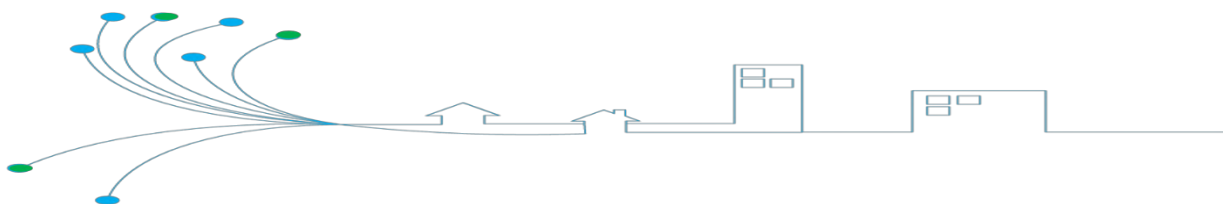


ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΑΝΟΙΚΤΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ (ΔΧΤ)»

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«Σχεδιασμός, Διαχείριση και Τεχνοοικονομική Αξιολόγηση
Δικτύων FTTH: Μελέτη Περίπτωσης του Έργου Ultra-Fast
Broadband (UFBB)»**



ΑΘΑΝΑΣΙΑ ΣΩΤΗΡΟΠΟΥΛΟΥ
ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ Τ.Ε.

Επιβλέπων καθηγητής: ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΣΑΛΩΝΙΤΗΣ

Πάτρα, Μάιος 2026

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του φοιτητή («συγγραφέας/δημιουργός») που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο ΕΑΠ, μη αποκλειστική άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, προσαρμογής, δημόσιου δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσής τους διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος και για όλο το χρόνο διάρκειας των δικαιωμάτων πνευματικής ιδιοκτησίας. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο για μελέτη και ανάγνωση δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, αποθήκευση, πώληση, εμπορική χρήση, μετάδοση, διανομή, έκδοση, εκτέλεση, «μεταφόρτωση» (downloading), «ανάρτηση» (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού. Ο συγγραφέας/δημιουργός διατηρεί το σύνολο των ηθικών και περιουσιακών του δικαιωμάτων.

ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΑΝΟΙΚΤΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ (ΔΧΤ)»

**«Σχεδιασμός, Διαχείριση και Τεχνοοικονομική Αξιολόγηση
Δικτύων FTTH: Μελέτη Περίπτωσης του Έργου Ultra-Fast
Broadband (UFBB)»**

ΑΘΑΝΑΣΙΑ ΣΩΤΗΡΟΠΟΥΛΟΥ
ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ Τ.Ε.
(Α.Μ.: 160754)

Επιτροπή Επίβλεψης Πτυχιακής / Διπλωματικής Εργασίας

Επιβλέπων Καθηγητής:
ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΣΑΛΩΝΙΤΗΣ

Β' Αξιολογητής Καθηγητής:
ΔΗΜΗΤΡΙΟΥ ΔΗΜΗΤΡΗΣ

Συντονιστής Προγράμματος: ΧΑΤΖΗΓΕΩΡΓΙΟΥ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

Πάτρα, Μάιος 2026

«Ευχαριστίες ή Αφιέρωση»

Για την υλοποίηση της παρούσας Διπλωματικής μου εργασίας θα ήθελα θερμά να ευχαριστήσω το σύνολο των καθηγητών μου στο Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω την Εταιρεία **COSMOTE** για την τόσο σημαντική βοήθεια, γνώση και εμπειρία που μου πρόσφερε κατά την διάρκεια εκπόνησης της συγκεκριμένης Διπλωματικής εργασίας καθώς και την μια από τους κυρίους Ανάδοχους του έργου, την κατασκευαστική εταιρεία **«SATnVOICE IKE»**. Συγκεκριμένα, τον κ. Δήμου Λεωνίδα καθώς και τον κ. Παπανικολάου Φώτιο, Επιβλέπων Μηχανικό του έργου UFBB για την περιοχή της Κορινθίας που μου έδωσαν την απαιτούμενη τεκμηρίωση και την δυνατότητα της κατ' ιδίαν επίσκεψης στο πεδίο για τη συλλογή πραγματικών δεδομένων όσο αφορά στο χρόνο και στο τρόπο υλοποίησης του έργου.

Περίληψη

Η διαρκώς αυξανόμενη ζήτηση για αξιόπιστες ευρυζωνικές υπηρεσίες υψηλών ταχυτήτων φέρνει στο προσκήνιο τις οπτικές ίνες. Η παρούσα διπλωματική εργασία διερευνά τον ρόλο της τεχνολογίας FTTH στην αναβάθμιση των τηλεπικοινωνιακών δυνατοτήτων της Ελλάδας. Επίκεντρο αποτελεί το UFBB, μία από τις σημαντικότερες πρωτοβουλίες που υλοποιούνται σήμερα στην Ευρώπη μέσω Σύμπραξης Δημοσίου και Ιδιωτικού Τομέα. Εξετάζονται οι κυριότερες λύσεις πρόσβασης νέας γενιάς, οι αρχιτεκτονικές παθητικών οπτικών συστημάτων και οι δυνατότητες που προσφέρουν για υπηρεσίες Gigabit και καινοτόμες ψηφιακές λειτουργίες. Αναδεικνύεται η σημασία των σύγχρονων χρηματοδοτικών και οργανωτικών σχημάτων για την ολοκλήρωση σύνθετων επενδύσεων μεγάλης κλίμακας, οι οποίες προϋποθέτουν πόρους, εξειδικευμένη εμπειρία και μακροπρόθεσμο προγραμματισμό. Μέσω της μελέτης περίπτωσης της Περιφερειακής Ενότητας Κορινθίας αποτυπώνονται οι κυριότερες τεχνικές, διοικητικές και κατασκευαστικές παράμετροι που συνοδεύουν την παροχή οπτικής συνδεσιμότητας μέχρι τον τελικό χρήστη. Ιδιαίτερη μνεία γίνεται στις διαδικασίες αδειοδότησης και στις εργασίες πεδίου για τη δημιουργία υπόγειων και εναέριων οδεύσεων. Μελετήθηκαν και πτυχές οικονομικής αξιολόγησης και χρηματοοικονομικής βιωσιμότητας κατά την εφαρμογή του εγχειρήματος. Τα ευρήματα καταδεικνύουν ότι η διείσδυση της συγκεκριμένης τεχνολογικής λύσης συνδράμει στη γεφύρωση του ψηφιακού χάσματος και στην ενίσχυση της ανάπτυξης περιοχών με περιορισμένο επενδυτικό ενδιαφέρον. Διαπιστώνεται ότι η συνεργασία μεταξύ κράτους και αγοράς μπορεί να λειτουργήσει αποτελεσματικά για την πραγματοποίηση τηλεπικοινωνιακών παρεμβάσεων στρατηγικής σημασίας, εφόσον διασφαλίζονται επαρκείς χρηματοδοτικοί πόροι, τεχνική επάρκεια και αποτελεσματικός έλεγχος των παραγόντων αβεβαιότητας.

Λέξεις – Κλειδιά

FTTH, Οπτικές Ίνες, Ultra-Fast Broadband (UFBB), 5G, Δίκτυα Πρόσβασης Νέας Γενιάς (NGA), GPON, ΣΔΙΤ, Τεχνοοικονομική Ανάλυση.

«Design, Management and Techno-Economic Evaluation of FTTH Networks: A Case Study of the Ultra-Fast Broadband (UFBB) Project»

ATHANASIA SOTIROPOULOU

Abstract

The continuously increasing demand for reliable high-speed broadband services has brought fiber-optic technology to the forefront of digital transformation. This thesis investigates the role of Fiber to the Home (FTTH) technology in enhancing Greece's telecommunications capabilities. The study focuses on the Ultra-Fast Broadband (UFBB) project, one of the most significant broadband initiatives currently being implemented in Europe through a Public–Private Partnership (PPP) scheme. The research examines the main Next Generation Access (NGA) solutions, the architectures of Passive Optical Networks (PON), and the capabilities they provide for Gigabit services and innovative digital applications. Furthermore, it highlights the importance of modern financing and organizational schemes for the successful completion of large-scale investments, which require substantial resources, specialized expertise, and long-term planning. Through a case study of the Regional Unit of Corinthia, the thesis outlines the principal technical, administrative, and construction-related aspects associated with the provision of fiber connectivity to end users. Particular emphasis is placed on licensing procedures and field operations related to the development of underground and aerial routes. In addition, issues concerning economic evaluation and financial viability during project implementation are examined. The findings indicate that the deployment of this technological solution contributes significantly to bridging the digital divide and fostering the development of areas with limited investment interest. Moreover, the study confirms that cooperation between the public and private sectors can serve as an

effective mechanism for delivering telecommunications projects of strategic importance, provided that adequate financial resources, technical expertise, and effective control of uncertainty factors are ensured.

Keywords

FTTH, Optical Fiber Networks, Ultra-Fast Broadband (UFBB), 5G, Next Generation Access Networks (NGA), GPON, Public-Private Partnerships (PPP), Techno-Economic Analysis.

Περιεχόμενα

Περίληψη	ii
Abstract	iii
Περιεχόμενα	v
Κατάλογος Εικόνων	vii
Κατάλογος Πινάκων	x
Συντομογραφίες & Ακρωνύμια	xi
1. Εισαγωγή	1
1.1 Αντικείμενο της Εργασίας	1
1.2 Σκοπός και Στόχοι	1
1.3 Ερευνητικό Κενό	2
1.4 Ερευνητικά Ερωτήματα	2
1.5 Συνεισφορά της εργασίας	3
1.6 Μεθοδολογία	3
1.7 Δομή της Εργασίας	4
2. Θεωρητικό Πλαίσιο Οπτικών Δικτύων Νέας Γενιάς	6
2.1 Εξέλιξη τηλεπικοινωνιακών δικτύων	6
2.2 Οπτική ίνα – Φυσικά χαρακτηριστικά	8
2.3 Αρχιτεκτονικές FTTH (GPON, XGS-PON, NG-PON2)	11
2.4 FTTx – Συγκριτική ανάλυση	15
2.5 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα FTTH	19
2.6 Διεθνείς τάσεις και στατιστικά	22
3. Το Έργο UFBB και το Ρυθμιστικό Πλαίσιο	25
3.1 Το UFBB ως ΣΔΙΤ	25
3.2 Στόχοι, χρηματοδότηση, γεωγραφική κάλυψη	27
3.3 Αρχιτεκτονική UFBB (Urban, Semi-Urban, Rural)	33
3.4 Ρυθμιστικό Πλαίσιο (ΕΕΤΤ, Δήμοι, άδειες)	37
3.5 Ευρωπαϊκές πολιτικές VHCN	39
3.6 Στρατηγική σημασία για την Ελλάδα	40
4. Μεθοδολογία Μελέτης και Κατασκευής FTTH	42
4.1 Site survey	44
4.2 Ομαδοποίηση καμπινών	47
4.3 Σχεδιασμός οδεύσεων	49
4.4 Υποδομές πεδίου	51
4.5 Πολυσωλήνια – microducts	54
4.6 Καλώδια οπτικών ινών	59
4.7 Καμπίνες FTTH	64
4.8 Ποιοτικός έλεγχος - OTDR	67
5. Τεχνοοικονομική Ανάλυση UFBB	70
5.1 CAPEX	70
5.2 OPEX	72
5.3 Μοντέλο κόστους FTTH	75
5.4 Ανάλυση ρίσκων ΣΔΙΤ	78
5.5 Πολυκριτηριακή αξιολόγηση	81
5.6 Οικονομική αποδοτικότητα UFBB	82

6. Μελέτη Περίπτωσης UFBB	85
6.1 Περιγραφή περιοχής	85
6.2 Μελέτη FTTH.....	88
6.3 Κατασκευαστική διαδικασία	94
6.4 Μετρήσεις – αποτελέσματα	104
6.5 Συζήτηση ευρημάτων.....	108
7. Συμπεράσματα.....	110
Βιβλιογραφία.....	114
Παράρτημα.....	124
Παράρτημα Α – Ενδεικτικά τεχνικά διαγράμματα σχεδιασμού UFBB	124

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 2-1 Υλοποίηση FTTX.....	8
Εικόνα 2-2 Δομή οπτικής ίνας	9
Εικόνα 2-3 Αρχιτεκτονικές δικτύων FTTH: (a) Active Optical Network (AON) σημείου προς σημείο (Babu et al., 2019) και (b) Passive Optical Network (PON) σημείου προς πολλαπλά σημεία.....	12
Εικόνα 2-4 Κύρια στοιχεία της αρχιτεκτονικής FTTC (Fiber to the Cabinet)	17
Εικόνα 2-5 Διαφορετικοί τύποι αρχιτεκτονικών FTTx και το σημείο τερματισμού της οπτικής ίνας σε σχέση με τον τελικό χρήστη.....	18
Εικόνα 2-6 Βασικοί παράγοντες ανάπτυξης και περιορισμοί της αγοράς οπτικών ινών έως το 2030.....	23
Εικόνα 2-7 Γεωγραφική κατανομή της παγκόσμιας αγοράς οπτικών ινών (Regional Share)	24
Εικόνα 3-1 Γεωγραφική κατανομή των επτά γεωγραφικών ζωνών (Lots) του έργου Ultra-Fast Broadband (UFBB) στην Ελλάδα.....	30
Εικόνα 3-2 High Level KPIs και συνολικά τεχνικά μεγέθη του έργου UFBB (μήκη δικτύων Backhaul και Access).	32
Εικόνα 3-3 Γενική αρχιτεκτονική του δικτύου UFBB με απεικόνιση των δικτύων οπισθόζευξης (Backhaul) και πρόσβασης (Access), καθώς και των βασικών κόμβων διασύνδεσης.	34
Εικόνα 3-4 Ανάπτυξη δικτύου UFBB σε αστικές περιοχές.....	35
Εικόνα 3-5 Ανάπτυξη δικτύου UFBB σε ημιαστικές περιοχές	35
Εικόνα 3-6 Ανάπτυξη δικτύου UFBB σε αγροτικές περιοχές.....	36
Εικόνα 4-1 Διαδικασία ανάπτυξης δικτύου FTTH στο πλαίσιο του έργου UFBB.....	44
Εικόνα 4-2 Διαδικασία επιτόπιας αποτύπωσης (site survey) για ανάπτυξη δικτύου FTTH	45
Εικόνα 4-3 Ενδεικτικές διαμορφώσεις micro-duct (tight bundles, loose bundles και flat bundles) για εφαρμογές ανάπτυξης δικτύων οπτικών ινών.	52
Εικόνα 4-4 Εξαρτήματα διακλάδωσης (branching elements) και συστήματα στεγανοποίησης (sealing systems) για υποδομές micro-duct.	54
Εικόνα 4-5 Εγκατάσταση υποδομών micro-duct σε υπόγεια όδευση για ανάπτυξη δικτύου FTTH	57

Εικόνα 4-6 Διαμόρφωση καλωδίου Figure-8 που χρησιμοποιείται σε εναέριες εγκαταστάσεις οπτικών ινών.....	58
Εικόνα 4-7 Εγκατάσταση ενεργών και παθητικών Optical Distribution Frames (ODFs) σε Point of Presence (POP) δικτύου FTTH.....	60
Εικόνα 4-8 Παραδείγματα direct buried και aerial καλωδίων οπτικών ινών που χρησιμοποιούνται σε δίκτυα πρόσβασης FTTH.	62
Εικόνα 5-1 Κόστος ανάπτυξης δικτύου FTTH σε αστικές, προαστιακές και αγροτικές περιοχές.....	71
Εικόνα 6-1 Γεωγραφική θέση της Περιφερειακής Ενότητας Κορινθίας στον ελλαδικό χώρο	86
Εικόνα 6-2 Περιοχές ανάπτυξης δικτύου FTTH/UFBB στον Δήμο Κορινθίων και γεωγραφική κατανομή των υπό κάλυψη περιοχών.	88
Εικόνα 6-3 Δομή και φάσεις υλοποίησης δικτύου FTTH/FTTB στο πλαίσιο του έργου UFBB.....	90
Εικόνα 6-4 Λειτουργική οργάνωση των εργασιών ανάπτυξης του δικτύου UFBB και διασύνδεση των τμημάτων Backhaul και Access από τον κεντρικό κόμβο (PoP) έως τους τελικούς συνδρομητές.....	91
Εικόνα 6-5 Κατασκευή μικροτάφρου (MT), φρεατίων πρόσβασης και εφαρμογή μέτρων εργοταξιακής ασφάλειας κατά την ανάπτυξη του δικτύου FTTH/UFBB στον Δήμο Κορινθίων.	94
Εικόνα 6-6 Εγκατάσταση μικροσωληνώσεων οπτικών ινών μέσω μεθόδου μικροτάφρου κατά την ανάπτυξη δικτύου FTTH στα Εξαμίλια Κορινθίας	95
Εικόνα 6-7 Τελική αποκατάσταση της τομής μικροτάφρου μετά την εγκατάσταση υποδομών FTTH στην περιοχή Αγίου Βασιλείου Κορινθίας	97
Εικόνα 6-8 Κατασκευή κάθετης όδευσης και τοποθέτηση σωλήνωσης διέλευσης οπτικών ινών στο πλαίσιο του έργου UFBB	98
Εικόνα 6-9 Κατασκευή υπόγειου φρεατίου δικτύου FTTH κατά το στάδιο διαμόρφωσης και οπλισμού στο Χιλιόμοδι Κορινθίας.....	99
Εικόνα 6-10 Εργασίες ειδικής ασφαλικής αποκατάστασης και συμπίεσης οδοστρώματος στην Ολυμπία Οδό μετά την ολοκλήρωση των εργασιών εγκατάστασης υποδομών οπτικών ινών του έργου UFBB.....	100
Εικόνα 6-11 Εναέριος οπτικός σύνδεσμος και εξοπλισμός διανομής οπτικών ινών εγκατεστημένος σε στύλο δικτύου στο πλαίσιο ανάπτυξης του έργου UFBB.	101

Εικόνα 6-12 Καμπίνες UFBB και εναέρια υποδομή διανομής οπτικών ινών του δικτύου FTTH, με εγκατεστημένο τηλεπικοινωνιακό εξοπλισμό και στοιχεία διασύνδεσης του δικτύου πρόσβασης.....	102
Εικόνα 6-13 Κασετοθήκη συγκόλλησης και τερματισμοί υπόγειου οπτικού συνδέσμου FTTH, με οργάνωση και σήμανση οπτικών ινών για τη διασφάλιση της ορθής λειτουργίας και διαχείρισης του δικτύου πρόσβασης	103
Εικόνα 6-14 Αποτελέσματα μέτρησης iOLM/OTDR οπτικής ζεύξης FTTH στο πλαίσιο του έργου UFBB Κορινθίας	104
Εικόνα 6-15 Αναφορά μετρήσεων iOLM/OTDR για έλεγχο οπτικής ζεύξης FTTH στο έργο UFBB Κορινθίας	106
Εικόνα 6-16 Αναφορά μετρήσεων iOLM/OTDR για πιστοποίηση οπτικής ζεύξης FTTH στο έργο UFBB Κορινθίας.....	107
Εικόνα A-1 Δίκτυο Backhaul (BH) του έργου UFBB στον Νομό Μεσσηνίας.	124
Εικόνα A-2 Ενδεικτική απεικόνιση δικτύου πρόσβασης (Access Network) του έργου UFBB.....	125
Εικόνα A-3 Ενδεικτικό διάγραμμα μετάδοσης και διασύνδεσης κόμβων	126

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2-1 Σύγκριση απόδοσης και κατανάλωσης ενέργειας μεταξύ τεχνολογιών PON14	
Πίνακας 2-2 Συγκριτική αξιολόγηση αρχιτεκτονικών FTTx.....	19
Πίνακας 2-3 Συνοπτική παρουσίαση των βασικών πλεονεκτημάτων και περιορισμών της τεχνολογίας FTTH.....	21

Συντομογραφίες & Ακρωνύμια

5G	Fifth Generation (Δίκτυα 5ης γενιάς)
AON	Active Optical Network
CAPEX	Capital Expenditure
DBA	Dynamic Bandwidth Allocation
FTTB	Fiber To The Building
FTTC	Fiber To The Cabinet / Curb
FTTDP	Fiber To The Distribution Point
FTTH	Fiber To The Home
FTTN	Fiber To The Node
FTTx	Fiber To The x
GPON	Gigabit Passive Optical Network
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
ITU-T	International Telecommunication Union – Telecommunication Sector
NG-PON2	Next Generation Passive Optical Network 2
OLT	Optical Line Termination
ONU	Optical Network Unit
ONT	Optical Network Termination
OPEX	Operational Expenditure
PON	Passive Optical Network
TDM	Time Division Multiplexing
TWDM	Time and Wavelength Division Multiplexing
UFBB	Ultra-Fast Broadband
WDM	Wavelength Division Multiplexing
XGS-PON	10 Gigabit Symmetric Passive Optical Network
ΣΔΙΤ	Συμπράξεις Δημόσιου και Ιδιωτικού Τομέα
FCPs	Fibre Concentration Points
IL	Insertion Loss
NGA	Next Generation Access
OCCA	Outdoor Cabinet Coverage Area
ODFs	Optical Distribution Frames
OTDR	Optical Time Domain Reflectometer

POPs	Points of Presence
RL	Return Loss
RSCA	Remote Settlement Coverage Area
SPVs	Special Purpose Vehicles
VHCN	Very High Capacity Networks
VLU	Virtual Local Unbundling
ΑΕΕΣ	Ανώνυμη Εταιρεία Ειδικού Σκοπού
ΔΕΣΔΙΤ	Διυπουργική Επιτροπή ΣΔΙΤ
ΕΕΤΤ	Εθνική Επιτροπή Τηλεπικοινωνιών και Ταχυδρομείων
ΙΦΣ	Ιδιωτικός Φορέας Σύμπραξης

1. Εισαγωγή

1.1 Αντικείμενο της Εργασίας

Η εργασία εξετάζει τη συμβολή της δημιουργίας οπτικών δικτύων νέας γενιάς (FTTH) και 5G στην ψηφιακή μετάβαση της Ελλάδας, με έμφαση στο Ultra-Fast Broadband (UFBB). Το UFBB αποτελεί τη μεγαλύτερη τηλεπικοινωνιακή παρέμβαση ΣΔΙΤ στη χώρα. Αποσκοπεί στην κατασκευή δικτύων πολύ υψηλής χωρητικότητας σε ημιαστικές και αγροτικές περιοχές, συμβάλλοντας στη μείωση του ψηφιακού χάσματος και στην ενίσχυση της περιφερειακής ανάπτυξης.

Επίκεντρο της μελέτης συνιστά ο σχεδιασμός, η διαχείριση και η αξιοποίηση των δικτύων FTTH. Ερευνώνται η τεχνική υλοποίηση και οι οργανωτικές, οικονομικές και κοινωνικές διαστάσεις των εν λόγω δικτύων. Αναλύεται η αρχιτεκτονική των οπτικών δικτύων και ο ρόλος τους στην παροχή ευρυζωνικών υπηρεσιών υψηλής ταχύτητας, με στόχο την κάλυψη των αυξανόμενων αναγκών των σύγχρονων ψηφιακών εφαρμογών. Το υπό εξέταση έργο εντάσσεται στο ευρύτερο πλαίσιο των Συμπράξεων Δημόσιου και Ιδιωτικού Τομέα (ΣΔΙΤ), διερευνώντας τη συμβολή τους στην προώθηση τηλεπικοινωνιακών υποδομών και στη μείωση του ψηφιακού χάσματος, ιδιαίτερα σε ημιαστικές και αγροτικές περιοχές.

1.2 Σκοπός και Στόχοι

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση και αξιολόγηση της συμβολής των δικτύων FTTH και του UFBB στην ψηφιακή πρόοδο της Ελλάδας, καθώς και η αποτίμηση της αποτελεσματικότητας της συγκεκριμένης Σύμπραξης Δημόσιου και Ιδιωτικού Τομέα. Αναδεικνύεται ο ρόλος των οπτικών υποδομών στη διαμόρφωση ενός σύγχρονου ψηφιακού περιβάλλοντος, ικανού να υποστηρίξει εφαρμογές υψηλών απαιτήσεων, όπως υπηρεσίες cloud, τηλεργασία, Internet of Things και δίκτυα 5G.

Αναλύονται τα τεχνολογικά χαρακτηριστικά των δικτύων FTTH με στόχο τη διεύρυνση του γνωστικού υποβάθρου των αναγνωστών σχετικά με τις διαδικασίες σχεδιασμού και κατασκευής τους στο πλαίσιο του UFBB. Επιπλέον, λαμβάνει χώρα αξιολόγηση της αποδοτικότητάς τους από τεχνική, οικονομική και κοινωνική σκοπιά και εξετάζονται οι βασικές προκλήσεις που προκύπτουν κατά την πραγματοποίηση τέτοιων έργων, όπως το κόστος κατασκευής, οι κανονιστικές απαιτήσεις και η αποδοχή από την τοπική κοινωνία.

1.3 Ερευνητικό Κενό

Η ανάπτυξη δικτύων FTTH έχει αποτελέσει αντικείμενο εκτεταμένης διεθνούς έρευνας, με έμφαση στα τεχνολογικά χαρακτηριστικά των αρχιτεκτονικών πρόσβασης νέας γενιάς, στις επιδόσεις των τεχνολογιών GPON και XGS-PON, καθώς και στα οικονομικά οφέλη που προκύπτουν από την εφαρμογή τους. Η βιβλιογραφία εξετάζει τις πολιτικές ανάπτυξης ευρυζωνικών υποδομών και τον ρόλο των ΣΔΙΤ στη χρηματοδότηση μεγάλων τηλεπικοινωνιακών επενδύσεων.

Παρά τη στρατηγική σημασία του έργου, η διαθέσιμη βιβλιογραφία δεν παρέχει ολοκληρωμένη ανάλυση των παραγόντων που επηρεάζουν τον σχεδιασμό, τη διαχείριση, την τεχνική υλοποίηση και την τεχνοοικονομική αποδοτικότητα του υπό πραγματικές συνθήκες κατασκευής. Επιπλέον, η πλειονότητα των σχετικών ερευνών βασίζεται σε θεωρητικά μοντέλα ή δευτερογενή δεδομένα, ενώ είναι περιορισμένες οι αναλύσεις που αξιοποιούν πρωτογενή στοιχεία από την πραγματική κατασκευή και λειτουργία μεγάλων ευρυζωνικών υποδομών. Το κενό αυτό της έρευνας έρχεται να καλύψει η παρούσα εργασία, συνδυάζοντας τη θεωρητική τεκμηρίωση με εμπειρικά δεδομένα από την εφαρμογή του έργου UFBB και εξετάζοντας τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ τεχνικών, οικονομικών και διαχειριστικών παραμέτρων που επηρεάζουν την επιτυχή ανάπτυξη δικτύων FTTH.

1.4 Ερευνητικά Ερωτήματα

Η παρούσα εργασία επιδιώκει να απαντήσει στα ακόλουθα ερευνητικά ερωτήματα:

- Ποιοι είναι οι κρίσιμοι τεχνικοί, οργανωτικοί και διαχειριστικοί παράγοντες που επηρεάζουν την επιτυχή υλοποίηση ενός έργου ανάπτυξης δικτύων FTTH μέσω Σύμπραξης Δημόσιου και Ιδιωτικού Τομέα;
- Ποιοι παράγοντες επηρεάζουν περισσότερο το επενδυτικό κόστος (CAPEX), το λειτουργικό κόστος (OPEX) και τη συνολική τεχνοοικονομική βιωσιμότητα ενός έργου FTTH;
- Ποιες είναι οι σημαντικότερες τεχνικές και διοικητικές δυσκολίες που προκύπτουν κατά τη μελέτη, την αδειοδότηση και την κατασκευή του έργου UFBB και ποια είναι η επίδρασή τους στο χρονοδιάγραμμα και στο κόστος υλοποίησης;

- Ποια συμπεράσματα μπορούν να εξαχθούν από τη μελέτη περίπτωσης του έργου UFBB και πώς μπορούν να αξιοποιηθούν για τη βελτίωση του σχεδιασμού και της διαχείρισης αντίστοιχων έργων στο μέλλον;

1.5 Συνεισφορά της εργασίας

Η συνεισφορά της παρούσας διπλωματικής εργασίας έγκειται στην ολοκληρωμένη προσέγγιση του σχεδιασμού, της διαχείρισης και της τεχνοοικονομικής αξιολόγησης δικτύων FTTH μέσω της μελέτης περίπτωσης του έργου UFBB. Σε αντίθεση με προηγούμενες μελέτες, η εργασία δεν περιορίζεται στην παρουσίαση των τεχνολογικών χαρακτηριστικών των δικτύων πρόσβασης νέας γενιάς, αλλά εξετάζει συγχρόνως τις τεχνικές, οργανωτικές και οικονομικές παραμέτρους που επηρεάζουν την υλοποίηση ενός σύνθετου τηλεπικοινωνιακού έργου μεγάλης κλίμακας.

Ιδιαίτερη αξία της εργασίας αποτελεί η αξιοποίηση πραγματικών δεδομένων από το έργο UFBB, τα οποία προέρχονται από τη διαδικασία μελέτης, σχεδιασμού και κατασκευής του δικτύου FTTH στην Περιφερειακή Ενότητα Κορινθίας. Η χρήση πρωτογενών τεχνικών στοιχείων επιτρέπει την αποτύπωση πραγματικών προκλήσεων που σχετίζονται με την αδειοδότηση, τις κατασκευαστικές εργασίες, τον ποιοτικό έλεγχο και τη διαχείριση του έργου, προσδίδοντας αυξημένη αξιοπιστία στα συμπεράσματα της έρευνας. Η εργασία συνδυάζει τη βιβλιογραφική τεκμηρίωση με την εμπειρική διερεύνηση και την τεχνοοικονομική αξιολόγηση, αναδεικνύοντας κρίσιμους παράγοντες επιτυχίας και παρέχοντας χρήσιμα συμπεράσματα που μπορούν να αξιοποιηθούν τόσο από φορείς σχεδιασμού και υλοποίησης τηλεπικοινωνιακών έργων όσο και από τη μελλοντική ακαδημαϊκή έρευνα.

1.6 Μεθοδολογία

Η μεθοδολογία που ακολουθείται στη συγκεκριμένη εργασία βασίζεται σε έναν συνδυασμό θεωρητικής ανάλυσης και εμπειρικής διερεύνησης. Πραγματοποιείται βιβλιογραφική ανασκόπηση σχετικά με τις τεχνολογίες οπτικών δικτύων, τα δίκτυα νέας γενιάς και το πλαίσιο των Συμπράξεων Δημόσιου και Ιδιωτικού Τομέα, προκειμένου να διαμορφωθεί το απαραίτητο θεωρητικό υπόβαθρο.

Περιγράφεται το τεχνικό και ρυθμιστικό πλαίσιο του UFBB, καθώς και οι διαδικασίες μελέτης και κατασκευής των δικτύων FTTH. Η έρευνα περιλαμβάνει τη συλλογή και

αξιοποίηση πρωτογενών δεδομένων από το πεδίο κατασκευής, όπως τεχνικές προδιαγραφές, στοιχεία κόστους και διαδικασίες υλοποίησης. Τέλος, εφαρμόζεται τεχνοοικονομική ανάλυση και πολυκριτηριακή αξιολόγηση. Για την εκτίμηση της αποδοτικότητας και της βιωσιμότητας του έργου λαμβάνονται υπόψη τεχνικοί, οικονομικοί και κοινωνικοί παράγοντες που επηρεάζουν την επιτυχή ανάπτυξη των υποδομών.

1.7 Δομή της Εργασίας

Η παρούσα εργασία οργανώνεται σε έξι κύρια κεφάλαια.

Το Κεφάλαιο 1 παρουσιάζει το αντικείμενο, τον σκοπό και τους στόχους της έρευνας. Αναδεικνύει το ερευνητικό κενό, διατυπώνει τα ερευνητικά ερωτήματα και τη συνεισφορά της εργασίας. Στο τέλος του κεφαλαίου περιγράφεται η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε και η συνολική δομή της διπλωματικής εργασίας.

Στη συνέχεια, στο Κεφάλαιο 2 αναπτύσσεται το θεωρητικό πλαίσιο των οπτικών δικτύων νέας γενιάς. Περιλαμβάνει την εξέλιξη των τηλεπικοινωνιακών δικτύων, τα φυσικά χαρακτηριστικά της οπτικής ίνας, τις αρχιτεκτονικές FTTH και συγκριτική ανάλυση των τεχνολογιών FTTx. Το κεφάλαιο ολοκληρώνεται με την παρουσίαση των πλεονεκτημάτων, των μειονεκτημάτων των δικτύων FTTH και των διεθνών τάσεων στον τομέα των ευρυζωνικών υποδομών.

Το Κεφάλαιο 3 επικεντρώνεται στο Ultra-Fast Broadband (UFBB) και στο σχετικό ρυθμιστικό πλαίσιο, με ιδιαίτερη μνεία στη λειτουργία του στο πλαίσιο Σύμπραξης Δημόσιου και Ιδιωτικού Τομέα. Αναλύονται οι στόχοι, η χρηματοδότηση και η γεωγραφική κάλυψη του έργου, καθώς και η αρχιτεκτονική του σε αστικές, ημιαστικές και αγροτικές περιοχές. Επιπλέον, εξετάζονται οι κανονιστικές απαιτήσεις και η στρατηγική σημασία που έχει για την ανάπτυξη των τηλεπικοινωνιακών υποδομών στην Ελλάδα.

Το Κεφάλαιο 4 εστιάζει στη μεθοδολογία μελέτης και στα στάδια κατασκευής των δικτύων FTTH, όπως η επιτόπια αποτύπωση (site survey), ο σχεδιασμός των οδεύσεων, η δημιουργία των υποδομών πεδίου και η εγκατάσταση των καλωδίων οπτικών ινών. Γίνεται αναφορά στον εξοπλισμό, όπως οι καμπίνες και τα συστήματα διανομής, αλλά και στις διαδικασίες ποιοτικού ελέγχου.

Στο Κεφάλαιο 5 λαμβάνει χώρα τεχνοοικονομική ανάλυση του UFBB. Εξετάζονται τα κόστη επένδυσης και λειτουργίας (CAPEX και OPEX), το μοντέλο κόστους των δικτύων FTTH και οι κίνδυνοι που σχετίζονται με την υλοποίηση έργων ΣΔΙΤ. Επιπλέον, εφαρμόζεται πολυκριτηριακή αξιολόγηση και αναλύεται η οικονομική αποδοτικότητα του εγχειρήματος.

Στο Κεφάλαιο 6 παρουσιάζεται μελέτη περίπτωσης από την εφαρμογή του UFBB σε συγκεκριμένη περιοχή. Αναλύονται η μελέτη, η κατασκευαστική διαδικασία του δικτύου, τα αποτελέσματα των μετρήσεων και η αξιολόγηση των ευρημάτων. Τέλος, στο Κεφάλαιο 7 διατυπώνονται τα βασικά συμπεράσματα της εργασίας. Προτείνονται κατευθύνσεις για μελλοντική έρευνα, με στόχο τη βελτίωση της διαχείρισης αντίστοιχων τηλεπικοινωνιακών έργων.

2. Θεωρητικό Πλαίσιο Οπτικών Δικτύων Νέας Γενιάς

Το παρόν κεφάλαιο παρουσιάζει το θεωρητικό υπόβαθρο που υποστηρίζει την ανάπτυξη δικτύων οπτικών ινών νέας γενιάς και ειδικότερα των δικτύων FTTH. Αρχικά εξετάζεται η εξέλιξη των τηλεπικοινωνιακών δικτύων και τα βασικά χαρακτηριστικά της τεχνολογίας των οπτικών ινών. Στη συνέχεια αναλύονται οι κυριότερες αρχιτεκτονικές παθητικών οπτικών δικτύων (GPON, XGS-PON και NG-PON2), καθώς και οι διαφορετικές υλοποιήσεις της οικογένειας FTTx. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στη συγκριτική αξιολόγηση των διαθέσιμων τεχνολογικών λύσεων ως προς τις επιδόσεις, το κόστος ανάπτυξης και λειτουργίας, την επεκτασιμότητα και την καταλληλότητά τους για διαφορετικά περιβάλλοντα εφαρμογής. Το κεφάλαιο ολοκληρώνεται με την παρουσίαση των βασικών πλεονεκτημάτων και περιορισμών των δικτύων FTTH, καθώς και των διεθνών τάσεων που διαμορφώνουν την εξέλιξη των ευρυζωνικών υποδομών.

2.1 Εξέλιξη τηλεπικοινωνιακών δικτύων

Η εξέλιξη των τηλεπικοινωνιακών δικτύων τα τελευταία χρόνια χαρακτηρίζεται από μια συνεχή μετάβαση από τεχνολογίες περιορισμένης χωρητικότητας σε υποδομές υψηλών ταχυτήτων, ικανές να υποστηρίξουν τις αυξανόμενες απαιτήσεις της σύγχρονης ψηφιακής κοινωνίας. Οι πρώτες γενιές δικτύων βασίζονταν σε αναλογικές συνδέσεις και τεχνολογίες στενής ζώνης (narrowband), οι οποίες παρείχαν περιορισμένες δυνατότητες μετάδοσης δεδομένων και εξυπηρετούσαν κυρίως φωνητικές υπηρεσίες. Η ανάγκη για ταχύτερη και πιο αξιόπιστη μετάδοση δεδομένων οδήγησε σταδιακά στην ανάπτυξη των ευρυζωνικών δικτύων (broadband), τα οποία επέτρεψαν την ταυτόχρονη μετάδοση μεγαλύτερου όγκου πληροφοριών μέσω ενσύρματων ή ασύρματων μέσων (Ye et al., 2021).

Ο όρος «ευρυζωνικότητα» χρησιμοποιείται για να περιγράψει συνδέσεις που προσφέρουν πολύ υψηλότερες ταχύτητες σε σχέση με τις προηγούμενες τεχνολογίες. Ωστόσο δεν υπάρχει μία καθολικά αποδεκτή και σταθερή ποσοτική του οριοθέτηση. Σύμφωνα με προσεγγίσεις της ITU-T, η ευρυζωνική πρόσβαση συνδέεται με ρυθμούς μετάδοσης μεγαλύτερους από εκείνους των ISDN συνδέσεων, δηλαδή άνω των 1,5–2 Mbps, αποτελώντας ένα πρώτο σημείο αναφοράς για τον ορισμό της έννοιας της ευρυζωνικότητας (ITU-T Recommendation Q.2931, 1995; ITU-T Recommendation I.113, 1997). Στη συνέχεια, επιχειρήθηκε ένας πιο σαφής ορισμός, σύμφωνα με τον οποίο ευρυζωνική πρόσβαση θεωρείται κάθε σύνδεση που υποστηρίζει ρυθμούς μετάδοσης μεγαλύτερους από

2 Mbps (ITU-T Liaison Statement SCV-LS13, 2017). Η τιμή αυτή θεωρείται πλέον χαμηλή σε σχέση με τις σύγχρονες τεχνολογικές δυνατότητες (ITU-T Liaison Statement SCV-TD66, 2017).

Η έννοια της ευρυζωνικότητας εξελίχθηκε δυναμικά και απέκτησε σχετικό χαρακτήρα, δεδομένου ότι χρησιμοποιείται για να διακρίνει κάθε νέα γενιά δικτύων από τις προηγούμενες. Η έλλειψη ενός ενιαίου και διαχρονικού ορισμού επιβεβαιώνεται και από τη θέση της ITU-T. Σύμφωνα με αυτή, δεν είναι δυνατή προς το παρόν η διατύπωση ενός καθολικού ορισμού της ευρυζωνικότητας που να καλύπτει όλα τα τεχνολογικά και ρυθμιστικά πλαίσια (ITU-T Deliberation SCV-LS24, 2018). Στην πράξη, ο όρος χρησιμοποιείται συχνά με τρόπο σχετικό ή ακόμη και εμπορικό, υποδηλώνοντας συνδέσεις «υψηλής ταχύτητας» σε σύγκριση με προηγούμενες τεχνολογίες.

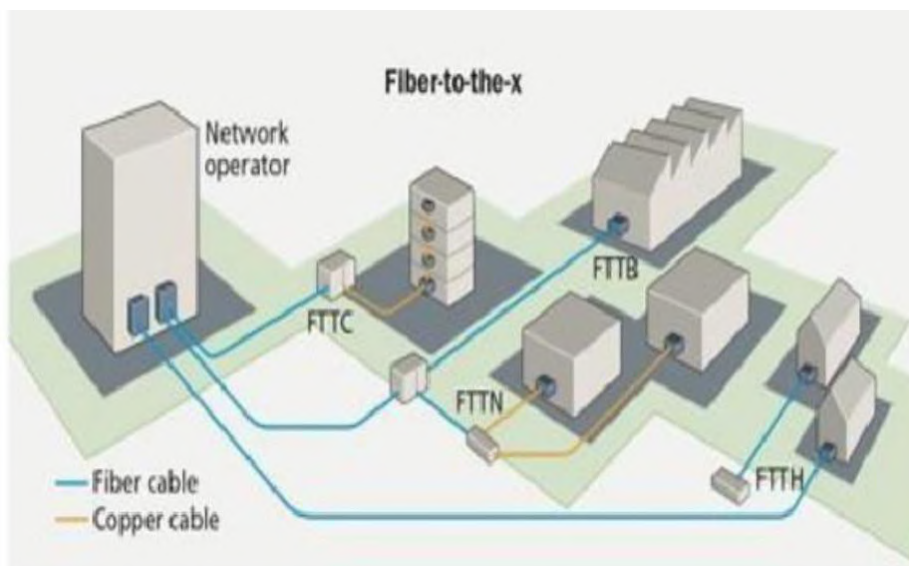
Η διάδοση των ευρυζωνικών υποδομών συνδέθηκε άμεσα με την εξάπλωση ψηφιακών υπηρεσιών υψηλής ζήτησης, όπως η μετάδοση βίντεο, η τηλεργασία, οι υπηρεσίες υπολογιστικού νέφους (cloud computing), οι εφαρμογές τηλεϊατρικής και οι πλατφόρμες επικοινωνίας σε πραγματικό χρόνο. Οι υπηρεσίες αυτές απαιτούν υψηλές ταχύτητες, χαμηλή καθυστέρηση και αυξημένη αξιοπιστία, χαρακτηριστικά που δεν μπορούν να υποστηριχθούν επαρκώς από τα παραδοσιακά δίκτυα χαλκού.

Η επόμενη σημαντική φάση στην εξέλιξη των τηλεπικοινωνιακών δικτύων είναι η στροφή προς τα δίκτυα υπερ-υψηλών ταχυτήτων (ultra-fast broadband), τα οποία βασίζονται κυρίως σε υποδομές οπτικών ινών. Οι τεχνολογίες αυτές προσφέρουν ταχύτητες που ξεκινούν από 30 Mbps και μπορούν να φτάσουν έως και αρκετά Gbps, καθιστώντας δυνατή την υλοποίηση των Δικτύων Πρόσβασης Νέας Γενιάς (Next Generation Access – NGA). Σε αντίθεση με τα δίκτυα χαλκού, τα δίκτυα οπτικών ινών διαθέτουν μεγαλύτερη χωρητικότητα και δυνατότητα μελλοντικής αναβάθμισης χωρίς εκτεταμένες αλλαγές στο δίκτυο (Moghaddam & Moghaddam, 2025).

Η διαδικασία αυτή δεν πραγματοποιείται απότομα, αλλά μέσω ενδιάμεσων σταδίων, όπου η οπτική ίνα προσεγγίζει σταδιακά τον τελικό χρήστη (π.χ. FTTC, FTTB, FTTH). Η στρατηγική αυτή επιτρέπει τη σταδιακή αναβάθμιση των δικτύων, λαμβάνοντας υπόψη τόσο τη ζήτηση της αγοράς όσο και το κόστος επένδυσης, ιδιαίτερα σε περιοχές με χαμηλή πληθυσμιακή πυκνότητα (Skoufis et al., 2022). Η εξέλιξη των τηλεπικοινωνιακών δικτύων αντανακλά την πορεία από περιορισμένες αναλογικές υπηρεσίες σε ένα πλήρως ψηφιακό

περιβάλλον υψηλών απαιτήσεων, όπου η ευρυζωνικότητα και τα δίκτυα οπτικών ινών αποτελούν βασικό πυλώνα της ψηφιακής μετάβασης και της οικονομικής μεγέθυνσης.

Ο όρος FTTX (Fiber To The X) χρησιμοποιείται για να περιγράψει διαφορετικές αρχιτεκτονικές δικτύων πρόσβασης οπτικών ινών, οι οποίες διαφοροποιούνται ως προς το σημείο τερματισμού της οπτικής ίνας σε σχέση με τον τελικό χρήστη. Οι κυριότερες υλοποιήσεις περιλαμβάνουν τις FTTC (Fiber to the Cabinet), FTTB (Fiber to the Building) και FTTH (Fiber to the Home) (Εικόνα 2-1). Όσο πιο κοντά στον τελικό χρήστη τερματίζει η οπτική ίνα, τόσο υψηλότερες ταχύτητες και μεγαλύτερη αξιοπιστία μπορούν να επιτευχθούν, με αντίστοιχη όμως αύξηση του κόστους ανάπτυξης και εγκατάστασης (Μπούγος, 2023).



Εικόνα 2-1 Υλοποίηση FTTX

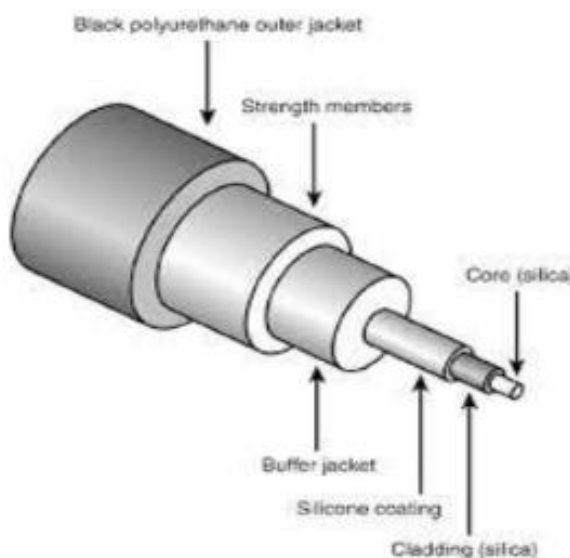
(Πηγή: Μπούγος, 2023)

2.2 Οπτική ίνα – Φυσικά χαρακτηριστικά

Η οπτική ίνα αποτελεί τη βασική τεχνολογία υποδομής των σύγχρονων τηλεπικοινωνιακών δικτύων νέας γενιάς, καθώς προσφέρει πλεονεκτήματα σε σχέση με τα παραδοσιακά μέσα μετάδοσης, όπως τα καλώδια χαλκού. Η διάδοσή της συνδέεται άμεσα με την αυξανόμενη ανάγκη για υψηλότερο εύρος ζώνης και ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων, οι οποίες αποτελούν πρωταρχικούς παράγοντες για την υποστήριξη σύγχρονων ψηφιακών υπηρεσιών και εφαρμογών (Nyarko-Boateng et al., 2020).

Η αρχή λειτουργίας της οπτικής ίνας στηρίζεται στο φαινόμενο της ολικής εσωτερικής ανάκλασης, το οποίο μελετήθηκε ήδη από τον 19ο αιώνα από επιστήμονες όπως οι Colladon, Babinet και Tyndall. Η εξέλιξη της τεχνολογίας συνεχίστηκε με σταθμούς, όπως η εφεύρεση του φωτοφώνου από τον Alexander Graham Bell το 1880 και η ανάπτυξη των πρώτων εφαρμογών μετάδοσης εικόνας μέσω οπτικών ινών τον 20ό αιώνα. Καθοριστική υπήρξε η συμβολή της ερευνητικής ομάδας του Charles Kao τη δεκαετία του 1960, η οποία έθεσε τα θεμέλια για τη σύγχρονη χρήση των οπτικών ινών στις τηλεπικοινωνίες, οδηγώντας στη μαζική υιοθέτησή τους τις επόμενες δεκαετίες (Kao & Hockham, 1996).

Σε αντίθεση με τα ηλεκτρικά σήματα που χρησιμοποιούνται στα δίκτυα χαλκού, η οπτική ίνα μεταδίδει πληροφορία μέσω παλμών φωτός, οι οποίοι διαδίδονται σε ένα διηλεκτρικό μέσο υψηλής καθαρότητας. Οι οπτικές ίνες αποτελούν ένα κυλινδρικό διηλεκτρικό κυματοδηγό, ο οποίος μεταδίδει φωτεινά σήματα κατά μήκος του άξονά του μέσω του φαινομένου της ολικής εσωτερικής ανάκλασης. Η βασική δομή μιας οπτικής ίνας περιλαμβάνει έναν εσωτερικό πυρήνα (core) υψηλού δείκτη διάθλασης, περιβαλλόμενο από έναν μανδύα (cladding) χαμηλότερου δείκτη διάθλασης, διαφορά απαραίτητη για την καθοδήγηση του φωτός εντός της ίνας (Εικόνα 2-1). Η διάμετρος του πυρήνα κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 10 και 100 μm , ενώ το σύνολο της ίνας προστατεύεται από εξωτερικό περίβλημα που εξασφαλίζει μηχανική αντοχή και προστασία από περιβαλλοντικές επιδράσεις (Divyavarshini et al., 2024).



Εικόνα 2-2 Δομή οπτικής ίνας

(Πηγή: Divyavarshini et al., 2024)

Η μετάδοση της πληροφορίας πραγματοποιείται μέσω φωτεινών παλμών, οι οποίοι διαδίδονται με πολύ μικρές απώλειες, της τάξης των 0,1 dB/km, καθιστώντας τις οπτικές ίνες ιδιαίτερα κατάλληλες για μεταφορά δεδομένων σε μεγάλες αποστάσεις. Λόγω του υψηλού εύρους συχνοτήτων της οπτικής ακτινοβολίας, οι ίνες προσφέρουν εξαιρετικά μεγάλη χωρητικότητα μετάδοσης. Ταυτόχρονα παρουσιάζουν ανοσία σε ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές και υψηλό επίπεδο ασφάλειας, αφού το σήμα παραμένει περιορισμένο εντός του μέσου μετάδοσης. Τα χαρακτηριστικά αυτά καθιστούν τις οπτικές ίνες θεμελιώδες στοιχείο των σύγχρονων τηλεπικοινωνιακών υποδομών και βασικό μοχλό για την ανάπτυξη δικτύων νέας γενιάς. Ανάλογα με τη δομή και το προφίλ του δείκτη διάθλασης, οι οπτικές ίνες διακρίνονται σε μονότροπες (single-mode) και πολύτροπες (multi-mode). Οι πρώτες χρησιμοποιούνται κυρίως σε μεγάλες αποστάσεις λόγω της μειωμένης διασποράς και της υψηλότερης ποιότητας μετάδοσης (Divyavarshini et al., 2024).

Ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά των οπτικών ινών είναι η δυνατότητα μετάδοσης μεγάλου όγκου δεδομένων σε υψηλές ταχύτητες, το οποίο οφείλεται στο μεγάλο διαθέσιμο εύρος συχνοτήτων του φωτός. Η τεχνολογία αξιοποιεί τεχνικές όπως η πολυπλεξία κατά μήκος κύματος (Wavelength Division Multiplexing – WDM), μέσω της οποίας είναι δυνατή η μετάδοση πολλαπλών καναλιών πληροφορίας ταυτόχρονα μέσω της ίδιας ίνας, αυξάνοντας τη συνολική χωρητικότητα του δικτύου (Liu, 2019).

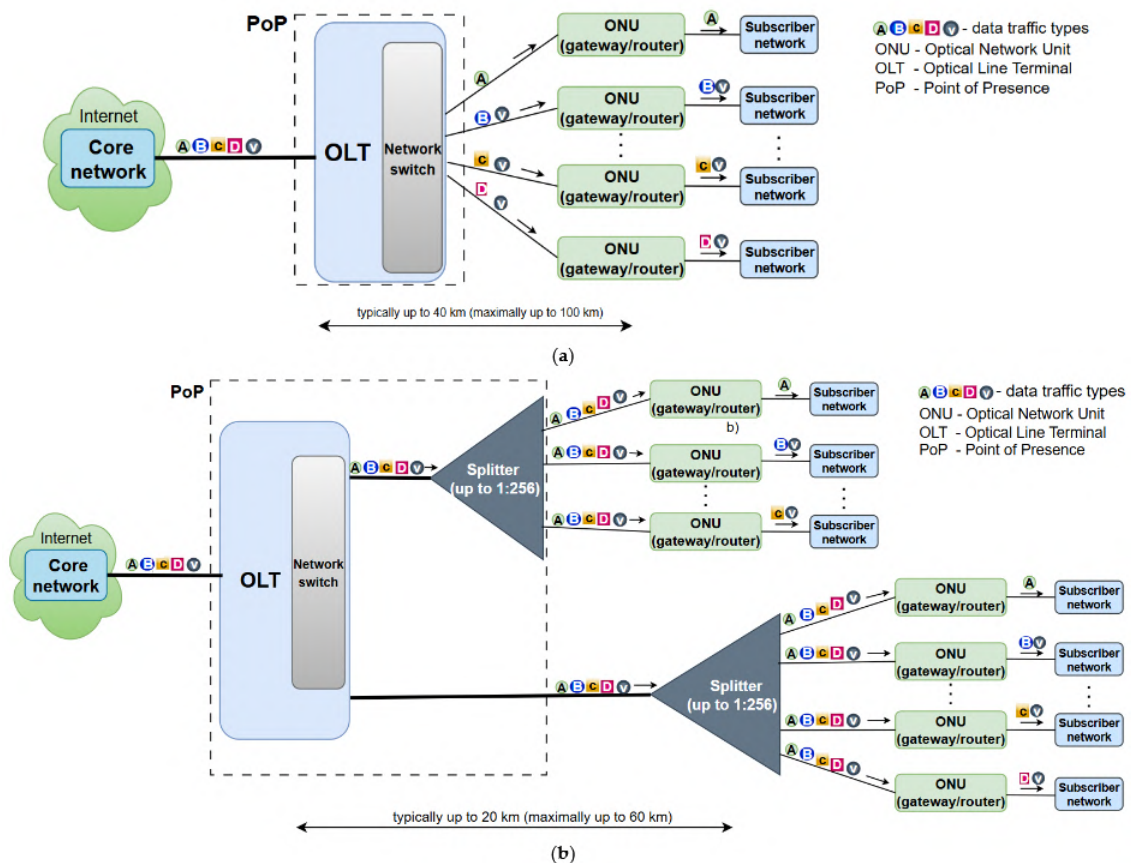
Σε σύγκριση με τα παραδοσιακά καλώδια χαλκού, οι οπτικές ίνες παρουσιάζουν πολλά πλεονεκτήματα. Προσφέρουν μεγαλύτερο εύρος ζώνης, υποστηρίζοντας υψηλότερες ταχύτητες μετάδοσης και καλύτερη ισορροπία μεταξύ ρυθμών λήψης και αποστολής δεδομένων. Εμφανίζουν εξαιρετικά χαμηλές απώλειες σήματος, της τάξης των 0,1 dB/km, γεγονός που τις κρίνει κατάλληλες για μεταδόσεις μεγάλων αποστάσεων χωρίς σημαντική υποβάθμιση της ποιότητας. Επίσης, είναι ανθεκτικές σε ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές και περιβαλλοντικές συνθήκες, διασφαλίζοντας υψηλή αξιοπιστία και σταθερότητα στη λειτουργία τους (Dai, 2022). Χαρακτηρίζονται από μικρό βάρος και όγκο, επιτρέποντας υψηλή πυκνότητα μετάδοσης δεδομένων. Ενδεικτικά, η απόδοση ενός μικρού όγκου οπτικής ίνας μπορεί να ισοδυναμεί με πολλαπλάσιο βάρος χαλκού, στοιχείο που αναδεικνύει την τεχνολογία ως αποδοτική από πλευράς υλικών. Η κατασκευή τους βασίζεται σε υλικά ευρέως διαθέσιμα, ενώ η λειτουργία τους είναι ενεργειακά αποδοτική, καθώς τα δίκτυα οπτικών ινών μπορούν να λειτουργούν σε μεγάλο βαθμό παθητικά.

Παρά τα οφέλη, η ανάπτυξη αυτών των δικτύων συνοδεύεται από υψηλό αρχικό κόστος εγκατάστασης, το οποίο αποτελεί βασικό περιοριστικό παράγοντα για την ευρεία ανάπτυξή τους, κυρίως σε περιοχές χαμηλής ζήτησης. Η τεχνολογία θεωρείται «μελλοντικά ανθεκτική» (future-proof), δεδομένου ότι μπορεί να υποστηρίξει την αυξανόμενη ζήτηση για δεδομένα για μεγάλο χρονικό διάστημα χωρίς την ανάγκη εκτεταμένων αναβαθμίσεων. Οι οπτικές ίνες αποτελούν τον βασικό πυλώνα των σύγχρονων τηλεπικοινωνιακών υποδομών. Ο συνδυασμός υψηλής χωρητικότητας, αξιοπιστίας και δυνατότητας επεκτασιμότητας που παρέχουν, τις καθιστά ιδανικές για την προώθηση δικτύων νέας γενιάς και την υποστήριξη της ψηφιακής μετάβασης (Addanki et al., 2018).

2.3 Αρχιτεκτονικές FTTH (GPON, XGS-PON, NG-PON2)

Τα Παθητικά Οπτικά Δίκτυα, ή Passive Optical Networks, βασίζονται σε αρχιτεκτονική σημείου προς πολλαπλά σημεία. Στην περίπτωση αυτή, μία οπτική ίνα που ξεκινά από το Optical Line Termination στο κεντρικό σημείο του παρόχου διαμοιράζεται σε πολλούς τελικούς χρήστες μέσω παθητικών οπτικών διαχωριστών (Εικόνα 2-2). Οι διαχωριστές αυτοί δεν απαιτούν ηλεκτρική τροφοδοσία και επιτρέπουν την εξυπηρέτηση πολλών Optical Network Units ή Optical Network Terminations μέσω μιας κοινής οπτικής αρχιτεκτονικής. Συνήθεις λόγοι διαίρεσης σε ένα δίκτυο PON είναι 1:32 ή 1:64, γεγονός που μειώνει τον αριθμό των απαιτούμενων οπτικών ινών και το κόστος. Επιπλέον, ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα των δικτύων PON είναι η υψηλή ενεργειακή τους αποδοτικότητα. Η χρήση παθητικών στοιχείων στο δίκτυο διανομής περιορίζει την κατανάλωση ενέργειας σε σχέση με ενεργές αρχιτεκτονικές, καθιστώντας τα πιο βιώσιμη λύση για την ανάπτυξη υποδομών FTTH (Lorincz et al., 2025).

Η πιο διαδεδομένη κατηγορία PON είναι τα δίκτυα TDM-PON, στα οποία η μετάδοση δεδομένων πραγματοποιείται με πολυπλεξία διαίρεσης χρόνου. Στην κατεύθυνση καθόδου, το OLT μεταδίδει την πληροφορία προς όλους τους χρήστες, ενώ κάθε τερματική μονάδα λαμβάνει μόνο τα δεδομένα που την αφορούν. Στην κατεύθυνση ανόδου, κάθε χρήστης μεταδίδει σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, ώστε να αποφεύγονται συγκρούσεις στη μετάδοση. Στην οικογένεια αυτή ανήκουν τεχνολογίες όπως BPON, GPON, XG-PON, XGS-PON και EPON (Lorincz et al., 2025).



Εικόνα 2-3 Αρχιτεκτονικές δικτύων FTTH: (a) Active Optical Network (AON) σημείου προς σημείο (Babu et al., 2019) και (b) Passive Optical Network (PON) σημείου προς πολλαπλά σημεία

(Πηγή: Horvath et al., 2020)

Το GPON, το οποίο έχει τυποποιηθεί ως ITU-T G.984, αποτελεί μία από τις πιο διαδεδομένες τεχνολογίες παθητικών οπτικών δικτύων. Παρέχει ταχύτητα καθόδου 2,488 Gbps και ταχύτητα ανόδου 1,244 Gbps, υποστηρίζοντας πολλαπλές υπηρεσίες μέσω της ίδιας υποδομής, όπως φωνή, δεδομένα και βίντεο. Χρησιμοποιεί διαφορετικά μήκη κύματος για την άνοδο και την κάθοδο με ταυτόχρονη μετάδοση προς τις δύο κατευθύνσεις (Sapundzhi et al., 2025). Επιπροσθέτως, το GPON χαρακτηρίζεται από υψηλή ενεργειακή αποδοτικότητα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η κοινή χρήση των πόρων του δικτύου μεταξύ πολλών χρηστών οδηγεί σε χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας ανά συνδρομητή, ιδίως σε δίκτυα μεγάλης κλίμακας. Η εξέλιξη του GPON οδήγησε στο XG-PON, το οποίο τυποποιήθηκε ως ITU-T G.987 και παρέχει περίπου 10 Gbps στην κάθοδο και 2,5 Gbps στην άνοδο (Muciaccia et al., 2014; Lorincz et al., 2025).

Η ανάγκη για συμμετρικές ταχύτητες οδήγησε στην ανάπτυξη του XGS-PON, το οποίο έχει τυποποιηθεί ως ITU-T G.9807.1 και προσφέρει συμμετρική χωρητικότητα περίπου 10 Gbps τόσο στην κάθοδο όσο και στην άνοδο. Οι τεχνολογίες αυτές ενσωματώνουν προηγμένους μηχανισμούς διαχείρισης ενέργειας, όπως λειτουργίες εξοικονόμησης ισχύος (sleep modes) για τις τερματικές μονάδες, συμβάλλοντας στη βελτίωση της συνολικής ενεργειακής απόδοσης του δικτύου χωρίς σημαντική υποβάθμιση της ποιότητας υπηρεσίας (Torres-Ferrera et al., 2022).

Η επόμενη εξέλιξη των παθητικών οπτικών δικτύων είναι το NG-PON2, το οποίο έχει τυποποιηθεί ως ITU-T G.989 και βασίζεται στην τεχνολογία TWDM-PON, δηλαδή στον συνδυασμό πολυπλεξίας διαίρεσης χρόνου και μήκους κύματος. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει τη χρήση πολλαπλών ζευγών μηκών κύματος, αυξάνοντας τη συνολική χωρητικότητα του δικτύου. Ενδεικτικά, με τη χρήση τεσσάρων καναλιών, το NG-PON2 μπορεί να επιτύχει συνολική χωρητικότητα 40 Gbps στην κάθοδο και 10 Gbps στην άνοδο. Ένα από τα πλεονεκτήματα του NG-PON2 είναι η δυνατότητα συνύπαρξης με προϋπάρχουσες τεχνολογίες, όπως GPON και XG-PON, καθώς αξιοποιεί διαφορετικές φασματικές περιοχές (Abbas & Gregory, 2016). Με τον τρόπο αυτό, οι τηλεπικοινωνιακοί πάροχοι μπορούν να αναβαθμίζουν σταδιακά το δίκτυό τους χωρίς να απαιτείται πλήρης αντικατάσταση της υφιστάμενης οπτικής υποδομής. Ωστόσο, η αυξημένη πολυπλοκότητα και η χρήση πολλαπλών καναλιών συνεπάγονται και αυξημένες απαιτήσεις σε διαχείριση πόρων και κατανάλωση ενέργειας, καθιστώντας απαραίτητη τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας του δικτύου (Lorincz et al., 2025).

Η δυνατότητα συνύπαρξης διαφορετικών τεχνολογιών PON αποτελεί θεμελιώδες χαρακτηριστικό για τη βιωσιμότητα και τη μακροχρόνια αξιοποίηση των δικτύων FTTH. Μέσω κατάλληλων πολυπλεκτών και αποπολυπλεκτών, όπως xWDM ή xPON, είναι δυνατή η ταυτόχρονη λειτουργία διαφορετικών γενεών τεχνολογιών πάνω στην ίδια φυσική υποδομή. Έτσι, η αναβάθμιση του δικτύου μπορεί να πραγματοποιηθεί με αντικατάσταση ή αναβάθμιση εξοπλισμού στα άκρα του δικτύου, χωρίς εκτεταμένες παρεμβάσεις στο οπτικό δίκτυο διανομής (Lorincz et al., 2025).

Η ενεργειακή αποδοτικότητα θεωρείται σημαντική παράμετρος αξιολόγησης των αρχιτεκτονικών PON, κυρίως σε περιβάλλοντα αυξημένης ζήτησης. Σύμφωνα με σχετικές μελέτες, τεχνολογίες με χαρακτηριστικά παραδείγματα το GPON και το 1G-EPON

εμφανίζουν καλύτερη ενεργειακή απόδοση σε δίκτυα με μέτριο αριθμό χρηστών, ενώ λύσεις επόμενης γενιάς, μεταξύ των οποίων το 10G-EPON και το XG-PON, παρουσιάζουν βελτιωμένη απόδοση σε σενάρια υψηλής πυκνότητας, λόγω της αυξημένης χωρητικότητας και της αποδοτικότερης διαχείρισης πόρων (Lorincz et al., 2025). Επιπλέον, τεχνικές όπως η δυναμική κατανομή εύρους ζώνης (Dynamic Bandwidth Allocation – DBA), οι υψηλότεροι ρυθμοί μετάδοσης και οι ενσωματωμένοι μηχανισμοί διαχείρισης ισχύος συμβάλλουν στη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας ανά χρήστη. Αξίζει να σημειωθεί ότι, αν και το GPON εμφανίζεται λιγότερο αποδοτικό σε μικρής κλίμακας δίκτυα, καθίσταται ιδιαίτερα ενεργειακά αποδοτικό όταν ο αριθμός των συνδρομητών αυξάνεται (π.χ. άνω των 1500 χρηστών), αφού το ενεργειακό κόστος των κεντρικών στοιχείων (π.χ. OLT), κατανέμεται σε μεγαλύτερο αριθμό χρηστών, μειώνοντας το κόστος ανά συνδρομητή. Οι λύσεις επόμενης γενιάς, όπως το 10G-EPON και το XG-PON, βελτιώνουν περαιτέρω την ενεργειακή αποδοτικότητα μέσω προηγμένων χαρακτηριστικών, όπως η δυναμική κατανομή εύρους ζώνης και οι υψηλοί ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων (Πίνακας 2-1) (ITU-T G.987.3, 1. 2014). Οι διαφορετικές τεχνολογίες PON διαφοροποιούνται όχι μόνο ως προς τις επιδόσεις και τη χωρητικότητα, αλλά και ως προς την ενεργειακή τους συμπεριφορά. Τα δίκτυα PON εμφανίζουν γενικά χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας σε σχέση με ενεργές αρχιτεκτονικές, λόγω της παθητικής φύσης του δικτύου διανομής, ενώ η αποδοτική λειτουργία των OLT και ONT επηρεάζει τη βελτιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης σε περιβάλλοντα αυξημένης ζήτησης (Lorincz et al., 2025).

Πίνακας 2-1 Σύγκριση απόδοσης και κατανάλωσης ενέργειας μεταξύ τεχνολογιών PON

Τεχνολογία	Πρότυπο / Αρχιτεκτονική	Μέγιστος Ρυθμός Χρήστη	Ενεργειακή Απόδοση	Απόδοση
GPON	ITU-T G.984 (2021)/ P2MP PON	2.5 Gbit/s (downstream), 1.25 Gbit/s (upstream)	~15–25 W/Gbit/s/χρήστη, γίνεται πιο αποδοτικό πάνω από ~1500 συνδρομητές λόγω καλύτερης κατανομής πόρων (Aleksić, 2011; ITU-T G.987.3, 1. 2014)	Μέτρια απόδοση· κατάλληλο για δίκτυα μέσης πυκνότητας, περιορισμένη κλιμάκωση σε υψηλό φορτίο
1G-EPON	IEEE 802.3ah (IEEE, 2004) / P2MP Ethernet PON	1 Gbit/s συμμετρικό	~20–30 W/Gbit/s/χρήστη, πιο αποδοτικό από GPON σε μικρό αριθμό χρηστών (Aleksić, 2011)	Παρόμοια απόδοση με GPON σε μικρότερα Ethernet δίκτυα, περιορισμένη επεκτασιμότητα σε υψηλή κίνηση
10G-EPON	IEEE 802.3av (IEEE, 2009) / P2MP Ethernet PON	10 Gbit/s συμμετρικό	<10 W/Gbit/s/χρήστη (για >1000 χρήστες), υψηλότερη αποδοτικότητα σε συνθήκες	Υψηλότερη ενεργειακή αποδοτικότητα σε υψηλό φορτίο, υψηλό

Τεχνολογία	Πρότυπο / Αρχιτεκτονική	Μέγιστος Ρυθμός Χρήστη	Ενεργειακή Απόδοση	Απόδοση
			υψηλού φορτίου (Aleksić, 2011)	throughput μειώνει την κατανάλωση ανά χρήστη
XG-PON (10G-PON)	ITU-T G.987 / P2MP TDM οπτικό δίκτυο	10 Gbit/s (downstream), 2.5 Gbit/s (upstream)	~15–20 W/Gbit/s/χρήστη, ενεργειακά αποδοτικό λόγω TDM, DBA και λειτουργιών εξοικονόμησης ενέργειας (Aleksić, 2011; Zin et al., 2018)	Υψηλή απόδοση σε δίκτυα μέσης έως μεγάλης κλίμακας· ελαφρώς λιγότερο αποδοτικό από 10G-EPON αλλά ανώτερο από GPON

Μέσω της συγκριτικής αξιολόγησης των τεχνολογιών PON επιβεβαιώνεται ότι δεν υπάρχει μία λύση η οποία να υπερτερεί σε όλα τα κριτήρια. Η καταλληλότερη προσέγγιση εξαρτάται από τον επιδιωκόμενο βαθμό κάλυψης, την απαιτούμενη χωρητικότητα, την πυκνότητα των συνδρομητών και τους οικονομικούς περιορισμούς του έργου. Η GPON εξακολουθεί να αποτελεί την πλέον διαδεδομένη λύση για μεγάλης κλίμακας αναπτύξεις FTTH, δεδομένου ότι συνδυάζει σχετικά χαμηλό κόστος ανάπτυξης, ώριμο οικοσύστημα εξοπλισμού και ικανοποιητική ενεργειακή απόδοση. Αντιθέτως, οι XG-PON και XGS-PON προσφέρουν σημαντικά υψηλότερη χωρητικότητα και καλύτερη υποστήριξη συμμετρικών υπηρεσιών, γεγονός που ευνοεί την αξιοποίησή τους για εφαρμογές υψηλών απαιτήσεων και μελλοντικές αναβαθμίσεις των δικτύων πρόσβασης. Επομένως, η υιοθέτηση μιας συγκεκριμένης τεχνολογίας δεν αποτελεί αποκλειστικά τεχνική απόφαση, αλλά συνιστά τεχνοοικονομική επιλογή, καθώς απαιτεί εξισορρόπηση μεταξύ απαιτούμενων επιδόσεων, ενεργειακής κατανάλωσης, κόστους επένδυσης (CAPEX), λειτουργικού κόστους (OPEX) και μελλοντικής επεκτασιμότητας. Στο πλαίσιο του έργου UFBB, η επιλογή της βέλτιστης λύσης επηρεάζει άμεσα το συνολικό κόστος ανάπτυξης και τη μακροχρόνια βιωσιμότητα της επένδυσης.

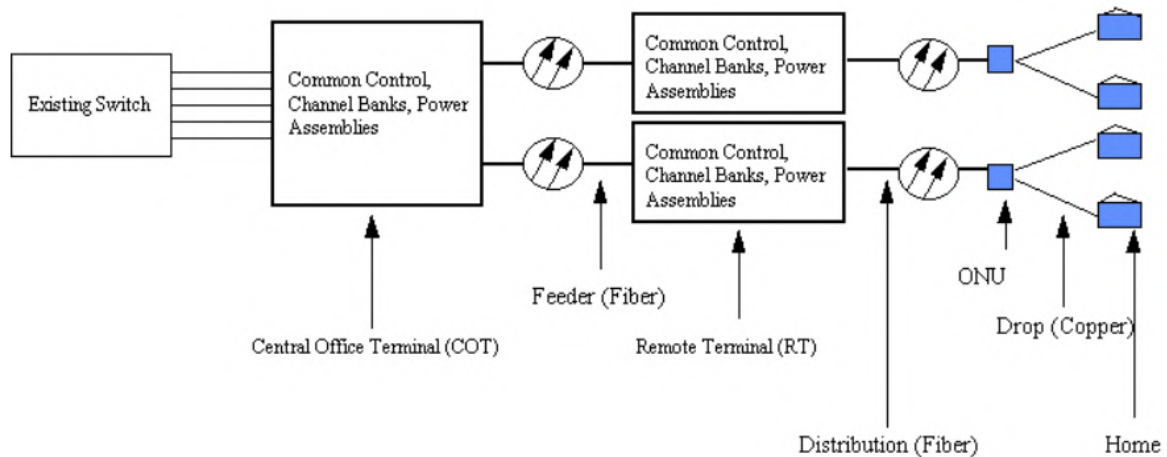
2.4 FTTx – Συγκριτική ανάλυση

Κατά τη μεταβατική περίοδο από τα παραδοσιακά τηλεπικοινωνιακά δίκτυα χαλκού προς τα δίκτυα νέας γενιάς, παρατηρείται η συνύπαρξη και διαλειτουργικότητα διαφορετικών τεχνολογιών, με κύρια χαρακτηριστικά τη συνδυαστική χρήση καλωδίων χαλκού και οπτικών ινών. Αυτές οι ενδιάμεσες λύσεις βελτιώνουν σταδιακά την ποιότητα των παρεχόμενων υπηρεσιών. Συνιστούν ένα μεταβατικό στάδιο προς την πλήρη υλοποίηση δικτύων οπτικών ινών μέχρι τον τελικό χρήστη. Οι συγκεκριμένες υβριδικές αρχιτεκτονικές εμφανίζουν εγγενείς περιορισμούς. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το βασικό σημείο

συμφόρησης του δικτύου μετατοπίζεται στο τμήμα διασύνδεσης μεταξύ της οπτικής ίνας και του χάλκινου καλωδίου, το οποίο αποτελεί τον ασθενέστερο κρίκο της αλυσίδας μετάδοσης (Corazza et al., 2026).

Για την αντιμετώπιση των περιορισμών αυτών έχουν αναπτυχθεί διάφορες αρχιτεκτονικές δικτύων, γνωστές με τον γενικό όρο FTTx (Fiber to the x). Διαφοροποιούνται ανάλογα με το σημείο στο οποίο καταλήγει η οπτική ίνα σε σχέση με τον τελικό χρήστη. Η θεμελιώδης αρχή αυτών των αρχιτεκτονικών είναι η σταδιακή προσέγγιση της οπτικής ίνας προς τον συνδρομητή, μειώνοντας αντίστοιχα το μήκος του τμήματος του δικτύου που βασίζεται σε καλώδια χαλκού (Grötschel et al., 2014). Στην αρχιτεκτονική Fiber-to-the-Node (FTTN), η οπτική ίνα φτάνει μέχρι κεντρικούς κόμβους ή τηλεπικοινωνιακά κέντρα του δικτύου, τα οποία μπορεί να βρίσκονται σε σημαντική απόσταση από τον τελικό χρήστη, ακόμη και αρκετά χιλιόμετρα. Σε αυτή την περίπτωση, το μεγαλύτερο μέρος του δικτύου πρόσβασης εξακολουθεί να βασίζεται σε υποδομές χαλκού. Ως αποτέλεσμα παρατηρούνται περιορισμένες βελτιώσεις στις επιδόσεις σε σχέση με τις παραδοσιακές τεχνολογίες, όπως το ADSL (Timmers et al., 2013).

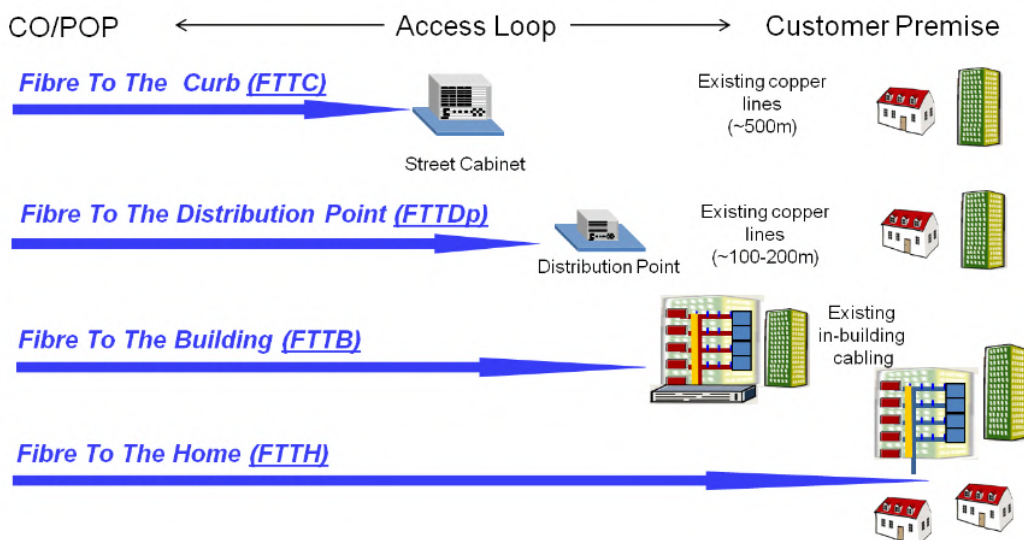
Η αρχιτεκτονική Fiber-to-the-Cabinet ή Fiber-to-the-Curb (FTTC) αναδύεται ως μια πιο εξελιγμένη μορφή. Η οπτική ίνα φτάνει σε υπαίθριες καμπίνες κοντά στους χρήστες, συνήθως σε απόσταση μερικών εκατοντάδων μέτρων (Εικόνα 2-4). Από το σημείο αυτό έως τον τελικό χρήστη χρησιμοποιείται καλώδιο χαλκού, καλύπτοντας το λεγόμενο «τελευταίο μίλι». Η εν λόγω αρχιτεκτονική είναι ευρέως διαδεδομένη. Παρέχει ταχύτητες της τάξης των 100 έως 200 Mbps, αποτελώντας μια ενδιάμεση αλλά αποτελεσματική λύση αναβάθμισης των υφιστάμενων δικτύων (Omoigui et al., 2020).



Εικόνα 2-4 Κύρια στοιχεία της αρχιτεκτονικής FTTC (Fiber to the Cabinet)

(Πηγή: Omoigui et al., 2020)

Ακόμη πιο κοντά στον τελικό χρήστη βρίσκεται η αρχιτεκτονική Fiber-to-the-Distribution-Point (FTTDP). Η οπτική ίνα εκτείνεται μέχρι το σημείο διανομής του δικτύου και το τμήμα χαλκού περιορίζεται σε πολύ μικρές αποστάσεις, συνήθως από 30 έως 200 μέτρα. Η προσέγγιση αυτή, γνωστή και ως «deep fiber», αναβαθμίζει τις επιδόσεις και μπορεί να προσφέρει ταχύτητες που προσεγγίζουν τα επίπεδα των πλήρως οπτικών δικτύων. Στην αρχιτεκτονική Fiber-to-the-Building (FTTB), η οπτική ίνα καταλήγει μέχρι το κτίριο και στη συνέχεια η διανομή του σήματος πραγματοποιείται εσωτερικά, συνήθως μέσω τεχνολογιών Ethernet. Είναι κατάλληλη για πολυκατοικίες ή επαγγελματικά κτίρια, όπου πολλοί χρήστες μπορούν να εξυπηρετηθούν από μία κοινή οπτική σύνδεση. Η πλέον εξελιγμένη μορφή είναι η αρχιτεκτονική Fiber-to-the-Home (FTTH). Η οπτική ίνα φτάνει απευθείας στον τελικό χρήστη, χωρίς τη μεσολάβηση καλωδίων χαλκού. Η συγκεκριμένη δομή εξαλείφει τα προβλήματα που σχετίζονται με τις απώλειες και τους περιορισμούς των μεταλλικών καλωδίων, προσφέροντας υψηλές ταχύτητες, αξιοπιστία και δυνατότητα μελλοντικής αναβάθμισης (FTTH Council Europe, 2016).



Εικόνα 2-5 Διαφορετικοί τύποι αρχιτεκτονικών FTTx και το σημείο τερματισμού της οπτικής ίνας σε σχέση με τον τελικό χρήστη.

(Πηγή: FTTH Council Europe, 2016)

Οι επιμέρους αρχιτεκτονικές FTTx διαφοροποιούνται ως προς τη δομή και τη λειτουργία τους, ανάλογα με τον αριθμό των οπτικών ινών, τη θέση των σημείων διακλάδωσης και συγκέντρωσης, αλλά και τις τεχνικές και επιχειρησιακές απαιτήσεις του παρόχου. Στην πράξη, δεν υπάρχει μία ενιαία βέλτιστη λύση. Κάθε αρχιτεκτονική εξυπηρετεί διαφορετικές ανάγκες και προτεραιότητες, όπως το κόστος ανάπτυξης, η απόδοση και η δυνατότητα μελλοντικής αναβάθμισης. Παραδείγματος χάριν, στις αρχιτεκτονικές FTTC και FTTDP, η οπτική ίνα φτάνει κοντά στον τελικό χρήστη, ενώ το τελευταίο τμήμα της σύνδεσης βασίζεται σε υφιστάμενες υποδομές χαλκού, αξιοποιώντας τεχνολογίες όπως VDSL2 ή G.fast. Αντίθετα, στις αρχιτεκτονικές FTTB και FTTH, η οπτική ίνα επεκτείνεται έως το κτίριο ή τον τελικό χρήστη αντίστοιχα. Εξαλείφεται, έτσι, η ανάγκη χρήσης μεταλλικών καλωδίων και παρέχεται μεγαλύτερη επεκτασιμότητα και μακροχρόνια βιωσιμότητα του δικτύου. Για τους ανωτέρω λόγους, οι αρχιτεκτονικές FTTH και FTTB θεωρούνται διεθνώς ως ο τελικός στόχος των δικτύων πρόσβασης (FTTH Council Europe, 2016). Οι βασικές διαφοροποιήσεις μεταξύ των αρχιτεκτονικών FTTx απεικονίζονται στην Εικόνα 2-5.

Πίνακας 2-2 Συγκριτική αξιολόγηση αρχιτεκτονικών FTTx

Αρχιτεκτονική	Τερματισμός οπτικής ίνας	Ταχύτητα	CAPEX	OPEX	Επεκτασιμότητα	Τυπικές Εφαρμογές
FFTN	Κόμβος δικτύου	Χαμηλή - Μέτρια	Πολύ χαμηλό	Υψηλό	Περιορισμένη	Προσωρινή αναβάθμιση
FFTC	Υπαίθρια καμπίνα	Μέτρια - Υψηλή	Χαμηλό	Μέτριο	Μέτρια	Αστικές περιοχές
FTTDP	Σημείο διανομής	Υψηλή	Μέτριο	Μέτριο	Υψηλή	Περιοχές υψηλής πυκνότητας
FTTB	Κτίριο	Υψηλή	Μέτριο	Χαμηλό	Υψηλή	Πολυκατοικίες, γραφεία
FTTH	Τελικός χρήστης	Πολύ υψηλή	Υψηλό	Πολύ χαμηλό	Πολύ υψηλή	Νέα δίκτυα NGA

Η συγκριτική αξιολόγηση των αρχιτεκτονικών FTTx καταδεικνύει ότι η σταδιακή προσέγγιση της οπτικής ίνας προς τον τελικό χρήστη οδηγεί σε σημαντική βελτίωση των επιδόσεων και της επεκτασιμότητας του δικτύου, συνοδευόμενη όμως από αυξημένο αρχικό επενδυτικό κόστος (CAPEX) (Πίνακας 2-2). Οι αρχιτεκτονικές που αξιοποιούν υφιστάμενες υποδομές χαλκού εμφανίζουν χαμηλότερο κόστος ανάπτυξης, αλλά υψηλότερο λειτουργικό κόστος (OPEX), μεγαλύτερες απώλειες μετάδοσης και περιορισμένες δυνατότητες μελλοντικής αναβάθμισης. Για τον λόγο αυτό, παρότι οι λύσεις FTTC και FTTDP αποτελούν οικονομικά αποδοτικές μεταβατικές επιλογές, η αρχιτεκτονική FTTH θεωρείται διεθνώς η πλέον βιώσιμη μακροπρόθεσμη λύση για δίκτυα πρόσβασης νέας γενιάς.

Αξίζει να σημειωθεί ότι, ενώ οι αρχιτεκτονικές FTTB και FTTH έχουν τυποποιηθεί σε διεθνές επίπεδο, δεν υπάρχει πλήρως εναρμονισμένος ορισμός για τις ενδιάμεσες μορφές, όπως οι FFTN και FTTC. Αυτό συνεπάγεται διαφοροποιήσεις στην ορολογία και στην πρακτική εφαρμογή τους μεταξύ διαφορετικών χωρών και παρόχων. Η επέκταση των δικτύων οπτικών ινών πραγματοποιείται συνήθως σταδιακά, με στόχο αρχικά την ευρεία γεωγραφική κάλυψη και στη συνέχεια τη βαθύτερη διείσδυση της οπτικής ίνας προς τον τελικό χρήστη.

2.5 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα FTTH

Η τεχνολογία Fiber to the Home (FTTH) αντιπροσωπεύει την προηγμένη μορφή δικτύων πρόσβασης νέας γενιάς, εφόσον εξασφαλίζει την πλήρη αντικατάσταση των παραδοσιακών υποδομών χαλκού από οπτικές ίνες σε όλο το μήκος του δικτύου μέχρι τον τελικό χρήστη (Khalil et al., 2022). Η αρχιτεκτονική αυτή παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα σε επίπεδο

απόδοσης, αξιοπιστίας και μελλοντικής επεκτασιμότητας, ωστόσο συνοδεύεται και από ορισμένους περιορισμούς, κυρίως οικονομικής φύσεως.

Από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα της τεχνολογίας FTTH θεωρείται το εξαιρετικά υψηλό εύρος ζώνης που προσφέρει. Η μετάδοση δεδομένων μέσω φωτεινών παλμών καθιστά δυνατή την εκμετάλλευση ενός ευρύτερου φάσματος συχνοτήτων σε σχέση με τα μεταλλικά μέσα μετάδοσης, καθιστώντας δυνατή την επίτευξη ταχυτήτων της τάξης των Gbps. Το χαρακτηριστικό αυτό διευκολύνει την υποστήριξη απαιτητικών εφαρμογών, όπως υπηρεσίες cloud, τηλεδιάσκεψη υψηλής ευκρίνειας, streaming 4K/8K και εφαρμογές Internet of Things (Abdellaoui et al., 2021).

Επιπλέον, τα δίκτυα FTTH παρουσιάζουν εξαιρετικά χαμηλές απώλειες μετάδοσης, οι οποίες είναι της τάξης των 0,1 dB/km, πολύ χαμηλότερες σε σχέση με τα καλώδια χαλκού. Αυτό συνεπάγεται τη μετάδοση δεδομένων σε μεγάλες αποστάσεις χωρίς υποβάθμιση της ποιότητας του σήματος, μειώνοντας την ανάγκη για ενδιάμεσους ενισχυτές και εξοπλισμό αναγέννησης. Οι οπτικές ίνες είναι ανθεκτικές σε ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές, εξασφαλίζοντας υψηλή σταθερότητα και αξιοπιστία στη λειτουργία του δικτύου (Petrovich et al., 2025).

Ένα ακόμη ισχυρό πλεονέκτημα είναι η συμμετρική ή σχεδόν συμμετρική ταχύτητα μετάδοσης που μπορεί να επιτευχθεί, ιδίως σε σύγχρονες τεχνολογίες όπως το XGS-PON. Σε αντίθεση με τις τεχνολογίες χαλκού, όπου η ταχύτητα λήψης υπερβαίνει την ταχύτητα αποστολής, τα δίκτυα FTTH μπορούν να υποστηρίξουν ισορροπημένη μετάδοση δεδομένων, γεγονός που είναι κρίσιμο για επιχειρησιακές εφαρμογές και υπηρεσίες νέας γενιάς (Apriono et al., 2024).

Επιπρόσθετα, οι οπτικές ίνες χαρακτηρίζονται από μικρό βάρος και όγκο, το οποίο οδηγεί σε υψηλή πυκνότητα μετάδοσης δεδομένων. Ενδεικτικά, η απόδοση ενός μικρού όγκου οπτικής ίνας μπορεί να αντικαταστήσει πολλαπλάσια ποσότητα χαλκού, συμβάλλοντας στη μείωση του κόστους μεταφοράς και εγκατάστασης υλικών. Η τεχνολογία θεωρείται ενεργειακά αποδοτική, δεδομένου ότι τα παθητικά δίκτυα, όπως τα PON, δεν απαιτούν ηλεκτρική τροφοδοσία στο ενδιάμεσο τμήμα του δικτύου. Ένα από τα στρατηγικά πλεονεκτήματα της τεχνολογίας FTTH είναι η «μελλοντική της ανθεκτικότητα» (future-proof). Η εγκατάσταση οπτικής ίνας μπορεί να υποστηρίξει αυξανόμενες ανάγκες σε εύρος

ζώνης για μεγάλο χρονικό διάστημα, χωρίς την ανάγκη αντικατάστασης της φυσικής υποδομής. Οι αναβαθμίσεις μπορούν να πραγματοποιηθούν σε επίπεδο ενεργού εξοπλισμού, μειώνοντας το κόστος μελλοντικών επενδύσεων (Fenta et al., 2021).

Ωστόσο, παρά τα θετικά χαρακτηριστικά, η υλοποίηση δικτύων FTTH παρουσιάζει και ορισμένα μειονεκτήματα. Το κυριότερο από αυτά είναι το υψηλό αρχικό κόστος εγκατάστασης (CAPEX), το οποίο σχετίζεται με τα έργα πολιτικού μηχανικού, όπως εκσκαφές, διέλευση καλωδίων και εγκατάσταση υποδομών. Το κόστος αυτό λειτουργεί ως βασικό εμπόδιο για την δημιουργία δικτύων σε περιοχές χαμηλής πληθυσμιακής πυκνότητας, όπου η απόδοση της επένδυσης είναι χαμηλότερη. Επιπλέον, η εγκατάσταση οπτικών ινών απαιτεί εξειδικευμένο τεχνικό προσωπικό και κατάλληλο εξοπλισμό, στοιχείο που αυξάνει την πολυπλοκότητά της. Σε ορισμένες περιπτώσεις, η ανάπτυξη του δικτύου μπορεί να προκαλέσει προσωρινή όχληση στην καθημερινότητα των πολιτών, λόγω των εργασιών εγκατάστασης. Σε επίπεδο λειτουργίας, αν και τα δίκτυα PON μειώνουν το κόστος, παρουσιάζουν περιορισμούς ως προς τη διαμοίραση του εύρους ζώνης μεταξύ των χρηστών αφού πρόκειται για αρχιτεκτονική κοινής χρήσης. Επιπλέον, η παθητική φύση των ενδιάμεσων στοιχείων δυσχεραίνει τον εντοπισμό βλαβών και τη διαχείριση του δικτύου σε σχέση με λύσεις Active Ethernet (Yousaf, 2026). Τα κυριότερα πλεονεκτήματα και οι βασικοί περιορισμοί της τεχνολογίας FTTH συνοψίζονται στον Πίνακα 2-3, προκειμένου να αποτυπωθούν συγκεντρωτικά τα χαρακτηριστικά που επηρεάζουν την αξιολόγηση και την υιοθέτησή της σε έργα ανάπτυξης δικτύων νέας γενιάς.

Πίνακας 2-3 Συνοπτική παρουσίαση των βασικών πλεονεκτημάτων και περιορισμών της τεχνολογίας FTTH

Πλεονεκτήματα	Περιορισμοί
Πολυ υψηλές ταχύτητες μετάδοσης	Υψηλό αρχικό επενδυτικό κόστος (CAPEX)
Χαμηλές απώλειες σήματος	Ανάγκη εκτεταμένων εργασιών εγκατάστασης
Χαμηλή κατανάλωση ενέργειας	Απαιτήση εξειδικευμένου τεχνικού προσωπικού
Υψηλή αξιοπιστία και ανθεκτικότητα σε ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές	Δυσκολία αποκατάστασης βλαβών
Δυνατότητα μελλοντικής αναβάθμισης χωρίς αντικατάσταση της υποδομής	Περιορισμένη οικονομική αποδοτικότητα σε περιοχές χαμηλής πληθυσμιακής πυκνότητας

Πλεονεκτήματα	Περιορισμοί
Υποστήριξη συμμετρικών υπηρεσιών υψηλού εύρους ζώνης	-

Η τεχνολογία FTTH αποτελεί την πλέον κατάλληλη λύση για την κατασκευή σύγχρονων τηλεπικοινωνιακών υποδομών, και αυτό γιατί προσφέρει υψηλές ταχύτητες, αξιοπιστία και δυνατότητα μελλοντικής επέκτασης. Παρά τους οικονομικούς και τεχνικούς περιορισμούς που παρουσιάζει, τα οφέλη της υπερτερούν, γεγονός που εξηγεί τη συνεχή αύξηση της υιοθέτησής της σε παγκόσμιο επίπεδο και τον καθοριστικό της ρόλο στην ψηφιακή μετάβαση.

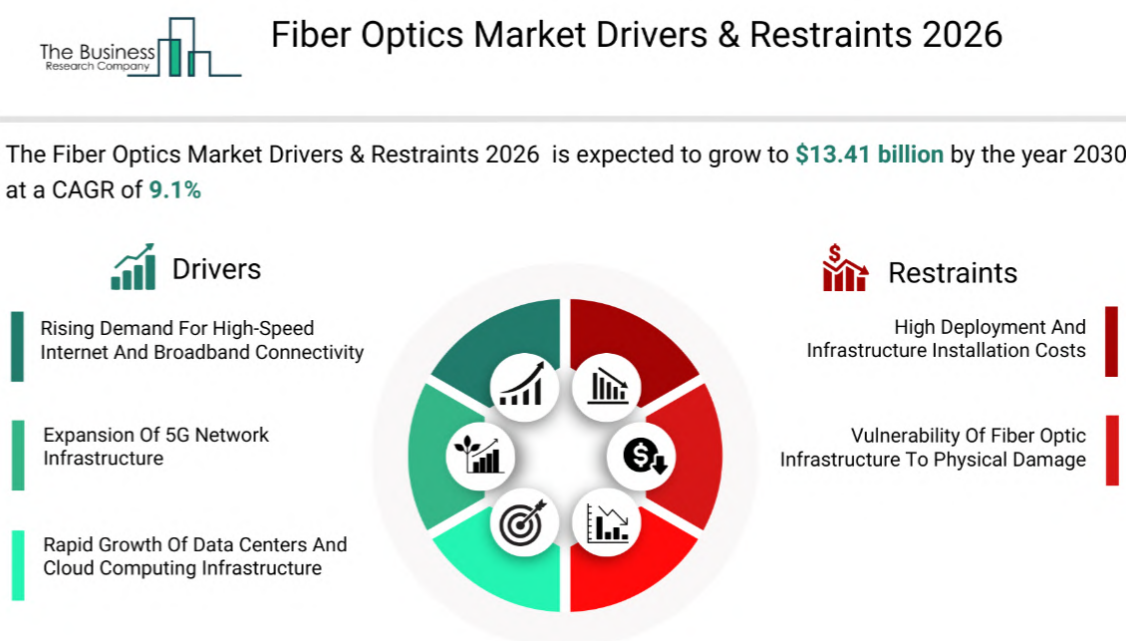
2.6 Διεθνείς τάσεις και στατιστικά

Σε διεθνές επίπεδο, παρατηρείται ραγδαία αύξηση των δικτύων FTTH, η οποία συνοδεύεται από εκθετική αύξηση της διαδικτυακής κίνησης και του όγκου δεδομένων ανά χρήστη. Η τάση αυτή οδηγεί σε αυξημένες απαιτήσεις για χωρητικότητα και ενεργειακή αποδοτικότητα των δικτύων πρόσβασης. Η συνεχής αύξηση του αριθμού των συνδρομητών και των απαιτήσεων σε εύρος ζώνης αναμένεται να επηρεάσει την κατανάλωση ενέργειας των οπτικών δικτύων την περίοδο 2025–2035, καθιστώντας την ενεργειακή αποδοτικότητα βασική συνιστώσα σχεδιασμού των σύγχρονων τηλεπικοινωνιακών υποδομών (Lorincz et al., 2025).

Η παγκόσμια αγορά οπτικών ινών παρουσιάζει αξιοσημείωτη αναπτυξιακή δυναμική, καθώς η ζήτηση για υψηλής ταχύτητας συνδεσιμότητα αυξάνεται ραγδαία. Σύμφωνα με εκτιμήσεις, η αξία της αγοράς αναμένεται να ξεπεράσει τα 13 δισεκατομμύρια δολάρια έως το 2030, με μέσο ετήσιο ρυθμό ανάπτυξης (CAGR) περίπου 9% (Εικόνα 2-5). Σε σύγκριση με την ευρύτερη αγορά τηλεπικοινωνιακού εξοπλισμού, η οποία εκτιμάται ότι θα φτάσει τα 1.018 δισεκατομμύρια δολάρια έως το 2030, η αγορά οπτικών ινών αντιπροσωπεύει περίπου το 1% αυτής. Στο σύνολο της βιομηχανίας της πληροφορικής, η οποία αναμένεται να φτάσει τα 13.807 δισεκατομμύρια δολάρια, οι οπτικές ίνες καταλαμβάνουν περίπου το 0,1% της συνολικής αξίας (The Business Research Company, 2026).

Οι βασικοί παράγοντες που οδηγούν στην διεύρυνση της αγοράς περιλαμβάνουν την αυξανόμενη ζήτηση για γρήγορο διαδίκτυο και ευρυζωνικές υπηρεσίες, την επέκταση των δικτύων 5G και τη ραγδαία εξάπλωση των data centers και των υπηρεσιών cloud computing.

Οι οπτικές ίνες αποτελούν εργαλείο υποστήριξης εφαρμογών υψηλής έντασης δεδομένων, όπως το video streaming, οι υπηρεσίες cloud και οι πλατφόρμες απομακρυσμένης συνεργασίας. Τα δίκτυα 5G απαιτούν υψηλής χωρητικότητας και χαμηλής καθυστέρησης συνδέσεις, γεγονός που ενισχύει τη ζήτηση για οπτικές υποδομές (The Business Research Company, 2026). Οι ανωτέρω παράγοντες απεικονίζονται συνοπτικά στην Εικόνα 2-5.

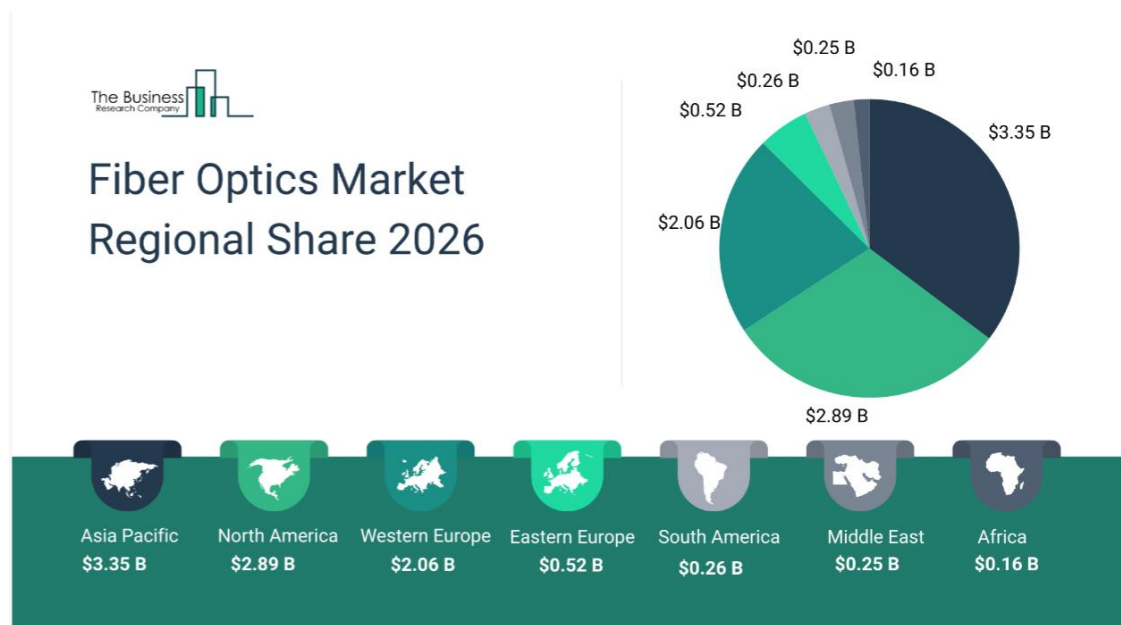


Εικόνα 2-6 Βασικοί παράγοντες ανάπτυξης και περιορισμοί της αγοράς οπτικών ινών έως το 2030

(Πηγή: The Business Research Company, 2026)

Σε γεωγραφικό επίπεδο, η περιοχή της Ασίας-Ειρηνικού αναμένεται να αποτελέσει τη μεγαλύτερη αγορά οπτικών ινών έως το 2030, με εκτιμώμενη αξία περίπου 5 δισεκατομμυρίων δολαρίων. Αυτό αποδίδεται στην επέκταση ευρυζωνικών υποδομών, στην αυξανόμενη υιοθέτηση δικτύων FTTH και στις επενδύσεις σε χώρες όπως η Κίνα, η Ινδία και η Ιαπωνία. Αντίστοιχα, οι Ηνωμένες Πολιτείες αναμένεται να αποτελέσουν τη μεγαλύτερη μεμονωμένη αγορά, φτάνοντας τα 3 δισεκατομμύρια δολάρια έως το 2030 (The Business Research Company, 2026). Η γεωγραφική κατανομή της αγοράς παρουσιάζεται στην Εικόνα 2-6.

Όσον αφορά στη διάρθρωση της αγοράς, η τεχνολογία single-mode αναμένεται να κυριαρχήσει, αντιπροσωπεύοντας περίπου το 71% της συνολικής αγοράς έως το 2030. Η επικράτηση αυτή οφείλεται στην καταλληλότητά της για μεταδόσεις μεγάλων αποστάσεων και υψηλής χωρητικότητας, καθώς και στην αυξανόμενη χρήση της σε δίκτυα FTTH, backhaul υποδομές 5G και data centers (The Business Research Company, 2026). Οι διεθνείς τάσεις καταδεικνύουν ότι οι οπτικές ίνες αποτελούν βασικό πυλώνα της ψηφιακής οικονομίας, υποστηρίζοντας τα δίκτυα νέας γενιάς και την αυξανόμενη ανάγκη για αξιόπιστη και υψηλής ταχύτητας συνδεσιμότητα.



Εικόνα 2-7 Γεωγραφική κατανομή της παγκόσμιας αγοράς οπτικών ινών (Regional Share)

(Πηγή: The Business Research Company, 2026)

Το κεφάλαιο ανέδειξε την εξέλιξη των δικτύων πρόσβασης από τις παραδοσιακές τεχνολογίες χαλκού προς τις υποδομές οπτικών ινών νέας γενιάς. Η συγκριτική αξιολόγηση των τεχνολογιών GPON, XGS-PON και NG-PON2, καθώς και των αρχιτεκτονικών FTTx, κατέδειξε ότι η επιλογή της κατάλληλης τεχνολογικής λύσης δεν εξαρτάται αποκλειστικά από τις επιδόσεις της, αλλά και από οικονομικούς, λειτουργικούς και στρατηγικούς παράγοντες, όπως το κόστος ανάπτυξης, η επεκτασιμότητα και οι απαιτήσεις της περιοχής εφαρμογής. Ειδικότερα, για έργα μεγάλης κλίμακας όπως το UFBB, η επιλογή τεχνολογίας πρέπει να ισορροπεί μεταξύ τεχνικής απόδοσης και οικονομικής βιωσιμότητας. Το

θεωρητικό αυτό υπόβαθρο αποτελεί τη βάση για την ανάλυση του έργου UFBB και του θεσμικού πλαισίου υλοποίησής του, που παρουσιάζεται στο επόμενο κεφάλαιο.

3. Το Έργο UFBB και το Ρυθμιστικό Πλαίσιο

3.1 Το UFBB ως ΣΔΙΤ

Η επίσημη έναρξη του UFBB πραγματοποιήθηκε στις 12 Ιουνίου 2023 με την υπογραφή της Σύμβασης Σύμπραξης. Η συγκεκριμένη πρωτοβουλία υλοποιείται μέσω Σύμπραξης Δημοσίου και Ιδιωτικού Τομέα (ΣΔΙΤ). Θεωρείται μία από τις σημαντικότερες δημόσιες παρεμβάσεις ανάπτυξης ευρυζωνικών υποδομών στην Ελλάδα και ένα από τα μεγαλύτερα έργα ΣΔΙΤ στην Ευρώπη (Υπουργείο Ψηφιακής Διακυβέρνησης, 2023).

Η επιλογή του μοντέλου ΣΔΙΤ σχετίζεται με την ανάγκη δημιουργίας Δικτύων Νέας Γενιάς (Next Generation Access - NGA) και Πολύ Υψηλής Χωρητικότητας (Very High Capacity Networks – VHCN). Αυτές οι τεχνολογίες αφορούν κυρίως δίκτυα οπτικών ινών που υποστηρίζουν υπερυψηλές ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων και η δημιουργία τους κρίθηκε απαραίτητη σε περιοχές όπου το ιδιωτικό επενδυτικό ενδιαφέρον δεν επαρκεί. Στην πράξη οι περισσότεροι ιδιώτες πάροχοι αποφεύγουν τέτοιες επενδύσεις λόγω του υψηλού κόστους και της περιορισμένης εμπορικής βιωσιμότητας των συγκεκριμένων περιοχών που δεν τις καθιστούν εμπορικά ελκυστικές. Το συγκεκριμένο μοντέλο συνδυάζει τις δυνατότητες χρηματοδότησης και στρατηγικού σχεδιασμού του δημόσιου τομέα με την τεχνογνωσία και την επιχειρησιακή εμπειρία των ιδιωτικών παρόχων τηλεπικοινωνιών (Υπουργείο Ψηφιακής Διακυβέρνησης, 2025). Οι Συμπράξεις Δημοσίου και Ιδιωτικού Τομέα αποτελούν σύγχρονο μηχανισμό υλοποίησης μεγάλων υποδομών, μέσω του οποίου επιδιώκεται η αξιοποίηση της τεχνογνωσίας, της χρηματοδοτικής ικανότητας και της επιχειρησιακής ευελιξίας του ιδιωτικού τομέα, διατηρώντας τον στρατηγικό έλεγχο από το Δημόσιο. Οι ΣΔΙΤ εφαρμόζονται κυρίως σε παρεμβάσεις υψηλής τεχνικής και χρηματοοικονομικής πολυπλοκότητας, όπου απαιτείται μακροχρόνια διαχείριση και λειτουργία υποδομών δημόσιου ενδιαφέροντος (Νταβέλης, 2021).

Το έργο σχεδιάστηκε σύμφωνα με τις διατάξεις του Ν. 3389/2005 περί Συμπράξεων Δημοσίου και Ιδιωτικού Τομέα και η υπαγωγή του εγκρίθηκε από τη Διυπουργική Επιτροπή

ΣΔΙΤ. Η Αναθέτουσα Αρχή προκήρυξε δημόσιο διεθνή διαγωνισμό για την επιλογή Ιδιωτικού Φορέα Σύμπραξης στοχεύοντας στη λειτουργία υποδομών υπερυψηλής ευρυζωνικότητας στην ελληνική επικράτεια. Η ανάθεση βασίστηκε στη διαδικασία του Ανταγωνιστικού Διαλόγου, όπως προβλέπεται στο άρθρο 13 του Ν. 3389/2005. Ως κριτήριο επιλογής ορίστηκε η πλέον συμφέρουσα από οικονομική άποψη προσφορά βάσει της βέλτιστης σχέσης ποιότητας και τιμής. Η συγκεκριμένη μέθοδος ανάθεσης εφαρμόστηκε ώστε να αποσαφηνιστούν σταδιακά οι τεχνικές, χρηματοοικονομικές και νομικές απαιτήσεις της σύμπραξης. Η διαδικασία του Ανταγωνιστικού Διαλόγου εφαρμόζεται κυρίως σε παρεμβάσεις ιδιαίτερης τεχνικής και χρηματοδοτικής πολυπλοκότητας, όπου η Αναθέτουσα Αρχή δεν είναι σε θέση να προσδιορίσει εξ αρχής τη βέλτιστη τεχνική ή χρηματοοικονομική λύση. Μέσω διαδοχικών φάσεων διαβούλευσης επιδιώκεται η διαμόρφωση της καταλληλότερης λύσης πριν την υποβολή δεσμευτικών προσφορών από τους υποψηφίους αναδόχους (Νταβέλης, 2021).

Βασικό χαρακτηριστικό των έργων ΣΔΙΤ αποτελεί ο επιμερισμός των κινδύνων μεταξύ δημόσιου και ιδιωτικού τομέα. Ο ιδιωτικός φορέας αναλαμβάνει συνήθως τον κατασκευαστικό, λειτουργικό και χρηματοοικονομικό κίνδυνο, ενώ το Δημόσιο διατηρεί τον ρυθμιστικό και εποπτικό ρόλο. Η μεταφορά κινδύνου θεωρείται κρίσιμο στοιχείο αποτελεσματικότητας των ΣΔΙΤ, δεδομένου ότι συνδέεται με τη βελτιστοποίηση του κόστους, την έγκαιρη υλοποίηση και τη διασφάλιση της ποιότητας των παρεχόμενων υπηρεσιών (Νταβέλης, 2021). Για τον προσδιορισμό της καλύτερης και προτιμότερης λύσης για την υλοποίηση της σύμπραξης πραγματοποιήθηκαν διαδοχικοί κύκλοι διαβούλευσης μεταξύ της Αναθέτουσας Αρχής και των προεπιλεγέντων οικονομικών φορέων. Στο οργανωτικό σχήμα της σύμπραξης προβλέπεται η δημιουργία Ανώνυμης Εταιρείας Ειδικού Σκοπού (ΑΕΕΣ), η οποία θα λειτουργεί ως Ιδιωτικός Φορέας Σύμπραξης και θα αναλάβει την κατασκευή και διαχείριση του δικτύου. Η ΑΕΕΣ συστήνεται αποκλειστικά για τις ανάγκες της Σύμβασης Σύμπραξης και επωμίζεται την ορθή εφαρμογή του UFBB (Υπουργείο Ψηφιακής Διακυβέρνησης, 2021). Προβλέπεται η αξιοποίηση εταιρειών ειδικού σκοπού (Special Purpose Vehicles – SPVs), οι οποίες φέρουν την ευθύνη για την επιχειρησιακή υποστήριξη των υποδομών. Η χρήση SPVs συνιστά συνήθη πρακτική σε μεγάλα έργα ΣΔΙΤ λόγω του ότι επιτρέπει τον διαχωρισμό χρηματοοικονομικών, οργανωτικών και επενδυτικών υποχρεώσεων. Η αρχιτεκτονική του UFBB βασίζεται στο επιχειρηματικό μοντέλο χονδρικής ανοικτής πρόσβασης (open access wholesale model)

παρέχοντας τη δυνατότητα ισότιμης χρήσης των εγκαταστάσεων από όλους τους τηλεπικοινωνιακούς παρόχους (Υπουργείο Ψηφιακής Διακυβέρνησης, 2025).

Η επιλογή του μοντέλου ΣΔΙΤ στο UFBB συνδέεται και με την αρχή του “Value for Money”, δηλαδή της επίτευξης της βέλτιστης σχέσης κόστους–αποτελεσματικότητας για το Δημόσιο. Η λογική αυτή βασίζεται στην εκτίμηση ότι η συνεργασία με τον ιδιωτικό τομέα μπορεί να εξασφαλίσει αποδοτικότερη υλοποίηση, καλύτερη διαχείριση κινδύνων και υψηλότερο επίπεδο τεχνικής εξειδίκευσης σε σύγκριση με τις παραδοσιακές δημόσιες συμβάσεις. Σε αντίθεση με τις παραδοσιακές δημόσιες συμβάσεις, το μοντέλο ΣΔΙΤ που εφαρμόζεται στο UFBB συνδυάζει την αξιοποίηση δημόσιων και ιδιωτικών πόρων, τη μακροχρόνια λειτουργική ευθύνη του ιδιωτικού φορέα και τη δυνατότητα τεχνολογικής αναβάθμισης σε όλο τον κύκλο ζωής του δικτύου (Νταβέλης, 2021).

Η εφαρμογή του μοντέλου ΣΔΙΤ στο έργο UFBB παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα, καθώς επιτρέπει τη μόχλευση ιδιωτικών κεφαλαίων και τεχνογνωσίας για την ανάπτυξη ευρυζωνικών υποδομών μεγάλης κλίμακας, περιορίζοντας παράλληλα την άμεση δημοσιονομική επιβάρυνση. Ωστόσο, η επιτυχία του μοντέλου εξαρτάται από την αποτελεσματική κατανομή των κινδύνων, την επάρκεια του ρυθμιστικού πλαισίου και τον αποτελεσματικό συντονισμό μεταξύ των εμπλεκόμενων φορέων. Σε έργα υψηλής πολυπλοκότητας, όπως το UFBB, καθυστερήσεις στις αδειοδοτήσεις, μεταβολές του κόστους κατασκευής ή δυσχέρειες στον συντονισμό δημόσιων και ιδιωτικών φορέων μπορούν να επηρεάσουν τόσο το χρονοδιάγραμμα όσο και τη συνολική οικονομική απόδοση της επένδυσης. Συνεπώς, η επιλογή του μοντέλου ΣΔΙΤ δεν αποτελεί από μόνη της εγγύηση επιτυχίας, αλλά προϋποθέτει αποτελεσματική διακυβέρνηση του έργου και συνεχή εποπτεία καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής του.

3.2 Στόχοι, χρηματοδότηση, γεωγραφική κάλυψη

Πρωταρχικός στόχος του έργου UFBB είναι η παροχή συνδέσεων υπερυψηλών ταχυτήτων, έως και 1 Gbps, σε περιοχές της ελληνικής επικράτειας που δεν καλύπτονται επαρκώς από ιδιωτικές επενδύσεις νέας γενιάς. Αναμένεται να επωφεληθούν περίπου 830.000 νοικοκυριά και επιχειρήσεις, καθώς και περίπου 10.000 δημόσια κτίρια, όπως σχολεία, κέντρα υγείας και λοιπές δημόσιες υποδομές (Υπουργείο Ψηφιακής Διακυβέρνησης, 2025).

Το UFBB στοχεύει κατά κύριο λόγο σε ημιαστικές και αγροτικές περιοχές όπου η προώθηση αντίστοιχων υποδομών δεν ήταν εμπορικά ελκυστική για τους ιδιωτικούς παρόχους. Μέσω των εκτεταμένων δικτύων οπτικών ινών επιδιώκεται η ισότιμη πρόσβαση σε υπηρεσίες υπερυψηλών ταχυτήτων, η μείωση του ψηφιακού χάσματος μεταξύ αστικών και περιφερειακών περιοχών και η ενίσχυση της τοπικής οικονομίας και της περιφερειακής ενδυνάμωσης (Υπουργείο Ψηφιακής Διακυβέρνησης, 2026). Η δράση UFBB αποτελεί βασική δημόσια παρέμβαση στο πλαίσιο του «Εθνικού Σχεδίου Ευρυζωνικής Πρόσβασης Επόμενης Γενιάς». Το δίκτυο θεμελιώνεται σε εκτεταμένες υποδομές οπτικών ινών, εγκατεστημένες όσο το δυνατόν πλησιέστερα στον τελικό χρήστη, ώστε να εξασφαλίζονται ταχύτητες τουλάχιστον 100 Mbps, με δυνατότητα αναβάθμισης έως και 1 Gbps συμβάλλοντας στην επίτευξη των στόχων της Gigabit Society και της Ψηφιακής Ατζέντας της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Εντάσσεται στο ευρύτερο Εθνικό Ευρυζωνικό Σχέδιο και συνδέεται άμεσα με τους στόχους της ευρωπαϊκής στρατηγικής «Ψηφιακή Δεκαετία 2030», η οποία επιδιώκει την καθολική πρόσβαση σε δίκτυα VHCN (Ψηφιακός Μετασχηματισμός 2021–2027, 2025).

Η δημόσια χρηματοδότηση του έργου εγκρίθηκε από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή στο πλαίσιο των κανόνων κρατικών ενισχύσεων για την επέκταση ευρυζωνικών υποδομών σε «λευκές NGA περιοχές», δηλαδή περιοχές όπου δεν υπήρχαν ούτε προβλέπονταν ιδιωτικές επενδύσεις δικτύων νέας γενιάς. Η δράση σχεδιάστηκε ώστε να λειτουργεί συμπληρωματικά προς τις ιδιωτικές επενδύσεις τηλεπικοινωνιακών παρόχων, χωρίς να δημιουργεί στρεβλώσεις στην αγορά ή να λειτουργεί ανασταλτικά για μελλοντικές εμπορικές επενδύσεις. Υπό αυτές τις συνθήκες, προβλέπονται δύο κατηγορίες ευρυζωνικών υπηρεσιών: α) η Κλάση Α, η οποία αφορά συνδέσεις τουλάχιστον 100 Mbps με δυνατότητα αναβάθμισης σε 1 Gbps, και β) η Κλάση Β, η οποία αφορά συνδέσεις με ελάχιστη ταχύτητα καθόδου 100 Mbps (European Commission, 2019). Η χρηματοδότηση πραγματοποιείται μέσω μικτού μοντέλου δημόσιας και ιδιωτικής χρηματοδότησης, με τη συνολική επένδυση να ανέρχεται σε 829 εκατομμύρια ευρώ, εκ των οποίων περίπου 250 εκατομμύρια ευρώ προέρχονται από συγχρηματοδοτούμενη δημόσια δαπάνη μέσω του ΕΣΠΑ 2021–2027 και του προγράμματος «Ψηφιακός Μετασχηματισμός», ενώ το υπόλοιπο ποσό καλύπτεται από ιδιωτικά κεφάλαια. Σε προηγούμενη φάση σχεδιασμού, ο αρχικός προϋπολογισμός ανερχόταν σε περίπου 700 εκατομμύρια ευρώ (870 εκατ. ευρώ συμπεριλαμβανομένου ΦΠΑ), με δημόσια συγχρηματοδότηση μέσω του ΕΠΑΝΕΚ και του Προγράμματος Αγροτικής Ανάπτυξης (Υπουργείο Ψηφιακής Διακυβέρνησης, 2023).

Η γεωγραφική κάλυψη του UFBB οργανώνεται σε επτά «Γεωγραφικές Ζώνες», γνωστές ως lots, οι οποίες αντιστοιχούν σε συγκεκριμένες Περιφερειακές Ενότητες της χώρας (Εικόνα 3-1). Από το 2023 έχει ξεκινήσει το έργο στις γεωγραφικές ζώνες 1, 3 και 7, οι οποίες αφορούν περιοχές της Στερεάς Ελλάδας, της Πελοποννήσου, της Κρήτης και τμημάτων της νησιωτικής Ελλάδας, καλύπτοντας περισσότερα από 350.000 νοικοκυριά και επιχειρήσεις. Από το 2025 η ανάπτυξη επεκτάθηκε και στις υπόλοιπες γεωγραφικές ζώνες (Lots 2, 4, 5 και 6) (Υπουργείο Ψηφιακής Διακυβέρνησης, 2025).

Συγκεκριμένα, το Lot 2 περιλαμβάνει τις Περιφερειακές Ενότητες Πέλλας, Πιερίας, Καστοριάς, Φλώρινας, Ιωαννίνων, Θεσπρωτίας, Πρέβεζας, Λάρισας, Μαγνησίας, Σποράδων και Κέρκυρας, με 133.432 συνδέσεις. Το Lot 4 περικλείει τις Περιφερειακές Ενότητες Χαλκιδικής, Θάσου, Καβάλας, Σερρών, Λέσβου, Ικαρίας, Λήμνου, Σάμου και Χίου, με 107.532 συνδέσεις. Το Lot 5 εμπεριέχει τις Περιφερειακές Ενότητες Θεσσαλονίκης, Κιλκίς, Ευρυτανίας, Φωκίδας, Ιθάκης, Κεφαλληνίας, Λευκάδας, Αχαΐας και Αιτωλοακαρνανίας, με 124.143 συνδέσεις. Το Lot 6 αφορά τις Περιφερειακές Ενότητες Κοζάνης, Γρεβενών, Άρτας, Καρδίτσας, Τρικάλων, Ημαθίας, Αργολίδας και Λακωνίας, με 114.205 συνδέσεις (Υπουργείο Ψηφιακής Διακυβέρνησης, 2025).



Εικόνα 3-1 Γεωγραφική κατανομή των επτά γεωγραφικών ζωνών (Lots) του έργου Ultra-Fast Broadband (UFBB) στην Ελλάδα
(Πηγή: COSMOTE, 2023)

Στις τέσσερις από τις επτά γεωγραφικές ζώνες του UFBB, η ανάπτυξη των υποδομών είχε αναληφθεί από την εταιρεία TERNΑ FIBER, καλύπτοντας περίπου 480.000 νοικοκυριά και επιχειρήσεις σε ημιαστικές και αγροτικές περιοχές της χώρας. Με την ολοκλήρωση της μεταβίβασης της εταιρείας στον Όμιλο ΟΤΕ, ο τελευταίος αναλαμβάνει την υλοποίηση του συνόλου του έργου, το οποίο προβλέπεται να καλύψει συνολικά περίπου 860.000 γραμμές σε ολόκληρη την ελληνική επικράτεια (Capital.gr, 2025). Το UFBB υλοποιείται με καθεστώς 26ετούς περιόδου παραχώρησης, συμπεριλαμβανομένης της περιόδου κατασκευής, στοιχείο που αντανάκλα τον μακροπρόθεσμο χαρακτήρα των επενδύσεων ευρυζωνικών υποδομών και τη λογική απόσβεσης των κεφαλαίων μέσω μακροχρόνιας εκμετάλλευσης του δικτύου (ΟΤΕ Α.Ε., 2025).

Πίνακας 3-1 Βασικά χαρακτηριστικά του έργου Ultra-Fast Broadband (UFBB).

(Πηγή: Προσαρμογή από COSMOTE (2023), *UFBB Rollout* – Lots 1, 3 & 7.

Παράμετρος	Τιμή
Γεωγραφικές ζώνες (Lots)	7
Διάρκεια κατασκευής	3 έτη
Διάρκεια παροχής υπηρεσιών	23 έτη
OCCAs (Υπαίθριες καμπίνες)	7.642
Ενεργές γραμμές OCCAs	748.920
RSCAs	2.948
Ισοδύναμες ενεργές γραμμές RSCAs	88.550
Σημεία κοινωνικοοικονομικού ενδιαφέροντος	10.230
Συνολικές προβλεπόμενες γραμμές	860.000

Τα στοιχεία του Πίνακα 3-1 αναδεικνύουν το εύρος και την πολυπλοκότητα του έργου UFBB. Η ανάπτυξη χιλιάδων υπαίθριων καμπινών και η κάλυψη εκατοντάδων χιλιάδων νοικοκυριών και επιχειρήσεων κατατάσσουν το UFBB μεταξύ των σημαντικότερων έργων ευρυζωνικών υποδομών που έχουν υλοποιηθεί στην Ελλάδα. Η μακροχρόνια περίοδος παραχώρησης και η κάλυψη χιλιάδων σημείων κοινωνικοοικονομικού ενδιαφέροντος υπογραμμίζουν τη στρατηγική σημασία του έργου για τον ψηφιακό μετασχηματισμό της χώρας.

Η ανάλυση των βασικών χαρακτηριστικών του έργου καταδεικνύει ότι ο σχεδιασμός του UFBB δεν βασίστηκε αποκλειστικά σε τεχνικά κριτήρια, αλλά σε συνδυασμό τεχνικών, οικονομικών και γεωγραφικών παραμέτρων. Η κατανομή των επτά γεωγραφικών ζωνών, η επιλογή των περιοχών παρέμβασης και η υλοποίηση μέσω μικτού μοντέλου δημόσιας και ιδιωτικής χρηματοδότησης αποσκοπούν στη μεγιστοποίηση της κοινωνικής ωφέλειας, διατηρώντας παράλληλα τη βιωσιμότητα της επένδυσης. Η προσέγγιση αυτή αντανάκλα τη στρατηγική της Ευρωπαϊκής Ένωσης για τη δημόσια χρηματοδότηση ευρυζωνικών υποδομών μόνο σε περιοχές όπου η αγορά αδυνατεί να επενδύσει αυτόνομα, περιορίζοντας

έτσι τον κίνδυνο στρέβλωσης του ανταγωνισμού και ενισχύοντας την αποτελεσματική αξιοποίηση των διαθέσιμων πόρων.

Σύμφωνα με τον αρχικό τεχνικό σχεδιασμό του έργου, προβλέπεται η ανάπτυξη περίπου 5.300 km δικτύου οπισθόζευξης (Backhaul), καθώς και 7.500 km δικτύου πρόσβασης (Access), εκ των οποίων 2.850 km αφορούν υπόγειες οδεύσεις και 4.650 km εναέριες υποδομές (Εικόνα 3-2). Τα στοιχεία αυτά αποτυπώνουν τη μεγάλη γεωγραφική κλίμακα του UFBB και τις σημαντικές τεχνικές απαιτήσεις που συνεπάγεται η ανάπτυξη υποδομών οπτικών ινών σε ολόκληρη την ελληνική επικράτεια (COSMOTE, 2023).

HIGH LEVEL KPIs ΕΡΓΟΥ ΚΑΙ ACTUAL ΜΕΤΡΙΚΑ ΟΡΟΣΗΜΟΥ 1

ΣΥΝΟΛΙΚΑ ΜΕΤΡΙΚΑ ΕΡΓΟΥ ΑΠΟ HIGH LEVEL DESIGN (ΣΥΝΟΛΟ ΕΡΓΟΥ)

ΜΗΚΗ BACKHAUL (Km)			ΜΗΚΗ ACCESS (Km)	
UFBB ΕΚΣΚΑΦΗ	Υποδομή ΟΤΕ	Υποδομή Rural	Υπόγειο	Εναέριο (μήκος καλωδίων)
5.300	3.500	1.650	2.850	4.650

ΜΕΤΡΙΚΑ 1^{ΟΥ} ΟΡΟΣΗΜΟΥ (ΑΝΑΛΥΤΙΚΕΣ ΜΕΛΕΤΕΣ)

ΜΗΚΗ BACKHAUL (Km)			ΜΗΚΗ ACCESS (Km)	
UFBB ΕΚΣΚΑΦΗ	Υποδομή ΟΤΕ	Υποδομή Rural	Υπόγειο	Εναέριο (μήκος καλωδίων)
779	811	187	523	1.372

Εικόνα 3-2 High Level KPIs και συνολικά τεχνικά μεγέθη του έργου UFBB (μήκη δικτύων Backhaul και Access).

(Πηγή: COSMOTE, 2023)

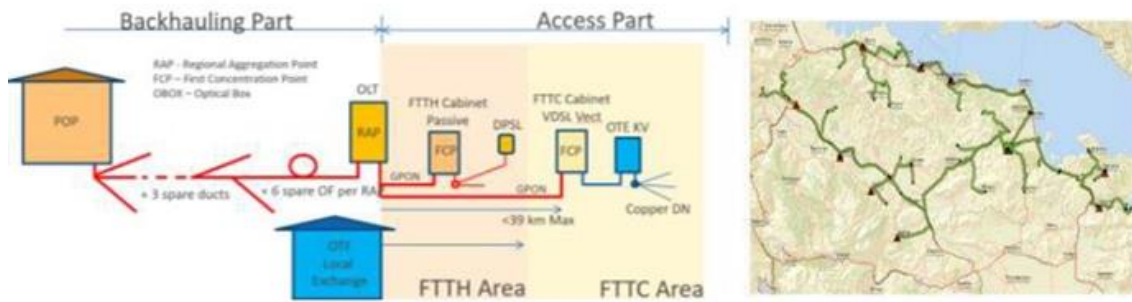
Από τον Μάρτιο του 2026 ξεκίνησε η εμπορική διάθεση υπηρεσιών οπτικής ίνας στο πλαίσιο του UFBB, με ταχύτητες έως 1 Gbps τόσο σε επίπεδο χονδρικής όσο και λιανικής. Οι πρώτες περιοχές εμπορικής διάθεσης περιλαμβάνουν τμήματα των νομών Μεσσηνίας και Ροδόπης, ενώ ακολούθησαν περιοχές των νομών Δράμας, Έβρου και Κορινθίας. Η σταδιακή ενεργοποίηση των υποδομών αποτυπώνει τη μετάβαση του έργου από τη φάση κατασκευής στη φάση λειτουργικής αξιοποίησης των δικτύων νέας γενιάς. Σύμφωνα με το Υπουργείο Ψηφιακής Διακυβέρνησης, μέχρι το τέλος του 2026 προβλέπεται η κατασκευή περισσότερων από 250.000 γραμμών, ενώ υπηρεσίες οπτικής ίνας θα είναι εμπορικά διαθέσιμες σε περίπου 150.000 νοικοκυριά και επιχειρήσεις (Υπουργείο Ψηφιακής Διακυβέρνησης, 2026).

3.3 Αρχιτεκτονική UFBB (Urban, Semi-Urban, Rural)

Η αρχιτεκτονική UFBB οργανώνεται με βάση τη γεωγραφική και πληθυσμιακή κατανομή των περιοχών παρέμβασης, ώστε η υλοποίηση των υποδομών να προσαρμόζεται στις διαφορετικές ανάγκες συνδεσιμότητας της ελληνικής επικράτειας. Το έργο διαχωρίζει το πεδίο παρέμβασης σε επιμέρους περιοχές κάλυψης και γεωγραφικές ζώνες (lots), επιτρέποντας την αποτελεσματικότερη εγκατάσταση των ευρυζωνικών υποδομών σε αστικές, ημιαστικές και αγροτικές περιοχές. Σε αυτό το πλαίσιο, το «Πεδίο Παρέμβασης» περιλαμβάνει περιοχές OCCA (Outdoor Cabinet Coverage Area) και RSCA (Remote Settlement Coverage Area). Οι περιοχές OCCA αντιστοιχούν κυρίως σε περιοχές μεγαλύτερης πληθυσμιακής συγκέντρωσης και αυξημένης τηλεπικοινωνιακής δραστηριότητας, όπου οι υποδομές οπτικών ινών μπορούν να υποστηρίξουν μεγάλο αριθμό συνδέσεων. Αντίθετα, οι περιοχές RSCA αφορούν απομακρυσμένους και αραιοκατοικημένους οικισμούς, όπου οι ανάγκες κάλυψης διαφοροποιούνται λόγω γεωγραφικών και οικονομικών περιορισμών (Υπουργείο Ψηφιακής Διακυβέρνησης, 2021).

Πέραν της γεωγραφικής διάκρισης σε περιοχές OCCA και RSCA, η αρχιτεκτονική του UFBB βασίζεται σε μία ιεραρχική δομή κόμβων και δικτύων μεταφοράς και πρόσβασης. Κεντρικό ρόλο διαδραματίζουν οι κόμβοι POP (Point of Presence), οι οποίοι αποτελούν τα βασικά σημεία συγκέντρωσης και διασύνδεσης του δικτύου. Από τους κόμβους αυτούς αναπτύσσεται το δίκτυο οπισθόζευξης (Backhaul Network), μέσω του οποίου διασυνδέονται οι ενδιάμεσοι κόμβοι RAP (Regional Aggregation Point), FCP (Fiber Concentration Point) και DPSL, εξασφαλίζοντας τη μεταφορά της κίνησης προς τα δίκτυα πρόσβασης (Εικόνα 3-3). Το δίκτυο πρόσβασης (Access Network) υλοποιείται κυρίως με τεχνολογία FTTH (Fiber to the Home), παρέχοντας δυνατότητα ταχυτήτων έως 1 Gbps μέσω οπτικών ινών που φθάνουν μέχρι τον τελικό χρήστη. Σε ορισμένες περιπτώσεις προβλέπεται και αξιοποίηση υφιστάμενων υποδομών FTTC (Fiber to the Cabinet), όπου η οπτική ίνα καταλήγει σε υπαίθρια καμπίνα και η τελική σύνδεση υλοποιείται μέσω του υφιστάμενου δικτύου χαλκού. Η συγκεκριμένη αρχιτεκτονική επιτρέπει την αποτελεσματική ανάπτυξη ευρυζωνικών υποδομών σε περιοχές με διαφορετικά γεωγραφικά και πληθυσμιακά χαρακτηριστικά, διατηρώντας παράλληλα υψηλό επίπεδο επεκτασιμότητας και αξιοπιστίας του δικτύου (COSMOTE, 2023). Παραδείγματα τεχνικής απεικόνισης δικτύου οπισθόζευξης (Backhaul) και δικτύου πρόσβασης (Access) παρουσιάζονται στο Παράρτημα Α (Εικόνες Α-1 και Α-2), όπου αποτυπώνονται οι βασικές

αρχές σχεδιασμού και γεωγραφικής ανάπτυξης των υποδομών του έργου UFBB.

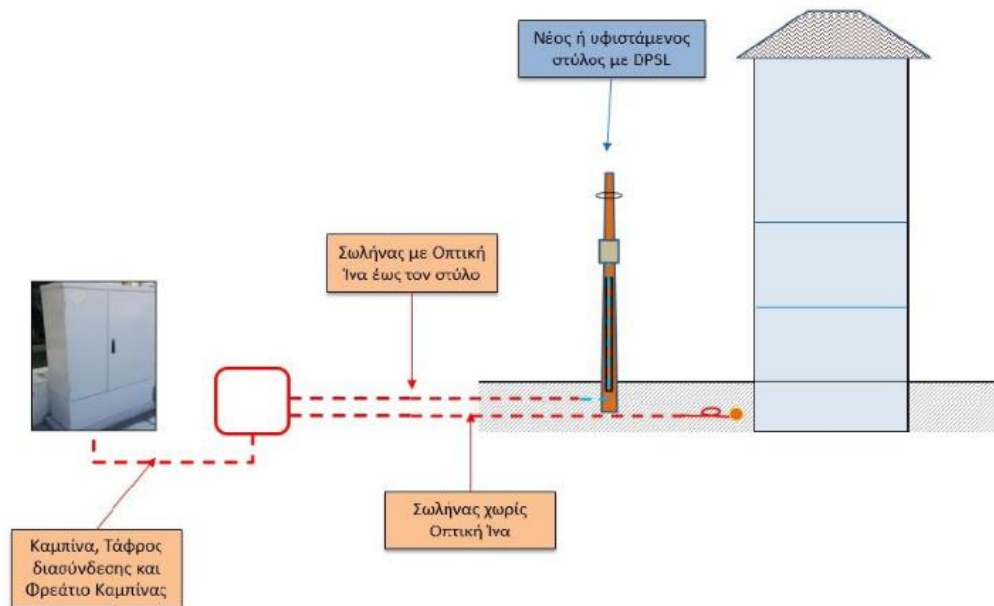


Εικόνα 3-3 Γενική αρχιτεκτονική του δικτύου UFBB με απεικόνιση των δικτύων οπισθόζευξης (Backhaul) και πρόσβασης (Access), καθώς και των βασικών κόμβων διασύνδεσης.

Πηγή: COSMOTE. (2023).

Η διαφοροποίηση της αρχιτεκτονικής του UFBB ανάλογα με τα γεωγραφικά χαρακτηριστικά των περιοχών δεν αποτελεί μόνο τεχνική επιλογή, αλλά και αποτέλεσμα τεχνοοικονομικής βελτιστοποίησης. Η ανάπτυξη ομοιόμορφων υποδομών σε ολόκληρη την ελληνική επικράτεια θα οδηγούσε σε ιδιαίτερα υψηλό κόστος κατασκευής, ιδίως στις αραιοκατοικημένες περιοχές όπου το κόστος ανά συνδρομητή είναι σημαντικά αυξημένο. Για τον λόγο αυτό, ο σχεδιασμός του έργου προσαρμόζεται στην πληθυσμιακή πυκνότητα, στις γεωμορφολογικές ιδιαιτερότητες και στην αναμενόμενη ζήτηση ευρυζωνικών υπηρεσιών, επιδιώκοντας την καλύτερη δυνατή ισορροπία μεταξύ τεχνικής απόδοσης, κόστους ανάπτυξης και γεωγραφικής κάλυψης. Η προσέγγιση αυτή αποτελεί βασικό παράγοντα της οικονομικής βιωσιμότητας του έργου και συνδέεται άμεσα με τη στρατηγική ανάπτυξης δικτύων νέας γενιάς στις περιοχές όπου η ιδιωτική επένδυση δεν είναι εμπορικά ελκυστική.

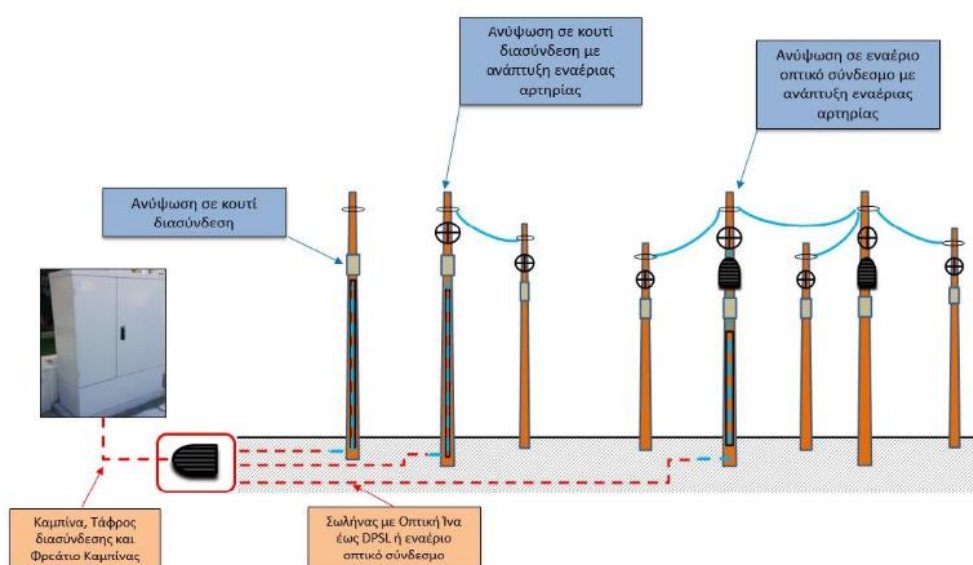
Η συγκεκριμένη αρχιτεκτονική αντανakλά ουσιαστικά τη διάκριση μεταξύ urban, semi-urban και rural περιοχών. Στις περισσότερες αστικές περιοχές, το ανάπτυγμα των δικτύων πραγματοποιείται σε περιβάλλον υψηλής πυκνότητας χρηστών και αυξημένων απαιτήσεων χωρητικότητας. Η ανάπτυξη των υποδομών βασίζεται κυρίως σε υπόγειες οδεύσεις και σε πυκνό δίκτυο καμπινών και σημείων διανομής, με στόχο την υποστήριξη μεγάλου αριθμού συνδρομητών και υπηρεσιών υψηλών απαιτήσεων (Εικόνα 3-4) (Μπούγος, 2023).



Εικόνα 3-4 Ανάπτυξη δικτύου UFBB σε αστικές περιοχές

(Πηγή: Μπούγος, 2023)

Στις ημιαστικές περιοχές επιδιώκεται η επέκταση των υποδομών νέας γενιάς σε περιοχές με περιορισμένη έως μέτρια εμπορική βιωσιμότητα. Στις περιπτώσεις αυτές εφαρμόζονται συχνά μικτές αρχιτεκτονικές ανάπτυξης, οι οποίες συνδυάζουν υπόγειες και εναέριες υποδομές, με στόχο τη βελτιστοποίηση του κόστους και της γεωγραφικής κάλυψης (Εικόνα 3-5) (Μπούγος, 2023).

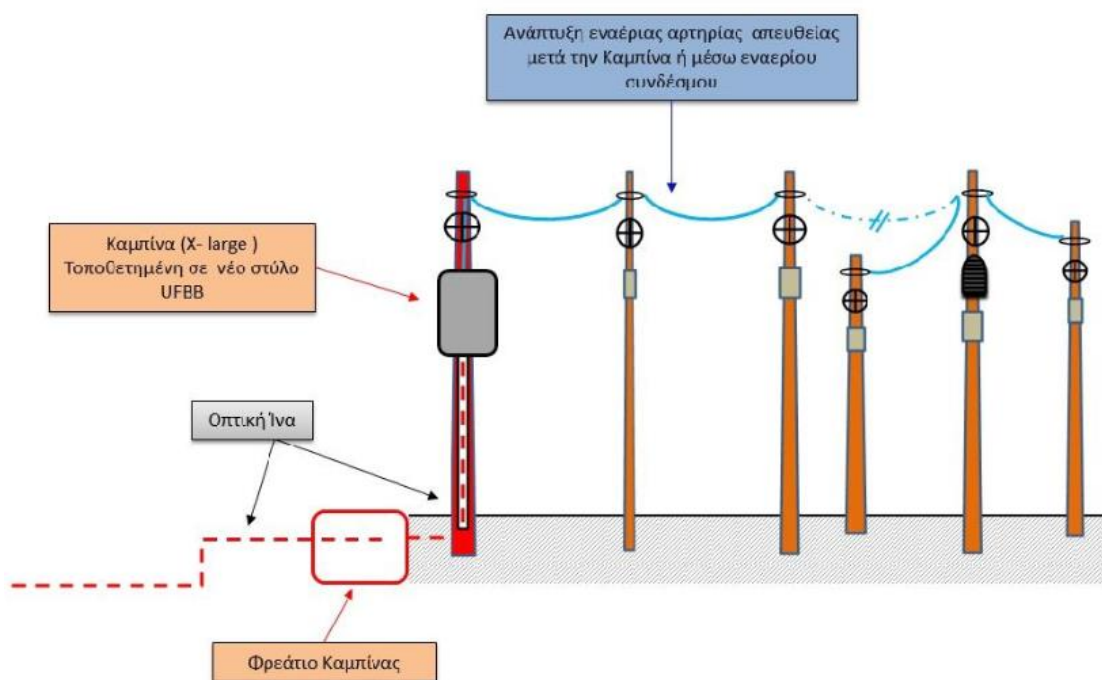


Εικόνα 3-5 Ανάπτυξη δικτύου UFBB σε ημιαστικές περιοχές

(Πηγή: Μπούγος, 2023)

Στις αγροτικές και απομακρυσμένες περιοχές προτεραιότητα δίνεται στην εξασφάλιση πρόσβασης σε υπηρεσίες υπερυψηλών ταχυτήτων και στη μείωση του ψηφιακού αποκλεισμού (Εικόνα 3-6). Η ανάπτυξη ευρυζωνικών υποδομών στις περιοχές αυτές συνδέεται άμεσα με τη μείωση του ψηφιακού χάσματος και τη βελτίωση της ποιότητας ζωής των κατοίκων, καθώς διευκολύνεται η πρόσβαση σε υπηρεσίες τηλεργασίας, τηλεϊατρικής, εκπαίδευσης και ψηφιακής επικοινωνίας. Η ενίσχυση της συνδεσιμότητας μπορεί να συμβάλει στην οικονομική ανάπτυξη των τοπικών κοινωνιών, υποστηρίζοντας την ψηφιακή λειτουργία επιχειρήσεων και την προσέλκυση νέων επενδυτικών δραστηριοτήτων. Ωστόσο, η ανάπτυξη δικτύων σε αγροτικές περιοχές συνοδεύεται από αυξημένες τεχνικές και οικονομικές προκλήσεις, όπως οι μεγάλες αποστάσεις, η χαμηλή πληθυσμιακή πυκνότητα και το υψηλό κόστος εγκατάστασης ανά συνδρομητή (Μπούγος, 2023).

Συνεπώς, η αρχιτεκτονική του UFBB αναδεικνύει ότι η ανάπτυξη δικτύων FTTH μεγάλης κλίμακας δεν μπορεί να βασιστεί σε μία ενιαία τεχνική λύση για όλες τις περιοχές. Η προσαρμογή του σχεδιασμού στις ιδιαίτερες γεωγραφικές και οικονομικές συνθήκες κάθε περιοχής αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για τη μείωση του κόστους ανάπτυξης και για τη μακροχρόνια βιωσιμότητα του έργου. Η εμπειρία αυτή μπορεί να αξιοποιηθεί ως σημείο αναφοράς για τον σχεδιασμό αντίστοιχων ευρυζωνικών έργων στο μέλλον.



Εικόνα 3-6 Ανάπτυξη δικτύου UFBB σε αγροτικές περιοχές

(Πηγή: Μπούγος, 2023)

3.4 Ρυθμιστικό Πλαίσιο (ΕΕΤΤ, Δήμοι, άδειες)

Όπως προαναφέρθηκε, το έργο UFBB λειτουργεί σύμφωνα με την αρχή της χονδρικής ανοικτής πρόσβασης, ώστε όλοι οι τηλεπικοινωνιακοί πάροχοι να μπορούν να χρησιμοποιούν τις υποδομές υπό ίσους και μη διακριτικούς όρους. Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή έθεσε ως βασική προϋπόθεση για την έγκριση της δημόσιας χρηματοδότησης τη διασφάλιση συνθηκών υγιούς ανταγωνισμού μέσω μηχανισμών εποπτείας, ρύθμισης τιμών χονδρικής, ελέγχου πρόσβασης και αποφυγής στρέβλωσης της αγοράς, υπό την εποπτεία της Εθνικής Επιτροπής Τηλεπικοινωνιών και Ταχυδρομείων (ΕΕΤΤ) (European Commission, 2019).

Το UFBB εντάσσεται σε ένα σύνθετο θεσμικό και ρυθμιστικό πλαίσιο που περιλαμβάνει την εθνική και ευρωπαϊκή νομοθεσία περί ηλεκτρονικών επικοινωνιών, δημοσίων συμβάσεων και ΣΔΙΤ. Ειδική μνεία γίνεται στον Ν. 4070/2012 σχετικά με τις ηλεκτρονικές επικοινωνίες, και στον Ν. 4727/2020 για την ψηφιακή διακυβέρνηση και την ενσωμάτωση της Οδηγίας 2018/1972 της Ευρωπαϊκής Ένωσης στο ελληνικό δίκαιο. Η ΕΕΤΤ συνδέεται άμεσα με τη λειτουργία της συγκεκριμένης παρέμβασης, καθώς οι Πάροχοι Ηλεκτρονικών Επικοινωνιών ορίζονται ως οι αδειοδοτημένοι από την ΕΕΤΤ πάροχοι υπηρεσιών ηλεκτρονικών επικοινωνιών. Συγχρόνως, η υλοποίηση πραγματοποιείται μέσω διαδικασιών δημοσίων συμβάσεων και ηλεκτρονικών διαγωνισμών μέσω του ΕΣΗΔΗΣ, ενώ συμπεριλαμβάνει πλήθος διοικητικών εγκρίσεων, ελέγχων και εποπτικών διαδικασιών. Η πολυπλοκότητα της αδειοδοτικής και διοικητικής διαδικασίας αποτυπώνεται στον μεγάλο αριθμό νομοθετικών και κανονιστικών πράξεων που αναφέρονται στο τεύχος του διαγωνισμού (Υπουργείο Ψηφιακής Διακυβέρνησης, 2023).

Η ΕΕΤΤ διαδραματίζει πρωταγωνιστικό ρυθμιστικό ρόλο και είναι υπεύθυνη για τον έλεγχο και την εποπτεία των υποχρεώσεων χονδρικής πρόσβασης, της τιμολόγησης, της διαφάνειας και της μη διακριτικής μεταχείρισης των παρόχων που αναπτύσσουν δίκτυα με δημόσια συγχρηματοδότηση. Επιπροσθέτως, εγκρίνει την Προσφορά Αναφοράς των παρόχων και ελέγχει τη συμμόρφωσή τους με τις ρυθμιστικές και συμβατικές υποχρεώσεις (ΕΕΤΤ, 2025). Σε σχετικές εκθέσεις και παρεμβάσεις της ΕΕΤΤ επισημαίνεται ότι οι διαδικασίες αδειοδότησης και ο συντονισμός μεταξύ των εμπλεκόμενων φορέων εξακολουθούν να αποτελούν κρίσιμους παράγοντες που επηρεάζουν τον χρόνο ανάπτυξης

των δικτύων νέας γενιάς, γεγονός που αναδεικνύει τη σημασία της συνεχούς βελτίωσης του θεσμικού πλαισίου.

Κύριος του έργου είναι η Γενική Γραμματεία Τηλεπικοινωνιών και Ταχυδρομείων του Υπουργείου Ψηφιακής Διακυβέρνησης, ενώ αναθέτουσα αρχή αποτελεί η Ειδική Υπηρεσία Διαχείρισης του Προγράμματος «Ψηφιακός Μετασχηματισμός». Η θεσμική αυτή δομή αντικατοπτρίζει τη θέση του κράτους στον σχεδιασμό, την εποπτεία και τον συντονισμό της ανάπτυξης ευρυζωνικών υποδομών νέας γενιάς (Υπουργείο Ψηφιακής Διακυβέρνησης, 2023).²

Παρότι το θεσμικό και ρυθμιστικό πλαίσιο που διέπει την ανάπτυξη δικτύων FTTH στην Ελλάδα έχει εξελιχθεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια, η πρακτική εφαρμογή του εξακολουθεί να παρουσιάζει προκλήσεις. Η εμπλοκή πολλών δημόσιων φορέων στις διαδικασίες αδειοδότησης, οι διαφορετικές απαιτήσεις των τοπικών αρχών και οι χρονοβόρες εγκρίσεις για εργασίες εκσκαφής μπορούν να οδηγήσουν σε σημαντικές καθυστερήσεις κατά την υλοποίηση έργων μεγάλης κλίμακας, όπως το UFBB. Οι καθυστερήσεις αυτές δεν επηρεάζουν μόνο το χρονοδιάγραμμα του έργου, αλλά συνεπάγονται και αύξηση του κόστους κατασκευής, δυσχέρειες στον προγραμματισμό των συνεργείων και μεταβολές στον οικονομικό προγραμματισμό των αναδόχων. Κατά συνέπεια, η αποτελεσματική λειτουργία του ρυθμιστικού πλαισίου αποτελεί βασική παράμετρο επιτυχίας αντίστοιχων έργων ευρυζωνικών υποδομών.

Η εμπειρία από το έργο UFBB αναδεικνύει ότι η επιτυχία ενός μεγάλου έργου ανάπτυξης υποδομών δεν εξαρτάται αποκλειστικά από την επιλογή της κατάλληλης τεχνολογίας ή από τη διαθεσιμότητα χρηματοδότησης, αλλά και από την αποτελεσματικότητα της διοικητικής υποστήριξης και του θεσμικού συντονισμού. Η απλοποίηση των διαδικασιών αδειοδότησης, η ενίσχυση της συνεργασίας μεταξύ των εμπλεκόμενων φορέων και η ευρύτερη αξιοποίηση ψηφιακών εργαλείων διαχείρισης μπορούν να συμβάλουν ουσιαστικά στη μείωση των καθυστερήσεων και στη βελτίωση της αποδοτικότητας μελλοντικών έργων FTTH. Οι παράγοντες αυτοί αποκτούν ιδιαίτερη σημασία κατά την τεχνοοικονομική αξιολόγηση έργων FTTH, καθώς οι διοικητικές καθυστερήσεις επηρεάζουν άμεσα τόσο το κόστος ανάπτυξης (CAPEX) όσο και τον συνολικό χρόνο απόσβεσης της επένδυσης.

3.5 Ευρωπαϊκές πολιτικές VHCN

Το UFBB ευθυγραμμίζεται πλήρως με τις ευρωπαϊκές πολιτικές για την δημιουργία Δικτύων VHCN και εκπληρώνει τους στόχους της Ευρωπαϊκής Ψηφιακής Ατζέντας, της Gigabit Society και της στρατηγικής “Ψηφιακή Δεκαετία 2030”. Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή έχει θέσει ως πρωτεύων στόχο τη διαθεσιμότητα ευρυζωνικών συνδέσεων τουλάχιστον 100 Mbps, αναβαθμίσιμων σε 1 Gbps για τα νοικοκυριά, καθώς και Gigabit συνδεσιμότητα για βασικούς κοινωνικοοικονομικούς φορείς και επιχειρήσεις (European Commission, 2019).

Η έγκριση του «Εθνικού Σχεδίου Ευρυζωνικής Πρόσβασης Επόμενης Γενιάς» από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή επιβεβαιώνει ότι το UFBB συγκαταλέγεται στις στρατηγικές προτεραιότητες της Ευρωπαϊκής Ένωσης για την ενίσχυση των δικτύων νέας γενιάς. Επιπλέον, το ρυθμιστικό πλαίσιο βασίζεται στην ενσωμάτωση ευρωπαϊκών οδηγιών που αφορούν τις δημόσιες συμβάσεις, τις συμβάσεις παραχώρησης και τις ηλεκτρονικές επικοινωνίες. Ειδική αναφορά γίνεται στις Οδηγίες 2014/23/ΕΕ, 2014/24/ΕΕ, 2014/25/ΕΕ και 2018/1972/ΕΕ, οι οποίες αποτελούν το θεσμικό υπόβαθρο για τον εκσυγχρονισμό των τηλεπικοινωνιακών υποδομών στην Ευρωπαϊκή Ένωση. Η ευρωπαϊκή διάσταση του έργου ανακύπτει επίσης μέσω της συμμετοχής χρηματοδοτικών μηχανισμών που συνδέονται με το ΕΣΠΑ και τις αναπτυξιακές παρεμβάσεις της προγραμματικής περιόδου 2014–2020 (Υπουργείο Ψηφιακής Διακυβέρνησης, 2021).

Το UFBB ενσαρκώνεται επίσης βάσει των κατευθυντηρίων γραμμών της Ευρωπαϊκής Επιτροπής για τις κρατικές ενισχύσεις στον τομέα των ευρυζωνικών δικτύων. Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή το ενέκρινε μέσω της απόφασης SA.53135(2019/N) με τίτλο “Ultrafast Broadband Infrastructure Scheme”, αναγνωρίζοντας τη συμβατότητά του με το ευρωπαϊκό δίκαιο κρατικών ενισχύσεων. Υπό αυτό το πρίσμα, εφαρμόζονται μηχανισμοί Virtual Local Unbundling (VLU) και δημοσιεύονται εγκεκριμένες Προσφορές Αναφοράς για τις παρεχόμενες υπηρεσίες χονδρικής (EETT, 2025).

Σύμφωνα με τον Όμιλο ΟΤΕ, το UFBB εντάσσεται στη στρατηγική επέκτασης δικτύων NGA σε ολόκληρη την ελληνική επικράτεια. Η διαμόρφωση των υποδομών αποβλέπει στην παροχή υπερυψηλής και αξιόπιστης συνδεσιμότητας και στην επιτάχυνση της μετάβασης νοικοκυριών και επιχειρήσεων σε δίκτυα οπτικών ινών (ΟΤΕ Α.Ε., 2025). Η ευθυγράμμιση του UFBB με τις ευρωπαϊκές στρατηγικές για τα Δίκτυα Πολύ Υψηλής Χωρητικότητας (VHCN) αναδεικνύει ότι το έργο δεν αποτελεί μία μεμονωμένη εθνική πρωτοβουλία, αλλά

εντάσσεται σε ένα ευρύτερο πλαίσιο ψηφιακού μετασχηματισμού της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Η συμμόρφωση με τις ευρωπαϊκές κατευθυντήριες γραμμές διασφαλίζει όχι μόνο τη δυνατότητα χρηματοδότησης του έργου, αλλά και την εφαρμογή κοινών κανόνων που προάγουν τον ανταγωνισμό, τη διαφάνεια και τη βιώσιμη ανάπτυξη των ευρυζωνικών υποδομών. Ως εκ τούτου, το UFBB μπορεί να θεωρηθεί χαρακτηριστικό παράδειγμα υλοποίησης των ευρωπαϊκών πολιτικών στον τομέα των ηλεκτρονικών επικοινωνιών, συνδυάζοντας τεχνική καινοτομία, δημόσια χρηματοδότηση και ρυθμιστική εποπτεία.

3.6 Στρατηγική σημασία για την Ελλάδα

Η στρατηγική σημασία του έργου UFBB για την Ελλάδα συσχετίζεται άμεσα με τον ψηφιακό μετασχηματισμό της χώρας και την ενίσχυση της συνδεσιμότητας. Μέσω της κατασκευής εκτεταμένων υποδομών οπτικών ινών, συνδράμει στη μείωση του ψηφιακού χάσματος μεταξύ αστικών και περιφερειακών περιοχών, ενισχύει την περιφερειακή ανάπτυξη και δημιουργεί τις απαραίτητες προϋποθέσεις για την επέκταση ψηφιακών υπηρεσιών, επιχειρηματικότητας και καινοτομίας. Η δημιουργία δικτύων πολύ υψηλής χωρητικότητας θεωρείται βασική συνιστώσα για την επίτευξη των στόχων της ευρωπαϊκής πολιτικής «Ψηφιακή Δεκαετία 2030» και για την ενίσχυση της ανταγωνιστικότητας της ελληνικής οικονομίας (Υπουργείο Ψηφιακής Διακυβέρνησης, 2025). Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή αναγνωρίζει ότι οι ευρυζωνικές υποδομές νέας γενιάς αποτελούν βασικό παράγοντα οικονομικής ευημερίας, καινοτομίας και πρόσβασης των πολιτών σε ψηφιακές υπηρεσίες (European Commission, 2019).

Το UFBB χαρακτηρίζεται ως μία από τις εμβληματικότερες παρεμβάσεις ψηφιακών υποδομών στην Ελλάδα και ως ένας από τους βασικούς άξονες του Εθνικού Σχεδίου Ευρυζωνικής Πρόσβασης Επόμενης Γενιάς. Η ένταξή του στο ευρωπαϊκό πλαίσιο δικτύων VHCN και η έγκρισή του από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή αναδεικνύουν την συνεισφορά του σε εθνικό και ευρωπαϊκό επίπεδο (Υπουργείο Ψηφιακής Διακυβέρνησης, 2021).

Η σημαντικότητα του UFBB υπερβαίνει την απλή εξάπλωση τηλεπικοινωνιακών υποδομών. Η διαμόρφωση αξιόπιστων ευρυζωνικών δικτύων δημιουργεί συνθήκες ενίσχυσης της επιχειρηματικότητας, προσέλκυσης επενδύσεων και παραγωγή ψηφιακών υπηρεσιών και εφαρμογών. Διευκολύνει την εξ αποστάσεως εργασία, την τηλεεκπαίδευση, τις υπηρεσίες ηλεκτρονικής διακυβέρνησης και την πρόσβαση σε ψηφιακές υπηρεσίες

υγείας, βελτιώνοντας συνολικά την ποιότητα ζωής των πολιτών (Υπουργείο Ψηφιακής Διακυβέρνησης, 2023).

Η εξέχουσα σημασία του UFBB αντανακλάται επίσης στη μεγάλη γεωγραφική του έκταση και στη συμμετοχή κορυφαίων τηλεπικοινωνιακών και κατασκευαστικών φορέων. Η οργάνωσή του σε γεωγραφικές ζώνες επέτρεψε την δημιουργία υποδομών σε μεγάλο μέρος της ελληνικής επικράτειας, ενισχύοντας την εδαφική συνοχή και την ισότιμη πρόσβαση σε υπηρεσίες υπερυψηλών ταχυτήτων. Μετά την ολοκλήρωση της εξαγοράς της TERNΑ FIBER, ο Όμιλος ΟΤΕ ανέλαβε το σύνολο της υλοποίησης, το οποίο προβλέπεται να καλύψει περίπου 860.000 γραμμές σε ολόκληρη τη χώρα (ΟΤΕ Α.Ε., 2025).

Από το 2025 ξεκίνησε σταδιακά η εμπορική λειτουργία των δικτύων UFBB, επιτρέποντας τη διάθεση υπηρεσιών οπτικής ίνας σε περιοχές που μέχρι πρότινος δεν διέθεταν πρόσβαση σε υποδομές υπερυψηλών ταχυτήτων. Η εξέλιξη αυτή έχει ήδη αρχίσει να επηρεάζει θετικά τη θέση της Ελλάδας στις διεθνείς κατατάξεις ευρυζωνικών επιδόσεων. Σύμφωνα με στοιχεία που παρουσιάστηκαν το 2026, η Ελλάδα βελτίωσε κατά 24 θέσεις τη θέση της στην παγκόσμια κατάταξη ταχυτήτων σταθερής ευρυζωνικής σύνδεσης της Ookla, ενώ η διάμεση ταχύτητα λήψης σταθερού διαδικτύου ανήλθε στα 92,79 Mbps. Η βελτίωση αυτή συνάδει με τη σταδιακή ενεργοποίηση των νέων δικτύων οπτικών ινών και καταδεικνύει τη συμβολή του UFBB στην ενίσχυση της ψηφιακής ανταγωνιστικότητας της χώρας (ΣΔΙΤ Forum Initiative, 2026).

Παρά τις τεχνικές, διοικητικές και χρηματοοικονομικές προκλήσεις που αντιμετώπισε κατά τα αρχικά του στάδια, το UFBB εξελίσσεται σε έργο-κλειδί για τη μελλοντική ψηφιακή ανάπτυξη της Ελλάδας. Η σταδιακή ολοκλήρωση και εμπορική αξιοποίηση των υποδομών του αναμένεται να διαδραματίσει καθοριστικό ρόλο στην επίτευξη των στόχων της «Ψηφιακής Δεκαετίας 2030» και στη μετάβαση της χώρας σε ένα σύγχρονο ψηφιακό περιβάλλον υψηλής συνδεσιμότητας. Η μελέτη του έργου UFBB καταδεικνύει ότι η επιτυχής ανάπτυξη δικτύων FTTH μεγάλης κλίμακας δεν εξαρτάται αποκλειστικά από την επιλογή της κατάλληλης τεχνολογίας ή από τη διαθεσιμότητα χρηματοδοτικών πόρων. Αντίθετα, προϋποθέτει τον συνδυασμό αποτελεσματικού στρατηγικού σχεδιασμού, κατάλληλου θεσμικού πλαισίου, αποδοτικής διαχείρισης έργου και συνεχούς συνεργασίας μεταξύ δημόσιου και ιδιωτικού τομέα. Υπό αυτή την έννοια, το UFBB αποτελεί μια ιδιαίτερα χρήσιμη μελέτη περίπτωσης, από την οποία μπορούν να εξαχθούν πολύτιμα

συμπεράσματα για τον σχεδιασμό και την υλοποίηση μελλοντικών έργων ευρυζωνικών υποδομών στην Ελλάδα και σε άλλες ευρωπαϊκές χώρες.

4. Μεθοδολογία Μελέτης και Κατασκευής FTTH

Η μελέτη και η κατασκευή δικτύων FTTH πραγματοποιούνται μέσω διαδοχικών φάσεων, οι οποίες οδηγούν σταδιακά από τον αρχικό στρατηγικό προγραμματισμό έως την παραγωγή του τελικού σχεδίου κατασκευής. Η μεθοδολογία αυτή οργανώνεται σε τρία επίπεδα: α) τον στρατηγικό σχεδιασμό, β) τον σχεδιασμό υψηλού επιπέδου και γ) τον λεπτομερή σχεδιασμό του δικτύου (Segarra et al., 2012).

Η πρώτη φάση είναι ο στρατηγικός σχεδιασμός, όπου λαμβάνονται οι επιχειρησιακές και τεχνολογικές αποφάσεις για την ανάπτυξη του δικτύου. Εξετάζεται η σκοπιμότητα της επένδυσης, η γεωγραφική έκταση της κάλυψης, η σειρά ανάπτυξης των επιμέρους περιοχών και οι τεχνολογικές επιλογές. Η ανάλυση δεν περιορίζεται στο κόστος κατασκευής, αλλά εμπεριέχει και τις δαπάνες ενεργοποίησης των συνδρομητών, τη μελλοντική συντήρηση και τα αναμενόμενα έσοδα από την παροχή των υπηρεσιών. Η αξιοποίηση πραγματικών τοπικών δεδομένων διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο. Περιοχές με παρόμοια πληθυσμιακή πυκνότητα μπορεί να παρουσιάζουν αξιοσημείωτες διαφορές ως προς το κόστος ανάπτυξης, λόγω της μορφολογίας του οικιστικού ιστού, της ύπαρξης πολυκατοικιών, των διαθέσιμων υποδομών και των γεωγραφικών περιορισμών. Για τον λόγο αυτό, η χρήση γενικών εκτιμήσεων ή απλών συγκρίσεων μπορεί να οδηγήσει σε εσφαλμένες αποφάσεις. Στη φάση αυτή καθορίζεται επίσης η σειρά ανάπτυξης των περιοχών του δικτύου. Σε έργα μεγάλης κλίμακας, τα οποία υλοποιούνται σε βάθος χρόνου, η σωστή ιεράρχηση των περιοχών μπορεί να επηρεάσει την οικονομική βιωσιμότητα του έργου. Περιοχές με υψηλότερη πιθανότητα ζήτησης ή ευκολότερη ανάπτυξη μπορούν να προηγηθούν, ώστε να επιτευχθεί ταχύτερη ενεργοποίηση συνδρομητών και βελτίωση της επενδυτικής απόδοσης (FTTH Council Europe, 2016).

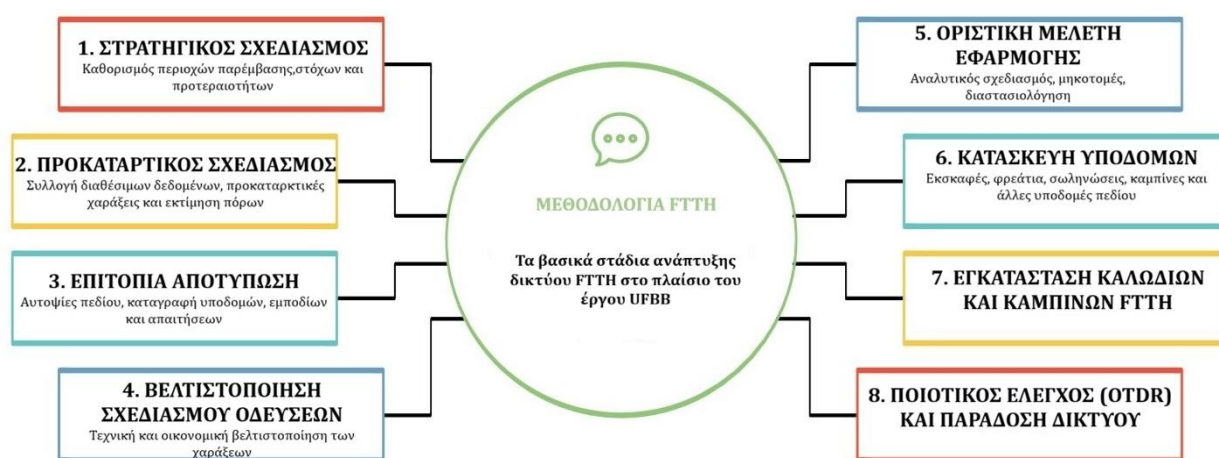
Το επόμενο επίπεδο αφορά τον σχεδιασμό υψηλού επιπέδου κατά τον οποίο διαμορφώνεται η βασική δομή του δικτύου σε συγκεκριμένες γεωγραφικές περιοχές. Προσδιορίζονται οι θέσεις των σημείων παρουσίας (Points of Presence – POPs), των σημείων συγκέντρωσης οπτικών ινών (Fibre Concentration Points – FCPs) και οι οδεύσεις καλωδίων και

σωληνώσεων. Συγχρόνως, εκτιμώνται οι απαιτούμενες ποσότητες υλικών, όπως καλώδια, αγωγοί, διαχωριστές (splitters), closures και εξοπλισμός πεδίου. Η επιλογή των θέσεων των POPs και FCPs αποτελεί καθοριστικό στοιχείο της αρχιτεκτονικής του δικτύου. Τα μεγαλύτερα POPs μπορούν να προσφέρουν οικονομίες κλίμακας σε επίπεδο ενέργειας, συντήρησης και συγκέντρωσης κίνησης, αλλά αυξάνουν τα μήκη και τη δαπάνη των feeder καλωδίων. Η χωροθέτηση των FCPs επηρεάζει τη διανομή των ινών, τη δομή των καμπινών και την οικονομική επιβάρυνση των οδεύσεων προς τους τελικούς χρήστες. Δεδομένου ότι η θεωρητικά βέλτιστη θέση δεν είναι πάντα πρακτικά εφαρμόσιμη, η μελέτη θα πρέπει να προσαρμόζεται στις συνθήκες του πεδίου. Σημαντικό μέρος του συγκεκριμένου βήματος αφορά τη χάραξη του δικτύου. Η επιλογή των διαδρομών μεταξύ POPs, FCPs και συνδρομητών επιδρά άμεσα στην οικονομική αποδοτικότητα, καθώς οι εκσκαφές και η εγκατάσταση σωληνώσεων συγκαταλέγονται στις πιο δαπανηρές εργασίες ενός έργου FTTH. Ως εκ τούτου, εξετάζεται η αξιοποίηση υφιστάμενων υποδομών, όπως κενές σωληνώσεις, διαθέσιμα δίκτυα ή εναέριες εγκαταστάσεις. Σε αρκετές περιπτώσεις εφαρμόζονται μικτές λύσεις, οι οποίες συνδυάζουν υπάρχοντες αγωγούς και εναέρια τμήματα (FTTH Council Europe, 2016).

Η τρίτη φάση αναφέρεται στον λεπτομερή σχεδιασμό, όπου τα αποτελέσματα του προηγούμενου επιπέδου μετατρέπονται σε πλήρη σχέδια κατασκευής (to-build plans). Τα σχέδια πρέπει να είναι αρκετά ακριβή ώστε να υποστηρίζουν την έκδοση αδειών, την παραγωγή οδηγιών εργασίας και την κατασκευή από τα τεχνικά συνεργεία. Αυτό το στάδιο περιλαμβάνει την ενδελεχή αποτύπωση των οδεύσεων, των συνδέσεων, των καλωδίων, των σωληνώσεων και των σημείων διακλάδωσης. Περιέχει επίσης splicing plans, labelling schemes, πληροφορίες για microducts και τεκμηρίωση των POPs, ODFs και optical splitters. Με τον τρόπο αυτό, το αρχικό τεχνικό σχέδιο μετατρέπεται σε εφαρμόσιμο κατασκευαστικό πλάνο (FTTH Council Europe, 2016).

Οι τρεις φάσεις δεν λειτουργούν απομονωμένα, αλλά αλληλεπιδρούν. Συχνά, όταν προκύπτουν νέα δεδομένα, απαιτείται αναθεώρηση προηγούμενων αποφάσεων. Η αξιοποίηση εξειδικευμένων εργαλείων σχεδίασης και Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριακών (ΣΓΠ) καταδεικνύεται ιδιαίτερα χρήσιμη. Τα εργαλεία αυτά επιτρέπουν την επαναχρησιμοποίηση δεδομένων, τη μοντελοποίηση διαφορετικών σεναρίων, τη βελτιστοποίηση της τοπολογίας και τη μείωση του συνολικού κόστους ανάπτυξης. Η ακρίβεια των παραγόμενων σχεδίων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ποιότητα των

γεωαναφερόμενων δεδομένων. Στοιχεία όπως η θέση των κτιρίων, οι διευθύνσεις, οι οδικοί άξονες και τα σημεία ζήτησης αποτελούν κρίσιμες εισροές για την παραγωγή αξιόπιστων σχεδίων. Μέσω αυτών των δεδομένων καθίσταται δυνατός ο καθορισμός κατάλληλων οδεύσεων, η σωστή χωροθέτηση καμπινών και η εκτίμηση των απαιτούμενων υλικών. Η μεθοδολογία μελέτης και κατασκευής FTTH συνδράμει στη σταδιακή ωρίμανση του έργου, από τη στρατηγική απόφαση επένδυσης έως την τελική κατασκευή. Η οργανωμένη αυτή προσέγγιση συμβάλλει στη δημιουργία δικτύων με τεχνική αξιοπιστία, δυνατότητα μελλοντικής επέκτασης και βέλτιστη σχέση κόστους και απόδοσης (FTTH Council Europe, 2016).



Εικόνα 4.1 Διαδικασία ανάπτυξης δικτύου FTTH στο πλαίσιο του έργου UFBB

Η Εικόνα 4.1 παρουσιάζει συνοπτικά τη μεθοδολογία ανάπτυξης δικτύου FTTH που ακολουθείται στο πλαίσιο του έργου UFBB. Η διαδικασία αποτελείται από διαδοχικά και αλληλεξαρτώμενα στάδια, τα οποία ξεκινούν από τον στρατηγικό σχεδιασμό και ολοκληρώνονται με τον ποιοτικό έλεγχο και την παράδοση του δικτύου. Κάθε στάδιο παρέχει τις απαραίτητες πληροφορίες και παραδοτέα για την επιτυχή υλοποίηση του επόμενου σταδίου.

4.1 Site survey

Το site survey αποτελεί ίσως το πιο βασικό στάδιο στη μελέτη και κατασκευή δικτύων FTTH, δεδομένου ότι επηρεάζει άμεσα την ακρίβεια του σχεδιασμού, την τεχνική εφικτότητα και το συνολικό κόστος υλοποίησης του έργου. Η ανάπτυξη δικτύων πρόσβασης οπτικών ινών απαιτεί ισχυρές επενδύσεις, λόγω των εργασιών πολιτικού μηχανικού, της εγκατάστασης σωληνώσεων και της διέλευσης καλωδίων. Επομένως, είναι

απαραίτητη η ακριβής αποτύπωση των συνθηκών πεδίου για τον περιορισμό τεχνικών αστοχιών και επενδυτικών κινδύνων (FTTH Council Europe, 2016).

Η φάση της διερεύνησης περιλαμβάνει τη συλλογή, αξιολόγηση και επιβεβαίωση γεωγραφικών και τεχνικών δεδομένων της περιοχής ανάπτυξης του δικτύου. Τα στοιχεία αυτά αφορούν, μεταξύ άλλων, τη θέση των κτιρίων, τις διευθύνσεις, τον αριθμό κατοικιών ή επιχειρήσεων ανά κτίριο, την κατάσταση του οδικού δικτύου, τις διαθέσιμες διαδρομές διέλευσης και την ύπαρξη διαθέσιμων δικτύων και εγκαταστάσεων (Εικόνα 4-1).



Εικόνα 4.2 Διαδικασία επιτόπιας αποτύπωσης (site survey) για ανάπτυξη δικτύου FTTH

(Πηγή: Μπούγος, 2023)

Σύμφωνα με τους Segarra et al. (2012), ο ποιοτικός σχεδιασμός FTTH απαιτεί ακριβή πληροφοριακά δεδομένα σχετικά με τη γεωγραφία, τις υφιστάμενες υποδομές, τη χωρική κατανομή του πληθυσμού και τα διαθέσιμα δίκτυα, τα οποία υποστηρίζονται από συστήματα ΣΓΠ και γεωχωρικές βάσεις. Αυτές οι πληροφορίες αξιοποιούνται για την καταγραφή των σημείων ζήτησης, όπως κατοικίες, πολυκατοικίες, επιχειρήσεις ή άλλα σημεία που απαιτούν σύνδεση οπτικών ινών. Συγχρόνως, καταγράφονται οι πιθανές οδεύσεις του δικτύου, οι αγωγοί, τα φρεάτια και τα δίκτυα κοινής ωφέλειας που ενδέχεται να επηρεάσουν την κατασκευή (Segarra et al., 2012; Vargas-Bustamante et al., 2025).

Στο αρχικό στάδιο μπορεί να πραγματοποιηθεί προκαταρκτικός έλεγχος της περιοχής μέσω ψηφιακών χαρτογραφικών εργαλείων και Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών. Με τη βοήθειά τους καθίσταται δυνατή η χαρτογραφική αποτύπωση και η διαχείριση πολυεπίπεδων πληροφοριών δικτύου, όπως αγωγοί, φρεάτια, στύλοι, ενεργός εξοπλισμός

και στοιχεία συνδρομητών (Segarra et al., 2012). Έτσι είναι εφικτή η αρχική αξιολόγηση της μορφολογίας των δρόμων, της κατάστασης του οδοστρώματος, της ύπαρξης εμποδίων, της θέσης των κτιρίων και των πιθανών σημείων εγκατάστασης του δικτύου. Ωστόσο, σε περιπτώσεις που τα ψηφιακά δεδομένα δεν είναι πάντοτε επικαιροποιημένα, συχνά απαιτείται επιτόπια αυτοψία (FTTH Council Europe, 2016). Σε πρακτικές αναπτύξεις FTTH χρησιμοποιούνται συχνά προηγμένα συστήματα γεωπληροφορικής, όπως ΣΓΠ, Google Earth και λογισμικά CAD, για την προκαταρκτική χαρτογράφηση των οδεύσεων, των σημείων εγκατάστασης εξοπλισμού και των περιοχών εξυπηρέτησης συνδρομητών πριν από την αυτοψία πεδίου (Valentino et al., 2024; Putra et al., 2024).

Η επιτόπια αυτοψία χρησιμοποιείται για την επαλήθευση των διαθέσιμων στοιχείων και τον εντοπισμό τεχνικών περιορισμών που δεν είναι δυνατόν να αποτυπωθούν με ακρίβεια μέσω ψηφιακών εργαλείων. Κατά τη διάρκειά της εξετάζονται η κατάσταση των υποδομών, η διαθεσιμότητα υπόγειων ή εναέριων διαδρομών, οι περιορισμοί διέλευσης, οι τοπικές κυκλοφοριακές συνθήκες, τα πολεοδομικά εμπόδια και οι πιθανές δυσκολίες εκσκαφής. Η διαδικασία διαφοροποιείται ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της περιοχής. Σε αστικά περιβάλλοντα, οι σημαντικότερες προκλήσεις έγκεινται στην περιορισμένη διαθεσιμότητα χώρου, τη δυσκολία χωροθέτησης καμπινών, την αυξημένη παρουσία υπόγειων δικτύων και την ανάγκη περιορισμού της όχλησης. Σε αγροτικές ή αραιοκατοικημένες περιοχές, μεγαλύτερη σημασία αποκτούν οι αποστάσεις μεταξύ των σημείων εξυπηρέτησης, η επιλογή οικονομικών οδεύσεων και η αξιοποίηση εναέριων ή διαθέσιμων δικτύων (FTTH Council Europe, 2016).

Η δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης υφιστάμενων εγκαταστάσεων αναγνωρίζεται ως βασική συνιστώσα για τη μείωση του κόστους ανάπτυξης δικτύων FTTH. Αγωγοί, φρεάτια, στύλοι ή άλλα δίκτυα κοινής ωφέλειας μπορούν να περιορίσουν την ανάγκη νέων εκσκαφών και να επιταχύνουν τις εργασίες κατασκευής. Όταν δεν υπάρχουν κατάλληλες υποδομές, απαιτούνται νέες εργασίες πολιτικού μηχανικού, το οποίο συνεπάγεται αύξηση του κόστους και του χρόνου υλοποίησης. Η μελέτη πεδίου δεν περιορίζεται στην αποτύπωση της υπάρχουσας κατάστασης αλλά περιλαμβάνει και την αξιολόγηση της δυνατότητας ομαδοποίησης των συνδρομητών σε κατάλληλες περιοχές εξυπηρέτησης. Κατά το αρχικό στάδιο της επιτόπιας διερεύνησης πραγματοποιείται συλλογή γεωγραφικών και δημογραφικών δεδομένων, εντοπισμός πιθανών θέσεων εγκατάστασης Fibre

Distribution Hubs (FDHs) και αξιολόγηση περιβαλλοντικών και πολεοδομικών περιορισμών (Abdullah et al., 2025).

Σύμφωνα με τους Yuhani et al. (2025), στο στάδιο του site survey πραγματοποιείται ανάλυση της λειτουργικής δομής του κτιρίου, καταγραφή των IP συσκευών και εκτίμηση των απαιτήσεων bandwidth ανά ζώνη εξυπηρέτησης. Πραγματοποιούνται μετρήσεις αποστάσεων μεταξύ των επιμέρους ζωνών και λαμβάνεται επιπλέον μήκος καλωδίωσης ως περιθώριο εγκατάστασης και όδευσης. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν αξιοποιούνται στη φάση του λεπτομερούς σχεδιασμού, όπου το δίκτυο μετατρέπεται σε “to-build” σχέδιο κατασκευής. Η ακρίβεια των στοιχείων πεδίου διευκολύνει την παραγωγή αξιόπιστων σχεδίων οδεύσεων, την έκδοση αδειών, την προετοιμασία οδηγιών εργασίας και την αποφυγή συγκρούσεων με υφιστάμενες υποδομές (FTTH Council Europe, 2016).

4.2 Ομαδοποίηση καμπινών

Η ομαδοποίηση των καμπινών επηρεάζει άμεσα την τοπολογία του δικτύου, το μήκος των οδεύσεων, τη χωρητικότητα του δικτύου και το συνολικό κόστος ανάπτυξης. Σχετίζεται με τον καθορισμό των περιοχών εξυπηρέτησης κάθε καμπίνας ή σημείου συγκέντρωσης οπτικών ινών (Fibre Concentration Point – FCP), όπως και με την κατανομή των συνδρομητών στο δίκτυο πρόσβασης (FTTH Council Europe, 2016). Πραγματοποιείται με βάση τον αριθμό των αναμονών και τη χωρητικότητα εξυπηρέτησης κάθε καμπίνας. Στην πράξη χρησιμοποιούνται καμπίνες διαφορετικής χωρητικότητας, ενώ προβλέπεται η διατήρηση εφεδρειών, ώστε το δίκτυο να μπορεί να υποστηρίξει μελλοντικές επεκτάσεις και αυξημένες ανάγκες συνδεσιμότητας. Για την ορθολογική διαχείριση των δεδομένων και των οδεύσεων αξιοποιούνται εργαλεία σχεδίασης όπως το AutoCAD (Μπούγος, 2023).

Η χωροθέτηση και η διάρθρωση των καμπινών βασίζονται στη γεωγραφική κατανομή των κτιρίων, στην πυκνότητα των συνδρομητών, στις διαθέσιμες υποδομές και στις τεχνικές απαιτήσεις του δικτύου. Σε περιοχές υψηλής πληθυσμιακής πυκνότητας είναι δυνατή η συγκέντρωση μεγαλύτερου αριθμού συνδρομητών σε κοινά σημεία συγκέντρωσης. Αυτό επιφέρει μείωση του αριθμού των απαιτούμενων καμπινών και την καλύτερη αξιοποίηση του εξοπλισμού και των διαθέσιμων πόρων. Η ύπαρξη πολυκατοικιών και μεγάλων κτιριακών συγκροτημάτων συμβάλλει περαιτέρω στη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού, καθώς σημαντικός αριθμός χρηστών μπορεί να εξυπηρετηθεί μέσω περιορισμένου μήκους καλωδιώσεων και μικρότερου αριθμού σημείων διανομής. Στις αγροτικές και

αραιοκατοικημένες περιοχές η απόσταση μεταξύ των κτιρίων αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για τη διαμόρφωση του δικτύου. Σε αυτές τις περιπτώσεις, ο κύριος περιορισμός δεν έγκειται στη χωρητικότητα των καμπινών, αλλά στο μήκος των οδεύσεων και στο κόστος ανάπτυξης του δικτύου πρόσβασης. Η αυξημένη γεωγραφική διασπορά των συνδρομητών οδηγεί συχνά στην ανάγκη εγκατάστασης περισσότερων σημείων συγκέντρωσης ή στη χρήση μεγαλύτερων αποστάσεων διανομής, με αντίστοιχη αύξηση του κόστους εγκατάστασης και καλωδίωσης (FTTH Council Europe, 2016).

Σε περιοχές με ομοιόμορφη πυκνότητα κατοικιών, η θεωρητικά βέλτιστη θέση ενός FCP βρίσκεται κοντά στο γεωμετρικό κέντρο της περιοχής εξυπηρέτησης, ενώ σε περιοχές με ανομοιόμορφη πυκνότητα μετατοπίζεται προς τις περιοχές μεγαλύτερης συγκέντρωσης συνδρομητών (Segarra et al., 2012). Η θεωρητικά καλύτερη θέση ενός FCP από άποψη κόστους δεν είναι πάντοτε πρακτικά υλοποιήσιμη. Αυτό οφείλεται σε περιορισμούς που σχετίζονται με τη διαθεσιμότητα χώρου, την πρόσβαση για συντήρηση ή τις απαιτήσεις αδειοδότησης. Η διαδικασία σχεδιασμού περιλαμβάνει τον εντοπισμό της προτιμότερης θεωρητικής θέσης και την επιλογή της πλησιέστερης τεχνικά εφικτής θέσης εγκατάστασης (FTTH Council Europe, 2016).

Η ομαδοποίηση των καμπινών επηρεάζει, επίσης, τη δομή των feeder και distribution καλωδίων, τη χωρητικότητα των microducts και την ανάγκη δημιουργίας νέων υποδομών διέλευσης. Μεγαλύτερες περιοχές εξυπηρέτησης συνεπάγονται αυξημένα μήκη feeder καλωδίων, ενώ μικρότερες περιοχές απαιτούν μεγαλύτερο αριθμό καμπινών και σημείων διακλάδωσης (FTTH Council Europe, 2016). Η αρχιτεκτονική GPON μπορεί επίσης να βασιστεί σε zoning προσέγγιση, όπου το δίκτυο χωρίζεται σε επιμέρους περιοχές ανάλογα με τη λειτουργική χρήση των κτιρίων. Στη μελέτη των Yuhani et al. (2025), το δίκτυο διακρίθηκε σε τρεις βασικές ζώνες (Zone A, Zone B και Zone C) με διαφορετικές απαιτήσεις σε bandwidth και αριθμό συνδεδεμένων συσκευών. Η τακτική αυτή διευκολύνει τη βελτιστοποίηση της κατανομής των διαχωριστών και τη διαχείριση της εξασθένησης (attenuation) ανά περιοχή.

Κατά τη φάση του σχεδιασμού αξιοποιούνται γεωγραφικά δεδομένα, πληροφορίες ζήτησης και εξειδικευμένα λογισμικά ΓΣΠ και σχεδιασμού δικτύων, ώστε να πραγματοποιείται συγκριτική αξιολόγηση διαφορετικών σεναρίων. Μέσω αυτής της διαδικασίας επιτυγχάνεται καλύτερη κατανομή των συνδρομητών, αξιοποίηση των διαθέσιμων πόρων

και μείωση του συνολικού κόστους ανάπτυξης και λειτουργίας του δικτύου. Η χρήση εργαλείων ΓΣΠ αυτοματοποιεί τη διαστασιολόγηση καλωδίων και την εκτίμηση του απαιτούμενου αριθμού οπτικών ινών ανά περιοχή εξυπηρέτησης, μέσω αλγοριθμικής επεξεργασίας γεωγραφικών και πληθυσμιακών δεδομένων (Segarra et al., 2012). Η ομαδοποίηση συνδρομητών και καμπινών στηρίζεται επίσης στον υπολογισμό του απαιτούμενου αριθμού ONTs, ODPs και διαχωριστών, ώστε να επιτυγχάνεται ισορροπία μεταξύ χωρητικότητας, μήκους οδεύσεων και κόστους ανάπτυξης του δικτύου (Valentino et al., 2024).

Οι Abdullah et al. (2025) παρουσίασαν μια πραγματική ανάπτυξη FTTH όπου κάθε Network Access Point (NAP) σχεδιάστηκε ώστε να εξυπηρετεί έως 24 συνδρομητές, ενώ περίπου 20 NAPs ομαδοποιούνταν κάτω από ένα κοινό Fibre Distribution Hub (FDH). Διαπιστώθηκε καλύτερη κατανομή της χωρητικότητας, αξιοποίηση των optical splitters και περιορισμός του κόστους υποδομών και καλωδίωσης. Η πρόβλεψη εφεδρικής χωρητικότητας αποτελεί βασική πρακτική στον σχεδιασμό δικτύων FTTH, εφόσον υποστηρίζει τις μελλοντικές συνδέσεις χωρίς την ανάγκη εκτεταμένων παρεμβάσεων στις υποδομές του δικτύου πρόσβασης.

4.3 Σχεδιασμός οδεύσεων

Οι οδεύσεις μπορεί να αφορούν νέες υπόγειες εκσκαφές, αξιοποίηση υφιστάμενων αγωγών και φρεατίων ή χρήση εναέριων δικτύων, ανάλογα με τα γεωγραφικά, πολεοδομικά και τεχνικά χαρακτηριστικά της περιοχής ανάπτυξης. Η αξιοποίηση διαθέσιμων εγκαταστάσεων μπορεί να μειώσει σημαντικά το κόστος ανάπτυξης του δικτύου, περιορίζοντας τις απαιτούμενες εργασίες πολιτικού μηχανικού, οι οποίες αποτελούν ένα από τα μεγαλύτερα ποσοστά του συνολικού CAPEX ενός έργου FTTH. Επιδιώκεται η μέγιστη δυνατή επαναχρησιμοποίηση διαθέσιμων αγωγών, φρεατίων, καναλιών διέλευσης και εναέριων δικτύων. Η χάραξη των οδεύσεων του δικτύου περιλαμβάνει τον καθορισμό των διαδρομών καλωδίων τροφοδοσίας και διανομής μεταξύ STO, ODC και ODP. Η διαδικασία υποστηρίζεται από ΣΓΠ, ώστε να επιτυγχάνεται βέλτιστη χωροθέτηση των καμπινών και ελαχιστοποίηση του συνολικού μήκους καλωδίωσης (Putra et al., 2024).

Σε αυτή την φάση εμπερικλείεται και ο ακριβής προσδιορισμός των διαδρομών καλωδίων και αγωγών, όπως και η αποτύπωση κάθε σύνδεσης πρόσβασης (drop connection) από το τελευταίο σημείο διακλάδωσης του δικτύου έως το σημείο εισόδου του κτιρίου. Κάθε

διαδρομή πρέπει να χαρτογραφείται με υψηλή ακρίβεια, ώστε να διασφαλίζονται η δυνατότητα υλοποίησης, η μελλοντική λειτουργία και η συντήρηση του δικτύου. Η συγκεκριμένη διαδικασία παρουσιάζει αυξημένο ενδιαφέρον σε πυκνοκατοικημένες αστικές περιοχές, όπου οι διαθέσιμοι χώροι διέλευσης είναι περιορισμένοι και συχνά συνυπάρχουν πολλαπλά υπόγεια δίκτυα κοινής ωφέλειας. Χρησιμοποιούνται εξειδικευμένα λογισμικά ΣΓΠ και σχεδιασμού δικτύου, τα οποία επιτρέπουν την ανταλλαγή δεδομένων και την ομαλή μετάβαση από τον προκαταρκτικό στον αναλυτικό σχεδιασμό (FTTH Council Europe, 2016).

Επιπροσθέτως, προσδιορίζονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά των υλικών και του εξοπλισμού που θα χρησιμοποιηθούν, όπως παραδείγματος χάριν οι προδιαγραφές καλωδίων και σωληνώσεων, η χρωματική κωδικοποίηση πολυσωληνίων και microducts, οι ελάχιστες ακτίνες κάμψης καλωδίων, οι μέγιστες αποστάσεις εμφύσησης και η συμβατότητα συνδέσμων, microducts και οπτικών ινών. Μεγάλη σημασία αποδίδεται επίσης στον σχεδιασμό των σημείων συγκόλλησης και διαχείρισης οπτικών ινών (splicing planning). Στα Optical Distribution Frames (ODFs) και στα Fibre Concentration Points καθορίζεται με ακρίβεια ποια ζεύγη ινών συγκολλούνται μεταξύ τους, σε ποια splice trays τοποθετούνται και ποια μονοπάτια ακολουθούν μέσα στο δίκτυο. Εφαρμόζονται συστήματα μοναδικής επισήμανσης (labelling) για κάθε καλώδιο, σωλήνωση, splice tray και σημείο σύνδεσης, ώστε να διευκολύνεται η αναγνώριση και η συντήρηση του δικτύου (FTTH Council Europe, 2016).

Ο λεπτομερής σχεδιασμός συνδέεται με την τεχνική τεκμηρίωση των οδεύσεων και του εξοπλισμού του δικτύου. Παράγονται σχέδια κατασκευής του δικτύου, καταγραφή ενεργού και παθητικού εξοπλισμού, λίστες καλωδίων και υλικών (BoM), σχέδια συγκολλήσεων και patching, οδηγίες εγκατάστασης και τεχνικά σχέδια για ODFs, διαχωριστές και λοιπό εξοπλισμό πεδίου. Εξειδικευμένα λογισμικά υποστηρίζουν χειροκίνητες παρεμβάσεις και αυτοματοποιημένες διαδικασίες, όπως η ονοματοδοσία εξοπλισμού, και η παραγωγή σχεδίων και αναφορών. Η αυτοματοποίηση συνεισφέρει στη μείωση σφαλμάτων και στον περιορισμό του χρόνου και του κόστους υλοποίησης του δικτύου FTTH (FTTH Council Europe, 2016).

Στον σχεδιασμό δικτύων GPON λαμβάνονται επίσης υπόψη η χωροθέτηση των optical splitters, των ODC και των ODP όπως και η σμίκρυνση του συνολικού μήκους όδευσης. Οι

Yuhani et al. (2025) αναφέρουν ότι η αναδιάταξη των οδεύσεων και η τοποθέτηση των ODC πλησιέστερα σε περιοχές υψηλής πυκνότητας συσκευών συμβάλλει στην ελάττωση της εξασθένησης και των splicing losses.

4.4 Υποδομές πεδίου

Η ανάπτυξη των υποδομών πεδίου θεωρείται ένα από τα πιο κομβικά στάδια υλοποίησης ενός δικτύου FTTH, εφόσον μεγάλο μέρος του συνολικού κόστους σχετίζεται με έργα πολιτικού μηχανικού και κυρίως με τις εκσκαφές (trenching). Περίπου το ήμισυ του κόστους ενός υπόγειου δικτύου οπτικών ινών συνδέεται με τις εργασίες δημιουργίας δικτύων. Πριν από την κατασκευή νέων οδεύσεων αξιολογείται πάντοτε η δυνατότητα αξιοποίησης υφιστάμενων εγκαταστάσεων, όπως αγωγοί τηλεπικοινωνιακών παρόχων, δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας, ηλεκτροφωτισμού αποχέτευσης, ύδρευσης ή φυσικού αερίου (FTTH Council Europe, 2016). Σε αρκετές περιπτώσεις εφαρμόζονται μικτές αρχιτεκτονικές duct-aerial, οι οποίες συνδυάζουν υπόγειες και εναέριες οδεύσεις αποσκοπώντας στη βελτιστοποίηση του κόστους και τη μείωση των απαιτούμενων εργασιών πολιτικού μηχανικού (Valentino et al., 2024).

Η πλέον συμβατική μέθοδος υπόγειας εγκατάστασης βασίζεται στη δημιουργία δικτύου σωληνώσεων, μέσα στο οποίο τα καλώδια οπτικών ινών εγκαθίστανται με τεχνικές pulling, air blowing ή floatation. Μπορεί να περιλαμβάνει κύριους αγωγούς, sub-ducts, micro-ducts και δέσμες micro-ducts (micro-duct bundles). Οι αγωγοί διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες: α) τους direct buried / thick walled ducts, οι οποίοι μπορούν να τοποθετηθούν απευθείας στο έδαφος χωρίς πρόσθετη μηχανική προστασία, και β) τους direct installed / thin walled ducts, οι οποίοι εγκαθίστανται εντός μεγαλύτερων αγωγών ή cable trays. Η χρήση υποδομών ducting προσφέρει ευελιξία για μελλοντική επέκταση και επαναδιαμόρφωση του δικτύου πρόσβασης, καθώς καθιστά εφικτή την εγκατάσταση επιπλέον καλωδίων χωρίς νέες εκσκαφές. Κατά τις εργασίες εκσκαφής και εγκατάστασης πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι υφιστάμενες υπόγειες εγκαταστάσεις και η όχληση που προκαλείται στην κυκλοφορία οχημάτων και πεζών. Πριν από την κατασκευή πραγματοποιούνται έλεγχοι και αυτοψίες για τον εντοπισμό υπόγειων δικτύων κοινής ωφέλειας, ώστε να αποφεύγονται βλάβες σε άλλες κατασκευές κατά την εκτέλεση των έργων (FTTH Council Europe, 2016).

Οι τεχνικές εκσκαφής που χρησιμοποιούνται σε έργα FTTH περιλαμβάνουν open trenching, slotting, directional drilling και mole ploughing. Σε πολλές περιπτώσεις εφαρμόζεται συνδυασμός τεχνικών, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της περιοχής ανάπτυξης, τη μορφολογία του εδάφους, το πλάτος των δρόμων και τους περιορισμούς κυκλοφορίας. Αυξημένο ενδιαφέρον στις σύγχρονες αναπτύξεις FTTH παρουσιάζει η χρήση τεχνικών micro-ducting και microtrenching. Τα micro-ducts αποτελούν μικρού μεγέθους εύκαμπτους αγωγούς HDPE, διαμέτρου συνήθως μικρότερης των 16 mm, οι οποίοι έχουν σχεδιαστεί για την εγκατάσταση micro-cables με τεχνική air blowing. Η μικρότερη διάμετρος των micro-cables σε σχέση με τα συμβατικά καλώδια μειώνει τον απαιτούμενο χώρο εγκατάστασης και το συνολικό βάρος της (FTTH Council Europe, 2016).

Η χρήση μικροσωληνώσεων συνδέεται με μεγαλύτερη πυκνότητα ανεξάρτητων οδεύσεων, ευελιξία σχεδιασμού, δυνατότητα μελλοντικής επέκτασης και καλύτερη αξιοποίηση της χωρητικότητας υφιστάμενων αγωγών. Οι υποδομές micro-duct μπορούν να διαμορφωθούν ως tight bundles, loose bundles ή flat bundles, ανάλογα με τις απαιτήσεις του έργου και τη μέθοδο εγκατάστασης. Τα flat bundles χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές microtrenching, παρέχοντας εύκολη πρόσβαση στους επιμέρους micro-ducts και καλύτερη αξιοποίηση του διαθέσιμου χώρου εγκατάστασης. Στην Εικόνα 4-1 παρουσιάζονται ενδεικτικοί τύποι διαμόρφωσης micro-duct, όπως tight bundles, loose bundles και flat bundles, οι οποίοι χρησιμοποιούνται ανάλογα με τις απαιτήσεις εγκατάστασης και ανάπτυξης δικτύων FTTH.



Εικόνα 4-3 Ενδεικτικές διαμορφώσεις micro-duct (tight bundles, loose bundles και flat bundles) για εφαρμογές ανάπτυξης δικτύων οπτικών ινών.

Πηγή: FTTH Council Europe, 2016

Η τεχνική microtrenching αποτελεί σύγχρονη μέθοδο ανάπτυξης FTTH δικτύων, η οποία βασίζεται στη δημιουργία στενών και μικρού βάθους τομών στο οδόστρωμα ή στο πεζοδρόμιο. Συνήθως οι τομές αυτές έχουν πλάτος μικρότερο των 5 cm και βάθος

μικρότερο των 30 cm. Η μέθοδος εφαρμόζεται κυρίως σε πυκνοκατοικημένα αστικά περιβάλλοντα, όπου απαιτείται περιορισμός της όχλησης, ταχύτερη αποκατάσταση του οδοστρώματος και μείωση του χρόνου υλοποίησης του έργου. Σε αντίθεση με τις συμβατικές εκσκαφές, το microtrenching συντελεί στην ολοκλήρωση των εργασιών σε σύντομο χρονικό διάστημα, συχνά ακόμη και εντός της ίδιας ημέρας. Η μικρότερη ποσότητα απομάκρυνσης υλικών και η περιορισμένη κατάληψη του οδοστρώματος συμβάλλουν στη μείωση της κυκλοφοριακής επιβάρυνσης και του συνολικού κόστους εγκατάστασης (FTTH Council Europe, 2016).

Σημαντικό στοιχείο των υποδομών πεδίου αποτελούν, επίσης, τα φρεάτια πρόσβασης και σύνδεσης. Τα φρεάτια τοποθετούνται σε κατάλληλα σημεία κατά μήκος της όδευσης και πρέπει να διαθέτουν επαρκείς διαστάσεις ώστε να είναι εφικτή η εγκατάσταση και διαχείριση καλωδίων, η αποθήκευση πλεονάζοντος μήκους καλωδίων, η φιλοξενία splice closures και η διενέργεια εργασιών συντήρησης και επεκτάσεων. Κατασκευάζονται επιτόπου ή χρησιμοποιούνται προκατασκευασμένες λύσεις, με στόχο τη μείωση του χρόνου κατασκευής και της όχλησης στο πεδίο. Σε περιπτώσεις όπου τα υφιστάμενα φρεάτια δεν επαρκούν λόγω μικρού μεγέθους ή υπερφόρτωσης, μπορεί να προβλεφθεί η κατασκευή πρόσθετων φρεατίων εκτός της κύριας όδευσης (FTTH Council Europe, 2016).

Ο σχεδιασμός των φρεατίων και των υπόγειων εγκαταστάσεων εξαρτάται άμεσα από τις απαιτήσεις όδευσης και τις επιτρεπόμενες αποστάσεις εγκατάστασης. Σύμφωνα με τους Abdullah et al. (2025), χρησιμοποιούνται διαφορετικοί τύποι φρεατίων για υποδομές τροφοδοσίας και διανομής, όπως θάλαμοι τύπου T4 και T6, ενώ η μέγιστη απόσταση μεταξύ φρεατίων για αγωγούς 110 mm μπορεί να φθάνει τα 250 m. Σε κάθε σημείο διακλάδωσης ή εγκατάστασης NAP προβλέπεται χρήση κατάλληλου chamber για διευκόλυνση της πρόσβασης και της συντήρησης του δικτύου.

Για τη σωστή λειτουργία των μικροσωληνώσεων απαιτείται επίσης η χρήση εξειδικευμένων εξαρτημάτων και συστημάτων διαχείρισης, όπως σύνδεσμοι (connectors), end caps, reducers, duct sealings, branch boxes και cable loop boxes. Στην Εικόνα 4-2 παρουσιάζονται εξαρτήματα διακλάδωσης και συστήματα στεγανοποίησης που χρησιμοποιούνται σε υποδομές microduct για τη διασύνδεση, προστασία και ασφαλή λειτουργία των σωληνώσεων του δικτύου.



Εικόνα 4-4 Εξαρτήματα διακλάδωσης (branching elements) και συστήματα στεγανοποίησης (sealing systems) για υποδομές micro-duct.

Πηγή: FTTH Council Europe, 2016

Η ποιότητα και η στεγανότητα του duct network θεωρούνται απαραίτητες για τη μακροχρόνια αξιοπιστία και λειτουργικότητα του δικτύου FTTH. Επηρεάζουν άμεσα την επιτυχία των διαδικασιών εμφύσησης καλωδίων, τη δυνατότητα μελλοντικής επέκτασης και την προστασία των υποδομών από υγρασία, σκόνη και μηχανικές καταπονήσεις.

4.5 Πολυσωλήνια – microducts

Στο στάδιο του λεπτομερούς σχεδιασμού απαιτείται ο ακριβής καθορισμός της δομής, της διασύνδεσης και της διαχείρισης των σωληνώσεων που χρησιμοποιούνται για την ανάπτυξη του δικτύου FTTH. Τα συστήματα πολυσωληνίων διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην όδευση, προστασία και μελλοντική επεκτασιμότητα των καλωδίων οπτικών ινών κατά μήκος του δικτύου πρόσβασης. Προσδιορίζεται αναλυτικά η διαμόρφωση duct-in-duct, ήτοι ο τρόπος με τον οποίο κάθε εσωτερικό microduct τοποθετείται μέσα σε εξωτερικούς αγωγούς ή πολυσωλήνια. Για κάθε καλώδιο που δεν εγκαθίσταται απευθείας στο έδαφος απαιτείται να καθοριστεί με ακρίβεια σε ποιο microduct θα εμφυσηθεί ή θα διέλθει, μέσω διαδικασιών χρωματικής κωδικοποίησης και επισήμανσης των σωληνώσεων. Η τεκμηρίωση αυτή αποτελεί χαρακτηριστικό των “to-build” σχεδίων που χρησιμοποιούνται κατά την υλοποίηση και τη συντήρηση του δικτύου.

Ο σχεδιασμός αυτών των συστημάτων περιλαμβάνει, επίσης, τεχνικούς περιορισμούς και προδιαγραφές, όπως η ελάχιστη επιτρεπόμενη ακτίνα κάμψης σωληνώσεων και καλωδίων, οι μέγιστες αποστάσεις εμφύσησης, οι προδιαγραφές των micro-cables και η συμβατότητα συνδέσμων και στοιχείων διασύνδεσης. Ο ακριβής καθορισμός των σημείων σύνδεσης των σωληνώσεων συνιστά ένα ακόμη βασικό στοιχείο. Για κάθε τέτοιο σύστημα πρέπει να προσδιορίζεται η ακριβής γεωγραφική θέση στην οποία πραγματοποιείται η σύνδεση, ο τύπος του συνδέσμου που χρησιμοποιείται και η αντιστοίχιση μεταξύ των επιμέρους αγωγών διαφορετικών σωληνώσεων. Η χρήση τυποποιημένων διαδικασιών επισήμανσης και διαχείρισης των πολυσωληνίων διευκολύνει την κατασκευή και τη μελλοντική συντήρηση και επέκταση του δικτύου FTTH (FTTH Council Europe, 2016).

Τα microducts αποτελούν μικρού μεγέθους, εύκαμπτους και ελαφρούς αγωγούς, συνήθως κατασκευασμένους από HDPE, με εξωτερική διάμετρο μικρότερη των 16 mm. Σχεδιάστηκαν για την εγκατάσταση micro-cables με τεχνική air blowing και η χρήση τους αυξήθηκε με τη μείωση του μεγέθους και του βάρους των καλωδίων οπτικών ινών. Σε σύγκριση με τα συμβατικά sub-ducts, επιτρέπουν μεγαλύτερη πυκνότητα ανεξάρτητων οδεύσεων, καλύτερη αξιοποίηση της διαθέσιμης χωρητικότητας και ευκολότερη μελλοντική επέκταση του δικτύου.

Μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε ως direct buried / thick walled, τα οποία τοποθετούνται απευθείας στο έδαφος, είτε ως direct installed / thin walled τα οποία απαιτούν πρόσθετη μηχανική προστασία και εγκαθίστανται μέσα σε μεγαλύτερους αγωγούς, κτίρια ή cable trays. Οι δέσμες microducts διαμορφώνονται συνήθως ως tight bundles, loose bundles ή flat bundles. Τα flat bundles χρησιμοποιούνται ιδιαίτερα σε εφαρμογές microtrenching, καθώς περιορίζουν τις διασταυρώσεις μεταξύ των επιμέρους microducts και παρέχουν ευκολότερη πρόσβαση για σύνδεση ή διακλάδωση.

Τα microducts μπορούν να κατασκευάζονται σε διαφορετικά χρώματα, διαμέτρους και υλικά, ενώ ειδικές εσωτερικές στρώσεις χρησιμοποιούνται για τη βελτίωση της απόδοσης εμφύσησης των καλωδίων. Στο πλαίσιο πρακτικών FTTH υλοποιήσεων χρησιμοποιούνται διαφορετικές διαμέτροι σωληνώσεων για feeder και access δίκτυα. Οι Abdullah et al. (2025) αναφέρουν χρήση αγωγών 110 mm για τις κύριες οδεύσεις τροφοδοσίας και μικρότερων αγωγών 25 mm για τις συνδέσεις πρόσβασης προς τις εγκαταστάσεις των συνδρομητών. Η

διαφοροποίηση αυτή προσφέρει καλύτερη προσαρμογή της χωρητικότητας του duct network στις απαιτήσεις κάθε τμήματος του δικτύου.

Στα FTTH δίκτυα πρόσβασης χρησιμοποιούνται διαφορετικοί τύποι καλωδίων ανάλογα με το τμήμα του δικτύου. Σύμφωνα με τους Asril et al. (2023), για τη σύνδεση μεταξύ ODC και ODP χρησιμοποιούνται aerial ή distribution cables, ενώ για τη σύνδεση του ODP με το Optical Termination Point (OTP) του συνδρομητή χρησιμοποιούνται drop core cables. Για την εσωτερική εγκατάσταση αξιοποιούνται indoor cables που συνδέουν το OTP με το ROSET της οικίας.

Η εγκατάσταση των microducts σε FTTH μπορεί να πραγματοποιηθεί με διαφορετικές τεχνικές, ανάλογα με το μήκος της όδευσης, την ύπαρξη διαθέσιμων αγωγών και τις συνθήκες της περιοχής. Οι κύριες μέθοδοι εγκατάστασης είναι η έλξη (pulling), η εμφύσηση με αέρα (air blowing), η επίπλευση (floating), η τοποθέτηση σε συμβατική τάφρο, η εγκατάσταση σε micro-trench και η εναέρια εγκατάσταση. Η εγκατάσταση με έλξη χρησιμοποιείται κατά βάση σε μικρά μήκη, συνήθως κάτω των 100 μέτρων, όταν τα microducts τοποθετούνται μέσα σε υφιστάμενους αγωγούς ή sub-ducts. Η διαδικασία είναι παρόμοια με την εγκατάσταση καλωδίων. Πιο συγκεκριμένα, απαιτείται χρήση draw-rope, swivel για ελεύθερη περιστροφή κατά την έλξη. Εφαρμόζονται μηχανισμοί προστασίας ώστε να μην ξεπεραστεί η επιτρεπόμενη εφελκυστική αντοχή του microduct. Η χρήση λιπαντικών μειώνει την τριβή και το φορτίο έλξης, ενώ πρέπει να τηρούνται οι ελάχιστες ακτίνες κάμψης μέσω κατάλληλων οδηγών και τροχαλίων. Στην Εικόνα 4-3 απεικονίζεται η εγκατάσταση micro-ducts σε συμβατική τάφρο, διαδικασία που εφαρμόζεται κατά την ανάπτυξη υπόγειων δικτύων FTTH (FTTH Council Europe, 2016).



Εικόνα 4-5 Εγκατάσταση υποδομών micro-duct σε υπόγεια όδευση για ανάπτυξη δικτύου FTTH

Πηγή: FTTH Council Europe, 2016

Η εμφύσηση με αέρα αποτελεί μία από τις πιο διαδεδομένες και αποτελεσματικές μεθόδους εγκατάστασης microducts. Η τεχνική αυτή χρησιμοποιείται για thin-walled μέσα σε υφιστάμενα sub-ducts και αυξάνει την χωρητικότητα των αγωγών σε δίκτυα FTTH. Με τη χρήση ειδικών jetting machines και συμπιεστών αέρα είναι δυνατό να εγκατασταθούν μεγάλα μήκη microducts, τα οποία σε κενά sub-ducts μπορούν να ξεπεράσουν ακόμη και τα 1.000 μέτρα. Πριν από την εμφύσηση, τα microducts πρέπει να βρίσκονται υπό πίεση ώστε να αποφεύγεται η παραμόρφωση ή κατάρρευσή τους από την πίεση του αέρα. Σε περιπτώσεις μεγάλων αποστάσεων εφαρμόζεται και η μέθοδος της επίπλευσης (floating). Στη μέθοδο αυτή οι δέσμες microducts γεμίζονται με νερό, με αποτέλεσμα να μειώνεται το ενεργό βάρος τους μέσα στον αγωγό. Με τον τρόπο αυτό καθίσταται δυνατή η εγκατάσταση πολύ μεγαλύτερων μηκών σε σύγκριση με την απλή έλξη ή εμφύσηση (FTTH Council Europe, 2016).

Η εγκατάσταση microducts σε συμβατική τάφρο αποτελεί παραδοσιακή τεχνική ανάπτυξης νέων υποδομών. Συνήθως διανοίγεται τάφρος πλάτους περίπου 30 cm και βάθους 40–90 cm, ανάλογα με τα τοπικά πρότυπα και τους κανονισμούς. Ακολουθεί η απομάκρυνση λίθων και εμποδίων, η διαμόρφωση της βάσης και η τοποθέτηση thick-walled, τα οποία καλύπτονται με μαλακό χώμα ή άμμο για προστασία από μηχανικές καταπονήσεις.

Στις σύγχρονες αστικές αναπτύξεις FTTH απαντάται συχνά η τεχνική microtrenching. Η μέθοδος αυτή βασίζεται στη δημιουργία στενών τομών μικρού βάθους στο οδόστρωμα ή στο πεζοδρόμιο, μέσα στις οποίες τοποθετούνται συνήθως flat bundles. Το μικρό πλάτος της τομής, που συχνά είναι μικρότερο από 5 cm, μειώνει την όχληση, τον χρόνο κατασκευής και την ποσότητα αποβλήτων εκσκαφής. Επίσης, επιτρέπει την ταχεία αποκατάσταση του οδοστρώματος και τη γρήγορη ανάπτυξη του δικτύου σε αστικά περιβάλλοντα υψηλής πυκνότητας (FTTH Council Europe, 2016).

Τα microducts μπορούν, επίσης, να εγκατασταθούν εναέρια, ιδιαίτερα σε περιοχές όπου υπάρχει ήδη υποδομή στύλων, όπως δίκτυα τηλεφωνίας ή καλωδιακής τηλεόρασης. Η εναέρια εγκατάσταση δεν απαιτεί εκσκαφές και χρησιμοποιείται για μικρές αποστάσεις σύνδεσης τελικών συνδρομητών, με ανοίγματα στύλων μικρότερα των 50 μέτρων. Σε αυτές τις περιπτώσεις χρησιμοποιούνται συχνά τύπου Σχήματος 8 (Figure-8), συμβατά με τυπικά εξαρτήματα εναέριων καλωδίων (Εικόνα 4-4) (FTTH Council Europe, 2016).



Εικόνα 4-6 Διαμόρφωση καλωδίου Figure-8 που χρησιμοποιείται σε εναέριες εγκαταστάσεις οπτικών ινών.

Πηγή: FTTH Council Europe, 2016

Το ολοκληρωμένο δίκτυο microducts συμπληρώνεται από κατάλληλα εξαρτήματα σύνδεσης, στεγανοποίησης και διαχείρισης, τα οποία διασφαλίζουν την ασφαλή λειτουργία και τη μακροχρόνια αξιοπιστία του δικτύου. Για thick-walled που εγκαθίστανται απευθείας στο έδαφος χρησιμοποιούνται ειδικοί direct buried connectors, ενώ στα σημεία πρόσβασης και στα κτίρια εφαρμόζονται gas και water stop connectors ώστε να διασφαλίζεται η προστασία των σωληνώσεων από εισροή υγρασίας, νερού ή αερίων.

Η ποιότητα, η στεγανότητα και η σωστή τεκμηρίωση του δικτύου πολυσωληνίων αποτελούν σημαντικούς παράγοντες για τη μακροχρόνια αξιοπιστία και επεκτασιμότητα

ενός δικτύου FTTH, καθώς επηρεάζουν άμεσα την επιτυχία των διαδικασιών εγκατάστασης και τη δυνατότητα μελλοντικής ανάπτυξης και συντήρησης των υποδομών.

4.6 Καλώδια οπτικών ινών

Η αρχιτεκτονική ενός δικτύου FTTH οργανώνεται σε διαδοχικά επίπεδα καλωδίωσης και σημείων συγκέντρωσης οπτικών ινών, ξεκινώντας από το Access Node ή Point of Presence (POP) και καταλήγοντας στον τελικό συνδρομητή. Κάθε επίπεδο του δικτύου εξυπηρετεί διαφορετικό ρόλο ως προς τη μεταφορά, διανομή και διαχείριση των οπτικών ινών και διαμορφώνει μία ιεραρχική δομή πρόσβασης, η οποία συντελεί στην αποδοτική ανάπτυξη και λειτουργία του δικτύου. Οι Segarra et al. (2012) διαχωρίζουν τη δομή ενός FTTH δικτύου σε feeder, distribution, dispersion και user network, επισημαίνοντας ότι κάθε επίπεδο διαθέτει διαφορετικές απαιτήσεις χωρητικότητας, μήκους καλωδίων και τύπων εγκατάστασης.

Το Access Node συνιστά το σημείο εκκίνησης της οπτικής διαδρομής προς τον συνδρομητή και φιλοξενεί τον ενεργό τηλεπικοινωνιακό εξοπλισμό του παρόχου, τα συστήματα τερματισμού οπτικών ινών και τον εξοπλισμό διασύνδεσης μεταξύ ενεργού εξοπλισμού και οπτικών καλωδίων. Το μέγεθος και η χωρητικότητα του Access Node εξαρτώνται από τον αριθμό των εξυπηρετούμενων συνδρομητών και τις μελλοντικές ανάγκες επέκτασης του δικτύου. Στον χώρο αυτό εγκαθίστανται Optical Distribution Frames (ODFs), συστήματα οργάνωσης ινών, συστήματα αδιάλειπτης τροφοδοσίας (UPS), υποδομές ψύξης και φυσικής ασφάλειας, καθώς και εξοπλισμός ενεργού δικτύου (FTTH Council Europe, 2016). Στην Εικόνα 4-5 παρουσιάζεται ενδεικτική διαμόρφωση Access Node / POP με εγκατεστημένα Optical Distribution Frames (ODFs) και εξοπλισμό διαχείρισης οπτικών ινών (FTTH Council Europe, 2016).



Εικόνα 4-7 Εγκατάσταση ενεργών και παθητικών Optical Distribution Frames (ODFs) σε Point of Presence (POP) δικτύου FTTH.

(Πηγή: FTTH Council Europe, 2016)

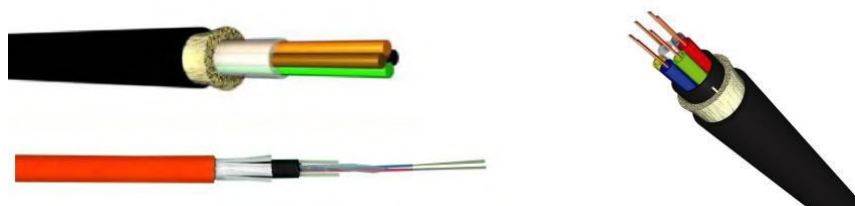
Η εκκίνηση της καλωδίωσης τροφοδοσίας λαμβάνει χώρα από το Access Node, συνδέοντας το POP με τα πρωτεύοντα σημεία συγκέντρωσης ινών (Primary Fibre Concentration Points – Primary FCPs). Τα καλώδια τροφοδοσίας καλύπτουν αποστάσεις αρκετών χιλιομέτρων και διαθέτουν υψηλό αριθμό οπτικών ινών, ιδιαίτερα σε αρχιτεκτονικές Point-to-Point, όπου χρησιμοποιούνται καλώδια εκατοντάδων ινών. Σε δίκτυα PON η χρήση passive optical splitters επιφέρει μείωση του απαιτούμενου αριθμού ινών στην feeder περιοχή του δικτύου (FTTH Council Europe, 2016).

Η feeder υποδομή υλοποιείται συνήθως μέσω υπόγειων σωληνώσεων κατάλληλης χωρητικότητας, ενώ προβλέπεται επιπλέον διαθέσιμος χώρος για μελλοντική επέκταση και συντήρηση του δικτύου. Η χρήση flexible subducts και microducts συνδράμει στην καλύτερη αξιοποίηση της χωρητικότητας των αγωγών και στη δυνατότητα εγκατάστασης πρόσθετων καλωδίων χωρίς νέες εκσκαφές. Στα Primary FCPs πραγματοποιείται η μετάβαση από τα καλώδια τροφοδοσίας προς τα καλώδια διανομής. Στα σημεία αυτά οι

οπτικές ίνες διαχωρίζονται και συγκολλούνται σε μικρότερες ομάδες, ώστε να εξυπηρετούν επιμέρους περιοχές του δικτύου. Τα Primary FCPs μπορεί να υλοποιούνται ως υπόγειες ή εναέριες καμπίνες και closures και πρέπει να υποστηρίζουν επαναλαμβανόμενη πρόσβαση για εργασίες συντήρησης, επαναδιαμόρφωσης και δοκιμών οπτικών ινών (FTTH Council Europe, 2016).

Η distribution καλωδίωση συνδέει τα FCPs με τις περιοχές εξυπηρέτησης των συνδρομητών και συνήθως δεν υπερβαίνει αποστάσεις του 1 km. Τα distribution διαθέτουν μεσαίο αριθμό ινών και μπορούν να εγκατασταθούν μέσα σε ducts ή sub-ducts, με direct burial ή μέσω micro-duct bundles. Η χρήση microducts καθιστά εφικτή την εγκατάσταση επιπλέον καλωδίων σε μεταγενέστερο χρόνο (“grow as you go”), βελτιώνοντας την επεκτασιμότητα του δικτύου. Τα loose tube μπορούν να εγκατασταθούν με τεχνικές blowing ή pulling μέσα σε ducts και sub-ducts, αλλά και εναέρια σε στύλους. Σε αρχιτεκτονικές GPON εφαρμόζεται συχνά two-stage splitting, όπου διαχωριστές πρώτου επιπέδου εγκαθίστανται στα Optical Distribution Cabinets (ODCs) και διαχωριστές δεύτερου επιπέδου στα Optical Distribution Points (ODPs). Η προσέγγιση αυτή διευκολύνει τη διανομή των ινών και την αποτελεσματικότερη εξυπηρέτηση μεγαλύτερου αριθμού συνδρομητών μέσω περιορισμένου αριθμού ινών τροφοδοσίας (Valentino et al., 2024).

Σε ορισμένες περιπτώσεις χρησιμοποιείται και δευτερεύον σημείο συγκέντρωσης ινών (Secondary FCP), στο οποίο πραγματοποιείται περαιτέρω διαχωρισμός των ινών πριν τη σύνδεση προς τον τελικό συνδρομητή. Στα Secondary FCPs τα distribution καλώδια συγκολλούνται με τις ίνες των drop καλωδίων, επιτρέποντας τη διασύνδεση όσο το δυνατόν πλησιέστερα στους συνδρομητές. Η θέση τους εξαρτάται από την τοπολογία των ducts, τα σημεία πρόσβασης και στις αρχιτεκτονικές PON, τη θέση των optical splitters. Η drop καλωδίωση αποτελεί το τελικό τμήμα του εξωτερικού δικτύου και συνδέει το τελευταίο FCP με το κτίριο του συνδρομητή. Οι αποστάσεις συνήθως δεν υπερβαίνουν τα 500 m και μειώνονται σε περιοχές υψηλής πυκνότητας. Τα drop καλώδια μπορούν να εγκατασταθούν υπόγεια μέσα σε μικρούς αγωγούς ή microducts, με direct burial, εναέρια μέσω στύλων ή εξωτερικά πάνω στις όψεις κτιρίων (façade installation). Διατίθενται σε διάφορους τύπους, όπως direct install cables, direct buried cables, aerial cables και façade cables (Εικόνα 4-6).



Εικόνα 4-8 Παραδείγματα direct buried και aerial καλωδίων οπτικών ινών που χρησιμοποιούνται σε δίκτυα πρόσβασης FTTH.

(Πηγή: FTTH Council Europe, 2016)

Τα direct install εγκαθίστανται εντός ducts με pulling, pushing ή blowing και χρησιμοποιούν συνήθως κατασκευές LSZH ή διπλού μανδύα. Τα direct buried διαθέτουν αυξημένη μηχανική αντοχή για προστασία από καταπονήσεις του εδάφους, ενώ τα aerial καλώδια σχεδιάζονται με βάση τα μηχανικά φορτία και τις περιβαλλοντικές συνθήκες των εναέριων εγκαταστάσεων. Τα facade χρησιμοποιούνται κυρίως σε πολυκατοικίες ή brownfield deployments, όπου η υπόγεια διέλευση δεν είναι πρακτικά εφικτή (FTTH Council Europe, 2016).

Σε πολλές περιπτώσεις χρησιμοποιούνται pre-connectorized ή pre-terminated καλώδια, τα οποία υπόσχονται ταχύτερη εγκατάσταση και συντομεύουν τον χρόνο εργασιών στον χώρο του συνδρομητή, αφού έτσι μειώνεται η ανάγκη επιτόπιων συγκολλήσεων και τερματισμών. Οι pre-connectorized λύσεις θεωρούνται ιδιαίτερα πρακτικές σε FTTH deployments, επειδή ελαχιστοποιούν τις εργασίες συγκόλλησης και επιταχύνουν την ενεργοποίηση συνδρομητών (Segarra et al., 2012).

Τα καλώδια οπτικών ινών που χρησιμοποιούνται σε δίκτυα FTTH βασίζονται σε συγκεκριμένες δομικές αρχές και διαμορφώσεις. Το βασικό δομικό στοιχείο πολλών καλωδίων είναι το loose tube, δηλαδή ένας πλαστικός σωλήνας που περιέχει τις οπτικές ίνες και ειδικό υλικό πλήρωσης για προστασία από μηχανικές και περιβαλλοντικές καταπονήσεις. Πολλαπλά loose tubes τοποθετούνται γύρω από κεντρικό strength member, ενώ χρησιμοποιούνται water-swellaable tapes ή grease για προστασία από υγρασία και διείσδυση νερού. Προστατεύονται εξωτερικά με polyethylene sheath ή άλλα προστατευτικά υλικά και μπορούν να περιλαμβάνουν μεταλλικά στοιχεία ενίσχυσης, στοιχεία ανίχνευσης ή πρόσθετη προστασία έναντι υγρασίας και μηχανικών καταπονήσεων. Ανάλογα με τη μέθοδο εγκατάστασης χρησιμοποιούνται blown cables, pulled cables, micro-cables και fibre units. Τα micro-cables είναι μικρού μεγέθους και βάρους, σχεδιασμένα για τοποθέτηση

μέσω air blowing μέσα σε microducts. Τα fibre units αξιοποιούνται σε blown fibre εφαρμογές και διαθέτουν ειδική προστατευτική επίστρωση για ασφάλεια σε μεγάλες αποστάσεις και μικρές διαμέτρους αγωγών (FTTH Council Europe, 2016).

Η εγκατάσταση καλωδίων σε αγωγούς μπορεί να πραγματοποιηθεί με έλξη (pulling), εμφύσηση αέρα (air blowing) ή επίπλευση (floating). Κατά την μέθοδο με έλξη απαιτείται χρήση draw-rope, swivel και μηχανικής ασφάλειας, ώστε να προστατεύεται το καλώδιο από υπέρβαση της επιτρεπόμενης εφελκυστικής δύναμης. Επιπροσθέτως, πρέπει να τηρούνται οι ελάχιστες ακτίνες κάμψης και οι μηχανικές προδιαγραφές του κατασκευαστή. Η χρήση λιπαντικών μειώνει την τριβή μεταξύ καλωδίου και αγωγού και διευκολύνει την διαδικασία.

Η τεχνική με εμφύσηση αέρα χρησιμοποιείται σε ελαφριά, μη μεταλλικά καλώδια και μπορεί να επιτρέψει μεγαλύτερα συνεχόμενα μήκη εγκατάστασης, μειώνοντας τις ανάγκες για ενδιάμεσες συνδέσεις. Για την επιτυχία της μεθόδου απαιτείται αεροστεγές δίκτυο αγωγών και σωστή σχέση μεταξύ της διαμέτρου του καλωδίου και της εσωτερικής διαμέτρου του αγωγού. Η επίπλευση αντικαθιστά τον αέρα με νερό και μπορεί να επιτρέψει ακόμη μεγαλύτερες αποστάσεις, ενώ χρησιμοποιείται και για ασφαλή αφαίρεση καλωδίων από αγωγούς (FTTH Council Europe, 2016).

Η επιλογή της οπτικής ίνας σε ένα δίκτυο FTTH εξαρτάται από την αρχιτεκτονική του δικτύου, το φυσικό μέγεθος της περιοχής κάλυψης, τον διαθέσιμο οπτικό προϋπολογισμό και τη συμβατότητα με υφιστάμενη υποδομή. Τα FTTH σχεδιάζονται συνήθως με χρονικό ορίζοντα ζωής άνω των 30 ετών. Για τον λόγο αυτό, η επιλογή τύπου ίνας αποτελεί κομβική απόφαση. Στις περισσότερες περιπτώσεις χρησιμοποιείται single-mode ίνα, η οποία προσφέρει χαμηλή εξασθένηση και υψηλή χωρητικότητα μετάδοσης. Βασικές παράμετροι απόδοσης της οπτικής ίνας είναι η εξασθένηση και η διασπορά. Η εξασθένηση εκφράζει τη μείωση της οπτικής ισχύος κατά μήκος της ίνας και επηρεάζει τη μέγιστη απόσταση μετάδοσης, ενώ η διασπορά σχετίζεται με τη διεύρυνση των οπτικών παλμών κατά τη μετάδοση και επηρεάζει την ποιότητα του μεταδιδόμενου σήματος.

Για εφαρμογές FTTH, οι single-mode ίνες της σύστασης ITU-T G.652 καλύπτουν τις ανάγκες των περισσότερων δικτύων. Οι bend-insensitive ίνες της οικογένειας ITU-T G.657 έχουν σχεδιαστεί ώστε να λειτουργούν αξιόπιστα ακόμη και σε μικρές ακτίνες κάμψης. Οι ίνες G.657.A δίνουν έμφαση στη συμβατότητα με ίνες G.652.D και χρησιμοποιούνται ευρέως σε δίκτυα πρόσβασης, ενώ οι ίνες G.657.B προορίζονται για εφαρμογές πολύ

μικρών ακτίνων κάμψης, κυρίως σε εσωτερικές εγκαταστάσεις κτιρίων. Η χρήση bend-insensitive ινών μειώνει τον κίνδυνο απωλειών λόγω κάμψης και διευκολύνει την εγκατάσταση σε περιορισμένους χώρους, όπως σωληνώσεις μικρής διαμέτρου, καμπίνες και εσωτερικές οδεύσεις κτιρίων (Segarra et al., 2012; FTTH Council Europe, 2016).

Στις αρχιτεκτονικές FTTH χρησιμοποιούνται κυρίως single-mode οπτικές ίνες λόγω της δυνατότητας μετάδοσης υψηλών ρυθμών δεδομένων σε μεγάλες αποστάσεις με χαμηλή εξασθένηση. Οι Asril et al. (2023) επισημαίνουν ότι η χρήση οπτικής ίνας υποστηρίζει τις υπηρεσίες δεδομένων, φωνής και βίντεο με υψηλό bandwidth και αυξημένη αξιοπιστία σε σύγκριση με τα παραδοσιακά χάλκινα δίκτυα.

4.7 Καμπίνες FTTH

Οι καμπίνες FTTH και τα σημεία συγκέντρωσης οπτικών ινών αποτελούν βασικούς πυλώνες της αρχιτεκτονικής ενός δικτύου πρόσβασης, εφόσον συμβάλλουν στη συγκέντρωση, οργάνωση, διανομή και διαχείριση των οπτικών κυκλωμάτων. Κατά τη φάση του λεπτομερούς σχεδιασμού καθορίζονται οι θέσεις, η χωρητικότητα και η εσωτερική οργάνωση των Optical Distribution Frames (ODFs), των Fibre Concentration Points (FCPs), των optical splitters και των καμπινών διανομής. Σε πρακτικές GPON υλοποιήσεις εφαρμόζεται συχνά διβάθμια διαίρεση (two-level splitting), όπου διαχωριστές πρώτου επιπέδου εγκαθίστανται στα Fibre Distribution Terminals (FDTs) και δεύτερου επιπέδου στα Fibre Access Terminals (FATs), παρέχοντας αποτελεσματικότερη κατανομή των οπτικών πόρων (Kadhim & Hussain, 2013).

Στα δίκτυα FTTH χρησιμοποιούνται καμπίνες ODC και ODP για τη διανομή της οπτικής ισχύος προς τους συνδρομητές. Η διακλάδωση του σήματος πραγματοποιείται μέσω passive optical splitters διαφορετικών βαθμίδων, όπως 1:8 και 1:16, ανάλογα με τη χωρητικότητα και την αρχιτεκτονική του δικτύου (Putra et al., 2024). Οι Yuhani et al. (2025) αναφέρουν ότι η χρήση cascaded splitters (π.χ. 1:4 + 1:4 ή 1:4 + 1:2) μπορεί να προσφέρει μικρότερες συνολικές απώλειες σε σχέση με επίπεδες αρχιτεκτονικές 1:32, επιτρέποντας καλύτερο έλεγχο εξασθένησης και ευκολότερη διαχείριση βλαβών.

Το Optical Distribution Frame συνιστά το σημείο στο οποίο οι ίνες των εξωτερικών καλωδίων τερματίζονται και γίνονται διαθέσιμες για σύνδεση με τον ενεργό τηλεπικοινωνιακό εξοπλισμό. Τα ODFs βρίσκονται συνήθως στα σημεία παρουσίας (POPs)

ή στα Access Nodes και μπορούν να συγκεντρώνουν από αρκετές εκατοντάδες έως αρκετές χιλιάδες ίνες. Η σωστή οργάνωσή τους είναι ιδιαίτερα σημαντική, δεδομένου ότι επηρεάζει τη δυνατότητα συντήρησης, επέκτασης και αποκατάστασης βλαβών του δικτύου. Η υποστήριξη μεγάλου αριθμού οπτικών ινών απαιτεί οργανωμένη φυσική διάταξη, σαφή διαχωρισμό των κυκλωμάτων, χρήση pigtails και patch cords και κατάλληλα συστήματα καθοδήγησης ινών. Τα fibre containment systems εξασφαλίζουν προστατευμένη όδευση των εσωτερικών οπτικών καλωδίων μεταξύ ODF και ενεργού εξοπλισμού, ενώ συμβάλλουν στη διατήρηση των επιτρεπόμενων ακτίνων κάμψης και της οπτικής απόδοσης (FTTH Council Europe, 2016).

Υπό το πρίσμα του σχεδιασμού των καμπινών προσδιορίζεται επίσης η θέση του ενεργού και παθητικού εξοπλισμού, η χωρητικότητα των racks, η διαχείριση των καλωδίων και η διάταξη των σημείων σύνδεσης. Στην περίπτωση του Inside Plant (ISP), περιλαμβάνεται ο αριθμός και η φυσική θέση των Optical Line Cards, των Layer 2 switches και των ODFs, όπως και οι απαιτήσεις σε χώρο, ισχύ και ψύξη εντός του Central Office.

Οι καμπίνες δρόμου λειτουργούν ως σημεία διανομής μεταξύ της distribution ίνας και της drop ίνας προς τον τελικό συνδρομητή. Συνήθως εξυπηρετούν από 24 έως 96 συνδρομητές, ενώ μικρότερες compact λύσεις μπορούν να εξυπηρετούν από 1 έως 24 συνδρομητές. Μπορούν να φιλοξενούν fibre closures, optical splitters και σημεία διασύνδεσης, σε αρχιτεκτονικές PON και σε point-to-point δίκτυα (Segarra et al., 2012; FTTH Council Europe, 2016). Τα Fibre Distribution Terminals (FDTs) χρησιμοποιούνται ως ενδιάμεσα σημεία συγκέντρωσης και διανομής οπτικών ινών μεταξύ feeder και distribution δικτύου, ενώ τα Fibre Access Terminals (FATs) εξυπηρετούν συνήθως μικρότερες ομάδες τελικών συνδρομητών κοντά στο σημείο πρόσβασης (Kadhim & Hussain, 2013). Στις υλοποιήσεις GPON, τα Optical Distribution Cabinets (ODCs) λειτουργούν ως σημεία πρωτεύουσας διανομής, ενώ τα Optical Distribution Points (ODPs) χρησιμοποιούνται για τη σύνδεση μικρότερων ομάδων συνδρομητών και τη διανομή των drop καλωδίων προς τα ONTs (Valentino et al., 2024).

Σε υλοποιήσεις GPON, τα Fibre Distribution Hubs (FDHs) χρησιμοποιούνται ως σημεία διανομής μεταξύ feeder και access δικτύου. Στη μελέτη των Abdullah et al. (2025), κάθε FDH φιλοξενεί διαχωριστές αναλογίας 1:32 και μπορεί να εξυπηρετεί έως περίπου 480 συνδρομητές. Τα FDHs συνδέονται με το Point of Presence (POP) μέσω feeder καλωδίων

και λειτουργούν ως κεντρικά σημεία διασύνδεσης προς τα επιμέρους Network Access Points (NAPs).

Σύμφωνα με τους Asril et al. (2023), το Optical Distribution Cabinet (ODC) λειτουργεί ως σημείο τερματισμού μεταξύ feeder και distribution καλωδίων και φιλοξενεί διαχωριστές, connectors και splicing στοιχεία. Αντίστοιχα, το Optical Distribution Point (ODP) αποτελεί το τελικό σημείο διανομής πριν από την εγκατάσταση του συνδρομητή και περιλαμβάνει splitter modules, pigtails, adapters και χώρους διαχείρισης ινών. Στην προτεινόμενη αρχιτεκτονική χρησιμοποιείται splitter 1:4 στο ODC και splitter 1:8 στο ODP.

Η ενσωμάτωση των optical splitters στις καμπίνες FTTH είναι βασική επιλογή. Στα δίκτυα PON, οι διαχωριστές χρησιμοποιούνται για την κατανομή του οπτικού σήματος σε πολλούς τελικούς χρήστες και απαιτούν ευέλικτη σύνδεση με τις ίνες που αντιστοιχούν στους συνδρομητές. Η θέση και η διάταξή τους πρέπει να υποστηρίζουν εύκολη πρόσβαση, μελλοντική προσθήκη χωρητικότητας και περιορισμό των επιτόπιων παρεμβάσεων. Κατά τον σχεδιασμό πραγματοποιείται επίσης αναλυτικός προγραμματισμός των συγκολλήσεων οπτικών ινών. Στα ODFs και στα σημεία συγκέντρωσης ινών καθορίζεται με ακρίβεια ποια ζεύγη ινών συγκολλούνται μεταξύ τους, καθώς και η θέση κάθε splice tray. Συγχρόνως, εφαρμόζονται διαδικασίες μοναδικής επισήμανσης για κάθε στοιχείο του εξοπλισμού, ώστε να διευκολύνεται η αναγνώριση, η διαχείριση, η συντήρηση και η αποκατάσταση βλαβών.

Η χρήση pre-stubbed και pre-terminated καμπινών επιταχύνει την εγκατάσταση και μειώνει την πιθανότητα σφαλμάτων στο πεδίο. Συναρμολογούνται και ελέγχονται εργοστασιακά, διαθέτουν καλωδιακό stub και patch panel, και υποστηρίζουν διασύνδεση plug-and-play. Μπορούν επίσης να συνδυαστούν με plug-and-play PON splitters, οι οποίοι εγκαθίστανται όταν απαιτείται, χωρίς πρόσθετες εργασίες συγκόλλησης στο πεδίο.

Η τελική τεκμηρίωση των “to-build” σχεδίων περιλαμβάνει καταγραφή των POPs, των ODFs, των καμπινών FTTH, των optical splitters, των splice trays και του ενεργού και παθητικού εξοπλισμού. Η τεκμηρίωση αυτή είναι απαραίτητη όχι μόνο για την κατασκευή, αλλά και για τη μελλοντική λειτουργία, συντήρηση, επέκταση και αποκατάσταση του δικτύου FTTH (FTTH Council Europe, 2016).

4.8 Ποιοτικός έλεγχος - OTDR

Ο ποιοτικός έλεγχος είναι το στάδιο που ακολουθεί την εγκατάσταση και τον τερματισμό των οπτικών ινών και αποσκοπεί στην αξιολόγηση της συνέχειας, της απόδοσης και της αξιοπιστίας της οπτικής διαδρομής. Στα δίκτυα FTTH, η αξιοπιστία της σύνδεσης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ποιότητα των συνδέσμων, των συγκολλήσεων και των παθητικών οπτικών στοιχείων. Μετά τον τερματισμό των εξωτερικών καλωδίων, κάθε ίνα πρέπει να είναι προσβάσιμη για διανομή ή σύνδεση με ενεργό εξοπλισμό. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω pigtails και patch cords, τα οποία χρησιμοποιούνται για τη διαχείριση και τη διασύνδεση των επιμέρους οπτικών κυκλωμάτων. Ο ποιοτικός έλεγχος ενός FTTH δικτύου πραγματοποιείται μέσω μετρήσεων εξασθένησης και αξιολόγησης παραμέτρων όπως το Power Link Budget, το Bit Error Rate (BER) και το Q-factor, ώστε να επιβεβαιώνεται η ορθή λειτουργία της οπτικής ζεύξης και η συμμόρφωση με τα πρότυπα GPON (Putra et al., 2024).

Στους οπτικούς συνδέσμους σημαντικές παράμετροι ποιότητας αποτελούν η απώλεια εισαγωγής (Insertion Loss – IL) και η απώλεια επιστροφής (Return Loss – RL). Η insertion loss εκφράζει την απώλεια οπτικής ισχύος στο σημείο σύνδεσης δύο ινών, ενώ η return loss εκφράζει το ποσοστό του φωτός που ανακλάται πίσω προς την πηγή. Όσο μικρότερη είναι η insertion loss και όσο μεγαλύτερη είναι η return loss, τόσο καλύτερη θεωρείται η απόδοση της οπτικής σύνδεσης και τόσο μικρότερες είναι οι συνολικές απώλειες του δικτύου (FTTH Council Europe, 2016).

Η συγκόλληση οπτικών ινών πραγματοποιείται κυρίως με δύο μεθόδους: α) fusion splicing και β) mechanical splicing. Στη fusion splicing τα δύο άκρα των ινών συντήκονται μέσω ηλεκτρικού τόξου, επιτυγχάνοντας πολύ χαμηλές απώλειες και υψηλή αξιοπιστία. Οι σύγχρονες fusion splicers με core alignment μπορούν να επιτύχουν τυπικές απώλειες μικρότερες από 0,05 dB. Στη mechanical splicing τα άκρα των ινών ευθυγραμμίζονται μηχανικά, συχνά με χρήση index matching gel, παρουσιάζοντας συνήθως μεγαλύτερες απώλειες σε σχέση με τη fusion μέθοδο. Στα παθητικά οπτικά δίκτυα χρησιμοποιούνται επίσης optical splitters, τα οποία επιτρέπουν τη διαίρεση του οπτικού σήματος προς πολλούς συνδρομητές και αποτελούν θεμελιώδες στοιχείο των αρχιτεκτονικών PON. Οι βασικές τεχνολογίες είναι οι fused biconic taper (FBT) και οι planar waveguide splitters.

Για μεγαλύτερους λόγους διαίρεσης, οι planar splitters προσφέρουν συνήθως καλύτερη ομοιομορφία κατανομής ισχύος και χαμηλότερες απώλειες.

Στη μελέτη των Asril et al. (2023), η χρήση πολλαπλών splitters αύξησε τις συνολικές απώλειες του οπτικού δικτύου. Συγκεκριμένα, branching με splitter 1:2 οδήγησε σε συνολική εξασθένηση περίπου 36.69 dB, τιμή που υπερβαίνει το επιτρεπτό όριο λειτουργίας GPON. Αντίθετα, η χρήση drop core cable για την επέκταση νέων ODPs παρήγαγε εξασθένηση περίπου 27.51 dB, διατηρώντας το δίκτυο εντός αποδεκτών προδιαγραφών. Στον ποιοτικό έλεγχο GPON δικτύων πραγματοποιούνται μετρήσεις optical attenuation και received signal power (Pr), ώστε να διαπιστωθεί αν το λαμβανόμενο σήμα παραμένει εντός των επιτρεπτών ορίων λειτουργίας. Σύμφωνα με τους Yuhani et al. (2025), το αποδεκτό όριο για GPON ONT συσκευές είναι περίπου -28 dBm.

Η αξιοπιστία του δικτύου εξαρτάται επίσης από την τήρηση διεθνών προτύπων ποιότητας για connectors, patch cords και pigtails. Τα πρότυπα IEC 61753, IEC 61755-3-1 και IEC 61755-3-2 καθορίζουν κατηγορίες απόδοσης και γεωμετρικές παραμέτρους για τους οπτικούς συνδέσμους, παρέχοντας ακριβέστερο υπολογισμό του οπτικού προϋπολογισμού και μείωση αποκλίσεων μεταξύ θεωρητικών και πραγματικών τιμών απωλειών. Πρωταρχικό εργαλείο ποιοτικού ελέγχου στα δίκτυα FTTH αποτελεί το OTDR (Optical Time Domain Reflectometer). Το OTDR χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της οπτικής εξασθένησης κατά μήκος της ίνας και για τον εντοπισμό σημείων ασυνέχειας, συγκολλήσεων, συνδέσμων, καμπών ή βλαβών. Η λειτουργία του βασίζεται στην εκπομπή οπτικών παλμών μέσα στην ίνα και στην ανάλυση του ανακλώμενου σήματος που επιστρέφει από τα διάφορα σημεία της διαδρομής.

Μέσω των μετρήσεων OTDR είναι δυνατός ο έλεγχος της ποιότητας των συγκολλήσεων, η επιβεβαίωση της συνέχειας της ίνας, η μέτρηση της συνολικής εξασθένησης της διαδρομής, ο εντοπισμός σημείων υψηλών απωλειών ή ανακλάσεων και η διάγνωση βλαβών κατά τη λειτουργία του δικτύου. Οι μετρήσεις OTDR πραγματοποιούνται κατά την ολοκλήρωση της κατασκευής όσο και κατά τη διάρκεια εργασιών συντήρησης ή αποκατάστασης βλαβών. Τα αποτελέσματα αποθηκεύονται ως μέρος της τεχνικής τεκμηρίωσης του έργου και χρησιμοποιούνται ως δεδομένα αναφοράς για μελλοντικούς ελέγχους και συγκρίσεις. Οι διαδικασίες ποιοτικού ελέγχου στα FTTH δίκτυα περιλαμβάνουν επίσης την επαλήθευση της σωστής λειτουργίας των optical splitters, των συνδέσεων OLT-ONT και της συνολικής

απόδοσης του Optical Distribution Network (ODN), ώστε να διασφαλίζεται η συμμόρφωση με τις προδιαγραφές σχεδιασμού και ο απαιτούμενος οπτικός προϋπολογισμός (Kadhim & Hussain, 2013).

Στις διαδικασίες commissioning και ενεργοποίησης του δικτύου εφαρμόζονται επιπλέον δοκιμές με power meters και OTDR, ώστε να επιβεβαιώνεται η σωστή λειτουργία των οπτικών συνδέσεων και η συμμόρφωση με τις τεχνικές προδιαγραφές. Σύμφωνα με τους Abdullah et al. (2025), οι μετρήσεις αυτές χρησιμοποιούνται τόσο για την επιβεβαίωση της ποιότητας των συνδέσεων όσο και για την τεκμηρίωση της απόδοσης του δικτύου πριν από την παράδοσή του σε λειτουργία.

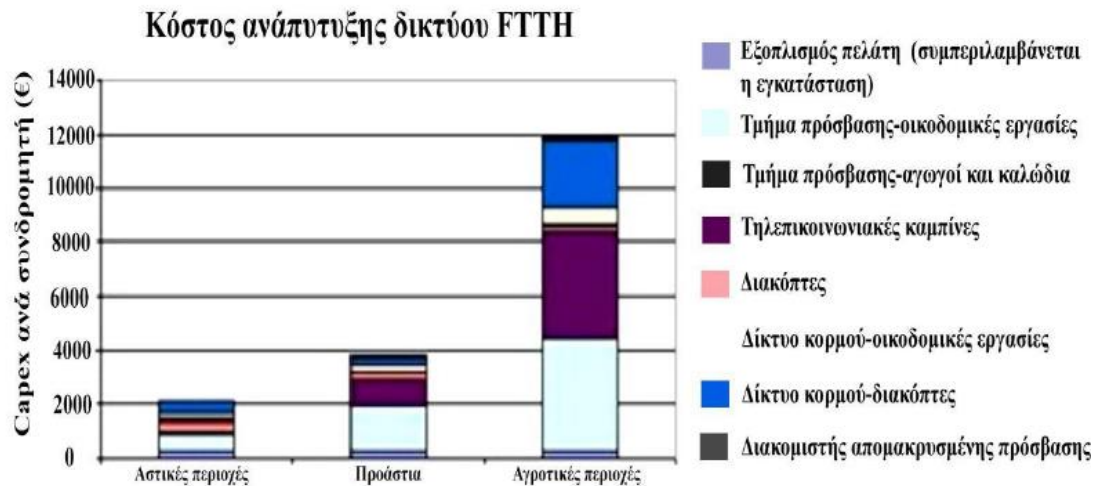
Για την αξιολόγηση της ποιότητας του FTTH δικτύου πραγματοποιούνται μετρήσεις εξασθένησης σε κάθε στάδιο της διαδρομής του οπτικού σήματος, όπως στα ODC, ODP, OTP και ROSET σημεία. Οι Asril et al. (2023) χρησιμοποίησαν Optical Power Meter (OPM) και power link budget calculations ώστε να επιβεβαιώσουν ότι οι συνολικές απώλειες παραμένουν εντός των ορίων του προτύπου ITU-T G.984 (<28 dB). Η συνολική εξασθένηση του δικτύου επηρεάζεται από το μήκος των καλωδίων, τον αριθμό των διαχωριστών, τα splice points και τα adapters. Οι Yuhani et al. (2025) επισημαίνουν ότι μεγάλα μήκη όδευσης και αυξημένος αριθμός διαχωριστών μπορούν να οδηγήσουν σε σημαντική υποβάθμιση του οπτικού σήματος. Η χρήση attenuators, optical amplifiers και βελτιστοποιημένων splitter topologies μπορεί να συμβάλει στη διατήρηση των attenuation values εντός των προδιαγραφών ITU-T, ιδιαίτερα σε σύνθετες εγκαταστάσεις μεγάλων κτιριακών συγκροτημάτων. Η ολοκληρωμένη διαδικασία ποιοτικού ελέγχου συμβάλλει στη διασφάλιση της αξιοπιστίας, της λειτουργικής σταθερότητας και της μακροχρόνιας απόδοσης του δικτύου FTTH, μειώνοντας τις πιθανότητες αστοχιών και διευκολύνοντας τη συντήρηση και τη μελλοντική επέκταση των υποδομών. Η πρακτική υλοποίηση δικτύων FTTH απαιτεί συνδυασμό αρχιτεκτονικού σχεδιασμού GPON, σωστής διαστασιολόγησης ODN, βελτιστοποίησης split ratios και λεπτομερούς τεχνικής τεκμηρίωσης των υποδομών πεδίου και των οπτικών διαδρομών (Kadhim & Hussain, 2013).

5. Τεχνοοικονομική Ανάλυση UFBB

5.1 CAPEX

Το κόστος κεφαλαίου (Capital Expenditure – CAPEX) θεωρείται από τους σημαντικότερους οικονομικούς δείκτες κατά τον σχεδιασμό και την υλοποίηση δικτύων FTTH. Περιλαμβάνει το σύνολο των επενδύσεων που απαιτούνται για την κατασκευή, επέκταση και αναβάθμιση των σχετικών υποδομών και αφορά δαπάνες που συνδέονται με την απόκτηση ή δημιουργία πάγιων στοιχείων ενεργητικού, όπως οπτικές ίνες, τηλεπικοινωνιακές εγκαταστάσεις και τεχνολογικός εξοπλισμός. Έργα αυτού του τύπου χαρακτηρίζονται από υψηλές κεφαλαιακές ανάγκες, δεδομένου ότι προϋποθέτουν σημαντικούς οικονομικούς πόρους για την εγκατάσταση των παθητικών και ενεργών τμημάτων του συστήματος πρόσβασης. Οι εργασίες πολιτικού μηχανικού είναι βασική συνιστώσα του CAPEX. Οι εκσκαφές, οι μικροτάφροι, οι αποκαταστάσεις οδοστρώματος και οι εργασίες εγκατάστασης των οπτικών καλωδίων αντιπροσωπεύουν το μεγαλύτερο μέρος της επένδυσης. Σύμφωνα με σχετικές μελέτες, οι συγκεκριμένες διεργασίες μπορούν να αντιστοιχούν έως και στο 75% του συνολικού κόστους ανάπτυξης ενός FTTH, στοιχείο που καθιστά κρίσιμη τη βελτιστοποίηση των οδεύσεων και την αξιοποίηση υφιστάμενων υποδομών (Δαλατζής, 2017).

Το ύψος του CAPEX επηρεάζεται από τα γεωγραφικά και πολεοδομικά χαρακτηριστικά της περιοχής παρέμβασης. Στα αστικά κέντρα, η υψηλή πυκνότητα συνδρομητών οδηγεί σε χαμηλότερο κόστος ανά χρήστη, καθώς οι αποστάσεις όδευσης είναι μικρότερες. Στις ημιαστικές και κυρίως στις αγροτικές περιοχές απαιτούνται μεγαλύτερα μήκη καλωδίων, αγωγών και οδεύσεων, γεγονός που αυξάνει σημαντικά τις δαπάνες ανά συνδρομητή. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 5-1, το κόστος ανάπτυξης FTTH κλιμακώνεται σημαντικά από τις αστικές προς τις αγροτικές περιοχές, κυρίως λόγω της αύξησης των έργων πολιτικού μηχανικού (Δαλατζής, 2017).



Εικόνα 5-0.1 Κόστος ανάπτυξης δικτύου FTTH σε αστικές, προαστιακές και αγροτικές περιοχές
(Πηγή: Δαλατζής, 2017).

Το συνολικό κόστος επηρεάζεται, επίσης, από την αρχιτεκτονική του δικτύου, τις τοπικές συνθήκες εγκατάστασης, τις απαιτήσεις αδειοδότησης και τη δυνατότητα αξιοποίησης υφιστάμενων υποδομών. Η χρήση τεχνικών όπως οι μικροσωληνώσεις, η εμφύσηση οπτικών ινών (blown fibre) και η μέθοδος μικροτάφρου μπορεί να συμβάλει στη μείωση των δαπανών ανάπτυξης και στην επιτάχυνση της ολοκλήρωσης του έργου. Η επαναχρησιμοποίηση υφιστάμενων αγωγών, φρεατίων ή εναέριων υποδομών περιορίζει την ανάγκη νέων εκσκαφών και το επενδυτικό κεφάλαιο (FTTH Council Europe, 2016).

Η ακριβής εκτίμηση του CAPEX αποτελεί βασική προϋπόθεση για την αξιολόγηση της οικονομικής βιωσιμότητας ενός έργου FTTH και για τον αποτελεσματικό προγραμματισμό επενδύσεων μεγάλης κλίμακας, όπως το έργο Ultra-Fast Broadband (UFBB). Η σωστή αποτύπωση των υποδομών, των τεχνικών χαρακτηριστικών και των κατασκευαστικών εργασιών επιτρέπει την ακριβέστερη πρόβλεψη του επενδυτικού κόστους και συμβάλλει στη λήψη ορθολογικών αποφάσεων κατά τον σχεδιασμό και την ολοκλήρωση του δικτύου. Η κατανομή του επενδυτικού κόστους αποδεικνύει ότι οι εργασίες πολιτικού μηχανικού αποτελούν τον κυριότερο παράγοντα διαμόρφωσης του CAPEX στα δίκτυα FTTH. Οι εκσκαφές, οι σωληνώσεις, η αποκατάσταση οδοστρωμάτων και οι εργασίες εγκατάστασης της παθητικής υποδομής απορροφούν το μεγαλύτερο ποσοστό της επένδυσης, ενώ ο ενεργός τηλεπικοινωνιακός εξοπλισμός αντιστοιχεί σε μικρότερο ποσοστό του συνολικού κόστους. Η συγκεκριμένη κατανομή υπογραμμίζει τη σημασία του σωστού σχεδιασμού των οδεύσεων, της αξιοποίησης υφιστάμενων υποδομών και της επιλογής κατάλληλων

τεχνικών εγκατάστασης, ώστε να περιορίζεται το απαιτούμενο επενδυτικό κεφάλαιο χωρίς να επηρεάζεται η ποιότητα της υποδομής. Η ίδια προσέγγιση εφαρμόζεται και στο έργο UFBB, όπου η βελτιστοποίηση των πολιτικών ανάπτυξης της παθητικής υποδομής αποτελεί βασικό παράγοντα οικονομικής βιωσιμότητας (Χριστοδουλοπούλου, 2021).

5.2 OPEX

Το λειτουργικό κόστος (Operational Expenditures – OPEX) στα δίκτυα FTTH αφορά το σύνολο των δαπανών που σχετίζονται με τη λειτουργία, διαχείριση, τεχνική υποστήριξη και συντήρηση της υποδομής σε όλη τη διάρκεια ζωής της. Αποτελεί μία από τις παραμέτρους που επηρεάζουν τη μακροχρόνια βιωσιμότητα ενός έργου NGA, δεδομένου ότι συνδέεται άρρηκτα με την αρχιτεκτονική του δικτύου, τις τεχνολογίες ανάπτυξης και την ποιότητα του συνολικού σχεδιασμού. Κατά τη φάση σχεδιασμού ενός FTTH δικτύου δεν αξιολογούνται μόνο οι αρχικές κεφαλαιουχικές δαπάνες (CAPEX), αλλά και οι μελλοντικές λειτουργικές απαιτήσεις που σχετίζονται με τη συντήρηση της υποδομής. Η επιλογή της κατάλληλης αρχιτεκτονικής πρόσβασης και της μεθοδολογίας ανάπτυξης καθορίζει τις απαιτήσεις λειτουργίας και την αξιοπιστία του δικτύου. Για τον λόγο αυτό, η βελτιστοποίηση του συνολικού κόστους επιτυγχάνεται μέσω του συνδυασμού αποδοτικών τεχνολογικών λύσεων και κατάλληλων πρακτικών ανάπτυξης της υποδομής (FTTH Council Europe, 2016).

Η σημασία της σωστής σχεδίασης αναδεικνύεται κυρίως στο στάδιο του δικτυακού προγραμματισμού. Υποδομές που έχουν σχεδιαστεί ανεπαρκώς ενδέχεται να προκαλέσουν αυξημένες λειτουργικές απαιτήσεις και δυσκολίες κατά τη φάση λειτουργίας του δικτύου, οδηγώντας σε αυξημένες ανάγκες συντήρησης και αποκατάστασης βλαβών. Μια αποτελεσματική διαδικασία σχεδιασμού μπορεί να επιφέρει σημαντική εξοικονόμηση κατά την ανάπτυξη και κατά τη μακροχρόνια λειτουργία του FTTH δικτύου. Οι λειτουργικές απαιτήσεις επηρεάζονται από τα χαρακτηριστικά της γεωγραφικής περιοχής και της χρησιμοποιούμενης υποδομής. Σε πυκνοκατοικημένες αστικές περιοχές οι ανάγκες συντήρησης διαφοροποιούνται σε σχέση με αγροτικές περιοχές, όπου χρησιμοποιούνται συχνότερα εναέριες εγκαταστάσεις και μεγαλύτερα μήκη καλωδιώσεων. Οι διαφορετικές τεχνικές ανάπτυξης επηρεάζουν τη σχέση μεταξύ απαιτήσεων εργασίας και υλικών, οδηγώντας σε διαφορετικές ανάγκες διαχείρισης και συντήρησης του δικτύου. Στις κατηγορίες λειτουργικών δαπανών περιλαμβάνονται οι εργασίες πολιτικού μηχανικού, οι

εγκαταστάσεις και οι μετρήσεις δικτύου, οι διαδικασίες συντήρησης, η ενεργειακή κατανάλωση του ενεργού εξοπλισμού, καθώς και οι δαπάνες λειτουργίας των σημείων παρουσίας (Points of Presence – POPs) και των σημείων συγκέντρωσης οπτικών ινών (Fibre Concentration Points – FCPs). Επιπλέον, σημαντικό μέρος του OPEX συνδέεται με δικαιώματα διέλευσης, μισθώσεις υποδομών και διαδικασίες αδειοδότησης. Προτεραιότητα δίνεται στη συντήρηση του ενεργού εξοπλισμού και των συστημάτων λειτουργικής υποστήριξης του δικτύου. Το ενεργό επίπεδο αναφέρεται στον ηλεκτρονικό εξοπλισμό και τις πλατφόρμες διαχείρισης που απαιτούνται για την εμπορική λειτουργία της FTTH υποδομής. Ο φορέας λειτουργίας είναι υπεύθυνος για τον σχεδιασμό, τη διαχείριση και τη συντήρηση του ενεργού εξοπλισμού, γεγονός που καθιστά κρίσιμες τις διαδικασίες παρακολούθησης, τεχνικής υποστήριξης και εξυπηρέτησης πελατών (FTTH Council Europe, 2016).

Η λειτουργική αποδοτικότητα αποτελεί βασικό παράγοντα περιορισμού των λειτουργικών δαπανών και διασφάλισης υψηλής ποιότητας υπηρεσιών προς τους συνδρομητές. Υπό αυτό το πρίσμα, εφαρμόζονται τυποποιημένες διαδικασίες λειτουργίας, εποπτείας και συντήρησης, με στόχο την βέλτιστη δυνατή αξιοποίηση των διαθέσιμων πόρων και τη μείωση του χρόνου αποκατάστασης βλαβών. Καθοριστικό ρόλο διαδραματίζει επίσης η ύπαρξη ολοκληρωμένης τεχνικής τεκμηρίωσης του δικτύου. Η παθητική υποδομή των FTTH δικτύων χαρακτηρίζεται από ιδιαίτερα μεγάλη διάρκεια ζωής, η οποία συχνά υπερβαίνει τα 25 έτη. Ωστόσο, ο ενεργός εξοπλισμός απαιτεί περιοδικές αναβαθμίσεις κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου, δημιουργώντας συνεχή ανάγκη για τεχνική υποστήριξη και εργασίες συντήρησης. Η λειτουργία ενός FTTH δικτύου περιλαμβάνει οργανωτικές δραστηριότητες όπως η εξυπηρέτηση πελατών, η τεχνική υποστήριξη και η παροχή λιανικών υπηρεσιών, οι οποίες συνεισφέρουν στο συνολικό OPEX του δικτύου (FTTH Council Europe, 2016).

Η λειτουργία και συντήρηση των FTTH δικτύων επηρεάζεται και από τις διαδικασίες παρακολούθησης των Συμφωνιών Επιπέδου Υπηρεσιών (Service Level Agreements – SLA) που διέπουν τη συνεργασία μεταξύ παρόχων χονδρικής και λιανικής. Παρότι μεγάλο μέρος της διεθνούς βιβλιογραφίας επικεντρώνεται κυρίως στη μείωση του αρχικού επενδυτικού κόστους, ιδιαίτερη ενδιαφέρον παρουσιάζουν και οι λειτουργικές δαπάνες που σχετίζονται με τη διαχείριση βλαβών, τις τεχνικές παρεμβάσεις και την τήρηση των SLA. Οι Mazzei et al. (2023) μελέτησαν τη σχέση μεταξύ κατωφλίων εξασθένησης, ποιότητας υπηρεσίας και

λειτουργικών δαπανών σε πραγματικό δίκτυο GPON FTTH του ιταλικού παρόχου χονδρικής Open Fiber. Η μελέτη εξετάζει τον τρόπο με τον οποίο τα όρια αποδεκτής εξασθένησης επηρεάζουν τον αριθμό των αναφορών βλαβών (Trouble Tickets) που υποβάλλονται από τους παρόχους λιανικής και κατ' επέκταση τις συνολικές λειτουργικές απαιτήσεις του δικτύου. Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε σε FTTH υποδομή μήκους περίπου 11 km με αρχιτεκτονική GPON και λόγο διαχωρισμού 1:64. Για τις δοκιμές χρησιμοποιήθηκαν τερματικά οπτικών γραμμών (Optical Line Terminals – OLT), τερματικά οπτικού δικτύου (Optical Network Terminals – ONT), όργανα μέτρησης ανακλάσεων οπτικής ισχύος στο πεδίο του χρόνου (Optical Time-Domain Reflectometers – OTDR) και μεταβλητοί οπτικοί εξασθενητές (Variable Optical Attenuators – VOA), προκειμένου να προσομοιωθούν πραγματικές συνθήκες υποβάθμισης του οπτικού σήματος υπό διαφορετικά επίπεδα φόρτου δικτύου. Τα αποτελέσματα της μελέτης κατέδειξαν ότι το GPON δίκτυο μπορούσε να λειτουργήσει χωρίς ουσιαστική υποβάθμιση της απόδοσης έως επίπεδα εξασθένησης περίπου 37,4 dB, χωρίς εμφάνιση packet loss ή μεταβολή του throughput. Μεταξύ 37,4 dB και 40,3 dB παρατηρήθηκε σταδιακή υποβάθμιση της σύνδεσης, ενώ σε υψηλότερα επίπεδα εμφανίστηκε πλήρης απώλεια επικοινωνίας μεταξύ OLT και ONT. Με βάση τα αποτελέσματα αυτά, οι Mazzei et al. (2023) διατείνονται ότι η αναπροσαρμογή των κατωφλίων εξασθένησης στα SLA μπορεί να περιορίσει τον αριθμό περιττών Trouble Tickets για γραμμές που εξακολουθούν να λειτουργούν αποδεκτά. Η μείωση αυτή επηρεάζει άμεσα το συνολικό OPEX, αφού περιορίζονται οι διαδικασίες απομακρυσμένης διάγνωσης, οι επιτόπιες τεχνικές παρεμβάσεις, οι λειτουργίες των κέντρων διαχείρισης δικτύου και οι πιθανές οικονομικές ρήτρες SLA.

Η μελέτη παρουσιάζει επίσης αναλυτικό μοντέλο λειτουργικού κόστους για τη διαχείριση καταγραφών βλαβών. Στο μοντέλο συνυπολογίζονται δαπάνες που σχετίζονται με το προσωπικό του Κέντρου Λειτουργίας και Διαχείρισης Δικτύου (Network Operation Center – NOC), τα τεχνικά συνεργεία πεδίου, τα τηλεφωνικά κέντρα εξυπηρέτησης, τους χρόνους αποκατάστασης βλαβών και τις πιθανές ρήτρες που προκύπτουν από την μη τήρηση των SLA προς τους παρόχους λιανικής. Για τον υπολογισμό του συνολικού κόστους χρησιμοποιούνται παράμετροι όπως το Ισοδύναμο Πλήρους Απασχόλησης (Full-Time Equivalent – FTE), ο μέσος χρόνος αποκατάστασης και το ποσοστό επιτόπιων τεχνικών παρεμβάσεων. Σημαντικό εύρημα της μελέτης αποτελεί η εκθετική αύξηση του αριθμού αναφορών βλαβών όταν τα κατώφλια εξασθένησης ορίζονται σε ιδιαίτερα αυστηρά επίπεδα. Παραδείγματος χάριν, για πελατειακή βάση ενός εκατομμυρίου συνδρομητών,

όριο εξασθένησης ίσο με το 95% της μέγιστης αποδεκτής εξασθένησης οδηγεί σε περίπου 7.500 καταγραφές βλαβών ετησίως. Η μείωση του ορίου στο 85% αυξάνει τις περιπτώσεις σε περισσότερες από 55.000 ετησίως. Η αύξηση αυτή επιβαρύνει τις λειτουργικές απαιτήσεις του δικτύου, καθώς αυξάνονται οι ανάγκες σε προσωπικό, τεχνικές παρεμβάσεις και διαδικασίες παρακολούθησης και τήρησης των SLA. Η αποτελεσματική διαχείριση SLA αποτελεί εργαλείο λειτουργικής βελτιστοποίησης των FTTH δικτύων. Η προσαρμογή των λειτουργικών ορίων στις πραγματικές συνθήκες της υποδομής μπορεί να περιορίσει το OPEX χωρίς να επηρεάζεται η ποιότητα υπηρεσίας προς τον τελικό χρήστη. Συγχρόνως, η μείωση των περιττών τεχνικών παρεμβάσεων συμβάλλει στη βελτίωση της λειτουργικής αποδοτικότητας και στη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης και των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που συνδέονται με τις μετακινήσεις συνεργείων και τις επαναλαμβανόμενες διαδικασίες αποκατάστασης βλαβών (Mazzei et al., 2023).

Η τεχνοοικονομική διαχείριση των FTTH δικτύων δεν εξαρτάται αποκλειστικά από το αρχικό επενδυτικό κόστος ανάπτυξης, αλλά και από τη μακροχρόνια διαχείριση των λειτουργικών διαδικασιών, των SLA και των πολιτικών συντήρησης. Πέραν της τεχνικής αξιοπιστίας, ιδιαίτερη σημασία αποκτά η προληπτική διαχείριση της λειτουργίας του δικτύου, μέσω της συνεχούς παρακολούθησης της κατάστασης των οπτικών συνδέσεων, της έγκαιρης διάγνωσης πιθανών βλαβών και της βελτιστοποίησης των διαδικασιών αποκατάστασης. Η αποτελεσματική διαχείριση των Συμφωνιών Επιπέδου Υπηρεσιών (SLAs) περιορίζει τις άσκοπες τεχνικές παρεμβάσεις, βελτιώνει την αξιοποίηση των διαθέσιμων πόρων και συμβάλλει στη μείωση του συνολικού λειτουργικού κόστους. Κατά συνέπεια, η προσαρμογή των λειτουργικών παραμέτρων στις πραγματικές επιδόσεις της υποδομής μπορεί να ενισχύσει τη συνολική οικονομική αποδοτικότητα μεγάλων έργων ανάπτυξης FTTH, όπως το UFBB (Χριστοδουλοπούλου, 2021).

5.3 Μοντέλο κόστους FTTH

Η ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου μοντέλου κόστους για δίκτυα Fiber to the Home (FTTH) αποτελεί αναπόσπαστο στοιχείο της τεχνοοικονομικής ανάλυσης δικτύων νέας γενιάς. Μπορεί να εκτιμήσει τις επενδυτικές και λειτουργικές απαιτήσεις ενός έργου, να συγκρίνει εναλλακτικές αρχιτεκτονικές και να αξιολογήσει την οικονομική βιωσιμότητα της επένδυσης. Σύμφωνα με το FTTH Council Europe (2016), η μοντελοποίηση του κόστους πρέπει να ξεκινά ήδη από τα αρχικά στάδια του στρατηγικού σχεδιασμού και να επικαιροποιείται κατά τη διάρκεια του λεπτομερούς σχεδιασμού, ώστε να υποστηρίζει τις

τεχνικές και επιχειρησιακές αποφάσεις ανάπτυξης του δικτύου. Ένα μοντέλο εκτίμησης κόστους για δίκτυα FTTH βασίζεται αρχικά σε μία απλοποιημένη προσέγγιση, σύμφωνα με την οποία το συνολικό κόστος προκύπτει από το γινόμενο του μοναδιαίου κόστους κάθε στοιχείου επί την απαιτούμενη ποσότητά του. Ωστόσο, για να μπορεί να αποτυπώσει ρεαλιστικά τις απαιτήσεις ενός τέτοιου έργου, το μοντέλο πρέπει να περιλαμβάνει αναλυτικά στοιχεία σχετικά με τη δομή του δικτύου, τη γεωγραφική περιοχή ανάπτυξης, τις τεχνολογίες εγκατάστασης και τις διαθέσιμες υποδομές. Στο πλαίσιο αυτό, λαμβάνονται υπόψη τα κεφαλαιουχικά (CAPEX) και τα λειτουργικά κόστη (OPEX).

Η αρχιτεκτονική του δικτύου επηρεάζει το τελικό κόστος ανάπτυξης. Οι δύο βασικές αρχιτεκτονικές FTTH είναι η Point-to-Point (P2P) και η Point-to-Multipoint (P2MP/GPON). Στην αρχιτεκτονική GPON χρησιμοποιούνται παθητικοί οπτικοί διαχωριστές, μέσω των οποίων μία κοινή οπτική ίνα τροφοδοσίας εξυπηρετεί πολλαπλούς συνδρομητές, μειώνοντας τις απαιτήσεις σε οπτικές ίνες και ενεργό εξοπλισμό. Στην αρχιτεκτονική P2P κάθε συνδρομητής διαθέτει αποκλειστική οπτική ίνα από τον κόμβο πρόσβασης μέχρι το τελικό σημείο σύνδεσης, γεγονός που αυξάνει το κόστος ανάπτυξης του δικτύου, αλλά παρέχει μεγαλύτερη χωρητικότητα και ευελιξία. Οι Havic & Mikac (2011) έδειξαν ότι η αρχιτεκτονική GPON παρουσιάζει χαμηλότερο κόστος ανάπτυξης σε σχέση με την P2P, ιδιαίτερα σε αστικές και ημιαστικές περιοχές.

Σημαντική παράμετρος του μοντέλου εκτίμησης κόστους αποτελεί η κατασκευή τάφρων και γενικότερα οι εργασίες πολιτικού μηχανικού. Σύμφωνα με τις μελέτες, το μεγαλύτερο ποσοστό του συνολικού κόστους κεφαλαίου (CAPEX) στα δίκτυα FTTH σχετίζεται με τις εκσκαφές, τις αποκαταστάσεις οδοστρώματος, την εγκατάσταση σωληνώσεων και τις υποδομές διέλευσης οπτικών ινών. Οι Havic & Mikac (2011) αναφέρουν ότι οι εργασίες κατασκευής τάφρων μπορούν να αντιστοιχούν περίπου στο 48% του συνολικού κόστους στις αστικές περιοχές, στο 54% στις ημιαστικές και έως και στο 84% στις αγροτικές περιοχές, λόγω των αυξημένων αποστάσεων μεταξύ των συνδρομητών. Για τον λόγο αυτό, η αξιοποίηση υφιστάμενων αγωγών και υποδομών διέλευσης, η χρήση μικροσωληνώσεων και τεχνικών μικροτάφρου (microtrenching), καθώς και ο συνδυασμός των έργων οπτικών ινών με άλλα έργα πολιτικού μηχανικού μπορούν να μειώσουν σημαντικά το συνολικό κόστος υλοποίησης.

Η γεωγραφική περιοχή ανάπτυξης επηρεάζει επίσης καθοριστικά τη διαμόρφωση του μοντέλου κόστους ενός δικτύου FTTH. Η πληθυσμιακή πυκνότητα, η μορφολογία του οδικού δικτύου, οι αποστάσεις μεταξύ των συνδρομητών και η διαθεσιμότητα υφιστάμενων υποδομών καθορίζουν το κόστος ανά συνδρομητή και τη συνολική οικονομική βιωσιμότητα του έργου. Η χρήση ΓΣΠ και γεωχωρικών μεθόδων ανάλυσης επιτρέπει τη βελτιστοποίηση των οδεύσεων, της χωροθέτησης των οπτικών διαχωριστών και των κόμβων συγκέντρωσης, οδηγώντας σε αποτελεσματικότερη αξιοποίηση των διαθέσιμων πόρων και περιορισμό του συνολικού κόστους ανάπτυξης.

Στην Ευρωπαϊκή Ένωση, η πλέον διαδεδομένη μεθοδολογία κοστολόγησης υποδομών πρόσβασης νέας γενιάς είναι το μοντέλο μακροπρόθεσμου επαυξητικού κόστους εκ των κάτω προς τα άνω (Bottom-Up Long Run Incremental Cost Plus - BU-LRIC+). Βασίζεται στον υπολογισμό του κόστους που θα είχε ένας υποθετικός αποδοτικός πάροχος για την ανάπτυξη ενός σύγχρονου δικτύου FTTH, λαμβάνοντας υπόψη τόσο το CAPEX όσο και το OPEX του έργου. Οι Ioannou et al. (2020), εξέτασαν διαφορετικές προσεγγίσεις σχεδιασμού, όπως οι αρχιτεκτονικές scorched node και scorched earth. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η προσέγγιση scorched earth η οποία στηρίζεται σε πλήρη επανασχεδίαση του δικτύου χωρίς περιορισμούς από υφιστάμενες υποδομές, μπορεί να μειώσει το συνολικό CAPEX κατά περίπου 16,5% και το κόστος ανά γραμμή κατά περίπου 13,5%.

Η επιλογή του κατάλληλου μοντέλου κοστολόγησης εξαρτάται από τον σκοπό της ανάλυσης. Τα μοντέλα τύπου BU-LRIC+ χρησιμοποιούνται κυρίως από τις ρυθμιστικές αρχές για τον καθορισμό τιμών χονδρικής και την αξιολόγηση της αποδοτικότητας των επενδύσεων, ενώ τα επιχειρησιακά μοντέλα των παρόχων επικεντρώνονται περισσότερο στην εκτίμηση της οικονομικής βιωσιμότητας συγκεκριμένων έργων ανάπτυξης. Συνεπώς, η μοντελοποίηση του κόστους αποτελεί ένα δυναμικό εργαλείο λήψης αποφάσεων που υποστηρίζει τον στρατηγικό σχεδιασμό και τη βελτιστοποίηση της υλοποίησης των δικτύων FTTH.

Σημαντική συμβολή στην τεχνοοικονομική αξιολόγηση FTTH δικτύων παρουσιάζει και η μεθοδολογία TONIC-ECOSYS, η οποία χρησιμοποιήθηκε από τον Rokkas (2011) για την ανάλυση NGA επενδύσεων. Η συγκεκριμένη προσέγγιση συνδυάζει τεχνικά, οικονομικά και εμπορικά δεδομένα, λαμβάνοντας υπόψη παραμέτρους όπως η εξέλιξη της ζήτησης, η διείσδυση υπηρεσιών, τα έσοδα ανά χρήστη, το κόστος συντήρησης και το προεξοφλητικό

επιτόκιο. Η οικονομική αξιολόγηση πραγματοποιείται μέσω χρηματοοικονομικών δεικτών όπως η Καθαρή Παρούσα Αξία (NPV), ο Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης (IRR) και η περίοδος απόσβεσης της επένδυσης. Σύμφωνα με τη μελέτη, οι εργασίες του πολιτικού μηχανικού μπορούν να αντιστοιχούν στο 65%–72% του συνολικού CAPEX, γεγονός που αναδεικνύει τη σημασία της σωστής διαδικασίας σχεδιασμού και της αξιοποίησης υφιστάμενων υποδομών για τη μείωση του κόστους ανάπτυξης. Η διεθνής πρακτική προβλέπει ότι τα μοντέλα τεχνοοικονομικής αξιολόγησης ολοκληρώνονται με χρηματοοικονομικούς δείκτες, όπως η Καθαρή Παρούσα Αξία (NPV), ο Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης (IRR), η περίοδος αποπληρωμής της επένδυσης (Payback Period) και ο Δείκτης Κερδοφορίας (Profitability Index – PI). Οι δείκτες αυτοί επιτρέπουν την εκτίμηση της οικονομικής βιωσιμότητας της επένδυσης υπό διαφορετικά επενδυτικά σενάρια. Η ανάπτυξη υποδομών FTTH συνδέεται άμεσα και με την εξέλιξη των δικτύων 5G. Σύμφωνα με τους Bouras et al. (2015), οι οπτικές ίνες αποτελούν υποδομή για την υλοποίηση συνδέσεων οπισθόζευξης (backhaul) και εμπρόσθιας ζεύξης (fronthaul) υψηλής χωρητικότητας, οι οποίες απαιτούνται για τη λειτουργία δικτύων μικροκυψελών και Κατανεμημένων Συστημάτων Κεραίας (Distributed Antenna Systems – DAS).

Η ανάπτυξη ενός μοντέλου κόστους για δίκτυα FTTH προϋποθέτει τη συνδυαστική αξιολόγηση τεχνικών, γεωχωρικών και οικονομικών παραμέτρων. Η επιλογή αρχιτεκτονικής, η πυκνότητα δόμησης, οι τεχνικές εγκατάστασης, η αξιοποίηση υφιστάμενων υποδομών και η μελλοντική ζήτηση υπηρεσιών επηρεάζουν καθοριστικά τόσο το επενδυτικό κόστος όσο και τη μακροχρόνια λειτουργική αποδοτικότητα του δικτύου. Για μεγάλα έργα όπως το UFBB, η εφαρμογή ολοκληρωμένων μοντέλων κοστολόγησης συμβάλλει στη βελτιστοποίηση των επενδυτικών αποφάσεων και στη διασφάλιση της οικονομικής βιωσιμότητας της επένδυσης.

5.4 Ανάλυση ρίσκων ΣΔΙΤ

Η διαχείριση κινδύνων αποτελεί θεμελιώδες στοιχείο του σχεδιασμού και της υλοποίησης έργων Σύμπραξης Δημόσιου και Ιδιωτικού Τομέα (ΣΔΙΤ), καθώς η επιτυχία ενός έργου εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την έγκαιρη αναγνώριση, αξιολόγηση και κατανομή των πιθανών αβεβαιοτήτων μεταξύ των εμπλεκόμενων μερών. Ως κίνδυνος ορίζεται κάθε γεγονός ή παράγοντας που μπορεί να επηρεάσει αρνητικά την επίτευξη των στόχων ενός

έργου ως προς το κόστος, το χρονοδιάγραμμα, την ποιότητα ή τη λειτουργική του απόδοση (European Commission, 2003).

Τα έργα ΣΔΙΤ χαρακτηρίζονται από αυξημένη πολυπλοκότητα λόγω της μακροχρόνιας διάρκειας των συμβάσεων, του μεγάλου αριθμού εμπλεκόμενων φορέων και των σημαντικών χρηματοδοτικών απαιτήσεων που συνεπάγονται. Για τον λόγο αυτό, η ανάλυση ρίσκου αποτελεί κρίσιμη συνιστώσα για τη βιωσιμότητα και τη χρηματοδοτική επιτυχία των έργων (Ng & Loosemore, 2007). Σύμφωνα με τους Li et al. (2005), οι αβεβαιότητες στα έργα ΣΔΙΤ μπορούν να ταξινομηθούν σε τρία επίπεδα. Το πρώτο επίπεδο (macro level) περιλαμβάνει εξωγενείς παράγοντες που σχετίζονται με πολιτικές, οικονομικές, κοινωνικές και νομοθετικές μεταβολές. Το δεύτερο επίπεδο (meso level) αφορά ζητήματα που συνδέονται άμεσα με το έργο, όπως ο κίνδυνος μελέτης, κατασκευής, λειτουργίας και ζήτησης. Τέλος, το τρίτο επίπεδο (micro level) περιλαμβάνει θέματα που προκύπτουν από τις σχέσεις και τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των συμμετεχόντων φορέων κατά τη διάρκεια της σύμβασης.

Οι σημαντικότερες κατηγορίες κινδύνων που εμφανίζονται σε έργα ΣΔΙΤ είναι ο κατασκευαστικός κίνδυνος, ο κίνδυνος διαθεσιμότητας και ο κίνδυνος ζήτησης. Ο κατασκευαστικός κίνδυνος αφορά καθυστερήσεις, υπερβάσεις προϋπολογισμού, κατασκευαστικές αστοχίες ή αποκλίσεις από τις τεχνικές προδιαγραφές και συνήθως αναλαμβάνεται από τον ιδιωτικό φορέα. Ο κίνδυνος διαθεσιμότητας σχετίζεται με την ικανότητα του αναδόχου να διατηρεί το έργο σε πλήρη λειτουργία και να παρέχει υπηρεσίες σύμφωνα με τα συμφωνημένα επίπεδα ποιότητας. Αντίστοιχα, ο κίνδυνος ζήτησης αφορά πιθανές αποκλίσεις μεταξύ της αναμενόμενης και της πραγματικής χρήσης του έργου κατά τη φάση λειτουργίας, επηρεάζοντας άμεσα τα προβλεπόμενα έσοδα (Στύλλα, 2014).

Η ποσοτικοποίηση των παραπάνω κινδύνων αποτελεί βασικό στάδιο της τεχνοοικονομικής αξιολόγησης μεγάλων έργων υποδομής. Κάθε κατηγορία κινδύνου μπορεί να επηρεάσει διαφορετικά το επενδυτικό κόστος (CAPEX), τις λειτουργικές δαπάνες (OPEX), τη διάρκεια υλοποίησης και τελικά τους χρηματοοικονομικούς δείκτες της επένδυσης, όπως η Καθαρή Παρούσα Αξία (NPV) και ο Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης (IRR). Για τον λόγο αυτό, η σύγχρονη διεθνής πρακτική δεν περιορίζεται μόνο στην ποιοτική αναγνώριση των κινδύνων, αλλά προχωρά και στην αξιολόγηση της πιθανότητας εμφάνισης και του

μεγέθους των επιπτώσεών τους, ώστε να υποστηρίζεται αποτελεσματικότερα η διαδικασία λήψης αποφάσεων.

Ο χρηματοοικονομικός κίνδυνος σχετίζεται με τη δυνατότητα εξασφάλισης επαρκούς χρηματοδότησης και με τη βιωσιμότητα των ταμειακών ροών του έργου. Στα έργα ΣΔΙΤ, όπου μεγάλο μέρος του επενδυτικού κόστους καλύπτεται μέσω τραπεζικού δανεισμού, η μεταβολή των επιτοκίων, η δυσκολία πρόσβασης σε κεφάλαια ή η αδυναμία εξυπηρέτησης του χρέους μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά την οικονομική βιωσιμότητα της επένδυσης. Εκτός από τους παραπάνω κινδύνους, ιδιαίτερη βαρύτητα έχουν οι ρυθμιστικοί και νομικοί κίνδυνοι, οι οποίοι σχετίζονται με μεταβολές του θεσμικού πλαισίου, αλλαγές στη νομοθεσία ή δυσκολίες στην εφαρμογή των συμβατικών υποχρεώσεων. Πολιτικές μεταβολές ή αλλαγές στις προτεραιότητες της δημόσιας διοίκησης μπορούν να επηρεάσουν την πορεία και τη λειτουργία ενός έργου ΣΔΙΤ, δημιουργώντας πρόσθετες αβεβαιότητες για τους επενδυτές (Στύλλα, 2014).

Οι περιβαλλοντικοί και αρχαιολογικοί κίνδυνοι εμφανίζονται συχνά σε έργα υποδομών μεγάλης κλίμακας. Η ανακάλυψη αρχαιολογικών ευρημάτων, η ανάγκη λήψης πρόσθετων περιβαλλοντικών μέτρων ή απρόβλεπτες γεωτεχνικές συνθήκες μπορούν να οδηγήσουν σε καθυστερήσεις και αύξηση του κόστους κατασκευής. Η κοινωνική αποδοχή του έργου επηρεάζει καθοριστικά την ομαλή υλοποίησή του, καθώς αντιδράσεις τοπικών κοινωνιών ή φορέων μπορούν να προκαλέσουν σημαντικές καθυστερήσεις ή τροποποιήσεις στον αρχικό σχεδιασμό. Τέλος, αξίζει να αναφερθούν οι κίνδυνοι ανωτέρας βίας, όπως φυσικές καταστροφές, σεισμοί, πλημμύρες ή άλλα απρόβλεπτα γεγονότα τα οποία βρίσκονται εκτός του ελέγχου τόσο του δημόσιου όσο και του ιδιωτικού τομέα. Για την αντιμετώπιση τέτοιων περιστατικών προβλέπονται συνήθως ειδικοί μηχανισμοί κατανομής κινδύνου και διαδικασίες αναπροσαρμογής των συμβάσεων (Στύλλα, 2014).

Βασική αρχή των έργων ΣΔΙΤ είναι η κατανομή κάθε κινδύνου στο μέρος που διαθέτει τη μεγαλύτερη ικανότητα να τον διαχειριστεί αποτελεσματικά και με το μικρότερο δυνατό κόστος (European Commission, 2003). Στην πράξη, οι κίνδυνοι που σχετίζονται άμεσα με τη μελέτη, την κατασκευή, τη λειτουργία και τη συντήρηση του έργου αναλαμβάνονται συνήθως από τον ιδιωτικό φορέα, καθώς διαθέτει την απαραίτητη τεχνογνωσία και εμπειρία για την αποτελεσματική διαχείρισή τους. Αντίθετα, κίνδυνοι που συνδέονται με πολιτικές αποφάσεις, νομοθετικές μεταβολές, απαλλοτριώσεις, αρχαιολογικά ευρήματα ή γεγονότα

ανωτέρας βίας αναλαμβάνονται συνήθως από τον δημόσιο τομέα ή κατανέμονται μεταξύ των δύο συμβαλλόμενων μερών (Li et al., 2005; Roumboutsos & Anagnostopoulos, 2008). Η ορθή κατανομή των κινδύνων θεωρείται βασική προϋπόθεση για την επίτευξη οικονομικής αποδοτικότητας (value for money), τη διασφάλιση της χρηματοδότησης και τη μακροχρόνια βιωσιμότητα των έργων ΣΔΙΤ (Ng & Loosemore, 2007).

Η αποτελεσματική κατανομή και παρακολούθηση των κινδύνων αποτελεί επίσης βασική προϋπόθεση για την επιτυχή εφαρμογή αναλύσεων ευαισθησίας (Sensitivity Analysis), σεναρίων (Scenario Analysis) και προσομοιώσεων Monte Carlo, οι οποίες χρησιμοποιούνται διεθνώς για την εκτίμηση της επίδρασης των αβεβαιοτήτων στους χρηματοοικονομικούς δείκτες ενός έργου. Παρότι οι μέθοδοι αυτές δεν εφαρμόζονται αναλυτικά στην παρούσα εργασία, αποτελούν σημαντικές προσεγγίσεις για μελλοντική επέκταση της τεχνοοικονομικής αξιολόγησης έργων FTTH και UFBB.

5.5 Πολυκριτηριακή αξιολόγηση

Η ανάπτυξη δικτύων FTTH μεγάλης κλίμακας απαιτεί την συνεκτίμηση τεχνικών, χωρικών και οικονομικών παραμέτρων, καθώς η συνολική αποδοτικότητα του έργου δεν εξαρτάται αποκλειστικά από το χαμηλό αρχικό κόστος ανάπτυξης αλλά και από τη δυνατότητα μακροχρόνιας βιώσιμης λειτουργίας του δικτύου. Το μοντέλο BULRIC που αναπτύχθηκε για το Βελγικό Ινστιτούτο Ταχυδρομείων και Τηλεπικοινωνιών (Belgian Institute for Postal Services and Telecommunications – BIPT) αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα πολυκριτηριακής προσέγγισης, καθώς συνδυάζει στοιχεία γεωχωρικής ανάλυσης, διαστασιολόγησης, κοστολόγησης και κατανομής πόρων για τη συνολική αποτίμηση των υποδομών. Η μεθοδολογία βασίζεται σε λογική bottom-up, όπου κάθε στοιχείο του δικτύου διαστασιολογείται με βάση πραγματικές ανάγκες κάλυψης, χωρητικότητας και γεωγραφικής κατανομής της ζήτησης. Η ανάλυση πραγματοποιείται ανά κατηγορία γεωγραφικής περιοχής, επιτρέποντας τη διαφοροποίηση των παραδοχών μεταξύ αστικών, ημιαστικών και αγροτικών περιοχών. Έτσι καθίσταται δυνατός ο υπολογισμός των δαπανών ανά πάροχο αλλά και ανά τύπο περιοχής, συμβάλλοντας στη βελτιστοποίηση επενδυτικών αποφάσεων σε έργα NGA και UFBB.

Το πλαίσιο διερεύνησης περιλαμβάνει παραμέτρους όπως η πυκνότητα δόμησης, τα επίπεδα κάλυψης, οι απαιτούμενες αποστάσεις εκσκαφής και οι δυνατότητες κοινής χρήσης

υφισταμένων υποδομών. Μέσω ΓΣΠ προσδιορίζονται οι βέλτιστες οδεύσεις και η δυνατότητα κοινής χρήσης σωληνώσεων, μειώνοντας σημαντικά το συνολικό κόστος. Επιπλέον, εξετάζονται διαφορετικές αρχιτεκτονικές FTTH ανάπτυξης, όπως αυτές των Proximus, Fiberklaar και Unifiber. Μέσω αυτής της συγκριτικής ανάλυσης καθίσταται δυνατή η επιλογή της αποδοτικότερης αρχιτεκτονικής ανά γεωγραφική περιοχή και επιχειρησιακό μοντέλο. Η πολυκριτηριακή προσέγγιση επεκτείνεται και στην οικονομική αξιολόγηση. Το μοντέλο συνυπολογίζει το επενδυτικό κόστος (CAPEX), το λειτουργικό κόστος (OPEX), τις αποσβέσεις και τον επιμερισμό των κοινών δαπανών, παρέχοντας μια ολοκληρωμένη εικόνα του συνολικού κόστους. Λαμβάνονται υποψη οι υπηρεσίες χονδρικής και λιανικής, επιτρέποντας την αξιολόγηση μοντέλων ανοικτής πρόσβασης και συνεργατικής αξιοποίησης υποδομών (Axon Partners Group, 2023).

5.6 Οικονομική αποδοτικότητα UFBB

Η οικονομική αποδοτικότητα των υποδομών Ultra-Fast Broadband (UFBB) και ιδιαίτερα των δικτύων Fiber to the Home (FTTH) αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για τη βιωσιμότητα των επενδύσεων σε δίκτυα νέας γενιάς. Οι υποδομές αυτές δεν περιορίζονται μόνο στη βελτίωση των τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών, αλλά συνδέονται άμεσα με την παραγωγικότητα, την ανταγωνιστικότητα και τον συνολικό ψηφιακό μετασχηματισμό της οικονομίας. Σύμφωνα με τους Cambini et al. (2023), τα δίκτυα Ultra-Fast Broadband αποτελούν στρατηγικές υποδομές για την υποστήριξη τεχνολογιών όπως το cloud computing, τα big data, η τεχνητή νοημοσύνη και οι προηγμένες ψηφιακές υπηρεσίες, ενώ παράλληλα αποτελούν βασικό πυλώνα της ευρωπαϊκής στρατηγικής “Digital Compass 2030”.

Οι Cambini et al. (2023) εξέτασαν εμπειρικά την επίδραση των υποδομών UFB στην παραγωγικότητα ιταλικών επιχειρήσεων κατά την περίοδο 2013–2019, αξιοποιώντας panel data επιχειρήσεων και στοιχεία ανάπτυξης ευρυζωνικών υποδομών σε επίπεδο δήμων. Τα αποτελέσματα της μελέτης έδειξαν ότι η πρόσβαση σε υποδομές Ultra-Fast Broadband αυξάνει τη συνολική παραγωγικότητα των συντελεστών παραγωγής (Total Factor Productivity – TFP) κατά περίπου 2,9%, ενώ η παραγωγικότητα εργασίας αυξάνεται κατά 3,9%. Τα οφέλη αυτά αποδίδονται στη δυνατότητα αξιοποίησης προηγμένων ψηφιακών εφαρμογών, στη βελτίωση των επιχειρησιακών διαδικασιών και στη μείωση του κόστους διαχείρισης και μεταφοράς δεδομένων μέσω δικτύων υψηλής χωρητικότητας. Ιδιαίτερο

ενδιαφέρον παρουσιάζει η σύγκριση μεταξύ υποδομών FTTC και πλήρως οπτικών δικτύων FTTH. Σύμφωνα με τη μελέτη, τα δίκτυα FTTH προσφέρουν επιπλέον αύξηση της συνολικής παραγωγικότητας κατά περίπου 1,2% και της παραγωγικότητας εργασίας κατά περίπου 1,8% σε σχέση με τα υβριδικά δίκτυα χαλκού–οπτικής ίνας. Το εύρημα αυτό επιβεβαιώνει ότι οι πλήρως οπτικές υποδομές παρουσιάζουν μεγαλύτερη οικονομική αξία και υψηλότερη μακροχρόνια απόδοση επένδυσης, καθώς παρέχουν υψηλότερες ταχύτητες, μεγαλύτερη αξιοπιστία και αυξημένη δυνατότητα υποστήριξης ψηφιακών υπηρεσιών υψηλών απαιτήσεων.

Η οικονομική αποδοτικότητα των επενδύσεων FTTH αναλύεται διεξοδικά και στη μελέτη των Skoufis et al. (2023), η οποία εξετάζει την τεχνοοικονομική αξιολόγηση μετάβασης από δίκτυα FTTC/VDSL2 σε FTTH στην ελληνική αγορά. Σύμφωνα με τη μελέτη, η άμεση ανάπτυξη πλήρους FTTH παρουσιάζει ιδιαίτερα υψηλό αρχικό επενδυτικό κόστος, γεγονός που δυσκολεύει την υλοποίησή της σε μεγάλη κλίμακα. Για τον λόγο αυτό προτείνεται μία σταδιακή στρατηγική μετάβασης, η οποία περιλαμβάνει αρχικά ανάπτυξη FTTC με VDSL2 vectoring, στη συνέχεια αναβάθμιση σε G.fast και τελικά μετάβαση σε FTTH. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει τη χρηματοδότηση κάθε επόμενης φάσης μέσω των εσόδων της προηγούμενης, μειώνοντας το συνολικό επενδυτικό ρίσκο.

Η μελέτη αναδεικνύει επίσης τη σημαντική διαφορά μεταξύ του κόστους ανάπτυξης FTTH και του λειτουργικού κόστους του δικτύου. Παρότι το αρχικό CAPEX των FTTH υποδομών είναι υψηλό, το λειτουργικό κόστος (OPEX) παραμένει χαμηλότερο σε σχέση με δίκτυα FTTC/VDSL, καθώς τα παθητικά οπτικά δίκτυα δεν απαιτούν ενεργό εξοπλισμό στις υπαίθριες καμπίνες. Ως αποτέλεσμα, μειώνονται οι απαιτήσεις συντήρησης, ενεργειακής κατανάλωσης και τεχνικής υποστήριξης, γεγονός που βελτιώνει σημαντικά τη μακροχρόνια οικονομική αποδοτικότητα της επένδυσης. Παράλληλα, η μελέτη δείχνει ότι οι χρηματοοικονομικοί δείκτες NPV και IRR παρουσιάζουν ιδιαίτερα θετικές τιμές, υποδεικνύοντας υψηλή επενδυτική βιωσιμότητα των FTTH υποδομών.

Εξίσου σημαντικό παράγοντα οικονομικής αποδοτικότητας αποτελεί και το deployment cost των FTTH υποδομών. Σύμφωνα με τον Garvey (2005), το μεγαλύτερο μέρος του συνολικού κόστους ανάπτυξης σχετίζεται με τις υποδομές Outside Plant (OSP), δηλαδή, εγκαταστάσεις οπτικών καλωδίων και εργασίες πεδίου. Η μελέτη δείχνει ότι το κόστος εργασίας μπορεί να αντιστοιχεί σε περισσότερο από το ένα τρίτο του συνολικού deployment

cost, ενώ το κόστος των passive optical components παραμένει σχετικά περιορισμένο. Για τον λόγο αυτό, η χρήση τεχνικών όπως pre-terminated drop cables και hardened connectors μπορεί να μειώσει σημαντικά τον χρόνο και το κόστος εγκατάστασης, βελτιώνοντας τη συνολική οικονομική αποδοτικότητα του έργου.

Η οικονομική βιωσιμότητα ενός FTTH deployment επηρεάζεται σημαντικά από το penetration rate, δηλαδή το ποσοστό των χρηστών που επιλέγουν τις υπηρεσίες του δικτύου. Σύμφωνα με τη μελέτη του Garvey (2005), υψηλά ποσοστά διείσδυσης υπηρεσιών οδηγούν σε σημαντική αύξηση των εσόδων και επιτρέπουν την ταχύτερη απόσβεση της επένδυσης. Αντίθετα, σε ιδιαίτερα ανταγωνιστικές αγορές με χαμηλό penetration rate, η οικονομική βιωσιμότητα του έργου επηρεάζεται αρνητικά, ακόμη και όταν το deployment cost έχει τεχνικά βελτιστοποιηθεί.

Επιπλέον, η οικονομική αποδοτικότητα των υποδομών UFBB δεν συνδέεται μόνο με τους τηλεπικοινωνιακούς παρόχους, αλλά επηρεάζει συνολικά την οικονομία και την αγορά εργασίας. Η διάχυση των δικτύων υπερυψηλών ταχυτήτων ενισχύει την τηλεργασία, την αυτοματοποίηση, τις ψηφιακές υπηρεσίες και τη χρήση cloud εφαρμογών, δημιουργώντας αυξημένη ζήτηση για εργαζομένους με ψηφιακές δεξιότητες και βελτιώνοντας την ανταγωνιστικότητα των επιχειρήσεων. Οι επενδύσεις σε υποδομές UFBB και FTTH παρουσιάζουν υψηλή οικονομική αποδοτικότητα σε επίπεδο παρόχων και σε επίπεδο οικονομίας. Παρά το υψηλό αρχικό επενδυτικό κόστος, τα δίκτυα FTTH προσφέρουν χαμηλότερο λειτουργικό κόστος, υψηλή μακροχρόνια βιωσιμότητα και σημαντικά παραγωγικά οφέλη, συμβάλλοντας καθοριστικά στον ψηφιακό μετασχηματισμό και στην ανάπτυξη σύγχρονων τηλεπικοινωνιακών υποδομών.

6. Μελέτη Περίπτωσης UFBB

6.1 Περιγραφή περιοχής

Η Περιφερειακή Ενότητα Κορινθίας βρίσκεται στην Κεντρική Ελλάδα, στην ένωση της Πελοποννήσου με τη Στερεά Ελλάδα (Εικόνα 6-1). Η στρατηγική της θέση σε συνδυασμό με τη σύνδεσή της με βασικούς οδικούς και θαλάσσιους άξονες, την καθιστούν ορόσημο για τις μετακινήσεις, το εμπόριο, τον τουρισμό και την ανάπτυξη υποδομών νέας γενιάς. Φημίζεται για την πλούσια πολιτιστική της κληρονομιά, την ιστορική της σημασία και για τη γεωμορφολογία της, δεδομένου ότι συνδυάζει ορεινές και πεδινές εκτάσεις, παραθαλάσσια τμήματα και φυσικούς σχηματισμούς (Κασίμης κ.ά., 1998).

Η ιδιαιτερότητά της έγκειται στο γεγονός ότι μέσω της φυσικής της διαμόρφωσης και της ανθρώπινης δραστηριότητας έχει ενοποιήσει διαφορετικούς τρόπους ζωής. Συνυπάρχουν ο αστικός με τον παραδοσιακό χαρακτήρα των χωριών, ενώ η οικονομική δραστηριότητα εκτείνεται από τον τουρισμό και το εμπόριο έως τη γεωργία και την παροχή υπηρεσιών. Το φυσικό τοπίο χαρακτηρίζεται από την παρουσία μεγάλων οροσειρών και εκτεταμένων παράκτιων ζωνών, αφού περιβρέχεται από τον Σαρωνικό και τον Κορινθιακό κόλπο. Ο Ισθμός της Κορίνθου και η διάνοιξη της διώρυγας συνέβαλαν στην αναβάθμιση της περιοχής διευκολύνοντας την προσβασιμότητα από και προς την υπόλοιπη Ελλάδα και ενισχύοντας τις θαλάσσιες μεταφορές, το εμπόριο και την πολιτιστική αλληλεπίδραση. Η γεωγραφική αυτή σύνδεση μεταξύ ηπειρωτικής και νησιωτικής Ελλάδας μετατρέπει την Κορινθία σε κόμβο στρατηγικής σημασίας και για την εγκατάσταση σύγχρονων τηλεπικοινωνιακών συστημάτων (Μπόγκος, 2011).

Η Περιφερειακή Ενότητα Κορινθίας εντοπίζεται στη βορειοανατολική Πελοπόννησο και συνορεύει βορειοανατολικά με την Περιφερειακή Ενότητα Αττικής, δυτικά με την Αχαΐα και νότια με τις Περιφερειακές Ενότητες Αργολίδας και Αρκαδίας. Πρωτεύουσα και μεγαλύτερη πόλη της είναι η Κόρινθος, η οποία βρίσκεται στο δυτικό άκρο της Διώρυγας, στην Ποσειδωνία, και αποτελεί την έδρα του Δήμου Κορινθίων. Η πόλη της Κορίνθου συγκεντρώνει το μεγαλύτερο ποσοστό της εμπορικής, διοικητικής και οικονομικής

δραστηριότητας της περιφερειακής ενότητας, παρουσιάζοντας αυξημένες ανάγκες σε τηλεπικοινωνιακές υπηρεσίες και ψηφιακές υποδομές (Μπόγκος, 2011).



Εικόνα 6-1 Γεωγραφική θέση της Περιφερειακής Ενότητας Κορινθίας στον ελλαδικό χώρο

(Πηγή: Μπόγκος, 2011)

Σύμφωνα με την απογραφή του 2021 της Ελληνικής Στατιστικής Αρχής (ΕΛ.ΣΤΑΤ.), ο συνολικός πληθυσμός της Περιφερειακής Ενότητας Κορινθίας ανέρχεται σε 138.144 κατοίκους. Η διοικητική της διαίρεση περιλαμβάνει τον Δήμο Κορινθίων με 56.437 κατοίκους, τον Δήμο Λουτρακίου – Περαιχώρας – Αγίων Θεοδώρων με 21.925 κατοίκους, τον Δήμο Σικυωνίων με 20.983 κατοίκους, τον Δήμο Βέλου – Βόχας με 17.836 κατοίκους, τον Δήμο Νεμέας με 5.668 κατοίκους και τον Δήμο Ξυλοκάστρου – Ευρωστίνης με 15.295 κατοίκους (Φάνη, 2024).

Η Κορινθία θεωρείται ημιορεινή και καταλαμβάνει συνολική έκταση 2.295 τετραγωνικών χιλιομέτρων. Το μεγαλύτερο μέρος της, περίπου το 88%, αποτελείται από ορεινές και ημιορεινές εκτάσεις συνολικής επιφάνειας 2.020 τετραγωνικών χιλιομέτρων, ενώ μόνο το 12% της συνολικής επιφάνειας αντιστοιχεί σε πεδινές εκτάσεις. Οι ορεινές εκτάσεις εντοπίζονται κυρίως στα νοτιοδυτικά και βόρεια της περιφερειακής ενότητας, όπου δεσπόζουν μεγάλες οροσειρές όπως τα Αροάνια Όρη με υψηλότερη κορυφή την Ψηλή Κορφή στα 2.455 μέτρα, η Κυλλήνη ή Μεγάλη Ζήρεια στα 2.374 μέτρα, ο Σαϊτάς, ο Ολίγυρτος, το Μεγαλοβούνι και τα Γεράνια Όρη. Η μορφολογία αυτή δημιουργεί

ιδιαίτερες απαιτήσεις κατά την υλοποίηση υποδομών οπτικών ινών αφού επηρεάζει τη χάραξη των οδεύσεων, τη διασύνδεση απομακρυσμένων περιοχών και τη συνολική κατασκευαστική διαδικασία (Φάνη, 2024).

Η γεωμορφολογική πολυπλοκότητα της Κορινθίας επηρεάζει άμεσα τον τεχνικό σχεδιασμό και την οικονομική διάσταση της ανάπτυξης δικτύων FTTH. Οι μεγάλες υψομετρικές διαφορές, οι διάσπαρτοι οικισμοί και η συνύπαρξη αστικών και αγροτικών περιοχών αυξάνουν τις απαιτήσεις σε εκσκαφές, υπόγειες και εναέριες οδεύσεις, καθώς και σε διαδικασίες αδειοδότησης. Ως αποτέλεσμα, η επιλογή των κατάλληλων τεχνικών ανάπτυξης και η ορθή προετοιμασία της μελέτης αποτελούν κρίσιμους παράγοντες για τον περιορισμό του κόστους και την τήρηση του χρονοδιαγράμματος του έργου.

Η περιφερειακή ενότητα διαθέτει επίσης αξιόλογο υδρογραφικό δίκτυο. Ο Σαρωνικός και ο Κορινθιακός κόλπος συνδέονται μέσω της Διώρυγας της Κορίνθου, ενώ συναντώνται μικρά ποτάμια και χείμαρροι όπως ο Ασωπός και ο Ελισσών. Περιβαλλοντικό ενδιαφέρον παρουσιάζουν η λίμνη Στυμφαλία και οι λιμνοθάλασσες της Βουλιαγμένης και της Μαυρολίμνης. Η γεωγραφική και περιβαλλοντική ποικιλομορφία της Κορινθίας λαμβάνεται υπόψη κατά τον σχεδιασμό τεχνικών έργων μεγάλης κλίμακας, όπως είναι το έργο Ultra-Fast Broadband. Εκτός από το φυσικό της περιβάλλον, διαθέτει ιστορική και πολιτιστική κληρονομιά. Η Αρχαία Κόρινθος, η Νεμέα, το Ηραίο και τα Ίσθμια συνιστούν σημαντικούς αρχαιολογικούς χώρους με ιστορική αξία, ενώ τα μουσεία και τα πολιτιστικά μνημεία αποτελούν πόλο έλξης για πλήθος επισκεπτών. Συγχρόνως, οι τοπικές παραδόσεις και τα πολιτιστικά δρώμενα διατηρούν έντονο τον χαρακτήρα της περιοχής, με χαρακτηριστικά παραδείγματα τη Γιορτή του Κρασιού στη Νεμέα και το πανηγύρι της Παναγίας Γιάτρισσας στο Λουτράκι (Μπόγκος, 2011).

Η παρούσα μελέτη περίπτωσης επικεντρώνεται στην ανάπτυξη του έργου Ultra-Fast Broadband (UFBB) στην Περιφερειακή Ενότητα Κορινθίας και ειδικότερα στις θέσεις Κορίνθου, Χιλιμοδίου και Εξαμιλίων, όπου πραγματοποιούνται εργασίες δικτύων FTTH και εγκατάστασης σημείων RAP (Remote Access Point). Οι συγκεκριμένες τοποθεσίες παρουσιάζουν διαφορετικά τεχνικά και πολεοδομικά χαρακτηριστικά, γεγονός που τις καθιστά κατάλληλες για την αξιολόγηση της υλοποίησης δικτύων νέας γενιάς σε αστικό και ημιαστικό περιβάλλον. Το UFBB στην συγκεκριμένη τοποθεσία αναμένεται να συμβάλει ουσιαστικά στον εκσυγχρονισμό της προσφέροντας υπηρεσίες υπερυψηλών ταχυτήτων,

βελτιωμένη ποιότητα σύνδεσης και δυνατότητα υποστήριξης εφαρμογών νέας γενιάς, όπως τα δίκτυα 5G, οι υπηρεσίες έξυπνων πόλεων και οι ψηφιακές εφαρμογές υψηλών απαιτήσεων. Στην Εικόνα 6-2 παρουσιάζεται η περιοχή ανάπτυξης του δικτύου FTTH/UFBB στον Δήμο Κορινθίων, καθώς και η γεωγραφική κατανομή των περιοχών που εντάχθηκαν στο κατασκευαστικό πλάνο του έργου (ΟΤΕ Υποδομές Ευρυζωνικότητας, 2024).



Εικόνα 6-2 Περιοχές ανάπτυξης δικτύου FTTH/UFBB στον Δήμο Κορινθίων και γεωγραφική κατανομή των υπό κάλυψη περιοχών.

(Πηγή: ΟΤΕ Υποδομές Ευρυζωνικότητας, 2024)

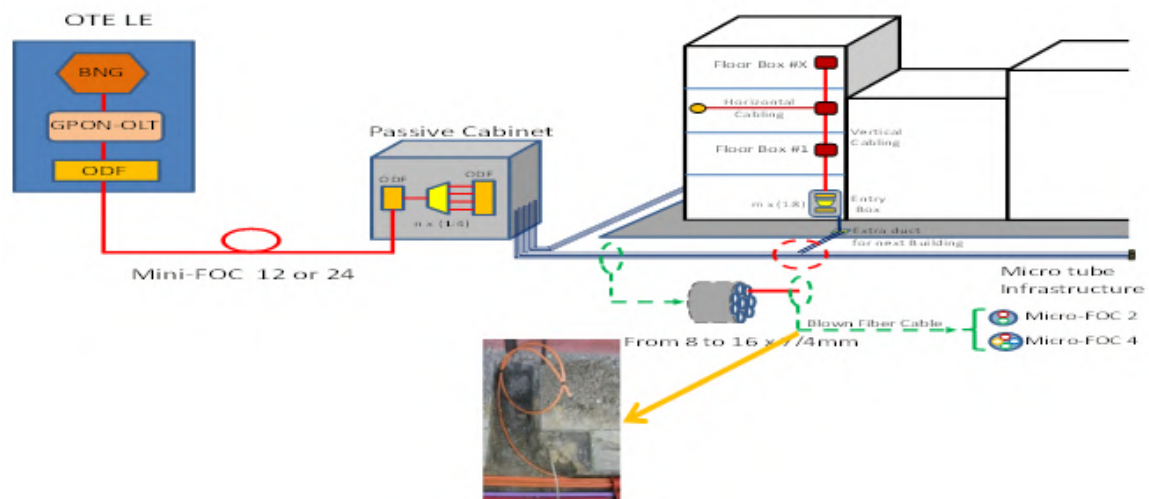
6.2 Μελέτη FTTH

Η ανάπτυξη δικτύου FTTH αποτελεί τη βασική τεχνολογική κατεύθυνση του έργου UFBB, με στόχο την παροχή ευρυζωνικών υπηρεσιών υπερυψηλών ταχυτήτων και την υποστήριξη των αυξανόμενων ψηφιακών αναγκών πολιτών, επιχειρήσεων και δημόσιων οργανισμών. Η τεχνολογία FTTH θεωρείται η πλέον σύγχρονη μορφή ενσύρματης τηλεπικοινωνιακής πρόσβασης. Επιτρέπει τη μετάδοση δεδομένων μέσω οπτικών ινών απευθείας μέχρι την εγκατάσταση του συνδρομητή, εξασφαλίζοντας υψηλές ταχύτητες μετάδοσης, μικρές

καθυστερήσεις και αυξημένη αξιοπιστία δικτύου (Lorincz, et al., 2025). Στην Περιφερειακή Ενότητα Κορινθίας, η υλοποίηση του δικτύου FTTH πραγματοποιείται στο πλαίσιο του έργου UFBB με σκοπό τη δημιουργία υποδομών νέας γενιάς, ικανών να υποστηρίζουν υπηρεσίες Gigabit και εφαρμογές υψηλών απαιτήσεων. Η ανάπτυξη του δικτύου επικεντρώνεται στις περιοχές Κορίνθου, Χιλιομοδίου και Εξαμιλίων, όπου πραγματοποιούνται εργασίες εγκατάστασης υπόγειων οδεύσεων οπτικών ινών, σημείων διανομής και κόμβων πρόσβασης RAP (Remote Access Point).

Η ανάπτυξη του δικτύου FTTH στον Δήμο Κορινθίων πραγματοποιήθηκε σε δύο διακριτές φάσεις. Η πρώτη φάση αφορούσε εργασίες σε δημόσιους κοινόχρηστους χώρους και περιλάμβανε την εγκατάσταση ενεργού εξοπλισμού στο αστικό κέντρο, την τοποθέτηση νέων οπτικών καμπινών, τη διασύνδεσή τους με το δίκτυο κορμού καθώς και την κατασκευή του εξωτερικού δικτύου διανομής μέσω μικροσωληνώσεων και οπτικών καλωδίων. Κατά τη φάση αυτή προβλέφθηκε η δημιουργία αναμονών σύνδεσης προς τα κτίρια, ώστε να είναι δυνατή η μελλοντική ενεργοποίηση υπηρεσιών FTTH χωρίς εκτεταμένες νέες εκσκαφές. Η δεύτερη φάση ενεργοποιείται κατόπιν αιτήματος του συνδρομητή και περιλαμβάνει την είσοδο της οπτικής ίνας στο κτίριο, την κατασκευή των απαραίτητων εσωτερικών υποδομών και τη σύνδεση της κατοικίας ή της επιχείρησης με το πλησιέστερο σημείο διανομής του δικτύου.

Η διάκριση της υλοποίησης σε δύο φάσεις έχει σημαντική τεχνοοικονομική σημασία. Η πρώτη φάση δημιουργεί τη βασική παθητική υποδομή και μειώνει την ανάγκη επαναλαμβανόμενων εκσκαφών στο μέλλον, ενώ η δεύτερη φάση ενεργοποιείται μόνο όταν υπάρχει πραγματική ζήτηση από τον συνδρομητή. Με τον τρόπο αυτό περιορίζεται το αρχικό κόστος ανάπτυξης, αποφεύγεται η άσκοπη κατασκευή συνδέσεων που δεν θα αξιοποιηθούν άμεσα και επιτυγχάνεται καλύτερη αντιστοίχιση μεταξύ επένδυσης και ζήτησης.



Εικόνα 6-3 Δομή και φάσεις υλοποίησης δικτύου FTTH/FTTB στο πλαίσιο του έργου UFBB.

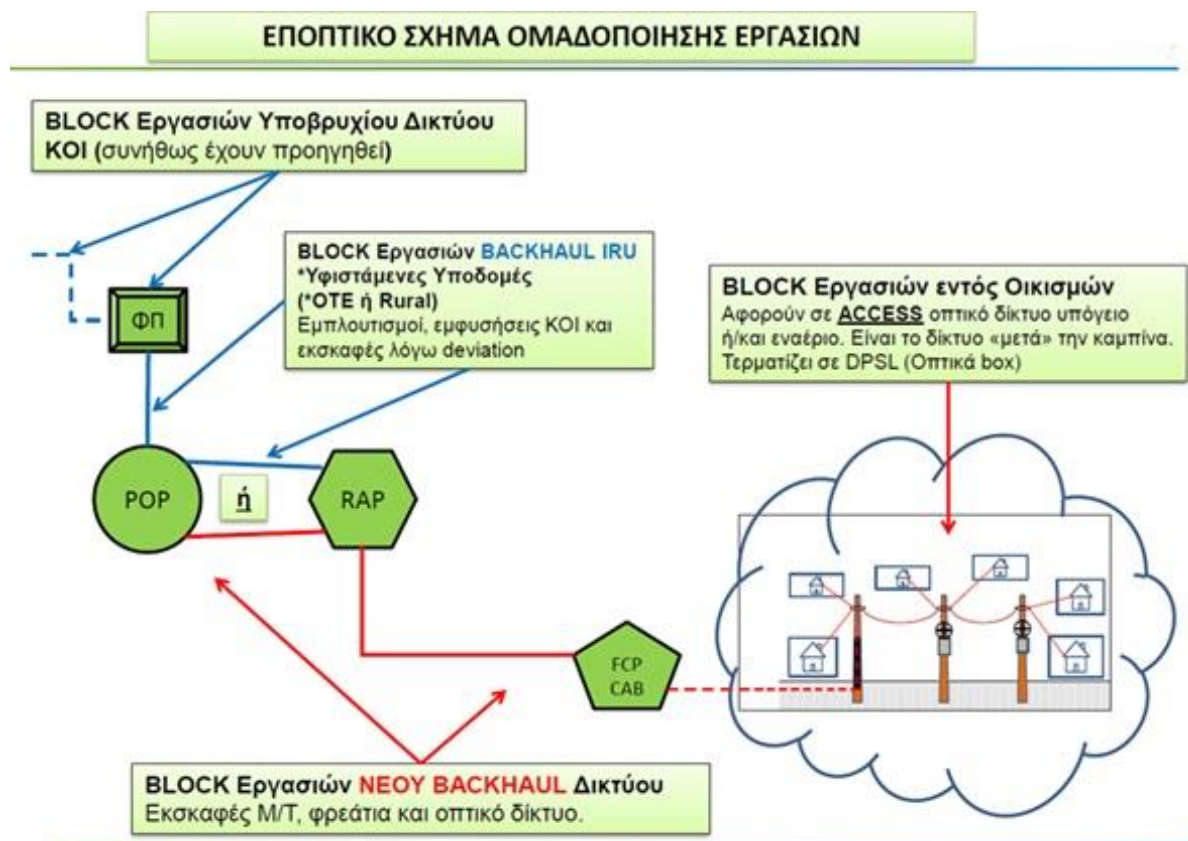
(Πηγή: ΟΤΕ Υποδομές Ευρυζωνικότητας, 2024)

Η διαδικασία ανάπτυξης του δικτύου FTTH περιλαμβάνει διαδοχικά στάδια που ξεκινούν από το αστικό κέντρο και καταλήγουν στην τελική σύνδεση του συνδρομητή (Εικόνα 6-3). Κατά τη Φάση Α υλοποιούνται οι βασικές υποδομές του εξωτερικού δικτύου, όπως η εγκατάσταση ενεργού εξοπλισμού στο αστικό κέντρο, η τοποθέτηση οπτικών καμπινών, η ανάπτυξη των οδεύσεων οπτικών ινών και η κατασκευή των απαραίτητων υποδομών διανομής προς τα κτίρια. Στο στάδιο αυτό δημιουργούνται επίσης οι αναμονές σύνδεσης που επιτρέπουν τη μελλοντική ενεργοποίηση υπηρεσιών χωρίς πρόσθετες εκτεταμένες εκσκαφές. Η Φάση Β ενεργοποιείται μετά από αίτημα του συνδρομητή και περιλαμβάνει την είσοδο της οπτικής ίνας στο κτίριο, την εγκατάσταση των εσωτερικών υποδομών και την τελική διασύνδεση με το δίκτυο πρόσβασης. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει την αποδοτική ανάπτυξη των υποδομών, περιορίζοντας το κόστος κατασκευής και διευκολύνοντας τη σταδιακή ενεργοποίηση νέων συνδέσεων.

Η αρχιτεκτονική του δικτύου βασίζεται σε παθητικά οπτικά δίκτυα (Passive Optical Networks – PON), τα οποία επιτρέπουν τη διανομή του οπτικού σήματος σε πολλαπλούς συνδρομητές μέσω παθητικών διαχωριστών (splitters). Η συγκεκριμένη δομή επιλέγεται λόγω του μειωμένου λειτουργικού κόστους, της υψηλής ενεργειακής αποδοτικότητας και της δυνατότητας εξυπηρέτησης μεγάλου αριθμού χρηστών με περιορισμένο ενεργό εξοπλισμό πεδίου. Το σύστημα σχεδιάζεται σύμφωνα με τις προδιαγραφές GPON και XGS-PON, υποστηρίζοντας ταχύτητες που μπορούν να ξεπεράσουν το 1 Gbps (Horvath et al., 2020). Η υποδομή περιλαμβάνει τον κεντρικό κόμβο τηλεπικοινωνιακού εξοπλισμού (Point

of Presence – PoP), το δίκτυο κορμού, το δίκτυο διανομής και το τμήμα πρόσβασης μέχρι τον τελικό χρήστη. Από τον κεντρικό κόμβο εκκινούν τα καλώδια οπτικών ινών, τα οποία μέσω υπόγειων οδεύσεων και ενδιάμεσων σημείων διανομής καταλήγουν στους τοπικούς κόμβους RAP, οι οποίοι εξυπηρετούν ομάδες συνδρομητών ανά γεωγραφική ενότητα (Adhikari, 2025).

Η λειτουργική οργάνωση του δικτύου UFBB περιλαμβάνει διακριτά τμήματα κορμού (Backhaul) και πρόσβασης (Access), τα οποία διασυνδέουν τον κεντρικό κόμβο του δικτύου με τα σημεία διανομής και τελικά με τους συνδρομητές. Στην Εικόνα 6-4 παρουσιάζεται ενδεικτικά η ομαδοποίηση των βασικών εργασιών και η ροή ανάπτυξης του δικτύου από το PoP έως τα σημεία εξυπηρέτησης των τελικών χρηστών (OTE, 2024).



Εικόνα 6-4 Λειτουργική οργάνωση των εργασιών ανάπτυξης του δικτύου UFBB και διασύνδεση των τμημάτων Backhaul και Access από τον κεντρικό κόμβο (PoP) έως τους τελικούς συνδρομητές.

(Πηγή: OTE, 2024)

Ο σχεδιασμός του δικτύου FTTH στην Κορινθία επηρεάζεται σε σημαντικό βαθμό από τα γεωγραφικά και πολεοδομικά χαρακτηριστικά της περιοχής. Η συνύπαρξη αστικών, ημιαστικών και ορεινών περιοχών δημιουργεί διαφορετικές απαιτήσεις όσον αφορά τη

χάραξη των οδεύσεων, την επιλογή των σημείων διανομής και τη συνολική διαχείριση του δικτύου. Στις αστικές περιοχές, όπως η πόλη της Κορίνθου, απαιτείται προσεκτικός σχεδιασμός λόγω της υψηλής πυκνότητας κτιρίων, της ύπαρξης υφιστάμενων δικτύων κοινής ωφέλειας και της αυξημένης κυκλοφορίας. Αντίθετα, στις ημιαστικές περιοχές, όπως το Χίλιομόδι και τα Εξαμίλια, δίνεται μεγαλύτερη έμφαση στη βέλτιστη κάλυψη μεγαλύτερων αποστάσεων και στην αποδοτική εξυπηρέτηση περιοχών με μικρότερη πληθυσμιακή πυκνότητα. Η εγκατάσταση των υποδομών πραγματοποιείται κυρίως μέσω υπόγειων οδεύσεων, χρησιμοποιώντας μικροσωληνώσεις και φρεάτια πρόσβασης για τη διέλευση και προστασία των οπτικών καλωδίων. Ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του οδικού δικτύου και τις ιδιαιτερότητες κάθε τοποθεσίας, εφαρμόζονται μέθοδοι μικροτάφρου ή συμβατικών εκσκαφών. Η επιλογή της κατάλληλης τεχνικής πραγματοποιείται με γνώμονα τη μείωση του κατασκευαστικού χρόνου, τον περιορισμό της όχλησης προς τους πολίτες και την ασφαλή εγκατάσταση των τηλεπικοινωνιακών υποδομών (E-Business Forum, 2008).

Κατά τον σχεδιασμό του δικτύου θα πρέπει να δίνεται προσοχή στη μείωση των απωλειών οπτικού σήματος, στη δυνατότητα μελλοντικής επέκτασης και στην ευκολία συντήρησης του δικτύου. Για τον λόγο αυτό, η χάραξη των οδεύσεων και η τοποθέτηση των σημείων διανομής πραγματοποιούνται με τέτοιο τρόπο ώστε να εξασφαλίζεται η βέλτιστη λειτουργία του δικτύου και η δυνατότητα κάλυψης μελλοντικών τηλεπικοινωνιακών αναγκών. Η ανάπτυξη του δικτύου FTTH στην Κορινθία συμβάλλει ουσιαστικά στον ψηφιακό μετασχηματισμό της περιοχής, παρέχοντας τη δυνατότητα πρόσβασης σε σύγχρονες υπηρεσίες επικοινωνίας και δεδομένων υψηλών ταχυτήτων. Παράλληλα, οι υποδομές οπτικών ινών αποτελούν βασική προϋπόθεση για τη μελλοντική ανάπτυξη δικτύων 5G, καθώς οι σταθμοί βάσης κινητής τηλεφωνίας απαιτούν αξιόπιστη οπτική διασύνδεση υψηλής χωρητικότητας για τη μεταφορά μεγάλου όγκου δεδομένων και την υποστήριξη εφαρμογών νέας γενιάς.

Η ποιότητα της αρχικής μελέτης επηρεάζει άμεσα την επιτυχία της κατασκευαστικής φάσης. Ελλιπής αποτύπωση των υφιστάμενων υποδομών, λανθασμένη επιλογή οδεύσεων ή μη επαρκής πρόβλεψη των σημείων διανομής μπορεί να οδηγήσουν σε πρόσθετες εργασίες, ανάγκη τροποποίησης αδειών, καθυστερήσεις και αύξηση του κόστους. Αντίθετα, ένας ολοκληρωμένος σχεδιασμός μειώνει τον τεχνικό κίνδυνο, βελτιώνει τον συντονισμό

των συνεργείων και συμβάλλει στη συγκράτηση τόσο του CAPEX όσο και του μελλοντικού OPEX του δικτύου.

Το έργο πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο συμβατικής σχέσης μεταξύ του ΟΤΕ και του αναδόχου κατασκευής, με σαφώς καθορισμένες τεχνικές, ποιοτικές και οργανωτικές απαιτήσεις. Σύμφωνα με τους ειδικούς όρους, ο ανάδοχος ανέλαβε την κατασκευή των υποδομών οπτικών ινών, την εγκατάσταση του απαραίτητου εξοπλισμού και την παράδοση ενός πλήρως λειτουργικού δικτύου πρόσβασης FTTH σύμφωνα με τις εγκεκριμένες μελέτες και τα κατασκευαστικά σχέδια του έργου. Όφειλε να ακολουθεί τις εγκεκριμένες μελέτες, να τηρεί τους κανόνες της τεχνικής επιστήμης και να συμμορφώνεται με τις διαδικασίες ελέγχου και πιστοποίησης του ΟΤΕ. Επίσης, ήταν υποχρεωμένος να υποβάλλει τακτικές αναφορές που περιλάμβαναν την πρόοδο των μικροτάφρων, την εγκατάσταση σωληνώσεων και οπτικών καλωδίων, την κατασκευή φρεατίων και την ολοκλήρωση των σημείων αναμονής προς τα κτίρια. Προβλεπόταν καθημερινή παρουσία μηχανικού επίβλεψης με αρμοδιότητα τον συντονισμό των συνεργείων, την τήρηση των τεχνικών προδιαγραφών και τη διασφάλιση της ποιότητας κατασκευής. Η σύμβαση προέβλεπε την τμηματική εκτέλεση του έργου μέσω επιμέρους υποέργων και παραγγελιών εργασιών, στις οποίες καθορίζονταν το φυσικό αντικείμενο, τα χρονοδιαγράμματα και οι τεχνικές προδιαγραφές κατασκευής. Καθόριζε συγκεκριμένες απαιτήσεις σχετικά με την αποθήκευση και διακίνηση των υλικών (ΟΤΕ, 2021).

Οι εγκαταστάσεις του αναδόχου έπρεπε να διαθέτουν κατάλληλους χώρους αποθήκευσης, εξοπλισμό φορτοεκφόρτωσης και διαδικασίες διαχείρισης υλικών, ώστε να εξασφαλίζεται η ακεραιότητα των οπτικών καλωδίων, των πολυσωληνίων και των παθητικών στοιχείων του δικτύου. Οι συμβατικές υποχρεώσεις αφορούσαν την ασφάλεια των εργασιών και την προστασία του περιβάλλοντος. Προβλεπόταν η λήψη μέτρων εργοταξιακής σήμανσης, η ασφαλής διέλευση πεζών και οχημάτων, η άμεση απομάκρυνση των προϊόντων εκσκαφής και η τήρηση συγκεκριμένων χρονικών ορίων για την αποκατάσταση οδοστρωμάτων και πεζοδρομίων μετά την ολοκλήρωση των εργασιών. Η συμμόρφωση με τις παραπάνω απαιτήσεις αποτελούσε βασική προϋπόθεση για την πιστοποίηση και παραλαβή των κατασκευαστικών εργασιών, ενώ σε περιπτώσεις αποκλίσεων ή καθυστερήσεων προβλέπονταν ποινικές ρήτρες και διαδικασίες ελέγχου ποιότητας. Το συμβατικό αυτό πλαίσιο συνέβαλε στη διασφάλιση της ομοιομορφίας των κατασκευών, της ποιότητας των υποδομών και της επιτυχούς ολοκλήρωσης του έργου UFBB (ΟΤΕ, 2021). Οι απαιτήσεις

αυτές εφαρμόστηκαν καθ' όλη τη διάρκεια των κατασκευαστικών εργασιών, με ιδιαίτερη έμφαση στη σήμανση των εργοταξίων, την ασφαλή εκτέλεση των εκσκαφών και την κατασκευή των φρεατίων πρόσβασης του δικτύου. Ενδεικτικά παραδείγματα παρουσιάζονται στην Εικόνα 6-5.



Εικόνα 6-5 Κατασκευή μικροτάφρου (ΜΤ), φρεατίων πρόσβασης και εφαρμογή μέτρων εργοταξιακής ασφάλειας κατά την ανάπτυξη του δικτύου FTTH/UFBB στον Δήμο Κορινθίων.

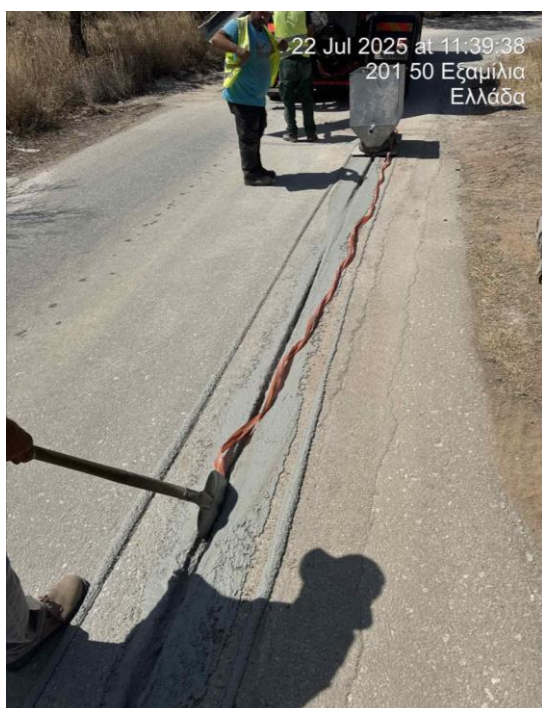
(Πηγή: ΟΤΕ Υποδομές Ευρυζωνικότητας, 2024)

6.3 Κατασκευαστική διαδικασία

Στο πλαίσιο της υλοποίησης του έργου Ultra-Fast Broadband (UFBB) στις περιοχές Αγίου Βασιλείου Χιλιομοδίου και Εξαμιλίων πραγματοποιήθηκαν εργασίες εκσκαφής και εγκατάστασης υποδομών οπτικών ινών για την ανάπτυξη του δικτύου FTTH. Οι εργασίες πεδίου περιλάμβαναν τη διάνοιξη μικροτάφρου επί του οδοστρώματος, την τοποθέτηση μικροσωληνώσεων (microducts) και την εγκατάσταση υποδομών διέλευσης οπτικών καλωδίων (Φακλή, 2021). Η μέθοδος μικροτάφρου εφαρμόστηκε με στόχο τη μείωση του χρόνου κατασκευής και τον περιορισμό της όχλησης στο οδικό δίκτυο και στους κατοίκους της περιοχής (Εικόνα 6-6). Μετά την ολοκλήρωση της τοποθέτησης των σωληνώσεων πραγματοποιήθηκαν εργασίες αποκατάστασης του οδοστρώματος, ώστε να διασφαλιστεί η ασφαλής επαναφορά της κυκλοφορίας και η προστασία των εγκατεστημένων υποδομών. Οι φωτογραφίες πεδίου αποτυπώνουν χαρακτηριστικά στάδια της κατασκευαστικής διαδικασίας, όπως τη χάραξη των οδεύσεων, τη διάνοιξη των τομών, την τοποθέτηση των

μικροσωληνώσεων και την τελική αποκατάσταση του οδοστρώματος. Οι συγκεκριμένες εργασίες αποτελούν βασικό στάδιο ανάπτυξης του δικτύου FTTH, καθώς δημιουργούν την απαραίτητη υποδομή για τη διέλευση και προστασία των οπτικών ινών.

Η επιλογή της μεθόδου μικροτάφρου δεν βασίζεται αποκλειστικά σε τεχνικά κριτήρια αλλά και σε τεχνοοικονομικούς παράγοντες. Η περιορισμένη έκταση της εκσκαφής μειώνει τον χρόνο εκτέλεσης, περιορίζει την κυκλοφοριακή όχληση και οδηγεί σε μικρότερες δαπάνες αποκατάστασης σε σχέση με τις συμβατικές εκσκαφές. Η ταχύτερη ολοκλήρωση των εργασιών συμβάλλει στη μείωση του συνολικού κόστους του έργου και στην ταχύτερη ενεργοποίηση των υπηρεσιών προς τους συνδρομητές.



Εικόνα 6-6 Εγκατάσταση μικροσωληνώσεων οπτικών ινών μέσω μεθόδου μικροτάφρου κατά την ανάπτυξη δικτύου FTTH στα Εξαμίλια Κορινθίας

Πριν από την έναρξη των κατασκευαστικών εργασιών πραγματοποιήθηκε αναλυτικός έλεγχος των διαθέσιμων σχεδίων και επιτόπια αυτοψία (site survey), με σκοπό τον εντοπισμό υφιστάμενων δικτύων κοινής ωφέλειας και τηλεπικοινωνιακών υποδομών. Εφαρμόστηκε διαδικασία ενημέρωσης των κατοίκων και των τοπικών φορέων μέσω σχετικών ανακοινώσεων πριν από την έναρξη των εργασιών, ώστε να περιοριστεί η όχληση και να διευκολυνθεί η ομαλή εκτέλεση του έργου. Οι κατασκευαστικές εργασίες περιλάμβαναν την εγκατάσταση οπτικών καμπινών, τη διάνοιξη μικροτάφρων για την

τοποθέτηση μικροσωληνώσεων και οπτικών καλωδίων, καθώς και την κατασκευή φρεατίων πρόσβασης και διακλάδωσης του δικτύου. Οι μικροτάφροι κατασκευάζονταν τόσο κατά μήκος των οδικών αξόνων όσο και εγκάρσια, όπου απαιτούνταν για την τροφοδότηση οικοδομικών τετραγώνων και κτιρίων με υποδομές οπτικών ινών. Κατά την εκτέλεση των εργασιών δόθηκε ιδιαίτερη έμφαση στην τήρηση των μέτρων ασφάλειας, στην εργοταξιακή σήμανση και στην ταχεία αποκατάσταση των οδοστρωμάτων μετά την ολοκλήρωση κάθε επέμβασης. Σύμφωνα με τα στοιχεία υλοποίησης του έργου, η μέση ημερήσια παραγωγικότητα εκσκαφής μικροτάφρου κυμαινόταν μεταξύ 200 και 250 μέτρων ανά συνεργείο, γεγονός που συνέβαλε στην ταχεία πρόοδο των εργασιών και στην έγκαιρη ολοκλήρωση των κατασκευαστικών φάσεων (ΟΤΕ Υποδομές Ευρυζωνικότητας, 2024). Η ημερήσια παραγωγικότητα δεν αποτελεί σταθερό μέγεθος. Επηρεάζεται από παράγοντες όπως η μορφολογία του εδάφους, η πυκνότητα υπόγειων δικτύων κοινής ωφέλειας, οι κυκλοφοριακές ρυθμίσεις και οι απαιτήσεις αδειοδότησης. Στις αστικές περιοχές οι παραπάνω παράγοντες συχνά μειώνουν τον ρυθμό κατασκευής, αυξάνοντας τόσο τη διάρκεια όσο και το κόστος των εργασιών.

Μετά την ολοκλήρωση των εργασιών εγκατάστασης των μικροσωληνώσεων και των υποδομών διέλευσης οπτικών ινών, ακολούθησε το στάδιο επαναφοράς του οδοστρώματος και καθαρισμού της περιοχής επέμβασης (Εικόνα 6-7). Οι εργασίες αυτές περιλάμβαναν την πλήρωση και συμπίεση της μικροτάφρου, την εφαρμογή ασφαλικού υλικού καθώς και τον καθαρισμό της επιφάνειας με χρήση ειδικού εξοπλισμού, ώστε να διασφαλιστεί η ασφαλής αποκατάσταση της κυκλοφορίας και η ομαλή επανένταξη του οδικού δικτύου στην καθημερινή χρήση. Η διαδικασία επαναφοράς αποτελεί ιδιαίτερα σημαντικό στάδιο της κατασκευαστικής διαδικασίας, καθώς συμβάλλει τόσο στην προστασία των εγκατεστημένων τηλεπικοινωνιακών υποδομών όσο και στη μείωση της όχλησης προς τους κατοίκους και τους διερχόμενους οδηγούς. Η σωστή αποκατάσταση της τομής εξασφαλίζει τη μακροχρόνια σταθερότητα του οδοστρώματος και περιορίζει την πιθανότητα μελλοντικών φθορών ή καθιζήσεων κατά μήκος της όδευσης του δικτύου FTTH (Φακλή, 2021).



Εικόνα 6-7 Τελική αποκατάσταση της τομής μικροτάφρου μετά την εγκατάσταση υποδομών FTTH στην περιοχή Αγίου Βασιλείου Κορινθίας

Στο πλαίσιο της ανάπτυξης του δικτύου FTTH πραγματοποιήθηκαν επίσης εργασίες κατασκευής κάθετων συνδέσεων προς σημεία πρόσβασης και εξυπηρέτησης συνδρομητών (Εικόνα 6-8). Οι εργασίες αυτές περιλάμβαναν τοπικές εκσκαφές μικρής κλίμακας, εγκατάσταση σωληνώσεων διέλευσης και διασύνδεση του δικτύου πρόσβασης με τις υποδομές διανομής της περιοχής. Οι κάθετες συνδέσεις αποτελούν ιδιαίτερα σημαντικό στάδιο της υλοποίησης του δικτύου, καθώς επιτρέπουν την επέκταση της οπτικής ίνας προς τον τελικό χρήστη και τη μελλοντική ενεργοποίηση τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών υψηλών ταχυτήτων (Φακλή, 2021). Κατά την εκτέλεση των εργασιών δόθηκε έμφαση στην ασφαλή αποκατάσταση των σημείων επέμβασης και στη διατήρηση της λειτουργικότητας του αστικού περιβάλλοντος.



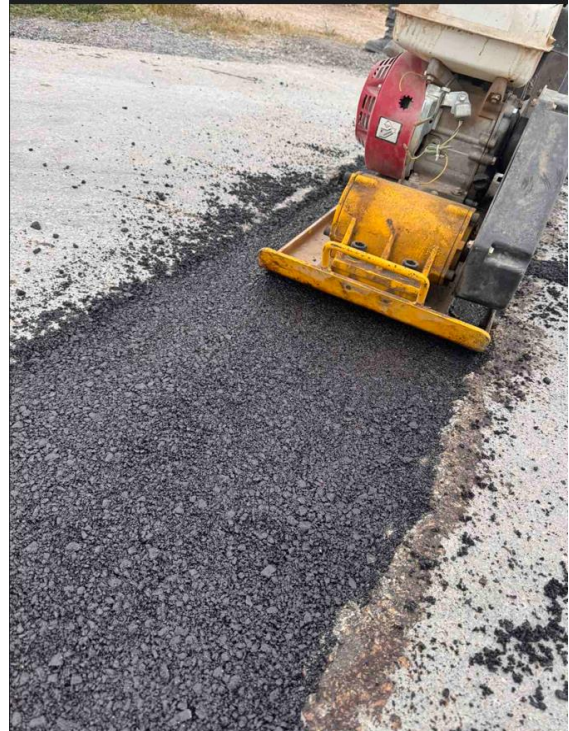
Εικόνα 6-8 Κατασκευή κάθετης όδευσης και τοποθέτηση σωλήνωσης διέλευσης οπτικών ινών στο πλαίσιο του έργου UFBB

Ένα ακόμη στάδιο της κατασκευαστικής διαδικασίας αποτέλεσε η εγκατάσταση υπόγειων φρεατίων πρόσβασης και διανομής του δικτύου οπτικών ινών. Τα φρεάτια χρησιμοποιούνται ως σημεία διέλευσης, διασύνδεσης και συντήρησης των υποδομών FTTH, επιτρέποντας την ασφαλή όδευση των μικροσωληνώσεων και των οπτικών καλωδίων κατά μήκος του δικτύου (Φακλή, 2021). Οι εργασίες περιλάμβαναν εκσκαφή, διαμόρφωση της βάσης έδρασης, τοποθέτηση προκατασκευασμένων φρεατίων, εγκατάσταση σωληνώσεων εισόδου και εξόδου καθώς και τελική αποκατάσταση της επιφάνειας. Στην Εικόνα 6-9 παρουσιάζεται το στάδιο κατασκευής υπόγειου φρεατίου πρόσβασης, στο οποίο διακρίνεται η διαμόρφωση του ξυλοτύπου και του οπλισμού πριν την ολοκλήρωση της κατασκευής.



Εικόνα 6-9 Κατασκευή υπόγειου φρεατίου δικτύου FTTH κατά το στάδιο διαμόρφωσης και οπλισμού στο Χιλιομόδι Κορινθίας

Σε τμήματα του έργου όπου οι εργασίες ανάπτυξης του δικτύου FTTH πραγματοποιήθηκαν σε οδικούς άξονες αυξημένων απαιτήσεων, εφαρμόστηκαν ειδικές διαδικασίες αποκατάστασης του οδοστρώματος (Εικόνα 6-10). Οι επεμβάσεις αυτές περιλάμβαναν εργασίες ασφαλικής αποκατάστασης, συμπίεσης και τελικής διαμόρφωσης της επιφάνειας, με στόχο τη διατήρηση της λειτουργικότητας και της ασφάλειας του οδικού δικτύου μετά την ολοκλήρωση των κατασκευαστικών εργασιών. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στην ποιότητα της τελικής αποκατάστασης, καθώς οι συγκεκριμένες παρεμβάσεις πραγματοποιήθηκαν σε σημεία αυξημένης κυκλοφορίας και τεχνικής σημασίας. Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκε εξειδικευμένος μηχανολογικός εξοπλισμός για τη διάστρωση και συμπίεση του ασφαλικού υλικού, ώστε να εξασφαλιστεί η αντοχή του οδοστρώματος και η ασφαλής διέλευση των οχημάτων. Οι ειδικές αποκαταστάσεις αποτελούν κρίσιμο στάδιο της υλοποίησης του έργου UFBB, καθώς συμβάλλουν στη μείωση των επιπτώσεων των κατασκευαστικών επεμβάσεων στο υφιστάμενο οδικό δίκτυο και στην ομαλή επανένταξη των περιοχών επέμβασης στην καθημερινή λειτουργία τους (Φακλή, 2021). Η ποιότητα της τελικής αποκατάστασης επηρεάζει την αποδοχή του έργου από τις τοπικές κοινωνίες και το μελλοντικό λειτουργικό κόστος. Ελλιπής αποκατάσταση μπορεί να οδηγήσει σε καθυστερήσεις, επαναλαμβανόμενες τεχνικές παρεμβάσεις και πρόσθετες οικονομικές επιβαρύνσεις για τον ανάδοχο, ενώ αυξάνει και τον κίνδυνο καθυστερήσεων κατά την παραλαβή του έργου.



Εικόνα 6-10 Εργασίες ειδικής ασφαλτικής αποκατάστασης και συμπίεσης οδοστρώματος στην Ολυμπία Οδό μετά την ολοκλήρωση των εργασιών εγκατάστασης υποδομών οπτικών ινών του έργου UFBB.

Σε ορισμένα τμήματα του έργου UFBB εφαρμόστηκε ανάπτυξη εναέριου δικτύου οπτικών ινών, κυρίως σε σημεία όπου η υπόγεια όδευση δεν ήταν τεχνικά ή οικονομικά εφικτή. Η εγκατάσταση πραγματοποιήθηκε μέσω υφιστάμενων στύλων δικτύου, με χρήση κατάλληλου εξοπλισμού στήριξης και εναέριων οπτικών συνδέσμων, εξασφαλίζοντας τη συνέχεια και την αξιοπιστία του τηλεπικοινωνιακού δικτύου (Εικόνα 6-11).



Εικόνα 6-11 Εναέριος οπτικός σύνδεσμος και εξοπλισμός διανομής οπτικών ινών εγκατεστημένος σε στύλο δικτύου στο πλαίσιο ανάπτυξης του έργου UFBB.

Η ανάπτυξη εναέριου δικτύου FTTH εφαρμόζεται κυρίως σε αγροτικές και ημιαστικές περιοχές όπου υπάρχει διαθέσιμη υποδομή στύλων ή όπου η κατασκευή υπόγειου δικτύου παρουσιάζει αυξημένες τεχνικές δυσκολίες και κόστος. Στο πλαίσιο του έργου UFBB, το εναέριο δίκτυο λειτουργεί συμπληρωματικά προς το υπόγειο δίκτυο πρόσβασης, εξασφαλίζοντας τη συνέχεια της κάλυψης σε περιοχές όπου η υπόγεια όδευση δεν είναι πρακτικά εφικτή. Η λύση αυτή επιτρέπει την ταχύτερη ανάπτυξη του δικτύου και τη μείωση των απαιτούμενων εκσκαφών, διατηρώντας παράλληλα τη δυνατότητα παροχής υπηρεσιών FTTH στους τελικούς χρήστες (ΟΤΕ, 2023). Η επιλογή μεταξύ υπόγειας και εναέριας ανάπτυξης αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα τεχνοοικονομικής απόφασης. Η υπόγεια εγκατάσταση προσφέρει υψηλότερη προστασία και μικρότερες απαιτήσεις συντήρησης, αλλά συνεπάγεται μεγαλύτερο αρχικό κόστος κατασκευής. Αντίθετα, η εναέρια ανάπτυξη μειώνει σημαντικά το CAPEX και επιταχύνει την υλοποίηση, όμως αυξάνει την έκθεση του δικτύου σε περιβαλλοντικές καταπονήσεις και ενδέχεται να επιφέρει υψηλότερο λειτουργικό κόστος συντήρησης.

Η ανάπτυξη εναέριων αρτηριών οπτικών ινών προϋποθέτει την κατάλληλη επιλογή τύπου καλωδίου και υποδομής μεταφοράς, ανάλογα με τον αριθμό των σημείων εξυπηρέτησης, τις απαιτήσεις χωρητικότητας και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της όδευσης. Στο πλαίσιο του έργου UFBB χρησιμοποιούνται καλώδια διαφορετικής χωρητικότητας (12, 24, 48, 96 και περισσότερων οπτικών ινών), ενώ η τροφοδότηση των εναέριων αρτηριών πραγματοποιείται μέσω micro ή mini καλωδίων που εγκαθίστανται σε κατάλληλες

μικροσωληνώσεις. Η επιλογή του κατάλληλου συνδυασμού καλωδίου και σωληνώσεων πραγματοποιείται κατά το στάδιο της μελέτης, ώστε να εξασφαλίζεται επαρκής χωρητικότητα για τις υφιστάμενες ανάγκες αλλά και δυνατότητα μελλοντικής επέκτασης του δικτύου (ΟΤΕ, 2023).

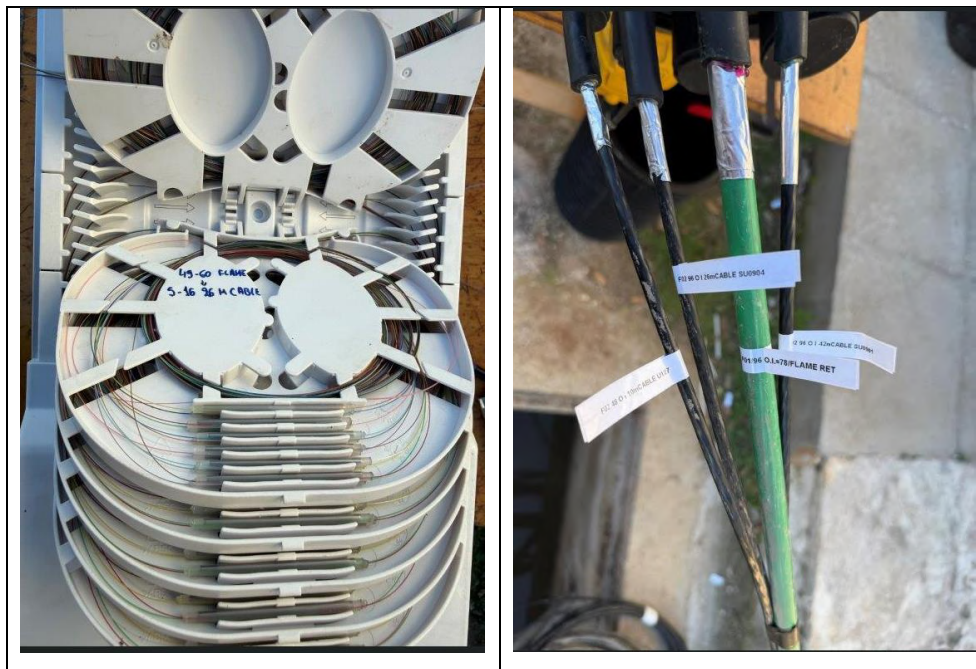
Οι καμπίνες UFBB αποτελούν βασικά στοιχεία του δικτύου FTTH, καθώς φιλοξενούν τον απαραίτητο τηλεπικοινωνιακό εξοπλισμό διανομής και σύνδεσης των οπτικών ινών. Στο πλαίσιο του έργου πραγματοποιήθηκαν εργασίες εγκατάστασης, διασύνδεσης και εσωτερικής καλωδίωσης καμπινών τύπου F1, F2 και F3, με στόχο την οργάνωση και ασφαλή λειτουργία του δικτύου πρόσβασης. Οι καμπίνες τοποθετήθηκαν σε κατάλληλα σημεία του οδικού δικτύου και συνδέθηκαν με τα υπόγεια και εναέρια τμήματα της υποδομής (Εικόνα 6-12).



Εικόνα 6-12 Καμπίνες UFBB και εναέρια υποδομή διανομής οπτικών ινών του δικτύου FTTH, με εγκατεστημένο τηλεπικοινωνιακό εξοπλισμό και στοιχεία διασύνδεσης του δικτύου πρόσβασης.

Στο πλαίσιο της ανάπτυξης του δικτύου FTTH πραγματοποιήθηκαν εργασίες εγκατάστασης και διασύνδεσης υπόγειων οπτικών καλωδίων, με χρήση κατάλληλων κασετών συγκόλλησης και εξοπλισμού προστασίας των οπτικών ινών. Οι εργασίες περιλάμβαναν την οργάνωση, συγκόλληση και τερματισμό των οπτικών ινών εντός υπόγειων φρεατίων

και σημείων σύνδεσης, εξασφαλίζοντας την ορθή λειτουργία και συνέχεια του δικτύου πρόσβασης (Εικόνα 6-13).



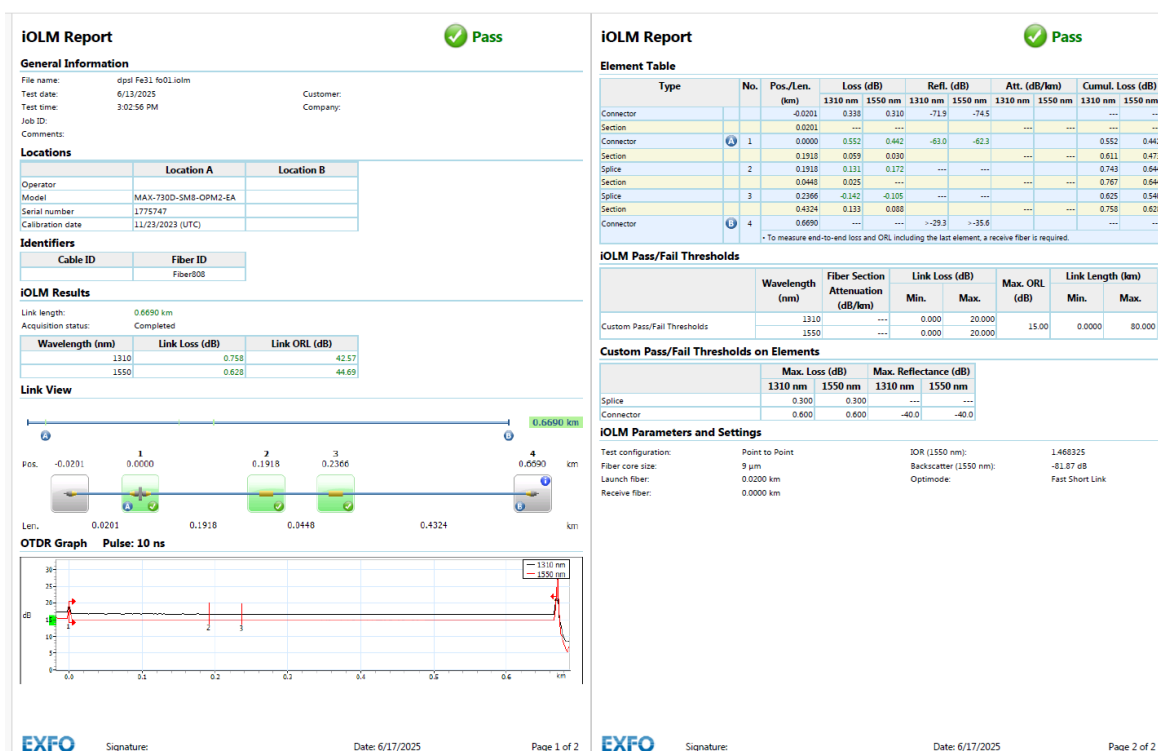
Εικόνα 6-13 Κασετοθήκη συγκόλλησης και τερματισμού υπόγειου οπτικού συνδέσμου FTTH, με οργάνωση και σήμανση οπτικών ινών για τη διασφάλιση της ορθής λειτουργίας και διαχείρισης του δικτύου πρόσβασης

Μετά την ολοκλήρωση των εργασιών συγκόλλησης και τερματισμού των οπτικών ινών, ακολούθησε η διαδικασία σήμανσης και τεκμηρίωσης των στοιχείων του δικτύου. Σε καλώδια, ίνες, καμπίνες, φρεάτια και σημεία διασύνδεσης τοποθετήθηκαν ειδικές ετικέτες αναγνώρισης (labels), οι οποίες περιλαμβάνουν πληροφορίες σχετικά με την προέλευση, τον προορισμό και τη θέση κάθε σύνδεσης. Η διαδικασία αυτή εξασφαλίζει την ιχνηλασιμότητα των υποδομών, διευκολύνει τις εργασίες συντήρησης και αποκατάστασης βλαβών και συμβάλλει στην ορθή διαχείριση του δικτύου καθ' όλη τη διάρκεια λειτουργίας του. Η σήμανση αποτελεί βασικό στοιχείο της τεχνικής τεκμηρίωσης των δικτύων FTTH και προϋπόθεση για την αποτελεσματική παρακολούθηση και πιστοποίηση των εγκατεστημένων υποδομών (ΟΤΕ Υποδομές Ευρυζωνικότητας, 2024). Η πλήρης τεκμηρίωση των εγκατεστημένων υποδομών αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για τη μελλοντική λειτουργία του δικτύου. Η ύπαρξη ενημερωμένων as-built σχεδίων και ακριβούς σήμανσης μειώνει τον χρόνο εντοπισμού βλαβών, περιορίζει το λειτουργικό κόστος συντήρησης και διευκολύνει τόσο τις μελλοντικές επεκτάσεις όσο και τις διαδικασίες πιστοποίησης και παραλαβής του έργου.

Η κατασκευαστική διαδικασία του έργου UFBB αναδεικνύει ότι η επιτυχής ανάπτυξη ενός δικτύου FTTH δεν εξαρτάται μόνο από την εφαρμογή των τεχνικών προδιαγραφών, αλλά και από τον αποτελεσματικό συντονισμό μελετών, αδειοδοτήσεων, εργοταξιακής οργάνωσης και ελέγχου ποιότητας. Η εμπειρία από την Κορινθία καταδεικνύει ότι η έγκαιρη προετοιμασία, η ορθή επιλογή των κατασκευαστικών μεθόδων και η συνεχής τεχνική επίβλεψη συμβάλλουν καθοριστικά στη μείωση των καθυστερήσεων, στον περιορισμό του κόστους και στη διασφάλιση της μακροχρόνιας αξιοπιστίας των υποδομών FTTH.

6.4 Μετρήσεις – αποτελέσματα

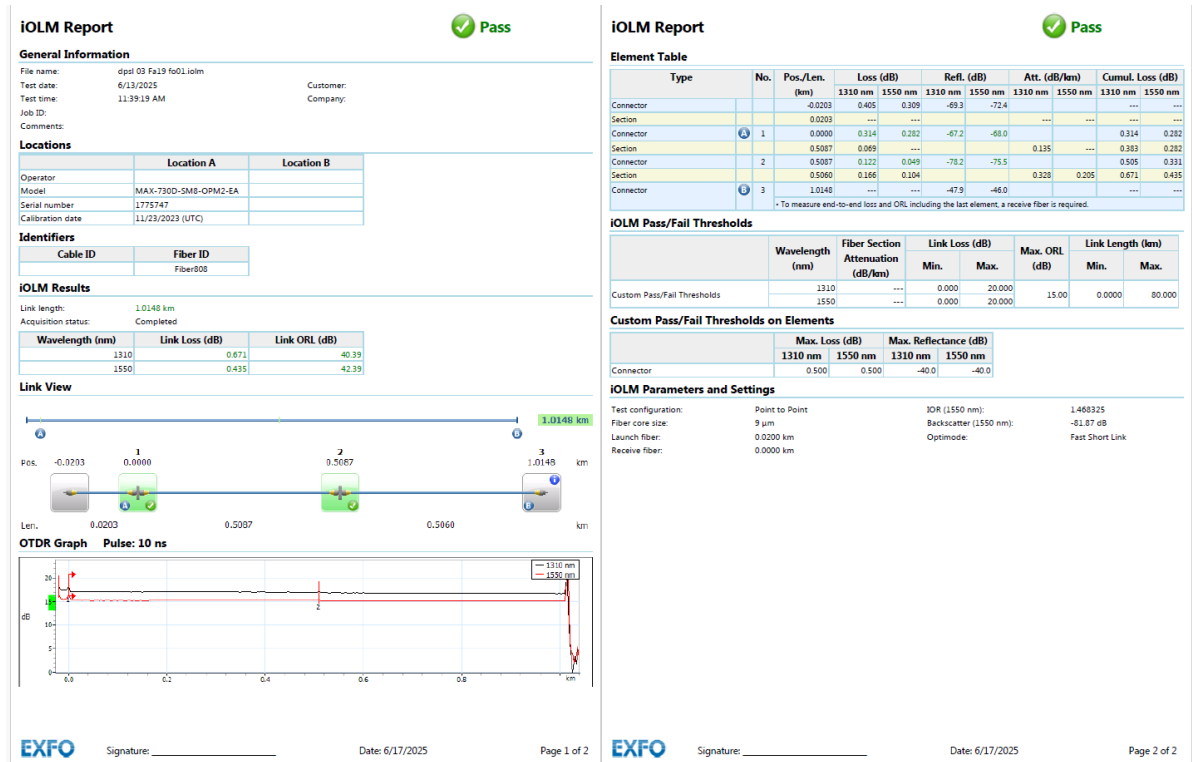
Μετά την ολοκλήρωση των εργασιών εγκατάστασης του δικτύου FTTH πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις πιστοποίησης και ελέγχου της οπτικής ζεύξης, με σκοπό την αξιολόγηση της ποιότητας εγκατάστασης και της ορθής λειτουργίας του δικτύου. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με χρήση εξοπλισμού EXFO iOLM/OTDR, ο οποίος χρησιμοποιείται ευρέως σε δίκτυα οπτικών ινών για τον εντοπισμό απωλειών, ανακλάσεων και πιθανών αστοχιών κατά μήκος της ζεύξης.



Εικόνα 6-14 Αποτελέσματα μέτρησης iOLM/OTDR οπτικής ζεύξης FTTH στο πλαίσιο του έργου UFBB Κορινθίας

Η συγκεκριμένη μέτρηση (Εικόνα 6-14) αφορούσε οπτική ίνα συνολικού μήκους 0,669 km και πραγματοποιήθηκε στα μήκη κύματος 1310 nm και 1550 nm, σύμφωνα με τις συνήθειες πρακτικές ελέγχου δικτύων FTTH. Τα αποτελέσματα έδειξαν συνολικές απώλειες 0,758 dB στα 1310 nm και 0,628 dB στα 1550 nm, τιμές οι οποίες βρίσκονται εντός των επιτρεπτών ορίων για δίκτυα πρόσβασης GPON/XGS-PON. Οι μετρήσεις Optical Return Loss (ORL) παρουσίασαν τιμές 42,57 dB και 44,69 dB αντίστοιχα, γεγονός που υποδεικνύει πολύ καλή ποιότητα οπικής ζεύξης και περιορισμένες ανακλάσεις κατά μήκος του δικτύου. Η χαμηλή ανακλαστικότητα αποτελεί σημαντικό παράγοντα για τη σταθερή λειτουργία των υπηρεσιών υψηλών ταχυτήτων και τη διατήρηση υψηλής ποιότητας μετάδοσης δεδομένων. Τα αποτελέσματα αυτά υποδηλώνουν ότι η εγκατάσταση του δικτύου πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τις προδιαγραφές σχεδιασμού, χωρίς σημαντικές απώλειες στις συγκολλήσεις ή στις συνδέσεις των οπτικών ινών. Η επίτευξη χαμηλών απωλειών ήδη από το στάδιο της πιστοποίησης μειώνει την πιθανότητα μελλοντικών τεχνικών παρεμβάσεων και συμβάλλει στη μείωση του λειτουργικού κόστους (OPEX) του δικτύου. Κατά τη διάρκεια της μέτρησης εντοπίστηκαν συνδέσεις και συγκολλήσεις (splices) οι οποίες παρουσίασαν απώλειες εντός των προβλεπόμενων ορίων. Ειδικότερα, οι απώλειες των συγκολλήσεων παρέμειναν χαμηλότερες από τα όρια αποδοχής των 0,3 dB, επιβεβαιώνοντας την ορθή εγκατάσταση και την ποιοτική υλοποίηση του δικτύου οπτικών ινών.

Η δεύτερη μέτρηση (Εικόνα 6-15) πραγματοποιήθηκε σε οπτική ζεύξη συνολικού μήκους 1,0148 km με χρήση συστήματος EXFO iOLM/OTDR, στα μήκη κύματος 1310 nm και 1550 nm. Τα αποτελέσματα της μέτρησης έδειξαν συνολικές απώλειες 0,671 dB στα 1310 nm και 0,435 dB στα 1550 nm, τιμές οι οποίες βρίσκονται εντός των επιτρεπόμενων ορίων λειτουργίας δικτύων FTTH και θεωρούνται ιδιαίτερα ικανοποιητικές για το μήκος της συγκεκριμένης ζεύξης. Οι τιμές Optical Return Loss (ORL) καταγράφηκαν στα 40,39 dB και 42,39 dB αντίστοιχα, υποδεικνύοντας περιορισμένες ανακλάσεις και υψηλή ποιότητα μετάδοσης του οπτικού σήματος. Η μέτρηση ανέδειξε την ύπαρξη συνδέσεων και ενδιάμεσων σημείων διασύνδεσης τα οποία παρουσίασαν πολύ χαμηλές απώλειες, επιβεβαιώνοντας την ορθή εκτέλεση των εργασιών εγκατάστασης και συγκόλλησης των οπτικών ινών.

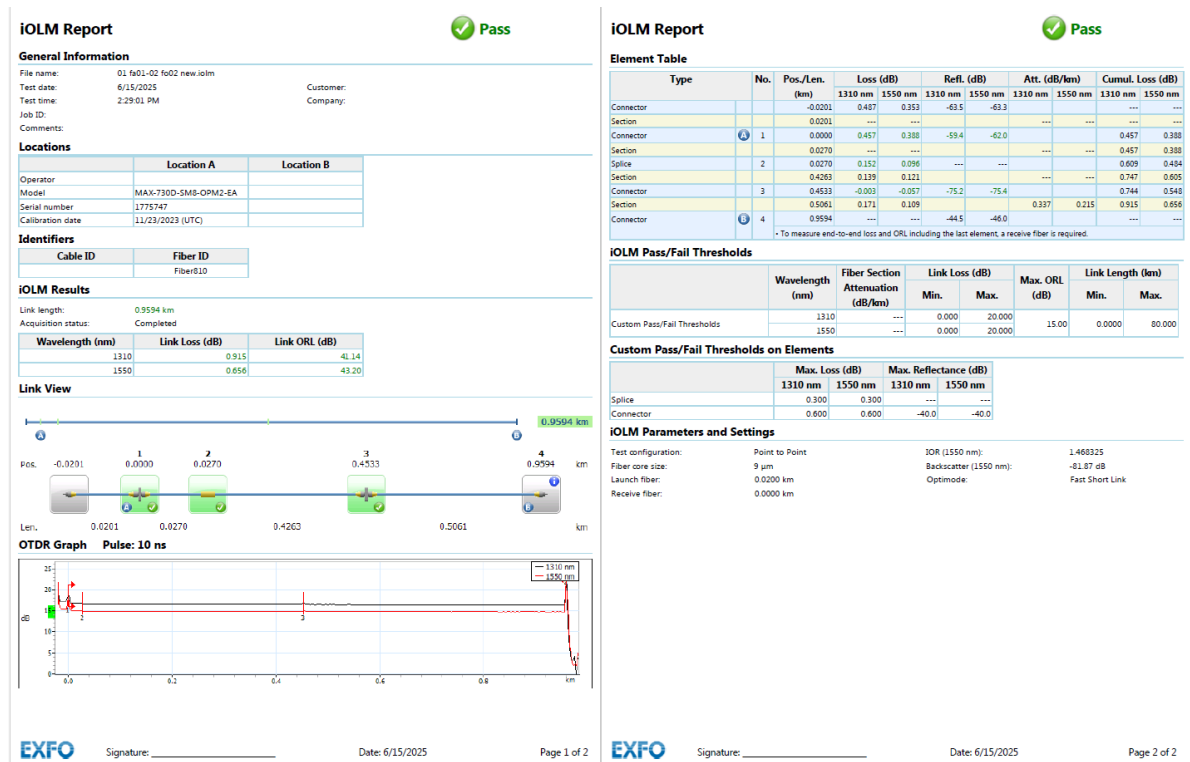


Εικόνα 6-15 Αναφορά μετρήσεων iOLM/OTDR για έλεγχο οπτικής ζεύξης FTTH στο έργο UFBB Κορινθίας

Η τρίτη μέτρηση (Εικόνα 6-16) πραγματοποιήθηκε σε οπτική ζεύξη συνολικού μήκους 0,9594 km με χρήση εξοπλισμού EXFO iOLM/OTDR, στα μήκη κύματος 1310 nm και 1550 nm. Οι συνολικές απώλειες της ζεύξης καταγράφηκαν στα 0,915 dB για το μήκος κύματος των 1310 nm και στα 0,656 dB για τα 1550 nm, τιμές οι οποίες θεωρούνται αποδεκτές για το μήκος της συγκεκριμένης γραμμής και συμβατές με τις απαιτήσεις λειτουργίας δικτύων GPON/XGS-PON. Οι τιμές Optical Return Loss (ORL) ανήλθαν στα 41,14 dB και 43,20 dB αντίστοιχα, υποδεικνύοντας περιορισμένες ανακλάσεις και ικανοποιητική ποιότητα μετάδοσης του οπτικού σήματος. Κατά την ανάλυση της οπτικής ζεύξης εντοπίστηκαν συνδέσεις και συγκολλήσεις οπτικών ινών με πολύ χαμηλές απώλειες, οι οποίες παρέμειναν εντός των προκαθορισμένων ορίων αποδοχής. Η σωστή συμπεριφορά των συνδέσεων και των ενδιάμεσων σημείων διασύνδεσης αποδεικνύει την ποιοτική εγκατάσταση του δικτύου και τη σωστή εκτέλεση των εργασιών πεδίου.

Η συνέπεια των αποτελεσμάτων και στις τρεις μετρήσεις αποτελεί ένδειξη σταθερής ποιότητας κατασκευής ανεξάρτητα από τη θέση εγκατάστασης. Το στοιχείο αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε έργα μεγάλης γεωγραφικής έκτασης, όπως το UFBB, όπου η

ομοιομορφία της ποιότητας κατασκευής αποτελεί βασική προϋπόθεση για τη μακροχρόνια αξιοπιστία του δικτύου.



Εικόνα 6-16 Αναφορά μετρήσεων iOLM/OTDR για πιστοποίηση οπτικής ζεύξης FTTH στο έργο UFBB Κορινθίας

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του συστήματος iOLM, οι οπτικές ζεύξεις χαρακτηρίστηκαν ως “Pass”, γεγονός που επιβεβαιώνει ότι πληρούνται οι τεχνικές προδιαγραφές λειτουργίας του δικτύου πρόσβασης FTTH στο πλαίσιο του έργου Ultra-Fast Broadband (UFBB). Οι μετρήσεις αποδεικνύουν ότι η εγκατεστημένη υποδομή μπορεί να υποστηρίξει αξιόπιστα υπηρεσίες υπερυψηλών ταχυτήτων και εφαρμογές αυξημένων απαιτήσεων δεδομένων. Επιπλέον, οι μετρήσεις πιστοποίησης δεν αποτελούν μόνο τεχνικό κριτήριο αποδοχής του έργου, αλλά και βασικό στοιχείο της διαδικασίας ποιοτικού ελέγχου και παραλαβής. Η συμμόρφωση με τα καθορισμένα όρια επιτρέπει την ασφαλή εμπορική ενεργοποίηση των συνδέσεων και περιορίζει τον κίνδυνο εμφάνισης βλαβών κατά τα πρώτα στάδια λειτουργίας του δικτύου.

6.5 Συζήτηση ευρημάτων

Η υλοποίηση του έργου Ultra-Fast Broadband (UFBB) στην Περιφερειακή Ενότητα Κορινθίας ανέδειξε τη σημασία της ανάπτυξης δικτύων οπτικών ινών νέας γενιάς για την κάλυψη των αυξανόμενων τηλεπικοινωνιακών αναγκών της περιοχής. Διαπιστώθηκε ότι η τεχνολογία οπτικών ινών μπορεί να υποστηρίξει αξιόπιστα υπηρεσίες υπερυψηλών ταχυτήτων και εφαρμογές αυξημένων απαιτήσεων δεδομένων. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων πιστοποίησης με χρήση εξοπλισμού EXFO iOLM/OTDR έδειξαν ότι οι οπτικές ζεύξεις παρουσίασαν χαμηλές απώλειες και πολύ ικανοποιητικές τιμές Optical Return Loss (ORL). Επιβεβαιώνεται, έτσι, η ορθή εγκατάσταση των οπτικών καλωδίων, των συγκολλήσεων και των σημείων διασύνδεσης του δικτύου. Οι τιμές των απωλειών παρέμειναν εντός των προβλεπόμενων ορίων λειτουργίας δικτύων GPON/XGS-PON, ενώ όλες οι μετρήσεις χαρακτηρίστηκαν ως “Pass”, επιβεβαιώνοντας την επιτυχημένη υλοποίηση του έργου και τη συμμόρφωση με τις τεχνικές προδιαγραφές. Τα ευρήματα της παρούσας μελέτης επιβεβαιώνουν ότι η ποιότητα κατασκευής αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για τη μελλοντική λειτουργία ενός δικτύου FTTH. Οι χαμηλές τιμές απωλειών και ανακλάσεων δεν επηρεάζουν μόνο την τεχνική απόδοση της σύνδεσης, αλλά περιορίζουν και τις ανάγκες συντήρησης, μειώνοντας τις λειτουργικές δαπάνες καθ' όλη τη διάρκεια ζωής της υποδομής.

Η κατασκευαστική διαδικασία κατέδειξε τις ιδιαιτερότητες που παρουσιάζει η ανάπτυξη δικτύων FTTH σε περιοχές με διαφορετικά γεωγραφικά και πολεοδομικά χαρακτηριστικά. Η συνύπαρξη αστικών, ημιαστικών και αγροτικών περιοχών δημιούργησε διαφορετικές απαιτήσεις ως προς τη χάραξη των οδεύσεων, την επιλογή των σημείων εγκατάστασης και τη μέθοδο ανάπτυξης του δικτύου. Σε αρκετές περιπτώσεις απαιτήθηκε συνδυασμός υπόγειων και εναέριων υποδομών, ώστε να επιτευχθεί η βέλτιστη κάλυψη με τεχνικά και οικονομικά αποδοτικό τρόπο. Η εμπειρία από την Κορινθία ανέδειξε ότι οι τεχνικές επιλογές δεν λαμβάνονται αποκλειστικά με βάση τις επιδόσεις του δικτύου, αλλά προκύπτουν από τη συνδυαστική αξιολόγηση τεχνικών, οικονομικών και γεωγραφικών παραμέτρων. Η επιλογή μεταξύ υπόγειας και εναέριας ανάπτυξης, καθώς και μεταξύ μικροτάφρου και συμβατικής εκσκαφής, επηρεάζει άμεσα το κόστος κατασκευής και τον χρόνο ολοκλήρωσης του έργου.

Η εφαρμογή τεχνικών μικροτάφρου και ειδικών αποκαταστάσεων οδοστρώματος συνέβαλαν στη μείωση της όχλησης προς τους πολίτες και στη γρηγορότερη ολοκλήρωση των εργασιών πεδίου. Η χρήση υπόγειων οπτικών συνδέσμων, καμπινών διανομής UFBB και εξειδικευμένου εξοπλισμού συγκόλλησης επέτρεψε την ασφαλή διαχείριση και προστασία των οπτικών ινών, διασφαλίζοντας τη λειτουργική αξιοπιστία του δικτύου. Το έργο UFBB στην Κορινθία αποδεικνύει ότι η ανάπτυξη δικτύων FTTH αποτελεί βασική προϋπόθεση για τον ψηφιακό μετασχηματισμό των τοπικών κοινωνιών και την υποστήριξη σύγχρονων υπηρεσιών επικοινωνίας. Η εγκατάσταση υποδομών νέας γενιάς ενισχύει τη δυνατότητα παροχής υπηρεσιών Gigabit, συμβάλλει στην ανάπτυξη εφαρμογών έξυπνων πόλεων και δημιουργεί τις απαραίτητες προϋποθέσεις για τη μελλοντική υποστήριξη δικτύων 5G και υπηρεσιών υψηλής χωρητικότητας. Κατά την υλοποίηση του έργου διαπιστώθηκε ότι σημαντικό μέρος των καθυστερήσεων δεν οφειλόταν στις ίδιες τις τεχνικές εργασίες αλλά σε εξωτερικούς παράγοντες, όπως οι διαδικασίες αδειοδότησης, ο συντονισμός με οργανισμούς κοινής ωφέλειας και οι κυκλοφοριακές ρυθμίσεις. Οι παράγοντες αυτοί επηρέασαν τον προγραμματισμό των συνεργειών και είχαν έμμεση επίδραση στο συνολικό κόστος του έργου, αναδεικνύοντας ότι η επιτυχία ενός μεγάλου έργου FTTH εξαρτάται εξίσου από την αποτελεσματική διοικητική οργάνωση και τον τεχνικό σχεδιασμό.

Η μελέτη περίπτωσης του UFBB στην Περιφερειακή Ενότητα Κορινθίας καταδεικνύει ότι η επιτυχής ανάπτυξη δικτύων FTTH προϋποθέτει την ολοκληρωμένη διαχείριση τεχνικών, οικονομικών και οργανωτικών παραμέτρων. Η ποιότητα της μελέτης, η ορθή επιλογή των τεχνικών εγκατάστασης, η αποτελεσματική διαχείριση των αδειοδοτήσεων και η συστηματική πιστοποίηση του δικτύου αποτελούν αλληλένδετους παράγοντες που επηρεάζουν την ποιότητα, το κόστος και τον χρόνο υλοποίησης. Τα συμπεράσματα αυτά μπορούν να αξιοποιηθούν ως χρήσιμα διδάγματα για τον σχεδιασμό και την υλοποίηση αντίστοιχων έργων FTTH στην Ελλάδα.

7. Συμπεράσματα

Η παρούσα διπλωματική εργασία διερεύνησε τη συμβολή των δικτύων FTTH και των δικτύων πέμπτης γενιάς (5G) στην ψηφιακή μετάβαση της Ελλάδας, με έμφαση στο έργο UFBB. Οι υποδομές πολύ υψηλής χωρητικότητας αποτελούν βασική προϋπόθεση για την ενίσχυση της ανταγωνιστικότητας της οικονομίας, τη βελτίωση της ποιότητας ζωής των πολιτών και τη δημιουργία των κατάλληλων συνθηκών για την ανάπτυξη σύγχρονων ψηφιακών υπηρεσιών. Από τη θεωρητική προσέγγιση προέκυψε ότι τα δίκτυα FTTH αντιπροσωπεύουν την πλέον ολοκληρωμένη και τεχνολογικά ώριμη λύση πρόσβασης νέας γενιάς. Σε σύγκριση με άλλες αρχιτεκτονικές FTTx, προσφέρουν υψηλότερες ταχύτητες μετάδοσης, αυξημένη αξιοπιστία, χαμηλές απώλειες σήματος και δυνατότητες μελλοντικής αναβάθμισης χωρίς εκτεταμένες παρεμβάσεις στη φυσική υποδομή. Η εξέλιξη των τεχνολογιών GPON, XGS-PON και NG-PON2 επιβεβαιώνει ότι οι οπτικές ίνες συνιστούν τη βασική υποδομή πάνω στην οποία θα στηριχθούν οι μελλοντικές ανάγκες συνδεσιμότητας, οι υπηρεσίες cloud, οι εφαρμογές Internet of Things και τα δίκτυα 5G. Η εργασία δεν περιορίστηκε στην τεχνολογική περιγραφή των δικτύων FTTH, αλλά διερεύνησε τον τρόπο με τον οποίο ο τεχνικός σχεδιασμός, η διαχείριση του έργου και οι τεχνοοικονομικές παράμετροι αλληλεπιδρούν κατά την ανάπτυξη ενός μεγάλου έργου ευρυζωνικών υποδομών. Η μελέτη περίπτωσης του έργου UFBB κατέδειξε ότι η επιτυχία μιας τέτοιας επένδυσης δεν εξαρτάται αποκλειστικά από την επιλογή της κατάλληλης τεχνολογίας, αλλά από τον αποτελεσματικό συντονισμό τεχνικών, διοικητικών και οικονομικών διαδικασιών σε όλα τα στάδια υλοποίησης.

Οι Συμπράξεις Δημοσίου και Ιδιωτικού Τομέα διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην εξάπλωση τηλεπικοινωνιακών υποδομών σε περιοχές όπου η αποκλειστική ιδιωτική επένδυση δεν θεωρείται οικονομικά ελκυστική. Μέσω του συγκεκριμένου μοντέλου κατέστη δυνατή η κινητοποίηση επενδυτικών κεφαλαίων και η αξιοποίηση εξειδικευμένης τεχνογνωσίας, συμβάλλοντας στη μείωση του ψηφιακού χάσματος μεταξύ αστικών, ημιαστικών και αγροτικών περιοχών.

Ιδιαίτερη σημασία έχει και η διαδικασία μελέτης, σχεδιασμού και κατασκευής των δικτύων FTTH. Η επιτυχής υλοποίηση ενός έργου τέτοιας κλίμακας προϋποθέτει συστηματική

επιτόπια αποτύπωση, ορθό σχεδιασμό οδεύσεων, αποτελεσματική αξιοποίηση των υποδομών πεδίου, κατάλληλη επιλογή εξοπλισμού και αυστηρό ποιοτικό έλεγχο. Η εμπειρία από την εγκατάσταση δικτύων FTTH καταδεικνύει ότι οι τεχνικές αποφάσεις που λαμβάνονται κατά τη φάση του σχεδιασμού επηρεάζουν άμεσα το κόστος υλοποίησης και τη μελλοντική λειτουργικότητα και επεκτασιμότητα του δικτύου. Η ανάλυση της μελέτης περίπτωσης ανέδειξε ότι οι αποφάσεις που λαμβάνονται κατά τα αρχικά στάδια του σχεδιασμού επηρεάζουν καθοριστικά όχι μόνο το αρχικό επενδυτικό κόστος (CAPEX), αλλά και τις μελλοντικές λειτουργικές δαπάνες (OPEX), την ποιότητα των παρεχόμενων υπηρεσιών και τη δυνατότητα μελλοντικής αναβάθμισης του δικτύου. Επομένως, η ορθή μελέτη και η ολοκληρωμένη προετοιμασία αποτελούν κρίσιμους παράγοντες επιτυχίας αντίστοιχων έργων FTTH.

Η βασική συνεισφορά της παρούσας εργασίας έγκειται στη συνδυαστική προσέγγιση τεχνικών, διοικητικών και τεχνοοικονομικών παραμέτρων ανάπτυξης δικτύων FTTH μέσα από τη μελέτη περίπτωσης του έργου UFBB. Σε αντίθεση με μεγάλο μέρος της διεθνούς βιβλιογραφίας, η οποία επικεντρώνεται είτε στην τεχνολογία είτε στην οικονομική αξιολόγηση, η παρούσα εργασία αξιοποιεί πραγματικά στοιχεία σχεδιασμού, κατασκευής και πιστοποίησης του έργου, επιτρέποντας τη διατύπωση συμπερασμάτων που προκύπτουν από πραγματικές συνθήκες υλοποίησης. Η προσέγγιση αυτή συμβάλλει στην καλύτερη κατανόηση των παραγόντων που επηρεάζουν την επιτυχή ανάπτυξη μεγάλων έργων FTTH στην Ελλάδα.

Παρά τα πλεονεκτήματα των δικτύων οπτικών ινών, η ανάπτυξή τους συνοδεύεται από προκλήσεις. Το υψηλό αρχικό επενδυτικό κόστος, οι χρονοβόρες αδειοδοτικές διαδικασίες, οι απαιτήσεις συντονισμού μεταξύ πολλών εμπλεκόμενων φορέων και οι τεχνικές δυσκολίες που προκύπτουν κατά την κατασκευή επηρεάζουν την πρόοδο των έργων. Επιπλέον, η μακροχρόνια βιωσιμότητα των επενδύσεων εξαρτάται από τα τεχνικά χαρακτηριστικά των υποδομών και τη ζήτηση των παρεχόμενων υπηρεσιών, τον βαθμό υιοθέτησης από τους τελικούς χρήστες και τη δυνατότητα αξιοποίησης των δικτύων από παρόχους και επιχειρήσεις. Η εμπειρία από το έργο UFBB έδειξε επίσης ότι σημαντικό μέρος των καθυστερήσεων δεν οφείλεται στις τεχνικές εργασίες καθαυτές, αλλά σε διοικητικούς και θεσμικούς παράγοντες, όπως οι διαδικασίες αδειοδότησης, ο συντονισμός μεταξύ δημόσιων φορέων και οργανισμών κοινής ωφέλειας και η διαχείριση των παρεμβάσεων στον αστικό χώρο. Το εύρημα αυτό υπογραμμίζει ότι η αποτελεσματική

διοίκηση έργου αποτελεί εξίσου σημαντικό παράγοντα επιτυχίας με την τεχνική αρτιότητα της κατασκευής.

Τα συμπεράσματα της εργασίας μπορούν να αξιοποιηθούν από τηλεπικοινωνιακούς παρόχους και δημόσιους φορείς που σχεδιάζουν αντίστοιχα έργα ψηφιακών υποδομών. Η έγκαιρη ολοκλήρωση των μελετών, η αποτελεσματική διαχείριση των αδειοδοτήσεων, η επιλογή κατάλληλων τεχνικών ανάπτυξης και η συστηματική παρακολούθηση της ποιότητας των κατασκευών μπορούν να περιορίσουν σημαντικά τις καθυστερήσεις και να βελτιώσουν τη συνολική αποδοτικότητα των επενδύσεων.

Τα ευρήματα της εργασίας επιβεβαιώνουν ότι τα δίκτυα FTTH αποτελούν πυλώνα για την επίτευξη των εθνικών και ευρωπαϊκών στόχων ψηφιακού μετασχηματισμού. Η ανάπτυξή τους δημιουργεί τις απαραίτητες προϋποθέσεις για την υποστήριξη υπηρεσιών υψηλής προστιθέμενης αξίας, τη βελτίωση της παραγωγικότητας, την ενίσχυση της καινοτομίας και την προσέλκυση επενδύσεων. Συμβάλλουν στην κοινωνική συνοχή, προσφέροντας ισότιμη πρόσβαση σε σύγχρονες ψηφιακές υπηρεσίες ανεξαρτήτως γεωγραφικής θέσης.

Η ανάπτυξη δικτύων FTTH δεν περιορίζεται μόνο στην τεχνολογική αναβάθμιση των τηλεπικοινωνιακών υποδομών, αλλά επιδρά άμεσα και στην καθημερινότητα των πολιτών. Η πρόσβαση σε συνδέσεις πολύ υψηλών ταχυτήτων διευκολύνει τη χρήση ψηφιακών υπηρεσιών, την τηλεργασία, την τηλεεκπαίδευση και την ηλεκτρονική διακυβέρνηση. Η χρήση νέων υποδομών οπτικών ινών συμβάλλει στη μείωση των βλαβών και στη βελτίωση της αξιοπιστίας των παρεχόμενων υπηρεσιών.

Η διαθεσιμότητα δικτύων FTTH αποτελεί σημαντικό παράγοντα ενίσχυσης της τοπικής οικονομικής δραστηριότητας. Οι επιχειρήσεις αποκτούν πρόσβαση σε υπηρεσίες υψηλής αξιοπιστίας και ταχύτητας, γεγονός που διευκολύνει την αξιοποίηση εφαρμογών υπολογιστικού νέφους, ηλεκτρονικού εμπορίου και απομακρυσμένης συνεργασίας. Επιπλέον, η ύπαρξη σύγχρονων τηλεπικοινωνιακών υποδομών μπορεί να λειτουργήσει ως κίνητρο εγκατάστασης νέων επιχειρήσεων σε μια περιοχή, βελτιώνοντας την ανταγωνιστικότητά της.

Η παρούσα εργασία βασίστηκε κυρίως σε βιβλιογραφική ανασκόπηση, τεχνικές προδιαγραφές και διαθέσιμα στοιχεία σχετικά με το έργο UFBB) και την ανάπτυξη δικτύων FTTH στην Ελλάδα. Ως εκ τούτου, ορισμένα συμπεράσματα στηρίζονται σε θεωρητικά και

δευτερογενή δεδομένα και όχι σε πλήρως επικαιροποιημένα οικονομικά ή λειτουργικά στοιχεία από το σύνολο των περιοχών υλοποίησης του έργου. Επιπλέον, η αξιολόγηση της οικονομικής αποδοτικότητας των δικτύων FTTH επηρεάζεται από παράγοντες που μεταβάλλονται διαχρονικά, όπως το κόστος υλικών, οι τιμές ενέργειας, οι χρηματοδοτικές συνθήκες, η διείσδυση των ευρυζωνικών υπηρεσιών και η τεχνολογική εξέλιξη των δικτύων πρόσβασης. Αντίστοιχα, η πραγματική απόδοση του έργου UFBB θα μπορεί να αποτιμηθεί με μεγαλύτερη ακρίβεια μετά την πλήρη ολοκλήρωση και εμπορική αξιοποίησή του.

Το περιεχόμενο της συγκεκριμένης διπλωματικής μπορεί να αποτελέσει χρήσιμο οδηγό για τον σχεδιασμό και την υλοποίηση των μελλοντικών έργων ευρυζωνικών υποδομών στην Ελλάδα. Καταδεικνύει ότι η ανάπτυξη δικτύων FTTH αποτελεί μια σύνθετη τεχνολογική και επενδυτική διαδικασία, της οποίας η επιτυχία προϋποθέτει τον συνδυασμό αποτελεσματικού τεχνικού σχεδιασμού, ορθής διοίκησης έργου και τεκμηριωμένης τεχνοοικονομικής αξιολόγησης.

Για μελλοντική έρευνα προτείνεται η περαιτέρω διερεύνηση της οικονομικής αποδοτικότητας των επενδύσεων FTTH μέσω προηγμένων τεχνοοικονομικών μοντέλων, η αξιολόγηση της πραγματικής διείσδυσης των υπηρεσιών στις περιοχές ανάπτυξης του UFBB, καθώς και η μελέτη της αλληλεπίδρασης μεταξύ δικτύων FTTH, 5G και εφαρμογών έξυπνων πόλεων. Επιπλέον, ενδιαφέρον παρουσιάζει η εξέταση της συμβολής των υποδομών αυτών στην πράσινη μετάβαση και στη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος των τηλεπικοινωνιακών δικτύων μέσω ενεργειακά αποδοτικότερων αρχιτεκτονικών και τεχνολογιών.

Βιβλιογραφία

Abbas H.S., Gregory M.A. (2016). The next generation of passive optical networks: A review. *Journal of Network and Computer Applications*, 67.

Abdellaoui Z., Dieudonne Y., Aleya A. (2021). Design and evaluation of a FTTH access network based on GPON. *Array*, 10.

Abdullah, A. M., Al Hoqani, M., Amirza, M., & Kannadhasan, S. (2025). Optimizing fiber optic network design for efficient FTTH implementation. In J. K. Katiyar et al. (Eds.), *Proceedings of International Conference on Computer Science and Communication Engineering (ICCSCE 2025)* (Advances in Computer Science Research, Vol. 124, pp. 2219–2229). Atlantis Press.

Addanki S., Amiri I.S., Yupapin P.P. (2018). Review of optical fibers: Introduction and applications in fiber lasers. *Results in Physics*.

Adhikari, R. (2025). FTTH planning and implementation of Fiber World Communication Pvt. Ltd. *Vaasan Ammattikorkeakoulu University of Applied Sciences*.

Ahmad, M. F. (2026). Cost optimization strategies for large-scale FTTH deployment in KSA. *Iconic Research and Engineering Journals*, 9(10), 829–839.

Aleksić S. (2011). Energy Efficiency of Electronic and Optical Network Elements. *IEEE Network*, 17, 296–308.

Apriono C., Martino M.S., Natali Y. (2024). FTTH network design using TWDM-PON. *Evergreen*.

Asril, A. A., Maria, P., Lifwarda, Antonisfia, Y., & Hadi, R. (2023). Fiber to the home (FTTH) network design with addition of optical distribution point (ODP) using the branching method. *International Journal of Advanced Science Computing and Engineering*, 5(2), 95–107.

Axon Partners Group. (2023). *BULRIC model for FTTH networks: Descriptive manual*. Belgian Institute for Postal Services and Telecommunications (BIPT). <https://www.bipt.be/operators/publication/ftth-cost-model-proximus-fiberklaar-and-unifiber-descriptive-manual>

Babu M., Ramakrishnan M., Sikkander D.M., Rajkumar D. (2019). Backhaul performance of 5G TWDM-PON network. *Caribbean Journal of Science*, 53.

Bouras, C., Kokkinos, V., Kollia, A., & Papazois, A. (2015). Techno-economic analysis of ultra-dense and DAS deployments in mobile 5G. *IEEE*.

Cambini, C., Grinza, E., & Sabatino, L. (2023). Ultra-fast broadband access and productivity: Evidence from Italian firms. *International Journal of Industrial Organization*, 86, 102901.

Capital.gr. (2025, 6 Νοεμβρίου). *OTE: Συμφωνία για την υλοποίηση του έργου ΣΔΙΤ UFBB μέσω μεταβίβασης της εταιρείας TERNΑ FIBER*. <https://www.capital.gr/epixeiriseis/3955262/ote-sumfonia-gia-tin-ulopoiisi-tou-ergou-sdit-ufbb-meso-metabibasis-tis-etairias-terna-fiber/>

Corazza G.E., Rinaldi I., Coletto I., Mirabile M., Mazzarella S., Parasecolo F., Baiocchi A., Colonnese S., Panarese P., Yildiz M., Costa C., De Minico G., Abbondante F., De Tullio M.F., Girardi M., Parisi S., Serafini S., Tinnirello I. (2026). A glimpse on the futures of telecommunication networks. *Journal of Open Innovation*.

COSMOTE Technical Services. (2025). *New FTTH cabinets cabling management: Διαχείριση - Προβλήματα*. COSMOTE.

COSMOTE. (2023, Οκτώβριος 2). *UFBB rollout – Lots 1, 3, 7*. OTE.

Dai T. (2022). The Advantages of Network Data Transmission of Optical Fiber Data and its Principle. *Advances in Social Science, Education and Humanities Research*.

Divyavarshini R., Sanjay Kumar S., Teni Jio F.J., Evanjalín A.B. (2024). Evaluation of fiber-optic cable performance. *International Journal of Science, Engineering and Technology*, 12(2).

E-Business Forum. (2008). *Τεχνικό παράρτημα ανάπτυξης δικτύων FTTX: Γενικές αρχές, διεθνείς πρακτικές και τεχνικές προδιαγραφές για την κατασκευή δικτύων οπτικών ινών εντός πόλεων και εγκατάσταση δομημένης καλωδίωσης εντός κτιρίων* (Έκδ. Ομάδα Εργασίας Ιδ3).

European Commission, (2019). *State Aid SA.53135 (2019/N) – Greece Ultra-Fast Broadband Infrastructure Scheme (UFBB)*. <https://www.digitaltransform.gr/wp-content/uploads/2024/03/01-Decision-UFBB-sa-53135-2019.pdf>

European Commission, 2003. *Guidelines for successful Public-Private Partnerships*. Directorate-General for Regional Policy. Brussels.

Fenta M.C., Potter D.K., Szanyi J. (2021). Fibre Optic Methods of Prospecting: A Comprehensive and Modern Branch of Geophysics. *Surveys in Geophysics*, 42, 551–584.

FTTH Council Europe. (2016). *FTTH handbook* (7th ed.). Ανακτήθηκε από: https://lafibre.info/images/doc/201602_ftth_handbook_v7.pdf

Garvey, P. (2005). *Cost and profitability drivers for FTTH*. Last Mile, July 2005, 24–25.

Grötschel M., Raack C., Werner A. (2014). Towards optimizing the deployment of optical access networks. *EURO Journal on Computational Optimization*, 2.

Havic, Z., & Mikac, B. (2011). Economic model for FTTH access network design. *Proceedings of the 10th Conference on Telecommunication Techno-Economics* (CTTE 2011), Berlin, Germany.

Havic, Z., & Mikac, B. (2015). Economic model for FTTH access network design. *Universal Journal of Communications and Network*, 3(3), 57–63.

Horvath T., Munster P., Oujezsky V., Bao N.-H. (2020). Passive optical networks progress: A tutorial. *Electronics*, 9(7).

IEEE. (2004). *IEEE 802.3ah-2004: Ethernet in the First Mile*. IEEE, Piscataway, NJ, USA.

IEEE. (2009). *IEEE 802.3av-2009: 10G-EPON Standard*. IEEE, Piscataway, NJ, USA

Ioannou, N., Logothetis, V., Petre, K., Tselekounis, M., Chipouras, A., Katsianis, D., & Varoutas, D. (2020). Network modelling approaches for calculating wholesale NGA prices: A full comparison based on the Greek fixed broadband market. *ITS Online Event 2020, International Telecommunications Society (ITS)*.

ITU-T G.984. (2021). *Gigabit-capable passive optical networks (GPON)*. Ανακτήθηκε από: https://www.itu.int/en/ITU-T/studygroups/2017-2020/15/Documents/flyers/Flyer_ITU-T_G.984.pdf

ITU-T G.987.3. (2014). *10-Gigabit-capable Passive Optical Networks (XG-PON): Transmission convergence layer specification*. Ανακτήθηκε από: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.987.3>

ITU-T. (1995). *Recommendation Q.2931*. Ανακτήθηκε από: <https://www.itu.int/ITU-T/recommendations/rec.aspx?rec=4594&lang=en>

ITU-T. (1997). *Recommendation I.113*. Ανακτήθηκε από: <https://www.itu.int/rec/t-rec-i.113-199706-i/en>

ITU-T. (2017). *Liaison Statement SCV-LS13*. Ανακτήθηκε από: <https://www.itu.int/en/ITU-T/committees/scv/Documents/SCV-LS13.pdf>

ITU-T. G.987 (2014). *10-Gigabit-capable Passive Optical Networks (XG-PON)*. Ανακτήθηκε από: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.987/e>

Kadhim, D. J., & Hussain, N. A.-R. (2013). Design and implementation of a practical FTTH network. *International Journal of Computer Applications*, 72(12), 50–56.

Kao K.C., Hockham G.A. (1996). Dielectric-fiber surface waveguides for optical frequencies. *IEE Proceedings*.

Khalil, Siregar M., Sihombing D.J. (2022). Impact of the HFC migration to FTTH. *Journal of Physics: Conference Series*, 2193.

Li, B., Akintoye, A., Edwards, P.J. and Hardcastle, C., 2005. The allocation of risk in PPP/PFI construction projects in the UK. *International Journal of Project Management*, 23(1), pp.25-35.

Liu X. (2019). Evolution of Fiber-Optic Transmission and Networking toward the 5G Era. *iScience*, 22.

Lorincz J., Cústo E., Begušić D. (2025). A comprehensive analysis of methods for improving and estimating energy efficiency of FTTH networks. *Sensors*, 25.

Mazzei, C., Crescitelli, M., Fioramanti, D., Quagliarini, A., Reale, A., & Brunetti, F. (2023). Technical–economic analysis to identify the acceptable maximum attenuation on PON FTTH lines for wholesale network operators. *Scientific Reports*, 13, 12327.

Moghaddam S.S., Moghaddam S.K. (2025). Sustainable Broadband Internet: Current Status and Future Directions. *IEEE Access*, 13.

Muciaccia T., Gargano F., Passaro V.M. (2014). Passive Optical Access Networks: State of the Art and Future Evolution. *Photonics*, 1.

Ng, A. and Loosemore, M., 2007. Risk allocation in the private provision of public infrastructure. *International Journal of Project Management*, 25(1), pp.66-76.

Nyarko-Boateng O., Xedagbui F.E., Adekoya A.F., Weyori B.A. (2020). Fiber optic deployment challenges and their management in a developing country. *Engineering Reports*, 2.

Omoigui N., Sirbu M.A., Eldering C.A., Himayat N. (2020). Comparing integrated broadband architectures from an economic perspective. *Telecommunications and Internet Policy*.

OTE. (2021). Σύμβαση Υπεργολαβίας για την Εκτέλεση Έργου «Ανάπτυξη Υποδομών Υπερυψηλής Ευρυζωνικότητας – Ultra-Fast Broadband (UFBB) και Εκτέλεση Εργασιών σε Υφιστάμενες Υποδομές». Εσωτερικό συμβατικό έγγραφο.

Petrovich M.N., Numkam Fokoua E.R., Chen Y., Sakr H., Adamu A.I., Hassan R., Wu D., Fatobene Ando R., Papadimopoulos A., Sandoghchi S.R., Jasion G.T., Poletti F. (2025). Broadband optical fibre with ultra-low attenuation. *Nature Photonics*, 19.

Putra, S. F., Tjahjamoonsih, N., & Marpaung, J. (2024). Design and implementation of FTTH networks using Optisystem simulation software in Kota Raya residential complexes. *Journal of Electrical Engineering, Energy, and Information Technology (J3EIT)*, 12(2), 463–476.

Rokkas, T. (2011). *Technoeconomic analysis of Next Generation Networks* (Doctoral dissertation, National and Kapodistrian University of Athens, Department of Informatics and Telecommunications).

Roumboutsos, A. and Anagnostopoulos, K.P., 2008. Public–private partnership projects in Greece: risk ranking and preferred risk allocation. *Construction Management and Economics*, 26(7), pp.751-763.

Sapundzhi F., Zarev B., Georgiev S., Zaharieva S., Popstoilov M., Lazarova M. (2025). Design and implementation of a passive optical network. *Engineering Proceedings*, 100.

Segarra, J., Sales, V., & Prat, J. (2012). Planning and Designing FTTH Networks: Elements, Tools and Practical Issues. *Proceedings of ICTON 2012, IEEE*.

Skoufis A., Chatzithanasis G., Dede G., Filiopoulou E., Kamalakis T., Michalakelis C. (2022). Technoeconomic assessment of an FTTH network investment in the Greek telecommunications market. *Telecommunication Systems*, 82.

The Business Research Company. (2026). *Fiber optics market report 2026: Market size, trends, and global forecast 2026–2035*. Ανακτήθηκε από: <https://www.einpresswire.com/article/901594796>

Timmers M., Guenach M., Nuzman C.J., Maes J. (2013). G. fast: evolving the copper access network. *IEEE Communications Magazine*, 51.

Torres-Ferrera P., Effenberger F.J., Faruk M.S., Savory S.J., Gaudino R. (2022). Overview of high-speed TDM-PON beyond 50 Gbps. *Journal of Optical Communications and Networking*, 14.

Valentino, R., Yolanda, A., & Maria, P. (2024). Fiber To The Home (FTTH) network infrastructure design using Gigabyte Passive Optical Network (GPON) technology South Solok District. *PERFECT: Journal of Smart Algorithms*, 1(2), 49–56.

Vargas-Bustamante, M., Zapata, M., & Álvarez-Tello, J. (2025). Planning and Management of Fiber Optic Networks Based on a Geographic Information System: A Case in Ecuador. *Interacción*.

Vargas-Bustamante, M., Zapata, M., & Álvarez-Tello, J. (2025). Planning and Management of Fiber Optic Networks Based on a Geographic Information System: A Case in Ecuador. *Interacción*.

Ye O., Wang L., Yang A., Su L., Belanger D., Gao T., Wei L., Zhang Y. (2021). The Next Decade of Telecommunications Artificial Intelligence. *ArXiv*.

Yousaf M.B. (2026). Strategic deployment challenges and optimization of FTTH/FTTX networks in Saudi Arabia under Vision 2030. *Global Academic Journal of Economics and Business*, 8(2).

Yuhani, A., Haryatmi, E., Haryadi, D., & Arafat, Y. B. (2025). Design and implementation of FTTB network transmission in high-rise buildings using GPON. *International Journal of Engineering Continuity*, 4(1), 173–188.

Zin A.M., Idrus S.M., Ismail N.A., Ramli A., Butt R.A. (2018). Energy Efficient Performance Evaluation of XG-PON for Sustainable Green Communication Infrastructure. In *Proceedings of the Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS)*, Toyama, Japan, 1–4 August.

Δαλατζής, Ν. (2017). *Ευρυζωνικά Δίκτυα Οπτικών Ινών στην Ελλάδα* (Μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία). Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης & Πανεπιστήμιο Μακεδονίας, Ξάνθη.

Εθνική Επιτροπή Τηλεπικοινωνιών και Ταχυδρομείων (ΕΕΤΤ). (2025). *Έγκριση προσφοράς αναφοράς της εταιρείας «Ultrafast OTE Α.Ε.Ε.Σ.» στο πλαίσιο του έργου «Υποδομές Υπερυψηλής Ευρυζωνικότητας ULTRA-FAST BROADBAND με ΣΔΙΤ»* (ΑΠ 1146/1, ΦΕΚ Β' 1512/31.03.2025). Εφημερίδα της Κυβερνήσεως. <https://www.eett.gr/wp-content/uploads/2025/04/%CE%91%CE%A0-1146-001.%CE%A6%CE%95%CE%9A.pdf>

Κασίμης Χ., Παπαδόπουλος Α., Σουσουνής Γ., Στραβοράβδης Σπ. (1998) *Μελέτη για την ανάπτυξη του Νομού Κορινθίας* Εθνικό Κέντρο Κοινωνικών Ερευνών, Αθήνα.

Μπόγκος, Κ. (2011). *Στρατηγικό σχέδιο ανάπτυξης Νομού Κορινθίας* [Διπλωματική εργασία, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Μηχανικών Χωροταξίας, Πολεοδομίας και Περιφερειακής Ανάπτυξης]. Ιδρυματικό Αποθετήριο Πανεπιστημίου Θεσσαλίας

Μπούγος, Π. (2023). *Σχεδιασμός και ανάπτυξη δικτύων οπτικών ινών FTTH στο πλαίσιο του έργου Ultra-Fast Broadband (UFBB)* [Διπλωματική εργασία]. Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής.

Νταβέλης, Ε. (2021). *Συμβάσεις παραχώρησης – Σ.Δ.Ι.Τ. στην Ελλάδα: Εφαρμογές σε σύγχρονα τεχνικά έργα* [Μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία, Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο]. Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο.

Οργανισμός Τηλεπικοινωνιών Ελλάδος Α.Ε. (2025, 6 Νοεμβρίου). *Ο ΟΤΕ υπέγραψε συμφωνία για την υλοποίηση του έργου ΣΔΙΤ UFBB μέσω μεταβίβασης της εταιρείας TERNA FIBER*. ΟΤΕ Group. https://athens.euronext.com/sites/default/files/hermes_3/2025-11/el/d0c4d47c-344d-4f01-84d4-7c344d9f0132/99_7796_2025_Greek_1.pdf

ΟΤΕ Υποδομές Ευρυζωνικότητας. (2024). *Παρουσίαση έργου FTTH/UFBB Δήμου Κορινθίων*. Εσωτερική τεχνική παρουσίαση έργου UFBB.

ΟΤΕ. (2023, Απρίλιος). *Εναέριο οπτικό δίκτυο FTTH*. ΟΤΕ Group.

ΟΤΕ. (2024, Μάρτιος). *UFBB: Επιμετρήσεις & αναλώσεις υλικών*. COSMOTE – ΟΤΕ Group.

Πρόγραμμα Ψηφιακός Μετασχηματισμός 2021–2027, (2025). *Υποδομές Υπερυψηλής Ευρυζωνικότητας – Ultrafast Broadband (UFBB)*.
<https://www.digitaltransform.gr/ylopoiisi-drason/ylopoiisi-drason-tpe/ypodomes-yperypsilis-evryzonikotitas-ultrafast-broadband-ufbb/>

ΣΔΙΤ Forum Initiative. (2026, 18 Φεβρουαρίου). *Ultra-Fast Broadband: Ποιο είναι το έργο ΣΔΙΤ που συμβάλλει στο γρήγορο Ίντερνετ*.
<https://sditforum.gr/%CE%AD%CF%81%CE%B3%CE%B1/ultra-fast-broadband-%CE%AF%CE%BD%CF%84%CE%B5%CF%81%CE%BD%CE%B5%CF%84/>

Στύλλα, Η. (2014). *Συμπράξεις Δημοσίου και Ιδιωτικού Τομέα. Η μέθοδος παραχώρησης στην Ελλάδα: Η περίπτωση του αυτοκινητοδρόμου ΜΟΡΕΑ* (Διπλωματική εργασία, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης).

Υπουργείο Ψηφιακής Διακυβέρνησης, (2025). *Το Ultra-Fast Broadband αποτελεί το μεγαλύτερο έργο τηλεπικοινωνιακών υποδομών στην Ελλάδα*.
<https://www.mindigital.gr/archives/8234>

Υπουργείο Ψηφιακής Διακυβέρνησης. (2021). *Έγκριση τεύχους πρόσκλησης υποβολής δεσμευτικών προσφορών (Β' Φάση, Στάδιο II) στο πλαίσιο του διεθνούς ηλεκτρονικού διαγωνισμού για την ανάθεση σύμπραξης δημοσίου και ιδιωτικού τομέα με τίτλο «Υποδομές Υπερυψηλής Ευρυζωνικότητας ULTRA-FAST BROADBAND με ΣΔΙΤ»* (ΑΔΑ: 6ΕΚΑ46ΜΠΥΓ-ΜΑΦ). Ελληνική Δημοκρατία. <https://www.digitaltransform.gr/wp-content/uploads/2024/03/02-UFBB-%CE%88%CE%B3%CE%BA%CF%81%CE%B9%CF%83%CE%B7-%CE%BA%CE%B1%CE%B9-RFQ-%CE%91%CE%94%CE%91-%CE%91%CE%94%CE%91%CE%9C.pdf>

Υπουργείο Ψηφιακής Διακυβέρνησης. (2023, 12 Ιουνίου). *Υπογραφή σύμβασης σύμπραξης για το έργο «Ultra-Fast Broadband»*. <https://www.digitaltransform.gr/wp-content/uploads/2024/03/03-%CE%94%CE%A4-%CE%A5%CE%A0%CE%9F%CE%93%CE%A1%CE%91%CE%A6%CE%97-%CE%A3%CE%A5%CE%9C%CE%92%CE%91%CE%A3%CE%97%CE%A3->

[%CE%A3%CE%A5%CE%9C%CE%A0%CE%A1%CE%91%CE%9E%CE%97%CE%A3.pdf](#)

Υπουργείο Ψηφιακής Διακυβέρνησης. (2023, 14 Ιουνίου). *Υπογραφή Σύμβασης Σύμπραξης για το έργο «Ανάπτυξη Υποδομών Υπερυψηλής Ευρυζωνικότητας - UltraFast BroadBand (UFBB)»*. <https://pppunit.minfin.gov.gr/el/sdit/anakoinoseis/ipografi-simvasis-simpraxis-gia-to-ergo-anaptixi-ipodomon-iperipsilis-eurizonikotitas-ultrafast-broadband-ufbb>

Υπουργείο Ψηφιακής Διακυβέρνησης. (2026, 17 Μαρτίου). *Ξεκίνησε η εμπορική διάθεση υπηρεσιών οπτικής ίνας στο πλαίσιο του έργου UFBB – Ημιαστικές και αγροτικές περιοχές αποκτούν για πρώτη φορά ευρυζωνικές συνδέσεις*. <https://www.mindigital.gr/archives/8412>

Φακλή, Δ. (2021). *Χρονικός και οικονομικός προγραμματισμός έργων κατασκευής και αποκατάστασης δικτύων οπτικών ινών* [Διπλωματική εργασία, Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο].

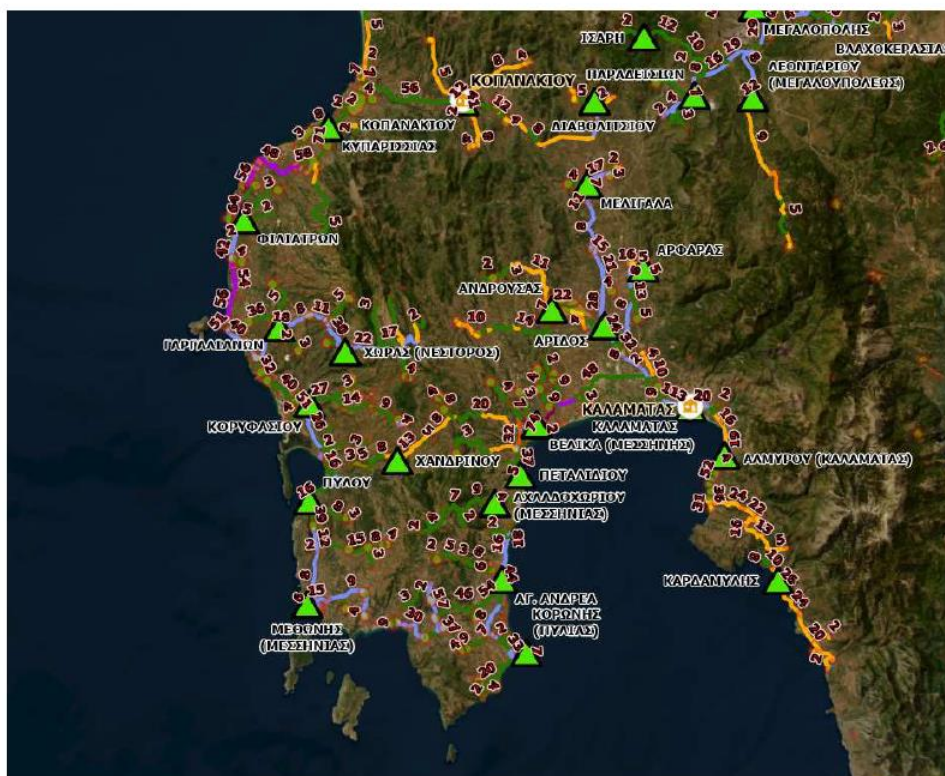
Φάνη, Κ.-Μ. (2024). *Χάρτης Περιφερειακής Ενότητας Κορινθίας* [Διπλωματική εργασία, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Πολυτεχνική Σχολή]. ΙΚΕΕ ΑΠΘ.

Χριστοδουλοπούλου, Μ. Γ. (2021). *Τεχνο-οικονομική ανάλυση δικτύων FTTH* (Διπλωματική εργασία). Διαπανεπιστημιακό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών «Τεχνο-Οικονομικά Συστήματα», Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο & Πανεπιστήμιο Πειραιώς.

Παράρτημα

Παράρτημα Α – Ενδεικτικά τεχνικά διαγράμματα σχεδιασμού UFBB

ΔΙΚΤΥΟ ΒΗ – ΝΟΜΟΣ ΜΕΣΣΗΝΙΑΣ



Εικόνα Α-1 Δίκτυο Backhaul (BH) του έργου UFBB στον Νομό Μεσσηνίας.

(Πηγή: COSMOTE, 2023)

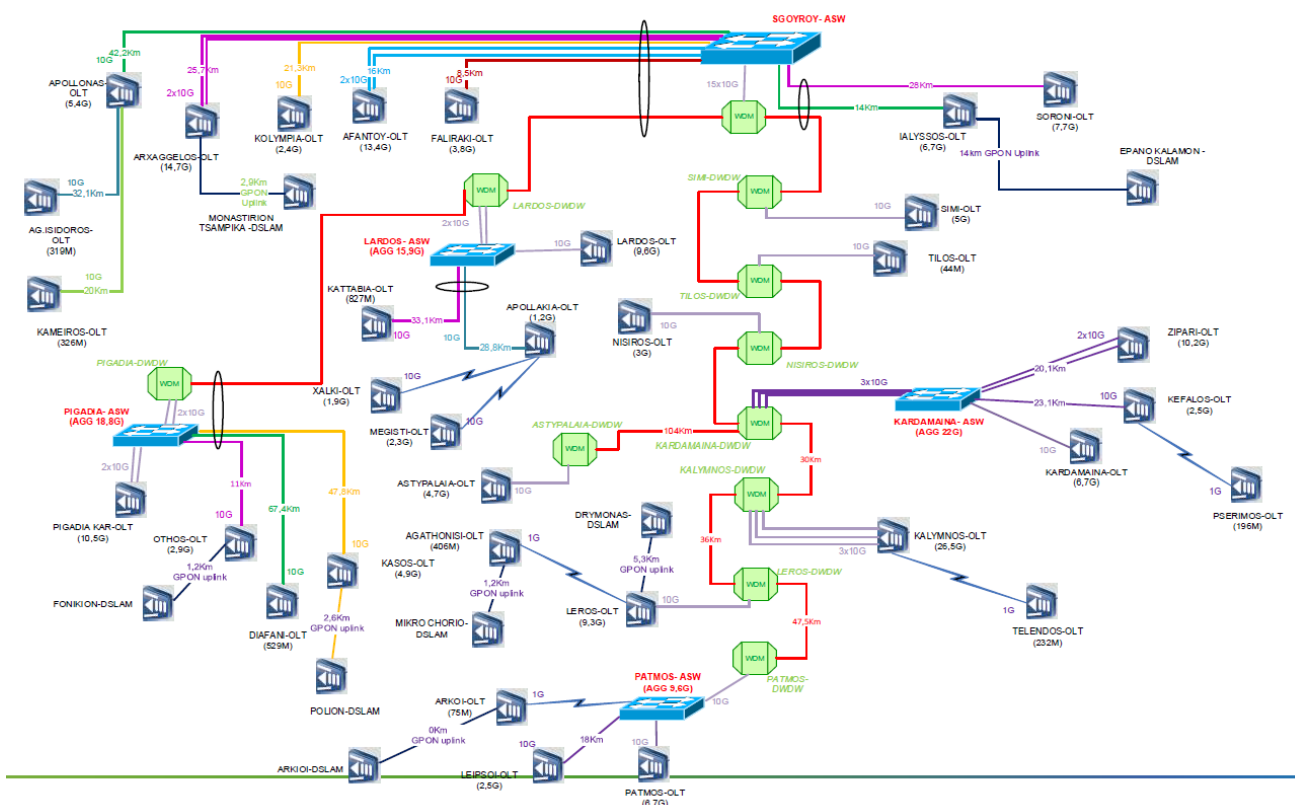
ΕΝΔΕΙΚΤΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΔΙΚΤΥΟΥ ACCESS



Εικόνα A-2 Ενδεικτική απεικόνιση δικτύου πρόσβασης (Access Network) του έργου UFBB.

(Πηγή: COSMOTE, 2023)

ΕΝΔΕΙΚΤΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ



Εικόνα Α-3 Ενδεικτικό διάγραμμα μετάδοσης και διασύνδεσης κόμβων

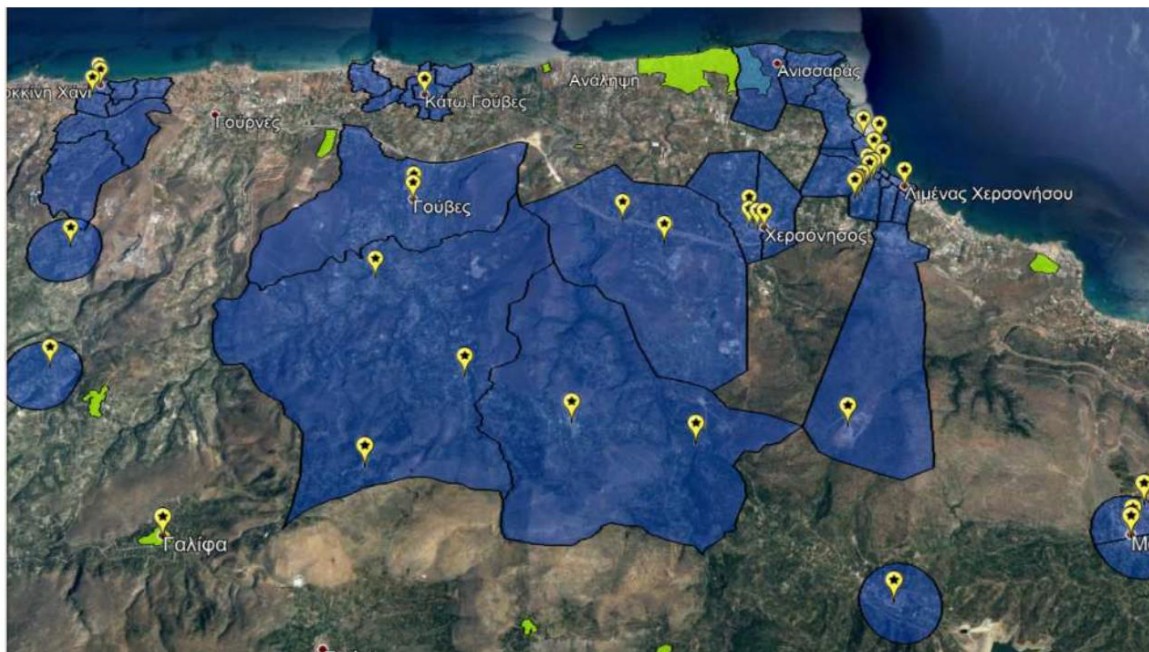
(Πηγή: COSMOTE, 2023)

OCCAs & RSCAs



Εικόνα Α-4 Παραδείγματα περιοχών OCCA και RSCA
(Πηγή: COSMOTE, 2023)

SEDs in OCCAs & RSCAs



Εικόνα Α-5 Περιοχές OCCA και RSCA με σημεία κοινωνικοοικονομικού ενδιαφέροντος (SEDs)
(Πηγή: COSMOTE, 2023)

Υπεύθυνη Δήλωση Συγγραφέα:

Δηλώνω ρητά ότι, σύμφωνα με το άρθρο 8 του Ν.1599/1986, η παρούσα εργασία αποτελεί αποκλειστικά προϊόν προσωπικής μου εργασίας, δεν προσβάλλει κάθε μορφής δικαιώματα διανοητικής ιδιοκτησίας, προσωπικότητας και προσωπικών δεδομένων τρίτων, δεν περιέχει έργα/εισφορές τρίτων για τα οποία απαιτείται άδεια των δημιουργών/δικαιούχων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον και πληρούν τους κανόνες της επιστημονικής παράθεσης.