



Tehnički vodič kroz arhitekturu, projektiranje i izgradnju svjetlovodnih mreža

1. UVOD U FTTH TEHNOLOGIJU

FTTH (*Fiber-to-the-Home*) predstavlja krajnji stadij evolucije širokopojasnog pristupa. Za razliku od hibridnih rješenja, FTTH eliminira bakar u potpunosti.

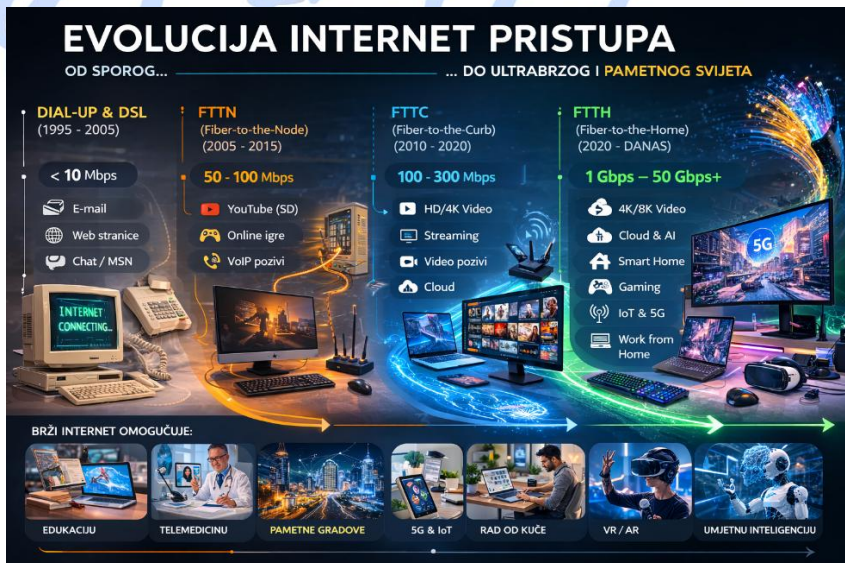
- **Prednosti:** Neograničen kapacitet, niska latencija (< 2ms), otpornost na elektromagnetske smetnje.
- **Topologija:** Fokus na P2MP (*Point-to-Multipoint*) arhitekturu.

1. Uvod u FTTH tehnologiju

1.1. Definicija i evolucija pristupa

FTTH je arhitektura prijenosa signala putem optičkog vlakna od centralnog čvora operatora (**Central Office**) do završne točke u domu korisnika. Povijesno gledano, razvoj je tekao kroz nekoliko faza:

1. **Dial-up & DSL:** Korištenje bakrenih parica (telefonska linija). Ograničen domet i brzina.
2. **FTTN (Fiber-to-the-Node):** Optika dolazi do kvartovskog ormarića, ostatak je bakar.
3. **FTTC (Fiber-to-the-Curb):** Optika dolazi do pločnika/stupa ispred kuće.
4. **FTTH (Fiber-to-the-Home):** Potpuna optička nit do rutera.



1.2. Zašto baš FTTH? (Ključne prednosti)

Za razliku od bakra, koji prenosi električne impulse podložne interferencijama, optika prenosi **fotone (svjetlost)** kroz staklenu jezgru. To donosi više ključnih stupova prednosti:

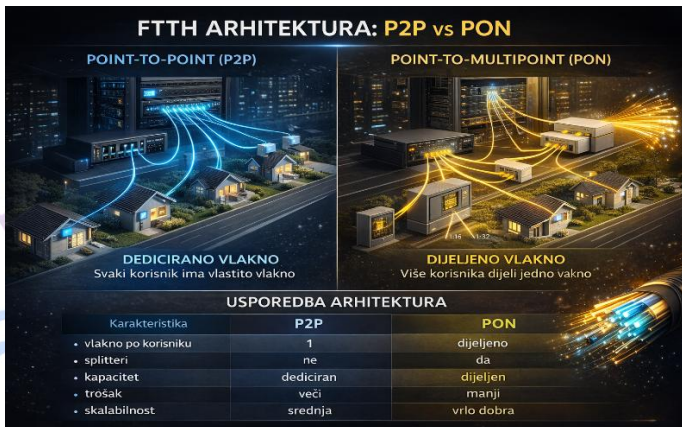
- **Simetrične brzine:** Mogućnost jednake brzine preuzimanja (*download*) i slanja (*upload*) podataka, što je kritično za video konferencije i Cloud servise.
- **Neograničena propusnost (Future-proof):** FTTH je tehnologija budućnosti, jer nudi ogroman kapacitet koji može zadovoljiti rastuće potrebe za podacima, 4K/8K streamingom, virtualnom stvarnosti (VR) i pametnim kućama.
- **Imunost na smetnje:** Budući da je vlakno dielektrik (ne vodi struju), na njega ne utječu grmljavina, elektromagnetsko zračenje niti korozija.
- **Energetska učinkovitost:** Pasivne optičke mreže (PON) troše znatno manje električne energije jer između centrale i korisnika nema aktivnih uređaja koji trebaju napajanje.
- **Veća vrijednost nekretnine:** Kuće i stanovi opremljeni svjetlovodnom infrastrukturom obično imaju veću tržišnu vrijednost.



1.3. Arhitektonski modeli: P2P vs. P2MP

U planiranju FTTh projekata, važno je razlikovati dva osnovna modela povezivanja:

- **P2P (Point-to-Point):** Svaki korisnik ima svoju vlastitu, izravnu nit do centrale. Maksimalna privatnost i pojasna širina, ali izuzetno visoki troškovi izgradnje zbog velike količine kabela.
- **P2MP (Point-to-Multipoint):** Temelj PON (Passive Optical Network) tehnologije. Jedna nit iz centrale dijeli se pomoću optičkog djelitelja (splittera) na 32, 64 ili čak 128 korisnika. Ovo je najisplativiji model za masovnu implementaciju.



1.4. Standardi i brzine prijenosa

Danas se FTTH implementira kroz nekoliko generacija standarda:

- **GPON (Gigabit PON):** Trenutni standard koji nudi do **2.5 Gbps** downloada.
- **XGS-PON:** Nova generacija koja omogućuje simetričnih **10 Gbps**.
- **50G-PON:** Tehnologija budućnosti koja je već u fazi testiranja za ultra-zahvatljive industrijske primjene.

Karakteristika	Bakrena parica (DSL)	Koaksijalni kabel (HFC)	Optičko vlakno (FTTH)
Maks. brzina	do 100 Mbps	do 1 Gbps	10+ Gbps
Domet signala	< 2 km	< 5 km	preko 20 km
Latencija	Visoka	Srednja	Ultra niska
Trajnost	Podložno koroziji	Srednja	Dugovječno (30+ g)

2. OSNOVE SVJETLOVODA (FIZIKA I STANDARDI)

Prijenos podataka temelji se na **totalnoj refleksiji** unutar jezgre vlakna.

Tehničke specifikacije:

- **G.652.D:** Standardno SM (Single-mode) vlakno za magistralne pravce.
- **G.657.A1/A2:** Vlakna s malim radijusom savijanja (ključna za unutar-objektne instalacije).

(Snellov zakon koji definira lom svjetlosti na granici jezgre i omotača)

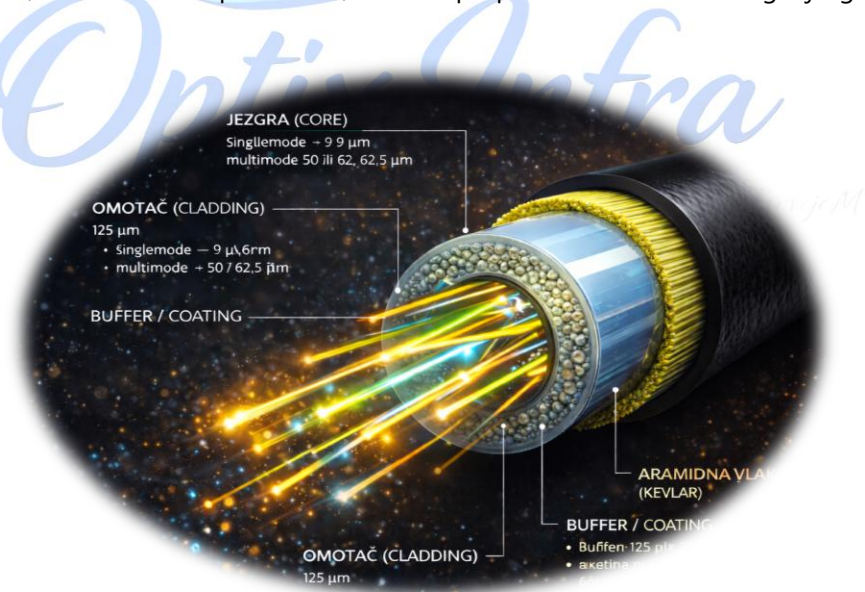
2.1. Fizika prijenosa: Totalna refleksija

Svjetlovod (optičko vlakno) prenosi informacije u obliku svjetlosnih impulsa kroz nit od ultra-čistog stakla (silicijev dioksid). Glavni princip koji to omogućuje je **totalna unutarnja refleksija**.

Vlakno se sastoji od dva osnovna dijela s različitim indeksima loma

- **Jezgra (Core):** Središnji dio s višim indeksom loma
- **Omotač (Cladding):** Sloj oko jezgre s nižim indeksom loma

Kada svjetlost pogodi granicu jezgre i omotača pod kutom većim od kritičnog kuta, ona se ne lomi prema van, već se u potpunosti reflektira natrag u jezgru.



2.2. Single-mode (SM) vs. Multi-mode (MM) vlakna

U FTTH mrežama, **Single-mode** vlakno je apsolutni standard, dok se Multi-mode koristi isključivo unutar podatkovnih centara na kratkim udaljenostima.

- **Single-mode (SM):** Ima vrlo usku jezgru (cca. **9 μm**). Svjetlost putuje samo jednom stazom (modom), što eliminira modalnu disperziju i omogućuje prijenos signala na desetke kilometara bez pojačanja.
- **Multi-mode (MM):** Šira jezgra (50 ili 62.5 μm) omogućuje putovanje svjetlosti u više cik-cak putanja. To uzrokuje "razlijevanje" impulsa na velikim udaljenostima.



2.3. Ključni ITU-T Standardi za FTTH

Prilikom nabave materijala za FTTH projekt, najvažnije je poznavati standarde Međunarodne telekomunikacijske unije (ITU-T):

Standard	Naziv / Namjena	Karakteristike
G.652.D	Standardno SM vlakno	Najčešće korišteno u magistralnim i distributivnim kabelima. Nisko gušenje na 1310 i 1550 nm.
G.657.A1	Savljivo SM vlakno	Poboljšana otpornost na savijanje. Koristi se u pristupnim mrežama.
G.657.A2	Ultra savljivo vlakno	Standard za unutar-objektne instalacije. Može se savijati oko oštih kutova u stanovima bez značajnog gubitka signala.

2.4. Svjetlovodni "prozori" i gušenje

Svjetlost se u optici ne mjeri bojama koje vidimo, već valnim duljinama u nanometrima (nm). U FTTH-u koristimo tri glavna pojasa:

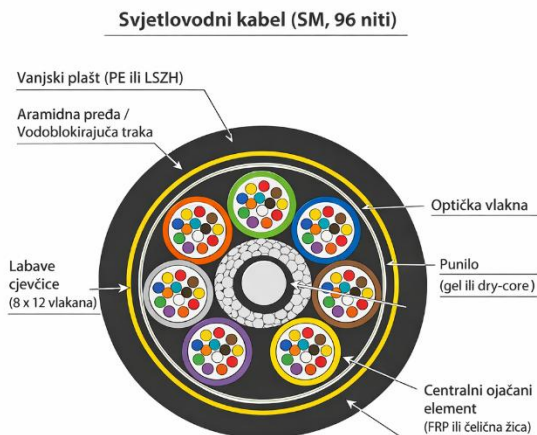
- **1310 nm:** Uzvodni smjer (*Upstream*) – od korisnika prema centrali.
- **1490 nm:** Nizvodni smjer (*Downstream*) – prijenos podataka korisniku.
- **1550 nm:** Često se koristi za RF Overlay (kabelska TV preko optike) ili XGS-PON.

Gušenje (Attenuation): Izražava se u decibelima po kilometru (**dB/km**). Svaki prekid, savijanje ili loš spoj (splice) povećava gušenje, što direktno utječe na kvalitetu usluge.

2.5. Struktura optičkog kabela

Zaštita krhkog stakla je prioritet. Tipično vlakno ima:

- **Glass Core (9 μm)**
- **Cladding (125 μm)** - Stakleni omotač.
- **Coating (250 μm)** - Primarna plastična zaštita (često u boji radi identifikacije).
- **Buffer/Jacket** - Vanjski plašt koji štiti od vlage i mehaničkih udaraca.



3. PASIVNA OPTIČKA MREŽA (PON) ARHITEKTURA

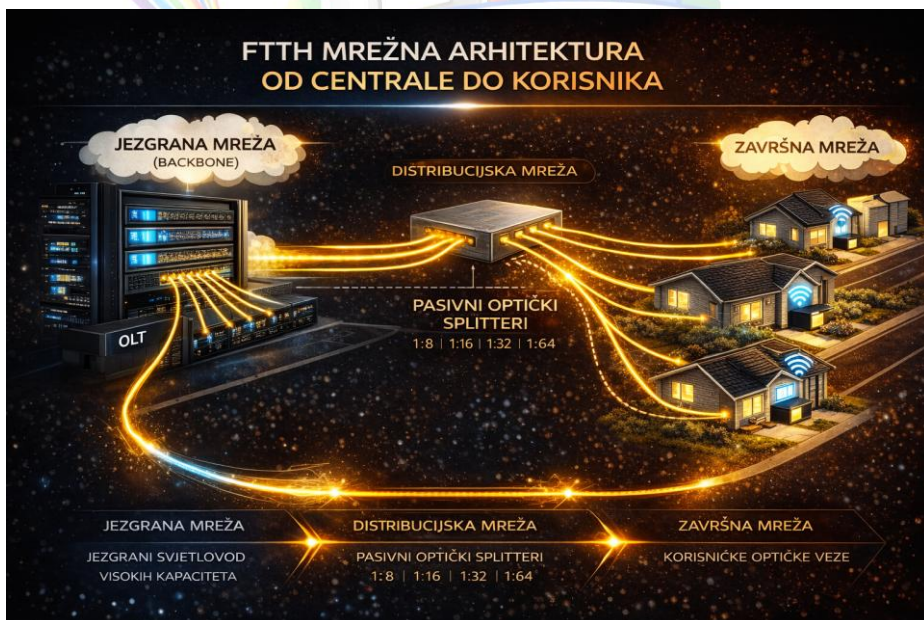
Srce FTTh sustava je GPON/XGS-PON tehnologija.

- **OLT (Optical Line Terminal):** Smješten u centrali (CO).
- **Pasivni splitteri:** Dijeje signal bez potrebe za napajanjem (omjeri 1:8, 1:32, 1:64).
- **ODN (Optical Distribution Network):** Dio mreže između OLT-a i korisnika.

3.1 FTTH Mrežna arhitektura (PON i Topologija)

3.1.1 Koncept pasivne optičke mreže (PON)

PON je "točka-prema-više-točaka" (*Point-to-Multipoint*) arhitektura. Ključna riječ je **pasivna** – to znači da između centrale i korisnika nema elektroničkih komponenti koje zahtijevaju napajanje. Sav razvod signala vrši se putem staklenih prizmi, odnosno **svjetlovodnih djelitelja (splittera)**.



3.1.2. Glavne komponente sustava

Svaka FTTH mreža sastoji se od tri ključna dijela:

1. **OLT (Optical Line Terminal):** Mozak operacije smješten u centrali. On upravlja prometom, dodjeljuje termine za slanje podataka korisnicima i komunicira s internetom.
2. **ODN (Optical Distribution Network):** Cjelokupna pasivna infrastruktura – kabeli, spojnice, zdenci i splitteri. To je "cjevovod" kroz koji teče svjetlost.
3. **ONT / ONU (Optical Network Terminal/Unit):** Uređaj u domu korisnika koji pretvara svjetlosne impulse natrag u električni signal (Ethernet/Wi-Fi).

3.1.3. Hijerarhija razvoda (Splitanje)

U FTTH projektima obično se koristi dvostupanjsko splitanje kako bi se optimizirao broj vlakana:

- **Prvi stupanj (Primarni splitter):** Obično u uličnom kabinetu (omjer 1:4 ili 1:8).
- **Drugi stupanj (Sekundarni splitter):** U zgradi ili na stupu blizu kuća (omjer 1:8 ili 1:16).
- **Ukupni omjer:** Najčešće **1:64**, što znači da 64 korisnika dijele jedan "port" na OLT-u.

3.1.4 GPON vs. XGS-PON Tehnologija

Iako arhitektura ostaje ista, tehnologija na krajevima vlakna evoluirala:

Tehnologija	Download (Brzina prema korisniku)	Upload (Brzina od korisnika)	Primjena
GPON	2.488 Gbps	1.244 Gbps	Standardni kućni korisnici
XGS-PON	10 Gbps	10 Gbps	Business korisnici, Gameri, 4K/8K streaming

4. VRSTE SVJETLOVODNIH KABELA (FIZIČKA IMPLEMENTACIJA)

Kada definiramo arhitekturu, moramo odabrati "alat" za njezinu izgradnju. U FTTH-u ne koristimo isti kabel za 'cestu' i za dnevni boravak.

4.1. Feeder kabeli (Magistrala)

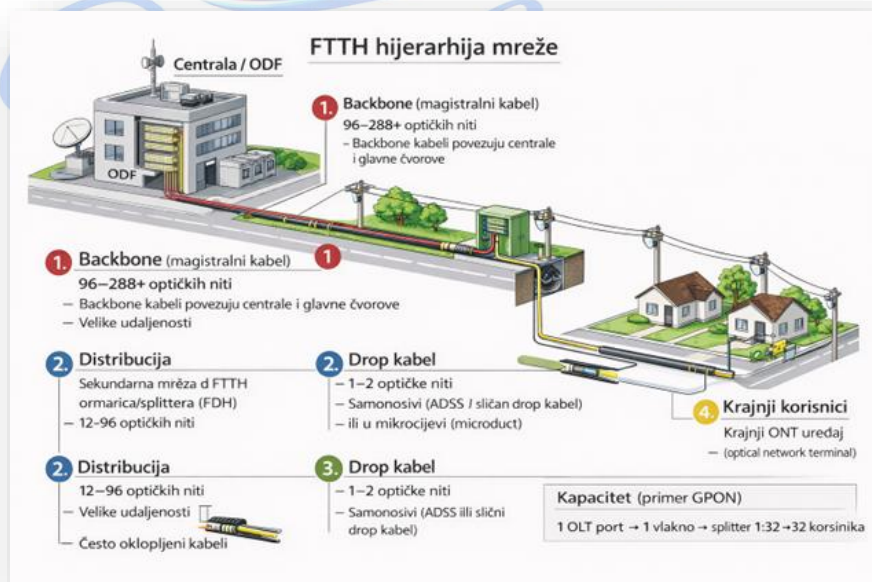
To su kabeli velikog kapaciteta (npr. 144 ili 288 niti) koji povezuju centralu s glavnim razvodnim čvorovima. Obično su **Loose Tube** konstrukcije kako bi se vlakna zaštitila od rastezanja.

4.2. Distribution kabeli (Distribucija)

Povezuju razvodne čvorove s točkama pristupa (npr. stupovi ili ormarići ispred zgrada). Ovdje se koriste kabeli od 12 do 48 niti.

4.3. Drop kabeli (Korisnički priključak)

Zadnji metara mreže. Ovi kabeli moraju biti izuzetno izdržljivi, a opet fleksibilni (G.657 standard). Često imaju ugrađen **Kevlar** ili čeličnu žicu za vlačnu čvrstoću.



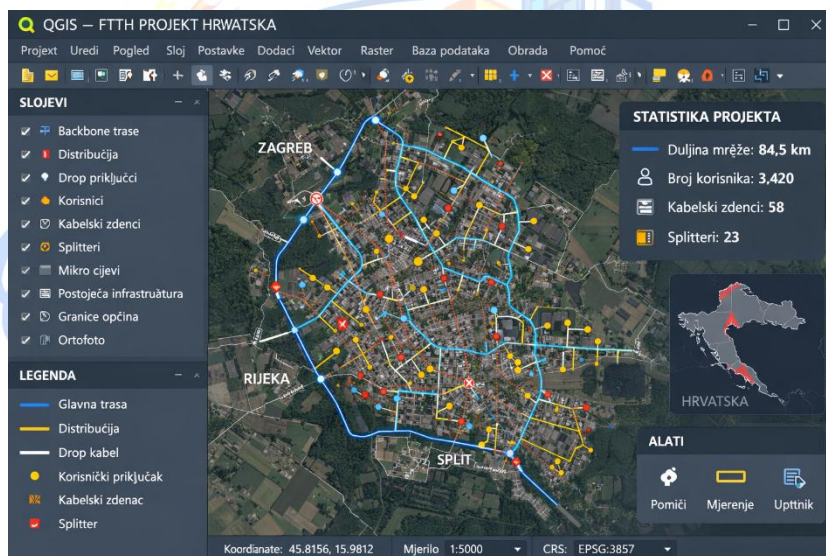
5. PLANIRANJE I PROJEKTIRANJE FTTH MREŽE

Prije nego što prvi bager izađe na teren, Projekt mora proći kroz fazu digitalnog planiranja. Cilj je minimizirati troškove iskopa, koji čine do **70% ukupne investicije**.

5.1. Geodetska podloga i GIS mapiranje

Svaki projekt započinje u **GIS (Geografski informacijski sustav)** okruženju.

- **Analiza gustoće:** Identificiramo "Home Passed" (broj kućanstava pored kojih prolazi nit) i "Home Connected" (stvarni korisnici).
- **Postojeća infrastruktura:** Provjera mogućnosti korištenja postojećih cijevi (DTK - Distributivna telekomunikacijska kanalizacija) ili stupova HEP-a/Rasvjete kako bi se izbjeglo kopanje.



5.2. High-Level Design (HLD) i Low-Level Design (LLD)

1. **HLD:** Određuje lokaciju centrale (CO) i optimalne rute glavnih kabela.
2. **LLD:** Detaljan nacrt koji sadrži točan broj splajsova u svakoj spojnici, duljinu svake mikrocjevčice i točnu poziciju svakog splittera.

6. GRAĐEVINSKI RADOVI I MIKRO-ROV TEHNOLOGIJA

U urbanim sredinama klasični iskop je spor, skup i uništava prometnice. Današnji FTTH se oslanja na moderne metode brzog polaganja.

6.1. Klasičan rov

Klasični rov je tradicionalna metoda izgradnje kableske kanalizacije.

Tipične dimenzije: Širina: 40 – 60 cm, dubina: 60 – 120 cm

Slojevi rova

- pješčana posteljica
- PEHD ili PVC cijevi
- zaštitni sloj pijeska
- upozoravajuća traka
- zatrpavanje/asfalt/beton

Prednosti

- vrlo robusna infrastruktura
- dug životni vijek
- opcija polaganja više cijevi

Nedostaci

- visoki troškovi
- sporija izgradnja
- veći utjecaj na promet

6.2. Mini rov

Mini rov je kompromis između klasičnog rova i mikro rova.

Tipične dimenzije: širina: 15 – 30 cm, dubina: 40 – 60 cm

Koristi se kada mikro rov nije dovoljno siguran, a klasični rov je preskup.

6.3. Mikro-rov (Micro-trenching) – Ključna prednost

Umjesto kopanja rova širine 50 cm, koristi se specijalni stroj s dijamantnim diskom koji "reže" asfalt.

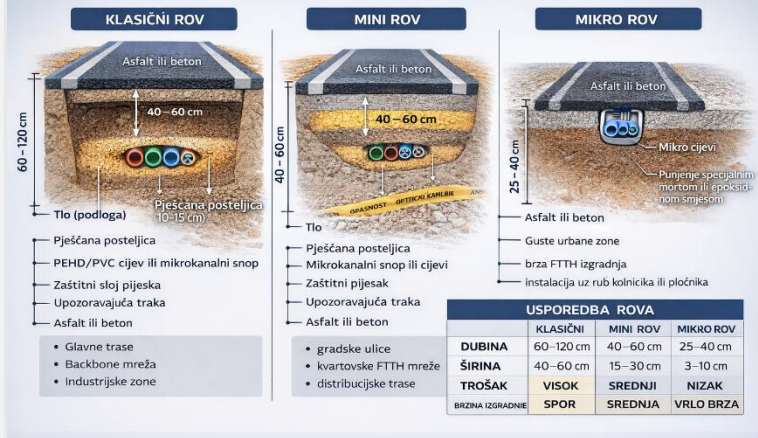
- **Dimenzije:** Širina kanala 2–5 cm, dubina 30–50 cm.
- **Brzina:** Moguće je položiti i do 500 metara mreže u jednom radnom danu.
- **Sanacija:** Odmah nakon polaganja mikrocevčica, kanal se puni brzovezujućim betonom ili smolom i asfaltira.

6.4. Tehnika "upuhivanja" vlakana (Fiber Blowing)

Umjesto klasičnog povlačenja kabela (koje može oštetiti nit), u FTTH mrežama koristimo komprimirani zrak.

- Kabel "lebdi" unutar mikrocevčice na zračnom jastuku, što omogućuje uvlačenje duljina većih od **1.000 metara** bez ijednog spoja.

PRESJEK TIPOVA FTTH ROVA



7. SPAJANJE VLAKANA (SPLICING)

Kada su kabeli položeni, potrebno ih je povezati u funkcionalnu cjelinu. To se radi postupkom **lučnog zavarivanja**.

7.1. Fusion Splicer (Uređaj za varenje)

Uređaj precizno poravnava dvije staklene niti (jezgru na jezgru) i pomoću električnog luka ih tali u jednu cjelinu.

- **Cilj:** Gubitak na spoju mora biti manji od **0.05 dB**.
- **Zaštita:** Svaki var se štiti termoskupljajućom cjevčicom s metalnim ojačanjem.



8. OTDR MJERENJA I CERTIFIKACIJA

Bez mjerenja, mreža ne postoji. Svaka nit u FTTh sustavu mora dobiti "rodni list".

8.1. Što je OTDR?

OTDR (Optical Time-Domain Reflectometer) je uređaj koji šalje svjetlosne impulse i mjeri njihovu refleksiju. Rezultat je graf (tracce) koji prikazuje:

- Ukupnu duljinu trase.
- Gubitak na svakom varu (splice).
- Eventualna oštećenja ili prejaka savijanja kabela (macrobending).



8.2. Power Meter testiranje

Za završni test kod korisnika koristi se **Optical Power Meter**. On mjeri stvarnu snagu svjetlosti koja dolazi iz centrale.

- **Normalne vrijednosti:** Obično između **-14 dBm i -25 dBm**. Sve iznad **-27 dBm** znači da korisnik neće imati stabilan internet.

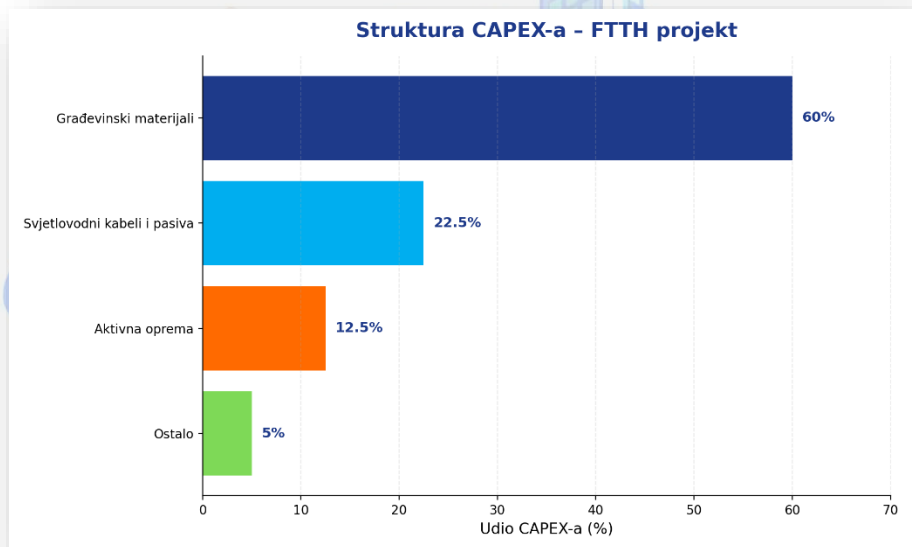


9. EKONOMIKA FTTH PROJEKATA (TROŠKOVI I POVRAT INVESTICIJE)

Izgradnja svjetlovodne mreže je dugoročna investicija s visokim početnim troškovima (**CAPEX**), ali izuzetno niskim troškovima održavanja (**OPEX**).

9.1. Struktura troškova (CAPEX)

1. **Građevinski radovi (60-70%):** Iskop, mikro-rov, sanacija asfalta, polaganje cijevi.
2. **Pasivna oprema (15-20%):** Svjetlovodni kabeli, splitteri, spojnice, ormarići.
3. **Aktivna oprema (10-15%):** OLT u centrali i ONT uređaji kod korisnika.
4. **Projektiranje i dozvole (5%):** GIS planiranje i pravna dokumentacija.



9.2. Strategija "Home Passed" vs. "Home Connected"

- **Home Passed:** Mreža je izgrađena ispred kuće/zgrade. Cilj je imati što veći broj HP-ova uz minimalnu duljinu trase.
- **Home Connected:** Trenutak kada korisnik potpiše Ugovor. Tada se radi "drop" kabel (zadnjih 20-50 metara) i instalira ONT.

10. POPIS MATERIJALA I ALATA (BoM - BILL OF MATERIALS)

Za uspješnu realizaciju FTTh projekta, svaki tim na terenu mora biti opremljen sljedećim standardiziranim setom:

10.1. Ključni materijali

- **Mikrojevčice (Microducts):** HDPE cijevi (npr. 7/4 mm ili 10/7 mm) ili u "bundle" paketima.
- **Distribucijski kabele:** 12, 24 ili 48 niti (G.652.D standard).
- **Korisnički Drop kabele:** G.657.A1 ili A2 (izuzetno savitljivi, 1 ili 2 niti).
- **Svjetlovodni splitteri:** PLC splitteri (1:8, 1:16 ili 1:32) s tvornički terminiranim SC/APC konektorima.
- **Spojnice (Joint Enclosures):** Vodonepropusna kućišta za zaštitu varova u zdencima ili na stupovima.
- **Kabelski zdenci (D0 – D4),** betonski ili polimerni
- **PSK materijal:** stupovi, nosači kabela, zatezne, ovjesne i sidrene stezaljke

10.2. Profesionalni alati za tehničare

- **Fusion Splicer:** Uređaj za varenje niti s ugrađenom pećnicom za zaštitu.
- **Fiber Cleaver:** Precizni sjekač vlakna (mora rezati pod kutom $< 0.5^\circ$).
- **Stripperi:** Alati za skidanje vanjskog plašta kabela i primarne zaštite vlakna (250 μm).
- **Vizualni lokator kvara (VFL):** "Crveni laser" za brzu provjeru kontinuiteta i identifikaciju niti.
- **OTDR uređaj:** Za certificiranje trase i lociranje točnog mjesta gušenja.



11. BUDUĆNOST SVJETLOVODNIH MREŽA (NEXT-GEN PON)

FTTH mreža koju gradimo danas je "**Future-proof**". To znači da staklena nit u zemlji može podržati brzine koje danas još ne možemo ni zamisliti.

11.1. Put prema 50G-PON-u

Trenutni GPON (2.5 Gbps) polako ustupa mjesto **XGS-PON-u (10 Gbps)**. Sljedeći korak je **50G-PON** koji će omogućiti:

- **Masovni VR/AR:** Virtualna stvarnost bez latencije.
- **Holografsku komunikaciju:** Prijenos 3D slike u realnom vremenu.
- **Smart City integraciju:** Tisuće senzora i kamera povezanih na 1 nit.

Izazovi implementacije

Iako je tehnologija vrlo napredna, postoje izazovi:

- cijena svjetlovodnog modula
 - energetska potrošnja
 - kompleksnost mreže
 - potreba za novom aktivnom opremom



11.2. WDM (Wavelength Division Multiplexing)

Budućnost omogućuje da kroz istu nit šaljemo različite "boje" (valne duljine) svjetlosti. Svaka boja može nositi potpuno drugu mrežu ili drugog operatera, što dramatično povećava kapacitet bez dodatnog kovanja.

Prednosti WDM tehnologije

- Povećanje kapaciteta vlakna
- Jedno svjetlovodno vlakno može prenositi desetke ili stotine kanala.

Efikasnije korištenje infrastrukture

- nije potrebno polagati nova vlakna.

Skalabilnost

- dodavanjem novih valnih duljina povećava se kapacitet mreže.

Velike brzine prijenosa

- kapacitet može doseći više terabita u sekundi.



JEDNOSTAVNA ANALOGIJA

WDM možemo usporediti s autocestom s više traka

- vlakno = autocesta
- valna duljina = prometna traka
- podaci = vozila

Što više valnih duljina imamo, to je veći kapacitet prijenosa.

12. ZAKLJUČAK I CASE STUDY (PRIMJER PROJEKTA)

Razvoj FTTH (Fiber To The Home) mreža predstavlja jedan od ključnih infrastrukturnih koraka u digitalnoj transformaciji društva. Svjetlovodne mreže omogućuju prijenos podataka iznimno velikih brzina uz minimalnu latenciju, čime stvaraju temelj za razvoj suvremenih digitalnih usluga poput pametnih gradova, cloud računalstva, umjetne inteligencije, telemedicine i virtualne stvarnosti.

CASE STUDY

Primjer FTTH projekta – srednje veliki grad u Hrvatskoj

Osnovni parametri projekta

- Lokacija: urbani grad u Hrvatskoj
- Broj stanovnika: oko 25.000
- Broj kućanstava: 8.500

Cilj projekta bio je izgraditi potpunu FTTH pristupnu mrežu koja omogućuje gigabitni pristup internetu svim kućanstvima.

Ekonomski aspekt projekta

Ukupna vrijednost projekta: 4,6 milijuna EUR

Struktura troškova:

Segment	Udio
Građevinski radovi	58 %
Svjetlovodni materijal	18 %
Aktivna oprema	14 %
Projektiranje i nadzor	10 %

Povrat investicije procijenjen je na: 6 – 8 godina

Svjetlovodna infrastruktura nije samo tehnološko rješenje današnjice, već temelj digitalne budućnosti na kojem će se graditi društvo povezano brzinom svjetlosti.

- Budućnost putuje svjetlom -



FTTh nije samo infrastruktura; to je digitalna autocesta koja osigurava razvoj društva u sljedećih 50 godina.