



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΒΙΟΙΑΤΡΙΚΗ

**Συγκρότηση Έξυπνων Συστημάτων με χρήση ευρυζωνικής
υποδομής 5G για τον εκσυγχρονισμό του πρωτογενούς τομέα
(καλλιέργεια, αγροτική παραγωγή, κτηνοτροφία)**

Ευθύμιος Κορτσέλης

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
Επιβλέπων Καθηγητής
Δρ. Θεόδωρος Τσιφτσής

Λαμία, Οκτώβριος 2022



UNIVERSITY OF THESSALY
SCHOOL OF SCIENCE
INFORMATICS AND COMPUTATIONAL BIOMEDICINE

**Modernizing the primary sector through implementation of Smart
Systems using 5G broadband infrastructure (farming, agriculture,
livestock breeding)**

Efthymios Kortselis

Master Thesis
Supervisor
Dr. Theodoros Tsiftsis

Lamia, October 2022



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΒΙΟΙΑΤΡΙΚΗ**

**ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ
«ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗ ΤΗΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ, ΤΗΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΜΕΓΑΛΟΥ
ΟΓΚΟΥ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΚΑΙ ΤΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ»**

**Συγκρότηση Έξυπνων Συστημάτων με χρήση ευρυζωνικής υποδομής
5G για τον εκσυγχρονισμό του πρωτογενούς τομέα (καλλιέργεια,
αγροτική παραγωγή, κτηνοτροφία)**

Ευθύμιος Κορτσέλης

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
Επιβλέπων Καθηγητής
Δρ. Θεόδωρος Τσιφτσής**

Λαμία, Οκτώβριος 2022

«Υπεύθυνη Δήλωση μη λογοκλοπής και ανάληψης προσωπικής ευθύνης»

Με πλήρη επίγνωση των συνεπειών του νόμου περί πνευματικών δικαιωμάτων, και γνωρίζοντας τις συνέπειες της λογοκλοπής, δηλώνω υπεύθυνα και ενυπογράφως ότι η παρούσα εργασία με τίτλο «Συγκρότηση Έξυπνων Συστημάτων με χρήση ευρυζωνικής υποδομής 5G για τον εκσυγχρονισμό του πρωτογενούς τομέα (καλλιέργεια, αγροτική παραγωγή, κτηνοτροφία)» αποτελεί προϊόν αυστηρά προσωπικής εργασίας και όλες οι πηγές από τις οποίες χρησιμοποίησα δεδομένα, ιδέες, φράσεις, προτάσεις ή λέξεις, είτε επακριβώς (όπως υπάρχουν στο πρωτότυπο ή μεταφρασμένες) είτε με παράφραση, έχουν δηλωθεί κατάλληλα και ευδιάκριτα στο κείμενο με την κατάλληλη παραπομπή και η σχετική αναφορά περιλαμβάνεται στο τμήμα των βιβλιογραφικών αναφορών με πλήρη περιγραφή. Αναλαμβάνω πλήρως, ατομικά και προσωπικά, όλες τις νομικές και διοικητικές συνέπειες που δύναται να προκύψουν στην περίπτωση κατά την οποία αποδειχθεί, διαχρονικά, ότι η εργασία αυτή ή τμήμα της δεν μου ανήκει διότι είναι προϊόν λογοκλοπής.

Ο ΔΗΛΩΝ

Ημερομηνία

Υπογραφή

**Συγκρότηση Έξυπνων Συστημάτων με χρήση ευρυζωνικής υποδομής
5G για τον εκσυγχρονισμό του πρωτογενούς τομέα (καλλιέργεια,
αγροτική παραγωγή, κτηνοτροφία)**

Ευθύμιος Κορτσέλης

Τριμελής Επιτροπή:

Δρ. Θεόδωρος Τσιφτσής, Καθηγητής, Τ.Π.&Τ.

Δρ. Παναγιώτης Βαρζάκας, Καθηγητής Τ.Π.&Τ.

Δρ. Θεόφιλος Χρυσικός, Ακαδ. Υπότροφος

Επιστημονικός Σύμβουλος:

Δρ. Θεόφιλος Χρυσικός

Περίληψη

Στα πλαίσια της παρούσας Μεταπτυχιακής εργασίας, παρουσιάζεται αναλυτικά η συγκρότηση των Έξυπνων Συστημάτων που έχουν αναπτυχθεί με βάση την αρχιτεκτονική του Διαδικτύου των Πραγμάτων (Internet of Things – IoT), για την εξυπηρέτηση της αυξανόμενης ζήτησης των παραγωγικών φορέων του πρωτογενούς τομέα για τέτοια συστήματα, ώστε να συμβαδίσουν με τους υπόλοιπους τομείς της Βιομηχανίας 4.0 στα νέα τεχνολογικά δεδομένα. Η αρωγή της ευρυζωνικής υποδομής 5G σε αυτήν την προσπάθεια παίζει τον κύριο παράγοντα σύνδεσης των διαφόρων στρωμάτων της αρχιτεκτονικής των Έξυπνων αυτών Συστημάτων, ειδικά στο ανεξερευνήτο περιβάλλον των αγροτικών περιοχών.

Αρχικά, στο Πρώτο Κεφάλαιο παρουσιάζονται οι τέσσερις βασικές έννοιες πάνω στις οποίες στηρίζεται αυτή η ανασυγκρότηση του πρωτογενούς τομέα. Στο Δεύτερο Κεφάλαιο παρουσιάζονται αναλυτικά οι αρχιτεκτονικές του IoT πάνω στις οποίες στηρίζονται οι διάφορες υλοποιήσεις των Έξυπνων Συστημάτων για κάθε έκφανση του πρωτογενούς τομέα. Στη συνέχεια, το Τρίτο Κεφάλαιο επικεντρώνεται στην ευρυζωνική υποδομή 5G με τις όποιες απαιτήσεις σχεδιασμού, υλοποίησης και προκλήσεις την συνοδεύουν στο πλαίσιο των αγροτικών περιοχών. Παράλληλα, αναπτύσσεται μία προσομοίωση μίας τέτοιας υποδομής στην αγροτική περιοχή πέριξ του Δήμου Λαμιέων με την χρήση του εργαλείου Matlab, για να εμφανιστεί η βέλτιστη περιοχή κάλυψης αυτών των περιοχών, καθώς και η ισχύς του λαμβανόμενου σήματος. Στο τέλος του κεφαλαίου παρουσιάζονται εναλλακτικές λύσεις που έχουν παρουσιαστεί για να υπερκεραστούν οι προκλήσεις που εμφανίζονται σε ένα αγροτικό περιβάλλον για μία υποδομή 5G. Τέλος, στο Τέταρτο Κεφάλαιο παρουσιάζονται εμπορικά Έξυπνα Συστήματα εκσυγχρονισμού του πρωτογενούς τομέα που έχουν ήδη εφαρμοστεί ή εφαρμόζονται σταδιακά σε όλον τον πλανήτη, από τους εκάστοτε χρησιμοποιούμενους αισθητήρες μέχρι ολοκληρωμένες εφαρμογές απευθυνόμενες στον τελικό χρήστη.

Λέξεις-Κλειδιά: Διαδίκτυο των Πραγμάτων, Τεχνολογία Επικοινωνιών 5G, Ευφυής Γεωργία, Ευφυής Κτηνοτροφία, Ευφυής Υδατοκαλλιέργεια, Ευφυής Εφοδιαστική Αλυσίδα Προϊόντων, UAV.

Abstract

In the present master's thesis, we aggregately and analytically present the implementation of Smart Systems that are developed based on the IoT architecture, in order to satisfy the ever-increasing need of the primary sector's leading authorities for such systems, such as to keep up with the rest sectors in the context of Industry 4.0. The contribution of 5G broadband infrastructure to that aim, is the primary link between the various layers of such Smart Systems, especially in the yet unexplored domain of rural areas.

Firstly, in the First Chapter, the four basic concepts are presented, upon which the modernization of the primary sector is built. In the Second Chapter, the various IoT agricultural architectures that are implemented in the primary sector are shown in detail. Continuing in the Third Chapter, we focus on the 5G broadband infrastructure, and everything that entails with it, such as design and implementation requirements and challenges that come up with deploying it in rural areas. In the same chapter, a simulation of such a deployment in the surrounding area of Lamia Prefecture is being developed using Matlab, in order to determine the coverage area and the received power of a 5G signal from the base stations. Closing the Third Chapter, we present various alternative solutions to the challenges that rural areas impose on the 5G infrastructure. In conclusion, in the Fourth Chapter, we present commercially available Smart Agriculture Systems that are either already deployed and in use, or are being gradually deployed worldwide. These range from specific agriculture sensors and equipment to complete smart applications catered to the end users.

Keywords: Internet of Things (IoT), 5G Mobile Networks, Smart Farming, Smart Livestock, Smart Aquaculture, Smart Supply Chain, UAV.

1 Περιεχόμενα

Περίληψη.....	vii
Abstract	viii
Πρόλογος	1
Κεφάλαιο 1 – Εισαγωγή.....	2
1.1 Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων – Wireless Sensor Networks/WSN.....	2
1.2 Τεχνολογία Επικοινωνιών 5G – Fifth-Generation Mobile Networks	6
1.3 Υπολογιστικό Νέφος - Cloud	11
1.4 Διαδίκτυο των Πραγμάτων – Internet of Things/IoT	16
Κεφάλαιο 2 – Έξυπνος Πρωτογενής Τομέας.....	19
2.1 Ευφυής Γεωργία – Smart Farming.....	20
2.2 Ευφυής Κτηνοτροφία – Smart Livestock Farming	38
2.3 Ευφυής Υδατοκαλλιέργεια – Smart Aquaculture	44
2.4 Ευφυής Εφοδιαστική Αλυσίδα Προϊόντων – Smart Agri-food Supply Chain ..	48
Κεφάλαιο 3 – Τεχνολογία επικοινωνιών 5G σε αγροτικές περιοχές.....	55
3.1 Απαιτήσεις σχεδιασμού – Design requirements.....	55
3.2 Απαιτήσεις υποδομών και δικτύωσης – Network and infrastructure requirements	63
3.3 Μοντελοποίηση – Design and Implementation.....	67
3.4 Εναλλακτικές λύσεις στις προκλήσεις υποδομών και δικτύωσης – Overcoming challenges through alternative solutions	78
Κεφάλαιο 4 – Αναδυόμενες Υλοποιήσεις και Μελλοντικές Προεκτάσεις Έξυπνων Συστημάτων στον πρωτογενή τομέα.....	87
Βιβλιογραφία.....	92

Πρόλογος

Ο πρωτογενής τομέας και όλες οι εκφάνσεις του (καλλιέργεια, κτηνοτροφία, αλίευση, άρδευση, τυποποίηση προϊόντων, εμπορία αγαθών, κλπ) αναμένεται να αντιμετωπίσουν σοβαρές προκλήσεις στα επόμενα χρόνια. Ο πληθυσμός της Γης αυξάνεται συνεχώς, οι φυσικοί πόροι καταναλώνονται ραγδαία χωρίς να είναι σε θέση να αναπληρωθούν, οι καλλιεργήσιμες εκτάσεις αρχίζουν και μειώνονται αισθητά λόγω των κλιματικών αλλαγών που δημιουργούν ερημοποίηση από την μία μεριά και αύξηση της στάθμης της θάλασσας από την άλλη, δημιουργώντας έναν στενό κλοιό γύρω από την διαθέσιμη έκταση. Αν σε αυτά προστεθούν η ραγδαία αστικοποίηση των χερσαίων εκτάσεων, η συνεχιζόμενη και αδιάλειπτη διάβρωση του εδάφους και η έλλειψη του νερού άρδευσης, ο πρωτογενής τομέας φαίνεται να συρρικνώνεται ως προς τις δυνατότητές του. Εκτός από αυτούς τους εξωτερικούς και δύσκολα ελεγχόμενους παράγοντες, υπάρχουν και εσωτερικοί παράγοντες που είναι άρρηκτα συνυφασμένοι με την διαδικασία παραγωγής αγαθών και εξαρτώνται από τις επιμέρους πτυχές του πρωτογενούς τομέα. Οι διαθέσιμες τιμές προϊόντων, η εμπορική κάλυψη μεγαλύτερου μεριδίου ανθρώπων, η αποτελεσματικότερη παραγωγή αγαθών αλλά και η αύξηση της παραγωγικότητας είναι μερικοί παράγοντες που συντελούν στην ορθή και αποτελεσματική λειτουργία του πρωτογενούς τομέα.

Εκεί έρχεται η τεχνολογία με όλα τα σύγχρονα μέσα και τις υλοποιήσεις της για να δώσουν ένα πλεονέκτημα στον άνθρωπο να μπορέσει να ελέγξει, αν όχι όλους, τους περισσότερους από τους παραπάνω παράγοντες και να τον εξοπλίσουν κατάλληλα για να αντιμετωπίσει αυτές τις προκλήσεις που υπάρχουν ή θα εμφανιστούν στο μέλλον. Μία κατηγορία από αυτές τις τεχνολογίες είναι το **Διαδίκτυο των Πραγμάτων (Internet of Things - IoT)** που βασίζεται στις τεχνολογίες των **Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων (Wireless Sensor Networks – WSN)**, στις **ασύρματες επικοινωνίες 5G** και στο **Νέφος (Cloud)**. Η εφαρμογή του IoT στον πρωτογενή τομέα έχει προσδώσει την έννοια του «Έξυπνου» πρωτογενή τομέα, καθώς η τεχνολογία τον αυτοματοποιεί και του προσδίδει μία εγγενή ευφυία. Η συγκέντρωση όλων των τεχνολογιών θα επιτρέψει την υλοποίηση **Έξυπνων Συστημάτων (Smart Systems)** πάνω στον πρωτογενή τομέα, εκσυγχρονίζοντάς τον και φέρνοντάς τον στα ίδια επίπεδα με τους άλλους τομείς, ώστε να μπορεί να αντιμετωπίσει τις απαιτήσεις της επερχόμενης Τέταρτης Βιομηχανικής Επανάστασης (Industry 4.0).

Κεφάλαιο 1 – Εισαγωγή

1.1 Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων – Wireless Sensor Networks/WSN

Τα τελευταία χρόνια η τεχνολογία έχει σημειώσει τεράστια άλματα στον τομέα της υπολογιστικής ισχύος, σε τέτοιο επίπεδο ώστε οι επεξεργαστές έχουν περιοριστεί σε μέγεθος, διαθέτουν μικρή κατανάλωση ενέργειας αλλά έχουν επεκταθεί σε πολυπλοκότητα και αριθμό υπολογισμών ανά δευτερόλεπτο. Αυτή η σύγκλιση των τριών αυτών χαρακτηριστικών έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη μικρών συσκευών, οι οποίες μπορούν να εκτελούν την ίδια υπολογιστική δραστηριότητα με τους κανονικούς προσωπικούς υπολογιστές, προσφέροντας όμως την ευελιξία της φορητότητας. Τέτοιες συσκευές είναι οι διάφοροι **αισθητήρες (sensors)** που μπορούν να μετρήσουν πολλά φυσικά μεγέθη του περιβάλλοντος και να τα επεξεργαστούν και μεταδώσουν σε άλλες συσκευές ή σε άλλους δέκτες πληροφοριών [1]. Μπορούν να διαχωριστούν σε 3 κυρίαρχες κατηγορίες:

1. Τα **μικρο-ηλεκτρο-μηχανολογικά συστήματα (microelectromechanical systems – MEMS)** όπως τα γυροσκόπια, τα επιταχυνσιόμετρα, τα μαγνητόμετρα, τους αισθητήρες πίεσης, τους αισθητήρες πυροηλεκτρικών φαινομένων και τους ακουστικούς αισθητήρες.
2. Τους **αισθητήρες βασιζόμενους στην τεχνολογία CMOS (CMOS based sensors)** όπως τους αισθητήρες θερμοκρασίας, υγρασίας, χωρητικής εγγύτητας και χημικής ανάλυσης.
3. Τους **αισθητήρες LED (LED sensors)** όπως τους αισθητήρες φωτός και εγγύτητας.

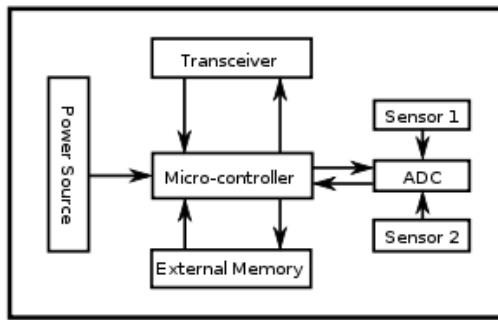
Είδη αισθητήρων που είναι διαθέσιμοι για γενικές χρήσεις μεταξύ άλλων είναι οι TelosB, MicaZ, Shimmer, Sun SPOT αλλά και τροποποιημένοι με αισθητήρες μικροελεγκτές όπως το Arduino και το Raspberry Pi.

Γενικά, ένας αισθητήρας αποτελείται από πολλά μέρη, όμοια με έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή. Κύρια μέρη ενός αισθητήρα αποτελούν η **μονάδα ανίχνευσης φαινομένων**, ο **επεξεργαστής** του, η **τοπική μνήμη** του, ο **πομποδέκτης** και η **πηγή ενέργειάς** του (Εικόνα 1). Η μονάδα ανίχνευσης φαινομένων είναι η μονάδα που καταγράφει ότι συμβαίνει στο πεδίο του αισθητήρα. Πολλοί αισθητήρες έχουν

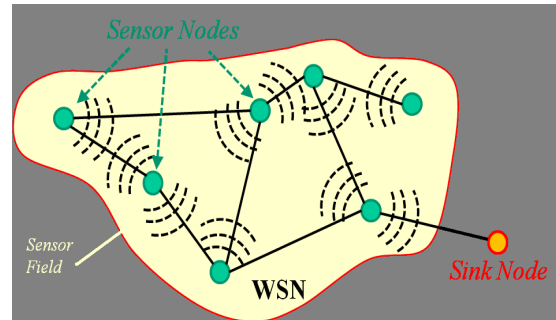
πολλαπλές μονάδες ανίχνευσης, ανιχνεύοντας ταυτόχρονα πολλά φαινόμενα, αυξάνοντας έτσι τον όγκο των δεδομένων και την πολυπλοκότητα ανίχνευσης. Η μονάδα επεξεργασίας είναι αυτή που συντονίζει όλα τα μέρη του αισθητήρα, επεξεργάζεται τα δεδομένα που δέχεται από την μονάδα ανίχνευσης και ενεργοποιεί τον πομποδέκτη για την αποστολή τους σε άλλους κόμβους. Η μονάδα του πομποδέκτη είναι υπεύθυνη για αποστολή και λήψη δεδομένων σε γειτονικούς κόμβους καθώς και για την ενίσχυση του σήματος για πιο αξιόπιστη μετάδοση και αποφυγή σφαλμάτων κατά την αποστολή. Η τοπική μνήμη αποθηκεύει τοπικά και πρόσκαιρα τα δεδομένα που δέχεται από άλλους κόμβους ή τα δεδομένα που έχουν προκύψει μετά από επεξεργασία για αποστολή τους από τον πομποδέκτη. Τέλος η πηγή ενέργειας τροφοδοτεί όλα τα μέρη και είναι υπεύθυνη για την διάρκεια ζωής του αισθητήρα. Αποτελείται από μπαταρίες ή και κάποιο άλλο είδος εξωτερικής πηγής ενέργειας όπως φωτοκύτταρο [2].

Από μόνο του, ένα σύστημα αισθητήρα δεν μπορεί να εκτελέσει κάποιο ολοκληρωμένο έργο για να εξαχθούν κάποια συμπεράσματα. Έμφυτο χαρακτηριστικό ενός αισθητήρα είναι ότι πάντα ανήκει σε ένα δίκτυο όπου παίζει τον πρωταρχικό ρόλο συλλογής και μετάδοσης των δεδομένων. Ένα τέτοιο σύστημα δικτύου, όπου πολλοί αισθητήρες επικοινωνούν μεταξύ τους με στόχο τον συντονισμό της συλλογής δεδομένων και τα δεδομένα αυτά τα μεταδίδουν σε κάποια βάση επεξεργασίας μεγάλου όγκου δεδομένων, ονομάζεται **Ασύρματο Δίκτυο Αισθητήρων (Wireless Sensor Networks – WSN)**. Τα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων ακολουθούν μία γενική αρχιτεκτονική υλοποίησης που αποτελείται από 3 μέρη (Εικόνα 2):

1. Τους **κόμβους (nodes)** που είναι οι ίδιοι οι αισθητήρες και που τοποθετούνται στο φυσικό περιβάλλον από το οποίο συλλέγονται τα δεδομένα,
2. Το **πεδίο εφαρμογής των κόμβων (sensor field)** που είναι το πεδίο στο οποίο τοποθετούνται οι κόμβοι και στο οποίο πραγματοποιούνται οι μετρήσεις,
3. Την **βάση (control center/sink)** που είναι ο δέκτης όλων των δεδομένων που έχουν συλλεγεί και υποστεί επεξεργασία από τους κόμβους, ώστε με την σειρά του να τα προωθήσει στους κατάλληλους δέκτες για περαιτέρω χρησιμοποίησή τους.



Σχήμα 1 Μέρη ενός αισθητήρα



Σχήμα 2 Αρχιτεκτονική του WSN

Αυτά τα βασικά μέρη τα οποία μπορούν να συνιστούν ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων διέπονται από ένα σύνολο χαρακτηριστικών τα οποία επιτρέπουν την μετάλλαξη του βασικού μοντέλου των δικτύων σε οποιαδήποτε παραλλαγή είναι κατάλληλη για το πείραμά μας. Πολλές είναι και οι τοπολογίες με τις οποίες μπορεί να διαταχθεί και να υλοποιηθεί ένα ασύρματο δίκτυο δεδομένων, ανάλογα με τις απαιτήσεις μας. Τα χαρακτηριστικά του ασύρματου δικτύου αισθητήρων δίνουν αρωγή στην εκτίμηση χειρισμού του ασύρματου δικτύου σε μια πληθώρα εφαρμογών και σεναρίων. Για να γίνει αυτό θα πρέπει να ληφθεί υπόψιν ο απώτατος σκοπός για τον οποίο υλοποιείται το συγκεκριμένο μοντέλο δικτύου, πώς θα χρησιμοποιηθεί το δίκτυο και τα πλεονεκτήματα που θα μας δίνει η χρήση ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων από κάποια ήδη υπάρχουσα τεχνολογία δικτύου.

Τα κύρια χαρακτηριστικά των δικτύων είναι η **διάρκεια ζωής**, η **κάλυψη του δικτύου**, το **κόστος** και η **ευκολία εγκατάστασης του δικτύου**, ο **χρόνος απόκρισης**, η **χρονική ακρίβεια**, η **ασφάλεια** και ο **αποτελεσματικός ρυθμός δειγματοληψίας**. Η **διάρκεια ζωής** των δικτύων είναι το απόθεμα ενέργειας που απομένει σε όλους τους κόμβους του. Στόχος του ίδιου του κόμβου είναι να μεγιστοποιεί την συνολική διάρκεια ζωής του δικτύου και όχι αποκλειστικά την ατομική του. Ο πομποδέκτης είναι η μεγαλύτερη καταβόθρα ενέργειας για ένα δίκτυο αισθητήρων. Η **κάλυψη του δικτύου** έχει δύο εκφάνσεις: το μεγαλύτερο εύρος ασύρματης επικοινωνίας και την μεγαλύτερη κάλυψη πεδίου εφαρμογής αυξάνοντας τον αριθμό κόμβων.

Αυξάνοντας το εύρος ασύρματης επικοινωνίας μέσω αύξησης της ισχύος του πομποδέκτη, και αυξάνοντας την γεωγραφική κάλυψη μέσω τοποθέτησης περισσότερων κόμβων, αυξάνεται και η κατανάλωση ενέργειας και στις δύο περιπτώσεις: στην πρώτη λόγω αύξησης ισχύος του πομποδέκτη και στην δεύτερη λόγω μεγαλύτερου όγκου πληροφορίας που θα πρέπει να μεταδοθεί στο δίκτυο.

Το **κόστος και η ευκολία εγκατάστασης** παίζουν σημαντικό ρόλο στην τελική εφαρμογή τους στο πεδίο. Το συνολικό κόστος εμπεριέχει περισσότερο το κόστος της συνεχούς συντήρησής του, παρά το κόστος αγοράς, αρχικής εφαρμογής και τοποθέτησής του. Η **ευκολία εγκατάστασης** απαρτίζεται από δύο συνδεδεμένες μεταξύ τους έννοιες: την ευκολία του φυσικού πεδίου εφαρμογής και την ευκολία χειρισμού του δικτύου. Εκτός, δηλαδή, από το πόσο προσβάσιμο και δεκτικό στους κόμβους είναι το φυσικό περιβάλλον που θα πρέπει να τοποθετηθεί ένα Ασύρματο Δίκτυο Αισθητήρων, πρέπει να μπορεί και ένας μη εκπαιδευμένος άνθρωπος να μπορεί να τοποθετήσει/αναπληρώσει/αντικαταστήσει κόμβους ώστε να σχηματιστεί το δίκτυο.

Ο **χρόνος απόκρισης** είναι κομβικό χαρακτηριστικό όταν τα σενάρια εφαρμογής των δικτύων επιβάλλουν άμεση μετάδοση, καταγραφή και επεξεργασία δεδομένων από τους κόμβους στη βάση, όπως δίκτυα αισθητήρων ασφαλείας, παρακολούθησης περιβαλλοντικών φαινομένων (πλημμύρες, πυρκαγιές), κ.ά. Βελτίωση του χρόνου απόκρισης επιτυγχάνεται όταν ένας κόμβος δειγματοληπτεί και επικοινωνεί με άλλους κόμβους ανά προκαθορισμένο διάστημα και όταν υπάρχουν κόμβοι που είναι ενεργοί όλο το διάστημα ζωής τους, προωθώντας συνεχώς τα απαραίτητα μηνύματα στην ραχοκοκαλιά του δικτύου.

Η βέλτιστη **χρονική ακρίβεια** του δικτύου επιτυγχάνεται με τον κατάλληλο χρονικό συγχρονισμό όλων των κόμβων του δικτύου και με την ταχύτερη διάδοση δεδομένων διαμέσου όλου του πεδίου εφαρμογής μέχρι την βάση. Αυτά τα δύο ζητούμενα υλοποιούνται αφενός με ένα ενιαίο και κοινό ρολόι του οποίου ο συγχρονισμός θα διαδίδεται συνεχώς μεταξύ των κόμβων, και αφετέρου με ένα αρκετό εύρος ζώνης που θα εξυπηρετεί τον όγκο των απεσταλμένων δεδομένων προς την βάση.

Η **ασφάλεια** του δικτύου εξασφαλίζεται μέσω αλγορίθμων κρυπτογραφίας και αυθεντικοποίησης δεδομένων, όπου και οι δύο τεχνικές χρειάζονται επιπρόσθετη υπολογιστική ισχύ (κρυπτογράφηση και αποκρυπτογράφηση) και μεγαλύτερα πακέτα μεταδιδόμενων δεδομένων (πρόσθετα bit αυθεντικοποίησης) για να υλοποιηθούν [3]. Τέλος, ο **αποτελεσματικός ρυθμός δειγματοληψίας**, δηλαδή ο ρυθμός δειγματοληψίας με τον οποίο τα δεδομένα του κόμβου μπορούν να διαδοθούν σε καθένα κόμβο ξεχωριστά και να κοινοποιηθούν στη βάση συλλογής δεδομένων, βελτιώνεται με την τοπική αποθήκευση δεδομένων και την συμπίεση των απεσταλμένων δεδομένων προς την βάση μόνο εάν πυροδοτηθεί ένα γεγονός, ακόμα και αν οι κόμβοι δειγματοληπτούν και επεξεργάζονται τα δεδομένα συνεχώς.

1.2 Τεχνολογία Επικοινωνιών 5G – Fifth-Generation Mobile Networks

Η εξέλιξη των δικτύων κινητών επικοινωνιών τις δύο τελευταίες δεκαετίες έχει ξεπεράσει κάθε προσδοκία, και ήδη αναμένονται καινούριες εξελίξεις στο άμεσο μέλλον. Από τον Ιταλό Guglielmo Marconi που μετέδωσε ασύρματα μέσω ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων το γράμμα ‘S’ σε απόσταση 3 χλμ με τη μορφή τριών τελειών σε κώδικα Μορς, έχουν περάσει πολλές δεκαετίες έως ότου οι ασύρματες επικοινωνίες γίνουν ένα αναπόσπαστο κομμάτι της σημερινής κοινωνίας. Το σύνολο των δορυφορικών επικοινωνιών και των τηλεοπτικών και ραδιοφωνικών μεταδόσεων έχει συμπυκνωθεί στην σύγχρονη εκδοχή τους: το εξελιγμένο κινητό τηλέφωνο. Για να φθάσουμε στην σημερινή Πέμπτη Γενιά (Fifth Generation – 5G) τηλεπικοινωνιών, έχουν δοκιμαστεί και στη συνέχεια υπερκεραστεί πολλές εκδόσεις προηγούμενων γενιών, με τους κύριους στόχους αυτής της βελτίωσης να είναι ο ρυθμός δεδομένων, η κάλυψη, η κινητικότητα και η φασματική απόδοση [4].

Οι βάσεις που τέθηκαν στο 4G στις αρχές του 2010, οδηγούν στην σημερινή **Πέμπτη Γενιά 5G**, όπου επικρατούν συνθήκες παρόμοιες με την τεχνολογική έκρηξη των smartphones. Στο σημερινό τοπίο, οι ασύρματες επικοινωνίες δεν περιορίζονται στο να εξυπηρετούν μόνο τις κινητές συσκευές χρηστών συνδρομητών. Με την έλευση του **Διαδικτύου των Πραγμάτων (Internet of Things - IoT)** που θα παρουσιαστεί παρακάτω, τα δίκτυα παύουν να είναι μία ραχοκοκαλιά που απλά συνδέει συσκευές μεταξύ τους. Πλέον, υπάρχει ανάγκη ασύρματης διασύνδεσης συσκευών που παλαιότερα δεν θα θεωρούνταν ως μέρος ενός ασύρματου δικτύου, όπως λαμπτήρες φωτός, σκίαστρα παραθύρων, λευκές συσκευές, φορετά αντικείμενα (γυαλιά, ρολόγια χειρός), αυτοκίνητα κ.ά. Έτσι, εξελίσσονται σε μία υπηρεσία, την ονομαζόμενη ως Network as a Service, όπου θα δημιουργούνται κομμάτια λογικών δικτύων (Network Slices) που είναι ευέλικτα και αποτελεσματικά στο να εξυπηρετούν αυτό το πολλαπλών χρήσεων και ανομοιογενές περιβάλλον [5].

Για να αντιμετωπίσει τις παραπάνω προκλήσεις που δημιουργούνται από αυτήν την νέα είσοδο του IoT στις ασύρματες επικοινωνίες, το 5G ζητείται να πληροί κάποιες απαιτήσεις [6]:

- **Ρυθμό δεδομένων δεκαπλάσιο έως και εκατονταπλάσιο** σε σχέση με τα ήδη εγκατεστημένα δίκτυα (Long Term Evolution-Advanced, LTE-A). Τα κινητά δίκτυα πέραν του 2020 πρέπει να υποστηρίζουν έως και εκατονταπλάσιο ρυθμό δεδομένων σε υψηλής κινητικότητας και πολυάνθρωπες περιοχές σε σχέση με

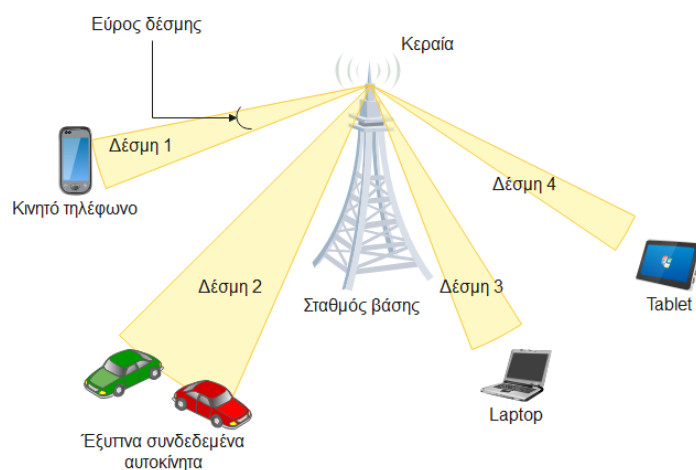
το 2010, εάν συνεχιστεί η αυξητική τάση χρήσης συσκευών διασύνδεσης για μεγάλο όγκο διακίνησης δεδομένων.

- **Αριθμός διασυνδέσεων δεκαπλάσιος έως και εκατονταπλάσιος** σε σχέση με τα 4G δίκτυα. Το Διαδίκτυο των Πραγμάτων ωθεί προς την εκρηκτική αύξηση της κίνησης των δεδομένων σε όλα τα μέρη του δικτύου, καθώς προβλέπεται έως και 80 δις συσκευές IoT θα είναι συνδεδεμένες σε ένα δίκτυο και έως και 20.5 δις συσκευές ανά άτομο θα είναι συνδεδεμένες έως το 2030 [7]. Οι διασυνδέσεις θα είναι ποικίλης μορφής όπως όχημα-προς-όχημα (V2V), όχημα-προς-εγκατάσταση (V2I), συσκευή-προς-συσκευή (D2D), συσκευή-προς-εγκατάσταση (D2I), όχημα προς συσκευή (V2D) κ.ά., δημιουργώντας ετερογενή δίκτυα.
- **Χωρητικότητα δικτύου χιλιαπλάσια** της ήδη υπάρχουσας. Καθώς η κίνηση των δεδομένων αναμένεται να αυξηθεί με κατακόρυφο ρυθμό στο εγγύς μέλλον, θα πρέπει να υιοθετηθούν καινούριες τεχνικές αύξησης της χωρητικότητας σε όλα τα μέρη του δικτύου: στο δίκτυο ραδιοπρόσβασης (Radio Access Network – RAN), στο fronthaul, στο backhaul και στην ραχοκοκαλιά (backbone), ώστε να υποστηριχτούν οι επικοινωνίες των καινούριων συσκευών που θα προστεθούν στο δίκτυο. Πρέπει επίσης να παρατηρήσουμε ότι περίπου το 80% της κατανάλωσης δεδομένων (και άρα της χωρητικότητας του δικτύου) προέρχεται από εσωτερικούς χώρους (σπίτια, γραφεία, εμπορικά κέντρα, σταθμούς MMT) και μόνον το 20% από εξωτερικούς χώρους, οπότε και πρέπει να υπάρχει ένας νοητικός διαχωρισμός της 5G αρχιτεκτονικής σε εσωτερικές και εξωτερικές διατάξεις για την βέλτιστη διαχείριση της χωρητικότητας [8].
- **Καθυστέρηση άκρο-σε-άκρο μικρότερη από 1 ms.** Η είσοδος του IoT στις ασύρματες επικοινωνίες, επέτρεψε την χρήση του 5G σε τομείς όπου η καθυστέρηση επικοινωνίας χρήστη-συσκευής ή λήψης αποφάσεων που στηρίζονται σε δεδομένα διασυνδεδεμένων συσκευών είναι τεράστιας σημασίας. Παραδείγματα αυτών είναι τα ιατρικά-χειρουργικά ρομπότ τηλεχειριζόμενα από γιατρούς, οι εφαρμογές άμεσης επέμβασης σε καταστάσεις εκτάκτου ανάγκης, οι βιομηχανικές διεργασίες που στηρίζονται σε μετρήσεις κατά την παραγωγή, οι V2V και V2I επικοινωνίες ώστε να υπάρχει χρόνος ασφάλειας για οποιαδήποτε μεταβολή στην πορεία των οχημάτων και η αναπαράσταση 3D χώρου στην εικονική και επαυξημένη πραγματικότητα. Για γίνουν εφικτές οι

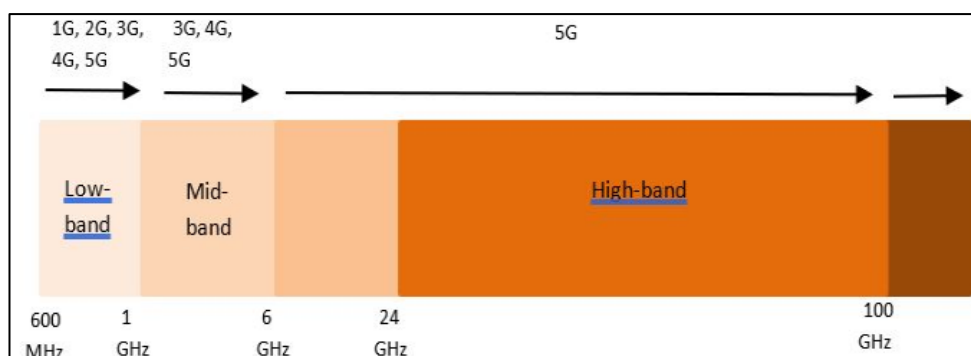
εφαρμογές των παραπάνω, το δίκτυο 5G πρέπει ιδανικά να υποστηρίζει 1ms καθυστέρηση ανάμεσα στα δύο άκρα με μεγάλη αξιοπιστία [9]. Αλλαγές στην αρχιτεκτονική τόσο της ασύρματης (καινοτομίες στην ασύρματη διεπαφή) όσο και της ενσύρματης διασύνδεσης (μεταγωγή πακέτων και οπτική μετάδοση) των δικτύων 5G, αλλά και των πρωτοκόλλων που το διέπουν (αλγόριθμοι ρύθμισης της κίνησης δεδομένων) μπορούν να βοηθήσουν στο να επιτυγχάνεται χαμηλή καθυστέρηση.

- **Ποιότητα εμπειρίας που να είναι συνεπής** με τις προσδοκίες των χρηστών. Αν και αυτή η απαίτηση δεν μπορεί να γενικευτεί, καθώς περιγράφει την υποκειμενική αντίληψη ενός χρήστη για το πόσο καλά λειτουργεί μια εφαρμογή ή μια υπηρεσία, μπορεί να τεθεί σε κάποια γενικά πλαίσια ώστε οι χρήστες, ανεξαρτήτως εφαρμογών και χρήσεων, να συνεχίζουν να απολαμβάνουν τις υπηρεσίες που τους παρέχονται. Γενικοί παράγοντες που επηρεάζουν την εμπειρία είναι η σταθερή συνδεσιμότητα, η χαμηλή καθυστέρηση και μεγάλο εύρος ζώνης και η ασφάλεια δεδομένων. Χρησιμοποιώντας μηχανική μάθηση ή καταγράφοντας εμπειρικά δεδομένα χρήστη μπορούμε να προσαρμόσουμε τους παράγοντες ώστε η ποιότητα εμπειρίας να βελτιώνεται συνεχώς προς όφελος του χρήστη και του παρόχου υπηρεσιών.
- **Κόστος το οποίο να είναι βιώσιμο.** Όπως προαναφέραμε, η διασύνδεση σε ασύρματο δίκτυο μιας περιοχής είναι κύριος παράγοντας κοινωνικοοικονομικής ανάπτυξης μιας ζώνης. Δεν είναι επιθυμητό καμία ζώνη να είναι «νεκρή» και άρα οι διασυνδεδεμένες περιοχές να εκτείνονται σε όλη την επικράτεια όπου υπάρχει ανθρώπινη δραστηριότητα. Αυτό συνεπάγεται κόστος, τόσο για τις υποδομές, όσο και για την ανάπτυξη, συντήρηση, διαχείριση και λειτουργία του δικτύου, ώστε η διασυνδεσιμότητα να είναι μια καθολικά διαθέσιμη, οικονομικά προσιτή και υποστηρικτική ωφέλιμη υπηρεσία. Αυτό το κόστος δεν ενδείκνυται να μετακυληθεί στον τελικό χρήστη. Οι λύσεις της χωρητικότητας, του αριθμού συνδέσεων και του ρυθμού δεδομένων με αυξημένη πυκνωση του δικτύου είναι οικονομικά ασύμφορες. Μεγάλο μέρος (70-80%) του κόστους αφορά στην κατανάλωση ενέργειας για την διατήρηση του δικτύου ραδιοπρόσβασης RAN, οπότε έξυπνες τεχνικές διαχείρισης ενέργειας μπορούν να μειώσουν τα συνολικά κόστη λειτουργίας του δικτύου [10].

Με βάση τις παραπάνω απαιτήσεις, το 5G σχεδιάστηκε έτσι ώστε να μπορέσει να καταφέρει να εκπληρώσει άριστα και τις 6 απαιτήσεις. Η εξέλιξη του LTE-A του 4G για το 5G έχει όνομα **New Radio – NR** και βασίζεται στο OFDM όπως και το 4G, χρησιμοποιώντας όμως μια προχωρημένη τεχνική πρόσβασης βασιζόμενη στην κατευθυνόμενη ορθογώνια «δέσμη» (orthogonal beam) ακτίνας από την κεραία προς κάθε κινητό σταθμό (συσκευή χρήστη, όχημα, κλπ) με κάθε σταθμό να έχει την δική του δέσμη για επικοινωνία με την βάση. Αυτή η τεχνική ονομάζεται **Beam Division Multiple Access – BDMA**, και αυξάνει δραματικά την χωρητικότητα του δικτύου καθώς μία δέσμη της κεραίας χωρίζεται σε πολλές μέσω του BDMA ανάλογα με τις θέσεις και κινήσεις των κινητών σταθμών, ώστε να επιτυγχάνονται ταυτόχρονες μεταδόσεις δεδομένων σε διαφορετικούς κινητούς σταθμούς για διαφορετικές γωνίες [11].



Σχήμα 1 Massive MIMO κεραία που μεταδίδει ταυτόχρονα δεδομένα σε πολλούς κινητούς σταθμούς με την χρήση beamforming



Σχήμα 2 Εύρος συχνοτήτων που χρησιμοποιεί το 5G. Η περιοχή πάνω από τα 30GHz είναι η περιοχή mmWave.

Το NR γίνεται το νέο δυνατό εργαλείο του 5G χάρη σε δύο τεχνολογίες που υπερκαλύπτουν πολλές από τις απαιτήσεις που έχουν τεθεί: το σύστημα κεραιών **massive MIMO (massive Multiple-Input Multiple-Output)** και την χρήση ζώνης μικροκυματικών συχνοτήτων **mmWave (millimeter Wavelength)**. Το mMIMO σύστημα χρησιμοποιεί συστοιχίες από κεραιές που περιλαμβάνουν μερικές εκατοντάδες κεραιές, οι οποίες ταυτόχρονα για μια χρονική στιγμή εξυπηρετούν δεκάδες χρήστες μέσω θυρίδων συχνοτήτων [12]. Αν και οι κεραιές MIMO υπήρχαν και στο 4G επιτρέποντας πολλαπλές ροές (εισόδους-εξόδους) δεδομένων ταυτόχρονα, στο 5G ο αριθμός των στοιχείων των κεραιών πολλαπλασιάζεται κατακόρυφα (ελάχιστος αριθμός στοιχείων 24, ικανοποιητικός αριθμός στοιχείων 256) έτσι ώστε με την χρήση κατευθυνόμενων δεσμών (**beamforming**) (Εικόνα 3) να υποστηρίζονται ροές δεδομένων σε πολλούς σταθμούς ταυτόχρονα χωρίς παρεμβολές [13].

Για να είναι πιο ομαλή η μετάβαση των ήδη υπαρχουσών εγκαταστάσεων δικτύων 4G αλλά και των συνδρομητών, χρησιμοποιούνται εύρη συχνοτήτων παλαιότερων γενιών. Η πρώτη περιοχή συχνοτήτων είναι η ίδια όλων των προηγούμενων γενιών και καλύπτει τα 600-850MHz (**low-band 5G**) πετυχαίνοντας μικρές ταχύτητες της τάξης των 30-250 Mbit/s, αν και μεγαλύτερες σε σχέση με το 4G στην ίδια μπάντα συχνοτήτων με την ίδια κάλυψη περιοχής με τις 4G κεραιές. Οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες συχνότητες βρίσκονται και πάλι μέσα στην μπάντα συχνοτήτων του 4G στις μικροκυματικές συχνότητες των 2.5-3.7 GHz (**mid-band 5G**) με ταχύτητες στο εύρος των 100-900 Mbit/s και κάλυψη μερικών χιλιομέτρων ανά κεραία.

Το εύρος συχνοτήτων μεγαλύτερων των 6 GHz (**high-band 5G**) είναι κατοχυρωμένο για μελλοντικές εφαρμογές που χρειάζονται πολύ μεγάλους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων της τάξης των Gbit/s, έχουν όμως περιορισμένη γεωγραφική κάλυψη για κάθε κεραία λόγω του μικρού μήκους κύματος. Ειδικότερα, το εύρος 30-300GHz, ή αλλιώς χιλιοστομετρικό κύμα (**mmWave**) (Εικόνα 4) φαίνεται να ταιριάζει απόλυτα με τις κεραιές mMIMO τεχνολογίας, καθώς κάτω των 6GHz οι κεραιές μπορούν να υποστηρίξουν 8 στοιχεία, ενώ στο mmWave μπορούν να υποστηρίξουν 128,256 ή περισσότερα στοιχεία. Από αυτές τις τρεις ομάδες συχνοτήτων αυτή με την μεγαλύτερη διείσδυση και υπερκέραση εμποδίων είναι η low-band, οπότε και χρησιμοποιείται για αστικές περιοχές, με κάλυψη εσωτερικού και εξωτερικού χώρου.

Η mid-band περιοχή συχνοτήτων διαθέτει ημιδιαπερατότητα ανάλογα με την υγρασία, την βροχή και τα εμπόδια (π.χ. δέντρα) ανάμεσα σε πομπό και δέκτη. Είναι

όμως κατάλληλη για τις εφαρμογές του πρωτογενούς τομέα όπως την παρακολούθηση περιβαλλοντικών συνθηκών και την άμεση επικοινωνία με αισθητήρες διεσπαρμένους σε αγροτικές περιοχές. Η high-band περιοχή, αν και επιτρέπει πολύ μεγάλους ρυθμούς μετάδοσης και υψηλή χωρητικότητα, είναι επιρρεπής σε εμπόδια και χρειάζεται οπτική επαφή (Line of Sight – LoS) ανάμεσα σε πομπό και δέκτη για την αξιόπιστη μεταφορά δεδομένων.

Το NR έχει σχεδιαστεί με βάση την κλιμακωσιμότητα και την ευελιξία που προσφέρει μια ασύρματη διεπαφή, πραγματώνοντας κάποια χαρακτηριστικά: μεγαλύτερο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων, μειούμενη καθυστέρηση, εξοικονόμηση ενέργειας, χαμηλότερο κόστος υλοποίησης, αυξημένη χωρητικότητα συστήματος και στοχεύει στην βέλτιστη επίδοση σε μεγάλης κλίμακας συνδέσεις συσκευών. Τα δύο πρώτα χαρακτηριστικά οδηγούν στην τεράστια αξιοπιστία και μειούμενης καθυστέρησης εξυπηρέτησης μεταφοράς δεδομένων των υπηρεσιών που προσφέρει το 5G, με τον όρο **Ultra-Reliable Low-Latency 5G (URLL 5G)**. Επίσης, η συνδεσιμότητα μεγάλου αριθμού συσκευών και η ταυτόχρονη εξυπηρέτησή τους από το δίκτυο (**massive Machine-Type Communications (mMTC)**), κυρίως συσκευών που ανήκουν στο IoT, κάνει το 5G αρκετά ελκυστικό στις υλοποιήσεις IoT, μερικές από αυτές και στον πρωτογενή τομέα όπως θα παρουσιαστούν στο επόμενο κεφάλαιο. Τέλος, βελτιώνοντας την φασματική απόδοση, την απόδοση σηματοδοσίας, το εύρος ζώνης και την κάλυψη δικτύου πετυχαίνεται **ενισχυμένη κινητή ευρυζωνικότητα (enhanced Mobile BroadBand - eMBB)** [14]. Αυτά τα τρία σενάρια χρήσης του 5G συγκροτούν το πρότυπο πάνω στο οποίο βασίζεται η όλη υλοποίησή του και το ξεχωρίζει από τις προηγούμενες γενιές ασύρματων τεχνολογιών.

1.3 Υπολογιστικό Νέφος - Cloud

Το υπολογιστικό νέφος είναι μια υποδομή που είναι ικανή να προσφέρει διαφορετικών ειδών υπηρεσίες προς πελάτες έξω από το νέφος (δηλαδή διαδικτυακά), χρησιμοποιώντας πολλών ειδών πλατφόρμες και διαμοιράζοντας τους εσωτερικούς της πόρους. Οι προσφερόμενες υπηρεσίες μπορούν να διαμορφωθούν δυναμικά και να παραδοθούν στους εξωτερικούς πελάτες κατ' απαίτηση, όντας δυναμικά και μαζικά κλιμακούμενες, χωρίς να υπάρχει καμία εξάρτηση ανάμεσα στην τοποθεσία, στο υλικό και στον φιλοξενούμενο πάροχο. Δεν έχει καμία σημασία που τοποθετούνται τα

δεδομένα, που γίνονται οι υπολογισμοί και που επεξεργάζονται τα αποτελέσματα, κάνοντάς τα ελεύθερα διαθέσιμα παντού και πάντοτε στο διαδίκτυο. Τα τρία κύρια χαρακτηριστικά που διέπουν το cloud είναι [15]:

- το υλικό και λογισμικό ως πόροι διατίθενται μέσω διαδικτύου στον χρήστη σαν υπηρεσίες,
- οι πόροι αυτοί μπορούν να επεκταθούν και παραμετροποιηθούν εντελώς δυναμικά ανάλογα με τις ανάγκες του χρήστη,
- ενώ οι πόροι ως φυσικές οντότητες είναι διαμοιραζόμενες, διάσπαρτες και ξεχωριστές, στον χρήστη φαίνονται ως μία ενιαία και ολόκληρη λογική οντότητα.

Οι υπηρεσίες που παρέχονται από το cloud έχουν γενικώς τρεις μορφές (Εικόνα 5) [16]:

1. **Λογισμικό ως Υπηρεσία (Software as a Service – SaaS)** όπου ο πάροχος της υπηρεσίας διαθέτει ένα ενοποιημένο λογισμικό στον server του και ο χρήστης πληρώνει συνδρομή μέσω διαδικτύου για να την χρησιμοποιήσει. Ο πάροχος τότε διαθέτει την υπηρεσία απευθείας στον χρήστη μέσω ενός browser και χρεώνει ανάλογα με την ποσότητα και τον χρόνο χρήσης της υπηρεσίας του. Παραδείγματα αυτών είναι τα Google Docs, Google Workspace, Dropbox κ.ά.
2. **Πλατφόρμα ως Υπηρεσία (Platform as a Service - PaaS)** όπου ο πάροχος διαθέτει ένα περιβάλλον ανάπτυξης λογισμικού στον χρήστη. Είναι ένα είδος διαμοιραζόμενης πλατφόρμας server, με την υπηρεσία χρήσης, το λογισμικό του server και τους υλικούς πόρους να μισθώνονται στον χρήστη. Αυτός αναπτύσσει τη δική του εφαρμογή και στη συνέχεια την διαθέτει στους δικούς του πελάτες από τον δικό του server και την δική του σύνδεση internet. Είναι ουσιαστικά ένας «μεσάζοντας» ανάπτυξης υπηρεσιών που διαθέτει βάσεις δεδομένων, server εφαρμογών, υλικούς πόρους και πλατφόρμα ανάπτυξης λογισμικού σε ιδιώτες και επιχειρήσεις ανάπτυξης δικών τους υπηρεσιών. Παραδείγματα αυτών είναι τα Google App engine και το AWS Elastik Beanstalk.
3. **Υποδομή ως Υπηρεσία (Infrastructure as a Service – IaaS)** όπου ο πάροχος διαθέτει πολλούς servers ως μια μετρούμενη υπηρεσία στους πελάτες. Συνδυάζει υπολογιστική μνήμη, συσκευές εισόδου/εξόδου, αποθηκευτικό χώρο, δικτυακή διασύνδεση και επεξεργαστική ισχύ σε μία ενοποιημένη λογική οντότητα πόρων. Παρέχει έτσι χώρους για αποθήκευση δεδομένων και περιβάλλον

εικονικοποίησης (virtualization) στην επιχείρηση/βιομηχανία, και χρεώνει όταν οι πόροι αυτοί δεσμεύονται για χρήση. Αυτό απαλλάσσει την επιχείρηση από τα κόστη αγοράς υλικού, ενοικίασης χώρου, πληρωμών ενέργειας και συντήρησης, πληρώνοντας μόνο όταν και όσο χρησιμοποιούνται οι πόροι. Παραδείγματα αυτών είναι τα Amazon Web Services, Microsoft Azure και Google Cloud σύνολα προϊόντων.

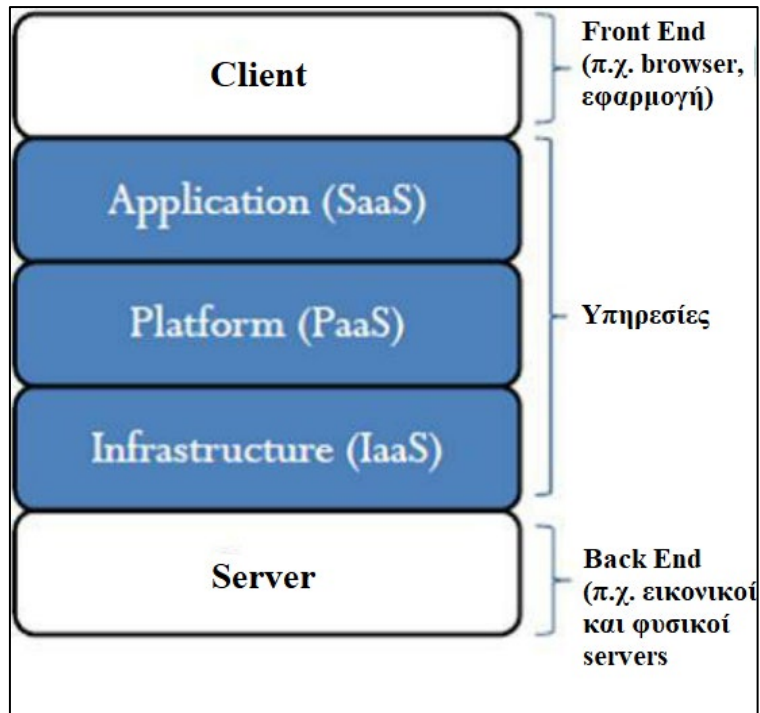
Οι παραπάνω τρεις μορφές των υπηρεσιών αποτελούν και τα τρία στρώματα που απαρτίζουν την αρχιτεκτονική του cloud. Αυτή η αρχιτεκτονική είναι μία λογική διαστρωμάτωση που διευκολύνει τον διαχωρισμό των διάφορων πραγματικών αρχιτεκτονικών που απαρτίζουν φυσικά το cloud, αλλά και τον διαχωρισμό των περιοχών ευθυνών του ανθρώπινου δυναμικού που το υποστηρίζει. Το cloud φυσικώς αποτελείται από κέντρα δεδομένων (datacenters) που βρίσκονται σε ορισμένες τοποθεσίες και περιέχουν servers διαφόρων τύπων: βάσεων δεδομένων (database servers), υπολογιστικής ισχύος (compute servers), αποθήκευσης (storage servers), εφαρμογών (application servers) κ.ά.

Τέσσερις τεχνολογίες-κλειδιά είναι αυτές που ξεχωρίζουν το cloud από οποιοδήποτε άλλη αρχιτεκτονική κατανεμημένων συστημάτων (distributed systems), όπως τα συστήματα grid computing και cluster computing και είναι η **εικονικοποίηση (virtualization)**, ο **μαζικός κατανεμημένος αποθηκευτικός χώρος (mass distributed storage)**, το **μοντέλο παράλληλου προγραμματισμού (parallel programming model)**, και η διαχείριση δεδομένων (cloud data management) [17]. Οτιδήποτε μπορεί να υλοποιηθεί στους παραπάνω servers, υλοποιείται πάντα σε εικονικό περιβάλλον μέσω **virtual machines**, δίνοντας μια ευελιξία και απλοποίηση στη διαχείριση των πόρων και καταργώντας τα «φυσικά» τείχη που διαχωρίζουν τα datacenters, τους servers, τον αποθηκευτικό χώρο, την δικτύωση και τις φυσικές συσκευές, πραγματώνοντας μία δυναμική αρχιτεκτονική που στοχεύει απευθείας στην συγκεντρωτική διαχείριση και στην δυναμική κατανομή των παραπάνω πόρων ως μία οντότητα που παρουσιάζεται ως υπηρεσία. Για να διατηρηθεί υψηλή αξιοπιστία και οικονομία, το cloud υιοθετεί κατανεμημένη αποθήκευση δεδομένων με χρήση **τεχνικών πλεονασμού (redundancy storage – RAID)** σαν υλική λύση και με χρήση αξιόπιστων προγραμμάτων ελέγχου σφαλμάτων δεδομένων σαν λογισμική λύση. Παράδειγμα τέτοιων τεχνικών αποθήκευσης είναι τα συστήματα αρχείων Google File System (GFS) και Hadoop Distributed File System (HDFS).

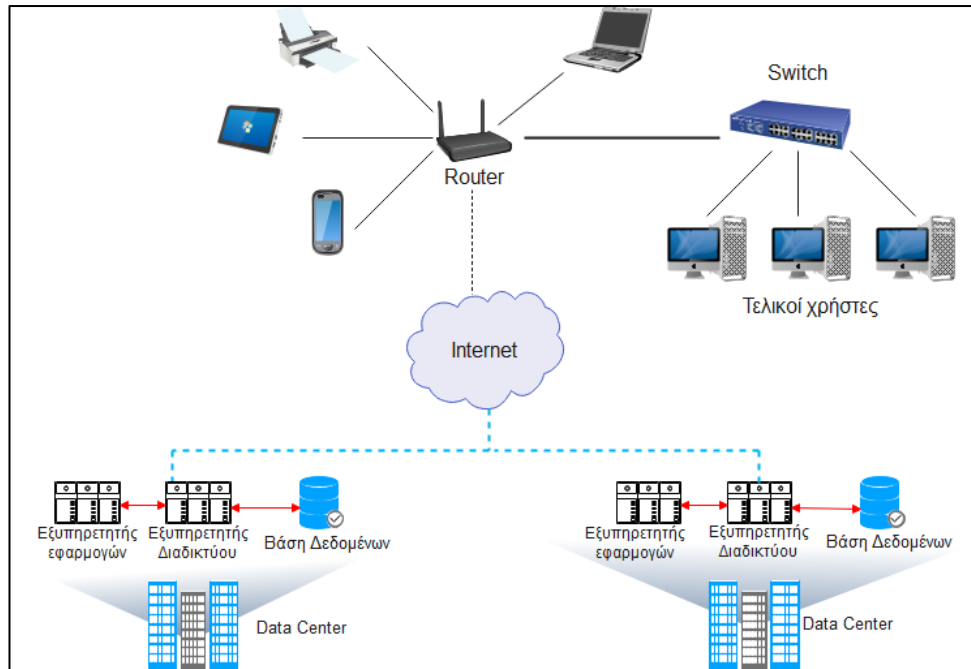
Για να απολαμβάνει ο χρήστης ευκολότερα τις υπηρεσίες που του διαθέτει το cloud αλλά και για να τους αναθέτει αποτελεσματικότερα τους υπολογιστικούς πόρους για να υλοποιήσουν το έργο τους, το cloud χρησιμοποιεί μοντέλα που προσάπτουν μια διαφάνεια στον χρονοπρογραμματισμό έργων και την παράλληλη εκτέλεσή τους, κάνοντάς τα μη ορατά στους χρήστες και στους προγραμματιστές. Το κύριο μοντέλο που υλοποιεί αυτές τις δύο τεχνικές είναι το **μοντέλο MapReduce**, όπου ένα έργο υποδιαιρείται σε περισσότερα υποέργα και μέσω των δύο βημάτων Map και Reduce, φτιάχνοντας έτσι διεργασίες Map και διεργασίες Reduce που διατίθενται σε πολλούς κόμβους-εργάτες (worker nodes) για να εκτελεστούν παράλληλα.

Τέλος, η διαχείριση δεδομένων πρέπει να είναι ικανή να επεξεργάζεται και να αναλύει τεράστιες ποσότητες κατανεμημένων δεδομένων, και άρα πρέπει να διαχειρίζεται αποτελεσματικά μεγάλα σετ δεδομένων. Αυτό υλοποιείται μέσω βάσεων δεδομένων όπου καταχωρούνται σε δεντρικής δομής πίνακες πληροφορίες και μεταδεδωμένα των πραγματικών δεδομένων, εξασφαλίζοντας κλιμακωσιμότητα και τάχιστη προσπέλαση (read και write) των δεδομένων. Παραδείγματα αυτών είναι το BigTable της Google και το HBase της Hadoop.

Ιδιαίτερα τα τελευταία χρόνια με την εξάπλωση και ραγδαία εξέλιξη της **τεχνητής νοημοσύνης (artificial intelligence)**, των **νευρωνικών δικτύων (neural networks)** και των **αλγορίθμων λήψεων αποφάσεων (decision making algorithms)**, η **εξόρυξη δεδομένων (data mining)** και η **μηχανική μάθηση (machine learning)** διευκόλυναν αυτό το έργο ώστε αυτή η συγκεντρωτική συρροή δεδομένων σε μία ισχυρή οντότητα που μπορεί να τα διαχειριστεί, να μετατραπεί σε πολλές ξεχωριστές οντότητες που όλες μαζί μπορούν να συνεργαστούν παράλληλα για την επίτευξη του ίδιου στόχου με καλύτερη αξιοπιστία, συντομότερη διάρκεια, ελάχιστη συντήρηση και ενσωμάτωση πολλών εφαρμογών και υπηρεσιών στην ίδια αρχιτεκτονική με ελάχιστο ή καθόλου κόστος μετατροπής.



Σχήμα 3 Λογική αρχιτεκτονική διαστρωμάτωση του Cloud.



Σχήμα 4 Φυσική αρχιτεκτονική του Cloud.

1.4 Διαδίκτυο των Πραγμάτων – Internet of Things/IoT

Με τις συνεχείς εξελίξεις της τεχνολογίας, αναπτύσσεται ραγδαία η πραγμάτωση του IoT ως ένα πανταχού παρόντος παγκόσμιο υπολογιστικό δίκτυο όπου όλοι και όλα θα είναι συνδεδεμένα στο Internet. Όλα άρχισαν το 1982 όπου ένα μηχάνημα αναψυκτικών ήταν συνδεδεμένο στην τότε έννοια του Internet και έδειχνε ποια αναψυκτικά ήταν διαθέσιμα και εάν ήταν αρκετά παγωμένα. Αργότερα, το 1991, έγιναν σκέψεις για ένα ενιαίο δίκτυο υπολογιστικής ισχύος, ενώ το 1999 υπήρξαν νύξεις για μαζικές επικοινωνίες συσκευής-προς-συσκευή. Την ίδια χρονιά έγινε τελικά παρουσίαση του όρου Internet of Things από τον Kevin Ashton με την σημασία που τον συναντάμε και σήμερα [18].

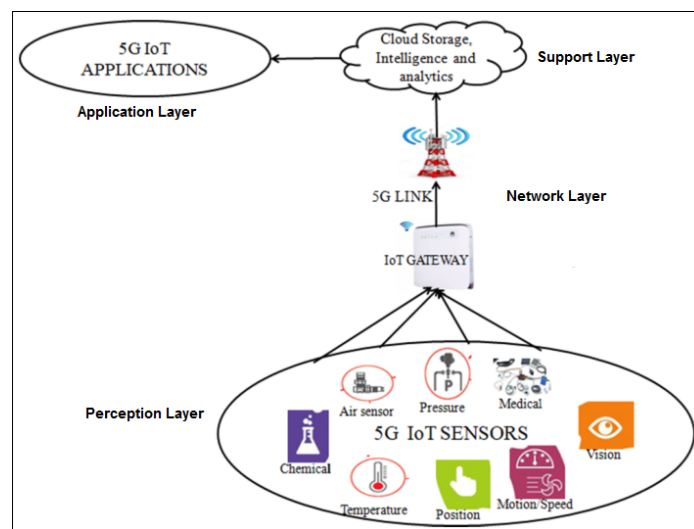
Οι έννοιες που παρουσιάστηκαν σε αυτό το κεφάλαιο, μπορούν να ενοποιηθούν σε ένα συγκεντρωτικό σύστημα που συνδυάζει αυτές τις επιμέρους διαφορετικές έννοιες σε μία γενική αρχιτεκτονική (Εικόνα 7) και τις αφήνει να συνεργαστούν αρμονικά μεταξύ τους. Το λεγόμενο και **Ίντερνετ των Πραγμάτων - IoT** χρησιμοποιεί τα **Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων** για να συλλέξει πληροφορίες του φυσικού περιβάλλοντος, μεταφέροντας τες μέσω ασύρματης τεχνολογίας όπως το **5G** στο **cloud** για να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα και να παρθούν αποφάσεις ανάλογα με τα δεδομένα που συλλέχθηκαν και τέλος να δοθούν πρακτικές λύσεις και έργα με βάση αυτές τις αποφάσεις. Έτσι φαίνεται μία αλληλουχία συνεργασίας μεταξύ των παραπάνω εννοιών για να δημιουργηθεί στο τέλος μία ενιαία οντότητα.

Για να γίνει κατανοητή αυτήν την ενιαία εικόνα του IoT, πρέπει να παρουσιαστεί και η αρχιτεκτονική με την οποία οργανώνονται όλα τα επιμέρους στοιχεία του σε στρώματα. Έτσι, μια γενική διαστρωμάτωση των επιμέρους μελών του έχει ως εξής (Εικόνα 8):

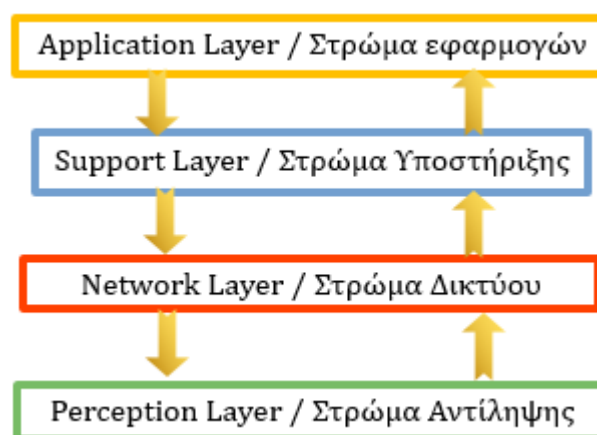
- **Στρώμα Αντίληψης (Perception Layer).** Αρχικά, δεν θα κάναμε λόγο για διασυνδεδεμένες συσκευές εάν αυτές δεν είχαν κάποιο λόγο διασύνδεσης με τις υπόλοιπες. Εδώ υπεισέρχονται τα **WSN** να δώσουν νόημα στις συσκευές ως «έξυπνα» αντικείμενα, συσκευές που μπορούν να αντιληφθούν το περιβάλλον τους και να οργανώσουν δεδομένα με βάση αυτές τις παρατηρήσεις. Αυτό το στρώμα δηλαδή έχει ως σκοπό την συλλογή δεδομένων και την αλληλεπίδραση με το φυσικό περιβάλλον μέσω αισθητήρων και άλλων ενεργοποιητών (actuators) και βρίσκεται πιο κοντά στο φυσικό περιβάλλον και τον τελικό χρήστη από τα άλλα στρώματα [7].

- **Στρώμα Δικτύου (Network Layer).** Το στρώμα αυτό είναι υπεύθυνο για την μετάδοση δεδομένων ανάμεσα σε μέρη του ίδιου στρώματος (π.χ. ανάμεσα στους αισθητήρες του στρώματος αντίληψης ή ανάμεσα στα διάφορα data centers του στρώματος υποστήριξης) ή ανάμεσα σε διαφορετικά στρώματα (π.χ. μεταφορά δεδομένων από το στρώμα αντίληψης στο στρώμα υποστήριξης) Αποτελείται από όλες τις τεχνολογίες και τα πρωτόκολλα διασύνδεσης υπολογιστικών πόρων και οντοτήτων όπως ενσύρματα δίκτυα (οπτικές ίνες, καλώδια χαλκού) ή ασύρματα (ZigBee επικοινωνία μεταξύ αισθητήρων, WiFi για μέτριες αποστάσεις, 5G για μεγάλες αποστάσεις, κλπ). Η βάση που προϋποθέτει αυτήν την κλιμακωσιμότητα για την διασύνδεση αυτού του τεράστιου αριθμού συσκευών είναι το **5G**, καθώς οι προηγούμενες τεχνολογίες 1G-4G που βασίζονταν σε ορθογώνιες τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης δεν μπορούν να διαθέσουν αρκετές χρονοσχισμές για κάθε μία συσκευή ούτε αρκετό εύρος ζώνης συχνότητων [19].
- **Στρώμα Υποστήριξης (Support Layer).** Οι συσκευές του IoT εφαρμόζουν διαφορετικούς τύπους υπηρεσιών. Κάθε συσκευή συνδέεται και επικοινωνεί μόνο με ίδιου τύπου υπηρεσιών συσκευές. Αυτό το στρώμα είναι υπεύθυνο για την υλοποίηση όλων των διαφορετικών υπηρεσιών, την επικοινωνία με την βάση δεδομένων και την συγκεντρωτική επεξεργασία δεδομένων. Παίρνει δηλαδή την συγκεντρωτική πληροφορία του στρώματος Αντίληψης και το αποθηκεύει στην βάση δεδομένων. Στη συνέχεια εκτελεί επεξεργασία πληροφορίας και διαμορφώνει αυτοματοποιημένες αποφάσεις με βάση τα αποτελέσματα της επεξεργασίας. Εδώ κύριο μέσο επίτευξης του έργου αυτού του στρώματος είναι το **Cloud**, που με τα εργαλεία που παρουσιάσαμε προηγουμένως, το εκτελεί αξιόπιστα και αποτελεσματικά [20].

- **Στρώμα Εφαρμογών (Applications Layer).** Το στρώμα αυτό βρίσκεται στην μεριά πιο κοντά στον άνθρωπο και είναι υπεύθυνο για την παράδοση των διαφόρων εφαρμογών στους διαφορετικούς χρήστες του IoT. Δημιουργεί δηλαδή πραγματικά αποτελέσματα και απτές εφαρμογές βασισμένο στα επεξεργασμένα δεδομένα του στρώματος Υποστήριξης. Αυτές οι εφαρμογές μπορεί να ανήκουν σε τελείως διαφορετικές υπηρεσιακές και βιομηχανικές περιοχές όπως οι κατασκευές, οι μεταφορές, το λιανεμπόριο, το περιβάλλον, η δημόσια ασφάλεια, η υγεία, ακόμα και η καθημερινή ιδιωτική ζωή με εφαρμογές στα έξυπνα σπίτια, έξυπνα αυτοκίνητα, έξυπνες οικιακές συσκευές κ.ά. [21]



Σχήμα 6 Αρχιτεκτονική του IoT



Σχήμα 5 Γενική διαστρωμάτωση του IoT

Κεφάλαιο 2 – Έξυπνος Πρωτογενής Τομέας

Η σύνδεση της τεχνολογίας με τον πρωτογενή τομέα έως λίγα χρόνια πριν, υπήρχε στα πλαίσια της διευκόλυνσης μέσω μηχανών των διαδικασιών παραγωγής, επεξεργασίας, μεταποίησης και τυποποίησης των προϊόντων. Ο άνθρωπος δεν έχει πια άμεση επαφή με τις διαδικασίες αυτές, αλλά μέσω της προόδου της τεχνολογίας στον τομέα της χειρωνακτικής δουλειάς και της αντικατάστασής της από αυτοματοποιημένες ενέργειες και διαδικασίες, έχει την δυνατότητα να εκτελέσει τις εργασίες που χρειάζεται πιο εύκολα, πιο αποδοτικά, ασφαλέστερα και με μεγάλη ακρίβεια.

Σε αυτήν την διευκόλυνση έρχεται να προστεθεί και ένα άλλο κομμάτι της τεχνολογίας, αυτό της **επιστήμης της πληροφορικής και των τηλεπικοινωνιών (Information and Communications Technology – ICT)** που με την σειρά της θα διευκολύνει, θα ανασυγκροτήσει και θα εκσυγχρονίσει ακόμη περισσότερο τον πρωτογενή τομέα, απομακρύνοντας τον άνθρωπο ακόμα πιο πολύ από την άμεση επαφή του με τις διαδικασίες παραγωγής των προϊόντων. Κυρίως όμως, όπως αναφερθήκαμε και στον πρόλογο, στόχος του εκσυγχρονισμού του πρωτογενούς τομέα είναι η βέλτιστη διαχείριση των περιορισμένων πόρων όπως το νερό και το γόνιμο έδαφος για την παραγωγή όσο το δυνατόν περισσότερων αγαθών λόγω της πληθυσμιακής έκρηξης που παρατηρείται τις τελευταίες δεκαετίες. Το IoT που περιγράψαμε στην εισαγωγή είναι και η κύρια πραγμάτωση αυτού του εκσυγχρονισμού του πρωτογενή τομέα, με υλοποιήσεις που εφαρμόζονται σε όλους τους διαφορετικούς πιθανούς τομείς παραγωγής προϊόντων. Αυτή η ευελιξία που παρουσιάζει το IoT το καθιστά και ως την αιχμή του δόρατος για την μελέτη και την περαιτέρω εξέλιξή του στο εγγύς μέλλον σε όλους τους τομείς της ανθρώπινης ζωής.

Με την αυξανόμενη αυτοματοποίηση όλης της αλυσίδας των διαδικασιών παραγωγής προϊόντων, οδηγούμαστε σε ένα νέο επίπεδο αυτοματισμού συστημάτων τα οποία δεν χρειάζονται την ανθρώπινη παρέμβαση για να λάβουν αποφάσεις εκτέλεσης ενεργειών, αλλά μπορούν μέσω νέων μεθόδων τεχνητής νοημοσύνης και ευφυούς προγραμματισμού να γίνουν τα ίδια λήπτες αποφάσεων, έχοντας ως βάση το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα. Μερικές τέτοιες μέθοδοι που επιτρέπουν τα συστήματα να επεξεργάζονται δεδομένα και να λαμβάνουν αυτόματα αποφάσεις ανάλογα την κάθε περίπτωση είναι η **μηχανική μάθηση (machine learning)** όπου ένα σύστημα μπορεί να «εκπαιδευτεί» πάνω σε ένα σύνολο δεδομένων, ώστε όταν θα έχει είσοδο πραγματικά δεδομένα να ξέρει τι ενέργειες να εκτελέσει, η **εξόρυξη δεδομένων (data mining)** όπου

μέσω της μελέτης μεγάλου όγκου δεδομένων που έχουν συλλεγεί για μία διαδικασία, το σύστημα να βρει κάποια πρότυπα συμπεριφοράς και έτσι να αποκτήσει γνώση λειτουργίας αυτής της διαδικασίας, και η **βαθιά μάθηση (deep learning)** όπου μέσω των τεχνητών νευρωνικών δικτύων που προσομοιάζουν τον ανθρώπινο εγκέφαλο μπορούν τα συστήματα με εισόδους κάποια δεδομένα και με ορισμένη πιθανότητα, να βγάλουν κάποιες αποφάσεις μετά από μία σειρά εσωτερικών αποφάσεων του νευρωνικού δικτύου. Αυτή η τεχνητή ευφυία που παρουσιάζει ο πρωτογενής τομέας όταν εφαρμοστεί πάνω του το IoT μέσω των παραπάνω μεθόδων, μας περιγράφουν την γενική περιγραφή του όρου «**Εξυπνος Πρωτογενής Τομέας**».

2.1 Ευφυής Γεωργία – Smart Farming

Η έννοια της ευφυούς γεωργίας δεν ήταν πάντα συνυφασμένη με την τεχνολογία της πληροφορικής και το IoT. Ο κύριος εκφραστής της ευφυούς γεωργίας είναι η **γεωργία ακριβείας (precision agriculture)** που ουσιαστικά είναι η πρακτική εφαρμογή οποιασδήποτε τεχνολογίας για την αποτελεσματικότερη διαχείριση της γεωργίας μέσω κατανόησης των χρονικών και χωρικών αλλαγών στο έδαφος, στην σοδειά, στην παραγωγή και στην διεύθυνση αγροτικών μονάδων με την βοήθεια καινοτόμων τεχνικών. Η γεωργία ακριβείας αναδείχθηκε στα τέλη του 1980 με την αντιστοίχιση χημικών ιδιοτήτων των δειγμάτων εδάφους μιας καλλιέργειας νοητικά χωρισμένης σε κομμάτια με πλέγμα (grid-based sampling), με την εφαρμογή μεταβλητών ποσοτήτων λιπάσματος σε κάθε κομμάτι ξεχωριστά μέσω νεοαναπτυχθέντος εξοπλισμού εφαρμογής λιπάσματος [22].

Η δημιουργία αρχικά των WSN και πιο πρόσφατα του IoT έχει κάνει παρόμοιες αντιστοιχίσεις εντελώς αυτοματοποιημένες και σε μερικές περιπτώσεις δίνει προτάσεις για ακόμα καλύτερες αντιστοιχίσεις δεδομένων-διαδικασιών για ακόμα καλύτερα αποτελέσματα. Ειδικά, η εφαρμογή του IoT στην γεωργία έχει συνδυαστεί τόσο αρμονικά που η ευφυής γεωργία έχει ακριβώς την ίδια αρχιτεκτονική υλοποίησης με την αρχιτεκτονική του IoT που παρουσιάσαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Τα τέσσερα κύρια συστατικά των εφαρμογών IoT στην γεωργία ακριβείας είναι (Εικόνα 9) [23]:

1. **Παρακολούθηση καιρού (Weather Monitoring)**. Κρίσιμες καιρικές παράμετροι έχουν τεράστια επίπτωση στην ανάπτυξη μιας καλλιέργειας και περιλαμβάνουν την θερμοκρασία, την υγρασία, την ταχύτητα του ανέμου, την

ατμοσφαιρική πίεση, κ.ά. Αυτά τα δεδομένα, όταν συλλεχθούν, θα αντιστοιχηθούν με τις τοπικές καιρικές συνθήκες και στη συνέχεια εργασία ανάλυσης θα καθορίσουν την πορεία δράσης για βελτίωση της σοδειάς.

2. **Παρακολούθηση Συστατικών Εδάφους (Soil Contents Monitoring).** Η παρακολούθηση του εδάφους και των συστατικών του έχει γίνει από τις πιο απαιτητικές πρακτικές στην γεωργία. Τα χαρακτηριστικά του εδάφους που παίζουν κύριο ρόλο στην καλλιέργεια είναι η υγρασία του εδάφους, το pH, η θερμοκρασία, η χημική σύνθεσή του, κλπ.
3. **Παρακολούθηση Ασθενειών (Diseases Monitoring).** Η ψηφιακή παρακολούθηση και αναγνώριση του τύπου ασθενειών των φυτών μπορούν να βοηθήσουν τον αγρότη να πάρει εμπεριστατωμένες αποφάσεις πολύ γρήγορα. Τεχνικές επεξεργασίας εικόνας και μηχανικής μάθησης χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό της υγείας των φυτών από οπτικούς αισθητήρες.
4. **Παρακολούθηση Άρδευσης (Irrigation Monitoring).** Το IoT βοηθά στην βελτίωση των παραδοσιακών συστημάτων άρδευσης με έναν πιο καινοτόμο τρόπο, παίρνοντας υπόψη σε πραγματικό χρόνο τις καιρικές συνθήκες και την κατάσταση του εδάφους. Έτσι πραγματοποιείται άρδευση μόνο όταν οι παραπάνω παράμετροι το επιτρέψουν. Σκοπός είναι η μείωση του κόστους άρδευσης και την βελτιστοποίηση των πόρων του νερού.



Σχήμα 7 Το IoT στις εφαρμογές γεωργίας.

Όπως αναφέραμε, η γεωργία ακριβείας σχεδιάζεται με τον ίδιο τρόπο που σχεδιάζεται αρχιτεκτονικά και ένα σύστημα IoT.

Αρχικά, το **Στρώμα Αντίληψης**, δηλαδή το στρώμα που έχει την πιο άμεση επαφή με την καλλιέργεια, θα απαρτίζεται από διαφορετικούς αισθητήρες (Πίνακας 1) που επιτρέπουν την συνεχή απόκτηση δεδομένων από την καλλιέργεια και παράδοσή τους στα επόμενα στρώματα ή κατευθείαν στον χρήστη για λήψη αποφάσεων. Η χρήση των WSN στην καλλιέργεια προϋποθέτει και ορισμένες παραμέτρους που πρέπει να ληφθούν υπόψιν. Αρχικά, ο τύπος των δεδομένων, οι τύποι των αισθητήρων, ο τρόπος χρήσης τους και τα αποτελέσματα διαφοροποιούνται ανάλογα με την εφαρμογή στην γεωργία. Τα δεδομένα που θα συλλεχθούν θα πρέπει να είναι διαθέσιμα για ανάλυση σε έναν κεντρικό σταθμό και θα χρησιμοποιηθούν σε συγκεκριμένες στιγμές της διαδικασίας λήψης αποφάσεων, καθώς επίσης και η συγκέντρωση των δεδομένων μπορεί να συμβεί σε ορισμένες στιγμές που σχετίζονται με τις αγροτικές διαδικασίες που έχουν ήδη εκτελεστεί.

Είναι σημαντικό η συλλογή δεδομένων να μην αναπαρίσταται ως άλλη μία διαδικασία χειρισμού μέσα στις υπόλοιπες που ήδη υπάρχουν στην καλλιέργεια, έτσι ώστε να μην αυξάνει τα κόστη παραγωγής. Επιπλέον της απαλλαγής του χειρισμού συλλογής δεδομένων από το WSN, θα πρέπει η εγκατάστασή του να είναι απλή καθώς οι περισσότεροι εργάτες αγροτικών περιοχών έχουν λίγη ή καθόλου γνώση υπολογιστών και ηλεκτρονικών συστημάτων. Η ρύθμιση των αισθητήρων θα πρέπει να αποφεύγεται και όταν είναι παρούσα να είναι όσο πιο απλή γίνεται. Τέλος, θα πρέπει κάθε αισθητήρας που συλλέγεται να έχει και την χωρική αντιστοίχιση που του αναλογεί ώστε τα δεδομένα που συλλέγονται από έναν αισθητήρα να έχουν συσχέτιση με μια περιοχή, με έμφαση το WSN να έχει την πλήρη χωρική κάλυψη του πεδίου εφαρμογής του, ώστε να αξιοποιείται όλο το διαθέσιμο έδαφος [24].

Οι αισθητήρες όμως δεν είναι το μόνο μέρος του στρώματος Αντίληψης. Εκτός από παρατήρηση και συλλογή δεδομένων, χρειάζεται και μια μικρή επεξεργασία και συλλογή μέσω επικοινωνίας D2D σε αυτό το στρώμα πριν σταλούν αυτόνομες στα ανώτερα στρώματα. Αν και μπορεί να χρειαστούν όλα τα επιμέρους δεδομένα από όλους τους αισθητήρες να στέλνονται αυτούσια στον σταθμό βάσης, αυτό μερικές φορές προκαλεί συμφόρηση στο ίδιο το WSN αλλά και πλεονασμό. Δεν χρειάζεται να διατίθενται οι δεκάδες ή εκατοντάδες τιμές θερμοκρασίας όλων των αισθητήρων, αρκετές φορές αρκεί να υπάρχει ένας μέσος όρος για ένα κομμάτι του πεδίου εφαρμογής ή ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα.

Πίνακας 1 Συγκεντρωτικός πίνακας χρήσης αισθητήρων στη γεωργία ακριβείας.

Τύπος αισθητήρων	Λειτουργίες	Παραδείγματα εφαρμογών
Οπτικοί	Χρήση φωτός για μέτρηση ιδιοτήτων εδάφους	Φωτοδίοδοι και φωτοανιχνευτές προσδιορίζουν ποσότητες αργίλου, οργανικών ουσιών και υγρασίας στο έδαφος
Μηχανικοί	Χρήση καθετήρων για μέτρηση συμπίκνωσης εδάφους ή μηχανικής αντίστασης	Τενσιόμετρα για ανίχνευση δύναμης που ασκούν οι ρίζες στην απορρόφηση νερού και για παρεμβάσεις άρδευσης
Ηλεκτροχημικοί	Χρήση ηλεκτροδίων για ανίχνευση ορισμένων ιόντων στο χώμα	Χρήση ηλεκτροδίων επιλεκτικών ιόντων και ηλεκτροδίων με τρανζίστορ επίδρασης πεδίων για εντοπισμό αζώτου-φωσφόρου-καλίου στο έδαφος
Διηλεκτρικά υγρασίας εδάφους	Χρήση ηλεκτροδίων για εκτίμηση επιπέδων υγρασίας μετρώντας την διηλεκτρική σταθερά του εδάφους	Χρήση οργάνου μέτρησης ανακλάσεων οπτικής ισχύος στο πεδίο του χρόνου και της συχνότητας για ανίχνευση περιεχόμενου νερού στο έδαφος
Ροής αέρα	Μέτρηση διαπερατότητας αέρα εδάφους	Μέτρηση συμπίκνωσης, τύπου και δομής εδάφους, επιπέδου υγρασίας
Τοποθεσίας	Χρήση GPS για μέτρηση γεωγραφικού μήκους, πλάτους και υψομέτρου	Το GPS προσφέρει επακριβής εντοπισμό θέσης που είναι ο ακρογωνιαίος λίθος για την γεωργία ακριβείας

Αυτές τις διαδικασίες τις αναλαμβάνουν ολοκληρωμένα που δεν επωμίζονται αποκλειστικά την παρακολούθηση και συλλογή δεδομένων και είναι οι Arduino, Arduino UNO (δέχονται δεδομένα από πολλούς αισθητήρες ταυτόχρονα και τα επεξεργάζονται), Raspberry Pi (μπορούν με τα δεδομένα που έχουν συλλέξει να δώσουν εντολές σε ενεργοποιητές όπως βάνες, κλείστρα, κλπ), Espressif (προσφέρουν κυρίως λειτουργίες χαμηλής κατανάλωσης μετάδοσης δεδομένων μέσω WiFi και Bluetooth), Intel Edison (συγκέντρωση πολλών περιβαλλοντικών μεταβλητών από πολλούς αισθητήρες) και BeagleBone (λήψη αποφάσεων σε πραγματικό χρόνο από την επεξεργασία δεδομένων παρατήρησης).

Τέλος, στο Στρώμα Αντίληψης υπάρχουν και τα δύο είδη που ενσωματώνουν την παρατήρηση και συλλογή δεδομένων με την επεξεργασία, μεταφορά και χρήση ενεργοποιητών σε μία λειτουργία. Αυτά είναι τα Αυτόνομα (Μη Επανδρωμένα) Πτητικά

Μέσα (Unmanned Aerial Vehicles) και τα Αγροτικά Ρομποτικά Συστήματα (Agricultural Robotics).

Σε αντίθεση με δορυφορική φωτογράφιση αγροτικών περιοχών, τα UAV λαμβάνουν μεγαλύτερης χρονικής και χωρικής ανάλυσης φωτογραφίες. Πολλά πεδία αστικών εφαρμογών ήδη χρησιμοποιούν UAV και ο πρωτογενής τομέας δεν αποτελεί την εξαίρεση. Οι τύποι των UAV μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε τέσσερις κατηγορίες, αναλόγως με το κύριο χαρακτηριστικό που εξετάζονται (Εικόνα 11) [25]:

- **Αεροδυναμικά χαρακτηριστικά.** Εδώ υπάρχουν τρεις κατηγορίες α) τα σταθερού πτερυγίου (fixed-wing), β) τα περιστροφικού πτερυγίου (rotary-wing) και γ) τα υβριδικά (hybrid). Τα σταθερού πτερυγίου συμπεριφέρονται όπως τα αεροσκάφη, δηλαδή ανυψώνονται με την ταχύτητα κίνησής τους προς τα εμπρός και πλοηγούνται με πηδάλια κλίσεως αέρος, πτερύγια ανύψωσης και πηδάλια περιστροφής. Στο περιστροφικό πτερύγιο, τα UAV συμπεριφέρονται όπως τα ελικόπτερα, με την ανύψωση να επιτυγχάνεται μέσω πολλών στροφείων που εκτοξεύουν τον αέρα αντίθετα με την βαρύτητα και την πλοήγηση με την ροπή και την ώθηση τους. Σε αυτά δεν χρειάζεται χώρος για την απογείωσή τους, και έτσι είναι πολύ ευέλικτα στις αγροτικές ανομοιόμορφες περιοχές. Ανάλογα με τον αριθμό των στροφείων υπάρχουν τα τρικόπτερα, τετράπτερα, οκτάπτερα, εξακόπτερα. Τέλος τα υβριδικά συνδυάζουν τους δύο παραπάνω τύπους, με το να χρησιμοποιούν τα σταθερά πτερύγια για να διανύσουν μεγάλες αποστάσεις και τα περιστροφικά πτερύγια για την απογείωση και προσγείωση.
- **Επίπεδο αυτονομίας.** Λόγω έλλειψης χειριστή, κάθε UAV χαρακτηρίζεται από το πόσο αυτόνομο είναι για να εκτελέσει μία διεργασία. Έτσι υπάρχουν τέσσερα επίπεδα αυτονομίας: α) τα ανθρώπινης λειτουργίας, όπου ένας άνθρωπος χειρίζεται όλες τις λειτουργίες του UAV, β) τα κατ' εξουσιοδότηση ανθρώπινης λειτουργίας, όπου τα UAV είναι ελεύθερα να πάρουν αυτόνομα κάποιες αποφάσεις, γ) τα ανθρώπινης επίβλεψης συστήματα, όπου απλά ο άνθρωπος δίνει γενικές κατευθυντήριες γραμμές για την λειτουργία τους και όλες οι αποφάσεις εναπόκεινται στο ίδιο το σύστημα ανάλογα με τα δεδομένα που λαμβάνει ο επιβλέπων άνθρωπος και δ) τα πλήρως αυτόνομα συστήματα όπου το UAV απλά δέχεται δεδομένα από τον ανθρώπινο χειριστή και το ίδιο ορίζει τις κατευθυντήριες γραμμές δράσης, τα επιμέρους καθήκοντα και το είδος των εργασιών για να εκτελεστούν.

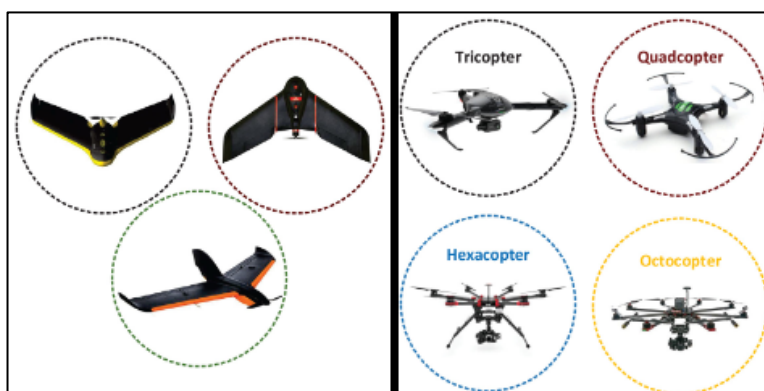
- **Μέγεθος και βάρος.** Εδώ οι δύο υποκατηγορίες βάρους είναι τα ελαφρά και βαριά, με οτιδήποτε ξεπερνά τα 150 κιλά να θεωρείται βαρύ. Στο μέγεθος, μικρά θεωρούνται τα σταθερού πτερυγίου όταν δεν ξεπερνούν τα 20 κιλά, ενώ για τα περιστροφικού πτερυγίου, οτιδήποτε δεν ξεπερνά τα 25 κιλά θεωρείται μικρό. Μία τρίτη υποκατηγορία είναι να mini τα οποία ζυγίζουν από γραμμάρια μέχρι μερικά κιλά.
- **Πηγή ισχύος.** Υπάρχουν τεσσάρων ειδών καύσιμα που χρησιμοποιεί ένα UAV: α) κηροζίνη, β) μπαταρίες, γ) κυψέλες καυσίμου και δ) ηλιακές κυψέλες. Η κηροζίνη χρησιμοποιείται συνήθως στα σταθερού πτερυγίου UAV, συνήθως για στρατιωτικές χρήσεις. Για τις χρήσεις στον πρωτογενή τομέα χρησιμοποιούνται UAV περιστροφικών πτερυγίων με μπαταρίες λόγω μικρότερης διάρκειας λειτουργίας. Οι κυψέλες καυσίμου μετατρέπουν την χημική ενέργεια σε ηλεκτρική και χρησιμοποιούνται σε σταθερού πτερυγίου UAV με ανάγκη για διάνυση μεγάλων αποστάσεων. Τέλος, οι ηλιακές κυψέλες χρησιμοποιούνται σε όλα τα UAV με σκοπό να τα ανυψώσουν στην ατμόσφαιρα με σκοπό να παρέχουν σε περισσότερους διασύνδεση με το internet.



Σχήμα 8 Αγροτικό Ρομποτικό σύστημα απομάκρυνσης ζιζανίων.

Υπάρχουν πάρα πολλές χρήσεις UAV στην ευφυή γεωργία με μερικές εφαρμογές να τα χρησιμοποιούν για εντοπισμό διαρροών νερού σε καλλιέργειες σόγιας και καλαμποκιού με θερμικές κάμερες, για παρακολούθηση της κατάστασης των φυτών με πολυφασματικές κάμερες και χρήση LiDAR σε αμπελώνες και σιτηρά για εκτίμηση χρήσης νερού σε αμπελώνες και καλλιέργειες ροδιού με χρήση θερμικών και πολυφασματικών καμερών ακόμα και για αποδοτικότερο ψεκασμό φρούτων και δέντρων.

Τα Αγροτικά Ρομποτικά Συστήματα που έχουν αναπτυχθεί με την βοήθεια του IoT μπορούν να εκτελέσουν πολλαπλές αγροτικές δραστηριότητες στη θέση του ανθρώπου, αντικαθιστώντας πλήρως τις δυνατότητές του ή ακόμα και επεκτείνοντάς τις (Εικόνα 10). Τέσσερις βασικές αγροτικές λειτουργίες που εκτελούν είναι ανίχνευση, καθοδήγηση, χαρτογράφηση και χειροκίνητη δραστηριότητα. Στην Ευρώπη, ΗΠΑ, και πολλές χώρες στην Ασία, όπου έχουν χρησιμοποιηθεί αυτά τα ρομπότ έχουν αυξήσει την αποδοτικότητα μειώνοντας τα κόστη και τον χρόνο λειτουργίας, έχουν μειώσει κατά σχεδόν 80% τα φυτοφάρμακα μειώνοντας έτσι την περιβαλλοντική μόλυνση, όπως επίσης έχουν δώσει λύσεις στην έλλειψη εργατικού δυναμικού, ειδικά στην τωρινή περίοδο της πανδημίας COVID. Εκτός από αυτόνομα συστήματα που αναλαμβάνουν την συγκομιδή, τον έλεγχο και την διαχείριση της εξάπλωσης των ζιζανίων, τον αυτόματο ψεκασμό για παράσιτα, την άρδευση, υπάρχουν και αυτόνομα τρακτέρ που είτε διαθέτουν συστήματα αυτό-οδήγησης είτε διαθέτουν χειρισμό με απομακρυσμένη σύνδεση, όπου ο αγρότης μπορεί να ελέγχει τις δραστηριότητες στη φάρμα του από οποιοδήποτε σημείο με την χρήση μιας έξυπνης συσκευής και μιας σύνδεσης στο internet [26].



Σχήμα 9 Τύποι UAV. Αριστερά είναι τα είδη σταθερού πτερυγίου και δεξιά τα περιστροφικού πτερυγίου.

Η τεχνολογίες επικοινωνιών και ειδικά το 5G παίζουν καθοριστικό ρόλο στην επιτυχή ανάπτυξη του δικτύου στο πεδίο εφαρμογής μιας καλλιέργειας. Στο **Στρώμα Δικτύου** για την ευφυή γεωργία, η χρήση καλωδιωμένων επικοινωνιών είναι εξαιρετικά περιορισμένη σε οποιαδήποτε εφαρμογή της, καθώς όπως είναι γνωστό το στρώμα αυτό περιέχει και την επικοινωνία μεταξύ των αισθητήρων, αλλά και την επικοινωνία του WSN με έναν σταθμό βάσης.

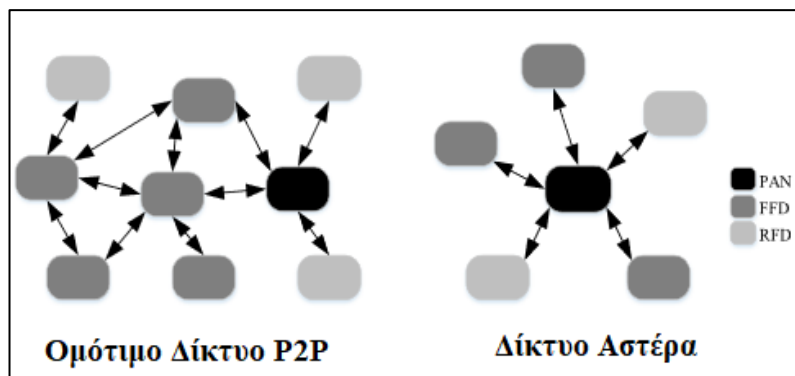
Αν αναλογιστούμε τις ιδιότητες του πεδίου εφαρμογής, τον αριθμό των αισθητήρων που θα χρειαστεί και την ανθρώπινη δραστηριότητα μέσα στο πεδίο εφαρμογής του WSN, οι ενσύρματες επικοινωνίες καθίστανται αρκετά μη βιώσιμες για την εφαρμογή τους στο Στρώμα Δικτύου, λόγω του μεγάλου κόστους της καλωδίωσης και της συντήρησής της. Έτσι, επικεντρώνοντας στις ασύρματες επικοινωνίες για την υλοποίηση του Στρώματος Δικτύου, οι τεχνολογίες που θα χρησιμοποιηθούν μπορούν να κατηγοριοποιηθούν με βάση τέσσερα γνωρίσματα [27]:

1. **Το φάσμα συχνοτήτων** το οποίο μπορεί να διακριθεί περαιτέρω σε **αδειοδοτημένο (licensed)** και **μη-αδειοδοτημένο (unlicensed)**. Το μη-αδειοδοτημένο φάσμα συχνοτήτων κάνει χρήση βιομηχανικής, επιστημονικής και ιατρικής μπάντας συχνοτήτων RF, γνωστή ως ISM μπάντα (Industrial Scientific Medical band). Το μειονέκτημα χρήσης αυτής της μπάντας είναι θέματα ασφαλείας, κόστος υποδομών και παρεμβολή άλλων συχνοτήτων, ιδιαίτερα ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή που δημιουργείται από συσκευές του IoT που χρησιμοποιούν ISM που διακόπτουν την ραδιοεπικοινωνία άλλων συσκευών που χρησιμοποιούν την ίδια πάντα συχνοτήτων. Από την άλλη μεριά, το αδειοδοτημένο φάσμα που κατανέμεται στα δίκτυα κυψελών προσφέρει λιγότερη παρεμβολή, μεγαλύτερο επίπεδο ασφάλειας, ευρύτερη κάλυψη, αποδοτικότερη διαχείριση κίνησης δεδομένων, υψηλή αξιοπιστία, καλύτερο QoS, και κυρίως λιγότερο κόστος υλοποίησης για τους χρήστες. Για όλα αυτά τα πλεονεκτήματα πρέπει βέβαια να θυσιαστούν δύο πράγματα: κόστος για την απόκτηση άδειας χρήσης του φάσματος και μεγαλύτερη κατανάλωση ισχύος μετάδοσης δεδομένων.
2. **Το πρότυπο επικοινωνιών** το οποίο διακρίνεται σε **μικρής και μεγάλης εμβέλειας πρότυπα επικοινωνιών**. Υπάρχουν πάρα πολλά πρότυπα και στις δύο υποκατηγορίες, το κάθε ένα με τα δικά του ξεχωριστά χαρακτηριστικά. Ειδικά για τις μικρής εμβέλειας επικοινωνίες υπάρχουν συσκευές που χρησιμοποιούν επικοινωνία κοντινού πεδίου (NFC - near field communication), Bluetooth, το πρωτόκολλο ZigBee, παθητικά και ενεργητικά συστήματα ταυτοποίησης με ραδιοσυχνότητες (RFID – Radio Frequency Identification) και καλύπτουν γενικά αποστάσεις περίπου 100m. Τα μεγάλης εμβέλειας πρότυπα καλύπτουν δεκάδες χιλιόμετρα και συγχωνεύονται όλα κάτω από τον όρο χαμηλής ισχύος – ευρύ πεδίου (Low Power Wide Area – LPWA) με βάση τα δύο κύρια χαρακτηριστικά τους, δηλαδή την κάλυψη μεγάλης έκτασης αλλά με χρήση μικρής ισχύος

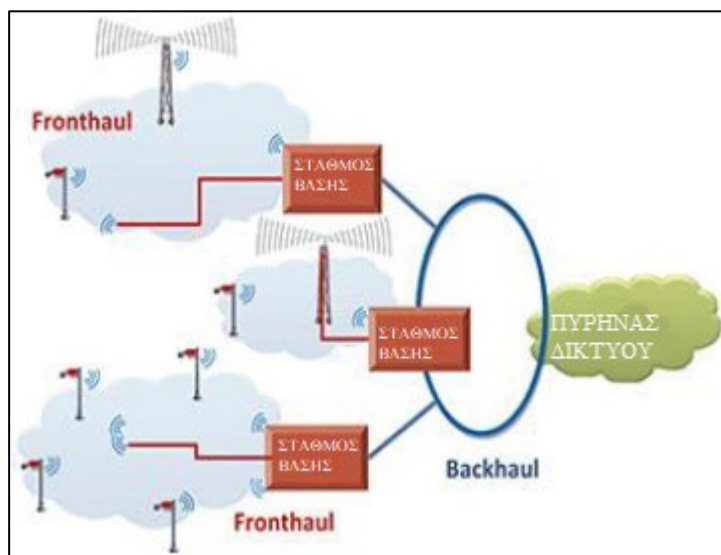
μετάδοσης δεδομένων. Παραδείγματα αυτών είναι το LoRa, SigFox, NB-IoT, κ.ά.

3. **Το σενάριο εφαρμογής** των ασύρματων επικοινωνιών προσδιορίζει την επιλογή της τεχνολογίας που θα χρησιμοποιηθεί από την εκάστοτε IoT συσκευή. Εδώ οι δύο κύριοι ρόλοι που μπορούν να διαδραματίσουν οι IoT συσκευές είναι είτε ως fronthaul είτε ως backhaul συσκευές (Εικόνα 13). Ως fronthaul εννοείται το μέρος του δικτύου από το πεδίο εφαρμογής του IoT μέχρι και τον σταθμό βάσης και ως backhaul εννοείται η σύνδεση του σταθμού βάσης μέχρι τον ενδότερο πυρήνα (ραχοκοκαλιά) του δικτύου. Οι αισθητήρες και ενεργοποιητές δηλαδή ανήκουν στο fronthaul, ενώ οι αναμεταδότες και μερικές συσκευές επεξεργασίας συγκεντρωτικών δεδομένων από το fronthaul, ανήκουν στο backhaul. Στο fronthaul οι κόμβοι μεταδίδουν λίγα δεδομένα, καλύπτουν μικρές αποστάσεις επικοινωνίας μεταξύ τους και χρησιμοποιούν μικρή ποσότητα ενέργειας για αυτήν την επικοινωνία. Αντίθετα, στο backhaul υποστηρίζονται μεγάλοι ρυθμοί δεδομένων που μεταδίδονται σε μεγάλες αποστάσεις. Μερικές από τις τεχνολογίες υποστηρίζουν και αμφίδρομες συνδέσεις που επιτρέπουν διόρθωση σφαλμάτων κατά την μετάδοση, κρυπτογράφηση δεδομένων, αμφίδρομες επιβεβαιώσεις «χειραψίας» για διασφάλιση αξιοπιστίας δεδομένων και ενημερώσεις υλικολογισμικού ανά πάσα στιγμή. Καθεμία τεχνολογία είναι κατάλληλη σε μια συγκεκριμένη εφαρμογή της IoT συσκευής σε σχέση με μία άλλη.
4. **Την τοπολογία εφαρμογής** των IoT συσκευών στο πεδίο. Κάθε πρότυπο επικοινωνίας συμπεριφέρεται διαφορετικά εάν οι κόμβοι τοποθετηθούν με συγκεκριμένο τρόπο. Μερικές τοπολογίες τοποθέτησης είναι αυτές της γραμμής, του ομότιμου δικτύου Peer-to-Peer, του αστέρα, του πλέγματος, της δεντρικής δομής, του διαύλου, κ.ά. Σε κάθε μία από αυτές τις τοπολογίες, μια IoT συσκευή διαδραματίζει διαφορετικό ρόλο και λειτουργία (Εικόνα 12). Τέτοιος ρόλος είναι αυτός του Συντονιστή Προσωπικού Χώρου (Personal Area Coordinator – PAN) ή αυτός της τελικής συσκευής (end device). Ως λειτουργίες ξεχωρίζουν αυτή της Συσκευής Πλήρους Λειτουργίας (Full Function Device – FFD) ή της Συσκευής Μειωμένης Λειτουργίας (Reduced Function Device – RFD). Για παράδειγμα, σε μια τοπολογία ομότιμου δικτύου, μία συσκευή συντονιστή λειτουργεί πάντα ως FFD, ενώ οι τελικές συσκευές μπορούν να είναι είτε FFD είτε RFD. Αυτές που είναι FFD μπορούν να έχουν πολλαπλές συνδέσεις, ενώ αυτές που είναι RFD

μπορούν να επικοινωνήσουν μόνο με μία FFD (δεν μπορεί να συνδεθεί με μία RFD). Σε μια τοπολογία αστέρα, ο κεντρικός κόμβος είναι πάντα PAN, και οι γύρω συσκευές μπορούν μόνο να συνδέονται μαζί του και όχι μεταξύ τους.



Σχήμα 11 Τεχνολογίες επικοινωνιών με βάση την τοπολογία εφαρμογής



Σχήμα 10 Τεχνολογίες επικοινωνιών με βάση το σενάριο εφαρμογής

Στόχος του 5G είναι να συνενώσει όλα τα παραπάνω διαφορετικά γνωρίσματα που είναι επιθυμητά για μία τεχνολογία επικοινωνιών στην εφαρμογή της σε IoT ευφυούς γεωργίας, σε μία ενιαία τεχνολογία που θα καλύπτει όλες τις απαιτήσεις που εμφανίζονται. Αυτό το καταφέρνει με βάση τα τρία σενάρια χρήσης του 5G: το mMTC, το URLL και το eMBB. Με κύρια δύναμη το mMTC και την δυνατότητά του να υποστηρίξει μεγάλο αριθμό συσκευών, οι περισσότερες εφαρμογές της ευφυούς γεωργίας αλλά και όλου του πρωτογενή τομέα μπορούν να στηριχτούν στην χρήση του 5G. Οποιοσδήποτε να είναι ο τύπος, ο αριθμός, τα χαρακτηριστικά και το πεδίο εφαρμογής των συσκευών, το 5G μπορεί να ανταπεξέλθει στα σενάρια εφαρμογής τους.

Επίσης, το URLL θα προσδώσει και μία επιπλέον ώθηση στο να γίνει το 5G η κινητήρια δύναμη του πρωτογενούς τομέα, με το να παρέχει αξιοπιστία και ελάχιστη καθυστέρηση στις εφαρμογές, ακόμα και στις αγροτικές περιοχές, περιοχές δηλαδή αποσυνδεδεμένες με την πυκνότητα και εγγύτητα των αστικών περιοχών. Τέλος, το eMBB θα μπορέσει να εξασφαλίσει μια αρκετά καλή υπάρχουσα λειτουργικότητα σε σχέση με τα ήδη υπάρχοντα δίκτυα κυψελών στις αγροτικές περιοχές. Όσο η τεχνολογία εισέρχεται στον πρωτογενή τομέα, τόσο αυξάνεται η ποιότητα και η ποσότητα της πληροφορίας στις ήδη υπάρχουσες υποδομές, μειώνοντας την αποδοτικότητα του 4G όπως την γνωρίζουμε έως σήμερα. Σε γενικές γραμμές, το 2020, οι ΗΠΑ, ο Καναδάς, πολλές χώρες στην Ευρώπη, η Κίνα και η Ιαπωνία έχουν ήδη χρησιμοποιήσει εμπορικά το 5G στις αγροτικές περιοχές, ενώ σχεδόν το 80% των αγροτικών περιοχών στο Ηνωμένο Βασίλειο είναι ακόμα εκτός του δικτύου 4G, δυσχεραίνοντας την εφαρμογή έξυπνων τεχνολογιών στις αγροτικές περιοχές [26].

Η κύρια τεχνολογία που θα κάνει πραγματικότητα τις απαιτήσεις που ορίσαμε το 5G και στην οποία θα στηριχτεί το 5G NR είναι η NB-IoT (Narrowband Internet of Things) που ανήκει στην ομάδα LPWA. Το NB-IoT είναι μια τεχνολογία που βασίζεται στο LTE και έχει προσελκύσει το επιστημονικό ενδιαφέρον λόγω της εύκολης και αποδοτικής υποστήριξης του mMTC και λόγω των αυστηρών απαιτήσεων σε θέματα συνδεσιμότητας, ενεργειακής απόδοσης, αξιοπιστίας και καθυστέρησης. Βασίζεται σε χαμηλό ρυθμό δεδομένων για D2D επικοινωνία, εξαιρετικά χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, επεκτασιμότητα και μεγάλη κάλυψη σε κυψελωτά δίκτυα, δηλαδή σε όλες τις προδιαγραφές για την ανάπτυξη και υλοποίηση έξυπνων IoT συστημάτων.

Με την ενσωμάτωσή του στα καινούρια 5G NR δίκτυα μέσω της αντικατάστασης μιας μπάντας του GSM στα 200KHz ή μέσω χρήσης ενός μπλοκ των 180KHz και για uplink και για downlink, θα ενισχύσει τις εξαιρετικά χαμηλών χαρακτηριστικών εφαρμογές του IoT όπως οι έξυπνοι μετρητές, οι αισθητήρες ανοιχτού χώρου, χωρίς να διακινδυνεύει να ελαττώσει την απόδοση των δικτύων από τα οποία θα εξυπηρετούνται. Για να τα επιτύχει αυτά θα πρέπει βέβαια να θυσιάσει δύο πράγματα: την υποστήριξη υπηρεσίας διαπομπής handover (αλλαγής κυψέλης όσο είναι ενεργό) και την απώλεια του QoS για να γίνει δυνατή μια μείωση στην κατανάλωση ενέργειας [28].

Όπως ορίστηκε και παραπάνω, η γεωργία ακριβείας ορίζει την βέλτιστη μετατροπή των δεδομένων που παρατηρούνται στο φυσικό περιβάλλον σε καινοτόμες γεωργικές πρακτικές, ώστε να βελτιώσουν τις ήδη υπάρχουσες. Το **Στρώμα**

Υποστήριξη είναι αυτό που θέτει τις βάσεις για την συνεχή εξέλιξη της γεωργίας, αλλά και αυτό που έθεσε τα θεμέλια της Γεωργίας 4.0 (Agriculture 4.0) όπως τα γνωρίζουμε σήμερα. Το Διεθνές Οικονομικό Φόρουμ ορίζει την Γεωργία 4.0 ως την θεμελίωση ενός ψηφιακού περιβάλλοντος όπου τα φυσικά και τα εικονικά αντικείμενα διασυνδέονται και αλληλοεπιδρούν αυτόνομα. Οι τεχνολογίες κλειδιά που θα το επιτύχουν αυτό είναι η τεχνητή νοημοσύνη, η μηχανική μάθηση, το big data και η ανάλυση δεδομένων, το υπολογιστικό νέφος και τα κυβερνο-φυσικά συστήματα που διασυνδέουν τις φυσικές αγροτικές εργασίες με τις τεχνολογίες επικοινωνιών (Πίνακας 2).

Πίνακας 2 Τεχνολογίες-κλειδιά στην Γεωργία 4.0

Τεχνολογία	Δυνατότητα	Επίδραση
Τεχνητή Νοημοσύνη και Μηχανική Μάθηση	Διαθέτει ευφρείς εφαρμογές λογισμικού που μπορούν να εκτελέσουν γνωστικές λειτουργίες μέσω αποφάσεων και μη-δομημένων εντολών.	-Μείωση κόστους πρόβλεψης για λήψη αποφάσεων. -Επιτρέπει αποτελεσματική διαχείριση ρίσκου. -Αυξάνει την γεωργική ακρίβεια και αυξάνει την αποδοτικότητα.
Big Data και Ανάλυση Δεδομένων	Επιτρέπει την απόκτηση και εμπειριστατωμένη εκτίμηση μεγάλου όγκου ετερογενών δεδομένων από πολλές πηγές.	-Πρώθηση λήψεων αποφάσεων πραγματικού χρόνου. -Ενίσχυση αποτελεσματικότερης διαχείρισης πόρων. -Βελτιστοποίηση ποιότητας παραγωγής.
Υπολογιστικό Νέφος	Διαθέτει υλικούς, λογισμικούς και αποθηκευτικούς υπολογιστικούς πόρους ως υπηρεσίες πάνω σε ένα δίκτυο ή στο Internet.	-Αποτροπή ανάγκης για δαπανηρούς υπολογιστικούς πόρους. -Διευκόλυνση διαχείρισης και διάχυσης δεδομένων. -Υποστηρίζει την λήψη αποφάσεων.
Κυβερνο-φυσικά Συστήματα	Επιτρέπει την σύνδεση των γεωργικών διεργασιών στην καλλιέργεια με την υπολογιστική δύναμη και τον ICT τομέα μέσω καινοτόμων εφαρμογών.	-Τροποποίηση επίδοσης του εργατικού δυναμικού στον αγροτικό τομέα. -Ενίσχυση ασφάλειας, ευελιξίας, και αξιοπιστίας των εργασιών στην καλλιέργεια. -Παραγωγή μεγαλύτερης ποιότητας σοδειά σε μικρότερο κόστος.

Υπάρχουν πολλά παραδείγματα αυτών των τεχνολογιών-κλειδιών στην Γεωργία 4.0. Στην Τεχνητή Νοημοσύνη έχουν αναπτυχθεί αυτοματοποιημένα συστήματα λήψεων αποφάσεων, όπου WSN παρακολουθήσης καλλιεργειών για διαφορετικές πτυχές όπως ασθένειες σοδειάς, διαχείριση λιπασμάτων και φυτοφαρμάκων και διαχείρισης νερού χρησιμοποιούν έξυπνους αλγορίθμους για την ανίχνευση των παραπάνω δεδομένων ώστε να βελτιώνεται η απόδοση ενέργειας και να μεγιστοποιείται η έκταση κάλυψης από το WSN μέσω ενός πρωτοκόλλου που εξισορροπεί την χρήση ενέργειας ανάμεσα στους αισθητήρες [29].

Η Μηχανική Μάθηση από την άλλη έχει δείξει ισχυρές δυνατότητες και πολλά υποσχόμενα αποτελέσματα, όπως το PestNet που είναι μια εφαρμογή μηχανικής μάθησης για την ανακάλυψη και κατηγοριοποίηση φυτικών παρασίτων ή το σύστημα αυτόματης διαχείρισης νερού των Bu και Wang που μαθαίνοντας από δεδομένα ανάπτυξης της σοδειάς και χρήσης νερού παραθέτει έξυπνες αποφάσεις για την άρδευση από την φύτευση μέχρι την συγκομιδή [30]. Η διαχείριση μεγάλου όγκου δεδομένων και η ανάλυσή τους στη γεωργία είναι απαραίτητη καθώς δεδομένα συλλέγονται από αισθητήρες, UAV, γεωργικά μηχανήματα κ.ά. και όχι μόνο τοπικά ή για μία καλλιέργεια. Έχει αναπτυχθεί ένα σύστημα που μπορεί να τοποθετηθεί σε οποιοδήποτε αγροτικό τεμάχιο, να πάρει δεδομένα από τις IoT συσκευές, να τις αποθηκεύσει και με χρήση εξόρυξης δεδομένων (data mining) να δει τις επιπτώσεις του περιβάλλοντος στην σοδειά για την έκταση μιας ολόκληρης χώρας [31].

Τέλος, το Υπολογιστικό Νέφος προσφέρει τα απαραίτητα εργαλεία που μπορούν να μετατρέψουν τα δεδομένα της καλλιέργειας σε αξιόπιστο αυτοματοποιημένο σύστημα διαχείρισης της αγροτικής παραγωγής. Το CLAY-MIST με ακρίβεια 94% μπορεί να βοηθήσει αποτελεσματικά τους αγρότες μέσω παρακολούθησης του αγρού και της επεξεργασίας των δεδομένων στο cloud. Επίσης, το Agri-Info παραθέτει ως υπηρεσία όλες τις πληροφορίες που συγκεντρώνονται από άλλες αγροτικές περιοχές για μια συγκεκριμένη σοδειά, δίνοντας συμβουλές και διαγνώσεις μετά από επεξεργασία για συγκεκριμένους χρήστες [32].

Το Στρώμα Υποστήριξης είναι η διεπαφή ως σύστημα λογισμικού μεταξύ των IoT συσκευών και των εφαρμογών. Τα ακατέργαστα δεδομένα που συλλέγονται στο Στρώμα Αντίληψης δεν έχουν καμία δύναμη ως απλές παρατηρήσεις και καταγραφές δεδομένων. Πρέπει να υπάρξει ένα **πλαίσιο-έκφραση (context)** ώστε να μπορέσουν να αποκτήσουν σημασία για περαιτέρω χρήση.

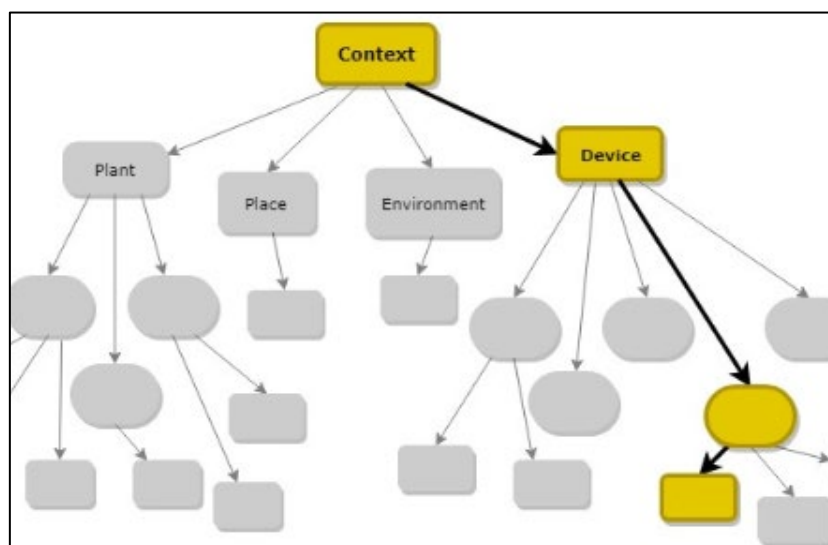
Οι περιβαλλοντικές πληροφορίες και εντολές από το πεδίο-καλλιέργεια πρέπει να μεταφερθούν σε αυτό το στρώμα για ερμηνεία και λήψη αποφάσεων. Με βάση τη λογική της έκφρασης των ακατέργαστων δεδομένων σε κατανοητά για ένα σύστημα ή χρήστη δεδομένα, στο Στρώμα Υποστήριξης διαθέτει ενότητες (modules) [33]:

- **Απόκτηση Πλαισίου (Context Acquisition).** Αυτή η ενότητα επιφορτίζεται με το να λαμβάνει τα ακατέργαστα δεδομένα και να τα μετατρέπει σε καθορισμένες εκφράσεις. Χρησιμοποιούνται τεχνικές Μηχανική Μάθησης όπως συσταδοποίηση και κατηγοριοποίηση με χρήση τεχνητών νευρωνικών δικτύων, ώστε να ομογενοποιηθούν τα παραπλήσια δεδομένα σε ξεχωριστές κατηγορίες. Τα βήματα που γίνεται αυτό είναι αρχικά μια προεπεξεργασία των ακατέργαστων δεδομένων από αισθητήρες της γεωργίας ακριβείας, μετά μια τμηματοποίησή τους ανάλογα με το σύστημα της γεωργίας ακριβείας στο οποίο ανήκουν, μια εξαγωγή κάποιων χαρακτηριστικών όπως βέλτιστες τιμές, όρια τιμών, αποδεκτός βαθμός συσχέτισης, και εάν αυτά τα χαρακτηριστικά είναι αποδεκτά από την εκάστοτε τεχνική προχωρά στην κατηγοριοποίηση σε μία ομάδα όλων των παρόμοιων (που προέρχονται από το ίδιο σύστημα) δεδομένων. Συνήθης γλώσσα κατασκευής τέτοιων οντοτήτων είναι η Web Ontology Language (OWL) αλλά και η Extensible Markup Language (XML), όπου μπορούν να κατασκευαστούν οντότητες δεδομένων όπως οντότητα φυτών, χώρου, περιβάλλοντος και συσκευής (plant, place, environment and device ontology).
- **Διαχείριση Πλαισίου (Context Management)** (Εικόνα 14). Αυτή η ενότητα είναι υπεύθυνη για τη διαχείριση των αιτήσεων από τη μονάδα Απόκτησης Πλαισίου όπου λαμβάνονται πληροφορίες για το πλαίσιο, καθώς και για τη συσχέτιση των εκφράσεων με τις υπηρεσίες που προσδιορίζονται από τους παρόχους υπηρεσιών, προκειμένου να εντοπίζονται οι καταλληλότερες υπηρεσίες και ενέργειες ελέγχου για το σχετικό πλαίσιο. Αυτή η ενότητα αποτελεί τον πυρήνα του ενδιάμεσου λογισμικού με επίγνωση του περιβάλλοντος cloud και περικλείει διάφορες κατανεμημένες μηχανές που αλληλεπιδρούν μεταξύ τους, συνδέοντας τις λειτουργίες. Η κύρια λειτουργία δηλαδή αυτής της ενότητας είναι η αντιστοίχιση των δεδομένων με μία ή περισσότερες υπηρεσίες ώστε να εντοπιστούν οι κατάλληλες ενέργειες για να ολοκληρωθούν αυτές οι υπηρεσίες. Για παράδειγμα, εμπλεκόμενοι φορείς που

δραστηριοποιούνται στην γεωργία ακριβείας μπορούν να θέσουν όρους για οποιαδήποτε λειτουργία (υπηρεσία) ενός συνεταιρισμού καλλιιεργειών.

- **Αποθήκευση Πλαισίου (Context Storage)** (Εικόνα 15). Η αποθήκευση των πλαισίων είναι απαιτούμενη καθώς το ιστορικό είναι απαραίτητο για σχεδιασμό διαδικασιών και αποτελεί καλή πηγή δεδομένων για πρόβλεψη μελλοντικών ενεργειών. Έχοντας υπόψιν τον μεγάλο όγκο δεδομένων, ένα κατακευκμένο σύστημα αποθετηρίου στο cloud μας εγγυάται την διατήρηση της πληροφορίας. Ο καλύτερος τρόπος να γίνει η αποθήκευση είναι με βάσεις δεδομένων όπου τα πλαίσια αποθηκεύονται σαν οντότητες και τα μεμονωμένα δεδομένα σαν χαρακτηριστικά οντοτήτων. Η Structured Query Language (SQL) είναι μια τέτοια γλώσσα προγραμματισμού που μπορεί να αποθηκεύσει, διαχειριστεί και ανακαλέσει δεδομένα από μία βάση δεδομένων, αν και στη συνέχεια για την υλοποίηση αυτής της ενότητας αναβαθμίζεται σε ένα γραφικό περιβάλλον μέσα στο cloud.
- **Αυτο-προσαρμογή (Self-Adaptation)**. Η ικανότητα της αυτο-προσαρμογής είναι μια ισχυρή απαίτηση ώστε το κάθε πλαίσιο να είναι είσοδος για την παραγωγή κατάλληλων υπηρεσιών και ενέργειας ελέγχου, όπως επίσης και για να μπορεί να αυτοδιορθώνεται η ροή του Στρώματος Υποστήριξης μέσω διάγνωσης, εντοπισμού και ανάκαμψης πιθανών προβλημάτων. Οι δύο αυτοί μηχανισμοί που πληρούν αυτές τις απαιτήσεις είναι ο Μηχανισμός Διαχείρισης Εξέλιξης (Evolution Management mechanism) και ο μηχανισμός Διαχείρισης Προσαρμογής (Adaptation Management mechanism). Ο πρώτος ελέγχει εάν έχει αναπτυχθεί σωστά το Στρώμα Υποστήριξης μέσω παρατήρησης και ελέγχου και ο δεύτερος δέχεται ως είσοδο τα αποτελέσματα παρατήρησης του πρώτου μηχανισμού και με βάση αυτά βρίσκει νέες μεθόδους ανάπτυξης του Στρώματος Υποστήριξης και επιτρέπει νέες υπηρεσίες κατ' απαίτηση. Αυτό επιτρέπει την γρηγορότερη ανάπτυξη συστημάτων εάν εντοπιστεί παρόμοιο μοτίβο δεδομένων-πλαίσια στο σύστημα.
- **Ασφάλεια και Απόρρητο (Security and Privacy)**. Τα ακατέργαστα δεδομένα που εισέρχονται στο Στρώμα Υποστήριξης έχουν μικρή σημασία για εξαγωγή οποιουδήποτε συμπεράσματος ή λήψης απόφασης. Τα δεδομένα όμως που έχουν συσχετιστεί και ενταχθεί σε πλαίσια είναι κύριας σημασίας και άρα ευαίσθητα. Αυτή η ενότητα χρησιμοποιεί λειτουργίες ασφαλείας για τον εντοπισμό και

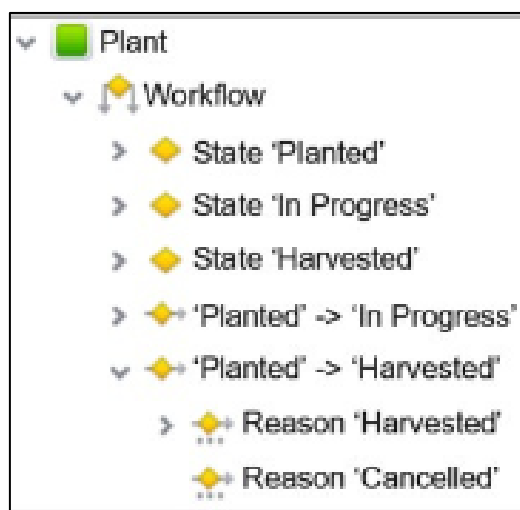
παρακολούθηση πιθανόν παρατυπιών και μη εξουσιοδοτημένης πρόσβασης στα δεδομένα, εξασφαλίζοντας το απόρρητο των πλαισίων δεδομένων. Αυτό το καταφέρνει με τον ορισμό ειδικών κανόνων ελέγχου πρόσβασης (access control rules) αλλά και με την κρυπτογράφηση και αυθεντικοποίηση των δεδομένων κατά την μεταφορά και αποθήκευση των δεδομένων στο cloud. Ο πιο εύκολος και αποδοτικός τρόπος είναι μέσω του μηχανισμού OTP (One-Time Password), δηλαδή ενός αναλώσιμου κωδικού μίας χρήσης που έχει ισχύ για μικρό χρονικό διάστημα ανάμεσα στην επικοινωνία του χρήστη και του server αυθεντικοποίησης. Παράδειγμα αυτού είναι το Google Authenticator.



Σχήμα 12 Παράδειγμα διαχείρισης πλαισίων δεδομένων μέσω αντιστοίχισης πλαισίων σε δεδομένα IoT με χρήση δενδρικής δομής.

Διαφορετικών ειδών πλατφόρμες υποστήριξης έχουν εφαρμοστεί κατά τόπους για αγροτικές και όχι μόνο εφαρμογές του πρωτογενούς τομέα. Το LinkSmart της Ευρωπαϊκής Ένωσης όπου κύριος στόχος του είναι η ενσωμάτωση και διαχείριση ετερογενών συσκευών σε εφαρμογές μέσω κατανεμημένης αρχιτεκτονικής, ανεξαρτήτως τεχνολογίας δικτύου. Το Global Sensor Networks είναι μια πλατφόρμα ανοιχτού κώδικα που διευκολύνει την ανάπτυξη WSN σε διαφορετικά πεδία εφαρμογής και σε παραλληλία με διαφορετικού είδους WSN. Το Node-RED της IBM είναι ένα σύστημα που οπτικοποιεί τις συσκευές IoT και τα δεδομένα τους για καλύτερη και απλούστερη διαχείριση του συστήματος. Τα FIWARE και Open-IoT έχουν εφαρμοστεί σε αρδευτικά συστήματα και φάρμες στην Αυστραλία αντίστοιχα και έχουν δώσει δείγματα εξοικονόμησης κόστους λειτουργίας, με το πρώτο να είναι ιδιαίτερα

αποτελεσματικό στο να διασυνδέει διαφορετικές εφαρμογές του Στρώματος Εφαρμογών πολύ εύκολα και το δεύτερο να επιτρέπει την διασύνδεση ξεχωριστών υπηρεσιών IoT σε ένα ενιαίο εύκολα διαχειρίσιμο σύστημα.



Σχήμα 13 Παράδειγμα αποθήκευσης
πλαίσιας ως οντότητες με χρήση SQL

Το **Στρώμα Εφαρμογών** της ευφυούς γεωργίας είναι το μόνο με το οποίο ο τελικός χρήστης έχει οποιαδήποτε αλληλεπίδραση με το σύστημα μέσω των εφαρμογών λογισμικού και το μόνο που πραγματικά δίνει αξία στα συλλεγόμενα, μεταδιδόμενα και επεξεργασμένα δεδομένα. Οι εφαρμογές είναι κεντρικά αποθηκευμένες, προσβάσιμες εξ' αποστάσεως από τους χρήστες και χρησιμοποιούμενες κατόπιν εγγραφής του χρήστη για απόκτηση άδειας χρήσης. Μέσω των εφαρμογών ο τελικός χρήστης μπορεί να διαχειρίζεται τα δεδομένα από όλη την καλλιέργειά του, να παρακολουθεί και να ελέγχει μεμονωμένα φυτά, σειρές φυτών, κομμάτια γης ή ολόκληρη την καλλιέργεια, να προειδοποιείται έγκαιρα και να εκτελεί διαγνώσεις λοιμώξεων από ασθένειες και προσβολών από παράσιτα, καθώς και να χειρίζεται αυτόνομα μηχανήματα [34].

Μιας και στην εποχή μας ο τελικός χρήστης διαθέτει πολλαπλές συσκευές με πρόσβαση στο internet και άρα στο IoT, το στρώμα εφαρμογών πρέπει να εξυπηρετεί όλους τους δυνατούς συνδυασμούς λειτουργικών συστημάτων, υλικών προδιαγραφών, γλωσσών προγραμματισμού, συμβατότητας μεταξύ αυτών και ξεχωριστή χρηστικότητα και λειτουργία για κάθε συνδυασμό. Μια εφαρμογή για παρακολούθηση καλλιέργειας θα πρέπει να είναι διαθέσιμη με την ίδια ευκολία χρήσης και επίδοσης και στον χρήστη που χρησιμοποιεί μεγάλων προδιαγραφών σταθερό υπολογιστή σε ένα γραφείο (π.χ. υπεύθυνος γεωπόνος της καλλιέργειας), και στον χρήστη που κινείται σε κτηριακές

εγκαταστάσεις και είναι επιφορτισμένος με πολλές διεργασίες ταυτόχρονα (π.χ. υπεύθυνος μονάδας παραγωγής) και στον αγρότη που έχει στη διάθεσή του ένα smartphone.

Σε αυτό το στρώμα χρησιμοποιούνται πολλά πρωτόκολλα για ανταλλαγή δεδομένων είτε με τα διαφορετικά API είτε με το Στρώμα Υποστήριξης. Μερικά από αυτά είναι [35]:

- Το **HTTP (HyperText Transfer Protocol)** που είναι το πιο διαδεδομένο πρωτόκολλο που χρησιμοποιείται για ανάπτυξη εφαρμογών στο διαδίκτυο και σκοπός του είναι να παραθέτει όλους τους πόρους των υπερμέσων/πολυμέσων για να ικανοποιήσουν όλες τις απαραίτητες ανάγκες του διαδικτύου.
- Το **CoAP (Constrained Application Protocol)** που είναι ένα πρωτόκολλο σχεδιασμένο πάνω στην έννοια του IoT και προσφέρει REST (Representational state transfer) διεπαφές επιπρόσθετα των λειτουργιών του HTTP, και αλλάζει μερικά χαρακτηριστικά του HTTP για να λειτουργήσουν αποκλειστικά πάνω σε IoT συστήματα για αποφυγή απώλειας και ποιοτικά χαμηλής σύνδεσης.
- Το **MQTT (Message Queue Telemetry Transport)** είναι ένα ελαφρύ και απλό πρωτόκολλο μηνυμάτων δημοσίευσης και συνδρομής που έχει σχεδιαστεί για δίκτυα IoT μεγάλης καθυστέρησης και μικρού εύρους ζώνης. Έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε το συνολικό εύρος ζώνης του δικτύου και οι απαιτήσεις ενέργειας των συσκευών να είναι ελάχιστες, ενώ παράλληλα διασφαλίζει την αξιοπιστία και την εξασφάλιση ότι τα μηνύματα θα παραδοθούν. Αυτά τα χαρακτηριστικά το κάνουν αρκετά επιθυμητό για συσκευή-προς-συσκευή επικοινωνία.
- Το **XMPP (eXtensible Messaging and Presence Protocol)** βασίζεται στην XML γλώσσα και επιτρέπει σε πραγματικό χρόνο ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ οντοτήτων του δικτύου, όπως επίσης και την άμεση επικοινωνία πολλαπλών χρηστών στο internet με επιπρόσθετη από άκρη σε άκρη κρυπτογράφηση.
- Το **Advanced Message Queuing Protocol (AMQP)** είναι ανοιχτού κώδικα πρωτόκολλο με βάση τα συστήματα IoT και επιτρέπει την τυποποίηση του μηχανισμού μηνυμάτων χρησιμοποιώντας παραγωγούς, διαμεσολαβητές, καταναλωτές και τεχνικές επικοινωνίας. Χρησιμοποιεί το TCP πρωτόκολλο για την ανταλλαγή μηνυμάτων με δύο κύρια συστατικά, τις ουρές ανταλλαγής και τις ουρές μηνυμάτων (exchange and message queues).

- Το **DDS (Data Distribution Service)** το οποίο είναι το ίδιο είδος με το MQTT (δημοσίευση/συνδρομή), αλλά χρησιμοποιεί μηχανισμούς όπως το AMQP παραλείποντας τους διαμεσολαβητές, και χρησιμοποιώντας multi-casting αντί για αυτούς, αυξάνοντας το QoS.

2.2 Ευφυής Κτηνοτροφία – Smart Livestock Farming

Η δεύτερη μεγαλύτερη βιομηχανία του πρωτογενούς τομέα ως ποσότητα παραγωγής αλλά και μεριδίου αγοράς ως τζίρος είναι η κτηνοτροφία. Αυτό ισχύει εδώ και χιλιετίες, με την σχέση του ανθρώπου και των εξημερωμένων ζώων να έχει περάσει από πολλά στάδια, από συνύπαρξη και αλληλοβοήθεια έως εκμετάλλευση σε βαθμό αρπακτικού, με αποτέλεσμα την δραστική μείωση του προσδόκιμου ζωής των ζώων. Στην παρούσα περίοδο υπάρχει μία τάση που στηρίζεται στις διαδικασίες όπου προτιμάται η ευζωία του ζώου, παρά η εκμετάλλευσή του [36]. Την ίδια στιγμή όμως, η απομάκρυνση από την εντατική παραγωγή (αποτέλεσμα της εκμετάλλευσης) θα είναι επιβλαβής στις ανάγκες του όλο και αυξανόμενου πληθυσμού της γης, όπως συζητήθηκε στον πρόλογο.

Η λύση βρίσκεται στην επονομαζόμενη **κτηνοτροφία ακριβείας (precision livestock farming/ precision husbandry)**. Όπως και στην γεωργία ακριβείας, έτσι και εδώ σχετίζεται με την εφαρμογή σύγχρονων προσεγγίσεων, στρατηγικών και τεχνολογιών, μέσω των οποίων στο συγκεκριμένο μέρος, τη σωστή στιγμή, να λαμβάνονται οι καταλληλότερες ενέργειες με τη μέγιστη δυνατή ακρίβεια για την ικανοποίηση των ειδικών αναγκών των ζώων και των συμφερόντων των παραγωγών και κτηνοτρόφων, για την παραγωγή προϊόντων με συγκεκριμένες ιδιότητες, με μέγιστη αποτελεσματικότητα, ελάχιστη αρνητικό αντίκτυπο στα ζώα και στο περιβάλλον, με φειδωλή χρήση των φυσικών πόρων [37].

Η ανατροφή μηρυκαστικών είναι ένα παράδειγμα εφαρμογής κτηνοτροφίας ακριβείας που πληροί όλες τις παραπάνω προϋποθέσεις για μέγιστη αποτελεσματικότητα. Οι δύο τρόποι ανατροφής των μηρυκαστικών, η εσωτερικού χώρου σε εγκαταστάσεις με ελεγχόμενη τροφή και η εξωτερικού χώρου σε βοσκοτόπια, αποτελούν διαφορετικές προσεγγίσεις για την κτηνοτροφία ακριβείας, με την κάθε προσέγγιση να έχει διαφορετική υλοποίηση του IoT.

Σε σχέση με την γεωργία ακριβείας και την IoT διαστρωμάτωσή της που παρουσιάστηκε προηγουμένως, η κτηνοτροφία ακριβείας διαφέρει κυρίως στο Στρώμα Αντίληψης, με τα άλλα στρώματα να παραμένουν αμετάβλητα. Τα στρώματα Δικτύου, Υποστήριξης και Εφαρμογών είναι ιδιαίτερα ευέλικτα ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι ίδιες τεχνολογίες με την γεωργία ακριβείας, και ως χρήση πρωτοκόλλων δικτύου, και ως εργαλεία επεξεργασίας, αποθήκευσης και εξαγωγής συμπεράσματος, αλλά και ως λογισμικά και εργαλεία ανάπτυξης λογισμικού και εφαρμογών τελικού χρήστη.

Η διαφοροποίηση στο Στρώμα Αντίληψης συμβαίνει στην διαφορετική αντιμετώπιση που έχουν τα ζώα ως παραγωγικές μονάδες: χρειάζονται συνεχή παρακολούθηση ζωτικών λειτουργιών, η εκτροφή τους είναι από μόνη της μία ολόκληρη διαδικασία με δικές της απαιτήσεις, έχουν μικρότερο και πιο ευαίσθητο κύκλο ζωής ως μονάδες παραγωγής σε σχέση με το φυτικό βασίλειο και στο διάστημα στο οποίο συμβάλλουν στην παραγωγική διαδικασία υπόκεινται σε μεγάλες αλλαγές σε σχέση με το ίδιο διάστημα ενός φυτού. Ακόμα και το είδος δεδομένων που παρατηρούνται είναι διαφορετικό με αυτό της γεωργίας ακριβείας, κυρίως λόγω της προσθήκης περισσότερων παρατηρήσιμων μεγεθών. Έτσι είναι απαραίτητο να προστεθούν περαιτέρω είδη αισθητήρων, οι οποίοι διαχωρίζονται σε **εξωτερικούς** (αυτούς που μετρούν δεδομένα του περιβάλλοντος) και **εσωτερικούς** (σε αυτούς που μετρούν δεδομένα των ζώων) (Πίνακας 3).

Πίνακας 3 Είδη αισθητήρων στις εφαρμογές της έξυπνης κτηνοτροφίας.

Εξωτερικοί αισθητήρες	Εσωτερικοί αισθητήρες
Θερμοκρασία περιβάλλοντος χώρου	Επιταχυνσιόμετρο / Γυροσκόπιο
Αναλυτής αερίων (αμμωνία, CO ₂)	Μετρητές δραστηριότητας
Διαθλαστής laser	Βιοαισθητήρες
Ταχύτητα αέρα	Αισθητήρες αναπνοής
Σχετική ατμοσφαιρική υγρασία	GPS
Ήχος (μικρόφωνα)	Μετρητής βημάτων
Χημικοί αναλυτές (pH, ποιότητα νερού)	Αισθητήρες καρδιακών παλμών
Υπέρυθρη εικόνα (θερμική κάμερα)	Θερμοκρασία σώματος
Καταγραφή εικόνας/βίντεο	Αισθητήρες οίστρου
Βάρος (πλατφόρμα πλάστιγγας/ζυγαριά)	Αισθητήρες στρες

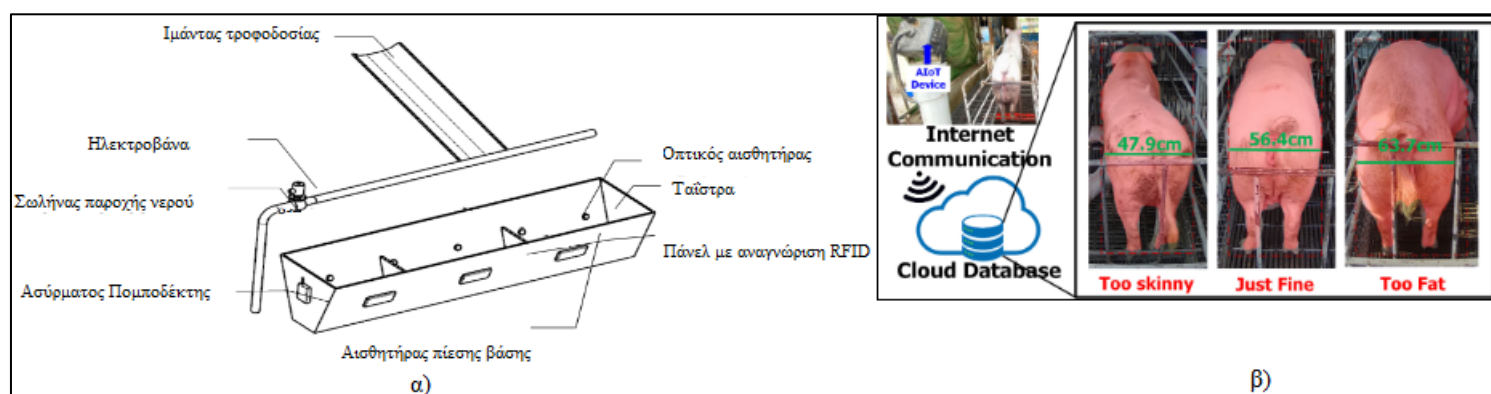
Αρχικά διαχωρίζεται ο τύπος εφαρμογής των αισθητήρων στην κτηνοτροφία σε αυτούς του **κλειστού** και του **ανοιχτού χώρου**. Φάρμες ζώων όπου η παραγωγική διαδικασία επικεντρώνεται σε κτηριακές εγκαταστάσεις που στεγάζουν τα διάφορα είδη ζώων ακολουθούν την γενική φιλοσοφία υλοποίησης της γεωργίας ακριβείας: αισθητήρες τοποθετημένοι σε συγκεκριμένα σημεία του χώρου που παρακολουθούν όχι μόνο περιβαλλοντικές αλλά και ζωικές μεταβλητές όχι ως μονάδες αλλά ως σύνολο. Η υλοποίηση αυτή του κλειστού χώρου έχει πολλά κοινά σημεία με τις υλοποιήσεις για παρακολούθηση μιας καλλιέργειας. Ενδεδειγμένα, σε μια μονάδα εκτροφής πουλερικών ή άλλων μικρών οικόσιτων ζώων τα δεδομένα που λαμβάνουν οι αισθητήρες εφάπτονται των συνθηκών διαβίωσής τους στον περιορισμένο χώρο που διαθέτουν: θερμοκρασία, ποσοστά διοξειδίου του άνθρακα από την αναπνοή και τις υπόλοιπες ζωτικές λειτουργίες παραγωγής αερίων των ζώων, ποσοστά αμμωνίας ώστε τα περιττώματα να μην ελαττώνουν την ποιότητα του αέρα, ποσοστά υγρασίας και σκόνης για την ποιότητα του αέρα, κλπ [38].

Πέραν των αισθητήρων, οι ενεργοποιητές παίζουν σημαντικό ρόλο στους κλειστούς χώρους: η σίτιση, η πόση, ο καθαρισμός και φροντίδα των ζώων κλειστού χώρου γίνεται αποκλειστικά με παρέμβαση του ανθρώπου και όχι αυτοβούλως από τα ζώα. Έτσι, έξυπνα ρομποτικά μηχανήματα και ενεργοποιητές απομακρύνουν την ανθρώπινη παρέμβαση στις παραπάνω διαδικασίες και τις αυτοματοποιούν. Ένα παράδειγμα αυτοματοποιημένης σίτισης και πόσης ζώων κλειστού χώρου είναι η ειδική επιλογή τροφής και νερού από ένα έξυπνο σύστημα τροφοδοσίας που δέχεται ασύρματα τα δεδομένα από τους αισθητήρες και προσαρμόζει την διαίτα των ζώων με έλεγχο ροής στερεάς τροφής με ιμάντες και χρήση ηλεκτροβαλβίδας στο σύστημα νερού, ενώ ένας αισθητήρας μέσα στην ταΐστρα παρακολουθεί τις διατροφικές συμπεριφορές ανά συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα [39].

Παράδειγμα έξυπνου συστήματος για την πορεία υγείας του ζώου σε κλειστούς χώρους είναι και η οπτική παρακολούθηση του ζώου και για αποτύπωση των σωματικών του μεγεθών (και εάν αυτά παρεκκλίνουν από το κανονικό) και για τυχόν εύρεση ασθενειών ή άλλων ανωμαλιών κατά την ανάπτυξή του [40] (Εικόνα 16). Άλλα αυτόματα ρομποτικά συστήματα κλειστού χώρου χρησιμοποιούνται για την αποκομιδή ζωικών παράγωγων όπως το γάλα. Το χειροκίνητο άρμεγμα είναι μια αργή και χρονοβόρα διαδικασία, επιρρεπής σε βακτηριακές λοιμώξεις και αρκετά απρόβλεπτη ως προς την ποσότητα παραγόμενου γάλακτος. Εδώ το IoT έρχεται να ξεπεράσει τις

προκλήσεις ελαχιστοποιώντας την ανθρώπινη δραστηριότητα και τα κόστη εργασίας με τα αυτοματοποιημένα συστήματα αρμέγματος.

Ειδικά συστήματα ελέγχουν την θερμοκρασία του γάλακτος και το αποθηκεύουν σε ψυκτικές δεξαμενές με τελείως αποστειρωμένα μέσα. Πριν γίνει όμως αυτό προηγούνται αρκετές ενέργειες όπως ο καθαρισμός του ζώου, την καθοδήγηση του σε πλατφόρμα, την αυτόματη τοποθέτηση των συσκευών/αισθητήρων στο ζώο και την αποτελεσματική εξαγωγή του γάλακτος. Η παραγωγή γάλακτος εξαρτάται από την ποιότητα και ποσότητα της τροφής του ζώου, το οποίο γίνεται με την μέθοδο που παρουσιάστηκε προηγουμένως. Ένα τέτοιο σύστημα IoT κλειστού χώρου που ολοκληρώνει τον κύκλο τροφής-ανάπτυξης-εξαγωγής προϊόντος εντός ενός κλειστού χώρου είναι και το Biz4intellia [41].



Σχήμα 14 Παραδείγματα κλειστού χώρου αισθητήρων. α) Έξυπνο σύστημα σίτισης και πόσης ζώων, β) Σύστημα παρακολούθησης πορείας της υγείας οικόσιτων ζώων κλειστού χώρου

Στους αισθητήρες ανοιχτού χώρου υπάρχουν ορισμένοι παράγοντες που διαφοροποιούν την υλοποίηση του Στρώματος Αντίληψης (και περιορίζουν τις επιλογές του Στρώματος Δικτύου) σε σχέση με τα προηγούμενα παραδείγματα εφαρμογών. Εδώ σε αντίθεση με τον χωρικό περιορισμό του παρατηρήσιμου πεδίου μιας καλλιέργειας από τους αισθητήρες, οι αισθητήρες δεν είναι υποχρεωτικά χωρικά στάσιμοι και σταθεροί, ειδικά σε μεγάλα ζώα κτηνοτροφίας όπως τα βοοειδή και τα αιγώδη. Η έννοια του πραγματικού χρόνου παρακολούθησης των ζώων μιας κτηνοτροφικής μονάδας οδηγεί στον δρόμο των **φορητών (mobile)** και **φορετών (wearable)** αισθητήρων, καθώς τα μεγάλα ζώα υπό παρακολούθηση δεν μπορούν να περιοριστούν χωρικά όπως στου κλειστού χώρου οικόσιτα ζώα (πουλερικά, χοίροι, κ.ά.). Η ανάγκη για ξεχωριστή παρακολούθηση ενός μεγάλου ζώου, μιας και το καθένα είναι ξεχωριστή επένδυση για τον κτηνοτρόφο, μεταφέρει το Στρώμα Αντίληψης τοπικά στο ζώο. Έτσι έχουμε διαφορετικά είδη αισθητήρων τα οποία φέρουν αισθητήρες μικρού μεγέθους για την άνετη εφαρμογή τους πάνω ή μέσα στο ζώο (Εικόνα 17).

Αρχικά, υπάρχουν οι έξυπνες ετικέτες που προσαρμόζονται πάνω στο δέρμα σε κάποιο εξωτερικό σημείο του ζώου, συνήθως το αυτί, και διαθέτουν RFID τεχνολογία αλλά και αναμεταδότη σημάτων, και είναι χαμηλών προδιαγραφών λόγω του περιορισμού του βάρους και του μεγέθους τους. Χρησιμοποιούνται συνήθως για την ταυτοποίηση και εντοπισμό του ζώου, χωρίς να παρέχουν πιο εξειδικευμένες δυνατότητες επεξεργασίας δεδομένων. Μια παρόμοια υλοποίηση είναι και οι υποδόριοι αναμεταδότες, όπου μικροσκοπικές κάψουλες μεταφέρονται υποδόρια μέσω σύριγγας και μπορούν να μετρούν την θερμοκρασία σώματος και άλλες ζωτικές ενδείξεις λόγω εγγύτητας στα μετρούμενα μεγέθη. Εναλλακτικά στα μηρυκαστικά χρησιμοποιούνται βόλαιο-αναμεταδότες που παραμένουν στο στομάχι και είναι απολύτως ασφαλείς για το ζώο. Για περισσότερες και πιο σύνθετες δυνατότητες, είναι δυνατόν να προσδεθεί πάνω στο ζώο ένας ή περισσότεροι (sensor group) αισθητήρες με μεγαλύτερες προδιαγραφές, ώστε να υπάρχει μια πιο ολοκληρωμένη εικόνα για την κατάσταση του ζώου. Συνήθως τέτοιοι αισθητήρες είναι μεγαλύτερου μεγέθους από τα 3 προηγούμενα παραδείγματα και υλοποιούνται ως κολάρα ή μπρασελέ στα άκρα του ζώου [42].



Σχήμα 15 Είδη φορητών και φορετών αισθητήρων για μεγάλα οικόσιτα ζώα. α)Έξυπνες ταμπέλες β)Υποδόριοι αισθητήρες γ)Αισθητήρες-βόλαιο δ)Αισθητήρες ως κολάρο

Έχοντας μεταφέρει το πεδίο παρατήρησης των αισθητήρων πάνω στο ζώο, έχουμε προσδώσει φορητότητα στον αισθητήρα, κάτι που πρέπει να καλυφθεί δικτυακά από το **Στρώμα Δικτύου** σε όλο τον χώρο κίνησης του ζώου, ειδάλλως ο αισθητήρας δεν θα είναι φανερός στο δίκτυο, και άρα θα υπάρχει απώλεια δεδομένων. Υπάρχουν δύο τρόποι να γίνει αυτό: είτε απευθείας στον σταθερό σταθμό βάσης που είναι τοποθετημένος ώστε να καλύπτει όλα τα πιθανά σημεία μιας φάρμας (π.χ. στο κέντρο της φάρμας), είτε εμμέσως μέσω multi-hop διαδρομής, είτε αυτή είναι συνεχής μετάδοση στον εγγύτερο αισθητήρα άλλου ζώου έως να φθάσουν τα δεδομένα στον σταθμό βάσης, είτε είναι με χρήση UAV που λειτουργεί ως επαναλήπτης ή συλλογέας δεδομένων από πολλούς αισθητήρες και μπορεί να μετακινείται σε όλη την επιφάνεια της φάρμας. Και εδώ, με βάση τα χαρακτηριστικά του 5G έχουν αρθεί οι περιορισμοί που χαρακτηρίζουν τα δίκτυα 3G και 4G, όπως η υψηλή κατανάλωση ενέργειας, η καθυστέρηση από άκρο σε άκρο, η αδυναμία υποστήριξης υψηλής πυκνότητας συσκευών κ.λπ.

Η ίδια δυνατότητα θα επιτρέψει στο IoT να διαδραματίσει το ρόλο του στη διαχείριση της κτηνοτροφίας, όπου τα διάφορα σενάρια χρήσης βάσει υπηρεσιών είναι εκτεταμένα. Εκτός από τα πλεονεκτήματα που προσφέρει το 5G με βάση τα χαρακτηριστικά του, υπάρχουν και άλλα οφέλη, όπως η ασφάλεια, η κινητικότητα υποστήριξη, οικονομία κλίμακας, κλπ.

Στο **Στρώμα Υποστήριξης** δεν σημειώνεται κάποια αξιολογή αλλαγή σε σχέση με την ευφυή γεωργία, αλλάζουν μόνο τα δεδομένα πάνω στα οποία η μηχανική μάθηση και η τεχνητή νοημοσύνη χρησιμοποιούν τους αλγορίθμους τους. Από τα ίδια δεδομένα, τα οποία οι συσκευές IoT θα συλλέγουν από διάφορες δραστηριότητες των ζώων, μπορούν να αναπτυχθούν εξ' αποστάσεως επαυξημένες αναλύσεις για την παρακολούθηση του καρδιακού ρυθμού των ζώων, της θέσης, της αρτηριακής πίεσης, της θερμοκρασίας κ.λπ. Χωρίς την αλλοίωση του φυσικού οικοσυστήματος και του περιβάλλοντός του, το οποίο φιλοξενεί ζώα, οι προηγμένες τεχνικές τεχνητής νοημοσύνης και ML μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την μοντελοποίηση και προσομοίωση πιθανών σεναρίων, ώστε να μάθουμε για τον καιρό και ακόμη να παρέχουμε οδηγίες για τη μείωση της συμβολής των ζώων στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου κ.λπ. Η αναγνώριση προτύπων που είναι δυνατή με τους αλγορίθμους τεχνητής νοημοσύνης και μηχανικής μάθησης θα αποδώσει μια άμεση πρόβλεψη που θα είναι χρήσιμη στο πλαίσιο του στρώματος εφαρμογών για εξαγωγή και εκτίμηση συμπερασμάτων πολλές επιλογές και στη συνέχεια να εισαγάγει με ακρίβεια τις οικονομικές ισορροπίες της κτηνοτροφικής παραγωγής. Με αυτές τις προηγμένες ψηφιακές τεχνικές, η γραμμή παραγωγής ζωικών προϊόντων μπορεί να έχει έναν υποστηρικτικό μηχανισμό που εγγυάται την διαχείριση της πολυπλοκότητας και των αβεβαιοτήτων που αντιμετωπίζουν οι κτηνοτρόφοι σε τακτική βάση [43].

Τέλος, στο **Στρώμα Εφαρμογών** υπάρχει μία έντονη απαίτηση για πραγματικού χρόνου απόκτηση δεδομένων από τους αισθητήρες και απευθείας απεικόνισή τους στους χρήστες, με αποτέλεσμα το URLL σενάριο χρήσης του 5G να προέχει ως εφαρμογή του στην κτηνοτροφική μονάδα. Οι τελικοί χρήστες και εδώ είναι είτε άμεσα εμπλεκόμενοι στην παραγωγική διαδικασία όπως οι κτηνοτρόφοι, είτε έμμεσα όπως οι υπεύθυνοι της μονάδας και οι προμηθευτές, είτε ως εξωτερικοί αρωγοί στην κτηνοτροφία όπως οι κτηνίατροι οι οποίοι διευκολύνονται αρκετά με την εξ' αποστάσεως παρακολούθηση της υγείας των ζώων για να βγάλουν γρήγορα και ακριβή συμπεράσματα σε περίπτωση εμφάνισης περίεργων ζωτικών καταγεγραμμένων δεδομένων, και να αποφανθούν για τυχόν ασθένεια και τρόπο δράσης καταπολέμησής της [44].

2.3 Ευφυής Υδατοκαλλιέργεια – Smart Aquaculture

Ο πρωτογενής τομέας δεν περιορίζεται μόνο στα χερσαία εδάφη αλλά καλύπτει και τις θαλάσσιες περιοχές. Ως τμήμα του, η υδατοκαλλιέργεια παίζει σημαντικό ρόλο στην προσφορά φυσικών αγαθών στον άνθρωπο. Το 2014, η παγκόσμια προσφορά ψαριών έφτασε τα 16,2 εκατομμύρια τόνους, που αντιστοιχούν σε 20 κιλά ψαριών ανά άτομο. Έφτασε σε νέο ρεκόρ, κυρίως λόγω της τεράστιας ανάπτυξης της υδατοκαλλιέργειας, η οποία παρέχει πλέον σχεδόν το ήμισυ του αποθέματος ψαριών, ενώ η παραγωγή αλιευμάτων με παραδοσιακούς τρόπους (ψάρεμα με δίχτυα στην ανοιχτή θάλασσα) έχει κορεστεί από το 1990. Όλοι οι ειδικοί συμφωνούν ότι η υδατοκαλλιέργεια θα συμβάλει σημαντικά στο μέλλον στην επισιτιστική ασφάλεια και στην επαρκή διατροφή για έναν παγκόσμιο πληθυσμό όπως αναφέρθηκε στον πρόλογο.

Με βάση προβλέψεις για τις αλλαγές του παγκόσμιου και τοπικού κλίματος, τις εκτιμήσεις παραγωγής του θαλάσσιου οικοσυστήματος και της αλιείας, του μεγέθους του ανθρώπινου πληθυσμού, των τιμών του πετρελαίου και των ιχθυαλεύρων και προβλέψεις των τεχνολογικών ανάπτυξης της τεχνολογίας υδατοκαλλιέργειας, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η κάλυψη των σημερινών και μεγαλύτερων ποσοστών κατανάλωσης είναι εφικτή, παρά τον αυξανόμενο πληθυσμό και τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στη δυνητική αλιευτική παραγωγή. Ωστόσο, είναι εφικτό μόνο εάν η διαχείριση των αλιευτικών πόρων γίνεται με βιώσιμο τρόπο και η διαχείριση της αλιείας γίνει παραγωγικά αποτελεσματική. Αν και υπάρχει αυτή η ανάγκη για εκσυγχρονισμό με βάση την σωστότερη διαχείριση των πόρων και την βέλτιστη παραγωγή αγαθών, λίγες υδατοκαλλιέργειες (κυρίως ιχθυοτροφεία) είναι εφοδιασμένες με έξυπνα συστήματα παρακολούθησης πραγματικού χρόνου και αυτοματισμού των διαδικασιών [45].

Στα τέλη του 2017, η Ευρωπαϊκή Ένωση έθεσε τον όρο **Υδατοκαλλιέργεια 4.0**, που ως τμήμα της Βιομηχανίας 4.0 αναφέρεται σε μια διασυνδεδεμένη υδατοκαλλιέργεια χρησιμοποιώντας αντικείμενα που στέλνουν και αναλύουν δεδομένα σε πραγματικό χρόνο χρησιμοποιώντας σύγχρονες τεχνικές επικοινωνίας και διεργασίες υπολογιστικού νέφους. Έτσι με την βοήθεια του IoT, αυτός ο όρος είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί αποτελεσματικά. Η ιδιαιτερότητα της εφαρμογής του στην υδατοκαλλιέργεια έγκειται κυρίως στο πεδίο εφαρμογής του IoT, που στην περίπτωση μας είναι οι θαλάσσιες περιοχές. Οι αλλαγές και πάλι βρίσκονται κυρίως στα στρώματα της Αντίληψης και του Δικτύου.

Στο **Στρώμα Αντίληψης** τα δεδομένα που πρέπει να συλλεχθούν αποτελούν δείκτες της ποιότητας του νερού στην περιοχή που εκτρέφονται τα ψάρια ή τα οστρακόδερμα και είναι καίριας σημασίας για την σωστή ανάπτυξη της υδατοκαλλιέργειας. Αυτά περιλαμβάνουν την θερμοκρασία, τα επίπεδα pH, το διαλυμένο οξυγόνο στο νερό, την αγωγιμότητα και αλατότητα, και την παρουσία θρεπτικών συστατικών όπως άλγη και πλαγκτόν στο νερό. Επειδή το υδάτινο περιβάλλον είναι ταυτόχρονα και περιβάλλον εισροής οξυγόνου και περιβάλλον τροφής για τους οργανισμούς, οποιαδήποτε αλλαγή σε ένα από τα δύο αυτά χαρακτηριστικά επηρεάζει άμεσα την ποιότητα ζωής των οργανισμών που ζουν σε αυτό [46].

Υπάρχουν διάφορα περιβάλλοντα στα οποία οι αισθητήρες είναι απαραίτητοι. Σε εκκολαπτήρια ή εγκαταστάσεις παραγωγής νέων ηλικιακά ψαριών, οι αισθητήρες τοποθετούνται σε λίμνες ή δεξαμενές εντός κτιρίων. Συνήθως υπάρχει πρόσβαση σε ηλεκτρικό δίκτυο και ενσύρματο δίκτυο επικοινωνίας, οπότε η ισχύς και η συνεχής δικτυακή κίνηση δεν αποτελεί πρόβλημα. Οι εγκαταστάσεις είναι επίσης ανθεκτικές στις καιρικές συνθήκες και εύκολα προσβάσιμες για επισκευή και συντήρηση.

Στην άλλη περίπτωση, οι αισθητήρες αναπτύσσονται σε πλωτές κατασκευές (Εικόνα 18), όπως οι ελεγχόμενες περιοχές με δίχτυα ή φορηγίδες ζωοτροφών στη θάλασσα και σε λίμνες γλυκού νερού. Εδώ είναι εκτεθειμένοι στις καιρικές συνθήκες και στο αντίξοο για τα ηλεκτρονικά περιβάλλον. Επιπλέον, ενδέχεται να μην υπάρχει άμεση πρόσβαση σε δίκτυο ρεύματος. Σε τέτοιες τοποθεσίες η κατανάλωση ισχύος των αισθητήρων και του συστήματος επικοινωνίας για την αναμετάδοση των δεδομένων μπορεί να είναι σημαντικό ζήτημα. Στα περισσότερα περιβάλλοντα όπου αναπτύσσονται αισθητήρες υπάρχει πιθανή ρύπανση των οργάνων τόσο από περιβαλλοντικά απορρίμματα (λάδια, νεκρά φυτικά υλικά που επιπλέουν, κλπ) όσο και από αυτά των βιολογικών οργανισμών όπως αμμωνία και διοξείδιο του άνθρακα ή ακόμα και ανάπτυξη άλγης πάνω σε αυτά.

Επομένως, σε όλες τις περιπτώσεις η ανθεκτικότητα των αισθητήρων και η ικανότητά τους να αντέχουν στη ρύπανση είναι ένας σημαντικός παράγοντας. Αυτοκαθαριζόμενα ή ανθεκτικά στη ρύπανση όργανα θα έχουν σημαντικό πλεονέκτημα, ακολουθούμενα από εκείνα που έχουν απλή και χαμηλής συχνότητας προγραμματισμένη προληπτική συντήρηση [47].

Κοινός παράγοντας ευρωστίας των αισθητήρων είναι η αντοχή τους στο περιβάλλον, και άρα η ικανότητά τους να μην επηρεάζονται από αυτό (π.χ.

στεγανοποίηση) ή να επιστρέφουν σε καλή κατάσταση ανά χρονικά διαστήματα (π.χ. αυτοκαθαρισμός).



α)



β)

Σχήμα 16 Είδη αισθητήρων έξυπνης υδατοκαλλιέργειας α) ομάδα αισθητήρων πλωτής εξέδρας β) υποβρύχιο στεγανό σύστημα αισθητήρων

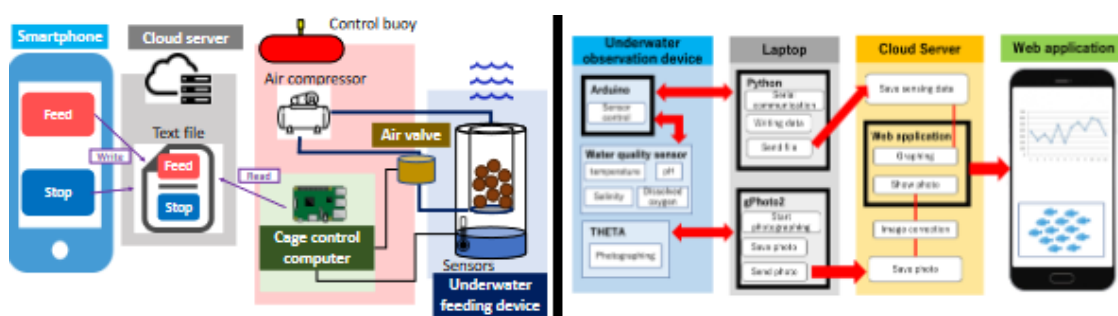
Στο **Στρώμα Δικτύου** οι προκλήσεις επαφίονται στην φύση του πεδίου εφαρμογής. Στις θαλάσσιες υδατοκαλλιέργειες, οι αισθητήρες είναι τοποθετημένοι σε μεγάλη απόσταση από οποιοδήποτε σημείο που μπορεί να θεωρηθεί ως σταθμός βάσης ή κόμβος gateway και οι αισθητήρες μεταξύ τους επικοινωνούν σε δυσμενείς συνθήκες ασύρματης επικοινωνίας όπως είναι η συνεχής υγρασία ή ακόμα και μεγάλες ποσότητες νερού που δυσχεραίνουν την μετάδοση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Έτσι προτιμώνται τεχνολογίες επικοινωνίας μεγάλης εμβέλειας, με έμφαση έως τώρα τα πρωτόκολλα δικτύων κυψελών LTE, τις οποίες θα διαδεχθεί το 5G NR. Επίσης εξετάζεται και η χρήση UAV (εναέριων αλλά και υποβρύχιων) ως αναμεταδότες δεδομένων ανάμεσα στην θαλάσσια και χερσαία υποδομή του δικτύου. Κοινός παράγοντας είναι η συγκέντρωση των δεδομένων των αισθητήρων με την μικρότερη καθυστέρηση και το μεγαλύτερο εύρος ζώνης που διαθέτει ένα δίκτυο για την πραγματοποίηση παρακολούθησης πραγματικού χρόνου και την αποφυγή απώλειας δεδομένων λόγω συνθηκών [47].

Στο **Στρώμα Υποστήριξης**, η ανάπτυξη της τεχνητής νοημοσύνης και του IoT στην υδατοκαλλιέργεια έχουν σημειώσει πρόοδο για την επίλυση των προβλημάτων που υπάρχουν στην παραδοσιακή υδατοκαλλιέργεια. Εφαρμόζονται σε διάφορα συστήματα καλλιέργειας, όπως κλωβοί, λίμνες, εκκολαπτήρια και αναπαραγωγικά συστήματα, με διάφορους στόχους, όπως η παρακολούθηση της ποιότητας του νερού, η παρατήρηση της κατάστασης στο εσωτερικό κλωβών, της λίμνης καθώς και του εκκολαπτηρίου, η βελτιστοποίηση της ποσότητας της τροφής που πρέπει να παρέχεται για τα καλλιεργούμενα είδη και τον κατάλληλο χρόνο για τη σίτιση, η μείωση της συχνότητας

παροχής τροφής στα καλλιεργούμενα συστήματα, η μείωση της εργασίας με την αυτοματοποίηση των συστημάτων καλλιέργειας και ο εντοπισμός ασθενειών με χρήση αλγορίθμων οπτικής αναγνώρισης και μηχανικής μάθησης [48].

Με την βοήθεια της μηχανικής μάθησης και των αλγορίθμων κατηγοριοποίησης μπορούν να ομαδοποιηθούν τα συλλεγόμενα δεδομένα, ανάλογα με τα συμπεράσματα που θέλουμε να βγάλουμε. Έτσι πολλά μαθηματικά μοντέλα που δρουν πάνω στις υδατοκαλλιέργειες όπως τα δέντρα απόφασης (Decision trees), τα νευρωνικά δίκτυα, τα support vector machines (SVM), βοηθούν στην τεράστιας ακρίβειας εξαγωγή αποτελεσμάτων για τον εντοπισμό της βιομάζας των ψαριών, την εκτίμηση μεγεθών από υποβρύχιο οπτικοακουστικό υλικό, το βάρος των ψαριών, τον αριθμό τους, τον εντοπισμό του είδους τους σε μικτές ιχθυοκαλλιέργειες, τον προσδιορισμό της ηλικίας και του φύλου τους, τις διατροφικές συμπεριφορές είτε ατομικά είτε ως κοπάδι, κ.ά. [49].

Το **Στρώμα Εφαρμογών** έρχεται για να προσδώσει βάρος στα προηγούμενα στρώματα για την άμεση και εύκολη διαχείριση της ευφυούς υδατοκαλλιέργειας μέσω εφαρμογών από τους τελικούς χρήστες. Έχοντας υπόψιν ότι οι περιοχές ενδιαφέροντος δεν είναι εύκολα παρατηρήσιμες για εξαγωγή δεδομένων χωρίς την βοήθεια αισθητήρων, η αναγκαιότητα και σπουδαιότητα αδιάκοπης λειτουργίας γίνεται ιδιαίτερα προφανής. Η πλειοψηφία των εφαρμογών ευφυούς υδατοκαλλιέργειας έχει ως κεντρικό σημείο την προβολή της γενικής κατάστασης των υδάτινων χώρων των ψαριών στους χρήστες και επιπλέον επιτρέπει την ενημέρωσή τους για οποιαδήποτε ενέργεια θεωρηθεί κατάλληλη για βελτίωση της κατάστασης αυτής με βάση τις προηγμένες επεξεργασίες που έχουν γίνει στο Στρώμα Υποστήριξης.



Σχήμα 17 Εφαρμογές ευφυούς υδατοκαλλιέργειας. Αριστερά: Εφαρμογή αυτοματοποιημένης σίτισης, Δεξιά: Εφαρμογή παρακολούθησης ποιότητας νερού.

Από την απλή παρακολούθηση της ποιότητας του νερού [50] και τον εντοπισμό ασθενειών στους υδρόβιους οργανισμούς [49] (Εικόνα 19), μέχρι το αυτοματοποιημένο σύστημα σίτισης των ψαριών εξ αποστάσεως [51], το Στρώμα Εφαρμογών ευελπιστεί

να κάνει την διαφορά ανάμεσα στην παραδοσιακή αλιεία ή τις απλές ιχθυοκαλλιέργειες και στην ευφυή υδατοκαλλιέργεια του IoT με στόχο την ευκολότερη, αποτελεσματικότερη και σαφώς πιο επικερδή εκμετάλλευση αυτού του φυσικού πλούτου.

2.4 Ευφυής Εφοδιαστική Αλυσίδα Προϊόντων – Smart Agri-food Supply Chain

Ο πρωτογενής τομέας με τις προοπτικές που δίνει το IoT έχει όλα τα δυνατά μέσα για να εδραιωθεί στην νέα εποχή της Βιομηχανίας 4.0 όπως έχει περιγραφεί και παραπάνω. Όμως, όπως όλα τα πολύπλοκα συστήματα του πραγματικού κόσμου, ο πρωτογενής τομέας δεν είναι ανεξάρτητος, ούτε ως δέκτης ερεθισμάτων ούτε ως κύριος παράγοντας εξέλιξεων από τις υπόλοιπες κοινωνικές διαδικασίες. Στα όρια του πρωτογενούς τομέα με τον δευτερογενή τομέα βρίσκεται η επεξεργασία και η διάθεση των προϊόντων που παράγονται. Η τυποποίηση, η επεξεργασία και βέλτιστη απόδοση παραγωγής προϊόντων του πρωτογενούς τομέα συνδέονται άρρηκτα με την ανασυγκρότηση και τον εκσυγχρονισμό του.

Η έννοια της ιχνηλασιμότητας του κάθε παραγόμενου αγαθού από την συγκομιδή του μέχρι την παραλαβή του από την εφοδιαστική αλυσίδα εμπεριέχει την έννοια της βιωσιμότητας και αποτελεσματικότητας όλης της αγροτικής βιομηχανίας. Δεν αρκεί μόνο να παράγονται αποτελεσματικά τα αγαθά, πρέπει να διατίθενται και στο γενικό εμπόριο με σαφή και βέλτιστο τρόπο. Στον πρόλογο έγινε σαφής η όλο και μεγαλύτερη ζήτηση για βασικά αγαθά του πρωτογενή τομέα, την οποία πρέπει έξυπνα να αντιμετωπίσει με το να ανταποκριθεί επαρκώς ως προσφορά.

Εδώ έρχεται να εκπληρώσει αυτό το χάσμα της ζήτησης και της προσφοράς η έννοια της **ευφυούς εφοδιαστικής αλυσίδας προϊόντων**. Επιβάλλεται η εξέταση των υφιστάμενων καθώς και των νέων αναπτυσσόμενων αλυσίδων εφοδιασμού τροφίμων από μια παγκόσμια ολιστική προοπτική που υπερβαίνει τα σημερινά όρια των υφιστάμενων οικοσυστημάτων τροφίμων. Δεν είναι μόνο η γεωργία, η μεταποίηση, η συσκευασία, ο εφοδιασμός και οι λειτουργίες διανομής, αλλά και οι αλληλεξαρτώμενες σχέσεις μεταξύ των τόπων καλλιέργειας και κατανάλωσης, των αστικών και αγροτικών τοπίων, των στρατηγικών μετριασμού του άνθρακα, της διαχείρισης αποβλήτων και του ενεργειακού εφοδιασμού.

Για τον έλεγχο και την καλύτερη δυνατή διαχείριση των παραμικρών και αμοιβαίων επιδράσεων αυτών των οντοτήτων και διαδικασιών που σχετίζονται άμεσα με την αποτελεσματικότητα και τη βιωσιμότητα των οικοσυστημάτων εφοδιασμού τροφίμων, αναμένονται νέες διεπιστημονικές και ολοκληρωμένες προσεγγίσεις, με πρωτοπόρες εκείνες που ενσωματώνουν το IoT. Ο σχεδιασμός και ο έλεγχος των ολοκληρωμένων οικοσυστημάτων εφοδιασμού τροφίμων αποτελεί πρόκληση, ενώ οι ερευνητικές συνεισφορές και οι επιστημονικές προσπάθειες εξακολουθούν να είναι περιορισμένες και να επικεντρώνονται στο σχεδιασμό των κλάδων τέτοιων δικτύων.

Τα εφοδιαστικά συστήματα προϊόντων πρωτογενούς τομέα περιορίζονται από μία μίξη αλληλεξαρτώμενων μεγεθών όπως [52]:

- τη θέση των καλλιεργειών, των γεωργικών εκμεταλλεύσεων και των υδατοκαλλιεργειών,
- το κλίμα, το έδαφος και τις περιβαλλοντικές συνθήκες,
- την πρόσβαση σε νερό, ενέργεια και εδαφικούς πόρους,
- το σύνολο των περιοχών συγκομιδής και η κατανομή τους στις εγκαταστάσεις επεξεργασίας και συσκευασίας,
- η παρουσία ή η δημιουργία υλικοτεχνικών υποδομών και δικτύων διανομής που συνδέουν τις αστικές περιοχές,
- το νομικά ρυθμιστικό και τεχνολογικό περιβάλλον,
- τα κανάλια διανομής τροφίμων,
- το προφίλ των καταναλωτών ως προς την ζήτηση.

Σε ένα τόσο πολύπλοκο περιβάλλον, η λήψη αποφάσεων πρέπει να υποβοηθείται από την ανάλυση τόσο των φυσικών (π.χ. πρώτες ύλες, συσκευασία, τρόφιμα, ενέργεια, νερό) όσο και των πληροφοριακών ροών. Η πρώτη στηρίζεται στη δεύτερη, δεδομένου ότι ο αποτελεσματικός έλεγχος του δυναμικού προτύπου παραγωγής-προσφοράς-κατανάλωσης σε όλα τα στάδια και τη διαδικασία της εφοδιαστικής αλυσίδας απαιτεί το χειρισμό ενός ευρέος συνόλου δεδομένων και γνώσεων που συχνά παραμελούνται. Η τυπική εντατική σε εργασία και ανθρωπογενής φύση του τομέα των τροφίμων αυξάνει την πολυπλοκότητα της παροχής, συλλογής, αποθήκευσης και αξιοποίησης των δεδομένων στο πεδίο.

Έτσι, η ανάπτυξη και εφαρμογή της εικονικοποίησης της επεξεργασίας τροφίμων, της ιχνηλασιμότητας τροφίμων και του IoT για την αντιμετώπιση των

γνωστών προβλημάτων του πρωτογενούς τομέα, ακούγονται τουλάχιστον φιλόδοξες και εξακολουθούν να αποτελούν τεράστια πρόκληση για το μέλλον. Η εφαρμογή του IoT στην εφοδιαστική αλυσίδα σημαίνει την ανάπτυξη και την εκτεταμένη εικονικοποίηση των στοιχείων, των υποδομών, των πόρων, των σταδίων, των φορέων και των ροών που συμβάλλουν στη μοντελοποίηση των δραστηριοτήτων παραγωγής-μετασχηματισμού και διανομής.

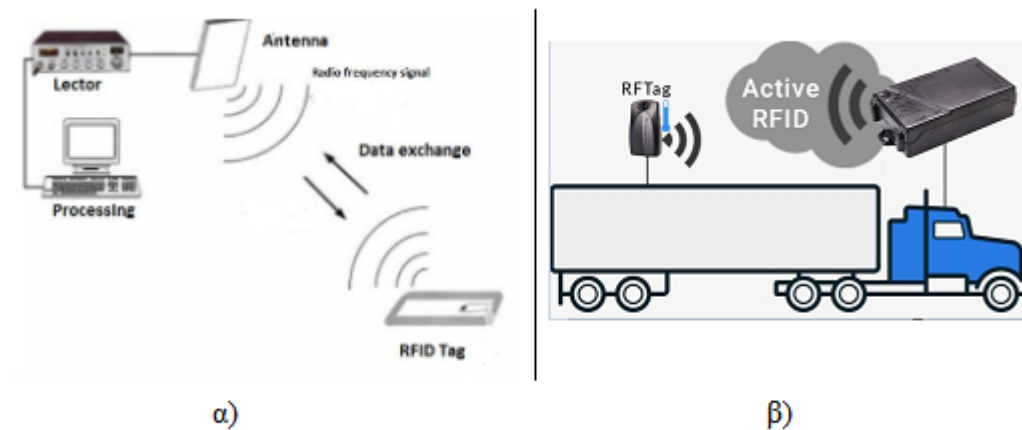
Η εικονικοποίηση της εφοδιαστικής αλυσίδας περνά μέσα από την καλύτερη κατανόηση της εσωτερικής δυναμικής του οικοσυστήματος εφοδιασμού τροφίμων στο σύνολό του, τις αλληλεξαρτήσεις μεταξύ της ροής των πόρων, τη μελέτη των φυσικών και πληροφοριακών υποδομών. Η έννοια της ιχνηλασιμότητας του κάθε παραγόμενου αγαθού από την συγκομιδή του μέχρι την παραλαβή του από την εφοδιαστική αλυσίδα εμπεριέχει την έννοια της βιωσιμότητας και αποτελεσματικότητας όλης της αγροτικής βιομηχανίας. Δεν αρκεί μόνο να παράγονται αποτελεσματικά τα αγαθά, πρέπει να διατίθενται και στο γενικό εμπόριο με σαφή και βέλτιστο τρόπο.

Έτσι πρέπει:

- Να παράγονται αγαθά προστιθέμενης αξίας (αυξημένης ποιότητας, εύκολα στην προετοιμασία, φθηνά στο κόστος)
- Να είναι ασφαλή ώστε να προτιμώνται από τον καταναλωτή
- Να διασφαλίζουν βιώσιμη και συνεχόμενη παραγωγή
- Να διασφαλίζουν αποτελεσματική διαχείριση της τροφικής αλυσίδας
- Να συμμορφώνονται με τις περιβαλλοντικές συνθήκες και κανόνες

Αρχικά, στο **Στρώμα Αντίληψης** οι πιο διαδεδομένοι αισθητήρες για την εφοδιαστική αλυσίδα είναι τύπου RFID ετικετών, ορισμένες φορές εξοπλισμένοι και με ανιχνευτές GPS για τον γεωεντοπισμό αντικειμένων όπως προϊόντων, κοντέινερ, οχημάτων και άλλων στοιχείων. Υπάρχουν δύο ειδών RFID ετικέτες: οι **παθητικές (passive)**, οι οποίες επανακωδικοποιούν το ηλεκτρομαγνητικό σήμα που δέχονται από έναν αποστολέα ώστε να στείλουν πληροφορία και αυτό γίνεται μέσω χρήσης του σήματος αυτού για να ενεργοποιηθεί εσωτερικά το κύκλωμα, και οι **ενεργητικές (active)** οι οποίες έχουν αυτονομία ενέργειας και διαθέτουν δικό τους RF πομπό χρησιμοποιώντας peer-to-peer επικοινωνία (Εικόνα 20). Μερικές φορές οι ενεργητικές λόγω του αυτόνομου φορτίου ενέργειας (μπαταρίες, ηλιακές κυψέλες) διαθέτουν και επιπλέον αισθητήρες όπως υγρασίας και θερμότητας. Οι αισθητήρες RFID χρησιμοποιούνται σε 4 διαφορετικά στάδια της εφοδιαστικής αλυσίδας [53]:

1. **Παρακολούθηση Παραγωγής (Production Monitoring).** Κατά την παραγωγή προϊόντων προς κατανάλωση από τον πρωτογενή τομέα, χρησιμοποιούνται οι ετικέτες RFID στην διαδικασία τυποποίησής τους ώστε να αποτυπώνονται ακριβώς πληροφορίες για το προϊόν: κωδικός μονάδας παραγωγής, προέλευση προϊόντος, ημερομηνία τυποποίησης, κλπ. Με τον τρόπο αυτό αρχίζει η ενσωμάτωση του προϊόντος στην έξυπνη εφοδιαστική αλυσίδα μέχρι να φθάσει στον καταναλωτή.
2. **Παρακολούθηση μεταφοράς και παράδοσης (Delivery and Deployment tracking).** Η παρακολούθηση σε αυτό το στάδιο αρχίζει από τους προμηθευτές μέχρι τους τελικούς καταναλωτές. Εδώ παρακολουθούνται τα μεταφορικά μέσα των προϊόντων και ως προς την τοποθεσία τους και ως προς τον χρόνο μεταφοράς ώστε να επιτυγχάνεται η αποτελεσματικότερη διανομή των προϊόντων μέσω προγραμματισμού των βέλτιστων διαδρομών.
3. **Παρακολούθηση αποθέματος (Inventory Monitoring).** Πραγματικού χρόνου συστήματα εντός των αποθηκών των επιχειρήσεων παρακολουθούν την εισαγωγή και εξαγωγή προϊόντων. Αυτό συνδέεται άμεσα με την οικονομική διαχείριση της επιχείρησης: προϊόντα που πωλούνται τάχιστα έχουν την ανάγκη να αναπληρωθούν από τους προμηθευτές, ενώ προϊόντα που παρουσιάζουν στασιμότητα πρέπει να ελεγχθούν ως προς την ζήτηση και την διάρκεια ζωής τους στην αποθήκη. Στόχος αυτού του σταδίου είναι η αποφυγή προβλημάτων ελέγχου αποθέματος σε ιδιαίτερα μεγάλες και πολύπλοκες αποθήκες με αναγνώριση αναγκών ανεφοδιασμού και επιμερισμού αποθέματος.
4. **Παρακολούθηση πωλήσεων (Retail Monitoring).** Φθάνοντας στο τέλος της διαδικασίας της εφοδιαστικής αλυσίδας, το προϊόν του πρωτογενούς τομέα έχει αποθηκευμένη πληροφορία για όλη την διαδρομή του από τον παραγωγό στον καταναλωτή. Με χρήση μεθόδων γρήγορης προσπέλασης κωδικών, όπως είναι το QR code ή το barcode, ο καταναλωτής μπορεί με την έξυπνη συσκευή του να διαβάσει αυτήν την πληροφορία και να ενημερωθεί εκτενέστερα για το προϊόν που έχει στη διάθεσή του. Επιπλέον, ο πωλητής μπορεί να έχει μια ολοκληρωμένη άποψη για την απόδοση πωλήσεων συγκεκριμένων προϊόντων ώστε να προσαρμόσει την οικονομική διαχείριση της επιχείρησης σε σχέση με το αγοραστικό ενδιαφέρον (π.χ. εκπτώσεις σε προϊόντα, αλλαγή τοποθέτησης σε ράφια με μεγαλύτερο αγοραστικό ενδιαφέρον, κλπ)



Σχήμα 18 Παραδείγματα αισθητήρων στην εφοδιαστική αλυσίδα. α) Σύστημα παρακολούθησης στην παραγωγή, β) Σύστημα παρακολούθησης μεταφοράς και παράδοσης με χρήση παθητικής και ενεργητικής RFID ετικέτας.

Στο **Στρώμα Δικτύου**, υπάρχει πλήθος τεχνολογιών επικοινωνιών που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε κάθε στάδιο της εφοδιαστικής αλυσίδας. Ως υλοποίηση του IoT, η εφοδιαστική αλυσίδα πρέπει να παρέχει μία ενιαία σύνδεση ανάμεσα σε όλα τα διαφορετικά συστατικά της, είτε πρόκειται για προϊόντα, είτε για μεταφορικά μέσα, είτε για κτηριακές εγκαταστάσεις. Στόχος είναι να επικοινωνούν όλα αυτά αρμονικά, ώστε η ροή του προϊόντος να είναι όσο πιο ομαλή γίνεται. Τα αναδυόμενα σενάρια τεχνολογικών εφαρμογών στη μελλοντική ψηφιακή αλυσίδα εφοδιασμού απαιτούν υψηλό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων, υψηλή κάλυψη, χαμηλή καθυστέρηση, συνδεσιμότητα πολλαπλών συσκευών, υψηλή αξιοπιστία και υψηλή ασφάλεια.

Δεδομένου ότι τα παλαιότερα συστήματα (π.χ. 4G, WiFi, Bluetooth, Zigbee) είναι κατακερματισμένα και δυσχεραίνουν την ενοποίηση που προαναφέρθηκε, και δεν μπορούν να ανταποκριθούν στις απαιτήσεις μεταφοράς δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, υπάρχει ανάγκη για ένα προηγμένο δίκτυο ασύρματης επικοινωνίας, δηλαδή το 5G. Αυτή η νέα ραχοκοκαλιά επικοινωνίας του δικτύου επιτρέπει ετερογενή και διαφορετικής προέλευσης δίκτυα ραδιοπρόσβασης, όπου η νοημοσύνη τοποθετείται στην άκρη του δικτύου κινητής τηλεφωνίας και κοντά στους τελικούς χρήστες, βελτιώνοντας την εμπειρία πρόσβασης σε δεδομένα σε πραγματικό χρόνο.

Επιπλέον, χρησιμοποιούνται τεχνολογίες τεμαχισμού δικτύου (network slicing), εικονικοποίησης λειτουργιών δικτύου (network functions virtualization - NFV) και δικτύωσης καθορισμένης από λογισμικό (software defined networks - SDN) και για να καταστούν αυτά τα δίκτυα πιο ευέλικτα και οικονομικά αποδοτικά [54].

Το **Στρώμα Υποστήριξης** συνεχίζει να εφαρμόζει της έξυπνες τεχνικές επεξεργασίας δεδομένων για την εξαγωγή βέλτιστων αποφάσεων για την λειτουργία της εφοδιαστικής αλυσίδας. Ένα νέο τεχνολογικό εργαλείο το οποίο ταιριάζει απόλυτα με την υλοποίηση του IoT στην εφοδιαστική αλυσίδα, είναι η τεχνολογία του **blockchain**. Η τεχνολογία του blockchain χρησιμοποιεί ένα αποκεντρωμένο και κατακευαμμένο σύστημα καταγραφής συναλλαγών μεταξύ χρηστών (οποιασδήποτε φύσης: χρηματικής, δεδομένων, μηνυμάτων, κλπ) σε ένα αρχείο καταγραφής – βιβλίο (ledger) με την υλοποίηση μιας βάσης δεδομένων, και η καταγραφή αυτή πραγματοποιείται μόνο εάν επικυρωθεί η συναλλαγή μετά από κάποια ασφαλή, ανεξάρτητη και υπολογιστικά ισχυρή διαδικασία. Μια τέτοια διαδικασία είναι η ένταξη μιας ομάδας συναλλαγών (block) σε μια αλυσίδα προηγούμενων ομάδων που έχουν ήδη επικυρωθεί, σχηματίζοντας έτσι μια αλυσίδα block.

Ως αρχιτεκτονική, το δίκτυο Blockchain πρέπει να πληροί τις εξής προϋποθέσεις: ασφάλεια, προσβασιμότητα, ιχνηλασιμότητα και διαφάνεια - και το blockchain είναι κατασκευασμένο για να φέρει όλα αυτά τα οφέλη και να προσθέσει κάτι επιπλέον στη βιομηχανική εξέλιξη. Τα πλεονεκτήματα για τη εφοδιαστική αλυσίδα (οδική, ναυτική, αεροπορική) είναι τα εξής: μειώνει τη γραφειοκρατία (τεκμηρίωση), μειώνει το κόστος και την ανθρώπινη διαχείριση των διαδικασιών, διευκολύνει την καθιέρωση και τον προγραμματισμό των δρομολογίων και αυτοματοποιεί τα καθήκοντα των οδηγών και των σταθμών φορτίων. Μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για την απλούστευση της αλυσίδας εφοδιασμού, μειώνοντας την ανθρώπινη αλληλεπίδραση, αυξάνοντας την ταχύτητα της διαχείρισης αποθέματος και επιτρέποντας την επικοινωνία μεταξύ οχημάτων. Ξεκινώντας από τη διαχείριση των μεταφορικών εγγράφων και τη παρακολούθηση μεταφοράς και παράδοσης, η τεχνολογία ledger μπορεί να λειτουργήσει ως επικοινωνιακό δίκτυο για το IoT και θα διευκολύνει την χρήση RFID, των κωδικών QR και άλλων έξυπνων ετικετών, αφού τα μπλοκ θα επιτρέψουν την αποθήκευση μεγάλων δεδομένων, με ασφαλή και αποκεντρωμένο τρόπο, εξασφαλίζοντας γρήγορη επεξεργασία δεδομένων σε σύντομο χρονικό διάστημα. Η ασφάλεια είναι ένα άλλο σημαντικό χαρακτηριστικό της τεχνολογίας blockchain. Κανείς δεν μπορεί να τροποποιήσει ή να παραβιάσει οποιοδήποτε μέσο ανταλλαγής δεδομένων άπαξ και ενσωματωθεί στο block. Αυτό εξασφαλίζει ότι καθ' όλη την διάρκεια παραμονής του προϊόντος μέσα στην εφοδιαστική αλυσίδα, δεν πρόκειται να υπάρξει καμία μεταβολή στην προδιαγεγραμμένη χρονική και χωρική πορεία από την παραγωγή στην κατανάλωση [55].

Τέλος, στο **Στρώμα Εφαρμογών** έχουμε την τελική αποτύπωση όλης της διαδικασίας της εφοδιαστικής αλυσίδας σε ένα συγκεντρωτικό σύστημα εφαρμογών με την μορφή των **συστημάτων επιχειρησιακού σχεδιασμού (Enterprise Resource Planning - ERP)**. Τα συστήματα αυτά αποτελούν τον κεντρικό κόμβο των οικονομικών και διοικητικών διεργασιών μιας επιχείρησης. Οποιαδήποτε πληροφορία περνά από το κάθε στάδιο της εφοδιαστικής αλυσίδας παρουσιάζεται με λεπτομέρεια στον χειριστή των συστημάτων ERP, δίνοντάς του μια συνολική ματιά στην ροή των προϊόντων, είτε αυτός είναι ο παραγωγός, είτε ο μεταφορέας, είτε ο πωλητής τους. Οι προχωρημένες τεχνικές επεξεργασίας δεδομένων με την βοήθεια της τεχνητής νοημοσύνης και της μηχανικής μάθησης βοηθά στην ομαλή επικοινωνία όλων των παραγόντων που συμβάλλουν στην διάθεση του προϊόντος, διευκολύνοντας την διαδικασία και αυξάνοντας το οικονομικό και χρονικό κέρδος με την διάθεση των προϊόντων στους καταναλωτές.

Κεφάλαιο 3 – Τεχνολογία επικοινωνιών 5G σε αγροτικές περιοχές

Έχοντας παρουσιάσει τις διάφορες πτυχές του έξυπνου πρωτογενούς τομέα και των απαιτήσεων που χρειάζεται να εκπληρωθούν για να μπορέσουν να υλοποιηθούν αυτές οι εφαρμογές του IoT, το κύριο στοιχείο που θα πρέπει να εξεταστεί ενδελεχώς είναι το Στρώμα Δικτύου. Στις υλοποιήσεις που παρουσιάστηκαν, το κοινό σημείο που πρέπει να έχει την μεγαλύτερη ευρωστία, αξιοπιστία και αποδοτικότητα είναι η μεταφορά των δεδομένων από το πεδίο εφαρμογής των αισθητήρων σε οποιαδήποτε μορφή αποθήκευσης, επεξεργασίας και ασφαλούς μετάδοσης στους εκάστοτε παραλήπτες.

Για να λειτουργήσουν ομαλά οι υλοποιήσεις του IoT, και συνεπώς να αναδειχθεί η χρησιμότητά τους σε σχέση με παραδοσιακά συστήματα του πρωτογενούς τομέα, θα πρέπει να υπάρχει αδιάλειπτη ροή δεδομένων ανάμεσα σε όλα τα στρώματα της αρχιτεκτονικής του IoT. Αυτό γίνεται ευκολότερα κατανοητό εάν αναλογιστεί κάποιος την χωρική διάσταση της αρχιτεκτονικής του IoT στον πρωτογενή τομέα: Το Στρώμα Αντίληψης είναι συγκεντρωμένο σε ένα συγκεκριμένο πεδίο εφαρμογής όπως είναι μια φάρμα ή μια ιχθυοκαλλιέργεια, τοποθετημένο αρκετά μακριά από το Στρώμα Υποστήριξης που επωμίζεται το βάρος των κατάλληλων ενεργειών πάνω στα δεδομένα αυτά.

Μια έξυπνη φάρμα που έχει στη διάθεσή της πολλά δεδομένα αισθητήρων, βρίσκεται αρκετά μακριά από ένα datacenter στο οποίο έχει στηθεί μια βάση δεδομένων για αποθήκευσή τους, ένα πρόγραμμα μηχανικής μάθησης για επεξεργασία τους, και μία εφαρμογή για προβολή τους στους τελικούς χρήστες. Ακόμα και εάν κάποιες από τις λειτουργίες του Στρώματος Υποστήριξης μπορούν να υλοποιηθούν εγγύτερα ή ακόμα και τοπικά στο πεδίο εφαρμογής (π.χ. database server στις εγκαταστάσεις της αγροτικής μονάδας παραγωγής), είναι αδύνατον να υλοποιηθούν εξ' ολοκλήρου τοπικά.

3.1 Απαιτήσεις σχεδιασμού – Design requirements

Με βάση την παραπάνω πρόκληση, είναι σκόπιμο να μελετηθεί η υλοποίηση του Στρώματος Δικτύου στον ευφυή πρωτογενή τομέα, και πιο συγκεκριμένα **η εφαρμογή της τεχνολογίας επικοινωνιών 5G στις αγροτικές περιοχές**. Σε αντίθεση με το αστικό

περιβάλλον, οι αγροτικές περιοχές παρουσιάζουν ορισμένες ιδιαιτερότητες που τις καθιστούν πρόκληση για την ομοιόμορφη ένταξή τους στις προόδους και εξελίξεις της τεχνολογίας επικοινωνιών. Εξάλλου, η πρόοδος μιας τεχνολογίας γίνεται με βάση την πιο συχνή, πιο κερδοφόρα και πιο διαδεδομένη χρήση της στην κοινωνία, και το αστικό περιβάλλον έχει σοβαρό πλεονέκτημα, καθώς οι περισσότεροι, με μεγαλύτερο κατά κεφαλήν εισόδημα και πιο ενημερωμένοι χρήστες βρίσκονται μέσα σε αυτό.

Οι ιδιαιτερότητες που παρουσιάζονται στις αγροτικές περιοχές σε σχέση με τις αστικές και αποτελούν προκλήσεις για την ανάπτυξη των ασύρματων επικοινωνιών και των ασύρματων δικτύων είναι [56]:

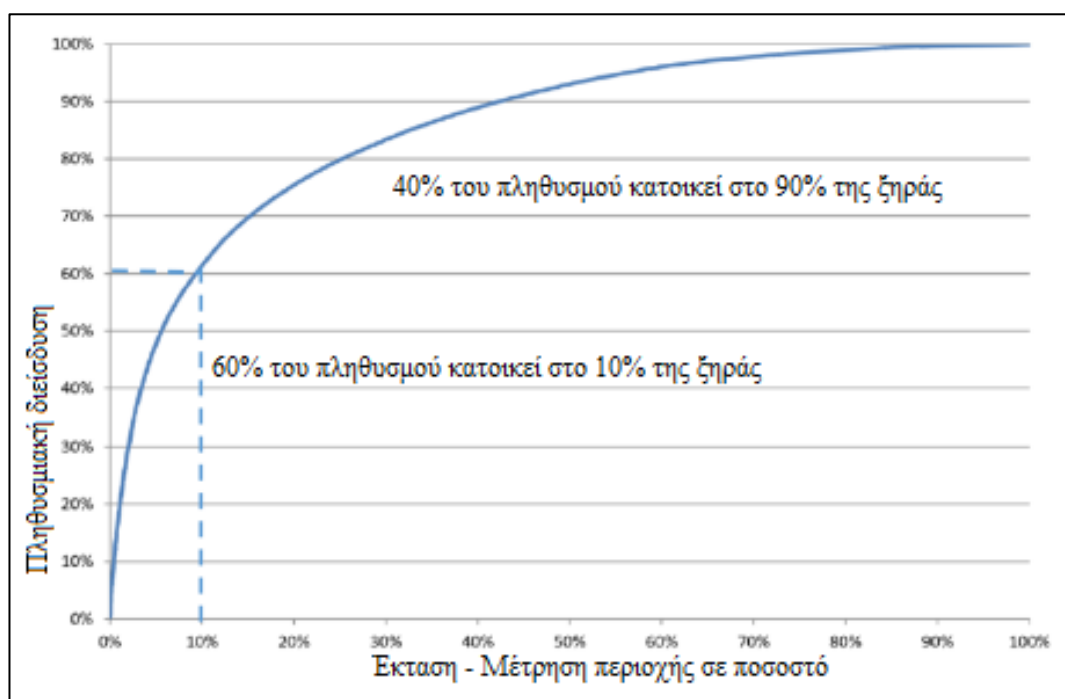
- **Αραιή Πυκνότητα Πληθυσμού με Ομαδοποιημένες Γεωγραφικά Οντότητες.** Σε αντίθεση με τις αστικές περιοχές, ο πληθυσμός στις αγροτικές είναι διασκορπισμένος αρκετά για μία συγκεκριμένη έκταση. Επίσης παρατηρείται ομαδοποίηση (clustering) αυτού του πληθυσμού, με πολλές συσκευές συγκεντρωμένες σε μία συγκεκριμένη περιοχή σχηματίζοντας μία ομάδα και σχεδόν καμία ανάμεσα στις ομάδες. Ένα αγρόκτημα με μία έξυπνη καλλιέργεια μπορεί να έχει ένα τεράστιο αριθμό συσκευών που πρέπει να εξυπηρετηθεί, αλλά ανάμεσα στις καλλιέργειες που είναι αραιά διασκορπισμένες να μην υπάρχει καμία συσκευή. Το να παρέχονται παρόμοιοι τύποι υπηρεσιών στις δύο αυτές περιοχές είναι οικονομικά αναποτελεσματικό (Εικόνα 21,22).
- **Διαφορετικός Τύπος Υπηρεσιών.** Σε αντίθεση με άλλα σενάρια εφαρμογής του 5G, στις αγροτικές περιοχές και στον ευφυή πρωτογενή τομέα, εστιάζομαστε κυρίως στην εξυπηρέτηση μεγάλου αριθμού ετερογενών συσκευών όπως αισθητήρες, ενεργοποιητές, σταθμοί βάσης, αυτοματοποιημένα συστήματα (mMTC), σε συγκεκριμένες υλοποιήσεις στην ελάχιστη καθυστέρηση (URLL) και σπάνια στην κινητικότητα και στον τεράστιο ρυθμό δεδομένων, δηλαδή την ευρυζωνικότητα (eMBB) του 5G που παρουσιάσαμε.
- **Αδιάλειπτη Παροχή Ενέργειας.** Στις αγροτικές περιοχές δεν είναι δεδομένη η σταθερή και μόνιμη παροχή ενέργειας για τον ενεργό εξοπλισμό του δικτύου. Όμως, όπως και στις αστικές περιοχές, χρειάζεται να εξασφαλίσουμε την διαθεσιμότητα του δικτύου ανά πάσα στιγμή, αλλιώς αποκόπτεται η απομακρυσμένη πρόσβαση στις αρχιτεκτονικές IoT του πρωτογενούς τομέα. Απόρροια αυτού, είναι και ο λόγος του ότι είναι αδύνατο να εξασφαλίσουμε σταθερή παροχή δικτύου internet, εάν ο δικτυακός εξοπλισμός είναι

αποκλειστικά εξαρτημένος από το δίκτυο ηλεκτρισμού. Επομένως είναι σημαντικό να εστιαστούν οι προσπάθειες ανάπτυξης κόμβων δικτύου χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας που είναι ικανές να λειτουργούν με εναλλακτικές πηγές ενέργειας με έναν οικονομικά αποδοτικό τρόπο.

- **Μικρή Κινητικότητα.** Έχει παρατηρηθεί ότι οποιαδήποτε συσκευή τελικού χρήστη στις αγροτικές περιοχές είτε έχει ταχύτητα παρόμοια με αυτή του βαδίσματος, είτε μικρές ταχύτητες κάτω των 50 χλμ./ώρα. Ειδικά στις υλοποιήσεις που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, η πλειοψηφία των συσκευών στο Στρώμα Αντίληψης είναι εντελώς στάσιμες. Για αυτόν τον λόγο η ανάπτυξη πολύπλοκων τεχνικών εξυπηρέτησης μεγάλης κινητικότητας (έως 500χλμ/ώρα), όπως είναι ιδιαίτερα πολύπλοκες τεχνικές εκτίμησης καναλιών και τεχνικών συγχρονισμού, δεν σχετίζονται με τις αγροτικές περιοχές.
- **Απομακρυσμένες/Δυσπρόσιτες Περιοχές.** Πολλά μέρη των αγροτικών περιοχών μπορεί να είναι απομακρυσμένα με φυσικά εμπόδια και να είναι δύσκολα προσβάσιμα με ανθρώπινα μέσα. Η συντηρησιμότητα και η διαθεσιμότητα του εξοπλισμού του δικτύου σε τόσο απομακρυσμένα μέρη ενέχει μεγάλη ανησυχία και χρίζει ιδιαίτερης μέριμνας.
- **Χαμηλό Κέρδος Ανά Χρήστη.** Αν και ο πρωτογενής τομέας είναι καίριος τομέας για κάθε πολιτική οντότητα και προσφέρει autárkeia στους πολίτες της, το κόστος υλοποίησης μίας υποδομής 5G δικτύου και της συντήρησης του σε σχέση με τα ανταποδοτικά κέρδη είναι δυσανάλογα (low Average Revenue Per User – low ARPU). Στις αγροτικές περιοχές όπου επικρατούν γενικά χαμηλότερα εισοδήματα σε σχέση με τις αστικές, οι υπηρεσίες που καλείται να υποστηρίξει μία υλοποίηση δικτύου 5G διαθέτουν τάξεις μεγέθους μικρότερο τζίρο σε σχέση με υπηρεσίες υψηλής τεχνολογίας της πόλης όπως έξυπνα κτίρια, υπηρεσίες έξυπνης υγείας, ασφάλειας, μεταφορών κλπ.
- **Συνάφεια Περιεχομένου.** Στην σύγχρονη εποχή, το 80% του περιεχομένου του internet είναι διαθέσιμο σε μία από τις δέκα γλώσσες που ομιλούν μόνο 3 δις ανθρώπων. Στην πλειοψηφία των αγροτικών περιοχών, αυτό το 80% έχει μικρή ή καθόλου σημασία και συσχέτιση με τις συνθήκες, τα τάσεις ή γενικά την καθημερινή ζωή που υπάρχει εκεί. Επιπλέον, ακόμα σε τοπικό ή εθνικό επίπεδο υπάρχει μεγάλο χάσμα στην διευκόλυνση δημιουργίας αυτού του περιεχομένου

ανάμεσα στο αστικό και αγροτικό περιβάλλον. Μία τεχνολογία που δεν ευδοκιμεί σε έναν χώρο ώστε να δικαιολογήσει την ύπαρξη ή την ανάπτυξή της, δεν είναι εύκολο να εδραιωθεί εκεί.

Τα παραπάνω χαρακτηριστικά κάνουν εμφανείς τις απαιτήσεις στις οποίες πρέπει να βασιστεί ένα αγροτικά επικεντρωμένο τηλεπικοινωνιακό σύστημα και είναι η οικονομική προσιτότητα, η υποστήριξη περιορισμένης κινητικότητας, η επικοινωνία σε τοπικό επίπεδο, η δυνατότητα λειτουργίας με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, η παροχή υπηρεσιών σε συστάδες συσκευών, η συνδεσιμότητα με απομακρυσμένες περιοχές και η διευκόλυνση της παραγωγής και αποθήκευσης περιεχομένου τοπικά.



Σχήμα 19 Πληθυσμιακή διείσδυση σε συνάρτηση με την έκταση καταδεικνύει την αραιοκατοίκηση των αγροτικών περιοχών.



Σχήμα 20 Συστάδες πυκνής τηλεπικοινωνιακής κίνησης σε αγροτική περιοχή. Ο υπόλοιπος χώρος παρουσιάζει σχεδόν μηδενική τηλεπικοινωνιακή κίνηση.

Για να επιτευχθεί μία συντονισμένη προσπάθεια ανάπτυξης δικτύου 5G στις αγροτικές περιοχές, είναι απαραίτητο να συνεργαστούν πολλοί φορείς ως διαμεσολαβητές (stakeholders) ώστε να υπερκεραστούν οι προκλήσεις αυτού του δύσκολου εγχειρήματος. Οι κύριοι διαμεσολαβητές ενός τέτοιου εγχειρήματος είναι [57]:

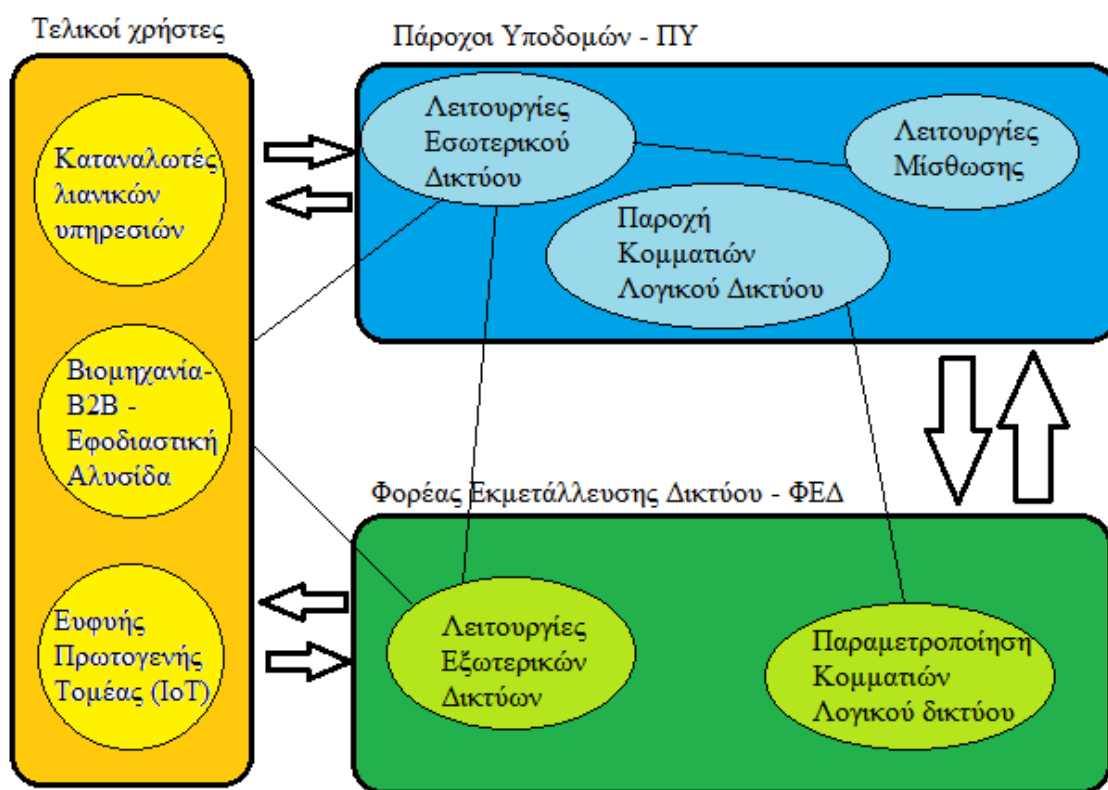
- **Φορείς προτυποποίησης.** Τα πρότυπα για το δίκτυο 5G που επιτρέπουν την ανάπτυξη ενός δικτύου 5G καταρτίζονται από το 3GPP. Η κύρια προσδοκία των φορέων τυποποίησης είναι η δημιουργία ευρέως υποστηριζόμενων προτύπων για την κατασκευή εξαρτημάτων, διασυνδέσεων δικτύου, τη λειτουργία των διαφόρων υλικών και συμβατότητα με προηγούμενες γενιές για την επίτευξη ενός κοινού στόχου. Ομοίως, ο μηχανισμός σηματοδότησης θα πρέπει να είναι τυποποιημένος ώστε να επιτρέπει σε διαφορετικές συσκευές και τεχνολογίες να επικοινωνούν μεταξύ τους. Η αγορά του 5G στις αγροτικές περιοχές θα προσελκύσει τη βιομηχανία να εφαρμόσει δικαιώματα πνευματικής ιδιοκτησίας (Intellectual Property Rights -IPR).

- **Φορέας εκμετάλλευσης δικτύου - ΦΕΔ (Mobile Network Operator – MNO).** Στην υλοποίηση του 5G στις αγροτικές περιοχές, ο ΦΕΔ είναι σε θέση να επεκτείνει την επιχείρησή του σε νέα περιοχή με χαμηλότερη επένδυση κεφαλαίου σε σύγκριση με την παραδοσιακή ανάπτυξη. Η ύπαρξη του ΦΕΔ στην αγορά της αγροτικής ανάπτυξης των τηλεπικοινωνιών θα βοηθήσει στην είσοδο σε καθετοποιημένες βιομηχανίες. Αυτό το μοντέλο προσελκύει νέους πελάτες για να ενταχθούν στο δίκτυο του ΦΕΔ. Τους εγγυάται QoS από τον ΠΥ. Τα θέματα ασφάλειας θα είναι βασικές ανησυχίες για τον ΦΕΔ, όταν ο ΠΥ θα συνδεθεί στο κεντρικό δίκτυό του. Επίσης, πρέπει να αντιμετωπιστεί η διεπαφή των φορέων για τον έλεγχο από άκρο σε άκρο στο κομμάτι που αναλαμβάνει ο ΠΥ. Αυτό το σενάριο είναι ελκυστικό για τον ΦΕΔ, εάν αντιμετωπιστούν αυτά τα ζητήματα.
- **Πάροχος υποδομών – ΠΥ (Infrastructure Provider – InP).** Ο ΠΥ θα αναπτύσσει το δίκτυο από άκρο σε άκρο και θα μισθώνει τα κατάλληλα κομμάτια του λογικού δικτύου (network slices) στον ΦΕΔ. Ο ΠΥ θα συζητήσει με τους ΦΕΔ για να κατανοήσει τις απαιτήσεις τους για το επίπεδο υπηρεσιών. Ο ΠΥ θα διαπραγματεύεται με τους ΦΕΔ τη χωρητικότητα και την τιμολόγηση των δικτύου πριν από την ανάπτυξή του. Με την ανάπτυξη ενός δικτύου με βάση τη συνεργασία, ο ΠΥ και οι ΦΕΔ μπορούν να μετριάσουν τις απώλειες και τις ζημιές. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, ο ΠΥ μπορεί είτε να είναι ανεξάρτητη εταιρεία, ένας από τους ΦΕΔ ή ένα συνεταιριστικό δίκτυο. Το φάσμα λειτουργίας μπορεί να αποφασιστεί από κοινού με τους ενοικιαστές των κομματιών του δικτύου. Αυτή η ανοικτή συζήτηση θα επιτρέψει στον ΠΥ να αποφασίσει τον απαιτούμενο αριθμό κομματιών δικτύου για την ικανοποίηση των απαιτήσεων της υλοποίησης.
- **Εθνική ρυθμιστική αρχή – ΕΡΑ (National Operator).** Η ΕΡΑ διαδραματίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην παρακολούθηση της χρήσης του φάσματος. Καθώς οι ζώνες φάσματος του ΦΕΔ θα μπορούσαν να επαναχρησιμοποιηθούν από τον(τους) φορέα(εις) ΠΥ, θα περιλαμβάνει κατάλληλες νομικές διαδικασίες με την ΕΡΑ και με τον κάτοχο της άδειας χρήσης της ζώνης. Εν τω μεταξύ, ο ΠΥ θα μπορούσε επίσης να φιλοξενήσει το δίκτυο 5G σε κοινόχρηστες ζώνες φάσματος ή μη αδειοδοτημένες ζώνες, αφού λάβει νομικές άδειες από την ρυθμιστική αρχή για τη χρήση των εν λόγω ζωνών. Οι εγκρίσεις ανάπτυξης θα

μπορούσαν να υπόκεινται σε βελτιστοποίηση και αυτοματοποίηση από την ρυθμιστή αρχή, ώστε να μειωθεί η απαιτούμενη φυσική προσπάθεια που απαιτεί ανθρώπινες και πόρους. Η ΕΡΑ θα μπορούσε να αναπτύξει έναν νέο μηχανισμό χρέωσης, να αξιοποιήσει αυτό το νέο επιχειρηματικό σενάριο και να αποκομίσει έσοδα διασφαλίζοντας παράλληλα ότι η μακροπρόθεσμη επένδυση των ΦΕΔ στις δημοπρασίες αδειών για τις ζώνες φάσματος δεν είναι μειωθεί.

- **Πωλητές τηλεπικοινωνιακού εξοπλισμού (telecommunication equipment vendors).** Λαμβάνοντας υπόψη το μοντέλο 5G για το αγροτικό σενάριο, θα περιλαμβάνει πωλητές τηλεπικοινωνιακού εξοπλισμού που θα κατασκευάζουν εξοπλισμό για την υποστήριξη της λειτουργίας του δικτύου. Θα τηρούν τα πρότυπα κατασκευής που έχουν αναπτυχθεί από τους φορείς προτυποποίησης και θα αναπτύξουν περαιτέρω δράσεις επαλήθευσης και βελτίωσης των προτύπων ώστε να ανταποκρίνονται στις πραγματικές απαιτήσεις. Επί του παρόντος, τα δίκτυα NHN υπάρχουν για την κάλυψη εντός κτιρίων με τη χρήση τεχνολογιών όπως το citizen's broadband radio services (CBRS).
- **Διαχειριστής λογικών κομματιών δικτύου (Network slices manager).** Η οντότητα του διαχειριστή λογικών κομματιών δικτύου μπορεί να αναπτυχθεί είτε από την ΕΡΑ, είτε από τον ΠΥ είτε από τους πωλητές τηλεπικοινωνιακού εξοπλισμού. Ο διαχειριστής αυτός θα συντονίζει τις διενέξεις δικαιοδοσίας μεταξύ των διαφόρων ενδιαφερομένων και θα διαχειρίζεται τις αιτήσεις που υποβάλλονται. Αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αλλαγή των απαιτήσεων του συστήματος σύμφωνα με τις ανάγκες, όπως επίσης να εκτελεί τιμολόγηση. Με λίγα λόγια, θα ενεργεί ως διαχειριστής του δικτύου.
- **Τελικός χρήστης (end user).** Ο τελικός χρήστης θα επωφεληθεί από τη συνδεσιμότητα στο διαδίκτυο και θα έχει άμεσο όφελος από αυτή την ανάπτυξη. Ο τελικός χρήστης μπορεί να είναι μεμονωμένοι χρήστες κινητής τηλεφωνίας (χρήστες δηλαδή των εφαρμογών στις υλοποιήσεις IoT που παρουσιάστηκαν) ή ολόκληρα τα συστήματα ευφυούς πρωτογενούς τομέα με όλα τα συστατικά στοιχεία τους. Όταν οι τελικοί χρήστες συνειδητοποιήσουν τα οφέλη της αγροτικής συνδεσιμότητας, τότε η ζήτησή τους θα αυξηθεί. Θα είναι σε θέση να συνδεθούν με τον κόσμο μέσω της συνδεσιμότητας στο διαδίκτυο και να απολαμβάνουν υπηρεσίες που δεν θα μπορούσαν χωρίς το διαδίκτυο. Θα αυξηθεί

δηλαδή η συνάφεια περιεχομένου που τέθηκε προηγουμένως ως πρόκληση στην ανάπτυξη του 5G στις αγροτικές περιοχές.



Σχήμα 21 Διαμόρφωση 5G δικτύου σε αγροτικές περιοχές με βάση τους διαμεσολαβητές.

Τα τεχνικά συστατικά είναι οι τεχνολογίες που καθιστούν δυνατή την τεχνολογική λειτουργικότητα, δηλαδή η τεχνική αρχιτεκτονική που οδηγεί στη δημιουργία αξίας. Οι φορείς διαδραματίζουν τους ρόλους που σχετίζονται με τα τεχνικά συστατικά τους. Κάθε φορέας έχει τον δικό του επιχειρηματικό ρόλο και διασυνδέονται μεταξύ τους με τις επιχειρηματικές διεπαφές. Είναι φανερό ότι οι διάφοροι φορείς έχουν επιχειρηματικές και τεχνικές διεπαφές, γεγονός που επιτρέπει τη μελέτη των ρόλων που περιγράφονται από τους φορείς. Οι ΦΕΔ, οι ΠΥ, και οι τελικοί χρήστες αλληλεπιδρούν σε διάφορους επικαλυπτόμενους τομείς όπως ο τομέας της συσκευής, ο τομέας του δικτύου και ο τομέας της εφαρμογής. Ο ΠΥ θα μπορούσε να είναι μια εταιρεία παροχής 5G υποδομών, ένας ΦΕΔ, μία βιομηχανία ή οποιαδήποτε άλλη καθετοποιημένη εταιρεία που αναπτύσσει το 5G και νοικιάζει τα λογικά κομμάτια του δικτύου στους ΦΕΔ. Οι ΦΕΔ χρησιμοποιούν τα κομμάτια για την εξυπηρέτηση των τελικών χρηστών μέσω της υποδομής των ΠΥ. Οι τελικοί χρήστες πληρώνουν τους ΦΕΔ, ενώ οι ΦΕΔ πληρώνουν τον ΠΥ. Αυτός ο σχεδιασμός είναι μια επιχείρηση όπου πρωτοστάτης και καθοδηγητής είναι ο ΠΥ. Τα έσοδα μοιράζονται μεταξύ των ΠΥ και ΦΕΔ.

Η προσωρινή αποθήκευση δεδομένων στην άκρη του δικτύου γίνεται από τον ΠΥ για τη μείωση της καθυστέρησης του δικτύου. Ο ΠΥ συνδέεται με τον πυρήνα του ΦΕΔ για να συνδεθεί στην συνέχεια με ένα άλλο μεγαλύτερο μητροπολιτικό δίκτυο WAN (Wide Area Network). Οι τελικοί χρήστες μπορούν να μισθώνουν λογικά κομμάτια του δικτύου από τον ΠΥ ως ιδιωτικό δίκτυο και να μισθώσουν υπηρεσίες ΦΕΔ για το WAN. Ο ΠΥ θα διαχειρίζεται τους λογαριασμούς και τις λειτουργίες για το 5G. Όπως επίσης μπορεί να χρησιμοποιήσει συχνότητες είτε από έναν ΦΕΔ είτε κοινόχρηστου φάσματος ή μη-αδειοδοτημένες ζώνες φάσματος. Το 5G επιτρέπει την καθετοποιημένη βιομηχανία να υπάρχει στο ίδιο φυσικό δίκτυο με τους καταναλωτές λιανικής. Ο τεμαχισμός του δικτύου σε λογικά κομμάτια επιτρέπει τις ανεξάρτητες λειτουργίες όλων αυτών των διαμεσολαβητών ως μισθωτές του δικτύου στην ανάπτυξή του.

3.2 Απαιτήσεις υποδομών και δικτύωσης – Network and infrastructure requirements

Με βάση τις απαιτήσεις σχεδιασμού που ορίστηκαν προηγουμένως, υπάρχει ανάγκη για εύρεση της καλύτερης συσχέτισης των πραγματικών αναγκών με τους περιορισμούς που θέτει η υλοποίηση ενός δικτύου 5G. Απώτερος στόχος είναι η εξυπηρέτηση του συνόλου των τελικών χρηστών στις αγροτικές περιοχές με την βέλτιστη χρήση των πόρων που υπάρχουν στην διάθεση των ΠΥ. Όπως ορίστηκε και στην εισαγωγή, οι κύριες τεχνολογίες υλοποίησης ενός δικτύου 5G είναι η **υπερσυγκέντρωση**, η **χρήση mmWave επικοινωνίας** και η **χρήση mMIMO τεχνολογίας κεραιών**. Και οι τρεις αυτές τεχνικές, ως **απαιτήσεις υποδομών**, στοχεύουν στο να αυξήσουν το μέγιστο ρυθμό δεδομένων, που να μην είναι χρήσιμο σε ένα αστικό περιβάλλον, αλλά καθόλου ιδανικό για ευρεία κάλυψη δικτύου.

Με την υπερσυγκέντρωση γίνεται στόχος να παρέχονται περισσότερες κυψέλες σε μία δεδομένη περιοχή με την χρήση των πικο- και φεμτοκυψελών. Η κύρια εφαρμογή αυτών είναι στο αστικό περιβάλλον, ενώ οι δυσκολίες κάλυψης ταιριάζουν περισσότερο στα αραιά αγροτικά περιβάλλοντα. Ως εφαρμογή αυτής της τεχνολογίας, όσο αυξάνεται ο αριθμός των κυψελών, τόσο αυξάνεται το κόστος (εγκατάστασης και συντήρησης) και οι παρεμβολές. Είναι πρακτικά αδύνατο να καλυφθούν όλες οι αγροτικές περιοχές με το να τοποθετούνται κεραιές που θα σχηματίζουν κυψέλες η μία δίπλα στην άλλη.

Σε αντίθεση με αυτήν την τεχνική, προτείνεται η χρήση υπερμεγέθων κυψελών (εκατοντάδες χιλιόμετρα σε διάμετρο κυψέλης) και μακροκυψελών [58]. Επίσης, υπάρχει και τα προβλήματα της επαναχρησιμοποίησης της υπάρχουσας υποδομής και της χρήσης αποδοτικών ενεργειακών πόρων που γίνονται εμφανή στο στόχο της καθολικής παροχής υπηρεσιών. Με την χρήση του mmWave στις επικοινωνίες μπαίνει ο στόχος της χρήσης περισσότερου εύρους ζώνης μετακινούμενοι στο φάσμα συχνοτήτων του mmWave.

Αν και αυτό το φάσμα συχνοτήτων συνοδεύεται από πολλά προτερήματα, δεν είναι κατάλληλο για την μεγάλη κάλυψη που χρειαζόμαστε στις αγροτικές περιοχές λόγω της μεγαλύτερης εξασθένησης των κυμάτων που διαδίδονται στον χώρο, όταν αυτά χρησιμοποιούν αυτές τις συχνότητες. Αυτό θα οδηγήσει και πάλι σε αδυναμία εφαρμογής αυτής της τεχνολογίας για ευρεία κάλυψη λόγω του κόστους: από την μία θα χρειάζονται περισσότεροι σταθμοί βάσης για την κάλυψη περιοχών πριν εξασθενίσει το σήμα, και από την άλλη η ανάγκη υλοποίησης μεγάλης πολυπλοκότητας beamforming για να ξεπεραστεί αυτή η εξασθένηση. Χρησιμοποιείται δηλαδή περιορισμένα μόνο σε περιοχές όπου το πρόβλημα των παρεμβολών δεν υφίσταται λόγω του τεράστιου εύρους ζώνης και της απορρόφησης σημάτων που συναντάται σε αυτή την μπάντα συχνοτήτων, προσφέροντας μεγάλων ταχυτήτων υπηρεσίες σε συγκεκριμένο χώρο και πολλούς χρήστες, παρά στις αγροτικές περιοχές όπου ο σχετικά μικρός αριθμός χρηστών είναι διεσπαρμένοι σε μεγάλες περιοχές.

Τέλος, με την χρήση κεραιών τεχνολογίας mMIMO, μπορούμε να αυξήσουμε την αποδοτική εκμετάλλευση του φάσματος συχνοτήτων (spectral efficiency) μέσω μεγάλης κλίμακας κεραιοσυστημάτων. Εδώ υπάρχουν σημάδια αποδοτικής χρήσης των κεραιών στις αγροτικές περιοχές: Πρώτον, υπάρχει προσπάθεια να βελτιωθεί η υπολογιστική επιβάρυνση του mMIMO, καθώς υπόσχεται καθολική κάλυψη. Δεύτερον, εξετάζεται η χρήση των συστημάτων mMIMO ώστε να μετατραπεί το κέρδος για κάλυψη περιοχών σε οικονομικό κέρδος μέσω χρήσης λιγότερων σταθμών βάσης ανά περιοχή. Τρίτον, ερευνητές δουλεύουν πάνω στην μείωση κατανάλωσης ενέργειας και στην τοποθέτηση υπερμεγέθων κυψελών (άνω των 50χλμ) μέσω της συνετής χρήσης πολλών στοιχείων κεραίας. Τέλος, υπάρχει δυνατότητα να αξιοποιηθεί η τεχνική

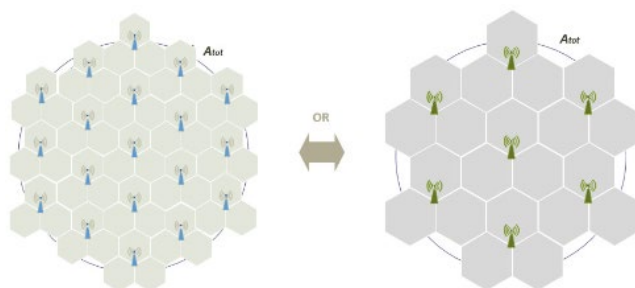
beamforming σε χαμηλές συχνότητες ώστε να υπάρχει μεγάλης έκτασης κάλυψη στις αγροτικές περιοχές.

Εκτός από τις απαιτήσεις υποδομών, σημαντικό ρόλο στην υλοποίηση δικτύου 5G στις αγροτικές περιοχές παίζουν και οι παράγοντες που επαφίονται στο ίδιο το μέσο τηλεπικοινωνιών. Έτσι, υπάρχουν ορισμένες **απαιτήσεις δικτύωσης** που πρέπει να εξεταστούν με βάση τις ανάγκες που πρέπει να καλυφθούν. Αυτές εξαρτώνται από το ίδιο το σύστημα τηλεπικοινωνιών και τις φυσικές ιδιότητες που το διέπουν και είναι η **ευρυζωνικότητα**, η **χωρητικότητα**, η **περιοχή συχνοτήτων**, ο **ρυθμός δεδομένων**, η **απόσταση κάλυψης**, η **εκπεμπόμενη ισχύς** και οι μεταξύ τους αλληλεξαρτήσεις. Στόχος είναι να βρεθεί η βέλτιστη σχέση ανάμεσα στα μεγέθη αυτά ώστε να καλυφθούν επαρκώς οι απαιτήσεις δικτύωσης.

Αρχικά, εξετάζουμε το περιβάλλον στο οποίο θα πρέπει να ενεργήσει ένα ασύρματο δίκτυο 5G. Όπως όλα τα περιβάλλοντα στα οποία διαδίδονται τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα, έτσι και στις αγροτικές περιοχές υφίστανται εξασθενίσεις (attenuation-path loss), θόρυβος (noise), και παρεμβολές (interference).

Στους θορύβους περιλαμβάνονται οι εσωτερικοί (εντός των κυκλωμάτων του πομποδέκτη) και εξωτερικοί θόρυβοι (περιβαλλοντικοί και εξωγενείς) και με βάση αυτούς υπολογίζεται ο λόγος ισχύς του αποδεκτού σήματος (P_{signal}) προς την ισχύ του θορύβου (P_{noise}) με τον όρο signal-to-noise ratio (SNR): $SNR = \frac{S(\text{signal})}{N(\text{noise})} = \frac{P_{\text{signal}}}{P_{\text{noise}}}$

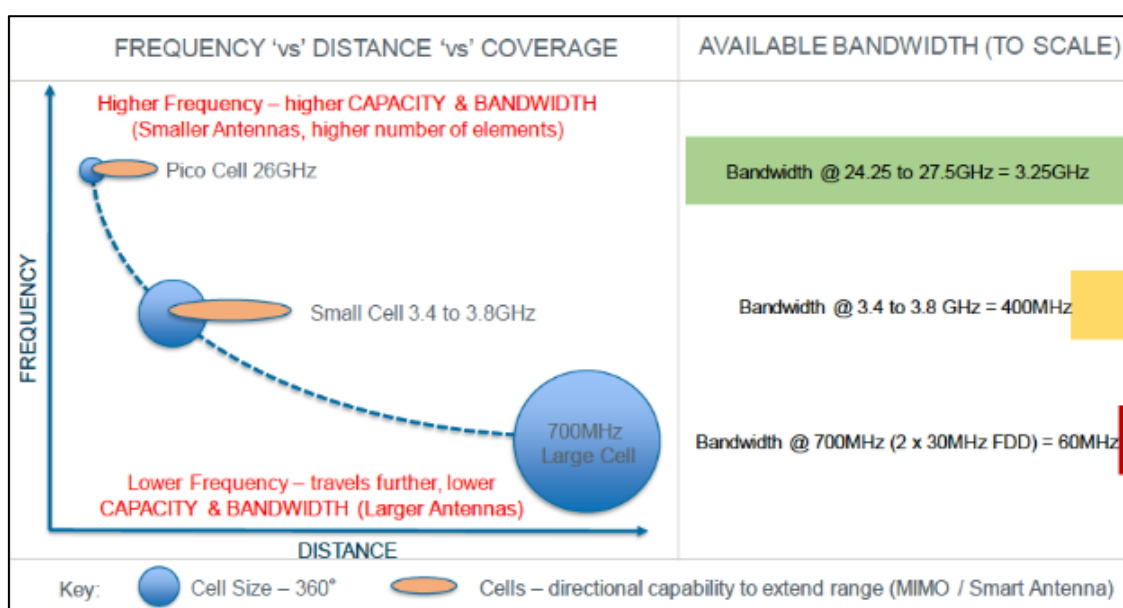
Η μέγιστη θεωρητική χωρητικότητα ενός καναλιού, δηλαδή το άνω όριο του ρυθμού δεδομένων που μπορούν να μεταδοθούν με σχετικά χαμηλό ρυθμό σφάλματος, μπορεί να υπολογιστεί με βάση το εύρος ζώνης του καναλιού (το φάσμα των συχνοτήτων που χρησιμοποιεί το κανάλι) και του SNR, όπως διατυπώνει το θεώρημα Shannon-Hartley: $C = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right)$. Από αυτόν τον τύπο φαίνεται ότι για να έχουμε μεγαλύτερη χωρητικότητα καναλιού, δηλαδή μεγάλο ρυθμό δεδομένων, θα πρέπει να αυξηθεί το εύρος ζώνης του καναλιού. Μεγαλύτερο εύρος ζώνης οδηγεί σε μεγαλύτερο



Σχήμα 22 Αποδοτική χρήση κεραιών 5G σε σχέση με υπάρχουσες υποδομές δικτύων LTE

κανάλι, το οποίο με την σειρά του σημαίνει μεγαλύτερο ρυθμό δεδομένων που θα μπορέσουν να μεταφερθούν από το κανάλι μέσω κωδικοποίησης.

Το 5G NR όπως έχει αναφερθεί χρησιμοποιεί τριών ειδών μπάντες συχνοτήτων: την low, medium και high band. Εξετάζοντας τώρα τις εξασθενίσεις που υπόκεινται τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα κατά την διάδοσή τους, υπάρχει μια βέλτιστη επιλογή για αυτές τις τρεις περιοχές συχνοτήτων για χρήση τους σε αγροτικές περιοχές: ξέροντας ότι η συχνότητα είναι αντιστρόφως ανάλογη του μήκους κύματος των κυμάτων, μεγαλύτερης συχνότητας κύματα έχουν μικρότερα μήκη κύματος και άρα χάνουν περισσότερη ενέργεια λόγω σύγκρουσης των φωτονίων του ηλεκτρομαγνητικού κύματος με τα άτομα και μόρια του μέσου διάδοσης. Μεγάλη χαμένη ενέργεια ισοδυναμεί με μικρότερη απόσταση κάλυψης. Έτσι, θα ήταν ιδανική η low band του 5G για την κάλυψη μεγάλων αποστάσεων. Με βάση όλα τα παραπάνω, η αλληλεξάρτηση της συχνότητας, της χωρητικότητας και του εύρους ζώνης και της απόστασης κάλυψης είναι: Μεγάλες συχνότητες → μεγαλύτερο εύρος ζώνης και άρα μεγαλύτερη χωρητικότητα αλλά μικρή απόσταση κάλυψης, ενώ μικρότερες συχνότητες παρέχουν μεγαλύτερη περιοχή κάλυψης αλλά μικρό ρυθμό δεδομένων (Εικόνα 25).

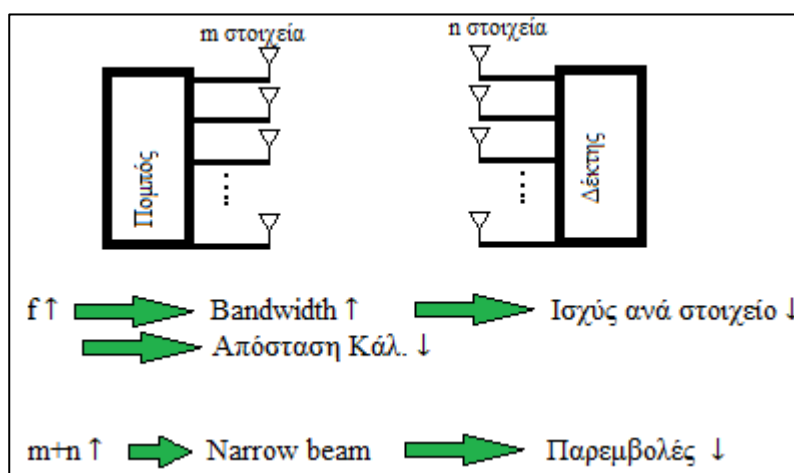


Σχήμα 23 Σύνδεση συχνότητας, εύρους ζώνης, χωρητικότητας σε σχέση με την απόσταση κάλυψης.

Τα παραπάνω δεν λαμβάνουν υπόψιν την εκπεμπόμενη ισχύ του σήματος που θεωρείται σταθερή όσο τα άλλα μεγέθη μεταβάλλονται, καθώς είναι γνωστό ότι όσο αυξάνεται η ισχύς εκπεμπόμενου σήματος αυξάνεται και η απόσταση κάλυψης.

3.3 Μοντελοποίηση – Design and Implementation

Τα συστήματα mMIMO έχουν το ιδιαίτερο γνώρισμα των πολλαπλών στοιχείων για εκπομπή και λήψη σήματος και αυτό δίνει ορισμένες διαφοροποιήσεις στο πώς μπορούν να παίζουν ρόλο οι αλληλεξαρτήσεις των ιδιοτήτων του ηλεκτρομαγνητικού κύματος που περιγράψαμε σε σχέση με μία κεραία LTE χωρίς beamforming. Αρχικά χρησιμοποιώντας όλο και μεγαλύτερες συχνότητες ώστε να επιτευχθεί μεγαλύτερη χωρητικότητα για να είναι δυνατόν να εξυπηρετηθούν τα IoT συστήματα στις αγροτικές περιοχές, αυξάνεται και το διαθέσιμο bandwidth, μειώνοντας όμως την απόσταση κάλυψης. Αυτό συνεπάγεται ότι και η ισχύς σήματος για κάθε στοιχείο ενός συστήματος mMIMO θα μειωθεί (λόγω μικρού μεγέθους του κάθε στοιχείου). Αυτό θα ωθήσει την αύξηση του πλήθους των στοιχείων εκπομπής και λήψης, που με τη σειρά του θα δημιουργήσει κατευθυνόμενες δέσμες κύματος (narrow beam), ρίχνοντας τις παρεμβολές από τους άλλους χρήστες (αισθητήρες, σταθμούς βάσης, κλπ). Το ότι οι δέσμες κύματος θα είναι πιο κατευθυνόμενες, σε άλλα περιβάλλοντα θα ανάγκαζε τον εντοπισμό του κάθε χρήστη ανά πάσα στιγμή, αλλά στις εφαρμογές του IoT στον αγροτικό τομέα αυτό δεν είναι μεγάλη προτεραιότητα λόγω της μικρής κινητικότητας που εμφανίζει ο χώρος (Εικόνα 25) [59].



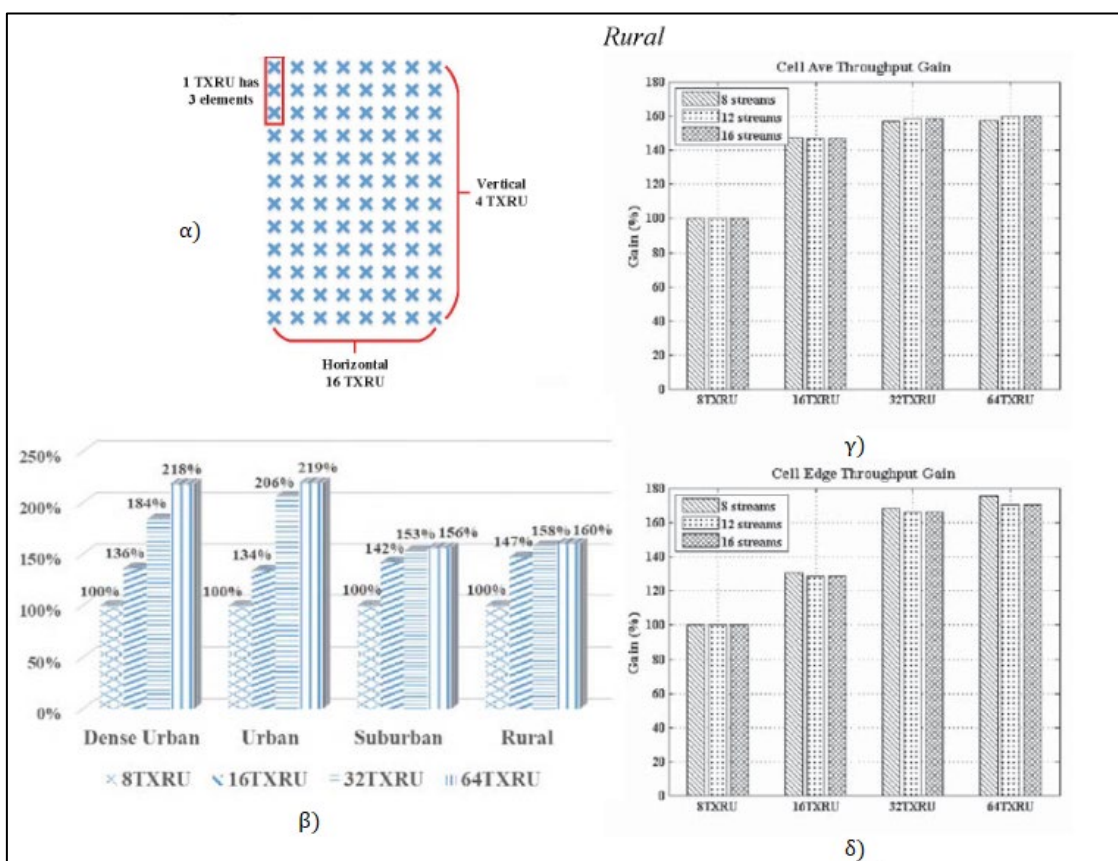
Σχήμα 24 Αλληλουχία εξαρτήσεων ιδιοτήτων κύματος με την εφαρμογή mMIMO κεραίων.

Εάν θεωρηθεί ότι 3 στοιχεία μιας κεραίας αποτελούν μία μονάδα πομποδέκτη (Transceiver Unit – TXRU) (Εικόνα 27 α), τότε το προηγούμενο βήμα της αύξησης των στοιχείων θα οδηγήσει σε συστήματα mMIMO με πολλά TXRU. Συγκριτικά με τις αγροτικές περιοχές, αύξηση των TXRU σε ένα σύστημα mMIMO θα οδηγήσει σε αύξηση του ρυθμού μετάδοσης στην κυψέλη (μέσος και άκρου) (Εικόνα 27 γ και δ), ενώ

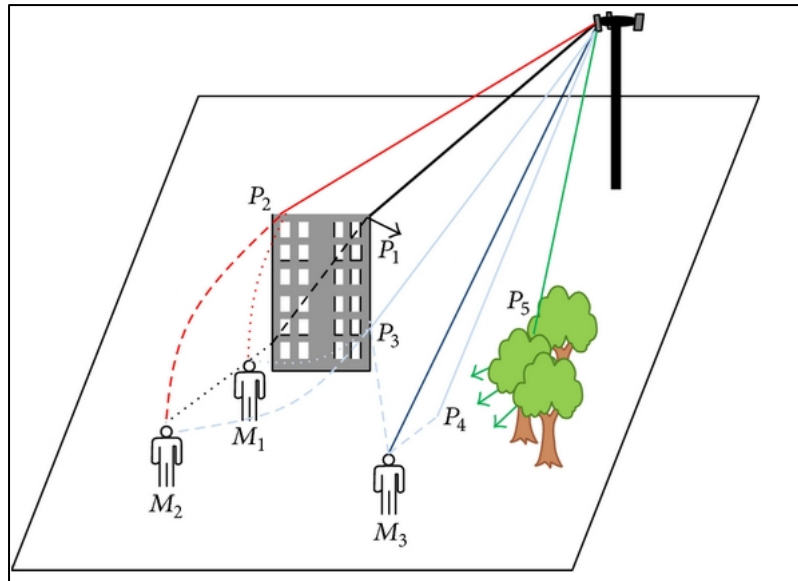
παράλληλα είναι δυνατόν να επιλεγθεί ο αριθμός των data streams που θα χρησιμοποιηθούν, ανάλογα με τις ανάγκες της κυψέλης.

Τα data streams θα έχουν πολυπλεξία χώρου ενώ θα χρησιμοποιούν τους ίδιους συχνοτικούς και χρονικούς πόρους και για upstream και για downstream. Βέβαια, είναι γνωστό ότι το 5G γίνεται πιο αποδοτικό στους ρυθμούς μετάδοσης σε πυκνές περιοχές χρηστών (αστικές, προάστια, κλπ) όσο αυξάνουν τα TXRU (Εικόνα 27 β). Αυτό βέβαια δεν σημαίνει ότι δεν παρατηρείται αύξηση και στις αγροτικές περιοχές, αλλά από ένα σημείο και μετά, η αύξηση των TXRU στην κεραία δεν δημιουργεί και ισόποση αύξηση του ρυθμού μετάδοσης στην κυψέλη [60].

Ως βέλτιστη χρήση στα αρχικά στάδια της υλοποίησης 5G στις αγροτικές περιοχές, κεραίες με 16 TXRU φαίνεται να είναι προτιμητέες, ενώ στα πυκνά αστικά κέντρα χρειάζονται 64 TXRU.

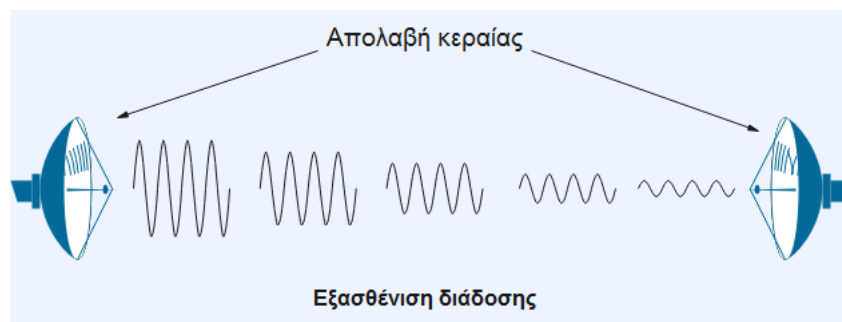


Σχήμα 25 α) Σύστημα mMIMO 192 στοιχείων και 64 TXRU, β) Σύγκριση μέσου throughput gain κυψελών σε διαφορετικές περιοχές, γ) Μέσο ποσοστιαίο throughput gain σε 4 διαφορετικές κεραίες με 3 διαφορετικά data streams δ) Το ίδιο throughput gain αλλά για την άκρη.



Σχήμα 27 Μηχανισμοί διάδοσης κύματος: P1: Ανάκλαση, P2: Περίθλαση, P3: Διάθλαση, P4: Σκέδαση, P5: Απορρόφηση.

Υπάρχουν πολλών ειδών μηχανισμοί διάδοσης του κύματος στον χώρο: **Ανάκλαση (reflection)** όπου τα κύματα προσκρούουν σε λείες επιφάνειες με πολύ μεγάλες διαστάσεις ως προς το μήκος κύματος του σήματος όπως η επιφάνεια της γης, κτήρια και τοίχοι, **περίθλαση (diffraction)** όπου δημιουργείται καμπύλωση του κύματος γύρω από φυσικά ή τεχνητά εμπόδια (κυρίως σε ακμές αυτών) με εμφάνιση δευτερευόντων κυμάτων λόγω της αρχής του Huygens, **διάθλαση (refraction)** όπου το κύμα εκτρέπεται από την πορεία του περνώντας μέσα από διαφορετικής πυκνότητας μέσα διάδοσης, **σκέδαση (scattering)** όπου το κύμα προσκρούει πάνω σε τραχεία επιφάνεια ή σε επιφάνεια κοντά στο μήκος κύματος και διασκορπίζεται προς όλες τις κατευθύνσεις και **απορρόφηση (absorption)** όπου το πλάτος του κύματος μειώνεται (εξασθενεί) λόγω μεταφοράς της ενέργειας του κύματος στο μέσο διάδοσης (Εικόνα 28). Αυτοί οι μηχανισμοί διάδοσης δημιουργούν πολυδιαδρομικές διαδόσεις του σήματος και παρεμβολές, ενώ παρατηρείται **εξασθένιση (path loss)** και στο ίδιο το μέσο.



Σχήμα 26 Μείωση της ισχύος του σήματος όσο αυτό ταξιδεύει στο μέσο διάδοσης.

Για την διάδοση ηλεκτρομαγνητικού κύματος στον ελεύθερο χώρο έχει εκφραστεί με το μοντέλο που φέρει το ίδιο όνομα και προβλέπει την ισχύ του λαμβανομένου σήματος όταν ο πομπός και ο δέκτης έχουν καθαρή, απρόσκοπτη διαδρομή οπτικής επαφής ανάμεσά τους (Line of Sight- LoS path). Ένα σύστημα δικτύου 5G υπόκειται και αυτό στη διάδοση ελεύθερου χώρου. Γενικά ακολουθείται ο γενικός κανόνας που θέλει την λαμβανόμενη ισχύ να φθίνει συναρτήσει της απόστασης πομπού-δέκτη υψωμένη σε κάποια δύναμη. Έτσι και στο μοντέλο διάδοσης ελεύθερου χώρου έχουμε: $P_r(d) = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2 L}$, όπου d η απόσταση πομπού δέκτη, P_t η μεταδιδόμενη ισχύς, $P_r(d)$ η λαμβανόμενη ισχύς, G_t το κέρδος κεραίας πομπού, G_r το κέρδος κεραίας δέκτη, L ένας παράγοντας απωλειών του συστήματος ανεξάρτητος από την διάδοση και λ το μήκος κύματος σε μέτρα. Αυτή είναι και η επονομαζόμενη εξίσωση του Friis. Εάν τώρα δεν ληφθούν υπόψιν οι απολαβές των κεραιών και εκφραστεί η απώλεια διαδρομής ως την διαφορά σε dB ανάμεσα την ενεργό μεταδιδόμενη ισχύ και στην λαμβανόμενη ισχύ, τότε η εξίσωση του Friis γίνεται $PL(dB) = 10 \log \frac{P_t}{P_r} = -10 \log \left[\frac{\lambda^2}{(4\pi)^2 d^2} \right]$.

Προχωρώντας τώρα την εξίσωση Friis εκφρασμένη σε dB έχουμε:

$$\begin{aligned} PL(dB) &= -10 \log \left[\frac{\lambda^2}{4\pi^2 d^2} \right] = -10 \log \left[\left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \right] = 20 \log \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right) \\ &= -20 \log \lambda + 20 \log d + 21.98 dB \\ &= 20 \log f + 20 \log d - 147.56 dB \end{aligned}$$

Από τον παραπάνω τύπο απωλειών στον ελεύθερο χώρο, είναι φανερό ότι οι απώλειες αυξάνονται από την απόσταση και την συχνότητα επικοινωνίας, όπως έχει αναφερθεί και προηγουμένως. Ο παραπάνω τύπος ισχύει στην ιδανική περίπτωση που το κύμα μεταδίδεται από τον πομπό στον δέκτη χωρίς εμπόδια και χωρίς να ληφθούν υπόψιν οι άλλοι τρόποι διάδοσης που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Η μετάδοση όμως σε ένα ασύρματο δίκτυο επικοινωνιών στο φυσικό περιβάλλον λαμβάνει χώρα πάνω από ανώμαλο έδαφος, όπου το γεωγραφικό ανάγλυφο της περιοχής εφαρμογής πρέπει να ληφθεί υπόψιν, μαζί με όποιους μηχανισμούς μετάδοσης αυτό προϋποθέτει.

Με αυτόν τον τρόπο, είναι διαθέσιμα πολλά είδη μοντέλων διάδοσης που προβλέπουν της απώλειες διάδοσης στις περιοχές αυτές, τα οποία βοηθούν στην πρόβλεψη ισχύος σήματος σε σημεία λήψης ή σε όλη την περιοχή εφαρμογής, και

ποικίλουν ανάλογα με την προσέγγισή τους, την πολυπλοκότητά τους και την ακρίβειά τους. Αυτά τα μοντέλα είναι δύο ειδών, ανάλογα με το πεδίο εφαρμογής τους: τα **μοντέλα υπαίθριας διάδοσης** και τα **μοντέλα ενδοκτιριακής διάδοσης**.

Για την μοντελοποίηση που εφάπτεται στις ανάγκες και απαιτήσεις των αγροτικών περιοχών χρησιμοποιούνται δύο μοντέλα: το μοντέλο **Longley-Rice** και το μοντέλο **Durkin**. Ως το πιο διαδεδομένο μοντέλο για πρόβλεψη απωλειών στις «ανοιχτές» αγροτικές περιοχές (σε σχέση με τις «κλειστές» αστικές), το μοντέλο Longley-Rice εφαρμόζεται σε συστήματα επικοινωνίας σημείο προς σημείο στην περιοχή συχνοτήτων από 40 MHz έως 100 GHz, δηλαδή και στις 3 ζώνες συχνοτήτων του χρησιμοποιεί το 5G. Κύριο στοιχείο απωλειών σε αυτό το μοντέλο είναι η γεωμετρία διαδρομής της κατατομής του εδάφους και η διαθλαστικότητα της τροπόσφαιρας. Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιεί άλλα μοντέλα για να υπολογίσει τις επιμέρους απώλειες, όπως το μοντέλο εδαφικής ανάκλασης δύο ακτινών για τις απώλειες από το ανάγλυφο του εδάφους, τα μοντέλα ακμής Fresnel-Kirchoff για απώλειες περίθλασης σε μεμονωμένα εμπόδια, η θεωρία του εμπροσθόδρομου σκεδαστή για την τροποσφαιρική σκέδαση και μια τροποποιημένη μέθοδος Van der Pol-Bremmer για τις απώλειες περίθλασης σε μακρινό πεδίο διαδρομών.

Η μέθοδος Longley-Rice λειτουργεί με δύο μορφές: αν υπάρχει διαθέσιμο το λεπτομερές ανάγλυφο της επίγειας διαδρομής, οι ειδικές παράμετροι για την διάδοση μπορούν να καθοριστούν και να υπάρχει **πρόβλεψη σημείο-προς-σημείο (point to point mode)**. Αν όμως δεν είναι διαθέσιμο το ανάγλυφο, το μοντέλο παρέχει τεχνικές για την εκτίμηση των παραμέτρων και η πρόβλεψη λέγεται **περιοχής (area mode)**. Έχει υπάρξει αρκετή βιβλιογραφία και αρκετές τροποποιήσεις και διορθώσεις για το μοντέλο από την δημοσίευσή του, με κύρια την προσθήκη ενός επιπλέον όρου που υπολογίζει μια επιπρόσθετη εξασθένιση λόγω της αστικής διαταραχής και λέγεται **αστικός παράγοντας (urban factor)** και έχει προέλθει από την σύγκριση των μοντέλων υπαίθριας διάδοσης στις διάφορες περιοχές (όπως του Okumura-Hata): πυκνές αστικές (dense urban), αστικές (urban), προάστια (suburban) και αγροτικές (rural).

Με βάση τις παραπάνω απαιτήσεις και με την χρήση των διαθέσιμων μοντέλων που υπάρχουν, μπορεί να γίνει προσομοίωση για την κατάσταση περιοχής κάλυψης μίας υποτιθέμενης κεραίας που πλησιάζει σε χαρακτηριστικά μια κεραία 5G στην ισοτροπική εκδοχή της. Εργαλεία όπως τα Terrain Analysis Package της SoftWright LLC, RFToolkit της Nautel Inc. και ειδικές βιβλιοθήκες του Matlab έχουν σχεδιαστεί για την μελέτη κάλυψης μιας περιοχής από διάφορους σταθμούς ραδιοκυμάτων διαφόρων

χαρακτηριστικών. Για μια τέτοια σύντομη μελέτη θα χρησιμοποιηθεί η Matlab για να αποτυπωθεί μία πιθανή υλοποίηση ενός τέτοιου δικτύου σε αγροτική περιοχή. Χρησιμοποιούνται οι εξής παράμετροι σύμφωνα με τους κανονισμούς που θέτει ο ITU για το standard που έχει ορίσει για τις 5G υλοποιήσεις (IMT-2020)(Πίνακας 4) [61]:

- την ζώνη συχνοτήτων low band που ορίστηκε ως η καταλληλότερη, και ειδικά συχνότητες κοντά στα 700MHz που είναι και οι πιο διαδεδομένες για 5G δίκτυα,
- επίπεδα ισχύος πολύ μεγαλύτερα των 7kW (default 12kW), καθώς οι σταθμοί βάσης 5G έχουν μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας [62] από τους αντίστοιχους 4G και ειδικά στις αγροτικές περιοχές πρέπει να χρησιμοποιηθεί μεγαλύτερη ισχύς τόσο για την κάλυψη τεράστιων περιοχών όσο και για την αντιμετώπιση του attenuation,
- τοποθέτηση 100m πάνω από την επιφάνεια της γης στο σημείο τοποθέτησης,
- μοντέλο Longley-Rice για την υπαίθρια διάδοση σε αγροτικές περιοχές (urban factor = 2 κατάλληλο για αγροτικές περιοχές),
- μέγιστη απόσταση κάλυψης ορισμένη στα 50km

Με βάση τις παραπάνω παραμέτρους και χρησιμοποιώντας το εργαλείο Matlab και τις ειδικές βιβλιοθήκες RF toolbox, communications toolbox, mapping toolbox, phased array system toolbox και antenna toolbox, επιχειρείται μία μοντελοποίηση της περιοχής κάλυψης της ευρύτερης αγροτικής περιοχής του κάμπου του Σπερχειού Ποταμού και της πεδιάδας της Ξυνιάδας στην περιοχή του Δομοκού, με τον σταθμό βάσης για την περιοχή του Σπερχειού ποταμού να βρίσκεται πλησίον του χωριού Δελφίνο στους πρόποδες της Οίτης σε υψόμετρο 580μ και τον σταθμό βάσης για την περιοχή του Δομοκού να βρίσκεται στους πρόποδες του όρους Όθρυς πλησίον του χωριού Νέος Παλαμάς.

Πίνακας 4 Παράμετροι κεραιών 5G για τοποθέτηση σε αγροτικές περιοχές. Το configuration C (LMLC - Low Mobility Low Large Cell) είναι πιο κοντά στις προτιμήσεις για εφαρμογή στον έξυπνο πρωτογενή τομέα.

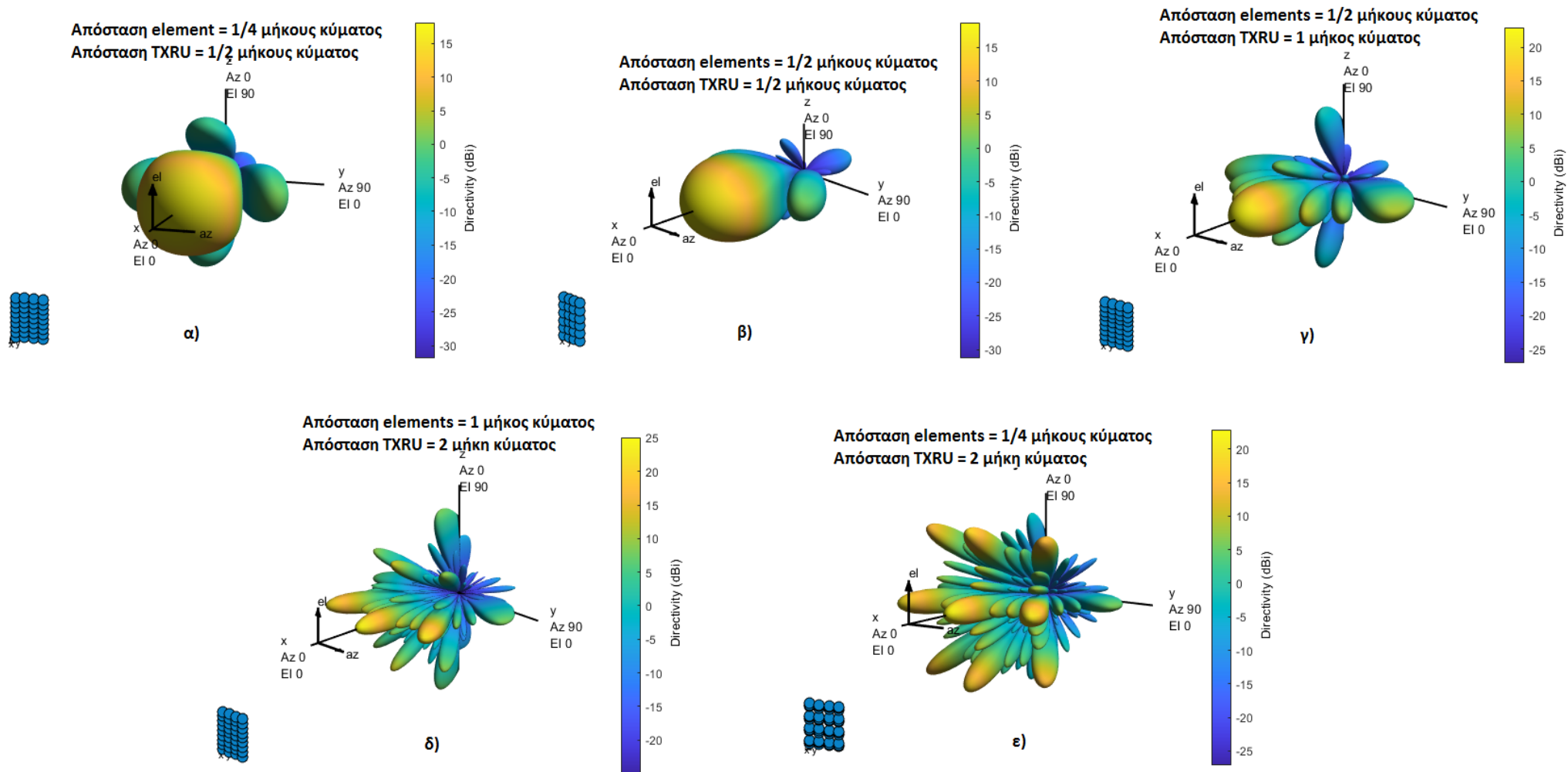
Parameters	Rural-eMBB		
	Spectral Efficiency and Mobility Evaluations		Average Spectral Efficiency Evaluation
	Configuration A	Configuration B	Configuration C (LMLC)
Baseline evaluation configuration parameters			
Carrier frequency for evaluation	700 MHz	4 GHz	700 MHz
BS antenna height	35 m	35 m	35 m
Total transmit power per TRxP	49 dBm for 20 MHz bandwidth 46 dBm for 10 MHz bandwidth	49 dBm for 20 MHz bandwidth 46 dBm for 10 MHz bandwidth	49 dBm for 20 MHz bandwidth 46 dBm for 10 MHz bandwidth
UE power class	23 dBm	23 dBm	23 dBm
Percentage of high loss and low loss building type	100% low loss	100% low loss	100% low loss
Additional parameters for system-level simulation			
Inter-site distance	1732 m	1732 m	6000 m
Number of antenna elements per TRxP	Up to 64 Tx/Rx	Up to 256 Tx/Rx	Up to 64 Tx/Rx
Number of UE antenna elements	Up to 4 Tx/Rx	Up to 8 Tx/Rx	Up to 4 Tx/Rx
Device deployment	50% indoor, 50% outdoor (in-car) Randomly and uniformly distributed over the area	50% indoor, 50% outdoor (in-car) Randomly and uniformly distributed over the area	40% indoor, 40% outdoor (pedestrian), 20% outdoor (in-car) Randomly and uniformly distributed over the area
UE mobility model	Fixed and identical speed $ v $ of all UEs, randomly and uniformly distributed direction	Fixed and identical speed $ v $ of all UEs, randomly and uniformly distributed direction	Fixed and identical speed $ v $ of all UEs, randomly and uniformly distributed direction

Ο κώδικας για την υλοποίηση της προσομοίωσης των κεραιών στις παραπάνω περιοχές και τα αποτελέσματα φαίνονται παρακάτω:

```
Editor - C:\Users\Kortselis\Documents\MATLAB\Kalipsi_Keraewn_Fthiotida.m *
Kalipsi_Keraewn_Fthiotida.m * +
1 %Ορίζω την ταχύτητα του φωτός c.
2 c = physconst('LightSpeed');
3
4 %Ορίζω την συχνότητα εκπομπής στα 700MHz = 700000000Hz = 7e+8 (γραμμένο ως scientific notation).
5 fq = 7e8;
6
7 %Ορίζω το μήκος κύματος lambda ως το κλάσμα του c προς το fq.
8 lambda = c/fq;
9
10 %Χρησιμοποιώντας την βιβλιοθήκη Phased Array System Toolbox, κατασκευάζω ένα ορθογώνιο phased array κεραιοστοιχείο
11 %με 16 TXRU σε στοίχιση 4x4, με το κάθε TXRU να έχει 3 elements σε στοίχιση 1x3, όπως έχουμε ορίσει ότι είναι αποδεκτό για αγροτικές περιοχές.
12 %Δοκιμάζοντας διαφορετικές αποστάσεις ανάμεσα στα elements και στα TXRU, τα elements μπορούν να απέχουν μεταξύ τους
13 %διαφορετικές τιμές του μήκους κύματος όπως και τα TXRU, δημιουργώντας έτσι διαφορετικά διαγράμματα ακτινοβολίας.
14 array = phased.NRRectangularPanelArray('Size',[3, 1, 4, 4],'Spacing',[0.25*lambda, 0.25*lambda, 2*lambda, 2*lambda]);
15
16 %Παρουσιάζω την τρισδιάστατη απεικόνιση ακτινοβολίας του κεραιοσυστήματος.
17 pattern(array,fq,'ShowArray',true)
18
19 %Ορίζω ως μοντέλο διάδοσης το Longley-Rice.
20 pm = propagationModel("longley-rice");
21
22 %Κατασκευάζω δύο πειραματικούς σταθμούς βάσης με τις προδιαγραφές του IMT-2020. Ο σταθμός tx1 είναι τοποθετημένος
23 %στους πρόποδες της Οίτης πλησίον του χωριού Δελφίνο σε ύψος 580μ λόγω καλού line of sight με όλη την πεδιάδα του
24 %Σπερχειού Ποταμού. Ο σταθμός tx2 είναι τοποθετημένος στις πλαγιές του όρους Όθρυς στα 750μ και καλύπτει την πεδιάδα του Δομοκού.
25 tx1 = txsite('Name',"Antenna Sperxeiou","Latitude",38.7958389,"Longitude",22.4260381,"Antenna",array,"AntennaHeight",35,"AntennaAngle",70,"TransmitterFrequency",fq,"TransmitterPower",7000);
26 tx2 = txsite("Name","Antenna Domokou","Latitude",39.0312673,"Longitude",22.4074061,"Antenna",array,"AntennaHeight",35,"AntennaAngle",90,"TransmitterFrequency",fq,"TransmitterPower",7000);
27
28 %Δημιουργώ χάρτες κάλυψης των αγροτικών περιοχών από τους παραπάνω σταθμούς βάσης με χρωματικές διαβαθμίσεις ανάλογα με την ισχύ λήψης.
29 coverage(tx1,pm,"SignalStrengths",-100:5)
30 coverage(tx2,pm,"SignalStrengths",-100:5)
```

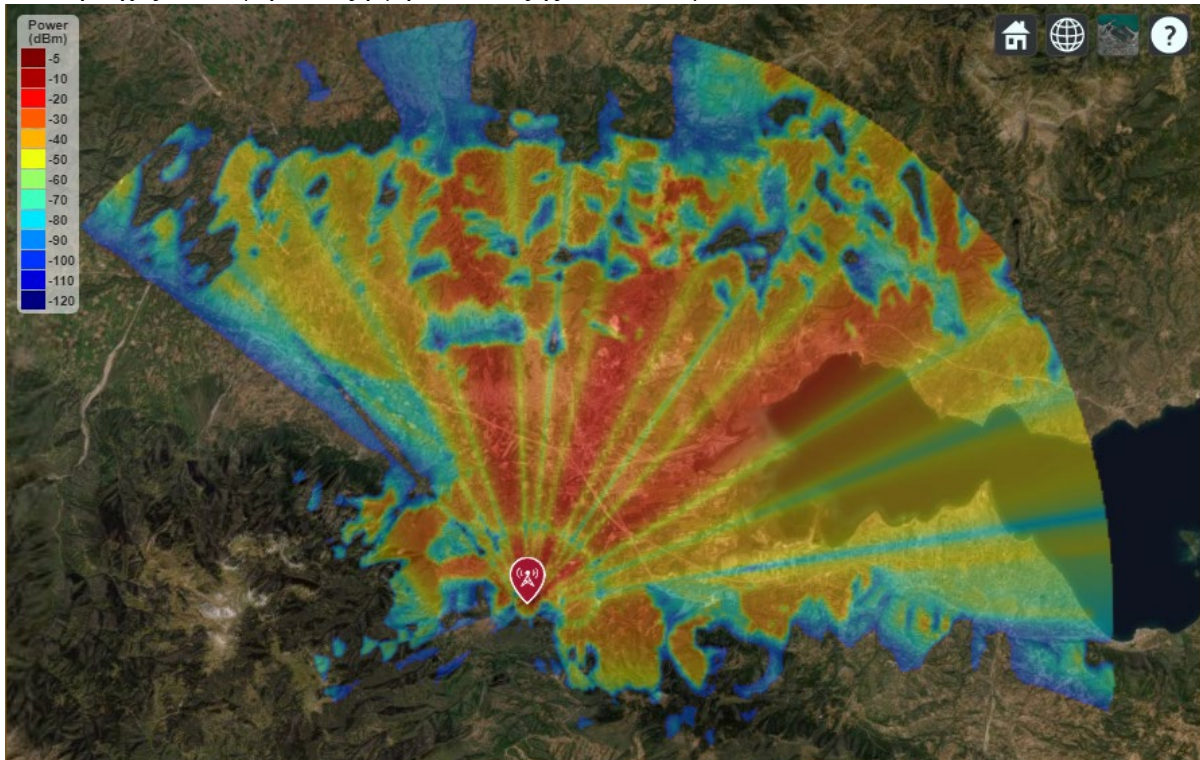
Σχήμα 28 Κώδικας Matlab για την δημιουργία τρισδιάστατης αναπαράστασης ακτινοβολίας της κεραίας και χάρτη κάλυψης των σταθμών βάσεων.

Στον παραπάνω κώδικα βλέπουμε ότι χρησιμοποιήθηκε αυθαίρετα η απόσταση του $\frac{1}{4}$ του μήκους κύματος ανάμεσα στα elements της κεραίας και διπλάσιο του μήκους κύματος απόσταση ανάμεσα στα TXRU. Παρακάτω παρατίθενται οι διαφορετικές αναπαραστάσεις ακτινοβολίας για διαφορετικές τιμές αποστάσεων elements και TXRU με στόχο την παρατήρηση δημιουργίας διαφορετικών ακτινοβολιών με άλλα μεγέθη κύριων και δευτερευόντων (πλευρικών) λοβών. Για την περίπτωση των αγροτικών περιοχών με στόχο την κάλυψη όσο μεγαλύτερης απόστασης από τον κύριο λοβό και εξάλειψη των δευτερευόντων, χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές που φαίνονται στην Εικόνα 30. Οι αλλαγές βρίσκονται στην συνάρτηση phased.NRRectangularPanelArray και αποτυπώνονται με την συνάρτηση pattern.

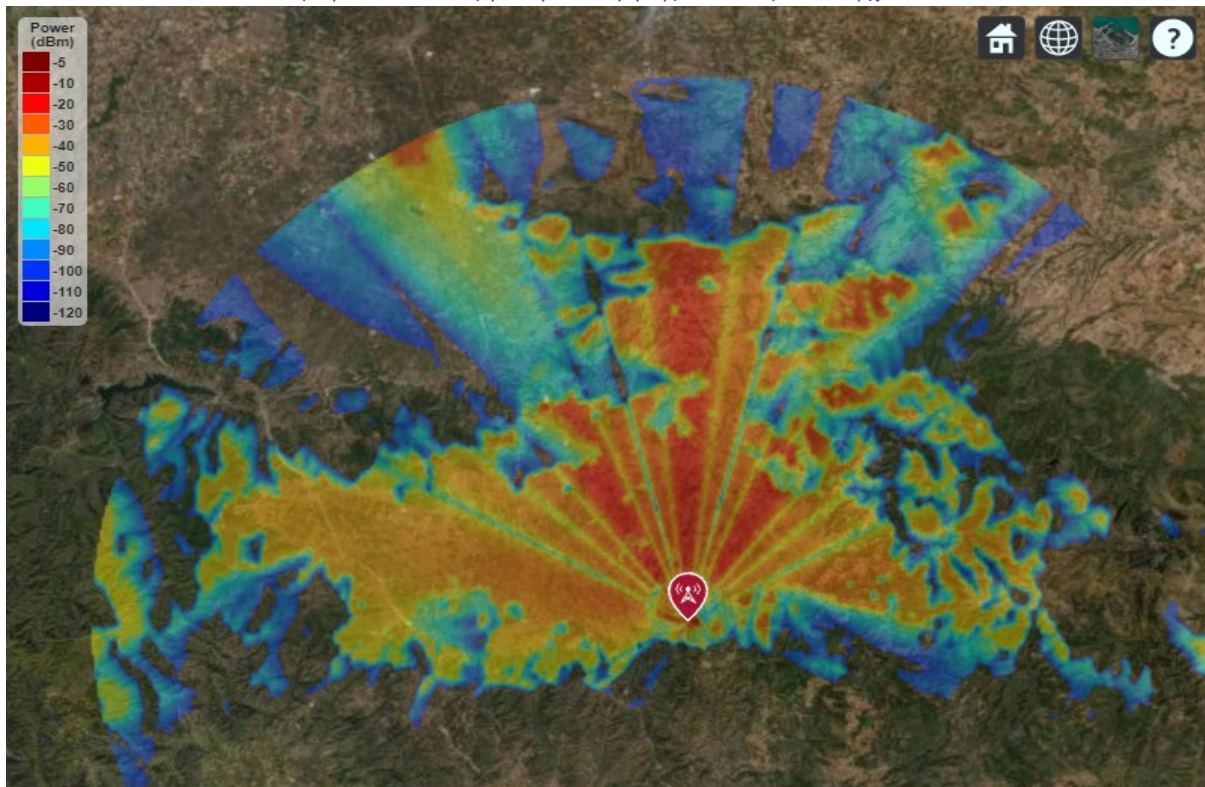


Σχήμα 29 Διαφορετικά τρισδιάστατα διαγράμματα ακτινοβολίας ανάλογα με την απόσταση των στοιχείων και των TXRU της κεραίας. Αυξάνοντας την απόσταση των TXRU δημιουργούνται πλευρικοί λοβοί μεγάλης έντασης.

Στην προσομοίωση των σταθμών βάσης που χρησιμοποιήθηκαν στις αγροτικές περιοχές περίξ της Λαμίας, χρησιμοποιήθηκε η κεραία ε) της Εικόνας 31. Για τις δύο περιοχές ενδιαφέροντος βγήκαν τα εξής αποτελέσματα:

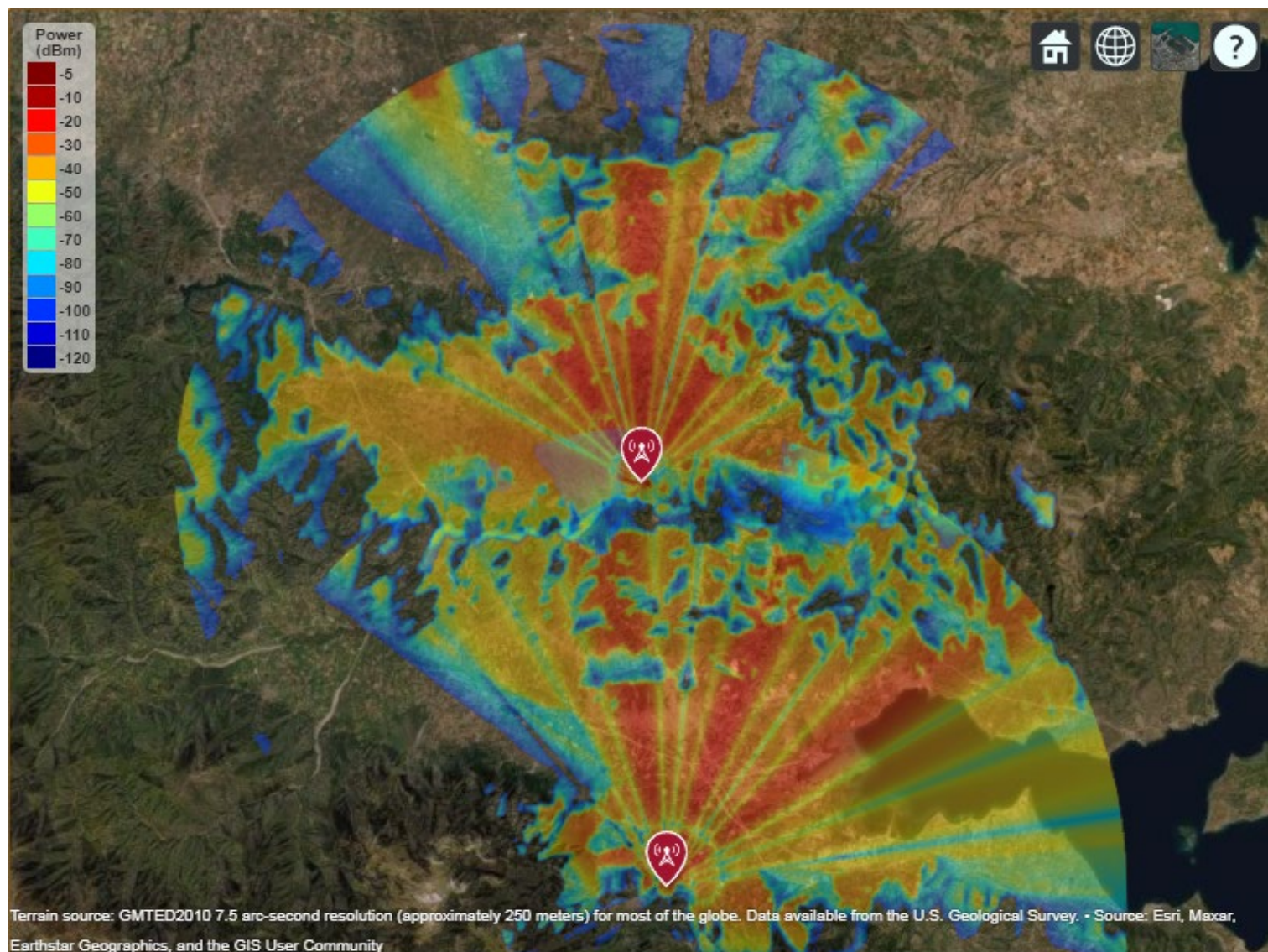


Σχήμα 32 Κεραία τοποθετημένη στους πρόποδες της Οίτης (κόκκινο pin) και στραμμένη 70 μοίρες (βορειοανατολικά) για την κάλυψη της πεδιάδας του Σπερχειού.



Σχήμα 30 Κεραία τοποθετημένη στους πρόποδες της Όθρυς (κόκκινο pin) και στραμμένη 90 μοίρες (βόρεια) για την κάλυψη της πεδιάδας της περιοχής του Δομοκού.

Συνολικά, η κάλυψη της ευρύτερης αγροτικής περιοχής πέριξ του δήμου Λαμιέων με την υπέρθεση κάλυψης και των δύο κεραιών είναι:



Σχήμα 31 Το συνολικό πεδίο κάλυψης και από τις δύο κεραιές για τις αγροτικές περιοχές πέριξ της Λαμίας.

Με βάση τα παραπάνω μπορεί να σχηματιστεί μία γενική άποψη για την υλοποίηση δικτύου 5G στις αγροτικές περιοχές, όταν οριστούν μερικά χαρακτηριστικά που πληρούν τις απαιτήσεις που έχουμε θέσει για την ανάπτυξη ενός τέτοιου δικτύου. Παρόμοιες προσομοιώσεις έχουν γίνει κυρίως για αστικά περιβάλλοντα με πολύ πυκνές κυψέλες κεραιών και για πολύ μεγαλύτερες συχνότητες [63].

3.4 Εναλλακτικές λύσεις στις προκλήσεις υποδομών και δικτύωσης – Overcoming challenges through alternative solutions

Όπως ειπώθηκε και προηγουμένως, οι τρεις κύριες τεχνολογίες του 5G (ultradensification, mmWave, mMIMO) δεν επαρκούν από μόνες τους για να καλύψουν τις απαιτήσεις υποδομής που προκύπτουν από την εφαρμογή του 5G στις αγροτικές περιοχές. Ωστόσο, υπάρχουν εναλλακτικές λύσεις για να επιτευχθεί μία βιώσιμη εφαρμογή του 5G στις αγροτικές περιοχές, τόσο με την οικονομική έννοια των κεφαλαιουχικών (CAPEX) και λειτουργικών δαπανών (OPEX) της δικτύωσης, όσο και με την τεχνολογική έννοια της απτής εφαρμογής αρχιτεκτονικών που θα δώσουν ζωή στα διάφορα θεωρητικά μοντέλα υλοποίησης.

Η δικτύωση των διαφόρων παραγωγικών μονάδων των αγροτικών περιοχών που βρίσκονται στις άκρες του δικτύου 5G (fronthaul) με τον κύριο κορμό/ραχοκοκαλιά του δικτύου (backhaul) θα πρέπει να λάβει υπόψιν τις απαιτήσεις που έχουν διατυπωθεί προηγουμένως, χωρίς όμως να αναιρεί το κύριο χαρακτηριστικό της: της αδιάλειπτη σύνδεση του fronthaul με το backhaul, ακόμη και στην περίπτωση των αγροτικών περιοχών.

Έχοντας δεδομένο για τις αγροτικές περιοχές ότι από την γενική αρχιτεκτονική του IoT που παρουσιάσαμε στην εισαγωγή, τα στρώματα Αντίληψης, μέρους του Δικτύου και των εφαρμογών βρίσκονται κοντά στο fronthaul (δηλαδή υλοποιούνται κοντά στις αγροτικές περιοχές όπως π.χ. το δίκτυο αισθητήρων), ενώ τα στρώματα Υποστήριξης και μέρος του στρώματος Δικτύου βρίσκονται στο backhaul (δηλαδή υλοποιούνται κοντά στις αστικές περιοχές όπως π.χ. ένα data center του cloud), η δικτύωση πρέπει να ενώσει αυτά τα δύο μέρη ώστε να λειτουργεί αρμονικά όλη η αρχιτεκτονική του IoT στον πρωτογενή τομέα.

Εκτός από την δικτύωση των δύο κορμών, πρέπει να αναλογιστούμε και την δικτύωση των ακραίων συσκευών (edge devices) με τον κορμό του 5G που ενέχει αρκετές προκλήσεις στις αγροτικές περιοχές, όπως αυτές που αποτυπώθηκαν στην προηγούμενη ενότητα.

Αυτές οι εναλλακτικές λύσεις που είναι σε θέση να εξισορροπήσουν αυτήν την δυσανάλογη δυσκολία κάλυψης των αγροτικών περιοχών και εξυπηρέτησης του έξυπνου πρωτογενούς τομέα μπορούν να διαχωριστούν σε δύο κατηγορίες: τις **επίγειες λύσεις (5G terrestrial solutions)** και τις **εναέριες λύσεις (airborne 5G solutions)**.

Στις επίγειες λύσεις συγκαταλέγονται όλες εκείνες οι τεχνολογίες που βοηθούν στην κάλυψη των αγροτικών περιοχών, εκεί που το 5G είναι ασύμφορο ή αδύνατο να το καταφέρει. Αρχικά, ορισμένα κομμάτια της αρχιτεκτονικής του 5G δικτύου μπορούν να αντικατασταθούν με άλλες τεχνολογίες και αρχιτεκτονικές. Μία από αυτές τις αντικαταστάσεις είναι να αποδεσμευθούν τα κυψελωτά δίκτυα από την ένωση του δικτύου στα άκρα (edge network) προς το εσωτερικό δίκτυο (core network), και αυτόν τον ρόλο να τον αναλάβουν δύο ειδών δίκτυα: είτε τα ενσύρματα, είτε τα ασύρματα δίκτυα δημιουργώντας έτσι μία **υβριδική 5G αρχιτεκτονική (hybrid 5G architecture)**.

Ως ασύρματη αντικατάσταση των κυψελωτών δικτύων, μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα **δίκτυα σταθερής ασύρματης πρόσβασης (Fixed Wireless Access - FWA)** όπου μία επένδυση για κυψέλες δεν είναι συμφέρουσα (δεν ικανοποιεί την εξυπηρέτηση χρηστών) ή δεν υπάρχει έτοιμη υλοποίηση κεραιών. Τα αποκλειστικά FWA (dedicated FWA) μπορούν να είναι συμφέρουσες λύσεις επέκτασης σύνδεσης κυψέλης-κυψέλης ή κυψέλης-κέντρου, καθώς δεν χρησιμοποιούν ακριβό αδειοδοτημένο φάσμα συχνοτήτων, προσφέρουν μεγαλύτερη κάλυψη σε σχέση με μία κυψέλη (10-100χλμ), και έχουν μεγαλύτερη χωρητικότητα και φθηνότερο κόστος υλοποίησης σε σχέση με υλοποίηση 5G μακροκυψελών.

Ειδικά οι υλοποιήσεις με **WiFi over Long Distances (WiLD)**, δηλαδή ασύρματες συνδέσεις με σημείο-προς-σημείο οπτική επαφή κεραιών (point-to-point line-of-sight links) με χρήση κατευθυντικών κεραιών WiFi, είναι ιδιαίτερα ελκυστικές λόγω του μηδενικού κόστους χρήσης της συχνότητας (το WiFi είναι ελεύθερο προς χρήση από όλους), το φθηνό υλικό και η μεγάλη συμβατότητα με άλλες τεχνολογίες λόγω του ευρέως διαδεδομένου πρωτοκόλλου IEEE 802.11.

Άλλη ασύρματη υλοποίηση είναι η τεχνολογία **WiMAX**, που όμως λόγω της αρχιτεκτονικής με βάση τους σταθμούς βάσης είναι πιο δαπανηρή ως υλοποίηση σε σχέση με το WiLD. Και οι δύο αυτές υλοποιήσεις χρησιμοποιούν υψηλές συχνότητες (5.8GHz) με απώτερο στόχο την χρήση μπάντας 26-60GHz ως WiFi, πριν την ενσωμάτωση των συχνοτήτων αυτών στο 5G NR. Με βάση τα παραπάνω προτερήματα, μπορούν διάφοροι πάροχοι ασύρματων δικτύων (Wireless Internet Service Providers - WISP) να ξεφύγουν από την αγορά των αστικών περιοχών και να εισέλθουν στην αγορά των αγροτικών περιοχών, ρίχνοντας έτσι το κόστος λόγω ανταγωνισμού [64] [65].

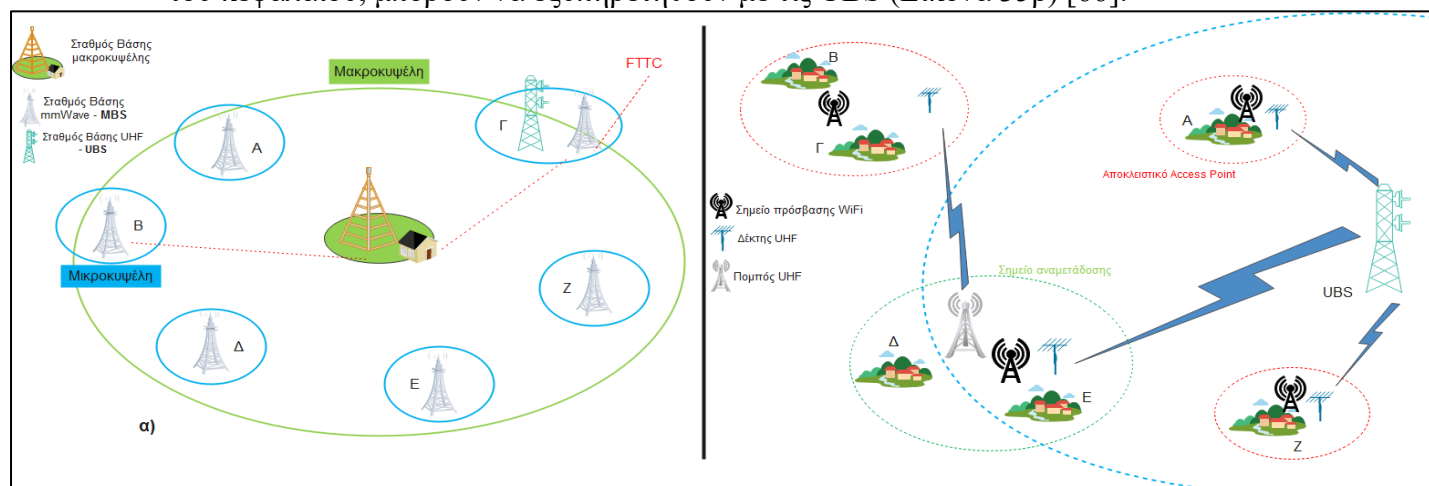
Άλλη ασύρματη λύση είναι η χρήση UHF συχνοτήτων (ultra high frequency) του **TV White Space (TVWS)** ως την πιο ανταγωνιστική λύση σε σχέση με τις WiLD και

WiMAX. Ο λόγος που είναι πιο ανταγωνιστική είναι, γιατί ενώ οι άλλες δύο τεχνολογίες λειτουργούν σε πολύ μεγάλες συχνότητες από ότι οι UHF, για την ίδια ισχύ εκπομπής, καλύπτουν πολύ μικρότερη περιοχή και άρα δεν είναι τόσο κατάλληλες για μεγάλης απόστασης και ευρείας περιοχής ασύρματη κάλυψη. Επίσης οι χαμηλότερες UHF συχνότητες προσφέρουν καλύτερη διάδοση αλλά και μερικά πολύ επιθυμητά χαρακτηριστικά όπως μη οπτικής επαφής επικοινωνία (Non Line of Sight – NLOS), συμπεριλαμβανομένης διάδοσης μέσα από βλάστηση και χαμηλά εμπόδια, φυσικά χαρακτηριστικά που συναντώνται στις αγροτικές περιοχές. Γενικά υπάρχουν τέσσερις αιτίες-κλειδιά που καθιστούν συμφέρουσα την χρήση TVWS στις αγροτικές περιοχές [64]:

1. **Χαμηλού ρίσκου κανονιστικές ρυθμίσεις χρήσης φάσματος:** Μιας και το TVWS βασίζεται στο μοντέλο DSA (Dynamic Spectrum Alliance), με παρόμοιους ρυθμιστικούς παράγοντες όπως το ISM, η ρυθμιστική αρχή δεν χρειάζεται να δεσμεύει το φάσμα για ορισμένα χρόνια ή να εκτελεί δημοπρασίες για αυτό.
2. **Άπλετη διαθεσιμότητα του φάσματος TV:** Σε αντίθεση με τα αστικά περιβάλλοντα της Ευρώπης και των ΗΠΑ που χρησιμοποιούν κατά κόρον το φάσμα για την μετάδοση του τηλεοπτικού σήματος, υπάρχουν τεράστιες αχρησιμοποίητες αγροτικές περιοχές σε αναπτυσσόμενες χώρες (όπως η υποσαχάρια περιοχή της Αφρικής) όπου η ανάγκη για διασύνδεση είναι ύψιστης σημασίας.
3. **Καταλληλότητα για αγροτικά περιβάλλοντα:** Η χρήση του φάσματος UHF προσφέρει εξαιρετικά χαρακτηριστικά διάδοσης, με τις εκπομπές σημάτων να φθάνουν πιο μακριά σε σχέση με άλλες συχνότητες, να διαπερνούν εμπόδια όπως τοίχοι και να μην χρειάζονται LOS, οδηγώντας έτσι σε λιγότερα κόστη υλοποίησης λόγω λιγότερων και απλούστερων σταθμών βάσης.
4. **Ευκαιρίες για επιχειρηματική δραστηριότητα:** το TVWS καθιερώνει ένα πιο δημοκρατικό τοπίο στην αγορά των ασύρματων δικτύων, όπου πριν ήταν διαθέσιμο μόνο για πολυεθνικές και μεγάλου τζίρου εταιρίες που ήταν σε θέση να πληρώσουν για το αδειοδοτημένο φάσμα. Με το TVWS, νέοι επιχειρηματίες μπορούν να προσφέρουν ανταγωνιστικές broadband υπηρεσίες.

Οι παραπάνω αιτίες είναι αρκετά πειστικές ώστε να επιτρέψουν την χρήση του TVWS στο αγροτικό δίκτυο 5G, ενσωματώνοντάς το στην αρχιτεκτονική του. Αν και δεν έχουν υπάρξει προτάσεις για χρήση του TVWS με βάση την αποδοτικότητα κόστους

σε ήδη υλοποιημένες υποδομές κυψελωτών δικτύων, μερικές πειραματικές διατάξεις με βάση υποδομές LTE που χρησιμοποιούν TVWS, έχουν δείξει ταχύτητες downlink έως και 45Mbps, αν και αυτό έγινε με ειδικό εξοπλισμό τελικού χρήστη. Για ενσωμάτωση σε ήδη υπάρχουσες υποδομές δικτύων 5G σε αγροτικές περιοχές, έχει γίνει πρόταση για χρήση του TVWS στο backhaul κομμάτι του 5G δικτύου. Μια βάση UHF (UHF Base Station – UBS) μπορεί να τοποθετηθεί συνοδευόμενη με μία κανονική 5G βάση (mmWave Base Station – MBS) μέσα στην ίδια μακροκυψέλη. Η MBS μπορεί να συμπεριφέρεται ως gateway της μακροκυψέλης και η UBS ως gateway της αγροτικής περιοχής. Έτσι το UBS θα χρησιμοποιηθεί ως στυλοβάτης για να τροφοδοτεί το δίκτυο UHF από την αγροτική μεριά (Εικόνα 35α). Με αυτόν τον τρόπο, οι συστάδες (είτε είναι χωριά είτε είναι έξυπνα αγροτικά συγκροτήματα πρωτογενούς τομέα) που είχαν παρατηρηθεί στις προκλήσεις των αγροτικών περιοχών που περιεγράφηκαν στην αρχή του κεφαλαίου, μπορούν να εξυπηρετηθούν με τις UBS (Εικόνα 35β) [66].

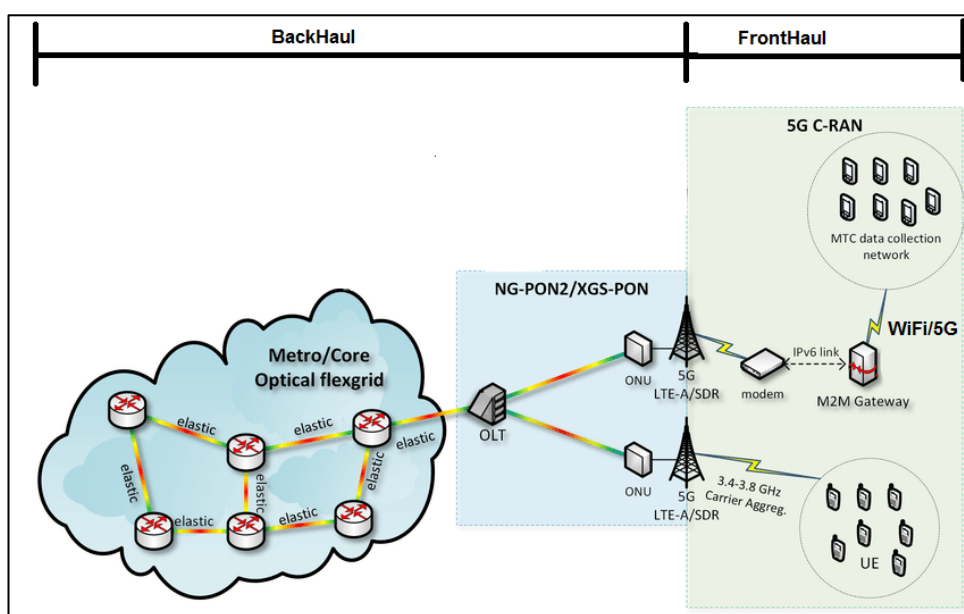


Σχήμα 32 Υβριδική αρχιτεκτονική 5G με χρήση TVWS για την κάλυψη αγροτικών περιοχών. α) αρχιτεκτονική υποδομή, β) κάλυψη αγροτικής μεριάς της αρχιτεκτονικής

Οι παραπάνω επίγειες ασύρματες λύσεις εντάσσονται σε μια γενικότερη κατηγορία που είναι ο **διαμοιρασμός φάσματος (spectrum sharing)** και δεν περιορίζονται μόνο σε ορισμένες κατηγορίες όπως ορισμένα φάσματα συχνοτήτων ή αδειοδοτημένα φάσματα, αλλά επεκτείνονται και στις υπόλοιπες συχνότητες. Το 5G NR έχει την δυνατότητα να επιλέξει δυναμικά ένα φάσμα για επικοινωνία (**dynamic spectrum sharing – DSS**) μέσω δυναμικής επιλογής συχνότητας (**dynamic frequency selection**) ή να αποφεύγει ήδη χρησιμοποιούμενες συχνότητες άλλων τεχνολογιών (**detection and avoidance – DAA**).

Στις ενσύρματες επίγειες λύσεις εντάσσονται οι λύσεις που αντικαθιστούν παλαιότερες τεχνολογίες ή ασύρματες τεχνολογίες που φαίνονται αναξιόπιστες ή αδύνατες να ανταποκριθούν στην μεταφορά δεδομένων. Σε αυτές τις λύσεις ανήκουν οι

αρχιτεκτονικές που ενσωματώνουν **δίκτυα οπτικών ινών**, αντικαθιστώντας ασύρματες μεταδόσεις ή δίκτυα χαλκού προς όφελος μεγαλύτερου bandwidth, αξιοπιστίας και μικρότερης καθυστέρησης. Επειδή όμως η χρήση οπτικών ινών εμπεριέχει αρκετά υψηλά κόστη υποδομών, τα κομμάτια του δικτύου που είναι πιθανότερο να αντικατασταθούν ανήκουν στο backhaul δίκτυο του 5G και ειδικά στο σημείο πριν οδηγηθούμε γεωγραφικά στις αγροτικές περιοχές. Συγκεκριμένα, οπτικές ίνες μπορούν να συνδέσουν την αστική ραχοκοκαλιά του δικτύου (όπου ανήκουν τα data centers με τις υποδομές cloud υπηρεσιών) με τους σταθμούς βάσης στα πρόθυρα του fronthaul 5G δικτύου των αγροτικών περιοχών (κυρίως δηλαδή μέχρι τους μεγάλους σταθμούς βάσης – συγκέντρωσης δεδομένων) (Εικόνα 36).



Σχήμα 33 Υβριδική αρχιτεκτονική 5G-οπτικού δικτύου, με την κύρια εφαρμογή οπτικών ινών στο backhaul κομμάτι.

Άλλες επίγειες λύσεις περιλαμβάνουν την χρήση **έξυπνων επαναπρογραμματιζόμενων επιφανειών (Reconfigurable Intelligent Surfaces – RIS)**, δηλαδή επίπεδες επιφάνειες φτιαγμένες από ειδικά ηλεκτρομαγνητικά υλικά που μπορούν να μεταβάλλουν τα χαρακτηριστικά του προσπίπτοντος κύματος, ανάλογα με την εκάστοτε προγραμματιζόμενη εφαρμογή των ενσωματωμένων ηλεκτρονικών τους. Αυτές οι επιφάνειες είναι παθητικές, δηλαδή δεν επεμβαίνουν με κανέναν τρόπο πάνω στο σήμα, ούτε για την ενίσχυσή του, ούτε για την αποκωδικοποίησή του αλλά ούτε και για την οποιαδήποτε επεξεργασία του. Αυτού του είδους οι επιφάνειες είναι σπάνιο και δύσκολο να εφαρμοστούν στις αγροτικές περιοχές όπου δεν συναντώνται επίπεδες επιφάνειες ή εμπόδια πάνω στα οποία μπορούν να τοποθετηθούν οι RIS (όπως κτήρια,

τοίχοι, διαφημιστικές επιφάνειες, δρόμοι), αλλά δεν παύουν να είναι ένα εργαλείο στην φαρέτρα την κάλυψης όλο και μεγαλύτερων περιοχών [67].

Στις εναέριες λύσεις περιλαμβάνονται όλοι οι τρόποι υπερκέρρασης εμποδίων στην δικτύωση και την υποδομή του 5G στις αγροτικές περιοχές, φεύγοντας από την επιφάνεια της γης και τις δυσκολίες που συναντά κανείς στο ανάγλυφό της, και μεταφέροντας μέρος του δικτύου στον ανοιχτό ορίζοντα ή ακόμα και έξω από την ατμόσφαιρα της γης. Εδώ υπάρχουν δύο κατηγορίες εναέριας υποδομής για την υποβοήθηση ενός δικτύου 5G στις αγροτικές περιοχές: η **τεχνολογία δορυφόρων (satellite technology)** και οι **εναέριες πλατφόρμες (aerial platforms)**.

Το γεγονός ότι η τεχνολογία δορυφόρων μπορεί να προσφέρει πολύ μεγαλύτερη ασύρματη κάλυψη χρησιμοποιώντας λιγότερη επίγεια υποδομή, την καθιστά εξαιρετικά επιθυμητή για τις απόμακρες και δυσπρόσιτες αγροτικές περιοχές. Υπάρχουν τριών ειδών δορυφόροι για το επικοινωνιακό σύστημα δορυφόρων [64]:

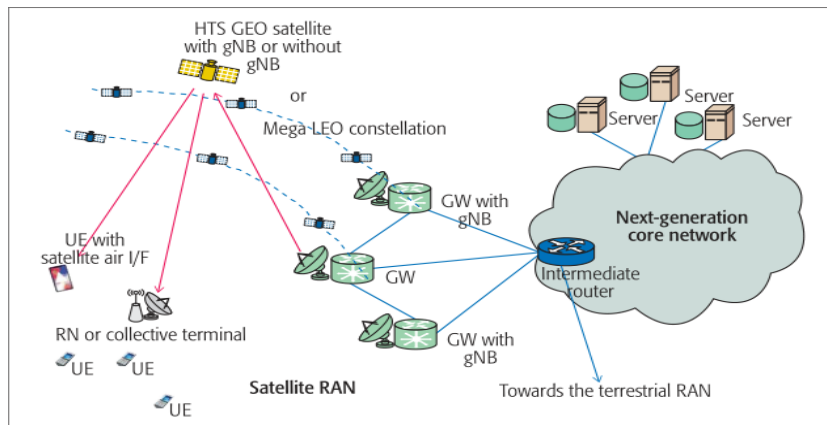
- 1. Οι γεωσύγχρονοι-γεωστατικοί δορυφόροι (Geostationary Satellites – GEO),** οι οποίοι κινούνται με την ίδια γωνιακή ταχύτητα με την γη (γι' αυτό και φαίνονται σταθεροί από την επιφάνεια της γης) και έχουν τροχιά παράλληλη με την περιστροφή της γης, περιορίζοντας έτσι την γεωγραφική κάλυψη σε μια συγκεκριμένη περιοχή. Βρίσκονται σε απόσταση περίπου 36000χλμ πάνω από την επιφάνεια της γης και είναι οι πιο μακρινοί από τις τρεις κατηγορίες. Είναι πιο ακριβοί στην υλοποίηση από τους άλλους, χρειάζονται ειδικό εξοπλισμό για την επικοινωνία με αυτούς και λόγω της μεγάλης απόστασης έχουν και μεγαλύτερη καθυστέρηση μεταφοράς δεδομένων, παρέχουν όμως την μεγαλύτερη επιφάνεια κάλυψης.
- 2. Οι μεσαίας τροχιάς δορυφόροι (Medium Earth Orbit – MEO),** οι οποίοι έχουν μικρότερη περίοδο περιστροφής σε σχέση με τους GEO, περνώντας δύο φορές πάνω από το ίδιο σημείο του ισημερινού στην διάρκεια της ημέρας. Σε αυτήν την ζώνη ανήκουν και οι περισσότεροι δορυφόροι συστημάτων γεωεντοπισμού όπως το GPS (ΗΠΑ), το GLONASS (Ρωσία) και το BeiDou (Κίνα). Λόγω της μικρότερης απόστασης από την επιφάνεια της γης σε σχέση με τους GEO, έχουν σχεδόν πέντε φορές μικρότερη καθυστέρηση μεταφοράς δεδομένων.
- 3. Οι χαμηλής τροχιάς δορυφόροι (Low Earth Orbit – LEO),** οι οποίοι είναι και οι εγγύτεροι στην επιφάνεια της γης, σε απόσταση 160-2000χλμ. Λόγω της εγγύτητας αυτής, οι δορυφόροι έχουν πολύ μεγαλύτερη φυγόκεντρο δύναμη για

να αντισταθμίσουν την μεγαλύτερη έλξη της γης. Για αυτόν τον λόγο δεν υφίσταται τόσο η «τοπικότητα» του LEO δορυφόρου σε μια περιοχή σε σχέση με τους MEO/GEO, καθώς μετακινείται συνεχώς και πολύ γρήγορα σε σχέση με την περιστροφή της γης. Αυξάνουν την πολυπλοκότητα του συστήματος ενσωμάτωσής τους σε ένα επίγειο δίκτυο καθώς δεν είναι σταθεροί, παρέχουν όμως την ταχύτερη μετάδοση δεδομένων, έχοντας ελάχιστη καθυστέρηση.

Η γενική οδηγία χρήσης του κάθε είδους δορυφόρων συμφωνεί με τα τρία σενάρια χρήσης του 5G: οι GEO δορυφόροι είναι περισσότερο συνυφασμένοι με το σενάριο eMBB καθώς η αποδοτικότητα του φάσματος συχνοτήτων, η όσο το δυνατόν μεγαλύτερη κάλυψη και οι υψηλοί ρυθμοί δεδομένων έχουν μεγαλύτερη σημασία, ενώ από την άλλη στο σενάριο URLLC, η καθυστέρηση και η αξιοπιστία έχει τον κύριο λόγο, με τους LEO δορυφόρους να έχουν τον πρώτο λόγο σε αυτό το σενάριο.

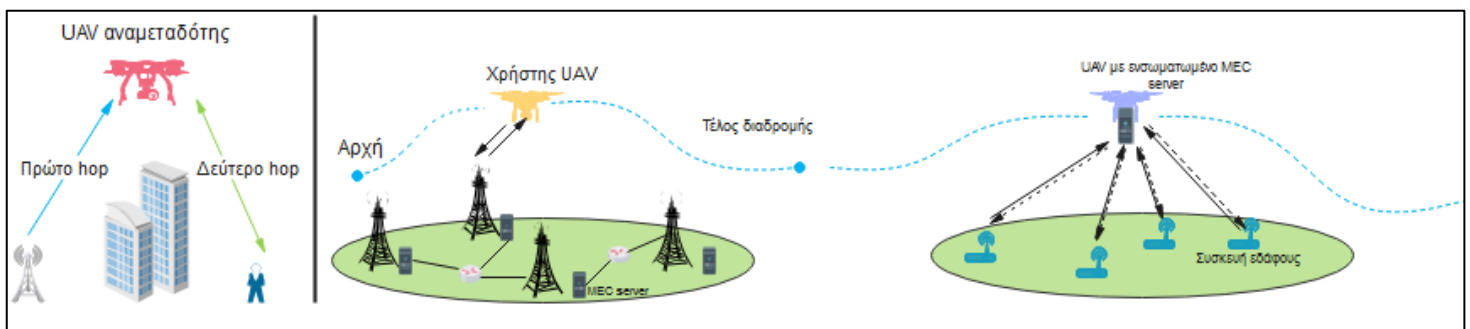
Στο σενάριο mMTC, οι συσκευές στέλνουν περιοδικά τα πακέτα τους στους δορυφόρους, έτσι χρειάζεται ένας τοπικός συλλέκτης δεδομένων για να μεταδώσει αυτά τα πακέτα, ρόλος που ταιριάζει περισσότερο στους MEO/LEO δορυφόρους. Ήδη υπάρχουν συστήματα δορυφόρων που είναι ενσωματωμένα σε επίγεια 5G δίκτυα, με κύρια παραδείγματα ο LeoSat αστερισμός δορυφόρων που ο καθένας φέρει 10 κατευθυνόμενες κεραίες του 1.6Gb/s, 2 κατευθυνόμενες κεραίες του 5.2Gb/s και 4 εσωτερικούς οπτικούς συνδέσμους επικοινωνίας μεταξύ των δορυφόρων, το σύστημα OneWEB που διαθέτει 720 LEO δορυφόρους στα 1100km που υποστηρίζει μεγάλες ταχύτητες των 50Mb/s και χαμηλή καθυστέρηση της τάξης των λιγότερο των 50ms, και το πρόσφατο σύστημα δορυφόρων της SpaceX με όνομα StarLink θα διαθέτει 4425 δορυφόρους (έως το 2024) στα 1100km, προσφέροντας υπηρεσίες 5G σε οικιακούς, επαγγελματικούς, υπηρεσιακούς, και κρατικούς παράγοντες.

Και εδώ μπορούμε να έχουμε υβριδικά δίκτυα, με τους δορυφόρους να εκτελούν χρέη διαμεσολαβητή πληροφοριών από αισθητήρες προς σταθμούς βάσης (Gateways – GW) ή από σταθμούς βάσης προς εξοπλισμό χρήστη (User Equipment - UE), με τους σταθμούς βάσης να επικοινωνούν με την ραχοκοκαλιά του δικτύου ασύρματα. Δημιουργείται έτσι ένα δορυφορικό RAN (satellite RAN) στην άκρη του δικτύου, το οποίο στη συνέχεια προχωρά σε επίγειο RAN (terrestrial RAN) (Εικόνα 37) [68].



Σχήμα 34 Υβριδική αρχιτεκτονική 5G με σύστημα δορυφόρων.

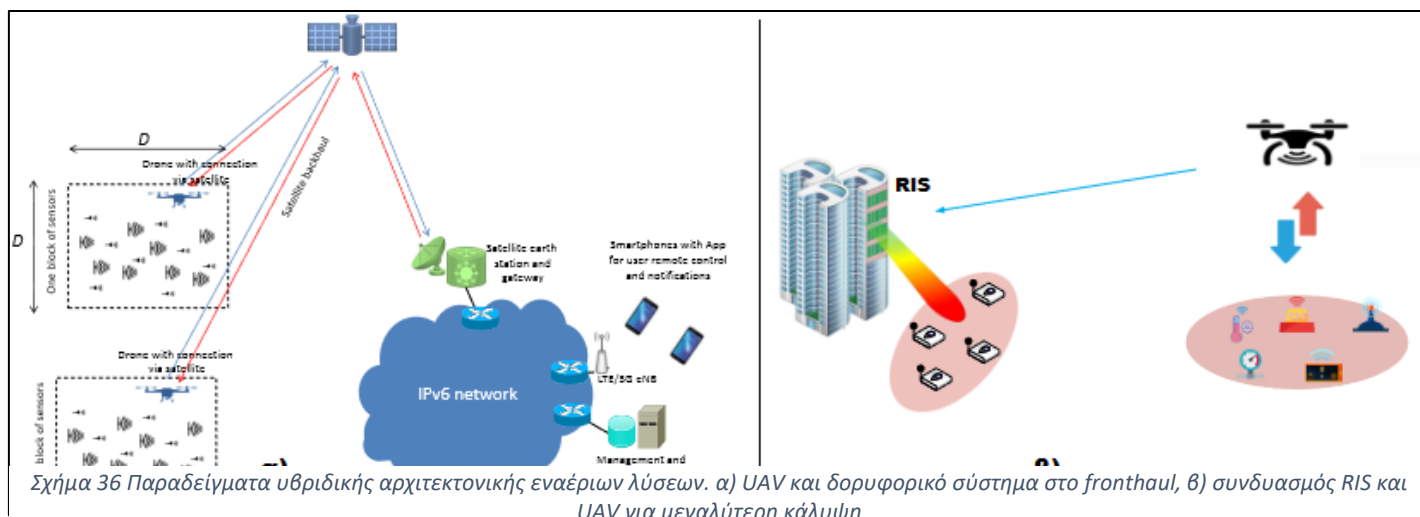
Στην τεχνολογία υλοποίησης εναέριες πλατφόρμες περιλαμβάνει τέσσερις τύπους πλατφόρμας: ειδικά κατασκευασμένα **μπαλόνια (balloons)**, **χαμηλού υψομέτρου πλατφόρμες (Low Altitude Platforms - LAP)**, **υψηλού υψομέτρου πλατφόρμες (High Altitude Platforms - HAP)** και **αυτόνομα πτητικά μέσα (Unmanned Aerial Vehicles - UAV)**. Από αυτές τις 4 κατηγορίες, η πιο διαδεδομένη και εύκολα υλοποιήσιμη βοηθητική 5G τεχνολογία είναι τα UAV που παρουσιάσαμε εκτενώς στο προηγούμενο κεφάλαιο. Η τεχνολογία των UAV έχει προχωρήσει αρκετά ώστε να έχουν αρχίσει ήδη να υλοποιούνται αρκετές εφαρμογές όπου τα UAV παίζουν το ρόλο ενός δικτυακού κομματιού. Δύο είναι οι επικρατέστερες ιδέες για την χρήση των UAV ως λύσεις στο κομμάτι των δικτύων: πρώτον να χρησιμοποιούνται για να συνδέσουν σημεία που κανονικά δεν είναι δυνατόν να συνδεθούν, είτε λόγω εμποδίων είτε λόγω της ανομοιομορφίας του εδάφους (Εικόνα 38α), και δεύτερον να αποτελούν τον συλλέκτη των πακέτων δεδομένων ενός σημείου του δικτύου και κυριολεκτικά να μεταφέρουν τα δεδομένα στο άλλο σημείο του δικτύου, μετακινούμενα στον χώρο (Εικόνα 38β).



Σχήμα 35 Χρήση UAV στις αγροτικές περιοχές. α) Χρήση ως αναμεταδότη δεδομένων σε περίπτωση εμποδίων, β) Χρήση ως μεταφορέα δεδομένων ανάμεσα σε σταθμούς βάσης και αισθητήρες.

Παράδειγμα του πρώτου είναι να ενώσει μία έξυπνη καλλιέργεια από την μία πλευρά του βουνού/δάσους με την άλλη με την χρήση δύο βημάτων (2-hop communication) ενώ αυτό έχει ήδη ανυψωθεί σε ύψος ώστε να έχει LOS και με τα δύο σημεία, ενώ παράδειγμα του δεύτερου είναι το UAV να ίπταται κοντά στους αισθητήρες (έξυπνα κολλάρα κτηνοτροφίας ή έξυπνοι αισθητήρες καλλιέργειας) να συλλέγει όλα τα πακέτα δεδομένων τοπικά, να μεταφέρεται κοντά στον σταθμό βάσης και να παραδίνει τα δεδομένα (να «ξεφορτώνει») ώστε να επαναλάβει την διαδικασία. Υπάρχουν ειδικές έρευνες που θέτουν ως στόχο την βέλτιστη λειτουργία αυτής της παραλαβής-παράδοσης δεδομένων, με την υλοποίηση αλγορίθμων που υπολογίζουν τις καλύτερες διαδρομές, την ελάχιστη κατανάλωση μπαταρίας, και την μέγιστη διάρκεια πτήσης αλλά και τον κατάλληλο χρόνο φόρτισης του UAV σε πλατφόρμες φόρτισης, όλα αυτά με πλήρη αυτονομία και χωρίς καμία παρέμβαση ανθρώπου [69] [70].

Ενώ οι εναέριες λύσεις δεν μπορούν να ανταγωνιστούν τις επίγειες λύσεις σε θέματα κόστους, επίδοσης και χρήσης φάσματος, έχουν το πλεονέκτημα της κάλυψης δικτύου σε έκταση. Αυτό και μόνο επιτρέπει τις εναέριες λύσεις αρκετά ελκυστικές για τις δυσμορφίες των αγροτικών περιοχών και την ανάγκη κάλυψης όσο μεγαλύτερης περιοχής χρειάζεται από ένα δίκτυο 5G. Υπάρχει όμως και ευελιξία στην επιλογή διάρθρωσης και μοντελοποίησης ενός τέτοιου ασύρματου διαύλου επικοινωνίας των μερών του IoT, καθώς η υλοποίηση του υβριδικού 5G μπορεί να συνδυάσει ενσύρματες επικοινωνίες, διαμοιρασμό φάσματος, δορυφορικά συστήματα και UAV σε οποιαδήποτε μορφή, μέγεθος και έκταση χρειάζεται ώστε η αγροτική περιοχή να καλυφτεί εξ ολοκλήρου από το δίκτυο 5G και να ενωθεί με αυτό του αστικού τοπίου (Εικόνα 39) [71] [72].



Κεφάλαιο 4 – Αναδυόμενες Υλοποιήσεις και Μελλοντικές Προεκτάσεις Έξυπνων Συστημάτων στον πρωτογενή τομέα

Έχοντας συζητήσει και σχεδιάσει την εναρμονισμένη συνύπαρξη των στρωμάτων αρχιτεκτονικής των εφαρμογών του IoT στην ευφυή γεωργία και στις διάφορες απαιτήσεις που χρειάζεται να πληρούν οι εφαρμογές αυτές στο αγροτικό περιβάλλον μέσω προσομοιώσεων, μπορούμε να εξετάσουμε την υλοποίηση ενός τελικού ολοκληρωμένου IoT Έξυπνο Σύστημα ευφυούς γεωργίας στον πραγματικό κόσμο θέτοντας νέα στάνταρ ποιότητας, αξιοπιστίας και κερδοφορίας στον πρωτογενή τομέα. Μέχρι την εξάπλωση και ωρίμανση των τεχνολογιών που παρουσιάστηκαν ανά στρώμα, δεν υπήρχαν ευρείες υλοποιήσεις στον αγροτικό τομέα.

Η ευφυής γεωργία, και κατ' επέκταση όλες οι εφαρμογές του IoT στον πρωτογενή τομέα που θα παρουσιαστούν παρακάτω, είχαν στην αρχή μόνο ακαδημαϊκό/ερευνητικό χαρακτήρα όταν υλοποιήθηκαν στην πραγματικότητα. Ανάλογα με τις συνθήκες που επικρατούσαν, αλλά και τις ανάγκες, αναπτύχθηκαν νέοι αισθητήρες που μπορούσαν να ανταπεξέλθουν στο αντίστοιχο πεδίο εφαρμογής της γεωργίας. Πριν την εμφάνιση επαρκών τεχνολογιών επικοινωνιών για να καλύψουν την έκταση και τον ρυθμό των δεδομένων που συλλέγονταν, η κλίμακα των έξυπνων συστημάτων δεν επέφερε κάποιο σημαντικό όφελος στην υλοποίησή του και ένταξή του στην καλλιέργεια [73]. Ακόμα και όταν οι παραπάνω ανάγκες καλύφθηκαν και το πεδίο εφαρμογής μπορούσε να καλύψει όλες τις πτυχές της γεωργίας, τα δεδομένα παρατήρησης ήταν απλά αυτό· δεδομένα που απλά αποτύπωναν χρονικά τις περιβαλλοντικές μεταβλητές.

Η ζήτηση για υπολογιστική ισχύ, αποθηκευτικό χώρο, εξ' αποστάσεως πρόσβαση και εξαγωγή συμπερασμάτων από αυτά τα δεδομένα ικανοποιήθηκε όταν εμφανίστηκε ένα αποκεντρωμένο υπολογιστικό σύστημα πληρούσε αυτές τις προδιαγραφές, με την μορφή του cloud. Καμία υλοποίηση συστήματος στον πραγματικό κόσμο βέβαια δεν είναι βιώσιμη για αρκετό καιρό, αν δεν εξυπηρετεί και τον δεύτερο σκοπό για τον οποίο δημιουργείται, πέραν της ανάγκης δημιουργίας του: την εμπορική εκμετάλλευσή του με σκοπό το κέρδος. Εκεί, η εξάπλωση της τεχνολογίας σε όλες τις δομές της κοινωνίας, των τεχνολογικών αγαθών, της διασυνδεσιμότητας που προσέφερε το Internet και φυσικά της γνώσης χρήσης αυτών των καινοτόμων τεχνολογιών σε όλα τα κοινωνικά στρώματα, διετέλεσε στο να ξεφύγει από το ακαδημαϊκό και ερευνητικό στάδιο υλοποίησης και να εισέλθει στο εμπορικό/καταναλωτικό [74].

Αυτό, με αλυσιδωτές αντιδράσεις στη συνέχεια, έδωσε περαιτέρω πόρους, κίνητρα και ώθηση για να εξαπλωθεί ακόμα περισσότερο, σε σημείο που στην σημερινή εποχή, οποιαδήποτε καλλιέργεια δεν εναρμονίζεται με την ευφυή γεωργία, είναι καταδικασμένη σε χειρότερες επιδόσεις από μία που την έχει ενσωματώσει στη λειτουργία της.

Αρχικά, στον τομέα της Έξυπνης Γεωργίας, πολλές ήταν οι εταιρίες που ενσωμάτωσαν τα Έξυπνα Συστήματα στον παραδοσιακό αγροτικό εξοπλισμό, με εντυπωσιακά αποτελέσματα στον τζίρο τους (Πίνακας 5) [75].

Πίνακας 5 Εταιρίες αγροτικού εξοπλισμού που διαθέτουν έξυπνα συστήματα για τα προϊόντα τους.

Εταιρία	Χώρα	Τζίρος (δισ)
Deere & Company	ΗΠΑ	26,6
CNH Industrial	Κάτω Χώρες	24,8
Kubota	Ιαπωνία	12
AGCO	ΗΠΑ	7.41
Claas	Γερμανία	3.6

Επίσης, πολλές εταιρίες ανέπτυξαν ειδικού σκοπού εμπορικούς αισθητήρες, φτιαγμένους αποκλειστικά για παρακολούθηση καλλιεργειών και δεδομένων άρρηκτα συνδεδεμένων με τις σοδειές. Ορισμένοι αισθητήρες είναι τροποποιημένα ολοκληρωμένα κυκλώματα της ίδιας κατασκευάστριας εταιρίας με προσθήκη ειδικών περιβαλλοντικών αισθητήρων, ενώ άλλοι είναι δημιουργημένοι εξ' ολοκλήρου για την αποκλειστική εφαρμογή τους στις καλλιέργειες (Πίνακας 6) [76].

Εκτός όμως από τον αγροτικό εξοπλισμό και τους εξειδικευμένους αισθητήρες, εταιρίες λογισμικού άδραξαν την ευκαιρία της νέας αυτής αγοράς του IoT στην γεωργία και ανέπτυξαν ολοκληρωμένες λύσεις για τον αναδυόμενο έξυπνο αγροτικό τομέα, ευέλικτες και εύκολες στην χρήση για τους μη εξειδικευμένους σε θέματα τεχνολογίας τελικούς χρήστες του πρωτογενούς τομέα. Αναπτύχθηκαν έτσι εφαρμογές και πλατφόρμες λογισμικού, cloud, μηχανικής μάθησης και τεχνητής νοημοσύνης για αποκλειστική χρήση στον έξυπνο πρωτογενή τομέα.

Πίνακας 6 Εμπορικά διαθέσιμοι αισθητήρες για εφαρμογές στην έξυπνη γεωργία.

Χρήση στην γεωργία	Εφαρμογή	Παραδείγματα
Παρακολούθηση σοδειάς	Ανάπτυξη	CyberShot DSC-QX100 (Sony), Parrot Sequoia
	Εντοπισμός ζιζανίων και ασθενειών	FLIR BlackFly 23S6C (FLIR Systems), ACS-430 (Holland Scientific Inc.)
Παρακολούθηση υπεδάφους	Θερμοκρασία, υγρασία, PH	DS18B20 (Maxim Integrated), VH400 (Vegetronix), ECH20-10HS (METER Group)
	Χημικά στοιχεία	SEN0244 (DFROBOTS)
Παρακολούθηση περιβάλλοντος	Αέρας (θερμοκρασία, ταχύτητα, υγρασία, κλπ)	DHT11 (Aosong Electronics), WS-3000 (Ambient Weather Inc.), SEN08942 (SparkFun)
	Φωτισμός (ηλιακή ακτινοβολία, φωτεινότητα)	SQ-110 (Apogee Instruments), BH1750 (Rohm Semiconductor), TSL2561 (Adafruit Industries)
	Συγκέντρωση CO ₂	MG-811 (ZhengZhou Winsen), MQ135 (WaveShare Electronics)
Εφοδιαστική Αλυσίδα	Εντοπισμός	Mifare Ultralight NFC tag (NXP Semiconductors), Blueberry RFID reader (Tertium Technology), UM220-III (Unicore)

Παραδείγματα τέτοιων πλατφορμών του cloud για αποθήκευση, επεξεργασία, οπτικοποίηση και ελέγχου ενεργειών μέσω ενεργοποιητών στην καλλιέργεια είναι το ThingSpeak, FIWARE, Ubidots, SmartFarmNet, AWS IoT, κ.ά. Για διαχείριση μεγάλων δεδομένων υπάρχει το AgroCloud, το CropInfra, το RuralIoT, το AgroXML, κ.ά. Για την μηχανική μάθηση πάνω στα δεδομένα των καλλιεργειών με στόχο την προτυποποίηση των τελικών προϊόντων μετά την συγκομιδή ή την αρχική επεξεργασία υπάρχουν τα πρότυπα του AGROVOC της Food and Agriculture Organization (FAO), το CBV της GS1 και οι θησαυροί της NALT και CAB [77].

Τέλος, εμπορικά διαθέσιμες είναι ολοκληρωμένες εφαρμογές τελικού χρήστη που περιλαμβάνουν όλα τα στρώματα του IoT και που είναι διαθέσιμες για όλες τις πλατφόρμες υπολογιστών και smartphones. Η αγορά αυτών των εφαρμογών στον έξυπνο πρωτογενή τομέα μέσα στην τελευταία δεκαετία έχει αυξηθεί δυναμικά σε όλο τον κόσμο, είτε από ήδη εξέχουσες εταιρίες λογισμικού που είχαν διαχειριστεί έξυπνα συστήματα άλλων τομέων (ενέργεια, υπηρεσίες, υγεία, τραπεζικά συστήματα, κλπ.) και

αποφάσισαν να εισέλθουν στην ραγδαία εξελισσόμενη αγορά του έξυπνου πρωτογενούς τομέα, είτε από νεοσύστατους και νεοφυείς εταιρικούς σχηματισμούς (startups) που αποφάσισαν να επενδύσουν σε αυτό το κενό που είχε δημιουργηθεί ανάμεσα στην όλο και αυξανόμενη ζήτηση των παραγωγών για έξυπνα συστήματα και την σχεδόν υποτονική προσφορά λύσεων στοχευμένων αποκλειστικά πάνω στον πρωτογενή τομέα.

Έτσι, στην Ευρώπη υπάρχουν οι γερμανικές My Data Plant, Geoclidian, 365FarmNet, οι αυστριακές Farmdok και Onfarming, η πολωνική SatAgro, η πολυευρωπαϊκές Agridata και Agrivi, οι ελληνικές Gaiasense, Kondellis SA, DRAXIS, αλλά και πολλές άλλες μικρότερες εφαρμογές κυρίως από startups. Στην άλλη πλευρά του Ατλαντικού, κύριοι φορείς της έξυπνης γεωργίας μέσω εφαρμογών είναι οι Botanicalls, η Edyn, η Parrot:Flower Power, η Plantlink, η harvestgeek, η Sensefly και πολλές άλλες. Εκτός των εμπορικών αυτών εφαρμογών, υπάρχουν και ανοιχτού κώδικα εφαρμογές διαχείρισης έξυπνων καλλιεργειών, φέρνοντας την τεχνολογία ακόμα και σε λιγότερο ανεπτυγμένες αγροτικές περιοχές ή περιοχές με μικρή οικονομική δυνατότητα επέκτασης στην ψηφιοποίηση της παραγωγής. Παραδείγματα δωρεάν και ανοιχτού κώδικα εφαρμογές είναι το FarmOS, Trimble, FarmAtHand, Tania, και FarmRexx [23].

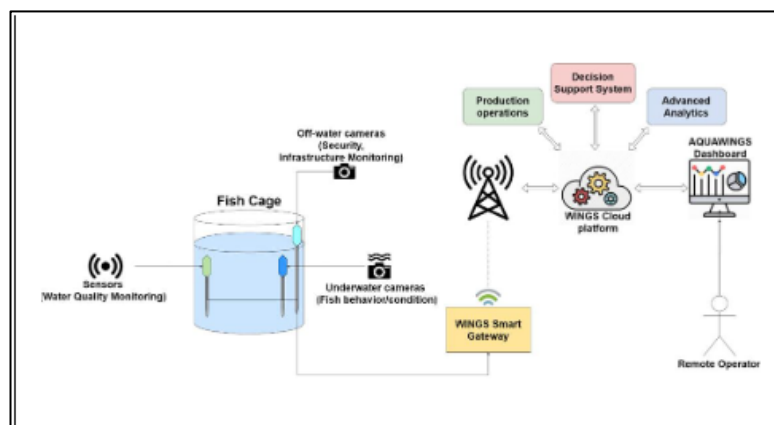
Από την μεριά της κτηνοτροφίας, ειδικές πλατφόρμες που διαθέτουν όχι μόνο τις εφαρμογές αλλά και τα υλικά (κολάρα, RFID ετικέτες) έχουν αναπτυχθεί από εταιρίες που προωθούν την αύξηση της ζωικής παραγωγής με τον αποτελεσματικότερο τρόπο. Στην Ευρώπη κυριαρχούν οι Tambero, Ranch manager, Cow management system, Cattle Max, e-stado και DeLaval DelPro, με ελληνική παρουσία την Digitanimal.

Στον χώρο των υδατοκαλλιεργειών έχουν αναπτυχθεί προγράμματα συνεργασιών μεταξύ χωρών ώστε να υλοποιηθούν εφαρμογές στην έξυπνη υδατοκαλλιέργεια. Το ευρωπαϊκό πρόγραμμα H2020 έχει δημιουργήσει το έξυπνο σύστημα υδατοκαλλιέργειας PROTEUS που προσφέρει ευκολία εφαρμογής, χαμηλό κόστος αισθητήρων και υψηλή επίδοση σε όλα τα στρώματα του IoT. Επίσης, με βάση το ίδιο συγχρηματοδοτούμενο πρόγραμμα H2020 έχει οριστεί ένα τριετές πρόγραμμα ανάπτυξης παρόμοιου συστήματος για την Αφρική με όνομα WAZIUP, με στόχο την επαναφορά της ποσότητας των ψαριών στις ακτές της μέσω εντατικών μεθόδων μαζικής αναπαραγωγής ψαριών και εναπόθεσή τους σε λίμνες και ποτάμια, την μετριασμένη αλιεία και την αύξηση του διαθέσιμου παραγόμενου προϊόντος σε σχέση με την παραδοσιακή αλιεία.

Στην Ελλάδα, μία σύμπραξη πολλών τεχνολογικών φορέων και περιβαλλοντικών οργανώσεων Ελλάδας και Νορβηγίας, έχουν αναπτύξει δύο έξυπνες υδατοκαλλιέργειες 5G με την ονομασία 5G HEART, μία στα Μέγαρα και μία στην Gjerdinga όπου αισθητήρες στους κλωβούς των ψαριών επικοινωνούν με μία 5G κεραία στην στεριά που στη συνέχεια μεταφέρει στο cloud τα δεδομένα για περαιτέρω επεξεργασία και διάθεσή τους στην πλατφόρμα AQUAWINGS (Εικόνες 40 και 41) [78].



Σχήμα 37 Σύστημα 5G HEART. Κεραία 5G στην ξηρά



Σχήμα 38 Αρχιτεκτονική του 5G HEART

Βιβλιογραφία

- [1] C. Poellabauer and W. Dargie, Fundamentals of Wireless Sensor Networks - Theory and Practice, Wiley Publications, 2010.
- [2] P. Vidyasagar, S. Atif and E. Chang, Wireless Sensor Networks: A survey, International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops, 2019.
- [3] A. Perrig, R. Szewczyk, J. Tygar, V. Wen and D. Culler, SPINS: Security Protocols for Sensor Networks, Kluwer Academic Publishers, 2002.
- [4] T. Rappaport, Wireless Communications - Principles and Practice, Second Edition, Prentice-Hall Inc., 2002.
- [5] Q. Wang, J. Alcaraz-Calero, M. W. Barros, A. Gavras, P. N. Miguel and R. Cale, SliceNet: End-to-End cognitive network slicing and slice management framework in virtualised multi-domain, multi-tenant 5G networks, IEEE Int. Symposium Broadband Multimedia Syst. Broadcast (BMSB), 2018.
- [6] P. K. Agyapong, M. Iwamura, D. Staehle, W. Kiess and A. Benjebbour, Design Considerations for a 5G Network Architecture, IEEE Communications Magazine, 2014.
- [7] M. R. Palattella, M. Dohler, A. Grieco, G. Rizzo, J. Torsner, T. Engel and I. Ladid, Internet of Things in the 5G Era: Enablers, Architecture, and Business Models, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 34, 2016.
- [8] C. X. Wang, F. Haider, X. Gao, Y. Yang, H. Haas, S. Fletcher and E. Hepsaydir, Cellular Architecture and Key Technologies for 5G Wireless Communication Networks, IEEE Communications Magazine, 2014.
- [9] G. Fettweis, A 5G Wireless Communications Vision, Dresden: Microwave Journal, 2012.
- [10] G. Biczok, J. Malmudin and A. Fehske, Economic and Ecological Impact of ICT, Energy Aware Radio and neTwork tecHnologies - EARTH, 7th Framework Programme, 2011.
- [11] P. Dalela, P. Bhave, P. Yadav, A. Yadav and V. Tyagi, Beam Division Multiple Access (BDMA) and Modulation Formats for 5G: Heir of OFDM?, International Conference on Information Networking (ICOIN), 2018.
- [12] E. Larsson, O. Edfors, T. Marzetta and F. Tufvesson, Massive MIMO for Next Generation Wireless Systems, IEEE Communications Magazine, 2014.
- [13] E. Bjornson, J. Hoydis and L. Sanguinetti, Massive MIMO: Spectral, Energy and Hardware Efficiency, Now Publishers Inc., 2017.
- [14] O. Erunkulu, A. Zunkeru, C. Lebekwe, M. Mosalaosi and J. Chuma, 5G Mobile Communication Applications: A Survey and Comparison of Use Cases, IEEE Access, Volume 9, 2021.

- [15] D. Balasubramaniam, S. S. and V. S., A Review on Cloud Computing, International Journal of Trend in Research and Development, Vol. 4, 2018.
- [16] S. Zhang, H. Yan and X. Chen, Research on Key Technologies of Cloud Computing, Elsevier, Physics Procedia 33, 2012.
- [17] M. Armbrust, A. Fox, R. Katz and A. Konwinski, A View of Cloud Computing, Communications of the ACM, Vol. 53, No.4, 2010.
- [18] M. Farooq, M. Waseem, S. Mazhar, A. Khairi and T. Kamal, A Review on Internet of Things (IoT), International Journal of Computer Applications, Vol. 113, 2015.
- [19] J. M. Khurpade, D. Rao and P. Sanghavi, A Survey on IoT and 5G Network, 2018 International Conference on Smart City and Emerging Technology (ICSCET), 2018.
- [20] K. Govinda and R. Saravanaguru, Review on IoT Technologies, International Journal of Applied Engineering Research ISSN, Vol. 11, 2016.
- [21] M. Wu, T.-J. Lu, F.-Y. Ling, J. Sun and H.-Y. Du, Research on the architecture of Internet of Things, 3rd International Conference on Advanced Computer Theory and Engineering (ICACTE), 2010.
- [22] A. Khattab, A. Abdelgawahad and K. Yelmarthi, Design and Impelmentation of a Cloud-based IoT Scheme for Precision Agriculture, International Conference on Microelectronics (ICM) 2016, 2016.
- [23] M. R. M. Kassim, IoT Applications in Smart Agriculture: Issues and Challenges, IEEE Conference on Open Systems (ICOS), 2020.
- [24] V. d. Oliveira, H. E. Castelli, S. H. Montebeller and T. P. Avancini, Wireless Sensor Networks for Smart Agriculture using Zigbee Protocol, IEEE First Summer School on Smart Cities, 2017.
- [25] P. Radoglou-Grammatikis, P. Sarigiannidis, T. Lagkas and I. Moscholios, A compilation of UAV applications for precision agriculture, Elsevier, Computer Networks Vol. 172, 2020.
- [26] S. Mohammed, A. B. Belal, S. Abd-Elmabod and M. El-Shirbeny, Smart farming for improving agricultural management, The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences, 2021.
- [27] E. Olakunle, A. R. Tharek, O. Igbafe, C. Y. Leow and H. Nour, An Overview of Internet of Things (IoT) and Data Analytics in Agriculture: Benefits and Challenges, IEEE Internet of Things Journal, Vol. 5, 2018.
- [28] S. A. Gbadamosi, G. Hancke and A. Abu-Mahfouz, Building upon NB-IoT Networks: A Roadmap Towards 5G New Radio Networks, IEEE Access, Vol. 8, 2020.
- [29] A. R. ' . B. Kumaravelu, Fuzzy logic–based distributed clustering protocol to improve energy efficiency and stability of wireless smart sensor networks for farmland

monitoring systems, Wiley, International Journal of Communication Systems, Vol. 33 Issue 4, 2019.

- [30] F. Bu and X. Wang, A smart agriculture IoT system based on deep reinforced learning, Elsevier, Future Generation Computer Systems, Vol. 99, 2019.
- [31] J. Muangprathub, N. Boonnam, S. Kajornkasirat, N. Lekbangpong, A. Wanichsombat and P. Nillaor, IoT and agriculture data analysis for smart farm, Elsevier, Computers and Electronics in Agriculture Vol. 156, 2019.
- [32] S. Singh, I. Chana and R. Buyya, Agri-Info: Cloud Based Autonomic System for Delivering Agriculture as a Service, Elsevier, Internet of Things Vol. 9, 2020.
- [33] E. Symeonaki, K. Arvanitis and D. Piromalis, A Context-Aware Middleware Cloud Approach for Integrating Precision Farming Facilities into the IoT toward Agriculture 4.0, Applied Sciences Vol. 10, 2020.
- [34] Internet of Things in arable farming: Implementation, applications, challenges and potential, Elsevier, Biosystems Engineering Vol. 191, 2020.
- [35] O. Friha, M. A. Ferrag, L. Shu, L. Maglaras and X. Wang, Internet of Things for the Future of Smart Agriculture: A Comprehensive Survey of Emerging Technologies, IEEE/CAA JOURNAL OF AUTOMATICA SINICA, VOL. 8, NO. 4, 2021.
- [36] A. Matsuoka. and J. Sorenson, Human Consequences of Animal Exploitation: Needs for Redefining Social Welfare, The Journal of Sociology & Social Welfare, Vol. 40, 2013.
- [37] M. Appleby and L. A. Mitchell, Understanding human and other animal behaviour: Ethology, welfare and food policy, Applied Animal Behaviour Science, Vol. 205, 2018.
- [38] S.-K. Jo, D.-H. Park, H. Park and S.-H. Kim, Smart Livestock Farms Using Digital Twin: Feasibility Study, International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC), 2018.
- [39] Y. Wang, X. Yong, Z. Chen, H. Zheng, J. Zhuang and J. Liu, The Design of an Intelligent Livestock Production Monitoring and Management System, 7th Data Driven Control and Learning Systems Conference, 2018.
- [40] W.-T. Su, L.-Y. Jiang, Tang-Hsuan, Y.-C. Lin, M.-H. Hung and C.-C. Chen, AIoT-Cloud-Integrated Smart Livestock Surveillance via Assembling Deep Networks with Considering Robustness and Semantics Availability, IEEE Robotics and Automation Letters, Vol. 6 No. 4, 2021.
- [41] "Milk Level Monitoring Solution," Allflex Livestock Intelligence, [Online]. Available: <https://www.allflex.global/product/heatimepro/>. [Accessed 10 6 2021].
- [42] K. Dineva, T. Atanasova, P. Petrov, D. Parvanov, G. Mateeva and G. Konstadinov, Towards CPS/IoT System for Livestock Smart Farm Monitoring, International Conference Automatics and Informatics (ICAI), 2021.

- [43] B. I. Akhigbe, K. Munir, O. Akinade, L. Akanbi and L. O. Oyedele, IoT Technologies for Livestock Management: A Review of Present Status, Opportunities, and Future Trends, *Big Data and Cognitive Computing*, Vol. 5, Issue 10, 2021.
- [44] M. S. Farooq, O. O. Sohail, A. Abid and S. Rasheed, A Survey on the Role of IoT in Agriculture for the Implementation of Smart Livestock Environment, *IEEE Access*, Vol. 10, 2022.
- [45] G. Merino, M. Barange, J. L. Blanchard, J. Harle, R. Holmes, I. Allen, E. H. Allisond, M. C. Badjeck, N. K. Dulvy, J. Holt, S. Jennings, C. Mullonh and L. D. Rodwell, Can marine fisheries and aquaculture meet fish demand from a growing human population in a changing climate?, *Elsevier, Global Environmental Change*. Vol.22, Issue 4, 2012.
- [46] A. Petkovski, J. Ajdari and X. Zenuni, IoT-based Solutions in Aquaculture: A Systematic Literature Review, *Croatian Society for Information, Communication and Electronic Technology - MIPRO*, 2021.
- [47] C. Dupont, P. Cousin and S. Dupont, IoT for Aquaculture 4.0 : Smart and easy-to-deploy real-time water monitoring with IoT, *Global Internet of Things Summit*, 2018.
- [48] E. Agossou and T. Toshiro, IoT & AI Based System for Fish Farming: Case study of Benin, *ACM, Proceedings of the Conference on Information Technology for Social Good*, 2021.
- [49] T. T. E. Vo, H. Ko, J.-H. H. 4 and Y. Kim, Overview of Smart Aquaculture System: Focusing on Applications of Machine Learning and Computer Vision, *MDPI AG, Electronics* Vol. 10, Issue 22, 2021.
- [50] M. M. Rahman, C. Bapery, M. J. Hossain, Z. Hassan, G. J. Hossain and M. M. Islam, Internet of Things (IoT) Based Water Quality Monitoring System, *International Journal of Multidisciplinary and Current Educational Research*, Vol. 2, Issue 4, 2020.
- [51] T. Imai, K. Arai and T. Kobayashi, Smart Aquaculture System: A Remote Feeding System with Smartphones, *IEEE 23rd International Symposium on Consumer Technologies (ISCT)*, 2019.
- [52] R. Accorsi, M. Bortolinia and G. Baruffaldi, IoT paradigm in food supply chains control and management, *27th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing, FAIM*, 2017.
- [53] R. Behl and S. Dhir, Role of IOT in Supply Chain Innovation: A Survey Analysis, *International Mobile and Embedded Technology Conference (MECON)*, 2022.
- [54] I. Taboada and H. Shee, Understanding 5G technology for future supply chain management, *Taylor & Francis, International Journal of Logistics Research and Applications*, 2020.
- [55] N. Stancel and C. M. Dimitrescu, IoT Technology and Supply Chain Management, *13th International Conference on Electronics, Computers and Artificial intelligence (ECAI)*, 2021.

- [56] M. Khaturia, P. Jha and A. Karandikar, Connecting the Unconnected: Toward Frugal 5G Network Architecture and Standardization, IEEE Communications Standards Magazine, 2020.
- [57] S. Koratagere, A. Kumar, R. Stewart, D. Crawford και S. Chaudhari, Business model for rural connectivity using multi-tenancy 5G network slicing, 17th International Conference on Smart Communities: Improving Quality of Life Using ICT, IoT and AI (HONET), 2020.
- [58] L. Chiaraviglio, N. Blefari-Melazzi, W. Liu, J. A. Gutierrez, J. V. D. Beek, R. Birke, L. Chen, F. Idzikowski, D. Kilper, P. Monti and J. Wu, 5G in rural and low-income areas: Are we ready?, ITU Kaleidoscope: ICTs for a Sustainable World (ITU WT), 2016.
- [59] I. C. (. Fellow), «Digital Communications, Multiple Antenna Communications,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.iaincollings.com/digital-communications>.
- [60] J. Guo, N. Li, Z. Jiang, S. Liu and P. Chen, System-level Evaluation on Practical Massive MIMO Deployment Scenarios for 5G, IEEE 5th International Conference on Computer and Communications, 2019.
- [61] I. C. U. -. ITU, "Guidelines for evaluation of radio interface technologies for IMT-2020," [Online]. Available: <https://www.itu.int/md/R15-SG05-C-0057>.
- [62] Huawei, «5G Power: Creating a green grid that slashes costs, emissions & energy use,» 2020. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.huawei.com/us/technology-insights/publications/huawei-tech/89/5g-power-green-grid-slashes-costs-emissions-energy-use>.
- [63] M. M. Ahamed and S. Faruque, 5G Network Coverage Planning and Analysis of the Deployment Challenges, Sensors 2021, Issue 21, MDPI, 2021.
- [64] S. A. Hassan, M. S. Omar, M. A. Imran, J. Qadir and D. N. K. Jayakody, Universal Access in 5G Networks: Potential Challenges and Opportunities for Urban and Rural Environments, 5G Networks: Fundamental Requirements, Enabling Technologies and Operations Management, First Edition, 2018.
- [65] C. e. a. University of Strathclyde, 5G RuralFirst: New Thinking Applied to Rural Connectivity, 5G Ruralfirst Consortium, 2019.
- [66] 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., IEEE 20th Conference on Innovations in Clouds, Internet and Networks (ICIN), 2017.
- [67] M. Jian, G. C. Alexandropoulos, E. Basar, C. Huang, R. Liu, Y. Liu and C. Yuen, Reconfigurable intelligent surfaces for wireless communications: Overview of hardware designs, channel models, and estimation techniques, IEEE, Intelligent and Converged Networks, Vol. 3, Issue 1, 2022.
- [68] G. Giambene, S. Kota and P. Pillai, Satellite-5G Integration: A Network Perspective, IEEE Network September/October 2018, 2018.

- [69] L. Chiaraviglio, L. Amorosi, N. Blefari-Melazzi, P. Dell’Olmo, C. Natalino and P. Monti, Optimal Design of 5G Networks in Rural Zones with UAVs, Optical Rings, Solar Panels and Batteries, International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), 2018.
- [70] L. Amorosi, L. Chiaraviglio, F. D’Andreagiovanni and N. Blefari-Melazzi, Energy-Efficient Mission Planning of UAVs for 5G Coverage in Rural Zones, IEEE, 2018 IEEE International Conference on Environmental Engineering (EE), 2018.
- [71] Q. Wu, J. Xu, Y. Zeng, D. W. K. Ng, N. Al-Dhahir, R. Schober and A. Lee, A Comprehensive Overview on 5G-and-Beyond Networks with UAVs: From Communications to Sensing and Intelligence, IEEE Journal on Selected Areas in Communications (JSAC), 2021.
- [72] G. Giambene, E. O. Addo and S. Kota, 5G Aerial Component for IoT Support in Remote Rural Areas, IEEE 2nd 5G World Forum (5GWF), 2019.
- [73] V. P. Kour and S. Arora, Recent Developments of the Internet of Things in Agriculture: A Survey, IEEE Access, Vol. 8, 2020.
- [74] A. Srivastava and D. K. Das, A Comprehensive Review on the Application of Internet of Thing (IoT) in Smart Agriculture, Springer, Wireless Personal Communications, 2021.
- [75] J. Arnold, J. Raczkowska, A. Kowarik and N. Rosenski, Preparing Smart Statistics: Description of the findings regarding Smart Farming, Eurostat, ESSnet Big Data II, Workpackage L, 2019.
- [76] E. Navarro, N. Costa and A. Pereira, A Systematic Review of IoT Solutions for Smart Farming, MDPI, Sensors 2020, Vol. 20, 2020.
- [77] C. Brewster, I. Roussaki, N. Kalatzis, K. Doolin and K. Ellis, IoT in Agriculture: Designing a Europe-Wide Large-Scale Pilot, IEEE Communications Magazine, 2017.
- [78] I. Tsoukalas, D. Koutalaki, N. Ruane, P. Verrios, I. Patsouras, T. Zafeiropoulos, E. Fotopoulou, V. Kayiotis, R. Skaret-Thoresen, M. Hauko, I. Pietri and A. Lekidis, 5G HEART Webinar: Smart Aquaculture with the use of 5G, 5G HEALTH AQUACULTURE AND TRANSPORT VALIDATION TRIALS, 5G-HEART.eu, 2021.
- [79] A. Uttamrap and R. Priti, Wireless Evolution with 4G Technologies, International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering, 2012.
- [80] A. Ghosh, J. Andrews and M. Rias, Fundamentals of WiMAX: Understanding Broadband Wireless Networking, Prentice-Hall Inc., 2007.
- [81] T. Halonen, J. Romero and J. Melero, GSM, GPRS and EDGE Performance: Evolution Towards 3G/UMTS, Wiley, 2003.