoT τρίτου μέρους θα επεξεργάζεται και θα αποκωδικοποιεί τα μηνύματα. Τα cloud integrations περιλαμβάνουν πολυάριθμες πλατφόρμες όπως το IoT in a Box, το Datacake, το Cayenne, το Cloud Studio κ.α [62].

❖ MQTT Server

Το The Things Stack εκθέτει έναν διακομιστή MQTT για την επεξεργασία συμβάντων ροής. Προκειμένου να χρησιμοποιηθεί ο MQTT server ο χρήστης οφείλει να σχηματίσει ένα νέο κλειδί API με στόχο τον έλεγχο ταυτότητας. Το The Things Stack Console παρέχει τις απαιτούμενες πληροφορίες σύνδεσης και αξιοποιείται στη διαμόρφωση του κλειδιού API [63].

❖ Pub/Sub

Η ενσωμάτωση Pub/Sub επιτρέπει στον Application Server να δημοσιεύει και να εγγράφεται ως συνδρομητής σε διάφορα θέματα, χρησιμοποιώντας τον ενσωματωμένο πελάτη MQTT του The Things Stack ή τον NATS client [64].

❖ LoRa Cloud

Η πλατφόρμα LoRa Cloud προσφέρει API προστιθέμενης αξίας που επιτρέπουν απλές λύσεις για συνηθισμένες εργασίες, οι οποίες σχετίζονται τόσο με το δίκτυο LoRaWAN όσο και με συσκευές που βασίζονται στη διαμόρφωση LoRa. Το The Things Stack υποστηρίζει ενσωματώσεις με τις υπηρεσίες LoRa Cloud Device & Application Services και LoRa Cloud Geolocation API [65].

❖ Node-RED

Το Node-RED είναι ένα δωρεάν, βασισμένο στη γλώσσα JavaScript, εργαλείο ανάπτυξης για οπτικό προγραμματισμό, το οποίο αναπτύχθηκε για να διευκολύνει τη διαδικασία σύνδεσης

συσκευών υλικού, API και διαδικτυακών υπηρεσιών. Ο διακομιστής MQTT που προσφέρεται από το The Things Stack μπορεί να συνδεθεί με το Node-RED. Αυτή η ενσωμάτωση επιτρέπει τη δημιουργία μιας ροής Node-RED που ερμηνεύει συμβάντα και μηνύματα uplink, ενώ χειρίζεται και προγραμματισμό μηνυμάτων κατερχόμενης ζεύξης [66].

❖ IFTTT

Το IFTTT αποτελεί μια υπηρεσία διαμόρφωσης αλυσίδων από προτάσεις υπό συνθήκες, που ονομάζονται applets, οι οποίες ενεργοποιούνται από τα γεγονότα που διαδραματίζονται σε διάφορες υπηρεσίες ιστού. Τα applets συνδέουν πολλαπλές εφαρμογές προκειμένου να εκτελέσουν αυτοματοποιημένες εργασίες. Τέλος, επισημαίνεται πως για τη σύνδεση του The Things Stack με το IFTTT, θα χρησιμοποιηθεί το Node-RED ως μέρος της εγκατάστασης [67].

❖ Payload Formatters

Οι Payload Formatters επιτρέπουν στο χρήστη να επεξεργάζεται δεδομένα που μεταφέρονται από και προς τις τελικές συσκευές. Οι συγκεκριμένοι μορφοποιητές αξιοποιούνται κυρίως για τη μετατροπή δυαδικών ωφέλιμων φορτίων σε αναγνώσιμες μορφές από τον άνθρωπο ή για την πραγματοποίηση οποιουδήποτε άλλου είδους μετατροπής δεδομένων σε ανερχόμενα και κατερχόμενα μηνύματα. Το The Things Stack υποστηρίζει την ανάπτυξη τριών τύπων Payload Formatters: JavaScript, CayenneLPP και μορφοποιητές δεδομένων αποθήκευσης [68].

❖ Storage Integration

Η ενσωμάτωση αποθήκευσης επιτρέπει την αποθήκευση των λαμβανόμενων ανοδικών μηνυμάτων σε μια μόνιμη βάση δεδομένων και την ανάκτησή τους σε μεταγενέστερο χρόνο. Η ενσωμάτωση αποθήκευσης υλοποιείται ως πακέτο εφαρμογών και μπορεί να ενεργοποιηθεί ανά εφαρμογή ή τελική συσκευή [69].

❖ Webhooks

Η λειτουργία των Webhooks επιτρέπει στο The Things Stack να αποστέλλει μηνύματα σχετικά με την εφαρμογή σε συγκεκριμένα τερματικά σημεία HTTP(S). Τα Webhooks χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία integration μεταξύ του The Things Stack και οποιασδήποτε third party υπηρεσίας. Για παράδειγμα, το The Things Stack χαρακτηρίζεται ικανό να αποστέλλει

ένα webhook κάθε φορά που λαμβάνεται ένα μήνυμα ανοδικής ζεύξης, το οποίο στη συνέχεια απεικονίζεται σε ένα εξωτερικό ταμπλό. Ο χρήστης μπορεί να ανατρέξει στην ενότητα των Προτύπων Webhook για third party υπηρεσίες με τις οποίες συνεργάζεται το The Things Stack. Η συγκεκριμένη ενσωμάτωση αξιοποιώντας ως third party εφαρμογή το TAGO IO χρησιμοποιήθηκε στην εργασία μας [70].

5.2 Διαδικασία Πειράματος

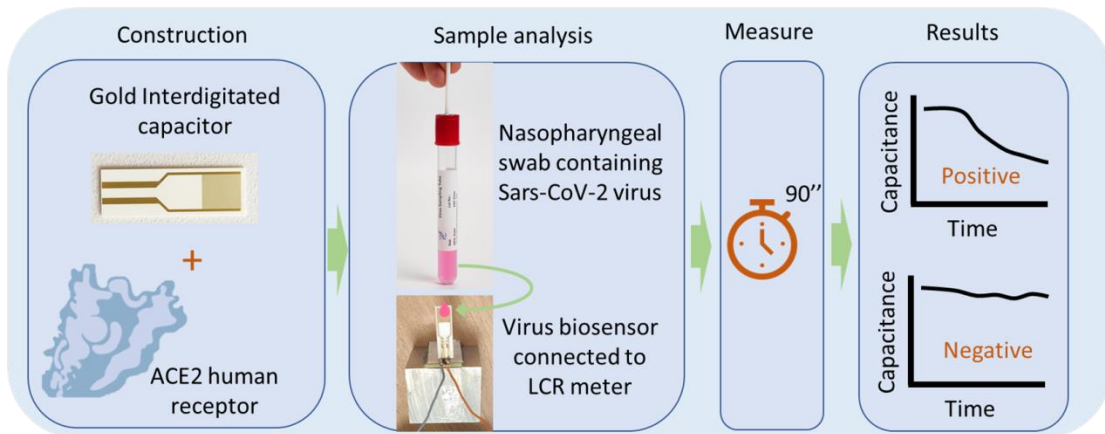
Στην συγκεκριμένη διπλωματική εργασία αξιοποιήθηκαν ο βιοαισθητήρας ανίχνευσης κορονοϊού και το πρωτότυπο κύκλωμα ανάγνωσής του, που αναπτύχθηκαν στο εργαστήριο ηλεκτρονικών αισθητηρίων.

5.2.1 Ανάλυση λειτουργίας του βιοαισθητήρα και του κυκλώματος ανάγνωσής του

Η λειτουργία του βιοαισθητήρα, που απεικονίζεται στο Σχήμα 5.32, είναι η εξής:

Αρχικά, η πρωτεΐνη-υποδοχέας ACE-2 ακινητοποιείται στην επιφάνεια χρυσών ενδοδιαπλεκόμενων ηλεκτροδίων. Στην συνέχεια τοποθετείται βιολογικό δείγμα (ρινοφαρυγγικό ή σάλιο) πάνω στο στρώμα του ACE-2. Αν σε αυτό το δείγμα υπάρχουν σωματίδια του ιού, ή και μόνο η πρωτεΐνη S, τα σωματίδια δεσμεύονται από το ACE-2 επιφέροντας μια αλλαγή στις διηλεκτρικές ιδιότητες του υλικού ή στο πάχος του διηλεκτρικού στρώματος. Αυτή η αλλαγή καταγράφεται ως αλλαγή στην αντίσταση και την χωρητικότητα μεταξύ των ηλεκτροδίων του πυκνωτή. Η παρακολούθηση της αλλαγής της χωρητικότητας πραγματοποιείται με την χρήση πρωτότυπου ηλεκτρονικού κυκλώματος ανάγνωσης που αναπτύχθηκε στο εργαστήριο.

Το διάστημα μέτρησης με τον βιοαισθητήρα είναι 1 λεπτό. Σε αυτό το διάστημα παρατηρήθηκαν 3 ενδεχόμενα: Για δείγματα που δεν περιείχαν τον ιό η αλλαγή της χωρητικότητας ήταν μικρότερη του 1%. Για δείγματα που περιείχαν μικρό ιικό φορτίο ($<10^3$ virus copy numbers/ μL) η αλλαγή στην χωρητικότητα ήταν μεταξύ 1 και 2%. Ενώ για δείγματα με ιικό φορτίο $>10^3$ virus copy numbers/ μL η αλλαγή στην χωρητικότητα ήταν μεγαλύτερη του 2%.



Σχήμα 5.32: Σχηματική αναπαράσταση της μεθόδου ανίχνευσης [37].

5.2.2 Διαδικασία λήψης, επεξεργασίας και αποστολής δεδομένων μέσω Python

Αρχικά, όπως επισημάνθηκε και στην προηγούμενη ενότητα, οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με το κύκλωμα ανάγνωσης που κατασκευάστηκε στο εργαστήριο Ηλεκτρονικών Αισθητηρίων. Στην συνέχεια, το κύκλωμα προχώρησε σε καταγραφή των δεδομένων σε έναν φορητό υπολογιστή μέσω USART επικοινωνίας, χρησιμοποιώντας έναν USB to TTL μετατροπέα, ο οποίος ονομάζεται Prolific PL2303. Τα δεδομένα χωρητικότητας που μεταδίδονται στον ηλεκτρονικό υπολογιστή μέσω του σειριακού διαύλου, αποθηκεύονται, επεξεργάζονται και αποστέλλονται επίσης μέσω σειριακής επικοινωνίας στον μικροελεγκτή LoRa32u4Π με την αξιοποίηση της γλώσσας προγραμματισμού Python. Συνεπώς, στην εργασία μας, το πρωτότυπο κύκλωμα ανάγνωσης (LCR μετρητή), συνδέθηκε στην θύρα COM7 του φορητού μας υπολογιστή με την συνδρομή του ελεγκτή γέφυρας Prolific PL2303 (Σχήμα 5.33). Παράλληλα, προχωρήσαμε στην σύνδεση του μικροελεγκτή LoRa32u4Π στην θύρα COM8 του υπολογιστή μας.



Σχήμα 5.33: Το πρωτότυπο κύκλωμα ανάγνωσης συνδέεται μέσω του PL2303 USB-TTL στη θύρα COM7 του υπολογιστή.

Ακολούθως, περιγράφεται η διαδικασία λήψης και επεξεργασίας των δεδομένων μέσω του κώδικα που συντάχθηκε σε γλώσσα Python. Αρχικά, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις διάρκειας 60 δευτερολέπτων με ρυθμό μίας μέτρησης ανά δευτερόλεπτο, προκειμένου να καθοριστεί εάν το δείγμα που ανιχνεύεται από τον αισθητήρα είναι θετικό ή αρνητικό [38]. Συνεπώς, το σύνολο των μετρήσεων χωρητικότητας ανέρχεται στις 60. Στηριζόμενοι στη λογική αυτή, αξιοποιώντας τη βιβλιοθήκη σειριακής επικοινωνίας pySerial της Python, καταχωρήθηκαν οι πρώτες 60 τιμές χωρητικότητας, που μετρούνται μετά την εφαρμογή του προς εξέταση δείγματος στον βιοαισθητήρα. Τα δεδομένα χωρητικότητας που λαμβάνονται σειριακά, εισάγονται σε μια λίστα προκειμένου να αξιολογηθεί η συμπεριφορά τους. Εφόσον, η απόκριση των τιμών χωρητικότητας είναι φθίνουσα, ενώ παράλληλα η συνολική μεταβολή της υπερβαίνει το 2% το τεστ καταγράφεται ως θετικό και το αποτέλεσμα καταχωρείται σε μία μεταβλητή *result*, η οποία ορίστηκε στην αρχή του κώδικα, ως P(Positive). Διαφορετικά, εάν τα δεδομένα χωρητικότητας δεν μειώνονται ή η συνολική μεταβολή της χωρητικότητας υπολογίζεται κάτω από το 2%, το τεστ χαρακτηρίζεται ως αρνητικό και το αποτέλεσμα καταχωρείται στη μεταβλητή *result* ως N(Negative). Παρακάτω, παρατίθενται ο κώδικας που συγγράφηκε σε γλώσσα Python στον επεξεργαστή πηγαίου κώδικα VSCode.

```
from pickletools import string1
import time
```

```

from numpy import append
import serial
import struct
result='N'
i = 0
cs=[]
stmdata = serial.Serial(
    port='COM7',
    baudrate=115200,
    parity=serial.PARITY_EVEN,
    stopbits=serial.STOPBITS_ONE,
    bytesize=serial.SEVENBITS,
    timeout=0)
time.sleep(1)
while i < 60:
    while (stmdata.inWaiting()==0):
        pass
    dataPacket=stmdata.readline()
    dataPacket=dataPacket.decode('utf-8')
    time.sleep(2)
    dataPacket=dataPacket.strip('\x00\r\n')
    dataPacket=dataPacket.split(',')
    time.sleep(2)
    cs.append(float(dataPacket[6]))
    i=i+1
for y in range (10, len(cs), 10) :
    if (cs[y-1]<cs[y-10]) and (cs[59]< (cs[0] * 0.98)) :
        result='P'
    else :
        result='N'
        break;
print(cs)
print(result)

```

```

result=str(ord(result))
arduino = serial.Serial(port='COM8', baudrate=9600)
AMKA=input('Please input AMKA of patient date month year national register
number code number ')
AMKA_RESULT=AMKA+' '+result+'\n'
arduino.write(AMKA_RESULT.encode())

```

Για την σειριακή επικοινωνία με τις δύο θύρες του υπολογιστή χρησιμοποιήθηκε η βιβλιοθήκη `pySerial`, η εγκατάσταση της οποίας πραγματοποιήθηκε μέσω PyPI με την εκτέλεση της εντολής `pip install pyserial`. Όπως εύκολα διαπιστώνεται, στην αρχή του κώδικα μας, εισάγεται η βιβλιοθήκη `pySerial` με την εντολή `import serial`, προκειμένου να χρησιμοποιηθεί από την Python. Το άνοιγμα της σειριακής θύρας στην οποία συνδέεται το κύκλωμα ανάγνωσης και η έναρξη διέλευσης δεδομένων χωρητικότητας επιτυγχάνεται με το κάλεσμα της μεθόδου δόμησης (constructor) της έτοιμης κλάσης `Serial`. Στο αντικείμενο που δημιουργείται αποδίδεται ο χαρακτηρισμός `stmdata`, εξαιτίας του ενσωματωμένου μικροελεγκτή STM32 bluepill που αποτελεί βασικό στοιχείο του κυκλώματος ανάγνωσης. Το όρισμα `Port` αναφέρεται στην θύρα USB με την οποία επικοινωνούν οι δύο συσκευές και στην συγκεκριμένη περίπτωση αποτελεί την θύρα `COM7` του υπολογιστή μας. Η παράμετρος `baudrate` ορίζει τον ρυθμό δεδομένων που μεταδίδονται μέσω της σειριακής επικοινωνίας σε bits ανά δευτερόλεπτο και ρυθμίζεται στα 115200 b/s τόσο στον υπολογιστή όσο και στην πλακέτα. Η παράμετρος `bytesize` ορίζεται στα 7bits, καθώς τέτοιο είναι το μέγεθος των δεδομένων που λαμβάνονται σειριακά από το κύκλωμα ανάγνωσης. Μετά την δημιουργία του object `stmdata`, ξεκινά η καταχώρηση των 60 τιμών χωρητικότητας, που λαμβάνονται από το κύκλωμα ανάγνωσης, έπειτα από την χορήγηση του δείγματος στον βιοαισθητήρα. Για τον σκοπό αυτό, στην αρχή του κώδικα, ορίζεται και αρχικοποιείται ένας μετρητής $i(i=0)$ και μία λίστα στην οποία θα τοποθετηθούν τα δεδομένα. Στην συνέχεια, στη πρώτη δομή βρόγχου `while` ρυθμίζεται το μέγεθος της λίστας, έτσι ώστε να συμπεριληφθούν σ' αυτή μόνο οι 60 πρώτες μετρήσεις, ενώ στη δεύτερη αξιοποιείται η μέθοδος `in.waiting()` της `Serial`. Η συγκεκριμένη μέθοδος επιστρέφει τον αριθμό των bytes που βρίσκονται στον buffer λήψης. Με τη συνθήκη ελέγχου του 2^{ου} `while` του κώδικά μας εξετάζεται εάν υπάρχουν δεδομένα στο σειριακό δίαυλο. Εφόσον, δεν υφίστανται δεδομένα χωρητικότητας στην σειριακή θύρα, εκτελείται η εντολή `pass`, η οποία επιτρέπει κανονικά την συνέχεια λειτουργίας του κώδικα,

μ' αποτέλεσμα την επανάληψη ελέγχου της συνθήκης του 2^{ου} while μέχρι να εμφανιστούν δεδομένα στον σειριακό buffer.

Στο διάβασμα των τιμών που μεταδόθηκαν σειριακά, αξιοποιήθηκε μια ακόμα μέθοδος της κλάσης Serial, η *serial.readline()*. Η συγκεκριμένη μέθοδος διαβάζει γραμμές που περιέχουν χαρακτήρα αλλαγής γραμμής και γενικά EOL χαρακτήρες, αποτελώντας μία ανάπτυξη της *serial.read()*, η οποία διαβάζει μόνο 1 byte. Επιπλέον, χρειάζεται να προσδιοριστεί ένα χρονικό όριο(timeout) κατά το άνοιγμα της σειριακής θύρας, διαφορετικά ενδέχεται να μπλοκάρει για πάντα, εφόσον δεν ληφθεί ο χαρακτήρας νέας γραμμής('\n'). Εάν το '\n' λείπει από την τιμή επιστροφής, επιστρέφεται στο timeout. Αφού, διαβάζονται τα δεδομένα του κυκλώματος ανάγνωσης ανά γραμμή και καταχωρούνται στη μεταβλητή *dataPacket* κρίνεται απαραίτητο να τροποποιηθούν κατάλληλα ώστε να ενταχθούν στη λίστα *Cs*. Αρχικά, οι τιμές βρίσκονται σε μορφή UTF-8 και για να αποκωδικοποιηθούν εκμεταλλευόμαστε την συνάρτηση *decode()* της Python, η οποία ειδικεύεται στην μορφοποίηση αλφαριθμητικών δεδομένων(strings). Οι τιμές που λαμβάνονται ενοποιημένες από το κύκλωμα σε μία γραμμή ως ένα ενιαίο string για κάθε μέτρηση, περιλαμβάνουν το *signal_pp*, το *div_pp*, το *phase_diff*(διαφορά φάσης), το *reZ*(πραγματικό μέρος σύνθετης αντίστασης), το *imZ*(φανταστικό μέρος σύνθετης αντίστασης), την *Rs*(αντίσταση σειράς), την *Cs*(χωρητικότητα σειράς), την *Rp*(παράλληλη αντίσταση) και την *Cp*(χωρητικότητα παραλληλίας), μ' αυτή τη συγκεκριμένη σειρά. Τα προαναφερθέντα δεδομένα αποτελούν ένα string και διαχωρίζονται μεταξύ τους μονάχα με ένα κόμμα(.). Συνεπώς, χρησιμοποιώντας τη συνάρτηση *split(' , ',)*, μετατρέπουμε το *dataPacket* από string, σε λίστα με αλφαριθμητικά δεδομένα, τα στοιχεία της οποίας αποτελούν οι παραπάνω τιμές κάθε μέτρησης. Έπειτα, τα δεδομένα κάθε μέτρησης, αφού πρώτα τροποποιηθούν από συμβολοσειρές(strings) σε *float* αριθμούς, εντάσσονται στη λίστα *Cs* με τη χρήση της εντολής *append()*. Τέλος, αξίζει να επισημανθεί, πως τα δεδομένα που τοποθετούνται στην τελική λίστα είναι μονάχα οι τιμές της χωρητικότητας σειράς *Cs*, που απαιτούνται προκειμένου να καθοριστεί το αποτέλεσμα της ανίχνευσης του COVID-19 και για το λόγο αυτό χρειαζόμαστε μόνο το στοιχείο *dataPacket[6]* από κάθε μέτρηση.

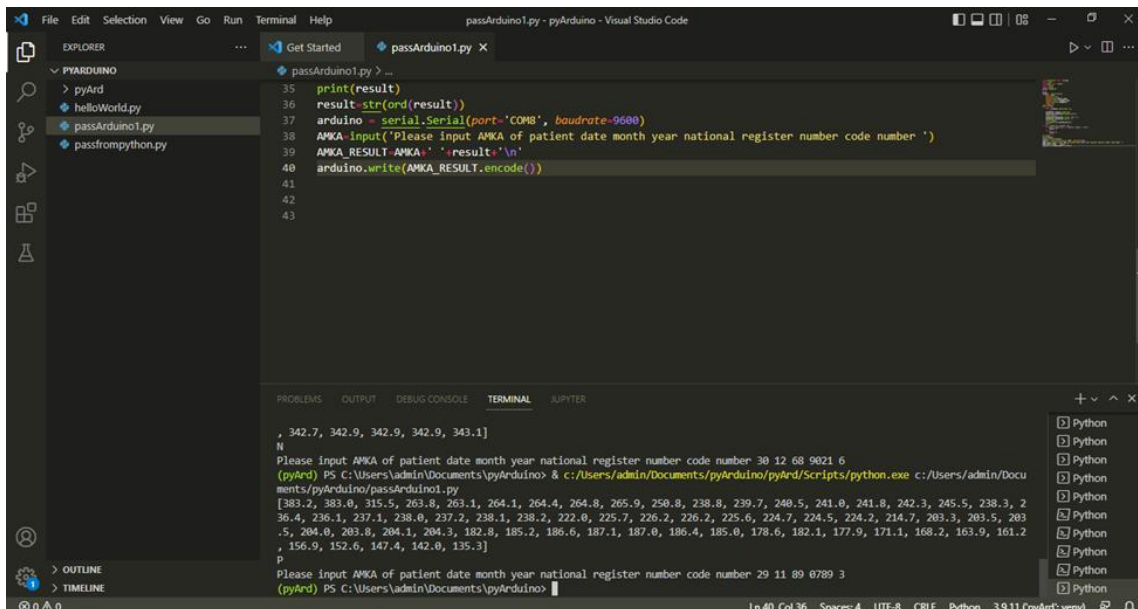
Για την αξιολόγηση του δείγματος, συντάχθηκε ένας κώδικας ελέγχου χρησιμοποιώντας εντολές συνθήκης (*if-else*). Όπως επισημάνθηκε στην αρχή της ενότητας, οι δύο προϋποθέσεις που οφείλουν να τηρούνται προκειμένου το υπό εξέταση δείγμα να θεωρηθεί θετικό αποτελούν:

(i) η συνάρτηση της απόκρισης χωρητικότητας σειράς Cs να είναι φθίνουσα και (ii) η συνολική μείωση των τιμών χωρητικότητας που καταχωρούνται στη λίστα Cs να υπερβαίνει το 2%. Σε οποιαδήποτε άλλη συνθήκη το δείγμα χαρακτηρίζεται ως αρνητικό. Εφόσον, το δείγμα θεωρηθεί θετικό στη μεταβλητή result αποθηκεύεται ο χαρακτήρας P, ενώ εφόσον το δείγμα χαρακτηριστεί αρνητικό στο result κατοχυρώνεται ο χαρακτήρας N.

Μετά τον καθορισμό του αποτελέσματος και την καταχώρηση του στην μεταβλητή *result* ο κώδικας εκτυπώνει την λίστα Cs και τη μεταβλητή *result* για επαληθευτικούς σκοπούς(Σχήμα 5.34). Παράλληλα, προκειμένου να επιτευχθεί η μετάδοση του αποτελέσματος ανίχνευσης στον μικροελεγκτή LoRa32u4Π, που βρίσκεται συνδεδεμένος στη θύρα COM8 του υπολογιστή μας, κρίνεται απαραίτητη η δημιουργία ενός νέου αντικειμένου της κλάσης Serial. Συνεπώς, καλείται η μέθοδος δόμησης της pySerial, για το άνοιγμα της θύρας COM8 και την έναρξη διέλευσης δεδομένων από τον υπολογιστή στον μικροελεγκτή LoRa, ενώ το διαμορφωμένο αντικείμενο ονομάζεται *arduino*. Τόσο στον υπολογιστή όσο και στην πλακέτα του μικροελεγκτή μας το baudrate ορίζεται στα 9600 b/s. Μαζί με το αποτέλεσμα των μετρήσεων επιλέχθηκε να στέλνεται από τον υπολογιστή και ένα στοιχείο ταυτοπροσωπίας, το οποίο θα συμπληρώνει ο ίδιος ο χρήστης. Το στοιχείο αυτό είναι ο Α.Μ.Κ.Α του ασθενούς. Οφείλει να υπογραμμιστεί ότι ο Α.Μ.Κ.Α, όπως αναφέρεται στην επίσημη ιστοσελίδα της Γενικής Γραμματείας Κοινωνικών Ασφαλίσεων, αποτελεί έναν 11ψήφιο αριθμό, ο οποίος δημιουργείται από τρία τμήματα, από τον συνδυασμό των οποίων προκύπτει και η μοναδικότητά του: (α) το πρώτο τμήμα είναι εξαψήφιο και δηλώνει την ημερομηνία γεννήσεως (ημέρα/μήνας/έτος) του συγκεκριμένου υπόχρεου, (β) το δεύτερο τμήμα είναι τετραψήφιο και δηλώνει τον αύξοντα αριθμό καταχώρισεως στο οικείο Εθνικό Μητρώο και (γ) το τρίτο τμήμα είναι μονοψήφιο και αποτελεί χαρακτήρα ελέγχου [71]. Ωστόσο, η διαχείριση και αποθήκευση ενός 11ψήφιου αριθμού από τον μικροελεγκτή LoRa32u4Π ελαχιστοποιεί τη διαθέσιμη μνήμη του, η οποία χαρακτηρίζεται έτσι και αλλιώς περιορισμένη. Παράλληλα, η μετάδοση ενός 11ψήφιου αριθμού αυξάνει το ωφέλιμο φορτίο(payload) που θα μεταδοθεί αργότερα στο The Things Stack Community Edition με αποτέλεσμα την αναγκαστική καθυστέρηση του χρόνου αποστολής του επόμενου μηνύματος στο δίκτυο, προκειμένου να τηρηθεί η πολιτική δίκαιης χρήσης. Για να αποφευχθούν τα παραπάνω, αποφασίστηκε ο χρήστης να δίνει το Α.Μ.Κ.Α, χωρίζοντας το σε πέντε βασικούς αριθμούς, οι οποίοι θα διακρίνονται με κενό. Δηλαδή, η δομή του συμπληρωμένου Α.Μ.Κ.Α θα ορίζεται ως εξής:

Ημέρα Γέννησης-κενό-Μήνας Γέννησης-κενό-Έτος Γέννησης-κενό-Αριθμός Εθνικού Μητρώου-κενό-Χαρακτήρας Ελέγχου-enter('\n' χαρακτήρας αλλαγής γραμμής).

Για την εγγραφή των δεδομένων στη σειριακή θύρα εφαρμόστηκε η μέθοδος `write()`. Τα δεδομένα για να αξιοποιηθούν από την συγκεκριμένη μέθοδο οφείλουν να βρίσκονται σε byte μορφή. Επομένως, μέσω της εντολής `encode()`, τα προς μετάδοση δεδομένα τροποποιήθηκαν και μετατράπηκαν από συμβολοσειρές σε bytes.

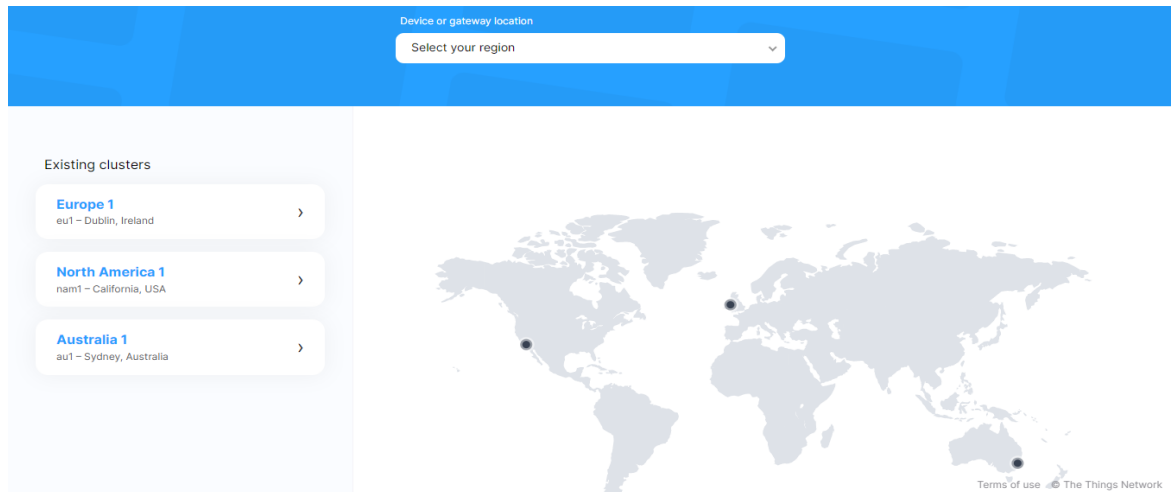


Σχήμα 5.34: Το περιβάλλον του VSCode κατά την έξοδο των τιμών χωρητικότητας Cs και του θετικού στην περίπτωση αυτή αποτελέσματος, καθώς και της εισόδου του A.M.K.A του ασθενούς.

5.2.3 Δημιουργία εφαρμογής στο The Things Stack

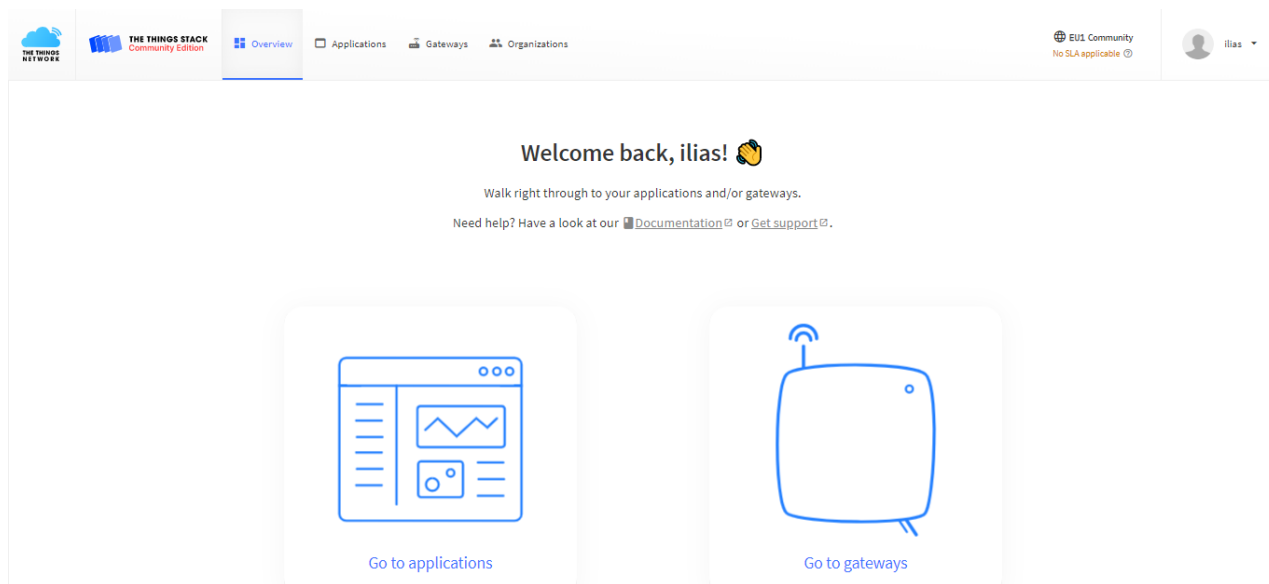
Η πλατφόρμα που αξιοποιήθηκε στην εργασία μας, όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενες ενότητες, είναι το The Things Stack Community Edition, το οποίο διαχειρίζεται το The Things Network. Προκειμένου να χρησιμοποιηθεί η πλατφόρμα του δωρεάν δημοσίου δικτύου LoRaWAN απαιτείται η δημιουργία λογαριασμού στο The Things Stack. Κατά την εγγραφή μας στο The Things Stack συμπληρώνουμε ένα email και έναν κωδικό πρόσβασης, ενώ αποκτάμε ένα Things ID. Για την καταχώρηση των τελικών συσκευών, των εφαρμογών και των πυλών χρησιμοποιήθηκε η Console, η οποία αποτελεί διαδικτυακή εφαρμογή του The Things Stack για το LoRaWAN. Όπως, έχει επισημανθεί, το The Thing Stack Community Edition αποτελεί

εγκατάσταση πολλαπλών συμπλεγμάτων(clusters). Κάθε cluster διαθέτει ένα Console όπου επιτυγχάνεται η διαχείριση των gateways και των τελικών συσκευών του συγκεκριμένου συμπλέγματος. Συνεπώς, κατά την σύνδεση στο λογαριασμό μας, προκειμένου να κατευθυνθούμε στην εφαρμογή Console, χρειάζεται να επιλεγεί το επιθυμητό cluster(Σχήμα 5.35). Οι διαθέσιμες επιλογές περιλαμβάνουν τα clusters Europe 1, North America 1 και Australia 1. Η συσκευή και η πύλη μας βρίσκεται στην Ευρώπη, επομένως προφανώς επιλέγεται το Europe 1(eu1) cluster.



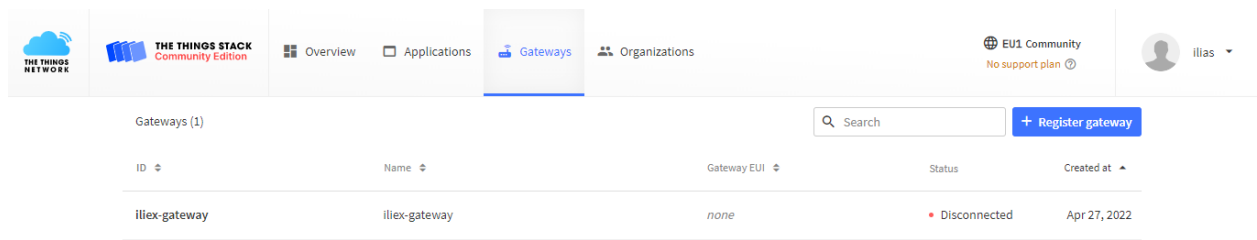
Σχήμα 5.35: Επιλογή Console cluster.

Μετά την επιλογή του cluster eu1, ο χρήστης κατευθύνεται στην κεντρική σελίδα του Console του The Things Stack Community Edition, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 5.36.



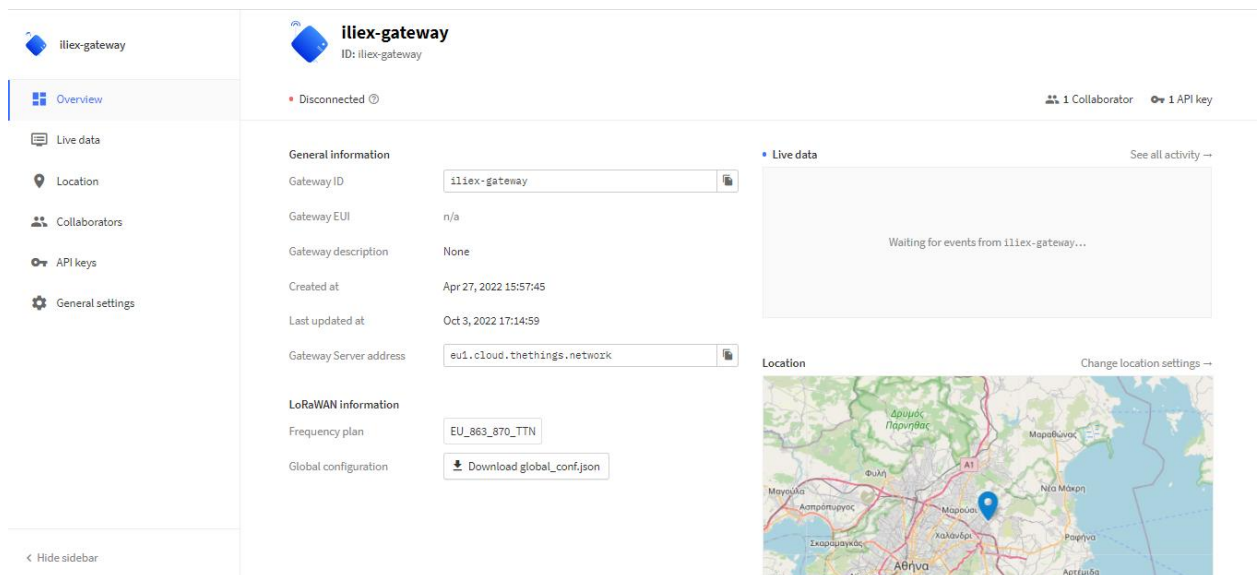
Σχήμα 5.36: Κεντρική Σελίδα του Console του Things Stack Community Edition.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκε η πύλη The Things Gateway με συχνότητα λειτουργίας 868 MHz ή όπως αλλιώς χαρακτηρίζεται συντομογραφικά TTN-GW-868. Η διαδικασία ένταξης του gateway στην εφαρμογή Console, ήταν εξαιρετικά απλή καθώς ακολουθήθηκαν με ακρίβεια τα βήματα που επισημαίνονται στην επίσημη ιστοσελίδα του The Things Stack. Η συγκεκριμένη πύλη δεν διαθέτει Gateway EUI, οπότε κατά τη διαδικασία εγγραφής της πατήθηκε η επιλογή **Continue without EUI**. Παράλληλα, στην πύλη αποδόθηκε το *Gateway ID*: *iliex-gateway*, ενώ εφαρμόστηκε το πλάνο συχνοτήτων Europe 863-870 MHz (SF9 for RX2). Έπειτα, αξιοποιώντας τις οδηγίες του documentation για το The Things Gateway [48], επιτυγχάνεται η ενεργοποίηση της πύλης, καθώς και η σύνδεση της στο WiFi. Με την επιλογή *Go to Gateways* ή *Gateways*, η οποία εμφανίζεται στην πάνω μπάρα επιλογών του Console, ο χρήστης μπορεί να εντοπίσει τις καταχωρημένες πύλες του, αλλά και να καταχωρήσει κάποια νέα με την επιλογή *Register Gateway*. Στο Σχήμα 5.37 απεικονίζεται το gateway που χρησιμοποιήθηκε καθώς και η τρέχουσα κατάσταση του:



Σχήμα 5.37: Το gateway της εργασίας μας.

Στο Σχήμα 5.38 αναφέρονται τα χαρακτηριστικά του gateway καθώς και η τοποθεσία του, η οποία τοποθετήθηκε από εμάς:



Σχήμα 5.38: Τα χαρακτηριστικά της καταχωρημένης πύλης μας.

Αξιοποιώντας την επιλογή *Go to Applications* ή *Applications*, η οποία βρίσκεται στην επάνω γραμμή επιλογών του Console, ο χρήστης κατευθύνεται στη σελίδα εύρεσης και επεξεργασίας των εφαρμογών του The Things Stack Community Edition. Σ' αυτό το σημείο ο χρήστης μπορεί να βλέπει και να διαχειρίζεται τις ήδη καταχωρημένες εφαρμογές του, ενώ παράλληλα του δίνεται η δυνατότητα να διαμορφώσει και νέες με την επιλογή **+Add Application**. Κάτι τέτοιο επιτυγχάνεται συμπληρώνοντας σε μία φόρμα το *Application ID* και ορισμένα άλλα προαιρετικά πεδία προκειμένου να καταχωρηθεί η νέα εφαρμογή. Στο Σχήμα 5.39 παρατίθενται οι δύο εφαρμογές που σχεδιάστηκαν στην παρούσα εργασία:

ID	Name	End devices	Created at
lora32-sensor1		1	Jul 3, 2022
lora32u4-start-app		1	May 6, 2022

Σχήμα 5.39: Οι εφαρμογές της εργασίας μας.

Η εφαρμογή με *Application ID* *lora32-sensor1* αποτελεί το τελικό application, το οποίο χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα της εργασίας μας. Στο Σχήμα 5.40 φαίνεται η σελίδα επισκόπησης της εφαρμογής *lora32-sensor1*.

Applications > lora32-sensor1

lora32-sensor1
ID: lora32-sensor1

No recent activity

1 End device | 1 Collaborator | 1 API key

General information

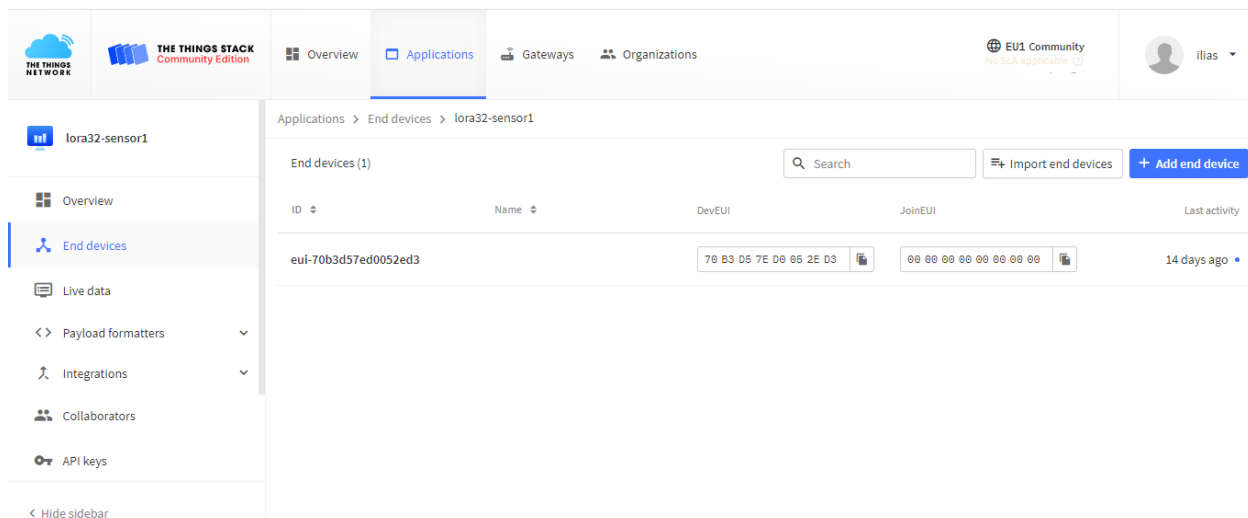
Application ID	lora32-sensor1
Created at	Jul 3, 2022 23:29:02
Last updated at	Jul 6, 2022 20:09:21

Live data See all activity

17:39:17 Console: Events cleared

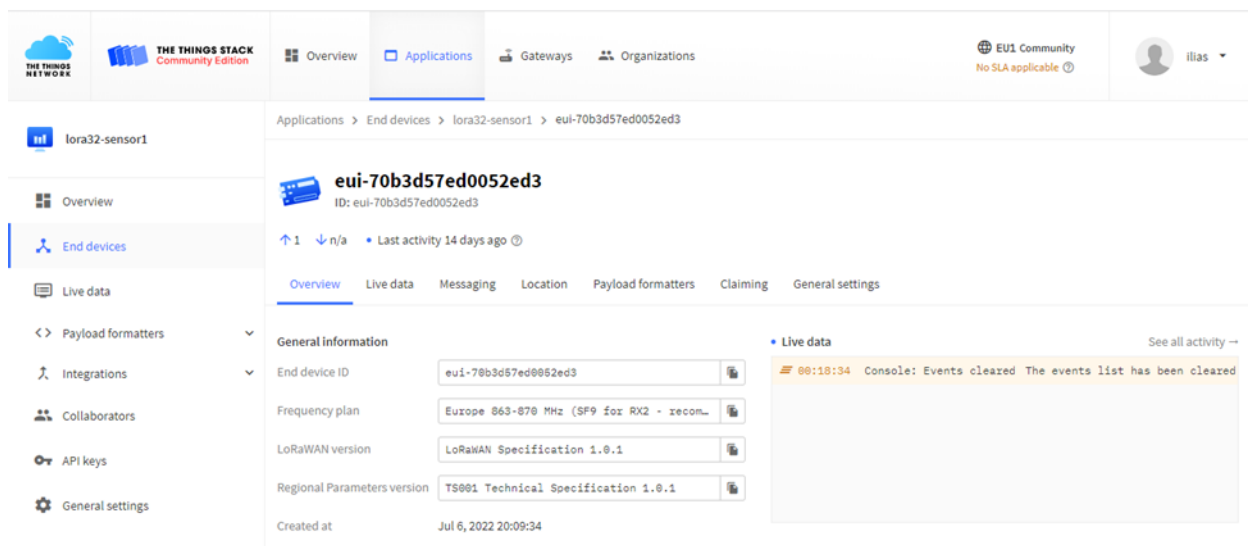
Σχήμα 5.40: Σελίδα επισκόπησης της εφαρμογής.

Για την ανάπτυξη της εφαρμογής απαιτήθηκε η σύνδεσή της με την τελική μας συσκευή, η οποία περιλαμβάνει τον μικροελεγκτή LoRa32u4Π v1.3. Η προσθήκη της τελικής συσκευής πραγματοποιήθηκε με την είσοδο στην καρτέλα *End devices*, που βρίσκεται στην αριστερή στήλη επιλογών της σελίδας επισκόπησης της εφαρμογής(Σχήμα 5.41). Έπειτα, χρησιμοποιήθηκε η επιλογή + **Add end device**, ενώ προτιμήθηκε η καταχώρηση της τελικής συσκευής να γίνει *Manually*.



Σχήμα 5.41: Η καταχωρημένη τελική συσκευή της εργασίας μας.

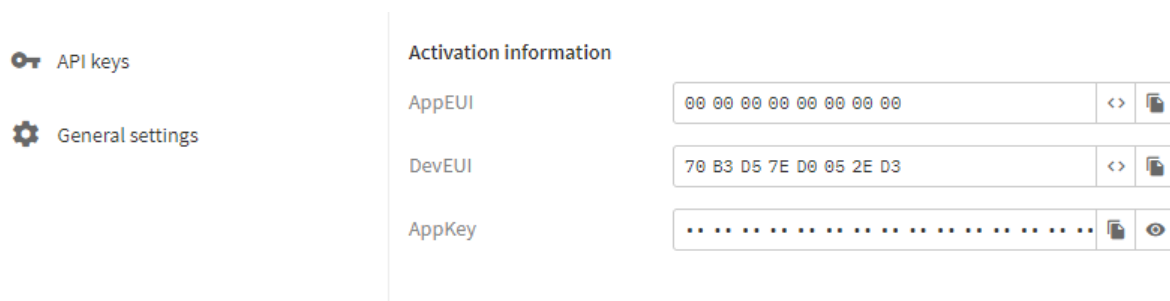
Στο πλάνο των συχνοτήτων συμπληρώθηκε το μοντέλο Europe 863-870 MHz (SF9 for RX2), ενώ στην έκδοση LoRaWAN επιλέχθηκε το LoRaWAN Specification 1.0.1. Επιπρόσθετα, στις περιφερειακές παραμέτρους τοποθετήθηκε αυτόματα η έκδοση TS001 Technical Specification 1.0.1. Οι συγκεκριμένες προδιαγραφές απεικονίζονται στο Σχήμα 5.42:



Σχήμα 5.42: Γενικές ρυθμίσεις του end device.

Ακόμα, στις προχωρημένες ρυθμίσεις επιλέγεται ως Activation Mode η ενεργοποίηση Over-the-Air-Activation(OTAA). Η OTAA αποτελεί έναν ασφαλή, κλιμακούμενο τρόπο για την ενεργοποίηση συσκευών, που λειτουργούν σύμφωνα με το πρωτόκολλο LoRaWAN. Η

συγκεκριμένη μέθοδος ενεργοποίησης υποστηρίζεται και προεπιλέγεται απ' όλες τις εμπορικά διαθέσιμες συσκευές του πρωτοκόλλου LoRaWAN. Η OTAA επιτυγχάνεται με την εισαγωγή των κλειδιών DevEUI, AppEUI και AppKey. Εφόσον, τα κλειδιά DevEUI και AppKey δεν παρέχονται από τον κατασκευαστή της συσκευής, δημιουργούνται αυτόματα την στιγμή της διαμόρφωσής της, χρησιμοποιώντας το κουμπί επιλογής *generate*. Επιπλέον, σε περίπτωση που δεν προσφέρεται ούτε το κλειδί AppEUI από τον κατασκευαστή, διαμορφώνεται και εκείνο αυτόματα χρησιμοποιώντας την επιλογή *Fill with zeros*(συμπλήρωσης με μηδενικά). Τέλος, η συσκευή μας υποστηρίζει χαρακτηριστικά κλάσης A, ενώ παράλληλα στο δίκτυο ακολουθούνται οι προεπιλεγμένες ρυθμίσεις MAC. Στο Σχήμα 5.43 απεικονίζονται τα διαμορφωμένα κλειδιά της συσκευής που δημιουργήθηκε:



Σχήμα 5.43: Τα κλειδιά AppEUI, DevEUI, AppKey για την ενεργοποίηση OTAA.

Τα κλειδιά ενεργοποίησης OTAA αξιοποιούνται στην ταυτοποίηση της τελικής συσκευής και χρησιμοποιούνται στον κώδικα που συντάχθηκε για τον προγραμματισμό της. Παράλληλα, οφείλει να επισημανθεί, ότι στον κώδικα το κλειδί DevEUI γράφεται σε little-endian format, ενώ το AppKey σε big-endian format. Οι όροι big-endian και little-endian περιγράφουν τη σειρά με την οποία μια ακολουθία byte αποθηκεύεται στη μνήμη του υπολογιστή. Η little-endian μορφή εκφράζει μια σειρά στην οποία το λιγότερο σημαντικό bit(lsb) αποθηκεύεται πρώτο. Η big-endian μορφή αποτελεί μια σειρά στην οποία το πιο σημαντικό bit(msb) αποθηκεύεται πρώτο. Παρακάτω απεικονίζεται το κομμάτι του κώδικα που γράφτηκε στο Arduino IDE και αφορά τα τρία κλειδιά:

```
static const u1_t PROGMEM APPEUI[8]={0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00};
void os_getArtEui (u1_t* buf) { memcpy_P(buf, APPEUI, 8);}
```

```

static const u1_t PROGMEM DEVEUI[8]= {0xD3, 0x2E, 0x05, 0xD0, 0x7E, 0xD5, 0xB3,
0x70};
void os_getDevEui (u1_t* buf) { memcpy_P(buf, DEVEUI, 8);}

static const u1_t PROGMEM APPKEY[16] = {0x33, 0xA4, 0x7E, 0xF8, 0x9E, 0xAD,
0x36, 0x84, 0xC7, 0xD8, 0xEE, 0x2D, 0x82, 0x26, 0x7A, 0x6A};
void os_getDevKey (u1_t* buf) { memcpy_P(buf, APPKEY, 16);}

```

5.2.4 Λήψη δεδομένων από τη συσκευή και αποστολή στο δίκτυο

Η αξιοποίηση του ενσωματωμένου chip LoRa του μικροελεγκτή μας επιτυγχάνεται με την εγκατάσταση της βιβλιοθήκης MCCI LoRaWAN LMIC στο περιβάλλον του Arduino IDE. Επιπλέον, απαραίτητη κρίνεται η μετάβαση στο αρχείο `lmic_project_config.h` της LMIC βιβλιοθήκης. Σε υπολογιστές που λειτουργούν με Windows, το προεπιλεγμένο όνομα του φακέλου είναι "Arduino" και βρίσκεται στο φάκελο Documents. Στο αρχείο αυτό ορίζονται οι βασικές ρυθμίσεις της πλακέτας μας. Για τη διαμόρφωση περιοχής της πλακέτας επιλέγεται η ρύθμιση ***#define CFG_eu868 1***, στην οποία δηλώνεται το πλαίσιο συχνοτήτων στο οποίο λειτουργεί η συσκευή. Παράλληλα, για τον πομποδέκτη της συσκευής χρησιμοποιείται η ρύθμιση ***#define CFG_sx1276_radio 1***. Στον κώδικα του Arduino η βιβλιοθήκη LMIC εντάσσεται μέσω της εντολής ***#include <lmic.h>***, ενώ για την αντιστοίχιση των pins της πλακέτας LoRa32u4II v1.3 χρησιμοποιείται το παρακάτω τμήμα κώδικα:

```

const lmic_pinmap lmic_pins = {
    .nss = 8,
    .rxtx = LMIC_UNUSED_PIN,
    .rst = 4,
    .dio = {7, 5, LMIC_UNUSED_PIN},
};

```

Η συνάρτηση `void onEvent()` περιγράφει όλες τις διαδικασίες που συμβαίνουν κατά την ενεργοποίηση OTAA και τα μηνύματα που λαμβάνονται ανάμεσα σε συσκευή και δίκτυο. Στη

συνάρτηση επισημαίνεται ο τρόπος αναγνώρισης της τελικής συσκευής, η μέθοδος αξιοποίησης των κλειδιών ταυτοποίησης του μικροελεγκτή καθώς και ο προγραμματισμός μετάδοσης των πακέτων δεδομένων που στέλνονται από το LoRa32U4II στο δίκτυο.

Η συνάρτηση `void setup()` αποτελεί μια απαραίτητη συνάρτηση για κάθε κώδικα γραμμένο στο περιβάλλον του Arduino IDE. Στη συνάρτηση αυτή διεκπεραιώνονται οι απαραίτητες αρχικοποιήσεις για την πλακέτα μας, επιβάλλεται η έναρξη της σειριακής επικοινωνίας με τη χρήση της συνάρτησης `Serial.begin(9600)` και ορίζονται τα θεμέλια για την επικοινωνία μέσω LoRa. Η `Serial.begin` καθορίζει το ρυθμό δεδομένων(`baudrate`) σειριακής μετάδοσης σε 9600 b/s, ώστε να ταυτίζεται με εκείνον που δόθηκε στον γραμμένο σε Python κώδικά μας. Ακόμα, ορίζονται ως ψηφιακές έξοδοι δύο θύρες του μικροελεγκτή στις οποίες συνδέονται, μέσω μίας πλακέτας breadboard, δύο led, χρώματος κόκκινου και πράσινου. Ο ορισμός αυτός εκτελείται με τη σύνταξη της συνάρτησης `pinMode()`. Παρακάτω, παρουσιάζεται το συγκεκριμένο τμήμα κώδικα:

```
void setup() {
  Serial.begin(9600);
  pinMode (LED_red, OUTPUT);
  pinMode (LED_green, OUTPUT);
  Serial.println(F("Starting"));

  #ifdef VCC_ENABLE
  pinMode(VCC_ENABLE, OUTPUT);
  digitalWrite(VCC_ENABLE, HIGH);
  delay(1000);
  #endif

  os_init();
  LMIC_reset();

  #define LMIC_CLOCK_ERROR_PERCENTAGE 3
  LMIC_setClockError(LMIC_CLOCK_ERROR_PERCENTAGE * (MAX_CLOCK_ERROR /
100.0));
```

```
do_send(&sendjob);
}
```

Η πλακέτα LoRa32u4Π λειτουργεί με συχνότητα 8MHz, η οποία είναι σχετικά αργή για τη βιβλιοθήκη LMIC. Συνεπώς, απαραίτητη χαρακτηρίζεται η χαλάρωση του χρονισμού και προσθήκη των παρακάτω γραμμών στον κώδικα:

```
#define LMIC_CLOCK_ERROR_PERCENTAGE 3
LMIC_setClockError(LMIC_CLOCK_ERROR_PERCENTAGE * (MAX_CLOCK_ERROR /
100.0));
```

Η συνάρτηση void loop() αποτελεί την 2^η βασική και απαραίτητη συνάρτηση που πρέπει να περιλαμβάνεται σε κάθε πρόγραμμα του Arduino IDE. Στη συνάρτηση χρησιμοποιείται η os_runloop_once(), η οποία με την σειρά της καλεί τον επεξεργαστή, LMIC runloop. Ο συγκεκριμένος βρόχος προκαλεί την εμφάνιση ραδιοφωνικών συμβάντων βασισμένων στα γεγονότα και τον χρόνο, όπως για παράδειγμα ανακλήσεις, οι οποίες συμβαίνουν τη χρονική στιγμή που ολοκληρώνεται η μετάδοση. Εξαιτίας του αυστηρού χρονισμού που διαθέτει το πρωτόκολλο LoRaWAN, δεν ενδείκνυται η προσθήκη επιπρόσθετου κώδικα στην συνάρτηση void loop(). Παρακάτω, παρατίθεται η συγκεκριμένη συνάρτηση του κώδικά μας:

```
void loop() {
  os_runloop_once();
}
```

Η λήψη του αποτελέσματος, το οποίο καθορίστηκε από τον κώδικα, ο οποίος συντάχθηκε σε Python, καθώς και του A.M.K.A που δόθηκε από τον χρήστη, ως στοιχείο αναγνώρισης, εκτελείται στη συνάρτηση void do_send(osjob_t* j) που παρουσιάζεται παρακάτω:

```
void do_send(osjob_t* j){
  if (LMIC.opmode & OP_TXRXPEND) {
    Serial.println(F("OP_TXRXPEND, not sending"));
  } else {
```

```

while (Serial.available()>=0){
}

    char apotelesma;
    byte day_of_birth;
    byte month_of_birth;
    byte year_of_month;
    int serial_number_Registry;
    byte code_number;
    day_of_birth=Serial.readStringUntil(' ').toInt();
    month_of_birth=Serial.readStringUntil(' ').toInt();
    year_of_month=Serial.readStringUntil(' ').toInt();
    serial_number_Registry=Serial.readStringUntil(' ').toInt();
    code_number=Serial.readStringUntil(' ').toInt();
    apotelesma=Serial.readStringUntil('\n').toInt();

    if ( apotelesma=='P'){
        digitalWrite (LED_green, LOW);
        digitalWrite (LED_red, HIGH);
    }

    if ( apotelesma=='N'){
        digitalWrite (LED_red, LOW);
        digitalWrite (LED_green, HIGH);
    }
}

```

```

byte payload[8];
payload[0] = byte(apotelesma);
payload[1] = byte(day_of_birth);
payload[2] = byte(month_of_birth);
payload[3] = byte(year_of_month);
payload[4] = highByte(serial_number_Registry);
payload[5] = lowByte(serial_number_Registry);
payload[6] = byte(code_number);

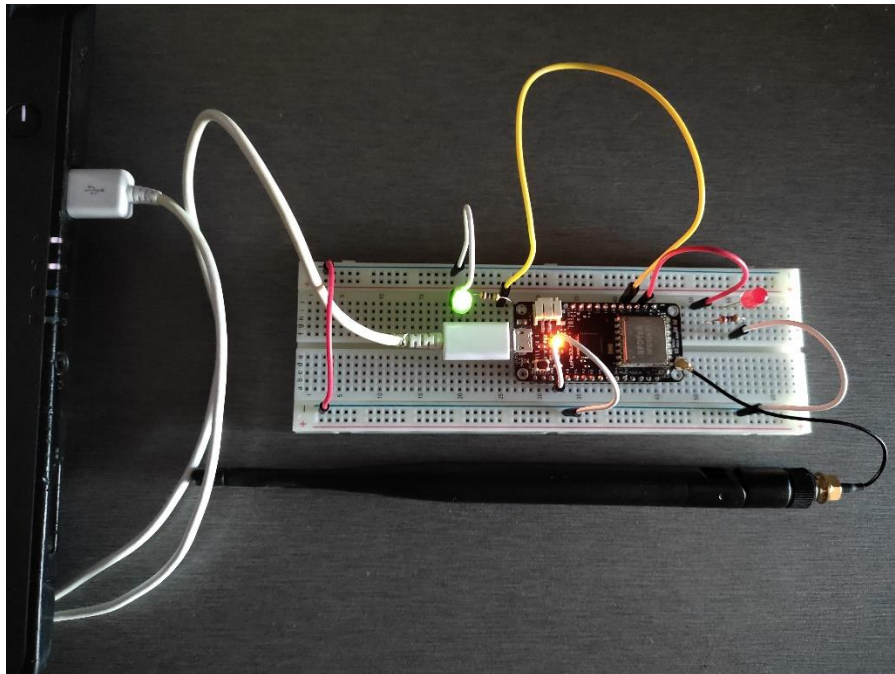
LMIC_setTxData2(1, payload, sizeof(payload)-1, 0);
Serial.println(F("Packet queued"));
}
}

```

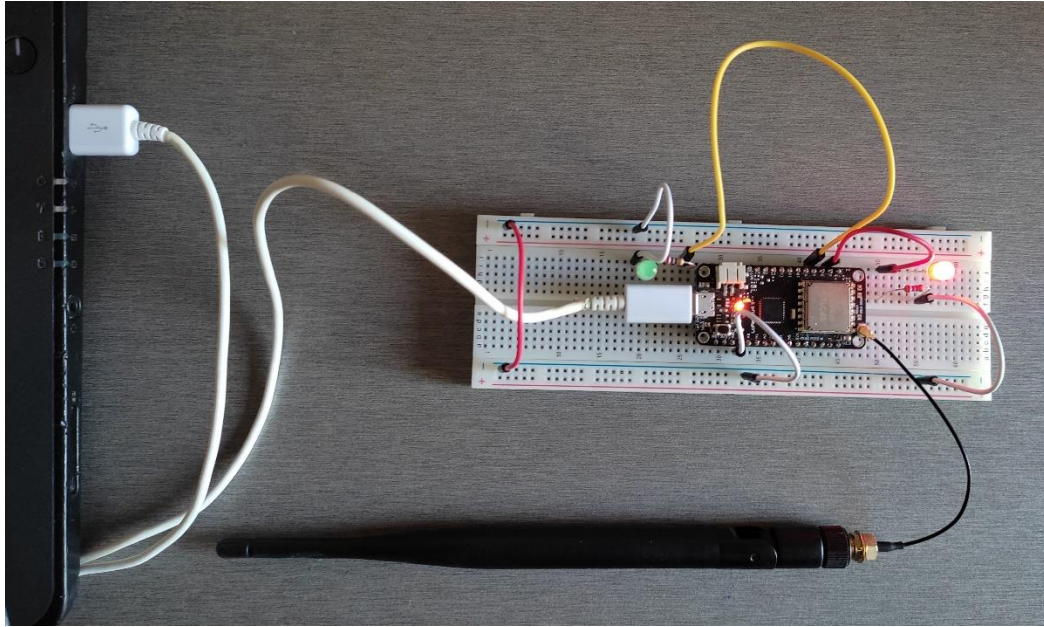
Τα δεδομένα που λαμβάνει ο μικροελεγκτής από την σειριακή θύρα COM8 αποτελούνται από το Α.Μ.Κ.Α του ασθενούς και το αποτέλεσμα της εξέτασης ανίχνευσης του βιοαισθητήρα. Ο 11ψήφιος αριθμός του Α.Μ.Κ.Α αποστέλλεται έχοντας διακριθεί σε πέντε αριθμούς: την ημέρα γεννήσεως, τον μήνα γεννήσεως, το έτος γεννήσεως, τον Αριθμό Εθνικού Μητρώου και το χαρακτήρα ελέγχου. Οι τρεις πρώτοι αριθμοί(ΗΓ/ΜΓ/ΕΓ) που μεταδίδονται αποτελούνται από δύο ψηφία ο καθένας, ενώ ο χαρακτήρας ελέγχου είναι μονοψήφιος αριθμός. Συνεπώς, για την αποθήκευση τους αξιοποιούνται μεταβλητές δεδομένων τύπου *byte*, καθώς όπως είναι γνωστό σ' ένα *byte* αποθηκεύεται ένας μη προσημασμένος αριθμός των 8 bit, από το 0 έως το 255. Ο κωδικός αριθμός του Εθνικού Μητρώου αποτελείται από τέσσερα ψηφία και καταχωρείται σε μια μεταβλητή τύπου *int*. Τέλος, το αποτέλεσμα τοποθετείται σε μια μεταβλητή τύπου *char* αφού χαρακτηρίζεται είτε ως 'N' σε περίπτωση που το δείγμα είναι αρνητικό είτε ως 'P' σε περίπτωση που το δείγμα είναι θετικό. Τα δεδομένα διαβάζονται με την εντολή *Serial.readStringUntil()*, η οποία λαμβάνει τιμές από την σειριακή θύρα COM8 στην οποία συνδέεται ο μικροελεγκτής, ως συμβολοσειρές(strings). Ως παράμετρος της συνάρτησης, χρησιμοποιείται ένας χαρακτήρας, στον οποίο η συνάρτηση ολοκληρώνει το "διάβασμά" της από το σειριακό διάυλο και επιστρέφει το

αλφαριθμητικό δεδομένο που σχηματίζεται μέχρι εκείνο το σημείο. Στην καταχώρηση των πέντε αριθμών του A.M.K.A αξιοποιείται ως *terminator* ο χαρακτήρας του κενού(' '), καθώς τα δεδομένα αποστάθηκαν από τον κώδικα της Python διαχωρισμένα με κενό. Με την τελευταία αποστολή δεδομένων, να αποτελεί εκείνη του αποτελέσματος, το τερματικό σύμβολο της *Serial.readStringUntil()* ορίζεται ο χαρακτήρας '\n'(χαρακτήρας αλλαγής γραμμής). Τέλος, οι τιμές μετατρέπονται από τύπου string σε τύπου int προκειμένου να αποθηκευτούν κατάλληλα στις μεταβλητές τους. Απαραίτητη για την σωστή καταχώρηση των δεδομένων καθίσταται η τοποθέτηση των κενών(' ') από τον χρήστη κατά την εισαγωγή του A.M.K.A στον κώδικα της Python.

Παράλληλα, προς επαλήθευση της ακρίβειας με την οποία μεταδίδονται οι τιμές, ορίζονται δύο pins της πλακέτας(3,6) ως ψηφιακές έξοδοι. Με τη χρήση ενός breadboard, συνδέθηκαν κατάλληλα δύο leds, το ένα κόκκινου και το άλλο πράσινου χρώματος, με τις ψηφιακές θύρες εξόδου της πλακέτας μας. Σε περίπτωση που στη μεταβλητή του αποτελέσματος, καταχωρήθηκε ο χαρακτήρας 'P', θα ανάψει το κόκκινο led(Σχήμα 5.45), ενώ εφόσον καταχωρήθηκε ο χαρακτήρας 'N' θα ανάψει το πράσινο led(Σχήμα 5.44).



Σχήμα 5.44: Σύνδεση του LoRa32u4Π με την COM8 του υπολογιστή μας και άναμμα του πράσινου led, καθώς το δείγμα που λαμβάνεται είναι αρνητικό.



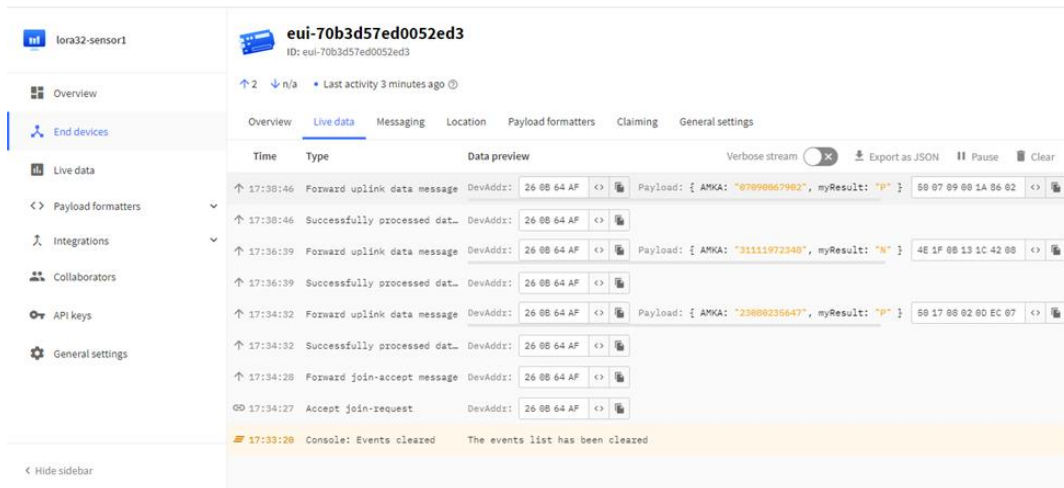
Σχήμα 5.45: Σύνδεση του LoRa32u4Π με την COM8 του υπολογιστή μας και άναμμα του κόκκινου led, καθώς το δείγμα που λαμβάνεται είναι θετικό.

Έπειτα, για την αποστολή των δεδομένων στο δίκτυο, ορίζεται στη συνάρτηση ο πίνακας `payload[8]`, τύπου `byte`, ο οποίος διαθέτει 8 στοιχεία, το καθένα απ' τα οποία έχει μήκος ένα `byte`. Αξίζει να επισημανθεί, πως εξαιτίας της μικρής χωρητικότητας μνήμης του μικροελεγκτή LoRa32u4Π, η ενσωμάτωση των πέντε στοιχείων του Α.Μ.Κ.Α σε μια λέξη δεν επιτεύχθηκε στον κώδικα του Arduino IDE. Παράλληλα, καταβλήθηκε μεγάλη προσπάθεια προκειμένου το μήκος του ωφέλιμου φορτίου να παραμείνει όσο το δυνατόν μικρότερο, εξυπηρετώντας ταυτόχρονα την κεντρική ιδέα της εφαρμογής, καθώς με τον τρόπο αυτό ο χρόνος επόμενης μετάδοσης δεδομένων (T_x), που επιτρέπεται από την πολιτική δίκαιης χρήσης του TTN, διατηρείται χαμηλός. Για τη φόρτωση της `serial_number_Registry` τύπου `int` στον πίνακα `payload` χρησιμοποιούνται οι συναρτήσεις `lowByte()` και `highByte()` στις οποίες καταχωρείται το μικρό και το μεγάλο `byte` αντίστοιχα του Αριθμού του Εθνικού Μητρώου, ο οποίος διαθέτει μέγεθος 16bits(2 `byte`). Τέλος, με την αξιοποίηση της συνάρτησης `LMIC_setTxData2()` ετοιμάζεται το `payload` για προώθηση στο δίκτυο του The Things Stack, στον επόμενο διαθέσιμο χρόνο. Παρακάτω, στο Σχήμα 5.46, φαίνεται η έξοδος του Serial Monitor του Arduino IDE, στην οποία καταγράφεται η ενεργοποίηση της τελικής συσκευής και η αποστολή των δεδομένων της.

```
COM8
Packet queued
1527498: EV_JOINING
1856786: EV_TXSTART
2179906: EV_JOINED
netid: 19
devaddr: 260B64AF
AppSKey: 36-5C-FE-BF-26-63-BD-26-8E-49-BF-5B-59-9B-2D-30
NwkSKey: 2-36-85-6B-7E-D6-C6-92-EE-6F-9E-1E-E5-97-60-1C
2181180: EV_TXSTART
2563255: EV_TXCOMPLETE (includes waiting for RX windows)
10126717: EV_TXSTART
Packet queued
10508799: EV_TXCOMPLETE (includes waiting for RX windows)
18072278: EV_TXSTART
Packet queued
18454358: EV_TXCOMPLETE (includes waiting for RX windows)
```

Σχήμα 5.46: Η έξοδος σειριακής επικοινωνίας της θύρας COM8 του υπολογιστή μας στο περιβάλλον του Arduino IDE κατά την αποστολή πακέτων στο The Things Stack.

Στο σχήμα 5.47 καταγράφεται η άφιξη των δεδομένων στο The Things Stack Community Edition. Οι απεσταλμένες τιμές απεικονίζονται στο 'Live data' τόσο του Application που έχει διαμορφωθεί, όσο και της τελικής συσκευής που συνδέθηκε σ' αυτό. Στο λαμβανόμενο μήνυμα καταγράφεται ο χρόνος λήψης του, η διεύθυνση DevAddr και το ωφέλιμο φορτίο του, τόσο στην αποκωδικοποιημένη μορφή, η οποία θα αναλυθεί παρακάτω, όσο και στην μορφή σε bytes με την οποία μεταδίδεται. Επιπλέον, με επιλογή στο κάθε μήνυμα ξεχωριστά, διαπιστώνονται και τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά του μηνύματος, όπως ο συντελεστής διασποράς(SF), ο ρυθμός δεδομένων(Data Rate), το SNR(Signal-to-Noise Ratio) κ.α.



Σχήμα 5.47: Τα καταγεγραμμένα δεδομένα στην εφαρμογή του Console του The Things Stack Community Edition.

5.2.5 Αποκωδικοποίηση δεδομένων και integration με το TagoIO

➤ Αποκωδικοποίηση δεδομένων με JavaScript Payload Formatter

Αρχικά, τα δεδομένα στο *Live Data* του The Things Stack Community Edition λαμβάνονται σε δεκαεξαδική μορφή. Όπως επισημάνθηκε νωρίτερα στην εργασία μας, η πλατφόρμα του The Things Stack διαθέτει μορφοποιητές ωφέλιμου φορτίου, οι οποίοι καθίστανται υπεύθυνοι για την επεξεργασία των δεδομένων που μεταδίδονται από και προς τις τελικές συσκευές. Η τροποποίηση αυτή θεωρείται απαραίτητη, για την μετατροπή των δυαδικών ωφέλιμων φορτίων σε μορφή αναγνώσιμη από τον άνθρωπο ή για την πραγματοποίηση οποιουδήποτε άλλου είδους επεξεργασίας δεδομένων σε ανοδικές και καθοδικές ζεύξεις. Έπειτα από την επιλογή του κατάλληλου application, στην αριστερή στήλη, με την επιλογή της καρτέλας *Payload Formatters*, επιτυγχάνεται η δυνατότητα αποκωδικοποίησης των uplink ή κωδικοποίησης των downlink μηνυμάτων της, με μορφοποιητές τύπου JavaScript, CayenneLPP και Repository. Στη διπλωματική εργασία κατά τη λήψη των uplink μηνυμάτων από το δίκτυο χρησιμοποιήθηκε αποκωδικοποιητής τύπου JavaScript, προκειμένου να επιτευχθεί η επιθυμητή μετατροπή των δεδομένων δεκαεξαδικής μορφής στις τιμές του A.M.K.A και του αποτελέσματος του βιοαισθητήρα. Ο κώδικας του αποκωδικοποιητή παρουσιάζεται παρακάτω:


```

function decodeUplink(input) {
  var data = {};
  var AMKA1 = "";
  data.myResult = String.fromCharCode(input.bytes[0]);
  const strings = [5];
  for (let i = 0; i < 3; i++){
    if (input.bytes[i+1]< 10){
      strings[i]= input.bytes[i+1].toString().padStart(2, '0');
    } else {
      strings[i]= input.bytes[i+1].toString();
    }
  }
  Serial_Registry_Number= (input.bytes[4] * 256) + input.bytes[5];
  if (Serial_Registry_Number< 1000){
    strings[3]= Serial_Registry_Number.toString().padStart(4, '0');
  } else {
    strings[3]= Serial_Registry_Number.toString();
  }
  strings[4]= input.bytes[6].toString();

  data.AMKA=AMKA1.concat(strings[0],strings[1],strings[2],strings[3],strings[4]
);
  return { data: data };
}

```

Αρχικά, στην συνάρτηση *decodeUplink()*, ορίζεται η μεταβλητή *data* ως αντικείμενο, στο οποίο θα αποθηκευτούν τα δεδομένα μετά τη μετατροπή τους στην επιθυμητή μορφή. Το byte του payload, το οποίο αντιστοιχεί στο αποτέλεσμα της ανίχνευσης, είναι το *input.bytes[0]*. Συνεπώς, για να αποκωδικοποιηθεί ορθά το αποτέλεσμα σε χαρακτήρα 'P'(positive) ή 'N'(negative), χρησιμοποιείται η συνάρτηση *String.fromCharCode()*, η οποία μετατρέπει τις τιμές Unicode σε χαρακτήρες. Οι τιμές του payload από το *input.bytes[1]* έως το *input.bytes[6]* αποτελούν τα έξι

τμήματα του A.M.K.A, τα οποία αποστάλθηκαν από την θύρα COM8 του υπολογιστή μας. Για την επιτυχή απεικόνιση του A.M.K.A, τα δεδομένα τροποποιήθηκαν σε συμβολοσειρές, μορφοποιήθηκαν κατάλληλα και τελικά ενώθηκαν για τον σχηματισμό του 11ψήφιου αριθμού. Καταρχάς, ορίζεται ένας σταθερός πίνακας 5 στοιχείων, στον οποίο θα τοποθετηθούν τα αλφαριθμητικά δεδομένα, με όνομα *strings*. Τα *input.bytes[1]*, *input.bytes[2]* και *input.bytes[3]* εμπεριέχουν την ημέρα, το μήνα και το έτος γέννησης του ασθενούς αντίστοιχα. Στη συνέχεια, γίνεται η μετατροπή τους σε συμβολοσειρές με την μέθοδο *toString()*. Επιπρόσθετα, σε περίπτωση που σε κάποιο από τα συγκεκριμένα bytes έχει καταχωρηθεί αριθμός μικρότερος του δέκα, θα είναι αποθηκευμένος ως μονοψήφιος. Όμως, μ' αυτόν τον τρόπο, το συνολικό εύρος του 11ψήφιου αριθμού του A.M.K.A θα μειωθεί κατά ένα ψηφίο, κάτι που κρίνεται ανεπιθύμητο. Έτσι, στις συγκεκριμένες περιπτώσεις, με την μέθοδο *padStart(2, '0')* προστίθεται στο string που περιλαμβάνει τον μονοψήφιο αριθμό ένα ακόμα μηδενικό στην αρχή του, μ' αποτέλεσμα η συμβολοσειρά να αποκτά το επιθυμητό μήκος δύο χαρακτήρων(π.χ. αντί για '9' σε '09'). Έπειτα από τις παραπάνω τροποποιήσεις τα δεδομένα καταχωρούνται στον πίνακα *strings*. Τα bytes του payload, τα οποία αντιστοιχούν στα bytes του Αριθμού Εθνικού Μητρώου, δηλαδή τα *input.bytes[4]* και *input.bytes[5]*, ενώνονται ξανά σε μία λέξη μεγέθους δύο byte στη μεταβλητή *Serial_Registry_Number*. Ο Αριθμός Εθνικού Μητρώου αποτελεί έναν τετραψήφιο αριθμό. Στην περίπτωση που είναι μικρότερος του 1000, στη μεταβλητή *Serial_Registry_Number* θα αποθηκεύεται ένας τριψήφιος αριθμός. Για να καταχωρηθεί στον πίνακα *strings* η τιμή του Αριθμού του Εθνικού Μητρώου, διαθέτοντας το κατάλληλο μήκος, αφότου επιτευχθεί η μετατροπή του σε συμβολοσειρά με τη μέθοδο *toString()*, χρησιμοποιείται και πάλι η μέθοδος *padStart()* με επιθυμητό μήκος συμβολοσειράς αυτή τη φορά το τέσσερα(*padStart(4, '0')*). Παράλληλα, ο χαρακτήρας ελέγχου του A.M.K.A μετά την μετατροπή του σε συμβολοσειρά καταχωρείται και αυτός στο διαμορφωμένο πίνακα. Τέλος, με τη συνάρτηση *concat()*, ενώνονται τα επιμέρους αλφαριθμητικά δεδομένα του πίνακα, σχηματίζοντας το αποκωδικοποιημένο A.M.K.A του ασθενούς. Στο Σχήμα 5.48 διακρίνονται καθαρά οι τιμές A.M.K.A και αποτελέσματος μετά την αποκωδικοποίησή τους:

The screenshot displays the 'Live data' view for a specific device in The Things Stack. The breadcrumb navigation shows the path: Applications > lora32-sensor1 > End devices > eui-70b3d57ed0052ed3 > Live data. The device name is 'eui-70b3d57ed0052ed3' with ID 'eui-70b3d57ed0052ed3'. The status is '1' and 'n/a', with 'Last activity 32 seconds ago'. Below this, there are tabs for Overview, Live data (selected), Messaging, Location, Payload formatters, Claiming, and General settings. A table displays the live data with columns for Time, Type, and Data preview. The data preview shows JSON payloads and hex representations. A console message at the bottom indicates 'Events cleared'.

Time	Type	Data preview
↑ 18:41:17	Forward uplink data message	DevAddr: 26 08 66 30 <> Payload: { AMKA: "29118987893", myResult: "P" } 58 1D 08 59 03 15 03 <>
↑ 18:41:17	Successfully processed dat...	DevAddr: 26 08 66 30 <>
↑ 18:33:28	Forward uplink data message	DevAddr: 26 08 66 30 <> Payload: { AMKA: "38126898216", myResult: "N" } 4E 1E 0C 44 23 3D 06 <>
↑ 18:33:28	Successfully processed dat...	DevAddr: 26 08 66 30 <>
↑ 18:32:56	Forward join-accept message	DevAddr: 26 08 66 30 <>
18:05:56	Console: Events cleared	The events list has been cleared

Σχήμα 5.48: Τα αποκωδικοποιημένα δεδομένα στο The Things Stack Community Edition.

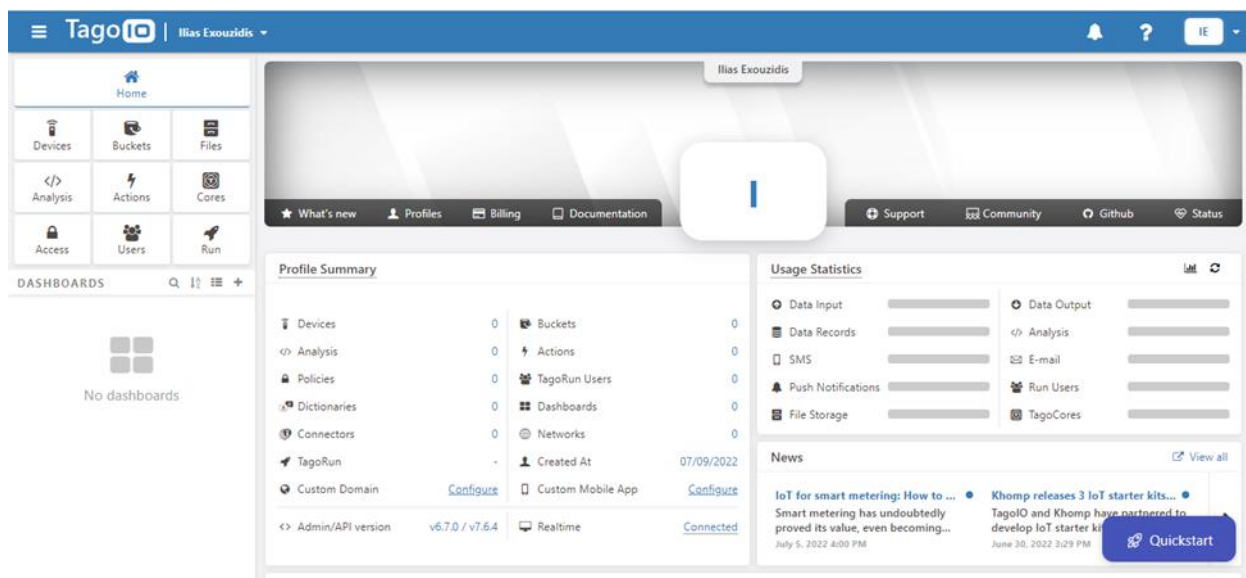
➤ Integration με χρήση της πλατφόρμας TagoIO

Μετά την αποκωδικοποίηση των τιμών, με την δημιουργία ενός integration μέσω webhook επιτυγχάνεται η αποστολή των δεδομένων στο TagoIO. Το TagoIO αποτελεί μία πλατφόρμα IoT βασισμένη στο Cloud, η οποία συνδυάζει αναπτυγμένη διαχείριση συσκευών με πληθώρα υπηρεσιών, αποθήκευση δεδομένων, οπτικοποίηση και ανάλυση τους, διαθέτοντας παράλληλα ένα ευρύ φάσμα λειτουργιών με εύκολη εφαρμογή. Το TagoIO παρέχει ευέλικτη τιμολόγηση για τη δημιουργία εφαρμογών IoT με βάση τα προγράμματα και τις υπηρεσίες, που προσφέρονται. Τα τρία βασικά πλάνα χρέωσης που υποστηρίζονται από την πλατφόρμα αποτελούν το Free, το Starter και το Scale. Παρακάτω παρουσιάζονται οι υπηρεσίες τους:

- ✓ Free: Το Δωρεάν πακέτο υπηρεσιών ενδείκνυται για την πρώτη επαφή των προγραμματιστών με το TagoIO. Στην Free υπηρεσία παρέχονται πέντε συσκευές, πέντε ταμπλό(dashboards), πέντε σενάρια αναλύσεων και αποθήκευση των δεδομένων για συνολικό χρόνο 30 ημερών.

- ✓ **Starter:** Το Starter πακέτο υπηρεσιών ενδείκνυται για προγραμματιστές και επιχειρήσεις, που ετοιμάζονται να κυκλοφορήσουν νέες εφαρμογές. Η υπηρεσία αυτή προσφέρει απεριόριστα scripts, 100 συσκευές, 100 dashboards, προσαρμογή εμπορικού σήματος, ενσωμάτωση πρόσθετων στοιχείων και υποστήριξη από το γραφείο βοήθειας. Οι συγκεκριμένες παροχές κοστολογούνται στα 49 δολάρια το μήνα.
- ✓ **Scale:** Το Scale πακέτο παροχών ενδείκνυται για επιχειρήσεις, που βρίσκονται έτοιμες να επεκτείνουν και να βελτιστοποιήσουν τις δραστηριότητές τους. Στη συγκεκριμένη υπηρεσία περιλαμβάνονται όλες οι προσφορές του πακέτου Starter, οι οποίες συμπληρώνονται με την αξιοποίηση 1 εκατομμυρίου συσκευών, 10.000 dashboards, ένα πλήρες αρχείο καταγραφής ελέγχων, μία προαιρετική μεμονωμένη βάση δεδομένων, πολυάριθμα χαρακτηριστικά κλιμάκωσης, πολλαπλές γλώσσες και λειτουργία SSO με SAML. Οι συγκεκριμένες παροχές κοστολογούνται στα 199 δολάρια το μήνα.

Στην εργασία μας αξιοποιήθηκε το Free πακέτο υπηρεσιών και δημιουργήθηκε ένας λογαριασμός χρήστη, δίνοντας e-mail και κωδικό αναγνώρισης. Στο Σχήμα 5.49 απεικονίζεται η δημιουργία λογαριασμού στην πλατφόρμα του TagoIO:

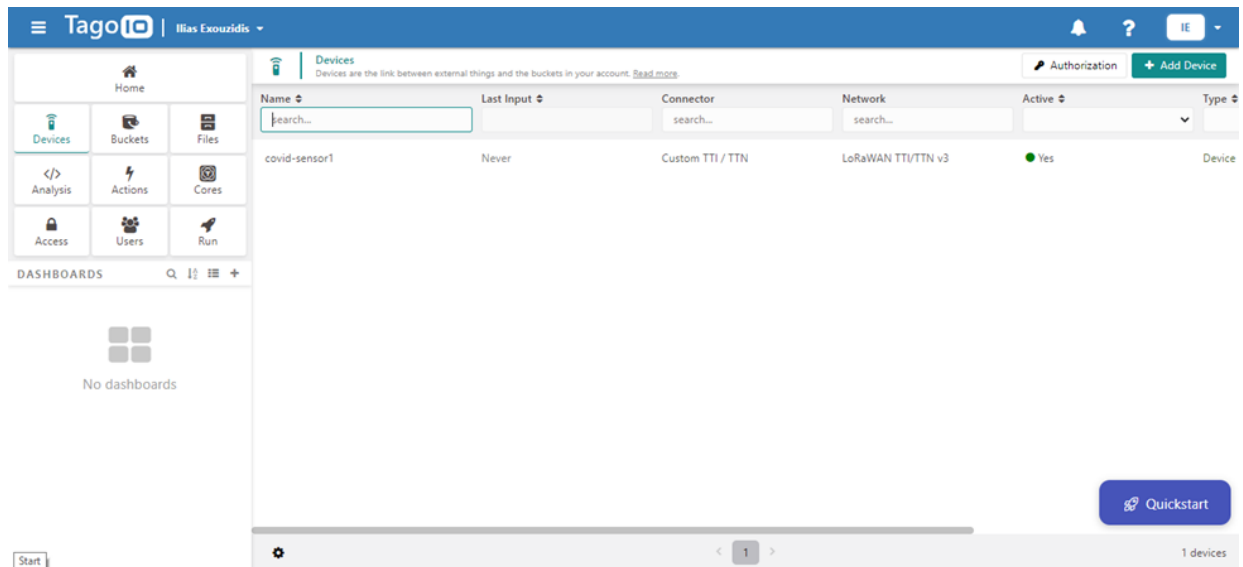


Σχήμα 5.49: Η σελίδα επισκόπησης του λογαριασμού στο TagoIO.

Για την σύνδεση της τελικής μας συσκευής μέσω webhook integration στο TagoIO χρησιμοποιείται η καρτέλα *Devices*, από την αριστερή λίστα επιλογών, η οποία βρίσκεται στη

σελίδα επισκόπησης. Έπειτα, επιλέγοντας *Add Device*, προωθηθήκαμε σε μία νέα σελίδα στην οποία εμφανίζονται οι διαθέσιμες συσκευές για σύνδεση με την πλατφόρμα. Στη συνέχεια, επιλέχθηκε από την αριστερή στήλη το *LoRaWAN TTI* και ακολούθως η επιλογή *Custom The Things Industries*. Στο σημείο αυτό, επιβάλλεται η εισαγωγή ενός ονόματος για την συσκευή που συνδέθηκε, καθώς και η προσθήκη του κλειδιού *DevEUI*, που δόθηκε στη συσκευή κατά την ενεργοποίηση OTAA από το *The Things Stack*. Μετέπειτα, επιλέγεται το *Create Device* για την ολοκλήρωση της διαδικασίας δημιουργίας της συσκευής. Παράλληλα, με την διαμόρφωση της συσκευής, το *TagoIO* απαιτεί την παραγωγή ενός κωδικού εξουσιοδότησης, για τον οποίο χρειάστηκε να δοθεί ένα όνομα και να πατηθεί η επιλογή *Generate*.

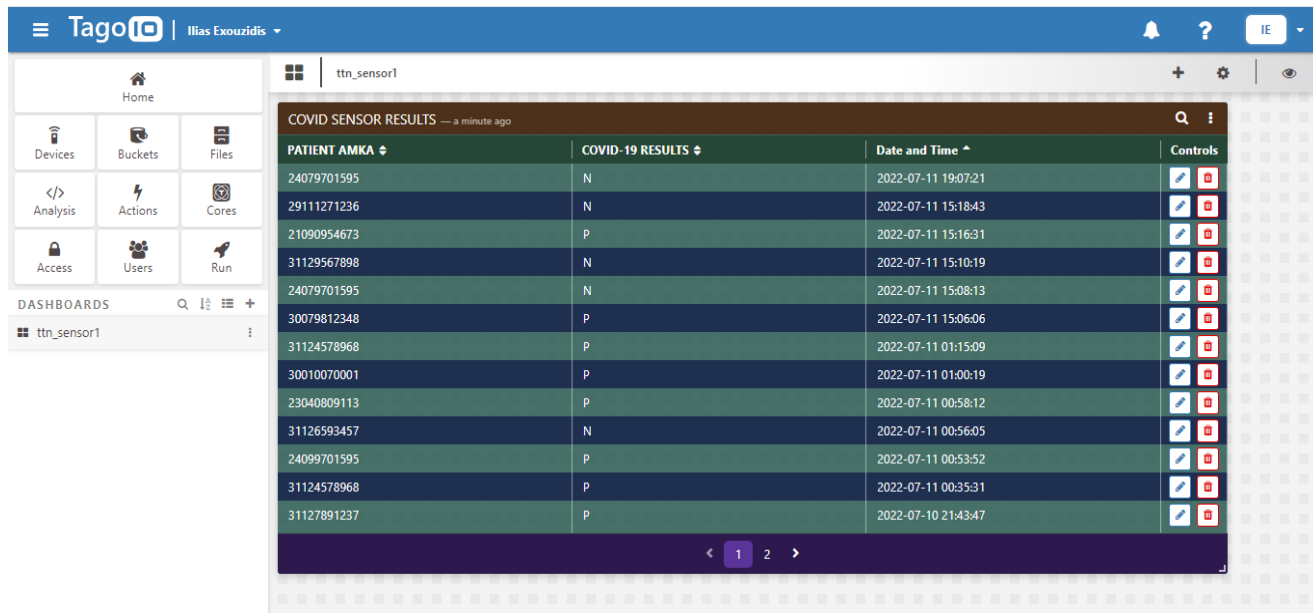
Επόμενο βήμα αποτελεί η δημιουργία του *webhook integration* στο *The Things Stack Community Edition*. Αρχικά, επισημαίνεται πως για τη δημιουργία ενός *webhook* ο χρήστης απαιτείται να διαθέτει ένα τελικό σημείο *HTTP(S)*. Εφόσον, δεν υφίσταται ένα τελικό σημείο για δοκιμή, ο χρήστης καλείται να δοκιμάσει μια δωρεάν υπηρεσία όπως η *Webhook.site*. Στην εφαρμογή του *The Things Stack* επιλέχθηκε η *dropdown* επιλογή *Webhooks* από την αριστερή λίστα των *Integrations*. Κάνοντας κλικ στο *+Add webhook* εμφανίζεται η λίστα με τα διαθέσιμα πρότυπα, στην οποία επιλέγεται το *TagoIO*. Τέλος, δίνεται ένα αναγνωριστικό όνομα για το *webhook* μας, καθώς και ο κωδικός εξουσιοδότησης που σχηματίστηκε στο *TagoIO*. Μ' αυτόν τον τρόπο ολοκληρώνεται η διαδικασία δημιουργίας του *webhook* και επιτυγχάνεται η σύνδεση των δεδομένων της συσκευής με το *TagoIO*. Στο Σχήμα 5.50 παρουσιάζεται η τελική συσκευή, η οποία ονομάστηκε *covid-sensor1*, στο πρόγραμμα *TagoIO*.





























Σχήμα 5.50: Η τελική συσκευή covid-sensor1 στο TagoIO.

Στο TagoIO δημιουργείται αυτόματα ένα *Bucket*, στο οποίο αποθηκεύονται τα δεδομένα της τελικής συσκευής. Επιπλέον, οι τιμές που λαμβάνονται από το δίκτυο οπτικοποιούνται με τη δημιουργία ενός *Dashboard*. Για την διαμόρφωση ενός νέου Dashboard αξιοποιείται η επιλογή *Add dashboard*. Στη συνέχεια, το TagoIO απαιτεί την εισαγωγή ενός ονόματος για το Dashboard μας, καθώς και τον προσδιορισμό του είδους του (*Normal* ή *Blueprint*). Στην εργασία μας, επιλέχθηκε *Normal* τύπος Dashboard. Τα Dashboards αποτελούνται από widgets, στα οποία παρουσιάζονται και αποθηκεύονται τα δεδομένα που λαμβάνονται από το δίκτυο. Το TagoIO παρέχει μια ποικιλία από widgets για τη διαχείριση των δεδομένων του χρήστη σε πραγματικό χρόνο. Οι διαθέσιμες επιλογές περιλαμβάνουν widgets από απλές κλίμακες μέχρι πίνακες, χάρτες, βίντεο, ακόμη και φόρμες που χρησιμοποιούνται επιτρέποντας στον χρήστη να εισάγει δεδομένα. Στην εργασία μας, χρησιμοποιήθηκε για την αποθήκευση και την παρουσίαση των τιμών ένα *Dynamic Table* widget. Οι δυναμικοί πίνακες αποτελούν πίνακες, οι οποίοι συμπληρώνονται δυναμικά καθώς λαμβάνονται τα δεδομένα μας, διατηρώντας παράλληλα το ιστορικό των προηγούμενων τιμών σε κάθε γραμμή. Με το *Dynamic Table*, αφού ληφθούν οι τιμές τόσο του A.M.K.A του ασθενούς όσο και του αποτελέσματος του βιοαισθητήρα, τοποθετούνται σε δύο διαφορετικές στήλες, στις οποίες δίνεται το κατάλληλο όνομα. Παράλληλα, σε μία τρίτη στήλη επισημαίνεται ο χρόνος στον οποίο λαμβάνονται τα δεδομένα από την πλατφόρμα του Tago IO. Τέλος, με το δυναμικό πίνακα προσφέρεται η δυνατότητα προσαρμογής της απεικόνισης των δεδομένων κάθε στήλης, ενώ καθίσταται δυνατή η εφαρμογή συγκεκριμένης φόρμουλας, η

αλλαγή χρωμάτων των κελιών βάσει συνθηκών, η χρήση εικονιδίων για την αναπαράσταση των δεδομένων μας και πολλά άλλα. Το Dashboard για την παρουσίαση των αποτελεσμάτων του αισθητήρα του COVID-19 μαζί με τα Α.Μ.Κ.Α των ασθενών παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.51.

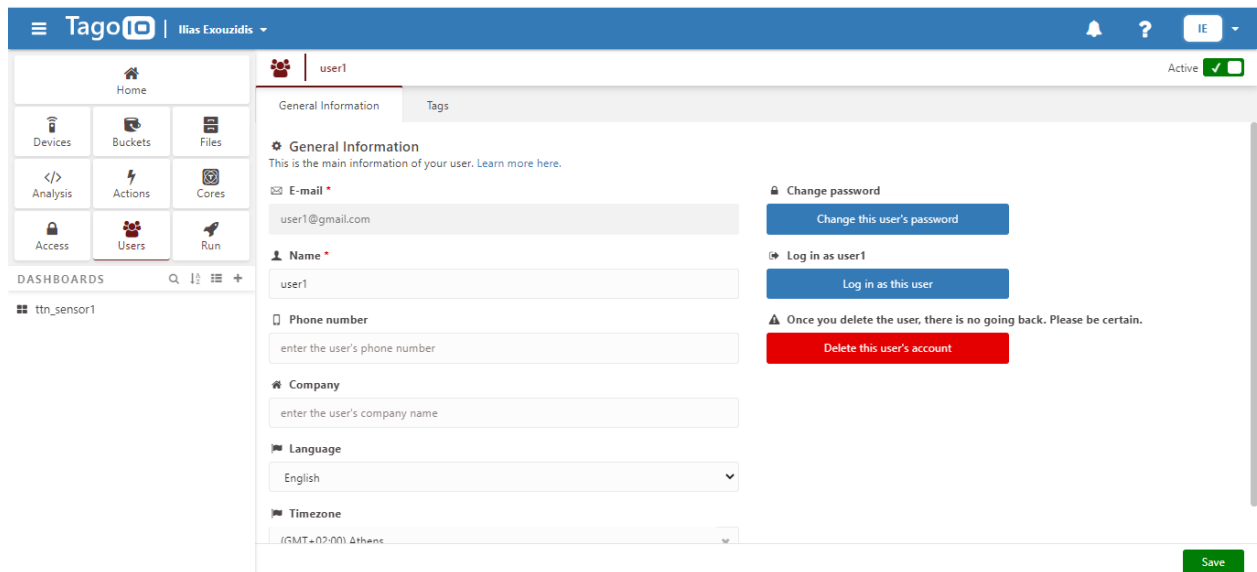


PATIENT AMKA	COVID-19 RESULTS	Date and Time	Controls
24079701595	N	2022-07-11 19:07:21	 
29111271236	N	2022-07-11 15:18:43	 
21090954673	P	2022-07-11 15:16:31	 
31129567898	N	2022-07-11 15:10:19	 
24079701595	N	2022-07-11 15:08:13	 
30079812348	P	2022-07-11 15:06:06	 
31124578968	P	2022-07-11 01:15:09	 
30010070001	P	2022-07-11 01:00:19	 
23040809113	P	2022-07-11 00:58:12	 
31126593457	N	2022-07-11 00:56:05	 
24099701595	P	2022-07-11 00:53:52	 
31124578968	P	2022-07-11 00:53:51	 
31127891237	P	2022-07-10 21:43:47	 

Σχήμα 5.51: Το Dashboard ttn_sensor1 του TagoIO στο οποίο απεικονίζονται τα αποτελέσματα των ασθενών μαζί με τους Α.Μ.Κ.Α τους, καθώς και ο χρόνος στον οποίο ελήφθησαν.

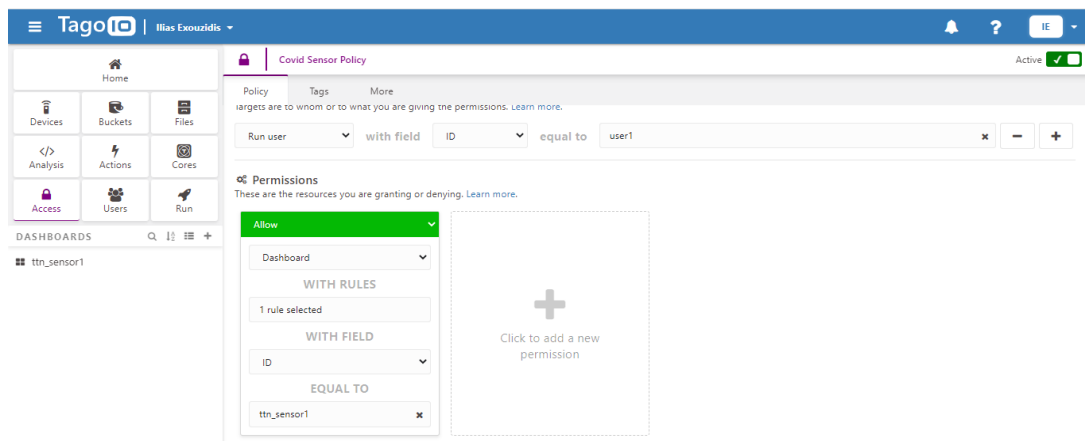
Τα οπτικοποιημένα δεδομένα, που λαμβάνονται στο TagoIO, προσφέρονται στους τελικούς χρήστες με το ενσωματωμένο εργαλείο που διατίθεται στην πλατφόρμα και ονομάζεται TagoRUN. Η ενότητα του TagoRUN υποστηρίζει τη δημιουργία μίας πλατφόρμας για την ανάπτυξη λύσεων χρησιμοποιώντας προσαρμοσμένο λογότυπο, χρώματα, διεύθυνση URL, σελίδα εγγραφής, μηνύματα ηλεκτρονικού ταχυδρομείου και πολυάριθμες επιπλέον υπηρεσίες. Το TagoRUN λειτουργεί σε συνεργασία με τις ενότητες ελέγχου πρόσβασης(*Access*) και διαχείρισης χρηστών(*Users*). Έπειτα από τη ρύθμιση και την ανάπτυξη της λύσης μας, στην ενότητα RUN διαμορφώνεται ένας τομέας(*domain*) για την εφαρμογή, στον οποίο οι χρήστες θα έχουν τη δυνατότητα να εγγραφούν. Για τη δημιουργία της εφαρμογής, επιλέχθηκε η καρτέλα *RUN*, η οποία βρίσκεται στο αριστερό μενού. Στην συνέχεια, στο *Main Configuration* ορίζεται το όνομα του application, ως *Covid-19 Sensor App*. Στην καρτέλα *Domain* της αριστερής στήλης φαίνεται η διεύθυνση URL στην οποία θα συνδέονται οι χρήστες για να αποκτήσουν πρόσβαση

στην εφαρμογή, ενώ στην καρτέλα *Theme* ο διαχειριστής επεξεργάζεται τα χρώματα και το φόντο των σελίδων της εφαρμογής.



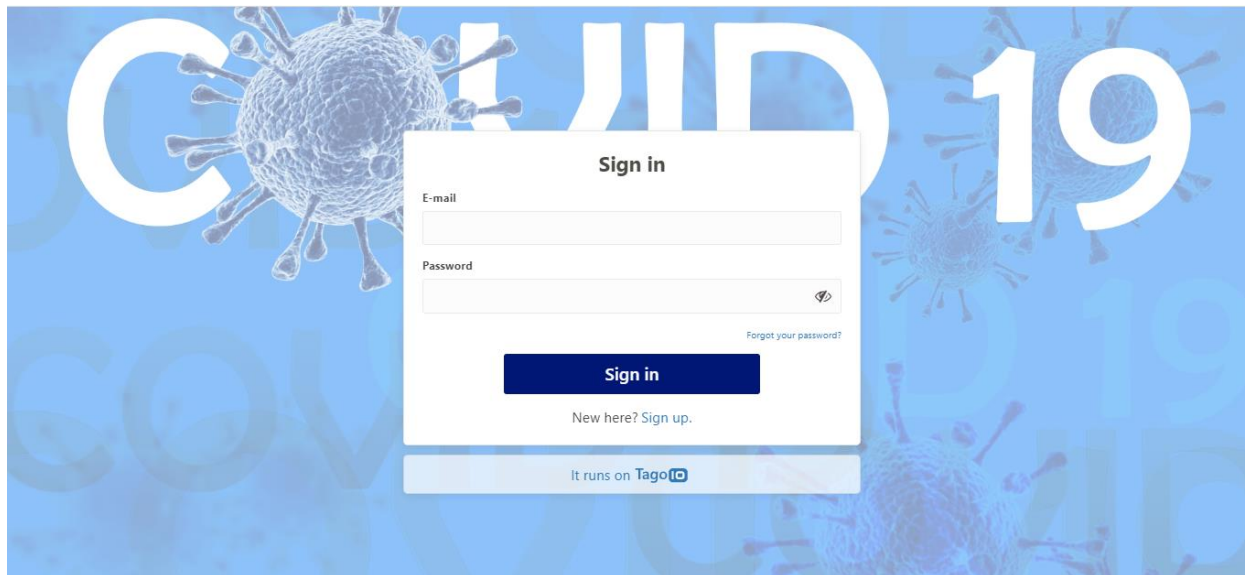
Σχήμα 5.52: Δημιουργία RUN user.

Για τη δοκιμή της εφαρμογής, δημιουργήθηκε, στην καρτέλα επιλογής *Users*, ένας χρήστης με όνομα **user1**, email εισόδου **user1@gmail.com** και επιθυμητό κωδικό πρόσβασης(Σχήμα 5.52). Προκειμένου, ο χρήστης να συνδεθεί στην εφαρμογή, επιλέγεται η καρτέλα *Access* και διαμορφώνεται ένα νέο Policy, με όνομα *Covid Sensor Policy*. Στις ρυθμίσεις, δίνεται η δυνατότητα στο συγκεκριμένο χρήστη να έχει πρόσβαση στο Dashboard των αποτελεσμάτων, χωρίς να μπορεί να το μορφοποιήσει με την προσθήκη νέων widgets(Σχήμα 5.53).



Σχήμα 5.53: Οι ρυθμίσεις πρόσβασης του Covid Sensor Policy.

Μετά την ρύθμιση πρόσβασης, ο χρήστης μπορεί να πλοηγηθεί στην διεύθυνση της εφαρμογής με URL: <https://62c9969ab6e7f200134bc5fd.run.tago.io/auth/login>. Η σελίδα εγγραφής και εισόδου της εφαρμογής παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.54:



Σχήμα 5.54: Το Signup Page της εφαρμογής που δημιουργήθηκε.

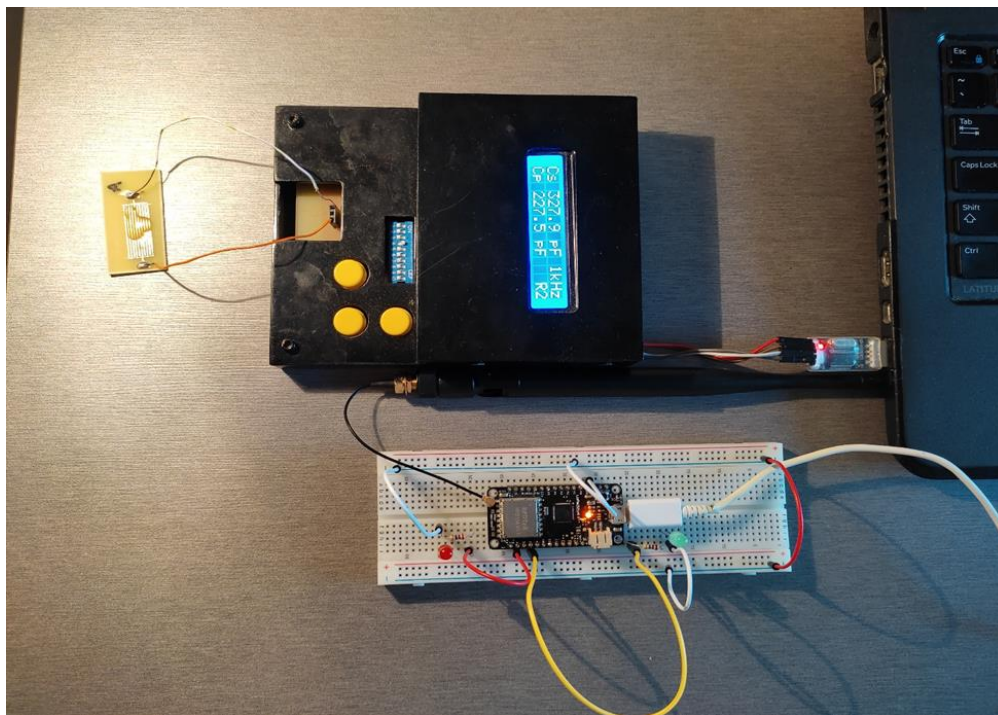
Τέλος, στο σχήμα 5.55 απεικονίζεται η πλατφόρμα που αναπτύχθηκε, αφού έχει γίνει είσοδος με τα στοιχεία του χρήστη που διαμορφώθηκε.

PATIENT AMKA	COVID-19 RESULTS	Date and Time	Controls
24079701595	N	2022-07-11 19:07:21	<input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
29111271236	N	2022-07-11 15:18:43	<input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
21090954673	P	2022-07-11 15:16:31	<input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
31129567898	N	2022-07-11 15:10:19	<input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
24079701595	N	2022-07-11 15:08:13	<input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
30079812348	P	2022-07-11 15:06:06	<input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
31124578968	P	2022-07-11 01:15:09	<input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
30010070001	P	2022-07-11 01:00:19	<input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
23040809113	P	2022-07-11 00:58:12	<input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
31126593457	N	2022-07-11 00:56:05	<input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
24099701595	P	2022-07-11 00:53:52	<input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
31124578968	P	2022-07-11 00:35:31	<input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
31127891237	P	2022-07-10 21:43:47	<input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>

Σχήμα 5.55: Το περιβάλλον της εφαρμογής στο TagoRUN.

5.2.6 Μετρήσεις και σχολιασμός αποτελεσμάτων

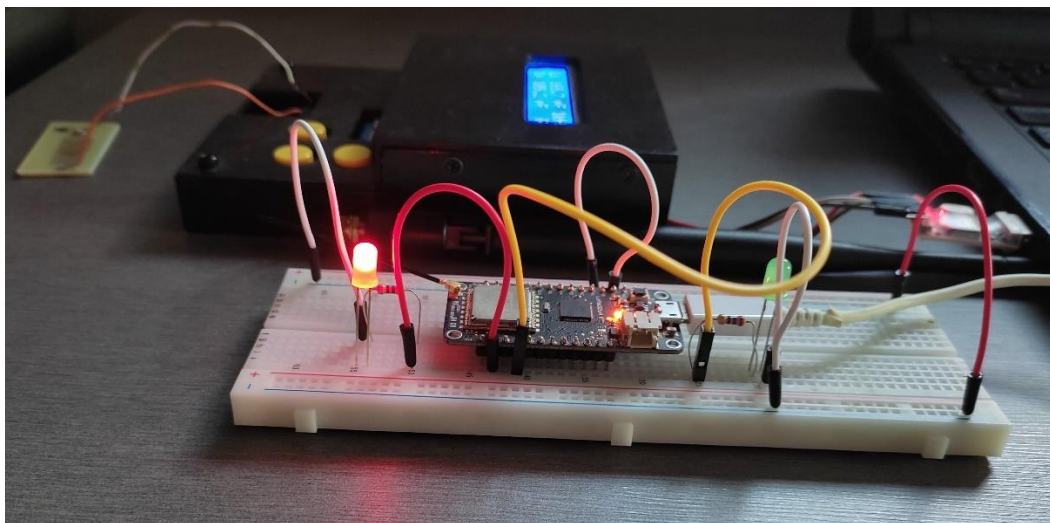
Η διάταξη του πειράματος απεικονίζεται στο Σχήμα 5.56. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στον ίδιο χώρο, που συνδέθηκε στο δίκτυο η πύλη του The Things Network.



Σχήμα 5.56: Η διάταξη με το μικροελεγκτή, το κύκλωμα ανάγνωσης και τον βιοαισθητήρα μας.

Αρχικά, για τη διεξαγωγή των μετρήσεων, τα καλώδια του πυκνωτή των ενδοδιαπλεκόμενων ηλεκτροδίων, συνδέθηκαν στις θύρες εισόδου του κυκλώματος ανάγνωσης. Στη συνέχεια, το κύκλωμα συνδέθηκε στη θύρα COM7 του φορητού υπολογιστή με την υποστήριξη του Prolific USB to TTL μετατροπέα και επιλέχθηκε η κατάλληλη συχνότητα λειτουργίας. Παράλληλα, ο μικροελεγκτής LoRa32u4Π συνδέθηκε στην θύρα COM8 του υπολογιστή. Έπειτα, με την εφαρμογή δείγματος στην επιφάνεια των ηλεκτροδίων, παρατηρείται μεταβολή των χωρητικότητων C_s και C_p , που απεικονίζονται στην LCD οθόνη του κυκλώματος ανάγνωσης. Εκείνη την στιγμή, εκτελείται ο κώδικας, που έχει συνταχθεί σε Python, στο περιβάλλον του VSCode για την καταχώρηση και την επεξεργασία των δεδομένων χωρητικότητας, τα οποία μεταβάλλονται μετά την εφαρμογή δείγματος στον βιοαισθητήρα. Ο χρόνος καθορισμού αποτελέσματος και εμφάνισης του στην οθόνη υπολογίζεται με προσέγγιση περίπου στα 5 λεπτά

και 30 δευτερόλεπτα. Στη συνέχεια, ζητείται να εισαχθεί το Α.Μ.Κ.Α του ασθενούς στην κατάλληλη μορφή για να αποσταλθεί μαζί με το αποτέλεσμα στην πλακέτα του μικροελεγκτή. Σε περίπτωση μετάδοσης θετικού αποτελέσματος στον LoRa32u4Π ανάβει το κόκκινο led(Σχήμα 5.57), ενώ σε περίπτωση αρνητικού το πράσινο(Σχήμα 5.58).



Σχήμα 5.57: Αποστολή θετικού αποτελέσματος και άναμμα κόκκινου led.

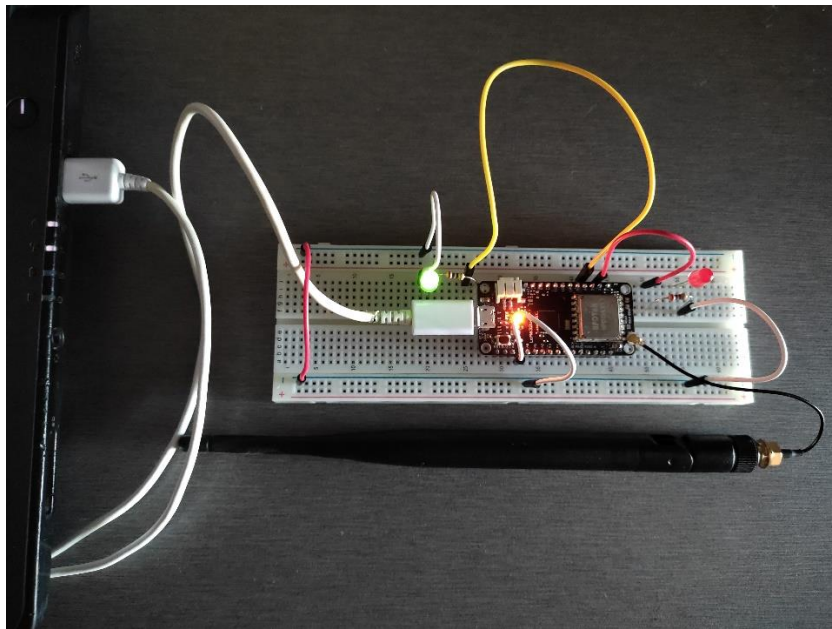
Ακολούθως, τα δεδομένα διαβάζονται από τον μικροελεγκτή, μέσω του κώδικα που συντάχθηκε στο περιβάλλον του Arduino IDE, τροποποιούνται και καταχωρούνται κατάλληλα στον πίνακα αποστολής payload και μεταδίδονται στο δίκτυο του The Things Stack Community Edition. Παράλληλα, στον κώδικα ορίζεται ο χρόνος επόμενης μετάδοσης μηνυμάτων(Tx) στο δίκτυο, ο οποίος οφείλει να εναρμονίζεται με την πολιτική δίκαιης χρήσης του TTN. Όπως, έχει υπογραμμιστεί σε προηγούμενη ενότητα, στο δημόσιο κοινοτικό δίκτυο του The Things Stack Community Edition εφαρμόζεται μια πολιτική δίκαιης χρήσης, η οποία περιορίζει τον χρόνο μετάδοσης uplink μηνυμάτων στον αέρα σε 30 δευτερόλεπτα ανά ημέρα (24 ώρες) για κάθε κόμβο και τα downlink μηνύματα σε 10 ανά ημέρα (24 ώρες) για κάθε κόμβο. Συνεπώς, προκειμένου να τηρηθούν οι κανόνες του δικτύου, υπολογίστηκε ο χρόνος που θα βρίσκονται τα uplink μηνύματα στον αέρα, χρησιμοποιώντας τον επίσημο airtime calculator του The Things Network [72]. Με βάση το Fair Use Policy του δικτύου το Duty cycle ορίζεται ως εξής:

$$Duty\ cycle = \frac{Total\ Uplink\ ToA}{Total\ Seconds\ per\ day} = \frac{30s}{86400s} = 0.00034722 \quad (5.2.1)$$

Όπου, *Total Uplink ToA* ο συνολικός χρόνος για uplink μηνύματα, ανά ημέρα που μπορεί να στείλει η συσκευή και *Total Seconds per day* ο συνολικός χρόνος διάρκειας μιας ημέρας σε δευτερόλεπτα. Η εξίσωση εύρεσης του χρονικού διαστήματος αποστολής νέου μηνύματος(T_x) αναφέρεται στον παρακάτω τύπο:

$$T_x = \left(\frac{ToA}{Duty\ Cycle} \right) - ToA \quad (5.2.2)$$

όπου, *ToA* ο χρόνος των μηνυμάτων(uplink) της συσκευής στον αέρα και *Duty Cycle* ο κύκλος λειτουργίας της.



Σχήμα 5.58: Αποστολή αρνητικού αποτελέσματος στο μικροελεγκτή και άναμμα πράσινου led.

Στα αρχικά πειράματα, εξαιτίας της κοντινής απόστασης(~3m) του μικροελεγκτή και του gateway, τα οποία βρισκόντουσαν σε εσωτερικό χώρο, ο συντελεστής διασποράς με τον οποίο

μεταδίδονταν τα μηνύματα στο δίκτυο του The Things Stack Community Edition ήταν είτε SF7 είτε SF8. Συνεπώς, στο διαδικτυακό υπολογιστή του ToA επιλέχθηκε εύρος ζώνης συχνοτήτων 125KHz, μέγεθος byte εισόδου 8 και συντελεστής διασποράς SF7-SF8. Έτσι, υπολογίστηκαν με βάση τον online calculator και την σχέση (5.2.2) οι χρόνοι:

- Για SF7 $\rightarrow T_{oA} = 56.6 \text{ ms} \rightarrow T_x = 162,95 \text{ s}$. Συνεπώς, επόμενη επιτρεπτή μετάδοση δεδομένων στο δίκτυο επιτυγχάνεται σε **2 λεπτά και 43 δευτερόλεπτα**.
- Για SF8 $\rightarrow T_{oA} = 102.9 \text{ ms} \rightarrow T_x = 296,25 \text{ s}$. Συνεπώς, επόμενη επιτρεπτή μετάδοση δεδομένων στο δίκτυο επιτυγχάνεται σε **4 λεπτά και 57 δευτερόλεπτα**.

Ωστόσο, επειδή ο χρόνος του κώδικα επεξεργασίας της γλώσσας Python(5 λεπτά και 30 δευτερόλεπτα) υπερβαίνει και τους δύο T_x ορισμένους χρόνους, στο περιβάλλον του Arduino IDE, συμπληρώθηκε επόμενος χρόνος μετάδοσης **$T_x = 330 \text{ seconds}$** . Έτσι, εύκολα συμπεραίνεται πως η συσκευή είναι ικανή να μεταδώσει μέχρι **261 μηνύματα ανά ημέρα** στο δίκτυο του The Things Stack Community Edition.

Μετά την αποστολή τους στο δίκτυο, τα δεδομένα αποκωδικοποιούνται από τον JavaScript Payload Formatter και αποθηκεύονται με την δημιουργία ενός webhook integration στην πλατφόρμα TagoIO(Σχήμα 5.59). Αξίζει να υπογραμμιστεί, πως με την αποστολή νέων δεδομένων στο TagoIO, ανανεώνεται το *Dashboard* με νέες στήλες, χωρίς όμως να διαγράφονται τα αποτελέσματα των παλαιότερων μετρήσεων. Τα προγενέστερα χρονικά λαμβανόμενα δεδομένα κατατάσσονται στις χαμηλότερες στήλες του *Dynamic Table* παραμένοντας ορατά στον διαχειριστή. Η συγκεκριμένη επιλογή του *Dynamic Table* ως *widget*, προσφέρει αποθήκευση και οπτικοποίηση πληθώρας αποτελεσμάτων στο *Dashboard*, τα οποία χαρακτηρίζονται από το A.M.K.A του ασθενούς και το χρόνο λήψης τους.

PATIENT AMKA	COVID-19 RESULTS	Date and Time	Controls
29118907893	P	2022-10-03 18:41:17	[Refresh] [Stop]
30126890216	N	2022-10-03 18:33:20	[Refresh] [Stop]
02110137891	N	2022-10-03 17:51:10	[Refresh] [Stop]
07090067902	P	2022-10-03 17:38:46	[Refresh] [Stop]
31111972348	N	2022-10-03 17:36:39	[Refresh] [Stop]
23080235647	P	2022-10-03 17:34:32	[Refresh] [Stop]
24079701595	P	2022-10-03 17:31:42	[Refresh] [Stop]

Σχήμα 5.59: Τα δεδομένα στο Dashboard του TagoIO.

Τέλος, προκειμένου να υπολογιστεί το εύρος απόστασης, στο οποίο γίνεται να πραγματοποιηθεί επικοινωνία μέσω του πρωτοκόλλου LoRaWAN, εκτελέστηκαν μετρήσεις στις οποίες το gateway τοποθετήθηκε σε μεγαλύτερη απόσταση από την πλακέτα LoRa32u4II. Στην αρχή, η μετάδοση δεδομένων από το μικροελεγκτή στην πύλη μπορούσε να επιτευχθεί σε απόσταση μικρότερη ή ίση των 10 μέτρων. Όμως, όταν προστέθηκε στην διάταξη μας, μια κεραία LoRa ιδανική για τη ζώνη συχνοτήτων 868MHz, η οποία απεικονίζεται και στο παραπάνω Σχήμα 5.56, το εύρος απόστασης αναβαθμίστηκε σε εξαιρετικό βαθμό. Αναλυτικότερα, η κεραία που αξιοποιήθηκε περιλαμβάνει ένα RP-SMA (Female) JK-IPEX MHF U.FL 1.13 100mm και ένα RP-SMA(Male) Tilt Swivel 1/2 Wave Whip antenna, συμβάλλοντας έτσι στην επίτευξη επικοινωνίας του μικροελεγκτή με την πύλη μας, σε απόσταση έως και 700 μέτρων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΑΝΑΦΟΡΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΩΝ ΕΠΕΚΤΑΣΕΩΝ ΤΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ

6.1 Αξιολόγηση της προτεινόμενης διάταξης

Η τελική διάταξη της παρούσας διπλωματικής εργασίας περιλαμβάνει έναν χωρητικό βιοαισθητήρα ανίχνευσης του COVID-19, ένα πρωτότυπο κύκλωμα ανάγνωσης και τον μικροελεγκτή LoRa32u4II v1.3. Μετά την εφαρμογή δείγματος πρωτεΐνης (S) στην επιφάνεια του βιοαισθητήρα, οι τιμές χωρητικότητας Cs και Cp, οι οποίες απεικονίζονται στην LCD οθόνη του κυκλώματος ανάγνωσης, μεταβάλλονται. Παράλληλα, η πλακέτα μέτρησης βρίσκεται ήδη συνδεδεμένη μέσω ενός μετατροπέα USB σε TTL στη θύρα COM7 του υπολογιστή μας, προκειμένου να επιτευχθεί σειριακή επικοινωνία μεταξύ των δύο συσκευών, αξιοποιώντας την βιβλιοθήκη pySerial της γλώσσας προγραμματισμού Python. Συνεπώς, καθώς αρχίσουν να μεταβάλλονται τα δεδομένα στην οθόνη του κυκλώματος, έπειτα από την πτώση κατάλληλου δείγματος, ξεκινά η εκτέλεση του κώδικα, που συντάχθηκε σε γλώσσα Python, για την αποθήκευση σε μία λίστα, των πρώτων 60 τιμών χωρητικότητας Cs, που λαμβάνονται από την πλακέτα, προκειμένου να καθοριστεί το αποτέλεσμα της διαδικασίας ανίχνευσης. Έπειτα, εξάγονται για επαληθευτικούς σκοπούς στην οθόνη του υπολογιστή το καθορισμένο αποτέλεσμα και οι τιμές της χωρητικότητας Cs που καταγράφηκαν στη λίστα. Στη συνέχεια, εισάγεται από τον χρήστη το Α.Μ.Κ.Α του ασθενούς, το οποίο αποτελεί έναν κωδικό αναγνώρισης των αποτελεσμάτων του. Το Α.Μ.Κ.Α και το αποτέλεσμα ανίχνευσης, μεταδίδονται σειριακά, στον μικροελεγκτή LoRa32u4II, ο οποίος συνδέεται στη θύρα COM8 του υπολογιστή μας. Τα δεδομένα μεταδίδονται μέσω του πρωτοκόλλου LoRaWAN στον διακομιστή του The Things Stack Community Edition. Η επικοινωνία του μικροελεγκτή με τον διακομιστή επιτεύχθηκε μέσω του The Things Gateway. Τα δεδομένα στο The Things Stack αποκωδικοποιούνται και μετατρέπονται στις επιθυμητές τιμές Α.Μ.Κ.Α και αποτελέσματος. Ακολούθως, αποστέλλονται μέσω ενός webhook integration στην Cloud πλατφόρμα TagoIO, όπου αποθηκεύονται και οπτικοποιούνται

σε ένα Dashboard, το οποίο αποτελείται από ένα widget μορφής Dynamic Table. Τέλος, μέσω του επιλογής του TagoRUN, σχεδιάστηκε μία εφαρμογή για την πρόσβαση στα οπτικοποιημένα δεδομένα από τους τελικούς χρήστες.

Ο κώδικας σειριακής επικοινωνίας του κυκλώματος ανάγνωσης με τον υπολογιστή, μέσω της θύρας COM7, συντάχθηκε σε γλώσσα Python, στο περιβάλλον του προγράμματος επεξεργασίας κειμένου Visual Studio Code ή VS Code, όπως αλλιώς χαρακτηρίζεται. Ο αλγόριθμος του κώδικα που υλοποιήθηκε προκειμένου να καθοριστεί το αποτέλεσμα ανίχνευσης, βασίστηκε στην ύπαρξη φθίνουσας ή όχι απόκρισης των πρώτων 60 μετρήσεων της χωρητικότητας Cs, οι οποίες αποθηκεύτηκαν σε μια λίστα, η οποία είχε οριστεί στην αρχή του προγράμματος μας. Οι δύο συνθήκες, σύμφωνα με τις οποίες το αποτέλεσμα κρίθηκε θετικό, αποτέλεσαν η διαρκώς μειούμενη απόκριση της χωρητικότητας ανά τον χρόνο, καθώς και το να υπερβαίνει το 2%, η συνολική μεταβολή της. Για τον έλεγχο της φθίνουσας απόκρισης, επιλέχθηκε να εξεταστεί η πορεία των τιμών χωρητικότητας ανά 10 μετρήσεις, καθότι η ελάχιστη αύξηση της σε μία μέτρηση δεν θα αποτελούσε ενδεικτική του αποτελέσματος και της γενικότερης μειούμενης τροχιάς της συνάρτησης της. Ωστόσο, το εύρος των 10 μετρήσεων, ενδέχεται να επηρεάζει ένα μικρό ποσοστό των αποτελεσμάτων. Τέλος, ο συνολικός χρόνος εκτέλεσης του προγράμματος σε Python υπολογίζεται περίπου στα 330 δευτερόλεπτα και υπερβαίνει, τον καθορισμένο από την Πολιτική Δίκαιης του TTN, χρόνο αποστολής νέου μηνύματος(Tx). Δυστυχώς, το γεγονός αυτό, περιορίζει τον απεσταλμένο αριθμό μηνυμάτων ανοδικής ζεύξης στο δίκτυο σε 261 μηνύματα ανά ημέρα.

Σχετικά με τη βαθμονόμηση της τελικής συσκευής, λαμβάνεται υπόψη ότι προορίζεται για ιατρικό έλεγχο, στον οποίο η απουσία ψευδώς θετικών αποτελεσμάτων θεωρείται προτεραιότητα, προκειμένου να αποφευχθεί η έναρξη επιβλαβών διαγνωστικών δοκιμών και η σπατάλη πόρων υγειονομικής περίθαλψης. Για το λόγο αυτό, παρόλο που η μέγιστη μείωση της χωρητικότητας των αρνητικών δειγμάτων βρέθηκε μικρότερη από 2%, επιλέχθηκε η καταχώρηση ως αρνητικών όλων των αποτελεσμάτων με συνολική μείωση χωρητικότητας 2% ή λιγότερο, προκειμένου να αποφευχθεί η ύπαρξη ψευδώς θετικών αποτελεσμάτων.

Η επικοινωνία μέσω του LoRaWAN πραγματοποιήθηκε με τη χρησιμοποίηση του SX1276 Chipset του μικροελεγκτή LoRa32u4II v1.3, της πύλης The Things Gateway, και της αξιοποίησης του server του The Things Stack Community Edition. Για την σειριακή λήψη των δεδομένων του

ασθενούς(A.M.K.A-αποτέλεσμα) από την θύρα COM8 του υπολογιστή και την επικοινωνία με το δίκτυο συντάχθηκε ένας κώδικας σε γλώσσα C++ στο περιβάλλον Arduino IDE, τα βασικά σημεία του οποίου παρουσιάζονται στο πειραματικό μέρος. Ο όγκος των δεδομένων του ωφέλιμου φορτίου ανέρχεται στα 8 bytes και μεταδίδεται με συντελεστές διασποράς SF7 ή SF8 ανάλογα με την κυκλοφορία(traffic) των πακέτων, που επικρατεί στο δίκτυο. Η μεγαλύτερη απόσταση ζεύξης της τελικής συσκευής με το gateway καταγράφηκε στα 650-700 μέτρα, με την αξιοποίηση ισχυρότερου spreading factor(SF11 ή SF12). Ωστόσο, αυτό επηρεάζεται από την αστική μορφολογία της περιοχής, τους εσωτερικούς και εξωτερικούς τοίχους των κτιρίων, της τοποθεσίας του gateway καθώς και το εύρος λειτουργίας του. Η συγκεκριμένη διάταξη εξάλλου, προορίζεται για χρήση σε υπαίθριες, απομακρυσμένες και αραιοκατοικημένες περιοχές, στις οποίες υφίσταται αισθητά μειωμένος αριθμός κτιρίων ανάμεσα στον μικροελεγκτή και την πύλη. Τέτοιες τοποθεσίες αποτελούν κυρίως τα νησιά της πατρίδας μας, και ειδικότερα αυτά που βρίσκονται στο Αιγαίο, καθώς διαθέτουν περιορισμένο αριθμό σπιτιών με μικρό σχετικά ύψος(έλλειψη πολυκατοικιών), μ' αποτέλεσμα λιγότερες παρεμβολές στα απεσταλμένα μηνύματα από εσωτερικούς και εξωτερικούς τοίχους.

Επιπρόσθετα, η δημιουργία ενός integration μέσω webhook του The Things Stack με το TagoIO καθίσταται ιδιαίτερα απλή, λόγω των διαθέσιμων ενσωματώσεων που παρουσιάζονται στο Console. Παράλληλα, οι μορφοποιητές ωφέλιμου φορτίου του The Things Stack Community Edition συνέβαλλαν στο σχεδιασμό ενός αποκωδικοποιητή των uplink μηνυμάτων που μεταδόθηκαν από την τελική συσκευή, καθώς και στην μετατροπή τους σε κατάλληλες τιμές A.M.K.A και αποτελέσματος ανίχνευσης, μέσω της σύνταξης ενός κώδικα σε γλώσσα JavaScript. Τέλος, μέσω της ενότητας TagoRUN διαμορφώθηκε μια εύχρηστη εφαρμογή για τους τελικούς χρήστες στην οποία επιτυγχάνεται η αποθήκευση και η παρουσίαση των δεδομένων της διάταξης. Έτσι, ο κάθε χρήστης σε ελάχιστο χρόνο μπορεί να λάβει τα αποτελέσματα του, από το κινητό ή τον υπολογιστή του, με μια απλή δημιουργία λογαριασμού και σύνδεση στην εφαρμογή.

6.2 Προκλήσεις και μελλοντικές βελτιώσεις

Σε ολόκληρη την διαδικασία υλοποίησης της αναπτυσσόμενης λύσης εντοπίστηκαν ορισμένα προβλήματα, τα οποία εντείνουν την ανάγκη για μελλοντικές τροποποιήσεις στην διάταξή μας. Αρχικά, ο μικροελεγκτής LoRa32u4II v1.3 διαθέτει περιορισμένη μνήμη, με αποτέλεσμα η

επεξεργασία των δεδομένων, τα οποία λαμβάνονται από τη σειριακή θύρα COM8, να μην εκτελείται σ' αυτόν. Συνεπώς, για την μετατροπή των τιμών σε μορφή αναγνωρίσιμη από τον άνθρωπο, χρησιμοποιήθηκε ένας αποκωδικοποιητής σε γλώσσα Javascript, που προσφέρεται από το The Things Stack Community Edition. Παράλληλα, εξαιτίας της μικρής μνήμης που κατέχει, ο αριθμός των δεδομένων που λαμβάνεται από την πλακέτα είναι επίσης περιορισμένος. Η συγκεκριμένη αδυναμία του μικροελεγκτή, μας ώθησε να αποστείλουμε το αποτέλεσμα της ανίχνευσης του βιοαισθητήρα σε μορφή ενός χαρακτήρα('N' ή 'P'), προκειμένου να εξοικονομήσουμε τα bytes που δεσμεύονται από την μνήμη. Η ίδια λογική εφαρμόστηκε στον διαχωρισμό του 11ψήφιου αριθμού του A.M.K.A σε πέντε διαφορετικά στοιχεία. Με βάση όλα τα παραπάνω, σε μία μεταγενέστερη επιστημονική έρευνα, συστήνεται η χρήση ενός διαφορετικού μικροελεγκτή με μεγαλύτερη χωρητικότητα μνήμης. Επιπλέον, με την αξιοποίηση προγραμματιστικών εργαλείων όπως το Node-RED ή διεπαφών προγραμματισμού εφαρμογών (APIs), η τελική διάταξη θα μπορούσε να συνδέεται με περισσότερες συσκευές και υπηρεσίες για την ταχύτερη υλοποίηση της λύσης μας.

Επιπρόσθετα, επισημαίνεται πως ο χρόνος επεξεργασίας των τιμών χωρητικότητας Cs, από τον κώδικα που δημιουργήθηκε σε Python, υπολογίστηκε στα 330 δευτερόλεπτα, μ' αποτέλεσμα τον περιορισμό των μηνυμάτων ανοδικής ζεύξης ανά ημέρα σε 261. Για την ταχύτερη λειτουργία του κώδικα, και την αποστολή μεγαλύτερου αριθμού μηνυμάτων στο δίκτυο συστήνεται η βελτιστοποίηση του προγράμματος και η απαλοιφή των γραμμών που εξάγουν τα δεδομένα Cs, καθώς και το αποτέλεσμα ανίχνευσης, στην οθόνη του υπολογιστή μας. Παράλληλα, αναγκαστικά κρίνεται η ύπαρξη δύο θυρών εισόδου USB στον υπολογιστή μας, για τη σύνδεση του κυκλώματος ανάγνωσης στη μία και του μικροελεγκτή μετάδοσης LoRa στην άλλη.

Τέλος, η πύλη που χρησιμοποιήθηκε διαθέτει εύρος ζεύξης με τον μικροελεγκτή μέχρι 10km, γεγονός που περιορίζει την μετάδοση μηνυμάτων σε μεγαλύτερες αποστάσεις. Για την αξιοποίηση της διάταξης σε υπαίθριες και απομακρυσμένες περιοχές προτείνεται η χρήση μιας αποδοτικότερης πύλης, με υψηλότερο εύρος ζεύξης. Η διαμόρφωση LoRa παρέχει επικοινωνίες μεγάλης εμβέλειας έως τρία μίλια (πέντε χιλιόμετρα) σε αστικές περιοχές και έως 10 μίλια (15 χιλιόμετρα) ή περισσότερο σε υπαίθριες. Η αποστολή πακέτων χωρίς απώλειες, σε αποστάσεις της τάξεως των 15-20 χιλιομέτρων, σε απομακρυσμένες τοποθεσίες, επιτυγχάνεται μειώνοντας τα bytes του απεσταλμένου payload και ρυθμίζοντας τον συντελεστή διασποράς στην ανώτατη τιμή

του SF12. Ωστόσο, μ' αυτόν τον τρόπο θα μειωθεί ο αριθμός των διαγνώσεων που μπορούν να μεταδοθούν από την συσκευή μας στο δίκτυο.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] K. Yuki, M. Fujiogi, and S. Koutsogiannaki, “COVID-19 pathophysiology: A review,” *Clinical Immunology*, vol. 215. Academic Press Inc., Jun. 01, 2020. doi: 10.1016/j.clim.2020.108427.
- [2] E. Janik, M. Bartos, M. Niemcewicz, L. Gorniak, and M. Bijak, “SARS-CoV-2: Outline, prevention, and decontamination,” *Pathogens*, vol. 10, no. 2. MDPI AG, pp. 1–15, Feb. 01, 2021. doi: 10.3390/pathogens10020114.
- [3] T. P. Velavan and C. G. Meyer, “The COVID-19 epidemic,” *Tropical Medicine and International Health*, vol. 25, no. 3. Blackwell Publishing Ltd, pp. 278–280, Mar. 01, 2020. doi: 10.1111/tmi.13383.
- [4] D. Tang, P. Comish, and R. Kang, “The hallmarks of COVID-19 disease,” *PLoS Pathogens*, vol. 16, no. 5. Public Library of Science, May 01, 2020. doi: 10.1371/journal.ppat.1008536.
- [5] L. Xiao, H. Sakagami, and N. Miwa, “ACE2: The key molecule for understanding the pathophysiology of severe and critical conditions of COVID-19: Demon or angel?” *Viruses*, vol. 12, no. 5. MDPI AG, May 01, 2020. doi: 10.3390/v12050491.
- [6] R. Jalandra et al., “Strategies and perspectives to develop SARS-CoV-2 detection methods and diagnostics,” *Biomedicine and Pharmacotherapy*, vol. 129. Elsevier Masson SAS, Sep. 01, 2020. doi: 10.1016/j.biopha.2020.110446.
- [7] A. Lino, M. A. Cardoso, H. M. R. Gonçalves, and P. Martins-Lopes, “SARS-CoV-2 Detection Methods,” *Chemosensors*, vol. 10, no. 6, p. 221, Jun. 2022, doi: 10.3390/chemosensors10060221.

- [8] M. Yüce, E. Filiztekin, and K. G. Özkaya, “COVID-19 diagnosis —A review of current methods,” *Biosens Bioelectron*, vol. 172, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.bios.2020.112752.
- [9] OECD, “The COVID-19 crisis in urban and rural areas,” in *OECD Regional Outlook 2021*, 2021.
- [10] C. Henning-Smith, “The Unique Impact of COVID-19 on Older Adults in Rural Areas,” *J Aging Soc Policy*, vol. 32, no. 4–5, pp. 396–402, Jul. 2020, doi: 10.1080/08959420.2020.1770036.
- [11] H. V. Lakhani, S. S. Pillai, M. Zehra, I. Sharma, and K. Sodhi, “Systematic review of clinical insights into novel coronavirus (Covid-19) pandemic: Persisting challenges in U.S. rural population,” *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 17, no. 12. MDPI AG, pp. 1–14, Jun. 02, 2020. doi: 10.3390/ijerph17124279.
- [12] N. Douthit, S. Kiv, T. Dwolatzky, and S. Biswas, “Exposing some important barriers to health care access in the rural USA,” *Public Health*, vol. 129, no. 6. Elsevier B.V., pp. 611–620, Jun. 01, 2015. doi: 10.1016/j.puhe.2015.04.001.
- [13] K. A. Hirko et al., “Telehealth in response to the COVID-19 pandemic: Implications for rural health disparities,” *Journal of the American Medical Informatics Association*, vol. 27, no. 11. Oxford University Press, pp. 1816–1818, Nov. 01, 2020. doi: 10.1093/jamia/ocaa156.
- [14] N. Bhalla, P. Jolly, N. Formisano, and P. Estrela, “Introduction to biosensors,” *Essays Biochem*, vol. 60, no. 1, pp. 1–8, Jun. 2016, doi: 10.1042/EBC20150001.
- [15] P. Mehrotra, “Biosensors and their applications - A review,” *Journal of Oral Biology and Craniofacial Research*, vol. 6, no. 2. Elsevier B.V., pp. 153–159, May 01, 2016. doi: 10.1016/j.jobcr.2015.12.002.

- [16] M. A. Arugula and A. Simonian, “Novel trends in affinity biosensors: Current challenges and perspectives,” *Measurement Science and Technology*, vol. 25, no. 3. Institute of Physics Publishing, 2014. doi: 10.1088/0957-0233/25/3/032001.
- [17] G. Ertürk and B. Mattiasson, “Capacitive biosensors and molecularly imprinted electrodes,” *Sensors (Switzerland)*, vol. 17, no. 2. MDPI AG, Feb. 17, 2017. doi: 10.3390/s17020390.
- [18] T. Adegbiya, A. Rogacs, C. Patel, and A. Gordon-Ross, “Microprocessor Optimizations for the Internet of Things: A Survey,” Mar. 2016, doi: 10.1109/TCAD.2017.2717782.
- [19] L. Atzori, A. Iera, and G. Morabito, “The Internet of Things: A survey,” *Computer Networks*, vol. 54, no. 15, pp. 2787–2805, Oct. 2010, doi: 10.1016/j.comnet.2010.05.010.
- [20] O. Vermesan, P. Friess, P. Guillemin et al., “Internet of things strategic research roadmap,” in *Internet of Things: Global Technological and Societal Trends*, vol. 1, pp. 9–52, 2011.
- [21] P. Sethi and S. R. Sarangi, “Internet of Things: Architectures, Protocols, and Applications,” *Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 2017. Hindawi Publishing Corporation, 2017. doi: 10.1155/2017/9324035.
- [22] I. Lee and K. Lee, “The Internet of Things (IoT): Applications, investments, and challenges for enterprises,” *Bus Horiz*, vol. 58, no. 4, pp. 431–440, Jul. 2015, doi: 10.1016/j.bushor.2015.03.008.
- [23] A. El Hakim, “Internet of Things (IoT) System Architecture and Technologies, White Paper. Internet of Things (IoT) System Architecture and Technologies,” doi: <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.17046.19521>.
- [24] K. Swathi, T. Uday Sandeep and A. Roja Ramani, “Performance Analysis of Microcontrollers Used In Iot Technology,” *International Journal of Scientific*

Research in Science, Engineering and Technology, vol. 4, 2018, [Online]. Available: www.ijsrset.com

- [25] Jobit Joseph, “Types of Arduino Boards – Quick Comparison on Specification and Features,” Mar. 19, 2022. Accessed: Sep. 17, 2022. [Online]. Available: <https://circuitdigest.com/article/different-types-of-arduino-boards>
- [26] “Arduino Integrated Development Environment (IDE) v1.” *Arduino Documentation*. <https://docs.arduino.cc/software/ide-v1/tutorials/arduino-ide-v1-basics> (accessed Sep. 17, 2022).
- [27] “What is a Raspberry Pi?” *opensource*. <https://opensource.com/resources/raspberry-pi> (accessed Oct. 27, 2022).
- [28] G. Beniwal and A. Singhrova, “A systematic literature review on IoT gateways,” *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*. King Saud bin Abdulaziz University, 2021. doi: 10.1016/j.jksuci.2021.11.007.
- [29] S. Al-Sarawi et al., “Internet of Things (IoT) Communication Protocols: Review,” in *ICIT 2017: the 8th International Conference on Information Technology: Internet of Things IoT: conference proceedings: May 17th - 18th, 2017, Amman, Jordan, 2017*, [Online]. doi: <https://doi.org/10.1109/ICITECH.2017.8079928>
- [30] “IoT Device Communication protocols.” *Selva Blogs*. <http://selvarajkesavan.blogspot.com/2019/01/iot-device-communication-protocols-it.html> (accessed Sep. 18, 2022).
- [31] A. Al-Fuqaha, M. Guizani, M. Mohammadi, M. Aledhari, and M. Ayyash, “Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications,” *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 17, no. 4, pp. 2347–2376, Oct. 2015, doi: 10.1109/COMST.2015.2444095.
- [32] A. Lavric, A. I. Petrariu, P. M. Mutescu, E. Coca, and V. Popa, “Internet of Things Concept in the Context of the COVID-19 Pandemic: A Multi-Sensor Application Design,” *Sensors*, vol. 22, no. 2, Jan. 2022, doi: 10.3390/s22020503.

- [33] M. Ndiaye, S. S. Oyewobi, A. M. Abu-Mahfouz, G. P. Hancke, A. M. Kurien, and K. Djouani, “IoT in the wake of Covid-19: A survey on contributions, challenges and evolution,” *IEEE Access*, vol. 8. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., pp. 186821–186839, 2020. doi: 10.1109/ACCESS.2020.3030090.
- [34] A. Hossam, A. Magdy, A. Fawzy, and S. M. Abd El-Kader, “An Integrated IoT System to Control the Spread of COVID-19 in Egypt,” in *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2021, vol. 1261 AISC, pp. 336–346. doi: 10.1007/978-3-030-58669-0_31.
- [35] M. Otoom, N. Otoum, M. A. Alzubaidi, Y. Etoom, and R. Banihani, “An IoT-based framework for early identification and monitoring of COVID-19 cases,” *Biomed Signal Process Control*, vol. 62, Sep. 2020, doi: 10.1016/j.bspc.2020.102149.
- [36] J. M. Howerton and B. L. Schenck, “The Deployment of a LoRaWAN-Based IoT Air Quality Sensor Network for Public Good,” 2020.
- [37] A. Georgas et al., “ACE2-based capacitance sensor for rapid native SARS-CoV-2 detection in biological fluids and its correlation with real-time PCR,” *Biosens Bioelectron*, vol. 202, Apr. 2022, doi: 10.1016/j.bios.2022.114021
- [38] A. Georgas et al., “A Biosensor Platform for Point-of-Care SARS-CoV-2 Screening,” *Biosensors (Basel)*, vol. 12, no. 7, Jul. 2022, doi: 10.3390/bios12070487.
- [39] Π. Γ. Βέργης, “Ανάπτυξη Cloud-based IoT συστήματος αισθητήρων θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας του εδάφους με χρήση του LoRaWAN για εφαρμογές έξυπνης γεωργίας,” ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ, ΗΜΜΥ, ΕΜΠ, Αθήνα, 2022.
- [40] “General Python FAQ.” *Python Documentation*. <https://docs.python.org/3.10/faq/general.html> (accessed Oct. 27, 2022).
- [41] “What is Visual Studio Code? Microsoft’s extensible code editor.” *InfoWorld*. <https://www.infoworld.com/article/3666488/what-is-visual-studio-code-microsofts-extensible-code-editor.html> (accessed Oct. 27, 2022).

- [42] “Getting Started.” *Visual Studio Code*. <https://code.visualstudio.com/docs> (accessed Oct. 14, 2022).
- [43] “pySerial.” *PySerial Docs*. <https://pyserial.readthedocs.io/en/latest/pyserial.html#features> (accessed Oct. 14, 2022).
- [44] Α. Νικολού, “Δημιουργία περιβάλλοντος διεπαφής σε ένα σύστημα συγχρονικής λήψης και απεικόνισης δεδομένων γενικού σκοπού,” Μεταπτυχιακή Εργασία, Σχολή Επιστημών Αγωγής, Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων, ΙΩΑΝΝΙΝΑ, 2017. [Online]. Available: <https://olympias.lib.uoi.gr/jspui/handle/123456789/28072>
- [45] “pySerial API.” *PySerial Docs*. https://pyserial.readthedocs.io/en/latest/pyserial_api.html#native-ports (accessed Oct. 15, 2022).
- [46] Najad, “LoRa32u4 An Alternative For Expensive Adafruit Feather M0 with RFM95 LoRa Radio.” *DIY Usthad*. <https://diyusthad.com/2020/01/an-alternative-for-expensive-adafruit-feather-m0-with-rfm95-lora-radio-lora32u4.html> (accessed Oct. 07, 2022).
- [47] BSFrance, “LoRa32u4II,” 2017.
- [48] “The Things Gateway.” *The Things Network*. <https://www.thethingsnetwork.org/docs/gateways/gateway/> (accessed Oct. 07, 2022).
- [49] “TTN-GW-868 - IoT LoRaWAN 868MHz network gateway - Ethernet, WiFi.” *botland*. <https://botland.store/radio-modules/11851-ttn-gw-868-iot-lorawan-868mhz-network-gateway-ethernet-wifi-5904422340469.html> (accessed Oct. 07, 2022).
- [50] “What are LoRa and LoRaWAN?” *The Things Network*. <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/what-is-lorawan/> (accessed Oct. 08, 2022).

- [51] “LoRaWAN Architecture.” *The Things Network*. <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/architecture/> (accessed Oct. 09, 2022).
- [52] “Regional Parameters.” *The Things Network*. <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/regional-parameters/> (accessed Oct. 10, 2022).
- [53] “Duty Cycle.” *The Things Network*. <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/duty-cycle/> (accessed Oct. 10, 2022).
- [54] “Spreading Factors.” *The Things Network*. <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/spreading-factors/> (accessed Oct. 10, 2022).
- [55] “Message Types.” *The Things Network*. <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/message-types/> (accessed Oct. 10, 2022).
- [56] “Addressing & Activation.” *The Things Network*. <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/addressing/> (accessed Oct. 22, 2022).
- [57] “What Is The Things Stack?” *The Things Industries*. <https://www.thethingsindustries.com/docs/getting-started/what-is-tts/> (accessed Oct. 11, 2022).
- [58] “Quick Start.” *The Things Network*. <https://www.thethingsnetwork.org/docs/quick-start/> (accessed Oct. 11, 2022).
- [59] “The Things Network.” *The Things Industries*. <https://www.thethingsindustries.com/docs/getting-started/ttn/> (accessed Oct. 11, 2022).

- [60] “Console.” *The Things Industries*.
<https://www.thethingsindustries.com/docs/getting-started/console/> (accessed Oct. 11, 2022).
- [61] “Addresses.” *The Things Industries*.
<https://www.thethingsindustries.com/docs/getting-started/ttn/addresses/> (accessed Oct. 12, 2022).
- [62] “Cloud Integrations.” *The Things Industries*.
<https://www.thethingsindustries.com/docs/integrations/cloud-integrations/>
(accessed Oct. 22, 2022).
- [63] “MQTT Server.” *The Things Industries*.
<https://www.thethingsindustries.com/docs/integrations/mqtt/> (accessed Oct. 22, 2022).
- [64] “Pub/Sub.” *The Things Industries*.
<https://www.thethingsindustries.com/docs/integrations/pubsub/> (accessed Oct. 22, 2022).
- [65] “LoRa Cloud.” *The Things Industries*.
<https://www.thethingsindustries.com/docs/integrations/lora-cloud/> (accessed Oct. 22, 2022).
- [66] “Node-RED.” *The Things Industries*.
<https://www.thethingsindustries.com/docs/integrations/node-red/> (accessed Oct. 22, 2022).
- [67] “IFTTT.” *The Things Industries*.
<https://www.thethingsindustries.com/docs/integrations/ifttt/> (accessed Oct. 22, 2022).
- [68] “Payload Formatters.” *The Things Industries*.
<https://www.thethingsindustries.com/docs/integrations/payload-formatters/>
(accessed Oct. 22, 2022).

- [69] “Storage Integration.” *The Things Industries*.
<https://www.thethingsindustries.com/docs/integrations/storage/> (accessed Oct. 22, 2022).
- [70] “Webhooks.” *The Things Industries*.
<https://www.thethingsindustries.com/docs/integrations/webhooks/> (accessed Oct. 22, 2022).
- [71] “ΑΜΚΑ και προσωπικά δεδομένα: Εξαψήφιο τμήμα από το οποίο προκύπτει η ημερομηνία γέννησης (ΣτΕ Δ΄ Τμ. 518/2018).” *LAWSPOT*.
<https://www.lawspot.gr/nomika-nea/amka-kai-prosopika-dedomena-exapsifio-tmima-apo-opoio-prokyptei-i-imerominia-gennisis-ste> (accessed Oct. 17, 2022).
- [72] “LoRaWAN airtime calculator.” *The Things Network*.
<https://www.thethingsnetwork.org/airtime-calculator> (accessed Oct. 22, 2022).