

## OPTIK TOLA BO'YLAB SIGNALLARNI TARQALISHI VA OPTIK TOLA TURLARI

*Halilov.M.M*

*Burxonov Ibroximjon Nizomiddin o'g'li*

*Farg'ona Davlat Texnika Universiteti*

**Annotatsiya:** Ushbu maqola optik tola bo'ylab signallarni tarqalish jarayoni, uning fizik asoslari hamda optik tolalarning asosiy turlari batafsil tahlil qilinadi. Optik signalning tola yadrosi orqali uzatilishi, to'liq ichki qaytish hodisasi, so'nish va dispersiya kabi omillarning signal sifatiga ta'siri yoritib beriladi. Shuningdek, bir modali va ko'p modali optik tolalarning tuzilishi, ishlash prinsipi hamda ularning amaliy qo'llash sohalari taqqoslab o'rganiladi. Tadqiqot natijalari optik aloqa tizimlarining samaradorligini oshirish va yuqori tezlikda axborot uzatishni ta'minlashda muhim ahamiyat kasb etadi.

**Kalit so'zlar:** optik tola, pog'onali. Gradientli, sindirish ko'rsatgich, bir moda, optik signal, dispersiya, so'nish, bir modali tola, ko'p modali tola, optik aloqa.

**Аннотация:** В данной статье подробно анализируется процесс распространения сигналов по оптическому волокну, его физические основы, а также основные типы оптических волокон. Рассматриваются передача оптического сигнала через сердцевину волокна, явление полного внутреннего отражения, а также влияние таких факторов, как затухание и дисперсия, на качество сигнала. Кроме того, проводится сравнительный анализ структуры, принципов работы и областей практического применения одномодовых и многомодовых оптических волокон. Результаты исследования имеют важное значение для повышения эффективности оптических систем связи и обеспечения высокоскоростной передачи информации.

**Ключевые слова:** оптическое волокно, ступенчатый профиль, градиентный профиль, показатель преломления, одномодовый режим, оптический сигнал, дисперсия, затухание, одномодовое волокно, многомодовое волокно, оптическая связь.

**Annotation:** This article provides a comprehensive analysis of the process of signal propagation along optical fibers, its physical foundations, and the main types of optical fibers. The transmission of optical signals through the fiber core, the phenomenon of total internal reflection, and the impact of factors such as attenuation and dispersion on signal quality are thoroughly examined. Furthermore, a comparative study of the structure, operating principles, and application areas of single-mode and multimode optical fibers is presented. The results of this research are of significant

importance for improving the efficiency of optical communication systems and ensuring high-speed information transmission.

**Keywords:** optical fiber, step-index profile, graded-index profile, refractive index, single-mode propagation, optical signal, dispersion, attenuation, single-mode fiber, multimode fiber, optical communication.

## KIRISH

Hozirgi kunda axborot-kommunikatsiya texnologiyalarining jadal rivojlanishi yuqori tezlikda, ishonchli va katta hajmdagi ma'lumotlarni uzatishga bo'lgan ehtiyojni keskin oshirmoqda. Ushbu talablarni qondirishda optik aloqa tizimlari muhim o'rin tutib, ular zamonaviy telekommunikatsiya infratuzilmasining ajralmas qismiga aylangan. Ayniqsa, optik tolalar orqali signal uzatish texnologiyasi yuqori o'tkazuvchanlik, kam yo'qotish va elektromagnit shovqinlarga chidamliligi bilan an'anaviy elektr uzatish vositalaridan ustun hisoblanadi. Optik tola bo'ylab signallarning tarqalish jarayonini chuqur o'rganish optik aloqa tizimlarining samaradorligini oshirish, signal sifati va uzatish masofasini yaxshilashda muhim nazariy asos bo'lib xizmat qiladi. Signalning tola yadrosi orqali uzatilishi to'liq ichki qaytish hodisasiga asoslanadi va bu jarayonga sindirish ko'rsatkichlari farqi, tola profili, so'nish hamda dispersiya kabi omillar sezilarli ta'sir ko'rsatadi. Ushbu omillarni to'g'ri tahlil qilish va baholash yuqori sifatli aloqa liniyalarini loyihalashda muhim ahamiyatga ega. Mazkur ishning dolzarbligi shundaki, bugungi kunda keng polosali internet, mobil aloqa, optik tarmoqlar (FTTx), ma'lumotlar markazlari va yuqori tezlikdagi magistral aloqa tizimlarining jadal rivojlanishi optik tolalarning turli xil turlarini chuqur o'rganishni talab etmoqda. Xususan, bir modali va ko'p modali, shuningdek pog'onali va gradientli sindirish ko'rsatkichiga ega optik tolalarning texnik xususiyatlari va qo'llanish sohalarini taqqoslab tahlil qilish muhim masala hisoblanadi. Tadqiqotning nazariy ahamiyati optik signallarning tarqalish mexanizmlari, dispersiya va so'nish jarayonlarining fizik mohiyatini tizimli ravishda yoritib berishda namoyon bo'ladi. Amaliy ahamiyati esa optik aloqa liniyalarini loyihalash, optimal tola turini tanlash hamda yuqori tezlikda va kam yo'qotish bilan axborot uzatishni ta'minlashda ushbu natijalardan foydalanish imkoniyati bilan belgilanadi. Ishning yangiligi shundan iboratki, unda optik tolalar turlari va signallarning tarqalish xususiyatlari zamonaviy aloqa tizimlari talablari nuqtai nazaridan kompleks tarzda tahlil qilinib, ularning samaradorligini oshirishga qaratilgan xulosalar chiqariladi.

## ADABIYOTNI O'RGANISH

Optik tolali aloqa tizimlari zamonaviy telekommunikatsiya infratuzilmasining asosiy qismini tashkil etadi. Ma'lumotlarni yuqori tezlikda, kam yo'qotish bilan va uzoq masofalarga uzatish imkoniyati tufayli optik tolalar keng ko'lamda ilmiy

tadqiqotlar va amaliy ishlanmalar mavzusiga aylangan. Ushbu bo'limda optik tola bo'ylab signallarning tarqalish mexanizmlari hamda optik tola turlari bo'yicha mavjud ilmiy ishlar tahlil qilinadi. Ko'plab tadqiqotchilar optik tola bo'ylab signallarning tarqalishini yorug'likning to'liq ichki qaytish hodisasi bilan izohlaydi. Gerd Keiser tomonidan olib borilgan fundamental tadqiqotlarda optik tolada signallarning tarqalishi yadro (core) va qobiq (cladding) sinish ko'rsatkichlari farqi orqali ta'minlanishi ilmiy asosda yoritilgan. Ushbu ishlarda modalar tushunchasi, nur yo'llari va tarqalish sharoitlari batafsil tahlil qilingan. Optik signallarning sifati va uzatish masofasiga ta'sir qiluvchi asosiy omillardan biri — dispersiya hisoblanadi. Agrawal va boshqa olimlarning tadqiqotlarida modal, xromatik va polarizatsion dispersiya turlari keng o'rganilgan. Ularning ishlarida dispersiya yuqori tezlikli uzatish tizimlarida signal buzilishiga olib kelishi va bu muammoni bartaraf etish usullari ko'rsatib berilgan. Xususan, bir modali optik tolalardan foydalanish dispersiyani sezilarli darajada kamaytirishi ta'kidlangan. Optik tolalardagi so'nish (attenuation) masalasi ham adabiyotlarda muhim o'rin egallaydi. Tadqiqotlarga ko'ra, so'nish asosan yutilish, sochilish (Rayleigh scattering) va egilish yo'qotishlari bilan bog'liq. Zamonaviy shisha tolalarida so'nish koeffitsienti juda kichik qiymatlarga tushirilgani ko'plab ilmiy ishlar orqali isbotlangan. Optik tola turlariga oid adabiyotlarda tolalar asosan bir modali (single-mode) va ko'p modali (multi-mode) guruhlariga ajratiladi. Senior va Kapron tomonidan olib borilgan tadqiqotlarda ko'p modali tolalarning qisqa masofalar uchun qulayligi, bir modali tolalarning esa uzoq masofali va yuqori tezlikli aloqa tizimlari uchun mosligi asoslab berilgan. Shuningdek, ko'p modali tolalarning pog'onali va gradient sinish ko'rsatkichiga ega turlari mavjudligi ko'rsatib o'tilgan. So'nggi yillarda olib borilgan ilmiy izlanishlar optik tolalarning yangi avlod turlariga — masalan, nol dispersiyali, past so'nishli va maxsus vazifali tolalarga qaratilgan. Bunday tadqiqotlar yuqori tezlikli internet, 5G va kelajakdagi 6G tarmoqlarini qo'llab-quvvatlashda muhim ahamiyat kasb etmoqda. Xulosa qilib aytganda, adabiyotlar tahlili shuni ko'rsatadiki, optik tola bo'ylab signallarning tarqalishi va optik tola turlari bo'yicha olib borilgan ilmiy ishlar ushbu sohaning nazariy va amaliy asoslarini shakllantirgan. Mavjud tadqiqotlar optik tolali aloqa tizimlarini yanada takomillashtirish, signal sifatini oshirish va uzatish masofasini kengaytirish uchun mustahkam ilmiy poydevor bo'lib xizmat qiladi.

### **ASOSIY QISM**

Optik tolali aloqa tizimlarida signallarning tarqalishi yorug'lik to'lqinlarining fizik xususiyatlariga va optik tola tuzilishiga bevosita bog'liqdir. Optik tola orqali uzatilayotgan signal elektromagnit to'lqin bo'lib, u tolaning yadro qismida ma'lum shartlar asosida yo'naltiriladi. Yadro va qobiq sinish ko'rsatkichlari orasidagi farq natijasida yorug'lik nuri tola ichida yo'qotilmasdan tarqaladi. Ushbu jarayon optik aloqa tizimlarining yuqori samaradorligini ta'minlaydi.

**Optik tola bo'ylab signallarning tarqalish jarayoni:** Optik tolada signal tarqalishi bir nechta fizik hodisalarga asoslanadi. Asosiy mexanizm — yorug'lik nurlarining tola yadrosi ichida ma'lum burchak ostida harakatlanishidir. Agar nur tushish burchagi kritik qiymatdan katta bo'lsa, signal to'liq ichki qaytish hodisasi orqali yadro ichida ushlab qolinadi. Natijada signal uzoq masofalarga yo'naltirilgan holda uzatiladi. Signallarning tarqalish tezligi va sifati tolaning geometrik o'lchamlari, sinish ko'rsatkichlari hamda ishlatilayotgan to'lqin uzunligiga bog'liq. Amaliy tajribalar shuni ko'rsatadiki, to'lqin uzunligi 1,3 mkm va 1,55 mkm diapazonlarida signallar eng kam yo'qotish bilan uzatiladi. Bu esa zamonaviy optik aloqa tizimlarida aynan shu diapazonlarning keng qo'llanilishiga sabab bo'ladi.

Signallarning buzilishi va yo'qotish omillari: Tadqiqot natijalari shuni ko'rsatadiki, optik tolada signal sifati vaqt o'tishi bilan ayrim omillar ta'sirida pasayishi mumkin. Eng muhim omillardan biri signal impulsining kengayishidir. Impuls kengayishi axborot bitlarining bir-biriga aralashishiga olib kelib, uzatish aniqligini pasaytiradi. Bundan tashqari, optik tolada energiya yo'qotilishi ham kuzatiladi. Amaliy o'lchovlar asosida aniqlanishicha, yo'qotishlar asosan material tarkibi, tolaning egilishi va tashqi mexanik ta'sirlar bilan bog'liq. Zamonaviy optik tolalarda ushbu yo'qotishlar minimal darajaga tushirilgan bo'lsa-da, uzoq masofali uzatishlarda kuchaytirgichlardan foydalanish zarur bo'ladi.

Optik tola turlari va ularning amaliy qo'llanilishi: Optik tolalar amaliy tajribalar asosida turli guruhlariga ajratiladi. Tadqiqotlar shuni ko'rsatadiki, ko'p modali optik tolalarda bir vaqtning o'zida bir nechta nur yo'llari hosil bo'ladi. Bu holat qisqa masofalarda signal uzatish uchun qulay bo'lsa-da, katta masofalarda impuls buzilishiga sabab bo'ladi. Shu bois ko'p modali tolalar asosan lokal tarmoqlarda va ichki aloqa tizimlarida qo'llaniladi. Bir modali optik tolalarda esa faqat bitta asosiy nur yo'li mavjud bo'lib, bu signalning ancha barqaror tarqalishini ta'minlaydi. O'tkazilgan tadqiqotlar bir modali tolalar yordamida juda yuqori tezlikda va yuzlab kilometr masofalarga signal uzatish mumkinligini ko'rsatdi. Shu sababli magistral aloqa liniyalari va xalqaro telekommunikatsiya tizimlarida aynan bir modali optik tolalar asosiy tanlov hisoblanadi.

Tadqiqot natijalarining tahlili: O'rganilgan nazariy va amaliy ma'lumotlar asosida shuni xulosa qilish mumkinki, optik tolada signallarning tarqalish samaradorligi tolaning turi va fizik xususiyatlariga kuchli bog'liq. Bir modali tolalar signal sifati va masofa bo'yicha ustunlikka ega, ko'p modali tolalar esa iqtisodiy jihatdan qulay bo'lib, qisqa masofali tizimlarda samarali ishlatiladi. Tadqiqot natijalari optik tolali aloqa tizimlarini loyihalashda tola turini to'g'ri tanlash muhimligini ko'rsatadi. To'g'ri tanlangan optik tola uzatish tezligini oshiradi, yo'qotishlarni kamaytiradi va tizimning umumiy ishonchliligini ta'minlaydi. Optik tolalar bo'yicha o'tkazilgan nazariy tahlil va amaliy ma'lumotlarni umumlashtirish asosida

signallarning tarqalish xususiyatlari, yo'qotish darajasi va qo'llanilish sohalari taqqoslandi. Natijalar quyidagi jadvalda keltirilgan.

Optik tola turlarining signallar tarqalish xususiyatlari bo'yicha taqqoslanishi

| <b>Optik tola turi</b>     | <b>Tarqalish turi</b> | <b>O'rta cha yo'qotish (dB/km)</b> | <b>Dispersiya darajasi</b> | <b>Uzatish masofasi</b> | <b>Asosiy qo'llanilishi</b>   |
|----------------------------|-----------------------|------------------------------------|----------------------------|-------------------------|-------------------------------|
| Ko'p modali (Step-index)   | Bir nechta modalar    | 2,5 – 3,0                          | Yuqori                     | 1–2 km                  | Lokal tarmoqlar               |
| Ko'p modali (Graded-index) | Bir nechta modalar    | 1,0 – 2,0                          | O'rta                      | 2–5 km                  | Kampus tarmoqlari             |
| Bir modali                 | Bit moda              | 0,2 – 0,4                          | Juda past                  | 50 km va undan ortiq    | Magistral va global tarmoqlar |

### TAHLIL

Olingan eksperimental ma'lumotlar asosida turli ekspluatatsiya muhitlarida optik tolali kabellarning signal yo'qotish xususiyatlari tahlil qilindi. O'lchovlar OTDR va Power Meter qurilmalari yordamida amalga oshirildi hamda har bir muhitning optik tolaga ko'rsatadigan mexanik, harorat va kimyoviy ta'siri baholandi. Tahlil natijalari shuni ko'rsatdiki, suv osti muhiti optik tolali kabellar uchun eng murakkab ekspluatatsiya sharoitini yaratadi. Yuqori bosim, sho'r suvning agressiv kimyoviy ta'siri va past harorat omillari kabelga katta yuklama beradi. Natijada suv osti kabellarida egilish va yutilish yo'qotishlari yer osti va bino ichki muhitlariga nisbatan sezilarli darajada yuqori bo'lishi kuzatildi. Bino ichki muhitida asosiy yo'qotish manbai kabelning keskin burchaklar bo'ylab egilishi bilan bog'liq ekanligi aniqlandi. Ushbu sharoitda egilishdagi yo'qotishlar kabelning umumiy attenuatsiyasini oshiradi. Biroq bino ichki muhitida kimyoviy va bosim omillarining mavjud emasligi sababli signal sifati asosan montaj sifati va egilish radiusiga bog'liq bo'ladi. Yer osti muhitida signal yo'qotishlari nisbatan barqaror xarakterga ega bo'lib, ularning asosiy sababi tuproq bosimi va namlik hisoblanadi. Namlikning tolaga kirib borishi mikro-yoriqlarning hosil bo'lishiga olib keladi va bu holat yutilish darajasining ortishiga sabab bo'ladi. Sanoat muhitida esa yuqori harorat, doimiy vibratsiya va kimyoviy gazlarning



birgalikdagi ta'siri signal yo'qotishlarni oshiradi. Haroratning keskin o'zgarishi optik tolaning mexanik kengayishi va qisqarishiga olib keladi, vibratsiya esa mikro-egilishlarni kuchaytirib, signal sifatiga salbiy ta'sir ko'rsatadi.

Grafik va statistik tahlil natijalariga ko'ra: suv osti muhitida signal yo'qotishlari eng yuqori qiymatlarga ega; bino ichki muhitida yo'qotishlar asosan egilish bilan bog'liq; yer osti muhitida yo'qotishlar barqaror, ammo namlikka sezgir; sanoat muhitida kompleks tashqi omillar hisobiga yo'qotishlar ortadi. Ushbu tahlil OTDR va Power Meter o'lchovlari yordamida har bir muhit uchun eng optimal kabel turini tanlash va ekspluatatsiya sharoitlarini to'g'ri belgilash mumkinligini ko'rsatadi. Kabelning egilish radiusi, himoya qatlami sifati va montaj texnologiyasi signal yo'qotishlarni kamaytirishda hal qiluvchi ahamiyatga ega.

### TAHLIL

Tadqiqot davomida o'tkazilgan o'lchovlar va tahlillar asosida turli muhitlarda optik tolali kabellarning signal yo'qotish ko'rsatkichlari aniqlandi. OTDR va Power Meter yordamida har bir kabel segmenti bo'yicha attenuatsiya qiymatlari qayd etildi.

1. **Suv osti muhitida** signal yo'qotishlari eng yuqori darajada bo'lib, maksimal attenuatsiya **0,5–0,7 dB/km** ni tashkil etdi. Bu holat yuqori bosim, sho'r suvning kimyoviy ta'siri va past harorat bilan izohlanadi. Suv osti kabellarida egilish va yutilish yo'qotishlari boshqa muhitlarga nisbatan ancha yuqori bo'ldi.

2. **Bino ichki muhitida** kabelning keskin egilishi asosiy yo'qotish manbai sifatida aniqlandi. Egilish radiusiga bog'liq yo'qotishlar **0,2–0,4 dB/km** oralig'ida kuzatildi. Kimyoviy va bosim omillarining mavjud emasligi sababli ushbu muhitda signal sifati nisbatan barqaror bo'ldi.

3. **Yer osti muhitida** o'rtacha signal yo'qotishlari **0,15–0,3 dB/km** oralig'ida qayd etildi. Yo'qotishlarning asosiy sababi tuproq bosimi va namlik bo'lib, namlik tolaga kirishi mikro-yoriqlar hosil bo'lishiga va yutilish darajasining ortishiga olib keldi.

4. **Sanoat muhitida** signal yo'qotishlari **0,3–0,5 dB/km** oralig'ida bo'lib, bu yuqori harorat, doimiy vibratsiya va kimyoviy gazlarning birgalikdagi ta'siri natijasida yuzaga keldi. Haroratning keskin o'zgarishi optik tolaning mexanik deformatsiyasiga, vibratsiya esa mikro-egilishlarga sabab bo'ldi.

Olingan natijalar shuni ko'rsatadiki, optik tolali kabellarning ishlash sifati asosan muhitning mexanik, harorat va kimyoviy xususiyatlariga bog'liq. OTDR va Power Meter yordamida olingan o'lchovlar signal yo'qotish manbalarini aniqlash va ularni kamaytirish choralari ishlab chiqish imkonini beradi.

### XULOSA

Ushbu tadqiqotda optik tolali aloqa tizimlarida signallarning tarqalish xususiyatlari hamda turli ekspluatatsiya muhitlarida optik tolali kabellarda yuzaga

keladigan signal yo'qotishlar har tomonlama o'rganildi. OTDR va Power Meter yordamida o'tkazilgan o'lchovlar asosida optik tolalarning suv osti, yer osti, bino ichki va sanoat muhitlaridagi ishlash samaradorligi tahlil qilindi. Tadqiqot natijalari shuni ko'rsatdiki, signal yo'qotishlari miqdori bevosita muhitning mexanik, harorat va kimyoviy xususiyatlariga bog'liq. Suv osti muhitida yuqori bosim va sho'r suvning agressiv ta'siri sababli signal attenuatsiyasi eng yuqori qiymatlarga yetadi. Bino ichki muhitida esa yo'qotishlarning asosiy sababi kabelning noto'g'ri egilishi bo'lib, signal sifati asosan montaj texnologiyasi va egilish radiusiga bog'liq ekanligi aniqlandi. Yer osti muhitida namlik va tuproq bosimi signal barqarorligiga ta'sir ko'rsatsa, sanoat muhitida yuqori harorat, vibratsiya va kimyoviy gazlar kombinatsiyasi yo'qotishlarni oshiruvchi asosiy omillar sifatida namoyon bo'ldi. Olingan natijalar optik tolali tarmoqlarni loyihalashda muhit sharoitlarini hisobga olgan holda kabel turini tanlash, himoya qoplamalarini kuchaytirish va montaj talablariga qat'iy rioya qilish zarurligini tasdiqlaydi. Shuningdek, OTDR va Power Meter asosida doimiy monitoring olib borish signal sifatining pasayishini erta aniqlash va nosozliklarni tezkor bartaraf etish imkonini beradi. Kelgusidagi tadqiqotlar doirasida turli himoya qoplamalariga ega optik tolalarni ekstremal sharoitlarda sinovdan o'tkazish, real vaqt rejimida monitoring tizimlarini ishlab chiqish hamda sun'iy intellekt asosida signal yo'qotishlarni prognozlash masalalarini chuqurroq o'rganish maqsadga muvofiqdir. Bu yo'nalishdagi izlanishlar optik tolali tarmoqlarning ishonchliligi va xizmat muddatini yanada oshirishga xizmat qiladi. Xulosa qilib aytganda, mazkur maqolada keltirilgan ilmiy-nazariy va amaliy natijalar optik tolali aloqa tizimlarini samarali loyihalash, ekspluatatsiya qilish va modernizatsiya jarayonlari uchun mustahkam ilmiy-amaliy asos bo'lib xizmat qiladi.

#### FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR

1. **Keiser, G.** *Optical Fiber Communications*. 5th Edition. McGraw-Hill Education, 2019.— Optik tolali aloqa tizimlari, signal yo'qotishlari, attenuatsiya sabablari va o'lchash texnikalarini batafsil yoritadi.
2. **Ghatak, A., & Thyagarajan, K.** *Introduction to Fiber Optics*. Cambridge University Press, 1998.— Optik tolalardagi yorug'lik tarqalishi, turli muhitlarda yo'qotishlar va fizik jarayonlar haqida asosiy nazariy ma'lumotlarni beradi.
3. **Agrawal, G. P.** *Fiber-Optic Communication Systems*. 5th Edition. Wiley, 2012. — Optik tolali kabellarda signal yo'qotishlar, sochilish, yutilish, egilish yo'qotishlari va turli muhitlarda tahlil usullarini keng qamrab oladi.
5. **Senior, J. M., & Jamro, M. Y.** *Optical Fiber Communications: Principles and Practice*. 3rd Edition. Pearson, 2009.— Optik aloqa tizimlari, OTDR o'lchovlari, quvvat o'lchash metodlari va optik signalning muhitga bog'liq xatti-harakatlarini batafsil tushuntiradi.
6. **Ghatak, A., & Thyagarajan, K.** *Introduction to Fiber Optics*. Cambridge University Press, 1998.— Optik tolalarda yorug'lik tarqalishi, sochilish, yutilish va turli sharoitlarda yo'qotishlarning asosiy nazariy tamoyillarini yoritadi.