

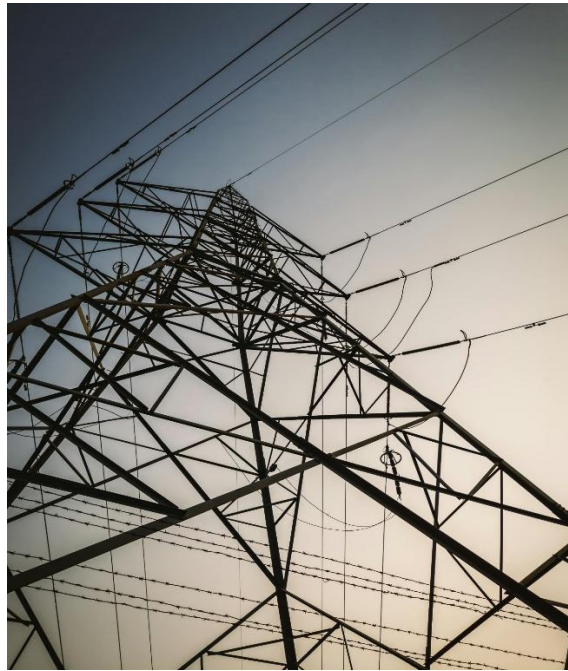


ΔΙΕΘΝΕΣ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΤΗΣ ΕΛΛΑΔΟΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Μελέτη τεχνολογιών επικοινωνίας/δικτύωσης για
χρήση σε απομακρυσμένες περιοχές»



Του φοιτητή
Ελευθέριος Χρίστος Κόκκινος
Αρ. Μητρώου: 144222

Επιβλέπων
Δρ. Περικλής Χατζημίσιος
Καθηγητής

Φεβρουάριος 2026

Τίτλος Π.Ε. Μελέτη τεχνολογιών επικοινωνίας/δικτύωσης για χρήση σε απομακρυσμένες περιοχές

Κωδικός Π.Ε. 24144

Όνοματεπώνυμο φοιτητή Ελευθέριος Χρίστος Κόκκινος

Όνοματεπώνυμο εισηγητή Περικλής Χατζημίσσιος

Ημερομηνία ανάληψης 08-03-2024

Ημερομηνία περάτωσης 22-01-2026

Βεβαιώνω ότι είμαι ο συγγραφέας αυτής της εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, έχω καταγράψει τις όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών, εικόνων και κειμένου, είτε αυτές αναφέρονται ακριβώς είτε παραφρασμένες. Επιπλέον, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία προετοιμάστηκε από εμένα προσωπικά, ειδικά ως διπλωματική εργασία, στο Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του ΔΙ.ΠΑ.Ε.

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του φοιτητή Ελευθέριου Χρίστου Κόκκινου που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης, ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο Διεθνές Πανεπιστήμιο της Ελλάδος άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσης της εργασίας διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο της εργασίας, δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού, ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, πώληση, εμπορική χρήση, διανομή, έκδοση, μεταφόρτωση (downloading), ανάρτηση (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού.

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του Διεθνούς Πανεπιστημίου της Ελλάδος, δεν υποδηλώνει απαραίτητως και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα, εκ μέρους του Τμήματος.

Πρόλογος

Η παρούσα πτυχιακή εργασία είναι αποτέλεσμα του ενδιαφέροντος που γεννήθηκε κατά την προσπάθεια εύρεσης κάποιου θέματος. Μου φάνηκε πολύ ενδιαφέρον, πως όλα αυτά που έχουμε ως δεδομένα στις μεγάλες πόλεις για την τελική τους υλοποίηση ουσιαστικά βασίζονται επάνω σε ένα τηλεπικοινωνιακό δίκτυο. Το πιο ενδιαφέρον όμως ήταν πως υπάρχουν περιοχές είτε σε κοντινές είτε σε μακρινές αποστάσεις, όπου δημιουργούνται τεράστιες κοινωνικές ανισότητες λόγω της μη ύπαρξης τηλεπικοινωνιακού δικτύου. Η αντίθεση που προκύπτει θεωρώ πως δείχνει καθαρά ότι χωρίς τις τηλεπικοινωνίες ο κόσμος και η καθημερινότητα των ανθρώπων θα ήταν πολύ διαφορετική. Οι τηλεπικοινωνίες είναι «θεμέλιος λίθος» της ανάπτυξης και βιωσιμότητας της εκάστοτε κοινωνίας με κρίσιμο ρόλο και επιρροή σε όλους τους τομείς. Είναι το αγαθό όπου ο κόσμος έχει την ύπαρξη του σαν δεδομένο. Αναπτύσσοντας την πτυχιακή μου εργασία κατάλαβα ότι μέσα από τις τηλεπικοινωνίες μπορούμε να αλλάξουμε ριζικά προς το καλύτερο οποιαδήποτε περιοχή. Το όφελος είναι η διαρκή συνειδητοποίηση των πλεονεκτημάτων που δημιουργούνται από την παροχή δικτύου σε περιοχές που έχουν μερική ή και καθόλου πρόσβαση σε αυτό.

Περίληψη

Οι απομακρυσμένες και αγροτικές περιοχές εξακολουθούν να είναι αντιμέτωπες με σημαντικές προκλήσεις, που οδηγούν στη συνολική μείωση του βιοτικού επιπέδου των κατοίκων. Συγκεκριμένα, το ψηφιακό χάσμα ανάμεσα στα αστικά κέντρα και τις περιοχές που βρίσκονται σε απομακρυσμένα σημεία ή έχουν μικρό πληθυσμό επιφέρει σημαντικές δυσκολίες στην καθημερινότητα. Στερεί από τους κατοίκους την πρόσβαση σε καινοτόμες υπηρεσίες, όπως είναι οι ψηφιακές εφαρμογές της ιατρικής, της παιδείας και της γεωργίας. Είναι πολύ σημαντική η κατανόηση του προβλήματος και το γεγονός ότι το βιοτικό επίπεδο αυτών των περιοχών είναι στενά συνδεδεμένο με τις τεχνολογίες τηλεπικοινωνιών.

Χάρη στις τεχνολογίες τηλεπικοινωνιών γίνονται διαθέσιμες υπηρεσίες και εφαρμογές που σκοπό έχουν να κάνουν την καθημερινότητα του ανθρώπου πιο εύκολη και πιο δημιουργική. Είναι καταγεγραμμένο πως περιοχές που έχουν μικρό ποσοστό υιοθέτησης της ψηφιακής τεχνολογίας είναι αντιμέτωπες με προβλήματα που σχετίζονται με το εκπαιδευτικό και μορφωτικό επίπεδο της κοινότητας. Παρουσιάζουν επίσης μεγαλύτερα ποσοστά προβλημάτων υγείας, καθώς η ιατρική περίθαλψη και η εξειδίκευση των θεραπόντων ιατρών είναι σημαντικά χαμηλότερη από εκείνη που υπάρχει στα αστικά κέντρα.

Με συγκεκριμένες παρεμβάσεις στο τηλεπικοινωνιακό δίκτυο και με συνδυαστική χρήση υπαρχουσών τεχνολογιών μπορεί αυτή η εικόνα να αλλάξει, μειώνοντας σημαντικά το ψηφιακό χάσμα. Η εν λόγω πτυχιακή εργασία προσφέρει μια επισκόπηση σημαντικών τηλεπικοινωνιακών τεχνολογιών που, με τη χρήση τους, μπορούν να υποστηρίξουν την υλοποίηση εφαρμογών και υπηρεσιών στους τομείς της γεωργίας, της ιατρικής και της εκπαίδευσης. Παρουσιάζεται ανάλυση των προκλήσεων, πρόταση πιθανής αρχιτεκτονικής και περιπτώσεις χρήσης ανά τομέα, με σκοπό την ανάδειξη των πλεονεκτημάτων που μπορούν να προκύψουν από την επέκταση του τηλεπικοινωνιακού δικτύου σε αγροτικές ή απομακρυσμένες περιοχές που έχουν μερική ή και καθόλου τηλεπικοινωνιακή κάλυψη.

«Study of communication and networking technologies for use in remote areas»

«ELEFThERIOS CHRISTOS KOKKINOS»

Abstract

The remote and agricultural areas are still against major challenges that lead to the overall decrease of the residents' living standards. In particular, the digital divide between the urban center and the places in remote areas or those that have small population induce important difficulties in everyday life. It deprives people of access to innovative services, such as the digital implementation in medicine, education and agriculture. The comprehension of the problem is very important, alongside the fact that the living standards of these areas are closely linked with communication technologies. Due to the telecommunication technologies, services and applications become available and have the goal of making human daily life easier and more creative. It is documented that areas that have a small percentage of adopting digital technology face problems that relate to the community's educational level. Additionally, they present larger percentages of health issues, since the medical care and medicals' specialization is significantly lower than that in urban centers. With specific interventions in the telecommunication network and with combinational use of currently existing technologies that image can alter, significantly decreasing the digital divide.

This B.Sc. thesis provides an overview of important telecommunication technologies that, with their use, will allow the implementation of applications and services in agricultural, medical and educational fields. An analysis of the challenges, a proposition of a potential architecture and the use cases per field are presented for the purpose of highlighting the advantages that can occur from the telecommunication network's extension in agricultural or remote areas that have partial or even no telecommunication coverage.

Ευχαριστίες

Ευχαριστώ πολύ τον καθηγητή μου κύριο Δρ. Περικλή Χατζημίσιο για τα διδακτικά εφόδια και τις συζητήσεις που κάναμε κατά την διάρκεια της εκπόνησης της πτυχιακής εργασίας. Επίσης ευχαριστώ όλους αυτούς που με την παρουσία και την εμπύχωση τους, κατέστησαν δυνατό την περάτωση της πτυχιακής μου εργασίας καθώς η όλη διαδικασία ήταν πολύ δύσκολη λόγω προβλήματος υγείας που αντιμετωπίζω και σχετίζεται με την όραση μου.

Περιεχόμενα

Πρόλογος.....	3
Περίληψη	4
Abstract	5
Ευχαριστίες	6
Περιεχόμενα.....	7
Κατάλογος Πινάκων	10
Συνομογραφίες.....	11
Κεφάλαιο 1ο: Η σημασία της συνδεσιμότητας και τεχνολογίες τηλεπικοινωνιών	13
1.1 Εισαγωγή.....	13
1.2 Τεχνολογίες τηλεπικοινωνιών	14
1.3 Backbone.....	14
1.3.1 Οπτικές ίνες	15
1.3.2 Δορυφορικά δίκτυα.....	16
1.3.3 Κινητά δίκτυα 3G , 4G , LTE , 5G.....	18
1.3.4 Ασύρματες ζεύξεις point to point.....	19
1.4 Middle-mile.....	20
1.4.1 TV White Spaces & Multi-hop	21
1.4.2 Relay stations με UHF πομποδέκτες.....	22
1.4.3 C-RAN.....	23
1.5 Last-mile.....	24
1.5.1 Wi-Fi.....	25
1.5.2 Bluetooth	26
1.5.3 ZigBee	27
1.5.4 LoRaWAN.....	28
1.6 Δίκτυα αισθητήρων και διαδίκτυο των πράγματων	29
1.6.1 Διαδίκτυο των πραγμάτων	30
1.6.2 Ασύρματα δίκτυα αισθητήρων	30
Κεφάλαιο 2ο: Έξυπνη γεωργία	32
2.1 Εισαγωγή.....	32
2.2 Αναγκαιότητα μετάβασης στην Έξυπνη Γεωργία	33
2.3 Προκλήσεις	34
2.3.1 Συνδεσιμότητα	35
2.3.2 Παρεμβολές.....	35
2.3.3 Κόστος.....	36

2.3.4	Ηλεκτροδότηση	38
2.3.5	Επεκτασιμότητα.....	39
2.3.6	Εκπαίδευση	40
2.3.7	Καιρικές συνθήκες.....	40
2.3.8	Υποστήριξη και συντήρηση εξοπλισμού	40
2.3.9	Διαλειτουργικότητα συσκευών	41
2.4	Αρχιτεκτονική.....	42
2.5	Περίπτωση χρήσης.....	43
2.5.1	Αυτόματο πότισμα	43
2.5.2	Μη επανδρωμένα οχήματα.....	46
2.5.3	Χρήση ρομπότ για συγκομιδή	52
2.5.4	Παρακολούθηση καιρού και εδάφους.....	55
2.5.5	Συστήματος παρακολούθησης κυψελών και μελισσοκομίας	57
2.5.6	Συστήματος παρακολούθησης θερμοκηπίου	60
2.5.7	Παρακολούθηση καλλιεργειών με σκοπό την πρόβλεψη ασθενειών και παρασίτων... 62	
2.5.8	Αποθήκευση καλλιεργειών	64
Κεφάλαιο 3ο:	Τηλεϊατρική.....	68
3.1	Εισαγωγή.....	68
3.2	Προκλήσεις στην τηλεϊατρική.....	69
3.2.1	Εισαγωγή	69
3.2.2	Δυσκολία στη Χρήση	69
3.2.3	Πρόσβαση σε τηλεπικοινωνιακές υποδομές	70
3.2.4	Πολιτικές και ρυθμιστικές προκλήσεις	71
3.2.5	Ασφάλεια δεδομένων	72
3.3	Αρχιτεκτονική.....	73
3.4	Περίπτωση χρήσης.....	77
3.4.1	Τηλεδιάγνωση	78
3.4.2	Παρακολούθηση ασθενών με χρόνιες παθήσεις.....	79
3.4.3	Απομακρυσμένη παρακολούθηση ασθενών με καρκίνο.....	81
3.4.4	Απομακρυσμένη παρακολούθηση της προγεννητικής φροντίδας.....	83
3.4.5	Τηλεκαρδιολογία.....	85
3.4.6	Τηλενευροψυχολογική αξιολόγηση.....	86
3.5	Οφέλη της τηλεϊατρικής	87
Κεφάλαιο 4ο:	Ψηφιακή Εκπαίδευση.....	90
4.1	Εισαγωγή.....	90
4.2	Προκλήσεις στην ψηφιακή εκπαίδευση.....	91
4.2.1	Εισαγωγή	91
4.2.2	Μακροεπίπεδο	92

4.2.3	Μεσοεπίπεδο	92
4.2.4	Μικροεπίπεδο	93
4.3	Αρχιτεκτονική.....	94
4.4	Περίπτωση χρήσης.....	97
4.4.2	Υβριδική εκπαίδευση	100
4.4.3	Ψηφιακές Βιβλιοθήκες.....	101
4.4.4	SolarSPELL.....	103
Κεφάλαιο 5ο:	Συμπεράσματα.....	105
	Βιβλιογραφικές αναφορές.....	107

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1: Διαφορές ανάμεσα στα πρωτόκολλα LPWAN	52
--	----

Συντομογραφίες

AP	Access Point
BBU	BaseBand Units
BLE	Bluetooth Low Energy
C-RAN	Cloud Radio Access Network
CSMA/CA	Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance
CRC	Cyclic Redundancy Check
CSS	Chirp Spread Spectrum
DTH	Direct-to-Home
DWDM	Dense Wavelength Division Multiplexing
GEO HTS	Geostationary High Throughput Satellites
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
GSM	Global System for Mobile Communication
HTTPS	Hyper Transfer Text Protocol Secure
IR LED	Infrared Light Emitting
IoT	Internet of Things
ISPs	Internet Service Providers
ITU	International Telecommunication Union
LE Coded PHY	Low Energy Coded PHY
LEO	Low Earth Orbit
LBT	Listen Before Talk
LoRaWAN	Long Range Wide Area Network
MAC	Medium Access Control
M2M	Machine-to-Machine
MEO	Medium Earth Orbit
MIMO	Multiple Input Multiple Output
MPLS	Multi-Protocol Label Switching
NOMA	Non-Orthogonal Multiple Access
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
PHY	Physical Layer
PID	Proportional Integral Derivative
PtP	Point to Point
PtMP	Point to Multipoint
QoS	Quality of Service

RAN	Radio Access Network
RFID	Radio Frequency Identification
RRH	Remote Radio Heads
RSSI	Received Signal Strength
SDN	software-defined networking
SF	Spreading Factor
TDR	Time Domain Reflectometry
TVWS	TV White Space
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
UBS	UHF Base Station
UHF	Ultra High Frequency
UTM	Universal Transverse Mercator
UHD	Ultra High Definition
VHF	Very High Frequency
VNF	Virtual Network Functions
VSAT	Very Small Aperture Terminals
WAN	Wide Area Network
WBAN	Wireless Body Area Network
WebRTC	Web Real-Time Communication
WLAN	Wireless Local Area Network
WSN	Wireless Sensor Network

Κεφάλαιο 1ο: Η σημασία της συνδεσιμότητας και τεχνολογίες τηλεπικοινωνιών

1.1 Εισαγωγή

Η συνδεσιμότητα στον 21ο αιώνα έχει καθοριστικό ρόλο στη ζωή του ανθρώπου. Η ταχεία εξάπλωση των τηλεπικοινωνιακών δικτύων σε όλο τον κόσμο δημιούργησε τη δυνατότητα και την έννοια της συνδεσιμότητας, όπου αρχικά ο άνθρωπος μπορούσε να επικοινωνεί με τους γύρω του. Στην πορεία, και χάρη στη συνεχή εξέλιξη των τεχνολογιών, έγινε το επόμενο βήμα, από την απλή επικοινωνία περάσαμε στη διάδραση και τον απομακρυσμένο έλεγχο εφαρμογών και συσκευών. Σκοπός ήταν και είναι να βοηθήσουν τον άνθρωπο στις καθημερινές του εργασίες, στη διασκέδασή του, στην εκπαίδευσή του και στην υγεία του, αυξάνοντας έτσι συνολικά το βιοτικό επίπεδο και προσφέροντάς του μια πιο εύκολη και βιώσιμη ζωή. Ωστόσο, παρότι η τεχνολογία συνεχώς εξελίσσεται και συμμετέχει όλο και πιο ενεργά στην καθημερινότητα των ανθρώπων, αυτό δεν ισχύει για όλους [1].

Περιοχές που χαρακτηρίζονται ως υποανάπτυκτες ή αγροτικές έχουν να διανύσουν μεγάλη απόσταση προκειμένου να καλύψουν το ψηφιακό χάσμα, το οποίο συνδέεται άμεσα με το συνολικό βιοτικό επίπεδο. Ενώ τα αστικά κέντρα και οι μεγάλες πόλεις ακμάζουν, ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά αυτής της ακμής είναι η ταχεία τεχνολογική εξέλιξη. Η πρόοδος αυτή βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στην ανάπτυξη και συνεχή βελτίωση των τηλεπικοινωνιών.

Αντίθετα, οι αγροτικές και απομακρυσμένες περιοχές αντιμετωπίζουν σοβαρές ελλείψεις και δυσκολίες σε σχέση με τα αστικά κέντρα. Όσο πιο απομονωμένη και δύσβατη είναι μια περιοχή, τόσο περισσότερο επιβαρύνεται από προβλήματα που δεν περιορίζονται μόνο στις τηλεπικοινωνίες, αλλά επεκτείνονται και σε βασικές υποδομές, όπως η ελλιπής ή ασταθής ηλεκτροδότηση, τα προβλήματα στη διαχείριση του νερού, η έλλειψη επαρκούς υγειονομικού προσωπικού και οι σημαντικές ελλείψεις στον τομέα της εκπαίδευσης. Όλα αυτά συμβάλλουν στην αύξηση των ποσοστών αναλφαβητισμού και, κατ' επέκταση, του ψηφιακού αναλφαβητισμού [2], [3].

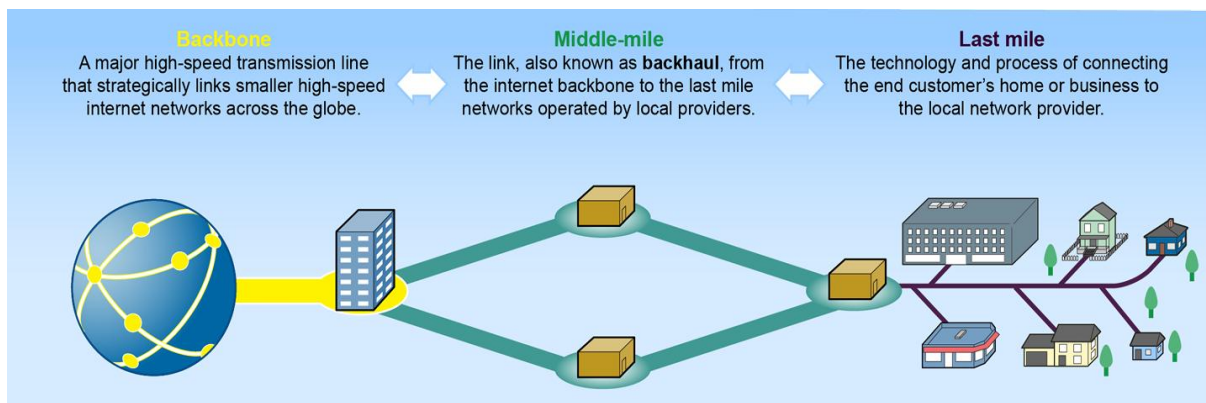
Η προτεινόμενη λύση για τη μείωση του ψηφιακού χάσματος και την αύξηση του βιοτικού επιπέδου των ανθρώπων που ζουν σε αυτές τις περιοχές είναι η ανάπτυξη ή η επέκταση των τηλεπικοινωνιών, καθώς και η υιοθέτηση πρακτικών εφαρμογών που διευκολύνουν την καθημερινότητά τους. Οι τηλεπικοινωνίες διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στη σωστή λειτουργία αγαθών και υπηρεσιών, οι οποίες στα αστικά κέντρα θεωρούνται δεδομένες, όπως για παράδειγμα τα έξυπνα κινητά τηλέφωνα, οι υπολογιστές και υπηρεσίες όπως η τηλεϊατρική, η τηλεεκπαίδευση και οι αυτοματοποιήσεις στον αγροτικό τομέα.

Υπάρχουν τόσο προσιτές οικιακές λύσεις όσο και πιο ακριβές, οι οποίες υπερνικούν εμπόδια όπως η ανεπαρκής ηλεκτροδότηση και τα δύσβατα σημεία, προσφέροντας έτσι μια ποικιλία επιλογών που κάνουν χρήση διαφορετικών τεχνολογιών. Οι τεχνολογίες αυτές εξασφαλίζουν αποτελεσματικά την κάλυψη των αναγκών κάθε εφαρμογής ή υπηρεσίας, λαμβάνοντας υπόψη τα εκάστοτε εμπόδια, είτε είναι φυσικά είτε τεχνικά.

Οι περιοχές αυτές διαθέτουν σημαντικές προοπτικές ανάπτυξης, οι οποίες θα αναλυθούν στη συνέχεια, καθώς και τις δυσκολίες που αντιμετωπίζουν οι κάτοικοί τους [4], [5].

1.2 Τεχνολογίες τηλεπικοινωνιών

Με τον όρο τεχνολογίες ορίζουμε τα πρωτόκολλα και τα συστήματα που είναι υπεύθυνα για την διαχείριση και την μεταφορά δεδομένων. Η μεταφορά δεδομένων μπορεί να γίνει είτε με ενσύρματο είτε με ασύρματο τρόπο. Η τηλεπικοινωνιακές τεχνολογίες έχουν παρουσιάσει ραγδαία εξέλιξη τα τελευταία χρόνια κυρίως όμως σε αναπτυγμένες περιοχές. Υπάρχουν περιοχές όμως όπου οι τηλεπικοινωνίες αντιμετωπίζουν πολλά προβλήματα στην ανάπτυξη τους με αποτέλεσμα η εξέλιξη τους να είναι αργή ή ακόμα και τελείως στάσιμη. Για την καλύτερη κατανόηση ενός τηλεπικοινωνιακού δικτύου υπάρχει ο διαχωρισμός του σε 3 μέρη τα οποία είναι το backbone, middle-mile, last-mile όπου το κάθε ένα περιλαμβάνει τεχνολογίες με σκοπό την μεταφορά της πληροφορίας. Σκοπός είναι η καλύτερη κατανόηση της δομής του δικτύου και η γνώση των τεχνολογιών που αναλύονται στην παρούσα εργασία. Ένα παράδειγμα για την καλύτερη κατανόηση των 3 τμημάτων θα ήταν η αντιστοιχία τους με το οδικό δίκτυο, όπου backbone θα είχε τον ρολό της εθνικής οδού που θα ένωνε 2 μεγάλες πόλεις μεταξύ τους όπου ως χαρακτηριστικό έχει την μεγάλη χωρητικότητα την γρήγορη ταχύτητά και την μεγάλη απόσταση. Middle-mile θα ήταν οι κεντρικοί δρόμοι μιας πόλης και τέλος last-mile θα ήταν οι μικρότεροι δρόμοι που οδηγούν το όχημα στο τελικό προορισμό του. Εμείς το όχημα το βλέπουμε σαν την πληροφορία που θα ξεκινήσει από το σημείο Α στο σημείο Β και ζητούμενο είναι η πληροφορία να φτάσει το συντομότερο και χωρίς καμία μεταβολή στη δομή της [6].



Εικόνα 1 Αναπαράσταση της δομής ενός πλήρη δικτύου [7]

1.3 Backbone

Ο φυσικός διαχωρισμός ενός δικτύου τηλεπικοινωνιών βασίζεται σε 3 διακριτά τμήματα από τα οποία το κάθε ένα έχει σημαντικά στοιχεία με σκοπό την σωστή λειτουργία του συστήματος επικοινωνιών. Αν ένα από τα 3 τμήματα δεν λειτουργεί σωστά αυτό συνεπάγεται με την μη ολοκλήρωση των πληροφοριών από το σημείο Α στο σημείο Β.

Το backbone δίκτυο είναι η κεντρική δίοδος κάθε σύγχρονης τηλεπικοινωνιακής υποδομής, είναι μια υψηλής χωρητικότητας δομή που συνδέει τοπικά δίκτυα, περιφερειακούς και διεθνείς κόμβους αναλαμβάνοντας τη μεταφορά μεγαλύτερων όγκων δεδομένων. Στην πράξη, ο κορμός αυτός δεν είναι απλώς ένα τεχνικό κομμάτι δικτύου, είναι η βασική προϋπόθεση ώστε υπηρεσίες όπως για παράδειγμα το cloud, οι διάφορες εφαρμογές και πλατφόρμες που χρησιμοποιούνται για την έξυπνη γεωργία την υγεία και την εκπαίδευση, αλλά και ολόκληρα οικοσυστήματα που βασίζονται σε ψηφιακές υπηρεσίες να λειτουργούν με αξιοπιστία και αποδεκτή απόδοση. Ένα καλά σχεδιασμένο backbone προσφέρει χωρητικότητα πολύ μεγαλύτερη από τα τμήματα πρόσβασης, χαμηλή καθυστέρηση και μηχανισμούς

πλεονασμού που εξασφαλίζουν την απρόσκοπτη λειτουργία και την διαθεσιμότητα των υπηρεσιών ακόμη και όταν προκύπτουν βλάβες ή αποκοπές σε μία διαδρομή[8].

Η λογική σχεδίαση του backbone στηρίζεται σε ιεραρχία και σε στρατηγική τοποθέτηση κόμβων. Ο κορμός συγκεντρώνει τον κύριο όγκο των πληροφοριών και είναι υπεύθυνος για τις μακρινές διασυνδέσεις. Ως κυρία τεχνολογία της υλοποίησης είναι οι οπτικές ίνες και οι ασύρματες ζεύξεις και οι δορυφορικές επικοινωνίες.

Η επίδραση του backbone στην απόδοση ενός δικτύου κρίνεται από τη συνολική του χωρητικότητα, τη δυνατότητα διατήρησης χαμηλής καθυστέρησης και το επίπεδο αξιοπιστίας που εξασφαλίζει. Για να επιτευχθεί αυτό, οι φορείς που σχεδιάζουν και διαχειρίζονται τον κορμό πρέπει να κάνουν σωστό σχεδιασμό, προνοώντας για μελλοντική αύξηση στην ζήτηση υπηρεσιών και να εφαρμόζουν στρατηγικές προσωρινής αποθήκευσης δεδομένων και τοπικής διανομής περιεχομένου, έτσι ώστε να μειώνεται η ανάγκη επαναλαμβανόμενων μεταφορών δεδομένων προς μακρινούς κόμβους. Θα πρέπει να υπάρχει πλεονασμός όπου θα υλοποιείται με πολλαπλές ανεξάρτητες διαδρομές και εφεδρικό εξοπλισμό, ενώ παράλληλα αιοποιείτε η τεχνολογία Multi-Protocol Label Switching (MPLS) όπου είναι μια τεχνική που προωθεί πακέτα δεδομένων βάσει σύντομων ετικετών, αντί για αναζητήσεις διευθύνσεων IP, δημιουργώντας προκαθορισμένες και αποδοτικές διαδρομές μέσα στο δίκτυο. Ακόμα μηχανισμοί παρακολούθησης εξασφαλίζουν γρήγορη ανακατεύθυνση και αποκατάσταση όταν χρειάζεται.

Η σημασία του backbone γίνεται πιο σαφής αν σκεφτούμε τις απομακρυσμένες και αγροτικές περιοχές. Για αυτές, ο κορμός είναι μια θεμελιώδης υποδομή. Όταν το backbone προσεγγίζει περιφερειακά κέντρα, ανοίγει ο δρόμος για την επέκταση των τοπικών δικτύων, για την προσωρινή αποθήκευση δεδομένων και μικρότερα data centers που μειώνουν την καθυστέρηση και το λειτουργικό κόστος. Αυτό με τη σειρά του καθιστά δυνατή την παροχή τηλεϊατρικής, εξ αποστάσεως εκπαίδευσης, ηλεκτρονικών υπηρεσιών και διαθεσιμότητα για συστήματα έξυπνης γεωργίας σε κοινότητες με χαμηλή πυκνότητα πληθυσμού, χωρίς η κάθε μία από αυτές τις υπηρεσίες να εξαρτάται από μακρινή απόσταση δρομολόγησης. Σε περιοχές όπου η εγκατάσταση οπτικής ίνας δεν είναι πρακτική λόγω κόστους ή γεωγραφικής δυσκολίας, ο κορμός λειτουργεί ως σημείο συγκέντρωσης για υβριδικές λύσεις πρόσβασης που περιλαμβάνουν δορυφόρους και επίγειες μικροκυψέλες, προσφέροντας έτσι συνδεσιμότητα μέσω εναλλακτικών διαδρομών προς τον κεντρικό κορμό.

Η ύπαρξη ισχυρού backbone βελτιώνει την οικονομική βιωσιμότητα της σύνδεσης των απομακρυσμένων περιοχών: μειώνει το κόστος ανά συνδρομητή, αυξάνει την αξιοπιστία υπηρεσιών και διευκολύνει την ανάπτυξη τοπικών εφαρμογών και επιχειρηματικών μοντέλων. Επιπλέον, με την τοπική αποθήκευση περιεχομένου και υπηρεσιών μειώνεται η εξάρτηση από διεθνείς κόμβους, γεγονός που βελτιώνει την εμπειρία του τελικού χρήστη και ενισχύει τη δυνατότητα δημιουργίας συνεργασιών μεταξύ δημόσιου και ιδιωτικού τομέα για στοχευμένες επενδύσεις [8], [9].

1.3.1 Οπτικές ίνες

Ένα backbone οπτικών ινών αποτελεί ένα δίκτυο υψηλής χωρητικότητας και απόδοσης το οποίο συνδέει τα αστικά κέντρα και τις απομακρυσμένες και αγροτικές περιοχές της χώρας, συνδυάζοντας υποβρύχια και χερσαία καλώδια και χρησιμοποιώντας τεχνολογία Dense Wavelength Division Multiplexing (DWDM) όπου αυτό σημαίνει υποστήριξη πολλαπλών καναλιών που χρησιμοποιούνται για μεταφορά δεδομένων μέσω μιας οπτικής ίνας. Αυτό επιτυγχάνεται με την χρήση διαφορετικού μήκους κύματος για κάθε κανάλι, με χωρητικότητα της τάξης των 80–100 Gbps ώστε να στηρίζει τις ανάγκες μετάδοσης

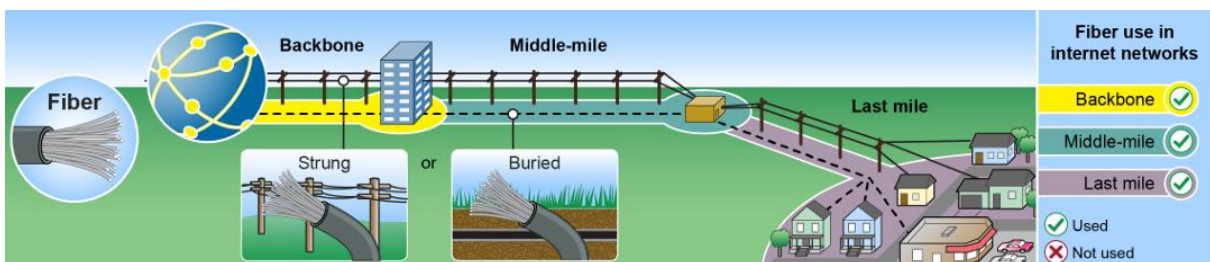
και τη μελλοντική κλιμάκωση του δικτύου. Σκοπός του σχεδίου είναι να συμπληρώσει την υπάρχουσα ιδιωτική υποδομή, να μειώσει το αρχικό κόστος επένδυσης για τους παρόχους.

Η υιοθέτηση οπτικών ινών ως backbone σε αγροτικές περιοχές προσφέρει σαφή τεχνικά πλεονεκτήματα. Αρχικά προσφέρει υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων και την δυνατότητα κλιμάκωσης του δικτύου, εξασφαλίζοντας έτσι ότι η υποδομή μπορεί να υποστηρίξει αυξανόμενη ζήτηση και μελλοντικές τεχνολογικές εξελίξεις, ενώ το DWDM επιτρέπει την αποτελεσματική διαχείριση πολλαπλών καναλιών μεταφοράς στο ίδιο φυσικό μέσο. Ένα εθνικό backbone δίκτυο μπορεί, σε βάθος χρόνου, να μειώσει το κόστος για τους ιδιωτικούς παρόχους, καθώς προσφέρει έτοιμη χωρητικότητα προς μίσθωση αντί να απαιτείται η επένδυση σε εκτεταμένες ιδιόκτητες συνδέσεις. Με αυτόν τον τρόπο, καθίσταται οικονομικά βιώσιμη η ανάπτυξη και παροχή υπηρεσιών σε αγροτικές περιοχές που διαφορετικά θα παρέμεναν μη εμπορικά ελκυστικές. Η οπτική είναι μπορεί να χρησιμοποιηθεί και στο κομμάτι του middle-mile και last-mile [10].

Τοπικά προβλήματα, όπως η ελλιπής παροχή ενέργειας, η δύσκολη οδική πρόσβαση και οι γενικότερες υποδομικές ελλείψεις, αυξάνουν το κόστος και την πολυπλοκότητα παροχής τελικών υπηρεσιών, ακόμη και όταν το δίκτυο διαθέτει μεσοπρόθεσμα ή μακροπρόθεσμα την απαιτούμενη τεχνική ικανότητα. Επιπλέον, οργανωτικοί και διοικητικοί περιορισμοί του φορέα διαχείρισης όπως η έλλειψη εξειδικευμένου προσωπικού, η ανεπαρκής εσωτερική συνεργασία και η μη βέλτιστη αξιοποίηση των εσόδων κ.λ.π. δυσχεραίνουν την αποτελεσματική εμπορική λειτουργία και περιορίζουν τη δυνατότητα παροχής υπηρεσιών με τρόπο που να μεγιστοποιεί την οικονομική αξία της επένδυσης [11].

Σε ρυθμιστικό επίπεδο, η προώθηση πολιτικών ανοικτής πρόσβασης και κοινής χρήσης υποδομών (open network provisioning και infrastructure sharing) είναι απαραίτητη, ώστε να διασφαλιστεί δίκαιη και αποδοτική πρόσβαση σε κρίσιμους κόμβους, να ενισχυθεί ο ανταγωνισμός και να μειωθούν τα εμπόδια εισόδου για νέους παρόχους που επιθυμούν να αξιοποιήσουν το backbone. Παράλληλα, η στοχευμένη εμπορική στρατηγική πρέπει να επικεντρώνεται αρχικά σε μεγάλους παρόχους υπηρεσιών διαδικτύου (ISPs), ώστε να επιτευχθεί ταχεία εμπορική απόδοση και να επιταχυνθεί γρηγορότερα η εξάπλωση των υπηρεσιών στις αγροτικές περιοχές .

Η ενδυνάμωση του φορέα διαχείρισης μέσω πρόσληψης εξειδικευμένου προσωπικού και βελτίωσης της εσωτερικής οργάνωσης είναι κρίσιμη για την επαγγελματική και εμπορική διαχείριση, την ορθή εκτέλεση έργων, την συντήρηση του υπάρχον εξοπλισμού και τη βέλτιστη αξιοποίηση των πόρων του backbone προς όλους [12], [13].



Εικόνα 2 Χρήση οπτικής ίνας [7]

1.3.2 Δορυφορικά δίκτυα

Η χρήση δορυφορικών δικτύων ως backbone για την παροχή ευρυζωνικών υπηρεσιών σε αγροτικές και απομακρυσμένες περιοχές αποτελεί μια πολύ καλή επιλογή ειδικά για περιοχές που είναι δυσπρόσιτες. Το δορυφορικό backbone λειτουργεί με σκοπό να συνδέσει τους κεντρικούς κόμβους που βρίσκονται

σε αγροτικές και απομακρυσμένες περιοχές με άλλους απομακρυσμένους κόμβους ή απευθείας με το διαδίκτυο μέσω δορυφορικών σταθμών όπου έχουν τον ρόλο του gateway και δορυφορικών ζεύξεων. Υπάρχουν τρεις βασικές κατηγορίες που σχετίζονται με την τροχιά όπου ακολουθεί ένας δορυφόρος [14]:

- Geostationary High Throughput Satellites (GEO HTS): μεγάλοι γεωστατικοί δορυφόροι που χρησιμοποιούν πολλαπλά spot beams για τη μεγιστοποίηση της χωρητικότητας. Τα spot beams είναι στενές, στοχευμένες δέσμες εκπομπής και λήψης που καλύπτουν μικρές γεωγραφικές περιοχές, επιτρέποντας την επαναχρησιμοποίηση συχνοτήτων σε διαφορετικές περιοχές. Με αυτόν τον τρόπο, ο ίδιος δορυφόρος μπορεί να παρέχει πολύ υψηλότερη συνολική χωρητικότητα σε σχέση με τους παραδοσιακούς δορυφόρους ευρείας δέσμης. Οι GEO HTS λειτουργούν ως σταθεροί κόμβοι με ευρεία γεωγραφική κάλυψη και υψηλή ολική χωρητικότητα ανά δορυφόρο, αποτελώντας βασικό στοιχείο για τη δορυφορική ευρυζωνικότητα σε αγροτικές και απομονωμένες περιοχές.
- Medium Earth Orbit (MEO): δορυφόροι σε ενδιάμεσες τροχιές προσφέρουν μικρότερη καθυστέρηση και ισορροπία ανάμεσα σε αριθμό δορυφόρων και κάλυψη, ιδανικοί για backhaul αλλά και για middle-mile δίκτυα.
- Low Earth Orbit (LEO): πολυσύνθετες συστοιχίες πολλών μικρών δορυφόρων, με πολύ χαμηλή καθυστέρηση και μικρότερη ανάγκη ισχυρών τερματικών, αλλά απαιτούν μεγάλο πλήθος για την διαχείριση του δικτύου μιας περιοχής [14], [15]

Στην πράξη δύο μοντέλα χρήσης εμφανίζονται συχνά ένα είναι το Direct-to-Home (DTH) όπου ο δορυφόρος συνδέει απευθείας τα νοικοκυριά και το community-aggregator όπου ο δορυφόρος παρέχει middle-mile και backhaul επικοινωνία σε ένα τοπικό ασύρματο ή ενσύρματο δίκτυο που διανέμει την πρόσβαση στους τελικούς χρήστες. Ως backbone ο δορυφόρος μπορεί να εξυπηρετήσει είτε αποκλειστικά την σύνδεση μεταξύ τοπικών κόμβων και των gateways είτε να λειτουργήσει συμπληρωματικά σε υβριδικές λύσεις που συνδυάζουν δορυφόρο και επίγεια μέσα [16], [17].

Σε μια υβριδική αρχιτεκτονική όπου ο δορυφορικός σύνδεσμος λειτουργεί ως backhaul, ένα Very Small Aperture Terminals (VSAT) δίκτυο παρέχει την τοπική πρόσβαση συνδέοντας πολλαπλά VSATs με ένα ή περισσότερα επίγεια gateway, τα VSAT τερματικά εγκαθίστανται σε σπίτια ή σε σημεία πρόσβασης ή σε κεραιές και λαμβάνουν downstream μέσω spot-beams Αυτή η λύση επιτρέπει γρήγορη ανάπτυξη κάλυψης σε απομακρυσμένες περιοχές, ευέλικτη κατανομή πόρων για τοπική διανομή του δικτύου.

Τα δορυφορικά δίκτυα έχουν τα εξής πλεονεκτήματα έναντι των άλλων λύσεων:

- Ευρεία κάλυψη και εύκολη ανάπτυξη. Τα δορυφορικά δίκτυα προσφέρουν άμεση και παντού συνδεσιμότητα σε απομακρυσμένες ή δυσπρόσιτες περιοχές χωρίς ανάγκη εκτεταμένων επίγειων υποδομών.
- Υψηλή χωρητικότητα και υψηλές ταχύτητες.
- Ευελιξία σε εφεδρικές διαδρομές. Τα δορυφορικά δίκτυα λειτουργούν αποτελεσματικά ως ενδιάμεσος σύνδεσμος για τοπικά δίκτυα και προσφέρουν διαθεσιμότητα και εφεδρική λύση όταν η χερσαία υποδομή είναι ανεπαρκής ή αποσυνδέεται.

Τα δορυφορικά δίκτυα έχουν πολύ μεγαλύτερη οικονομική επιβάρυνση στα πρώτα έσοδα που αφορούν την επένδυση για τους δορυφόρους και την τοποθέτησή τους σε τροχιά όμως μακροπρόθεσμα τα λειτουργικά τους έξοδα είναι χαμηλά. Για λύσεις που αφορούν περιοχές που είναι δυσπρόσιτες και

απομακρυσμένες τα δορυφορικά δίκτυα είναι συνολικά πιο οικονομική λύση από την κατασκευή επίγειων υποδομών [17].

1.3.3 Κινητά δίκτυα 3G , 4G , LTE , 5G

Τα κινητά δίκτυα είναι ένας πολύ σημαντικός παράγοντας στην υποστήριξη των απομακρυσμένων περιοχών και συγκεκριμένα α κινητά δίκτυα είναι συστήματα επικοινωνίας που επιτρέπουν την ασύρματη μετάδοση φωνής, δεδομένων και πολυμέσων μεταξύ κινητών χρηστών και του διαδικτύου, μέσω σταθμών βάσης δηλαδή τις κεραιές, ραδιοπρόσβασης, αποτελούν κύρια υποδομή για την παροχή ευρυζωνικών υπηρεσιών σε αστικές αλλά και σε αγροτικές περιοχές όπου δεν υπάρχει κάποια άλλη υποδομή όπως για παράδειγμα υποδομή πρόσβασης στο διαδίκτυο μέσω οπτικών ινών.

Οι κύριες γενιές κινητών δικτύων που χρησιμοποιούνται σήμερα είναι η 3G, η 4G (LTE) και η 5G, με την κάθε γενιά να εισάγει τεχνολογικές βελτιώσεις σε ρυθμούς μετάδοσης, φασματική αποδοτικότητα, μείωση της καθυστέρησης και την ικανότητα εξυπηρέτησης περισσότερων συσκευών. Η γενιά 3G αποτέλεσε τεχνολογία ευρείας κάλυψης για κινητές συνδέσεις δεδομένων και αποτελεί ακόμα σημαντικό ρόλο σε υποανάπτυκτες περιοχές οι οποίες τεχνολογικά προχωρούν πολύ πιο αργά από τις ανεπτυγμένες περιοχές , η 4G γενιά αύξησε σημαντικά το εύρος ζώνης και την ποιότητα εμπειρίας των τελικών χρηστών με πολύ πιο ομαλή εμπειρία χρήσης, και η γενιά 5G εισάγει αρχιτεκτονικές χαμηλής καθυστέρησης, υποστήριξη μαζικών συσκευών και πολυμορφικές υπηρεσίες με υψηλές απαιτήσεις όπως για παράδειγμα είναι η εφαρμογές πραγματικού χρόνου και έχουν ευρύ χρήση ως backbone υψηλής χωρητικότητας και ευελιξίας σε αναπτυγμένες περιοχές [18].

Τα κινητά δίκτυα μπορούν να λειτουργήσουν και ως δίκτυα κορμού , όταν οι συνδέσεις μεταξύ των σταθμών βάσης και του παρόχου μεταφέρουν την κίνηση των τελικών χρηστών προς τον πυρήνα του δικτύου. Με αυτόν τον τρόπο, το δίκτυο Radio Access Network (RAN) συνδέεται με τις σταθερές υποδομές του παρόχου. Για τη διασύνδεση αυτή μπορεί να χρησιμοποιήσει επιπλέον τεχνολογίες backbone όπως οπτικές ίνες, μικροκυματικές ζεύξεις και μισθωμένες γραμμές , οι οποίες εξασφαλίζουν την απαιτούμενη χωρητικότητα, αξιοπιστία και ποιότητα υπηρεσίας που χρειάζονται για την κάλυψη μιας γεωγραφικής περιοχής.

Σε αγροτικές περιοχές, όπου το ηλεκτρικό δίκτυο και οι βιώσιμες λύσεις ενέργειας είναι κρίσιμες για τη λειτουργία των σταθμών πρόσβασης, ο σωστός σχεδιασμός του backbone είναι καθοριστικός για την επιτυχία της παροχής ευρυζωνικής συνδεσιμότητας. Για τον λόγο αυτό θα πρέπει να υπάρχει σωστή μελέτη και σχεδιασμός με σκοπό να υπάρχει πρόβλεψη για βλάβες, εναλλακτικές διαδρομές, χρήση βιώσιμων πηγών ενέργειας και εναλλακτικές μέθοδοι για την παροχή ενέργειας όπως για παράδειγμα ηλιακά πάνελ ή γεννήτριες.

Ορισμένα σημαντικά στοιχεία είναι τα εξής

- **3G:** Η τεχνολογία 3G αποτέλεσε την πρώτη ευρεία γενιά που επέτρεψε πρακτικά την μετάδοση δεδομένων σε κινητούς χρήστες και για το λόγο αυτό το backbone βασίστηκε σε συνδυασμούς μικροκυματικών συνδέσεων και, όπου υπήρχε διαθεσιμότητα έκανε και χρήση οπτικών ινών οι απαιτήσεις εύρους ζώνης ήταν πολύ χαμηλότερες σε σύγκριση με την σημερινή ζήτηση, γεγονός που επέτρεψε την ευρύτερη χρήση ασύρματων συνδέσεων για backbone και middle-mile σε απομακρυσμένες περιοχές με περιορισμένη υποδομή.
- **4G:** Η εισαγωγή του 4G/LTE αύξησε σημαντικά τις απαιτήσεις σε χωρητικότητα και εισήγαγε την χρήση Quality of Service (QoS) , οδηγώντας σε μεγαλύτερη εξάρτηση από οπτικές ίνες και μικροκυματικές ζεύξεις για το backhaul οι πάροχοι συνδύασαν ιδιωτικά δίκτυα με μισθωμένες

γραμμές και ασύρματες λύσεις για να καλύψουν την αυξημένη κίνηση και τις εγγυήσεις για μείωση των καθυστερήσεων, καθιστώντας το backbone κρίσιμο στοιχείο για την παροχή ευρυζωνικής εμπειρίας σε αγροτικές και απομακρυσμένες κοινότητες [18], [19].

- **5G:** Το 5G ενισχύει τον ρόλο των κινητών δικτύων ως backbone, χάρη στην πυκνότερη εγκατάσταση μικρών κυψελών και στη χρήση υψηλών συχνοτήτων, όπως οι ζώνες mmWave. Οι συχνότητες αυτές απαιτούν συνδέσεις middle-mile υψηλής χωρητικότητας, οι οποίες υλοποιούνται κυρίως μέσω οπτικών ινών ή μικροκυματικών ζεύξεων (mmWave). Παράλληλα, το 5G εισάγει μεταβατικές αρχιτεκτονικές, όπως το edge computing και το transport slicing που επιτρέπουν τη δημιουργία πολλαπλών, εικονικών απομονωμένων διαδρομών για την μεταφορά των δεδομένων μέσα στο ίδιο δίκτυο, ώστε κάθε υπηρεσία να διαθέτει προσαρμοσμένο εύρος ζώνης μικρότερη καθυστέρηση και καλύτερη ποιότητα υπηρεσιών, σε εφαρμογές που απαιτούν εύλεκτο δίκτυο με χαμηλή καθυστέρηση και υψηλή αξιοπιστία. Σε αγροτικές περιοχές, η ενεργειακή απόδοση και η βιωσιμότητα της παροχής ισχύος αποτελούν κρίσιμους παράγοντες για τη σταθερή λειτουργία του backbone και την παροχή υπηρεσιών πραγματικού χρόνου και μεγάλης κλίμακας δεδομένων [20], [21].

1.3.4 Ασύρματες ζεύξεις point to point

Μια ακόμα τεχνολογία σύνδεσης είναι οι ασύρματες ζεύξεις point to point (PtP) οι οποίες μπορούν να είναι είτε microwave είτε millimeter-wave και έχουν ευρεία χρήση σε περιοχές όπου δεν έχουν αλλού είδους υποδομή με βασικό πλεονέκτημα το χαμηλό κόστος εγκατάστασης συγκριτικά με ένα δίκτυο οπτικών ινών. Οι ασύρματες ζεύξεις PtP χρησιμοποιούνται για την άμεση σύνδεση δύο κεραιών, με στόχο τη σταθερή και υψηλής απόδοσης μεταφορά δεδομένων μέσα στο δίκτυο. Χρησιμοποιούνται συχνά για να παρέχουν backbone επικοινωνία μεταξύ σταθμών βάσης, κόμβων δικτύου και εγκαταστάσεων παρόχων, ιδιαίτερα όταν η εγκατάσταση ή η διαθεσιμότητα οπτικών ινών δεν είναι πρακτική. Αυτές οι ζεύξεις σχεδιάζονται ώστε να προσφέρουν εγγυημένη χωρητικότητα και χαμηλή καθυστέρηση, διασφαλίζοντας σταθερή ποιότητα υπηρεσίας. Παράλληλα, οι ζεύξεις συνδυάζουν όλα τα απαραίτητα στοιχεία για να λειτουργούν σωστά και αξιόπιστα. Ελέγχουν πώς μεταδίδεται το σήμα, φροντίζουν να μην χάνονται δεδομένα και διασφαλίζουν ότι η σύνδεση παραμένει σταθερή και ασφαλής. Αυτά γίνονται μέσα σε έναν πλαίσιο σχεδιασμού όπου ο σκοπός είναι το δίκτυο να αντέχει στις δύσκολες συνθήκες, προσφέροντας σταθερή και αξιόπιστη επικοινωνία.

Η αρχιτεκτονική και τα κύρια στοιχεία μιας point to point ασύρματης ζεύξης περιλαμβάνουν παθητικά και ενεργά υποσυστήματα: κεραιές κατευθυντικού τύπου, ραδιοσυσκευές που υποστηρίζουν συγκεκριμένα φάσματα και πρωτόκολλα, υπολογισμό link budget για την εξασφάλιση λόγων Signal to Noise Ratio (SNR) και Multiple Input Multiple Output (MIMO) πολυπλεξία όπου εφαρμόζεται, καθώς και φυσική στεγανοποίηση και τροφοδοσία για λειτουργία σε απομακρυσμένες ή αγροτικές περιοχές. Ο σχεδιασμός link budget καθορίζει την απαιτούμενη ισχύ εκπομπής, το κέρδος κεραίας, τις απώλειες περιβάλλοντος και την ευαισθησία λήψης, ενώ παράμετροι όπως η εξασθένηση, η πολλαπλές διαδρομές, οι παρεμβολές και η οπτική επαφή των κεραιών (Line of Sight - LOS) είναι καθοριστικές για την επιλογή μεταξύ μικροκυματικών συχνοτήτων ή mmWave λύσεων. Οι ζεύξεις PtP χρησιμοποιούν ειδικές τεχνικές για να κρατούν σταθερή τη ροή των δεδομένων, ακόμη και όταν αλλάζουν οι συνθήκες του σήματος ή ο καιρός. Αυτό περιλαμβάνει προσαρμογή της μετάδοσης ανάλογα με το κανάλι και μηχανισμούς επιβεβαίωσης ότι τα δεδομένα φτάνουν σωστά στην απέναντι κεραία.

Οι ασύρματες μικροκυματικές ζεύξεις χρησιμοποιούν μικροκυματικά φάσματα για την άμεση σύνδεση δύο σταθερών κεραιών με σκοπό τη μεταφορά μεγάλων ποσοτήτων δεδομένων. Είναι μια τεχνολογία που καλύπτει αποστάσεις από μερικές εκατοντάδες μέτρα έως δεκάδες χιλιόμετρα, παρέχοντας συνεπή throughput και υψηλή διαθεσιμότητα.

Η λειτουργία τους βασίζεται στην επίτευξη οπτικής επαφής μεταξύ των δύο τελικών σημείων, με τη χρήση κατευθυντικών κεραιών υψηλού κέρδους και σε εξοπλισμού που διαχειρίζεται φάσμα, διαμόρφωση και πρωτόκολλα μεταφοράς ώστε να εξασφαλίζεται σταθερό οριακό SNR και προβλέψιμη απόδοση. Ο σχεδιασμός περιλαμβάνει link-budget ανάλυση για τον υπολογισμό της απαιτούμενης ισχύος εκπομπής, του κέρδους κεραίας, των απωλειών διάδοσης και της ευαισθησίας λήψης, ενώ οι σύγχρονες υλοποιήσεις αξιοποιούν MIMO τεχνικές και μηχανισμούς ανίχνευσης λαθών και προσαρμογής για τη διατήρηση του throughput υπό μεταβαλλόμενες περιβαλλοντικές συνθήκες.

Σε πρακτικό επίπεδο, οι μικροκυματικές ζεύξεις χρησιμοποιούνται για σταθμούς βάσης και κόμβους παρόχων για σύνδεση απομακρυσμένων εγκαταστάσεων, παρέχοντας γρήγορη ανάπτυξη και χαμηλότερο αρχικό κόστος σε σχέση με την λύση των οπτικών ινών. Η επιλογή φάσματος, εξοπλισμού και αρχιτεκτονικής εξαρτάται από το απαιτούμενο εύρος ζώνης, την απόσταση και τις συνθήκες LOS [22], [23].

Οι mmWave ζεύξεις αναφέρονται σε PtP ή point to multipoint (PtMP) ασύρματες συνδέσεις που λειτουργούν σε φάσματα υψηλής συχνότητας από δεκάδες έως 100 GHz και σχεδιάζονται για μεταφορά πολύ υψηλών ρυθμών δεδομένων σε μικρές έως μεσαίες αποστάσεις. Το mmWave είναι μια τεχνολογική λύση που αξιοποιεί την αφθονία φάσματος σε υψηλότερα εύρη, προσφέροντας μεγάλο εύρος ζώνης και χαμηλή καθυστέρηση.

Η λειτουργία των mmWave ζεύξεων βασίζεται σε κατευθυντικές κεραιές και τεχνικές δέσμης (beamforming) όπου το σήμα πηγαίνει στενευμένα προς μια κατεύθυνση, ώστε να ξεπερνιούνται οι απώλειες και τα εμπόδια που υπάρχουν στις υψηλές συχνότητες. Χρησιμοποιούν στενά κανάλια με μεγάλο συνολικό εύρος ζώνης για να μεταφέρουν πολλά δεδομένα. Στον σχεδιασμό τους λαμβάνονται υπόψη οι μεγαλύτερες απώλειες λόγω απόστασης, η ανάγκη για οπτική επαφή (LOS) και οι καιρικές συνθήκες. Για να διασφαλιστεί σταθερή ροή δεδομένων και αξιοπιστία, οι ζεύξεις αυτές ενσωματώνουν προσαρμοστική μετάδοση, δυναμικό έλεγχο δέσμης, MIMO και μηχανισμούς αυτόματης επαναδρομολόγησης ή εφεδρείας. Οι λύσεις mmWave απαιτούν προσεκτικό σχεδιασμό της θέσης των σταθμών και της τροφοδοσίας τους, σωστή διαχείριση του φάσματος και ανθεκτικότητα σε περιπτώσεις απώλειας οπτικής επαφής [23].

1.4 Middle-mile

Το επόμενο τμήμα του φυσικού διαχωρισμού του δικτύου μετά το backbone είναι το middle-mile. Το middle-mile είναι το κομμάτι της υποδομής που συνδέει τα τοπικά δίκτυα και τους παρόχους με τον εθνικό και διεθνή κορμό του διαδικτύου, προσφέροντας υψηλής χωρητικότητας διαύλους μεταφοράς δεδομένων χωρίς να φτάνει απευθείας έως το σπίτι του τελικού χρήστη. Πρόκειται για υποδομές που συγκεντρώνουν και μεταφέρουν κίνηση μεταξύ των τοπικών δικτύων. Περιλαμβάνουν πολλές τεχνολογίες ώστε να υπηρετούν πολλαπλούς παρόχους προσφέροντας διαφορετικές λύσεις ανάλογα με την γεωγραφική περίπτωση και κατανομή μιας περιοχής και ο σκοπός είναι η γρήγορη και αξιόπιστη μεταφορά δεδομένων ενώ ταυτόχρονα παρέχουν εφεδρικές διαδρομές για ανθεκτικότητα στο δίκτυο.

Η λειτουργία του middle-mile έχει οικονομικό και τεχνικό ρόλο, μειώνει το κόστος επένδυσης για τοπικούς παρόχους, αυξάνει την οικονομική βιωσιμότητα της σύνδεσης σε απομακρυσμένες και αγροτικές περιοχές και επιτρέπει την κλιμάκωση της χωρητικότητας καθώς το δίκτυο επεκτείνεται, με

αποτέλεσμα χαμηλότερο κόστος ανά συνδρομητή και μεγαλύτερη ανταγωνιστικότητα στην αγορά πρόσβασης. Το middle-mile δίκτυο μπορεί να κάνει και αυτό χρήση οπτικών ινών και τεχνολογιών που χρησιμοποιούνται και στο τμήμα του backbone [24], [25].

1.4.1 TV White Spaces & Multi-hop

Τα δίκτυα TV White Space (TVWS) είναι πολύ σημαντικά για τις αγροτικές περιοχές. Συγκεκριμένα τα TVWS δίκτυα είναι τα μη χρησιμοποιημένα τμήματα φάσματος μέσα στις ζώνες συχνοτήτων που προορίζονται για την τηλεοπτική εκπομπή, δηλαδή είναι κανάλια που δεν μεταδίδουν σήμα σε μια δεδομένη περιοχή, και που μπορούν να αξιοποιηθούν για ασύρματες υπηρεσίες χωρίς να παρεμβαίνουν στις υπάρχουσες τηλεοπτικές μεταδόσεις σήματος. Η ιδέα βασίζεται στην ευελιξία της χωρικής και χρονικής κατανομής του φάσματος όπου τα σημεία που δεν έχουν ενεργή εκπομπή παραμένουν διαθέσιμα και ονομάζονται «λευκά σημεία» και μπορούν να φιλοξενήσουν άλλες επικοινωνιακές εφαρμογές υπό όρους προστασίας των καναλιών πλησίον τους με στόχο να μην δημιουργούν κανένα είδος παρεμβολής. Για την χρήση των δικτύων TVWS γίνεται έμφαση στους μηχανισμούς ανίχνευσης και διαχείρισης αυτών των λευκών σημείων για ασφαλή συνύπαρξη με το τηλεοπτικό σήμα.

Η αξιοποίηση των TVWS βασίζεται σε τεχνολογίες δυναμικής πρόσβασης στο φάσμα, οι οποίες συνδυάζουν γεωγραφική πληροφόρηση, βάσεις δεδομένων με τις διαθέσιμες συχνότητες και τοπική ανίχνευση σήματος. Με αυτόν τον τρόπο εξασφαλίζεται ότι οι συσκευές δεν προκαλούν παρεμβολές στα αδειοδοτημένα τηλεοπτικά κανάλια [26].

Οι Very High Frequency (VHF) και Ultra High Frequency (UHF) ζώνες είναι οι κύριες φασματικές περιοχές που χρησιμοποιούνται για τηλεοπτικές εκπομπές και για την αξιοποίηση των TVWS, η VHF καλύπτει περίπου τις συχνότητες 30–300 MHz και η UHF περίπου τις 300–3000 MHz, με τις τηλεοπτικές υπηρεσίες να κινούνται συνήθως στα ανώτερα τμήματα της VHF και στα χαμηλότερα της UHF. Τα κύρια τεχνικά χαρακτηριστικά που τις καθιστούν κατάλληλες για δικτυακές εφαρμογές είναι η ικανότητα μακρινής διάδοσης και η καλύτερη διείσδυση μέσα από εμπόδια σε σχέση με υψηλότερες συχνότητες, πράγμα που μεταφράζεται σε μεγαλύτερη εμβέλεια ανά πομπό και μειωμένη ανάγκη για πυκνή υποδομή. Σχετικά με την απόδοση, οι VHF δίνουν γενικά μεγαλύτερη εμβέλεια αλλά χαμηλότερο διαθέσιμο εύρος ζώνης ανά κανάλι, ενώ η UHF προσφέρει καλύτερη ισορροπία μεταξύ εύρους και διείσδυσης, επιτρέποντας μεγαλύτερες απαιτήσεις δεδομένων και πιο συμπαγή κέρδη κεραίας. Λειτουργικά, οι ιδιαιτερότητες αυτές επηρεάζουν τον σχεδιασμό συστημάτων TVWS και η επιλογή γίνεται ανάλογα με την επιθυμητή εμβέλεια και την χωρητικότητα που χρειαζόμαστε. Οι ζώνες VHF/UHF, έχουν ευνοϊκά χαρακτηριστικά για την χρησιμοποίησή τους για ασύρματη επικοινωνία και επιπλέον έχουν χαμηλές απαιτήσεις ισχύος. Το σύνολο των χαρακτηριστικών καθιστούν τα TVWS δίκτυα ιδανικά για υπαίθριες και αγροτικές εφαρμογές, για την ανάπτυξη δικτύων ευρείας περιοχής WAN (Wide Area Network) και την παροχή συνδεσιμότητας σε απομακρυσμένες ή αγροτικές περιοχές.

Η τεχνολογία αυτή αντιμετωπίζει και προκλήσεις, όπως η ανάγκη για αξιόπιστες και συνεχώς ενημερωμένες βάσεις δεδομένων για τις διαθέσιμες συχνότητες, ο συντονισμός μεταξύ διαφορετικών παρόχων και ρυθμιστικών αρχών, καθώς και η αποτελεσματική διαχείριση της φασματικής συνύπαρξης σε περιοχές με υψηλή πυκνότητα χρηστών [27].

Ένα δίκτυο που βασίζεται στο TVWS μπορεί να παρέχει ευρυζωνική σύνδεση σε αγροτικές και απομακρυσμένες περιοχές και προσωρινή ενίσχυση τις χωρητικότητας σε πυκνά δίκτυα. Είναι μια οικονομική και αποδοτική λύση για middle-mile λόγω της μεγάλης εμβέλειας των VHF/UHF ζωνών. Αναφορικά με το ρυθμιστικό και το κοινωνικό πλαίσιο, για να αξιοποιηθούν τα TV White Space απαιτούνται σαφείς κανόνες, πρέπει να γίνει πιστοποίηση των συσκευών και συνεργασία μεταξύ

ρυθμιστικών αρχών και παρόχων υπηρεσιών, ώστε τα οφέλη της τεχνολογίας να κατανεμηθούν ευρύτερα χωρίς να θίγονται υπάρχοντες χρήστες του φάσματος.

Τα Multi-hop TVWS δίκτυα σχηματίζουν ένα mesh δίκτυο από κόμβους που μεταφέρουν τα δεδομένα σε πολλαπλά hops, εκμεταλλευόμενα την καλή διάδοση των VHF/UHF ζωνών για να προσφέρουν μεγάλη εμβέλεια χωρίς πυκνή υποδομή. Αυτό το μοντέλο επιτρέπει την κάλυψη απομακρυσμένων και αγροτικών περιοχών, την παροχή middle-mile σε απομονωμένα σημεία και σημαντική αύξηση της χωρητικότητας σε σημεία αιχμής, με μειωμένο κόστος σε σχέση με κυψελοειδή δίκτυα. Η αρχιτεκτονική βασίζεται στην αποκέντρωση της επικοινωνίας, όπου κάθε ενδιάμεσος κόμβος λειτουργεί και ως δρομολογητής για τα επόμενα hops, επιτυγχάνοντας ευέλικτη κάλυψη και ανθεκτικότητα σε βλάβες.

Η ασφαλής και αποδοτική λειτουργία των multi-hop απαιτεί συνδυασμό τεχνικών δηλαδή πρέπει να γίνεται χρήση βάσεων δεδομένων για το «κενό» φάσμα που υπάρχει στην τηλεοπτική εκπομπή σήματος και ο σκοπός είναι να ενημερώνουν εγκαίρως για τα διαθέσιμα κανάλια ανά γεωγραφική θέση. Έπειτα θα πρέπει να γίνεται τοπική ανίχνευση για προστασία από απρόβλεπτες εκπομπές και να γίνεται χρήση δυναμικών πρωτοκόλλων πρόσβασης που επιλέγουν συχνότητες σε πραγματικό χρόνο. Τα πρωτόκολλα δρομολόγησης προσαρμόζονται στη μεταβαλλόμενη διαθεσιμότητα φάσματος, λαμβάνοντας υπόψη την ποιότητα συνδέσεων ανά hop και την πιθανότητα προσωρινής απώλειας καναλιού, ενώ οι μηχανισμοί ελέγχου ισχύος και οι τεχνικές ανίχνευσης μειώνουν τις παρεμβολές στις τηλεοπτικές εκπομπές [28].

1.4.2 Relay stations με UHF πομποδέκτες

Σε αντίθεση με τα TVWS που αξιοποιούν δυναμικά τα αχρησιμοποίητα τμήματα του τηλεοπτικού φάσματος, οι UHF relay ζεύξεις βασίζονται σε σταθερά αδειοδοτημένες συχνότητες της ίδιας μπάντας, λειτουργώντας ως ενδιάμεσοι σταθμοί αναμετάδοσης για τη βελτίωση της κάλυψης και της αξιοπιστίας των ευρυζωνικών υποδομών.

Οι Relay stations με UHF πομποδέκτες λειτουργούν ως ενδιάμεσοι κόμβοι που επεκτείνουν την εμβέλεια και βελτιώνουν την ποιότητα του σήματος σε αγροτικές και απομακρυσμένες περιοχές, χρησιμοποιώντας τα πλεονεκτήματα της UHF ζώνης για αξιόπιστη σύνδεση μεταξύ απομακρυσμένων χρηστών και κεντρικών κόμβων. Το μοντέλο αυτό μειώνει την ανάγκη για εγκατάσταση πλήρων σταθμών βάσης, προσφέροντας οικονομικά αποδοτική κάλυψη σε περιοχές με μικρή πυκνότητα χρηστών, ενώ η χρήση UHF επιτρέπει καλύτερη διείσδυση σε εμπόδια και επάρκεια εύρους ζώνης για middle-mile υπηρεσίες[26], [28].

Κάθε σταθμός αναμετάδοσης μπορεί να λειτουργεί είτε ως ενισχυτής σήματος είτε ως ενδιάμεσος κόμβος δρομολόγησης σε δικτυακές τοπολογίες τύπου multi-hop, όπου τα δεδομένα μεταδίδονται διαδοχικά από κόμβο σε κόμβο μέχρι να φτάσουν στον τελικό προορισμό. Για να διατηρείται σταθερή η ποιότητα της σύνδεσης μέσα από αυτά τα πολλαπλά στάδια μετάδοσης, απαιτούνται ευέλικτα πρωτόκολλα επικοινωνίας στα επίπεδα Medium Access Control (MAC) και Physical Layer (PHY).

Τα πρωτόκολλα αυτά είναι σχεδιασμένα ώστε να προσαρμόζουν δυναμικά την ισχύ εκπομπής, τη διαμόρφωση σήματος και τη χρήση του καναλιού, ανάλογα με την απόσταση, τα εμπόδια και τις παρεμβολές που ανιχνεύονται. Έτσι, το δίκτυο μπορεί να βελτιστοποιεί τη μετάδοση σε πραγματικό χρόνο, αποτρέποντας την υποβάθμιση της ποιότητας και τις παρεμβολές μεταξύ γειτονικών καναλιών.

Η σωστή τοποθέτηση των relay stations που χρησιμοποιούν UHF πομποδέκτες απαιτεί προσεκτική ανάλυση της γεωγραφικής κάλυψης και υπολογισμό του κέρδους σήματος link budget, ώστε να

επιτυγχάνεται ισορροπία ανάμεσα στη μεγάλη εμβέλεια επικοινωνίας και στο διαθέσιμο εύρος ζώνης [28], [29].

1.4.3 C-RAN

Το Cloud Radio Access Network (C-RAN), είναι μια αρχιτεκτονική κινητών δικτύων που διαχωρίζει τη λειτουργία των σταθμών βάσης σε δύο κύρια μέρη τις Remote Radio Heads (RRH) που τοποθετούνται κοντά στους χρήστες και τις κεντρικές μονάδες επεξεργασίας Baseband Units (BBU) οι οποίες βρίσκονται σε ένα απομακρυσμένο εικονικό περιβάλλον (cloud). Ο βασικός στόχος είναι να μειωθεί η πολυπλοκότητα και το κόστος των απομακρυσμένων κόμβων, να επιτευχθεί καλύτερη διαχείριση πόρων μέσω κοινής χρήσης υποδομών και να γίνει δυνατή η ευέλικτη κλιμάκωση και αναβάθμιση υπηρεσιών χρησιμοποιώντας τεχνολογίες εικονικοποίηση (virtualization) και software-defined networking (SDN).

Ο όρος εικονικοποίηση αναφέρεται στην τεχνική που επιτρέπει τη δημιουργία πολλών εικονικών μηχανών ή πόρων πάνω σε έναν φυσικό εξοπλισμό. Με αυτόν τον τρόπο, ένας φυσικός server, ένας χώρος αποθήκευσης ή ένα δίκτυο μπορούν να διαχωριστούν σε ανεξάρτητα τμήματα που λειτουργούν σαν ξεχωριστές μονάδες.

Η εικονικοποίηση δίνει τη δυνατότητα να τρέχουν πολλές εικονικές λειτουργίες δικτύου Virtual Network Functions (VNF) πάνω στην ίδια υπολογιστική υποδομή, μειώνοντας έτσι το κόστος, τον χρόνο ανάπτυξης και αυξάνοντας την ευελιξία για νέες υπηρεσίες.

Ο όρος SDN αναφέρεται σε μια τεχνολογία που επιτρέπει τον πιο ευέλικτο και έξυπνο έλεγχο των δικτύων. Το SDN χωρίζει το δίκτυο σε δύο επίπεδα. Στο επίπεδο ελέγχου (control plane), που παίρνει αποφάσεις για τη δρομολόγηση και τη διαχείριση της κυκλοφορίας, και το επίπεδο δεδομένων (data plane), που εκτελεί αυτές τις αποφάσεις και μεταφέρει τα δεδομένα.

Ο έλεγχος του δικτύου συγκεντρώνεται σε ειδικές μονάδες που ονομάζονται controllers. Αυτές λειτουργούν μέσω λογισμικού και επιτρέπουν στους διαχειριστές να ρυθμίζουν, να παρακολουθούν και να προσαρμόζουν τη λειτουργία του δικτύου γρήγορα και εύκολα, χωρίς να χρειάζονται αλλαγές στο φυσικό εξοπλισμό. Έτσι, το δίκτυο μπορεί να αντιδρά άμεσα σε αλλαγές της κυκλοφορίας, να αυτοματοποιεί ρυθμίσεις και να χρησιμοποιεί πιο αποδοτικά τους διαθέσιμους πόρους.

Όταν το SDN συνδυάζεται με το virtualization, δημιουργείται μια ευέλικτη και αποδοτική αρχιτεκτονική όπως είναι το C-RAN δίκτυο. Σε τέτοια δίκτυα, οι υπολογιστικοί και δικτυακοί πόροι μπορούν να μοιράζονται και να κατανέμονται δυναμικά, βελτιώνοντας την απόδοση, την επεκτασιμότητα και τη συντονισμένη λειτουργία ανάμεσα στους απομακρυσμένους σταθμούς βάσης και το κεντρικό σύστημα.

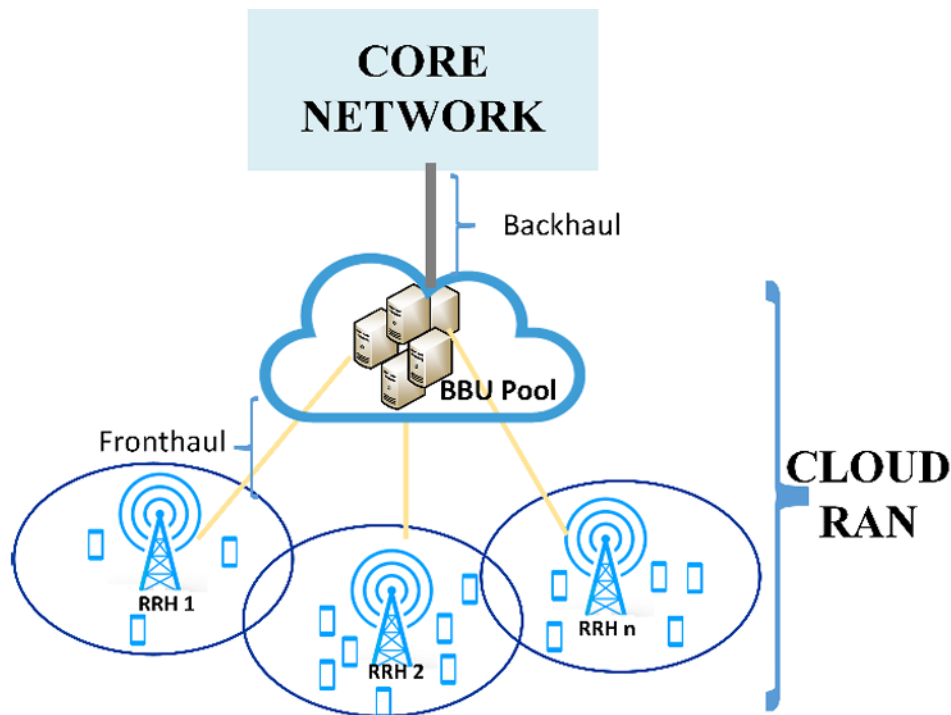
Η αρχιτεκτονική C-RAN βασίζεται σε τρία βασικά χαρακτηριστικά:

- i) συγκέντρωση των επεξεργαστικών πόρων.
- ii) απομακρυσμένη επεξεργασία του ραδιοσήματος
- iii) υψηλής ταχύτητας σύνδεσης, μεταξύ των απομακρυσμένων ραδιοκεφαλών (RRH) και των κεντρικών μονάδων επεξεργασίας βάσης (BBU).

Στην πράξη, τα σήματα που λαμβάνονται από τις κεραίες συλλέγονται από τις RRH, μετατρέπονται σε ψηφιακή μορφή και μεταφέρονται μέσω οπτικών ινών ή άλλων ζευξεων υψηλής χωρητικότητας προς το κεντρικό BBU pool, όπου εκτελούνται οι βασικές λειτουργίες επεξεργασίας του σήματος όπως είναι η κωδικοποίηση και η αποκωδικοποίηση, πολλαπλή πρόσβαση και διαχείριση ραδιοπόρων.

Η συγκεντρωμένη αυτή επεξεργασία επιτρέπει συντονισμό μεταξύ πολλών κυψελών, με αποτέλεσμα τη μείωση των παρεμβολών και τη βελτιστοποίηση της συνολικής απόδοσης του δικτύου σε πραγματικό χρόνο, αξιοποιώντας κοινόχρηστους υπολογιστικούς πόρους.

Σε αγροτικές και απομακρυσμένες περιοχές το C-RAN προσφέρει πρακτικά πλεονεκτήματα αλλά και προκλήσεις, μειώνει την ανάγκη για πλήρως εξοπλισμένους τοπικούς σταθμούς βάσης, επιτρέπει απομακρυσμένες και ευέλικτες αναβαθμίσεις στο δίκτυο και διευκολύνει οικονομικά βιώσιμες λύσεις κάλυψης, όμως απαιτεί αξιόπιστο και χαμηλής καθυστέρησης last-mile καθώς και κατάλληλη διαχείριση πόρων στο cloud για να ανταποκριθεί στις μεταβλητές συνθήκες κίνησης [30].



Εικόνα 3 Αρχιτεκτονική C-RAN [30]

1.5 Last-mile

Το Last mile είναι το τελευταίο τμήμα για την πλήρη περιγραφή της δομής ενός τηλεπικοινωνιακού δικτύου και είναι το κομμάτι που είναι πιο κοντά στον τελικό χρήστη, συγκεκριμένα αναφέρεται στο τελικό τμήμα της διαδρομής της επικοινωνίας που συνδέει την κεντρική υποδομή δικτύου με τους τελικούς χρήστες και καθορίζει την άμεση εμπειρία πρόσβασης στο διαδίκτυο για τα σχολεία τα νοσοκομεία τους αγρότες και το γενικό σύνολο του πληθυσμού.

Στις απομακρυσμένες και αγροτικές περιοχές, το last mile αντιμετωπίζει ιδιαίτερες προκλήσεις όπως χαμηλή πυκνότητα πληθυσμού, μεγάλο κόστος εγκατάστασης ανά χρήστη και δυσπρόσιτες γεωγραφικές περιοχές, γεγονότα που καθιστούν τις εμπορικές επενδύσεις ασύμφορες και κάνουν πιο έντονο τον ψηφιακό αποκλεισμό.

Κεντρικός παράγων επιτυχίας είναι οι πολιτικές και οι οικονομικοί μηχανισμοί στήριξης, η δημόσιες επιδοτήσεις, τα κίνητρα προς παρόχους, καθώς και η συνεργασία δημόσιου-ιδιωτικού τομέα.

Στις αγροτικές και απομακρυσμένες κοινότητες το last mile αποτελεί σημαντικό στάδιο για την ανάπτυξη, αφού κατάλληλα σχεδιασμένες συνδέσεις βελτιώνουν την πρόσβαση στην εκπαίδευση, την υγεία, τις αγροτικές εφαρμογές, μειώνοντας τις ανισότητες και ενισχύοντας την τοπική ανάπτυξη.

Το last-mile περιλαμβάνει ένα σύνολο από τεχνολογίες και πρότυπα που χρησιμοποιούνται για την αποτελεσματική λειτουργία του. Η βασική του λειτουργία είναι να διαμοιράσει σωστά και γρηγορά την πληροφορία την οποία λαμβάνει από τους κεντρικούς κόμβους όπως και να μεταδώσει την πληροφορία ανάμεσα σε τοπικούς κόμβους ή προς τους κεντρικούς κόμβους [31], [32].

1.5.1 Wi-Fi

Το Wi-Fi γνωστό και ως IEEE 802.11 είναι το ευρύτερα διαδεδομένο πρότυπο ασύρματων τοπικών δικτύων Wireless Local Area Network (WLAN) που λειτουργεί σε μη αδειοδοτημένες και σε επιλεγμένες αδειοδοτημένες συχνότητες, παρέχοντας πρόσβαση στο διαδίκτυο και τοπικές υπηρεσίες μέσω ασύρματων συνδέσεων. Το Wi-Fi στηρίζεται στο φυσικό επίπεδο και σε έναν μηχανισμό πρόσβασης μέσου (MAC) τύπου Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance (CSMA/CA) που επιτρέπει σε πολλές συσκευές να μοιράζονται το ίδιο φάσμα με απλό και οικονομικό τρόπο, ενώ οι συνεχείς τροποποιήσεις και επεκτάσεις του προτύπου έχουν εισαγάγει νέες λειτουργίες για βελτιωμένη απόδοση και ειδικές χρήσεις.

Η τεχνολογία Wi-Fi μεταδίδει δεδομένα χρησιμοποιώντας τη μέθοδο Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM), ενώ στις νεότερες εκδόσεις αξιοποιεί τεχνικές MIMO, δηλαδή πολλαπλές κεραίες για ταυτόχρονη αποστολή και λήψη δεδομένων, ώστε να αυξάνεται η χωρητικότητα και η ταχύτητα. Στο επίπεδο πρόσβασης (MAC), το Wi-Fi βασίζεται στον μηχανισμό CSMA/CA, που αποτρέπει τις συγκρούσεις στα πακέτα δεδομένων. Επιπλέον, χρησιμοποιεί βελτιώσεις όπως το EDCA για καλύτερη προτεραιότητα στην κίνηση (π.χ. βίντεο, φωνή αυξάνοντας έτσι το QoS) και τεχνικές συνένωσης πακέτων σε μία μετάδοση που μειώνουν την καθυστέρηση και αυξάνουν την απόδοση. Οι πιο πρόσφατες εκδόσεις του πρωτοκόλλου προσθέτουν χαρακτηριστικά που μειώνουν τα γενικά έξοδα λειτουργίας και βελτιώνουν την ποιότητα υπηρεσίας για πολλές ταυτόχρονες συνδέσεις [33].

Οι πιο σημαντικές εκδόσεις του προτύπου Wi-Fi (IEEE 802.11) που χρησιμοποιούνται στην πράξη είναι οι εξής:

IEEE 802.11ac, η οποία λειτουργεί κάτω από τα 6 GHz και προσφέρει πολύ υψηλές ταχύτητες χάρη σε ευρύτερα κανάλια (έως 160 MHz) και στη χρήση της τεχνολογίας Multi User-MIMO, που επιτρέπει την ταυτόχρονη επικοινωνία με πολλούς χρήστες.

IEEE 802.11af, γνωστή και ως White-Fi, που αξιοποιεί τις συχνότητες TVWS (UHF/VHF). Για να αποφύγει παρεμβολές με τα τηλεοπτικά σήματα, χρησιμοποιεί βάσεις δεδομένων γεωτοποθεσίας και μηχανισμούς ανίχνευσης διαθέσιμων καναλιών.

IEEE 802.11ah, η οποία λειτουργεί στη ζώνη κάτω από 1 GHz, προσφέροντας μεγαλύτερη εμβέλεια και χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, γεγονός που την καθιστά ιδανική για εφαρμογές M2M (Machine-to-Machine) και IoT.

Η εμβέλεια και οι επιδόσεις του Wi-Fi διαφέρουν ανάλογα με τη συχνότητα και την έκδοση του προτύπου. Οι ζώνες 2.4 GHz προσφέρουν καλύτερη κάλυψη και διείσδυση μέσα από τοίχους ή εμπόδια, αλλά διαθέτουν λιγότερο διαθέσιμο φάσμα και επομένως χαμηλότερες ταχύτητες. Αντίθετα, η μπάνα 5 GHz παρέχει μεγαλύτερη χωρητικότητα και ταχύτητα, αλλά η κάλυψη της είναι μικρότερη.

Οι πιο πρόσφατες προσεγγίσεις, όπως τα δίκτυα σε TVWS (IEEE 802.11af) και το IEEE 802.11ah με συχνότητες μικρότερες του 1 GHz, αξιοποιούν χαμηλότερες συχνότητες που προσφέρουν πολύ μεγαλύτερη εμβέλεια, καθιστώντας τις ιδανικές για αγροτικές και απομακρυσμένες περιοχές.

Επιπλέον, η συνένωση καναλιών 20/40/80/160 MHz αυξάνει τη συνολική χωρητικότητα του δικτύου, αλλά συχνά μειώνει την κάλυψη και μπορεί να προκαλέσει παρεμβολές με γειτονικά δίκτυα, κάτι που χρειάζεται προσεκτική ισορροπία κατά τον σχεδιασμό.

Ο όρος rural Wi-Fi αναφέρεται σε λύσεις Wi-Fi προσαρμοσμένες για αγροτικά περιβάλλοντα. Αυτές βασίζονται στη χρήση των υπο-GHz συχνοτήτων και TVWS για εκτεταμένη κάλυψη, απλοποιημένες τοπολογίες και μηχανισμούς χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας ώστε να παραμένουν οικονομικά βιώσιμες για μικρές κοινότητες ή αγροκτήματα.

Χάρη στις ιδιότητες των χαμηλών συχνοτήτων και στις τεχνικές του προτύπου, επιτυγχάνεται σταθερή ποιότητα υπηρεσίας (QoS), η ενεργειακή αποδοτικότητα και εύκολη συντήρηση του δικτύου.

Η συνεχής εξέλιξη των προτύπων IEEE 802.11 (ac/af/ah/ax) παρέχει όλα τα απαραίτητα τεχνολογικά εργαλεία για τη δημιουργία βιώσιμων, ευέλικτων και αποδοτικών Rural Wi-Fi δικτύων. Για καλύτερο αποτέλεσμα κατά την φάση του σχεδιασμού ενός δικτύου όπου θα γίνει χρήση του Wi-Fi η σωστή μελέτη αναφορικά με τις ταχύτητες την κατανάλωση ενέργειας είναι απαραίτητη για την σωστή επιλογή του προτύπου που θα χρησιμοποιηθεί [33], [34].

1.5.2 Bluetooth

Η τεχνολογία Bluetooth λειτουργεί ως ραδιοεπικοινωνία μικρής εμβέλειας στο φάσμα 2.4 GHz, με δύο βασικές οικογένειες πρωτοκόλλων, το Bluetooth Classic και το Bluetooth Low Energy (BLE). Το BLE σχεδιάστηκε ειδικά για εφαρμογές χαμηλής κατανάλωσης, χρησιμοποιώντας σύντομες, διακεκομμένες εκπομπές δεδομένων και κάνοντας χρήση της λειτουργίας ύπνου για να πετύχει αυτονομία μπαταρίας που συχνά μπορεί να προσφέρει αυτονομία σε μια συσκευή έως και μερικά χρόνια.

Η τεχνολογία BLE λειτουργεί μέσω ειδικών καναλιών που χρησιμοποιούνται είτε για εκπομπή σημάτων ανακάλυψης όπου πρακτικά μια συσκευή διαφημίζει την παρουσία της στις υπόλοιπες, είτε για σύνδεση P2P ώστε να γίνεται αξιόπιστη ανταλλαγή δεδομένων. Με αυτόν τον τρόπο, οι συσκευές μπορούν είτε να μεταδίδουν μικρές ποσότητες πληροφορίας σε κοντινή απόσταση, είτε να δημιουργούν άμεσες συνδέσεις μεταξύ τους.

Η αρχιτεκτονική του BLE μπορεί να υποστηρίξει διάφορους τύπους δικτύωσης, όπως point-to-point, broadcast (εκπομπή σε πολλές συσκευές ταυτόχρονα) και mesh δίκτυα, όπου πολλές συσκευές συνεργάζονται για να επεκτείνουν την εμβέλεια της επικοινωνίας [35].

Οι πιο πρόσφατες βελτιώσεις του προτύπου, όπως το Low Energy Coded PHY (LE Coded PHY) που αυξάνει την εμβέλεια επικοινωνίας, η ανίχνευση κατεύθυνσης σήματος και οι ενισχυμένες μηχανισμοί ασφαλείας κρυπτογράφηση AES-128, προσφέρουν μεγαλύτερη αξιοπιστία, ασφάλεια και ακρίβεια εντοπισμού, διατηρώντας παράλληλα τη χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και το χαμηλό κόστος των συσκευών.

Το BLE είναι ιδιαίτερα χρήσιμο σε αγροτικές και απομακρυσμένες περιοχές. Με τη λειτουργία Long Range (LE Coded), η απόσταση επικοινωνίας μπορεί να αυξηθεί έως και τέσσερις φορές, επιτρέποντας τη σύνδεση αισθητήρων και κόμβων σε μεγαλύτερες εκτάσεις. Συγκεκριμένα μπορεί να φτάσει σε απόσταση μετάδοσης περίπου το 1 χιλιόμετρο με την ταχύτητα μετάδοσης να είναι περίπου τα 100 kbps, ενώ αν αυξήσουμε την ταχύτητα θα μειωθεί αντίστοιχα και η απόσταση μετάδοσης.

Η υποστήριξη mesh δικτύωσης δίνει τη δυνατότητα δημιουργίας εκτεταμένων δικτύων από απλούς και οικονομικούς κόμβους που αναμεταδίδουν δεδομένα μεταξύ τους. Έτσι μειώνεται η ανάγκη για ισχυρά κεντρικά σημεία και καθίσταται δυνατή η αξιόπιστη επικοινωνία σε περιοχές όπου η παροχή ρεύματος

και η συντήρηση είναι περιορισμένες. Η δυνατότητα χρήσης κινητών συσκευών (smartphones/tablets) ως πύλες ή ως εργαλεία διαχείρισης επιτρέπει την υλοποίηση οικονομικών λύσεων χωρίς την ανάγκη εξειδικευμένου εξοπλισμού [35], [36].

1.5.3 ZigBee

Το ZigBee είναι ένα πρωτόκολλο ασύρματης επικοινωνίας χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας, σχεδιασμένο για εφαρμογές ελέγχου και τηλεμετρίας σε τοπικά δίκτυα αισθητήρων. Βασίζεται στο φυσικό και MAC επίπεδα του προτύπου IEEE 802.15.4, πάνω στα οποία προσθέτει επιπλέον επίπεδα για δρομολόγηση, διαχείριση κόμβων και ασφάλεια. Ο βασικός του στόχος είναι να προσφέρει απλή, οικονομική και ενεργειακά αποδοτική συνδεσιμότητα μεταξύ συσκευών που επικοινωνούν περιοδικά και χρειάζονται μεγάλη διάρκεια ζωής μπαταρίας.

Η λειτουργία του στηρίζεται στη μετάδοση μικρών πακέτων δεδομένων κυρίως στη ζώνη 2.4 GHz, αλλά και στις 868 για την Ευρώπη και 915 MHz για την Αμερική. Για να μειώσει την κατανάλωση ενέργειας, χρησιμοποιεί διαστήματα τα οποία πέφτει σε κατάσταση ύπνου και σύντομες ενεργές περιόδους για την διαδικασία της επικοινωνίας. Υποστηρίζει διάφορες τοπολογίες δικτύου, όπως αστέρα, δέντρο και mesh, όπου οι κόμβοι μπορούν όχι μόνο να επικοινωνούν απευθείας αλλά και να αναμεταδίδουν δεδομένα μεταξύ τους, επεκτείνοντας έτσι την κάλυψη και προσφέροντας έτσι ανθεκτικότητα και διαθεσιμότητα σε περίπτωση βλάβης ενός κόμβου [37].

Το ZigBee διαθέτει μηχανισμούς αυτόματης ανακάλυψης κόμβων, ανάθεσης διευθύνσεων και δρομολόγησης και εξασφαλίζει την διαλειτουργικότητα μεταξύ διαφορετικών συσκευών.

Τα βασικά πλεονεκτήματά που έχει είναι τα εξής:

- Πολύ χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, που επιτρέπει σε κόμβους να λειτουργούν για μήνες ή και χρόνια χωρίς να χρειάζεται αλλαγή στην μπαταρία τους.
- Χαμηλό κόστος εξοπλισμού.
- Δυνατότητα δημιουργίας μεγάλων mesh δικτύων που αυξάνουν την αξιοπιστία και την κάλυψη χωρίς ανάγκη για ισχυρή κεντρική υποδομή
- Λειτουργία σε συχνότητες με καλή διείσδυση σε εμπόδια, και ενσωματωμένα μέτρα ασφάλειας που προστατεύουν τα δεδομένα και τον έλεγχο πρόσβασης.

Σε ό,τι αφορά τις ταχύτητες και την εμβέλεια, το ZigBee έχει χαμηλούς ρυθμούς μετάδοσης περίπου 250 kbps, ενώ στις χαμηλότερες ζώνες 915 MHz, 868 MHz οι ταχύτητες πέφτουν περίπου στα 40 kbps και 20 kbps αντίστοιχα. Η εμβέλεια σε εσωτερικούς χώρους συνήθως κυμαίνεται συνήθως από 10 έως 100 m ανάλογα με εμπόδια, ενώ σε ανοιχτό ορίζοντα με ευνοϊκές συνθήκες μπορεί να φτάσει έως και μερικές εκατοντάδες μέτρα και συγκεκριμένα στα 2,4 GHz η απόσταση που μπορεί να καλύψει είναι από 100 έως 500 μετρά ανάλογα με τα εμπόδια ενώ στις συχνότητες 915 και 868 MHz η κάλυψη του είναι από 500 έως 1000 m

Χάρη σε αυτά τα χαρακτηριστικά, το ZigBee αποτελεί ιδανική επιλογή για δίκτυα αισθητήρων σε αγροτικές και απομακρυσμένες περιοχές, όπου η χαμηλή κατανάλωση, η αξιοπιστία και το μικρό κόστος είναι κρίσιμα στοιχεία.

Σε απομακρυσμένες και αγροτικές περιοχές το ZigBee αποκτά ιδιαίτερη αξία επειδή επιτρέπει την κάλυψη μεγάλων εκτάσεων με πολλαπλούς φθηνούς κόμβους που συνεργάζονται σε mesh τοπολογία, μειώνοντας την ανάγκη για συνεχή παροχή ρεύματος και συχνές παρεμβάσεις τεχνικής υποστήριξης.

Η συμβατότητα με φθηνούς κόμβους και οι λειτουργίες διαχείρισης δικτύου επιτρέπουν γρήγορη εγκατάσταση και κλιμάκωση, προσφέροντας προσιτές IoT λύσεις που παρέχουν αξιόπιστα δεδομένα για βελτιστοποίηση της παραγωγής και μείωση του λειτουργικού κόστους [38], [39].

1.5.4 LoRaWAN

Ένα ακόμα συχνά χρησιμοποιούμενο πρωτόκολλο είναι το Long Range Wide Area Network (LoRaWAN) και αποτελεί ένα από τα πιο διαδεδομένα πρωτόκολλα για εφαρμογές Internet of Things (IoT), ειδικά όταν απαιτείται μεγάλη εμβέλεια επικοινωνίας και πολύ χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Η αρχιτεκτονική του είναι σχεδιασμένη ώστε να εξυπηρετεί πλήθος απομακρυσμένων συσκευών που μεταδίδουν μικρή ποσότητα δεδομένων σε αραιά χρονικά διαστήματα.

Στο φυσικό επίπεδο χρησιμοποιείται, μια παραλλαγή της τεχνικής Chirp Spread Spectrum (CSS), η οποία εξασφαλίζει υψηλή ανθεκτικότητα σε παρεμβολές και πολύ καλή λήψη ακόμα και σε περιβάλλοντα με χαμηλή ποιότητα σήματος. Κάνοντας χρήση της τοπολογίας αστέρα, οι τερματικές συσκευές επικοινωνούν απευθείας με τις πύλες χωρίς να χρειάζεται να λειτουργούν ως ενδιάμεσοι κόμβοι, μειώνοντας έτσι την πολυπλοκότητα και την κατανάλωση ενέργειας.

Η λειτουργία του δικτύου βασίζεται στην αποστολή μικρών πακέτων δεδομένων από τις τερματικές συσκευές προς τις πύλες. Οι πύλες προωθούν στη συνέχεια τα δεδομένα μέσω ευρυζωνικών συνδέσεων προς τους κεντρικούς ή προς τους τοπικούς διακομιστές, όπου γίνεται η επεξεργασία και η δρομολόγηση.

Σε επίπεδο MAC το πρωτόκολλο καθορίζει πώς οι συσκευές μοιράζονται το ασύρματο μέσο για να στείλουν δεδομένα. Χρησιμοποιούνται απλές τεχνικές όπως το pure ALOHA όπου κάθε συσκευή μεταδίδει όποτε έχει δεδομένα, χωρίς να υπάρχει κάποιος συντονισμός, ή πιο εξελιγμένες μέθοδοι όπως το Listen Before Talk (LBT), όπου η συσκευή ακούει πρώτα το κανάλι πριν μεταδώσει, για να αποφύγει παρεμβολές. Με αυτόν τον τρόπο τηρούνται οι κανονισμοί χρήσης του φάσματος και μειώνονται οι πιθανότητες σύγκρουσης για τα πακέτα δεδομένων [40].

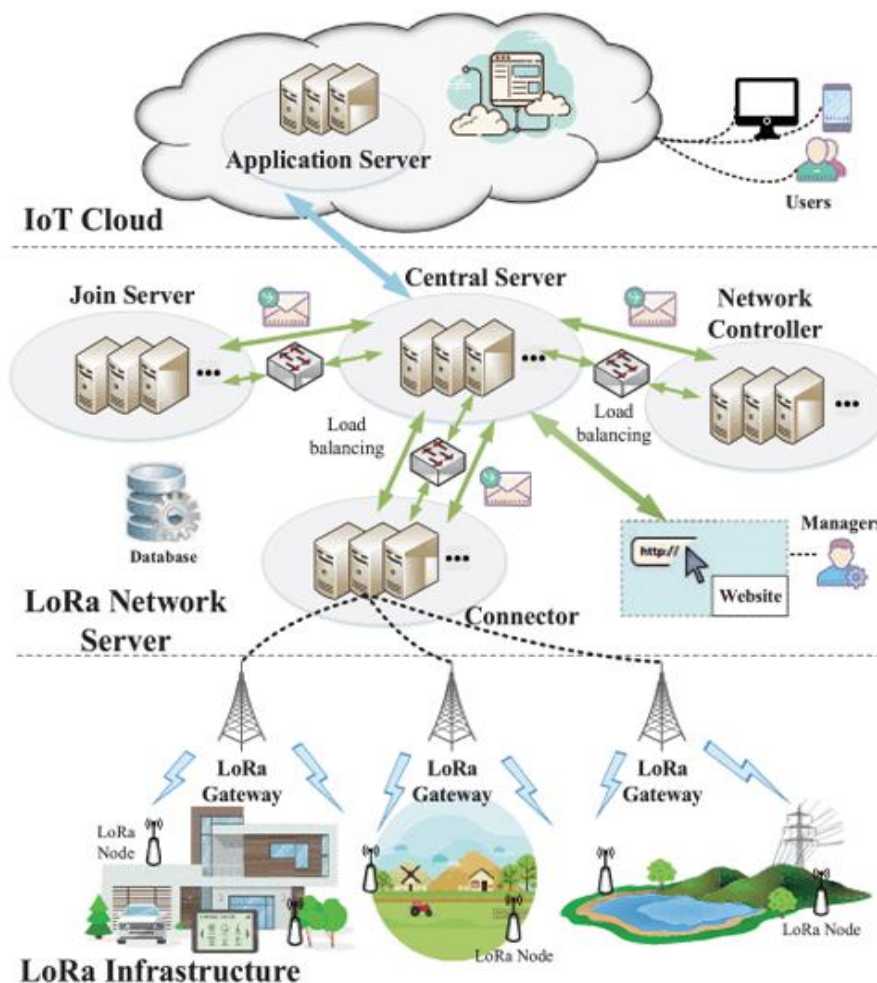
Η απόδοση ενός δικτύου LoRaWAN εξαρτάται από ορισμένες βασικές παραμέτρους, όπως το εύρος ζώνης, τον συντελεστή διασποράς Spreading Factor (SF) και τον κωδικό διόρθωσης σφαλμάτων (code rate) όπου είναι ο μηχανισμός που προσθέτει επιπλέον δεδομένα ώστε ο δέκτης να μπορεί να εντοπίζει και να διορθώνει λάθη που συμβαίνουν κατά τη μετάδοση. Ο SF καθορίζει πόσο απλώνεται το σήμα στο φάσμα, όσο μεγαλύτερος είναι, τόσο αυξάνεται η εμβέλεια και η ευαισθησία λήψης, αλλά μειώνεται η ταχύτητα μετάδοσης και αυξάνεται ο χρόνος επικοινωνίας. Αντίθετα, η αύξηση του εύρους ζώνης προσφέρει μεγαλύτερη ταχύτερη μετάδοση, αλλά μειώνει την ευαισθησία του δέκτη.

Επειδή οι διαφορετικές τιμές του SF είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους δηλαδή μπορούν να συνυπάρχουν χωρίς να αλληλοεπηρεάζονται, το LoRaWAN μπορεί να υποστηρίξει πολλαπλές ταυτόχρονες επικοινωνίες στο ίδιο κανάλι, με σχετικά μικρό κίνδυνο παρεμβολών. Ο συνολικός ρυθμός μετάδοσης δεδομένων του LoRaWAN είναι χαμηλός και κυμαίνεται από 0,3 έως 27 kbps και η κάλυψη του είναι περίπου από 5 έως 45 km [40], [41].

Σε αγροτικές ή αραιοκατοικημένες περιοχές, το LoRaWAN έχει αποδειχθεί ιδιαίτερα αποτελεσματικό, καθώς προσφέρει αξιόπιστη κάλυψη σε μεγάλες αποστάσεις. Η ποιότητα του σήματος (Received Signal Strength - RSSI) μειώνεται σταδιακά όσο αυξάνεται η απόσταση, ενώ η αναλογία σήματος προς θόρυβο (SNR) επηρεάζεται έντονα από την τοπογραφία, το ύψος στο οποίο τοποθετείται η πύλη και το αν υπάρχει ή όχι οπτική επαφή (LOS/NLOS) μεταξύ των συσκευών.

Σε δοκιμές με πύλες τοποθετημένες σε υπερυψωμένα σημεία και τερματικές συσκευές εγκατεστημένες κοντά στο έδαφος, επιτεύχθηκε αξιόπιστη επικοινωνία σε αποστάσεις που ξεπερνούν το ένα χιλιόμετρο, ιδιαίτερα όταν υπήρχε καθαρή γραμμή θέασης. Οι τιμές RSSI παρουσίαζαν διακυμάνσεις μερικών δεκάδων dB σε σύντομα χρονικά διαστήματα, ενώ το SNR ήταν συχνά ο πιο κρίσιμος παράγοντας για τη σταθερότητα της σύνδεσης.

Το LoRaWAN αποδεικνύεται ιδανική λύση για απομακρυσμένες περιοχές που χρειάζονται συστήματα παρακολούθησης, έξυπνους μετρητές, για χρήση στην έξυπνη γεωργία την τηλεμετρία ή άλλες εφαρμογές με μικρές και σποραδικές μεταδόσεις δεδομένων. Ωστόσο, οι περιορισμοί στον ρυθμό μετάδοσης και η ανάγκη σωστής ρύθμισης παραμέτρων όπως το SF και το εύρος ζώνης καθιστούν απαραίτητο τον προσεκτικό σχεδιασμό της θέσης των πυλών και των κεραιών, ώστε να εξασφαλίζεται η καλύτερη δυνατή απόδοση σε κάθε περιβάλλον [40], [42].



Εικόνα 4 Αρχιτεκτονική LoRaWAN [40]

1.6 Δίκτυα αισθητήρων και διαδίκτυο των πράγματος

Στην καρδιά του δικτύου, και με σκοπό την πλήρη αξιοποίηση της δομής που περιγραφικές στις προηγούμενες ενότητες, βρίσκονται δύο βασικές έννοιες δικτύων που έχουν ως στόχο τη συλλογή και τη μετάδοση δεδομένων προς το υπόλοιπο σύστημα. Το διαδίκτυο των πραγμάτων και το υποσύνολό του, το ασύρματο δίκτυο αισθητήρων (Wireless Sensor Network - WSN), έχουν καθοριστικό ρόλο στην

υλοποίηση έξυπνων εφαρμογών. Η σωστή λειτουργία των περισσότερων τέτοιων συστημάτων βασίζεται στη συνεχή συλλογή δεδομένων και στην αλληλεπίδρασή τους με το περιβάλλον.

1.6.1 Διαδίκτυο των πραγμάτων

Το διαδίκτυο των πραγμάτων γνωστό ως IoT ορίζεται ως ένα κατανεμημένο δίκτυο φυσικών αντικειμένων που ενσωματώνουν αισθητήρες, με στόχο τη συνεχή συλλογή, μετάδοση και επεξεργασία δεδομένων από το περιβάλλον. Με απλό τρόπο, το IoT μετατρέπει αντικείμενα και συσκευές σε έξυπνα σημεία δεδομένων, επιτρέποντας την παρακολούθηση, την ανάλυση και την υποστήριξη αποφάσεων σε πραγματικό χρόνο ή σε αναλυτικό επίπεδο.

Ενα σύστημα IoT αποτελείται από τέσσερα επίπεδα, το επίπεδο των κόμβων όπου περιλαμβάνει τις φυσικές συσκευές και αισθητήρια, το επίπεδο δικτύου που περιλαμβάνει τα πρωτόκολλα επικοινωνίας και δρομολογήσεις, το επίπεδο επεξεργασίας/αποθήκευσης και το επίπεδο εφαρμογών. Στο πρώτο επίπεδο οι κόμβοι είναι προγραμματισμένοι να συλλέγουν συγκεκριμένα δεδομένα, να μετρούν φυσικά μεγέθη και να εκτελούν συγκεκριμένες εντολές συνήθως οι κόμβοι διαθέτουν περιορισμένους πόρους ισχύος και επεξεργασίας, γεγονός που επηρεάζει την επιλογή πρωτοκόλλων και αρχιτεκτονικής. Στο επίπεδο δικτύου οι επιλογές τεχνολογίας καθορίζουν την εμβέλεια, την κατανάλωση ενέργειας, το throughput και το κόστος, ενώ το επίπεδο επεξεργασίας/αποθήκευσης είναι υπεύθυνο να αποφασίζει για την επεξεργασία των δεδομένων και αν αυτή θα γίνεται στη συσκευή και ή απομακρυσμένα μέσω edge ή cloud computing και το αν και που αυτή η πληροφορία θα αποθηκευτεί. Το επίπεδο εφαρμογών περιλαμβάνει εφαρμογές και οι διεπαφές για τον τελικό χρήστη, όπως επίσης και αναφορές και αυτοματισμούς που μετατρέπουν τα δεδομένα σε πρακτικές ενέργειες/αποφάσεις [43].

Οι τεχνολογίες επικοινωνίας που χρησιμοποιεί το IoT καλύπτουν ένα μεγάλο φάσμα αναγκών και χαρακτηριστικών. Στην περιοχή της μικρής εμβέλειας βρίσκουμε το Bluetooth το BLE για σύνδεση συσκευών σε λίγο μεγαλύτερη απόσταση μεταξύ τους γίνεται χρήση Zigbee για εφαρμογές αυτοματισμού με στόχο την χαμηλή κατανάλωση, καθώς και Wi-Fi για εφαρμογές που απαιτούν μεγαλύτερο bandwidth. Για εφαρμογές μακράς εμβέλειας και χαμηλής κατανάλωσης εμφανίζονται τα LPWAN πρωτόκολλα όπως LoRaWAN και Sigfox, NB-IoT και LTE 3G/ 4G-5G καλύπτουν ανάγκες ευρύτερης κάλυψης και εγγυημένης συνδεσιμότητας. Επιπλέον, υπάρχουν τεχνολογίες ειδικού σκόπου όπως χρήση του Radio Frequency Identification (RFID) για αναγνώριση αντικειμένων. Η επιλογή μεταξύ αυτών γίνεται με βάση την ταχύτητα, εμβέλεια, κατανάλωση ενέργειας, κόστος, απαιτήσεις latency και περιβάλλον εγκατάστασης.

Σε όλα τα επίπεδα απαιτούνται μέθοδοι κρυπτογράφησης, αυθεντικοποίησης, διαχείρισης ταυτότητας και ενημερώσεων λογισμικού ώστε να προστατεύεται η ακεραιότητα και η ιδιωτικότητα των δεδομένων.

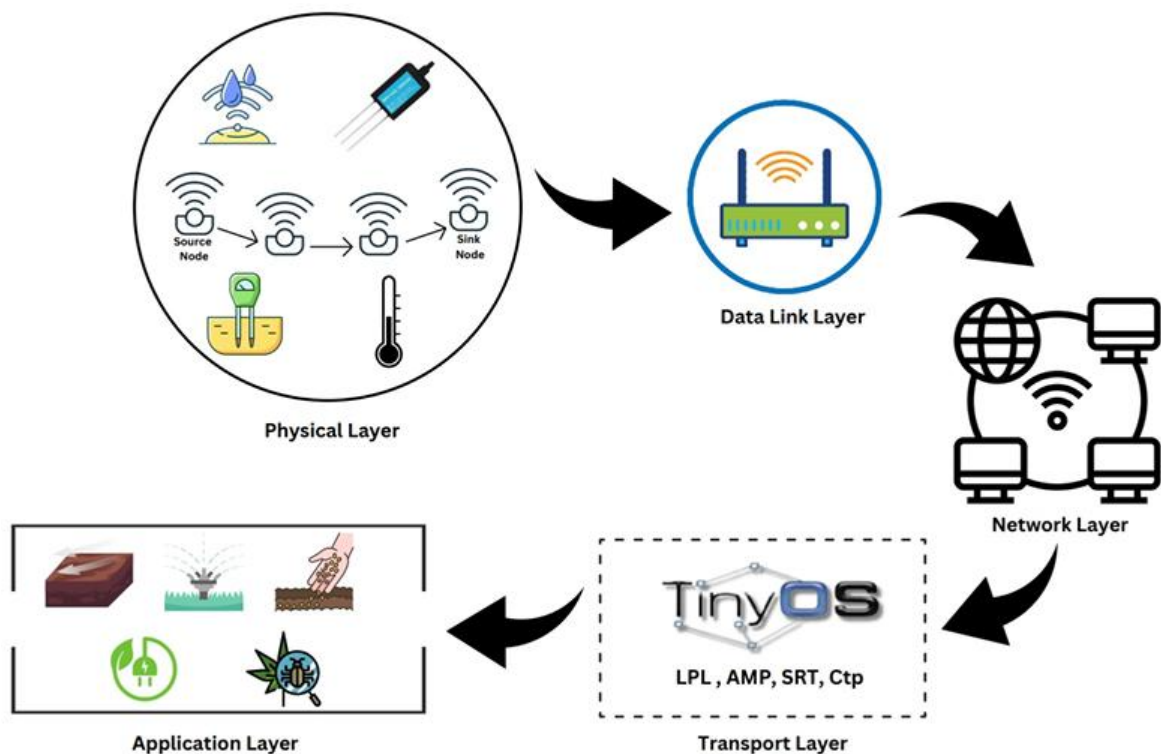
Η εφαρμογή του IoT σε απομακρυσμένες περιοχές προσφέρει σημαντικά οφέλη όπως για παράδειγμα η αυτοματοποίηση διεργασιών, βελτιστοποίηση πόρων, βελτίωση παρακολούθησης και βελτίωση στην λήψη των αποφάσεων αλλά απαιτεί προσεκτικό σχεδιασμό για να αντιμετωπιστούν οι εκάστοτε προσηλώσεις και περιορισμοί. Παράλληλα, η διαλειτουργικότητα προτύπων, η συντήρηση, η κατάρτιση χρηστών και το ρυθμιστικό πλαίσιο είναι κρίσιμα για την σωστή λειτουργία του συστήματος [43], [44]

1.6.2 Ασύρματα δίκτυα αισθητήρων

Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων WSN αποτελούνται από πλήθος αυτόνομων κόμβων, εξοπλισμένων με αισθητήρες, μικροελεγκτές και ασύρματους πομποδέκτες, σχεδιασμένων για τη συλλογή και

μετάδοση πληροφοριών από το φυσικό περιβάλλον προς κεντρικά σημεία συλλογής. Κάθε κόμβος εκτελεί μέτρηση φυσικών ή περιβαλλοντικών μεγεθών, προεπεξεργασία των δεδομένων και ασύρματη επικοινωνία με γειτονικούς κόμβους ή με σταθμό βάσης. Ο βασικός στόχος των WSN είναι η αξιόπιστη, ενεργειακά αποδοτική και επεκτάσιμη παρακολούθηση μεγάλων ή δυσπρόσιτων περιοχών χωρίς εκτεταμένη καλωδίωση.

Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων βασίζονται σε μια αρχιτεκτονική με πέντε επίπεδα λειτουργίας. Το πρώτο επίπεδο το οποίο περιλαμβάνει τους κόμβους τους αισθητήρες και τους ενεργοποιητές και ορίζονται η ακρίβεια των μετρήσεων, οι τρόποι τροφοδοσίας και οι μηχανισμοί ενίσχυσης αντοχής του υλικού σε περιβάλλοντα με αλλαγές στο φορτίο τροφοδοσίας και τις καιρικές συνθήκες. Το επίπεδο σύνδεσης δεδομένων το οποίο διαχειρίζεται την πρόσβαση στο μέσο, τον συγχρονισμό και τεχνικές εξοικονόμησης ενέργειας sleep/wake, μειώνοντας συγκρούσεις και σπατάλη ενέργειας στις ασύρματες μεταδόσεις. Το επίπεδο δικτύου φροντίζει για δρομολόγηση, διαχείριση τοπολογίας και ανθεκτικότητα σε αποτυχίες, εφαρμόζοντας αλγορίθμους ομαδοποίησης (clustering) και εξισορρόπησης φόρτου για παράταση ζωής του δικτύου. Το τέταρτο επίπεδο επικεντρώνεται στην επεξεργασία και διαχείριση των δεδομένων, όπου πραγματοποιείται προεπεξεργασία, συγχώνευση μετρήσεων και τοπική ανάλυση (edge processing), με σκοπό τη μείωση του όγκου των δεδομένων προς μετάδοση και τη βελτίωση της ποιότητας των πληροφοριών. Το πέμπτο επίπεδο αφορά τις υπηρεσίες εφαρμογών και περιλαμβάνει APIs και διεπαφές χρήστη για οπτικοποίηση, αποθήκευση και ενσωμάτωση. Ένα WSN δίκτυο μπορεί να λειτουργεί είτε ως αυτόνομο δίκτυο είτε ως υποσύστημα ενός IoT δικτύου [45].



Εικόνα 5 Αρχιτεκτονική WSN [43]

Κεφάλαιο 2ο: Έξυπνη γεωργία

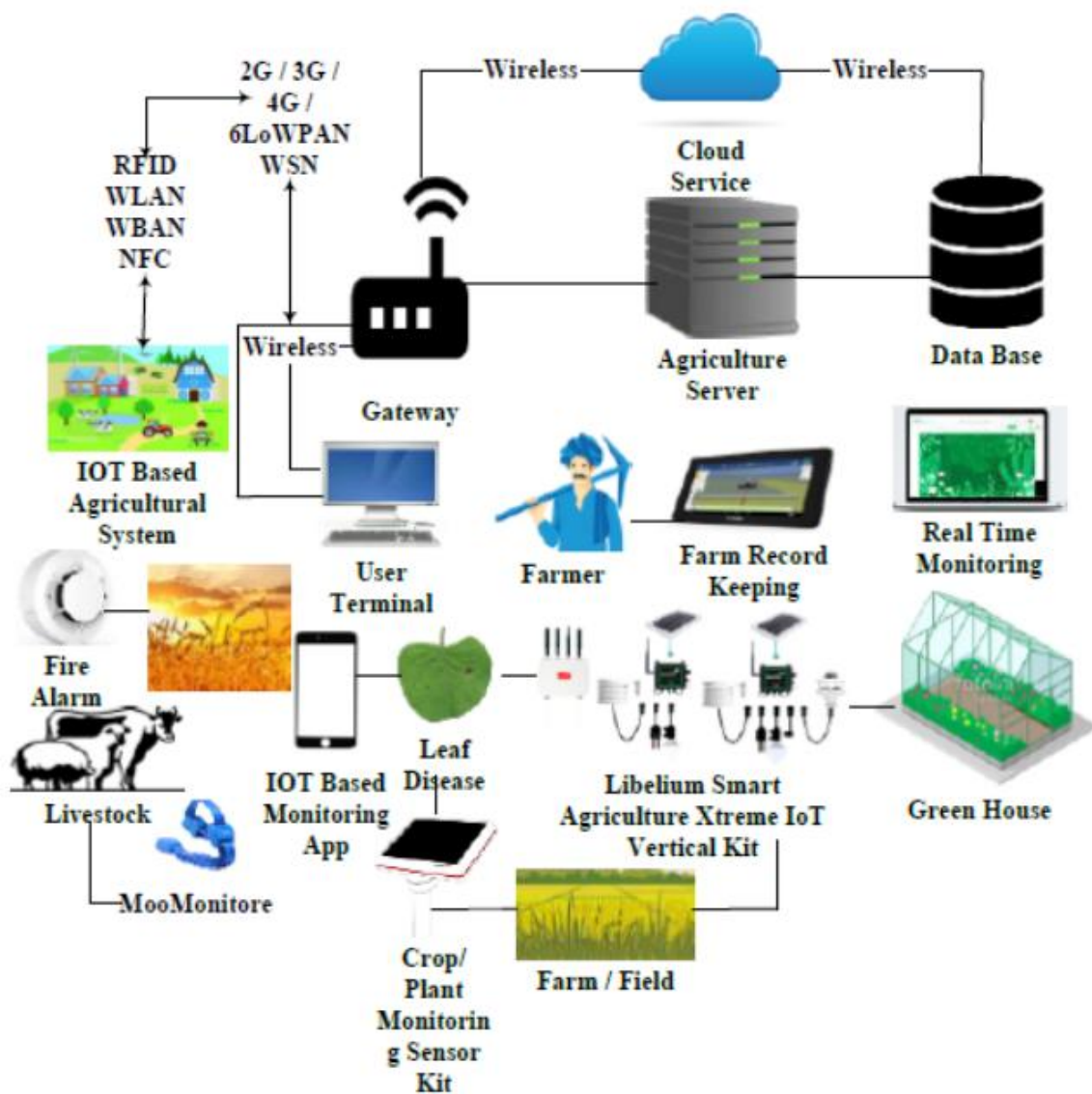
2.1 Εισαγωγή

Η έξυπνη γεωργία είχε καθοριστικό ρόλο στην ανάπτυξη των αγροτικών περιοχών και η μετάβαση κρίνεται αναγκαία με σκοπό την αύξηση του βιοτικού επιπέδου. Η έξυπνη γεωργία αναφέρεται στη δημιουργία και στη χρήση μιας υποδομής τεχνολογικού χαρακτήρα που έχει ως στόχο να βοηθήσει την αύξηση της παραγωγής και της ποιότητας των προϊόντων που παράγονται στο αγρόκτημα. Προσφέρει αποτελεσματική διαχείριση του αγροκτήματος και σημαντικά εργαλεία με σκοπό να βοηθήσουν τον αγρότη να πάρει τις αποφάσεις που χρειάζεται και είναι κατάλληλες για το δικό του αγρόκτημα [46] [47].

Στις αγροτικές περιοχές ο γεωργικός τομέας διαδραματίζει σημαντικό ρόλο καθώς είναι η κύρια πηγή εισοδήματος και η ενασχόληση του πληθυσμού των περιοχών αυτών. Ανά τα χρόνια, ο γεωργικός τομέας παρουσίαζε φθίνουσα πορεία, καθώς ήταν αντιμέτωπος με σημαντικές προκλήσεις, όπως η έλλειψη νερού, η μείωση γονιμότητας του εδάφους, η οποία συνεπάγεται με την μείωση της παραγωγής, τα ακραία καιρικά φαινόμενα που οδηγούν σε καταστροφή της σοδειάς και μετανάστευση/μετακίνηση του πληθυσμού σε αστικά κέντρα με σκοπό την αύξηση των εισοδημάτων του και την δυνατότητα πρόσβασης σε περισσότερες θέσεις εργασίας. Τα παραπάνω οδήγησαν στην αναγκαιότητα για εύρεσης λύσεων με σκοπό την βελτίωση και την εξισορρόπηση των προκλήσεων που υπάρχουν στον γεωργικό τομέα έτσι ώστε να πετυχαίνουμε την βιώσιμη γεωργία [48] [49].

Η έξυπνη γεωργία περικλείει ορισμένα χαρακτηριστικά, όπως η υγιής κερδοφορία για τον αγρότη, την ασφάλεια της μακροπρόθεσμης απόδοσης, δηλαδή την ικανότητα να εξακολουθεί να παράγει και τα επόμενα χρόνια χωρίς να αντιμετωπίζει ανυπέρβλητες δυσκολίες. Επιπλέον, περιλαμβάνει τη γνώση και τις δεξιότητες που απαιτούνται για την πρόβλεψη και την αποτελεσματική επίλυση των προβλημάτων που σχετίζονται με την παράγωγή και το αγρόκτημα.. Ένα άλλο χαρακτηριστικό είναι η αύξηση της παραγωγής, η οποία θα επιτρέψει στους αγρότες να ανταποκριθούν στην αυξανόμενη ζήτηση λόγω της αύξησης του πληθυσμού, καθώς και η ικανότητα προσαρμογής στην κλιματική αλλαγή [50].

Διανύουμε την 4.0 περίοδο της γεωργίας όπου ονομάζεται και διαφορετικά ως “Έξυπνη Γεωργία” ή “Γεωργία Ακρίβειας”. Η έξυπνη γεωργία περιλαμβάνει ένα σύνολο τεχνολογιών και πρωτοκόλλων που έχουν ως στόχο την αυτοματοποίηση λειτουργιών που σχετίζονται με τις καλλιέργειες ή με τα ζώα [51]. Ορισμένες από τις εφαρμογές που σχετίζονται με την έξυπνη γεωργία είναι, το αυτόματο πότισμα, διαχείριση σοδιάς, διαχείριση εδάφους, παρακολούθηση καιρού. Οι εφαρμογές αυτές μπορούν να είναι λειτουργικές με την χρήση τεχνολογιών IoT, WSN και την χρήση διάφορων πρωτοκόλλων για επικοινωνία όπως Wi-Fi, ZigBee, LoRa, Bluetooth, NB-IoT, SigFox κ.λ.π [52], [53]. Ένα από τα οφέλη της μετάβασης στην έξυπνη γεωργία είναι ότι ο αγρότης θα μπορεί να διαχειρίζεται και να ελέγχει το αγρόκτημά του από το σπίτι του. Θα έχει τη δυνατότητα να επεμβαίνει στο χωράφι του ή να παρακολουθεί στατιστικά δεδομένα σε πραγματικό χρόνο σχετικά με τις καλλιέργειές του. Επίσης, θα λαμβάνει έκτακτες ειδοποιήσεις σε περιπτώσεις που απαιτείται η άμεση παρέμβασή του, όπως για παράδειγμα λόγω αλλαγής καιρικών συνθηκών ή κάποιας δυσλειτουργίας του συστήματος. Αυτό συνεπάγεται λιγότερη σωματική εργασία και μικρότερη ταλαιπωρία, καθώς θα μπορεί να επισκέπτεται το χωράφι του λιγότερο συχνά ή ακόμη και καθόλου, ανάλογα με την υιοθέτηση των εφαρμογών και των τεχνολογιών που θα επιλέξει να εισάγει για να αναβαθμίσει το αγρόκτημά του [54]. Στην εικόνα που ακολουθεί περιγράφεται μια όψη του τομέα της έξυπνης γεωργίας σε επίπεδο αρχιτεκτονικής και τηλεπικοινωνιακής διασύνδεσης των τεχνολογιών που περιγράφονται.



Εικόνα 6 Προεπισκόπηση έξυπνης γεωργίας και τεχνολογιών τηλεπικοινωνίας [55]

2.2 Αναγκαιότητα μετάβασης στην Έξυπνη Γεωργία

Η μετάβαση από την παραδοσιακή γεωργία στην έξυπνη γεωργία, καθώς και η υιοθέτηση και χρήση της τεχνολογίας, δεν επηρεάζει θετικά μόνο τον αγρότη, αλλά έμμεσα ωφελεί και την υπόλοιπη κοινωνία. Η ανάγκη για μετάβαση στην έξυπνη γεωργία είναι επιτακτική, και υπάρχουν διεθνείς πιέσεις από οργανισμούς που στοχεύουν στη δημιουργία περισσότερων προγραμμάτων επιδοτήσεων για τους αγρότες προς αυτόν τον σκοπό. Υπάρχουν ορισμένοι βασικοί παράγοντες που καθιστούν τη μετάβαση αυτή αναγκαία, οι οποίοι θα αναλυθούν στη συνέχεια [56], [57].

- i. **Κόστος τροφίμων:** Ένας σημαντικός παράγοντας για τη μετάβαση στην ψηφιακή γεωργία είναι το κόστος των τροφίμων, το οποίο σχετίζεται άμεσα με την ποσότητα παραγωγής του αγροκτήματος. Πολλά προϊόντα που φτάνουν στον τελικό καταναλωτή είναι ακριβότερα, καθώς απαιτούν αυξημένη χρήση φυτοφαρμάκων και περισσότερες ώρες εργασίας. Η μετάβαση στην έξυπνη γεωργία, εκτός από την αύξηση της παραγωγής, μπορεί να μειώσει τον χρόνο ημερήσιας εργασίας κατά 20-30%, τη χρήση φυτοφαρμάκων έως και 85%, και την

κατανάλωση καυσίμων κατά περίπου 10%. Αυτός ο συνδυασμός συμβάλλει στη μείωση του κόστους των προϊόντων που φτάνουν στον καταναλωτή [56].

- ii. **Αύξηση πληθυσμού:** Ο πληθυσμός της Γης παρουσιάζει εκθετική αύξηση με την πάροδο των χρόνων. Συγκεκριμένα, από το 1800 έως και σήμερα, ο πληθυσμός της Γης αυξήθηκε από 1 δισεκατομμύριο, με προσδόκιμο ζωής τα 28,5 έτη, στα 8 δισεκατομμύρια, με προσδόκιμο ζωής τα 73 έτη. Αναμένεται, δε, έως το 2100 ο παγκόσμιος πληθυσμός να φτάσει τα 11 δισεκατομμύρια. Παράλληλα, η γεωργική έκταση αυξήθηκε από 1,35 δισεκατομμύρια σε 4,87 δισεκατομμύρια εκτάρια (ή 48,7 εκατομμύρια km²). Ωστόσο, για την κάλυψη των διατροφικών αναγκών του συνεχώς αυξανόμενου πληθυσμού, είναι απαραίτητο να αυξηθεί η παραγωγή. Αυτό, όμως, αποτελεί πρόκληση, καθώς η παραγωγή επηρεάζεται από την κλιματική αλλαγή, η οποία προκαλεί εκτεταμένες ζημιές [56].
- iii. **Πολιτικές για το περιβάλλον:** Καθώς η κλιματική αλλαγή είναι πλέον πιο αισθητή τα τελευταία χρόνια, αυτό έχει οδηγήσει διεθνείς οργανισμούς και περιβαλλοντικές οργανώσεις να δώσουν έμφαση στη διαμόρφωση πολιτικών για την προστασία του περιβάλλοντος, με στόχο την πρόληψη και τη μείωση των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής. Στον τομέα της γεωργίας, οι έλεγχοι που αφορούν τη χρήση λιπασμάτων και φυτοφαρμάκων, τα οποία είναι επιβλαβή για το περιβάλλον, έχουν αυξηθεί σημαντικά, με σκοπό την αποφυγή περιττής ή υπερβολικής χρήσης τους. Παράλληλα, ο γεωργικός τομέας δέχεται πιέσεις για τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας, ιδιαίτερα από ορυκτά καύσιμα, όπως το πετρέλαιο. Σε αυτό το πλαίσιο, η έξυπνη γεωργία διαδραματίζει σημαντικό ρόλο, παρέχοντας λύσεις για την προστασία του περιβάλλοντος και την προσαρμογή στις νέες περιβαλλοντικές πολιτικές [56].
- iv. **Κοινωνικοπολιτικοί παράγοντες:** Ο τομέας της γεωργίας αποτελεί έναν από τους πιο σημαντικούς τομείς παγκοσμίως και είναι ιδιαίτερα ευαίσθητος στις διεθνείς εξελίξεις. Οι πολεμικές συγκρούσεις και οι μαζικές μετακινήσεις πληθυσμών καθιστούν επιτακτική την ανάγκη διασφάλισης μιας σταθερής και βιώσιμης γεωργίας. Οι πόλεμοι διαταράσσουν την εφοδιαστική αλυσίδα, οδηγώντας σε ελλείψεις βασικών αγαθών, γεγονός που συνεπάγεται αύξηση των τιμών. Η έξυπνη γεωργία, η οποία βασίζεται σε τεχνολογίες αιχμής, μπορεί να συμβάλει στην ανάπτυξη μιας παγκόσμιας βιώσιμης γεωργίας που θα επηρεάζεται λιγότερο από τις διεθνείς εξελίξεις, καθώς θα διαθέτει μεγαλύτερη αυτονομία, περισσότερες δυνατότητες και θα είναι σε θέση να παράγει λύσεις για την απρόσκοπτη λειτουργία του αγροκτήματος. Αυτό, με τη σειρά του, θα καθιστά τη γεωργία έναν σταθεροποιητικό παράγοντα κοινωνικής συνοχής και πολιτικής σταθερότητας, ακόμα και σε περιόδους κρίσεων [56].

2.3 Προκλήσεις

Η μετάβαση στην έξυπνη γεωργία μπορεί συχνά να αποδειχθεί ιδιαίτερα δύσκολη και πολύπλοκη, καθώς η εύρυθμη λειτουργία του συστήματος που θα χρησιμοποιηθεί εξαρτάται από πολλούς παράγοντες. Το σύστημα αυτό καλείται να ανταποκριθεί στις ανάγκες του εκάστοτε αγροκτήματος. Στις απομακρυσμένες περιοχές, οι προκλήσεις και οι δυσκολίες είναι συχνά εντονότερες, γεγονός που απαιτεί τη μελέτη και την προσαρμογή των τεχνολογιών και των πρωτοκόλλων, προκειμένου να διασφαλιστεί η μέγιστη δυνατή απόδοση και βιωσιμότητα του συστήματος [58]. Για την καλύτερη απόδοση και την αποτελεσματικότητα του συστήματος, είναι απαραίτητο να ληφθούν υπόψη οι παρακάτω παράγοντες που ακολουθούν.

2.3.1 Συνδεσιμότητα

Οι αγροτικές περιοχές χαρακτηρίζονται από μεγάλη ποικιλομορφία στα γεωλογικά χαρακτηριστικά τους. Όσο πιο απομακρυσμένη και απομονωμένη είναι μια περιοχή, τόσο μεγαλύτερη είναι η δυσκολία εξασφάλισης ποιοτικής σύνδεσης στο δίκτυο, με το κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας να αυξάνεται σημαντικά [59]. Για τον λόγο αυτό, στις αγροτικές περιοχές η ασύρματη επικοινωνία προτιμάται σε μεγάλο βαθμό, καθώς το κόστος εγκατάστασής της είναι σημαντικά χαμηλότερο σε σύγκριση με το κόστος της καλωδίωσης. Επιπλέον, η ασύρματη τεχνολογία παρέχει μεγαλύτερη ευελιξία, επιτρέποντας την κάλυψη μεγάλων και δυσπρόσιτων περιοχών χωρίς την ανάγκη εκτεταμένων έργων υποδομής [60]. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η σύνδεση στο δίκτυο να είναι συχνά χαμηλής ποιότητας, ασταθής ή ακόμη και ανύπαρκτη, ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις ενδέχεται να υπάρχουν παρατεταμένες διακοπές εξαιτίας προβλημάτων, όπως ανεπαρκής ηλεκτρική τροφοδότηση ή περιορισμένη υποστήριξη και επιδιόρθωση βλαβών που σχετίζονται με το δίκτυο της περιοχής.

Η έξυπνη γεωργία βασίζεται συνήθως σε ένα δίκτυο αισθητήρων που αλληλεπιδρούν με το περιβάλλον και εκτελούν προκαθορισμένες ενέργειες σύμφωνα με τις οδηγίες του χρήστη. Η διασφάλιση της αδιάλειπτης επικοινωνίας εντός του αγροκτήματος αποτελεί κρίσιμο ζήτημα, καθώς τα δεδομένα που συλλέγουν οι αισθητήρες πρέπει να μεταδίδονται με συνέπεια και ακρίβεια σε καθορισμένα χρονικά διαστήματα, ώστε το σύστημα να λαμβάνει σωστές αποφάσεις. Η συνεχής παρακολούθηση και ο έλεγχος του δικτύου είναι απαραίτητος για την πρόληψη και αποφυγή ανεπιθύμητων καταστάσεων. Για παράδειγμα, η επιτήρηση μιας ηλεκτρομαγνητικής βαλβίδας είναι ζωτικής σημασίας για την αποφυγή πλημμύρας λόγω υπερβολικής άρδευσης. Εάν ένας αισθητήρας αποσυνδεθεί από το δίκτυο, δεν θα μπορέσει να μεταδώσει τα απαραίτητα δεδομένα για την ανίχνευση του προβλήματος, με αποτέλεσμα να μην εκτελούνται οι κατάλληλες ενέργειες.

Επιπλέον, υπάρχουν διάφοροι παράγοντες που επηρεάζουν τη συνδεσιμότητα του δικτύου και την επικοινωνία μεταξύ των συσκευών. Εκτός από την αδυναμία σύνδεσης στο δίκτυο, είναι εξίσου σημαντική η πρόληψη για την προστασία των ίδιων των συσκευών. Οι αισθητήρες και οι συσκευές, όντας εκτεθειμένοι σε εξωτερικές συνθήκες, κινδυνεύουν από καιρικά φαινόμενα που μπορεί να προκαλέσουν βλάβες ή καταστροφές. Η προληπτική προστασία, αν και αυξάνει το αρχικό κόστος εγκατάστασης, μπορεί να μειώσει σημαντικά το κόστος συντήρησης, να επιμηκύνει τη διάρκεια ζωής των συσκευών και να βελτιώσει την αξιοπιστία του δικτύου επικοινωνίας [61]. Με σκοπό την πιο αξιόπιστη σύνδεση στο δίκτυο, θα μπορούσε να εξεταστεί η χρήση δορυφορικής ζεύξης, η οποία προσφέρει αυξημένη ταχύτητα και ταχύτερη επεξεργασία των δεδομένων. Ωστόσο, η παροχή δικτύου μέσω δορυφόρου συνοδεύεται από σημαντικά υψηλότερο κόστος σε σύγκριση με την ασύρματη σύνδεση. Για τον λόγο αυτό, είναι απαραίτητος ο σωστός σχεδιασμός του συστήματος του αγροκτήματος, ώστε να προβλεφθούν και να καλυφθούν με ακρίβεια οι ανάγκες του. Μια ορθά σχεδιασμένη προσέγγιση θα επιτρέψει τη χρήση της κατάλληλης τεχνολογίας σύνδεσης, λαμβάνοντας υπόψη παραμέτρους όπως το κόστος, η αξιοπιστία και η λειτουργικότητα, ώστε να εξασφαλιστεί η βέλτιστη απόδοση του συστήματος [62].

2.3.2 Παρεμβολές

Ένας κρίσιμος παράγοντας που επηρεάζει τη λειτουργικότητα και την αξιοπιστία του συστήματος είναι οι παρεμβολές. Στα αγροκτήματα, όπου συνήθως υπάρχουν πολλές και παράλληλες λειτουργίες για την κάλυψη των αναγκών του σχεδιασμού, ο κίνδυνος για παρεμβολές είναι αυξημένος. Για παράδειγμα, μπορεί να συνυπάρχουν αισθητήρες για τον έλεγχο της κατάστασης του εδάφους, το αυτόματο πότισμα, την παρακολούθηση των αλλαγών του καιρού, καθώς και της κατάστασης της σοδειάς. Αυτή η πληθώρα

συσκευών που λειτουργούν ταυτόχρονα με σκοπό την αποτελεσματική διαχείριση του αγροκτήματος αυξάνει την πιθανότητα παρεμβολών μεταξύ των σημάτων τους. Οι παρεμβολές, που ορίζονται ως η παραμόρφωση ενός χρήσιμου σήματος από την παρουσία ενός άλλου, αποτελούν συχνό φαινόμενο σε περιβάλλοντα με μεγάλο αριθμό συσκευών. Ο κίνδυνος αυτός είναι ιδιαίτερα υψηλός όταν χρησιμοποιούνται πρωτόκολλα επικοινωνίας που λειτουργούν σε μη αδειοδοτημένες ζώνες φάσματος, όπως το ZigBee, το Wi-Fi, το SigFox και το LoRaWAN. Για την αποφυγή τέτοιων προβλημάτων, είναι απαραίτητος ο προσεκτικός σχεδιασμός του δικτύου επικοινωνίας, λαμβάνοντας υπόψη την κατανομή συχνοτήτων, τις ζώνες φάσματος, καθώς και την απόσταση και την ισχύ των σημάτων, ώστε να εξασφαλίζεται η απρόσκοπτη λειτουργία του συστήματος [61]. Μια πιθανή προσέγγιση για την αντιμετώπιση των παρεμβολών είναι η χρήση συσκευών που λειτουργούν σε αδειοδοτημένο φάσμα. Αυτή η επιλογή μπορεί να συμβάλλει στη μείωση ή ακόμα και στην εξάλειψη των παρεμβολών, καθώς το αδειοδοτημένο φάσμα παρέχει ελεγχόμενη πρόσβαση και μειώνει την πιθανότητα αλληλοεπικάλυψης σημάτων. Ωστόσο, λόγω της πολιτικής για περιορισμένη ανάθεση φάσματος στις κυψελοειδείς ζώνες, η χρήση αυτής της προσέγγισης ενδέχεται να είναι περιορισμένη. Επιπλέον, η επαναχρησιμοποίηση μη-ορθογώνιου σχήματος πολλαπλής πρόσβασης (Non-Orthogonal Multiple Access - NOMA), αν και προσφέρει αυξημένη χωρητικότητα στο φάσμα, μπορεί να εξακολουθεί να δημιουργεί παρεμβολές μεταξύ συσκευών που χρησιμοποιούν κυψελοειδές φάσμα σε αδειοδοτημένες περιοχές. Για την ελαχιστοποίηση αυτών των φαινομένων, είναι απαραίτητο να υιοθετηθούν προηγμένες τεχνικές διαχείρισης του φάσματος και βελτιστοποίησης της κατανομής των συχνοτήτων, λαμβάνοντας υπόψη τις ειδικές απαιτήσεις του αγροκτήματος και τις ιδιαιτερότητες της κάθε περιοχής [63].

Παρεμβολές μπορούν να προκύψουν όχι μόνο εντός του αγροκτήματος αλλά και από το αγρόκτημα προς το δίκτυο ή γενικότερα στην περιοχή. Στις αγροτικές περιοχές, όπου κυριαρχεί η χρήση ασύρματων δικτύων, η ποικιλομορφία του εδάφους συχνά δημιουργεί προκλήσεις. Φυσικά εμπόδια, όπως βουνά, δέντρα, πυκνή βλάστηση, αλλά και άλλες γεωλογικές ιδιαιτερότητες, μπορούν να προκαλέσουν φυσικές παρεμβολές που υποβαθμίζουν την ποιότητα του σήματος. Επιπρόσθετα, οι ηλεκτρικές γεννήτριες, οι οποίες χρησιμοποιούνται συχνά σε απομακρυσμένες περιοχές για την εξασφάλιση ηλεκτρικής ενέργειας, μπορεί να αποτελέσουν πηγή ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών στο δίκτυο. Τέλος, ακραία καιρικά φαινόμενα, όπως έντονες βροχοπτώσεις, καταιγίδες και κεραυνοί, χαλάζι, υψηλές θερμοκρασίες, σκόνη, υγρασία, μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά την ποιότητα του σήματος, καθιστώντας τη σύνδεση ασταθή ή ακόμη και μη διαθέσιμη για ορισμένες χρονικές περιόδους. Για την αποτελεσματική αντιμετώπιση αυτών των προκλήσεων, είναι απαραίτητος ο κατάλληλος σχεδιασμός και η χρήση τεχνολογιών που μπορούν να προσαρμοστούν στις απαιτητικές συνθήκες αυτών των περιοχών [59].

2.3.3 Κόστος

Το κόστος αποτελεί έναν από τους βασικότερους ανασταλτικούς παράγοντες που αποτρέπουν τους αγρότες από την υιοθέτηση συστημάτων έξυπνης γεωργίας. Στις αγροτικές ή απομακρυσμένες περιοχές, τα εισοδήματα είναι συνήθως χαμηλότερα συγκριτικά με τα αστικά κέντρα, γεγονός που περιορίζει τις οικονομικές δυνατότητες για επενδύσεις σε καινοτόμες τεχνολογίες. Το κεφάλαιο που απαιτείται για την εγκατάσταση του εξοπλισμού και τη διαχείριση του δικτύου είναι αρκετά υψηλό, γεγονός που αποθαρρύνει πολλούς αγρότες από το να προχωρήσουν στη μετάβαση αυτή. Παρόλο που σε βάθος χρόνου η έξυπνη γεωργία μπορεί να αυξήσει σημαντικά τα εισοδήματα και να επιτρέψει την απόσβεση του αρχικού κόστους, στα πρώτα στάδια η οικονομική επιβάρυνση είναι ιδιαίτερα αισθητή. Για αυτόν τον λόγο, η υιοθέτηση αυτών των συστημάτων γίνεται συνήθως σταδιακά. Οι αγρότες ξεκινούν με την

κάλυψη βασικών αναγκών του αγροκτήματος και σταδιακά επεκτείνονται στην ενσωμάτωση περισσότερων "έξυπνων" λύσεων, ώστε να μειώσουν το αρχικό κόστος επένδυσης [64]. Επιπλέον, ο αγρότης δεν έχει να αντιμετωπίσει μόνο την αρχική επένδυση, αλλά και τα συνεχή λειτουργικά κόστη που σχετίζονται με την ομαλή λειτουργία του συστήματος. Στα κόστη αυτά περιλαμβάνεται η εξασφάλιση αξιόπιστης σύνδεσης στο δίκτυο, η οποία πρέπει να καλύπτει τις ανάγκες του αγροκτήματος και να προσφέρει αδιάλειπτη παροχή υπηρεσιών.

Είναι κρίσιμο να ληφθεί υπόψη η δυνατότητα μελλοντικής επέκτασης του δικτύου, ώστε να εξασφαλιστεί η βιωσιμότητα και η επάρκεια της υποδομής για την κάλυψη αυξανόμενων αναγκών. Στις αγροτικές περιοχές, το κόστος σύνδεσης στο διαδίκτυο είναι συχνά υψηλότερο σε σχέση με τα αστικά κέντρα. Αυτό οφείλεται κυρίως στην περιορισμένη παρουσία παρόχων, γεγονός που περιορίζει τον ανταγωνισμό και οδηγεί σε υψηλότερες τιμές. Η έλλειψη επιλογών μπορεί να αναγκάσει τους αγρότες να πληρώνουν ακριβά για υπηρεσίες που στις αστικές περιοχές παρέχονται με πιο προσιτό κόστος. Ως αποτέλεσμα, το οικονομικό βάρος αυξάνεται περαιτέρω, κάνοντας τη μετάβαση στην έξυπνη γεωργία ακόμη πιο δύσκολη για τους μικρούς και μεσαίους αγρότες [65]. Στα λειτουργικά έξοδα του αγροκτήματος θα πρέπει να περιλαμβάνεται και η συντήρηση της υποδομής. Αυτό συνεπάγεται ότι θα πρέπει να πραγματοποιούνται τακτικοί έλεγχοι στις συσκευές και να διενεργείται η κατάλληλη συντήρηση ή αντικατάσταση των εξαρτημάτων, όποτε κρίνεται αναγκαίο από τον εξουσιοδοτημένο τεχνικό. Σκοπός αυτών των ενεργειών είναι η εξασφάλιση της ομαλής λειτουργίας του συστήματος και η μεγιστοποίηση της διάρκειας ζωής του εξοπλισμού [64]].

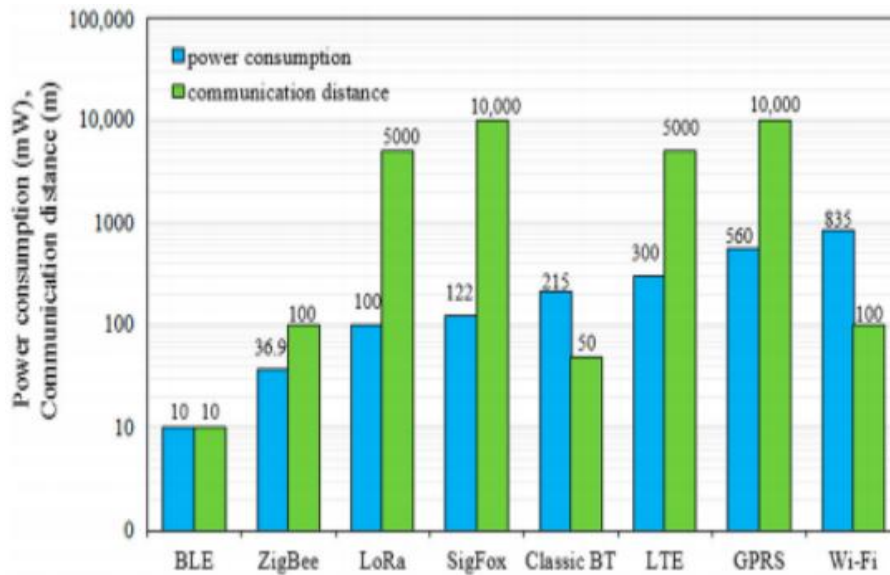
Το κόστος της επένδυσης εξαρτάται από την τεχνολογία που θα επιλεγεί. Για παράδειγμα, η υιοθέτηση ενός συστήματος IoT, το οποίο θα αποτελείται από ένα σύνολο αισθητήρων, απαιτεί την πρόβλεψη των καιρικών συνθηκών για τη διασφάλιση της βιωσιμότητας των συσκευών. Συγκεκριμένα, οι συσκευές πρέπει να διαθέτουν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά που ενδέχεται να αυξήσουν το κόστος. Για παράδειγμα, ένας εξωτερικός αισθητήρας που θα τοποθετείται στο χωράφι, επιθυμητά, θα πρέπει να πληροί το πρότυπο αδιαβροχοποίησης IP68, ώστε να εξασφαλίζεται η ανθεκτικότητά του έναντι βροχών και υγρασίας. Αν και θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί άλλος αισθητήρας με διαφορετικό πρότυπο, αυτό θα είχε ως αποτέλεσμα την ταχύτερη φθορά του αισθητήρα, με την ανάγκη για αντικατάσταση, γεγονός που τελικά θα οδηγούσε σε υψηλότερο κόστος από το αν είχε γίνει εξ αρχής η εγκατάσταση ενός πιο κατάλληλου αισθητήρα. Ένα ακόμα λειτουργικό έξοδο θα μπορούσε να είναι οι συνδρομές. Για παράδειγμα, το πρωτόκολλο NB-IoT λειτουργεί σε αδειοδοτημένες ζώνες συχνότητας κινητής τηλεφωνίας. Αυτό συνεπάγεται ότι απαιτείται η χρήση της υποδομής του παρόχου, καθώς και χρήση εξειδικευμένου εξοπλισμού για αυτό τον σκοπό, γεγονός που αυξάνει το κόστος των λειτουργικών εξόδων. Επιπλέον, ένα άλλο λειτουργικό έξοδο που μπορεί να προκύψει αφορά τη διαχείριση μεγάλου όγκου δεδομένων σε ειδικές περιπτώσεις. Η συλλογή, η μετάδοση και η αποθήκευση των δεδομένων πρέπει να πραγματοποιούνται με αξιόπιστο τρόπο, καθώς είναι κρίσιμες για τη σωστή λειτουργία του συστήματος. Η επεξεργασία των δεδομένων που συλλέγονται, με σκοπό τη λήψη σωστών αποφάσεων, μπορεί να απαιτεί υψηλή υπολογιστική ισχύ. Για τον λόγο αυτό, είναι αναγκαία η χρήση κάποιου παρόχου υπηρεσιών cloud, προκειμένου να εξασφαλιστεί η απόδοση του συστήματος. Η συνδρομή που θα χρειαστεί να πληρώνει ο αγρότης εξαρτάται από τον όγκο των δεδομένων που πρέπει να διαχειρίζεται στον διακομιστή cloud, καθώς και από τις ταχύτητες που απαιτούνται για τη λήψη και την αποστολή δεδομένων. Οι ταχύτητες αυτές εξαρτώνται από τα πρωτόκολλα επικοινωνίας που έχουν επιλεγεί, και βάσει αυτών θα πρέπει να γίνει η κατάλληλη επιλογή συνδρομής, με σκοπό να διασφαλιστεί η αποτελεσματικότητα και η αξιόπιστη μεταφορά δεδομένων [61].

2.3.4 Ηλεκτροδότηση

Στις απομακρυσμένες περιοχές, τα προβλήματα ηλεκτροδότησης αποτελούν σημαντικό ζήτημα, καθώς υπάρχουν περιοχές που μπορεί να αντιμετωπίζουν συχνές διακοπές ρεύματος, ασταθή τάση κατά τη διάρκεια της ημέρας ή ακόμη και πλήρη έλλειψη ηλεκτροδότησης. Επιπλέον, σε περίπτωση βλάβης στο δίκτυο ηλεκτροδότησης, ο χρόνος απόκρισης για την επιδιόρθωση της βλάβης είναι συχνά άγνωστος και μπορεί να είναι μεγάλος, ανάλογα με την έκταση της ζημιάς. Στα αγροκτήματα, η παροχή ηλεκτρικού ρεύματος είναι συνήθως λιγότερο διαθέσιμη και οι απαιτήσεις ενέργειας είναι διαφορετικές. Όσο περισσότερες συσκευές εντάσσονται σε ένα σύστημα έξυπνου αγροκτήματος, τόσο αυξάνεται η ζήτηση για ενέργεια. Ένα σημαντικό πρόβλημα είναι η μη σταθερή ισχύς του ρεύματος, η οποία μπορεί να προκαλέσει βλάβες ή ακόμα και καταστροφή στις συσκευές, όταν η τάση της τροφοδοσίας παρουσιάζει διακυμάνσεις. Για τον λόγο αυτό, στην έξυπνη γεωργία οι συσκευές βασίζονται κυρίως σε μπαταρίες ως μέσο τροφοδότησης. Δεδομένου ότι η κάλυψη στις έξυπνες γεωργικές εφαρμογές επιτυγχάνεται κατά κύριο λόγο με ασύρματες συσκευές, είναι κρίσιμο να εφαρμοστούν λύσεις που μειώνουν την κατανάλωση ενέργειας ή παρατείνουν τη διάρκεια ζωής των μπαταριών. Η βελτίωση της διάρκειας ζωής των μπαταριών ή η μείωση της κατανάλωσης ενέργειας μιας συσκευής εξαρτάται από τον σχεδιασμό του συστήματος και τους διαθέσιμους πόρους της περιοχής όπου βρίσκεται το αγρόκτημα [60]. Μία προσέγγιση είναι η χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως [66]:

- **Ηλιακή ενέργεια:** Μέσω φωτοβολταϊκών κυψελών, η ηλιακή ακτινοβολία μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια.
- **Ασύρματη μεταφορά ενέργειας:** Οι συσκευές μπορούν να μεταφέρουν ηλεκτρομαγνητική ενέργεια μεταξύ τους. Για παράδειγμα, ένας κόμβος θα μπορούσε να παρέχει την απαραίτητη ενέργεια στους υπόλοιπους.
- **Αιολική ενέργεια:** Μέσω της εκμετάλλευσης του ανέμου παράγεται ηλεκτρική ενέργεια.
- **Ενέργεια μέσω δονήσεων:** Βασισμένη σε πιεζοηλεκτρικές μονάδες, η ενέργεια από δονήσεις μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη φόρτιση μπαταριών αισθητήρων και κόμβων.
- **Πλατφόρμα πολλαπλών πηγών ενέργειας:** Συνδυασμός τεχνολογιών (νερό, αιολική, ηλιακή) για αυξημένη παραγωγή ενέργειας, που καλύπτει τις ανάγκες του αγροκτήματος.
- **Μικροβιακές κυψέλες καυσίμου:** Μετατρέπουν τη χημική ενέργεια των ρύπων σε ηλεκτρική ενέργεια.

Η κατανάλωση ενεργείας εξαρτάται από τα πρωτόκολλα επικοινωνίας που χρησιμοποιούνται στο αγρόκτημα. Η εικόνα 7 μας δείχνει την κατανάλωση ενέργειας για κάθε ένα πρωτόκολλο και την απόσταση που μπορεί να καλύψει.



Εικόνα 7 Σύγκριση κατανάλωσης ισχύος και απόστασης επικοινωνίας [54]

2.3.5 Επεκτασιμότητα

Η επεκτασιμότητα αποτελεί το επόμενο βήμα που θα κληθεί να κάνει ο αγρότης, με στόχο να ενσωματώσει στο αγρόκτημά του περισσότερες έξυπνες λύσεις, οι οποίες θα συμβάλλουν στην αυτοματοποίηση των εργασιών που πραγματοποιούνται. Ο όρος επεκτασιμότητα αναφέρεται στην προσθήκη περισσότερων συσκευών ή κόμβων στο υπάρχον δίκτυο, αλλά και στη δημιουργία ενός νέου αυτόνομου συστήματος, εφόσον χρειαστεί, για την κάλυψη ή τη βελτίωση των αναγκών του αγροκτήματος [60]. Η διαχείριση της επεκτασιμότητας ενός δικτύου μπορεί να αποδειχθεί από τις πιο απαιτητικές πτυχές, καθώς προϋποθέτει την κατάλληλη μελέτη κατά την αρχική σχεδίαση του δικτύου.

Η επεκτασιμότητα συνδέεται άμεσα με χαρακτηριστικά όπως το κόστος, η απόδοση, η τεχνολογία, η ορθολογική διαχείριση της ενέργειας, καθώς και η διαχείριση των δεδομένων. Όσον αφορά το κόστος, αυτό καθορίζει τη δυνατότητα πραγματοποίησης της επένδυσης για την αγορά του απαραίτητου εξοπλισμού και την πιθανή αύξηση του κέρδους του αγρότη μέσω της επεκτασιμότητας του δικτύου. Η απόδοση σχετίζεται με την ποιότητα των υπηρεσιών του δικτύου και είναι σημαντικό να ελαχιστοποιούνται οι παρεμβάσεις στο ήδη υπάρχον δίκτυο κατά την ενσωμάτωση νέων συσκευών. Επιπλέον, απαιτείται λεπτομερής μελέτη ώστε να εξασφαλιστεί ότι οι νέες συσκευές δεν δημιουργούν παρεμβολές μεταξύ τους και δεν επηρεάζουν αρνητικά την απόδοση του συστήματος.

Η επιλογή της κατάλληλης τεχνολογίας διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο, καθώς καθορίζει τον σχεδιασμό του δικτύου, την απόσταση μεταξύ των συσκευών, καθώς και την εμβέλεια και την ισχύ του σήματος. Όσο περισσότερες συσκευές προστίθενται, τόσο αυξάνεται η κατανάλωση ενέργειας. Εάν οι συσκευές δεν τροφοδοτούνται από μπαταρίες, αλλά από διαφορετικές πηγές, θα χρειαστεί να εξασφαλιστεί η απαιτούμενη ενέργεια μέσω κατάλληλων ενεργειών. Τέλος, η αύξηση του αριθμού των συσκευών συνεπάγεται και την αύξηση του όγκου των δεδομένων που συλλέγονται από το αγρόκτημα. Αυτό σημαίνει ότι θα πρέπει να εξασφαλιστεί η απαραίτητη υπολογιστική ισχύς και αποθηκευτικός χώρος για την κάλυψη των αναγκών όλων των συσκευών. Εάν γίνεται χρήση απομακρυσμένης αποθήκευσης και επεξεργασίας σε κάποιον πάροχο υπηρεσιών cloud, ο αγρότης πιθανόν να χρειαστεί να αναβαθμίσει τη συνδρομή του ώστε να ανταποκρίνεται στις αυξημένες απαιτήσεις του δικτύου [67].

2.3.6 Εκπαίδευση

Στις αγροτικές περιοχές, το μορφωτικό επίπεδο είναι συχνά χαμηλότερο σε σύγκριση με τα αστικά κέντρα, γεγονός που καθιστά το ψηφιακό χάσμα πιο έντονο. Ο ψηφιακός αναλφαριθμισμός είναι υψηλός στις αγροτικές περιοχές, γεγονός που δυσχεραίνει την υιοθέτηση έξυπνων τεχνολογιών που σχετίζονται με τη διαχείριση του αγροκτήματος. Η εκπαίδευση αποτελεί βασικό παράγοντα για τη σωστή διαχείριση του αγροκτήματος. Μετά την εγκατάσταση του εξοπλισμού, ο αγρότης θα κληθεί να αναλάβει τη διαχείριση του συστήματος, λαμβάνοντας αποφάσεις με βάση τη συνολική εικόνα που παρακολουθεί. Αυτό περιλαμβάνει την αναγνώριση πιθανών προβλημάτων και την κλήση τεχνικού για περαιτέρω έλεγχο ή τη λήψη πρωτοβουλιών σχετικά με τη λειτουργία του συστήματος, αξιοποιώντας τα στατιστικά δεδομένα που παρέχονται. Όλα τα παραπάνω απαιτούν γνώσεις και κατάλληλη εξειδίκευση.

Η έξυπνη γεωργία είναι ένας σύνθετος κλάδος που περιλαμβάνει πολυάριθμες παραμέτρους. Οι λύσεις που σχετίζονται με την έξυπνη γεωργία μπορεί να απαιτούν διαφορετικά επίπεδα γνώσεων, καθώς βασίζονται σε παράγοντες όπως ο τύπος της καλλιέργειας, η διαθεσιμότητα νερού, η γνώση του εδάφους και των καιρικών συνθηκών της περιοχής. Για παράδειγμα, ορισμένες καλλιέργειες ευνοούνται από τα τοπικά μορφολογικά χαρακτηριστικά, το έδαφος και τις θερμοκρασίες του περιβάλλοντος, ενώ άλλες όχι. Αυτό καθιστά την εκπαίδευση και την κατάρτιση σε ειδικά προγράμματα σπουδών για την έξυπνη γεωργία απαραίτητη. Στόχος είναι η αύξηση της απόδοσης της επένδυσης που έχει πραγματοποιηθεί, καθώς και η βαθύτερη κατανόηση των αναγκών του αγροκτήματος, ώστε να καθοριστούν οι κατάλληλες προτεραιότητες [64].

2.3.7 Καιρικές συνθήκες

Η υλοποίηση της έξυπνης γεωργίας περιλαμβάνει ένα σύνολο αισθητήρων, συσκευών και άλλων μηχανισμών που συμβάλλουν στην καλή λειτουργία του συστήματος. Αυτοί οι μηχανισμοί βρίσκονται συχνά σε εξωτερικούς χώρους, καθιστώντας τους εκτεθειμένους στις καιρικές συνθήκες και στις συνθήκες του περιβάλλοντος. Παράγοντες όπως η συνεχής έκθεση στον ήλιο, τα υψηλά επίπεδα υγρασίας, η σκόνη, το χώμα, η βροχή και ο αέρας μπορούν να προκαλέσουν βλάβες ή δυσλειτουργίες στις συσκευές. Αυτές οι συνθήκες μειώνουν τη διάρκεια ζωής των συσκευών και ενδέχεται να επηρεάσουν αρνητικά την απόδοσή τους. Για τον λόγο αυτό, οι συσκευές θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν καλύτερα προστατευμένες από την άμεση έκθεσή τους στις καιρικές συνθήκες και στο περιβάλλον. Κατά τη διάρκεια της μελέτης για την εγκατάσταση συστημάτων έξυπνης γεωργίας, είναι απαραίτητο να λαμβάνονται υπόψη μέτρα για την αντιμετώπιση αυτών των προκλήσεων. Οι συσκευές θα πρέπει να πληρούν συγκεκριμένα πρότυπα λειτουργίας για εξωτερικούς χώρους, όπως το πρότυπο IP68, που εξασφαλίζει αδιαβροχοποίηση και αντοχή στη σκόνη. Ανάλογα με τις εκάστοτε περιβαλλοντικές συνθήκες, θα πρέπει να εφαρμόζονται τα κατάλληλα μέτρα προστασίας. Επιπλέον, είναι σημαντικό να καθορίζεται μια ρουτίνα συντήρησης για τις συσκευές, όπως ο προγραμματισμός τακτικών ελέγχων για τη διασφάλιση της ορθής λειτουργίας τους και ο καθαρισμός τους σε τακτά χρονικά διαστήματα [61], [68].

2.3.8 Υποστήριξη και συντήρηση εξοπλισμού

Ένας ακόμη κρίσιμος παράγοντας που επηρεάζει τις αγροτικές περιοχές είναι η υποστήριξη και η συντήρηση του εξοπλισμού. Στις αγροτικές περιοχές, η εξουσιοδοτημένη τεχνική υποστήριξη συχνά είναι δυσεύρετη λόγω της έλλειψης εξειδικευμένου προσωπικού. Οι συσκευές που χρησιμοποιούνται στην έξυπνη γεωργία απαιτούν τακτική συντήρηση για να λειτουργούν σωστά και απρόσκοπτα. Η συντήρηση περιλαμβάνει καθαρισμό, έλεγχο της λειτουργικότητας και της απόδοσής τους, καθώς και

έλεγχο της μπαταρίας. Επιπλέον, συχνά απαιτείται η εφαρμογή καθορισμένων αναβαθμίσεων υλικολογισμικού (firmware) που παρέχονται από τον κατασκευαστή ή η πραγματοποίηση τροποποιήσεων των ρυθμίσεων που μπορεί να αυξήσουν την απόδοση και την αποτελεσματικότητα του εξοπλισμού. Χωρίς την εφαρμογή των παραπάνω διαδικασιών, οι συσκευές ενδέχεται να παρουσιάσουν δυσλειτουργίες, όπως:

- Καθυστερήσεις στην απόκριση.
- Προβλήματα συνδεσιμότητας με άλλες συσκευές.
- Σοβαρές βλάβες που μπορεί να τις καταστήσουν μη λειτουργικές.

Αυτές οι δυσλειτουργίες μπορούν να προκαλέσουν σοβαρά προβλήματα στη συνολική απόδοση του συστήματος, εμποδίζοντας την επιτυχή λήψη αποφάσεων που σχετίζονται με τη διαχείριση του αγροκτήματος. Για παράδειγμα, αν ένας αισθητήρας που μετρά την υγρασία του εδάφους δεν λειτουργεί σωστά ή καταγράφει λανθασμένες μετρήσεις, δεν θα ενεργοποιηθεί το σύστημα ποτίσματος όταν χρειάζεται. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε καθυστέρηση στην ανάπτυξη των καλλιεργειών ή, σε σοβαρές περιπτώσεις, στην καταστροφή της σοδειάς. Η έλλειψη σωστής συντήρησης και υποστήριξης όχι μόνο επηρεάζει τη λειτουργία των συσκευών, αλλά μπορεί επίσης να επιφέρει επιπρόσθετες ζημιές σε άλλες συσκευές που βασίζονται στις δεδομένες μετρήσεις, καθιστώντας πιο περίπλοκη τη διαχείριση του αγροκτήματος [61], [68].

2.3.9 Διαλειτουργικότητα συσκευών

Στην έξυπνη γεωργία, ένα σύστημα IoT που εξυπηρετεί τις ανάγκες του αγροκτήματος αποτελείται από πολλούς διαφορετικούς αισθητήρες και συσκευές. Η χρήση διαφορετικών πρωτοκόλλων ή τεχνολογιών για την επικοινωνία των συσκευών είναι σύνηθες φαινόμενο, καθώς κάθε υποδομή πρέπει να προσαρμόζεται στις απαιτήσεις, όπως η απόσταση, η ταχύτητα μετάδοσης και η κατανάλωση ενέργειας. Οι συσκευές που εντάσσονται σε ένα δίκτυο πρέπει να εξασφαλίζουν ότι μπορούν να επικοινωνούν και να ανταλλάσσουν πληροφορίες με τις υπόλοιπες για να εκτελούν τις προγραμματισμένες λειτουργίες. Ωστόσο, όσο πιο περίπλοκο γίνεται ένα σύστημα, τόσο πιθανότερο είναι να προκύψουν ζητήματα διαλειτουργικότητας, δηλαδή καταστάσεις στις οποίες μια συσκευή αδυνατεί να επικοινωνήσει με μια άλλη λόγω ασυμβατότητας [69]. Για την επίλυση αυτών των ζητημάτων, απαιτείται η ανάπτυξη και εφαρμογή κοινών πρωτοκόλλων και προτύπων για να διασφαλιστεί η διαλειτουργικότητα μεγάλου πλήθους συσκευών IoT. Η διαλειτουργικότητα περιλαμβάνει τέσσερα βασικά χαρακτηριστικά:

- **Τεχνική:** Εστιάζει στην ανάπτυξη πρωτοκόλλων και υποδομών που επιτρέπουν στις συσκευές IoT να επικοινωνούν μεταξύ τους. Αυτή σχετίζεται κυρίως με το υλικολογισμικό των συσκευών και διασφαλίζει τη βασική τεχνική συνδεσιμότητα.
- **Συντακτική:** Αφορά τη μορφή των δεδομένων που ανταλλάσσονται, εξασφαλίζοντας ότι οι συσκευές μπορούν να αναγνωρίσουν και να επεξεργαστούν τα δεδομένα με επιτυχία. Είναι κρίσιμο να χρησιμοποιούνται κοινές μορφές δεδομένων.
- **Σημασιολογική:** Εστιάζει στην ερμηνεία του περιεχομένου των δεδομένων, διασφαλίζοντας ότι οι πληροφορίες που ανταλλάσσονται μπορούν να χρησιμοποιηθούν από τη συσκευή λήψης. Αυτό σημαίνει ότι οι συσκευές «καταλαβαίνουν» τη σημασία των δεδομένων που ανταλλάσσουν.

- **Οργανωτική:** Ασχολείται με την επεξεργασία δεδομένων μεταξύ διαφορετικών δομών και γεωγραφικών περιοχών, εξασφαλίζοντας την αξιόπιστη μεταφορά και επικοινωνία ανεξαρτήτως περιοχής ή περιβάλλοντος.

Για τη διατήρηση της διαλειτουργικότητας, είναι απαραίτητοι τακτικοί έλεγχοι και αναβαθμίσεις στο υλικολογισμικό των συσκευών. Ωστόσο, η μονομερής αναβάθμιση κάποιων συσκευών χωρίς συντονισμό μπορεί να προκαλέσει δυσλειτουργίες στην επικοινωνία και να επηρεάσει την αξιοπιστία του συστήματος. Η διασφάλιση μιας αρμονικής λειτουργίας προϋποθέτει κοινή διαχείριση και συμμόρφωση με τα καθιερωμένα πρότυπα και διαδικασίες [63].

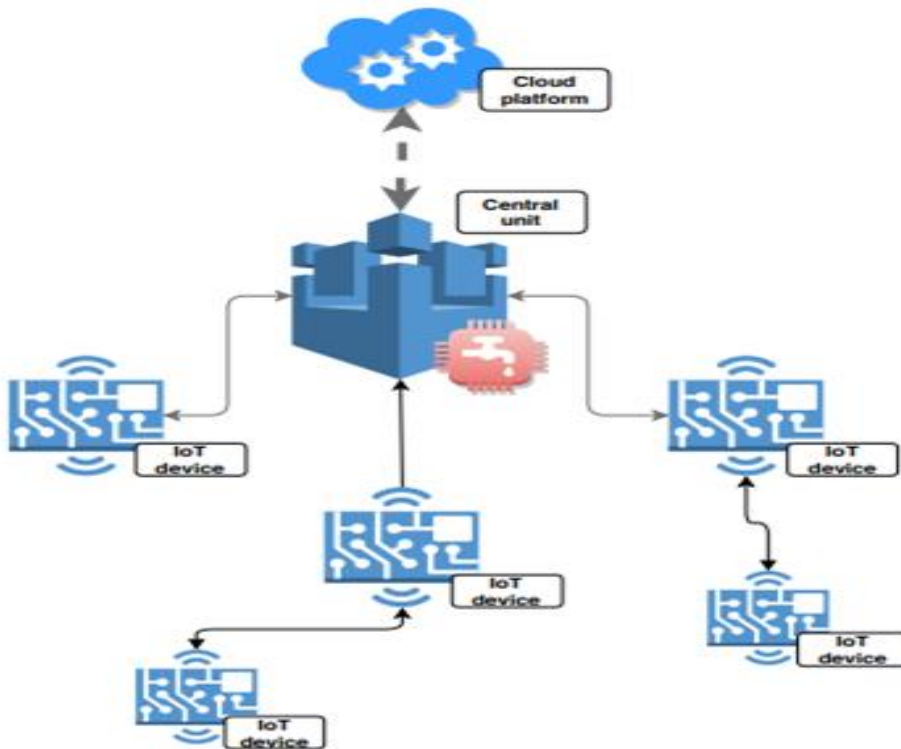
2.4 Αρχιτεκτονική

Στην έξυπνη γεωργία εφαρμόζονται διαφορετικές προσεγγίσεις, οι οποίες επικεντρώνονται στη σωστή λειτουργία συγκεκριμένων εφαρμογών. Λαμβάνοντας υπόψη τις συνθήκες του αγροκτήματος, όπως τους διαθέσιμους πόρους, το διαθέσιμο κεφάλαιο προς επένδυση και τις προκλήσεις της περιοχής, καταλήγουμε σε μια συγκεκριμένη αρχιτεκτονική που καλύπτει όλες τις ανάγκες για τη βέλτιστη λειτουργία του συστήματος.

Η αρχιτεκτονική αποτελείται από βασικά διακριτά στοιχεία, τα οποία είναι:

1. **Κόμβοι επικοινωνίας:** Οι κόμβοι επικοινωνίας είναι IoT συσκευές που συλλέγουν δεδομένα από το περιβάλλον τους. Μπορούν επίσης να λαμβάνουν δεδομένα και, βάσει αυτών, να εκτελούν συγκεκριμένες λειτουργίες. Οι κόμβοι μπορεί να περιλαμβάνουν αισθητήρες, ενεργοποιητές ή άλλες συσκευές IoT.
2. **Πύλες:** Οι πύλες λειτουργούν ως διαμεσολαβητές για την επικοινωνία των συσκευών με τον διακομιστή ή με υπηρεσίες cloud. Επιπλέον, μεταφέρουν πληροφορίες μεταξύ των συσκευών, έτσι ώστε κάθε συσκευή IoT να επικοινωνεί μόνο με την πύλη. Η πύλη συλλέγει δεδομένα από τις συσκευές και τα προωθεί στο cloud για επεξεργασία και αποθήκευση. Επιπλέον, οι πύλες μπορούν να επεξεργάζονται τα δεδομένα τοπικά, μειώνοντας τον όγκο των δεδομένων που αποστέλλονται στο cloud και βελτιώνοντας την απόκριση του συστήματος.
3. **Διακομιστής:** Ο διακομιστής μπορεί να βρίσκεται είτε τοπικά στο αγρόκτημα είτε απομακρυσμένα στο cloud. Είναι υπεύθυνος για την επεξεργασία, την ανάλυση και την αποθήκευση των δεδομένων που συλλέγονται από τις πύλες. Επίσης, προσφέρει υπηρεσίες και εφαρμογές στον τελικό χρήστη.
4. **Μοντέλο επικοινωνίας:** Η αρχιτεκτονική βασίζεται σε ένα συγκεκριμένο μοντέλο επικοινωνίας. Τα επικρατέστερα μοντέλα είναι:
 - **Αίτηση/Απάντηση (Request/Response):** Χρησιμοποιείται συνήθως για άμεση επικοινωνία μεταξύ δύο συσκευών.
 - **Δημοσίευση/Συνδρομή (Publish/Subscribe):** Επιτρέπει την επικοινωνία μεταξύ συσκευών μέσω ενός μεσάζοντα (broker), προσφέροντας ευελιξία σε συστήματα με πολλές συσκευές.

Η επιλογή της αρχιτεκτονικής είναι ένα από τα πιο σημαντικά βήματα στη σχεδίαση ενός συστήματος. Όσο καλύτερα σχεδιαστεί η αρχιτεκτονική, τόσο πιο αποδοτικό και αξιόπιστο θα είναι το σύστημα. Στην εικόνα παρουσιάζεται ένα γενικό παράδειγμα αρχιτεκτονικής, όπως έχει αναφερθεί παραπάνω [70], [71], [72].



Εικόνα 8 Αρχιτεκτονική IoT [54]

2.5 Περίπτωση χρήσης

Η έξυπνη γεωργία περιλαμβάνει διάφορες τεχνολογίες που είναι προσαρμοσμένες στις ανάγκες κάθε περιοχής. Οι τεχνολογίες και τα πρωτόκολλα για την υλοποίηση ενός συστήματος που χρησιμοποιείται στο αγρόκτημα μπορεί να διαφέρουν ανάλογα με την περίπτωση χρήσης. Αρχικά, πραγματοποιείται η μελέτη του περιβάλλοντος στο οποίο θα υλοποιηθεί το σύστημα, προσδιορίζοντας τα χαρακτηριστικά που απαιτούνται για τη λήψη αποφάσεων. Παράγοντες όπως η απόσταση, το κόστος, η παροχή ενέργειας, η δικτυακή υποδομή και οι μελλοντικές ανάγκες καθορίζουν τις επιλογές για την υλοποίηση του συστήματος. Στη συνέχεια, εξετάζονται οι περιπτώσεις χρήσης που σχετίζονται με το αυτόματο πότισμα, την παρακολούθηση καιρού και τη διαχείριση σοδειάς και εδάφους [57], [64]

2.5.1 Αυτόματο πότισμα

Το αυτόματο πότισμα είναι ένα από τα πιο συνηθισμένα συστήματα που συναντάμε στην έξυπνη γεωργία. Ο ρόλος του στο αγρόκτημα είναι εξαιρετικά σημαντικός και θεμελιώδης, καθώς συμβάλλει στην ταχύτερη ανάπτυξη των καλλιεργειών. Το αυτόματο πότισμα είναι ιδιαίτερα χρήσιμο, καθώς προσφέρει καλύτερη διαχείριση της κατανάλωσης νερού στο αγρόκτημα. Σε απομακρυσμένες περιοχές, όπου το νερό μπορεί να είναι περιορισμένο, ένα έξυπνο σύστημα ποτίσματος μπορεί να διαχειριστεί αποτελεσματικά τα διαθέσιμα αποθέματα, μειώνοντας σημαντικά την κατανάλωσή του. Επιπλέον, η κατανάλωση νερού συνδέεται άμεσα με την αυξανόμενη λειψυδρία που αναμένεται να γίνει εντονότερη τα επόμενα χρόνια. Για τον λόγο αυτό, είναι επιτακτική η ανάγκη για μείωση της σπατάλης νερού, με το αυτόματο πότισμα να αποτελεί μία βιώσιμη λύση στο πρόβλημα [69] [73]. Στο αυτόματο πότισμα μπορούν να υιοθετηθούν διαφορετικές στρατηγικές, ανάλογα με τις ανάγκες του αγροκτήματος. Μερικές από τις διαθέσιμες μεθόδους ποτίσματος είναι:

- **Με σταγόνα:** Χρησιμοποιούνται ειδικοί σωλήνες που διαθέτουν οπές σε όλο το μήκος τους, οι οποίες προσαρμόζονται στην έκταση του χωραφιού. Αυτή η μέθοδος προσφέρει πιο στοχευμένο πότισμα κοντά στη ρίζα του φυτού, εξοικονομώντας σημαντικές ποσότητες νερού.
- **Με εκτοξευτήρες νερού:** Οι εκτοξευτήρες συνδέονται σε ειδικούς σωλήνες και ρυθμίζονται κατάλληλα ώστε να καλύπτουν την επιθυμητή έκταση. Το πλεονέκτημα αυτής της στρατηγικής είναι ότι μπορεί να ποτίσει μεγαλύτερες εκτάσεις και είναι κατάλληλη για τους περισσότερους τύπους καλλιέργειας.
- **Με τάφρους:** Το νερό γεμίζει τις τάφρους που διαπερνούν το χωράφι, διανέμοντάς το στις καλλιέργειες.

Οι παραπάνω στρατηγικές μπορούν να λειτουργούν αυτόματα μέσω χρονοπρογραμματισμού. Ωστόσο, ο στόχος της σύγχρονης γεωργίας είναι η ενσωμάτωση τεχνολογίας που θα τις μετατρέψει σε "έξυπνες" δομές άρδευσης. Αντί να βασίζονται μόνο σε προγραμματισμένες ενέργειες, οι έξυπνες στρατηγικές αξιοποιούν δεδομένα, όπως το ποσοστό υγρασίας στο χωράφι και στο έδαφος, για να καθορίσουν πότε πρέπει να ξεκινήσει η διαδικασία άρδευσης. Με τη χρήση IoT τεχνολογιών, είναι εφικτός ο στόχος για μια πιο υγιή παραγωγή, ενώ ταυτόχρονα μειώνονται τα κόστη για τον αγρότη [74], [75]. Ένα έξυπνο σύστημα άρδευσης IoT μπορεί να αναπτυχθεί με τη χρήση ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων και να αξιοποιεί διάφορα πρωτόκολλα επικοινωνίας για τη μετάδοση δεδομένων μεταξύ των κόμβων. Η επιλογή των πρωτοκόλλων εξαρτάται από τις ανάγκες που προκύπτουν από τα χαρακτηριστικά της περιοχής και του αγροκτήματος. Τα πιο δημοφιλή πρωτόκολλα είναι τα LoRa, ZigBee, Wi-Fi, NB-IoT και BLE. Το καθένα από αυτά διαθέτει διαφορετικά χαρακτηριστικά, όπως εμβέλεια, ταχύτητα αποστολής δεδομένων και κατανάλωση ενέργειας. Ένα δίκτυο WSN, για να υποστηρίξει ένα έξυπνο σύστημα αυτόματου ποτίσματος με στόχο την αύξηση της αποδοτικότητας και της αξιοπιστίας του, πρέπει να διαθέτει τα εξής χαρακτηριστικά:

- **Ευαισθησία:** Το δίκτυο πρέπει να διαθέτει υψηλή ευαισθησία σε μικρές αλλαγές που αφορούν την υγρασία του εδάφους ή τις ανάγκες των φυτών, ώστε να εξασφαλίζεται καλύτερη απόδοση και πιο υγιής σοδειά.
- **Προσαρμοστικότητα:** Το WSN πρέπει να έχει τη δυνατότητα να προσαρμόζεται σε διαφορετικούς τύπους καλλιεργειών και να υποστηρίζει όλα τα στάδια ανάπτυξής τους.
- **Επεκτασιμότητα:** Το δίκτυο πρέπει να είναι κλιμακούμενο, επιτρέποντας την εύκολη επέκτασή του όταν κρίνεται απαραίτητο από τον διαχειριστή.
- **Φιλικότητα προς τον χρήστη:** Η διεπαφή χρήστη πρέπει να είναι εύχρηστη, χωρίς να απαιτείται σημαντική εκπαίδευση. Οι πληροφορίες πρέπει να παρουσιάζονται με απλό και κατανοητό τρόπο, καθιστώντας τες εύκολα διαχειρίσιμες.
- **Ενεργειακή απόδοση:** Οι αισθητήρες-κόμβοι πρέπει να τροφοδοτούνται είτε με μπαταρίες είτε μέσω τεχνολογιών συγκομιδής ενέργειας, ώστε να εξασφαλίζεται η μακροχρόνια λειτουργία τους.
- **Αξιόπιστη επικοινωνία:** Το WSN πρέπει να παρέχει αξιόπιστη επικοινωνία μεταξύ των αισθητήρων-κόμβων και του σταθμού βάσης, καλύπτοντας αποστάσεις έως και 1 χιλιόμετρο, ιδιαίτερα σε γεωργικά περιβάλλοντα μεγάλης έκτασης.

- **Χαμηλό κόστος:** Το δίκτυο πρέπει να αποτελεί μια οικονομική λύση τόσο για την εγκατάσταση όσο και για τη συντήρηση των κόμβων, ενώ η αντικατάστασή τους σε περίπτωση βλάβης πρέπει να είναι εύκολη.
- **Γρήγορη ανταπόκριση:** Το WSN πρέπει να παρέχει συνεχόμενη παρακολούθηση των καλλιεργειών και να ανταποκρίνεται άμεσα σε πραγματικό χρόνο στις αλλαγές που ανιχνεύει, διατηρώντας τα βέλτιστα επίπεδα υγρασίας.
- **Ανθεκτικότητα:** Το δίκτυο πρέπει να χρησιμοποιεί αξιόπιστες πηγές δεδομένων και να είναι ανθεκτικό σε σφάλματα και δυσλειτουργίες, ώστε να εξασφαλίζει καλύτερα αποτελέσματα κατά τη λειτουργία του.

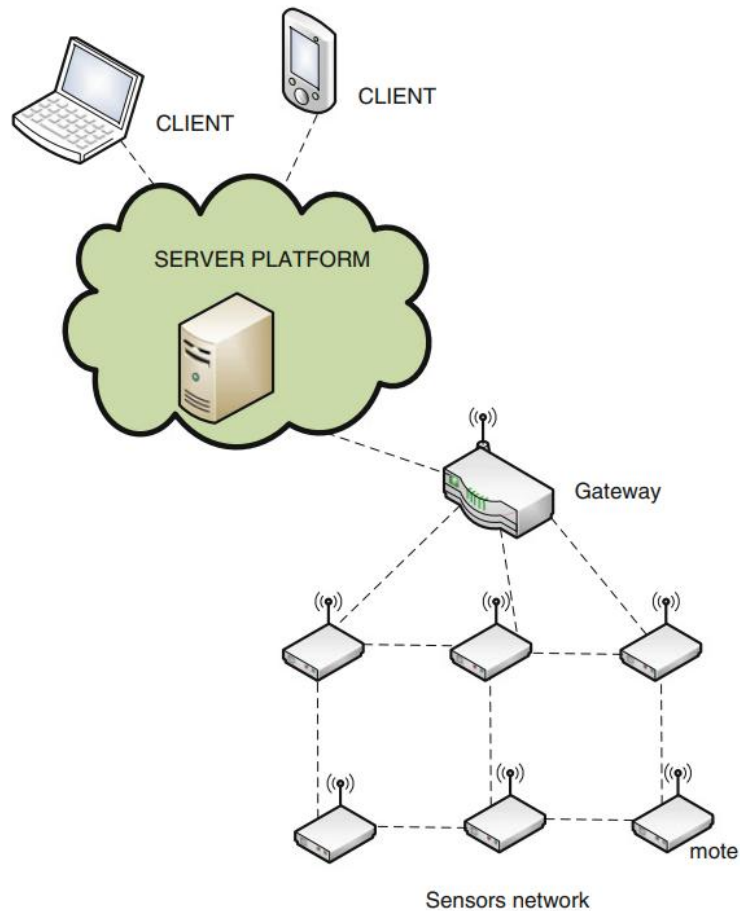
Στο αυτόματο πότισμα μπορούν να χρησιμοποιηθούν δύο διαφορετικές προσεγγίσεις για τη συλλογή της απαραίτητης πληροφορίας σχετικά με την υγρασία του εδάφους:

1. **Άμεση μέτρηση της υγρασίας του εδάφους:** Αυτή η προσέγγιση βασίζεται στη χρήση αισθητήρων που μετρούν την περιεκτικότητα του εδάφους σε νερό. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί είτε με αισθητήρες χωρητικότητας είτε με αισθητήρες που βασίζονται στη μέθοδο ανάκλασης στο χρόνο (Time Domain Reflectometry - TDR). Η μέθοδος αυτή προσφέρει μεγαλύτερη ακρίβεια και ακριβέστερα αποτελέσματα, αλλά έχει υψηλότερο κόστος λόγω της ανάγκης για μεγαλύτερο αριθμό αισθητήρων.
2. **Έμμεση μέτρηση μέσω μαθηματικού μοντέλου υδατικού ισοζυγίου:** Σε αυτή την προσέγγιση, χρησιμοποιείται ένα μοντέλο που λαμβάνει υπόψη:
 - Την ποσότητα της βροχόπτωσης.
 - Την ποσότητα νερού που παρέχεται μέσω άρδευσης.
 - Την εξάτμιση του νερού από την επιφάνεια του αγροκτήματος.
 - Την απορροή και την αποστράγγιση. Η μέθοδος αυτή είναι λιγότερο ακριβής, αλλά οικονομικότερη, καθώς απαιτεί μικρότερο αριθμό αισθητήρων.

Η πρώτη προσέγγιση προτείνεται όταν απαιτείται μεγάλη ακρίβεια στις μετρήσεις, ενώ η δεύτερη είναι κατάλληλη για οικονομικότερες λύσεις με αποδεκτό επίπεδο ακρίβειας.

Όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα, μια λύση που βασίζεται σε δίκτυο WSN περιλαμβάνει:

- **Αισθητήρες:** Συλλέγουν δεδομένα σχετικά με την υγρασία του εδάφους.
- **Μηχανικά μέρη:** Όπως βαλβίδες νερού, που διαχειρίζονται τη ροή του νερού.
- **Πύλη:** Μεταφέρει τα δεδομένα στον κεντρικό διακομιστή.
- **Κεντρικός διακομιστής:** Επεξεργάζεται τα δεδομένα και παρέχει πρόσβαση στον χρήστη μέσω εφαρμογών σε κινητά ή υπολογιστές [76], [77].



Εικόνα 9 Αρχιτεκτονική αυτόματου ποτίσματος [76]

2.5.2 Μη επανδρωμένα οχήματα

Η έξυπνη γεωργία περιλαμβάνει διαφορετικούς τομείς στην υλοποίηση των εφαρμογών και με το πέρασμα των χρόνων προστίθενται συνεχώς νέες τεχνολογικές προσεγγίσεις με σκοπό τη βελτίωση των υπάρχουσών τεχνολογιών ή την προσφορά μιας διαφορετικής υλοποίησης που στοχεύει σε καλύτερα αποτελέσματα στην έξυπνη διαχείριση του αγροκτήματος.

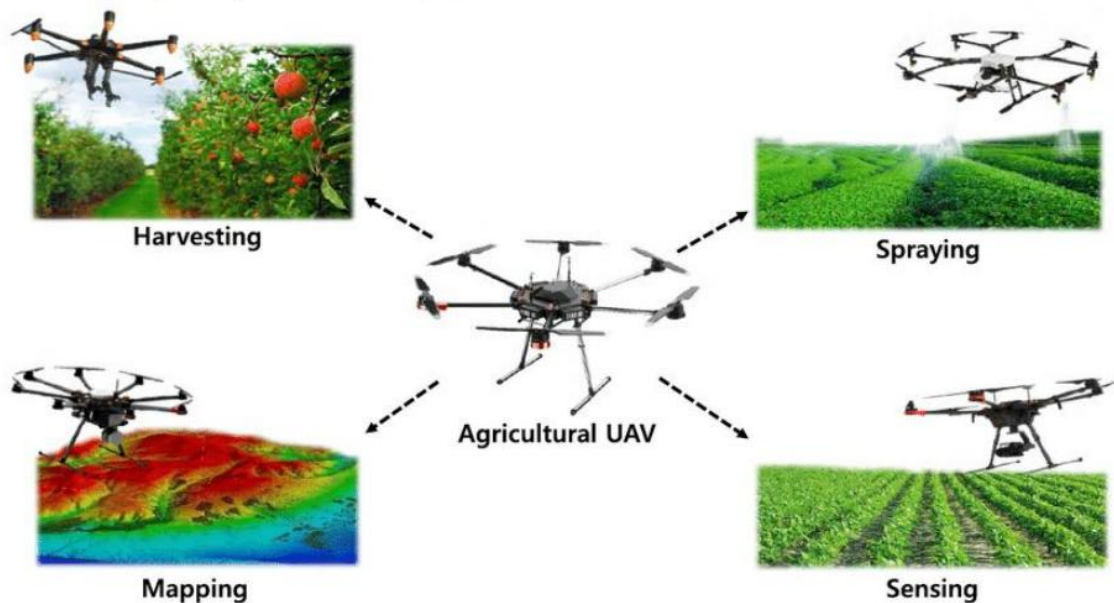
Τα μη επανδρωμένα οχήματα (Unmanned Aerial Vehicle - UAV) σε συνδυασμό με το διαδίκτυο των πραγμάτων αποτελούν δύο δημοφιλείς τεχνολογίες στον τομέα της έξυπνης γεωργίας, καλύπτοντας τα κενά άλλων τεχνολογιών και προσφέροντας νέες προοπτικές και καινοτομίες στην αποτελεσματική διαχείριση μεγάλων εκτάσεων ενός αγροκτήματος.

Τα σύγχρονα μη επανδρωμένα οχήματα έχουν πολλές χρήσεις και μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε στο έδαφος είτε στον αέρα. Η χρήση τους μπορεί να είναι χειροκίνητη, όπου από έναν σταθμό εργασίας θα υπάρχει ο χειριστής που θα ελέγχει τη διαδρομή και τις εργασίες του μη επανδρωμένου οχήματος σε πραγματικό χρόνο. Επιπλέον, υπάρχει η ημι-αυτοματοποιημένη λειτουργία, όπου είτε από τον σταθμό εργασίας είτε μέσω μιας εφαρμογής σε υπολογιστή ή κινητό τηλέφωνο θα γίνεται ο σχεδιασμός της πορείας και των εργασιών. Ο σχεδιασμός μπορεί να βασίζεται στον γεωεντοπισμό μέσω Global Positioning System (GPS), καθορίζοντας τα όρια του αγροκτήματος και σχεδιάζοντας με βάση συγκεκριμένες συντεταγμένες. Εναλλακτικά, μπορεί να γίνει μέσω δυναμικής χαρτογράφησης του αγροκτήματος, όπου αρχικά με χειροκίνητο έλεγχο πραγματοποιείται πλήρης σάρωση των περιοχών.

Οι πληροφορίες αυτές αποθηκεύονται και χρησιμοποιούνται για την εκτέλεση συγκεκριμένων εργασιών αυτόνομα [77], [78].

Ένα αυτόνομο μη επανδρωμένο όχημα βασίζεται αποκλειστικά στους αισθητήρες που διαθέτει, δημιουργώντας και παραμετροποιώντας δυναμικά τη διαδρομή του και τις ενέργειές του με βάση τις μεταβολές που ανιχνεύει στο χώρο κίνησής του.

Στην έξυπνη γεωργία, τα μη επανδρωμένα εναέρια οχήματα (drones) είναι πιο διαδεδομένα από τα μη επανδρωμένα οχήματα εδάφους. Τα drones προσφέρουν μεγάλη ευελιξία λόγω της ταχύτητας, της κινητικότητας και της απουσίας εξάρτησης από φυσικά εμπόδια, όπως καλλιέργειες, ζώα, κτίρια και αισθητήρες. Επιπλέον, χάρη στις πρόσφατες εξελίξεις στην ηλεκτρονική, έχει αυξηθεί σημαντικά η επεξεργαστική τους ισχύς, επιτρέποντας την επικοινωνία M2M για άμεση ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ drones και άλλων συσκευών του αγροκτήματος. Αυτή η δυνατότητα συμβάλλει στον καλύτερο προγραμματισμό και εκτέλεση εργασιών όπως φαίνεται και στην εικόνα που ακολουθεί.



Εικόνα 10 Διάφοροι τύποι λειτουργιών των Drones [77]

Τα γεωργικά drones διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην έξυπνη γεωργία, με τη χρήση τους να αυξάνεται διαρκώς λόγω της μείωσης του κόστους και της διεύρυνσης του πεδίου εφαρμογής τους. Σήμερα, χρησιμοποιούνται για ανάλυση πεδίου, φύτευση καλλιεργειών, ψεκασμό, παρακολούθηση και αξιολόγηση της υγείας των καλλιεργειών. Τα γεωργικά drones έχουν μεταμορφώσει τον αγροτικό τομέα, προσφέροντας μια νέα στρατηγική προσέγγιση και αυξάνοντας τη βιωσιμότητα των συστημάτων μέσω της χρήσης δεδομένων σε πραγματικό χρόνο .

Τα drones, εξοπλισμένα με θερμικούς ή πολυφασματικούς αισθητήρες, μπορούν να εντοπίσουν περιοχές καλλιεργειών που χρειάζονται προσαρμογές στην άρδευση, αποστέλλοντας τις πληροφορίες στον αντίστοιχο ελεγκτή του συστήματος. Έτσι, ενημερώνεται για τις περιοχές που χρειάζονται άρδευση λόγω μειωμένης υγρασίας ή για αυτές που παρουσιάζουν υπερβολική υγρασία. Επιπλέον, οι αισθητήρες επιτρέπουν τον υπολογισμό του δείκτη βλάστησης, ελέγχοντας σε πραγματικό χρόνο την υγεία των φυτών.

Οι γεωργικές περιοχές παρουσιάζουν πολλές δυσκολίες στον τομέα των τηλεπικοινωνιών, με κύριο πρόβλημα την κακή ποιότητα σήματος. Αυτό δυσχεραίνει την ανάπτυξη δικτύων IoT και την αξιόπιστη

ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ αισθητήρων. Τα drones μπορούν να αποτελέσουν εναλλακτική λύση, βελτιώνοντας την ποιότητα του σήματος και διασφαλίζοντας τη σταθερή επικοινωνία των αισθητήρων.

Τα γεωργικά drones είναι πλέον ικανά να αντικαταστήσουν τα αεροπλάνα ψεκασμού, τα οποία χρησιμοποιούνταν κυρίως για την κάλυψη μεγάλων εκτάσεων καλλιεργειών. Επίσης, μπορούν να αντικαταστήσουν τις δορυφορικές ή εναέριας φωτογραφίες, παρέχοντας πιο ακριβείς εικόνες σε πραγματικό χρόνο. Η δυναμική ανάλυση των εικόνων που συλλέγουν τα drones επιτρέπει την καλύτερη διαχείριση των αγροτικών εργασιών, βελτιώνοντας τόσο την αποδοτικότητα όσο και τη βιωσιμότητα της καλλιέργειας [55], [77].

Τα γεωργικά drones χωρίζονται σε ορισμένες κατηγορίες, οι οποίες είναι διακριτές ανάλογα με τη χρήση για την οποία προορίζονται, καθώς και με άλλα χαρακτηριστικά, όπως η αυτονομία πτήσης και η διαχείριση του χώρου του αγροκτήματος όσον αφορά την προσγείωση και την απογείωσή τους.

- **Drones με σταθερά πτερύγια:** Σχεδιασμένα για την κάλυψη εκτεταμένων περιοχών, τα drones αυτά πετούν σε μεγάλο υψόμετρο και καταγράφουν εικόνες υψηλής ανάλυσης. Χρησιμοποιούνται κυρίως για χαρτογράφηση και επιτήρηση μεγάλων αγροκτημάτων.
- **Πολυρότορα drones:** Ιδανικά για εφαρμογές που απαιτούν υψηλή ακρίβεια, όπως ο στοχευμένος ψεκασμός. Διαθέτουν μεγάλη ευελιξία και ικανότητα αιώρησης, ενώ μπορούν να απογειώνονται και να προσγειώνονται κάθετα, καθιστώντας τα κατάλληλα για περιοχές με δύσκολο έδαφος.
- **Υβριδικά drones:** Συνδυάζουν τα χαρακτηριστικά των drones με σταθερά πτερύγια και των πολυρότορων drones. Μπορούν να απογειώνονται και να προσγειώνονται κάθετα, ενώ ταυτόχρονα είναι κατάλληλα για εκτεταμένη πτήση, παρέχοντας μεγάλη κάλυψη και ακρίβεια στις εργασίες τους.
- **Drones με πτυσσόμενα πτερύγια:** Το κύριο χαρακτηριστικό αυτής της κατηγορίας είναι η εύκολη φορητότητα, χωρίς να μειώνεται η απόδοση. Χρησιμοποιούνται σε γεωργικές εργασίες μικρής ή μεσαίας κλίμακας και είναι ιδιαίτερα βολικά για μεταφορά σε διαφορετικά σημεία του αγροκτήματος ή μεταξύ αγροκτημάτων [79].

Τα αγροτικά drones μπορούν να επικοινωνήσουν με διάφορες τεχνολογίες και η χρήση της εκάστοτε τεχνολογίας εξαρτάται από την χρήση και από την εφαρμογή που θέλουμε να υλοποιήσουμε. Η τεχνολογία που θα χρησιμοποιηθεί για την επικοινωνία των drones είναι στενά συνδεδεμένη με δυο κρίσιμους παράγοντες.

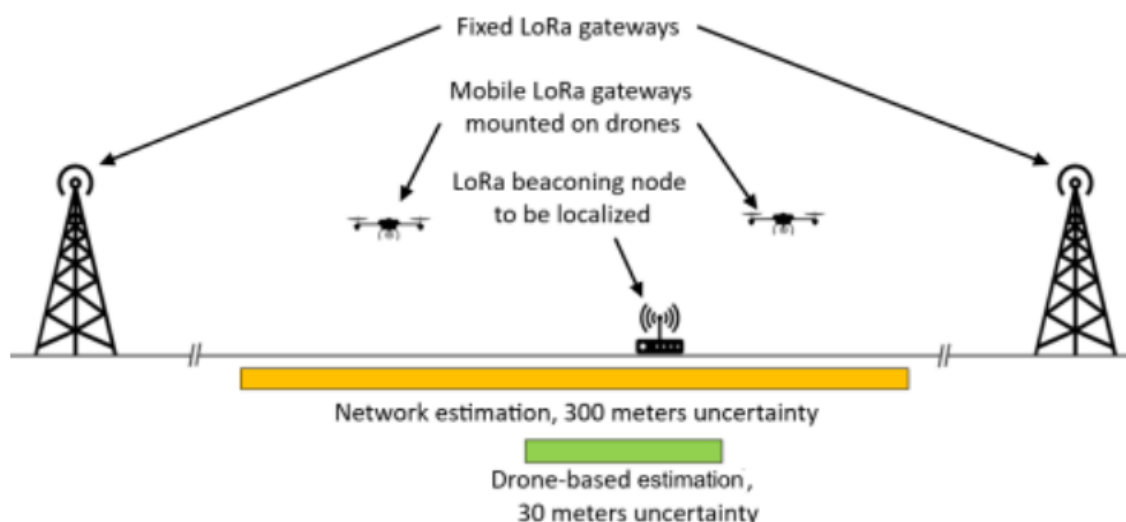
- **Εξασθένηση καναλιού:** Είναι πολύ σημαντικός ο υπολογισμός της εξασθένησης του σήματος. Πρέπει να εξασφαλιστεί το περιθώριο εξασθένησης που υπάρχει ανάμεσα στον πομπό και τον δεκτή έτσι ώστε να θεωρείται η επικοινωνία πάντα αξιόπιστη.
- **Πρόβλεψη περιοχής κάλυψης:** Θα πρέπει να γίνεται εκτίμηση της μέγιστης περιοχής που καλύπτει το drone με βάση την διαμόρφωση υλικού που έχει γίνει και τις ασύρματες τεχνολογίες που χρησιμοποιείτε αυτό μας οδηγεί στην δημιουργία ενός μοντέλου του όπου ο χειρίστης του drone θα μπορεί να αντλεί πληροφορίες από αυτό με σκοπό τον σωστό χειρισμό του drone και την σωστή ανάθεση πληροφοριών που αφορούν την πτήση και της εργασίες που πρέπει να πραγματοποιηθούν στο αγρόκτημα.

Στα αγροτικά Drones διαδεδομένη είναι η χρήση της ασύρματης τεχνολογίας LPWAN, η οποία περιλαμβάνει τα πρωτόκολλα LoRa, SigFox και NB-IoT. Ακολουθεί ένας πίνακας που περιλαμβάνει τις βασικές διαφορές στα χαρακτηριστικά ανάμεσα στα 3 πρωτόκολλα επικοινωνίας.

Πίνακας 1 Διαφορές ανάμεσα στα πρωτόκολλα LPWAN [80]

Περιγραφή	LoRa	SigFox	NB-IoT
Κάλυψη (αγροτικές περιοχές)	20 χιλιόμετρα	40 χιλιόμετρα	10 χιλιόμετρα
Ζώνη συχνότητα	Χωρίς άδεια	Χωρίς άδεια	Ζώνες LTE με άδεια χρήσης
Μέγιστος ρυθμός μεταφοράς δεδομένων	50kbps	100bps	200kbps
Διάρκεια ζωής μπαταρίας	20 χρόνια	10 χρόνια	10 χρόνια
Τυποποίηση	LoRa Alliance	SigFox and ETSI	3GPP

Από τα διαθέσιμα πρωτόκολλα LPWAN πιο διαδεδομένο για την χρήση drones είναι το πρωτόκολλο LoRa το οποίο συνδικάζει τα χαρακτηριστικά της εμβέλειας και της ταχύτητας μετάδοσης των δεδομένων και είναι μια καλή λύση καθότι προσφέρει μεγαλύτερη διάρκεια ζωής στις μπαταρίες των συσκευών. Μια από τις χρήσεις του πρωτόκολλου LoRa είναι ο εντοπισμός των συσκευών IoT μέσω drone διότι σε διαφορετική περίπτωση τα drones θα πρέπει να έχουμε έναν δέκτη Global Navigation Satellite System (GNSS) και έναν ασύρματο πομπό σε κάθε drone, ο συνδυασμός όμως του δέκτη και του ασύρματου πομπού αυξάνει σημαντικά την κατανάλωση ενέργειας και το κόστος. Με την χρήση του πρωτοκόλλου LoRa μπορεί να γίνει εντοπισμός των συσκευών IoT με βάση την ισχύ του σήματος που λαμβάνεται από τους σταθμούς λήψης αναφοράς και συνήθως είναι σταθεροί. Όπως φαίνεται στην εικόνα οι σταθεροί σταθμοί βάσης LoRa υπολογίζουν την θέση του drone έχοντας μια πιθανή απόκλιση μέχρι και 300 μέτρα. Για να βελτιωθεί η ακρίβεια μπορεί να γίνει χρήση κινητών σταθμών βάσης LoRa επάνω σε drones μειώνοντας την πιθανή απόκλιση στα 30 μέτρα [81]

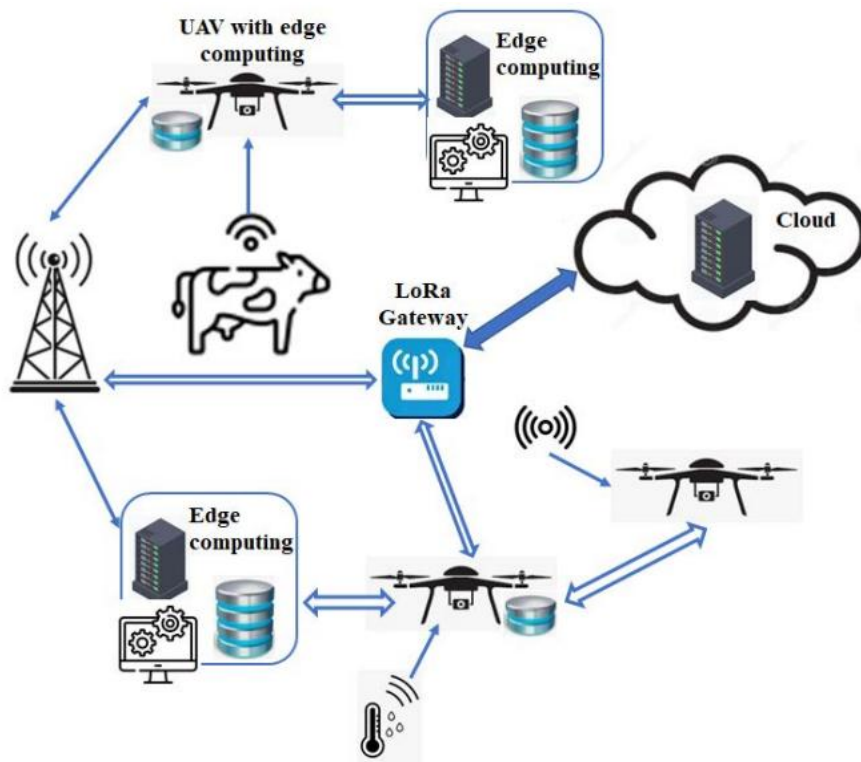


Εικόνα 11 Εντοπισμός συσκευών IoT με χρήση LoRa [81]

Μια ακόμα περίπτωση χρήσης των UAVs είναι η παρακολούθηση των κοπαδιών που μπορεί να έχει ο αγρότης στο αγρόκτημα του. Είναι πολύ σημαντικό διότι σε πραγματικό χρόνο ο κτηνοτρόφος μπορεί

να γνωρίζει που είναι το κοπάδι του και ποια είναι η κατάσταση του. Μερικά από τα πλεονεκτήματα της χρήσης των drones είναι τα εξής [82]:

- **Καταμέτρηση και ανίχνευση ζώων:** Τα drones μέσα από την κάμερα που περιλαμβάνουν στον εξοπλισμό τους δίνεται η δυνατότητα για να γίνει χρήση τεχνικών ανίχνευσης αντικειμένων, έτσι με βάση αυτή την τεχνική μέσα από το drones μπορεί να γίνει η καταμέτρηση του κοπαδιού αλλά και η ανίχνευση των ζώων εξασφαλίζοντας ότι από το κοπάδι δεν λείπει κάποιο ζώο, το κοπάδι βρίσκεται στο προκαθορισμένο σημείο και την δυνατότητα εντοπισμού κάποιου ζώου σε περίπτωση που αυτό έχει αποκλίνει από το κοπάδι.
- **Παρακολούθηση υγείας και συμπεριφοράς του κοπαδιού:** Με την χρήση έξυπνων αλγορίθμων που αναλύουν την συμπεριφορά του κοπαδιού, μπορεί να γίνεται έλεγχος για τυχόν μη φυσιολογικές καταστάσεις συμπεριφοράς στο κοπάδι όπως για παράδειγμα η απότομη μετατόπιση του κοπαδιού σε διαφορετικό σημείο χωρίς σχηματισμό θα μπορούσε να σημαίνει ότι το κοπάδι είναι κίνδυνο. Επίσης με χρήση Ειδικών αισθητήρων παρέχεται μια βασική εικόνα για την κατάσταση της υγείας του κάθε ζώου.
- **Παρακολούθηση από απόσταση:** Ο αγρότης θα μπορεί απομακρυσμένα να ελέγχει τα προαναφερόμενα δίνοντας του έτσι την δυνατότητα να μην χρειάζεται να είναι στο σημείο όπου βρίσκεται το κοπάδι και επίσης την σιγουριά πως οτιδήποτε και αν συμβεί θα ενημερωθεί εγκαίρως εστί ώστε να μπορεί να επέμβει με φυσική παρουσία άμα αυτό χρειαστεί.
- **Μείωση εξόδων :** Η χρήση των drones μπορεί να μειώσει σημαντικά τα λειτουργικά έξοδα μακροπρόθεσμα διότι μειώνει τα έξοδα συντήρησης και επιθεώρησης καθώς και τον χρόνο που απαιτείται για την παρακολούθηση του ζώου .



Εικόνα 12 Εντοπισμός κοπαδιού με χρήση LoRa Gateway [82]

Στην παραπάνω εικόνα γίνεται η περιγραφή του σχεδιασμού της επικοινωνίας και λειτουργίας με σκοπό την ανίχνευση και την παρακολούθηση υγείας του κοπαδιού. Συγκεκριμένα βλέπουμε drones τα οποία

μπορούν να επεξεργαστούν τα δεδομένα τα οποία λαμβάνουν, όμως ο όγκος των δεδομένων όπου μπορούν να επεξεργαστούν σε πραγματικό χρόνο είναι συγκεκριμένος. Έτσι υπάρχει επικοινωνία με σταθμό βάση όπου μπορεί να επεξεργαστεί μεγαλύτερο όγκο δεδομένων ή επικοινωνία μέσω του LoRa Gateway με το cloud για αμεσότερη επεξεργασία δεδομένων. Ανάλογα την αρχιτεκτονική που θα ακολουθηθεί ο σχεδιασμός είναι διαφορετικός. Για παράδειγμα θα μπορούσε να γίνεται ανάλυση των δεδομένων στο drone και ανάλογα να δρομολογούνται είτε στον τοπικό server είτε στο cloud για επεξεργασία, είτε να υπάρχει διαχωρισμός στο τι δεδομένα θα επεξεργαστεί κάθε οντότητα, είτε να γίνεται προοδευτική επεξεργασία των δεδομένων, δηλαδή για παράδειγμα το drone το οποίο λαμβάνει ορισμένες εικόνες και μετρήσεις που αφορούν το κοπάδι να μπορεί να επεξεργαστεί τα δεδομένα των μετρήσεων και αν εντοπίσει κάτι μη φυσιολογικό να αποστέλλει όλη την πληροφορία που έχει συλλέξει στον τοπικό server όπου στον τοπικό server θα γινόταν έλεγχος για το αν υπάρχουν παρόμοια δεδομένα και τι ενέργειες έγιναν και με την σειρά του είτε θα απαντούσε σχετικά με τις ενέργειες που θα έπρεπε να εκτελεστούν με βάση τα δεδομένα που θα είχε είτε θα έκανε αποστολή των δεδομένων στο cloud με σκοπό την περαιτέρω ανάλυση και επεξεργασία των δεδομένων με σκοπό να βρεθεί πιθανή λύση στο πρόβλημα που εντοπίστηκε [83].

Όσον αφορά την επικοινωνία ανάμεσα σε 2 drones με την χρήση του πρωτόκολλου LoRa θα πρέπει πρώτα να γίνουν οι κατάλληλες ρυθμίσεις οι οποίες αφορούν την εγκαθίδρυση της επικοινωνίας ανάμεσα στα 2 drone. Πρέπει να γίνει ορισμός των κατάλληλων παραμέτρων όπως η παράγοντας της διασποράς ο οποίος καθορίζει την απόσταση του σήματος του οποίου εκπέμπεται, δηλαδή όσο μεγαλύτερο παράγοντα διασποράς έχουμε τόσο μεγαλύτερη είναι η απόσταση που μπορεί να καλύψει το σήμα ταυτόχρονα όμως υπάρχει και μείωση της ταχύτητας μετάδοσης των δεδομένων. Έπειτα έχουμε την συχνότητα λειτουργίας όπου καθορίζει σε ποιο εύρος συχνοτήτων θα γίνει η επικοινωνία και ο ρυθμός της κωδικοποίησης. Η επικοινωνία αφού έχουν γίνει πρώτα οι κατάλληλες ρυθμίσεις γίνεται μέσω της διάδοσης παλμοσειρών (chirp-spread spectrum) όπου κάθε bit των δεδομένων που αποστέλλονται αντιπροσωπεύεται από πολλαπλές παλμοσειρές. Αρχικά γίνεται η δημιουργία και η αρχικοποίηση των δεδομένων από το drone αποστολής έπειτα αποστέλλονται τα πακέτα μέσω του αέρα και το drone λήψης αφού λάβει όλα τα δεδομένα τα αποκωδικοποιεί και τα επαληθεύει μέσω ενός μηχανισμού που χρησιμοποιείται για έλεγχο λαθών και διόρθωση σφαλμάτων κατά την μετάδοση για παράδειγμα ένας τέτοιος μηχανισμός είναι ο Cyclic Redundancy Check (CRC). Με την ίδια διαδικασία μπορεί ένα drone να κάνει εγκαθίδρυση επικοινωνίας με έναν σταθμό βάσης όπου θα λαμβάνει τις εργασίες που έχει να εκτελέσει και θα αποστέλλει πίσω τα δεδομένα τα οποία αντλεί από το περιβάλλον του και αποστέλλονται στον σταθμό βάση με σκοπό την ανάλυση, την επεξεργασία και τέλος την αποθήκευση [84].

Τα drones στις απομακρυσμένες περιοχές προσφέρουν με την χρήση τους σημαντικά πλεονεκτήματα που συνολικά βελτιώνουν την αποδοτικότητα και την ευημερία του αγροκτήματος και αποφέροντας μείωση των εξόδων και μείωση των ωρών εργασίας για τον αγρότη. Ωστόσο υπάρχουν και κάποιες τεχνικές προκλήσεις που πρέπει να ξεπεραστούν για την ορθή λειτουργία και αυτές είναι η εξής [82] :

- **Διαχείριση των δεδομένων:** Τα drones παράγουν μεγάλο όγκο δεδομένων προς επεξεργασία. Τα δεδομένα αυτά θα πρέπει να γίνει η συλλογή τους από το drone και έπειτα να γίνει η ανάλυση τους και η επεξεργασία τους. Ένα από τα επιφανή προβλήματα είναι ότι η επεξεργασία των δεδομένων στις περισσότερες περιπτώσεις θα πρέπει να γίνει σε πραγματικό χρόνο και αυτό συνεπάγεται με την ανάγκη υπολογιστικών πόρων.

- **Ανθεκτικότητα σε καιρικές συνθήκες:** Τα drones θα πρέπει να είναι ανθεκτικά στις αλλαγές των καιρικών φαινομένων για την αποτελεσματική τους λειτουργία και να υπάρχει ανοχή σε προσωρινή απώλεια ή παρεμβολές σήματος λόγω των καιρικών συνθηκών
- **Διάρκεια πτήσης:** Η διάρκεια πτήσης είναι περιορισμένη λόγω της διάρκειας ζωής της μπαταρίας ωστόσο μπορούν να χρησιμοποιούν ηλιακά πάνελ επάνω στα drones με σκοπό την επιμήκυνση των πτήσεων.
- **Προετοιμασία για μη διαθεσιμότητα:** Τα drones είναι υπεύθυνα για αρκετές εργασίες σε ένα αγρόκτημα και για τον λόγο αυτό θα πρέπει να έχει γίνει κατάλληλη προετοιμασία σε περίπτωση που δεν θα μπορεί μια προκαθορισμένη εργασία με drone να εκτελεστεί. Για παράδειγμα ένα drone μπορεί να μην είναι διαθέσιμο είτε λόγω καιρικών συνθηκών είτε λόγω μπαταρίας είτε λόγω βλάβης με αποτέλεσμα ο αγρότης να πρέπει να εκτελέσει την προκαθορισμένη εργασία με εναλλακτικό τρόπο.

2.5.3 Χρήση ρομπότ για συγκομιδή

Ένα κοινό πρόβλημα στις απομακρυσμένες περιοχές και ειδικά στις περιοχές οι οποίες είναι πολύ μικρές σε πληθυσμό ή αρκετά μακριά από κάποιο αστικό κέντρο είναι η αδυναμία εύρεσης εργατικού προσωπικού. Συγκεκριμένα η έλλειψη εργατικού δυναμικού είναι παράγοντας που αποτρέπει την ανάπτυξη στον τομέα της γεωργίας διότι όσο μεγαλύτερη είναι η έκταση του αγροκτήματος αυτό συνεπάγεται με το ότι ο αγρότης θα χρειάζεται παραπάνω εργατικό προσωπικό. Τα προβλήματα είναι πολυποίκιλα στο επιπλέον προσωπικό. Περιοχές με πολύ μικρό πληθυσμό ενδεχομένως να μην έχουν κατάλυμα το οποίο θα μπορεί να μείνει ο εργάτης κατά την περίοδο της συγκομιδής ούτε σπίτι προς ενοικίασή, αυτό είναι απωθητικός μεταναστευτικός παράγοντας και οδηγεί τους αγρότες στο να έχουν μειωμένοι παραγωγή με σκοπό να μπορούν να την διαχειριστούν ή να δουλεύουν πάρα πολλές ώρες με σκοπό να καταφέρουν να ολοκληρώσουν τις προκαθορισμένες εργασίες.

Η λύση σε αυτό το πρόβλημα και στην απρόσκοπτη ανάπτυξη του αγροκτήματος είναι η χρήση αυτόνομων ρομπότ. Τα ρομπότ έχουν καθοριστικό ρόλο στην σύγχρονη γεωργία εξασφαλίζοντας ομαλή διαδικασία συγκομιδής και άλλων εργασιών στο αγρόκτημα. Συγκεκριμένα φέρουν τα εξής πολύ σημαντικά πλεονεκτήματα [85]:

- **Αύξηση της παραγωγικότητας και της ακρίβειας:** Τα ρομπότ επιτρέπουν τη βελτιστοποίηση των γεωργικών διαδικασιών, εκτελώντας εργασίες με μεγαλύτερη ακρίβεια και ταχύτητα σε σχέση με τον ανθρώπινο παράγοντα. Η χρήση τεχνολογιών όπως το GPS και η επεξεργασία εικόνας διασφαλίζουν την ακρίβεια σε εργασίες συγκομιδής.
- **Ευελιξία:** Οι πλατφόρμες για τα ρομπότ μπορούν να προσαρμοστούν σε διαφορετικές γεωργικές ανάγκες, από τη συγκομιδή μέχρι τη φύτευση και τον ψεκασμό. Η ευελιξία αυτή ενισχύεται μέσω λογισμικών που παρέχουν εξατομικευμένες προσαρμογές. Διασφαλίζοντας έτσι την χρησιμότητα τους στο αγρόκτημα και εξαλείφοντας το κόστος από την αγορά επιπλέον μηχανημάτων για κάθε διαφορετική εργασία στο αγρόκτημα.
- **Βελτίωση της καθοδήγησης και της πλοήγησης:** Τα συστήματα αυτόνομης καθοδήγησης που βασίζονται στο GPS προσφέρουν σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με την ακρίβεια και την αποφυγή λαθών σε σύνθετα αγροτικά περιβάλλοντα. Προσφέροντας έτσι μεγαλύτερη ασφάλεια του ρομπότ αλλά και συνολικά του περιβάλλοντα χώρου όπου κινείται το ρομπότ.

- **Οικονομία χρόνου και μείωση κόστους:** Οι ρομποτικές τεχνολογίες μειώνουν το κόστος των γεωργικών εργασιών μέσω της αυτοματοποίησης, ενώ ταυτόχρονα εξοικονομούν χρόνο, καθώς πολλές χρονοβόρες εργασίες εκτελούνται ταχύτερα και αποδοτικότερα. Αν και το αρχικό κεφάλαιο επένδυσης είναι αρκετά υψηλότερο η χρήση τους σε βάθος χρόνου έχει πολύ καλύτερα αποτελέσματα ως προς το κόστος και την παραγωγικότητα.
- **Βιωσιμότητα και περιβαλλοντική προστασία:** Η έξυπνη γεωργία που εφαρμόζεται μέσω των ρομπότ μειώνει τη σπατάλη πόρων, όπως το νερό και τα χημικά λιπάσματα, συμβάλλοντας στη βιώσιμη ανάπτυξη και τη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος.
- **Απομακρυσμένος έλεγχος και επιτήρηση:** Τα ρομπότ επιτρέπουν την παρακολούθηση και διαχείριση των εργασιών σε πραγματικό χρόνο μέσω τεχνολογιών απομακρυσμένου ελέγχου, δίνοντας τη δυνατότητα στους αγρότες να επεμβαίνουν άμεσα όταν απαιτείται.
- **Ανθεκτικότητα σε δυσμενείς συνθήκες:** Τα ρομπότ έχουν σχεδιαστεί ώστε να λειτουργούν αποτελεσματικά σε δύσβατα ή αντίξοα περιβάλλοντα, προσφέροντας λύσεις όπου η ανθρώπινη εργασία μπορεί να είναι περιορισμένη ή επικίνδυνη.
- **Συλλογή και ανάλυση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο:** Οι ενσωματωμένοι αισθητήρες και τα προηγμένα λογισμικά των ρομπότ επιτρέπουν τη συνεχή συλλογή και ανάλυση δεδομένων, βελτιώνοντας τη λήψη αποφάσεων και τη στρατηγική διαχείρισης.



Εικόνα 13 Ρομπότ για την χαρτογράφηση της πυκνότητας των υπολειμμάτων μετά την συγκομιδή [85]

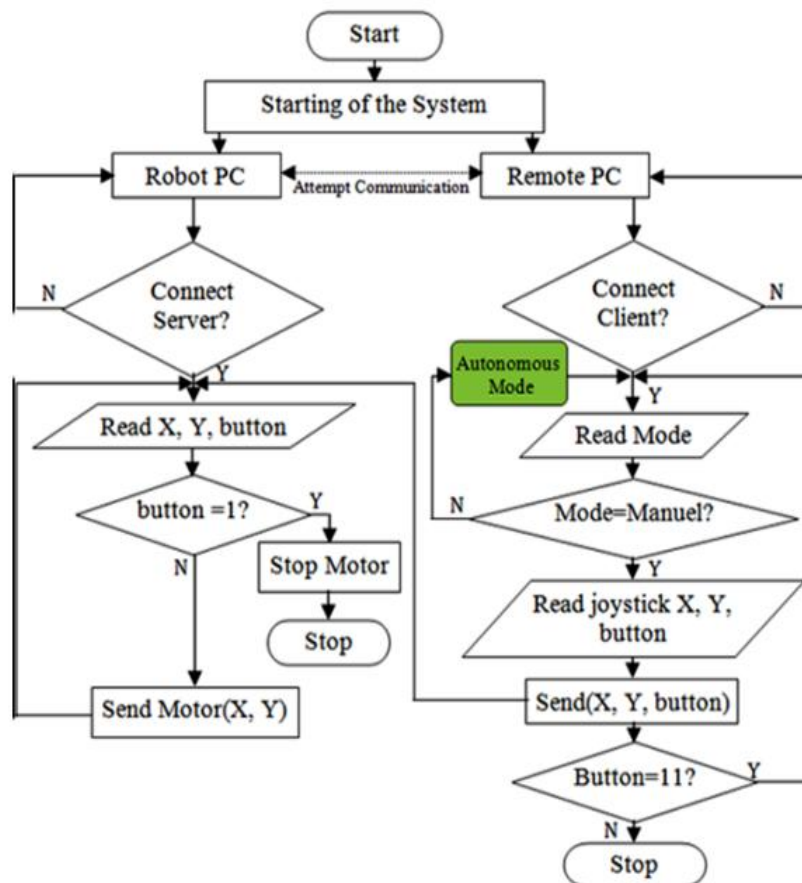
Όσον αφορά την διασύνδεση των ρομπότ ο απομακρυσμένος έλεγχος γίνεται μέσω διαδικτύου. Το ρομπότ υποστηρίζει απομακρυσμένο έλεγχο μέσω σύνδεσης 3G Internet που είναι περισσότερο πιθανό να είναι διαθέσιμο σε απομακρυσμένες περιοχές. Μια συσκευή joystick, συνδεδεμένη στον απομακρυσμένο υπολογιστή μέσω USB, επιτρέπει τον χειρισμό του ρομπότ σε πραγματικό χρόνο. Τα δεδομένα κίνησης προωθούνται από τον απομακρυσμένο υπολογιστή προς το ρομπότ με συχνότητα 10 ms μέσω του διαδικτύου.

Η επικοινωνία μεταξύ του υπολογιστή του ρομπότ και των εξαρτημάτων του πραγματοποιείται μέσω του πρωτοκόλλου RS-232. Το RS-232 εξασφαλίζει ακριβή και ασφαλή μεταφορά εντολών και δεδομένων σε πραγματικό χρόνο. Ειδικά για τα GPS δεδομένα, χρησιμοποιείται το πρότυπο

πρωτόκολλο NMEA 0183, το οποίο βασίζεται σε ASCII κωδικοποίηση για την αποστολή πληροφοριών όπως γεωγραφικές συντεταγμένες και ταχύτητα.

Για την συλλογή και την επεξεργασία των δεδομένων GPS. Ο δέκτης GPS Promark 500 χρησιμοποιείται για την πλοήγηση του ρομπότ. Τα δεδομένα γεωγραφικής θέσης συλλέγονται ανά 10 ms και μετατρέπονται σε Universal Transverse Mercator (UTM) μορφή για χρήση από το λογισμικό πλοήγησης. Τα δεδομένα αυτά αποθηκεύονται στη βάση δεδομένων σε μορφή SQL που είναι ενσωματωμένη στον υπολογιστή του ρομπότ.

Έπειτα η αρχιτεκτονική του λογισμικού βασίζεται στο μοντέλο πελάτη - εξυπηρετητή. Συγκεκριμένα το λογισμικό που ελέγχει το ρομπότ, το πρόγραμμα server είναι εγκατεστημένο στον υπολογιστή του ρομπότ και διαχειρίζεται τις λειτουργίες πλοήγησης, ενώ το client πρόγραμμα στον απομακρυσμένο υπολογιστή επιτρέπει τον χειροκίνητο έλεγχο και την παρακολούθηση της διαδικασίας. Η επικοινωνία μεταξύ των δύο προγραμμάτων πραγματοποιείται μέσω του 3G δικτύου. Ενώ η μετάδοση βίντεο σε γίνεται σε πραγματικό χρόνο με την χρήση μιας κάμερας που είναι τοποθετημένη στο ρομπότ παρέχει ζωντανή ροή βίντεο στον απομακρυσμένο υπολογιστή μέσω του Yawcam™ λογισμικού. Η μετάδοση γίνεται μέσω του διαδικτύου χρησιμοποιώντας την πόρτα 8080. Όλα τα δεδομένα που συλλέγονται κατά τη λειτουργία του ρομπότ, όπως δεδομένα GPS και εικόνες, καταγράφονται και αποθηκεύονται σε βάση δεδομένων SQL Server. Η καταγραφή των δεδομένων εξυπηρετεί τόσο την παρακολούθηση όσο και την ανάλυση μετά το πέρας της λειτουργίας.



Εικόνα 14 Αλγόριθμος απομακρυσμένου ελέγχου [85]

Ο αλγόριθμος πλοήγησης βασίζεται στον υπολογισμό γωνιών κατεύθυνσης (heading) και αζιμουθίου (azimuth) με βάση τα δεδομένα GPS. Το λογισμικό συγκρίνει αυτές τις γωνίες και υπολογίζει την απόσταση έως το επόμενο σημείο αναφοράς (waypoint), εξασφαλίζοντας την ακριβή πλοήγηση του ρομπότ. Η απόδοση της πλοήγησης είναι ρυθμισμένη σε απόκλιση 15-17 cm. Ακόμα τα ρομπότ περιλαμβάνει λογισμικό επεξεργασίας εικόνων που συλλέγονται από την ενσωματωμένη κάμερα για την ανάλυση δεδομένων, όπως η πυκνότητα υπολειμμάτων καλλιεργειών. Αυτές οι εικόνες αποθηκεύονται και αναλύονται στον υπολογιστή του ρομπότ [85], [86].

2.5.4 Παρακολούθηση καιρού και εδάφους

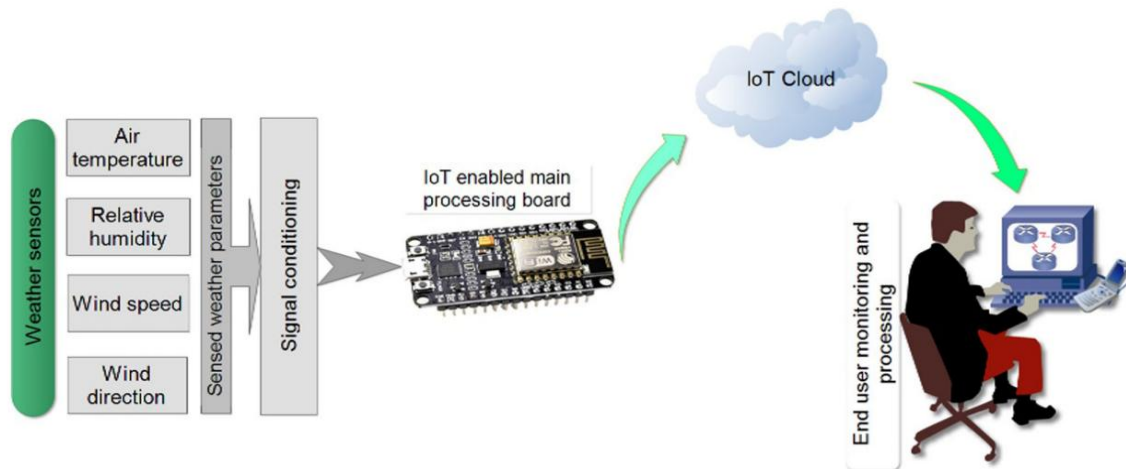
Μια από τις πιο σημαντικές και ενδεχομένως η πιο σημαντική περίπτωση χρήσης είναι αυτή της παρακολούθησης του καιρού και του εδάφους στο αγρόκτημα, καθώς οι περισσότερες περιπτώσεις χρήσης της έξυπνης γεωργίας μπορεί είτε να αναβληθούν είτε οι ενέργειες τους να χρειάζονται παραμετροποίηση με βάση τα στοιχεία που εξάγονται από την παρακολούθηση του καιρού και του εδάφους. Συγκεκριμένα Η παρακολούθηση καιρού είναι η διαδικασία συλλογής και ανάλυσης δεδομένων σχετικά με τις καιρικές συνθήκες, όπως η θερμοκρασία, η υγρασία, η ταχύτητα και η κατεύθυνση του ανέμου, και η βροχόπτωση. Αυτά τα δεδομένα συλλέγονται μέσω αισθητήρων που τοποθετούνται σε διάφορα σημεία και μεταδίδονται σε κεντρικούς υπολογιστές για ανάλυση. Η παρακολούθηση καιρού είναι κρίσιμη για την έξυπνη γεωργία, καθώς επιτρέπει στους αγρότες να λαμβάνουν ενημερωμένες αποφάσεις σχετικά με την άρδευση, τον ραντισμό και την προστασία των καλλιεργειών από ακραίες καιρικές συνθήκες ή το αν θα σηκωθούν τα drones στον αέρα για να πραγματοποιήσουν εργασίες στο αγρόκτημα [67].

Η σημασία της παρακολούθησης καιρού έγκειται στο γεγονός ότι οι καιρικές συνθήκες επηρεάζουν άμεσα την ανάπτυξη των καλλιεργειών και την απόδοση της γεωργικής παραγωγής. Με την ακριβή παρακολούθηση και πρόβλεψη των καιρικών συνθηκών, οι αγρότες μπορούν να προγραμματίσουν καλύτερα τις γεωργικές τους δραστηριότητες, να μειώσουν τη σπατάλη νερού και να βελτιώσουν την αποδοτικότητα των καλλιεργειών τους. Επιπλέον, η παρακολούθηση καιρού βοηθά στην πρόληψη ζημιών από ακραία καιρικά φαινόμενα, όπως οι καταιγίδες και οι ξηρασίες [87].

Στο κομμάτι των τηλεπικοινωνιών για τη μεταφορά των δεδομένων που συλλέγονται από τους αισθητήρες, χρησιμοποιούνται διάφορα πρωτόκολλα επικοινωνίας. Ένα από τα πιο διαδεδομένα πρωτόκολλα είναι το LoRaWAN, το οποίο προσφέρει μεγάλη εμβέλεια και χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Άλλα πρωτόκολλα που χρησιμοποιούνται περιλαμβάνουν το NB-IoT, το Sigfox και το Wi-Fi. Αυτά τα πρωτόκολλα επιτρέπουν τη μετάδοση των δεδομένων από τους αισθητήρες σε κεντρικούς υπολογιστές ή cloud πλατφόρμες για ανάλυση και αποθήκευση [88].

Η εγκατάσταση ενός συστήματος παρακολούθησης καιρού περιλαμβάνει τη χρήση αισθητήρων που συλλέγουν δεδομένα από το περιβάλλον και τα μεταδίδουν σε κεντρικό κόμβο ή cloud μέσω των παραπάνω πρωτοκόλλων επικοινωνίας. Οι σταθμοί καιρού εγκαθίστανται σε στρατηγικά σημεία και συνδέονται με τις τεχνολογίες IoT για την παροχή πληροφοριών σε πραγματικό χρόνο στους χρήστες πετυχαίνοντας έτσι την καλύτερη πρόληψη αναφορικά με την προστασία του αγροκτήματος και των καλλιεργειών, εξοικονόμηση πόρων καθώς προλαμβάνει περιττή άρδευση του αγροκτήματος ή το ράντισμα σε περίπτωση που προβλέπεται βροχή όπως επίσης και την προστασία των συσκευών σε περίπτωση πρόβλεψης ακραίων καιρικών φαινομένων όπως για παράδειγμα χαλάζι ή καταιγίδα με κεραυνούς ειδοποιώντας τον χρήστη να λάβει τα κατάλληλα μετρά προστασίας όπως για παράδειγμα να καλύψει ευάλωτες συσκευές, να προφυλάξει καλλιέργειες ή δέντρα από δυνατό άνεμο, να αποτρέψει την πτήση σε drone. Επίσης άμα υπάρχουν ζώα στο αγρόκτημα θα δώσει τον απαιτούμενο χρόνο στον

αγρότη να τα συγκεντρώνει στον στάβλο για την προστασία τους. Όλα αυτά αυξάνουν σημαντικά την απόδοση του αγροκτήματος και αποφέρουν μείωση των εξόδων και αποφυγή καταστροφών [89].



Εικόνα 15 Διάγραμμα ενός συστήματος παρακολούθησης καιρού [83]

Η παρακολούθηση εδάφους περιλαμβάνει τη συλλογή δεδομένων σχετικά με τις συνθήκες του εδάφους, όπως η υγρασία, η θερμοκρασία, το pH (οξύτητα) και σύσταση του εδάφους. Αυτά τα δεδομένα συλλέγονται μέσω αισθητήρων που τοποθετούνται στο έδαφος και μεταδίδονται στον τοπικό κεντρικό διακομιστή ή στο cloud ανάλογα με την υλοποίηση που έχει γίνει στο αγρόκτημα αναφορικά με την ανάλυση την επεξεργασία και την αποθήκευση των δεδομένων. Η παρακολούθηση εδάφους είναι κρίσιμη για την κατανόηση των συνθηκών που επηρεάζουν την ανάπτυξη των καλλιεργειών και τη λήψη αποφάσεων για την άρδευση και τον ραντισμό[90].

Η παρακολούθηση εδάφους είναι σημαντική για την αποδοτική χρήση των γεωργικών πόρων και την αύξηση της παραγωγικότητας. Με την παρακολούθηση των συνθηκών του εδάφους, οι αγρότες μπορούν να προσαρμόσουν τις πρακτικές άρδευσης και ραντισμού για να βελτιώσουν την απόδοση των καλλιεργειών και να μειώσουν τη σπατάλη νερού και λιπασμάτων. Επιπλέον, η παρακολούθηση εδάφους βοηθά στην πρόληψη προβλημάτων όπως η διάβρωση και η αλάτωση του εδάφους [91].

Για τη μεταφορά των δεδομένων από τους αισθητήρες στο κεντρικό σύστημα, χρησιμοποιούνται διάφορα πρωτόκολλα επικοινωνίας. Ένα από τα πιο διαδεδομένα πρωτόκολλα είναι το LoRaWAN, διαφορετικά μπορεί να χρησιμοποιηθεί Zigbee, το Wi-Fi και το Bluetooth, καθένα από τα οποία έχει τα δικά του πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα ανάλογα με τις ανάγκες της εφαρμογής.

Η εγκατάσταση ενός συστήματος παρακολούθησης εδάφους απαιτεί τη χρήση τηλεπικοινωνιακών τεχνολογιών για τη μετάδοση των δεδομένων. Οι αισθητήρες συνδέονται με κεντρικούς κόμβους μέσω ασύρματων δικτύων, όπως το LoRaWAN ή το Zigbee, και τα δεδομένα μεταφέρονται σε κεντρικό διακομιστή για ανάλυση. Η χρήση αυτών των τεχνολογιών επιτρέπει την απομακρυσμένη παρακολούθηση των συνθηκών του εδάφους και τη λήψη αποφάσεων σε πραγματικό χρόνο. Αυτό προσφέρει και προφύλαξη των καλλιεργειών από ασθένειες, καθότι μέσω της σύστασης του εδάφους μπορεί να γίνει προσδιορισμός των απαραίτητων λιπασμάτων που χρειάζονται οι καλλιέργειες με σκοπό την γρηγορότερη ανάπτυξη και την προστασία τους [83].



Εικόνα 16 Αισθητήρας παρακολούθησης εδάφους [83]

2.5.5 Συστήματος παρακολούθησης κυψελών και μελισσοκομίας

Στην έξυπνη γεωργία μπορούμε να συναντήσουμε πολλές και διαφορετικές περιπτώσεις χρήσης. Σε ένα αγρόκτημα που έχει μεγάλη έκταση, εκτός από καλλιέργειες ο αγρότης παράλληλα μπορεί να εκτρέφει ζώα και να περιλαμβάνει τομείς όπως είναι η μελισσοκομία. Η μελισσοκομία τα τελευταία χρόνια κατέχει πολύ σημαντικό ρόλο στον γεωργικό τομέα. Ωστόσο λόγω της κλιματικής αλλαγής ο πληθυσμός των μελισσών έχει μειωθεί σημαντικά με αποτέλεσμα σε πολλές χώρες να επιβληθούν μετρά για την προστασία των μελισσών καθώς συμμετέχει ενεργά στην γονιμότητα των φυτών. Η παρακολούθηση κυψελών και μελισσοκομίας είναι μια καινοτόμος μέθοδος που συνδυάζει τεχνολογικά εργαλεία για την παρακολούθηση, την ανάλυση και τη βελτιστοποίηση της υγείας και της παραγωγικότητας των μελισσών. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται για την καταγραφή διάφορων παραμέτρων των κυψελών, όπως η θερμοκρασία, η υγρασία και τα επίπεδα διοξειδίου του άνθρακα, μέσω αισθητήρων και προχωρημένων τεχνολογιών όπως τα δίκτυα ασύρματων αισθητήρων και το διαδίκτυο των πραγμάτων. Με τον τρόπο αυτόν επιτυγχάνεται η συλλογή μεγάλου όγκου δεδομένων που αναλύονται για την πρόβλεψη και τη λήψη αποφάσεων σχετικά με την υγεία και την ευημερία των αποικιών.

Η παρακολούθηση αυτή είναι κρίσιμης σημασίας για την υποστήριξη της βιωσιμότητας της μελισσοκομίας, καθώς οι μέλισσες είναι βασικοί επικονιαστές σε πολλές καλλιέργειες. Επιπλέον, συμβάλλει στην πρόληψη απειλών όπως οι ασθένειες και οι περιβαλλοντικοί κίνδυνοι και παρέχει τη δυνατότητα έγκαιρης παρέμβασης για την αποφυγή σοβαρών απωλειών. Χρησιμοποιώντας δεδομένα σε πραγματικό χρόνο, η μέθοδος αυτή υποστηρίζει τη γεωργία και την καταπολέμηση των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής, προωθώντας μια πιο βιώσιμη και αποδοτική παραγωγή. Με την παρακολούθηση των κυψελών, εξάγονται πολύτιμες πληροφορίες για τη βελτίωση της παραγωγικότητας, την ανίχνευση προτύπων και την αναγνώριση πιθανών προβλημάτων, καθιστώντας την παρακολούθηση κυψελών έναν αναπόσπαστο κρίκο για τη βιωσιμότητα τόσο της μελισσοκομίας όσο και της γεωργίας. Είναι ένα αποτελεσματικό εργαλείο για την κατανόηση των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής και για τη διαμόρφωση στρατηγικών που υποστηρίζουν τις μέλισσες και το

οικοσύστημα. Συγκεκριμένα ένα τέτοιο σύστημα είναι πολύ σημαντικό και φέρει σημαντικά πλεονεκτήματα.

- **Βελτίωση κατανόησης μικροκλίματος:** Το σύστημα παρακολούθησης καταγράφει παραμέτρους όπως θερμοκρασία, υγρασία και επίπεδα διοξειδίου του άνθρακα στις κυψέλες. Τα δεδομένα αυτά προσφέρουν πολύτιμες πληροφορίες για την καλύτερη πρόβλεψη των καιρικών συνθηκών και την προσαρμογή των αγροτικών πρακτικών με στόχο την αποφυγή ζημιών από ακραίες καιρικές συνθήκες.
- **Προστασία επικονιαστών:** Οι μέλισσες, ως σημαντικοί επικονιαστές, παρακολουθούνται για την υγεία και τη συμπεριφορά τους. Με τη χρήση αισθητήρων ανιχνεύονται εγκαίρως παράσιτα, ασθένειες και άλλες απειλές που μπορεί να επηρεάσουν την αποικία, συμβάλλοντας στην προστασία τους και στη διατήρηση του οικοσυστήματος.
- **Υποστήριξη κλιματικά έξυπνης γεωργίας:** Τα δεδομένα από τις κυψέλες χρησιμοποιούνται για να προβλεφθούν οι αλλαγές στις επικονιαστικές συνήθειες των μελισσών λόγω κλιματικών διακυμάνσεων. Αυτό βοηθά τους αγρότες να επιλέξουν τις καταλληλότερες καλλιέργειες, ενισχύοντας την παραγωγικότητα και μειώνοντας το περιβαλλοντικό αποτύπωμα.
- **Ανάλυση Big Data:** Με την ανάλυση δεδομένων (Big Data Analytics), εντοπίζονται τάσεις και μοτίβα που δεν είναι άμεσα ορατά. Αυτό δίνει τη δυνατότητα λήψης στρατηγικών αποφάσεων για την καλύτερη διαχείριση των αγροκτημάτων.
- **Αυτοματοποιημένες ειδοποιήσεις:** Προσφέρονται ειδοποιήσεις σε πραγματικό χρόνο για προβλήματα ή απειλές, όπως αλλαγές καιρού ή υγειονομικές συνθήκες των μελισσών, επιτρέποντας γρήγορη αντίδραση του αγρότη και αποφυγή καταστροφών.
- **Αύξηση παραγωγικότητας:** Μέσω της συνεχούς παρακολούθησης και της αξιοποίησης των δεδομένων, οι παραγωγοί μπορούν να μεγιστοποιήσουν την παραγωγή μελιού και άλλων προϊόντων, ενώ παράλληλα προστατεύουν το περιβάλλον.
- **Συμβολή στη στρατηγική πολιτική:** Τα δεδομένα από την παρακολούθηση κυψελών συμβάλλουν στη διαμόρφωση πολιτικών που ενισχύουν τη βιώσιμη γεωργία και τη διατήρηση της βιοποικιλότητας.

Η χρήση τέτοιων συστημάτων αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι της ανάπτυξης της γεωργίας του μέλλοντος, καθώς προσφέρει λύσεις που αντιμετωπίζουν τις προκλήσεις της κλιματικής αλλαγής και ενισχύει τη βιωσιμότητα και την αποδοτικότητα των γεωργικών πρακτικών[92], [93].

Η λειτουργία ενός τέτοιου συστήματος γίνεται με τον εξής τρόπο. Τα συστήματα παρακολούθησης κυψελών που χρησιμοποιούνται στο πλαίσιο της έξυπνης γεωργίας βασίζονται σε προηγμένες τηλεπικοινωνιακές τεχνολογίες που περιλαμβάνουν δίκτυα ασύρματων αισθητήρων και το διαδίκτυο των πραγμάτων. Ο τρόπος λειτουργίας τους περιγράφεται ως εξής:

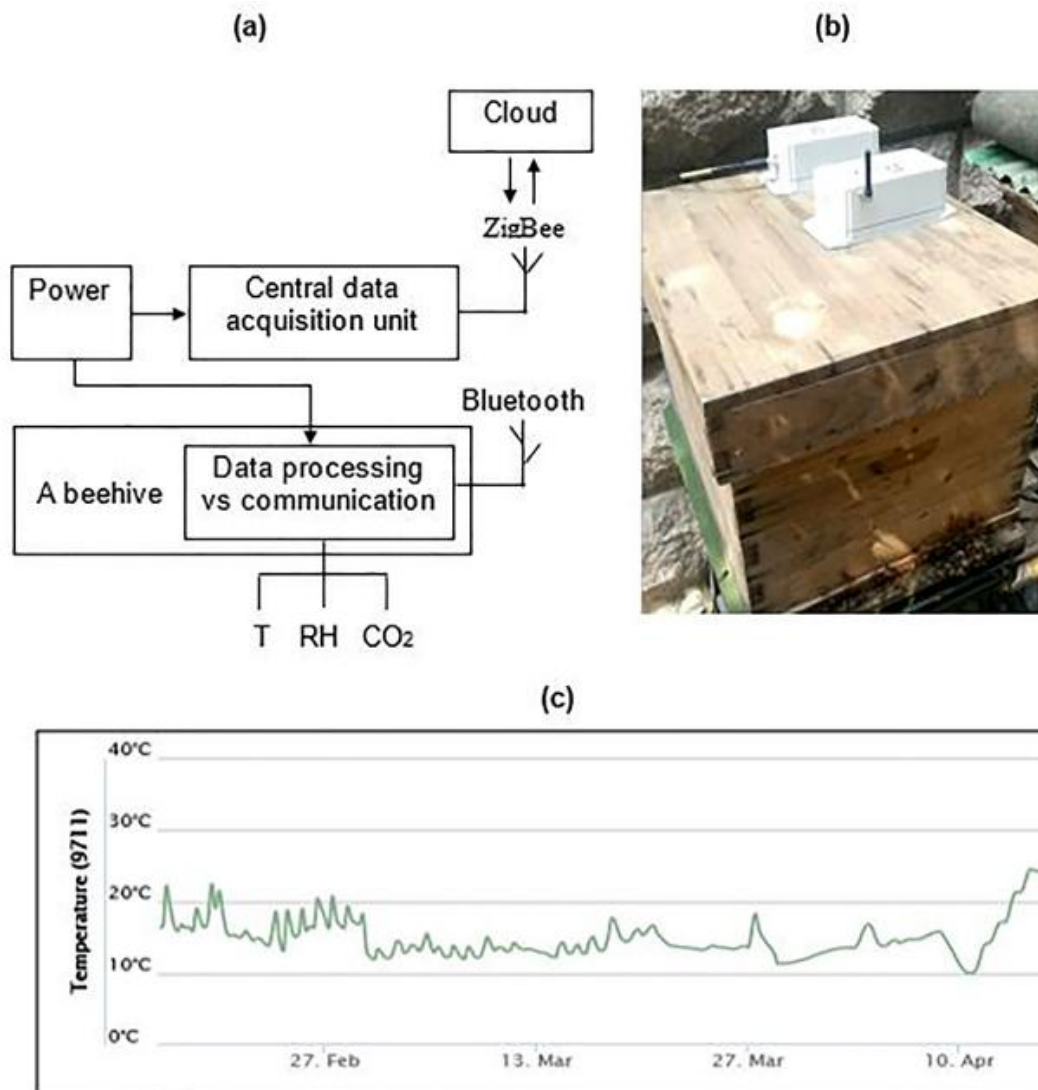
Αρχικά, τα δίκτυα ασύρματων αισθητήρων αποτελούνται από μικρούς, αυτόνομους αισθητήρες, οι οποίοι τοποθετούνται μέσα και γύρω από τις κυψέλες. Αυτοί οι αισθητήρες καταγράφουν διάφορες φυσικές και περιβαλλοντικές παραμέτρους, όπως η θερμοκρασία, η υγρασία, τα επίπεδα διοξειδίου του άνθρακα, ο ήχος και οι δονήσεις. Η λειτουργία των αισθητήρων είναι αυτοματοποιημένη, καθώς συλλέγουν συνεχώς δεδομένα και τα μεταδίδουν ασύρματα μέσω του δικτύου. Τα δεδομένα που συλλέγονται από τους αισθητήρες μεταφέρονται μιας πύλης προς την πλατφόρμα cloud ή τον τοπικό server επεξεργασίας, όπου γίνεται η ανάλυση τους και επτά αποθηκεύονται και διαχειρίζονται. Η πύλη αυτή λειτουργεί ως ενδιάμεσος σύνδεσμος που επιτρέπει τη μετάδοση των δεδομένων από τα τοπικά

δίκτυα ασύρματων αισθητήρων σε μια κεντρική βάση δεδομένων που βρίσκεται στο cloud. Παράλληλα, οι πλατφόρμες IoT ενσωματώνουν προηγμένους αλγορίθμους για την ανάλυση και την ερμηνεία των δεδομένων που συλλέγονται. Οι αλγόριθμοι αυτοί, βασισμένοι στη μηχανική μάθηση, είναι σε θέση να ανιχνεύουν μοτίβα, να προβλέπουν τάσεις και να ειδοποιούν τους μελισσοκόμους για πιθανές απειλές ή αλλαγές στην κατάσταση της κυψέλης. Για παράδειγμα, οι αλλαγές στα επίπεδα CO₂ ή στις δονήσεις μπορούν να υποδείξουν αλλαγές στον καιρό ή την υγεία της αποικίας.

Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό αυτών των συστημάτων είναι η χρήση τεχνολογιών επεξεργασίας Big Data. Τα συστήματα παράγουν τεράστιους όγκους δεδομένων, οι οποίοι περιλαμβάνουν ποικίλες μορφές, όπως κείμενο, εικόνες και ήχους. Η ανάλυση αυτών των δεδομένων επιτρέπει την εξαγωγή χρήσιμων πληροφοριών, όπως την πρόβλεψη καιρού ή την αναγνώριση παραμέτρων που επηρεάζουν την παραγωγή μελιού και την επικοινωνία.

Η λειτουργία ενός τέτοιου συστήματος βασίζεται επίσης στη χρήση συστημάτων πραγματικού χρόνου, τα οποία εξασφαλίζουν ότι οι μελισσοκόμοι λαμβάνουν άμεσα τις πληροφορίες που χρειάζονται για τη λήψη αποφάσεων. Με την ενσωμάτωση αισθητήρων, τεχνολογιών IoT και πλατφορμών ανάλυσης δεδομένων, τα συστήματα αυτά συνδυάζουν την ακριβή παρακολούθηση με την ανάλυση και τη διαχείριση μεγάλων ποσοτήτων δεδομένων, προσφέροντας μια ολοκληρωμένη λύση για τη μελισσοκομία και τη γεωργία του μέλλοντος.

Στην συνέχεια βλέπουμε μια εικόνα όπου έχουμε μια σχηματική διάταξη του συστήματος (a). Έπειτα έχουμε μια κυψέλη (b). Και τέλος έχουμε ένα παράδειγμα καταγραφής της θερμοκρασίας της κυψέλης από την εφαρμογή (c). Οι δείκτες T, R. Η αντιπροσωπεύουν την θερμοκρασία και την σχετική υγρασία ενώ ο δείκτης CO₂ αντιπροσωπεύει το διοξείδιο του άνθρακα [94].



Εικόνα 17 Σύστημα καταγραφής κυψέλης [94]

2.5.6 Σύστημα παρακολούθησης θερμοκηπίου

Τα θερμοκήπια είναι πολύ σημαντικά στις απομακρυσμένες περιοχές διότι μπορούν να προστατεύσουν τις καλλιέργειες από τα καιρικά φαινόμενα. Επίσης μπορούν να αυξήσουν την παραγωγή και να ανοίξουν τον δρόμο σε νέες καλλιέργειες διατηρώντας πάντα ιδανικές συνθήκες για της εκάστοτε καλλιέργειες. Πιο συγκεκριμένα, το θερμοκήπιο ορίζεται ως ένα ελεγχόμενο γεωργικό περιβάλλον όπου εφαρμόζεται τεχνολογία IoT για την παρακολούθηση και διαχείριση βασικών περιβαλλοντικών παραμέτρων όπως η θερμοκρασία, η ένταση του φωτός και η υγρασία του εδάφους. Μέσω της συνεχούς συλλογής δεδομένων από ειδικούς αισθητήρες και της μετάδοσής τους σε μικροελεγκτές, το σύστημα επιτρέπει τον ακριβή έλεγχο του μικροκλίματος, δημιουργώντας τις βέλτιστες συνθήκες για την ανάπτυξη των καλλιεργειών. Η χρησιμότητα του θερμοκηπίου είναι να βελτιστοποιεί τις γεωργικές πρακτικές μέσω της αυτοματοποίησης και του συνεχούς ελέγχου των συνθηκών καλλιέργειας. Η εφαρμογή του σε συνδυασμό με έναν αυτορυθμιζόμενο Proportional Integral Derivative (PID) ελεγκτή όχι μόνο οδηγεί σε αποδοτικότερη χρήση πόρων όπως το νερό, αλλά συμβάλλει και στη μείωση των δαπανών εργασίας,

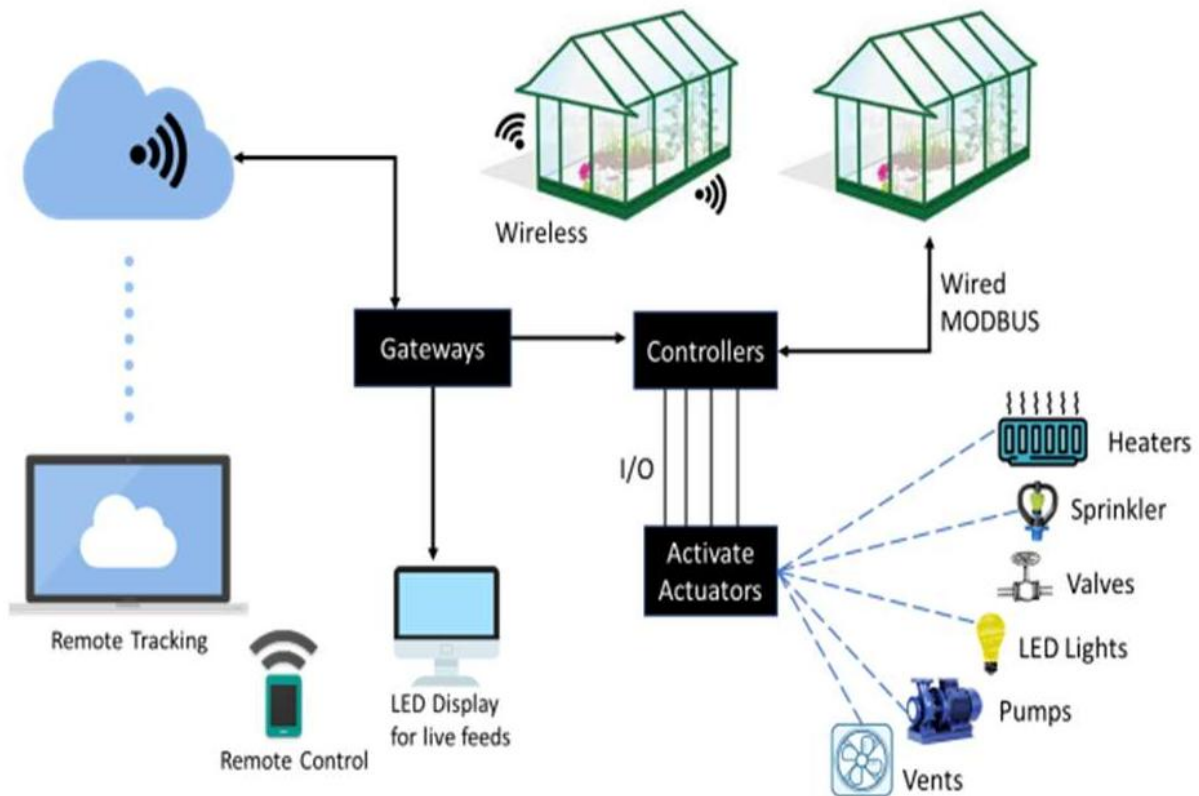
στην αύξηση της παραγωγικότητας και, συνολικά, στην ενίσχυση της οικονομικής βιωσιμότητας της γεωργικής παραγωγής .

Η λειτουργία ενός έξυπνου θερμοκηπίου σε επίπεδο τηλεπικοινωνιών στηρίζεται σε μια αρχιτεκτονική, όπου οι αισθητήρες που παρακολουθούν κρίσιμες παραμέτρους όπως για παράδειγμα η θερμοκρασία, η ένταση του φωτός και η υγρασία του εδάφους , συνεργάζονται με μικροελεγκτές και ενσωματωμένες συσκευές επικοινωνίας. Γίνετε συνεχή συλλογή δεδομένων μέσω Wi-Fi, το οποίο επιτρέπει την αποστολή αυτών των δεδομένων σε κεντρικές πλατφόρμες, όπου ένας μικροελεγκτής επεξεργάζεται τις τιμές σε πραγματικό χρόνο. Η υλοποίηση ενός αυτορυθμιζόμενου ελεγκτή PID, που βασίζεται σε έναν αλγόριθμο ο οποίος διατηρεί σταθερές τις συνθήκες του χώρου, ελέγχοντας συνεχώς τις αποκλίσεις, χρησιμοποιώντας πλατφόρμες όπως το arduino, εξασφαλίζει τη γρήγορη και ακριβή αντίδραση στο μεταβαλλόμενο περιβάλλον. Η διασύνδεση των συσκευών αυτών, μέσω αξιόπιστων πρωτοκόλλων επικοινωνίας, επιτρέπει την απομακρυσμένη εποπτεία και τον έλεγχο των περιβαλλοντικών παραμέτρων, διαμορφώνοντας έτσι ένα πλήρως αυτοματοποιημένο και ευέλικτο σύστημα διαχείρισης του μικροκλίματος εντός του θερμοκηπίου. Προσφέροντας έτσι μεγαλύτερη ασφάλεια στις καλλιέργειες αλλά και στον αγρότη καθώς μειώνει σημαντικά την ανάγκη για φυσική παρουσία και εποπτεία του χώρου ενώ παράλληλα μειώνει και τον χρόνο της ανάπτυξης των φυτών αυξάνοντας έτσι και το συνολικό του κέρδος [95]. Ακόμα τα πλεονεκτήματα που απορρέουν από αυτήν την ολοκληρωμένη προσέγγιση είναι πολλαπλά και σημαντικά για την αγροτική παραγωγή. Η δυνατότητα παρακολούθησης σε πραγματικό χρόνο και η έγκαιρη παρέμβαση επιτρέπει την ακριβή ρύθμιση των περιβαλλοντικών συνθηκών, οδηγώντας σε βελτιστοποιημένη καλλιέργεια και αυξημένη παραγωγικότητα. Η αυτοματοποίηση που γίνεται μέσω του PID ελεγκτή μειώνει δραστικά την ανάγκη για χειρωνακτική παρέμβαση, συμβάλλοντας έτσι σε εξοικονόμηση πόρων και μείωση του λειτουργικού κόστους. Μέσω του πρωτόκολλου Wi-Fi διασφαλίζεται τη συνεχή ροή των δεδομένων μεταξύ των αισθητήρων και του κεντρικού ελεγκτή, ενισχύοντας την αξιοπιστία και αποδοτικότητα της διαχείρισης του θερμοκηπίου [96].

Παρά τα οφέλη, η ενσωμάτωση τέτοιων τεχνολογικών συστημάτων συνοδεύεται και από προκλήσεις στο επίπεδο των τηλεπικοινωνιών. Ένα βασικό ζήτημα αποτελεί οι καθυστερήσεις στη μετάδοση των δεδομένων, με αρχικές υλοποιήσεις να παρουσιάζουν χρονικά διαστήματα της τάξης των δέκα δευτερολέπτων πριν την ενεργοποίηση των διακοπών. Επιπρόσθετα, η χρήση ασύρματων δικτύων σε αγροτικές και απομακρυσμένες περιοχές συχνά οδηγεί σε προβλήματα παρεμβολής, αστάθειας του σήματος ή περιορισμένης ζώνης κάλυψης. Η πολυπλοκότητα στην ενσωμάτωση και διασύνδεση πολλαπλών συστημάτων επιβάλλει επίσης την υιοθέτηση αυστηρών και τυποποιημένων πρωτοκόλλων επικοινωνίας, ώστε να εξασφαλιστεί η ομαλή και συνεχής ροή των πληροφοριών. Το κόστος εγκατάστασης ενός θερμοκηπίου στο αγρόκτημα είναι αρκετά υψηλό καθιστώντας την υιοθέτηση αυτής της πρακτικής δύσκολη, καθότι το κεφάλαιο που σχετίζεται για την επένδυση στις αγροτικές περιοχές συνήθως είναι περιορισμένο.

Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται μια ολοκληρωμένη αρχιτεκτονική ενός έξυπνου θερμοκηπίου που χαρακτηρίζεται από την ενσωμάτωση τεχνολογιών IoT και τηλεπικοινωνιακών. Στο κέντρο του διαγράμματος παρουσιάζεται η κεντρική μονάδα επεξεργασίας, η οποία λειτουργεί ως ο εγκέφαλος του συστήματος. Από αυτήν, δέχονται δεδομένα σε πραγματικό χρόνο από μια σειρά αισθητήρων. Η μετάδοση των δεδομένων πραγματοποιείται μέσω ασύρματης τεχνολογίας, όπου χρησιμοποιείται το Wi-Fi, για την ασφαλή και αξιόπιστη επικοινωνία. Η συνέχεια του διαγράμματος φαίνεται η λειτουργία του ελεγκτικού κυκλώματος, το οποίο επεξεργάζεται τις παραληφθείσες μετρήσεις με σκοπό τη διασφάλιση της βέλτιστης διαχείρισης του μικροκλίματος. Ο μικροελεγκτής, μέσω ενσωματωμένου αλγόριθμου συγκρίνει τις τιμές των αισθητήρων με τα προκαθορισμένα όρια και, σε περίπτωση

απόκλισης, στέλνει εντολές στους αντίστοιχους διακόπτες π.χ ανεμιστήρες, αντλίες, φωτιστικά συστήματα κ.λ.π. Τέλος, το σύστημα επιτρέπει την απομακρυσμένη παρακολούθηση και έλεγχο από τους χρήστες, διασφαλίζοντας έτσι τη συνεχή ροή των δεδομένων και την άμεση αντίδραση σε μεταβαλλόμενες περιβαλλοντικές συνθήκες [95], [96], [97].



Εικόνα 18 Σχηματική αναπαράσταση ενός έξυπνου θερμοκηπίου [95]

2.5.7 Παρακολούθηση καλλιεργειών με σκοπό την πρόβλεψη ασθενειών και παρασίτων.

Η καλλιέργειες είναι ευάλωτες σε παράσιτα και ασθένειες με αποτέλεσμα την καταστροφή τους. Η ενσωμάτωση τεχνολογιών με σκοπό την πρόληψη και την έγκυρη παρέμβαση είναι πολύ σημαντική διότι η καταστροφή των καλλιεργειών συνεπάγεται με σημαντική μείωση του εισοδήματος και την ανάγκη για εύρεση καινούριων κεφαλαίων με σκοπό την αποκατάσταση και προετοιμασία της σοδειάς. Ασθένειες και παράσιτα μπορούν να βρεθούν και να πλήξουν κάθε είδος καλλιέργειας ακόμα και αν αυτή βρίσκεται εντός θερμοκηπίου. Ειδικότερα αναφέρονται παρακάτω οι λόγοι για τους οποίους είναι πολύ σημαντική η εγκατάσταση και η υιοθέτηση συστημάτων παρακολούθησης των καλλιεργειών [98].

- **Μείωση της χρήσης χημικών ουσιών:** Η ακριβής παρακολούθηση και πρόγνωση ασθενειών και παρασίτων μπορεί να περιορίσει την ανάγκη για χρήση χημικών φυτοφαρμάκων. Αυτό όχι μόνο μειώνει το κόστος παραγωγής, αλλά και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις που συνδέονται με την υπερβολική χρήση των φυτοφαρμάκων.
- **Βιώσιμη ανάπτυξη της γεωργίας:** Μέσω της αξιοποίησης προηγμένων τεχνολογιών, η παρακολούθηση αυτών των παραγόντων συνεισφέρει στη δημιουργία βιώσιμων γεωργικών πρακτικών, που υποστηρίζουν τη μακροπρόθεσμη παραγωγικότητα και υγεία των καλλιεργειών αυξάνοντας σημαντικά το εισόδημα και την ευημερία του αγροκτήματος .
- **Βελτίωση της απόδοσης των γεωργικών διαδικασιών:** Οι μετρήσεις και η ανάλυση των δεδομένων που συλλέγονται μέσω συστημάτων παρακολούθησης βοηθούν στη βελτίωση των

γεωργικών διαδικασιών και στη λήψη αποφάσεων. Οι γεωργοί μπορούν να προβλέψουν τον χρόνο και την έκταση των προβλημάτων, ώστε να δράσουν έγκαιρα και αποτελεσματικά.

- **Ευκολότερη διαχείριση σε ευρεία κλίμακα:** Με τη χρήση συστημάτων βασισμένων σε δορυφόρους ή drone, είναι δυνατή η συνεχής και γεωγραφικά εκτεταμένη παρακολούθηση, κάτι που είναι αδύνατο με τις παραδοσιακές μεθόδους.
- **Υποστήριξη των πολιτικών προστασίας των καλλιεργειών:** Η πρόβλεψη βασισμένη σε δεδομένα, υποστηρίζει τις γεωργικές υπηρεσίες, στον σχεδιασμό και την εφαρμογή πολιτικών που προστατεύουν τις καλλιέργειες από απειλές, δίνοντας την δυνατότητα για στοχευμένα προγράμματα που αφορούν την ανάπτυξη στον αγροτικό τομέα .
- **Προστασία της ασφάλειας των τροφίμων:** Οι ασθένειες και τα παράσιτα μπορούν να οδηγήσουν σε δραματική απώλεια παραγωγής, η οποία επηρεάζει την διαθεσιμότητα των τροφίμων. Η έγκαιρη ανίχνευση και πρόγνωση επιτρέπουν την αποτελεσματική διαχείριση αυτών των προβλημάτων, μειώνοντας τις απώλειες και διασφαλίζοντας την ασφάλεια των τροφίμων σε εθνικό επίπεδο.

Παρακάτω περιγράφονται η βασική αρχιτεκτονική του συστήματος. Το σύστημα είναι δομημένο σε αρχιτεκτονική τριών επιπέδων, βασισμένη στο μοντέλο browser/server (B/S), για να διασφαλίζει ευκολία χρήσης, συντήρησης και επεκτασιμότητας:

Επίπεδο δεδομένων όπου περιλαμβάνει αποθήκες για τα χωρικά δεδομένα, τις μαθηματικές βάσεις των μοντέλων πρόγνωσης, καθώς και τα τελικά προϊόντα που αποτελούνται από θεματικούς χάρτες πρόγνωσης και ανάλυσης.

Επίπεδο εφαρμογών το οποίο είναι υπεύθυνο για την επεξεργασία των αιτημάτων από τους χρήστες, την ανάκτηση δεδομένων, την εκτέλεση αλγορίθμων. και την παραγωγή γραφημάτων και χαρτών όπου υποδεικνύουν την περιοχή που υπάρχει πρόβλημα .

Επίπεδο πελάτη όπου εξυπηρετεί τη διεπαφή με τους χρήστες μέσω ενός web browser, επιτρέποντας την αλληλεπίδραση με τις λειτουργίες του συστήματος.

Σε επίπεδο τηλεπικοινωνιών, η λειτουργία αυτών των συστημάτων βασίζεται σε τεχνολογίες που διευκολύνουν τη συλλογή, τη μετάδοση, την ανάλυση, και την παρουσίαση δεδομένων για την υποστήριξη των γεωργικών δραστηριοτήτων. Η τηλεπικοινωνιακή λειτουργία ενός συστήματος βασίζεται σε ολοκληρωμένες αρχιτεκτονικές που συνδυάζουν το διαδίκτυο των πραγμάτων , τα δίκτυα αισθητήρων και την υπολογιστική ισχύ του edge και fog computing. Το σύστημα για την ορθή λειτουργία του βασίζεται στα εξής [99]:

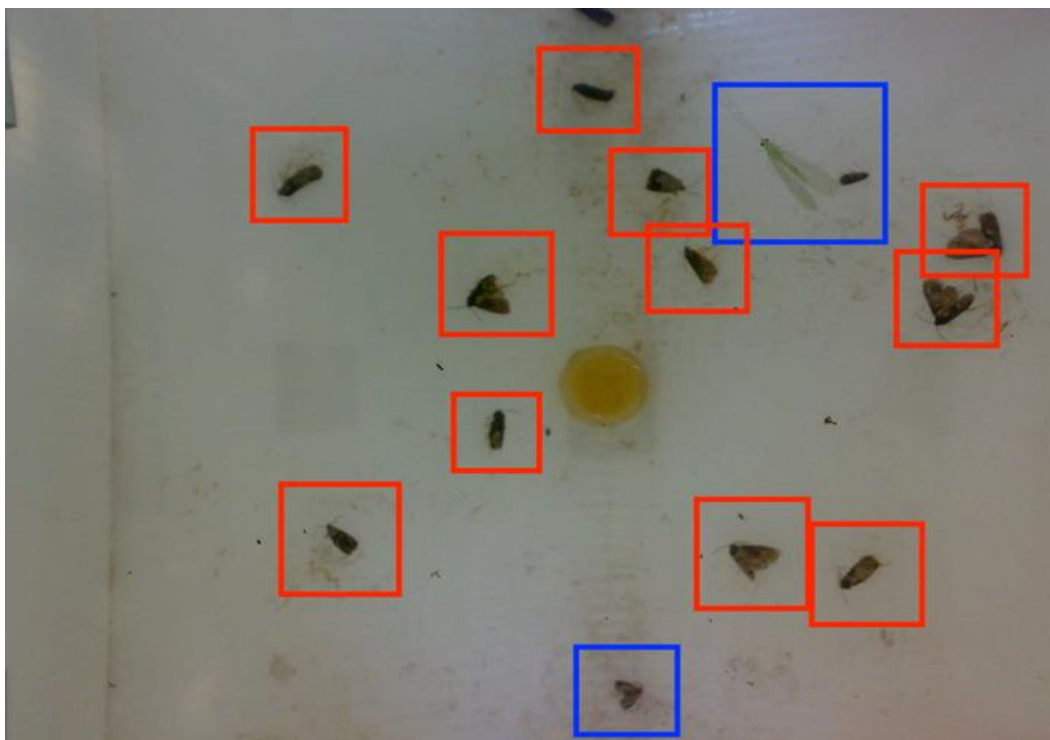
- **Αισθητήρες και δικτύωση:** Οι αισθητήρες συλλέγουν δεδομένα από διάφορες πηγές, όπως εικόνες φύλλων καλλιεργειών, δεδομένα υγρασίας, θερμοκρασίας και άλλες περιβαλλοντικές παραμέτρους. Οι αισθητήρες συνδέονται μέσω δικτύων IoT, επιτρέποντας τη συνεχή ροή δεδομένων από απομακρυσμένες αγροτικές περιοχές σε κεντρικούς σταθμούς επεξεργασίας.
- **Μετάδοση δεδομένων:** Τα δεδομένα που συλλέγονται από αισθητήρες μεταδίδονται μέσω τηλεπικοινωνιακών δικτύων, χρησιμοποιώντας ασφαλή πρωτόκολλα όπως για παράδειγμα το Hyper Transfer Text Protocol Secure (HTTPS). Οι πλατφόρμες μεταφοράς δεδομένων διασφαλίζουν τη συνέπεια και την αξιοπιστία, ενώ τα δορυφορικά δίκτυα χρησιμοποιούνται για περιοχές όπου δεν είναι διαθέσιμη η επίγεια σύνδεση.
- **Υπολογιστική ισχύς:** Οι τεχνολογίες edge computing και fog computing αναλαμβάνουν την προκαταρκτική επεξεργασία δεδομένων σε τοπικό επίπεδο πριν από την αποστολή τους στους κεντρικούς διακομιστές. Αυτό βελτιστοποιεί τη χρήση εύρους ζώνης και μειώνει τον χρόνο απόκρισης.

Είναι ζωτικής σημασίας η χρήση εφαρμογών που βασίζονται σε τηλεπικοινωνιακά συστήματα στις

αγροτικές περιοχές, διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στη λειτουργία αυτών των συστημάτων, επιτρέποντας:

- **Πραγματική παρακολούθηση:** Οι γεωργοί μπορούν να λαμβάνουν ενημερώσεις σε πραγματικό χρόνο για την κατάσταση των καλλιεργειών τους.
- **Προληπτική δράση:** Η έγκαιρη διάγνωση με τη χρήση εικόνων και δεδομένων μειώνει τις απώλειες παραγωγής.
- **Εκπαίδευση γεωργών:** Τα συστήματα παρέχουν πληροφορίες και γνώση για αποτελεσματική γεωργική πρακτική, μειώνοντας τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις και το κόστος παραγωγής.

Στην εικόνα παρακάτω φαίνεται στα κόκκινα κουτάκια το παράσιτο γνωστό ως σκόρος των καλλιεργειών όπου μπορεί να καταστρέψει έως και στο 100% την καλλιέργεια την οποία προσβάλει εφόσον δεν ελεγχθεί ενώ στα μπλε κουτάκια διακρίνονται αλλά παράσιτα ή έντομα τα οποία δεν αποτελούν απειλή για τις καλλιέργειες [100], [101].



Εικόνα 19 Εντοπισμός παράσιτων στις καλλιέργειες [101]

Τα παραγόμενα αποτελέσματα είναι ότι το σύστημα μπορεί να δημιουργήσει θεματικούς χάρτες που παρουσιάζουν τη χωρική κατανομή και το επίπεδο ζημιάς από παράσιτα και ασθένειες, επιτρέποντας στους γεωργούς και τις αρχές να λαμβάνουν έγκαιρες και στοχευμένες αποφάσεις. Αυτή η τεχνολογία συμβάλλει στη μείωση της χρήσης φυτοφαρμάκων, στη διασφάλιση της γεωργικής παραγωγής και στην υποστήριξη βιώσιμων πρακτικών καλλιέργειας [98].

2.5.8 Αποθήκευση καλλιεργειών

Η αποθήκευση των καλλιεργειών μετά την συγκομιδή είναι πολύ σημαντική και καθοριστική, διότι για άγνωστο χρονικό διάστημα θα πρέπει να διατηρηθεί στην αποθήκη σε όσο καλύτερη κατάσταση γίνεται. Στις αγροτικές περιοχές και ειδικότερα σε αυτές οι οποίες είναι δυσπρόσιτες η αποθήκευση είναι το πιο σημαντικό κομμάτι της διαδικασίας. Οι αγρότες μπορεί να κληθούν να μεταφέρουν τα σιτηρά ή οποιοδήποτε άλλο καρπό είχαν φυτεμένο σε μικρές ποσότητες ανά διαστήματα ή να χρειαστεί η

μακροπρόθεσμη αποθήκευση τους. Για παράδειγμα η αποθήκευση των σιτηρών μετά τη συγκομιδή αποτελεί κρίσιμο στάδιο για τη γεωργική παραγωγή, καθώς διασφαλίζει τη διατήρηση της ποιότητας του προϊόντος και την οικονομική βιωσιμότητα του αγρότη. Η σωστή διαχείριση του αποθηκευτικού περιβάλλοντος αποτρέπει την ανάπτυξη μικροοργανισμών και παρασίτων, ενώ οι ανεπιθύμητες μεταβολές στην υγρασία και τη θερμοκρασία μπορούν να οδηγήσουν σε απώλειες που αγγίζουν το 25–30% της συνολικής παραγωγής. Η εφαρμογή αυτόματων συστημάτων παρακολούθησης, με χρήση αισθητήρων για την καταγραφή κρίσιμων παραμέτρων όπως η θερμοκρασία, υγρασία και τα επίπεδα CO₂, επιτρέπει την άμεση αντίδραση σε αποκλίσεις του περιβάλλοντος αποθήκευσης. Με τον τρόπο αυτό, τα σιτηρά διατηρούνται σε βέλτιστες συνθήκες, ενώ παράλληλα ενισχύεται ο έλεγχος και η αποτελεσματικότητα των δομών αποθήκευσης. Επιπλέον, η ενσωμάτωση παραδοσιακών και οργανικών τεχνικών, όπως η χρήση φυσικών παραγόντων προστασίας, συμβάλλει περαιτέρω στη διατήρηση της υγείας και της ποιότητας των σιτηρών. Η επένδυση σε σύγχρονες τεχνολογικές λύσεις για την αποθήκευση μετά τη συγκομιδή δεν εξασφαλίζει μόνο τη διατροφή των κοινωνιών μέσω της βελτίωσης της διατροφικής ασφάλειας, αλλά ενισχύει και την οικονομική σταθερότητα των αγροτικών κοινοτήτων, αποτελώντας βασικό μοχλό για την βιωσιμότητα την ανάπτυξη, στον τομέα της γεωργίας.

Ωστόσο το στάδιο της αποθήκευσης έχει κάποιες σημαντικές προκλήσεις οι οποίες πρέπει να ξεπεραστούν, παρακάτω αναφέρονται ορισμένες εξ αυτών

Αρχικά, η διατήρηση ελεγχόμενων περιβαλλοντικών συνθηκών είναι πολύ δύσκολη χωρίς την βοήθεια της τεχνολογίας. Η ποιότητα των σιτηρών εξαρτάται άμεσα από την επίβλεψη βασικών παραμέτρων του περιβάλλοντος, όπως η θερμοκρασία, η υγρασία και τα επίπεδα διοξειδίου του άνθρακα. Μία από τις κύριες προκλήσεις είναι να διασφαλιστεί ότι αυτοί οι παράγοντες παραμένουν εντός των ορίων που απαιτούνται για την πρόληψη ανάπτυξης μικροοργανισμών και παρασίτων. Αυτό απαιτεί την υιοθέτηση αξιόπιστων αισθητήρων και την ενσωμάτωση συστημάτων που μπορούν να ενεργοποιήσουν αυτόματες διορθωτικές ενέργειες όπως για παράδειγμα η ενεργοποίηση ψύξης ή θέρμανσης, με σκοπό την εξομάλυνση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος, μόλις ανιχνευθούν αποκλίσεις.

Έπειτα η αντιμετώπιση μεταβαλλόμενων και ασταθών συνθηκών είναι εξίσου κρίσιμη. Η αποθήκευση μετά τη συγκομιδή είναι μια δυναμική διαδικασία, όπου παράγοντες όπως η εξωτερική κλιματική μεταβλητότητα και η εσωτερική μηχανική φθορά των δομών συμβάλλουν στην επιδείνωση του προϊόντος. Η πρόκληση εδώ έγκειται στη δημιουργία ενός συστήματος που όχι μόνο παρακολουθεί συνεχώς αυτές τις μεταβολές, αλλά μπορεί επίσης να παρέμβει άμεσα για να εξασφαλίσει την ομαλή λειτουργία του χώρου αποθήκευσης.

Εν συνεχεία ενώ η εισαγωγή ψηφιακών τεχνολογιών όπως IoT και αυτοματοποιημένα συστήματα ελέγχου είναι πολύ σημαντική, η ενσωμάτωση αυτών σε συνδυασμό με τις παραδοσιακές οργανικές τεχνικές όπως για παράδειγμα η χρήση βιολογικών φυτικών ουσιών όπως είναι ο κουρκουμάς για την πρόληψη επιβλαβών παρασίτων αποτελεί επιπλέον πρόκληση. Η συνδυαστική αυτή προσέγγιση απαιτεί προσεκτική σχεδίαση ώστε οι δύο αυτές μεθοδολογίες να συμπληρώνουν η μία την άλλη, βελτιώνοντας το συνολικό αποτέλεσμα [102].

Η κατασκευή δομών αποθήκευσης που να προσφέρουν τη βέλτιστη προστασία του προϊόντος αντιμετωπίζει προκλήσεις τόσο στο επίπεδο του σχεδιασμού όσο και στο οικονομικό κόστος. Τα παραδοσιακά συστήματα, όπως τα σιλό, απαιτούν τακτική συντήρηση και, σε ορισμένες περιπτώσεις, είναι δαπανηρά είτε λόγω του κόστους κατασκευής είτε λόγω των εξειδικευμένων εξοπλιστικών απαιτήσεων που συνεπάγονται οι προηγμένες τεχνολογικές λύσεις. Επιπλέον η ανάγκη για άμεση ειδοποίηση προς τον χρήστη σε περίπτωση απόκλισης των παραμέτρων του χώρου αποθήκευσης είναι κρίσιμη για τη λήψη έγκαιρων διορθωτικών μέτρων. Αυτό σημαίνει ότι το σύστημα πρέπει να

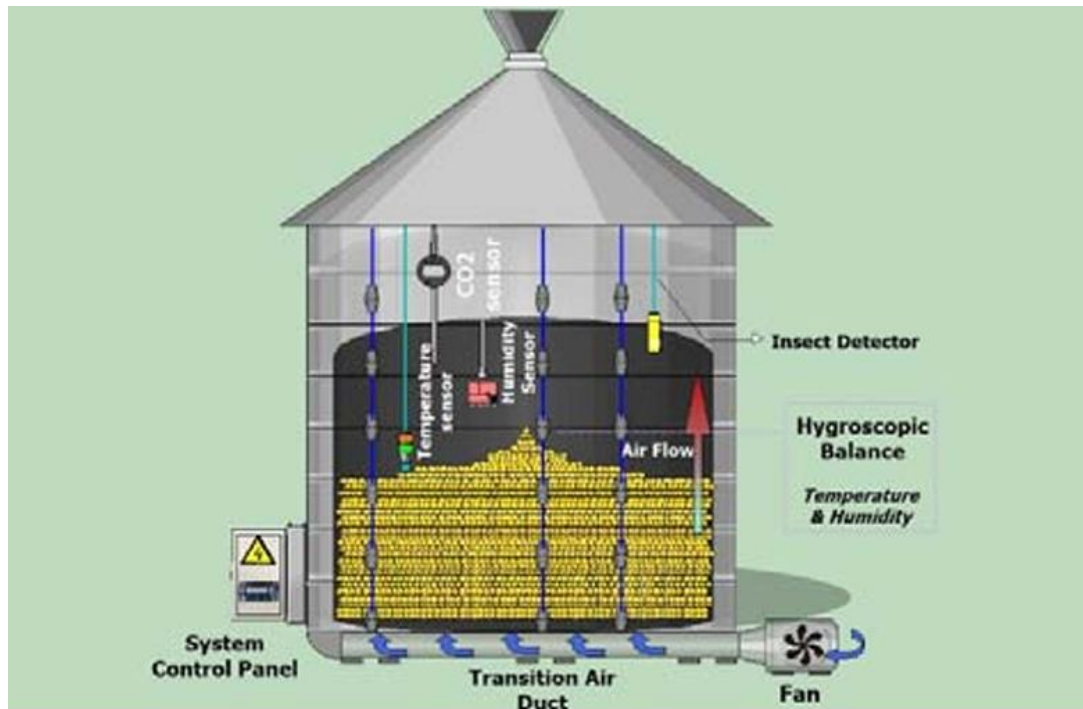
ενσωματώνει μηχανισμούς επικοινωνίας που να λειτουργούν αξιόπιστα από απόσταση και σε πραγματικό χρόνο, επιτρέποντας την άμεση λήψη δράσης για τη διατήρηση της ποιότητας του προϊόντος[103], [104].

Μακριά από τον τεχνολογικό σχεδιασμό, οι προκλήσεις αυτές αγγίζουν και ζητήματα βιωσιμότητας, οικονομικής αποδοτικότητας και κοινωνικής ευημερίας, καθιστώντας το θέμα κρίσιμης σημασίας για τη συνεχή βελτίωση της αγροτικής παραγωγής .

Στο κομμάτι της αρχιτεκτονικής, το σύστημα περιλαμβάνει μια προσεκτικά σχεδιασμένη κατασκευαστική δομή, η οποία αποτελείται από πολλαπλά επίπεδα προστασίας. Το εξωτερικό περίβλημα, από τούβλα, παρέχει σταθερότητα και ανθεκτικότητα, ενώ η εσωτερική επένδυση με γαλβανισμένα στοιχεία και ένα στρώμα στεγανής και αντιμυκητιακής προστασίας ,εμποδίζει την είσοδο υγρασίας και τους παράγοντες που προκαλούν αποσύνθεση. Εντός αυτής, ενσωματώνονται οι αισθητήρες που παρακολουθούν κρίσιμες παραμέτρους όπως η θερμοκρασία, η σχετική υγρασία, η πίεση και τα επίπεδα διοξειδίου του άνθρακα οι οποίες είναι απαραίτητες για τη διατήρηση ενός ελεγχόμενου περιβάλλοντος. Η συνεχής καταγραφή αυτών των δεδομένων πραγματοποιείται από αισθητήρες όπως για παράδειγμα ο αισθητήρας DHT11 για θερμοκρασία/υγρασία και ο MQ135 για το CO₂ οι οποίοι αποστέλλουν τις μετρήσεις στον μικροελεγκτή Arduino. Βάσει προκαθορισμένων ορίων, ο μικροελεγκτής λαμβάνει αποφάσεις για την ενεργοποίηση διορθωτικών μέτρων όπως η αυτόματη λειτουργία ψυκτικών ανεμιστήρων για περιπτώσεις υπερθέρμανσης ή η ενεργοποίηση θέρμανσης μέσω ειδικών Infrared Light Emitting (IR LED) όταν απαιτείται αύξηση της θερμοκρασίας [105].

Η ουσιαστική διάσταση του συστήματος εντοπίζεται στην ενσωμάτωση τεχνολογιών τηλεπικοινωνίας, οι οποίες καθιστούν δυνατή την απομακρυσμένη παρακολούθηση και τον έλεγχο του αποθηκευτικού χώρου. Χρησιμοποιώντας πλατφόρμες IoT, όπως το ESP8266 Node MCU module, το σύστημα μπορεί να συνδεθεί στο διαδίκτυο μέσω δικτύου Wi-Fi, επιτρέποντας τη μετάδοση των δεδομένων σε κεντρική τοπική βάση ή cloud πλατφόρμες σε πραγματικό χρόνο. Αυτή η σύνδεση εξασφαλίζει ότι οι μετρήσεις και οι ειδοποιήσεις που παράγονται από τους αισθητήρες είναι άμεσα διαθέσιμες σε εφαρμογές για κινητά, όπου ο χρήστης μπορεί να παρακολουθεί τις συνθήκες, να λαμβάνει ειδοποιήσεις σε περίπτωση ανωμαλιών και να ενεργοποιεί διαγνωστικά ή διορθωτικά μέτρα εξ αποστάσεως.

Σε περιπτώσεις όπου η σύνδεση μέσω Wi-Fi δεν είναι αξιόπιστη, το σύστημα μπορεί να ενσωματώσει Global System for Mobile Communication (GSM) modules για την αποστολή SMS ειδοποιήσεων. Με αυτόν τον τρόπο, εξασφαλίζεται η έγκαιρη ενημέρωση του χρήστη, ανεξαρτήτως των τοπικών συνθηκών σύνδεσης στο διαδίκτυο. Παράλληλα, ο αγρότης μπορεί να έχει τον έλεγχο μέσα από την εφαρμογή του κινητού του προσφέροντας του συνεχή γνώση για το τι συνθήκες επικρατούν στην αποθήκη του αλλά και σε τι κατάσταση βρίσκονται τα σιτηρά [102], [106].



Εικόνα 20 Απεικόνιση ενός έξυπνου σιλό [105]

Η παραπάνω εικόνα απεικονίζει την τοποθέτηση των αισθητήρων εντός του σιλό, όπου έχουν εγκατασταθεί συσκευές μέτρησης για παραμέτρους όπως η θερμοκρασία, η υγρασία, το οξυγόνο και διοξείδιο του άνθρακα. Οι αισθητήρες αυτοί διασυνδέονται με το κεντρικό σύστημα ελέγχου, επιτρέποντας συνεχή, αξιόπιστη και σε πραγματικό χρόνο παρακολούθηση της κατάστασης των αποθηκευμένων σιτηρών. Αυτή η διάταξη συμβάλλει καθοριστικά στο σχεδιασμό ενός ολοκληρωμένου και αυτοματοποιημένου συστήματος διαχείρισης και παρακολούθησης, το οποίο προλαμβάνει πιθανές αλλοιώσεις και διασφαλίζει την υψηλή ποιότητα των αποθεμάτων για μακροπρόθεσμη αποθήκευση [105].

Κεφάλαιο 3ο: Τηλεϊατρική

3.1 Εισαγωγή

Στη σύγχρονη ψηφιακή εποχή στον 21 αιώνα, η πρόσβαση στις τηλεπικοινωνιακές υποδομές είναι αναγκαία με σκοπό την αποτελεσματική εξυπηρέτηση των πολιτών, την οικονομική βιωσιμότητα, την ανάπτυξη, και την καλύτερη διαχείριση σύνθετων προβλημάτων. Ο κλάδος της υγείας στις ανεπτυγμένες περιοχές και στα αστικά κέντρα έχει κάνει μεγάλη πρόοδο τα τελευταία χρόνια, υιοθετώντας και αξιοποιώντας της τεχνολογικές εξελίξεις που αφορούν τον κλάδο της υγείας, με σκοπό την καλύτερη εξυπηρέτηση των πολιτών.

Ωστόσο στις απομακρυσμένες περιοχές και στις αναπτυσσόμενες χώρες δεν ισχύει το ίδιο. Τα βήματα προς την ανάπτυξη και την υιοθέτηση έξυπνων τεχνολογιών γίνονται με πολύ αργό ρυθμό. Στις απομακρυσμένες περιοχές και ειδικά σε περιοχές με χαμηλό πληθυσμό το επίπεδο της ιατροφαρμακευτικής αγωγής και της ιατρικής περίθαλψης είναι πολύ χαμηλό. Για τον λόγο αυτό θεωρείται πλέον επιτακτική ανάγκη η αναβάθμιση των ιατρικών υποδομών και των νοσοκομείων. Το πρώτο βήμα είναι η αναβάθμιση των τηλεπικοινωνιακών δομών και η ψηφιοποίηση της λειτουργίας του συστήματος υγείας, με σκοπό την καλύτερη λειτουργία και την πιο άμεση απόκριση των ιατρών προς τους ασθενείς. Η ψηφιοποίηση θα αποφέρει στον ιατρό την άμεση γνώση στο ιστορικό του ασθενή, παρέχοντας του μια συνολική εικόνα για τις κλινικές παθήσεις και τις φαρμακευτικές αγωγές που έχουν ακολουθηθεί στο παρελθόν [107].

Οι τεχνολογικές εξελίξεις, όπως η τηλεϊατρική και άλλες ψηφιακές εφαρμογές υγείας, μπορούν να μεταμορφώσουν το παραδοσιακό μοντέλο υγειονομικής περίθαλψης, ενισχύοντας την ικανότητα παροχής υπηρεσιών σε περιοχές που μέχρι πρότινος ήταν απομονωμένες. Αρχικά γίνεται σαφές ότι οι απαιτήσεις για την παροχή τέτοιων υπηρεσιών διαμορφώνονται από παράγοντες όπως, η ανάπτυξη των τηλεπικοινωνιακών δομών, η χαρτογράφηση των απομακρυσμένων γεωγραφικών ζωνών και η προσαρμογή των τεχνολογικών λύσεων στις τοπικές ανάγκες [108].

Σε γενικές γραμμές, η εφαρμογή των ψηφιακών λύσεων τηλεϊατρικής σε απομακρυσμένες περιοχές συμβάλλει στην ενίσχυση της ποιότητας ζωής των πολιτών, παράλληλα με τη μείωση του κόστους για ιατρική περίθαλψη. Στις απομακρυσμένες περιοχές ειδικότερα στις περιοχές που έχουν μικρότερο πληθυσμό είναι πιθανόν να μην υπάρχει καθόλου ιατρός στην περιοχή ή σε κοντινή απόσταση. Είναι πιθανόν να μην υπάρχει νοσοκομειακή υποδομή ή αν υπάρχει να περιλαμβάνει 1 γενικό ιατρό. Μέσω της τηλεϊατρικής θα μπορούσε μια νοσοκομειακή μονάδα να υποστηρίξει λύσεις όπως η απομακρυσμένη παρακολούθηση ασθενών, η τηλεδιάγνωση, η τηλεψυχιατρική, παρακολούθηση ασθενών και άλλες υπηρεσίες.

Οι εφαρμογές για την τηλεϊατρική μπορούν να υλοποιηθούν μέσω δικτύου κινητής ασύρματης τεχνολογίας, είτε με την χρήση δορυφορικού δικτύου, είτε με χρήση οπτικών ινών. Η σύνδεση της ιατρικής δομής εξαρτάτε από την τοποθεσία της, από την κατάσταση των τηλεπικοινωνιακών δομών στην ευρύτερη περιοχή και τον σχεδιασμό των εφαρμογών θα ενταχθούν. Ο τομέας της υγείας είναι από τους πιο απαιτητικούς όσον αφορά την ταχύτητα πρόσβαση στο δίκτυο διότι περιλαμβάνει εφαρμογές πραγματικού χρόνου, απαιτεί αξιόπιστη και απρόσκοπτη σύνδεση. Είναι πολύ σημαντικό βήμα ο σωστός σχεδιασμός και η μελέτη των εφαρμογών που θα υιοθετηθούν έτσι ώστε να μπορούν να καλυφθούν οι ανάγκες τους με σκοπό τον σωστό σχεδιασμό του δικτύου. Μια σημαντική πρόκληση είναι η επεκτασιμότητα ή η αναβάθμιση των υπηρεσιών πρόσβασης στο δίκτυο καθώς στις απομακρυσμένες περιοχές

οι λύσεις είναι περιορισμένες και δεν υπάρχει μεγάλη δυνατότητα για ευελιξία μετά την αρχική υλοποίηση.

Η τηλεϊατρική απαιτεί αναβάθμιση των τηλεπικοινωνιακών υποδομών που συνεπάγεται με την ανάγκη εύρεσης κρατικών κονδυλίων. Για την υλοποίηση της χρειάζονται κυβερνητικές πρωτοβουλίες και ένταξη των ιατρικών δομών σε προγράμματα αναβάθμισης. Επίσης θα πρέπει να γίνουν και αντίστοιχα προγράμματα για τους ιατρούς με σκοπό την εκμάθησή τους στην χρήση των εφαρμογών τηλεϊατρικής [109].

3.2 Προκλήσεις στην τηλεϊατρική

3.2.1 Εισαγωγή

Η τηλεϊατρική μπορεί να μειώσει το χάσμα που υπάρχει στις ανεπτυγμένες περιοχές συγκριτικά με τις αναπτυσσόμενες περιοχές ή το χάσμα που συναντάμε στα μεγάλα αστικά κέντρα συγκριτικά με τις αγροτικές περιοχές. Ένα σημαντικό βήμα προς αυτή την κατεύθυνση αυτή είναι η κατανόηση των λόγων όπου η τηλεϊατρική δεν έχει διαδεδομένη χρήση σε μη αστικά κέντρα και σε αναπτυσσόμενες περιοχές.

Η τηλεϊατρική είναι η σύγχρονη λύση για την εξασφάλιση υγειονομικής περίθαλψης και ανοίγει νέους ορίζοντες στην επικοινωνία μεταξύ ασθενών και επαγγελματιών υγείας. Σε περιβάλλοντα με περιορισμένες υποδομές όπως είναι η οι αγροτικές περιοχές η πρόσβαση σε αξιόπιστα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα και η κατάλληλη ταχύτητα του διαδικτύου παραμένουν κρίσιμα εμπόδια. Ταυτόχρονα, το ψηφιακό χάσμα και η έλλειψη εκπαίδευσης στους τεχνολογικούς τομείς εμποδίζουν την ομαλή ενσωμάτωση των επιμέρους εφαρμογών της τηλεϊατρικής στην καθημερινή πρακτική των υγειονομικών υπηρεσιών [110], [111].

Επιπλέον, εκτός από τις τεχνικές δυσκολίες, παρατηρούνται σημαντικά ζητήματα που αφορούν την οικονομική βιωσιμότητα και τις νομικές παραμέτρους της τηλεϊατρικής. Η απουσία ολοκληρωμένων μοντέλων αποζημίωσης, οι προκλήσεις στη συμμόρφωση με τις απαιτήσεις για την προστασία των προσωπικών δεδομένων, καθώς και οι ανησυχίες που γεννιούνται από παρανοήσεις σχετικά με την ασφάλεια και την εμπιστευτικότητα, καθιστούν την εφαρμογή της τηλεϊατρικής πιο σύνθετη από ό,τι φαίνεται. Παρακάτω περιγράφονται οι πιο σημαντικές προκλήσεις για την υλοποίηση της τηλεϊατρικής :

3.2.2 Δυσκολία στη Χρήση

Η τεχνική πολυπλοκότητα αποτελεί έναν από τους βασικούς παράγοντες που περιορίζουν την υιοθέτηση της τηλεϊατρικής, ειδικά σε αγροτικές περιοχές όπου οι τεχνολογικές υποδομές και οι ψηφιακές δεξιότητες είναι περιορισμένες συγκριτικά με τα αστικά κέντρα.

Η αντίληψη ότι τα συστήματα τηλεϊατρικής είναι εξαιρετικά τεχνικά και περίπλοκα δημιουργεί ένα σημαντικό εμπόδιο τόσο για τους ασθενείς όσο και για τους υπευθύνους για την παροχή υγειονομικής περίθαλψης. Οι τεχνολογικές πλατφόρμες, συχνά σχεδιασμένες με πληθώρα λειτουργιών και επιλογών, όπως για παράδειγμα η χρήση πολύπλοκου μενού το οποίο περιλαμβάνει πολλές ενότητες και λειτουργίες για τον ιατρό στις οποίες θα πρέπει να περιηγηθεί, ενδέχεται να φαίνονται αποθαρρυντικές για χρήστες που δεν έχουν προηγούμενη εμπειρία ή επαρκή εκπαίδευση στη χρήση παρόμοιων εργαλείων. Αυτή η εμπειρία της πολυπλοκότητας οδηγεί σε αυξημένο άγχος και δισταγμό όσον αφορά την προσπάθεια αλληλεπίδρασης με την τεχνολογία, καθώς οι χρήστες μπορεί να αμφιβάλλουν για την ικανότητά τους να κατανοήσουν και να χειριστούν αποτελεσματικά τις εφαρμογές αυτές.

Η έλλειψη φιλικών προς τον χρήστη διεπαφών εντείνει την αίσθηση της τεχνικής πολυπλοκότητας. Όταν κατά τον σχεδιασμό έχει δοθεί μεγαλύτερη έμφαση στον τεχνικό εξειδικευμένο χαρακτήρα, χωρίς να λαμβάνονται υπόψη και οι ανάγκες των τελικών χρηστών, το περιβάλλον χειρισμού της σελίδας ή αντίστοιχα της εφαρμογής γίνεται εξαιρετικά δύσχρηστο για τον τελικό χρήστη. Έτσι, ακόμα και σε περιπτώσεις όπου υπάρχει η απαραίτητη υποδομή, η πολυπλοκότητα των τεχνικών λεπτομερειών όπως η πολυπλοκότητα του λογισμικού, οι απαιτήσεις για συνεχή ενημέρωση και οι εξειδικευμένες λειτουργίες σε συνδυασμό με την μη εξοικείωση του χρήστη δημιουργεί ένα φαινομενικά αδιαπέραστο φράγμα που μειώνει την προθυμία για χρήση.

Επίσης, στις αγροτικές περιοχές, όπου οι χρήστες έχουν συχνά χαμηλότερα επίπεδα ψηφιακής επάρκειας, το συναίσθημα ότι η τηλεϊατρική απαιτεί ειδικές γνώσεις μπορεί να έχει ακόμα πιο έντονο αντίκτυπο. Οι ηλικιωμένοι ή αυτοί που δεν έχουν συνηθίσει στα σύγχρονα τεχνολογικά μέσα αντιμετωπίζουν ακόμα μεγαλύτερα εμπόδια, όπου, υπό τον φόβο της αστοχίας και της ανικανότητας να ακολουθήσουν και να αντιληφθούν τις λειτουργίες που παρέχονται από τις εφαρμογές αυτές προτιμούν να της κατακρίνουν και να μην προβούν στην χρήση τους. Σε περιπτώσεις όπου οι υπεύθυνοι για την παροχή υγειονομικής περίθαλψης προσπαθούν να εισαγάγουν τέτοια τεχνολογία, η έλλειψη εμπιστοσύνης και η αίσθηση ότι το σύστημα είναι υπερβολικά περίπλοκο μπορεί να μειώσει την αποδοχή και τελικά να επιβραδύνει την εφαρμογή του προγράμματος ή ακόμα και την πλήρη αναστολή λειτουργίας του.

Για την αντιμετώπιση του ζητήματος, είναι κρίσιμο να επανεξεταστούν και να αναδιαμορφωθούν τα συστήματα τηλεϊατρικής ώστε να διευκολύνουν τους χρήστες μέσα από μια προσέγγιση σχεδιασμού που δίνει προτεραιότητα στην ευχρηστία και την απλότητα μειώνοντας την συνολική πολυπλοκότητα, με σκοπό την δημιουργία ενός φιλικού περιβάλλοντος. Η ενσωμάτωση διαδικασιών συνεχούς εκπαίδευσης και σχετικών σεμιναρίων μπορεί να βοηθήσει στην εξακρίβωση των σημείων δυσκολίας, επιτρέποντας την ανάπτυξη φιλικών προς τον χρήστη διεπαφών που μειώνουν την αίσθηση τεχνικής πολυπλοκότητας. Με αυτόν τον τρόπο, επίσης, δημιουργούνται ευκαιρίες για την ενίσχυση της εμπιστοσύνης, τόσο των ασθενών όσο και των ιατρών στο να υιοθετήσουν σε ευρύτερη κλίμακα τεχνολογικές λύσεις που συμβάλλουν ουσιαστικά στη βελτίωση της υγειονομικής περίθαλψης σε περιοχές με περιορισμένους πόρους [112] [113].

3.2.3 Πρόσβαση σε τηλεπικοινωνιακές υποδομές

Σε πολλές αγροτικές και απομακρυσμένες περιοχές, η έλλειψη αξιόπιστων υποδομών είναι ένας από τους βασικούς παράγοντες που εμποδίζουν την επιτυχή εφαρμογή της τηλεϊατρικής. Παρά τις τεχνολογικές προόδους στον τομέα της ευρυζωνικότητας, οι αγροτικές περιοχές συχνά αντιμετωπίζουν σημαντικά κενά ως προς την πρόσβαση σε σταθερές και υψηλής ταχύτητα σύνδεσης. Η απουσία τέτοιων υποδομών καθιστά δύσκολη την πραγματοποίηση μεταφοράς δεδομένων, ζωντανών βιντεοδιασκέψεων και την παρακολούθηση ασθενών σε πραγματικό χρόνο, επηρεάζοντας άμεσα την ακρίβεια των διαγνώσεων και την ταχύτητα παροχής φροντίδας.

Η οικονομική αποδοτικότητα της εγκατάστασης και συντήρησης δικτύων αποτελεί επιπλέον εμπόδιο. Οι καταναμημένες και αραιές πληθυσμιακές δομές στις αγροτικές περιοχές μειώνουν το οικονομικό ενδιαφέρον των ιδιωτικών επενδυτών και των τηλεπικοινωνιακών εταιρειών, παράγοντας έτσι το λεγόμενο ψηφιακό χάσμα μεταξύ αστικών και αγροτικών περιοχών. Οι επενδύσεις σε υποδομές, όπως η εγκατάσταση οπτικών ινών, η ανάπτυξη δικτύων 4G/5G ή ακόμα και η υιοθέτηση δορυφορικών τεχνολογιών, απαιτούν σημαντικά οικονομικά μέσα και συχνά δεν αποδίδουν το επιθυμητό κέρδος σε περιοχές με χαμηλό πληθυσμό. Αυτή η ανισότητα στην πρόσβαση σημαίνει ότι οι τηλεϊατρικές υπηρεσίες, οι

οποίες θα μπορούσαν να γεφυρώσουν το χάσμα στην υγειονομική περίθαλψη, καταλήγουν να προσφέρονται με μειωμένη ποιότητα ή καθόλου σε περιοχές όπου η ανάγκη είναι μεγαλύτερη.

Πέραν της αρχικής εγκατάστασης, η συντήρηση και η τακτική αναβάθμιση των δικτύων αποτελούν κρίσιμες προκλήσεις. Ο τεχνικός εξοπλισμός πρέπει να είναι σύγχρονος, αλλά και ανθεκτικός σε περιβαλλοντικές προκλήσεις όπου συχνά συναντάμε σε αγροτικές ζώνες όπως για παράδειγμα οι ακραίες καιρικές συνθήκες ή οι διακοπές στην ηλεκτροδότηση. Ανεξάρτητα από το αρχικό επίπεδο επένδυσης, η έλλειψη τακτικού ελέγχου και συντήρησης μπορεί να οδηγήσει σε διακυμάνσεις στην ποιότητα της σύνδεσης, δημιουργώντας διακοπές στη λειτουργία των τηλεϊατρικών εφαρμογών και, κατ' επέκταση, αλλοιώνοντας την διαθεσιμότητα και την αποτελεσματικότητα του συστήματος.

Η αντιμετώπιση του προβλήματος της διαθεσιμότητας υποδομών απαιτεί μια ολοκληρωμένη προσέγγιση που συνδυάζει δημόσιες και ιδιωτικές επενδύσεις. Κυβερνητικές πολιτικές και προγράμματα επιδότησης μπορούν να ενθαρρύνουν τις τηλεπικοινωνιακές εταιρείες να επεκτείνουν το δίκτυό τους σε απομακρυσμένες περιοχές, ενώ παράλληλα η ανάπτυξη εναλλακτικών λύσεων, όπως οι δορυφορικές τεχνολογίες, μπορεί να γεφυρώσει προσωρινά το κενό και να επιτρέψει τη διάδοση της τηλεϊατρικής.

Μια επιτυχημένη υλοποίηση των τηλεϊατρικών υπηρεσιών εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ύπαρξη ενός αξιόπιστου και ανθεκτικού δικτύου που να μπορεί να υποστηρίξει όχι μόνο τις βασικές λειτουργίες, αλλά και αναβαθμίσεις και επεκτάσεις στο μέλλον. Με την αντιμετώπιση αυτού του θεμελιώδους προβλήματος, θα ενισχυθεί η αποτελεσματικότητα των τηλεϊατρικών υπηρεσιών και θα συμβάλει στην μείωση της ανισότητας στην πρόσβαση σε ποιοτικές υπηρεσίες υγείας μεταξύ αστικών και αγροτικών περιοχών [112].

3.2.4 Πολιτικές και ρυθμιστικές προκλήσεις

Η τηλεϊατρική μπορεί να γεφυρώσει σημαντικά τα χάσματα στην πρόσβαση σε υπηρεσίες υγείας, ιδίως σε απομακρυσμένες και αγροτικές περιοχές όπου οι παραδοσιακές υποδομές υγείας είναι ανεπαρκείς. Παρά τις προοπτικές αυτές, η υιοθέτηση εφαρμογών τηλεϊατρικής αντιμετωπίζει συστηματικά εμπόδια που σχετίζονται με το θεσμικό και πολιτικό πλαίσιο. Η έλλειψη σαφών κανονισμών, η ανεπαρκής κυβερνητική υποστήριξη και ο περιορισμένος συντονισμός μεταξύ των διαφορετικών φορέων, καθώς και οι επιπτώσεις που επιφέρει η πολιτική αστάθεια στις υγειονομικές πρωτοβουλίες είναι μερικά σημαντικά εμπόδια.

Αρχικά η έλλειψη σαφών κανονισμών και οδηγιών είναι ένα βασικό και αφορά την ασαφή διαμόρφωση των ρυθμιστικών κανόνων που αφορούν την εφαρμογή της τηλεϊατρικής. Οι υγειονομικοί βρίσκονται αντιμέτωποι με αβεβαιότητα όσον αφορά τα δικαιώματα και τις ευθύνες τους, καθώς οι οδηγίες για τη χρήση ψηφιακών μέσων δεν είναι επαρκώς καθορισμένες. Η απουσία σαφών οδηγιών όχι μόνο δυσχεραίνει τη λειτουργία και την εφαρμογή των τεχνολογιών τηλεϊατρικής, αλλά δημιουργεί και νομικά εμπόδια που αποθαρρύνουν τους επαγγελματίες από τη μετάβαση σε ψηφιακές μεθόδους παροχής υγειονομικής περίθαλψης. Επιπλέον, η έλλειψη ενός καλά οργανωμένου μηχανισμού παραπομπής μεταξύ διαφορετικών επιπέδων υγειονομικής φροντίδας οδηγεί σε καθυστερήσεις, αναποτελεσματικότητα και γενικότερη δυσλειτουργία του συστήματος.

Υπάρχει ανεπαρκής κυβερνητική υποστήριξη και συντονισμός παρά το γεγονός ότι η τηλεϊατρική μπορεί να αποτελέσει κρίσιμο εργαλείο ενίσχυσης της πρόσβασης σε υγειονομικές υπηρεσίες, η έλλειψη σταθερής κυβερνητικής υποστήριξης αποτελεί ακόμα ένα σοβαρό εμπόδιο. Στις περισσότερες αναπτυσσόμενες χώρες, οι κρατικοί φορείς δεν διαθέτουν σαφείς στρατηγικές για την υλοποίηση των τηλεϊατρικών λύσεων. Αυτό συμβαίνει λόγω ότι οι διάφορες πρωτοβουλίες και τα προγράμματα προς υλοποίηση, γίνονται αποσπασματικά, χωρίς φυσικό συντονισμό ή χωρίς την κατάλληλη συνεργασία μεταξύ των

διαφορετικών τμημάτων του κρατικού μηχανισμού. Ο ανεπαρκής προγραμματισμός και η περιορισμένη χρηματοδότηση οδηγούν σε αποτυχία στη δημιουργία ενός ενιαίου και αξιόπιστου συστήματος, καθιστώντας τη μετάβαση σε ψηφιακές μεθόδους υγειονομικής περίθαλψης δυσχερή και αναποτελεσματική [114].

Εν συνέχεια του κυβερνητικού προβλήματος ακολουθεί η πολιτική αστάθεια και η έλλειψη μακροπρόθεσμου οράματος. Σε χώρες που χαρακτηρίζονται από συχνές αλλαγές στην πολιτική ηγεσία ή από εναλλασσόμενες προτεραιότητες στο κυβερνητικό επίπεδο με μη μακροπρόθεσμο ορίζοντά , τα τηλεϊατρικά προγράμματα συχνά παραμένουν σε κατάσταση αναστολής. Η πολιτική αστάθεια δεν επιτρέπει στον σχεδιασμό και την υλοποίηση μακροπρόθεσμων δομών υποστήριξης της τηλεϊατρικής, διότι οι αποφάσεις που είχαν παρθεί από προηγούμενες κυβερνήσεις καταργούνται ή τροποποιούνται με την αλλαγή των κυβερνήσεων. Επιπλέον, η έλλειψη ελέγχου και λογοδοσίας καθώς και η γραφειοκρατική δυσλειτουργία επηρεάζουν αρνητικά την εφαρμογή πρωτοβουλιών που απαιτούν μακροπρόθεσμη δέσμευση.

Η αντιμετώπιση των ανωτέρω προκλήσεων απαιτεί τη διαμόρφωση ενός ενιαίου καθορισμένου ρυθμιστικού πλαισίου, στο οποίο να περιλαμβάνονται λεπτομερείς οδηγίες για τους ρόλους και τις ευθύνες των υγειονομικών. Παράλληλα, είναι επιτακτική η ανάγκη για στενή συνεργασία μεταξύ των κρατικών φορέων, ώστε να εξασφαλιστεί ο συντονισμός και η σταθερή χρηματοδότηση των τηλεϊατρικών προγραμμάτων. Επίσης, ο καθορισμός στρατηγικών πλάνων που να λαμβάνουν υπόψη την πολιτική αστάθεια και να ενσωματώνουν μέτρα για την αντιμετώπισή της, όπως η δημιουργία ανεξάρτητων φορέων παρακολούθησης και αξιολόγησης των υγειονομικών πρωτοβουλιών, θα μπορούσε να συμβάλει στη βιωσιμότητα της τηλεϊατρικής. Επίσης η εκπαίδευση και η ενημέρωση των υπεύθυνων για τις πολιτικές πρωτοβουλίες, για τα οφέλη και τις προκλήσεις της τηλεϊατρικής μπορούν να προάγουν την υιοθέτηση συστημικών λύσεων που θα ανταποκρίνονται στις ανάγκες των αγροτικών περιοχών. Ακόμα θα βοηθούσε και η εφαρμογή πιλοτικών προγραμμάτων μικρότερης κλίμακας σε συγκεκριμένες περιοχές με σκοπό την καλύτερη μελέτη και την εξαγωγή αποτελεσμάτων. Αυτό θα βοηθούσε να μειωθούν οι αστοχίες των προγραμμάτων, να βρεθούν λύσεις στα εμπόδια που θα προκύψουν και έπειτα την σταδιακή επέκταση στην υπόλοιπη χώρα.

Η υιοθέτηση της τηλεϊατρικής σε αγροτικές περιοχές αναπτυσσόμενων χωρών στερεώνεται σε μεγάλο βαθμό από το πολιτικό και ρυθμιστικό πλαίσιο που την περιβάλλει. Χωρίς σαφείς και σταθερούς κανονισμούς, το όραμα της ψηφιακής υγείας παραμένει απλά ως δυνητική δυνατότητα. Η υιοθέτηση και εφαρμογή ολοκληρωμένων πολιτικών δράσεων, που περιλαμβάνουν τόσο τεχνικές όσο και πολιτισμικές διαστάσεις, είναι καθοριστική για τη δημιουργία ενός βιώσιμου και λειτουργικού συστήματος τηλεϊατρικής.

3.2.5 Ασφάλεια δεδομένων

Η υιοθέτηση της τηλεϊατρικής απαιτεί ένα ολοκληρωμένο πρόγραμμα που δεν βασίζεται μόνο στη λειτουργικότητα και την ευχρηστία, αλλά επίσης διασφαλίζει τα υψηλότερα πρότυπα ασφάλειας και προστασίας των δεδομένων. Σε παραλληλισμό με αυτές τις απαιτήσεις, η ποιότητα και η αξιοπιστία των τηλεπικοινωνιακών υποδομών αποτελούν κρίσιμους παράγοντες για την ομαλή μετάδοση των δεδομένων και, κατ' επέκταση, για την υποστήριξη των μηχανισμών ασφαλείας. Το ζήτημα της ασφάλειας των δεδομένων είναι πολύ σημαντικό για το σχεδιασμό των τηλεϊατρικών εφαρμογών . Σε ένα περιβάλλον όπου οι χρήστες διακινούν ευαίσθητες πληροφορίες, όπως ιατρικά δεδομένα και προσωπικά στοιχεία, είναι απαραίτητο η εφαρμογή να διαθέτει ενσωματωμένα προηγμένα πρωτόκολλα κρυπτογράφησης και μηχανισμούς προστασίας. Η χαμηλή ψηφιακή εγγραμματοσύνη των τελικών χρηστών μπορεί

να εντείνει τις ανησυχίες για την ιδιωτικότητα, καθώς οι χρήστες δεν έχουν πάντα την τεχνική γνώση για να καταλάβουν πώς προστατεύονται τα δεδομένα τους από κυβερνοαπειλές.

Παράλληλα, η αξιοπιστία των τηλεπικοινωνιακών υποδομών παίζει καθοριστικό ρόλο στην αποστολή και λήψη των δεδομένων που απαιτούνται για τη λειτουργία της τηλεϊατρικής. Ανεπαρκής ή ασταθής σύνδεση, χαμηλές ταχύτητες διαύλου ή συχνές διακοπές ρεύματος μπορούν να επηρεάσουν αρνητικά τόσο την ποιότητα της συνεδρίας όσο και την εφαρμογή των μηχανισμών ασφαλείας. Για παράδειγμα, όταν οι υποδομές είναι ασταθείς, η μετάδοση κρυπτογραφημένων δεδομένων μπορεί να διακοπεί, αφήνοντας το σύστημα επιρρεπές σε υποκλοπές ή αλλοιώσεις. Επιπλέον, η έλλειψη τακτικής συντήρησης στις τηλεπικοινωνιακές υποδομές μπορεί να οδηγήσει σε συχνές αποτυχίες των συστημάτων ασφαλείας, διευκολύνοντας πιθανές παραβιάσεις ή διαρροές ευαίσθητων πληροφοριών.

Η αλληλεπίδραση μεταξύ της εφαρμογής και της μετάδοσης των πληροφοριών θα πρέπει να περικλείει τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

- **Ασφαλής σύνδεση:** Μια εφαρμογή τηλεϊατρικής που έχει σχεδιαστεί σύμφωνα με υψηλά πρότυπα ασφάλειας μπορεί να θεωρηθεί ως μη αξιόπιστη αν τα δεδομένα διακινούνται μέσω ασταθών δικτύων. Η αξιόπιστη τοπική τηλεπικοινωνιακή υποδομή είναι αναγκαία για την ομαλή λειτουργία όχι μόνο των εφαρμογών αλλά και για την εξασφάλιση ότι τα δεδομένα μεταδίδονται με ασφάλεια και χωρίς απώλειες ή διακοπές.
- **Δυνατότητες αναβάθμισης και συνεχής συντήρηση:** Ο συνεχής έλεγχος και η αναβάθμιση των συστημάτων ασφαλείας πρέπει να συνδυάζονται με την ενημέρωση και βελτίωση των υποδομών. Αυτό απαιτεί στενή συνεργασία μεταξύ των παρόχων τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών και των φορέων υγείας, ώστε να διασφαλιστεί ότι κάθε ευπάθεια που προκύπτει από το περιβάλλον των υποδομών μπορεί να αντιμετωπιστεί άμεσα μέσω τεχνικών και διοικητικών μέτρων.

Για να ξεπεραστούν οι προκλήσεις αυτές και να διασφαλιστεί η ακεραιότητα του πληροφοριακού συστήματος της τηλεϊατρικής, είναι απαραίτητο να γίνουν τα παρακάτω:

- **Ανάπτυξη ενοποιημένων πρωτοκόλλων ασφαλείας:** Η υιοθέτηση ενοποιημένων και αυστηρών πρωτοκόλλων κρυπτογράφησης και προστασίας δεδομένων, που να αναβαθμίζονται με βάση τις εξελισσόμενες απειλές.
- **Επενδύσεις στις τηλεπικοινωνιακές υποδομές:** Η αναβάθμιση η επέκταση και η συντήρηση των τηλεπικοινωνιακών δικτύων πρέπει να αποτελούν προτεραιότητα, ώστε να εξασφαλίζεται μια σταθερή και αξιόπιστη σύνδεση [115].

3.3 Αρχιτεκτονική

Το πρώτο σκέλος της αρχιτεκτονικής είναι η κατανόηση των αναγκών που προκύπτουν σχετικά με την υιοθέτηση τεχνολογιών τηλεϊατρικής. Μια λίστα με το εύρος ζώνης μας δίνει μια καλύτερη εικόνα σχετικά με την υποδομή που πρέπει να αναπτυχθεί και να χρησιμοποιηθεί με σκοπό να εξασφαλιστεί η σωστή λειτουργία και η διαθεσιμότητα των υπηρεσιών, που σχετίζονται με τον τομέα της υγείας στις απομακρυσμένες περιοχές [116].

- Αρχικά για έναν ασθενή από το σπίτι, με σκοπό να μπορεί να πραγματοποιήσει μια βιντεοδιαβούλευση με τον γιατρό του αλλά και να έχει πρόσβασή σε ηλεκτρονικά αρχεία χρειάζονται από 1.5 έως 3 Mbit/s.

- Για ένα ιατρείο που έχει ως δυναμικό έναν ιατρό για χρήση ηλεκτρονικού ταχυδρομείου για πρόσβαση στα ηλεκτρονικά αρχεία των μητρώων υγείας των ασθενών του και για βιντεοδιαβουλεύσεις επιτρέποντας την απομακρυσμένη παρακολούθηση χρειάζονται 4 Mbit/s.
- Για ένα ιατρείο που έχει στο δυναμικό του από 2 έως 4 ιατρούς, για ταυτόχρονη χρήση ηλεκτρονικού ταχυδρομείου, πρόσβασης στα ηλεκτρονικά αρχεία των μητρώων υγείας των ασθενών και βιντεοδιαβουλεύσεις που θα επιτρέπουν τους ιατρούς να παρακολουθούν απομακρυσμένα τους ασθενείς τους χρειάζονται τουλάχιστον 10 Mbit/s.
- Μια μικρή αγροτική κλινική με δυναμικό 5 ιατρών με για ταυτόχρονη χρήση ηλεκτρονικού ταχυδρομείου, πρόσβασης στα ηλεκτρονικά αρχεία των μητρώων υγείας των ασθενών με την δυνατότητα λήψης εικόνων σε μη πραγματικό χρόνο και βιντεοδιαβουλεύσεις που θα επιτρέπουν τους ιατρούς να παρακολουθούν απομακρυσμένα τους ασθενείς τους χρειάζονται τουλάχιστον 10 Mbit/s.
- Μια μικρή κλινική με δυναμικό 5 έως 25 ιατρούς για ταυτόχρονη χρήση ηλεκτρονικού ταχυδρομείου, πρόσβασης στα ηλεκτρονικά αρχεία των μητρώων υγείας των ασθενών με την δυνατότητα λήψης εικόνων σε πραγματικό χρόνο και βιντεοδιαβουλεύσεις που θα επιτρέπουν τους ιατρούς να παρακολουθούν απομακρυσμένα τους ασθενείς τους χρειάζονται τουλάχιστον 25 Mbit/s.
- Ένα νοσοκομείο που μπορεί να υποστηρίξει τις απαραίτητες λειτουργίες διαχείρισης που το καθιστούν λειτουργικό όπως το ηλεκτρονικό ταχυδρομείο, περιήγηση στο διαδίκτυο επιτρέποντας της ταυτόχρονη χρήση ηλεκτρονικών μητρώων υγείας όπως και βιντεοδιαβουλεύσεις υψηλής ευκρίνειας επιτρέποντας και την μεταφορά εικόνων σε πραγματικό χρόνο και δίνοντας την δυνατότητα για την συνεχή απομακρυσμένη παρακολούθηση χρειάζονται 100 Mbit/s.

Κομμάτι της αρχιτεκτονικής είναι η κατανόηση των αναγκών που προκύπτουν από τις εφαρμογές τις οποίες θα χρησιμοποιηθούν για υπηρεσίες τηλεϊατρικής. Είναι σημαντικό να ληφθούν υπόψη, μέτρα με σκοπό την επεκτασιμότητα του δικτύου διότι με βάση αυτά που έχουν αναφερθεί παραπάνω, η αρχική έγκριση για εγκατάσταση τηλεπικοινωνιακής υποδομής είναι δύσκολη στις απομακρυσμένες περιοχές και στις αναπτυσσόμενες χώρες. Επιπλέον, η υλοποίηση για την εγκατάσταση τηλεπικοινωνιακών δομών γίνεται με εξαιρετικά αργούς ρυθμούς και σε ορισμένες περιπτώσεις δεν ολοκληρώνεται ποτέ. Η επεκτασιμότητα του δικτύου είναι δύσκολη έως και απίθανη, οπότε κατά την διάρκεια του σχεδιασμού θα πρέπει να υπάρχει πρόβλεψη με σκοπό την μείωση των αναγκών για μελλοντικές επεκτάσεις.

Σε χώρες με ανάπτυξη όπως για παράδειγμα η Αιθιοπία, όπου η ανισότητα στην παροχή υγειονομικών υπηρεσιών είναι έντονη λόγω της έλλειψης ιατρικού προσωπικού και της συγκέντρωσης των ειδικών σε αστικές περιοχές, η τηλεϊατρική αναδεικνύεται ως απαραίτητο εργαλείο για την εξασφάλιση ομοιόμορφης πρόσβασης σε υπηρεσίες υγείας για όλη την χώρα. Η αρχιτεκτονική για ένα εθνικό τηλεϊατρικό δίκτυο στηρίζεται στην αξιοποίηση της υπάρχουσας υποδομής τηλεπικοινωνιών της χώρας, επιδιώκοντας να γεφυρώσει το χάσμα που υπάρχει ανάμεσα στις απομακρυσμένες αγροτικές περιοχές και των καλύτερα εξοπλισμένων αστικών κέντρων [117], [118].

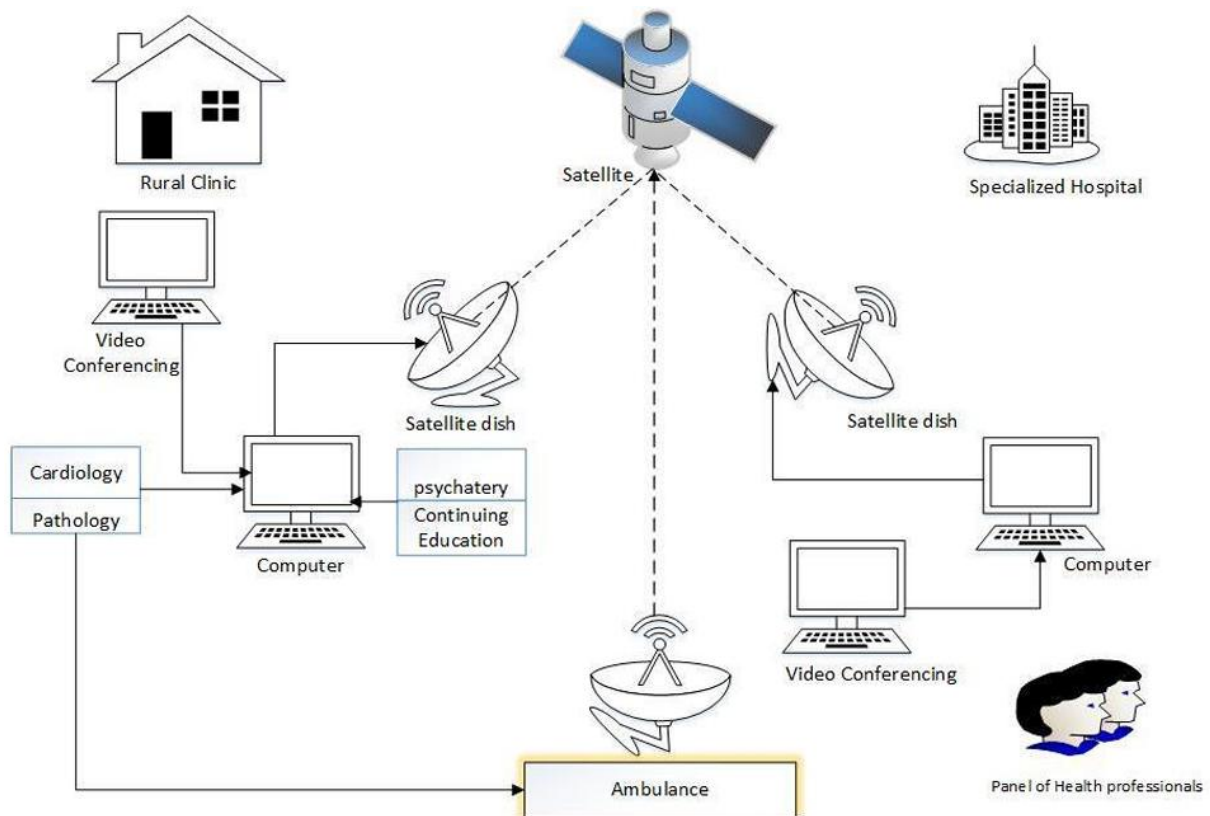
Μια λύση μπορεί να περιλαμβάνει ένα υβριδικό συνδυασμό τεχνολογικών προσεγγίσεων, όπου η χρήση των δικτύων VSAT θα μπορούσε να έχει καθοριστικό ρόλο στις απομακρυσμένες περιοχές. Με πάνω από 400 σταθμούς και την υλοποίηση εφαρμογών, αυτές οι συνδέσεις προσφέρουν οικονομικά αποδοτική και ευρείας κάλυψης μετάδοση δεδομένων, παρά το γεγονός ότι το διαθέσιμο bandwidth είναι σχετικά περιορισμένο. Παράλληλα, οι υπηρεσίες εκτός από της παραδοσιακές dial-up και leased line

συνδέσεις, με δυνατότητες μεταφοράς έως και 1 Mbps, υπάρχουν και οι πιο σύγχρονες τεχνολογίες κινητής τηλεφωνίας 3G/4G για την κάλυψη των απαιτήσεων των αστικών περιοχών αλλά και των ζωνών με πιο εξαπλωμένη υποδομή σε πιο απομακρυσμένες και λιγότερο πυκνοκατοικημένες περιοχές. Επιπλέον, το δίκτυο BMN, που βασίζεται σε οπτικές ίνες υψηλής ταχύτητας, εξυπηρετεί στην ταχεία μετάδοση πολυμέσων όπως ιατρικές εικόνες και βίντεο διαγνωστικών διαδικασιών, καθιστώντας το ιδανικό για την υποστήριξη εξειδικευμένων τηλειατρικών εφαρμογών.

Η συνύπαρξη αυτών των τεχνολογικών λύσεων δημιουργεί ένα ολοκληρωμένο και ευέλικτο τηλεϊατρικό σύστημα, το οποίο αξιοποιεί τα οικονομικά και γεωγραφικά πλεονεκτήματα κάθε τεχνολογίας για την αποτελεσματική διαχείριση και μεταφορά ιατρικών δεδομένων. Η υβριδική προσέγγιση, με την αντίστοιχη δυναμική κατανομή των πόρων βάσει των τοπικών αναγκών, επιτρέπει τόσο την ανταλλαγή πληροφοριών όσο και τη διεξαγωγή τηλεδιαβουλεύσεων, διευκολύνοντας την απομακρυσμένη διάγνωση και την αξιολόγηση περίπλοκων ιατρικών περιπτώσεων. Μέσα από αυτήν την προσέγγιση, το σύστημα όχι μόνο γεφυρώνει τις διαφορές μεταξύ αστικών και αγροτικών περιοχών, αλλά ενισχύει και τη συνεργασία μεταξύ των υγειονομικών παρέχοντας ένα ολοκληρωμένο υγειονομικό σύστημα που μπορεί να αυξήσει σημαντικά την ποιότητα και την πρόσβαση στις υγειονομικές υπηρεσίες σε όλη την επικράτεια [118], [119].

Παράλληλα, η εφαρμογή μιας απλής τηλεϊατρικής πλατφόρμας λειτουργεί συμπληρωματικά με την ανωτέρω δικτυακή αρχιτεκτονική, παρέχοντας το αναγκαίο λογισμικό για τη διαχείριση των ηλεκτρονικών ιατρικών φακέλων των ασθενών και την οργάνωση των επικοινωνιών μεταξύ ασθενών και γιατρών. Συνολικά επιτυγχάνεται η ασφαλή καταγραφή των προσωπικών δεδομένων των χρηστών, τη συνεχή ενημέρωση της ιατρικής ομάδας για το ιστορικό του ασθενή, και τη διευκόλυνση τηλεδιαβουλεύσεων, γεγονός που οδηγεί σε καλύτερη παρακολούθηση και θεραπεία των ασθενών. Η ολοκληρωμένη σύνδεση των συστημάτων επικοινωνίας και της τηλεϊατρικής πλατφόρμας δημιουργεί ένα συνεκτικό και διαδραστικό περιβάλλον, στο οποίο οι υγειονομικές υπηρεσίες μπορούν να είναι διαθέσιμες με ακρίβεια και αποτελεσματικότητα, ανεξάρτητα από τις γεωγραφικές δυσκολίες κάθε περιοχής [120].

Σε ένα ευρύτερο πλαίσιο, η ενσωμάτωση αυτών των τεχνολογικών λύσεων συμβάλλει ουσιαστικά στη μείωση των υγειονομικών ανισοτήτων, επιτρέποντας την πρόσβαση σε εξειδικευμένες υπηρεσίες ειδικών ιατρών όπου προηγουμένως η μεταφορά πληροφορίας ήταν ιδιαίτερα δύσκολη σε απομακρυσμένες περιοχές.



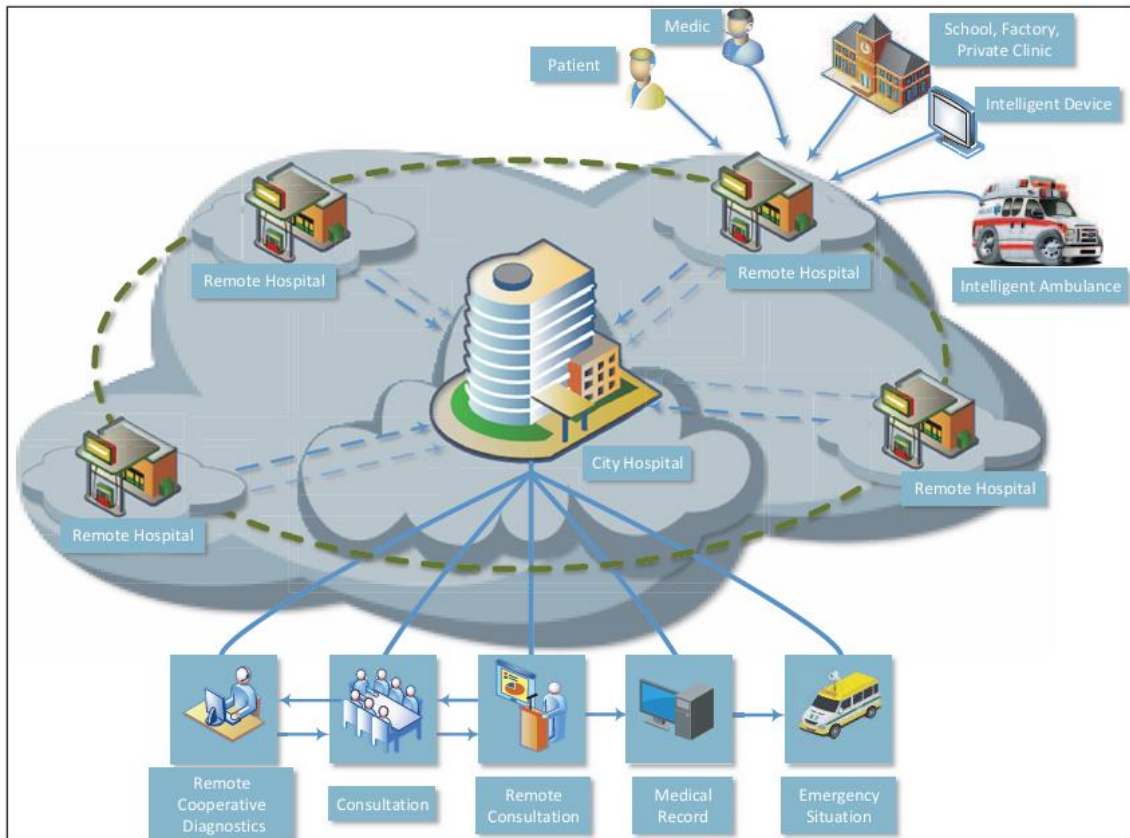
Εικόνα 21 Διάγραμμα αρχιτεκτονικής VSAT [118]

Σε απομακρυσμένες περιοχές που υπάγονται σε αναπτυγμένες χώρες η εικόνα είναι διαφορετική με περισσότερες δυνατότητες και καλύτερα και πιο άμεσα αποτελέσματα. Στο πλαίσιο αυτό, η τεχνολογία 5G και οι εφαρμογές της τηλεϊατρικής έρχονται να αναδιαμορφώσουν το τοπίο της υγείας, προσφέροντας λύσεις που εξασφαλίζουν γρήγορη και αξιόπιστη μετάδοση ιατρικών δεδομένων σε πραγματικό χρόνο.

Η προτεινόμενη αρχιτεκτονική, όπως απεικονίζεται στην εικόνα 22, στηρίζεται σε μια αξιόπιστη σύνδεση μέσω του διαδικτύου που ενώνει το κεντρικό αστικό νοσοκομείο με ένα δίκτυο απομακρυσμένων αγροτικών νοσοκομείων. Ειδικότερα, το αστικό νοσοκομείο λειτουργεί ως ο κεντρικός κόμβος του συστήματος, ο οποίος παρέχει την τεχνική υποστήριξη και τον συντονισμό για την απομακρυσμένη διάγνωση και θεραπεία. Μέσω της χρήσης του cloud, επιτυγχάνεται ο έγκαιρος διαμοιρασμός μεγάλου όγκου ιατρικών δεδομένων όπως για παράδειγμα εικόνες, βίντεο και ήχος επιτρέποντας την παροχή σύγχρονων υπηρεσιών τηλεϊατρικής, όπως η απομακρυσμένη διάγνωση, οι ηλεκτρονικές συνταγογραφίες και η online επικοινωνία μεταξύ των ιατρών.

Ειδικότερα, η υβριδική αυτή αρχιτεκτονική έχει σχεδιαστεί με βάση την ανάγκη για αποτελεσματική διαχείριση των πόρων και την υλοποίηση λύσεων που απευθύνονται στις ιδιαίτερες απαιτήσεις των απομακρυσμένων περιοχών. Τα απομακρυσμένα νοσοκομεία, παρόλο που συχνά στερούνται των εξελιγμένων υποδομών και εξειδικευμένων υπηρεσιών, μέσω της σύνδεσης τους στο ενιαίο σύστημα μπορούν να λάβουν λύσεις και υποστήριξη από το κεντρικό αστικό νοσοκομείο σε πραγματικό χρόνο. Η υλοποίηση αυτής της προσέγγισης όχι μόνο μειώνει το χρονικό και οικονομικό κόστος διάγνωσης και θεραπείας, αλλά ενισχύει επίσης την ποιότητα των παρεχόμενων υπηρεσιών και τη συνεργασία μεταξύ διαφόρων φορέων υγείας.

Η προτεινομένη αρχιτεκτονική λειτουργεί με τη χρήση τεχνολογιών αιχμής για την πραγματοποίηση τηλεϊατρικών υπηρεσιών. Η τεχνολογία 5G, με τα χαρακτηριστικά της όπως η χαμηλή καθυστέρηση και η υψηλή αξιοπιστία, επιτρέπει τη μετάδοση μεγάλων όγκων δεδομένων που απαιτούνται για τη σωστή αξιολόγηση και παρακολούθηση των ασθενών. Επιπλέον, η χρήση του διαμοιρασμού πόρων μέσω του cloud υπερβαίνει τους περιορισμούς του γεωγραφικού χώρου, ενώ η ενσωμάτωση εργαλείων τηλεδιαγνώσεων και ηλεκτρονικών ιατρικών αρχείων δημιουργεί ένα ολοκληρωμένο σύστημα υγείας, το οποίο ανταποκρίνεται στις ανάγκες τόσο των αστικών όσο και των απομακρυσμένων περιοχών [121].



Εικόνα 22 Αρχιτεκτονική για απομακρυσμένες περιοχές σε αναπτυγμένες χώρες [121].

3.4 Περίπτωση χρήσης

Ο σκοπός της τηλεϊατρικής είναι να αυξηθεί το βιοτικό επίπεδο και να παρέχει σε όλους καλύτερη ιατρική περίθαλψη. Επιπλέον οι απομακρυσμένες περιοχές ή περιοχές με μικρό πληθυσμό μπορούν να αποκτήσουν ένα πιο ολοκληρωμένο σύστημα υγείας όπου δεν θα χρειάζεται να διανύσουν πολλά χιλιόμετρα με σκοπό να λάβουν μια διάγνωση από έναν εξειδικευμένο ιατρό. Η τηλεϊατρική μπορεί να προσφέρει σε μικρές αγροτικές κλινικές σημαντικές υπηρεσίες που μπορούν να καλύψουν τα κενά που δημιουργούνται από την έλλειψη ιατρικού προσωπικού και να επιφέρει καλύτερα αποτελέσματα μέσα από τις υπηρεσίες που θα αναλυθούν στην συνέχεια του κεφαλαίου [107].

3.4.1 Τηλεδιάγνωση

Η τηλεδιάγνωση αποτελεί μία δυναμική προσέγγιση στην παροχή ιατρικών υπηρεσιών, όπου η σύγχρονη τεχνολογία ενσωματώνεται για την απομακρυσμένη διάγνωση, παρακολούθηση και για την θεραπεία των ασθενών, ανεξαρτήτως γεωγραφικής απόστασης. Αυτή η καινοτόμος μέθοδος επιτρέπει τη μετάδοση κρίσιμων βιολογικών δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, μειώνοντας το κόστος και την ανάγκη φυσικής παρουσίας των ασθενών ή των ιατρών, γεγονός που αποδεικνύεται ιδιαίτερα σημαντικό σε απομακρυσμένες [122].

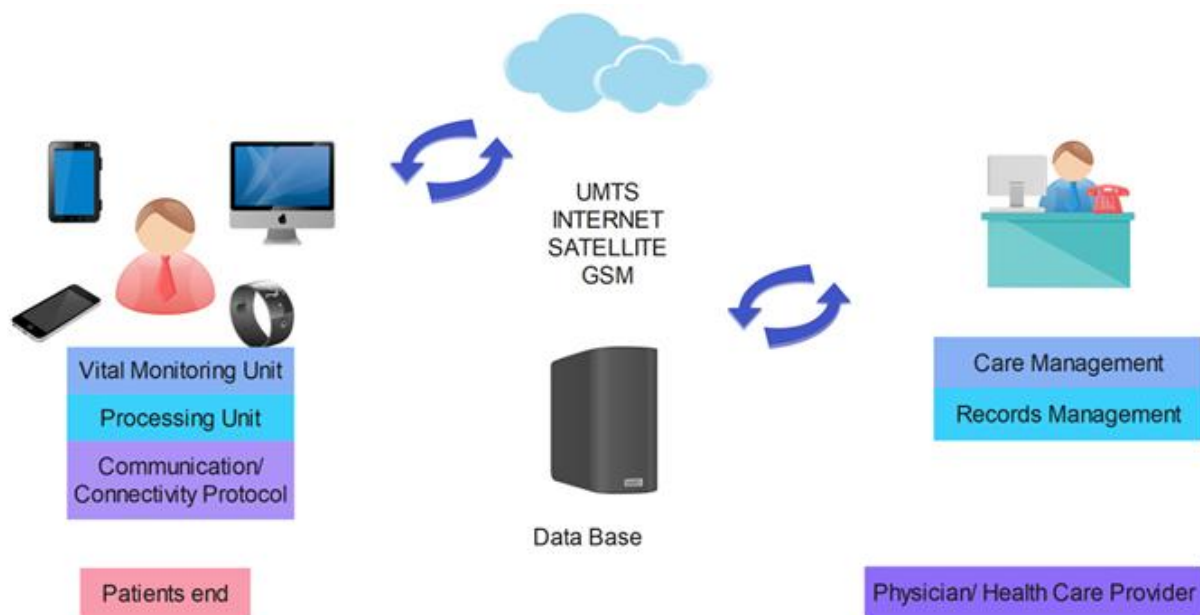
Η τηλεδιάγνωση έγκειται στη συλλογή των βιολογικών παραμέτρων του ασθενούς μέσω ειδικών φορητών αισθητήρων και συσκευών που αποτελούν το Wireless Body Area Network (WBAN). Μέσω αυτής της δομής, οι αισθητήρες καταγράφουν κρίσιμες παραμέτρους όπως το ηλεκτροκαρδιογράφημα, η αρτηριακή πίεση, ο παλμός, η θερμοκρασία και άλλες ζωτικές ενδείξεις. Τα δεδομένα που συλλέγονται μεταφέρονται τοπικά με τη χρήση όπως για παράδειγμα το Bluetooth, το Wi-Fi και το ZigBee εξασφαλίζοντας έτσι την αξιόπιστη και ενεργειακά αποδοτική επικοινωνία μεταξύ των συσκευών του ασθενούς.

Για την αποστολή των δεδομένων προς τους απομακρυσμένους κόμβους, μπορούν να χρησιμοποιηθούν τεχνολογίες όπως το GSM, 3G, 4G, 5G, LoRaWAN και δορυφορικές επικοινωνίες ανάλογα με την υποδομή που υπάρχει στην περιοχή. Η αποτελεσματική ενσωμάτωση αυτών των τεχνολογιών επιτρέπει την ταχεία ανταπόκριση των ιατρικών ειδικών, ενώ ταυτόχρονα μειώνει τα λειτουργικά κόστη και εξασφαλίζει την εμπιστευτικότητα των προσωπικών δεδομένων των ασθενών.

Τα οφέλη από την εφαρμογή της τηλεδιάγνωσης είναι πολλαπλά και πολύ σημαντικά. Μειώνονται οι καθυστερήσεις στη διάγνωση, εξαλείφεται ή μειώνεται δραστικά το κόστος μετακίνησης και επιτυγχάνεται η άμεση παρακολούθηση της υγείας του ασθενούς, γεγονός που συμβάλλει στη βελτιστοποίηση της ιατρικής φροντίδας και στη μείωση της επιβάρυνσης των νοσοκομείων ή των αγροτικών κλινικών.

Η εφαρμογή της σε απομακρυσμένες και περιοχές με περιορισμένη πρόσβαση στις παραδοσιακές υγειονομικές δομές επιτρέπει την εξάλειψη γεωγραφικών φραγμών, ενώ παράλληλα ενισχύει την ευκολία και την αποτελεσματικότητα των υπηρεσιών υγείας. Με την πάροδο του χρόνου και την συνεχιζόμενη έρευνα και τη σταδιακή ενσωμάτωση νέων τεχνολογιών, η τηλεδιάγνωση μπορεί να διαδραματίσει κεντρικό ρόλο στην εξέλιξη της ιατρικής περίθαλψης στις απομακρυσμένες περιοχές.

Στην εικόνα που ακολουθεί βλέπουμε το ολοκληρωμένο διάγραμμα του συστήματος τηλεδιάγνωσης, που απεικονίζει με σαφήνεια την αλληλουχία των λειτουργικών βημάτων για την απομακρυσμένη ιατρική φροντίδα. Συγκεκριμένα, παρουσιάζεται η διαδικασία συλλογής ζωτικών παραμέτρων του ασθενούς μέσω του WBAN, όπου οι φορητοί αισθητήρες καταγράφουν κρίσιμες ενδείξεις όπως το ηλεκτροκαρδιογράφημα, η αρτηριακή πίεση, ο παλμός και η θερμοκρασία, και μεταδίδουν τα δεδομένα τοπικά μέσω πρωτοκόλλων όπως το Bluetooth και το Wi-Fi. Στη συνέχεια, τα δεδομένα προωθούνται σε απομακρυσμένες ιατρικές μονάδες μέσω του τηλεπικοινωνιακού δικτύου, εξασφαλίζοντας έτσι την ασφαλή και την έγκαιρη πρόσβαση των ιατρών στις κρίσιμες πληροφορίες για τον ασθενή. Η απεικόνιση συνθέτει μία δυναμική αλυσίδα επικοινωνίας και συνεργασίας ανάμεσα στον ασθενή και στον ιατρό του, η οποία είναι ζωτικής σημασίας για την σύγχρονη ιατρική και την βελτίωση των ιατρικών υπηρεσιών σε απομακρυσμένες περιοχές [123].



Εικόνα 23 Σύστημα τηλεδιάγνωσης [123]

3.4.2 Παρακολούθηση ασθενών με χρόνιες παθήσεις

Σε απομακρυσμένες περιοχές και σε περιοχές όπου οι πόροι είναι περιορισμένοι και η πρόσβαση σε εξειδικευμένες ιατρικές υπηρεσίες είναι δυσκολότερη, εμφανίζεται με σαφήνεια η ανάγκη για υιοθέτηση νέων τεχνολογιών και εφαρμογών με σκοπό την στήριξη του υγειονομικού συστήματος. Το σύστημα ιατρικής τηλεδιαχείρισης αποτελεί μια καινοτόμο λύση που συνδυάζει δύο βασικές τεχνολογίες: τον τηλεέλεγχο και την τηλεσυμβουλευτική. Μέσα από αυτήν την ολοκληρωμένη ιατρική υπηρεσία, οι ασθενείς, ξεκινώντας από τη στιγμή που αποχωρούν από το νοσοκομείο, παρακολουθούνται συνεχώς με τη χρήση έξυπνων συσκευών και αισθητήρων, που καταγράφουν ζωτικές παραμέτρους όπως ο καρδιακός ρυθμός και η αρτηριακή πίεση ή οτιδήποτε άλλο κρίνεται απαραίτητο από τον θεράποντα ιατρό, αποτελώντας έτσι ένα κρίσιμο εργαλείο για την έγκαιρη ανίχνευση οποιασδήποτε απόκλισης από τα φυσιολογικά όρια τους[124].

Η κυριότερη αξία του συστήματος βασίζεται στο γεγονός ότι αντιμετωπίζει με αποτελεσματικότητα τα ιδιαίτερα προβλήματα που παρουσιάζονται σε περιβάλλοντα με περιορισμένους πόρους. Σε πολλές απομακρυσμένες ή αγροτικές περιοχές, όπου η διαθεσιμότητα ιατρών και ιατρικού προσωπικού είναι ελάχιστη, οι ασθενείς δεν έχουν την ευκαιρία για συχνές φυσικές επισκέψεις στα ιατρικά κέντρα, καθιστώντας έτσι αναγκαία την δημιουργία ενός αξιόπιστου μηχανισμού παρακολούθησης και υποστήριξης. Με την αυτόματη καταγραφή και μετάδοση των ζωτικών δεδομένων σε κεντρικές βάσεις, το σύστημα μπορεί να ενεργοποιήσει προληπτικές μέτρα και να προειδοποιήσει τους επαγγελματίες υγείας εγκαίρως, προλαμβάνοντας έτσι επιπλοκές που θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε σοβαρές καταστάσεις έκτακτης ανάγκης για τους ασθενείς.

Επιπρόσθετα, η υιοθέτηση ενός τέτοιου συστήματος συμβάλλει σημαντικά στη μείωση του κόστους και του χρόνου που απαιτούνται για τη διαχείριση χρόνιων παθήσεων. Οι ασθενείς δεν χρειάζεται πλέον να μετακινούνται συστηματικά ώστε να υποβληθούν σε ιατρικές εξετάσεις, ενώ ταυτόχρονα δίνεται η δυνατότητα για άμεση και διαδραστική επικοινωνία με τους θεράποντες ιατρούς, μέσω της τηλεδιάσκεψης. Αυτό το πλεονέκτημα όχι μόνο αποσυμφορίζει τα νοσοκομεία, τα οποία συχνά λειτουργούν με

υπερβολικό φόρτο εργασίας, αλλά επίσης ενισχύει τη συνεργασία μεταξύ ιατρών, καταργώντας τα γεωγραφικά και χρονικά εμπόδια που υπάρχουν.

Σε ένα ευρύτερο πλαίσιο, το σύστημα αυτό καταδεικνύει τη δυνατότητα της τεχνολογίας να αναδιαμορφώσει τις παραδοσιακές μεθόδους παροχής υγειονομικής περίθαλψης. Επιδιώκει, με έναν ολοκληρωμένο τρόπο, να ενσωματώσει τις σύγχρονες τεχνολογίες πληροφορικής και τηλεπικοινωνιών σε ένα εργαλείο που λειτουργεί όχι μόνο στην απομακρυσμένη παρακολούθηση των ασθενών, αλλά και στην άμεση συμβουλευτική υποστήριξη από ειδικούς που βρίσκονται σε πόλεις ή κέντρα υγείας σε ανθρώπους όπου η φυσική τους παρουσία καθίσταται δύσκολη για λόγους όπως είναι η απόσταση ή αναμονή στα ιατρικά κέντρα και πρακτικές δυσκολίες όπως έλλειψη μέσου μεταφοράς ή δυσκολία μεταφοράς λόγω προβλημάτων υγείας. Με αυτόν τον τρόπο, διαμορφώνει μια νέα μορφή ιατρικής φροντίδας, όπου η ποιότητα και η ταχύτητα ανταπόκρισης καθίστανται προσβάσιμες ανεξαρτήτως γεωγραφικών περιορισμών.

Η ενσωμάτωση και των δύο υπηρεσιών δηλαδή της συνεχούς παρακολούθησης και της διαδραστικής επικοινωνίας, αυτό έχει ως αποτέλεσμα μια ολιστική αντιμετώπιση των χρόνιων νοσημάτων, προβάλλοντας την τηλ-διαχείριση ως απαραίτητο εργαλείο για την πρόληψη και την έγκαιρη αντιμετώπιση επιπλοκών. Όταν οι ασθενείς παρακολουθούνται σε πραγματικό χρόνο με βάση αυτόματα συλλεχθέντα δεδομένα, κάθε απρόβλεπτη μεταβολή μπορεί να ανιχνευθεί άμεσα, επιτρέποντας στον ιατρό την έγκαιρη παρέμβαση. Έτσι, το σύστημα συμβάλλει στη σωστή διαχείριση των χρόνιων παθήσεων.

Η τεχνολογία που υποστηρίζει το σύστημα ιατρικής τηλε-διαχείρισης αποτελεί τον κρίσιμο ακρογωνιαίο λίθο για την απρόσκοπτη μετάδοση των δεδομένων και την άμεση παροχή υπηρεσιών υγειονομικής περίθαλψης. Η τηλεπικοινωνιακή του υποδομή έχει σχεδιαστεί ώστε να γεφυρώνει το χάσμα μεταξύ της απομακρυσμένης παρακολούθησης που απαιτείται για τη διαχείριση των χρόνιων παθήσεων και της άμεσης συμβουλευτικής υποστήριξης από τις ιατρικές μονάδες, ακόμα και σε περιοχές με περιορισμένους πόρους.

Το σύστημα λειτουργεί βάσει μιας πολυεπίπεδης αρχιτεκτονική η οποία μπορεί να διαχωριστεί σε επίπεδα λειτουργίας με σκοπό την καλύτερη προσέγγιση.

Πρώτο Επίπεδο το οποίο περιλαμβάνει τους βιοϊατρικούς αισθητήρες που τοποθετούνται στο σώμα του ασθενούς (όπως συσκευές μέτρησης καρδιακού ρυθμού και πίεσης αίματος κ.λ.π) συλλέγουν συνεχώς κρίσιμες πληροφορίες για τα ζωτικά σημεία. Αυτά τα δεδομένα μεταδίδονται με αξιοπιστία μέσω τεχνολογίας Bluetooth, σύμφωνα με το πρότυπο IEEE 802.15.1, εξασφαλίζοντας έτσι μια σταθερή και ασφαλή μετάδοση των πρώτων ενδείξεων της υγείας του ασθενούς.

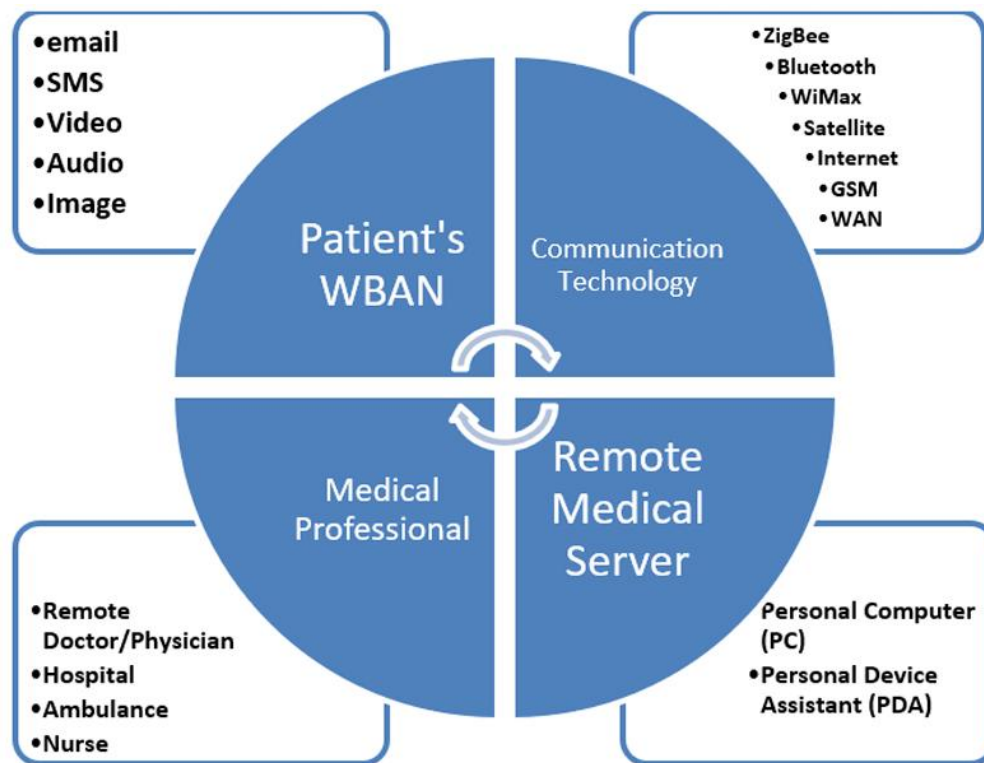
Ένα δεύτερο επίπεδο όπου περιλαμβάνει τις φορητές συσκευές που λειτουργούν ως πύλες επικοινωνίας, για παράδειγμα, το smartphone ή άλλες φορητές συσκευές λειτουργούν ως το τοπικό κέντρο συλλογής και προεπεξεργασίας των δεδομένων που συλλέγονται από τους αισθητήρες. Σε αυτό το στάδιο, οι πληροφορίες προετοιμάζονται για αποστολή προς την κεντρική πλατφόρμα. Χρησιμοποιώντας τα πρωτόκολλα GSM/GPRS, το σύστημα διασφαλίζει ότι τα δεδομένα μεταφέρονται σε πραγματικό χρόνο μέσω δικτύων κινητής τηλεφωνίας, ακόμη και σε περιβάλλοντα όπου η συνδεσιμότητα μπορεί να είναι περιορισμένη. Αυτή η σύνδεση επιτρέπει την άμεση ανταπόκριση σε κρίσιμες καταστάσεις, όπως όταν οι μετρήσεις παρουσιάζουν μεταβολές από τα προκαθορισμένα όρια που έχει θέσει ο θεράπων ιατρός.

Ένα τρίτο επίπεδο όπου γίνεται η κεντρική διαχείριση και η ανάλυση των δεδομένων που συλλέγονται μέσω του τηλεπικοινωνιακού δικτύου μεταφέρονται σε έναν κεντρικό διακομιστή όπου πραγματοποιείται η βαθύτερη ανάλυση και αποθήκευση των πληροφοριών. Εδώ, εφαρμόζονται μηχανισμοί επεξερ-

γασίας για τον καθορισμό της ακρίβειας των τιμών και την άμεση ενεργοποίηση ειδοποιήσεων σε περίπτωση που εντοπιστούν ανωμαλίες στα ζωτικά στοιχεία. Οι πληροφορίες αυτές υποβάλλονται σε αυστηρά πρωτόκολλα ασφαλείας, όπως η χρήση κρυπτογράφησης, για να διασφαλίζεται η εμπιστευτικότητα και η ακεραιότητα των δεδομένων.

Το σύστημα διαθέτει έναν ολοκληρωμένο μηχανισμό για την υλοποίηση του τηλεϊατρικού μέρους της εφαρμογής, ο οποίος βασίζεται στην τεχνολογία Web Real-Time Communication (WebRTC). Αυτή η τεχνολογία επιτρέπει την πραγματοποίηση αμφίδρομων συνεδριών, όπου οι ασθενείς και οι ιατροί μπορούν να επικοινωνούν άμεσα μέσω εικόνας, ήχου και κειμένου. Αυτό το εργαλείο καθιστά τη διαδικασία της τηλεδιαβούλευσης ιδιαίτερα διαδραστική.

Η αξιοπιστία και η διαθεσιμότητα του τηλεπικοινωνιακού συστήματος ενισχύονται με την εφαρμογή μεθόδων διαχείρισης σφαλμάτων και βελτιστοποιημένη παρακολούθηση των συνδέσεων. Έτσι, ακόμη και σε περιπτώσεις προβλημάτων στο δίκτυο ή αυξημένου φόρτου, το σύστημα είναι σε θέση να παράσχει μια ομαλή και αδιάλειπτη υπηρεσία, μειώνοντας στο ελάχιστο τους χρόνους διακοπής και εξασφαλίζοντας μια συνεχή ροή δεδομένων [124].



Εικόνα 24 Συστατικά ενός τηλεϊατρικού συστήματος [123]

3.4.3 Απομακρυσμένη παρακολούθηση ασθενών με καρκίνο

Η τηλεογκολογία μπορεί να προσφέρει μια πρωτοποριακή προσέγγιση στην ογκολογική φροντίδα που βασίζεται στην αξιοποίηση των σύγχρονων τεχνολογιών τηλεπικοινωνίας για τη μετάδοση και ανάλυση ιατρικών δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, επιτρέποντας την εξ αποστάσεως παροχή εξειδικευμένων υπηρεσιών σε ασθενείς που ζουν σε απομακρυσμένες ή υποεξυπηρετούμενες περιοχές. Η τηλεογκολογία αποτελεί ένα παρακλάδι της τηλεϊατρικής, όπου εξειδικευμένοι ογκολόγοι, ακτινολόγοι, παθολόγοι και άλλοι ειδικοί συνεργάζονται με τοπικούς γιατρούς μέσω διαδικτυακών πλατφορμών, υλοποιώντας

διαδικασίες όπως η τηλεδιάγνωση, η τηλεσυμβουλευτική και η τηλεπαθολογία. Η ανταλλαγή ψηφιοποιημένων εικόνων, ηχητικών αρχείων και άλλων κρίσιμων πληροφοριών σε πραγματικό χρόνο επιτρέπει την ακρίβεια στη διάγνωση και τον σχεδιασμό στοχευμένων θεραπευτικών πλάνων, γεφυρώνοντας το υγειονομικό χάσμα ανάμεσα στις περιοχές όπου συγκεντρώνονται οι εξειδικευμένοι επαγγελματίες ιατροί και εκείνες που έχουν μειωμένη πρόσβαση σε αυτούς.

Η χρησιμότητα της τηλεογκολογίας έγκειται στις πολυάριθμες προκλήσεις που αντιμετωπίζουν οι ασθενείς με καρκίνο, ιδίως όταν αυτά τα άτομα διαμένουν σε απομακρυσμένες περιοχές όπου η συγκέντρωση εξειδικευμένων κέντρων υγείας είναι περιορισμένη. Η δυνατότητα για απομακρυσμένη διάγνωση και θεραπεία δεν συμβάλλει μόνο στη μείωση του χρόνου που απαιτείται για την έναρξη της θεραπείας, αλλά και στην εξασφάλιση ποιοτικότερων υπηρεσιών, μειώνοντας τους κινδύνους επιπλοκών και τα ποσοστά θνησιμότητας που παρατηρούνται συχνά λόγω καθυστερήσεων και ανεπαρκούς παρακολούθησης. Επιπλέον, μέσω της τηλεϊατρικής, διευκολύνεται η ανταλλαγή γνώσεων μεταξύ των τοπικών ιατρών και των κεντρικών εξειδικευμένων ομάδων, συμβάλλοντας στην επαγγελματική ανάπτυξη και στην υλοποίηση βέλτιστων πρακτικών που βελτιώνουν τη συνολική ποιότητα της περίθαλψης [123].

Η υλοποίηση της τηλεογκολογίας στηρίζεται σε ένα ολοκληρωμένο σύστημα υποδομών που περιλαμβάνει τον σύγχρονο ιατρικό εξοπλισμό και τις τεχνολογίες πληροφορικής. Καταρχάς, απαιτείται η χρήση συσκευών, όπως υπολογιστές και ψηφιακές κάμερες υψηλής ανάλυσης, σε συνδυασμό με ιατρικές συσκευές για τη σωστή λήψη των απεικονιστικών δεδομένων, όπως ηλεκτρονικά στηθοσκόπια, ακτινογραφικές και μαγνητικές τομογραφίες. Η ύπαρξη μιας αξιόπιστης και υψηλής ταχύτητας σύνδεσης στο διαδίκτυο εξασφαλίζει την άμεση μεταφορά των ψηφιοποιημένων δεδομένων, ενώ τα ασφαλή πρωτόκολλα μετάδοσης εγγυώνται την εμπιστευτικότητα και την ακεραιότητα των ευαίσθητων ιατρικών πληροφοριών. Μέσω τηλεδιασκέψεων, οι τοπικοί γιατροί συντονίζονται με εξ αποστάσεως ειδικούς ιατρούς, οι οποίοι μέσω της ανάλυσης των δεδομένων και των εικόνων καταφέρνουν να διαμορφώσουν ένα ειδικό θεραπευτικό πλάνο για τον ασθενή. Παράλληλα, η δυνατότητα για συνεχή απομακρυσμένη παρακολούθηση εξασφαλίζει την έγκαιρη αναγνώριση τυχόν επιπλοκών μετά την εφαρμογή της θεραπευτικής προσέγγισης, επιτρέποντας την άμεση παρέμβαση και την προσαρμογή του σχεδίου θεραπείας βάσει των εξελισσόμενων κλινικών αναγκών.

Ταυτόχρονα, η τηλεογκολογία έχει κερδίσει ιδιαίτερη σημασία στο πλαίσιο των πρόσφατων κοινωνικών και ιατρικών προκλήσεων, όπως αυτές που επιτάχυναν την ανάγκη για εναλλακτικές μεθόδους παροχής υγειονομικής φροντίδας κατά την πανδημία COVID-19. Σε συνθήκες όπου οι παραδοσιακές φυσικές επαφές με τους ασθενείς είχαν τον κίνδυνο μετάδοσης του ιού, η απομακρυσμένη παροχή της ογκολογικής φροντίδας μέσω τηλεπροσεγγίσεων απέδειξε την αποτελεσματικότητά της στην προστασία των ευπαθών ασθενών, ενώ παράλληλα διατήρησε την επικράτηση της θεραπευτικής διαδικασίας χωρίς διακοπές. Επιπλέον, η ευελιξία του συστήματος τηλεογκολογίας επιτρέπει την ευρεία δυναμική ενσωμάτωση άλλων σχετικών εφαρμογών, όπως η τηλεπαθολογία για την απομακρυσμένη αξιολόγηση βιοψιών, και η διευκόλυνση της συμμετοχής των ασθενών σε κλινικές δοκιμές, επιταχύνοντας έτσι την ανάπτυξη νέων θεραπευτικών προγραμμάτων.

Η τηλεογκολογία αποτελεί ένα πλήρως ολοκληρωμένο μοντέλο που ανταποκρίνεται στις σύγχρονες ανάγκες του συστήματος υγείας, υποστηρίζοντας την παροχή υψηλής ποιότητας φροντίδας σε περιοχές που μέχρι πρότινος βίωναν αισθητές ανισότητες στην πρόσβαση σε εξειδικευμένες υπηρεσίες. Η αξιοποίηση τηλεπικοινωνιακών τεχνολογιών, σε συνδυασμό με τη συνεχή εκπαίδευση των τοπικών ιατρών και την υλοποίηση ασφαλών και αξιόπιστων υποδομών, διαμορφώνει ένα αποτελεσματικό εργαλείο για

την αντιμετώπιση των προκλήσεων που σχετίζονται με την ογκολογική φροντίδα. Έτσι, η τηλεογκολογία όχι μόνο συμβάλλει στη μείωση του χρόνου διάγνωσης και θεραπείας, αλλά και ενισχύει τη συνεργασία μεταξύ των διαφόρων επαγγελματιών υγείας, προάγοντας τη συνολική αποτελεσματικότητα του ιατρικού συστήματος και βάζοντας τα θεμέλια για ένα πιο συμπεριληπτικό και προσβάσιμο μέλλον για όλους τους ασθενείς [125].

3.4.4 Απομακρυσμένη παρακολούθηση της προγεννητικής φροντίδας

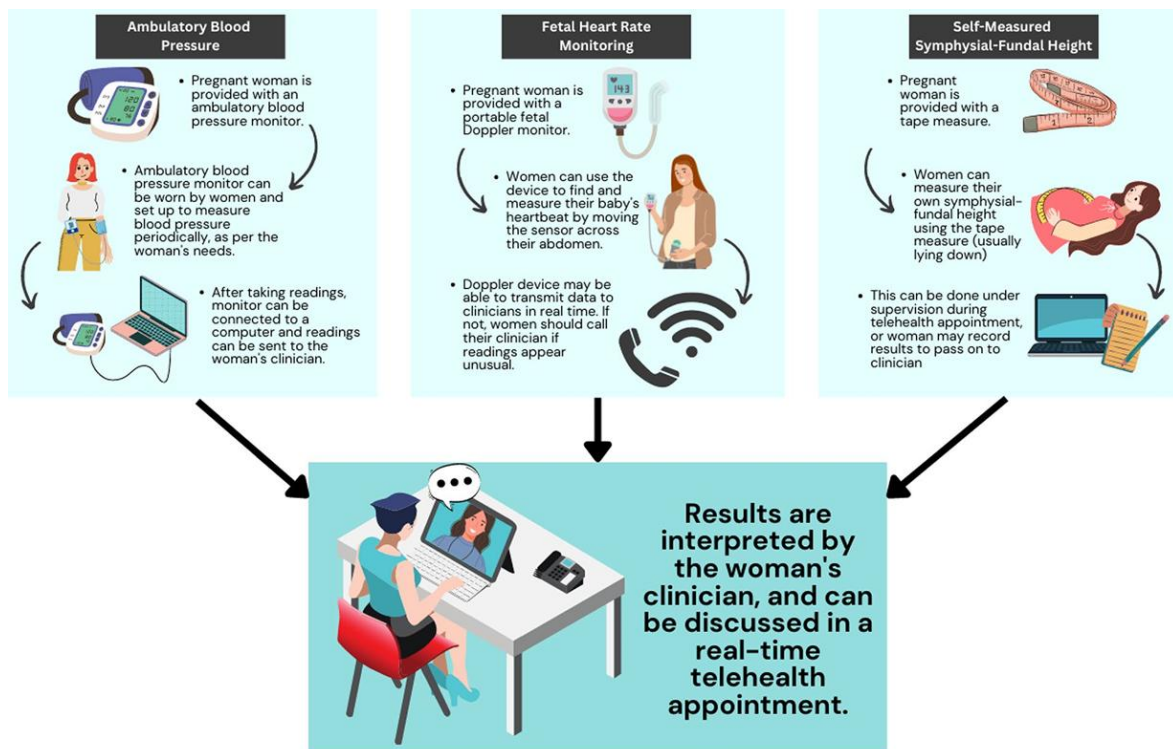
Το χάσμα που δημιουργείται ανάμεσα στις απομακρυσμένες περιοχές και τα αστικά κέντρα εκτείνεται σε πολλούς τομείς όμως χάρη στην τεχνολογία μπορεί να μειωθεί αισθητά. Στον τομέα της υγείας η εγκυμοσύνη είναι πολύ διαφορετική για μια γυναίκα που ζει σε ένα αστικό κέντρο και σε μια η οποία ζει στην επαρχία. Όσο πιο απομονωμένη είναι μια περιοχή και πιο δύσβατη τόσο μεγαλώνει και το χάσμα. Σε απομακρυσμένες περιοχές και σε υποανάπτυκτες χώρες ο κίνδυνος για την υγεία τις γυναίκας που κυοφορεί και για το μωρό της είναι πολύ μεγαλύτερος, καθότι η εξειδικευμένη ιατρική φροντίδα είναι περιορισμένη έως και ανύπαρκτη. Οι παραδοσιακές διαδικασίες παρακολούθησης της εγκυμοσύνης και της μεταγεννητικής φροντίδας είναι αντιμετώπιες με σοβαρά εμπόδια, ιδιαίτερα σε αυτές τις περιοχές. Σε περιβάλλοντα, όπου οι φυσικές υποδομές είναι ανεπαρκείς και οι γεωγραφικές, οικονομικές και κοινωνικές δυσκολίες παρεμποδίζουν την πρόσβαση στα υγειονομικά κέντρα, οι γυναίκες που βρίσκονται σε κατάσταση εγκυμοσύνης συχνά δεν έχουν την ευκαιρία να λάβουν την αναγκαία φροντίδα και ενημέρωση. Η έλλειψη μεταφορικών μέσων, η περιορισμένη ενημέρωση για την προγεννητική και μεταγεννητική φροντίδα, αλλά και οι κοινωνικοί παράγοντες, όπως ο έλεγχος της πρόσβασης σε τεχνολογία από μέλη της οικογένειας, καθιστούν επιτακτική την αναζήτηση και εφαρμογή νέων προσεγγίσεων ώστε να εξασφαλιστεί η ασφαλής φροντίδα της μητέρας και του νεογνού.

Σε αυτό το πλαίσιο, η χρήση της τηλεϊατρικής μέσω τηλεδιάσκεψης και άλλων ψηφιακών μέσων έχει αναδειχθεί ως ένα πρωτοποριακό εργαλείο, το οποίο έχει τη δυνατότητα να γεφυρώσει το χάσμα μεταξύ των αστικών κέντρων και των απομακρυσμένων περιοχών με περιορισμένους πόρους. Οι τηλεδιασκέψεις επιτρέπουν την άμεση επικοινωνία μεταξύ των υγειονομικών επαγγελματιών και των εγκύων, προσφέροντάς τους τη δυνατότητα όχι μόνο να παρακολουθούν την πορεία της εγκυμοσύνης, αλλά και να παρέχουν συμβουλές, να κάνουν έγκαιρες διαγνώσεις και να προβαίνουν σε έγκαιρες παραπομπές σε εξειδικευμένες υπηρεσίες, ακόμα και όταν η φυσική επαφή δεν είναι εφικτή. Παράλληλα, οι ψηφιακές πλατφόρμες συμβάλλουν στη βελτίωση της οργάνωσης των ραντεβού, στην καταγραφή των αναγκών και στην τήρηση ενός συστηματικού αρχείου που διευκολύνει την παρακολούθηση των ενηλίκων.

Ωστόσο, η μετάβαση σε αυτό το μοντέλο έρχεται αντιμετώπιη με αρκετές προκλήσεις. Η ανεπάρκεια των τηλεπικοινωνιακών υποδομών σε πολλούς απομακρυσμένους τόπους, η ασταθής σύνδεση και η έλλειψη προσωπικών συσκευών, ιδιαίτερα στις γυναίκες, ενισχύουν το χάσμα στην ποιότητα της παρεχόμενης φροντίδας. Επιπλέον, η εξαιρετικά γρήγορη μετάβαση σε τέτοιες τεχνολογικές λύσεις απαιτεί την άμεση και συστηματική εκπαίδευση των ασθενών και των ιατρών, ώστε να εξοικειωθούν με τα νέα εργαλεία και τις ψηφιακές πλατφόρμες, ενώ παράλληλα είναι απαραίτητη η δημιουργία κατάλληλων πρωτοκόλλων και οδηγιών που να προσαρμόζονται στις τοπικές συνθήκες. Η σωστή εφαρμογή και η βιωσιμότητα αυτών των λύσεων εξαρτώνται καθοριστικά από τη συνεχή υποστήριξη, την ενημέρωση και την επένδυση σε υποδομές που θα διασφαλίζουν την αξιοπιστία και την προσβασιμότητα των υπηρεσιών.

Η τηλεδιάσκεψη, δεν αποτελεί απλώς μια προσωρινή λύση στις επιπτώσεις μιας πανδημίας ή για να καλύψει τα κενά που υπάρχουν στο υγειονομικό προσωπικό, αλλά ανοίγει τον δρόμο για μια βαθύτερη αναμόρφωση του συστήματος υγειονομικής περίθαλψης. Με την ενσωμάτωση ψηφιακών τεχνολογιών,

οι υγειονομικές υπηρεσίες μπορούν να προσφέρουν μια πιο ευέλικτη, προσβάσιμη και αποτελεσματική φροντίδα, ιδίως σε γυναίκες που ζουν σε περιοχές με μειωμένη πρόσβαση σε παραδοσιακές δομές υγείας. Η εφαρμογή αυτής της τεχνολογικής προσέγγισης ενισχύει τόσο τη διαρκή επικοινωνία όσο και την άμεση ανταλλαγή γνώσεων μεταξύ ειδικών, προωθώντας τη συνεργασία μεταξύ κρατικών φορέων, διεθνών οργανισμών και των τοπικών κοινοτήτων. Μέσα από αυτήν την προσέγγιση, μπορεί να δημιουργηθεί ένα δίκτυο υποστήριξης που θα βελτιώσει την ποιότητα των υπηρεσιών υγείας, θα μειώσει τις επιπλοκές και θα προωθήσει την καλή υγεία των μητέρων και των νεογνών, ανεξάρτητα από τους γεωγραφικούς και κοινωνικούς περιορισμούς που υπάρχουν [126], [127].



Εικόνα 25 Απομακρυσμένη παρακολούθηση της προγεννητικής φροντίδας [128]

Η εικόνα απεικονίζει αναλυτικά τις κύριες τεχνολογικές λύσεις που χρησιμοποιούνται για την απομακρυσμένη παρακολούθηση της προγεννητικής φροντίδας. Συγκεκριμένα, η εικόνα δείχνει πώς οι έγκυες μπορούν να μετρήσουν στο σπίτι τους κρίσιμες παραμέτρους υγείας, όπως η αρτηριακή πίεση και ο καρδιακός ρυθμός του εμβρύου, χρησιμοποιώντας οικιακές συσκευές όπως για παράδειγμα αυτόματους μετρητές αρτηριακής πίεσης και φορητό σύστημα Doppler. Επιπλέον, περιλαμβάνει την αυτομέτρηση του μήκους της μήτρας μέσω ειδικών εργαλείων μέτρησης, ως έναν τρόπο αξιολόγησης της ανάπτυξης του εμβρύου. Το διάγραμμα υπογραμμίζει επίσης τη ροή των δεδομένων από τις οικιακές συσκευές προς τους επαγγελματίες υγείας, επιτρέποντας την άμεση και συνεχή παρακολούθηση των ζωτικών δεικτών χωρίς την ανάγκη φυσικής παρουσίας.

Επιπρόσθετα, η εικόνα δείχνει πώς η ενσωμάτωση των ψηφιακών τεχνολογιών δημιουργεί ένα υβριδικό μοντέλο φροντίδας, όπου τα δεδομένα που συλλέγονται στο σπίτι μεταφέρονται σε κέντρα υγείας για την έγκαιρη αξιολόγηση και παρέμβαση σε περίπτωση που προκύψουν επιπλοκές. Μέσω αυτής της διαδικασίας, οι επαγγελματίες υγείας μπορούν να λαμβάνουν αποφάσεις θεμελιωμένες σε ακριβείς, σημαντικού τύπου μετρήσεις, βελτιώνοντας τη διαχείριση της εγκυμοσύνης και μειώνοντας τους κινδύνους που σχετίζονται με τις περιορισμένες υποδομές υγειονομικής περίθαλψης σε απομακρυσμένες περιοχές [128].

3.4.5 Τηλεκαρδιολογία

Η καρδιαγγειακή νόσος αποτελεί μία από τις κύριες αιτίες θνησιμότητας παγκοσμίως. Η έγκαιρη διάγνωση και η συνεχής παρακολούθηση είναι καθοριστικές για τη μακροπρόθεσμη διαχείριση των ασθενών. Σε απομακρυσμένες ή αγροτικές περιοχές, όπου η πρόσβαση σε εξειδικευμένους καρδιολόγους ή προηγμένο ιατρικό εξοπλισμό είναι περιορισμένη, η τηλεκαρδιολογία προσφέρει μια βιώσιμη και μακροπρόθεσμη λύση. Συγκεκριμένα, η τηλεκαρδιολογία αποτελεί μια πολύπλευρη και καινοτόμο προσέγγιση στη διαχείριση των καρδιαγγειακών νοσημάτων, συνδυάζοντας τις σύγχρονες δυνατότητες της τηλεϊατρικής με τις εξελιγμένες τεχνολογίες τηλεπικοινωνιών. Μέσω της τηλεπαρακολούθησης, τηλεδιαβούλευσης και την μετάδοση ηλεκτροκαρδιογραφημάτων, οι ιατροί μπορούν να λαμβάνουν κρίσιμα ιατρικά δεδομένα σε πραγματικό χρόνο, εξασφαλίζοντας έγκαιρη διάγνωση και άμεση θεραπευτική παρέμβαση. Η χρήση οικιακών συσκευών που παρακολουθούν παραμέτρους όπως η αρτηριακή πίεση και ο καρδιακός ρυθμός, επιτρέπει στους ασθενείς που ζουν σε απομακρυσμένα περιοχές να λαμβάνουν την απαραίτητη φροντίδα χωρίς τα συνηθισμένα προβλήματα που αφορούν την μετακίνηση και την παραμονή τους σε κέντρα υγείας.

Η ένταξη της καρδιολογίας έχει αποδειχθεί ιδιαίτερα αποτελεσματική στην προαγωγή των κλινικών αποτελεσμάτων, καθώς με τη συνεχή τηλεπαρακολούθηση επιτυγχάνεται έγκαιρη ανίχνευση επιδεινώσεων, γεγονός που οδηγεί στη μείωση του χρόνου διάγνωσης, στην πρόληψη επεισοδίων και στη μείωση του ποσοστού νοσηρότητας και θνησιμότητας. Παράλληλα, οι τηλεκαρδιολογικές υπηρεσίες έχουν αποδειχθεί ότι συμβάλλουν σημαντικά στη μείωση των συνολικών εξόδων φροντίδας, μειώνοντας τα έξοδα μετακίνησης και επιτρέποντας στους οργανισμούς υγείας να κατανέμουν πιο αποδοτικά, τους πόρους τους. Η αυξημένη ικανοποίηση των ασθενών και η βελτίωση της ποιότητας ζωής τους, που προκύπτουν όταν λαμβάνουν συνεχώς υποστηρικτική και εξειδικευμένη φροντίδα, αποδεικνύουν την πρακτική αξία της τηλεκαρδιολογίας στην καθημερινή ιατρική πρακτική σε απομακρυσμένες περιοχές.

Ένας από τους βασικούς πυλώνες της επιτυχίας αυτής της προσέγγισης είναι οι εξελιγμένες τεχνολογίες τηλεπικοινωνιών. Η αξιόπιστη μετάδοση των δεδομένων, μεταξύ των οποίων τα ηλεκτροκαρδιογραφήματα, επιτυγχάνεται χάρη στα δίκτυα υψηλής ταχύτητας όπως τα LTE, 3G, 4G και το 5G, που διασφαλίζουν την άμεση και ασφαλή ροή πληροφοριών, από τις οικιακές συσκευές προς κεντρικούς διακομιστές και την επεξεργασία των πληροφοριών τους ιατρούς. Αυτές οι τεχνολογικές εξελίξεις δεν αποτελούν μόνο το θεμέλιο για την απομακρυσμένη παρακολούθηση, αλλά και βελτιώνουν σημαντικά την ασφάλεια και την προστασία των μεταδιδόμενων δεδομένων, γεγονός που είναι κρίσιμο για τη διατήρηση του απορρήτου και της εμπιστευτικότητας των ιατρικών πληροφοριών των ασθενών.

Επιπρόσθετα, ο συνδυασμός τηλεκαρδιολογικών εφαρμογών με τις σύγχρονες τηλεπικοινωνιακές υποδομές επιτρέπει την άμεση ανταλλαγή γνώσεων και εμπειριών μεταξύ των ειδικών. Μέσω τηλεδιασκέψεων και ψηφιακών πλατφορμών, οι καρδιολόγοι μπορούν να συνεργάζονται αποτελεσματικά, να ανταλλάσσουν κρίσιμα δεδομένα και να προσαρμόζουν τις θεραπευτικές στρατηγικές βάσει της πραγματικής κατάστασης κάθε ασθενούς. Αυτή η διαδραστική επικοινωνία συμβάλλει όχι μόνο στη βελτίωση της ποιότητας της φροντίδας, αλλά και στην επαγγελματική ανάπτυξη των παρόχων υγειονομικής περίθαλψης, διασφαλίζοντας ότι οι ασθενείς λαμβάνουν την πιο ενημερωμένη και εξειδικευμένη υποστήριξη. Η τηλεκαρδιολογία στην πράξη είναι αντιμέτωπη με σημαντικά εμπόδια όπως η έλλειψη τηλεπικοινωνιακών δομών. Αυτό καθιστά αναγκαία την βελτίωση των υποδομών που υπάρχουν σε απομακρυσμένες περιοχές ή σε περιοχές όπου δεν υπάρχουν καθόλου τηλεπικοινωνιακές υποδομές, λύσεις όπως για παράδειγμα είναι τα δορυφορικά δίκτυα VSAT είναι απαραίτητες για την ορθή λειτουργία και υποστήριξη του συστήματος [129], [130].

3.4.6 Τηλενευροψυχολογική αξιολόγηση

Η νευροψυχολογία αποτελεί έναν κλάδο της επιστήμης που διερευνά τις σχέσεις μεταξύ της εγκεφαλικής λειτουργίας και των γνωστικών, συμπεριφορικών και συναισθηματικών εκδηλώσεων. Μέσω εξειδικευμένων δοκιμασιών και κλινικών συνεντεύξεων, αποσκοπεί στον εντοπισμό και την αξιολόγηση νευροεκφυλιστικών διαταραχών, όπως η νόσος του Alzheimer και άλλες μορφές γνωστικής συμπεριφοράς. Το σημαντικό είναι πως μπορεί να ενταχθεί μια ιατρική υπηρεσία που επιτρέπει την έγκαιρη διάγνωση και την ακριβή παρακολούθηση της εξέλιξης των νοητικών διαταραχών, δημιουργώντας έτσι τις βάσεις για στοχευμένες θεραπευτικές παρεμβάσεις και προληπτικές δράσεις. Η γνώση του τρόπου λειτουργίας του ανθρώπινου εγκεφάλου μας βοηθά να κατανοήσουμε βαθύτερα τους μηχανισμούς που διέπουν τόσο τις υγιείς όσο και τις παθολογικές καταστάσεις, και να επενδύσουμε σε λύσεις που βελτιώνουν την ποιότητα ζωής των ασθενών.

Η πρόσφατη ανάγκη για εξ αποστάσεως αξιολόγηση έχει επιταχυνθεί από καταστάσεις όπως η πανδημία COVID-19, που επιβάλλει περιορισμούς στην άμεση πρόσβαση σε ιατρικές υπηρεσίες, ιδιαίτερα σε περιοχές όπου είναι απομακρυσμένες. Σε αυτές τις γεωγραφικά και κοινωνικοοικονομικά περιοχές, οι δυνατότητες για φυσική επαφή με εξειδικευμένο ιατρικό προσωπικό είναι συχνά ανεπαρκείς, γεγονός που οδηγεί σε καθυστερήσεις στη διάγνωση και τη θεραπεία. Η νευροψυχολογική αξιολόγηση μέσω εξ αποστάσεως μεθόδων εισάγει, επομένως, έναν πολυδιάστατο και καινοτόμο τρόπο αντιμετώπισης αυτών των προκλήσεων [131].

Σε αυτό το πλαίσιο υλοποιούνται τηλεπικοινωνιακές πλατφόρμες, οι οποίες έχουν σχεδιαστεί ειδικά για τη διεξαγωγή νευροψυχολογικών δοκιμασιών σε απομακρυσμένες τοποθεσίες. Με τη χρήση προσαρμοσμένων εφαρμογών, οι ασθενείς μπορούν να συνδεθούν μέσω διαδικτύου με εξειδικευμένους ιατρούς που βρίσκονται σε άλλες τοποθεσίες. Η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει τη διενέργεια γνωστικών τεστ, εργασίες αξιολόγησης της γλωσσικής ικανότητας και δοκιμασίες που αξιολογούν τις εκτελεστικές λειτουργίες, με απομακρυσμένη μέθοδο. Οι ψηφιοποιημένες εκδόσεις αυτών των διαδικασιών έχουν προσαρμοστεί ώστε να διατηρούν την εγκυρότητα της αξιολόγησης, παρά το γεγονός ότι εμφανίζουν ορισμένες διαφορές σε σχέση με την κλασική μέθοδο. Έτσι, ενώ για ορισμένες δοκιμασίες διαπιστώνονται μικρές αποκλίσεις λόγω περιβαλλοντικών παραγόντων όπως για παράδειγμα η διαφοροποιημένη επικοινωνία μέσω οθόνης συγκριτικά με την παρουσία του ασθενή στο ιατρείο, η συνολική αξιοπιστία διατηρείται σε επαρκές επίπεδο για την καλή διάγνωση των κοινωνικών και γνωστικών διαταραχών.

Αυτό που καθιστά τις τηλεπικοινωνιακές εφαρμογές τόσο ανεκτίμητες είναι το γεγονός ότι παρέχουν πρόσβαση σε εξειδικευμένες υπηρεσίες σε εκείνους που διαφορετικά θα αντιμετώπιζαν σημαντικούς περιορισμούς, είτε λόγω γεωγραφικού απομονωτισμού είτε λόγω έλλειψης τοπικών πόρων. Όταν οι δυνατότητες για φυσική επίσκεψη στα τοπικά κέντρα υγείας ή νοσοκομεία είναι περιορισμένες, η απομακρυσμένη αξιολόγηση επιτρέπει πλέον σε ηλικιωμένους και άλλους ευπαθείς πληθυσμούς να λάβουν έγκαιρη διάγνωση, συμβάλλοντας στην καλύτερη διαχείριση των συμπτωμάτων και στην εφαρμογή θεραπευτικών παρεμβάσεων χωρίς καθυστερήσεις. Επιπλέον, η χρήση βιντεοσυνεδριών διευκολύνει την παρακολούθηση της συμπεριφοράς και την αξιολόγηση των εκτελεστικών λειτουργιών, ενώ ταυτόχρονα διασφαλίζει την προστασία των προσωπικών δεδομένων μέσω ασφαλών διαύλων επικοινωνίας. Για την τηλεπικοινωνιακή κάλυψη προτείνεται η πρόσβαση σε δίκτυο 4G. Πρόσβαση στο δίκτυο 4G μπορεί να υπάρξει μέσω ειδικού εξοπλισμού σε ειδικά διαμορφωμένα οχήματα όπου ο ασθενής θα μπορεί από εκεί να συνδέεται με τον θεράπων ιατρό του ή ο ασθενής θα μπορεί να συνδεθεί με τον θεράπων ιατρό του μέσω του φυλλομετρητή του εφόσον έχει την απαραίτητη τηλεπικοινωνιακή δομή στην περιοχή του [132].

Για παράδειγμα, σε περιοχές με χαμηλή κάλυψη ιατρικών υπηρεσιών, η δυνατότητα να διεξάγεται μια νευροψυχολογική αξιολόγηση από το ιδιωτικό περιβάλλον του ασθενούς ή από εξειδικευμένες τοπικές μονάδες όπου έχει εγκατασταθεί ο κατάλληλος εξοπλισμός, αποτελεί ένα σημαντικό βήμα για την επίτευξη ισότητας στην υγειονομική περίθαλψη. Η εφαρμογή των ψηφιοποιημένων, απομακρυσμένων διαγνωστικών ελέγχων έχει ήδη ευρέως διαπιστωθεί ως μια αξιόπιστη εναλλακτική μέθοδος, που επιτρέπει την αναγνώριση και την ανάδειξη γνωστικών δυσλειτουργιών, βελτιώνοντας τη συνολική ποιότητα ζωής των ασθενών και μειώνοντας το βάρος στη φροντίδα που επιβαρύνει τόσο τα άτομα όσο και τους φροντιστές τους.

Ενώ παραμένουν ορισμένες προκλήσεις όπως τα τεχνικά ζητήματα και η ανάγκη διατήρησης μιας “ανθρώπινης επαφής” σε συνάφεια με την κλινική εμπειρία, οι λύσεις που προσφέρει η τηλενευροψυχολογία αποτελούν μια αναγκαία προσαρμογή στις μεταβαλλόμενες συνθήκες. Με την επίμονη βελτίωση των ψηφιοποιημένων εργαλείων και την επέκταση των τηλεπικοινωνιακών δομών, το μέλλον της απομακρυσμένης διάγνωσης ανοίγει νέους ορίζοντες στην κλινική μελέτη και την έγκυρη πρόληψη. Στην σημερινή εποχή η ανάγκη για ισότητα στην πρόσβαση στις υπηρεσίες υγείας είναι καίρια ανάγκη, η χρήση τηλεπικοινωνιακών τεχνολογιών στην νευροψυχολογία παρέχει τα εφόδια για την αντιμετώπιση των προκλήσεων που τίθενται στις απομακρυσμένες περιοχές, καθιστώντας την αξιολόγηση και τη φροντίδα πιο εύκολα προσβάσιμη, αποτελεσματική και ανθρώπινη.

Στις απομακρυσμένες περιοχές η υπηρεσία της νευροψυχολογίας είναι ένα πολύ σημαντικό βήμα με σκοπό να προσφερθεί ένα καλύτερο βιοτικό επίπεδο μέσω της έγκαιρης πρόγνωσης και της θεραπείας. Στο ίδιο πλαίσιο μπορεί να κινηθεί και η υπηρεσία της ψυχολογικής υποστήριξης σε αυτούς που την έχουν ανάγκη. Στα μεγάλα αστικά κέντρα και στις ανεπτυγμένες χώρες στον 21 αιώνα έχει αυξηθεί κατά πολύ η ζήτηση για ιατρούς ψυχολόγους. Στις απομακρυσμένες περιοχές και σε υποανάπτυκτες περιοχές η υπηρεσία της ψυχοθεραπείας είναι εξαιρετικά σπάνια, είτε λόγω ότι δεν υπάρχουν ιατροί είτε λόγω κοινωνικών στερεότυπων. Ενώ χάρη στην απομακρυσμένη σύνδεση με τον θεράπων ιατρό είναι ευκολότερη η πρόσβαση σε όσους το έχουν ανάγκη και επιπλέον προσφέρεται μεγαλύτερη διακριτικότητα και ιδιωτικότητα ξεπερνώντας έτσι και τα κοινωνικά στερεότυπα καθότι δεν θα χρειάζεται ο ασθενής να πάει σε ένα συγκεκριμένο σημείο αλλά θα μπορεί από το σπίτι του μέσω τηλεδιαβούλευσης να έχει επαφή με τον θεράπων ιατρό του [131], [133].

3.5 Οφέλη της τηλεϊατρικής

Η τηλεϊατρική αποτελεί μια σύγχρονη και ολοκληρωμένη προσέγγιση για την παροχή υγειονομικών υπηρεσιών, ιδιαίτερα κρίσιμη και χρήσιμη για τις απομακρυσμένες περιοχές όπου συνήθως οι πόροι είναι περιορισμένοι. Τα πλεονεκτήματα για την εφαρμογή αυτής της υπηρεσίας σε αγροτικές ή απομακρυσμένα περιβάλλοντα, όπου οι ανάγκες για πρόσβαση σε εξειδικευμένη ιατρική φροντίδα, η αποτελεσματική διαχείριση των πόρων και η μείωση των ανισοτήτων στην υγειονομική περίθαλψη αποτελούν προτεραιότητες. Στο πλαίσιο αυτό ακολουθεί η ανάλυση των κυριότερων πλεονεκτημάτων της τηλεϊατρικής στο πεδίο της παροχής υπηρεσιών υγείας σε αυτές τις περιοχές.

- **Βελτίωση της πρόσβασης σε εξειδικευμένες υπηρεσίες:** Ένα από τα κρίσιμα πλεονεκτήματα της τηλεϊατρικής είναι η ενίσχυση της πρόσβασης των κατοίκων σε εξειδικευμένες ιατρικές υπηρεσίες. Συχνά, λόγω γεωγραφικής απομόνωσης και ελλιπούς υποδομής, οι ασθενείς αναγκάζονται να διανύουν μεγάλες αποστάσεις για να λάβουν την απαιτούμενη φροντίδα. Μέσω της τηλεϊατρικής, υφίσταται η δυνατότητα άμεσης επικοινωνίας με ειδικούς που βρίσκονται σε μεγάλες αστικές κέντρα, επιτρέποντας την έγκαιρη διάγνωση και αντιμετώπιση διαφόρων παθολογικών καταστάσεων. Η συγκεκριμένη δυνατότητα συμβάλλει αποφασιστικά

στη βελτίωση της ποιότητας ζωής των κατοίκων, μειώνοντας τα εμπόδια που συνήθως προκύπτουν από τις μακρινές αποστάσεις έτσι συνολικά επιτυγχάνεται μείωση του κοινωνικού χάσματος ανάμεσα στις απομακρυσμένες περιοχές και στα αστικά κέντρα και αύξηση του βιοτικού επιπέδου.

- **Οικονομία χρόνου και κόστους:** Η μείωση του χρόνου και του κόστους μετακίνησης αποτελεί ακόμη ένα σημαντικό όφελος της τηλεϊατρικής. Στις απομακρυσμένες περιοχές, όπου τα μέσα μεταφοράς συχνά παρουσιάζουν δυσλειτουργίες ή είναι ανεπαρκείς, η τηλεδιάσκεψη και οι άλλες μορφές τηλεϊατρικής επιτρέπουν στους ασθενείς να αποφύγουν τις μακρινές και δαπανηρές μετακινήσεις προς κεντρικές υγειονομικές μονάδες που βρίσκονται στα αστικά κέντρα. Από την πλευρά του συστήματος υγείας, η μείωση των φυσικών επισκέψεων μειώνει το φόρτο εργασίας και συμβάλλει στην ορθότερη κατανομή των πόρων, καθιστώντας τη φροντίδα πιο αποτελεσματική και οικονομικά βιώσιμη για όλους ανοίγοντας έτσι τον δρόμο για ίση πρόσβαση στις υγειονομικές υποδομές και ταυτόχρονα αυξάνει την αποτελεσματικότητά τους.
- **Συνεχής παρακολούθηση και ενίσχυση της φροντίδας:** Η τηλεϊατρική επιτρέπει την τακτική παρακολούθηση των ασθενών, καθώς και την άμεση παροχή ιατρικών συμβουλών μέσω ψηφιακών πλατφορμών. Η δυνατότητα διεξαγωγής συστημικών τηλεδιαβουλεύσεων ενισχύει την επικοινωνία μεταξύ του ασθενούς και του θεράπων ιατρού, συμβάλλοντας στη διαχείριση χρόνιων παθήσεων και στην γρήγορη αντιμετώπιση επειγόντων περιστατικών. Επιπλέον, η συνεχής αξιολόγηση της κατάστασης του ασθενούς επιτρέπει την πρόληψη επιδεινώσεων και την ταχύτερη αντιμετώπιση ενδεχόμενων επιπλοκών, προσδίδοντας μια πιο ολοκληρωμένη διάσταση στη φροντίδα του ασθενούς.
- **Ενίσχυση των τοπικών υπηρεσιών υγείας:** Ένα ακόμη πλεονέκτημα είναι η ενίσχυση του τοπικού προσωπικού υγείας. Οι επαγγελματίες που δραστηριοποιούνται σε απομακρυσμένες περιοχές, οι οποίοι ενδεχομένως να αντιμετωπίζουν προκλήσεις λόγω ανεπαρκών πόρων και εξειδίκευσης, μπορούν να λάβουν άμεση υποστήριξη από ειδικούς μέσω τηλεϊατρικών συστημάτων. Η ανταλλαγή γνώσεων και η εκπαίδευση που επιτυγχάνεται με αυτόν τον τρόπο βελτιώνει όχι μόνο τις πρακτικές που αφορούν διαγνωστικούς και θεραπευτικούς χειρισμούς, αλλά και τη συνολική ικανότητα του τοπικού συστήματος υγείας να ανταποκρίνεται στις ανάγκες της εκάστοτε κοινότητας.
- **Μείωση των ανισοτήτων στην υγειονομική περίθαλψη:** Η υιοθέτηση της τηλεϊατρικής έχει επίσης σημαντικές κοινωνικές και υγειονομικές επιπτώσεις, καθώς συμβάλλει στη μείωση των υγειονομικών ανισοτήτων που παρατηρούνται μεταξύ των αστικών και των απομακρυσμένων περιοχών. Εν μέσω των προβλημάτων που οφείλονται στη γεωγραφική απομόνωση, η τηλεϊατρική δίνει τη δυνατότητα στα υποεξυπηρετούμενα πληθυσμιακά στρώματα να έχουν πρόσβαση σε ποιοτικές υπηρεσίες υγείας, εξασφαλίζοντας έτσι μια πιο δίκαιη κατανομή των πόρων και την ενίσχυση της κοινωνικής συνοχής. Επιπλέον μπορεί να εξασφαλιστεί η μακροχρόνια παρακολούθηση ατόμων με κινητικά προβλήματα υγείας ή ατόμων που είναι δύσκολο να μετακινούνται σε συνέχρη βάση, εξασφαλίζοντας έτσι την μικρότερη δυνατή ταλαιπωρία για τα άτομα αυτά ενώ ταυτόχρονα βελτιώνεται η παρακολούθησή τους, που συνεπάγεται και με καλύτερα αποτελέσματα για την υγείά τους.

Συνοψίζοντας, η εφαρμογή της τηλεϊατρικής στις απομακρυσμένες περιοχές παρουσιάζει πολυάριθμα πλεονεκτήματα, που κυμαίνονται από τη βελτιωμένη πρόσβαση σε εξειδικευμένες υπηρεσίες, μέσω της εξοικονόμησης χρόνου και πόρων, μέχρι και την ενίσχυση του τοπικού συστήματος υγείας. Τα οφέλη

αυτά καθιστούν την τηλεϊατρική μια αναγκαία λύση για την αντιμετώπιση των προκλήσεων που χαρακτηρίζουν τις απομακρυσμένες και γεωγραφικά δυσπρόσιτες περιοχές. Παράλληλα, επισημαίνεται ότι η επιτυχία της εφαρμογής της τηλεϊατρικής εξαρτάται άμεσα από την ύπαρξη κατάλληλων τεχνικών τεχνολογικών υποδομών και την εξειδικευμένη κατάρτιση του προσωπικού όπως επίσης είναι ζωτικής σημασίας η συνεχή επέκταση των τηλεπικοινωνιακών δομών με σκοπό την μεγαλύτερη κάλυψη του πληθυσμού που βρίσκεται εκτός των αστικών κεντρών αλλά και την αύξηση της αποτελεσματικότητας του συστήματος της τηλεϊατρικής.

Κεφάλαιο 4ο: Ψηφιακή Εκπαίδευση

4.1 Εισαγωγή

Η ψηφιακή εκπαίδευση είναι το βασικό βήμα για την μείωση του ψηφιακού χάσματος. Σε απομακρυσμένες ή αγροτικές περιοχές το μαθησιακό επίπεδο είναι αρκετά πιο χαμηλό σε σύγκριση με τα μεγαλύτερα αστικά κέντρα. Σε αυτές τις περιοχές υπάρχει μεγάλος ψηφιακός αναγραμματισμός. Ο ψηφιακός γραμματισμός είναι η γνώση και η κατανόηση του ατόμου στο να χειριστεί σωστά υπολογιστή, tablet και κινητά τηλέφωνα και γενικότερα η επαφή του με την τεχνολογία με σκοπό να βελτιώσει την ζωή του και να αυξήσει την αλληλεπίδραση του με την κοινωνία. Η ψηφιακή εκπαίδευση έχει ως βασικά στοιχεία, τον εκσυγχρονισμό, την αμεσότητα και την αύξηση των μαθητών. Ο εκσυγχρονισμός αφορά κάθε ψηφιακή πτυχή που εντάσσεται στο εκπαιδευτικό σύστημα, όπως η δυνατότητα πρόσβασης των σχολείων στο διαδίκτυο, η βελτίωση του προγράμματος σπουδών με βάση την σύγχρονη εποχή, η δυνατότητα πρόσβασης των μαθητών σε σεμινάρια, η πρόσβαση σε σχολικές εκπαιδευτικές δραστηριότητες απομακρυσμένα και η εκπαίδευση στην χρήση της τεχνολογίας. Αμεσότητα ως προς την άμεση πρόσβαση σε εκπαιδευτικές βιβλιοθήκες, σεμινάρια και ενημέρωση. Αύξηση των μαθητών χτίζοντας υβριδικά προγράμματα διδασκαλίας δίνοντας την δυνατότητα στους μαθητές να έχουν απομακρυσμένη πρόσβαση την ώρα του μαθήματος ή παρακολουθώντας το μάθημα όπου έχει καταγραφεί σε δεύτερο χρόνο. Επίσης έτσι δίνεται η ευκαιρία και σε μαθητές οι οποίοι λόγω γεωγραφικής απόστασης δεν είναι εύκολο να έχουν φυσική παρουσία στο σχολείο τους. Επιπλέον οι σχολικές μονάδες οι οποίες έχουν ελλείψεις σε προσωπικό καθηγητών, δίνεται η δυνατότητα να καλυφθούν από άλλες σχολικές μονάδες μέσω διαδικτύου.

Ένας παράγοντας που παίζει σημαντικό ρόλο στην χρήση του διαδικτύου είναι η εκπαίδευση καθότι σε αγροτικές περιοχές ή σε υποανάπτυκτες χώρες υπάρχει μεγάλος τεχνολογικός αναλφαριθμητισμός. Με σκοπό την διεύρυνση του διαδικτύου σε αυτές τις περιοχές προκύπτει ότι υπάρχει μια ισχυρή σχέση ανάμεσα στο διαδίκτυο στην εκπαίδευση και στο εισόδημα δηλαδή εκτός από τις υποδομές που θα προσφέρουν την πρόσβαση στο δίκτυο, θα πρέπει αντίστοιχα να υπάρχουν ευνοϊκό ρυθμιστικό πλαίσιο από το πάροχο έτσι ώστε να μπορεί να γίνει ευκολότερα χρήση των υπηρεσιών που προσφέρει και η κατάλληλη εκπαίδευση που θα επιτρέψει τους χρήστες να χρησιμοποιήσουν το διαδίκτυο.

Οι τεχνολογικές εξελίξεις στον τομέα των τηλεπικοινωνιών έχουν μεταμορφώσει κάθε πτυχή της κοινωνικής ζωής, ιδίως της εκπαίδευσης. Η παγκόσμια τάση με την μετεγκατάσταση του πληθυσμού από τις αγροτικές σε αστικές περιοχές έχει διογκώσει τις δυσκολίες στην πρόσβαση σε ποιοτικές υπηρεσίες, με αποτέλεσμα οι απομακρυσμένες και αγροτικές περιοχές να υφίστανται σημαντικές προκλήσεις σε όλους τους τομείς ανάπτυξης. Σε αυτό το πλαίσιο, η παροχή ευρυζωνικών λύσεων και η εκμετάλλευση των δυνατοτήτων της ψηφιακής τεχνολογίας καθίστανται κρίσιμα εργαλεία για τη γεφύρωση του ψηφιακού χάσματος και την ενίσχυση του εκπαιδευτικού συστήματος. Η διείσδυση των τεχνολογιών πληροφορικής και επικοινωνιών στην εκπαίδευση δημιουργεί ένα δυναμικό περιβάλλον όπου η γνώση μεταδίδεται πιο εύκολα και αποτελεσματικά, προσφέροντας νέες ευκαιρίες μάθησης ανεξαρτήτως γεωγραφικής θέσης.

Η εφαρμογή λύσεων που βασίζονται σε δεδομένα μέσω ευρυζωνικής πρόσβασης σε αγροτικές και απομακρυσμένες περιοχές έχει ήδη δείξει ότι οι νέες τεχνολογίες μπορούν να συμβάλουν καθοριστικά στην αναβάθμιση των εκπαιδευτικών υποδομών. Η αξιοποίηση πλατφορμών ηλεκτρονικής μάθησης, η απομακρυσμένη πρόσβαση σε εκπαιδευτικό υλικό και η δημιουργία διαδραστικών εκπαιδευτικών συστημάτων συμβάλουν στην ενίσχυση της ποιότητας της εκπαίδευσης τόσο σε αστικές όσο και σε

περιοχές με χαμηλή πυκνότητα πληθυσμού. Μέσω της υλοποίησης προγραμμάτων τηλεεκπαίδευσης, οι μαθητές και οι εκπαιδευτικοί σε μέρη με περιορισμένη πρόσβαση με εκπαιδευτικές εγκαταστάσεις μπορούν πλέον να ανταλλάξουν γνώσεις και εμπειρίες, αποκτώντας πρόσβαση σε σύγχρονες εκπαιδευτικές μεθόδους και περιεχόμενο υψηλής ποιότητας.

Τα οφέλη από την ενσωμάτωση των ευρυζωνικών υποδομών στην εκπαίδευση είναι πολλαπλά. Αρχικά, επιταχύνεται ο ρυθμός διάδοσης της πληροφορίας και της τεχνογνωσίας, καθώς οι μαθησιακές διαδικασίες δεν περιορίζονται πλέον από το φυσικό περιβάλλον ή τις γεωγραφικές αποστάσεις. Έπειτα, δημιουργούνται νέες μορφές μάθησης που κάνουν χρήση διαδραστικών εργαλείων και ψηφιακών περιβαλλόντων, καθιστώντας την εκπαίδευση πιο προσιτή και ελκυστική για τους νέους. Και τέλος, η ευρυζωνική πρόσβαση ενισχύει την κοινωνική συνοχή και μειώνει τις ανισότητες, επιτρέποντας την εξίσωση των ευκαιριών μεταξύ των μαθητών που ζουν σε αστικές και αγροτικές περιοχές. Αυτή η διαδικασία έχει καθοριστικό ρόλο στην ενίσχυση της τοπικής ανάπτυξης, διότι η επένδυση στη γνώση και στην εκπαίδευση αποτελεί τη βάση για την καινοτομία και την οικονομική πρόοδο [134].

Η ενσωμάτωση των ψηφιακών μέσων στην εκπαίδευση επιφέρει σημαντικές προκλήσεις, που πρέπει να αντιμετωπιστούν με στοχευμένες πολιτικές και στρατηγικές δράσεις. Οι προκλήσεις αυτές περιλαμβάνουν την ανεπάρκεια υποδομών περιορισμένους πόρους χρηματοδότησης, καθώς και τις διαφορές στο επίπεδο ψηφιακού γραμματισμού. Η δημιουργία ενός ολοκληρωμένου και συνεκτικού σχεδίου δράσης, που συνδυάζει την κρατική στήριξη, τις πρωτοβουλίες του ιδιωτικού τομέα και την ενεργή συμμετοχή των τοπικών κοινοτήτων, κρίνονται απαραίτητες για την επίτευξη ενός βιώσιμου μοντέλου ψηφιακής εκπαίδευσης. Η μελέτη περιπτώσεων διεθνών οργανισμών, όπως ο Οργανισμός Τηλεπικοινωνιών (International Telecommunication Union - ITU) και οι πολυάριθμες πρωτοβουλίες για έξυπνα συστήματα εκπαίδευσης, αναδεικνύουν ότι η εστίαση στην ευρυζωνική πρόσβαση αποτελεί κρίσιμη συνιστώσα για την επιτυχή ανάπτυξη του τομέα της εκπαίδευσης σε αγροτικές και απομακρυσμένες περιοχές.

Ειδικότερα, οι εμπειρίες από διάφορες χώρες έχουν δείξει ότι η εφαρμογή χορηγούμενων και επιδοτούμενων προγραμμάτων τηλε-εκπαίδευσης μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικές μεταρρυθμίσεις την ποιότητα και το εύρος της πρόσβασης στην εκπαίδευση. Μέσω της αξιοποίησης σύγχρονων τεχνολογικών λύσεων, οι περιοχές που μέχρι πρότινος θεωρούνταν απομονωμένες, έχουν δυνατότητα να υιοθετήσουν προηγμένες μεθόδους διδασκαλίας και μάθησης. Η ανάλυση περιπτώσεων όπως η εφαρμογή ευρυζωνικής πρόσβασης ή άλλων τεχνολογιών σύνδεσης στο διαδίκτυο για τα σχολεία, οι τεχνολογικές επενδύσεις και η διεύρυνση των εκπαιδευτικών πόρων, αποτελούν ισχυρά εργαλεία για την ενίσχυση της κοινωνικής ενσωμάτωσης και τη βελτίωση των ποιοτικών μαθησιακών αποτελεσμάτων.

Η ενσωμάτωση των ψηφιακών τεχνολογιών στην εκπαίδευση αντιπροσωπεύει ένα κρίσιμο βήμα για την αναβάθμιση της ποιότητας ζωής και την αντιμετώπιση των κοινωνικών ανισοτήτων. Με την επένδυση σε τηλεπικοινωνιακές υποδομές, τα εκπαιδευτικά ιδρύματα μπορούν να ανταπεξέλθουν στις σύγχρονες απαιτήσεις της αγοράς εργασίας, προάγοντας την καινοτομία, την ψηφιακή γραμματισμό και τελικά την ανάπτυξη των τοπικών κοινοτήτων [135], [136].

4.2 Προκλήσεις στην ψηφιακή εκπαίδευση

4.2.1 Εισαγωγή

Η ψηφιακή εκπαίδευση και οι τηλεπικοινωνίες σε απομακρυσμένα σχολεία είναι κρίσιμες για την ισότιμη πρόσβαση στη μάθηση, αλλά ταυτόχρονα αντιμετωπίζουν πολυεπίπεδες δυσκολίες. Η εξέλιξη

της ψηφιακής εκπαίδευσης είναι πολύ συμπαντική και σχετίζεται έμμεσα και με την εσωτερική μετανάστευση που υπάρχει από τα τις απομακρυσμένες περιοχές προς τα αστικά κέντρα με σκοπό την αναβάθμιση του μαθησιακού επιπέδου των μαθητών καθότι το επίπεδο εκπαίδευσης στις απομακρυσμένες περιοχές είναι χαμηλό συγκριτικά με τα αστικά κέντρα ή δεν υπάρχουν σχολικές υποδομές με επαρκές εκπαιδευτικό προσωπικό. Οι προκλήσεις αυτές κατανέμονται σε τρία επίπεδα : το μακρο, το μεσο, και το μικρο επίπεδο. Τα επίπεδα για τον διαχωρισμό των προκλήσεων βασίζονται σε ένα πλαίσιο που επιτρέπει την κατηγοριοποίηση των παραγόντων ανάλογα με το αν προκύπτουν από ευρύτερα κοινωνικά και πολιτικά περιβάλλοντα ή από το άμεσο σχολικό περιβάλλον [137], [138].

4.2.2 Μακροεπίπεδο

Αυτό το επίπεδο αφορά παράγοντες που βρίσκονται εκτός του άμεσου ελέγχου των σχολείων. Περιλαμβάνει ζητήματα όπως οι κυβερνητικές πολιτικές, η χρηματοδότηση, οι εθνικές και περιφερειακές υποδομές καθώς και άλλες ευρύτερες κοινωνικοοικονομικές συνθήκες που επηρεάζουν τη δυνατότητα των σχολείων να ενσωματώσουν την τεχνολογία.

- **Έλλειψη χρηματοδότησης και πόρων**

Οι κυβερνητικοί και μη κυβερνητικοί πόροι δεν επαρκούν για την αγορά υπολογιστικών συσκευών και για την ανάπτυξη της τεχνολογικής υποδομής, δημιουργώντας έναν σημαντικό εμπόδιο για την ψηφιακή μετάβαση.

- **Έλλειψη εξειδικευμένου διδακτικού προσωπικού**

Οι εκπαιδευτικοί που διορίζονται σε απομακρυσμένες περιοχές συχνά δεν διαθέτουν την απαραίτητη κατάρτιση για την ενσωμάτωση και την αξιοποίηση της τεχνολογίας στην καθημερινή διδασκαλία.

- **Ανεπαρκής ή ασταθής σύνδεση στο διαδίκτυο**

Πολλά σχολεία δεν έχουν πρόσβαση σε αξιόπιστη και γρήγορη σύνδεση, γεγονός που περιορίζει τη χρήση διαδικτυακών πλατφορμών και ψηφιακών εργαλείων και καθιστά αναγκαία την αναβάθμιση και την επέκταση των τηλεπικοινωνιακών υποδομών [137], [138].

- **Έλλειψη συνεργασίας μεταξύ σχολείων**

Η απουσία πολιτικών που ενθαρρύνουν τη συνεργασία μεταξύ των σχολικών μονάδων εμποδίζει την ανταλλαγή καλών πρακτικών και την αμοιβαία υποστήριξη στην τεχνολογική μετάβαση και την ανταλλαγή πληροφοριών.

- **Συχνές διακοπές ρεύματος**

Η απρόβλεπτη διακοπή ρεύματος, κοινή σε πολλές απομακρυσμένες περιοχές, δυσχεραίνει περαιτέρω τη συνεχή λειτουργία των ψηφιακών συστημάτων.

4.2.3 Μεσοεπίπεδο

Σε αυτό το επίπεδο, οι παράγοντες αφορούν το ίδιο το σχολείο ως οργανισμό. Περιλαμβάνει ζητήματα όπως η διοίκηση και η ηγεσία του σχολείου, η έλλειψη τεχνολογικών συσκευών ή της τεχνικής υποστήριξης, καθώς και οργανωτικές δομές και πολιτικές που εμπιστεύονται ή εμποδίζουν την εφαρμογή νέων τεχνολογιών στο σχολικό περιβάλλον.

- **Αδυναμία σχολικής διοίκησης και έλλειψη οράματος**

Οι διευθυντές και οι υπεύθυνοι της σχολικής μονάδας συχνά δεν διαθέτουν το απαιτούμενο όραμα για την υιοθέτηση ψηφιακών πρωτοβουλιών ή δεν έχουν τη σχετική γνώση, γεγονός που καθιστά δύσκολη την εφαρμογή ολοκληρωμένων πολιτικών στην τεχνολογία.

- **Έλλειψη τεχνολογικών συσκευών και πληροφοριακών υποδομών**

Σε πολλά σχολεία η έλλειψη υπολογιστών, εργαστηρίων και άλλων ψηφιακών συσκευών επιδεινώνει σημαντικά το πρόβλημα. Ακόμα και να ξεπεραστούν οι τηλεπικοινωνιακές προκλήσεις τα σχολεία χωρίς τον κατάλληλο εξοπλισμό δεν θα μπορούν να αξιοποιήσουν την ψηφιακή εκπαίδευση

- **Ανεπαρκής τεχνική και εκπαιδευτική υποστήριξη**

Η απουσία ειδικευμένου τεχνικού προσωπικού για την αντιμετώπιση προβλημάτων, την εγκατάσταση και τη συντήρηση του εξοπλισμού, καθώς και η έλλειψη προσωπικού που θα μπορούσε να υποστηρίξει τους εκπαιδευτικούς στη χρήση της τεχνολογίας, περιορίζουν την αποτελεσματικότητα της εφαρμογής [137], [139].

- **Περιορισμένος φυσικός χώρος για ψηφιακή διδασκαλία**

Τα υπάρχοντα σχολικά κτήρια δεν παρέχουν αρκετό χώρο για τη διεξαγωγή ομαδικών ή διαδικτυακών μαθημάτων, δημιουργώντας έναν επιπρόσθετο περιορισμό για τις ψηφιακές δραστηριότητες.

4.2.4 Μικροεπίπεδο

Αυτό το επίπεδο εστιάζει στην καθημερινή αλληλεπίδραση στην αίθουσα διδασκαλίας. Εδώ είναι τα ζητήματα που αφορούν άμεσα τους εκπαιδευτικούς και τους μαθητές, όπως η τεχνολογική παιδεία των διδασκόντων, η ικανότητα χρήσης των ψηφιακών εργαλείων, η αξιολόγηση της μαθησιακής διαδικασίας και οι προσωπικές στάσεις απέναντι στην ψηφιακή διδασκαλία.

- **Έλλειψη τεχνολογικής παιδείας των εκπαιδευτικών.**

Οι εκπαιδευτικοί συχνά δεν έχουν επαρκή γνώση για τη χρήση των ψηφιακών εργαλείων ούτε για την ενσωμάτωσή τους στο διδακτικό τους περιεχόμενο, με αποτέλεσμα να μειώνεται η ποιότητα της διδασκαλίας.

- **Περιορισμένη κατανόηση για τον τομέα της τεχνολογίας.**

Η έλλειψη ενημέρωσης για το πώς μπορούν οι ψηφιακές τεχνολογίες να τροποποιήσουν τη διδακτική διαδικασία καθιστά δύσκολη την αξιολόγηση και την ενσωμάτωση των νέων μεθόδων διδασκαλίας.

- **Έλλειψη προσωπικού εξοπλισμού για εκπαιδευτικούς και μαθητές.**

Εκτός από τον εξοπλισμό που παρέχει το σχολικό περιβάλλον, οι εκπαιδευτικοί και οι μαθητές συχνά δεν έχουν πρόσβαση σε δικά τους μέσα (π.χ. προσωπικούς υπολογιστές, tablets, smartphone) για να αξιοποιήσουν πλήρως τις ψηφιακές πλατφόρμες.

- **Υπερφόρτωση εργασίας και διπλή εξυπηρέτηση σε διαφορετικά σχολεία.**

Οι εκπαιδευτικοί που καλούνται να διαχειριστούν πολλαπλές τάξεις, ή ακόμη και διαφορετικά σχολεία, αντιμετωπίζουν αυξημένο εργασιακό φόρτο που εμποδίζει τη συνεχή επένδυση χρόνου στην εκμάθηση και εφαρμογή της τεχνολογίας.

- **Αρνητική στάση και προκαταλήψεις για την ψηφιακή διδασκαλία.**

Προκαταλήψεις και έλλειψη εμπιστοσύνης στις ψηφιακές πλατφόρμες επηρεάζουν τόσο τους εκπαιδευτικούς όσο και τους μαθητές, οδηγώντας σε περιορισμένη υιοθέτηση των νέων εργαλείων.

- **Προκλήσεις στην αξιολόγηση και παρακολούθηση των μαθησιακών επιτευγμάτων.**

Οι υπάρχουσες μέθοδοι αξιολόγησης μέσω ψηφιακών εργαλείων δεν ανταποκρίνονται επαρκώς στις ανάγκες των μαθητών, καθιστώντας δύσκολη την αντικειμενική παρακολούθηση της προόδου τους.

- **Έλλειψη τεχνικής υποστήριξης για μαθητές στο οικιακό περιβάλλον.**

Όταν οι μαθητές αντιμετωπίζουν τεχνικά προβλήματα κατά την εκπαιδευτική τους διαδικασία από το σπίτι, η απουσία άμεσης υποστήριξης επηρεάζει αρνητικά την εμπειρία τους [137], [140].

4.3 Αρχιτεκτονική

Η εκπαίδευση στις αγροτικές και ορεινές περιοχές υφίσταται διαχρονικά το πρόβλημα του ψηφιακού αποκλεισμού είτε λόγω γεωγραφικής απόστασης είτε λόγω απουσίας πρωτοβουλιών με σκοπό την εξέλιξη και την βελτίωση των υπηρεσιών που προσφέρονται. Η αδυναμία σύνδεσης σχολείων και των κοινοτικών χώρων με το διαδίκτυο στερεί από τους μαθητές τη δυνατότητα πρόσβασης σε σύγχρονο εκπαιδευτικό υλικό, διεθνείς εκπαιδευτικές πλατφόρμες και εξ αποστάσεως διδασκαλία. Στόχος είναι η πρόσβαση στο διαδίκτυο, με περιορισμένο αρχικό κόστος και χαμηλό λειτουργικό κόστος, αξιοποιώντας τις υπάρχουσες τεχνολογίες. Η ψηφιακή αναβάθμιση της εκπαίδευσης στις απομακρυσμένες και αγροτικές κοινότητες αποτελεί κρίσιμο βήμα για την ισότιμη πρόσβαση στη γνώση. Είναι σημαντική η χαμηλού κόστους σύνδεση από αστικές υποδομές προς σχολεία σε απομακρυσμένες περιοχές, η διάδοση του σήματος μέσα στους χώρους του σχολείου και η βιώσιμη ενεργειακή υποστήριξη και διαχείριση φάσματος, με σκοπό τη συνεχή κοινωνική συμμετοχή και εκπαίδευση της τοπικής κοινότητας [141].

Οι απομακρυσμένες σχολικές υποδομές μπορούν να αποκτήσουν αξιόπιστη πρόσβαση στο διαδίκτυο καθώς πλέον υπάρχουν πολλές διαθέσιμες επιλογές για να επιτευχθεί αυτό. Στο επίκεντρο βρίσκονται τρεις συμπληρωματικές λύσεις: η χρήση Wi-Fi για τοπική διανομή, η εκμετάλλευση των TVWS για τη μεσαία ζώνη (middle-mile) και, όπου υπάρχει η δυνατότητα, η ενσωμάτωση στοιχείων 5G C-RAN στο backhaul κομμάτι της επικοινωνίας.

Η κάθε σχολική εγκατάσταση η οποία συγκεντρώνονται τάξεις, εργαστήρια πληροφορικής και αίθουσες διδασκαλίας, αντιστοιχεί σε συγκεκριμένη απαιτούμενη ταχύτητα ανά μαθητή για παράδειγμα ένα σχολείο σε μια απομακρυσμένη περιοχή είναι σημαντικό να επιτευχθεί όσο τον δυνατόν καλύτερη ταχύτητα πρόσβασης ανά μαθητή διότι του εξασφαλίζει αύξηση της παραγωγικότητας καθώς θα μπορεί να γίνει χρήση περισσότερων εργαλείων μάθησης. Ένας μαθητής χρειάζεται μόλις 0,25 Mbit/s για να μπορεί να παρακολουθήσει ένα διαδικτυακό μάθημα ή να ολοκληρώσει μια εργασία ή να απαντήσει σε ένα τεστ πολλαπλών επιλογών αν αυξήσουμε την ταχύτητα του σε 1 Mbit/s θα μπορεί να συμμετάσχει σε μια τηλεδιάσκεψη ή να διεξάγει πλήρη ερευνά στο διαδίκτυο. Έπειτα όσο εμπλέκονται εφαρμογές που χρησιμοποιούν πολυμέσα όπως ήχος, εικόνες, βίντεο αυξάνονται και οι απαιτήσεις συγκεκριμένα για ροή μουσική χρειάζεται ταχύτητα 2 Mbit/s και για ροή βίντεο από 3 έως 25 Mbit/s, όπου στα 3 Mbit/s έχουμε στην πιο χαμηλή ποιότητα αναπαραγωγής και στα 25Mbit/s έχουμε υποστήριξη ποιότητας Ultra High Definition (UHD) [142]. Είναι σημαντική η ανάλυση του τοπογραφικού και

κοινωνικοοικονομικού προφίλ, η επαρκεί και αδιάκοπη ύπαρξη ηλεκτροδότησης, η πυκνότητα και η απόσταση μεταξύ των σχολείων, αν υπάρχουν φυσικά εμπόδια (πολύ μεγάλα και πυκνά δέντρα, κτίρια), καθώς και δυνατότητες τοπικής υποστήριξης και συντήρησης .

Στο στάδιο middle-mile της δικτυακής αρχιτεκτονικής, τα TVWS επιλέγονται λόγω της μεγάλης εμβέλειας και της ικανότητας διείσδυσης ακόμη και χωρίς άμεση οπτική επαφή. Σε κάθε βασικό σημείο, όπως ένα κεντρικό σχολείο ή ένας κοινοτικός κόμβος, εγκαθίσταται ένας σταθμός βάσης (UBS) για συχνότητες UHF. Αν ο σταθμός αυτός ενσωματώνει και μια μικροκυψέλη 5G στο πλαίσιο αρχιτεκτονικής C-RAN, μπορεί να παρέχει σταθερή σύνδεση με ταχύτητες 20 έως 50 Mbps, καλύπτοντας αποστάσεις 10 έως 15 χιλιόμετρα, χωρίς την ανάγκη για αδειοδότηση του φάσματος. Η χρήση της απλής μεθόδου Energy Detection για την ανίχνευση φάσματος εξασφαλίζει ότι η εκπομπή στα TVWS δεν θα παρεμβαίνει σε άλλους χρήστες που έχουν προτεραιότητα στο ίδιο φάσμα.

Η τελική ζώνη πρόσβασης των χρηστών, γνωστή και ως last-mile, βασίζεται σε ασύρματες συνδέσεις μέσω Wi-Fi. Το σήμα εκπέμπεται μέσα στις σχολικές αίθουσες, στον προαύλιο χώρο και στους χώρους των εργαστηρίων, παρέχοντας ικανοποιητική ταχύτητα σύνδεσης όταν υπάρχει άμεση οπτική επαφή (LOS). Ωστόσο, όταν η απόσταση ξεπερνά τα 200–300 μέτρα ή υπάρχουν εμπόδια όπως δέντρα ή κτίρια, η απόδοση των καναλιών 5 GHz μειώνεται σημαντικά. Αντίθετα, οι UHF συχνότητες διατηρούν πιο σταθερό σήμα σε τέτοιες συνθήκες. Με βάση αυτό, διαμορφώνονται δύο τύποι κόμβων:

- Τα exclusive access points (APs), που λειτουργούν ως απλοί δρομολογητές για συνδέσεις Wi-Fi και συνδέονται σε έναν δέκτη TVWS.
- Τα relay points, οι οποίοι διαθέτουν επιπλέον πομποδέκτη UHF και φωτοβολταϊκή μονάδα, προσφέροντας αυτονομία 24–48 ωρών.

Τα relay points επιτρέπουν τη δημιουργία πολυ-βηματικών (multi-hop) TVWS δικτύων, γεφυρώνοντας ομάδες κτιρίων που βρίσκονται εκτός άμεσης εμβέλειας του σταθμού βάσης UBS.

Το βασικό πλεονέκτημα της υβριδικής λύσης είναι ότι, σε κάθε διαδικασία δρομολόγησης, επιλέγεται δυναμικά το φάσμα (5 GHz ή UHF) που παρουσιάζει, βάσει πραγματικών μετρήσεων, τον πιο ευνοϊκό λόγο σήματος προς παρεμβολή (SINR). Με αυτόν τον τρόπο διασφαλίζεται χαμηλή καθυστέρηση και ο σταθερός ρυθμός μετάδοσης.

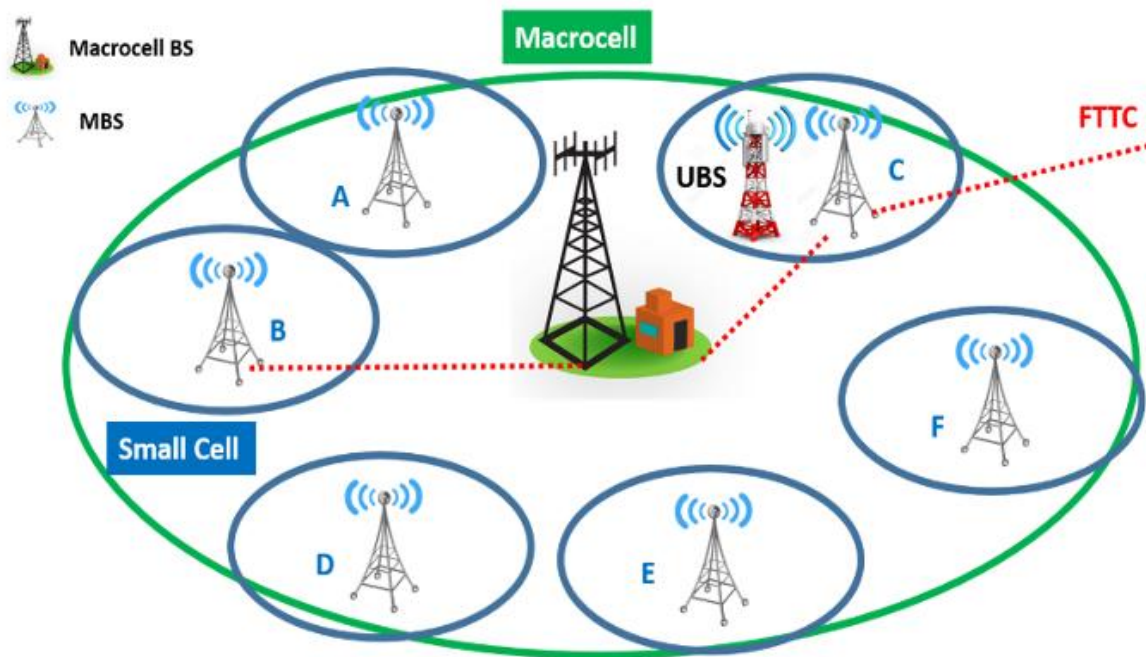
Στο Wi-Fi, έχουμε συχνότητα λειτουργίας στα 2,4 GHz ή 5 GHz και περιλαμβάνει μια σειρά από αριθμημένα κανάλια, καθένα από τα οποία καταλαμβάνει συγκεκριμένο εύρος συχνοτήτων. Στη ζώνη των 2,4 GHz, πολλά από τα διαθέσιμα κανάλια επικαλύπτονται μεταξύ τους, κάτι που μπορεί να προκαλέσει παρεμβολές. Για τον λόγο αυτό, προτιμάται η χρήση των καναλιών 1, 6 και 11, τα οποία είναι τα μόνα πλήρως μη αλληλοεπικαλυπτόμενα σε αυτή τη ζώνη. Στη ζώνη των 5 GHz, τα κανάλια είναι πιο απομονωμένα μεταξύ τους, με τα πιο διαδεδομένα κανάλια να είναι από το 36 έως 48, τα οποία λειτουργούν χωρίς περιορισμούς και χωρίς την ανάγκη ειδικού μηχανισμού αποφυγής παρεμβολών (DFS). Αντίθετα, στις συχνότητες των tv white spaces η επιλογή καναλιού δεν είναι προκαθορισμένη, αλλά γίνεται δυναμικά μέσω σύνδεσης με κεντρική βάση δεδομένων. Η βάση αυτή ενημερώνει τη συσκευή για τα διαθέσιμα “λευκά” κανάλια στη συγκεκριμένη περιοχή και χρονική στιγμή, ώστε να αποφεύγονται παρεμβολές με τηλεοπτικούς σταθμούς ή άλλους πρωτεύοντες χρήστες του φάσματος.

Σημαντικό μέρος της λύσης αφορά και την ενεργειακή διαχείριση, που ενσωματώνεται στον τηλεπικοινωνιακό σχεδιασμό και για τα συστήματα τροφοδοσίας. Κατά τις περιόδους μη λειτουργίας όπως για παράδειγμα είναι οι περίοδοι των διακοπών οι τα σαββατοκύριακα , τα σημεία πρόσβασης (AP) τίθενται σε κατάσταση χαμηλής κατανάλωσης (sleep mode). Σε περιοχές χωρίς σταθερή ηλεκτροδότηση, τα φωτοβολταϊκά πάνελ μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη φόρτιση μπαταριών σε

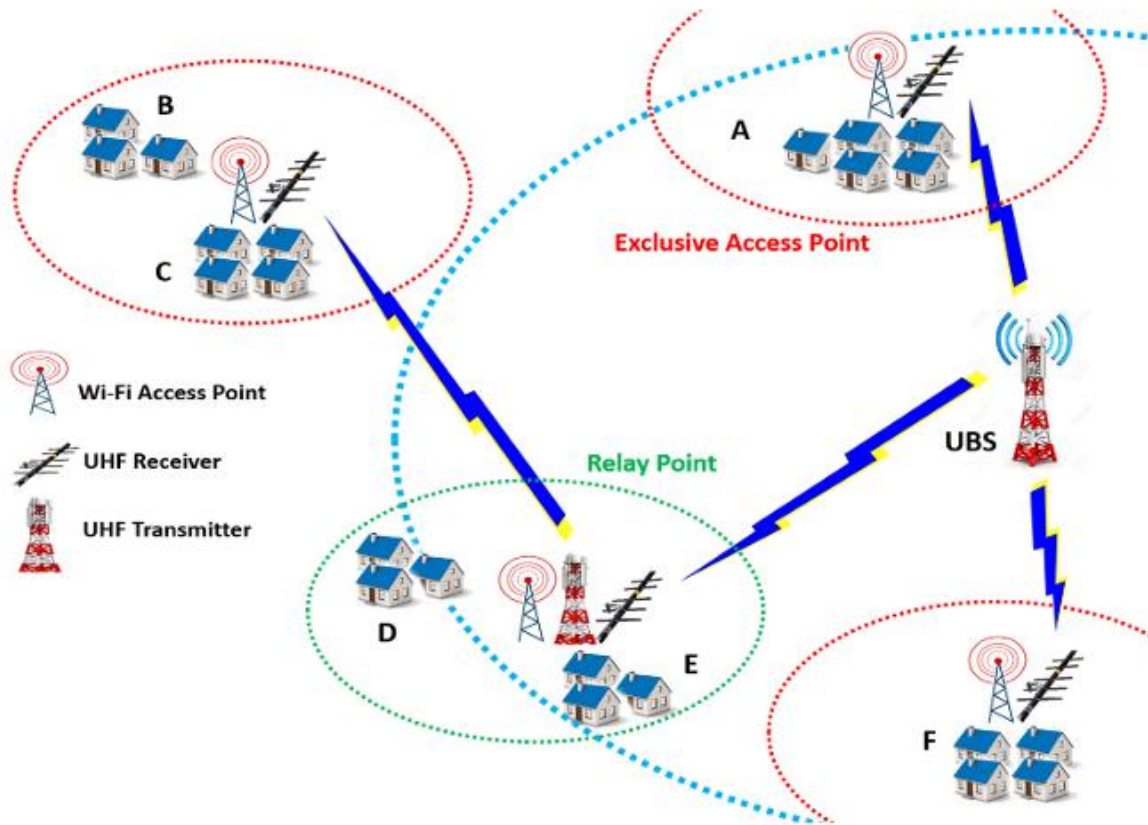
UPS, μειώνοντας το λειτουργικό κόστος έως και 30%, σε σύγκριση με παραδοσιακές λύσεις όπως οι γεννήτριες.

Για τη μακροχρόνια βιωσιμότητα της εγκατάστασης, προβλέπεται η εκπαίδευση των καθηγητών ή των μαθητών σε βασικές διαδικασίες συντήρησης των κόμβων και στη ρύθμιση καναλιών. Παράλληλα, η συλλογή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο επιτρέπει τη συνεχή προσαρμογή του δικτύου στις πραγματικές ανάγκες κάθε σχολικής υποδομής .

Με αυτόν τον τρόπο, η συνδυαστική αξιοποίηση του Wi-Fi για υψηλές ταχύτητες σε εσωτερικούς χώρους και των TVWS για μεγάλες αποστάσεις και τη μετάδοση σήματος μέσω εμποδίων, σε συνδυασμό με την υποστήριξη της αρχιτεκτονικής 5G C-RAN στο τμήμα backhaul, διαμορφώνει μια πλήρη αρχιτεκτονική με οικονομικά βιώσιμο και πλήρως προσαρμόσιμο μοντέλο σύνδεσης απομακρυσμένων εκπαιδευτικών υποδομών στο διαδίκτυο [143], [144].



Εικόνα 26 Η αρχιτεκτονική του 5G με 2 πύλες MBS [143]



Εικόνα 27 Απεικόνιση των Exclusive AP και των Relay Points για TVWS συνδεσιμότητα σε αγροτικές περιοχές [143]

4.4 Περίπτωση χρήσης

Στις απομακρυσμένες περιοχές έχει πολύ σημαντικό ρόλο ο τομέας της εκπαίδευσης διότι είναι η απαρχή για την σωστή χρήση των διαθέσιμων τεχνολογιών. Χωρίς την βελτίωση του εκπαιδευτικού συστήματος και χωρίς την αποτελεσματική μείωση του ψηφιακού αναλφαριθμητισμού τομείς όπως είναι η υγεία και ο αγροτικός τομέας έρχονται αντιμέτωποι με σημαντικές προκλήσεις. Ακόμα και αν το δίκτυο των τηλεπικοινωνιών επεκταθεί και μπορεί να στηρίξει αποτελεσματικά τους τομείς της υγείας και τον αγροτικό τομέα, στο πρακτικό κομμάτι ο τελικός χρήστης δεν θα είναι σε θέση να κατανοήσει να επεξεργαστεί και να διαμορφώσει τις τεχνολογίες όπου θα τον βοηθήσουν. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα την δυσπιστία απέναντι στην τεχνολογία και την επικράτηση των τοπικών προκαταλήψεων. Η επένδυση στον τομέα της εκπαίδευσης με την χρήση σύγχρονων εργαλείων είναι απαραίτητη για την χρήση και την προσαρμογή στα ψηφιακά εργαλεία που μπορούν να αναπτύξουν το βιοτικό επίπεδο των απομακρυσμένων αγροτικών περιοχών [145].

4.4.1.1 Info-Internet

Η έλλειψη σταθερής και προσιτής πρόσβασης στο διαδίκτυο αποτελεί φραγμό για εκατοντάδες εκατομμύρια παιδιά σε απομακρυσμένες και υποανάπτυκτες περιοχές. Το Info-Internet γεννήθηκε από την ανάγκη να γεφυρωθεί το χάσμα αυτό, προσφέροντας ελεύθερη πρόσβαση σε βασική, χαμηλού όγκου πληροφορία όπως για παράδειγμα κείμενο, εικόνες, εκπαιδευτικά γραφήματα και ταυτόχρονα για να δημιουργήσει τις συνθήκες για βιώσιμη οικονομική λειτουργία των δικτύων σε απομακρυσμένες κοινότητες.

Το Info-Internet εμπεριέχει τρεις διάστασης, την τεχνολογία, το επιχειρηματικό μοντέλο και την κοινωνική ένταξη. Σε τεχνικό επίπεδο, η αρχιτεκτονική του χωρίζεται σε τέσσερα σημεία. Αρχικά έχουμε τον τοπικό πυρήνα (local core), όπου φιλοξενούνται αρχεία και οι υπηρεσίες με υψηλή προτεραιότητα, έπεται ακολουθεί το τοπικό ασύρματο δίκτυο (local network), που διανέμει πληροφορία σε σχολεία ή κοινοτικά σημεία, έπεται είναι ο κεντρικός πυρήνας (centralised core) όπου συγκεντρώνονται οι λειτουργίες ελέγχου πρόσβασης και ταυτοποίησης, η εφαρμογή του freemium μοντέλου (διαχωρισμός ελεύθερης πρόσβασης ή πρόσβασης με μικρή χρέωση), καθώς και η διαχείριση κεντρικών διακομιστών και έλεγχος των πολιτικών ποιότητας υπηρεσίας (QoS), ώστε οι σχολικοί κόμβοι να λαμβάνουν σταθερό και εγγυημένο εύρος ζώνης, και τέλος η ασύρματη ή δορυφορική σύνδεση προς το Internet (backhaul). Με αυτό τον τρόπο, ακόμη και χαμηλής χωρητικότητας σύνδεση 1–2 Mbps γίνεται επαρκής: οι σελίδες ενημερωτικού χαρακτήρα φορτώνονται τοπικά από έναν τοπικό διακομιστή, ενώ τα σχολεία αποκτούν άμεση πρόσβαση σε βασικό εκπαιδευτικό υλικό.

Το επιχειρηματικό πρότυπο που υιοθετείται είναι freemium: όπου περιλαμβάνει την βασική πληροφορία (κείμενο, εικονογράμματα, απλές ασκήσεις) και παρέχεται δωρεάν, απορροφώντας μόλις το 2,5 % του διαθέσιμου εύρους ζώνης, ενώ για υπηρεσίες μεγαλύτερου όγκου (εκπαιδευτικά βίντεο, πολυμεσικές εφαρμογές και μεγαλύτερος όγκος δεδομένων) υπάρχουν μικρές χρεώσεις, οι οποίες καλύπτονται είτε από τοπικά προγράμματα επιδότησης είτε από ειδικά πακέτα δεδομένων των παρόχων. Κάθε μαθητής έχει εγγυημένη πρόσβαση στην ελάχιστη βάση γνώσης, ενώ η επέκταση και η ανανέωση του εξοπλισμού χρηματοδοτείται από τα έσοδα των premium υπηρεσιών.

Η χρησιμότητα του Info-Internet εστιάζει στην ισότητα ευκαιριών για όλους τους μαθητές. Με την ελεύθερη διάθεση ψηφιακών βιβλιοθηκών, λεξικών, εγκυκλοπαιδειών και εκπαιδευτικών παιχνιδιών, παιδιά που παλαιότερα αντιμετώπιζαν πολύωρες μεταφορές μέχρι το ένα και μοναδικό σχολείο της περιοχής, ανοίγουν μια πόρτα στον παγκόσμιο ιστό. Μαθαίνουν να διερευνούν, να αμφισβητούν και να συνεργάζονται, συμμετέχουν σε διαδικτυακές ασκήσεις και, το πιο σημαντικό, λαμβάνουν τα απαραίτητα εφόδια και γίνονται μέρος ενός κόσμου που εξελίσσεται ραγδαία.

Τα οφέλη του Info-Internet δεν εξαντλούνται στην πεντάλεπτη αναζήτηση ορισμών ή στην πρόσβαση σε λογοτεχνικά κείμενα. Αλλά επιτυγχάνονται τα εξής

- Οι εκπαιδευτικοί εμπλουτίζουν τα μαθήματά τους, χρησιμοποιώντας τα tablet ή τους υπολογιστές ως διαδραστικό εργαλείο μάθησης.
- Οι μαθητές αποκτούν αυτοπεποίθηση, καθώς μαθαίνουν να επιλύουν δικά τους ερωτήματα, να φτιάχνουν συλλογικές παρουσιάσεις και να ανεβάζουν εργασίες στο τοπικό cloud ή να κατεβάζουν πληροφορίες που χρειάζονται.
- Ο σύνδεσμος αναμασά στο σχολείο και στην κοινότητα ενισχύεται καθώς γονείς και ηλικιωμένοι επισκέπτονται τα Info-Internet κέντρα για βασικές πληροφορίες υγείας, γεωργίας ή γραφειοκρατίας, αξιοποιώντας παράλληλα το ίδιο σύστημα υποστήριξης.

Οι ωφελούμενοι δεν είναι μόνο οι μικροί μαθητές. Αντίθετα οι ωφελούμενοι είναι τα μικρά παιδιά δημοτικού που αναπτύσσουν βασικές αλφαβητικές και μαθηματικές δεξιότητες μέσω απλών, εικόνων και ήχων, οι έφηβοι που χρειάζονται πρόσβαση σε προηγμένα εργαλεία και βίντεο για τα μαθήματα, οι εκπαιδευτικοί, οι οποίοι επιμορφώνονται διαρκώς και συνεργάζονται διαδικτυακά με συναδέλφους, οι γονείς με περιορισμένη γραμματική κατανόηση, που μέσα από το διαδραστικό υλικό όπως είναι οι εικόνες, το βίντεο και η αφήγηση μαθαίνουν να στηρίζουν τα παιδιά τους και να χρησιμοποιούν και οι

ιδού την τεχνολογία καλύτερα και τέλος, κάθε μέλος της κοινότητας όπως για παράδειγμα οι υγειονομικοί, οι αγρότες, οι μικροεπιχειρηματίες όπου βρίσκουν στην ίδια πλατφόρμα αρχεία, και φόρουμ συζητήσεων για να εξελίξει το επάγγελμά του και να βοηθήσουν την καθημερινή τους ζωή.

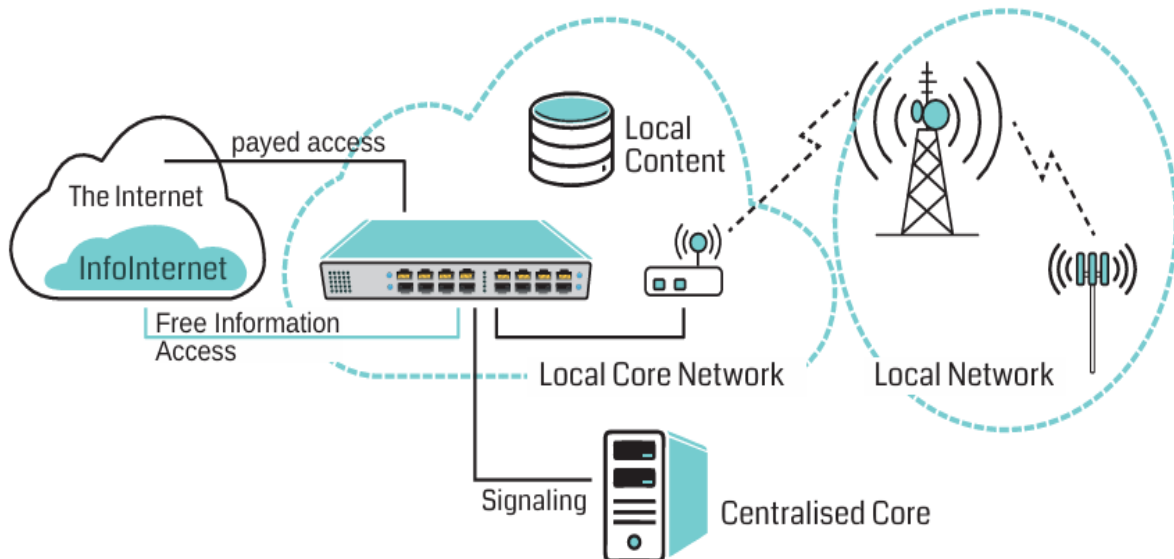
Η τηλεπικοινωνιακή υλοποίηση βασίζεται στη συνεργασία διαφορετικών τεχνολογιών. Τοπικά Wi-Fi hotspots (2,4 ή 5 GHz) εγκαθίστανται εντός σχολικών ή κοινοτικών κτιρίων, συνδέονται με το δίκτυο Info-Internet και προσφέρουν ταχύτητες έως και 150 Mbps, καλύπτοντας αποστάσεις περίπου 200 μέτρων.

Όταν η απόσταση αυξάνεται ή παρεμβάλλονται εμπόδια όπως πυκνή βλάστηση και λοφώδης γεωμορφολογία, αναλαμβάνουν τα TVWS (470–694 MHz), τα οποία, χάρη στην ικανότητά τους να διαπερνούν τέτοιου είδους περιβάλλον, χρησιμοποιούνται για τη middle-mile σύνδεση των απομακρυσμένων σημείων με το κεντρικό δίκτυο. Η σύνδεση επιτυγχάνεται μέσω σταθμών TVWS UBS, οι οποίοι τοποθετούνται σε υψώματα ή σε ιστούς μεγάλης ανύψωσης.

Το φάσμα ανιχνεύεται δυναμικά μέσω τεχνικής energy detection, εξασφαλίζοντας μηδενική παρεμβολή προς τους χρήστες της τηλεοπτικής ζώνης. Με αυτόν τον τρόπο, κάθε σχολική μονάδα μπορεί να εξυπηρετείται με χωρητικότητα έως και 50 Mbps, σε ακτίνα κάλυψης 10–15 km.

Η τοπική διαχείριση ενέργειας επιτυγχάνεται με την προσθήκη φωτοβολταϊκών πάνελ και μπαταριών, ώστε να υποστηρίζεται 24–48 ωρη αυτονομία σε περιοχές χωρίς αξιόπιστο δίκτυο.

Το Info-Internet είναι μια αποτελεσματική λύση για βασική πρόσβαση στο διαδίκτυο στα σχολεία. Παράλληλα όμως γίνεται και πηγή γνώσης για ολόκληρη την κοινότητα επιτρέποντας την πρόσβαση σε ηλεκτρονικές βιβλιοθήκες και υπηρεσίες όπου εξυπηρετούν όλους τους κάτοικους εντάσσοντας τους στην ψηφιακή εκπαίδευση όπου είναι ο κινητήριος μοχλός για την μείωση του ψηφιακού χάσματος, ανάμεσα στα αστικά κέντρα και τις απομακρυσμένες περιοχές και την μετάβαση τους στην ψηφιακή εποχή [146].



Εικόνα 28 Αρχιτεκτονική δομή Info-internet [146]

4.4.2 Υβριδική εκπαίδευση

Η ραγδαία εξέλιξη των τεχνολογιών μπορούν να προσφέρουν νέες προοπτικές σε απομακρυσμένες και αγροτικές περιοχές όπου η πρόσβαση σε εξειδικευμένο διδακτικό προσωπικό και σε κατάλληλες κτιριακές υποδομές είναι ελλείπει και συχνά παρουσιάζει σοβαρούς περιορισμούς και δυσκολίες. Στο πλαίσιο αυτό, ένα σύστημα υβριδικής εκπαίδευσης αναδύεται ως ολοκληρωμένη διδακτική στρατηγική που αξιοποιεί τις δυνατότητες τόσο της διά ζώσης διδασκαλίας όσο και της διαδικτυακής μάθησης, καλύπτοντας τα κενά που προκύπτουν από τις γεωγραφικές και κοινωνικές προκλήσεις των σχολικών μονάδων.

Με τον όρο υβριδική εκπαίδευση εννοούμε τη στοχευμένη ένταξη της διαδικτυακής εκπαίδευσης, υποστηριζόμενη από ψηφιακές πλατφόρμες και πολυμεσικό περιεχόμενο στο παραδοσιακό περιβάλλον της τάξης. Όπως επισημαίνουν θεωρητικοί του πεδίου, πρόκειται για μια συνδυαστική προσέγγιση όπου η εργασία των μαθητών εκτός φυσικής αίθουσας δηλαδή η ασύγχρονη μελέτη μέσω υπολογιστή, εναλλάσσεται με δραστηριότητες στο σχολείο υπό την άμεση επίβλεψη του καθηγητή. Αυτή η διττή δομή επιτρέπει στους μαθητές να προσαρμόζουν τον ρυθμό και τον τρόπο μάθησής τους, ενώ διατηρούν παράλληλα την αναγκαία ανθρώπινη επαφή με τον εκπαιδευτικό και το μαθησιακό τους περιβάλλον.

Σε σχέση με τις παραδοσιακές διδακτικές μεθόδους, η υβριδική εκπαίδευση φέρει πολλαπλά οφέλη. Πρώτον, ενισχύει το κίνητρο της αυτοεξέλιξης, καθώς οι μαθητές διαχειρίζονται σε μεγάλο βαθμό οι ίδιοι το χρόνο και την εξέλιξη του έργου τους, γεγονός που αυξάνει το εσωτερικό κίνητρο. Δεύτερον, προάγει μια μαθητοκεντρική προσέγγιση: ο ρόλος του διδάσκοντα μετατοπίζεται από τον παροχέα γνώσης στον συντονιστή της ενεργούς έρευνας και συνεργασίας των μαθητών. Τρίτον, η ευέλικτη δομή μειώνει τα λειτουργικά κόστη διότι επιτυγχάνεται μείωση των δαπανών μετακίνησης και καλύτερη αξιοποίηση των αιθουσών και επιτρέπει σε σχολικές μονάδες με περιορισμένους πόρους να υποστηρίξουν μεγαλύτερο αριθμό μαθητών [147].

Σε περιοχές όπου η διατήρηση και προσέλκυση εκπαιδευτικών αποτελεί κρίσιμο ζήτημα όπως για παράδειγμα τις απομακρυσμένες κοινότητες, οι δυσκολίες απορρέουν από τον υψηλό κόστος διαβίωσης, τις ακανόνιστες συμβάσεις εργασίας και την έλλειψη καταλυμάτων για τους δασκάλους. Το αποτέλεσμα είναι η καθυστέρηση έναρξης του σχολικού έτους ή ακόμη και η οριστική διακοπή λειτουργίας σχολείων. Η υβριδική εκπαίδευση απαντά σε αυτές τις προκλήσεις, επιτρέποντας σε πιστοποιημένους εκπαιδευτικούς να διδάσκουν εξ αποστάσεως, μειώνοντας τις ανάγκες για συχνές μετακινήσεις, παρέχοντας παράλληλα συνεχή εποπτεία των μαθητών από τοπικούς βοηθούς, χωρίς να θίγεται η ποιότητα της μάθησης. Το σύστημα αυτό επιτρέπει σε έναν καθηγητή να έχει τον ρόλο του συντονιστή ακόμα και σε διαφορετικά σχολεία για παράδειγμα 2 διαφορετικά χωριά που έχουν μικρό πλήθος μαθητών ο δάσκαλος θα μπορούσε να έχει εναλλάξ φυσική παρουσία σε ένα από τα 2 σχολεία ενώ στο σχολείο όπου δεν θα έχει φυσική παρουσία θα επιβλέπει την αίθουσα απομακρυσμένα. Σε διαφορετική περίπτωση ο δάσκαλος θα μπορούσε να διδάσκει απομακρυσμένα την τάξη του η οποία θα βρίσκεται μαζεμένη στην σχολική αίθουσα και να έχει φυσική παρουσία κάθε φορά που κρίνεται απαραίτητο.

Για την πρακτική υλοποίηση του συστήματος, έχουν αναπτυχθεί διάφορες προσεγγίσεις διδασκαλίας:

- Το station rotation, οι μαθητές χωρίζονται σε μικρές ομάδες και αλλάζουν θέσεις μέσα στην τάξη, περνώντας από διαφορετικές δραστηριότητες. Σε μία από αυτές χρησιμοποιούν υπολογιστή για να παρακολουθήσουν το μάθημα online, ενώ στις άλλες κάνουν εργασίες ή συζητούν με τον δάσκαλο.

- Το flipped classroom, οι μαθητές βλέπουν το μάθημα στο σπίτι, π.χ. μέσα από βίντεο ή άλλο ψηφιακό υλικό. Όταν πάνε σχολείο, δεν ακούν θεωρία αλλά χρησιμοποιούν τον χρόνο για ασκήσεις, ερωτήσεις και συζήτηση με τον δάσκαλο ο οποίος είτε είναι παρών στον χώρο είτε είναι συνδεδεμένος απομακρυσμένα.
- Το flex model, οι μαθητές μαθαίνουν κυρίως από το σπίτι μέσω διαδικτύου, αλλά έχουν τη δυνατότητα να έρχονται στο σχολείο όποτε χρειάζονται βοήθεια. Υπάρχει πάντα κάποιος εκπαιδευτικός διαθέσιμος για να τους καθοδηγεί ατομικά και να επιβλέπει την εξέλιξη τους.
- Το lab rotation, όπου το μάθημα γίνεται μόνο μέσω υπολογιστή, αλλά όχι από το σπίτι. Οι μαθητές βρίσκονται σε ειδικά διαμορφωμένα αίθουσα (π.χ. εργαστήριο υπολογιστών) και παρακολουθούν εκεί το online μάθημα, με κάποιον υπεύθυνο να τους επιβλέπει.

Η τηλεπικοινωνιακή υποδομή αποτελεί θεμέλιο για την επιτυχία του συστήματος. Απαιτείται αξιόπιστη και γρήγορη σύνδεση στο διαδίκτυο, καθώς και ένα πλήρες σύστημα διαχείρισης μαθημάτων, το οποίο να υποστηρίζει την παρακολούθηση της προόδου των μαθητών, την υποβολή και αξιολόγηση εργασιών, αλλά και τη διεξαγωγή τόσο σύγχρονης μάθησης μέσω ζωντανών βιντεοδιασκέψεων, όσο και ασύγχρονης μάθησης με τη χρήση βιντεοσκοπημένων παρουσιάσεων, ψηφιακών εγχειριδίων και κουίζ με άμεση ανατροφοδότηση. Χωρίς την κατάλληλη τεχνική στήριξη, οι μαθητές σε αγροτικές περιοχές κινδυνεύουν να αποκόπουν από την εκπαιδευτική διαδικασία.

Η ενίσχυση της αποτελεσματικότητας εξασφαλίζεται μέσω της συστηματικής κατάρτισης όλων των εμπλεκόμενων στην υβριδική εκπαίδευση δηλαδή των καθηγητών, των μαθητών και των γονέων σε ψηφιακές δεξιότητες και κανόνες ασφαλούς χρήσης των ψηφιακών μέσων. Η επαρκής επιμόρφωση δημιουργεί ένα περιβάλλον συνεργασίας όπου η τεχνολογία συμπληρώνει τα κενά που υπάρχουν προσφέροντας νέες δυνατότητες που στόχο έχουν την μείωση του χάσματος που υπάρχει στην εκπαίδευση στις απομακρυσμένες περιοχές σε σχέση με τα αστικά κέντρα διαμορφώνοντας ένα μαθησιακό περιβάλλον ανθεκτικό σε γεωγραφικούς και κοινωνικούς περιορισμούς [148], [149].

4.4.3 Ψηφιακές Βιβλιοθήκες

Οι ψηφιακές βιβλιοθήκες συνιστούν ένα σύγχρονο περιβάλλον στο οποίο τα έντυπα βιβλία και οι συλλογές μετατρέπονται σε ηλεκτρονικά διαθέσιμο ψηφιακό υλικό, προκειμένου να παρέχεται απομακρυσμένη πρόσβαση στους χρήστες μέσω του. Σε απομακρυσμένες περιοχές υπάρχει μεγάλη δυσκολία στην εύρεση εκπαιδευτικού και λογοτεχνικού περιεχομένου. Ακόμα και αν σε μια περιοχή η οποία έχει βιβλιοθήκη το περιεχόμενο της βιβλιοθήκης θα είναι αισθητά φτωχότερο σε σχέση με τις βιβλιοθήκες στα αστικά κέντρα. Μια σημαντική τομή στην εκπαίδευση είναι οι βιβλιοθήκες, όπου σε ένα κοινοτικό κτήριο κατάλληλα διαμορφωμένο θα είναι δυνατή η πρόσβαση σε εκπαιδευτικά βιβλία, εγκυκλοπαίδειες, λογοτεχνικό υλικό και κάθε κατηγορίας βιβλίου που περιλαμβάνεται και σε μια παραδοσιακή βιβλιοθήκη.

Η βασική τους λειτουργία αφορά τη συγκέντρωση, τη ψηφιοποίηση, την αποθήκευση και την διαχείριση πληροφοριακών πόρων, δηλαδή κειμένων, εικόνων και πολυμέσων, ώστε ο δανεισμός, η αναζήτηση και η ανάκτηση γνώσης να μην υπόκεινται πλέον στους γεωγραφικούς ή χρονικούς περιορισμούς που επιβάλλουν οι φυσικές βιβλιοθήκες. Μέσω των τεχνολογιών πληροφορικής και τηλεπικοινωνιών οι ψηφιακές βιβλιοθήκες επιτρέπουν ολοκληρωμένη παράδοση υπηρεσιών βιβλιοθηκονομίας, όπως η ταξινόμηση, η ευρετηρίαση, η αναζήτηση με λέξεις-κλειδιά και η προσωποποιημένη παρακολούθηση διαφόρων θεμάτων ενδιαφέροντος, δημιουργώντας ένα οικοσύστημα γνώσης το οποίο αναβαθμίζει

τόσο την ποιότητα όσο και την ταχύτητα πρόσβασης στην επιστημονική, εκπαιδευτική και πολιτιστική πληροφόρηση[150].

Η χρησιμότητα των ψηφιακών βιβλιοθηκών προέρχεται πρωτίστως από την ικανότητά τους να υπερβαίνουν το κατακερματισμένο δίκτυο φυσικών εγκαταστάσεων. Στις αγροτικές και απομακρυσμένες περιοχές, όπου η οικοδόμηση και ο εξοπλισμός νέων βιβλιοθηκών προχωρά με αργούς ρυθμούς και σε μεγάλο κόστος, οι ψηφιακές βιβλιοθήκες παρέχουν μία βιώσιμη εναλλακτική. Οι χρήστες δεν απαιτείται να διανεύουν μεγάλες αποστάσεις για να ανατρέξουν σε έντυπα συγγράμματα αλλά θα μπορούν με ένα μόνο υπολογιστή ή ακόμη και με το κινητό τους τηλέφωνο, μπορούν να συνδεθούν άμεσα σε βάσεις δεδομένων, περιοδικά και ηλεκτρονικά βιβλία. Επιπλέον, η περιοδική ενημέρωση των ψηφιακών συλλογών μέσω απλής μετάδοσης δεδομένων εξασφαλίζει τη συνεχή ανανέωση του περιεχομένου, καταργώντας την ανάγκη για φυσικές μεταφορές νέου έντυπου υλικού και μειώνοντας σημαντικά το λειτουργικό κόστος.

Οι ωφελούμενοι των ψηφιακών βιβλιοθηκών είναι κατά κύριο λόγο οι κάτοικοι αγροτικών περιοχών και απομακρυσμένων κοινοτήτων, των οποίων οι βιβλιογραφικές ανάγκες για εκπαιδευτική υποστήριξη, επαγγελματική κατάρτιση και έρευνα υπερβαίνουν τις δυνατότητες των ελάχιστων φυσικών υποδομών που υπάρχουν. Μαθητές, ερευνητές, εκπαιδευτικοί και εργαζόμενοι αποκτούν απευθείας πρόσβαση σε διδακτικό και σε επιστημονικό υλικό, ενισχύοντας την εκπαιδευτική διαδικασία και τις αναπτυξιακές πρωτοβουλίες. Παράλληλα, οι ίδιοι οι βιβλιοθηκονόμοι σε αγροτικές περιοχές επεκτείνουν το ρόλο τους από την ανάγκη για συγκέντρωση έντυπου υλικού σε διαχειριστές και επιμελητές ψηφιακού περιεχομένου, αποκτώντας νέες ψηφιακές δεξιότητες και συνεισφέροντας στη διατήρηση της πολιτισμικής κληρονομιάς μέσω της ηλεκτρονικής αρχειοθέτησης τοπικών πηγών [151].

Τα πλεονεκτήματα των ψηφιακών βιβλιοθηκών είναι πολλαπλά. Αρχικά, προσφέρουν αμφίδρομη 24ωρη πρόσβαση καθότι το εκπαιδευτικό και ερευνητικό κοινό μπορεί να αναζητήσει, να δανειστεί ή να κατεβάσει ψηφιακούς πόρους ανά πάσα στιγμή χωρίς χρονικούς περιορισμούς. Έπειτα, μειώνεται σημαντικά το κόστος λειτουργίας καθώς δεν χρειάζονται μεγάλες φυσικές αποθηκευτικές εγκαταστάσεις, ούτε μεταφορά έντυπου υλικού, ενώ το ψηφιακό περιεχόμενο μπορεί να αναπαράγεται επ' άοριστον χωρίς το πρόβλημα της φυσικής φθοράς. Ακόμα, ενισχύεται η προσβασιμότητα σε ευρύτερες συλλογές και διεθνείς βάσεις δεδομένων, επιτρέποντας στους χρήστες να ξεπεράσουν τους τοπικούς και γεωγραφικούς περιορισμούς και να αλληλοεπιδράσουν σε παγκόσμιο πλαίσιο. Έτσι, ενισχύεται η συνεργασία: μέσω εργαλείων κοινωνικής δικτύωσης και φόρουμ, με τους χρήστες και τους βιβλιοθηκονόμους να μπορούν να ανταλλάσσουν σχόλια και ιδέες, δημιουργώντας κοινότητες μάθησης.

Η υλοποίηση ψηφιακών βιβλιοθηκών προϋποθέτει την ανάπτυξη και συντήρηση ενός σταθερού δικτύου τηλεπικοινωνιακών υποδομών. Καταρχάς, ο πυρήνας του συστήματος αποτελείται από τους διακομιστές αποθήκευσης και παροχής περιεχομένου, οι οποίοι εδρεύουν σε κεντρικά κτήρια και συνδέονται στον παγκόσμιο ιστό μέσω TVWS. Οι χρήστες μπορούν να προσπελάσουν τις υπηρεσίες μέσω σταθερών υπολογιστών ή φορητών συσκευών, υπό την προϋπόθεση διαθεσιμότητας σύνδεσης στο διαδίκτυο, είτε ενσύρματα είτε ασύρματα από WI-FI hotspot. Επίσης ανάλογα με την διαθέσιμη υποδομή οι τοπικοί διακομιστές δεν είναι απαραίτητο να έχουν συνεχή πρόσβαση στο διαδίκτυο καθώς μπορούν να φορτωνόταν τοπικά την βιβλιογραφία και να την διανέμουν στους χρήστες.

Η επιτυχία των ψηφιακών βιβλιοθηκών σε αγροτικές περιοχές εξαρτάται επίσης από την επάρκεια και το επίπεδο ψηφιακής παιδείας των τελικών χρηστών και των βιβλιοθηκονόμων. Η βασική δεξιότητα χειρισμού υπολογιστή, όπως το άνοιγμα του φυλλομετρητή, η λήψη και η αποθήκευση αρχείων καθώς και η χρήση ηλεκτρονικού ταχυδρομείου, αποτελεί ελάχιστη προϋπόθεση για την προσβασιμότητα. Για την αποτελεσματική αξιοποίηση χρειάζονται επιπλέον εκπαιδεύσεις και σεμινάρια στη χρήση βάσεων

δεδομένων, στον εντοπισμό αξιόπιστων πηγών και στην αντιμετώπιση τεχνικών προβλημάτων σύνδεσης. Οι δημόσιες βιβλιοθήκες μπορούν να αναλάβουν τον ρόλο του τοπικού κόμβου ψηφιακής στήριξης προς την κοινότητα, παρέχοντας τεχνική υποστήριξη και ψηφιακές συμβουλευτικές υπηρεσίες [150], [151].

4.4.4 SolarSPELL

Το SolarSPELL είναι μια φορητή ψηφιακή βιβλιοθήκη σχεδιασμένη ειδικά για περιοχές όπου δεν υπάρχει αξιόπιστη πρόσβαση στο διαδίκτυο ή υπάρχουν προβλήματα με την ηλεκτροδότηση. Βασίζεται σε έναν μικροϋπολογιστή τύπου Raspberry Pi, ο οποίος περιέχει το σύνολο του εκπαιδευτικού υλικού αποθηκευμένο σε κάρτα SD και εκπέμπει ένα τοπικό Wi-Fi δίκτυο, ώστε οι χρήστες να μπορούν να συνδεθούν χωρίς να απαιτείται σύνδεση στο δίκτυο. Το σύστημα τροφοδοτείται από ηλιακή ενέργεια μέσω ηλιακού πάνελ και περιλαμβάνει μπαταρίες λιθίου, ρυθμιστή τάσης και ειδική αδιάβροχη θήκη για χρήση ακόμα και σε δύσκολες καιρικές συνθήκες αλλά και για επιπλέον προστασία της συσκευής. Έτσι, το SolarSPELL προσφέρει σε μαθητές και εκπαιδευτικούς πρόσβαση σε εκπαιδευτικό περιεχόμενο, δημιουργώντας μια εκπαιδευτική εμπειρία και προοπτική, χωρίς να χρειάζεται συνεχή πρόσβαση σε τηλεπικοινωνιακή υποδομή

Η πρωτοποριακή αυτή λύση είναι κατάλληλη σε απομακρυσμένες κοινότητες, όπου η έλλειψη ηλεκτρικής ενέργειας και σύνδεσης στο διαδίκτυο καθιστά απαγορευτική την πρόσβαση σε σύγχρονο εκπαιδευτικό υλικό. Στα πλαίσια πιλοτικής εφαρμογής στο αρχιπέλαγος των νησιών του Ειρηνικού, και ειδικότερα σε επτά απομακρυσμένα σχολεία, το SolarSPELL στήριξε την εκπαιδευτική διαδικασία προσφέροντας ψηφιακούς πόρους προσαρμοσμένους στο τοπικό αναλυτικό πρόγραμμα και στη γλώσσα της κοινότητας. Οι εκπαιδευτικοί κατάφεραν να εμπλουτίσουν τα μαθήματά τους με πολυμεσικά έγγραφα, βίντεο και διαδραστικές εφαρμογές, πετυχαίνοντας έτσι οι μαθητές τους, να αναπτύξουν νέες ψηφιακές δεξιότητες και να ενισχυθεί η αλληλεπίδρασή τους με το ψηφιακό περιεχόμενο.

Τηλεπικοινωνιακά, το SolarSPELL λειτουργεί ως αυτόνομος διακομιστής που εκπέμπει σήμα Wi-Fi, στο οποίο μπορούν να συνδεθούν έως και δεκάδες συσκευές με πρόγραμμα περιήγησης. Δεν απαιτείται εγκατάσταση κωδικών ή λογισμικών, καθώς το περιεχόμενο αποδίδεται απευθείας μέσω ιστοσελίδας. Η ανανέωση των εκπαιδευτικών πόρων πραγματοποιείται με αντικατάσταση της κάρτας SD με το νέο εκπαιδευτικό περιεχόμενο ή υπό προϋποθέσεις η ενημέρωση των περιεχόμενων του διακομιστή μπορεί να γίνει με πρόσβαση στο διαδίκτυο.

Η ψηφιακή βιβλιοθήκη SolarSPELL έχει βοηθήσει σημαντικά στη διάδοση της γνώσης μέσα στις σχολικές τάξεις. Με τη χρήση της, αναδείχθηκαν καλές πρακτικές για την εκπαίδευση σε σημαντικά θέματα, όπως η κλιματική αλλαγή και άλλα ζητήματα που αφορούν την εποχή μας. Το γεγονός ότι οι μαθητές έχουν πρόσβαση σε εκπαιδευτικό υλικό υψηλής ποιότητας και προσαρμοσμένο στις ανάγκες της περιοχής τους, τους ενθαρρύνει να συμμετέχουν ενεργά στη μάθηση. Επιπλέον, το SolarSPELL βοηθά στην ανάπτυξη δεξιοτήτων και θετικών στάσεων που είναι απαραίτητες για την ανάπτυξη. Αποτελεί ένα σημαντικό εργαλείο για σχολεία που βρίσκονται σε περιοχές με ελλείψεις υποδομής, προσφέροντας έναν εύκολο και αξιόπιστο τρόπο να έχουν πρόσβαση στη σύγχρονη εκπαίδευση [152], [153], [154].



Εικόνα 29 Πλήρη συσκευή SolarSPELL [153]

Κεφάλαιο 5ο: Συμπεράσματα

Η παρούσα πτυχιακή εργασία είχε σκοπό να εστιάσει στη μελέτη και ανάλυση των τηλεπικοινωνιακών τεχνολογιών που μπορούν να αξιοποιηθούν για την κάλυψη των αναγκών αγροτικών και απομακρυσμένων περιοχών, με απώτερο στόχο τη μείωση του ψηφιακού χάσματος και τη βελτίωση του βιοτικού επιπέδου των κατοίκων. Μέσα από τη συνολική προσέγγιση του θέματος κατέστη σαφές ότι η συνδεσιμότητα αποτελεί θεμελιώδη παράγοντα κοινωνικής συνοχής και ανάπτυξης και δεν μπορεί πλέον να αντιμετωπίζεται ως προαιρετική υποδομή, αλλά ως ένα βασικό κοινωνικό αγαθό που πρέπει όλοι να έχουν πρόσβαση.

Οι απομακρυσμένες περιοχές παρουσιάζουν ιδιαίτερα χαρακτηριστικά και δύσκολους πολύπλοκους περιορισμούς, οι οποίοι επηρεάζουν άμεσα τον σχεδιασμό και την υλοποίηση των τηλεπικοινωνιακών δικτύων. Το δύσβατο γεωγραφικό ανάγλυφο, η χαμηλή πληθυσμιακή πυκνότητα, η περιορισμένη ή ασταθής ηλεκτροδότηση και το αυξημένο κόστος ανάπτυξης και συντήρησης των υποδομών καθιστούν συχνά μη βιώσιμες τις παραδοσιακές ενσύρματες λύσεις. Ως αποτέλεσμα, αναδεικνύεται η ανάγκη για ευέλικτες, αποδοτικές και οικονομικά βιώσιμες λύσεις, προσαρμοσμένες στις πραγματικές ανάγκες κάθε περιοχής.

Από την ανάλυση των τεχνολογιών προκύπτει ότι καμία μεμονωμένη τεχνολογία δεν μπορεί να καλύψει πλήρως όλες τις απαιτήσεις. Η συνδυαστική χρήση διαφορετικών τηλεπικοινωνιακών λύσεων, όπως ασύρματα δίκτυα ευρείας περιοχής, TV White Spaces, δορυφορικά συστήματα, καθώς και σύγχρονες αρχιτεκτονικές κινητών δικτύων, μπορούν να προσφέρουν αξιόπιστη κάλυψη και επαρκή ποιότητα υπηρεσιών στον βαθμό που το απαιτεί η εκάστοτε εφαρμογή. Η επιλογή της κατάλληλης τεχνολογίας εξαρτάται από παράγοντες όπως η εμβέλεια, η κατανάλωση ενέργειας, το κόστος εγκατάστασης και συντήρησης, καθώς και οι απαιτήσεις των εφαρμογών που πρόκειται να υποστηριχθούν από το δίκτυο.

Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στον ρόλο του Διαδικτύου των Πραγμάτων και των Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων, τα οποία αποτελούν βασικά δομικά στοιχεία για την υλοποίηση έξυπνων εφαρμογών σε απομακρυσμένες περιοχές. Τα συστήματα αυτά επιτρέπουν τη συλλογή, επεξεργασία και μετάδοση δεδομένων από το φυσικό περιβάλλον προς το υπόλοιπο δίκτυο, παρέχοντας πολύτιμη πληροφορία σε πραγματικό ή σχεδόν πραγματικό χρόνο. Η χρήση κόμβων χαμηλής κατανάλωσης σε συνδυασμό με την χρήση κατάλληλων πρωτοκόλλων επικοινωνίας και αρχιτεκτονικών edge και cloud computing αναδεικνύεται ως κρίσιμη για τη βιωσιμότητα και την αποδοτικότητα τέτοιων λύσεων.

Στον αγροτικό τομέα, οι τεχνολογίες αυτές μπορούν να συμβάλουν ουσιαστικά στη μετάβαση προς πιο έξυπνες και βιώσιμες καλλιεργητικές πρακτικές. Η παρακολούθηση περιβαλλοντικών παραμέτρων, η αυτοματοποίηση διαδικασιών και η βελτιστοποίηση της χρήσης φυσικών πόρων οδηγούν σε αύξηση της παραγωγικότητας και στην σταδιακή μείωση του κόστους.

Στον τομέα της υγείας, η τηλεϊατρική και οι απομακρυσμένες υπηρεσίες παρακολούθησης ασθενών προσφέρουν λύσεις σε περιοχές με περιορισμένη πρόσβαση σε ιατρικές δομές, βελτιώνοντας την ποιότητα της παρεχόμενης φροντίδας και μειώνοντας τις ανισότητες. Χαρίζοντας έτσι μια ευκαιρία σε όλους τους ανθρώπους για καλύτερη ζωή και καλύτερη καθημερινότητα, με στόχο την έγκυρη πρόληψη και την αποτελεσματική θεραπεία.

Στον τομέα της εκπαίδευσης, οι ψηφιακές πλατφόρμες και η εξ αποστάσεως μάθηση δίνουν τη δυνατότητα πρόσβασης σε εκπαιδευτικό υλικό και γνώση, ανεξάρτητα από τη γεωγραφική θέση. Χτίζοντας μια καλύτερη κοινωνική δομή και επιτρέποντας στους νέους αλλά και τους μεγαλύτερους να ακολουθήσουν τα όνειρά τους και να βελτιώσουν την ποιότητα της ζωής τους.

Παρά τα πλεονεκτήματα, η υλοποίηση τέτοιων συστημάτων συνοδεύεται από σημαντικές τεχνικές και κοινωνικές προκλήσεις. Ζητήματα όπως η αξιοπιστία της σύνδεσης, η ασφάλεια των δεδομένων, η προστασία της ιδιωτικότητας και η ποιότητα υπηρεσίας πρέπει να λαμβάνονται σοβαρά υπόψη. Επιπλέον, η έλλειψη πολιτικών πρωτοβουλιών, ο ψηφιακός αναλφαριθμητισμός και η περιορισμένη εξοικείωση των χρηστών με τις νέες τεχνολογίες μπορούν να αποτελέσουν ανασταλτικούς παράγοντες, αν δεν συνοδεύονται από κατάλληλες δράσεις εκπαίδευσης και υποστήριξης.

Η εργασία ανέδειξε επίσης ότι η επιτυχία τέτοιων παρεμβάσεων δεν εξαρτάται αποκλειστικά από την τεχνολογία, αλλά και από τον σωστό σχεδιασμό, τη θεσμική υποστήριξη και τη συνεργασία μεταξύ κρατικών φορέων, παρόχων υπηρεσιών και τοπικών κοινοτήτων. Η ανάπτυξη τηλεπικοινωνιακών υποδομών πρέπει να εντάσσεται σε ένα ευρύτερο πλαίσιο βιώσιμης ανάπτυξης, το οποίο λαμβάνει υπόψη τις κοινωνικές και οικονομικές ιδιαιτερότητες κάθε περιοχής. Πρέπει να δίνεται έμφαση και ερεθίσματα για χρήση και υιοθέτηση της τεχνολογίας. Είναι αρκετά ξεκάθαρο, ότι η υλοποίηση ενός τηλεπικοινωνιακού δικτύου από μόνη της δεν είναι επαρκή για την χρησιμοποίησή του. Απαιτούνται στοχευμένες και μεθοδευμένες δράσεις με στόχο την ομαλή εξοικείωση και την υιοθέτηση των εφαρμογών που μπορεί να προσφέρει ένα τηλεπικοινωνιακό δίκτυο.

Συνοψίζοντας, η παρούσα πτυχιική εργασία αναδεικνύει ότι η ανάπτυξη και η αναβάθμιση των τηλεπικοινωνιακών δικτύων σε αγροτικές και απομακρυσμένες περιοχές αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για τη μείωση του ψηφιακού χάσματος και τη βελτίωση της ποιότητας ζωής. Η αξιοποίηση σύγχρονων τεχνολογιών επιτρέπει την ισότιμη πρόσβαση σε υπηρεσίες υγείας και εκπαίδευσης, ενώ παράλληλα δημιουργεί νέες προοπτικές για την ενίσχυση της παραγωγικότητας και της βιωσιμότητας της γεωργίας μέσω έξυπνων εφαρμογών και αυτοματισμών.

Βιβλιογραφικές αναφορές

- [1] M. Khaturia, P. Jha, and A. Karandikar, "Connecting the Unconnected: Toward Frugal 5G Network Architecture and Standardization," *IEEE Communications Standards Magazine*, vol. 4, no. 2, pp. 64–71, Jun. 2020, doi: 10.1109/MCOMSTD.001.1900006.
- [2] A. M. Cavalcante, M. V. Marquezini, L. Mendes, and C. S. Moreno, "5G for Remote Areas: Challenges, Opportunities and Business Modeling for Brazil," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 10829–10843, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3050742.
- [3] T. Ahmmed, A. Alidadi, Z. Zhang, A. U. Chaudhry, and H. Yanikomeroglu, "The Digital Divide in Canada and the Role of LEO Satellites in Bridging the Gap," *IEEE Communications Magazine*, vol. 60, no. 6, pp. 24–30, Jun. 2022, doi: 10.1109/MCOM.001.2100795.
- [4] *Gain edge for the 6G era : 2nd 6G Wireless Summit 2020 : 17-20 March 2020*, Levi, Lapland. IEEE, 2020.
- [5] D. Sector, *Telecommunications/ICTs for rural and remote areas ITUPublications International Telecommunication Union*. 2018.
- [6] M. D. J. Williams, "DEVELOPING BACKBONE COMMUNICATIONS NETWORKS."
- [7] "BROADBAND INFRASTRUCTURE Middle-Mile Grant Program Lacked Timely Performance Goals and Targeted Measures Report to Congressional Requesters United States Government Accountability Office," 2023.
- [8] I. Telecommunication Union, "GSR 2010: Discussion Papers," 2010.
- [9] "The Significance of Backbone Networks The Role of Backbone Networks in Delivering Telecommunications Services."
- [10] Y. Antoni and M. Asvial, "Strategy of national fiber optic backbone network utilization enhancement in rural area of Indonesia," in *2nd IEEE International Conference on Innovative Research and Development, ICIRD 2019*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Jun. 2019. doi: 10.1109/ICIRD47319.2019.9074750.
- [11] A. S. -, "The Impact of Fiber Broadband on Rural and Underserved Communities," *International Journal For Multidisciplinary Research*, vol. 4, no. 1, Jan. 2022, doi: 10.36948/ijfmr.2022.v04i01.38541.
- [12] E. J. Malecki, "Digital development in rural areas: Potentials and pitfalls," *J. Rural Stud.*, vol. 19, no. 2, pp. 201–214, Apr. 2003, doi: 10.1016/S0743-0167(02)00068-2.
- [13] "Rural Broadband Backbone: A case study of different approaches and potential." [Online]. Available: www.idrc.ca/openebooks/378-2
- [14] J. Toscano *et al.*, "Satellite as an effective and compelling solution to overcome the digital divide."
- [15] A. Lee González Fanfalone, V. Weber, Y. Yokomori, and S. Paltridge, "THE EVOLVING ROLE OF SATELLITE NETWORKS IN RURAL AND REMOTE BROADBAND ACCESS 2 OECD DIGITAL ECONOMY PAPERS," 2017.
- [16] "Broadband Situations in Rural and Remote Areas." [Online]. Available: <http://esa.un.org/Unpd/Wup/CD-ROM/Default.aspx>
- [17] "Regulation of global Broadband satellite communications broadband series Regulatory & market environment." [Online]. Available: www.itu.int
- [18] "[359] IRJET-V5I3667".
- [19] R. Shetty, P. Suthar, V. Agarwal, and A. Jangam, "White Paper-Cisco External 4G and 5G Migration and Interworking Strategy," 2020.
- [20] C. A. Farinha and F. C. Martins, "5G Internet in Rural Areas: Impacts, Challenges and Sustainable Strategies for Development," *Revista de Gestão Social e Ambiental*, vol. 19, no. 1, p. e011106, Feb. 2025, doi: 10.24857/rgsa.v19n1-177.
- [21] A. S. Biswas, S. Sil, R. Bera, and M. Mitra, "Integrated Access and Backhaul based 5G Connectivity for Rural Indian Sectors – Ending the Digital Divide," *International Journal of Electronics and Telecommunications*, vol. 67, no. 4, pp. 655–663, 2021, doi:

- 10.24425/ijet.2021.137859.
- [22] R. Lombardi, "Microwave and Millimetre-wave for 5G Transport." [Online]. Available: www.etsi.org
- [23] "INTERNATIONAL ROADMAP FOR DEVICES AND SYSTEMS™ 2024 EDITION OUTSIDE SYSTEM CONNECTIVITY THE IRDS IS DEvised AND INTENDED FOR TECHNOLOGY ASSESSMENT ONLY AND IS WITHOUT REGARD TO ANY," 2024.
- [24] Occ, "INTERNET FOR ALL Frequently Asked Questions and Answers Version 3.0 Enabling Middle Mile Broadband Infrastructure Note."
- [25] "Oregon Broadband Middle-Mile Infrastructure Planning Group Report and Recommendations," 2021.
- [26] "Concept Paper on TV White Spaces (TVWS)."
- [27] I. B. Salas and M. S. Castañer, *CASE STUDIES Radio Communications Systems in rural environments*. [Online]. Available: <http://gdee.eu/index.php/resources.html>
- [28] "[373] tvws".
- [29] M. Rahman and A. Saifullah, "A Comprehensive Survey on Networking over TV White Spaces," Aug. 2019, doi: 10.1016/j.pmcj.2019.101072.
- [30] I. S. Tognisse, A. D. Kora, and J. Degila, "Cloud-RAN and Coverage Gap in Rural Areas," in *10th IEEE International Conference on Communication, Networks and Satellite, Comnetsat 2021 - Proceedings*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Jul. 2021, pp. 329–336. doi: 10.1109/COMNETSAT53002.2021.9530816.
- [31] D. Sector, "The Last-mile Internet Connectivity Solutions Guide Sustainable connectivity options for unconnected sites 2020."
- [32] "Broadband last-mile connectivity model for effective bandwidth utilization in rural and urban-underserved areas," Nelson Mandela African Institution of Science and Technology, Arusha, 2019. doi: 10.58694/20.500.12479/306.
- [33] B. Bellalta, L. Bononi, R. Bruno, and A. Kassler, "Next generation IEEE 802.11 Wireless Local Area Networks: Current status, future directions and open challenges," Sep. 2021, doi: 10.1016/j.comcom.2015.10.007.
- [34] A. Hameed, A. N. Mian, and J. Qadir, "Low-cost sustainable wireless Internet service for rural areas," *Wireless Networks*, vol. 24, no. 5, pp. 1439–1450, Jul. 2018, doi: 10.1007/s11276-016-1415-8.
- [35] G. Koulouras, S. Katsoulis, and F. Zantalis, "Evolution of Bluetooth Technology: BLE in the IoT Ecosystem," Feb. 01, 2025, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*. doi: 10.3390/s25040996.
- [36] S. Bosse, "BeeTS: Smart Distributed Sensor Tuple Spaces combined with Agents using Bluetooth and IP Broadcasting."
- [37] A. Nikoukar, S. Raza, A. Poole, M. Gunes, and B. Dezfouli, "Low-power wireless for the internet of things: Standards and applications," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 67893–67926, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2879189.
- [38] K. Pooja and R. Scholar, "International Research Literature Survey on ZigBee / IEEE 802.15.4 System Implementation." [Online]. Available: www.ijtsrd.com
- [39] Y. Paul and R. Singh, "ZigBee Technology: A Comprehensive Review of Protocol, Applications, and Advancements," *IJRDO -Journal of Computer Science Engineering*, 2015, doi: 10.53555/cse.v1i2.6309.
- [40] N. M. Obiri and H. Shikunzi, "Long-Range Wide Area Network (LoRa-WAN) Connectivity and Range Evaluation in a Rural Setting," *Int. J. Comput. Appl.*, vol. 185, no. 3, pp. 61–67, Apr. 2023, doi: 10.5120/ijca2023922699.
- [41] "WHY LORAWAN® IS THE LOGICAL CHOICE FOR CROP PRODUCTION MONITORING SOLUTIONS." [Online]. Available: www.lora-alliance.org
- [42] B. Michel Gilbert, K. LoRa Alliance, and L. Alliance, "LoRaWAN® Gateways: Radio Coexistence Issues and Solutions." [Online]. Available: www.lora-alliance.org
- [43] M. N. Mowla, N. Mowla, A. F. M. Shahen Shah, K. Rabie, and T. Shongwe, "Date of publication

- xxxx 00, 0000, date of current version xxxx 00, 0000. Internet of Things and Wireless Sensor Networks for Smart Agriculture Applications-A Survey”, doi: 10.1109/ACCESS.2023.0322000.
- [44] A. Bhavani and J. Rani, “Title A Survey On Wireless Sensor Network Challenges To Secure Your Paper As Per UGC Guidelines We Are Providing A Electronic Bar Code A Survey On Wireless Sensor Network Challenges,” vol. 11, 2022, doi: 10.48047/IJIEMR/V11/I04/55.
- [45] A. Z. Bayih, J. Morales, Y. Assabie, and R. A. de By, “Utilization of Internet of Things and Wireless Sensor Networks for Sustainable Smallholder Agriculture,” May 01, 2022, *MDPI*. doi: 10.3390/s22093273.
- [46] A. Gábor and Z. Szabó, “Smart agriculture,” *Smart Business and Digital Transformation*, pp. 171–179, 2023, doi: 10.4324/9781003390312-18.
- [47] V. K. Quy *et al.*, “IoT-Enabled Smart Agriculture: Architecture, Applications, and Challenges,” *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 12, no. 7, 2022, doi: 10.3390/app12073396.
- [48] J. Wu, S. Guo, H. Huang, W. Liu, and Y. Xiang, “Information and communications technologies for sustainable development goals: State-of-the-art, needs and perspectives,” *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 20, no. 3, pp. 2389–2406, Jul. 2018, doi: 10.1109/COMST.2018.2812301.
- [49] A. R. Nimodiya and S. S. Ajankar, “ICT in Rural Development : Application and Challenges - A Review,” *Int. J. Sci. Res. Sci. Technol.*, pp. 464–472, 2021, doi: 10.32628/ijrsr218664.
- [50] S. Velten, J. Leventon, N. Jager, and J. Newig, “What is sustainable agriculture? A systematic review,” *Sustainability (Switzerland)*, vol. 7, no. 6, pp. 7833–7865, 2015, doi: 10.3390/su7067833.
- [51] D. C. Rose and J. Chilvers, “Agriculture 4.0: Broadening Responsible Innovation in an Era of Smart Farming,” *Front. Sustain. Food Syst.*, vol. 2, no. December, pp. 1–7, 2018, doi: 10.3389/fsufs.2018.00087.
- [52] F. Zhang, Y. Zhang, W. Lu, Y. Gao, Y. Gong, and J. Cao, “6G-Enabled Smart Agriculture: A Review and Prospect,” *Electronics (Switzerland)*, vol. 11, no. 18, pp. 1–23, 2022, doi: 10.3390/electronics11182845.
- [53] S. Verma, R. Gala, S. Madhavan, S. Burkule, S. Chauhan, and C. Prakash, “An Internet of Things (IoT) Architecture for Smart Agriculture,” *Proceedings - 2018 4th International Conference on Computing, Communication Control and Automation, ICCUBEA 2018*, pp. 1–4, 2018, doi: 10.1109/ICCUBEA.2018.8697707.
- [54] L. García, L. Parra, J. M. Jimenez, J. Lloret, and P. Lorenz, “IoT-based smart irrigation systems: An overview on the recent trends on sensors and iot systems for irrigation in precision agriculture,” *Sensors (Switzerland)*, vol. 20, no. 4, 2020, doi: 10.3390/s20041042.
- [55] L. Tomaszewski and R. Kołakowski, “Mobile Services for Smart Agriculture and Forestry, Biodiversity Monitoring, and Water Management: Challenges for 5G/6G Networks,” *Telecom*, vol. 4, no. 1, pp. 67–99, 2023, doi: 10.3390/telecom4010006.
- [56] I. Jur, “IoT applications in Rural and Agriculture,” no. August, 2020, doi: 10.13140/RG.2.2.35160.52482.
- [57] K. Pakeerathan *et al.*, *Agriculture for Developing Nations*. doi: 10.1007/978-981-19-8738-0.
- [58] P. K. Singh, B. K. Bhargava, M. Paprzycki, · Narottam, C. Kaushal, and W.-C. Hong, *Advances in Intelligent Systems and Computing 1132 Handbook of Wireless Sensor Networks: Issues and Challenges in Current Scenario's*. 2020. [Online]. Available: <http://www.springer.com/series/11156>
- [59] M. R. M. Kassim, “IoT Applications in Smart Agriculture: Issues and Challenges,” *2020 IEEE Conference on Open Systems, ICOS 2020*, pp. 19–24, 2020, doi: 10.1109/ICOS50156.2020.9293672.
- [60] E. Avşar and M. N. Mowla, “Wireless communication protocols in smart agriculture: A review on applications, challenges and future trends,” *Ad Hoc Networks*, vol. 136, no. August, 2022, doi: 10.1016/j.adhoc.2022.102982.
- [61] J. Xu, B. Gu, and G. Tian, “Review of agricultural IoT technology,” *Artificial Intelligence in Agriculture*, vol. 6, pp. 10–22, 2022, doi: 10.1016/j.aiaa.2022.01.001.

- [62] O. Elijah, T. A. Rahman, I. Orikumhi, C. Y. Leow, and M. N. Hindia, "An Overview of Internet of Things (IoT) and Data Analytics in Agriculture: Benefits and Challenges," *IEEE Internet Things J.*, vol. 5, no. 5, pp. 3758–3773, 2018, doi: 10.1109/JIOT.2018.2844296.
- [63] A. Salam, *Internet of things for sustainable community development: Introduction and overview*, no. March. 2020. doi: 10.1007/978-3-030-35291-2_1.
- [64] A. T. H. E. Connectivity and D. U. E. D. Challenges, "Prerequisites to digitising the agricultural last mile".
- [65] H. M. Jawad, R. Nordin, S. K. Gharghan, A. M. Jawad, and M. Ismail, "Energy-efficient wireless sensor networks for precision agriculture: A review," *Sensors (Switzerland)*, vol. 17, no. 8, 2017, doi: 10.3390/s17081781.
- [66] A. Lavric, A. I. Petrariu, and V. Popa, "Long Range SigFox Communication Protocol Scalability Analysis under Large-Scale, High-Density Conditions," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 35816–35825, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2903157.
- [67] S. Boruah, M. Pathak, K. Sarmah, and B. K. Sahoo, "Internet of Things (IoT) in Precision Agriculture," *Futuristic Trends in Agriculture Engineering & Food Sciences Volume 3 Book 6*, no. April, pp. 21–31, 2024, doi: 10.58532/v3bcag6p1ch3.
- [68] D. Cisterna, S. Seibel, S. Oprach, and S. Haghsheno, *Artificial Intelligence for the Construction Industry - A Statistical Descriptive Analysis of Drivers and Barriers*. 2022. doi: 10.1007/978-3-030-87687-6_27.
- [69] G. Valecce, S. Strazzella, A. Radesca, and L. A. Grieco, "Solarfertigation: Internet of things architecture for smart agriculture," *2019 IEEE International Conference on Communications Workshops, ICC Workshops 2019 - Proceedings*, no. 2, pp. 1–6, 2019, doi: 10.1109/ICCW.2019.8756735.
- [70] D. Glaroudis, A. Iossifides, and P. Chatzimisios, "Survey, comparison and research challenges of IoT application protocols for smart farming," *Computer Networks*, vol. 168, p. 107037, 2020, doi: 10.1016/j.comnet.2019.107037.
- [71] R. Prathipa, D. Kalaiarasi, P. Prakash Raj, K. Sasidharan, S. S. Kumar, and U. G. Scholar, "Lora Based Smart Irrigation System for Remote Areas," *International Research Journal of Engineering and Technology*, pp. 160–164, 2021, [Online]. Available: www.irjet.net
- [72] T. Ojha, S. Misra, and N. S. Raghuvanshi, "Wireless sensor networks for agriculture: The state-of-the-art in practice and future challenges," Oct. 01, 2015, *Elsevier B.V.* doi: 10.1016/j.compag.2015.08.011.
- [73] F. Adenugba, S. Misra, R. Maskeliūnas, R. Damaševičius, and E. Kazanavičius, "Smart irrigation system for environmental sustainability in Africa: An Internet of Everything (IoE) approach," *Mathematical Biosciences and Engineering*, vol. 16, no. 5, pp. 5490–5503, 2019, doi: 10.3934/mbe.2019273.
- [74] L. Hamami and B. Nassereddine, "Integration of irrigation system with wireless sensor networks: Prototype and conception of intelligent irrigation system," *Lecture Notes in Engineering and Computer Science*, vol. 2238, pp. 56–62, 2018.
- [75] D. Čulibrk, D. Vukobratovic, V. Minic, M. Alonso Fernandez, J. Alvarez Osuna, and V. Crnojevic, *Sensing Technologies For Precision Irrigation*. 2014. [Online]. Available: <http://link.springer.com/10.1007/978-1-4614-8329-8>
- [76] S. Renke and C. Technology, "LORA Communication-based Data Acquisition and Wireless Irrigation Control System Solutions".
- [77] S. R. Allanki, C. Jyothiinstitute, and O. Technology, "SMART AGRICULTURE WITH INTERNET OF THINGS AND UNMANNED AERIAL SMART AGRICULTURE WITH INTERNET OF THINGS AND," no. June, 2022, doi: 10.14704/NQ.2022.20.6.NQ22966.
- [78] P. K. R. Maddikunta *et al.*, "Unmanned Aerial Vehicles in Smart Agriculture: Applications, Requirements and Challenges," Jul. 2020, doi: 10.1109/JSEN.2021.3049471.
- [79] P. Daponte *et al.*, "A review on the use of drones for precision agriculture," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 275, no. 1, 2019, doi: 10.1088/1755-1315/275/1/012022.
- [80] M. Behjati, A. B. Mohd Noh, H. A. H. Alobaidy, M. A. Zulkifley, R. Nordin, and N. F. Abdullah,

- "LoRa communications as an enabler for internet of drones towards large-scale livestock monitoring in rural farms," *Sensors*, vol. 21, no. 15, 2021, doi: 10.3390/s21155044.
- [81] *2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. IEEE, 2020.
- [82] M. A. Alanezi, M. S. Shahriar, M. B. Hasan, S. Ahmed, Y. A. Sha'aban, and H. R. E. H. Bouchekara, "Livestock Management With Unmanned Aerial Vehicles: A Review," 2022, *Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.* doi: 10.1109/ACCESS.2022.3168295.
- [83] D. K. Singh, R. Sobti, A. Jain, P. K. Malik, and D. N. Le, "LoRa based intelligent soil and weather condition monitoring with internet of things for precision agriculture in smart cities," *IET Communications*, vol. 16, no. 5, pp. 604–618, Mar. 2022, doi: 10.1049/cmu2.12352.
- [84] A. Caruso, S. Chessa, S. Escolar, J. Barba, and J. C. Lopez, "Collection of Data with Drones in Precision Agriculture: Analytical Model and LoRa Case Study," *IEEE Internet Things J.*, vol. 8, no. 22, pp. 16692–16704, Nov. 2021, doi: 10.1109/JIOT.2021.3075561.
- [85] İ. Ünal and M. Topakci, "Design of a Remote-controlled and GPS-guided Autonomous Robot for Precision Farming," *Int. J. Adv. Robot. Syst.*, vol. 12, no. 12, Dec. 2015, doi: 10.5772/62059.
- [86] A. Khan, M. Bashir, S. Aziz, and U. Khan, "IoT and Wireless Sensor Network based Autonomous Farming Robot."
- [87] O. Nerella, "Internet of Things (IOT) Based Weather Monitoring system", doi: 10.17148/IJARCC.2016.5966.
- [88] M. H. Anik, M. Haque, F. R. Sajid, and M. M. Khan, "Design of IoT based Weather Monitoring System," in *Proceedings - 6th International Conference on Computing Methodologies and Communication, ICCMC 2022*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2022. doi: 10.1109/ICCMC53470.2022.9753911.
- [89] E. A. Moussati, "AFRIMED AJ-AI Awamia (132)," 2021.
- [90] G. Singh and S. Sharma, "A comprehensive review on the Internet of Things in precision agriculture," *Multimed. Tools Appl.*, 2024, doi: 10.1007/s11042-024-19656-0.
- [91] M. S. Rahman Al Nahian, A. P. Biswas, J. C. Tsou, and H. Rahman, "IOT BASED SOIL MONITORING AND AUTOMATIC IRRIGATION SYSTEM IN THE RURAL AREA OF BANGLADESH," *Acta Mechatronica*, vol. 6, no. 3, pp. 29–40, Sep. 2021, doi: 10.22306/am.v6i3.71.
- [92] *2019 IEEE International Workshop on Metrology for Agriculture and Forestry : proceedings : Portici, Italy, October 24-26, 2019*. IEEE, 2019.
- [93] Don. Popescu, Dorin. Şendrescu, Monica. Roman, Elvira. Popescu, and Lucian. Bărbulescu, *2017 18th International Carpathian Control Conference (ICCC) : Palace Hotel, Sinaia, Romania, May 28-31, 2017*. IEEE, 2017.
- [94] M. Z. Sharif, N. Di, and F. Liu, "Monitoring honeybees (*Apis* spp.) (Hymenoptera: Apidae) in climate-smart agriculture: A review," Nov. 01, 2022, *Springer*. doi: 10.1007/s13355-021-00765-3.
- [95] M. Thillai Rani, R. S. G, S. D. Govardhan, D. Svelmurugan, J. Rejina Parvin, and P. Rohini, "IOT BASED SMART AND ECONOMIC GREENHOUSE MONITORING AND AUTO-TUNED CONTROL SYSTEM FOR RURAL FARMING," *J. Theor. Appl. Inf. Technol.*, vol. 102, no. 8, 2024, [Online]. Available: www.jatit.org
- [96] R. R. Shamshiri *et al.*, "Advances in greenhouse automation and controlled environment agriculture: A transition to plant factories and urban agriculture," *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, vol. 11, no. 1, pp. 1–22, 2018, doi: 10.25165/j.ijabe.20181101.3210.
- [97] A. Umarov, B. Belgibaev, M. Grif, M. Mansurova, and S. Kulmamirov, "Smart greenhouse and plant growth control," *Original Research*, vol. 9, no. 3, pp. 474–493, 2021.
- [98] Y. Dong *et al.*, "Automatic System for Crop Pest and Disease Dynamic Monitoring and Early Forecasting," *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens.*, vol. 13, pp. 4410–4418, 2020, doi: 10.1109/JSTARS.2020.3013340.
- [99] V. Sharma, A. K. Tripathi, and H. Mittal, "Technological Advancements in Automated Crop Pest and Disease Detection: A Review & Ongoing Research," in *Proceedings of International Conference on Computing, Communication, Security and Intelligent Systems, IC3SIS 2022*,

- Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2022. doi: 10.1109/IC3SIS54991.2022.9885605.
- [100] L. C. Ngugi, M. Abelwahab, and M. Abo-Zahhad, "Recent advances in image processing techniques for automated leaf pest and disease recognition – A review," Mar. 01, 2021, *China Agricultural University*. doi: 10.1016/j.inpa.2020.04.004.
- [101] A. Albanese, M. Nardello, and D. Brunelli, "Automated Pest Detection with DNN on the Edge for Precision Agriculture," *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Circuits Syst.*, vol. 11, no. 3, pp. 458–467, Sep. 2021, doi: 10.1109/JETCAS.2021.3101740.
- [102] *Proceedings of IEEE CONECCT 2020 : 6th International Conference on Electronics, Computing and Communication Technologies : July 2-4, 2020*. IEEE, 2020.
- [103] E. Kramer, R. Szewczyk, and K. Rzeplinska, "INTEGRATED SYSTEM FOR MONITORING CRITICAL PARAMETERS OF FOOD STORAGE." [Online]. Available: www.pan.olsztyn.pl/journal/
- [104] "[302]editor_in_chief,+ejece_386".
- [105] A. S. Schuler, I. Fagarasan, V. Calofir, N. Arghira, M. S. Simoiu, and S. S. Iliescu, "New Trends in Automation Applied to Monitor and Control Grain Quality in Silos," in *2024 24th IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics, AQTR 2024 - Proceedings*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2024. doi: 10.1109/AQTR61889.2024.10554103.
- [106] M. N. Lakhous, "APPLICATION OF SYSTEM ANALYSIS IN ORDER TO MONITOR GRAIN SILOS," 2019.
- [107] N. Mohammadzadeh, S. Rezayi, and S. Saeedi, "Telemedicine for Patient Management in Remote Areas and Underserved Populations," May 19, 2023, *Cambridge University Press*. doi: 10.1017/dmp.2022.76.
- [108] D. Sector, "The Last-mile Internet Connectivity Solutions Guide Sustainable connectivity options for unconnected sites 2020."
- [109] *Wireless Telecommunications Symposium (WTS), 2011 : date, 13-15 April 2011*. [IEEE], 2011.
- [110] V. P. Gurupur and Z. Miao, "A brief analysis of challenges in implementing telehealth in a rural setting," Apr. 01, 2022, *AME Publishing Company*. doi: 10.21037/mhealth-21-38.
- [111] H. M. Lestari, A. V. Miranda, and A. Fuady, "Barriers to telemedicine adoption among rural communities in developing countries: A systematic review and proposed framework," Jul. 01, 2024, *Elsevier B.V.* doi: 10.1016/j.cegh.2024.101684.
- [112] V. P. Gurupur and Z. Miao, "A brief analysis of challenges in implementing telehealth in a rural setting," Apr. 01, 2022, *AME Publishing Company*. doi: 10.21037/mhealth-21-38.
- [113] "DIGITAL DIVIDENDS world development report."
- [114] *2013 National Conference on Communications (NCC) : Indian Institute of Technology Delhi, New Delhi, India, February 15-17, 2013*. IEEE, 2013.
- [115] H. M. Lestari, A. V. Miranda, and A. Fuady, "Barriers to telemedicine adoption among rural communities in developing countries: A systematic review and proposed framework," Jul. 01, 2024, *Elsevier B.V.* doi: 10.1016/j.cegh.2024.101684.
- [116] D. Sector, "The Last-mile Internet Connectivity Solutions Guide Sustainable connectivity options for unconnected sites 2020."
- [117] R. I. García-Betances and M. K. Huerta, "Guidelines for designing wireless communications for rural telemedicine in developing countries," *J. Telemed. Telecare*, vol. 18, no. 2, pp. 122–123, Mar. 2012, doi: 10.1258/jtt.2011.110003.
- [118] H. Kefie, S. Demessie Bogale, and H. K. Tamiru, "Telecommunication Network Architecture for Telemedicine in Ethiopia and its Applicability." [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/344949287>
- [119] T. Rahman, A. Hossain, and M. A. Hossain, "Peoples' Perception towards Telemedicine: A Case Study on Rural Area of Bangladesh Information and Knowledge Management Peoples' Perception towards Telemedicine: A Case Study on Rural Area of Bangladesh," vol. 6, no. 4, 2016, [Online]. Available: www.iiste.org
- [120] S. H. Choudhury, C. B. Peterson, S. Kyriazakos, and N. R. Prasad, "A novel hierarchical semi-

- centralized telemedicine network architecture proposition for Bangladesh,” in *IFMBE Proceedings*, 2011, pp. 176–179. doi: 10.1007/978-3-642-21683-1_44.
- [121] W. Duan, Y. Ji, Y. Zhang, G. Zhang, V. Frascolla, and X. Li, “5G Technologies Based Remote E-Health: Architecture, Applications, and Solutions,” Sep. 2020, [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/2009.02131>
- [122] “North and Mid Hampshire Integrated Care Partnership Remote Consultation Case Study,” 2020.
- [123] C. O. Alenoghena *et al.*, “Telemedicine: A Survey of Telecommunication Technologies, Developments, and Challenges,” *Journal of Sensor and Actuator Networks*, vol. 12, no. 2, Apr. 2023, doi: 10.3390/jsan12020020.
- [124] A. Donawa and C. E. Baker, “Addressing the Need for Remote Patient Monitoring Applications in Appalachian Areas,” Feb. 2021, [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/2102.08512>
- [125] A. J. Elder, H. Alazawi, F. Shafaq, A. Ayyad, and R. Hazin, “Teleoncology: Novel Approaches for Improving Cancer Care in North America,” *Cureus*, Aug. 2023, doi: 10.7759/cureus.43562.
- [126] S. S. Hawkins, “Telehealth in the Prenatal and Postpartum Periods,” Jul. 01, 2023, *Elsevier B.V.* doi: 10.1016/j.jogn.2023.05.113.
- [127] S. Turkmani *et al.*, “An evaluation of the introduction of telehealth for remote antenatal and postnatal contacts in Bangladesh and Lao People’s Democratic Republic during the COVID-19 pandemic,” *PLOS Global Public Health*, vol. 3, no. 5, May 2023, doi: 10.1371/journal.pgph.0000786.
- [128] J. Atkinson, R. Hastie, S. Walker, A. Lindquist, and S. Tong, “Telehealth in antenatal care: recent insights and advances,” Dec. 01, 2023, *BioMed Central Ltd.* doi: 10.1186/s12916-023-03042-y.
- [129] W. Backman, D. Bendel, and R. Rakhit, “The telecardiology revolution: Improving the management of cardiac disease in primary care,” Nov. 01, 2010, *SAGE Publications Ltd.* doi: 10.1258/jrsm.2010.100301.
- [130] N. Mohammadzadeh, S. Rezayi, M. Tanhapour, and S. Saeedi, “Telecardiology interventions for patients with cardiovascular Disease: A systematic review on characteristics and effects,” Feb. 01, 2022, *Elsevier Ireland Ltd.* doi: 10.1016/j.ijmedinf.2021.104663.
- [131] R. Zeghari *et al.*, “Feasibility Study of an Internet-Based Platform for Tele-Neuropsychological Assessment of Elderly in Remote Areas,” *Diagnostics*, vol. 12, no. 4, Apr. 2022, doi: 10.3390/diagnostics12040925.
- [132] R. Zeghari *et al.*, “Pilot study to assess the feasibility of a mobile unit for remote cognitive screening of isolated elderly in rural areas,” *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 18, no. 11, Jun. 2021, doi: 10.3390/ijerph18116108.
- [133] A. König *et al.*, “Remote cognitive assessment of older adults in rural areas by telemedicine and automatic speech and video analysis: Protocol for a cross-over feasibility study,” *BMJ Open*, vol. 11, no. 9, Sep. 2021, doi: 10.1136/bmjopen-2020-047083.
- [134] Itu, *The State of Broadband 2019 Broadband as a Foundation for Sustainable Development*. 2019.
- [135] “Broadband Situations in Rural and Remote Areas.” [Online]. Available: <http://esa.un.org/Unpd/Wup/CD-ROM/Default.aspx>
- [136] R. for Question, “Question 5/1: Telecommunications/ICTs for rural and remote areas,” 2014. [Online]. Available: www.itu.int/pub/D-STG/
- [137] F. Mustafa, H. T. M. Nguyen, and X. (Andy) Gao, “The challenges and solutions of technology integration in rural schools: A systematic literature review,” *Int. J. Educ. Res.*, vol. 126, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.ijer.2024.102380.
- [138] P. K. A. Ahiaku, C. Uleanya, and G. C. Muyambi, “Rural schools and tech use for sustainability: the challenge of disconnection,” *Educ. Inf. Technol. (Dordr.)*, 2025, doi: 10.1007/s10639-024-13311-9.
- [139] G. K. Chandramoulesh, “Impact and Challenges of Digital Education in Rural Areas,” *RESEARCH REVIEW International Journal of Multidisciplinary*, vol. 10, no. 3, pp. 302–312, Mar. 2025, doi: 10.31305/rrijm.2025.v10.n3.034.

- [140] N. K. Das, S. Sahoo, and L. Pati, "Online Learning: Challenges for Education in Rural and Remote Areas," *IARJSET*, vol. 8, no. 7, pp. 72–76, Jul. 2021, doi: 10.17148/iarjset.2021.8712.
- [141] M. M. Lamola, "Performance Analysis of Hybrid WiFi and TV White Space Links."
- [142] D. Sector, "The Last-mile Internet Connectivity Solutions Guide Sustainable connectivity options for unconnected sites 2020."
- [143] M. Khalil, J. Qadir, O. Onireti, M. A. Imran, and S. Younis, "Feasibility, architecture and cost considerations of using TVWS for rural Internet access in 5G," in *Proceedings of the 2017 20th Conference on Innovations in Clouds, Internet and Networks, ICIN 2017*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Apr. 2017, pp. 23–30. doi: 10.1109/ICIN.2017.7899245.
- [144] J. L. E. Kedieng Fendji and J. M. Nlong, "Rural Wireless Mesh Network: A Design Methodology," *International Journal of Communications, Network and System Sciences*, vol. 08, no. 01, pp. 1–9, 2015, doi: 10.4236/ijcns.2015.81001.
- [145] R. for Question, "Question 5/1: Telecommunications/ICTs for rural and remote areas," 2014. [Online]. Available: www.itu.int/pub/D-STG/
- [146] J. Johansen, C. Johansen, and J. Noll, "InfoInternet for Education in the Global South: A Study of Applications Enabled by Free Information-only Internet Access in Technologically Disadvantaged Areas (authors' version)," Aug. 2018, doi: 10.1080/20421338.2021.1884326.
- [147] S. Hussain, Z. Wang, and S. Rahim, "E-learning Services for Rural Communities," *Int. J. Comput. Appl.*, vol. 68, no. 5, pp. 15–20, Apr. 2013, doi: 10.5120/11574-6888.
- [148] B. Ghimire, "Blended Learning in Rural and Remote Schools: Challenges and Opportunities," *International Journal of Technology in Education*, vol. 5, no. 1, pp. 88–96, Jan. 2022, doi: 10.46328/ijte.215.
- [149] A. Apriyanto, A. Hossam, Y. Abed, and R. Anggara, "Exploring the Scalability of 5G-Enabled E-Learning Platforms in Rural Areas," *Journal Emerging Technologies in Education*, vol. 2, no. 4, Dec. 2024, doi: 10.70177/jete.v2i4.1367.
- [150] K. Banleman, "Digital Transformation in School Libraries Management: Evaluating the Effect of Technology Integration on Student Learning and Library Services," 2025. [Online]. Available: <https://acr-journal.com/>
- [151] M. J. Mamabolo and O. O. Durodolu, "Rural accessibility to digital libraries: requirements and challenges," *Digit. Libr. Perspect.*, vol. 39, no. 4, pp. 551–570, Nov. 2023, doi: 10.1108/DLP-04-2023-0025.
- [152] K. Linzy and L. Hosman, "The SolarSPELL Offline Digital library," 2018. [Online]. Available: <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>
- [153] L. Hosman, M. G. Gómez Zermeño, and L. A. de la Garza, "SolarSPELL assessment: Impact of a solar-powered digital library as a teaching-learning resource on climate change," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 12, no. 16, Aug. 2020, doi: 10.3390/su12166636.
- [154] E. Paget, "Online Skills in an Offline Environment: Creating Information Literacy Tutorials for the SolarSPELL Offline Digital Library." [Online]. Available: www.SolarSPELL.org