



“ΜΕΛΕΤΗ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΚΑΙ  
ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΔΙΚΤΥΟΥ ΟΠΤΙΚΩΝ  
ΙΝΩΝ ΣΕ ΑΣΤΙΚΗ ΚΑΙ ΗΜΙΑΣΤΙΚΗ  
ΠΕΡΙΟΧΗ”

**Αναστάσιος Μπολώσης**  
**A.M. 711151006**

**Επιβλέπων Καθηγητής:**  
**Δρ. Κωνσταντίνος Μαυρομάτης**

**Εξεταστική επιτροπή:**

<p><b>Κωνσταντίνος Μαυρομάτης</b> <b>Επιβλέπων Καθηγητής</b></p>	<p><b>Σταύρος Φατούρος</b> <b>Αν. Καθηγητής</b></p>	<p><b>Νικόλαος Μυριδάκης</b> <b>Επίκουρος Καθηγητής</b></p>
--	---	---

**Ημερομηνία εξέτασης 20/03/2024**

## Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της μεταπτυχιακής διπλωματικής μου εργασίας, θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες σε όλους όσους συνέβαλλαν στην εκπόνησή της.

Ευχαριστώ θερμά τον επιβλέπων καθηγητή μου, κύριο Κωνσταντίνο Μαυρομμάτη, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε εξ' αρχής, αναθέτοντάς μου το συγκεκριμένο θέμα, την επιστημονική του καθοδήγηση, τις υποδείξεις του, την επιμονή του, το αμείωτο ενδιαφέρον του, τη συμπαράστασή του, τη συνεχή του υποστήριξη που έδειξε από την αρχή μέχρι το τέλος.

Τέλος, θα ήθελα εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στην οικογένειά μου και την γυναίκα μου για όλη τη στήριξη, τη συμπαράσταση και την κατανόησή τους, καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

## Περιεχόμενα

Περίληψη.....	4
Abstract .....	5
Εισαγωγή.....	6
Κεφάλαιο 1: Γενική περιγραφή των οπτικών ινών και του εξοπλισμού.....	8
1.1 Εισαγωγή στις οπτικές ίνες.....	8
1.2 Εξοπλισμός οπτικών ινών .....	10
1.3. Τύποι οπτικών ινών.....	13
1.4 Υπηρεσίες που προσφέρονται στα δίκτυα οπτικών ινών .....	17
1.5 Εγκατάσταση του εξοπλισμού οπτικών ινών .....	20
1.6 Υλικά που χρησιμοποιούνται στα δίκτυα οπτικών ινών .....	22
Κεφάλαιο 2: Κάλυψη δικτύου σε αστικές περιοχές.....	24
2.1 Το μοντέλο OSI (Open Systems Interconnection) .....	24
2.2 Ανάλυση της υποδομής πύργων κινητής τηλεφωνίας και κεραιών σε αστικές περιοχές .....	26
2.3 Συστήματα καταναμημένων κεραιών (DAS).....	27
2.4 Wi-Fi hotspots.....	28
2.5 Τεχνολογίες 4G/5G .....	30
2.6 Ανάπτυξη δικτύου FTTx.....	31
Κεφάλαιο 3: Κάλυψη δικτύου σε ημιαστικές περιοχές.....	34
3.1 Το μοντέλο TCP/IP (Transmission Control Protocol/Internet Protocol).....	34
3.2 Ανάπτυξη δικτύου UFBB.....	36
Κεφάλαιο 4: Συγκριτική ανάλυση αστικών και ημιαστικών δικτύων.....	41
4.1 Εκτιμήσεις σχετικά με τα δίκτυα.....	41
4.2 Κοινωνικοοικονομικές επιπτώσεις.....	42
4.3 Διαφορές τεχνολογιών.....	43
Κεφάλαιο 5: Μελλοντικές εξελίξεις και καινοτομίες στα οπτικά δίκτυα .....	44
5.1 Μελλοντικές προοπτικές στα οπτικά δίκτυα .....	44
5.2 Νέες τεχνολογίες και αρχιτεκτονική δικτύων .....	45
5.2.1 Αρχιτεκτονική 6G.....	47
5.2.2 Άλλες τεχνολογίες .....	50
Συμπέρασμα .....	52
Βιβλιογραφία.....	54

## Περίληψη

Η παρούσα εργασία προσφέρει μια ολοκληρωμένη εξέταση των δικτύων οπτικών ινών, αναλύοντας λεπτομερώς τις θεμελιώδεις πτυχές τους, τον εξοπλισμό, τους διάφορους τύπους ινών, τις παρεχόμενες υπηρεσίες, τις διαδικασίες εγκατάστασης και τα χρησιμοποιούμενα υλικά. Εμβαθύνει στην αρχιτεκτονική των δικτύων διερευνώντας τα μοντέλα OSI και TCP/IP και τη σημασία τους σε αστικές και ημιαστικές περιοχές. Μια σημαντική ενότητα συγκρίνει αστικά και ημιαστικά δίκτυα οπτικών ινών, εξετάζοντας την αστική κάλυψη με ανάλυση της υποδομής πύργων κινητής τηλεφωνίας, των κατανεμημένων συστημάτων κεραιών (DAS), των σημείων πρόσβασης Wi-Fi και των προηγμένων τεχνολογιών 4G/5G. Αντίθετα, διερευνά τις ανισότητες στην κάλυψη των ημιαστικών δικτύων, την παρακολούθηση, τη συντήρηση και διεξάγει μια διεξοδική συγκριτική ανάλυση που περιλαμβάνει εκτιμήσεις, κοινωνικοοικονομικές επιπτώσεις και τεχνολογικές διαφορές. Επιπλέον, το έγγραφο προβλέπει μελλοντικές εξελίξεις και καινοτομίες στα οπτικά δίκτυα, συζητώντας τις πιθανές εξελίξεις, τις αναδυόμενες τεχνολογίες και τις νέες αρχιτεκτονικές δικτύων. Συνθέτοντας τις διαφορετικές οπτικές γωνίες, η παρούσα εργασία παρέχει σημαντικές πληροφορίες σχετικά με την πολυπλοκότητα των δικτύων οπτικών ινών, την τρέχουσα κατάστασή τους, τη συγκριτική δυναμική τους σε διαφορετικά περιβάλλοντα και τις πιθανές μελλοντικές τάσεις.

**Λέξεις-Κλειδιά:** οπτικές ίνες, δίκτυα, αστικές περιοχές, ημιαστικές περιοχές

## Abstract

This paper offers a comprehensive examination of fibre optic networks, detailing their fundamental aspects, equipment, different types of fibre, services provided, installation procedures and materials used. It delves into network architecture by exploring the OSI and TCP/IP models and their relevance in urban and semi-urban areas. An important section compares urban and semi-urban fibre networks, examining urban coverage with an analysis of mobile tower infrastructure, distributed antenna systems (DAS), Wi-Fi access points and advanced 4G/5G technologies. Conversely, it explores disparities in semi-urban network coverage, monitoring, maintenance and conducts a thorough comparative analysis that includes estimates, socio-economic impacts and technology differences. In addition, the paper anticipates future developments and innovations in optical networks, discussing potential developments, emerging technologies and new network architectures. By synthesizing the different perspectives, this paper provides important insights into the complexity of fiber optic networks, their current state, their comparative dynamics in different environments and possible future trends.

**Keywords:** fibre optic, networks, urban areas, semi-urban areas

## Εισαγωγή

Σε μια εποχή που χαρακτηρίζεται από μια ακόρεστη δίψα για συνδεσιμότητα και ανταλλαγή πληροφοριών, η παρουσία των ψηφιακών δικτύων έχει γίνει συνώνυμο της προόδου. Πρωτοπόρος αυτού του ψηφιακού συνόρου βρίσκεται η τεχνολογία των δικτύων οπτικών ινών που αλλάζει το παράδειγμα. Η παρούσα διατριβή ξεκινά μια εμπειρική διερεύνηση με τίτλο "Μελέτη του σχεδιασμού και της εγκατάστασης ενός δικτύου οπτικών ινών σε αστικές και ημιαστικές περιοχές", εμβαθύνοντας στις περιπλοκές της ανάπτυξης αυτής της μετασχηματιστικής υποδομής σε διαφορετικά γεωγραφικά τοπία.

Τα δίκτυα οπτικών ινών, που στηρίζονται στις αρχές της διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων και της ολικής εσωτερικής ανάκλασης, ενσωματώνουν τη συνέργεια του φωτός και των δεδομένων. Οι ιδιότητες που αναβλύζουν από αυτά τα δίκτυα έχουν φέρει επανάσταση στη μετάδοση δεδομένων, προσφέροντας απaráμιλλο εύρος ζώνης, μειωμένη απώλεια σήματος και υψηλούς ρυθμούς δεδομένων. Σε αντίθεση με τα αντίστοιχα δίκτυα που βασίζονται στο χαλκό, τα οποία περιορίζονται από την ηλεκτρική αντίσταση και την ευαισθησία σε παρεμβολές, οι οπτικές ίνες προσφέρουν ένα μέσο όπου τα δεδομένα ρέουν ως παλμοί φωτός, χωρίς να παρεμποδίζονται από την εξασθένηση (Rubinsztein-Dunlop et al., 2016).

Κεντρικό ρόλο στην έρευνα αυτή παίζει η εκτεταμένη γκάμα υπηρεσιών που προσφέρουν τα δίκτυα οπτικών ινών. Η αρχιτεκτονική αυτών των δικτύων διευκολύνει μια πληθώρα εφαρμογών, καθεμία από τις οποίες ανταποκρίνεται στις ποικίλες απαιτήσεις της σύγχρονης κοινωνίας. Η ροή βίντεο υψηλής ευκρίνειας ξεδιπλώνει έναν απρόσκοπτο καμβά ψυχαγωγίας, η υπολογιστική νέφους υπερβαίνει τα συμβατικά υπολογιστικά όρια, το Διαδίκτυο των πραγμάτων (IoT) συνδέει συσκευές σε ένα μωσαϊκό ανταλλαγής δεδομένων, η τηλεϊατρική γεφυρώνει το γεωγραφικό χάσμα στην υγειονομική περίθαλψη και η εξ αποστάσεως εκπαίδευση εκδημοκρατίζει την εκπαίδευση ανεξάρτητα από τη φυσική εγγύτητα. Αυτές οι υπηρεσίες, που υποστηρίζονται από την ευελιξία των οπτικών ινών, είναι έτοιμες να εγκαινιάσουν μια νέα εποχή συνδεσιμότητας και προσβασιμότητας (Winzer, 2014).

Καθώς εξελίσσεται η πορεία αυτής της μελέτης, η διάκριση μεταξύ αστικών και ημιαστικών περιβαλλόντων αναδεικνύεται σε καθοριστικό παράγοντα για την

ανάπτυξη δικτύων οπτικών ινών. Τα αστικά τοπία σφύζουν από ψηφιακή ζωντάνια, γεμάτα με υψηλές πληθυσμιακές πυκνότητες και δυναμικές απαιτήσεις υπηρεσιών. Σε αυτές τις περιοχές, οι οπτικές ίνες καλύπτουν ένα πλήθος εφαρμογών, από ψυχαγωγία υψηλής ταχύτητας έως ανάλυση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο. Αντίθετα, οι ημιαστικές περιοχές, που συχνά εξετάζονται περιφερειακά, κρύβουν λανθάνουσες δυνατότητες. Η έγχυση οπτικών ινών επαναπροσδιορίζει αυτές τις περιοχές, γεφυρώνοντας το χάσμα συνδεσιμότητας και επιτρέποντας υπηρεσίες που προηγουμένως διέφευγαν από το χέρι τους (Wernick & Bender, 2016).

Αυτή η έρευνα εμβαθύνει σε δύο διαφορετικές τοπολογίες δικτύων: η μία είναι πυκνή ενώ η άλλη πιο διασκορπισμένη. Το αστικό δίκτυο πλέκεται μέσα από πολυσύχναστους διαδρόμους, διασχίζοντας κάθετα τοπία και αστικές εκτάσεις. Εδώ, τα δεδομένα ρέουν αδιάκοπα, εξυπηρετώντας ένα πλήθος απαιτήσεων. Το ημιαστικό δίκτυο, που χαρακτηρίζεται από εκτάσεις ηρεμίας, απλώνει τις έλικες του με σκόπιμη ακρίβεια. Αυτός ο σχεδιασμός δικτύου αναγνωρίζει τη χωρική δυναμική των ημιαστικών περιοχών, εξασφαλίζοντας ότι η συνδεσιμότητα φτάνει σε κάθε γωνιά. Αυτές οι αρχιτεκτονικές δικτύων, προσαρμοσμένες στις αντίστοιχες συνθήκες, αντιπροσωπεύουν την προσαρμοστικότητα των οπτικών ινών.

Καθώς αυτή η έρευνα περιηγείται στις περιπλοκές των δικτύων οπτικών ινών, κοιτάζει πέρα από τη φάση ανάπτυξης. Η συντήρηση αναδεικνύεται ως μια κρίσιμη πτυχή, που απαιτεί σχολαστική παρακολούθηση και άμεση διόρθωση για τη διασφάλιση της ακεραιότητας των ροών δεδομένων. Επιπλέον, ο ορίζοντας υπόσχεται δελεαστικές προοπτικές. Οι καινοτομίες στους ρυθμούς μεταφοράς δεδομένων, τα πρωτόκολλα ασφαλείας και οι τομείς εφαρμογών περιμένουν να εξερευνηθούν. Η μελλοντική εξέλιξη των δικτύων οπτικών ινών είναι βέβαιο ότι θα επαναπροσδιορίσει τα όρια της συνδεσιμότητας, ενισχύοντας τον αντίκτυπό τους στην κοινωνία και τη βιομηχανία.

Συνοπτικά, η παρούσα διατριβή ξεκινά μια αυστηρή μελέτη, καθοδηγούμενη από εμπειρικές γνώσεις, σχετικά με τον σχεδιασμό και την ανάπτυξη των δικτύων οπτικών ινών. Εμβαθύνει στη συμβιωτική σχέση μεταξύ τεχνολογίας και γεωγραφίας, τονίζοντας τον τρόπο με τον οποίο τα δίκτυα αυτά συγκλίνουν για να γεφυρώσουν το χάσμα μεταξύ πόλης και ημιαστικού χώρου.



# Κεφάλαιο 1: Γενική περιγραφή των οπτικών ινών και του εξοπλισμού

## 1.1 Εισαγωγή στις οπτικές ίνες

Οι οπτικές ίνες διαδραματίζουν μετασχηματιστικό ρόλο στη σύγχρονη μετάδοση και επικοινωνία δεδομένων, φέρνοντας επανάσταση στον τρόπο με τον οποίο συνδεόμαστε και ανταλλάσσουμε πληροφορίες. Σε αυτό το υποκεφάλαιο, θα διερευνήσουμε τις θεμελιώδεις πτυχές των οπτικών ινών, τον ρόλο τους στα συστήματα επικοινωνίας και τα διακριτά πλεονεκτήματα που προσφέρουν σε σχέση με τα παραδοσιακά συστήματα που βασίζονται στον χαλκό.

### Ορισμός

Οι οπτικές ίνες είναι λεπτά, τριχοειδή νήματα που συνήθως κατασκευάζονται από υψηλής ποιότητας γυαλί ή πλαστικά υλικά, τα οποία έχουν σχεδιαστεί σχολαστικά ώστε να διαθέτουν εξαιρετικές οπτικές ιδιότητες. Οι ίνες αυτές λειτουργούν ως κυματοδηγοί, διοχετεύοντας φωτεινά σήματα κατά μήκος τους. Ο πυρήνας μιας οπτικής ίνας είναι η εσωτερική περιοχή όπου διαδίδεται το φως, περιβαλλόμενη από ένα στρώμα επικάλυψης που διατηρεί το φως περιορισμένο εντός του πυρήνα. Αυτή η δομή πυρήνα-επένδυσης είναι ζωτικής σημασίας για τη διασφάλιση της ακεραιότητας των μεταδιδόμενων σημάτων.

Η ουσία των οπτικών ινών έγκειται στην ικανότητά τους να μεταδίδουν δεδομένα ως παλμούς φωτός. Καθώς ένα φωτεινό σήμα εισέρχεται σε μια οπτική ίνα, υφίσταται ολική εσωτερική ανάκλαση εντός του πυρήνα, ελαχιστοποιώντας την απώλεια ενέργειας κατά τη μετάδοση. Αυτή η μοναδική ιδιότητα δίνει στις οπτικές ίνες τη δυνατότητα να μεταφέρουν τεράστιους όγκους πληροφοριών σε μεγάλες αποστάσεις χωρίς να υποκύπτουν στην υποβάθμιση του σήματος που συνηθίζεται στα χάλκινα καλώδια.

Οι οπτικές ίνες αποτελούν τη ραχοκοκαλιά διαφόρων δικτύων επικοινωνίας, συμπεριλαμβανομένων των υπηρεσιών διαδικτύου, των τηλεπικοινωνιακών συστημάτων και της καλωδιακής τηλεόρασης. Οι παλμοί φωτός που μεταφέρουν δεδομένα μπορούν να αντιπροσωπεύουν ήχο, βίντεο ή ψηφιακές πληροφορίες,

καθιστώντας τις οπτικές ίνες ένα ευέλικτο μέσο για την ταυτόχρονη μετάδοση μιας σειράς τύπων δεδομένων (Braithwaite et al., 2021).

### **Πλεονεκτήματα των οπτικών ινών έναντι των συστημάτων που βασίζονται στον χαλκό:**

Η υιοθέτηση των οπτικών ινών παρουσιάζει πληθώρα πλεονεκτημάτων σε σχέση με τα παραδοσιακά συστήματα που βασίζονται στον χαλκό, καθιστώντας τα την προτιμώμενη επιλογή για τα σύγχρονα δίκτυα επικοινωνίας:

*Υψηλό εύρος ζώνης:* Οι οπτικές ίνες προσφέρουν σημαντικά υψηλότερες δυνατότητες εύρους ζώνης σε σύγκριση με τα χάλκινα καλώδια, επιτρέποντας τη μετάδοση τεράστιων ποσοτήτων δεδομένων με αξιοσημείωτες ταχύτητες. Αυτό το εγγενές υψηλό εύρος ζώνης διευκολύνει την απρόσκοπτη παράδοση βίντεο υψηλής ευκρίνειας, τις ταχύτερες συνδέσεις στο διαδίκτυο και τις καθηλωτικές διαδικτυακές εμπειρίες (Ogudo, Mbongiseni Mthethwa and Nestor, 2019).

*Χαμηλή εξασθένηση:* Ένα απαραίτητο πλεονέκτημα των οπτικών ινών είναι η ελάχιστη απώλεια σήματος, γνωστή ως εξασθένηση, σε μεγάλες αποστάσεις. Σε αντίθεση με τα χάλκινα καλώδια που υφίστανται σημαντική υποβάθμιση του σήματος σε μεγάλα μήκη, οι οπτικές ίνες διατηρούν την ακεραιότητα του σήματος, επιτρέποντας τη μετάδοση δεδομένων σε εκατοντάδες χιλιόμετρα χωρίς την ανάγκη ενίσχυσής του (Hecht, 2015).

*Ανεκτικές στις ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές:* Σε αντίθεση με τα χάλκινα καλώδια, τα οποία είναι ευαίσθητα σε ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές (ΗΜΠ) από κοντινά καλώδια τροφοδοσίας ή ηλεκτρονικές συσκευές, οι οπτικές ίνες είναι ανθεκτικές στις ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές. Με αυτό τον τρόπο εξασφαλίζεται η σταθερή και αξιόπιστη μετάδοση δεδομένων ακόμη και σε περιβάλλοντα με υψηλή ηλεκτρομαγνητική δραστηριότητα (Sabri et al., 2014).

*Ασφαλής μετάδοση δεδομένων:* Οι οπτικές ίνες δεν εκπέμπουν ηλεκτρομαγνητικά σήματα, γεγονός που τις καθιστά ανθεκτικές σε υποκλοπές δεδομένων. Αυτό το χαρακτηριστικό ενισχύει την ασφάλεια των ευαίσθητων δεδομένων που μεταδίδονται μέσω δικτύων οπτικών ινών, καθιστώντας τα ιδανικά για εφαρμογές που απαιτούν ιδιωτικότητα και εμπιστευτικότητα (And Kaan Yilmaz, Deniz and Yuksel, 2021).

*Ελαφριές και αποδοτικές ως προς το χώρο:* Οι οπτικές ίνες είναι λεπτές, ελαφριές και καταλαμβάνουν ελάχιστο φυσικό χώρο. Αυτό το χαρακτηριστικό απλοποιεί την εγκατάσταση και την ανάπτυξη, ιδίως σε πυκνοδομημένα αστικά περιβάλλοντα όπου ο χώρος είναι περιορισμένος (Maimone and Wang, 2020).

*Ανθεκτικότητα και χαμηλή συντήρηση:* Τα καλώδια οπτικών ινών είναι ιδιαίτερα ανθεκτικά και λιγότερο ευαίσθητα σε βλάβες από περιβαλλοντικούς παράγοντες όπως η υγρασία, οι διακυμάνσεις της θερμοκρασίας και η διάβρωση. Ως αποτέλεσμα, απαιτούν λιγότερη συντήρηση σε σύγκριση με τα παραδοσιακά καλώδια χαλκού, γεγονός που οδηγεί σε μειωμένο λειτουργικό κόστος (Taheri, 2019).

Η εισαγωγή στις οπτικές ίνες αποκαλύπτει τον κρίσιμο ρόλο τους στα συστήματα μετάδοσης δεδομένων και επικοινωνίας. Αυτά τα λεπτά νήματα από γυαλί ή πλαστικό έχουν αναδειχθεί ως η βάση της σύγχρονης συνδεσιμότητας, λόγω των ανώτερων πλεονεκτημάτων τους σε σχέση με τα παραδοσιακά συστήματα που βασίζονται στον χαλκό. Οι επόμενες ενότητες θα εμβαθύνουν στον κόσμο των οπτικών ινών, διερευνώντας διάφορα εξαρτήματα, εφαρμογές και σχέδια δικτύων που αξιοποιούν πλήρως τις δυνατότητες των οπτικών ινών σε αστικές και ημιαστικές περιοχές.

## **1.2 Εξοπλισμός οπτικών ινών**

Στον περίπλοκο τομέα των οπτικών συστημάτων, η περίπλοκη εντοπιστική της μετάδοσης ζωτικής σημασίας πληροφοριών - είτε πρόκειται για τις ηχητικές αποχρώσεις μιας φωνής, είτε για ένα βίντεο, είτε για τη μετάδοση δεδομένων - εκδηλώνεται μέσω μιας σχολαστικής αλληλεπίδρασης πολύπλευρων εξαρτημάτων. Αυτά τα στοιχεία, εντοπισμένα με ακρίβεια, χρησιμεύουν ως αρχιτεκτονικό πλαίσιο για την απρόσκοπτη διάδοση των δεδομένων μέσω των περίπλοκων αγωγών των οπτικών ινών (Εικόνα 1).

### **Καλώδια οπτικών ινών**

Στο επίκεντρο αυτού του περίπλοκου συνόλου βρίσκεται το καλώδιο οπτικών ινών - ένας αγωγός που συχνά κατασκευάζεται από γυαλί, ενίοτε από πλαστικό ή πυρίτιο. Η ουσία του καλωδίου έγκειται στην ικανότητά του να διοχετεύει το φως μέσω του μηχανισμού της ολικής εσωτερικής ανάκλασης. Σε αυτό το φαινόμενο, το φως περιορίζεται στον πυρήνα της ίνας λόγω μιας προσεκτικά βαθμονομημένης διαφοράς

του δείκτη διάθλασης μεταξύ του πυρήνα και του περιβλήματος. Η σύμπραξη πυρήνα και μανδύα όχι μόνο διατηρεί τον περιορισμό του φωτός αλλά και προκαλεί τη διάδοσή του κατά μήκος της καθορισμένης τροχιάς. Κατά συνέπεια, το καλώδιο οπτικών ινών γίνεται ένας καταλύτης της οπτικής μετάδοσης, διευκολύνοντας τη διαρκή παράδοση πληροφοριών που βασίζονται στο φως (Philippe Jousset et al., 2018).

### **Πομποί**

Στο άκρο υποδοχής αυτού του ταξιδιού μετάδοσης βρίσκεται ο πομπός - μια περίπλοκη συσκευή που έχει σχεδιαστεί για να δρομολογεί το μετασχηματισμό των ηλεκτρικών σημάτων σε φωτεινές εκπομπές. Αυτή η συσκευή, που έχει τη μορφή διόδων εκπομπής φωτός (LED) ή διόδων λέιζερ, αναλαμβάνει την ευθύνη αυτής της μετατροπής. Οι λυχνίες LED, που διακρίνονται για την οικονομική τους απόδοση και την πανταχού παρουσία τους, αποτελούν μια διαδεδομένη επιλογή. Ωστόσο, οι αυξημένες δυνατότητες των διόδων λέιζερ έχουν ανάλογο κόστος. Αυτή η μετατροπή από ηλεκτρικά σήματα σε φως διευκολύνεται μέσω οπτικών στοιχείων που έχουν σχεδιαστεί με ακρίβεια, διευκολύνοντας τη σύζευξη του φωτός με το καλώδιο οπτικής ίνας υποδοχής (El-Hageen, Alatwi and Nabih, 2020).

### **Δέκτες**

Στην εκτεταμένη έκταση της οπτικής μετάδοσης, ο δέκτης βρίσκεται σε κομβικό σημείο. Οπλισμένος με φωτοανιχνευτές, αναλαμβάνει το επαχθές έργο της αποκρυπτογράφησης των περίπλοκων φωτεινών μοτίβων και της μετατροπής τους σε ψηφιακά αντίστοιχα. Ο συνεκτικός συγχρονισμός των μεταδιδόμενων και λαμβανόμενων μηκών κύματος εξασφαλίζει μια συνεχή επικοινωνία. Παράμετροι όπως ο ρυθμός σφάλματος bit (BER) και ο λόγος σήματος προς θόρυβο (SNR) αναδεικνύονται ως κρίσιμοι αξιολογητές, που ποσοτικοποιούν την αποτελεσματικότητα αυτής της προσπάθειας (Moroz and Davydov, 2019).

### **Παθητικές συσκευές: Συνδεσιμότητα και έλεγχος**

Στο πλαίσιο αυτού του σχολαστικά σχεδιασμένου δικτύου, οι παθητικές συσκευές κατέχουν καθοριστικό ρόλο. Αυτά τα εξαρτήματα, που δεν έχουν απαιτήσεις ενεργού ισχύος, αναλαμβάνουν την ευθύνη για τη διασύνδεση καλωδίων μέσω συνδετήρων, τη συνένωση ινών μέσω συνδέσμων και τον έλεγχο του οπτικού σήματος. Αυτή η συμφωνία των παθητικών εξαρτημάτων - ζεύκτες, φίλτρα και απομονωτές - οργανώνει

τη διαμόρφωση του οπτικού τοπίου, επιτρέποντας στα επιθυμητά σήματα να ευδοκιμήσουν, ενώ παράλληλα μετριάζει τις ανεπιθύμητες παρεμβολές (Remus Narcis Beres et al., 2016).

### **Οπτικοί ενισχυτές**

Η εξασθένηση των οπτικών σημάτων λόγω απόστασης αναδεικνύεται ως πρόκληση. Η εισαγωγή των οπτικών ενισχυτών αντιπροσωπεύει μια καίρια στρατηγική μετριασμού. Διαφορετικοί από τους αντίστοιχους ηλεκτρικούς ενισχυτές, οι οπτικοί ενισχυτές λειτουργούν στην οπτική σφαίρα, αναζωογονώντας τη φθίνουσα ενέργεια των σημάτων που βασίζονται στο φως. Αυτή η μετάβαση προαναγγέλλει μια κρίσιμη καμπή, μειώνοντας την υποβάθμιση του σήματος και αποτρέποντας τη συμφόρηση της μετάδοσης (Davenport et al., 2016).

### **Ενεργές συσκευές**

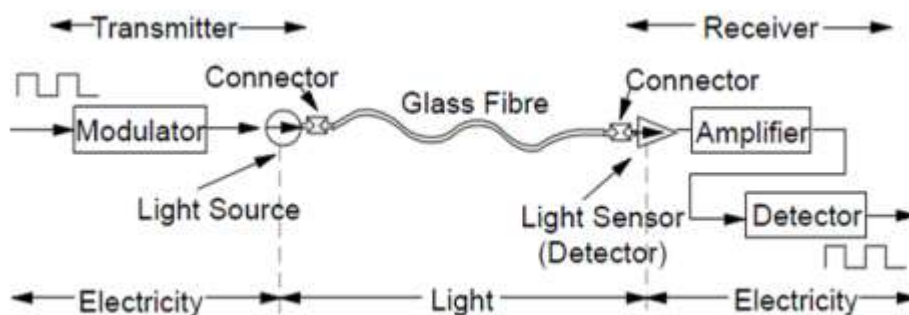
Οι ενεργές συσκευές -που τροφοδοτούνται από το σθένος του ηλεκτρισμού- αναδύονται ως καταλύτες καινοτομίας. Οι διαμορφωτές, τα φίλτρα, οι εξασθενητές και οι διακόπτες, μεταξύ άλλων, συντονίζονται με την προσαρμοστικότητα. Προσφέρουν μετασχηματιστικές δυνατότητες, επιτρέποντας τη διαμόρφωση και τον χειρισμό οπτικών σημάτων, προωθώντας έτσι τον δυναμικό έλεγχο του σήματος (Wang et al., 2021).

### **Πομποδέκτες και διακόπτες**

Οι πομποδέκτες και οι διακόπτες διεκδικούν τη θέση τους ως εννοησιμότητες πλοήγησης. Είναι ευέλικτοι στη λειτουργικότητά τους, χρησιμεύουν ταυτόχρονα ως πομποί και δέκτες σημάτων, γεφυρώνοντας τον ενδιάμεσο χώρο. Οι διακόπτες, από την άλλη πλευρά, αναδεικνύουν το ρόλο τους κατευθύνοντας τις οπτικές ροές μέσα από περίπλοκες τροχιές, εξασφαλίζοντας τη ροή των δεδομένων κατά μήκος της καθορισμένης πορείας (Chin et al., 2017).

Το βασίλειο των οπτικών ινών, μέσω του φασματικού χορού του φωτός, αποκαλύπτει ένα πεδίο συνδεσιμότητας που αψηφά τους γεωγραφικούς περιορισμούς και γεφυρώνει τα γνωστικά χάσματα. Κάθε συστατικό στοιχείο - από καλώδια οπτικών ινών, πομπούς, δέκτες, παθητικές και ενεργές συσκευές, μέχρι ενισχυτές και διακόπτες - συνεισφέρει την ξεχωριστή του χροιά σε αυτή την επιμελώς υφασμένη συμφωνία. Μέσω της

ρυθμικής κυμάτωσης του φωτός, οι οπτικές ίνες δεν προσφέρουν απλώς το δώρο της σύνδεσης, αλλά και μια εκτεταμένη προοπτική δυνατοτήτων στο δυναμικό περιβάλλον των σύγχρονων δικτύων επικοινωνίας.



**Εικόνα 1.1** Οπτική μετάδοση

### 1.3. Τύποι οπτικών ινών

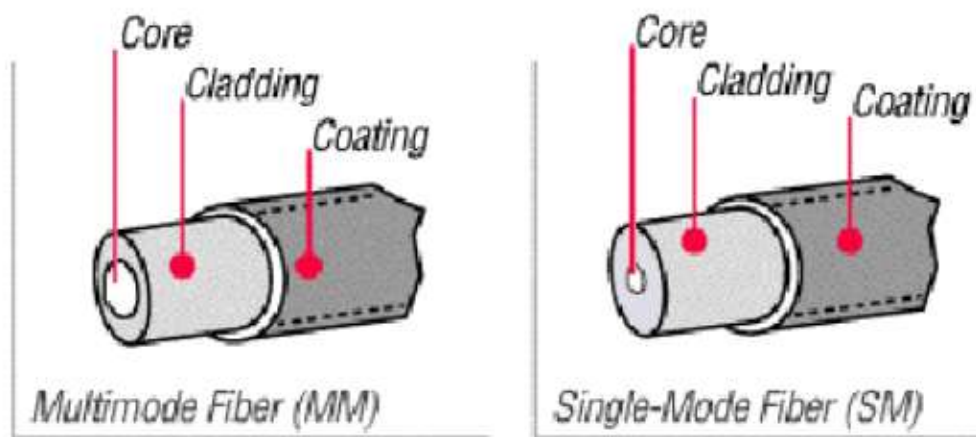
Τα θεμελιώδη συστατικά της οπτικής ίνας, ο πυρήνας και ο μανδύας, και τα δύο κατασκευασμένα από γυαλί, θέτουν τις βάσεις για την πραγματοποίηση της συνεχούς ολικής εσωτερικής ανάκλασης, ενός κομβικού φαινομένου που επιτρέπει τη διάδοση του οπτικού σήματος. Η αλληλεπίδραση αυτή συμβαίνει καθώς το φως εισέρχεται στην οπτική ίνα υπό γωνία και ταξιδεύει κατά μήκος μιας καθορισμένης διαδρομής που ονομάζεται τρόπος λειτουργίας. Ανάλογα με τον συγκεκριμένο τύπο ίνας, οι τρόποι λειτουργίας μπορεί να κυμαίνονται από μοναχικούς έως πολυάριθμους, όπου ο αριθμός των τρόπων λειτουργίας συσχετίζεται με τη διάμετρο του πυρήνα και το μήκος κύματος. Κάθε τρόπος μεταφέρει ένα ποσοστό του φωτός του εισερχόμενου σήματος. Οι οπτικές ίνες χωρίζονται σε δύο κύριες κατηγορίες: τις πολύτροπες και τις μονότροπες, καθεμία από τις οποίες αντιπροσωπεύει διακριτές αρχές λειτουργίας, χαρακτηριστικά και εφαρμογές (Raffaella Di Sante, 2015).

## **Μονότροπες ίνες**

Μια μονότροπη ίνα, η οποία χαρακτηρίζεται από το γεγονός ότι επιτρέπει τη διέλευση ενός μοναδικού μονοπατιού ή τρόπου λειτουργίας για το φως, διαθέτει μια μικροσκοπική διάμετρο πυρήνα που προσεγγίζει το επίπεδο μήκους κύματος του μεταδιδόμενου σήματος. Τυπικά, το μέγεθος του πυρήνα είναι περίπου 8,3 μm. Δεδομένων των μικροσκοπικών διαστάσεων του πυρήνα, η μετάδοση περιορίζεται σε μία μόνο αξονική διαδρομή. Αυτός ο σχεδιασμός περιορίζει το φως σε μια άμεση τροχιά, προωθώντας την ελάχιστη διασπορά σήματος. Η μονότροπη ίνα διαθέτει ανώτερη ικανότητα μεταφοράς πληροφοριών, ιδίως σε εκτεταμένες αποστάσεις, καθιστώντας την απαραίτητη σε σενάρια με αυστηρές εκτιμήσεις απώλειας σήματος και αυξημένους ρυθμούς δεδομένων. Η εφαρμογή της εκτείνεται σε περιβάλλοντα που καθιστούν αναγκαία τη μεγιστοποίηση των διαστημάτων μεταξύ των επαναληπτών/ενισχυτών. Ειδικότερα, η ικανότητα των μονότροπων ινών να διατηρούν μετάδοση δεδομένων υψηλής ταχύτητας στα 50 Gbps για αποστάσεις 100 km χωρίς ενδιάμεση ενίσχυση υπογραμμίζει την υπεροχή τους. Ο ευδιάκριτος κίτρινος χρωματισμός τους διευκολύνει την εύκολη αναγνώριση (Timo Gissibl et al., 2016).

## **Πολύτροπες ίνες**

Αντίθετα, οι πολύτροπες οπτικές ίνες, οι πρώτες που αναπτύχθηκαν εμπορικά, φιλοξενούν πολλαπλούς τρόπους οπτικής μετάδοσης. Αυτές οι ίνες έχουν σχεδιαστεί για να επιτρέπουν την ταυτόχρονη μετάδοση πολλαπλών ρυθμών ταλάντωσης (τρόπων) κατά μήκος του οπτικού αγωγού. Οι διαστάσεις του πυρήνα εκδηλώνονται συνήθως ως 50 μm και 62,5 μm. Οι εκτεταμένες διαστάσεις πυρήνα αυτών των ινών επιτρέπουν τη διακλάδωση του φωτός σε μυριάδες διαδρομές. Αυτή η εγγενής ικανότητα επιτρέπει ρυθμούς διαμόρφωσης έως και 200 Mb/s, και σε αποστάσεις μικρότερες από 100 μέτρα, το εύρος ζώνης ουσιαστικά ξεπερνά τους περιορισμούς. Οι πολύτροπες ίνες αξιοποιούνται ρεαλιστικά σε συστήματα μετάδοσης μικρών αποστάσεων, που χαρακτηρίζονται από τοπικά δίκτυα και δίκτυα πρόσβασης. Η οικονομική τους σκοπιμότητα ενισχύεται από τη συμβατότητά τους με οικονομικώς αποδοτικούς συνδέσμους και πομπούς LED, αυξάνοντας τη γοητεία τους. Διακρίνονται από την έντονη πορτοκαλί απόχρωση (Ploschner, Tomáš Tyc and Tomáš Čížmár, 2015).



**Εικόνα 1.2.** Κατηγορίες οπτικής ίνας

### **Πλεονεκτήματα και περιορισμοί των δικτύων οπτικών ινών**

Η επικράτηση της τεχνολογίας οπτικών ινών στις σύγχρονες τηλεπικοινωνίες μπορεί να αποδοθεί σε διακριτά χαρακτηριστικά που απουσίαζαν από τα προϋπάρχοντα μέσα μετάδοσης, όπως τα παραδοσιακά καλώδια χαλκού. Τα δίκτυα οπτικών ινών κυριαρχούν λόγω ενός αστερισμού πλεονεκτημάτων, που επιβάλλουν την προτίμησή τους έναντι των συμβατικών αντίστοιχων δικτύων. Τα πλεονεκτήματα αυτά μπορούν να αναλυθούν ως εξής (Chai et al., 2019):

*Υψηλό εύρος ζώνης και χαμηλή καθυστέρηση:* Τα δίκτυα οπτικών ινών διαθέτουν πρακτικά απεριόριστο εύρος ζώνης, αποδίδοντας κολοσσιαίες ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων της τάξης των Gbps. Επιπλέον, τα δίκτυα αυτά διαθέτουν χαμηλότερη καθυστέρηση κυκλικής διαδρομής σε σύγκριση με τα δορυφορικά δίκτυα, γεγονός που μεταφράζεται σε αυξημένη απόδοση δεδομένων και ισχυρές υπηρεσίες τηλεφωνίας μέσω πρωτοκόλλων IP.

*Μεγάλη απόσταση μετάδοσης:* Οι ελάχιστες απώλειες σήματος που παρουσιάζουν τα καλώδια οπτικών ινών επιτρέπουν τη μετάδοση δεδομένων σε σημαντικές αποστάσεις, χωρίς παρεμβολές.

*Ελάχιστες απαιτήσεις δημιουργίας σήματος:* Η διαρκής ικανότητα μετάδοσης των οπτικών δικτύων ελαχιστοποιεί τους απαιτούμενους αναγεννητές σήματος. Οι



εξαιρετικές ιδιότητες εξασθένησης του σήματος του γυαλιού περιορίζουν τη διασπορά, και όπου εμφανίζεται εξασθένηση, αρκεί η συνετή εφαρμογή ενισχυτών.

*Συμπαγές και ενεργειακά αποδοτικό:* Ο λεπτός συντελεστής μορφής των οπτικών καλωδίων και η χαμηλή κατανάλωση ενέργειας τα διακρίνουν από τα αντίστοιχα ηλεκτρικά καλώδια. Τα οπτικά συστήματα μεταφέρουν σημαντικά περισσότερα δεδομένα σε μικρότερα και ελαφρύτερα καλώδια.

*Οικονομική κατασκευή:* Τα καλώδια οπτικών ινών, δεδομένης της οικονομικής τους αποδοτικότητας και της χαμηλότερης δαπάνης υλικών σε σχέση με τα καλώδια χαλκού, εισάγουν την οικονομική βιωσιμότητα για τους παρόχους υπηρεσιών, η οποία κατά συνέπεια ωφελεί τους καταναλωτές.

*Ενισχυμένη ασφάλεια:* Τα οπτικά δίκτυα, απρόσβλητα σε θέματα όπως οι σπινθήρες και τα φαινόμενα υψηλής τάσης, αποτελούν την επιτομή της ασφάλειας. Η στιβαρή κατασκευή των οπτικών καλωδίων ελαχιστοποιεί τους κινδύνους εξωτερικών ζημιών, αυξάνοντας την ασφάλεια.

*Ενισχυμένη ποιότητα σήματος:* Τα δίκτυα οπτικών ινών διατηρούν την ακεραιότητα των δεδομένων με ελάχιστη αλλοίωση του σήματος, εξασφαλίζοντας επικοινωνία υψηλής ποιότητας. Τα οπτικά σήματα παραμένουν περιορισμένα εντός της ίνας, προσφέροντας αυξημένη ασφάλεια δεδομένων, ένα κρίσιμο χαρακτηριστικό για ευαίσθητες εφαρμογές.

Μερικά από τα μειονεκτήματα των οπτικών ινών είναι (Prucnal, 2018):

*Κόστος εξαρτημάτων:* Η εκκολαπτόμενη φύση της τεχνολογίας των οπτικών ινών συνεπάγεται αυξημένο κόστος για ορισμένα εξαρτήματα, όπως οι πομποί και οι δέκτες.

*Προκλήσεις τυποποίησης:* Η σχετική καινοτομία των οπτικών δικτύων μεταφράζεται σε περιορισμένη τυποποίηση, η οποία μπορεί να εμποδίσει την απρόσκοπτη ενσωμάτωση.

*Τεχνική πολυπλοκότητα:* Η ένωση και η συγκόλληση οπτικών καλωδίων απαιτούν εξειδικευμένο εξοπλισμό και ακρίβεια για την αποφυγή απώλειας σήματος.

*Περιορισμοί κάμψης καλωδίων:* Η εξάρτηση των οπτικών ινών από την ολική εσωτερική ανάκλαση επιβάλλει αυστηρά όρια κάμψης των καλωδίων για την αποφυγή διαρροής σήματος πέραν μιας κρίσιμης γωνίας.

Συνοψίζοντας, οι οπτικές ίνες διανύουν μια διαδρομή φορτωμένη με εγγενή πλεονεκτήματα και πραγματιστικούς περιορισμούς. Η εξέλιξή τους υπογραμμίζει την κεντρική τους θέση στα σύγχρονα δίκτυα επικοινωνίας, υποστηρίζοντας τη μετάδοση δεδομένων σε τεράστιες αποστάσεις με εξαιρετική αξιοπιστία και αποτελεσματικότητα.

#### **1.4 Υπηρεσίες που προσφέρονται στα δίκτυα οπτικών ινών**

Στο σύγχρονο ψηφιακό τοπίο, η διάδοση των δικτύων οπτικών ινών έχει προκαλέσει επανάσταση στο φάσμα των υπηρεσιών και των εφαρμογών που μπορούν να παρέχονται απρόσκοπτα στους χρήστες. Αυτή η μετασχηματιστική ικανότητα αξιοποιείται σε διάφορους τομείς, που εκτείνονται από τις αστικές μητροπόλεις έως τις ημιαστικές ενδοχώρες. Η υποδομή οπτικών ινών χρησιμεύει ως ραχοκοκαλιά και μεταφράζεται αποτελεσματικά σε μια πληθώρα υπηρεσιών που ανταποκρίνονται στις αυξανόμενες απαιτήσεις της σύγχρονης κοινωνίας.

##### **Οραματισμός του φάσματος υπηρεσιών**

Η ανάπτυξη δικτύων οπτικών ινών εγκαινιάζει ένα πολύπλευρο οικοσύστημα υπηρεσιών που ξεπερνά τα όρια των παραδοσιακών προτύπων επικοινωνίας. Με την τεχνολογική υπεροχή των οπτικών ινών, οι υπηρεσίες δεν περιορίζονται πλέον στη φωνητική επικοινωνία ή την επικοινωνία μέσω κειμένου- καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα που περιλαμβάνει ροή βίντεο υψηλής ευκρίνειας, καθηλωτικές εμπειρίες εικονικής πραγματικότητας, υπολογιστικό νέφος, συνδεσιμότητα IoT, τηλεϊατρική και πολλά άλλα (Durairajan et al., 2015). Οι ακόλουθες ενότητες αναλύουν ορισμένες από τις πρωταρχικές υπηρεσίες που διευκολύνουν τα δίκτυα οπτικών ινών:

##### **1. Ροή βίντεο υψηλής ευκρίνειας και ψυχαγωγία**

Τα δίκτυα οπτικών ινών χρησιμεύουν ως αγωγοί για τη ροή βίντεο υψηλής ευκρίνειας, επιτρέποντας στους χρήστες να απολαμβάνουν απρόσκοπτες εμπειρίες ψυχαγωγίας χωρίς buffer. Από τη ροή ταινιών και τηλεοπτικών σειρών έως τις αθλητικές μεταδόσεις σε πραγματικό χρόνο, οι οπτικές ίνες διευκολύνουν την παροχή περιεχομένου υψηλής ποιότητας τόσο σε αστικές όσο και σε ημιαστικές περιοχές. Η

υπηρεσία αυτή ανταποκρίνεται σε μεγάλο βαθμό στις ανάγκες των σύγχρονων χρηστών που απαιτούν άμεση ικανοποίηση και καθηλωτικές εμπειρίες θέασης (Nam et al., 2014).

## 2. Υπολογιστικό νέφος και αποθήκευση δεδομένων

Η έλευση του υπολογιστικού νέφους έφερε επανάσταση στον τρόπο με τον οποίο οι επιχειρήσεις και οι ιδιώτες διαχειρίζονται και έχουν πρόσβαση σε δεδομένα. Τα δίκτυα οπτικών ινών αποτελούν τη ραχοκοκαλιά της υποδομής του υπολογιστικού νέφους, εξασφαλίζοντας την ταχεία μεταφορά δεδομένων μεταξύ των χρηστών και των απομακρυσμένων κέντρων δεδομένων. Η προσβασιμότητα των εφαρμογών και της αποθήκευσης που βασίζονται στο υπολογιστικό νέφος δίνει τη δυνατότητα στους χρήστες να συνεργάζονται απρόσκοπτα, να έχουν πρόσβαση σε αρχεία από οποιαδήποτε τοποθεσία και να αξιοποιούν υπολογιστικούς πόρους χωρίς τους περιορισμούς του φυσικού υλικού (Liu et al., 2020).

## 3. Συνδεσιμότητα στο Διαδίκτυο των πραγμάτων (IoT)

Το εκρηκτικό τοπίο του IoT επιβάλλει μια αξιόπιστη υποδομή δικτύου χαμηλής καθυστέρησης για τη διευκόλυνση της απρόσκοπτης ανταλλαγής δεδομένων μεταξύ διασυνδεδεμένων συσκευών. Τα δίκτυα οπτικών ινών παρέχουν το απαιτούμενο εύρος ζώνης και τη χαμηλή καθυστέρηση που απαιτούνται για την επικοινωνία σε πραγματικό χρόνο μεταξύ των συσκευών IoT. Η υπηρεσία αυτή έχει τεράστιες δυνατότητες τόσο στις αστικές όσο και στις ημιαστικές περιοχές, διευκολύνοντας τις πρωτοβουλίες έξυπνων πόλεων, τη γεωργία ακριβείας και την αποτελεσματική διαχείριση των υπηρεσιών κοινής ωφέλειας (Balaji, 2021).

## 4. Λύσεις στην τηλεϊατρική και στην ηλεκτρονική υγεία

Στον τομέα της υγειονομικής περίθαλψης, τα δίκτυα οπτικών ινών υπερβαίνουν τα γεωγραφικά εμπόδια, επιτρέποντας την παροχή υπηρεσιών τηλεϊατρικής. Τα αστικά κέντρα μπορούν να αξιοποιήσουν αυτή την τεχνολογία για να προσφέρουν εξ αποστάσεως διαβουλεύσεις και διαγνωστικές εξετάσεις, ενώ οι ημιαστικές περιοχές αποκτούν πρόσβαση σε εξειδικευμένη ιατρική εμπειρογνωμοσύνη χωρίς την ανάγκη φυσικής μετακίνησης. Η υπηρεσία αυτή δίνει τη δυνατότητα στους επαγγελματίες υγείας να παρέχουν έγκαιρες παρεμβάσεις, ιδίως σε περιοχές με περιορισμένους ιατρικούς πόρους (Nepal et al., 2014).

## 5. Εξ αποστάσεως μάθηση και πλατφόρμες ηλεκτρονικής μάθησης

Τα δίκτυα οπτικών ινών διευρύνουν τους ορίζοντες της εκπαίδευσης, επιτρέποντας την παροχή υψηλής ποιότητας ηλεκτρονικών μαθημάτων και προγραμμάτων εξ αποστάσεως εκπαίδευσης. Τα αστικά κέντρα αξιοποιούν την υπηρεσία αυτή για να καλύψουν ποικίλες εκπαιδευτικές ανάγκες, ενώ οι ημιαστικές περιοχές επωφελούνται από την ισότιμη πρόσβαση σε εκπαιδευτικούς πόρους. Οι πλατφόρμες ηλεκτρονικής μάθησης προωθούν τη συνεχή ανάπτυξη δεξιοτήτων, την επαγγελματική ανάπτυξη και τη διάδοση της γνώσης, ανεξάρτητα από τη γεωγραφική θέση (Ayoub Kafyulilo, 2015).

### **Ικανοποίηση διαφορετικών αναγκών σε αστικές και ημιαστικές περιοχές**

Το ολοκληρωμένο φάσμα υπηρεσιών που προσφέρουν τα δίκτυα οπτικών ινών εναρμονίζεται με τις ξεχωριστές ανάγκες τόσο των αστικών όσο και των ημιαστικών περιοχών. Στα αστικά περιβάλλοντα, ο πολλαπλασιασμός των υπηρεσιών που κυμαίνονται από την ψυχαγωγία υψηλής ευκρίνειας έως τις εφαρμογές που βασίζονται στο υπολογιστικό νέφος ενισχύει τον ψηφιακό τρόπο ζωής ενός πληθυσμού που χαρακτηρίζεται από απαιτήσεις συνδεσιμότητας και δυναμικές προσδοκίες. Τα αστικά κέντρα απαιτούν ταχεία πρόσβαση σε πληροφορίες, ψυχαγωγία και πλατφόρμες συνεργασίας, και οι οπτικές ίνες ικανοποιούν άριστα αυτές τις απαιτήσεις.

Στις ημιαστικές περιοχές, τα δίκτυα οπτικών ινών επιφέρουν μετασχηματιστικές αλλαγές γεφυρώνοντας το ψηφιακό χάσμα. Οι περιοχές αυτές, που συχνά δεν εξυπηρετούνται επαρκώς από τις παραδοσιακές υποδομές επικοινωνίας, επωφελούνται από τη συνδεσιμότητα υψηλής ταχύτητας που ανοίγει δρόμους προς βασικές υπηρεσίες. Η εξ αποστάσεως εκπαίδευση και οι παρεμβάσεις τηλεϊατρικής, που επιτρέπονται από τις οπτικές ίνες, ενισχύουν τα αποτελέσματα της εκπαίδευσης και της υγειονομικής περίθαλψης, υπερβαίνοντας τους περιορισμούς που επιβάλλει η γεωγραφία. Η βελτιωμένη πρόσβαση σε πόρους που βασίζονται στο νέφος δίνει επίσης τη δυνατότητα στις τοπικές επιχειρήσεις να ανταγωνίζονται σε ευρύτερη κλίμακα και να τονώνουν την οικονομική ανάπτυξη (Nikolaos Kolydakis and Ioannis Tomkos, 2014).

Συμπερασματικά, η έλευση των δικτύων οπτικών ινών αυξάνει το ρεπερτόριο των υπηρεσιών που είναι διαθέσιμες στους χρήστες σε διαφορετικά τοπία. Η ικανότητα του δικτύου να ανταποκρίνεται στις περίπλοκες απαιτήσεις των αστικών κόμβων, ενώ

ταυτόχρονα αντιμετωπίζει τις μοναδικές απαιτήσεις των ημιαστικών περιοχών, υπογραμμίζει τις μετασχηματιστικές δυνατότητές του. Η ψυχαγωγία υψηλής ευκρίνειας, η υπολογιστική νέφους, η συνδεσιμότητα IoT, η τηλεϊατρική και η εξ αποστάσεως εκπαίδευση συγκλίνουν για να δημιουργήσουν ένα ολοκληρωμένο μωσαϊκό υπηρεσιών που εμπλουτίζουν τις ζωές, ενισχύουν τις βιομηχανίες και διαμορφώνουν το περίγραμμα της ψηφιακής εποχής. Η απρόσκοπτη αλληλεπίδραση μεταξύ της τεχνολογίας και των κοινωνικών αναγκών, ενορχηστρωμένη από τα δίκτυα οπτικών ινών, προαναγγέλλει ένα μέλλον που χαρακτηρίζεται από πρωτοφανή συνδεσιμότητα και προσβασιμότητα.

### 1.5 Εγκατάσταση του εξοπλισμού οπτικών ινών

Η εγκατάσταση του εξοπλισμού οπτικών ινών περιλαμβάνει διάφορα στάδια, συμπεριλαμβανομένης της τοποθέτησης καλωδίων, του τερματισμού και της σύνδεσης. Παρακάτω αναλύονται τα τρία στάδια (Maria et al., 2022):

#### *Τοποθέτηση καλωδίων:*

Η πόντιση καλωδίων είναι ένα κρίσιμο μέρος της διαδικασίας εγκατάστασης οπτικών ινών. Υπάρχουν δύο κοινές μέθοδοι για την τοποθέτηση καλωδίων: η εναέρια εγκατάσταση και η εγκατάσταση σε αγωγούς. Τα εναέρια καλώδια αναρτώνται μεταξύ στύλων στήριξης, ενώ τα καλώδια αγωγών εγκαθίστανται μέσα σε προστατευτικούς αγωγούς. Τα εναέρια καλώδια διαθέτουν συχνά ένα ενισχυτικό σύρμα για τη στήριξη του καλωδίου δεδομένων και την αποφυγή της χαλάρωσης. Τα καλώδια αγωγών, από την άλλη πλευρά, παρέχουν πρόσθετη φυσική προστασία και διευκολύνουν την ευκολότερη πρόσβαση και συντήρηση. Οι συγκεκριμένες τεχνικές και οι εκτιμήσεις για την τοποθέτηση καλωδίων μπορεί να διαφέρουν ανάλογα με το περιβάλλον και τις απαιτήσεις της εγκατάστασης.

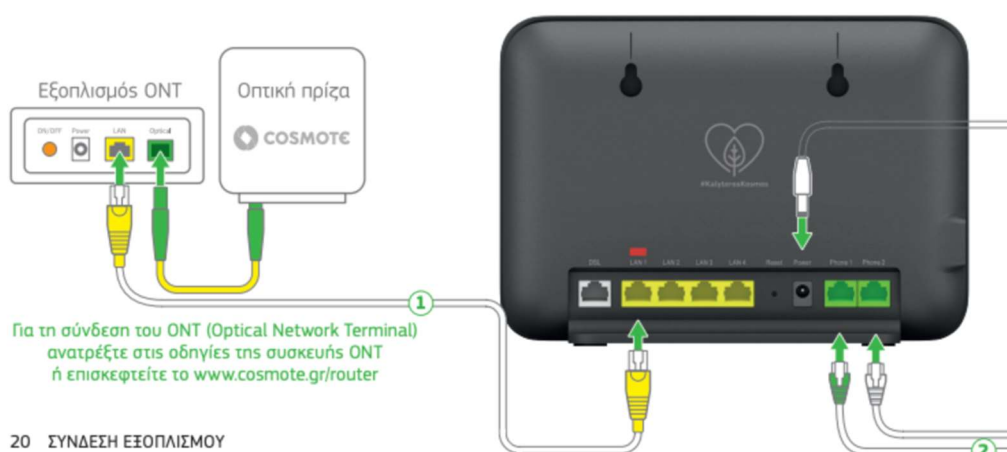
#### *Τερματισμός:*

Ο τερματισμός περιλαμβάνει τη σύνδεση των καλωδίων οπτικών ινών με τις απαραίτητες συσκευές και εξαρτήματα. Στο πλαίσιο των παρεχόμενων εγγράφων, ο τερματισμός περιλαμβάνει τη χρήση εργαλείων όπως ο οπτικός εντοπιστής σφαλμάτων (Visual Fault Locator - VFL) και ο μετρητής οπτικής ισχύος (Optical Power Meter -

OPM). Ο VFL χρησιμοποιείται για την ανίχνευση μακροκαμπυλότητας σε καλώδια εσωτερικού χώρου. Η μακροκάμψη αναφέρεται στην κάμψη του καλωδίου οπτικών ινών πέραν της καθορισμένης ακτίνας κάμψης, η οποία μπορεί να προκαλέσει στρέβλωση του φωτός και να επηρεάσει τη μετάδοση. Το VFL εκπέμπει ένα κόκκινο φως που βοηθά στον εντοπισμό της μακροκάμψης γρήγορα και εύκολα. Το OPM, από την άλλη πλευρά, χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της εξασθένησης των καλωδίων οπτικών ινών. Η εξασθένηση αναφέρεται στην απώλεια της ισχύος του σήματος καθώς αυτό ταξιδεύει μέσω των καλωδίων. Το OPM βοηθά στον προσδιορισμό των τιμών εισόδου και εξόδου στο σχεδιασμό Fiber To The Home (FTTH) και στον εντοπισμό τυχόν προβλημάτων εξασθένησης (Εικ. 1.3).

*Σύνδεση:*

Η σύνδεση είναι το τελικό βήμα στη διαδικασία εγκατάστασης, όπου τα καλώδια οπτικών ινών ενώνονται μεταξύ τους ή συνδέονται με άλλα εξαρτήματα. Η συγκόλληση με σύντηξη είναι μια κοινή μέθοδος που χρησιμοποιείται για τη σύνδεση των καλωδίων οπτικών ινών μεταξύ τους. Περιλαμβάνει την ευθυγράμμιση και τη σύντηξη των άκρων των ινών με τη χρήση θερμότητας, δημιουργώντας μια συνεχή οπτική διαδρομή. Μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν παθητικοί διαχωριστές για τη διαίρεση του οπτικού σήματος σε πολλαπλές ίνες για διανομή. Οι συγκεκριμένες τεχνικές και τα εξαρτήματα που χρησιμοποιούνται για τη σύνδεση μπορεί να διαφέρουν ανάλογα με το σχεδιασμό και τις απαιτήσεις του δικτύου οπτικών ινών.



**Εικόνα 1.3** Συνδεσμολογία Router μέσω οπτικών ινών (FTTH)

## 1.6 Υλικά που χρησιμοποιούνται στα δίκτυα οπτικών ινών

Τα δίκτυα οπτικών ινών βασίζονται σε μια ποικιλία υλικών για την αποτελεσματική και αξιόπιστη επικοινωνία. Παρακάτω περιγράφονται τα βασικά υλικά που χρησιμοποιούνται στα δίκτυα οπτικών ινών, συμπεριλαμβανομένων των καλωδίων οπτικών ινών, των αισθητήρων και των πολυπλεκτών.

Τα καλώδια οπτικών ινών αποτελούν τη βάση των δικτύων οπτικών ινών. Έχουν σχεδιαστεί για να μεταδίδουν σήματα φωτός σε μεγάλες αποστάσεις με ελάχιστες απώλειες. Η κατασκευή των καλωδίων οπτικών ινών περιλαμβάνει διάφορα στρώματα. Στον πυρήνα, ο οποίος είναι κατασκευασμένος από γυαλί πυριτίου υψηλής καθαρότητας, ταξιδεύουν τα φωτεινά σήματα. Τον πυρήνα περιβάλλει το περίβλημα, το οποίο έχει χαμηλότερο δείκτη διάθλασης για να διασφαλίζει ότι τα φωτεινά σήματα παραμένουν εντός του πυρήνα. Τέλος, το εξωτερικό στρώμα είναι το προστατευτικό περίβλημα, το οποίο παρέχει μηχανική αντοχή και προστατεύει το καλώδιο από εξωτερικούς παράγοντες, όπως η υγρασία και η φυσική φθορά. Τα καλώδια οπτικών ινών διατίθενται σε διάφορους τύπους, όπως μονότροπου και πολύτροπου, ανάλογα με τις ειδικές απαιτήσεις του δικτύου (Elliott et al., 2002).

Εκτός από τα καλώδια οπτικών ινών, στα δίκτυα οπτικών ινών χρησιμοποιούνται εξειδικευμένοι αισθητήρες για την παρακολούθηση και τη συντήρηση του δικτύου. Αυτοί οι αισθητήρες χρησιμοποιούν τις ιδιότητες του φωτός για την ανίχνευση και τη μέτρηση διαφόρων παραμέτρων. Για παράδειγμα, οι μετρητές οπτικής ισχύος χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της ισχύος των φωτεινών σημάτων στο δίκτυο. Οι οπτικοί ανακλαστήρες χρονικού πεδίου (OTDR) χρησιμοποιούνται για τον εντοπισμό των βλαβών ή τον τραυματισμό των καλωδίων των οπτικών ινών στέλνοντας έναν παλμό φωτός και μετρώντας τα ανακλώμενα σήματα. Τα πλέγματα Bragg (FBG) χρησιμοποιούνται ως αισθητήρες για τη μέτρηση παραμέτρων όπως η θερμοκρασία και η τάση στο δίκτυο (Allwood et al., 2016).

Τέλος, οι πολυπλέκτες χρησιμοποιούνται στα δίκτυα οπτικών ινών για την αύξηση της χωρητικότητας δεδομένων και της αποδοτικότητας του δικτύου. Μια συχνά χρησιμοποιούμενη τεχνική είναι η πολυπλεξία διαίρεσης μήκους κύματος (WDM), η οποία επιτρέπει την ταυτόχρονη μετάδοση πολλαπλών σημάτων διαφορετικού μήκους κύματος μέσω μιας ίνας. Η WDM επιτρέπει στο δίκτυο να μεταφέρει πολλαπλές ροές

δεδομένων, αυξάνοντας τη συνολική χωρητικότητα του δικτύου. Μια άλλη τεχνική είναι η πολυπλεξία διαίρεσης χρόνου (TDM), όπου πολλαπλά σήματα μεταδίδονται σε διαφορετικές χρονοθυρίδες. Η TDM χρησιμοποιείται συχνά στα σύγχρονα οπτικά δίκτυα (SONET) και στα συστήματα σύγχρονης ψηφιακής ιεραρχίας (SDH). Αυτές οι τεχνικές πολυπλεξίας είναι απαραίτητες για τη μεγιστοποίηση της χρήσης της υποδομής του δικτύου και την κάλυψη της αυξανόμενης ζήτησης για μετάδοση δεδομένων (Eldada, 2004).



## Κεφάλαιο 2: Κάλυψη δικτύου σε αστικές περιοχές

### 2.1 Το μοντέλο OSI (Open Systems Interconnection)

Το μοντέλο OSI (Open Systems Interconnection), το οποίο αναπτύχθηκε από τον Διεθνή Οργανισμό Τυποποίησης (ISO), χρησιμεύει ως ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο για την κατανόηση και την εφαρμογή πρωτοκόλλων επικοινωνίας δικτύου. Οριοθετεί επτά διακριτά επίπεδα, το καθένα με συγκεκριμένες λειτουργίες και αρμοδιότητες, διευκολύνοντας την τυποποιημένη επικοινωνία μεταξύ διαφορετικών συστημάτων υπολογιστών (Zhu et al., 2017). Αυτό το μοντέλο βοηθάει στη δημιουργία σχεδίου για την κάλυψη δικτύου σε αστικές περιοχές. Παρακάτω φαίνονται τα επίπεδα που παρουσιάζει το συγκεκριμένο μοντέλο:

#### 1. Φυσικό επίπεδο (*Physical Layer*):

Υπεύθυνο για τη μετάδοση ακατέργαστων bits μέσω φυσικών μέσων, ορίζει χαρακτηριστικά όπως επίπεδα τάσης, σηματοδότηση και μεθόδους συγχρονισμού για τη μεταφορά δεδομένων.

#### 2. Επίπεδο ζεύξης δεδομένων (*Data Link Layer*):

Λειτουργεί σχετικά με τη διαμόρφωση, την ανίχνευση σφαλμάτων και τον έλεγχο ροής. Ενθυλακώνει τα δεδομένα από το επίπεδο δικτύου σε πλαίσια, χειρίζεται τη διευθυνσιοδότηση και εκτελεί την ανίχνευση και διόρθωση σφαλμάτων.

#### 3. Επίπεδο δικτύου:

Χειρίζεται τη δρομολόγηση πακέτων, τη διευθυνσιοδότηση και τον έλεγχο συμφόρησης. Δημιουργεί, διατηρεί και τερματίζει συνδέσεις μεταξύ των κόμβων και είναι υπεύθυνο για τη λογική διευθυνσιοδότηση και τη δρομολόγηση των πακέτων.

#### 4. Επίπεδο μεταφοράς:

Εξασφαλίζει την αξιοπιστία της επικοινωνίας από άκρο σε άκρο. Παρέχει αποκατάσταση σφαλμάτων, έλεγχο ροής και τμηματοποίηση και επανασυναρμολόγηση των δεδομένων. Προσφέρει υπηρεσίες όπως η αναγνώριση, η ανίχνευση σφαλμάτων και η πολύπλεξη.

##### *5. Επίπεδο συνόδου:*

Διαχειρίζεται συνεδρίες ή συνδέσεις μεταξύ οντοτήτων του δικτύου. Καθιερώνει, διατηρεί και συγχρονίζει τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ εφαρμογών, προσφέροντας υπηρεσίες για έλεγχο διαλόγου, διαχείριση συνόδου και συγχρονισμό.

##### *6. Επίπεδο παρουσίασης:*

Επικεντρώνεται στην αναπαράσταση δεδομένων, τη μετάφραση και την κρυπτογράφηση. Χειρίζεται μορφές δεδομένων, κρυπτογράφηση, συμπίεση και διασφαλίζει ότι τα δεδομένα που ανταλλάσσονται μεταξύ των εφαρμογών είναι αναγνώσιμα και κατανοητά.

##### *7. Επίπεδο εφαρμογής:*

Το ανώτερο επίπεδο αλληλεπιδρά άμεσα με τις εφαρμογές των χρηστών. Παρέχει υπηρεσίες ειδικά για τις ανάγκες των χρηστών, όπως μεταφορά αρχείων, υπηρεσίες ηλεκτρονικού ταχυδρομείου και άλλες λειτουργίες υψηλού επιπέδου. Διαχειρίζεται τον έλεγχο ταυτότητας, την εξουσιοδότηση και τις λειτουργίες τελικού χρήστη.

Η πολυεπίπεδη προσέγγιση του μοντέλου OSI προσφέρει αρθρωτότητα και αφαίρεση, επιτρέποντας αλλαγές σε ένα επίπεδο χωρίς να επηρεάζονται τα υπόλοιπα. Προωθεί τη διαλειτουργικότητα μεταξύ διαφορετικών συστημάτων με τον καθορισμό τυποποιημένων διεπαφών και πρωτοκόλλων επικοινωνίας. Η σημασία αυτού του μοντέλου έγκειται στο ρόλο του ως εννοιολογικού πλαισίου για το σχεδιασμό, την κατανόηση και την αντιμετώπιση προβλημάτων σε αρχιτεκτονικές δικτύων. Παρά το γεγονός ότι είναι εννοιολογικό, το μοντέλο OSI καθοδηγεί την ανάπτυξη προτύπων και πρωτοκόλλων δικτύου, επιτρέποντας την απρόσκοπτη επικοινωνία σε ετερογενή δίκτυα, ενώ τονίζει τη σημασία των ανοικτών, τυποποιημένων πρωτοκόλλων επικοινωνίας (Zhu et al., 2017).

Στις αστικές περιοχές, η πολυεπίπεδη προσέγγιση του μοντέλου OSI αποδεικνύεται πολύτιμη για τη διαχείριση των περιπλοκών των ιδιαίτερα πυκνών και ποικίλων δικτύων. Το φυσικό στρώμα είναι ζωτικής σημασίας, εξασφαλίζοντας ισχυρές διαμορφώσεις υλικού για την εξυπηρέτηση συνδέσεων υψηλής ταχύτητας που απαιτούν οι πυκνοκατοικημένες περιοχές. Σε αυτό το περιβάλλον, τα στρώματα σύνδεσης δεδομένων και δικτύου διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στη διαχείριση της

κυκλοφορίας, στον έλεγχο σφαλμάτων και στην αποτελεσματική δρομολόγηση πακέτων. Τα επίπεδα αυτά διευκολύνουν την ομαλή μετάδοση δεδομένων μεταξύ διαφόρων οντοτήτων, όπως κυβερνητικά γραφεία, επιχειρήσεις, εκπαιδευτικά ιδρύματα και κάτοικοι. Επιπλέον, η αξιοπιστία του επιπέδου μεταφοράς εξασφαλίζει επικοινωνία χωρίς σφάλματα από άκρο σε άκρο για κρίσιμες υπηρεσίες, όπως οικονομικές συναλλαγές, συστήματα αντιμετώπισης έκτακτης ανάγκης και εφαρμογές υψηλού εύρους ζώνης, όπως η ροή βίντεο και τα μέσα κοινωνικής δικτύωσης (Awang et al., 2017).

## **2.2 Ανάλυση της υποδομής πύργων κινητής τηλεφωνίας και κεραιών σε αστικές περιοχές**

Η υποδομή των πύργων και των κεραιών κυψέλης παίζει καθοριστικό ρόλο στην παροχή κάλυψης δικτύου σε αστικές περιοχές. Η παρούσα ανάλυση επικεντρώνεται στις εκτιμήσεις σχεδιασμού, τις οπτικές επιπτώσεις και τις προκλήσεις που σχετίζονται με την εγκατάσταση πύργων και κεραιών κυψέλης σε πυκνοκατοικημένες περιοχές.

Ο φυσικός σχεδιασμός της υποδομής πύργων κυψέλης σε αστικές περιοχές πρέπει να λαμβάνει υπόψη τα χαρακτηριστικά του τοπικού περιβάλλοντος. Αυτό περιλαμβάνει τα αρχιτεκτονικά θέματα, τη συμμόρφωση με τους κανονισμούς σε προστατευόμενες περιοχές και την ευαισθησία απέναντι στη γύρω κοινότητα. Έχουν χρησιμοποιηθεί μη τυποποιημένα σχέδια, όπως πύργοι κεραιών με "ψεύτικα δέντρα" ή καμπαναριά εκκλησιών που έχουν σχεδιαστεί για να φιλοξενούν κεραίες σταθμών βάσης, για να εναρμονιστεί η υποδομή με το περιβάλλον. Στόχος είναι η επίτευξη οπτικής συμβατότητας και η ελαχιστοποίηση των επιπτώσεων στην αισθητική της περιοχής (Marcus, 2018, σ. 1).

Ο οπτικός αντίκτυπος των πύργων κινητής τηλεφωνίας και των κεραιών στα αστικά τοπία αποτελεί σημαντική ανησυχία για τις τοπικές κοινότητες και τους ρυθμιστικούς φορείς. Οι εγκαταστάσεις τοποθετημένες σε στύλους κοινής ωφέλειας ή σε μικρούς πύργους/στύλους σε χαμηλότερο ύψος γίνονται όλο και πιο συνηθισμένες. Ωστόσο, ο φυσικός σχεδιασμός αυτών των εγκαταστάσεων θα πρέπει να στοχεύει στην οπτική συμβατότητα με το περιβάλλον. Η προσέγγιση των σχεδίων σταθμών βάσης με γνώμονα την κατά προσέγγιση οπτική συμβατότητα μπορεί να διευκολύνει τη

διαδικασία έγκρισης από τις τοπικές κυβερνήσεις και να μετριάσει τις πιθανές αντιδράσεις της κοινότητας (Marcus, 2018, σ. 2).

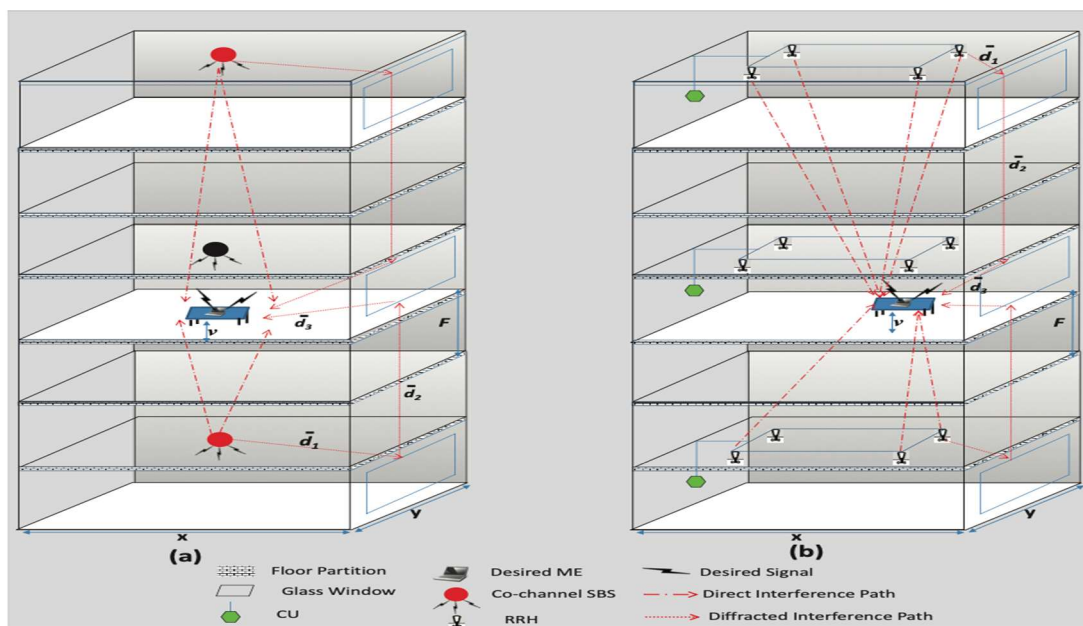
### 2.3 Συστήματα καταναμημένων κεραιών (DAS)

Οι μικρές κυψέλες και τα συστήματα καταναμημένων κεραιών (DAS) είναι δύο πολλά υποσχόμενες τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται σε αστικές περιοχές για την ενίσχυση των δυνατοτήτων κινητών επικοινωνιών. Σε αστικές περιοχές με μεγάλο αριθμό χρηστών, η παροχή αξιόπιστων επιδόσεων του συστήματος και υψηλών ρυθμών δεδομένων μπορεί να αποτελέσει πρόκληση. Οι μικρές κυψέλες είναι σταθμοί βάσης κυψελοειδούς δικτύου χαμηλής ισχύος και μικρής εμβέλειας που αναπτύσσονται εντός κτιρίων. Κάθε σταθμός βάσης μικρής κυψέλης (SBS) χρησιμεύει ως μοναδική φυσική κυψέλη, αλλά συχνά απαιτούνται πολλαπλοί SBS για την υποστήριξη μεγάλου αριθμού χρηστών. Η επαναχρησιμοποίηση συχνότητας χρησιμοποιείται για τη μεγιστοποίηση της χρήσης του διαθέσιμου φάσματος. Ωστόσο, η επαναχρησιμοποίηση συχνοτήτων εισάγει παρεμβολές στο κανάλι, οι οποίες μπορούν να περιορίσουν την απόδοση του συστήματος, να μειώσουν την αξιοπιστία και να μειώσουν τους μέγιστους ρυθμούς μετάδοσης και τον αριθμό των υποστηριζόμενων χρηστών.

Τα συστήματα καταναμημένων κεραιών (DAS) είναι μια άλλη τεχνολογία που χρησιμοποιείται σε αστικές περιοχές για τη βελτίωση της απόδοσης του συστήματος. Στο DAS εσωτερικών χώρων, οι απομακρυσμένες ραδιοκεφαλές (RRH) αναπτύσσονται σε διάφορους ορόφους εντός ενός κτιρίου. Σε αντίθεση με τα SBS εσωτερικού χώρου, όπου όλες οι κεραιές υπηρεσίας βρίσκονται σε μια συμπαγή περιοχή, οι RRHs στα DAS εσωτερικού χώρου είναι γεωγραφικά καταναμημένες. Αυτή η κατανομή μειώνει αποτελεσματικά την απόσταση μετάδοσης μεταξύ του πομπού και του δέκτη, μειώνοντας τις απώλειες διαδρομής, την ισχύ εκπομπής και τις παρεμβολές στο ίδιο κανάλι. Η εσωτερική DAS είναι ιδιαίτερα επωφελής για τον κινητό εξοπλισμό (ME) κοντά στην άκρη μιας κυψέλης, καθώς βελτιώνει την κάλυψη και την ποιότητα του σήματος.

Στις αστικές περιοχές, τόσο οι μικρές κυψέλες όσο και η DAS αναπτύσσονται για την αντιμετώπιση των προκλήσεων της υψηλής πυκνότητας χρηστών και της πυκνότητας της επικοινωνιακής κίνησης. Οι μικρές κυψέλες παρέχουν περιορισμένη κάλυψη και χωρητικότητα εντός των κτιρίων, ενώ η DAS επεκτείνει την κάλυψη και βελτιώνει την

απόδοση του συστήματος σε πολλούς ορόφους. Αυτές οι τεχνολογίες επιτρέπουν μεταδόσεις υψηλού ρυθμού δεδομένων για κινητούς χρήστες που βρίσκονται μέσα σε κτίρια. Ωστόσο, είναι σημαντικό να σχεδιάζεται και να αναλύεται προσεκτικά η απόδοση αυτών των συστημάτων, λαμβάνοντας υπόψη παράγοντες όπως οι αποστάσεις επαναχρησιμοποίησης, οι απώλειες διαδρομής, οι απώλειες διείσδυσης και οι ομοκαναλικές παρεμβολές, ώστε να διασφαλίζεται η βέλτιστη απόδοση σε αστικές περιοχές (Εικ. 2.1) (Alade & Ahmed, 2019).



**Εικόνα 2.1.** (α) Εσωτερικό SBS με επαναχρησιμοποίηση συχνότητας. (β) Εσωτερική DAS με επαναχρησιμοποίηση συχνότητας

## 2.4 Wi-Fi hotspots

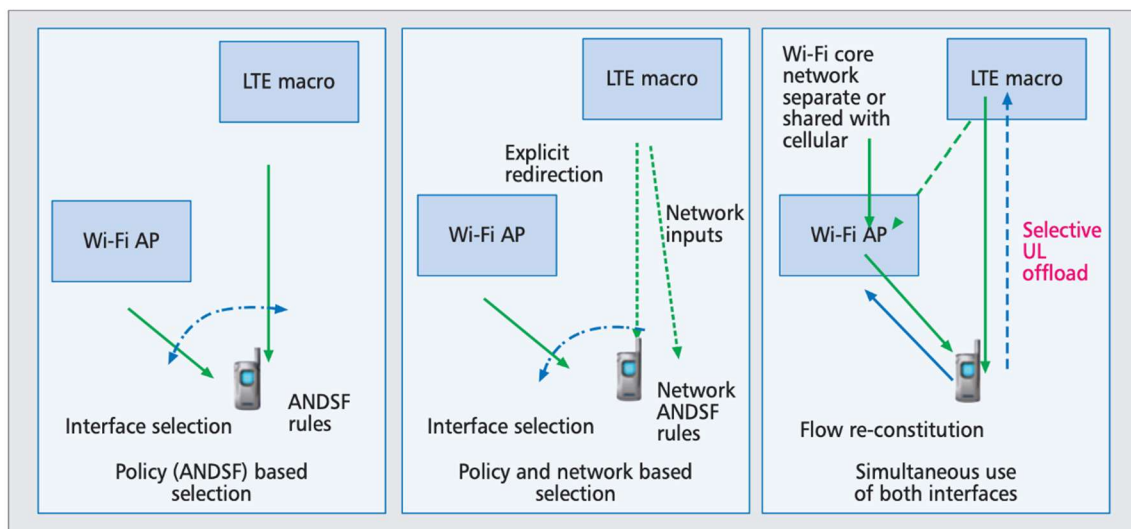
Τα Wi-Fi hotspots χρησιμοποιούνται για την παροχή δικτυακής κάλυψης σε περιοχές όπου οι κάτοικοι έχουν πολύ χαμηλά εισοδήματα. Σε αυτές τις περιοχές, τα hotspots έχουν σχεδιαστεί για να καταγράφουν μεγάλο αριθμό χρηστών και να παρέχουν υψηλούς ρυθμούς δεδομένων. Ωστόσο, η εμβέλεια των Wi-Fi hotspots περιορίζεται από τη χαμηλότερη ισχύ των συσκευών-πελατών και όχι από το σημείο πρόσβασης. Για να ξεπεραστεί αυτός ο περιορισμός και να βελτιωθεί τόσο η εμβέλεια όσο και η αποδοτικότητα, η κίνηση ανοδικής ζεύξης μπορεί να ανακατευθυνθεί ή να εκτραπεί μέσω άλλου δικτύου πρόσβασης, όπως το LTE.

Με την ταυτόχρονη χρήση των ραδιοδιεπαφών Wi-Fi και LTE, μπορεί να βελτιωθεί η χωρητικότητα και η κάλυψη των Wi-Fi hotspots. Αυτή η ενσωμάτωση των δικτύων Wi-Fi και LTE είναι γνωστή ως Wi-Fi/LTE. Υπάρχουν τρεις επιλογές για την ενσωμάτωση: χαλαρή, στενή και υβριδική (Εικ. 2.2).

Στη χαλαρή προσέγγιση ολοκλήρωσης, οι συνδέσεις δικτύου μπορούν να διαχειριστούν ξεχωριστά χωρίς να γνωρίζουν η μία την παρουσία της άλλης. Αυτή η προσέγγιση απαιτεί τροποποιήσεις στο λειτουργικό λογισμικό στις συσκευές-πελάτες και στους διακομιστές. Παρέχει βελτίωση των επιδόσεων και είναι εύκολα εφαρμόσιμη.

Στην προσέγγιση στενής ολοκλήρωσης, τα δίκτυα Wi-Fi και LTE συνδέονται στενά για να παρέχουν δυνητικά τις υψηλότερες επιδόσεις. Ωστόσο, αυτή η προσέγγιση έχει υψηλή πολυπλοκότητα υλοποίησης.

Η προσέγγιση υβριδικής ολοκλήρωσης βρίσκεται μεταξύ της χαλαρής και της στενής ολοκλήρωσης. Ενσωματώνει ελάχιστα τα δίκτυα και βελτιώνει την κάλυψη με τη δρομολόγηση πακέτων μέσω του εναλλακτικού δικτύου (Ling et al., 2015).



**Εικόνα 2.2** Εξέλιξη των συστημάτων ενσωμάτωσης Wi-Fi LTE.

## 2.5 Τεχνολογίες 4G/5G

Η ενσωμάτωση των τεχνολογιών 4G/5G στα αστικά δίκτυα βοηθά με διάφορους τρόπους. Πρώτον, επιτρέπει υπηρεσίες επικοινωνίας υψηλού εύρους ζώνης και χαμηλής καθυστέρησης, οι οποίες είναι απαραίτητες για την αποτελεσματική διαχείριση της αστικής κυκλοφορίας. Με τη σύγκλιση των VANETs (Vehicular Ad-Hoc Networks), των δικτύων 5G και των δικτύων που καθορίζονται από λογισμικό (SDN), η νέα αρχιτεκτονική προσφέρει ευελιξία και προγραμματισμό στην επικοινωνία, επιτρέποντας πιο ευέλικτη ανίχνευση του περιβάλλοντος και καλύτερη ανταπόκριση στη διαχείριση της κυκλοφοριακής συμφόρησης.

Δεύτερον, η ενσωμάτωση των τεχνολογιών 4G/5G με τα αστικά δίκτυα διευκολύνει την εφαρμογή του mobile-edge computing (MEC). Ο MEC τοποθετεί υπολογιστικούς πόρους στην άκρη του δικτύου, επιτρέποντας ταχύτητες απόκρισης σε πραγματικό ή σχεδόν πραγματικό χρόνο για κρίσιμες αποστολές. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε σενάρια όπως η ταχεία διάσωση σε ατυχήματα, όπου οι γρήγοροι χρόνοι απόκρισης μπορούν να μειώσουν σημαντικά το χρόνο διάσωσης και να βελτιώσουν την αποτελεσματικότητα της διαχείρισης της αστικής κυκλοφορίας.

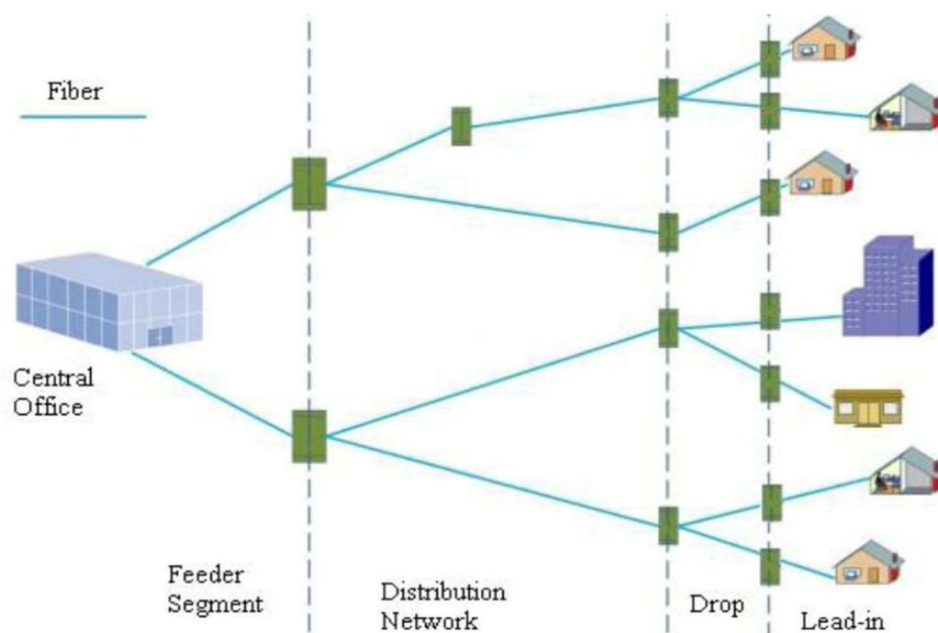
Επιπλέον, η ενσωμάτωση των τεχνολογιών 4G/5G επιτρέπει τη χρήση αναδυόμενων τεχνολογιών όπως η βαθιά μάθηση και η ανάλυση μεγάλων δεδομένων στη διαχείριση της αστικής κυκλοφορίας. Συνδυάζοντας την τεχνητή νοημοσύνη με τα μεγάλα δεδομένα, μπορούν να διερευνηθούν νέα υπολογιστικά μοντέλα με βάση τα δεδομένα, οδηγώντας σε αποτελεσματικότερη παρακολούθηση των κυκλοφοριακών συνθηκών, ανταπόκριση σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης και βελτιστοποίηση της κυκλοφοριακής ροής. Αυτό μπορεί να συμβάλει στην ανακούφιση της κυκλοφοριακής συμφόρησης, στη μείωση της κατανάλωσης καυσίμων και στην εξοικονόμηση χρόνου για τους μετακινούμενους (Liu et al., 2017).

Συμπερασματικά, η ενσωμάτωση των τεχνολογιών 4G/5G στα αστικά δίκτυα προσφέρει επικοινωνία υψηλού εύρους ζώνης, απόκριση με χαμηλή καθυστέρηση και δυνατότητα αξιοποίησης αναδυόμενων τεχνολογιών όπως η MEC και η ανάλυση μεγάλων δεδομένων. Αυτές οι εξελίξεις συμβάλλουν στην αποτελεσματικότερη διαχείριση της αστικής κυκλοφορίας, στη βελτίωση της ανταπόκρισης σε καταστάσεις

έκτακτης ανάγκης και στην καλύτερη αξιοποίηση των πόρων για την αντιμετώπιση της κυκλοφοριακής συμφόρησης (Εικ. 2.3).

## 2.6 Ανάπτυξη δικτύου FTTx

Η ανάπτυξη δικτύων Fiber-to-the-X (FTTx) σε αστικές περιοχές απαιτεί σχολαστικό σχεδιασμό και συνεκτίμηση της υπάρχουσας τεχνολογικής υποδομής για να εξασφαλιστεί η απρόσκοπτη ενσωμάτωση και η βέλτιστη απόδοση. Στο πλαίσιο της ανάπτυξης FTTx, το δίκτυο μπορεί να κατηγοριοποιηθεί σε γενικές γραμμές σε στοιχεία εντός και εκτός εγκατάστασης. Η εσωτερική εγκατάσταση, που βρίσκεται στο γεωγραφικό κέντρο της περιοχής κάλυψης, περιλαμβάνει το κεντρικό γραφείο (CO) και τα τηλεπικοινωνιακά ερμάρια δικτύου που περιέχουν ενεργό εξοπλισμό για ενεργά οπτικά δίκτυα. Αντίθετα, η εξωτερική εγκατάσταση, μια κεντρική πτυχή των δικτύων Fiber-to-the-Home (FTTH), συνδέει το εσωτερικό δίκτυο με τους πελάτες και διαθέτει αποκλειστικά παθητικό εξοπλισμό (Εικόνα 2.3).



**Εικόνα 2.3** Δομή δικτύου FTTH

Το εξωτερικό δίκτυο περιλαμβάνει βασικά στοιχεία όπως αγωγούς, υποσωλήνες, συστοιχίες μικροσωλήνων, καλώδια οπτικών ινών και διάφορες παθητικές υποδομές για μελλοντική συντήρηση και επέκταση. Αυτή η υποδομή περιλαμβάνει κουτιά διακλάδωσης και διακλάδωσης, φρεάτια όπως χειροκίνητα ερμάρια και ερμάρια δρόμου, δημιουργώντας μια ολοκληρωμένη ραχοκοκαλιά δικτύου. Στις αστικές



περιοχές, η ενσωμάτωση των δικτύων FTTx περιλαμβάνει συχνά την πλοήγηση σε προϋπάρχουσες υποδομές και πυκνοκατοικημένες περιοχές, παρουσιάζοντας μοναδικές προκλήσεις σε σύγκριση με τις αγροτικές αναπτύξεις.

Οι μέθοδοι για την εγκατάσταση καλωδίων αγωγών σε αστικά δίκτυα FTTx περιλαμβάνουν παραδοσιακές υποδομές σωλήνων/σωλήνων. Αυτό περιλαμβάνει τη δημιουργία ενός δικτύου σωλήνων για τη διευκόλυνση της επακόλουθης εγκατάστασης καλωδίων μέσω τεχνικών όπως το τράβηγμα, η εμφύσηση και η επίπλευση. Η εγκατάσταση καλωδίων με τράβηγμα απαιτεί προσεκτική εξέταση των μηχανικών και περιβαλλοντικών αντοχών σύμφωνα με τις προδιαγραφές του προμηθευτή. Οι τεχνικές φύσηματος, που προσφέρουν ταχύτερη εγκατάσταση και μεγαλύτερα μήκη, απαιτούν ένα αεροστεγές δίκτυο σωλήνων, ιδιαίτερα κρίσιμο σε αστικά περιβάλλοντα, όπου οι περιορισμοί χώρου και οι υπάρχουσες υποδομές μπορεί να θέτουν προκλήσεις.

Η αποδοτικότητα της υποδομής εξαρτάται σημαντικά από την ποιότητα της εγκατάστασης των αγωγών, λαμβάνοντας υπόψη στοιχεία όπως οι σωλήνες, οι υποσωλήνες, τα καλώδια εντός των σωλήνων και τα κλεισίματα των διακλαδώσεων. Τα αστικά δίκτυα FTTx χρησιμοποιούν συνήθως συμβατική υποδομή σωλήνων, ιδίως για τους κύριους αγωγούς τροφοδοσίας από το κεντρικό γραφείο στα τοπικά σημεία σύγκλισης. Οι μελλοντικές εκτιμήσεις επέκτασης του δικτύου σε αστικά περιβάλλοντα απαιτούν ασφαλή ανάπτυξη και επαρκή χωρητικότητα, που συχνά επιτυγχάνεται μέσω ενιαίων αγωγών ικανών να φιλοξενήσουν πολλαπλά καλώδια.

Οι δέσμες μικροσωλήνων χρησιμοποιούνται συστηματικά στα αστικά δίκτυα FTTx για την αντιμετώπιση της αυξημένης πυκνότητας σύνδεσης μεταξύ των κόμβων και των χρηστών. Η μέθοδος περιλαμβάνει την εμφύσηση καλωδίων οπτικών ινών μικρής διαμέτρου μέσω ενός δικτύου αγωγών, ελαχιστοποιώντας τον αριθμό των συνδέσεων καλωδίων. Τα πλεονεκτήματα των μικροσωλήνων έγκεινται στη συμβατότητά τους με διάφορες μεθόδους εγκατάστασης, όπως η υποδομή σωλήνων, η απευθείας ταφή ή η εναέρια ανάπτυξη. Τα μικροκαλώδια μέσα σε αυτούς τους αγωγούς προσφέρουν πλεονεκτήματα όπως η υψηλή πυκνότητα ινών, το μικρό βάρος, η εξαιρετική θερμική συμπεριφορά και η ταχεία εγκατάσταση, ευθυγραμμιζόμενα με τις δυναμικές απαιτήσεις των αστικών περιοχών.

Όσον αφορά τους τύπους καλωδίων και σωλήνων, οι αστικές αναπτύξεις FTTx περιλαμβάνουν ποικίλα καλώδια σχεδιασμένα για υποδομές σωλήνων και υποδοχές

μικροσωλήνων. Τα καλώδια για υποδομές σωλήνων πρέπει να προσαρμόζονται σε διαφορετικές μεθόδους εγκατάστασης, με τα καλώδια για τράβηγμα να είναι ισχυρότερα και εκείνα για φύσημα να είναι ελαφριά με κατάλληλη ακαμψία. Η ενσωμάτωση μεταλλικών στοιχείων σε μη μεταλλικό περίβλημα παρέχει καλύτερη αντοχή και προστασία από την υγρασία, απαραίτητη σε αστικά περιβάλλοντα. Οι πρίζες μικροσωλήνων απαιτούν μικρά, ελαφριά καλώδια που εγκαθίστανται με φυσητά, τονίζοντας την ανάγκη τα συστήματα σωλήνων και καλωδίων να ταιριάζουν σε μέγεθος και χωρητικότητα (Farmer et al., 2016).

Εν κατακλείδι, η ανάπτυξη δικτύων FTTx σε αστικές περιοχές απαιτεί λεπτή κατανόηση της υπάρχουσας τεχνολογικής υποδομής, σχολαστικό σχεδιασμό και προσαρμοστικές στρατηγικές για την αντιμετώπιση των προκλήσεων που θέτουν οι πυκνοί πληθυσμοί, ο περιορισμένος χώρος και οι προϋπάρχουσες υποδομές. Η ενσωμάτωση διαφορετικών καλωδίων και σωλήνων, σε συνδυασμό με ισχυρές μεθόδους εγκατάστασης, διασφαλίζει την επιτυχή ανάπτυξη και τη διαρκή λειτουργικότητα των δικτύων FTTx σε αστικά τοπία

## Κεφάλαιο 3: Κάλυψη δικτύου σε ημιαστικές περιοχές

### 3.1 Το μοντέλο TCP/IP (Transmission Control Protocol/Internet Protocol)

Το μοντέλο TCP/IP (Transmission Control Protocol/Internet Protocol) χρησιμεύει ως βάση για την επικοινωνία στο διαδίκτυο και τη συνδεσιμότητα του δικτύου. Αποτελούμενο από τέσσερα διακριτά επίπεδα, το μοντέλο αυτό διευκολύνει τη μετάδοση δεδομένων σε διασυνδεδεμένα δίκτυα, δίνοντας έμφαση στην ευρωστία, την ευελιξία και την αποτελεσματική επικοινωνία ακόμη και σε περιπτώσεις βλαβών του δικτύου ή διαφορετικών εφαρμογών (Khaniabadi et al., 2022). Αυτό το μοντέλο βοηθάει στη δημιουργία σχεδίου για την κάλυψη δικτύου σε ημιαστικές (αγροτικές) περιοχές. Παρακάτω φαίνονται τα επίπεδα που παρουσιάζει το συγκεκριμένο μοντέλο:

#### *1. Επίπεδο υποδοχής προς δίκτυο:*

Στο χαμηλότερο επίπεδο, αυτό το επίπεδο ενσωματώνει διάφορα πρωτόκολλα φυσικού επιπέδου και επιπέδου σύνδεσης για τη συνδεσιμότητα του κεντρικού υπολογιστή με το δίκτυο. Περιλαμβάνει προδιαγραφές σε επίπεδο υλικού και δεν επιβάλλει κάποιο συγκεκριμένο πρωτόκολλο, επιτρέποντας ευελιξία στη σύνδεση κεντρικών υπολογιστών με διαφορετικούς τύπους δικτύων.

#### *2. Στρώμα πρωτοκόλλου διαδικτύου (IP):*

Λειτουργώντας παρόμοια με το επίπεδο δικτύου στο μοντέλο OSI, το επίπεδο IP είναι θεμελιώδες στο μοντέλο TCP/IP. Καθορίζει το βασικό πρωτόκολλο για τη δρομολόγηση και την προώθηση πακέτων δεδομένων σε δίκτυα. Το IP χειρίζεται τη διεθυνσιοδότηση, τη δρομολόγηση και τον κατακερματισμό των πακέτων, εξασφαλίζοντας την επιτυχή μετάδοση ακόμη και αν τα πακέτα φθάνουν εκτός σειράς. Πρωταρχικό μέλημά του είναι η αποτελεσματική δρομολόγηση των πακέτων, ελαχιστοποιώντας τη συμφόρηση του δικτύου.

#### *3. Επίπεδο μεταφοράς:*

Τοποθετημένο πάνω από το επίπεδο IP, αυτό το επίπεδο διαχειρίζεται την επικοινωνία από άκρο σε άκρο μεταξύ των οντοτήτων πηγής και προορισμού. Δύο βασικά πρωτόκολλα που χρησιμοποιούνται εδώ είναι:

- Πρωτόκολλο ελέγχου μετάδοσης (TCP): Ένα αξιόπιστο, προσανατολισμένο στη σύνδεση πρωτόκολλο που τμηματοποιεί τα μηνύματα σε μικρότερες μονάδες (εάν χρειάζεται), εξασφαλίζει την επιτυχή παράδοσή τους, επανασυνθέτει τα ληφθέντα τμήματα και παρέχει επιβεβαιώσεις στον αποστολέα. Εγγυάται αξιόπιστη, ταξινομημένη και ελεγχόμενη από σφάλματα παράδοση των πακέτων δεδομένων.
- Πρωτόκολλο δεδομένων χρήστη (UDP): Ένα ταχύτερο πρωτόκολλο χωρίς σύνδεση που δεν παρέχει επιβεβαιώσεις στον αποστολέα. Επιλέγεται για λόγους ταχύτητας και χρησιμοποιείται όταν απαιτείται άμεση, ταχεία μετάδοση δεδομένων, ακόμη και με το κόστος πιθανής απώλειας δεδομένων. Το UDP χρησιμοποιείται συνήθως σε σενάρια όπως η ροή πολυμέσων, οι εφαρμογές πραγματικού χρόνου ή όπου η καθυστέρηση επιβεβαίωσης δεν είναι κρίσιμη.

#### *4. Επίπεδο εφαρμογής:*

Το ανώτερο επίπεδο αλληλεπιδρά άμεσα με τις εφαρμογές των τελικών χρηστών. Στεγάζει διάφορα πρωτόκολλα όπως TELNET, FTP, SMTP, HTTP και άλλα, που εξυπηρετούν συγκεκριμένους τύπους υπηρεσιών που απαιτούνται από τους χρήστες. Κάθε πρωτόκολλο σε αυτό το επίπεδο καλύπτει συγκεκριμένες ανάγκες εφαρμογών, όπως η απομακρυσμένη πρόσβαση σε τερματικό (TELNET), η μεταφορά αρχείων (FTP), η επικοινωνία μέσω ηλεκτρονικού ταχυδρομείου (SMTP) και η περιήγηση στο διαδίκτυο (HTTP).

Το μοντέλο TCP/IP προσφέρει ένα ευέλικτο και κλιμακούμενο πλαίσιο για ποικίλες δικτυακές επικοινωνίες, ειδικά προσαρμοσμένο στις απαιτήσεις του διαδικτύου. Τα διακριτά επίπεδά του επιτρέπουν την αποτελεσματική μετάδοση δεδομένων, την ανθεκτικότητα έναντι αστοχιών και την υποστήριξη μυριάδων εφαρμογών, αποτελώντας τη ραχοκοκαλιά της σύγχρονης επικοινωνίας στο Διαδίκτυο χωρίς εξάρτηση από συγκεκριμένο υλικό ή ιδιόκτητες τεχνολογίες (Khaniabadi et al., 2022).

Αντίθετα, στις ημιαστικές περιοχές, η εφαρμογή του μοντέλου OSI προσαρμόζεται στις μοναδικές προκλήσεις που παρουσιάζουν οι διάσπαρτοι πληθυσμοί και οι ενδεχομένως περιορισμένες υποδομές. Το φυσικό στρώμα εδώ απαιτεί ευέλικτες διαμορφώσεις για την προσαρμογή διαφορετικών μεθόδων συνδεσιμότητας, από παραδοσιακές ενσύρματες ρυθμίσεις έως ασύρματες λύσεις, αντιμετωπίζοντας το ποικίλο τεχνολογικό τοπίο της περιοχής. Η σημασία του στρώματος δικτύου έγκειται στην

καθιέρωση αποτελεσματικών στρατηγικών δρομολόγησης προσαρμοσμένων για τη σύνδεση απομακρυσμένων τοποθεσιών, βοηθώντας στην αντιμετώπιση των κενών συνδεσιμότητας. Ενώ τα στρώματα μεταφοράς και εφαρμογών παραμένουν απαραίτητα, μπορούν να καλύψουν βασικές ανάγκες επικοινωνίας, όπως υπηρεσίες ηλεκτρονικού ταχυδρομείου, περιήγηση στο διαδίκτυο και άλλες ζωτικές υπηρεσίες όπως η υγειονομική περίθαλψη και η εκπαίδευση, εξασφαλίζοντας τη συνδεσιμότητα παρά τους πιθανούς περιορισμούς (Bartolín-Arnau et al., 2022).

Ομοίως, το μοντέλο TCP/IP στις αστικές περιοχές ευδοκιμεί προσφέροντας προσαρμόσιμες λύσεις για ποικίλο υλικό και πρωτόκολλα δικτύου σε ιδιαίτερα δικτυωμένες αστικές περιοχές. Τα επίπεδα αυτού του μοντέλου επιτρέπουν την αποτελεσματική δρομολόγηση, την αξιόπιστη μετάδοση δεδομένων και την απρόσκοπτη παροχή υπηρεσιών ειδικών εφαρμογών για αστικές ανάγκες όπως οι υποδομές έξυπνων πόλεων, το ηλεκτρονικό εμπόριο και οι δημόσιες υπηρεσίες σε πραγματικό χρόνο (Singh et al., 2020).

Σε ημιαστικές περιοχές, η ευελιξία του μοντέλου TCP/IP καθίσταται ζωτικής σημασίας για την προσαρμογή διαφόρων επιλογών συνδεσιμότητας εν μέσω προκλήσεων υποδομής. Οι μηχανισμοί δρομολόγησης του στρώματος IP και η αξιοπιστία του επιπέδου μεταφοράς είναι καθοριστικής σημασίας για τη διατήρηση της σταθερής συνδεσιμότητας και της μεταφοράς δεδομένων σε διάσπαρτες περιοχές. Εν τω μεταξύ, το επίπεδο εφαρμογών ανταποκρίνεται σε συγκεκριμένες ανάγκες, παρέχοντας βασικές υπηρεσίες όπως η υποστήριξη της γεωργίας, η βασική υγειονομική περίθαλψη, τα εκπαιδευτικά εργαλεία και οι υπηρεσίες επικοινωνίας, γεφυρώνοντας τα κενά συνδεσιμότητας και καλύπτοντας τις απαιτήσεις των ημιαστικών κοινοτήτων (Hossain, 2023).

### **3.2 Ανάπτυξη δικτύου UFBB**

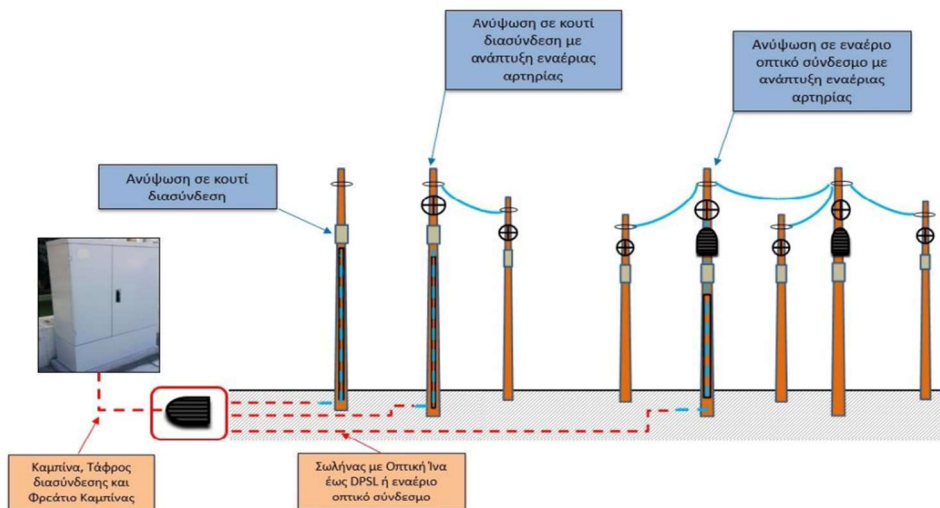
Οι μελέτες που έχουν γίνει για την ύπαρξη δικτύων στις ημιαστικές περιοχές είναι περιορισμένες καθώς η πλειοψηφία των πληθυσμών κατοικεί σε αστικές περιοχές, οπότε βρέθηκαν συγκεκριμένα δίκτυα που μπορούν να εφαρμοστούν στις ημιαστικές περιοχές.

Σε ημιαστικές περιοχές, η εφαρμογή δικτύων Ultra Fast BroadBand (UFBB) αποδεικνύεται καθοριστική για τη γεφύρωση των κενών συνδεσιμότητας. Το UFBB προσφέρει ταχύτητες διαδικτύου που ξεπερνούν τα 100Mbps, εξασφαλίζοντας ισχυρή

συνδεσιμότητα και τη δυνατότητα μελλοντικών αναβαθμίσεων σε 1 Gigabit. Η προσαρμοστικότητά του σε αγροτικά, ημιαστικά και αστικά τοπία αποτελεί μια ευέλικτη λύση. Τα δίκτυα UFBB, είτε αναπτύσσονται υπόγεια είτε εναέρια, χρησιμεύουν ως κεντρική ραχοκοκαλιά υποδομής, προωθώντας την οικονομική ανάπτυξη και βελτιώνοντας την ποιότητα ζωής των κατοίκων, παρέχοντας πρόσβαση σε υπηρεσίες διαδικτύου υψηλής ταχύτητας (Oughton, 2016).

*Μικτή υπόγεια και εναέρια ανάπτυξη UFBB:*

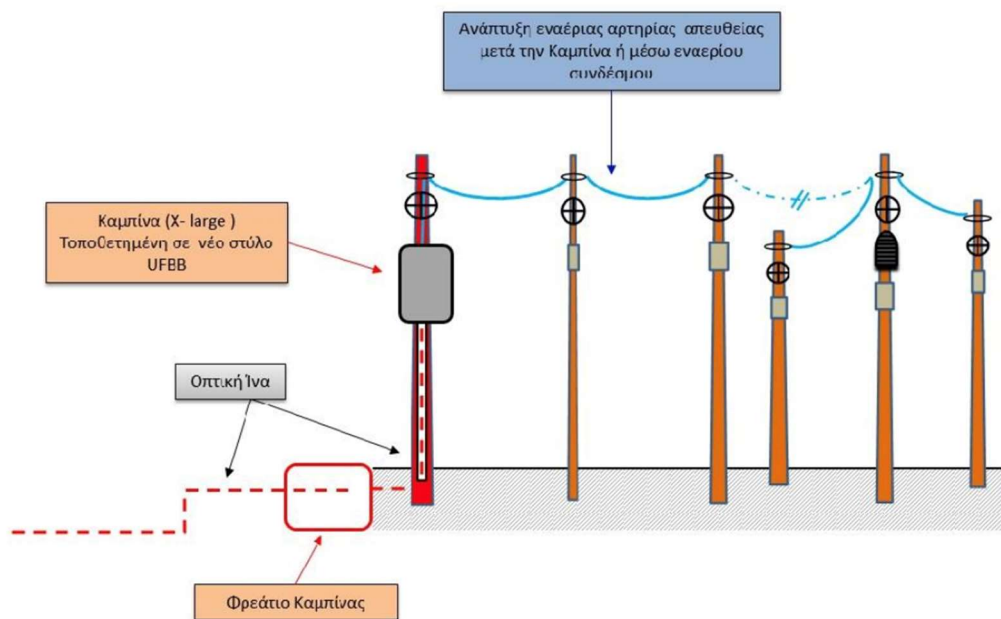
Η ανάπτυξη τόσο υπόγειων όσο και εναέριων δικτύων UFBB σε ημιαστικές περιοχές παρουσιάζει μια διαφοροποιημένη προσέγγιση που εξυπηρετεί διαφορετικά τοπία υποδομών (Εικόνα 3.1). Αυτό το μείγμα προσφέρει ευελιξία στις εταιρείες τηλεπικοινωνιών να προσαρμόζουν λύσεις με βάση τις ιδιαιτερότητες της περιοχής. Τα πλεονεκτήματα περιλαμβάνουν βελτιωμένη ποιότητα ζωής για τους κατοίκους, ενισχυμένη πρόσβαση σε διαδικτυακές υπηρεσίες που ωφελούν την εκπαίδευση και την τηλεϊατρική, προώθηση της ανάπτυξης των τοπικών επιχειρήσεων και προσέλκυση νέων επιχειρήσεων. Ωστόσο, προκλήσεις όπως οι επιπτώσεις στο κόστος, ο ανταγωνισμός με τις υπάρχουσες υποδομές και οι τεχνικές πολυπλοκότητες απαιτούν στρατηγικό σχεδιασμό για την επιτυχή ανάπτυξη (Oughton, 2016).



**Εικόνα 3.1** Ανάπτυξη δικτύου UFBB σε ημι-αστικές περιοχές

### *Εναέρια ανάπτυξη δικτύου UFBB σε αγροτικές περιοχές:*

Η ανάπτυξη δικτύων Ultra Fast BroadBand (UFBB) σε αγροτικές περιοχές αποτελεί μια σημαντική πρωτοβουλία για την αντιμετώπιση του ψηφιακού χάσματος και τη βελτίωση των κοινωνικοοικονομικών συνθηκών για τους κατοίκους. Υπάρχουν πολλά πλεονεκτήματα μέσω αυτής της κάλυψης δικτύου. Πρώτα απ' όλα, η παροχή γρήγορης και αξιόπιστης συνδεσιμότητας στο διαδίκτυο αυξάνει σημαντικά την ποιότητα ζωής των κατοίκων των αγροτικών περιοχών, παρέχοντας πρόσβαση σε ένα ευρύ φάσμα διαδικτυακών υπηρεσιών και πληροφοριών, που περιλαμβάνουν εκπαιδευτικούς πόρους, εγκαταστάσεις τηλεϊατρικής και επιλογές ψυχαγωγίας. Επιπλέον, η ανάπτυξη του δικτύου UFBB συμβάλλει στην ενίσχυση των τοπικών επιχειρήσεων, παρέχοντάς τους πρόσβαση σε συνδεσιμότητα υψηλής ταχύτητας στο διαδίκτυο που διευκολύνει την ηλεκτρονική επέκταση, την προσέγγιση του κοινού και την αύξηση των πωλήσεων. Επιπλέον, η γοητεία της γρήγορης και αξιόπιστης συνδεσιμότητας στο διαδίκτυο μπορεί να προσελκύσει νέες επιχειρήσεις σε αγροτικές περιοχές, προωθώντας την οικονομική ανάπτυξη και την περιφερειακή ανάπτυξη. Είναι σημαντικό ότι τα δίκτυα UFBB ενισχύουν την πρόσβαση σε υπηρεσίες τηλεϊατρικής, με αποτέλεσμα την μείωση της επιβάρυνσης από τα ταξίδια για ιατρική περίθαλψη. Ωστόσο, προκλήσεις όπως το σημαντικό κόστος ανάπτυξης, ο ανταγωνισμός με τις υπάρχουσες υποδομές, οι τεχνικές πολυπλοκότητες σε δύσβατα εδάφη και το εμπόδιο που θέτει η χαμηλή πυκνότητα πληθυσμού υπογραμμίζουν τις διαφοροποιημένες εκτιμήσεις που πρέπει να αντιμετωπιστούν για την επιτυχή εφαρμογή των δικτύων UFBB σε αγροτικές περιοχές (Schneir & Xiong, 2016).



**Εικόνα 3.2** Ανάπτυξη δικτύου UFBB σε αγροτικές περιοχές

*Διασυστημικές μεταβιβάσεις:*

Στη σφαίρα των κινητών επικοινωνιών, οι διασυστημικές μεταβιβάσεις διαδραματίζουν ζωτικό ρόλο, εξασφαλίζοντας αδιάλειπτη συνδεσιμότητα για τους χρήστες που μεταβαίνουν μεταξύ διαφορετικών κυψελοειδών συστημάτων όπως το GSM και το UMTS. Οι μηχανισμοί παράδοσης είναι ζωτικής σημασίας τόσο για τα δίκτυα με μεταγωγή κυκλώματος όσο και για τα δίκτυα με μεταγωγή πακέτου και διευκολύνουν την απρόσκοπτη μετακίνηση εντός των περιοχών κάλυψης. Ενώ οι τεχνικές εξελίξεις έχουν βελτιώσει τις μεταβιβάσεις εντός μεμονωμένων δικτύων, οι μεταβιβάσεις σε πραγματικό χρόνο μεταξύ συστημάτων μεταξύ δικτύων μεταγωγής πακέτων και δικτύων μεταγωγής κυκλώματος αποτελούν πρόκληση λόγω της περιορισμένης υποστήριξης στα υπάρχοντα πρότυπα. Ωστόσο, οι προσπάθειες από φορείς τυποποίησης όπως το 3GPP έχουν θεσπίσει προδιαγραφές για τις διασυστημικές μεταβιβάσεις, επιτρέποντας την απρόσκοπτη μετάβαση μεταξύ των δικτύων GSM και UMTS (Nirban , 2015).



### *Ασύρματα δίκτυα πλέγματος:*

Τα ασύρματα δίκτυα πλέγματος, τα οποία χαρακτηρίζονται από ευελιξία κόμβων και δυνατότητες αυτοδρομολόγησης, προσφέρουν μια οικονομικά αποδοτική λύση προσαρμόσιμη σε αστικά και ημιαστικά εδάφη. Τα δίκτυα αυτά, που είναι διαδεδομένα στη Βόρεια Αμερική, δίνουν τη δυνατότητα στις έξυπνες συσκευές να αναμεταδίδουν δεδομένα μέσω γειτονικών κόμβων, φτάνοντας τελικά στα σημεία πρόσβασης των δικτύων κοινής ωφέλειας. Ενώ η δικτύωση πλέγματος βελτιώνει την κάλυψη και την επεκτασιμότητα, προκλήσεις όπως οι περιορισμοί χωρητικότητας δικτύου, οι παρεμβολές σήματος και η ανάγκη για ισχυρή κρυπτογράφηση για τη διασφάλιση της ασφάλειας των δεδομένων αποτελούν αξιοσημείωτα μειονεκτήματα (Khatib & Alsadi, 2020).

### *Δίκτυο περιοχής πεδίου (FAN):*

Τα FAN, ζωτικής σημασίας για τους τομείς διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, περιλαμβάνουν αυτοματοποιημένα συστήματα ελέγχου και επικοινωνίας που συνδέουν μεμονωμένες συνδέσεις με παρόχους. Λειτουργώντας σε αστικές-αγροτικές και αγροτικές περιοχές, τα FAN χρησιμοποιούν διάφορες τεχνολογίες επικοινωνίας, όπως οπτικές ίνες, WiMAX και πρωτόκολλα IEC 61850. Τα δίκτυα αυτά διευκολύνουν την προηγμένη υποδομή μέτρησης (AMI) και υποστηρίζουν εφαρμογές όπως η αυτοματοποίηση της διανομής και η ενσωμάτωση των καταναμημένων ενεργειακών πόρων, αν και με συμβιβασμούς που αφορούν την τεχνολογία όσον αφορά την καθυστέρηση, την κάλυψη και τη διαλειτουργικότητα (Junjalearnvong et al., 2017).

Εν κατακλείδι, η κάλυψη δικτύων σε ημιαστικές περιοχές απαιτεί μια προσαρμοσμένη προσέγγιση, η οποία θα συνδυάζει διαφορετικές αρχιτεκτονικές δικτύων για την αντιμετώπιση των προκλήσεων, ενώ θα αξιοποιεί τις τεχνολογικές εξελίξεις για να διασφαλίσει την ολοκληρωμένη συνδεσιμότητα και την υποστήριξη της κοινωνικοοικονομικής ανάπτυξης. Η επιτυχής εφαρμογή απαιτεί σχολαστική κατανόηση των δυνατών και αδύνατων σημείων κάθε δικτύου και της συμβατότητάς τους στα στοχευόμενα ημιαστικά τοπία.

## Κεφάλαιο 4: Συγκριτική ανάλυση αστικών και ημιαστικών δικτύων

### 4.1 Εκτιμήσεις σχετικά με τα δίκτυα

Στις αστικές περιοχές, ο σχεδιασμός και η υλοποίηση των υποδομών πύργων και κεραιών κινητής τηλεφωνίας αποτελούν καίριας σημασίας ζητήματα λόγω της υψηλής πυκνότητας του πληθυσμού και των αυστηρών κανονισμών. Αυτές οι περιοχές δίνουν έμφαση σε σχέδια υποδομών που εναρμονίζονται με το περιβάλλον, χρησιμοποιώντας συχνά αντισυμβατικές κατασκευές όπως "ψεύτικα δέντρα" ή συγκαλυμμένες εγκαταστάσεις για να εναρμονιστούν αισθητικά με το περιβάλλον. Τεχνολογίες όπως τα κατανεμημένα συστήματα κεραιών (DAS) και οι μικρές κυψέλες κυριαρχούν, με τα DAS να μειώνουν τις αποστάσεις μετάδοσης και να βελτιώνουν την ποιότητα του σήματος, ενώ οι μικρές κυψέλες φροντίζουν για την τοπική κάλυψη, αν και ενδεχομένως εισάγουν παρεμβολές λόγω της επαναχρησιμοποίησης συχνοτήτων (Alade & Ahmed, 2019).

Αντίθετα, οι ημιαστικές περιοχές αξιοποιούν την προσαρμοστικότητα της αρχιτεκτονικής Ultra Fast BroadBand (UFBB), παρέχοντας διαδίκτυο υψηλής ταχύτητας (100Mbps+) μέσω εναέριων ή υπόγειων δικτύων. Η στρατηγική ανάπτυξης είναι πιο ευέλικτη, με στόχο την αντιμετώπιση συγκεκριμένων απαιτήσεων της περιοχής, ενώ παράλληλα εξισορροπεί την αποδοτικότητα κόστους και τις τεχνικές προκλήσεις. Η εστίαση εδώ εστιάζεται περισσότερο στη γεφύρωση των κενών συνδεσιμότητας και στην εξυπηρέτηση διαφορετικών τοπίων, στοχεύοντας έτσι στη γεφύρωση του ψηφιακού χάσματος και στη βελτίωση της ποιότητας ζωής των κατοίκων (Oughton, 2016).

Επίσης, η ανάπτυξη ενός δικτύου FTTx σε αστικές περιοχές προσφέρει σαφή πλεονεκτήματα σε σύγκριση με τις ημιαστικές περιοχές. Στις αστικές περιοχές, η ζήτηση για συνδεσιμότητα υψηλής ταχύτητας είναι εξαιρετικά υψηλή λόγω του πυκνού πληθυσμού και των συγκεντρωμένων οικονομικών δραστηριοτήτων. Οι δυνατότητες υψηλών ταχυτήτων των δικτύων FTTx ανταποκρίνονται στις αυξημένες απαιτήσεις δεδομένων των κατοίκων των πόλεων, διευκολύνοντας την απρόσκοπτη ροή δεδομένων, τα διαδικτυακά παιχνίδια και τις αποτελεσματικές μεταφορές αρχείων. Η αξιοπιστία των δικτύων FTTx καθίσταται ακόμη πιο κρίσιμη σε αστικά περιβάλλοντα, όπου η συμφόρηση του δικτύου κατά τις ώρες αιχμής αποτελεί κοινή πρόκληση.

Επιπλέον, η επεκτασιμότητα της τεχνολογίας οπτικών ινών ευθυγραμμίζεται καλά με τη δυναμική φύση της αστικής ανάπτυξης, διασφαλίζοντας ότι το δίκτυο παραμένει ανθεκτικό στο μέλλον για τις εξελισσόμενες τεχνολογικές απαιτήσεις. Ενώ το αρχικό κόστος ανάπτυξης μπορεί να είναι υψηλότερο στις αστικές περιοχές, η δυνατότητα ταχείας απόσβεσης της επένδυσης είναι μεγαλύτερη λόγω της υψηλότερης πληθυσμιακής πυκνότητας, της αυξημένης ζήτησης και της δυνατότητας προσέλκυσης επιχειρήσεων που αναζητούν ανταγωνιστικά πλεονεκτήματα. Στις ημιαστικές περιοχές, ωστόσο, ο ρυθμός υιοθέτησης μπορεί να είναι βραδύτερος και η υπάρχουσα υποδομή μπορεί να είναι πιο ανταγωνιστική ή να θεωρείται επαρκής, θέτοντας προκλήσεις για την ευρεία αποδοχή και την ανάκτηση του κόστους της ανάπτυξης FTTx (Farmer et al., 2016).

#### **4.2 Κοινωνικοοικονομικές επιπτώσεις**

Στις αστικές περιοχές παρατηρούνται θετικές επιπτώσεις από τις προηγμένες τεχνολογίες δικτύων, βελτιώνοντας σημαντικά τη διαχείριση της κυκλοφορίας, την ανταπόκριση σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης και τη χρήση των πόρων. Οι υπηρεσίες υψηλού εύρους ζώνης και χαμηλής καθυστέρησης ωφελούν τους μετακινούμενους με τη μείωση της κατανάλωσης καυσίμων, τον μετριασμό της συμφόρησης και τη βελτίωση της συνολικής αποδοτικότητας των μεταφορών. Ωστόσο, οι προκλήσεις προκύπτουν από τις τεχνικές πολυπλοκότητες και τα εμπόδια εφαρμογής, ιδίως όσον αφορά την ενσωμάτωση των δικτύων Wi-Fi και LTE (Ling et al., 2015).

Ταυτόχρονα, στις ημιαστικές περιοχές, οι εφαρμογές δικτύων UFBB προωθούν την οικονομική ανάπτυξη, βελτιώνουν την ποιότητα ζωής μέσω της βελτίωσης της πρόσβασης στο διαδίκτυο και υποστηρίζουν τις τοπικές επιχειρήσεις. Οι προσπάθειες αυτές αποσκοπούν στη γεφύρωση των ψηφιακών ανισοτήτων και στην προσέλκυση νέων επιχειρήσεων, ενώ παράλληλα ανταποκρίνονται στις μοναδικές κοινωνικοοικονομικές ανάγκες των περιοχών αυτών. Παρά τις θετικές αυτές επιδράσεις, οι προκλήσεις που σχετίζονται με το κόστος, τις τεχνικές πολυπλοκότητες και τον ανταγωνισμό με τις υπάρχουσες υποδομές παραμένουν εμπόδια στην αποτελεσματική ανάπτυξη δικτύων και την επίτευξη ολοκληρωμένης κάλυψης σε ημιαστικές περιοχές (Evangelista et al., 2014).

### 4.3 Διαφορές τεχνολογιών

Στις αστικές περιοχές αναπτύσσονται προηγμένες τεχνολογίες όπως το 4G/5G, εξασφαλίζοντας υπηρεσίες υψηλού εύρους ζώνης και χαμηλής καθυστέρησης, απαραίτητες για τη διαχείριση της αστικής κυκλοφορίας. Τεχνολογίες όπως το Mobile-Edge Computing (MEC) επιτρέπουν γρήγορους χρόνους απόκρισης και καινοτόμο παρακολούθηση της κυκλοφορίας, προς όφελος των επιβατών και μείωση της κυκλοφοριακής συμφόρησης. Τα Wi-Fi hotspots συμπληρώνουν την κάλυψη του δικτύου σε ορισμένες περιοχές με χαμηλό εισόδημα, ενσωματώνοντας δίκτυα Wi-Fi και LTE για την ενίσχυση της χωρητικότητας και της κάλυψης, εξασφαλίζοντας παράλληλα υψηλούς ρυθμούς δεδομένων. Ωστόσο, η πολυπλοκότητα της υλοποίησης, ιδίως με τα στενά ενσωματωμένα δίκτυα, δημιουργεί προκλήσεις σε αστικές περιοχές.

Σε ημιαστικές περιοχές, τα δίκτυα UFBB παρέχουν ταχύτητες διαδικτύου συγκρίσιμες με τις αστικές ρυθμίσεις, προωθώντας την οικονομική ανάπτυξη, την εκπαίδευση και την τηλεϊατρική. Οι διαφοροποιημένες στρατηγικές ανάπτυξης, όπως τα μικτά υπόγεια και εναέρια δίκτυα UFBB, αποσκοπούν στη γεφύρωση των ψηφιακών ανισοτήτων, τη βελτίωση της συνδεσιμότητας και την προσέλκυση επιχειρήσεων. Παρά τις προόδους αυτές, εξακολουθούν να υπάρχουν προκλήσεις, συμπεριλαμβανομένων των επιπτώσεων στο κόστος, της τεχνικής πολυπλοκότητας και του ανταγωνισμού με τις υπάρχουσες υποδομές, οι οποίες επηρεάζουν την αποτελεσματική ανάπτυξη και κάλυψη του δικτύου (Oughton, 2016).

## Κεφάλαιο 5: Μελλοντικές εξελίξεις και καινοτομίες στα οπτικά δίκτυα

### 5.1 Μελλοντικές προοπτικές στα οπτικά δίκτυα

Η εξέλιξη των οπτικών δικτύων είναι έτοιμη να φέρει επανάσταση στο τοπίο των τηλεπικοινωνιών, αντιμετωπίζοντας τους περιορισμούς και εισάγοντας πρωτοποριακές εξελίξεις για την ικανοποίηση των εκρηκτικών απαιτήσεων της σύγχρονης συνδεσιμότητας. Οι μελλοντικές τεχνολογίες οπτικών δικτύων οραματίζονται να ξεπεράσουν τις τρέχουσες προκλήσεις, να εισάγουν προηγμένες δυνατότητες και να ανοίξουν το δρόμο για την απρόσκοπτη, προσαρμόσιμη και αποτελεσματική μετάδοση δεδομένων (Chowdhury et al., 2020).

Αρχικά, τα μελλοντικά οπτικά δίκτυα δίνουν προτεραιότητα στην παροχή εγγυημένου και σταθερού εύρους ζώνης σε κάθε σύνδεση, εξασφαλίζοντας συνεπή και αξιόπιστη μετάδοση δεδομένων. Αξιοποιώντας στρατηγικές μεταγωγής πακέτων, τα δίκτυα αυτά στοχεύουν στη βελτιστοποίηση της χρήσης του διαθέσιμου εύρους ζώνης με τη δυναμική πολυπλεξία πακέτων από διάφορες συνδέσεις. Η προσέγγιση αυτή υπόσχεται αποτελεσματική κατανομή πόρων, καλύπτοντας τις ποικίλες απαιτήσεις κίνησης χωρίς να διακυβεύεται η σταθερότητα του δικτύου (Khalaf & Abdulsahib, 2021).

Επίσης, τα οπτικά δίκτυα δεύτερης γενιάς βασίζονται κατά κύριο λόγο στη μεταγωγή κυκλώματος, γεγονός που οδηγεί σε αναποτελεσματικότητα στη διαχείριση της εκρηκτικής κυκλοφορίας και σε μη βέλτιστη αξιοποίηση του διαθέσιμου εύρους ζώνης. Τα μελλοντικά οπτικά δίκτυα επιδιώκουν να υπερβούν αυτούς τους περιορισμούς διερευνώντας τεχνολογίες οπτικής μεταγωγής πακέτων. Με τη μετάβαση σε παραδείγματα μεταγωγής πακέτων, τα δίκτυα αυτά στοχεύουν στην αποτελεσματική διαχείριση της εκρηκτικής κίνησης, στον μετριασμό της απώλειας πληροφοριών και στην πλήρη αξιοποίηση του διαθέσιμου εύρους ζώνης, ακόμη και σε περιόδους χαμηλής κίνησης (N. Andriolli et al., 2022).

Στην αιχμή της έρευνας, αναπτύσσονται οπτικά δίκτυα μεταγωγής πακέτων για την παροχή ιδανικών κυκλωμάτων ή αυτόνομων υπηρεσιών. Αυτή η προσέγγιση επόμενης γενιάς διερευνά καινοτόμες μεθοδολογίες στη διαχείριση της κυκλοφορίας και τη δρομολόγηση για την ενίσχυση της απόδοσης, της προσαρμοστικότητας και της απρόσκοπτης μετάδοσης δεδομένων. Αντιμετωπίζοντας τις αδυναμίες των δικτύων

μεταγωγής κυκλώματος, τα οπτικά δίκτυα μεταγωγής πακέτων στοχεύουν να προσφέρουν αυξημένη αξιοπιστία, επεκτασιμότητα και ευελιξία (Abazeed, 2015).

Επιπλέον, η διαφάνεια σε όλα τα πρωτόκολλα και τους ρυθμούς μετάδοσης παραμένει πρωταρχικό χαρακτηριστικό των μελλοντικών οπτικών δικτύων. Αυτή η διαφάνεια διασφαλίζει ότι οι υπηρεσίες μπορούν να παρέχονται μέσω μιας ενιαίας τηλεπικοινωνιακής υποδομής, διευκολύνοντας την απρόσκοπτη λειτουργία ακόμη και εν μέσω εξελισσόμενων πρωτοκόλλων ή αλλαγών στο ρυθμό μετάδοσης. Τα οπτικά δίκτυα δεύτερης γενιάς παρουσίασαν διαφάνεια όσον αφορά τα μεταφερόμενα δεδομένα, καθορίζοντας μέγιστους και ελάχιστους ρυθμούς μετάδοσης σε κάθε οπτική διαδρομή (Tomkos et al., 2014).

Συμπερασματικά, η μελλοντική πορεία των οπτικών δικτύων σηματοδοτεί μια καίρια μετατόπιση προς πιο προσαρμοστικές, αποδοτικές και ανθεκτικές υποδομές επικοινωνίας. Εξασφαλίζοντας σταθερό εύρος ζώνης, αξιοποιώντας την αποτελεσματικότητα της μεταγωγής πακέτων και εμβαθύνοντας στη σφαίρα της οπτικής μεταγωγής πακέτων, τα δίκτυα αυτά υπόσχονται βελτιωμένη απόδοση και προσαρμοστικότητα. Επιπλέον, η δέσμευσή τους για διαφάνεια σε όλα τα πρωτόκολλα και τους ρυθμούς μετάδοσης ενισχύει το ρόλο τους ως θεμέλιο των μελλοντικών τηλεπικοινωνιακών υποδομών, ικανών να εξελίσσονται απρόσκοπτα με τις τεχνολογικές εξελίξεις, ενώ παράλληλα ανταποκρίνονται στις συνεχώς αυξανόμενες απαιτήσεις της σύγχρονης συνδεσιμότητας.

## **5.2 Νέες τεχνολογίες και αρχιτεκτονική δικτύων**

Η ενότητα περιγράφει μια ολοκληρωμένη σειρά καινοτόμων έργων που αποσκοπούν στην προώθηση του τοπίου των τεχνολογιών οπτικών δικτύων στο ευρύτερο πλαίσιο της έρευνας και της καινοτομίας 6G. Τα έργα αυτά, τα οποία επιλέχθηκαν από την κοινή επιχείρηση "Εξυπνα δίκτυα και υπηρεσίες" (SNS JU), είναι έτοιμα να επιφέρουν μετασχηματιστικές αλλαγές αντιμετωπίζοντας κρίσιμες πτυχές σε διάφορους τομείς των τεχνολογιών 6G.

### *Εξελίξεις στην αρχιτεκτονική συστημάτων:*

Αξιοσημείωτα έργα όπως τα 6G-CLOUD, 6G-TWIN, Origami και 6G-INTENSE επικεντρώνονται στην ενίσχυση της θεμελιώδους αρχιτεκτονικής των δικτύων 6G. Οι πρωτοβουλίες αυτές αποσκοπούν στην ενίσχυση της ανθεκτικότητας, της προσαρμοστικότητας και της αποδοτικότητας εν όψει των ακραίων περιπτώσεων χρήσης και των απαιτήσεων που αναμένονται στην εποχή 6G. Αξιοποιώντας την Τεχνητή Νοημοσύνη, τα έργα αυτά εισάγουν νέες προσεγγίσεις για την αδελφοποίηση δικτύων, την ενσωμάτωση πόρων και τις αρχιτεκτονικές με τεχνητή νοημοσύνη για πιο εύρωστα και βιώσιμα συστήματα 6G (Ευρωπαϊκή Επιτροπή, 2023).

### *Τεχνολογίες ασύρματων επικοινωνιών και επεξεργασία σήματος:*

Έργα όπως τα 6G-DISAC, 6G-GOALS, iSEE-6G και INSTINCT εμβαθύνουν στη διερεύνηση προηγμένων τεχνολογιών ασύρματης επικοινωνίας και ολοκληρωμένων μοντέλων ανίχνευσης επικοινωνιών. Αυτές οι πρωτοβουλίες στοχεύουν στην πρωτοποριακή κατανομημένη ευφυή ανίχνευση, τα σημασιολογικά δίκτυα επικοινωνίας και τα ολοκληρωμένα συστήματα ανίχνευσης, ενέργειας και επικοινωνίας, επιτρέποντας πρωτοποριακή πρόοδο στην τεχνολογία επικοινωνίας και την επεξεργασία σήματος για το τοπίο 6G (Ευρωπαϊκή Επιτροπή, 2023).

### *Τεχνολογίες και συσκευές επικοινωνιακής υποδομής:*

Προσπάθειες όπως οι PROTEUS-6G, ECO-eNET, Opti-6G και 6G-EWOC είναι αφιερωμένες στην ενίσχυση και επέκταση της φυσικής και εικονικής υποδομής που είναι απαραίτητη για την υποστήριξη των τεχνολογιών 6G. Τα έργα αυτά περιλαμβάνουν εξελίξεις στην οπτική και ασύρματη ολοκλήρωση, την αναμορφώσιμη οπτική μεταφορά, τα αποδοτικά δίκτυα άκρων και τα δίκτυα οπτικών ινών που υποστηρίζονται από τεχνητή νοημοσύνη και είναι ζωτικής σημασίας για την εξέλιξη της υποδομής 6G (Ευρωπαϊκή Επιτροπή, 2023).

### *Αξιόπιστες υπηρεσίες και έξυπνη ασφάλεια:*

Πρωτοβουλίες όπως SAFE-6G, NETWORK, iTrust6G και ROBUST-6G υπογραμμίζουν τη σημασία των ασφαλών και αξιόπιστων υπηρεσιών στη μετάβαση στην 6G. Τα έργα αυτά επικεντρώνονται στη δημιουργία πλαισίων και πλατφορμών για την ενίσχυση της εμπιστοσύνης, της αυτοανθεκτικότητας, της έξυπνης

ενορχήστρωσης εμπιστοσύνης και ασφάλειας και της αυτοματοποίησης στις πλατφόρμες υπηρεσιών ασφαλείας για το οικοσύστημα 6G (Ευρωπαϊκή Επιτροπή, 2023).

*Πειραματική υποδομή SNS και δοκιμές μεγάλης κλίμακας:*

Το έργο UNRISE-6G αποσκοπεί στη δημιουργία μιας πανευρωπαϊκής πειραματικής υποδομής 6G με ομοσπονδιακές δυνατότητες, που θα συμβάλει στην επικύρωση διαλειτουργικών αρχιτεκτονικών 6G. Επιπλέον, έργα όπως το 6G-PATH και το Envelope δίνουν έμφαση στη μεταφορά τεχνολογιών 6G σε πραγματικές εφαρμογές σε διάφορους τομείς, όπως η συνδεδεμένη κινητικότητα, η υγειονομική περίθαλψη, οι έξυπνες πόλεις, η γεωργία και η εκπαίδευση. Οι πρωτοβουλίες αυτές αποσκοπούν στην επικύρωση της τεχνολογίας, ενώ παράλληλα τις δοκιμάζουν σε επιχειρηματικούς και βιομηχανικούς τομείς προτεραιότητας, συμβάλλοντας σημαντικά στην τεχνολογική πρόοδο της Ευρώπης (Ευρωπαϊκή Επιτροπή, 2023).

Τα έργα που παρουσιάστηκαν στις νέες τεχνολογίες οπτικών δικτύων υπογραμμίζουν μια ολιστική προσέγγιση για την αντιμετώπιση των πολύπλευρων προκλήσεων και ευκαιριών στην εξέλιξη προς την 6G, αναδεικνύοντας τον καθοριστικό ρόλο που θα διαδραματίσουν οι πρωτοβουλίες αυτές στη διαμόρφωση του μέλλοντος των τεχνολογιών δικτύων, των συστημάτων επικοινωνίας και των πρακτικών εφαρμογών τους.

### **5.2.1 Αρχιτεκτονική 6G**

Το όραμα που περιγράφεται για την αρχιτεκτονική του δικτύου 6G εισάγει μια αλλαγή προτύπου, με στόχο τη δημιουργία ενός εξαιρετικά εξειδικευμένου, ευέλικτου και προσαρμόσιμου πλαισίου, ικανού να φιλοξενήσει ποικίλες περιπτώσεις χρήσης και να ανταποκριθεί στις εξελισσόμενες απαιτήσεις της ψηφιακής εποχής (Huang et al., 2019) (Εικ. 4.1)

*Κατανομημένες και ετερογενείς πλατφόρμες νέφους:* Η αρχιτεκτονική 6G αγκαλιάζει την ανάπτυξη σε διάφορες πλατφόρμες νέφους, τόσο δημόσιες όσο και ιδιωτικές, επιτρέποντας τη συμμετοχή πολλών ενδιαφερομένων και αξιοποιώντας ποικίλες δυνατότητες, συμπεριλαμβανομένης της επιτάχυνσης υλικού. Αυτή η κατανομημένη προσέγγιση υπόσχεται να διευκολύνει υψηλούς βαθμούς εξειδίκευσης και



προσαρμογής, υποστηρίζοντας μεγάλης κλίμακας δίκτυα ευρείας περιοχής καθώς και τοπικά δίκτυα εσωτερικών χώρων και προσωπικά δίκτυα, προσαρμόζοντας έτσι κάθε δίκτυο στις ειδικές ανάγκες ανάπτυξής του (Liu et al., 2020).

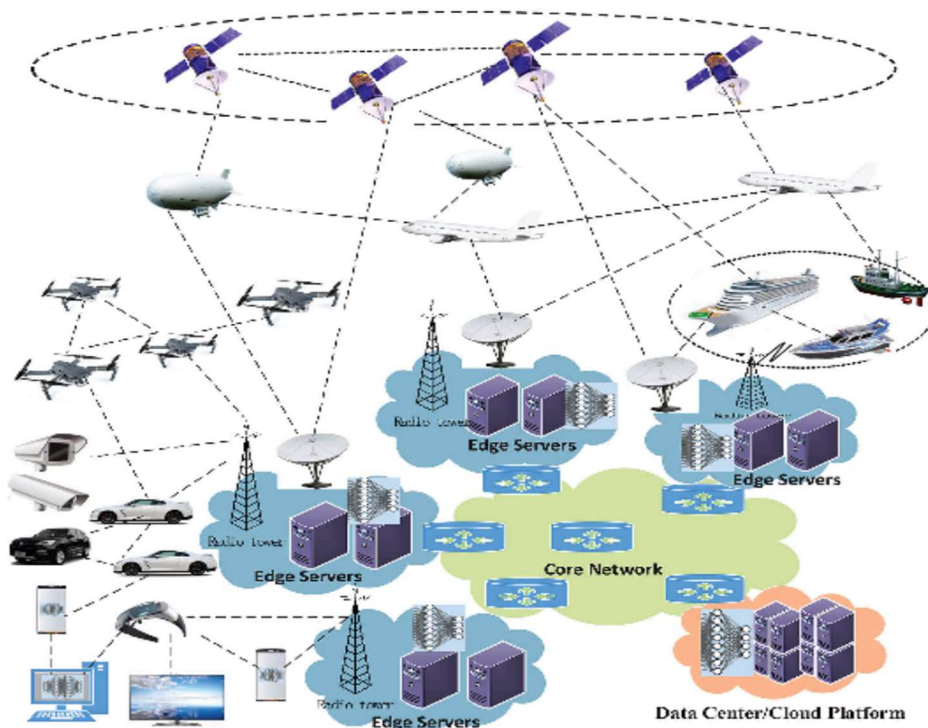
*Αρθρωτότητα και προσαρμογή:* Μια καινοτόμος πτυχή έγκειται στην αρθρωτή κατασκευή των δικτύων 6G, που μοιάζει με τη συναρμολόγηση Lego. Οι ανοικτές και βασισμένες σε υπηρεσίες διεπαφές δίνουν στους πελάτες τη δυνατότητα να συναρμολογούν με ευελιξία τα στρώματα δικτύου, ενσωματώνοντας υπηρεσίες και λειτουργίες από πολλούς προμηθευτές ανάλογα με τις συγκεκριμένες ανάγκες. Αυτή η προσέγγιση εξασφαλίζει προσαρμοστικότητα και επιτρέπει την προσαρμογή, θολώνοντας έτσι τη διάκριση μεταξύ δικτύων πρόσβασης και δικτύων πυρήνα και διευκολύνοντας την αμεσότερη επικοινωνία μεταξύ των λειτουργιών του δικτύου ραδιοπρόσβασης (RAN) και του δικτύου πυρήνα (Dryjański et al., 2021).

*Προηγμένη αυτοματοποίηση και επεξεργασία δεδομένων:* Τα χαρακτηριστικά αυτοματοποίησης που ενσωματώνονται στην αρχιτεκτονική 6G υπόσχονται να παρέχουν βελτιωμένη οργάνωση και αυτοματοποίηση σε διάφορους τομείς δικτύου, ενδιαφερόμενους φορείς και τομείς διαχείρισης. Για την υποστήριξη αναδυόμενων υπηρεσιών όπως η AI/ML, η επαυξημένη πραγματικότητα (XR) και το metaverse, οι σημαντικές δυνατότητες υπολογισμού και αποθήκευσης θα είναι ζωτικής σημασίας. Ως εκ τούτου, προτείνεται μια ειδική αρχιτεκτονική δεδομένων και πληροφοριών, με στόχο την αποτελεσματική συλλογή και επεξεργασία τεράστιων ποσοτήτων δεδομένων από πολλαπλές πηγές εντός του συστήματος 6G (Huynh-The et al., 2022).

*Μελλοντική προσασία και εξέλιξη του δικτύου:* Η αρχιτεκτονική υπογραμμίζει την ανάγκη για συνεχή καινοτομία και εξέλιξη, αξιοποιώντας δοκιμασμένες ιδέες και πρόσφατες καινοτομίες. Η προσέγγιση της Nokia για τη βελτίωση των δυνατοτήτων του δικτύου στο 5G-Advanced σηματοδοτεί μια στροφή προς το σχεδιασμό δικτύων πέρα από έναν απλό κατάλογο χαρακτηριστικών, εστιάζοντας στη βελτίωση των δυνατοτήτων σε τρεις διαστάσεις: εμπειρία, επέκταση και αριστεία. Αυτή η νοοτροπία θέτει τις βάσεις για τη μετάβαση σε μια νέα αρχιτεκτονική συστήματος 6G που αξιοποιεί τις πρόσφατες καινοτομίες στο έπακρο (Soldani et al., 2023).

*Ενσωμάτωση αναδυόμενων τεχνολογιών:* Η αρχιτεκτονική εξετάζει διάφορα τεχνολογικά στοιχεία που θα μπορούσαν να καθορίσουν το μέλλον των δικτύων 6G, συμπεριλαμβανομένων των νέων τεχνολογιών φάσματος, των πλαισίων διεπαφής με βάση την AI/ML, των ενισχυμένων μηχανισμών ασφάλειας και εμπιστοσύνης και της ποιοτικής συνδεσιμότητας. Οι τεχνολογίες αυτές προβλέπεται να ενσωματωθούν στον ιστό της αρχιτεκτονικής του συστήματος 6G, διευκολύνοντας ριζικές αλλαγές στην κατασκευή και τη λειτουργία του δικτύου (Kaloxylou et al., 2020).

Στην ουσία, η προτεινόμενη αρχιτεκτονική δικτύου 6G επιδιώκει να αντιμετωπίσει τους σημερινούς περιορισμούς του δικτύου, να βελτιστοποιήσει τον σχεδιασμό και να αναπτύξει απρόσκοπτη συνδεσιμότητα, ενώ παράλληλα αξιοποιεί τη δύναμη της τεχνητής νοημοσύνης, των υπολογιστών αιχμής και των αστραπιαίων ταχυτήτων για τον συντονισμό πολύπλοκων συστημάτων και την παροχή μιας ανώτερης εμπειρίας διαδικτύου. Ο αρθρωτός, προσαρμόσιμος και προοδευτικός χαρακτήρας αυτής της αρχιτεκτονικής ενσωματώνει τη δυνατότητα να διαμορφώσει το μέλλον της δικτύωσης, επαναπροσδιορίζοντας τον τρόπο με τον οποίο σχεδιάζονται, λειτουργούν και βιώνουν τα δίκτυα.



**Εικόνα 4.1.** Αρχιτεκτονική δικτύου 6G

## 5.2.2 Άλλες τεχνολογίες

Η εμφάνιση των αναδυόμενων τεχνολογιών στην οραματική εποχή 6G σηματοδοτεί μια βαθιά στροφή προς τις πιο καθηλωτικές και αλληλένδετες εμπειρίες, ξεπερνώντας τα όρια των σημερινών τεχνολογικών επιτευγμάτων. Αυτό το υποσύνολο των αναδυόμενων τεχνολογιών, όπως προβλέπουν οι ειδικοί, προβλέπει ένα μέλλον όπου η εικονική πραγματικότητα (VR) στο 5G θα είναι μόνο η αρχή. Στην εποχή του 6G, αναμένονται οι δυνατότητες για ακόμη πιο συναρπαστικές τεχνολογίες, όπως επιφάνειες κυττάρων, συνδεδεμένα εμφυτεύματα και ασύρματες διεπαφές εγκεφάλου-υπολογιστή.

Εντυπωσιακές τεχνολογίες: Πιθανόν να υπάρξει στροφή από τα smartphones προς τα έξυπνα wearables, τα ακουστικά και τα εμφυτεύματα που είναι ικανά για άμεσες αισθητηριακές εισροές στον άνθρωπο. Αυτή η εξέλιξη υποδηλώνει ένα παράδειγμα όπου η τεχνολογία ενσωματώνεται περισσότερο στις ανθρώπινες εμπειρίες, θολώνοντας τα όρια μεταξύ της φυσικής ζωής και του κυβερνοχώρου. Η προοπτική αυτών των τεχνολογιών δείχνει ένα μέλλον όπου η ανθρώπινη σκέψη και δράση θα μπορεί να υποστηρίζεται άμεσα από τον κυβερνοχώρο, εγκαινιάζοντας μια νέα εποχή καθηλωτικών εμπειριών και διασύνδεσης.

Νανοπυρηνικός υπολογισμός: Ένα σημαντικό τεχνολογικό άλμα που προβλέπεται για την 6G περιλαμβάνει την εμφάνιση ενός νανοπυρήνα, ενός προηγμένου υπολογιστικού πυρήνα που συνδυάζει στοιχεία υπολογισμού υψηλής απόδοσης (HPC) και τεχνητής νοημοσύνης. Ο νανοπυρήνας, που ενδεχομένως δεν είναι ένα φυσικό στοιχείο δικτύου αλλά μάλλον μια λογική συγκέντρωση υπολογιστικών πόρων, θα μπορούσε να διαμοιράζεται σε πολλαπλά δίκτυα και συστήματα. Αυτή η καινοτομία υποδηλώνει την ενοποίηση της υπολογιστικής ισχύος και της νοημοσύνης, που πιθανώς θα φέρει επανάσταση στις αρχιτεκτονικές και τις λειτουργίες των δικτύων.

Συντονισμός και διαχείριση δεδομένων ακραίων πυρήνων: Η μετάβαση στο 6G αναμένεται να δημιουργήσει πρωτοφανείς ποσότητες δεδομένων λόγω των προηγμένων δυνατοτήτων στην ανίχνευση, την απεικόνιση και τον προσδιορισμό θέσης. Κατά συνέπεια, ο συντονισμός μεταξύ των πλατφορμών των άκρων και των πυρήνων θα εξελιχθεί για την αποτελεσματική διαχείριση και την επεξεργασία αυτής της τεράστιας εισροής δεδομένων. Αυτό καθιστά αναγκαία την εξέλιξη των κέντρων

δεδομένων και των τεχνικών διαχείρισης δεδομένων για τη διαχείριση του αυξημένου όγκου δεδομένων εκ μέρους των ιδιοκτητών δικτύων, των παρόχων υπηρεσιών και των ιδιοκτητών δεδομένων.

Συνολικά, το υποσύνολο των αναδυόμενων τεχνολογιών στο τοπίο 6G υποδηλώνει ένα μέλλον όπου η τεχνολογία θα ενσωματωθεί απρόσκοπτα στις ανθρώπινες εμπειρίες, δημιουργώντας καθηλωτικά, συνδεδεμένα και έξυπνα συστήματα. Αυτές οι εξελίξεις υποδηλώνουν μια μετασχηματιστική αλλαγή στον τρόπο με τον οποίο οι άνθρωποι αλληλεπιδρούν με την τεχνολογία, επαναπροσδιορίζοντας ενδεχομένως τα όρια μεταξύ φυσικής και ψηφιακής πραγματικότητας. Η άνοδος αυτών των τεχνολογιών δημιουργεί συναρπαστικές ευκαιρίες για καινοτομία, ενώ απαιτεί επίσης ισχυρές στρατηγικές για την αντιμετώπιση των ηθικών ανησυχιών, της ιδιωτικής ζωής και της ασφάλειας που μπορεί να συνοδεύουν την ευρεία υιοθέτησή τους (Kranz & Christensen, 2023).

## Συμπέρασμα

Η ολοκληρωμένη διερεύνηση των δικτύων οπτικών ινών και των επιπτώσεών τους σε αστικά και ημιαστικά περιβάλλοντα παρέχει ανεκτίμητες πληροφορίες για την εξέλιξη, τα χαρακτηριστικά και τις ανισότητες των δικτύων αυτών. Η μελέτη αυτή περιελάμβανε μια εκτεταμένη ανάλυση των οπτικών ινών, του εξοπλισμού τους, των διαδικασιών εγκατάστασης, των υλικών που χρησιμοποιούνται και των υπηρεσιών που προσφέρονται στο πλαίσιο αυτών των δικτύων. Επίσης, εμβάθυνε σε κρίσιμες πτυχές της αρχιτεκτονικής των δικτύων, συζητώντας τα μοντέλα OSI και TCP/IP και τις εφαρμογές τους σε αστικές και ημιαστικές περιοχές, αναδεικνύοντας τις διαφορετικές ανάγκες και προκλήσεις που θέτουν αυτές οι περιοχές.

Η σύγκριση μεταξύ αστικών και ημιαστικών δικτύων οπτικών ινών αποκάλυψε τις διαφορές στην κάλυψη, την υποδομή και τις τεχνολογίες που αναπτύσσονται. Στις αστικές περιοχές, η πυκνή κάλυψη από πύργους κινητής τηλεφωνίας, τα συστήματα κατανεμημένων κεραιών (DAS), τα Wi-Fi hotspots και η έλευση προηγμένων τεχνολογιών 4G/5G σηματοδοτούν ισχυρή συνδεσιμότητα. Αντίθετα, οι ημιαστικές περιοχές παρουσιάζουν ανισότητες στην κάλυψη του δικτύου, βασίζονται σε διαφορετικές υποδομές και αντιμετωπίζουν προκλήσεις στην παροχή ολοκληρωμένων λύσεων συνδεσιμότητας.

Η ανάλυση των αστικών και ημιαστικών δικτύων επεκτάθηκε στην παρακολούθηση, τις πρακτικές συντήρησης και τις κοινωνικοοικονομικές επιπτώσεις. Φώτισε την κρισιμότητα των συνεπών πρακτικών παρακολούθησης και συντήρησης για τη διασφάλιση αδιάλειπτων υπηρεσιών δικτύου. Επιπλέον, οι κοινωνικοοικονομικές ανισότητες αντανakλούσαν τον βαθύ αντίκτυπο της προσβασιμότητας του δικτύου στην κοινωνική ανάπτυξη και την οικονομική μεγέθυνση σε αυτές τις περιοχές.

Η συγκριτική ανάλυση μεταξύ αστικών και ημιαστικών δικτύων υπογράμμισε τις διαφοροποιημένες διαφορές στις εκτιμήσεις για το δίκτυο, τις κοινωνικοοικονομικές επιπτώσεις και τις τεχνολογικές ανισότητες. Υπογράμμισε την επείγουσα ανάγκη για προσαρμοσμένες λύσεις που να ανταποκρίνονται στις μοναδικές απαιτήσεις και των δύο περιβαλλόντων, τονίζοντας τη σημασία της γεφύρωσης του ψηφιακού χάσματος με την αντιμετώπιση των ελλείψεων στις υποδομές και την ανάπτυξη κατάλληλων τεχνολογιών για τη διασφάλιση ισότιμης πρόσβασης στη συνδεσιμότητα.

Επιπλέον, το έγγραφο προέβλεψε το μέλλον των οπτικών δικτύων, τονίζοντας την ανάγκη για συνεχείς εξελίξεις και καινοτομίες. Οι μελλοντικές προοπτικές των οπτικών δικτύων υποδεικνύουν μια εξέλιξη προς πιο ισχυρές αρχιτεκτονικές και τεχνολογίες, που θα ανταποκρίνονται στις συνεχώς αυξανόμενες απαιτήσεις της μετάδοσης δεδομένων και της συνδεσιμότητας. Οι νέες τεχνολογίες και αρχιτεκτονικές θα διαδραματίσουν καθοριστικό ρόλο στην επέκταση των δυνατοτήτων των δικτύων, εξασφαλίζοντας ταχύτερα, πιο αξιόπιστα και αποδοτικά συστήματα επικοινωνίας.

Συμπερασματικά, η παρούσα εργασία ρίχνει φως στον περίπλοκο κόσμο των δικτύων οπτικών ινών, περιγράφοντας τις λειτουργικότητες, τις διαφορές και τις μελλοντικές τους πορείες. Η διερεύνηση των διαφορών των αστικών και ημιαστικών δικτύων υπογραμμίζει την επιτακτική ανάγκη για προσαρμοσμένες λύσεις για δίκαιη συνδεσιμότητα. Καθώς η τεχνολογία εξελίσσεται, οι μελλοντικές εξελίξεις στα οπτικά δίκτυα θα ανοίξουν αναμφίβολα το δρόμο για την ενισχυμένη συνδεσιμότητα, την προώθηση της κοινωνικοοικονομικής ανάπτυξης και τη γεφύρωση του χάσματος μεταξύ αστικών και ημιαστικών περιοχών στην ψηφιακή εποχή.

## Βιβλιογραφία

- Abazeed, M. (2015). *A Review of Secure Routing Approaches for Current and Next-Generation Wireless Multimedia Sensor Networks - Mohammed Abazeed, Kashif Saleem, Abdelouahid Derhab, Mehmet A. Orgun, Norsheila Fisal, Jalal Al-Muhtadi, Suleiman Zubair, 2015*. International Journal of Distributed Sensor Networks. <https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1155/2015/524038>
- Alade, T., & Ahmed, Q. Z. (2019). Performance Comparison of Small Cell and Distributed Antenna Systems for In-Building Mobile Communications. *Worcester Research and Publications (University of Worcester)*.  
<https://doi.org/10.1109/vtcspring.2019.8746681>
- Alani, M. M. (2014). Guide to OSI and TCP/IP Models. *SpringerLink*.  
<https://doi.org/10.1007-978-3-319-05152-9>
- Allwood, G., Wild, G., & Hinckley, S. (2016). Optical Fiber Sensors in Physical Intrusion Detection Systems: A Review. *IEEE Sensors Journal*, 16(14), 5497–5509. <https://doi.org/10.1109/jsen.2016.2535465>
- Awang, A., Husain, K., Kamel, N., & AïssaS. (2017). Routing in Vehicular Ad-hoc Networks: A Survey on Single- and Cross-Layer Design Techniques, and Perspectives. *IEEE Access*, 5, 9497–9517.  
<https://doi.org/10.1109/access.2017.2692240>
- Bartolín-Arnau, L. M., Todoli-Ferrandis, D., Sempere-Payá, V., Silvestre-Blanes, J., & Climent, S. (2022). LoRaWAN Networks for Smart Applications in Rural Settings. *IETE Technical Review*, 40(3), 440–452.  
<https://doi.org/10.1080/02564602.2022.2121773>

- Boukerche, A., & Darehshoorzadeh, A. (2015). Opportunistic Routing in Wireless Networks: Models, Algorithms, and Classifications. *ACM Computing Surveys*, 47(2), 1–36. <https://doi.org/10.1145/2635675>
- Chowdhury, M. Z., Hasan, Moh. K., Shahjalal, Md., Tanvir Hossan, Md., & Jang, Y. M. (2020). Optical Wireless Hybrid Networks: Trends, Opportunities, Challenges, and Research Directions. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 22(2), 930–966. <https://doi.org/10.1109/comst.2020.2966855>
- Dryjański, M., Kułacz, Ł., & Kliks, A. (2021). Toward Modular and Flexible Open RAN Implementations in 6G Networks: Traffic Steering Use Case and Open RAN xApps. *Sensors*, 21(24), 8173–8173. <https://doi.org/10.3390/s21248173>
- Eldada, L. A. (2004). Optical communication components. *Review of Scientific Instruments*, 75(3), 575–593. <https://doi.org/10.1063/1.1647701>
- Elliott, B. J., Elliott, B., & Gilmore, M. (2002). Fiber Optic Cabling. In *Google Books*. Newnes. [https://books.google.gr/books?hl=en&lr=&id=IkihbMfd394C&oi=fnd&pg=PR11&dq=Fibre+optic+cables+form+the+basis+of+fibre+optic+networks.&ots=Bt935oHzKi&sig=IOZC9kg0cL9aiSMdP6V\\_KHS9nJM&redir\\_esc=y#v=onepage&q=Fibre%20optic%20cables%20form%20the%20basis%20of%20fibre%20optic%20networks.&f=false](https://books.google.gr/books?hl=en&lr=&id=IkihbMfd394C&oi=fnd&pg=PR11&dq=Fibre+optic+cables+form+the+basis+of+fibre+optic+networks.&ots=Bt935oHzKi&sig=IOZC9kg0cL9aiSMdP6V_KHS9nJM&redir_esc=y#v=onepage&q=Fibre%20optic%20cables%20form%20the%20basis%20of%20fibre%20optic%20networks.&f=false)
- Evangelista, R., Guerrieri, P., & Meliciani, V. (2014). The economic impact of digital technologies in Europe. *Economics of Innovation and New Technology*, 23(8), 802–824. <https://doi.org/10.1080/10438599.2014.918438>
- Farmer, J., Lane, B., Bourg, K. and Wang, W. (2016). *FTTx Networks: Technology Implementation and Operation*. [online] *Google Books*. Morgan Kaufmann. Available at:



[https://books.google.gr/books?hl=en&lr=&id=0tqcBAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=FTTx+network+deployment&ots=zHwzQtmKhG&sig=usSY3tjW1CW5ibuM4nkmL2dxAqw&redir\\_esc=y#v=onepage&q=FTTx%20network%20deployment&f=false](https://books.google.gr/books?hl=en&lr=&id=0tqcBAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=FTTx+network+deployment&ots=zHwzQtmKhG&sig=usSY3tjW1CW5ibuM4nkmL2dxAqw&redir_esc=y#v=onepage&q=FTTx%20network%20deployment&f=false) [Accessed 2 Feb. 2024].

Fu, L., Johansson, M., & Bengtsson, M. (2015). Energy Efficient Transmissions in Cognitive MIMO Systems With Multiple Data Streams. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 14(9), 5171–5184.

<https://doi.org/10.1109/twc.2015.2434372>

Hossain, D. M. S. (2023). THE IMPACT OF INFORMATION AND COMMUNICATION TECHNOLOGY IN EDUCATION : A RESEARCH STUDY. In *Google Books*. Booksclinic Publishing.

<https://books.google.gr/books?hl=en&lr=&id=3QLFEAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA1&dq=In+semi-urban+areas>

Huang, T., Yang, W., Wu, J., Ma, J., Zhang, X., & Zhang, D. (2019). A Survey on Green 6G Network: Architecture and Technologies. *IEEE Access*, 7, 175758–175768. <https://doi.org/10.1109/access.2019.2957648>

Huynh-The, T., Pham, Q.-V., Pham, X.-Q., Nguyen, T. T., Han, Z., & Kim, D.-S. (2022). *Artificial Intelligence for the Metaverse: A Survey*. ArXiv.org.

<https://arxiv.org/abs/2202.10336>

Junjalearnvong, T., Habara, T., Okumura, R., Mizutani, K., & Harada, H. (2017). *A dynamic routing protocol supporting mobile nodes in Wi-SUN FAN systems*.

<https://doi.org/10.1109/wpmc.2017.8301832>

Kafi, M. A., Djenouri, D., Ben-Othman, J., & Badache, N. (2014). Congestion Control Protocols in Wireless Sensor Networks: A Survey. *IEEE*

*Communications Surveys and Tutorials*, 16(3), 1369–1390.

<https://doi.org/10.1109/surv.2014.021714.00123>

Kaloxylas, A., Gavras, A., Mur, D. C., Ghoraiishi, M., & Hrasnica, H. (2020). *AI and ML – Enablers for Beyond 5G Networks*.

<https://doi.org/10.5281/zenodo.4299895>

Khalaf, O. I., & Abdulsahib, G. M. (2021). An Improved Efficient Bandwidth Allocation using TCP Connection for Switched Network. *Journal of Applied Science and Engineering*, 24(5), 735–741.

[https://doi.org/10.6180/jase.202110\\_24\(5\).0007](https://doi.org/10.6180/jase.202110_24(5).0007)

Khaniabadi, S. M., Javadpour, A., Gheisari, M., Zhang, W., Liu, Y., & Sangaiah, A. K. (2022). An intelligent sustainable efficient transmission internet protocol to switch between User Datagram Protocol and Transmission Control Protocol in IoT computing. *Expert Systems*, 40(5). <https://doi.org/10.1111/exsy.13129>

Khatib, M., & Alsadi, S. (2020). *Wireless Mesh Networks: Security, Architectures and Protocols*. In *Google Books*. BoD – Books on Demand.

[https://books.google.gr/books?hl=el&lr=&id=Ezj8DwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA1&dq=Wireless+mesh+networks&ots=OSrwJaNH8N&sig=gyInz9T3-EJXBW5AnfbAQUfCS0U&redir\\_esc=y#v=onepage&q=Wireless%20mesh%20networks&f=false](https://books.google.gr/books?hl=el&lr=&id=Ezj8DwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA1&dq=Wireless+mesh+networks&ots=OSrwJaNH8N&sig=gyInz9T3-EJXBW5AnfbAQUfCS0U&redir_esc=y#v=onepage&q=Wireless%20mesh%20networks&f=false)

Komu, M., Sethi, M., & Bejar, N. (2015). A survey of identifier–locator split addressing architectures. *Computer Science Review*, 17, 25–42.

<https://doi.org/10.1016/j.cosrev.2015.04.002>

Kranz, G., & Christensen, G. (2023). *What is 6G? Overview of 6G networks & technology*. Networking; TechTarget.

<https://www.techtarget.com/searchnetworking/definition/6G>

- Ling, J., Satish Kanugovi, Vasudevan, S., & A Krishna Pramod. (2015). Enhanced capacity and coverage by Wi-Fi LTE integration. *IEEE Communications Magazine*, 53(3), 165–171. <https://doi.org/10.1109/mcom.2015.7060499>
- Liu, G., Huang, Y., Li, N., Dong, J., Jin, J., Wang, X., & Li, N. (2020). Vision, requirements and network architecture of 6G mobile network beyond 2030. *China Communications*, 17(9), 92–104. <https://doi.org/10.23919/jcc.2020.09.008>
- Liu, J., Wan, J., Jia, D., Zeng, B., Li, D., Hsu, C., & Chen, H. (2017). High-Efficiency Urban Traffic Management in Context-Aware Computing and 5G Communication. *IEEE Communications Magazine*, 55(1), 34–40. <https://doi.org/10.1109/mcom.2017.1600371>
- López-Higuera, J. M., Luis Rodríguez Cobo, Antonio Quintela Incera, & Cobo, A. (2011). Fiber Optic Sensors in Structural Health Monitoring. *Journal of Lightwave Technology*, 29(4), 587–608. <https://doi.org/10.1109/jlt.2011.2106479>
- Mainanwal, V., Gupta, M., & Upadhayay, S. K. (2015). *A survey on wireless body area network: Security technology and its design methodology issue*. <https://doi.org/10.1109/iciiecs.2015.7193088>
- Marcus, M. (2018). The Growing Visual Impact of Wireless Antennas in the Urban Landscape: Strategies for Coexistence. *IEEE Wireless Communications*, 25(1), 4–5. <https://doi.org/10.1109/mwc.2018.8304381>
- Maria, P., Aprinal Adila Asri, Yustini Yustini, Ihsan Lumasa Rimra, & Deddy Prayama. (2022). Fiber to The Home (FTTH) Network Design in Analyzing Macro Bending Problems in The Home Cable Installation Segment.

*International Journal of Advanced Science Computing and Engineering*, 4(2), 138–154. <https://doi.org/10.30630/ijasce.4.2.90>

- N. Andriolli, Giorgetti, A., Castoldi, P., Cecchetti, G., Cerutti, I., Sambo, N., Sgambelluri, A., L. Valcarenghi, Cugini, F., Martini, B., & Paolucci, F. (2022). Optical networks management and control: A review and recent challenges. *Optical Switching and Networking*, 44, 100652–100652. <https://doi.org/10.1016/j.osn.2021.100652>
- Nirban , B. (2015). *Mobile multimedia performance differences in a UMTS LTE-based self-organizing network with and without soft handover - ProQuest*. [Www.proquest.com](http://www.proquest.com). <https://www.proquest.com/openview/afd071e9de5f38318dad654a23719e63/1?pq-origsite=gscholar&cbl=18750>
- Oughton, E. J. (2016). Studying the Costs of Fibre Deployment in Fixed Broadband Access Infrastructure: Evidence from the UK’s National Needs Assessment. *Econstor.eu*. <http://hdl.handle.net/10419/148695>
- Schneir, J.R. and Xiong, Y. (2016). A cost study of fixed broadband access networks for rural areas. *Telecommunications Policy*, [online] 40(8), pp.755–773. doi:<https://doi.org/10.1016/j.telpol.2016.04.002>.
- Singh, A. K., Firoz, N., Tripathi, A., Singh, K., Choudhary, P., & Vashist, P. C. (2020). Internet of Things: from hype to reality. *Elsevier EBooks*, 191–230. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-821326-1.00007-3>
- Soldani, D., Petrit Nahi, Bour, H., Saber Jafarizadeh, Hamed, M., Leonardo Di Giovanna, Monaco, F., Ognibene, G., & Risso, F. (2023). eBPF: A New Approach to Cloud-Native Observability, Networking and Security for

Current (5G) and Future Mobile Networks (6G and Beyond). *IEEE Access*, 11, 57174–57202. <https://doi.org/10.1109/access.2023.3281480>

Tomkos, I., Azodolmolky, S., Solé-Pareta, J., Careglio, D., & Palkopoulou, E. (2014). A tutorial on the flexible optical networking paradigm: State of the art, trends, and research challenges. *Proceedings of the IEEE*, 102(9), 1317–1337. <https://doi.org/10.1109/jproc.2014.2324652>

Zhu, Y., Wang, J., & Wu, K. (2017). *Open System Interconnection for Energy: A Reference Model of Energy Internet*. <https://doi.org/10.1109/icei.2017.62>

Ευρωπαϊκή Επιτροπή. (2023). *Η έρευνα για το 6G λαμβάνει ενίσχυση 130 εκατ. ευρώ από την ΕΕ στην Ευρώπη*. Shaping Europe's Digital Future. <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/news/6g-research-gets-eu130-million-eu-funding-boost-europe>