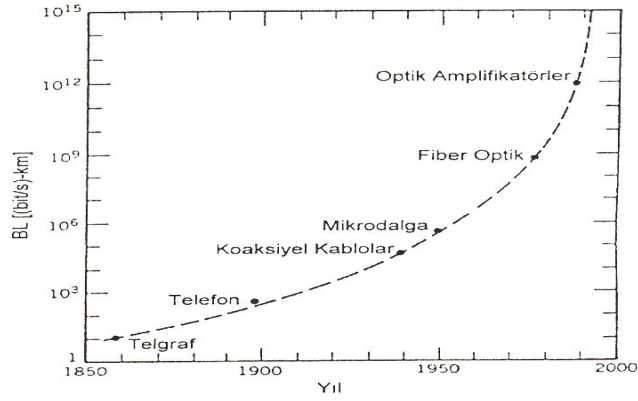


1.GİRİŞ

Son yıllarda elektronik iletişimden oluşan enformasyonun, global dağıtım ve paylaşımında oluşan olağanüstü artış, daha ekonomik ve geniş kapasiteli iletişim sistemlerine olan talebi de aynı oranda arttırmaktadır. Küresel radyolink, koaksiyel sistemleri ile uydu iletişim sistemleri, her geçen gün artan talebe ancak geçici bir rahatlama getirmektedir. Geniş kapasitelere cevap verebilecek ve yüksek kalitede hizmet sağlayabilecek ekonomik iletişim sistemleri gereklidir. Şekil 1.1’de yıllara göre iletişim sistemlerinde meydana gelen gelişmeler gösterilmiştir. Taşıyıcı olarak ışığın kullanıldığı iletişim sistemleri, günümüzde daha güncel kullanıma açılmaktadır.



Şekil 1.1 Yıllara göre iletişim teknolojisindeki gelişmeler⁽¹⁾

Fiber optik iletişim sistemlerinin uzun bir tarihi vardır. Ancak hızlı gelişimleri son yirmi yılda olmuştur. Böylece en iyi bant iletim bant genişliğini sağlayan optiksel dalgaların taşıyıcı olarak kullanılması yirminci yüzyılın ikinci yarısında gerçekleştirilebildi⁽¹⁾. 1960’lı yıllarda lazerin icat edilmesi, geliştirilmesi ve

elverişli optiksel kaynağın mümkün kılınmasıyla optiksel iletişimde yeni bir dönem başladı⁽²⁾. Başlangıçta, en iyi optik fiberlerde 1000 db/km den fazla gözlemlenen oldukça yüksek kayıplar, lazerlerin iletişimde kullanımını imkansız kıldı. Fakat 1966 yılında, Kao, Hockham ve Werts'in; yüksek kayıpların, fiber malzemesindeki kirliliğin bir sonucu olduğunu ve bu olumsuz durumun cam bazlı optiksel dalga kılavuzu kullanılarak azaltılabildiğini ortaya çıkarmaları, lazerlerin optik iletişimde kullanımını başlatan çok önemli bir buluş oldu⁽³⁾. 1960'lı yıllarda kullanılan fiber optik kablolar aşırı kayıplıydı. 100 dB/km'den fazla kayıp vardı. Bu da iletimleri mesafesini sınırlıyordu. 1970 yılında, Corning Glass Works'de 20 dB/km'den daha az kaybı olan bir fiber optik geliştirilmesi, fiber optik iletişim sistemleri oluşturmak için atılan en önemli adımdır⁽¹⁾.

1980 yılında yaklaşık 0.8 µm dalga boyunda çalışan ilk nesil optik sistemler ticari olarak kullanıma sunuldu. Bu sistemler her 10 km'de tekrarlayıcı kullanıyor ve 45 Mb/s bit oranı hızı ile işletiliyordu. Birkaç yıllık bir süre içerisinde 1.3 µm dalga boyunda çalışan ikinci nesil optik sistemler geliştirildi. Bu dalga boyunda çalışmanın avantajlarından birisi tekrarlayıcı mesafesinin arttırabilmesi diğeri ise fiber kaybının 1 dB/km'nin altında olmasıydı⁽¹⁾. İkinci nesil sistemler InGaAsP lazerler ve alıcılar (dedektör) kullanılarak geliştirildi, fakat bit oranı, çok modlu fiberlerdeki ışığın farklı renklere ayrılmasından kaynaklanan dağılma nedeniyle (dispersiyon) 100 Mb/s'nin altında sınırlı kaldı. 1980'li yılların ortalarında tek modlu fiberin (Single mod fiber - SMF) kullanıma sunulmasıyla sınırlama sorunu çözümlenmiş oldu. 1987 yılında ise, ikinci nesil optik sistemler 50 km mesafeli tekrarlayıcılı ve 1.7 Gb/s bit oranına ulaşan hızlarda işletiliyorlardı⁽¹⁾. İlerleyen yıllarda 1.3 µm'de fiber kaybının ikinci nesil sistemleri sınırladığının fark edilmesiyle, daha hızlı bit oranında ve daha

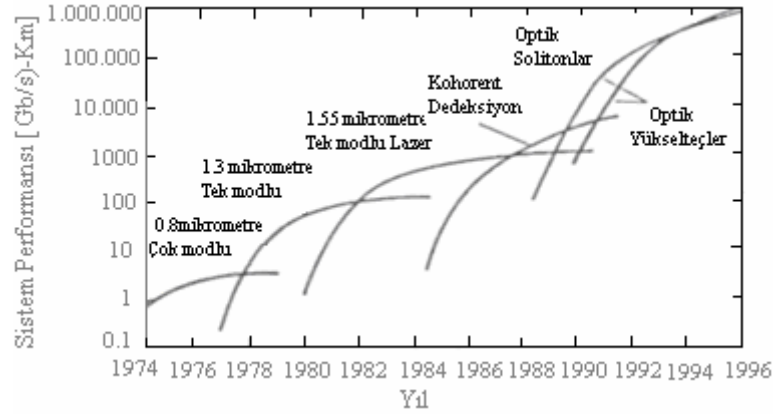
uzun mesafelere iletişimi gerçekleştirebilmek için optik sistemlerin, silika fiber kaybının minimum olduğu 1.5 µm dalga boyunda çalıştırılması gerektiği anlaşıldı. Fakat burada geleneksel InGaAsP yarı iletken lazerlerle ilgili başka bir problem vardı. Bu nedenle geleneksel InGaAsP yarı iletken lazerler, birkaç aksenel modun kendiliğinden salınması sonucunda meydana gelen darbe yayılması nedeniyle kullanılamamışlardır. Bu sorunu çözmek için iki metot sunulmuştur. İlk yaklaşım fiber içerisinde 1.55 µm de minimum dağılmaya sahip olarak tasarlanan değişen dağılma yöntemini kullanmaktı. İkinci yaklaşım ise, lazer tayfını tek bir aksenel moda sınırlamaktı. 1990 yılında, bu iki yaklaşımı kullanan 1.55 µm sistemler geliştirildi ve bu sistemler 2.5 Gb/s bit oranı hızında işletildi. Üçüncü nesil sistemlerin çok iyi performansına rağmen, çok önemli bir dezavantajları vardı: periyodik olarak sinyalin, birbirinden tipik olarak 60-70 km mesafede tekrarlayıcılar kullanılarak tekrar üretilmesi gereksinimi⁽¹⁾. Bu sorun 90'ların başlarında fiber yükselteçler kullanılarak çözüldü.

Dördüncü nesil sistemler, tekrarlayıcı mesafesini ve bit oranını arttırmak için fiber yükselteçler kullanılarak geliştirildi. Erbiyum katkılı fiber yükselteçlerin (EDFA) geliştirilmesi 1.55 µm dalga boyu bölgesinde aktif-fiber teknolojisi üzerine yapılan araştırmalara çok önemli bir teşvik sağladı ve çok uzun taşınabilir iletişim (ULH) alanında çok büyük bir etki yaptı. Erbiyum katkılı fiber (EDF), tekrarlayıcılar olmaksızın optiksel sinyalin binlerce kilometre uzaklara iletilebilmesini mümkün kıldı⁽⁴⁾. Bu teknoloji ile sistemlerin, verileri çok daha hızlı (5 Gb/s) ve uzun mesafelere (11,300 km) iletilebilmesi sağlandı. Her ne kadar optiksel yükselteçler, fiberde oluşan kayıp sorunlarına önemli ölçüde çözüm oldularsa da, belirli mesafelerden sonra optiksel sinyalde oluşan zayıflamalar ve ayrıca kullanılan çoklu

optiksel yükseltme işlemlerinden sonra toplanarak artan gürültü nedeniyle fiberde oluşan zayıflamada çok başarısız oldular⁽¹⁾. Bu nedenle fiber kayıpları, beşinci nesil optik sistemlerce çözümlenmesi gereken bir sorun olarak dördüncü nesil optik sistemlerde kaldı.

Optik fiberlerdeki zayıflama, uzun mesafe optik iletişiminin gerçekleşmesini önemli ölçüde sınırlamaktadır. Bununla beraber yeni gelişmeler sonucunda optik yükselteçler kullanılarak, yüksek kazanç, düşük gürültü, yüksek bant genişliği ve büyük çıkış gücü karakteristikleri elde etmek mümkündür. Optik iletişim sistemlerinin yıllara göre gelişimi şekil 1.2’de verilmiştir. Optik yükselteçlerde optik sinyal, elektriksel sinyale dönüştürülmeden optik olarak yükseltilmektedir. Bu sayede sistem hem daha ucuza mal edilmekte hem de karmaşık yapısından kurtulmaktadır. 1990’lı yıllarda optik yükselteçlerin geliştirilerek, uzun mesafeli taşıma sistemlerinde kullanılması gerçekleşmiştir. Optik yükselteçler geri besleme kullanmazlar. Yükselteç, optik veya elektriksel olarak pompalanırken, ana malzeme optik kazanç sağlar⁽¹⁾.

Erbiyum (Er^{3+}), Holmiyum (Ho^{3+}), Neodmiyum (Nd^{3+}), Prasedmiyum (Pr^{3+}), Samaryum (Sa^{3+}), Tuliyum (Tm^{3+}) ve Yitebiyum (Yb^{3+}) gibi birçok nadir toprak iyonlar kullanılarak, görülebilir ışıktan kızıl ötesi ışık bölgesine (3mm’ye kadar) geniş bir spektrumu kapsayan farklı dalga boylarında çalışan fiber yükselteçler yapılabilir. Fakat yukarıda belirtilen elementler arasında en çok ilgi çekeni erbiyumdur. Çünkü erbiyum kullanılarak yapılan Erbiyum Katkılı Fiber Optik Yükselteçler (EDFA), silika fiberlerin zayıflamasının minimum olduğu 1550 nm dalga boyu civarında geniş bir aralıkta çalışabilmektedir ve dolayısıyla da 1550 nm penceresinde (3. pencere) çalışan fiber optik haberleşme sistemleri için idealdir⁽⁵⁾.



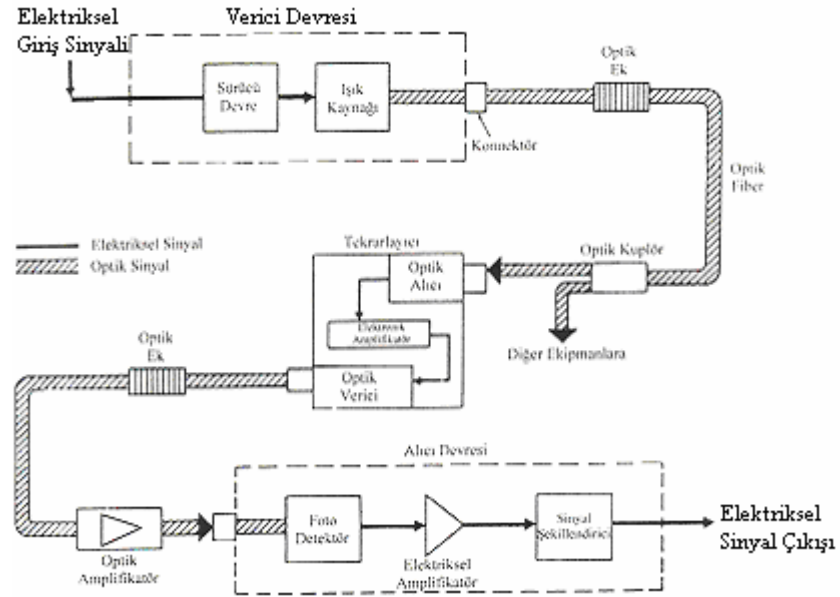
Şekil 1.2 Yıllara göre optik iletişim sistemlerindeki gelişmeler⁽¹⁾

Son yıllarda Bell Laboratuvarları'nda Lucent Technologies R&D grubu tarafından yüksek-geniş bant EDFA'ların (UWBEDFAs) kullanıldığı 100 optiksel kanalla, 1Tb/s hızında uzun mesafeli, 1,55 μm iletişim dalga boyunda, 83.5 nm bant genişliğine sahip ve toplamda 3 dB/km kaybı olan bir iletişim sistemi geliştirilmiştir. Yeni UWBEDFA'ların, Yoğun Dalga Boyu Bölmeli Çoklama (DWDM) sistemlerinde kullanılan geleneksel silika EDFA'ların sınırlı bant genişliğinden kaynaklanan kapasite sorununu (maksimum 400Gb/s) ortadan kaldıracığı tahmin edilmektedir⁽⁶⁾.

Bu çalışmada C bandında çalışan ve 1480 nm'de ileri yönde pompalanan EDFA'nın modellenerek değerlendirilmesi hedeflenmiştir. 1. bölüm giriş bölümü olup, iletim mesafesi ve bant genişliğini sınırlayan faktörlerden dolayı fiberde meydana gelen zayıflama ve nedenleri, giderme yöntemleri ile birlikte incelenmiştir. 2. bölümde, çalışmayla ilgili teorik bilgilere yer verilmiş, EDFA'nın genel yapısı ve çalışma prensibi anlatılmıştır. 3. bölümde, EDFA'ları karakterize eden oran ve yayılım denklemleri verilmiş, elde edilen EDFA karakteristikleri, 2. bölümde verilen teorik bilgilerin ışığı altında incelenerek değerlendirilmiştir. 4. bölümde ise sonuçlar ele alınmıştır.

1.1. Fiber Optik İletişimin Başlıca Elemanları

Optik iletişim sistemleri de, tüm iletişim sistemlerinde olduğu gibi verici, iletişim kanalı ve alıcı öğelerinden oluşmaktadır. Şekil 1.3’de fiber optik iletişim sistemleri için genel bir yapı biçimi gösterilmiştir.



Şekil 1.3 Optik iletişim sistemleri için genel blok diyagramı⁽¹⁾

Fiber optik iletişimde optik vericilerin rolü, elektriksel sinyali uygun bir şekilde optik sinyale dönüştürmek ve bu sinyali iletişim kanalındaki fibere uygulamaktır. Optik vericilerin ana elemanları olarak modülatör, optik kaynak ve kanal kupleleri verilebilir⁽¹⁾.

Optik kaynak olarak genelde LED’ler ya da yarı iletken lazerler kullanılır. Çünkü bu elemanların optik fibere bağlantı kayıpları diğer yarı iletken olmayan ışık kaynaklarına (veri depolama-ince film manyetik kafalar, mikro görüntü alanında kullanılan organik ışık yayan diyotlar-OLED, mikro-elektronik mekanik sistemler-

MEMS, mıknatıslanma dirençli rastgele erişimli bellek-MRAM, mürekkep püskürtmeli yazıcı cihazları) oranla çok daha düşüktür. Ayrıca yüksek verim, fiber nüvesine göre küçük yayılım (emiyon) alanı ve yüksek frekanslarda doğrudan modüle edilebilme gibi özellikleri avantajlarından bazılarıdır.

Optik iletişim sistemlerindeki ikinci ana öge olan iletişim kanalının görevi, optik sinyali formu bozulmadan vericiden alıcıya iletmektir. Görüş hattı (noktadan noktaya) optik sistemler iletişim kanalı olarak atmosferi (hava) kullanmakta, fakat ışığın atmosferde maruz kaldığı yüksek zayıflama nedeniyle kısa mesafelerde iletişim için kullanılabilir. Görüş hattı fiber optik sistemlere göre çok daha yaygın olarak kullanılan optik iletişim kanalı türü ise fiberdir. Çünkü fiberlerle iletilen ışıktaki kayıp miktarı düşüktür. Fiber kayıpları ve fiber zayıflaması, fiber optik iletişimde iki önemli performans sınırlayıcı faktördür.

Optik alıcılar ise, fiber çıkışından alınan optik sinyali tekrar orijinal elektrik sinyaline dönüştürür. Temel yapıları kanal kuplörü, foto alıcı (dedektör) ve demodülatörden oluşmaktadır. Kuplör alınan optik sinyali foto alıcı üzerine odaklayan, genelde top şeklinde bir lenstir. Foto alıcı olarak genelde yarı iletken PIN veya APD foto diyotlar kullanılır. Demodülatörün yapısı optik sistemde kullanılan modülasyon biçimine bağlıdır.

Sayısal fiber optik sistemlerin performansı bit-hata oranı (BER) ile karakterize edilir. BER belirli bir zaman diliminde iletilen hatalı bitlerin toplam bit sayısına oranıdır. Optik alıcı performansındaki bir başka önemli parametre alıcı duyarlılığıdır. Alıcı duyarlılığı sinyal-gürültü oranı (SNR) değerine bağlıdır. Şekil 1.3'de gösterilen tekrarlayıcılar, gelen optik sinyali elektriksel sinyale çevirerek elektriksel olarak yükseltir ve yükseltilecek elektriksel sinyali yeniden optik sinyal

formuna çevirerek iletişim kanalına verir. Optik yükselteçler ise optik sinyali direkt optiksel olarak yükseltirler⁽¹⁾.

1.2. Fiberde Zayıflama (Dispersiyon)

Fiber optik sistemlerde zayıflama, optik sinyalin iletebileceği maksimum mesafeyi belirleyen başlıca faktördür. Fiberdeki ışığın dalga boyuna bağlı çeşitli kayıp mekanizmaları nedeniyle ışık gücünde bir azalma meydana gelir ve bu azalma sistem bant genişliği ile iletim mesafesini azaltır. Fiberdeki P optik gücün zayıflaması aşağıdaki denklem ile verilebilir.

$$\frac{dP}{dZ} = -\alpha.P \quad (1.1)$$

Burada α , (Np/km) cinsinden zayıflama katsayısıdır. Denklem (1.1)'in çözümü optik gücün z fiber uzunluğu boyunca üstel biçimde azaldığını göstermektedir.

$$P(z) = P(0)e^{-\alpha z} \quad (1.2)$$

Giriş gücü P_{in} , çıkış gücü P_{out} olan L uzunluğundaki bir fiberin (dB/km) cinsinden zayıflama katsayısı ise aşağıdaki denklemle verilebilir.

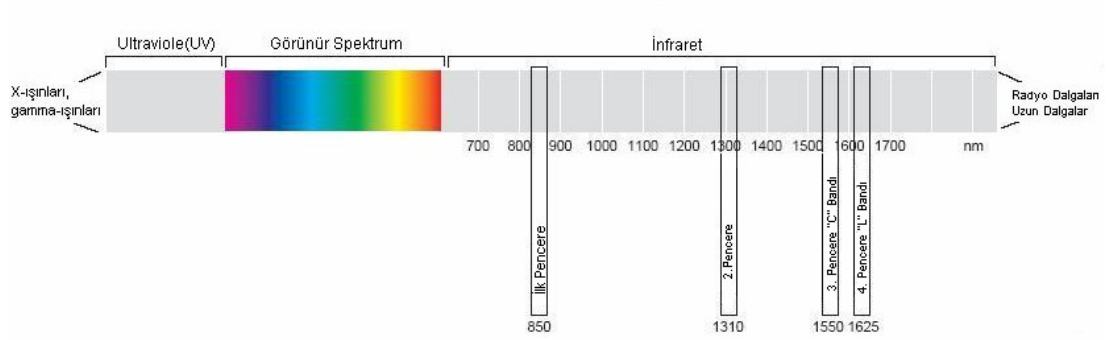
$$a(dB / km) = -\frac{10}{L} \log_{10} \left(\frac{P_{out}}{P_{in}} \right) \quad (1.3)$$

Fiber kayıpları, iletilen ışığın dalga boyuna bağlıdır. Optik fiberlerde zayıflama, temel olarak fiberdeki soğurma (absorplama) ve saçılma kayıpları ile az

miktardaki dalga kılavuzu kusurlarından meydana gelmektedir. Soğurma kayıpları saf ve saf olmayan malzeme soğurması, saçılma kayıpları ise doğrusal ve doğrusal olmayan saçılma kayıpları olarak ayrılabilir.

1.2.1. Malzeme Soğurma Kayıpları

Malzeme soğurması, fiberin malzeme yapısı ve fabrikasyon işlem biçimi ile ilgili bir kayıp mekanizmasıdır. Bu mekanizma, iletilen optik gücün bir kısmının dalga kılavuzunda ısı olarak harcanmasına neden olur⁽⁷⁾.

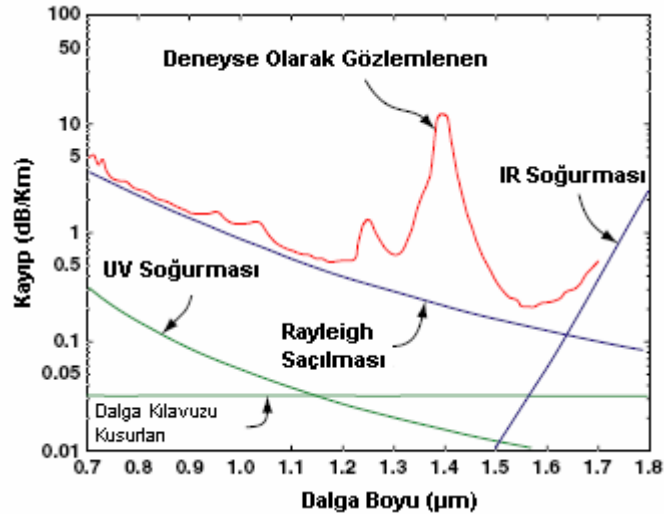


Şekil 1.4 Dalga boyu spektrumu⁽⁸⁾

Saf soğurma iki farklı şekilde gerçekleşir. Birincisi ışığın atomik elektronlarla etkileşmesi yüzünden elektronik geçişlerin zorlanmasıdır. Bunun sebep olduğu soğurmanın tepesi morötesi (UV, $\lambda < 0.4 \mu\text{m}$) bölgededir. Ancak bu bölgenin alt ucu optik fiberlerin kullanıldığı yakın kızılaltı (NIR) bölgesine uzanır. İkinci soğurma mekanizması, ışığın moleküler titreşimlerle etkileşmesidir. Bu soğurmanın tepesi

kızıltı (IR, $\lambda < 0.7 \mu\text{m}$) bölgesindedir. Şekil 1.4'de dalga boyu spektrumu gösterilmiştir.

Saf olmayan soğurma ise, cam içerisindeki safsızlıklar nedeniyle meydana gelmektedir. Bu durumdan dolayı ek kayıplar meydana gelebilir. Özellikle Cr^{3+} , Cu^{2+} , Fe^{2+} , Ni^{2+} , Mn, Co gibi 0.6-1.6 μm 'de yoğun şekilde ışığı soğuran geçiş metal iyonlarının cam içindeki konsantrasyonları milyarda bir veya daha az seviyede tutulmalıdır. 10^6 cam atomundan birindeki safsızlık (1 ppm-milyonda bir safsızlık) 2000 dB/km lik zayıflatma meydana getirir. Fakat son zamanlarda kullanılan fabrikasyon teknikleriyle bu zayıflatma etkisi ihmal edilebilecek kadar düşürülebilmektedir⁽¹⁾. Şekil 1.5'de tek modlu fiber için spektral kayıp profili gösterilmiştir.

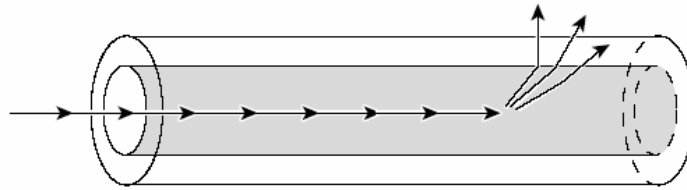


Şekil 1.5 Tek modlu fiberde spektral kayıp profili⁽⁹⁾

1.2.2. Saçılma Kayıpları

Saçılma kayıpları doğrusal ve doğrusal olmayan saçılma kayıpları olarak iki kısımda incelenebilir. Doğrusal saçılma mekanizmaları bir yayılma modunda ihtiva edilen optik gücün bir kısmını veya tamamını farklı bir moda, mod gücü ile orantılı bir biçimde doğrusal olarak transferine sebep olur. Bu transfer sızıntılı veya bir radyasyon modunda olabileceğinden, bu davranış, taşınan ışığın zayıflaması sonucunu doğurur⁽⁷⁾. Doğrusal saçılma Rayleigh ve Mie saçılmaları olarak iki ana tipte incelenebilir. Her iki saçılma türe de imal edilen fiberin ideal olmayan özelliklerinden kaynaklanmaktadır.

Rayleigh saçılması, ışığın dalga boyuna oranla küçük ölçekte oluşan rastgele yapıli düzensizliklerden kaynaklanır. Bu düzensizlikler kendilerini kırılma indisinde dalgalanmalar olarak gösterir ve soğuma sırasında cam örgüye yerleşen yoğunluk ve yapı değişimlerinden kaynaklanır. Yapı değişimleri gelişmiş fabrikasyon teknikleriyle azaltılabilir ama yoğunluk düzensizlikleri yüzünden oluşan indis dalgalanmaları kaçınılmazdır (Şekil 1.6).



Şekil 1.6 Rayleigh saçılması⁽⁸⁾

Dalga kılavuzunun ideal olmayan silindirik yapısından ve fiber kusurlarından dolayı kılavuzlanan dalga boyu mertebesindeki düzensizliklerde de doğrusal saçılma meydana gelebilir. Nüve ile kılıf ara yüzeyindeki düzensizlikler, fiber boyunca nüve

ile yelek kırılma indis farkları, çap dalgalanmaları, gerilme ve kabarcıklar bu zayıflamanın başlıca nedenleridir. Bu tür düzensizliklerce meydana gelen saçılma esas olarak ileri yöndedir ve Mie saçılması olarak adlandırılır. Fiber malzemesinin dizaynına ve imalatına bağlı olarak Mie saçılması önemli kayıplara neden olabilir⁽⁷⁾.

Optik dalga kılavuzları her zaman doğrusal kanallar gibi davranmazlar. Genellikle yüksek optik güç seviyelerinde çeşitli doğrusal olmayan etkiler meydana gelir. Bu doğrusal olmayan saçılma, optik gücün bir moddan farklı frekanstaki aynı ya da farklı modlara, ileri veya geri yönde aktarılmasına neden olur. Bu işlem fiber içindeki optik güç yoğunluğuna kritik bir şekilde bağlıdır. Optik fiberdeki doğrusal olmayan saçılmanın en önemli tipleri zorlanmış Brillouin ve Raman saçılmalarıdır. Bu her iki saçılma tipi de genellikle tek modlu uzun fiberlerde, yüksek optik güç yoğunluklarında görülür. Bu saçılma mekanizmaları gerçekte optik kazanç sağlarlar ama bir frekans kayması oluştururlar. Frekans kayması, belirli bir dalga boyunda ışık iletimine ait zayıflamaya katkıda bulunur. Bununla beraber bu tür doğrusal olmayan olaylar optik yükselteç içinde kullanılmaktadır. Doğrusal olmayan saçılmalar nedeniyle meydana gelen kayıplar, uygun bir optik sinyal seviyesinin kullanılmasıyla yani optik eşik gücünün altında çalışmak suretiyle ortadan kaldırılabilir⁽⁷⁾.

1.3. Tek Modlu Fiberde Zayıflama

Tek modlu fiberlerde zayıflama 6 çeşittir. Bunlar kromatik zayıflama, grup hızı zayıflaması, malzeme zayıflaması, dalga kılavuzu zayıflaması, yüksek mertebeden zayıflama, polarizasyon mod zayıflaması (PMD)'dir.

1.3.1. Kromatik Zayıflama

Kromatik zayıflama, fiber boyunca iletilen optiksel giriş sinyalinin frekansında meydana gelen değişim nedeniyle, optiksel sinyalin fazının bozularak zaman ekseninde genişlemesi olarak bilinir.

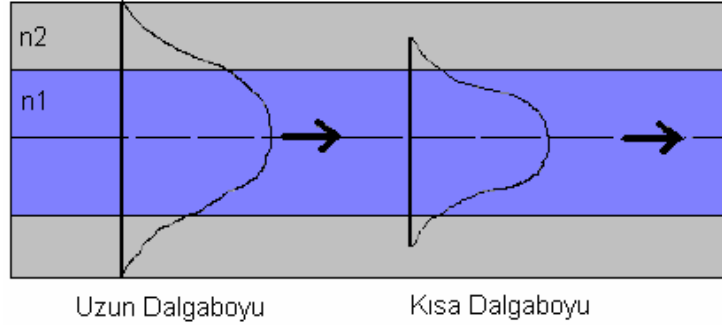
Grup hızı; optiksel fazın, optiksel frekansa göre birinci dereceden türevi, kromatik zayıflama ise optiksel fazın, optiksel frekansa göre ikinci dereceden türevi olarak tanımlanmaktadır ve aşağıdaki gibi gösterilmektedir.

$$\text{Grup Hızı} = \frac{\partial \phi}{\partial \omega} \quad (1.4)$$

$$\text{Kromatik Zayıflama} = \frac{\partial^2 \phi}{\partial^2 \omega^2} \quad (1.5)$$

Burada ϕ optiksel faz ve ω optiksel frekanstır. Bu durum, bütün optiksel sinyallerin sonlu bir spektral genişliğe ve fiber boyunca farklı hızlarda hareket eden spektral bileşenlere sahip olmasından dolayı meydana gelir. Hız farkına neden olan zayıflamalardan ilki, fiber nüvesinin farklı dalga boyları için farklı kırılma indisine sahip olmasıdır. Bu durum malzeme zayıflaması olarak adlandırılır ve tek modlu fiberlerde kromatik zayıflamaya neden olan en önemli sorundur. Diğer bir neden ise dalga kılavuzu zayıflaması olarak bilinir. Dalga kılavuzu zayıflaması, kısa dalga boyuna sahip optiksel sinyalin daha çok kırılma indisi büyük olan nüve içerisinde, uzun dalga boyuna sahip optiksel sinyalin ise daha çok kırılma indisi küçük olan kılıf içerisinde hareket etmesiyle meydana gelir. Farklı dalga boyuna sahip sinyallerin, farklı hızlarda ilerlemesi sonucunda optiksel sinyalde bozulma meydana gelir. Dalga

kılavuzu zayıflamasının kromatik zayıflamaya olan etkisi, malzeme zayıflamasına oranla daha azdır. Şekil 1.7’de dalga kılavuzu zayıflaması gösterilmiştir.



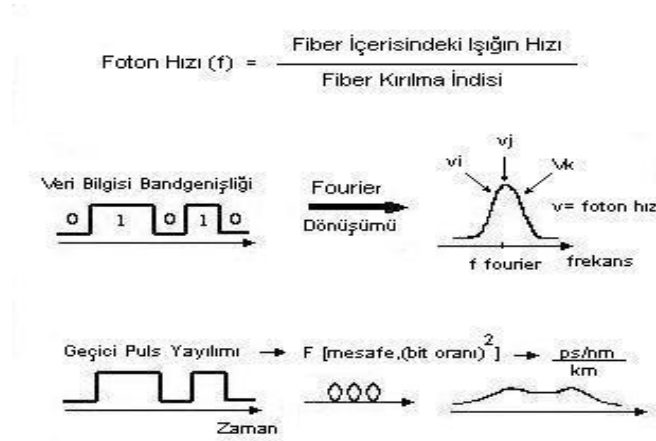
Şekil 1.7 Dalga Kılavuzu Zayıflaması - Farklı dalga boylarına sahip olan optiksel sinyallerin kırılma indisleri farklı olan ortamlarda ilerlemesi⁽¹⁰⁾

1.3.1.1.Kromatik Zayıflamayı Giderme Yöntemleri

Kromatik zayıflama, optiksel sinyalin fiber boyunca ilerlerken zamanla geçici olarak dağılmasına neden olur. Tek modlu fiberlerde iletilen veri oranı 2.5 Gbit/s eşit ya da az ise, kromatik zayıflamanın etkileri iletişimde önemli bir sorun yaratmamaktadır. Fakat tek modlu fiberlerde iletilen veri oranı 10 Gbit/s'ye eşit ya da büyük ise kromatik zayıflamanın etkisi, iletişimi oldukça güçleştirmektedir. 2.5 Gbit/s hızında işletilen iletişim sistemleri, 10 Gbit/s hızında işletilmek istendiğinde, karşılaşılan çoğu tekniksel sorun dört kat daha karmaşık olmaktadır. Optik fiberlerde iletilen veri oranı dört kat arttığında, kromatik zayıflamanın etkisi on altı kat daha fazla görülmektedir.

Kromatik zayıflama, fiberde görülen en önemli özelliklerden biridir. Veri bilgisi taşıyan ışığı oluşturan her bir fotonun hızı, fiberin kırılma indisine bağlıdır.

Işığın oluşturduğu ve farklı frekanslara sahip olan fotonlar, fiber kırılma indisinin ışığın frekansına bağımlılığı nedeniyle, fiber içerisinde farklı hızlarda ilerlemektedirler. Bir başka deyişle, yaklaşık olarak 1 GHz veri bant genişliği, 1 Gbit/s veri bilgisi içeren sinyal tarafından üretilmektedir. Bu durum, sadece 1 bit verisini oluşturan fotonların çok az da olsa farklı frekanslara sahip olduğu ve fiber boyunca hareket eden fotonların farklı hızlarda ilerledikleri anlamına gelmektedir. Fiber iletim mesafesi sonunda ise, kromatik zayıflama nedeniyle, zaman ekseninde yayılan fotonlar 1 bit verisinin, alıcı (dedektör) tarafından tam olarak 1 bit verisi olarak algılanmasını güçleştirmekte, bu olumsuz durum ise sistem performansını önemli oranda sınırlamaktadır. Bu durum Şekil 1.8’de gösterilmiştir⁽¹¹⁾.

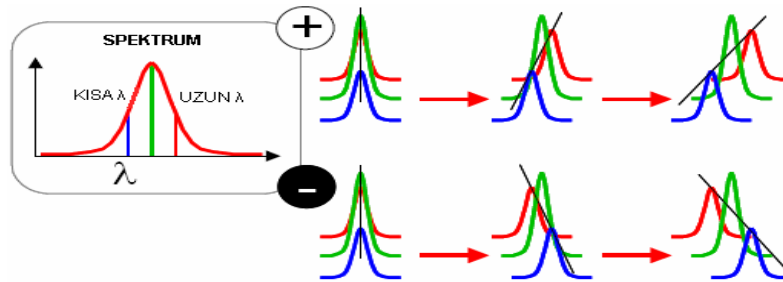


Şekil 1.8 Kromatik zayıflama, mesafe ve iletilen veri miktarının karesiyle orantılı olarak sinyal dalga boyunun artmasına (genişlemesine) neden olur⁽¹²⁾

Bununla beraber, veri iletişimde kullanılan modülasyonun biçimi de optiksel iletişim sisteminin kromatik zayıflamaya olan duyarlılığını etkileyebilmektedir. Örneğin, yaygın olarak kullanılan ve optiksel gücün 1 bitinin tamamında yüksek değerde kaldığı NRZ veri biçimi, optiksel gücün 1 bitinin sadece bir kısmında

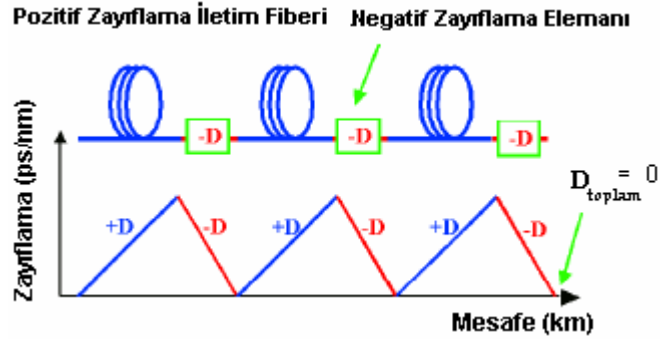
yüksek değerde kaldığı RZ veri biçimine oranla kromatik zayıflamaya daha az yatkındır. Bu farklılık, RZ'nin NRZ'ye oranla daha geniş kanal frekans spektrumuna sahip olmasından kaynaklanmaktadır⁽¹¹⁾.

Kromatik zayıflamayı, etkili bir şekilde kontrol altına almak için, her bir optik fiber sistemi, kendisi için özel olarak düzenlenmiş pozitif ve negatif zayıflama elemanlarını içeren uygun zayıflama haritalarına sahip olmalıdırlar. Negatif zayıflama, kısa dalga boyuna (mavi sinyal), bir başka deyişle yüksek dalga boyu frekansında sahip, içerdiği fotonların hızlı hareket ettiği, yavaş ilerleyen optiksel sinyallerde görülmektedir. Pozitif zayıflama ise negatif zayıflamanın aksine, uzun dalga boyuna (kırmızı sinyal), düşük dalga boyu frekansına sahip, içerdiği fotonların yavaş hareket ettiği, hızlı ilerleyen optiksel sinyallerde görülmektedir. Şekil 1.9 ve şekil 1.10'da negatif ve pozitif zayıflama şematik olarak gösterilmiştir. Yaygın olarak kullanılan onarılmış-değer negatif-zayıflama elemanları, zayıflama-giderici fiber (Dispersion - Compensating Fiber (DCF)) ve doğrusal azalan adımlı fiber Bragg ızgara (Chirped Fiber Bragg Grating) dir. Kullanımda olan optiksel sistemlerin büyük bir çoğunluğunda zayıflama giderici fiber (DCF) kullanılmaktadır⁽¹³⁾.



Şekil 1.9 Negatif ve pozitif zayıflama⁽¹⁴⁾

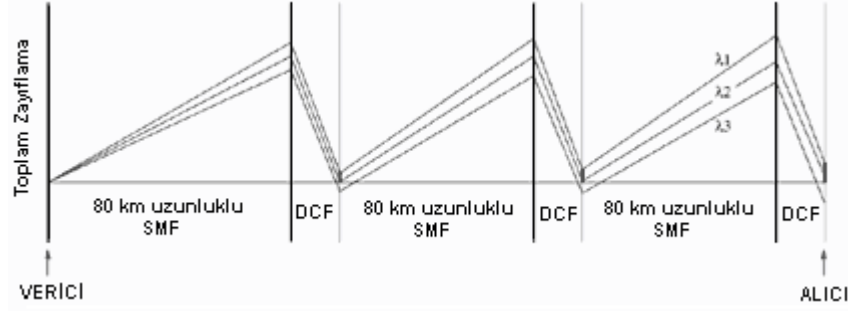
Zayıflama giderici fiber (DCF), bilinen tek modlu fiberle (SMF) üretilen negatif zayıflamaya oranla dört ila beş kat daha fazla negatif zayıflama üretmektedir⁽¹³⁾.



Şekil 1.10 Tipik bir zayıflama kontrol sisteminde, sondan sona toplam zayıflamanın sıfır olması için pozitif zayıflama iletim fiberinin yerini, negatif zayıflama giderici elemanı alır⁽¹²⁾

Farklı zayıflama değerleri, fiber nüve ve kılıfının kırılma indisi profilinin değiştirilmesiyle, bir başka deyişle; dalga kılavuzuna bağlı zayıflama değerinin değiştirilmesi ile elde edilmektedir. Yaklaşık olarak, 80 km uzunluğundaki SMF ile üretilen zayıflamayı telafi edebilmek için, 15 km uzunluğunda DCF gerekmektedir. DCF'nin geniş bant aralığında işletilebilir olmasından dolayı, çoğu WDM kanalında oluşan zayıflama eş zamanlı olarak giderilebilmektedir.

Ancak, SMF ve DCF'nin tayflara olan bağımlılığı (daha kısa dalga boyuna sahip sinyallerde oluşan negatif zayıflama ve daha uzun dalga boyuna sahip sinyallerde oluşan pozitif zayıflama) nedeniyle sadece bir dalga boyunda oluşan zayıflama tam anlamıyla giderilebilmektedir. Bu durum “zayıflama eğimi uygunsuzluğu” olarak adlandırılmakta ve şekil 1.11’de gösterilmektedir⁽¹⁵⁾.



Şekil 1.11 Düzeltilemeyen “eğim” zayıflaması, iletim hatları boyunca toplanarak artar ve kabul edilemez seviyelere ulaşabilir. Bu durum iletim hattında ilerleyen farklı dalga boylarına sahip sinyallerin merkezi dalga boyundan (λ_2) uzaklaşmasına neden olur⁽¹⁵⁾

1.3.2. Grup Hızı Zayıflaması

L uzunluğunda tek modlu fiberin çıkışındaki w frekansında meydana gelen zaman gecikmesi $t = L/V_g$ olarak verilir. Burada V_g grup hızıdır ve aşağıdaki şekilde tanımlanır.

$$V_g = (d\beta / d\omega)^{-1} \quad (1.6)$$

Δw spektral genişliğine sahip, L uzunluğundaki fiberde grup hızı zayıflaması nedeniyle meydana gelen darbe genişlemesi Δt olarak tanımlanır ve aşağıdaki gibi verilir⁽¹⁾.

$$\Delta t = \frac{d}{d\lambda} \left(\frac{L}{v_g} \right) \Delta w = LD\Delta\lambda \quad (1.7)$$

$$D = \frac{d}{d\lambda} \left(\frac{1}{v_g} \right) = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \beta^2 \quad (1.8)$$

Burada $w = 2\pi c / \lambda$ ve $\Delta w = (-2\pi c / \lambda^2)$ olarak kullanılmıştır. D terimi ise zayıflama parametresi olarak adlandırılır ve birimi ps/(km-nm)'dir. Standart silika fiberde D terimi 1.3 µm dalga boyu bölgesi civarında küçük değerler (D~1 ps/km-nm) alır. Zayıflama parametresi D, malzeme zayıflama terimi D_M ve dalga kılavuzu zayıflama terimi D_W 'nin toplamı şeklinde de yazılabilir⁽¹⁾.

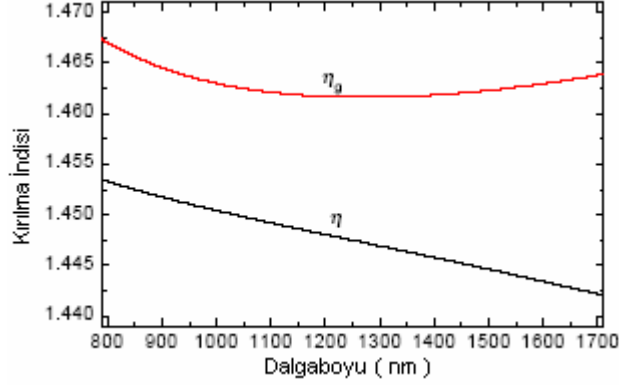
$$D = D_M + D_W \quad (1.9)$$

1.3.3. Malzeme Zayıflaması

Malzeme zayıflaması, optik kaynaktan fibere giren çeşitli spektral bileşenlerin farklı grup hızlarından kaynaklanan darbe genişlemesi olarak tanımlanabilir. Malzeme zayıflaması silikanın kırılma indisinin ω optik frekansa bağımlılığından meydana gelir. Fazların hızlarının farklı olması, grup hızının da farklı olmasını gerektirir. Kromatik zayıflama nedeniyle yavaş yayılan darbe frekansları ile hızlı yayılan darbe frekansları ayrılmaya başlar ve bir süre sonra toplam darbe genlikleri azalarak genişlemeye başlarlar. Genişleyen darbeler yavaş yavaş birbirleriyle çakışarak alıcıda (dedektör) algılanamayacak oranda bozulurlar⁽⁷⁾.

Şekil 1.12'de 0.5-1.6 µm civarındaki silika için kırılma indisi n ve grup indisi n_g 'nin dalga boyuna göre değişimi verilmiştir. $\lambda=1276$ nm dalga boyunda $dn_g / d\lambda = 0$ 'dır ve bu dalga boyu λ_{ZD} parametresi ile verilerek sıfır zayıflama dalga

boyu ($\lambda=\lambda_{ZD}$ için $D_M=0$) olarak adlandırılır. λ_{ZD} dalga boyunun altındaki dalga boylarında D zayıflama parametresi negatif değerler alır⁽¹⁾.



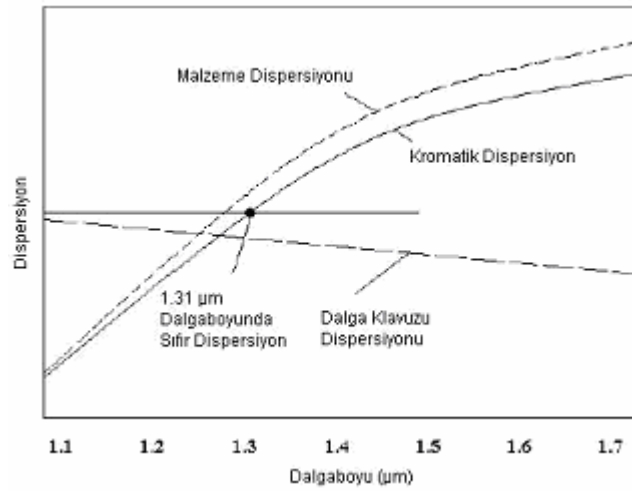
Şekil 1.12. Silika için kırılma ve grup indislerinin dalga boyuna göre değişimi⁽¹⁶⁾

1.3.4. Dalga Kılavuzu Zayıflaması

Kırılma indisinin dalga boyuna olan bağımlılığı ihmal edilse bile, her modun grup hızı dalga boyu ile artar. Nüve de taşınan güç oranı, merkezi frekans V 'ye bağlıdır. Yani belirli bir fiber için bu güç oranı, dalga boyundaki azalmayla artacaktır. Böylece λ azalırken yani V artarken mod nüve içinde daha büyük oranda hapsedilir. Bu yüzden grup hızı değeri c/n_1 değerine yakın bir değere yükselir. Bunun sonucunda bir demetteki farklı dalga boyu bileşenleri farklı etkin indisler görerek dalga kılavuzu zayıflamasını oluşturur⁽⁷⁾.

Çok modlu fiberler için dalga kılavuzu zayıflaması, modlar arası zayıflamadan çok daha küçüktür ve ihmal edilebilecek seviyededir. Fakat tek modlu fiberler için dalga kılavuzu zayıflaması önemli bir etkidir. Şekil 1.13'de tek modlu

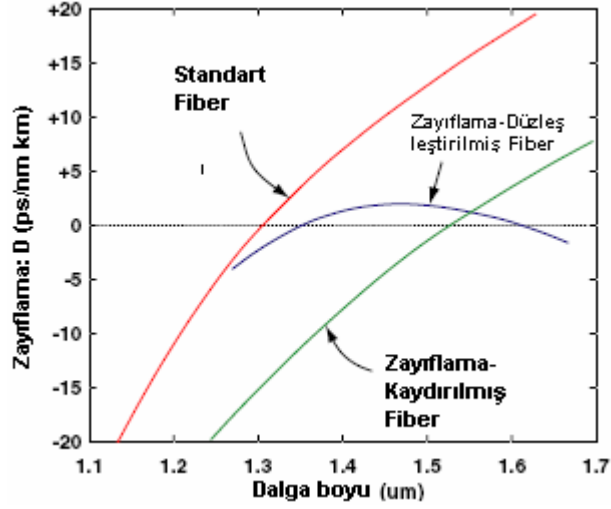
silika fiber için malzeme ve dalga kılavuzu zayıflamaları sonucunda meydana gelen toplam kromatik zayıflama verilmiştir. Dalga kılavuzu zayıflaması ile meydana gelen etki sonucunda λ_{ZD} 30-40 nm civarında bir kayma gösterir ve 1.31 μm civarında toplam zayıflama sıfır olarak görülür. Fiber optik sistemlerde minimum kaybı veren 1.55 μm dalga boyu civarındaki tipik zayıflama parametresi değeri 15-18 ps/(km-nm)'dir. 1.55 μm 'deki yüksek D değerleri fiber optik sistemler için performansı sınırlayan önemli faktörlerden biridir⁽¹⁾.



Şekil 1.13 Tek modlu silika fiberdeki kromatik zayıflama⁽¹⁰⁾

Dalga kılavuzu zayıflama parametresi D_w , nüve yarıçapı a ve indis farkı Δ gibi fiber parametrelerine bağlıdır. Bu parametreler değiştirilerek λ_{ZD} 'nin 1.55 μm civarına kaydırılmasıyla zayıflama kaydırılmış fiberler (dispersion-shifted fibers) yada toplam zayıflama değerinin nispeten düşük olduğu 1.3-1.6 μm arası geniş dalga boyu bölgesinde zayıflama düzleştirilmiş fiberler (dispersion-flattened fibers) yapılmaktadır. Şekil 1.14'de standart, zayıflama kaydırılmış ve zayıflama

düzleştirilmiş fiberler için dalga boyuna bağlı olarak D parametresinin değişimi verilmiştir.



Şekil 1.14 Standart, zayıflama kaydırılmış ve zayıflama düzleştirilmiş fiberler için zayıflama parametresinin dalga boyuna bağımlılığı⁽⁹⁾

1.3.5. Yüksek Mertebeden Zayıflama

Tek modlu fiberin BL (bit hata-uzunluğu) değeri zayıflama parametresi D 'nin sıfır olduğu λ_{ZD} dalga boyunda artar. Fakat bu durumda bile zayıflatıcı etkiler tam anlamıyla yok olmaz. Çünkü optik darbeler yüksek mertebeli zayıflatıcı etkilerden dolayı genişleme gösterirler. Yüksek mertebeden zayıflatıcı etkiler zayıflama eğimi $S=dD/d\lambda$ ile meydana gelir. S parametresi diferansiyel zayıflama veya ikinci derece zayıflama parametresi olarak adlandırılır ve aşağıdaki gibi verilir⁽¹⁾.

$$S = (2\pi c / \lambda^2) \beta_3 + (4\pi c / \lambda^3) \beta_2 \quad (1.10)$$

Burada $\beta_3 = d\beta_2/dw = d^3\beta/dw^3$ olarak tanımlanır. $\lambda = \lambda_{ZD}$ için $\beta_2 = 0$ 'dır ve S terimi β_3 ile orantılı olarak değişir.

1.3.6. Polarizasyon Mod Zayıflaması (PMD)

PMD nedeniyle oluşan darbe genişlemesinin kaynağı, fiberdeki ışığın çift kırınımıdır. İki farklı polarizasyondan oluşan giriş darbesindeki iki polarizasyon bileşeninin grup hızlarındaki farklılıklardan dolayı fiber çıkışındaki darbede bir genişleme meydana gelir. Bu olay polarizasyon mod zayıflaması (polarization-mode dispersion, PMD) olarak isimlendirilir (Şekil 1.15). Darbe yayılımı süresince iki polarizasyon bileşeni arasında oluşan gecikme süresi ΔT ile gösterilir ve L uzunluğundaki bir fiber için:

$$\Delta T = \left| \frac{L}{V_{gx}} - \frac{L}{V_{gy}} \right| = L |\beta_{1x} - \beta_{1y}| = L \Delta \beta_1 \quad (1.11)$$

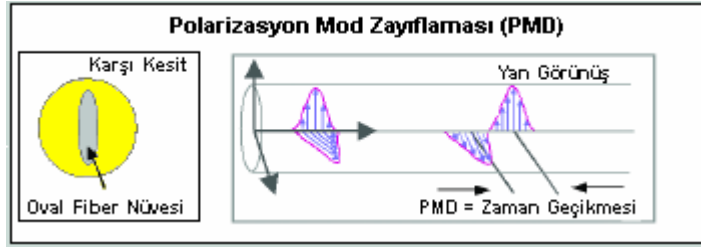
denklemleri ile verilir. Burada x ve y alt indisleri iki ortogonal polarizasyonları için propogasyon sabit farkıdır. Fakat denklem (1.11) standart telekomünikasyon sistemlerinde direkt olarak kullanılmaz. Çünkü iki mod arasında rastgele değişen bir bağlantı vardır. Polarizasyon mod zayıflaması nedeniyle oluşan darbe genişlemesi ΔT değerinin RMS (root-mean-square) değeri ile karakterize edilebilir.

$$\sigma_T^2 = \langle (\Delta T)^2 \rangle = \frac{1}{2} \Delta \beta_1^2 h^2 \left[\frac{2L}{h} - 1 + \exp\left(-\frac{2L}{h}\right) \right] \quad (1.12)$$

h parametresi burada dekorasyon boyudur ve tipi olarak 1-10 m arası değer alır. Polarizasyon korumalı fiberler için dekolerasyon boyu sonsuz büyüklüktedir ve σ_T değeri fiber boyu ile doğrusal olarak artar. $h \ll L$ için:

$$\sigma_T = \Delta\beta_1 \sqrt{hL} = D_p \sqrt{L} \quad (1.13)$$

olarak verilir. Burada D_p PMD parametresi olarak adlandırılır ve tipik değeri 0.1-1 ps/km^{1/2} arasındadır.



Şekil 1.15 Fiber nüvesinin iki eksene göre asimetrik oluşu, eksene polarize olan optiksel sinyallerin hızlarında farklılık meydana getirir⁽¹²⁾.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

Fiber optik iletişim sistemlerinde, iletim mesafesini sınırlayan en önemli faktörlerden birisi fiber kayıplarıdır. Optik yükselteç teknolojisinden önce uzun mesafeli fiber optik sistemlerindeki kayıplar, optoelektronik tekrarlayıcılar kullanılarak azaltılmaya çalışılırdı. Optoelektronik tekrarlayıcılarda zayıflayan optik sinyal ilk önce elektrik sinyaline çevrilir, elektriksel olarak yükseltilir, tekrar optik sinyal formuna çevrilerek vericiye aktarılırdı. Çok kanallı fiber optik sistemler için bu uygulamanın gerçekleştirilmesi, sistemi kompleks hale getirmekte ve kurulum maliyetini bir hayli yükseltmektedir. Bu yönetime alternatif olarak optik yükselteçler geliştirilmiştir. 1990'lı yıllarda uzun mesafeli fiber optik sistemlerde optik yükselteçler kullanılmaya başlanmış ve kısa zamanda birçok gelişme elde edilmiştir.

2.1. Optik Yükselteçlerin (Amplifikatör) Genel Yapısı

Optik yükselteçler lazerlerde kullanılan mekanizmaya benzer bir şekilde, gelen ışığı uyarılmış yayılım yoluyla yükseltirler. Aslında optik yükselteçlerin geri beslemesiz lazer yapısından bir farkı yoktur. Yükselteç, popülasyon ters birikimini sağlamak için optik veya elektriksel yolla pompalandığında, optik kazanç elde edilir. Optik kazanç sadece gelen ışığın frekansına veya dalga boyuna değil, aynı zamanda yükselteç içerisindeki herhangi bir noktadaki lokal ışık şiddetine de bağlıdır. Optik kazancın gelen ışığın frekansı ve şiddetine olan bağımlılığı, yükseltme ortamının özelliklerine göre değişir. Genel yapıyı göstermek için kazanç ortamı, düzenli genişleyen iki seviyeli sistem olarak modellenabilir. Böyle bir ortamda kazanç katsayısı;

$$g(w) = \frac{g_0}{1 + (w - w_0)^2 T_2^2 + \frac{P}{P_s}} \quad (2.1)$$

şeklinde formülleştirilerek verilebilir.

Burada g_0 kazancın maksimum değeri, w gelen optik sinyalin frekansı, w_0 atomik geçiş frekansı ve P ise yükseltilecek optik sinyalin gücüdür. P_s doyum gücü, florışı (fluorescence) süresi T_1 ve geçiş kesit alanı gibi kazanç ortamının parametrelerine bağlıdır. T_2 ise dipol gevşeme zamanı parametresi olarak bilinir ve tipik olarak 1ps'den küçük değerdedir. Popülasyon gevşeme süresi olarak bilinen florışı süresi T_1 , kazanç ortamına bağlıdır ve değeri 100 ps ile 10 ms arasında değişmektedir. Denklem (2.1) kullanılarak optik yükseltecin kazanç bant genişliği, yükseltme faktörü ve çıkış doyum gücü gibi birçok önemli karakteristikleri incelenebilir.

2.1.1. Kazanç Spektrumu ve Bant Genişliği

Yükselteç boyunca doyuma uğramamış giriş sinyal gücü $(P/P_s) \ll 1$ göz önüne alınırsa, denklem (2.1)'deki (P/P_s) terimi ihmal edilebilir ve kazanç katsayısı şu şekli alır.

$$g(w) = \frac{g_0}{1 + (w - w_0)^2 T_2^2} \quad (2.2)$$

Denklemden görülebileceği gibi atomik geçiş frekansı w_0 , gelen ışığın frekansı w , eşit olduğu zaman kazanç maksimum değerini almaktadır. Kazanç $w \neq w_0$ değerleri için düzenli genişleyen iki seviyeli sistemlerin genel karakteristiği olan

Lorentzian profiline göre azalır⁽¹⁷⁾. İlerideki bölümlerde görüleceği gibi gerçekte yükselteçlerin kazanç spektrumları Lorentzian profilinden önemli ölçüde sapabilir. Kazanç bant genişliği, kazanç spektrumu $g(w)$ 'nın yarı maksimumdaki tam genişlik (FWHM) olarak tanımlanır. Lorentzian spektrumu için kazanç bant genişliği $\Delta w_g = 2/T_2$ için şu biçimde verilir.

$$\Delta v_g = \frac{\Delta w_g}{2\pi} = \frac{1}{\pi T_2} \quad (\text{Hz}) \quad (2.3)$$

Örnek olarak $T_2 \sim 0.1$ ps olan yarı iletken lazer yükselteçlerde $\Delta v_g \sim 3$ THz' dir. Çok kanallı sinyal iletişimde, kazanç tüm bant genişliği boyunca hemen hemen sabit olduğundan, fiber optik haberleşme sistemlerinde nispeten yüksek bant genişlikli yükselteçler tercih edilmektedir. Kazanç bant genişliği yerine genellikle yükselteç bant genişliği kavramı kullanılır. Farkı anlamak için yükselteç kazancı veya yükselteç faktörü olarak tanımlanan G parametresi göz önüne alınabilir.

$$G = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (2.4)$$

Burada P_{in} ve P_{out} sırasıyla yükseltilecek sürekli dalga (CW) sinyalin giriş ve çıkış güçleridir. Girişten z uzaklıktaki optik güç:

$$\frac{dp}{dz} = gP \quad (2.5)$$

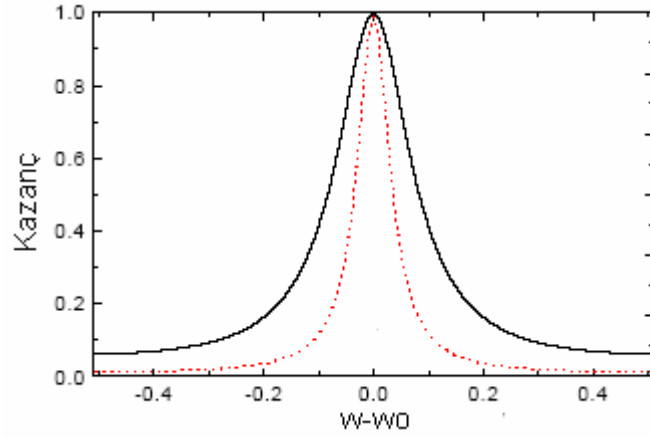
denklemleri ile verilir. $P(0) = P_{in}$ başlangıç şartı ile integrasyon, sinyal gücünün artışının eksponensiyel olduğunu gösterir.

$$P(z) = P_{in} \exp(gz) \quad (2.6)$$

$P(L) = P_{out}$ için denklem (2.4) kullanılarak L uzunluğundaki bir yükselteç için yükseltme faktörü:

$$G(w) = \exp[g(w)L] \quad (2.7)$$

ile verilir. G ve g terimlerinin her ikisinin de frekansa bağımlılığı yukarıdaki denklemden açıkça görülebilmektedir. Yükselteç kazancı $G(w)$ ile yükseltme faktörü $g(w)$ 'nin her ikisi de $w=w_0$ için maksimumdur ve artan $w-w_0$ değerleri için ise azalır. Bununla birlikte $G(w)$, $g(w)$ 'ye göre çok daha hızlı azalmaktadır. Yükselteç bant genişliği ΔV_A , $G(w)$ 'nin FWHM'i olarak tanımlanır ve kazanç bant genişliği ΔV_g 'ye bağlıdır.



Şekil 2.1 İki seviyeli orta kazanç için Lorentzian kazanç profili $g(w)$ ve buna karşılık gelen yükselteç kazanç spektrumu $G(w)$ ⁽¹⁶⁾

$$\Delta v_A = \Delta v_g \left(\frac{\ln(2)}{\ln(G_0/2)} \right)^{1/2} \quad (2.8)$$

Burada $G_0 = \exp(g_0.L)$ ' dir. Şekil 2.1 kazanç profili $g(w)$ ve yükselteç kazancı $G(w)$ 'nin spektrumlarını göstermektedir. Şekilden de görülebileceği gibi yükselteç bant genişliği kazanç bant genişliğinden daha küçüktür. Aralarındaki fark yükseltme kazancına bağlıdır.

2.1.2. Kazanç Doyumu (Saturation)

Kazanç doyumu, $g(w)$ 'nın güce bağımlılığına dayanmaktadır. P_s ile P yaklaşık eşit iken g değeri azaldığı için, yükseltme faktörü G sinyal gücündeki artışla sağlanır. Bu olaya kazanç doyumu denir. Gelen sinyal frekansının tam olarak ($w = w_0$) tepe kazanç ayarlandığını varsayarak denklem (2.1)' deki g 'yi denklem (2.5)'de yazarak:

$$\frac{dP}{dZ} = \frac{g_0 P}{1 + (P/P_s)} \quad (2.9)$$

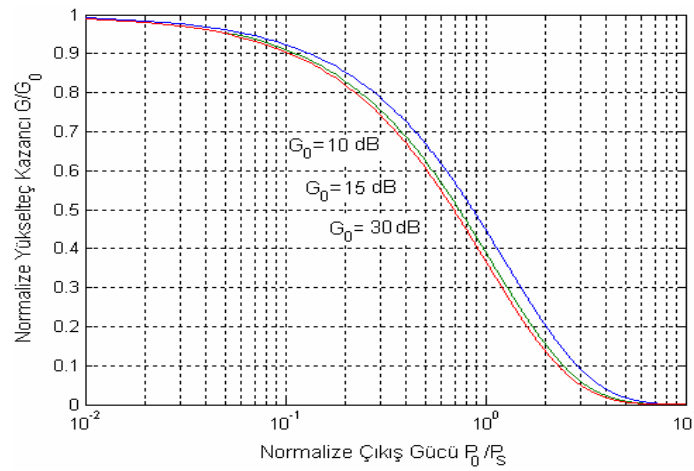
elde edilir. Bu denklem yükselteç uzunluğu için kolayca entegre edilebilir. $P(0)=P_{in}$ başlangıç şartıyla birlikte $P(L) = P_{out} = G.P_{in}$ kullanılırsa, büyük sinyal yükselteç kazancı için tanımlanan bağlantı elde edilir:

$$G = G_0 \exp\left(-\frac{(G-1) P_{out}}{G P_s}\right) \quad (2.10)$$

Pratik açıdan ilgilenilen bir büyüklük ise, çıkış doyum gücü P_{out}^s dir ve G yükselteç kazancının doyumsuz değeri G_0 'ın $1/2$ ' sine (veya 3dB) azaldığı çıkış gücü olarak tanımlanır. Denklem (2.10)' da $G=G_0/2$ kullanılırsa:

$$P_{out}^s = \frac{G_0 \ln(2)}{G_0 - 2} P_s \quad (2.11)$$

bulunur. P_{out}^s değeri P_s değerinden 30% civarında daha küçüktür. Aslında pratikte $G_0 \gg 2$ (30dB yükselteç kazancında $G_0 = 1000$ olduğu için), $P_{out}^s \approx [\ln(2)P_s] \approx 0.69P_s$ 'dir. Şekil 2.2'de görüldüğü gibi $G_0 > 20$ dB için P_{out}^s hemen hemen G_0 'dan bağımsız olur.



Şekil 2.2 Birkaç doyumsuz yükselteç kazanç G_0 değeri için çıkış gücünün fonksiyonu olarak doyum gücü ile normalize çizilmiş doyumlu yükselteç kazancı $G^{(1)}$

2.1.3. Yükselteç (Amplifikatör) Gürültüsü

Bütün yükselteçler yükseltme sırasında oluşan kendiliğinden yayınım nedeniyle sinyale gürültü ekleyerek yükseltile sinyalin sinyal/gürültü oranını (signal-to-noise ratio, SNR) düşürürler. SNR azalması elektronik yükselteçlerde de kullanılan bir büyüklük olan yükselteç gürültü faktörü (noise figure, NF) ile tanımlanır.

$$NF = \frac{(SNR)_{in}}{(SNR)_{out}} \quad (2.12)$$

SNR, optik sinyalin foto alıcıda elektrik akımına çevrilmesiyle üretilen elektriksel sinyal ve gürültü güçleri için tanımlanmıştır. Genelde NF , foto alıcıda üretilen termal gürültü dahil birkaç alıcı parametresine bağlıdır. Fakat performansı vuruş gürültüsü ile sınırlı ideal alıcı göz önüne alındığında NF için basit bir bağıntı elde edilebilir⁽¹⁸⁾. Çıkış gücü ile giriş gücünün $P_{out} = GP_{in}$ şeklinde bağıntılı olduğu G kazançlı bir yükselteç için giriş sinyalinin SNR'ı:

$$(SNR)_{in} = \frac{\langle I \rangle^2}{\sigma_s^2} = \frac{(RP_{in})^2}{2q(RP_{in})\Delta f} = \frac{P_{in}}{2hv\Delta f} \quad (2.13)$$

ile verilir. Burada $\langle I \rangle = RP_{in}$ ortalama foto akımını ve $R = q/(hv)$ ise birim kuantum verimli ideal foto alıcının tepkimesini vermektedir. Toplam vuruş gürültüsü $\sigma_s^2 = 2q(I_p + I_d)\Delta v$ şeklindedir⁽¹⁾. Foto alıcının karanlık akımı $I_d = 0$ için $I_p = RP_{in}$ formülü kullanılırsa:

$$\sigma_s^2 = 2q(RP_{in})\Delta v \quad (2.14)$$

elde edilir. Burada Δv alıcı bant genişliğidir. Yükseltile sinyal SNR değeri içinse, alıcı gürültüsüne kendiliğinden yayınının etkisi de eklenmelidir. Kendiliğinden yayınının neden olduğu gürültünün spektral yoğunluğu hemen hemen sabittir (beyaz gürültü) ve şu biçimde tanımlanır⁽¹⁸⁾.

$$S_{sp}(v) = (G-1)n_{sp}hv \quad (2.15)$$

Burada ν optik frekanstır. n_{sp} parametresine kendiliğinden yayınım faktörü veya popülasyon birikimi faktörü denir ve:

$$n_{sp} = \frac{n_2}{n_2 - n_1} \quad (2.16)$$

ile verilir. n_1 ve n_2 sırasıyla taban ve uyarılmış seviyelerin atomik popülasyonlarıdır. Kendiliğinden yayınımın etkisi, yükseltilem güçteki dalgalanmaları artırma şeklindedir ve bu da foto algılama süreci yoluyla akım dalgalanmalarına dönüşür. Alıcı gürültüsüne en fazla katkı, kendiliğinden yayınımın sinyalle girişim yapması sırasında meydana gelir⁽¹⁸⁾. Bu çarpışma olayı, heterodin algılamaya benzer şekilde kendiliğinden yayılan radyasyonun yükseltilem sinyalle foto alıcıda karışıp bir modüle edilmiş foto akım bileşeni üretmesi şeklindedir. Eğer diğer tüm gürültü kaynakları ihmal edilirse, foto akımın varyansı şu şekilde yazılabilir:

$$\sigma^2 \approx 4(RGP_{in})(RS_{sp})\Delta\nu \quad (2.17)$$

Buna göre yükseltilem sinyalin SNR'ı aşağıdaki hale gelir.

$$(SNR)_{out} = \frac{\langle I \rangle^2}{\sigma^2} = \frac{(RGP_{in})^2}{\sigma^2} \approx \frac{GP_{in}}{4S_{sp}\Delta\nu} \quad (2.18)$$

Yükselteç gürültü faktörü, (2.13) ve (2.18) denklemlerinin (2.12) denkleminde yerine konulmasıyla elde edilebilir. Bu denklemde S_{sp} için denklem (2.15) kullanılarak:

$$NF = 2n_{sp} \frac{(G-1)}{G} \approx 2n_{sp} \quad (2.19)$$

elde edilir. Bu denklemden anlaşılacağı gibi $n_{sp}=1$ olan ideal yükselteçlerde bile yükseltile sinyalin SNR'ı 3dB azalır. Çoğu pratik yükselteçlerde NF 3 dB'i aşar ve 6~8 dB gibi büyük değerlerde olabilir. Bir optik yükseltecin fiber optik haberleşme sistemlerinde kullanılabilmesi için, mümkün olduğu kadar küçük NF değerine sahip olması gerekmektedir⁽¹⁸⁾.

2.2. Katkılı Fiber Yükselteçler

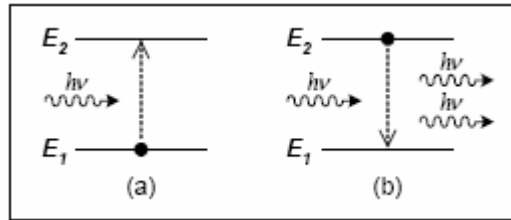
Fiber yükselteçlerin en önemli sınıfı katkılı fiber yükselteçlerdir. Fiber nüvesi boyunca doğada az rastlanan (rare-earth) elementlerin katkılanması yöntemi ile imal edilirler. Katkılı fiber yükselteçler üzerindeki ilk çalışmalar 1964 yılında başlamasına rağmen bu olayın pratikte uygulanabilmesi yaklaşık 25 yıl sonra gerçekleşmiştir⁽¹⁹⁾. Günümüzde, Erbiyum (Er^{3+}), Holmiyum (Ho^{3+}), Neodmiyum (Nd^{3+}), Prasedmiyum (Pr^{3+}), Samariyum (Sa^{3+}), Tuliyum (Tm^{3+}) ve Yiterbiyum (Yb^{3+}) gibi birçok nadir toprak iyonlar kullanılarak, görülebilir ışıktan kızılötesi ışık bölgesine (3 mm'ye) kadar geniş bir spektrumu kapsayan farklı dalga boylarında çalışan fiber yükselteçler yapılabilir. Bununla birlikte, Erbiyum Katkılı Fiber Optik Yükselteçler (EDFA) silika fiberdeki zayıflamanın en düşük olduğu 1550 nm penceresindeki geniş bir dalga boyu aralığında çalışabilmesiyle, uzak mesafe fiber optik iletişim sistemleri (Long Haul System) için vazgeçilmez bir eleman olmuştur. Erbiyum kullanılarak yapılan Erbiyum Katkılı Fiber Optik Yükselteçler (EDFA) birçok özellikleri bakımından diğer optik yükselteçlere göre daha dikkat çekicidirler. Çünkü çalışma dalga boyları fiber kayıplarının hemen hemen minimum olduğu 1.55 μm civarındadır.

Önceleri yalnızca C bandında (1525-1565 nm) yapılabilen yükseltme işlemi, aktif fiberin Erbiyumla birlikte ortak katkı malzemesi olarak Yiterbiyum (Yb^{3+}) ile katkılanmasıyla L bandına (1570-1620 nm) genişlemiştir. Diğer taraftan Tuliyum (Tm^{3+}) katkılı Raman fiber yükselteçler ise S bandında (1480-1520 nm) yükseltmeye imkan vermiştir. Fakat günümüzde halen erbiyum katkılı fiber yükselteçlerin kullanımı popülerliğini korumakta ve geliştirilmesi için çalışmalar devam etmektedir.

2.3. EDFA'nın Fiziksel Çalışma Prensipleri

2.3.1. Foton Atom Etkileşimi

Erbium iyonunda atomlar farklı enerji seviyelerinde bulunurlar. Enerji düzeyleri E_1 ve E_2 olan bir atoma, $h\nu = E_2 - E_1$, burada h plank sabitidir, koşulunu yerine getiren ν frekanslı bir elektromanyetik alan ile verilen enerji, atomun bu iki farklı enerji seviyesinde geçişine neden olabilmektedir. Optiksel bir ortamda, elektromanyetik alan, atomal enerji geçişlerine uygun olarak, $h\nu$ enerjili fotonların bir araya gelmesiyle oluşan optiksel bir ortamdır.



Şekil 2.3 a) Soğurma Şekil 2.3 b) Uyarılmış yayılım⁽²⁰⁾

Atomlar, ışınım (radyasyon) olayı sırasında üç farklı yolla etkileşebilmektedir: *Soğurma, uyarılmış foton yayılımı ve kendiliğinden yayılım.*

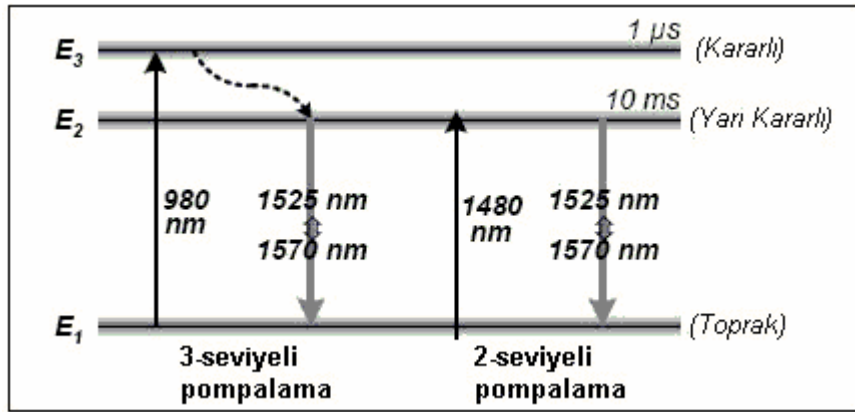
Harici bir ışınının geçerli bir sıcaklık durumunda mevcut olmaması ve optiksel frekansa uygun olarak enerji seviyeleri arasındaki mesafe nedeniyle, çoğu elektron düşük enerji seviyesinde bulunur. *Soğurma*, düşük enerji seviyesindeki bulunan erbiyum iyon elektronlarının, fiber boyunca, pompa sinyalinden, enerjisi $h\nu$ olan tesadüfi bir foton soğurması ve bir üst enerji seviyesi olan kararlı seviyeye geçiş yapmalarıyla meydana gelmektedir (Şekil 2.3.a.). Geçiş ışınım modunda ise zayıflamış optiksel sinyalden gelen tesadüfi bir foton, uyarılmış bir elektronun toprak seviyesine düşmesine, aynı yön, faz ve polarizasyonda foton yaymasına neden olur. Bu süreç, *uyarılmış yayınım* olarak bilinmekte ve ana optiksel lazer yükselteçlerin çalışma şeklinin temelini oluşturmaktadır (Şekil 2.3.b.). Üçüncü mümkün olan foton atom etkileşimi ise, *kendiliğinden yayınım*dır ve önceden yüksek enerji seviyesinde olan bir atomun daha düşük bir enerji seviyesine düşerken, $h\nu$ enerjisine sahip bir foton yayınmasıyla meydana gelir. Kendiliğinden yayınan fotonların faz, polarizasyon ve yön özellikleri, harici ışınımdan (radyasyon) bağımsızdır. Bu fotonların sonradan ortaya çıkan uyarılmış foton yayınımı ile birlikte yükseltilmesi, optiksel yükselteç çıkışında gürültü olarak görülen, yükseltilmiş doğal yayınımı, ASE'yi (amplified spontaneous emission) oluşturur.

N_1 ve N_2 yi, E_1 ve E_2 enerji seviyelerinde bulunan atom miktarı olarak nitelendirebiliriz. ($N_1 > N_2$, ısı dengesi) Uyarılmış emisyon ve soğurmanın gerçekleşme ihtimalinin eşit ve sadece miktara bağlılığı nedeniyle, $N_1 > N_2$ koşulu, uyarılmış emisyondan daha ziyade soğurmayı belirtecektir. Atom miktarını tersine çevirmek, ($N_2 > N_1$) yükseltme işlemini gerçekleştirebilmek için gereklidir. Bu nedenle, atomların enerji seviyelerini E_1 'den E_2 'ye değiştiren harici bir enerji kaynağının kullanımı gerekir (optiksel, elektriksel ya da kimyasal). Bu süreç, genellikle ekstra enerji seviyesi gerektirir ve pompalama olarak adlandırılır.

E_2 enerji seviyesinden E_1 'e düşüş ayrıca ışınım ile olmayabilmektedir. (Nonradiative). Işınımlı ve ışınımlı olmayan gecikme oranları sistem karakteristikleri (özellikleri) için çok önemlidir. E_2 'den E_1 'e geçiş ışınım ömrü, E_2 'nin florışı süresi olarak adlandırılmaktadır⁽⁵⁾.

2.3.2. Erbiyum Katkılı Silika Cam

Erbiyum iyonlarının silika cam fibere katkılanması süreci esnasında, her bir erbiyum iyonunun enerji düzeyleri, enerji bantlarını oluşturan birçok alt bölümlere ayrılır. EDFA'da, en önemli üç enerji bandı, E_1 , E_2 ve E_3 olarak adlandırılmış ve artan bir sırada şekil 2.4'de gösterilmiştir.



Şekil 2.4 Silika camdaki erbiyum iyonlarının enerji seviyeleri⁽²⁰⁾

Şekilde görülen oklar, mümkün olan soğurma ve yayınım geçişlerini göstermektedirler. Radyoaktif geçişler, dalga boylarıyla tanımlanmış ve yüksek enerji düzeylerinde ki ömürleri gösterilmiştir. Uyarılmış geçiş (yükseltme ve lazerin çalışmasından sorumlu) sırasıyla toprak ve yarı kararlı durum olarak adlandırılan, E_1 ve E_2 enerji düzeylerinin arasında meydana gelir.

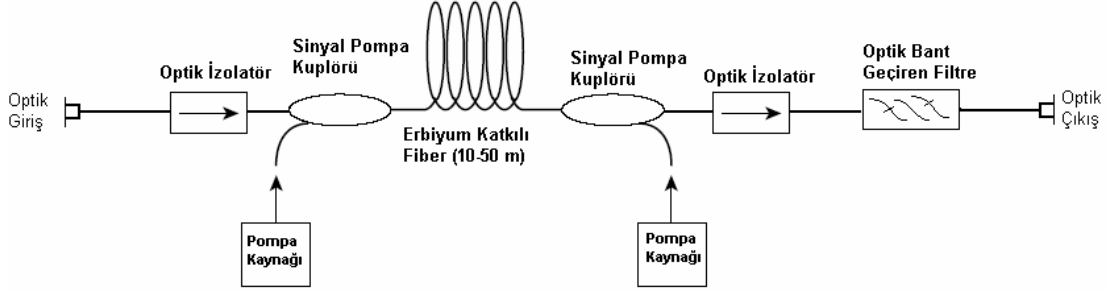
Yükseltme sürecini ilk olarak, toprak seviyesindeki iyonların, pompalama yardımıyla, geçiş enerji seviyesine uyarılmasıyla başlamaktadır. Bu düzeyin ömrünün kısa oluşu nedeniyle, erbiyum iyonları kendiliğinden yarı kararlı seviye, E_2 'ye geçiş yaparlar⁽²¹⁾. Erbiyum atomunun 10 ms gibi yüksek bir değerde olan yarı kararlı seviye ömrü, optiksel kazancın elde edilmesi sürecinde, kazancın doyuma ulaşması için geçen sürenin daha uzun olmasını sağlar⁽²²⁾. Yarı kararlı enerji bandı, çevre sıcaklığında dahi yaklaşık olarak düzenli popülasyona sahip olacak kadar yeterli darlıktadır. Bunun sonucunda, uyarılmış yayınım için kullanılan her bir iyon çok hızlı bir şekilde, yerini bir başka erbiyum iyonuna bırakır. Bu durum ise tipik olarak düzenli kazanç genişlemesi ile sonuçlanır.

Şekil 2.4'de temel EDFA pompalama yöntemleri oklarla gösterilmektedir. Geçiş bandı olarak E_3 'ü kullanan ilk pompalama yöntemi, 980 nm dalga boyunda pompalamayı; geçiş bandı olarak E_2 'nin en üstteki alt bölümlerini kullanan, ikinci pompalama yöntemi ise, 1480 nm dalga boyunda pompalamayı gerektirir. Bu iki pompalama yönteminin oluşturduğu ters şartlar altında (erbiyum iyonlarının uyarılmasıyla oluşan durum), geniş dalga boyu bandında (1525-1570 nm) ilerleyen giriş sinyali (gücü zayıflamış optiksel sinyal); erbiyum iyonlarının, yarı kararlı seviyeden toprak seviyesine radyoaktif geçişine neden olur. Herhangi bir giriş sinyalinin çok uzun süreler boyunca bulunmayışı ise, kendiliğinden yayınımın artmasına (sadece N_2 'ye bağımlı olması nedeniyle) ve dolayısıyla aynı dalga boyunda ASE'nin oluşmasına neden olur. Erbiyum iyonlarının E_2 'den E_1 'e düşüşü ister uyarılmayla, ister kendiliğinden olsun; pompa gücü soğurması, ters popülasyon şartlarını sürdürerek, toprak seviyesinde bulunan erbiyum iyonlarının derhal geçiş bandına ve oradan da E_2 'ye iletimini sağlar.

Ayrıca burada, şekil 3.4’de gösterilmeyen, fakat yarı kararlı ya da kararlı seviyede bulunan az miktardaki iyonların, pompa ya da sinyal fotonlarını soğurarak daha yüksek enerji seviyelerine geçebildikleri göz ardı edilmemelidir. Bu iyonlar aslında kendiliğinden E_2 ya da E_3 ’e geri düşene kadar yararlı popülasyonu terk ederler. Bu süreç “kararlı durum soğurması” olarak bilinir ve yükseltme ve pompalama olaylarının düşük güçte gerçekleşmesine neden olur. Bununla beraber, EDFA’nın modellenmesinde, sadece üç en önemli enerji bandının göz önüne alınması ve kararlı durum soğurmasının ihmal edilmesi, daha kesin doğrulukta sonuçlar elde edilmesini sağlamaktadır⁽²¹⁾.

2.3.3. EDFA’nın Bileşenleri ve Avantajları

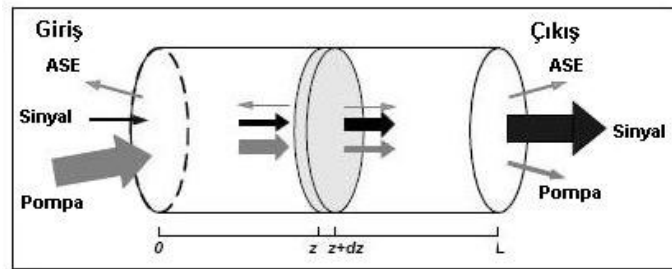
Şekil 2.5’de tipik bir EDFA’nın yapısı gösterilmektedir. EDFA, nüvesi doğada az rastlanan erbiyum iyonları (Er^{3+}) ile katkılanmış, maksimum 100m uzunlukta silika fiberden oluşur. Erbiyum katkılı fiber, genellikle %0.1 değerini geçmeyecek oranda katkılanır. Pompa, popülasyon ters birikimini sağlamak için yeterli gücü sağlar. Pompalama için, genelde erbiyum iyonlarının enerji soğurma düzeylerinin (bir başka deyişle verimin) en yüksek olduğu, 980 ve 1480 nm dalga boylarında çalışan yarı iletken lazerler kullanılmaktadır. Pompa gücü, silika fibere, WDM çoğullayıcı ya da kuplör kullanılarak verilir. Pompalama, silika fibere, sinyal doğrultusunda, ona ters yönde ya da eş zamanlı olarak her iki yönde uygulanabilmektedir. Geri yönde pompalamada, pompa gücü erbiyum katkılı fiberin çıkışından verilir⁽⁵⁾.



Şekil 2.5 EDFA yapısı⁽⁸⁾

EDFA daha ziyade 10 ila 50m uzunluğunda erbiyum katkılı fiber, dalga boyu bölmeli çoğullayıcı (WDM-Kuplör), ve pompa kaynağından oluşur. Bunlara ek olarak, polarizasyona duyarız optik izolatörler ve bir optik bant geçiren filtre EDFA'nın performansını arttırmak için gereklidir. Optik izolatör, kararlı yükseltme işlemini gerçekleştirmek için kullanılır (optik sinyalde oluşan sahte salınımları engeller). Optik filtre, yükseltilen optik sinyalden, oluşan ASE ve pompa gücünü büyük oranda kaldırmak ve yükseltici, sistem boyunca hızla artan ASE'nin neden olacağı doyumdan korumak için kullanılır⁽²²⁾.

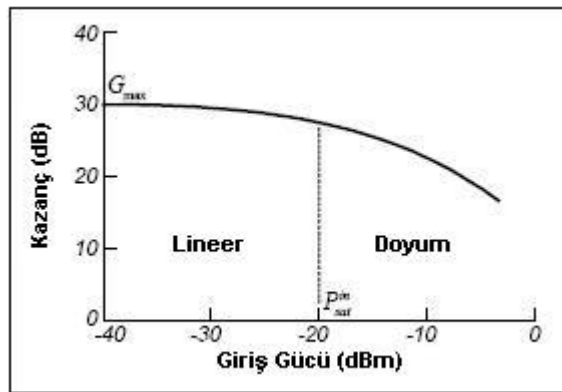
Şekil 2.6, ileri yönde pompalanmış erbiyum katkılı fiberin temel çalışma prensibini; sinyal yükseltme, pompa soğurma ve ASE üretimini, erbiyum katkılı fiber nüvesinin her bir silindirik bölgesinde meydana gelen eş zamanlı artışla birlikte göstermektedir⁽⁵⁾.



Şekil 2.6 EDFA'nın temel çalışma şekli⁽²⁰⁾

Erbiyum iyonlarının daha yüksek enerji seviyelerine yükselmeleriyle, erbiyum katkılı fiber boyunca pompa gücü soğurulmakta ve fiber sonunda azalmaktadır. Gelen sinyaller eş zamanlı olarak yükselmekte ve ASE, erbiyum katkılı fiberin her iki tarafında artmaktadır.

En yüksek kazanç, çok düşük güçlü sinyal girişlerinde meydana gelir. Giriş sinyal gücü artışı öyle bir seviyeye ulaşır ki, fiber boyunca pompa ile üretilen yarı kararlı seviye popülasyon oranı, giriş sinyali çıkış gücü artışını beslemek için yeterli olmaz. Kazanç; çıkış gücünün, giriş gücüne olan oranı olarak tanımlanır, erbiyum katkılı fiber boyunca giriş gücünün bir fonksiyonu olarak düşüşe geçer ve yükselteç doyuma ulaşır. Şekil 2.7, tipik bir EDFA'nın giriş gücü karakteristiği ile kazanç (dB) arasındaki ilişkiyi kısaca tarif etmektedir⁽⁵⁾.



Şekil 2.7 EDFA kazancı ve giriş gücü⁽²⁰⁾

Giriş gücü dBm ya da $decibel-mW$ birimindedir. Kazanç ve giriş gücünün her biri verilen bir dalga boyunda ele alınır. İşletilen iki bölge ayırt edilebilir. Düşük güçlü sinyal, kazancın G_{max} 'a ulaşıldığı bölgede doğrusal karakteristik gösterir. Daha yüksek güçlü sinyal girişleri için kazanç düşer ve yükselteç doyuma ulaşır. Giriş doyum gücü P_{sat}^{in} , kazancın G_{max} 'dan $3 dB$ düşük olduğu giriş gücü olarak tanımlanır.

G_{max} ve P_{sat}^{in} 'ın gerçek değerleri EDFA'nın fiziksel karakteristiklerine bağlıdır. Kendiliğinden-doyum (Self-Saturation), aşırı miktarda ASE'nin yükselteçte üretilmesi ve benzer şekilde kazancın aniden düşmesiyle meydana gelir.

EDFA, 1525-1570 nm dalga boyu aralığında eş zamanlı yükseltme imkanı sağlar, fakat 1532 nm dalga boyunda benzersiz kazanç özelliğine sahiptir. Bu dalga boyu penceresi, silika fiberde görülen en düşük zayıflama penceresi ile uyuşur. Erbiyumun lazerle iletiminin, silika fiberdeki en düşük zayıflama penceresi ile uyuşması gerçeği, iletim için 1550 nm dalga boyu aralığının seçilmesine ve EDFA'nın, fiber optik iletişim için kullanılmasına yol açan en önemli etkenlerden biridir. Katkılama için erbiyum iyonunun seçilmesinin nedeni; her şeyden önce erbiyumun yarı kararlı enerji seviyesinin uzun florışı ömrü ve yükseltme imkanı sağladığı geniş dalga boyu aralığına (pencere) sahip olmasındandır⁽⁵⁾.

980 nm de pompalama, 1480 nm pompalamaya göre daha etkilidir. Bu dalga boyunda pompalanan erbiyum katkılı fiberler, 1480 nm'de pompalamaya göre değişik avantajlara sahiptir. Bu avantajlardan bazıları, düşük gürültü değeri ve kazancın sıcaklığa olan bağımlılığının düşük olmasıdır. 980 nm de çalışan pompalar daha düşük gürültülü yükselteçlerin üretiminde kullanılır çünkü, yüksek popülasyon ters birikimi, daha düşük ASE seviyesi anlamına gelir. Bir başka deyişle; EDFA'da daha yüksek çıkış güçlerini mümkün kılan, yüksek güçlü pompa lazerleri, 1480 nm dalga boyunda bulunurlar. Bu nedenle 1480 nm'de çalışan pompa lazerleri, yüksek çıkışlı yükselteçlerin üretiminde kullanılır. 1480 nm'de pompalamanın bir başka avantajı ise, pompa gücünün silika fiberde düşük kayıpla ilerleyebilmesi ve bu nedenle pompalamanın daha uzağa yapılabilmesidir. 10-20 mW arası pompa gücü ile pompalanan bir EDFA'dan, 30-40 dB kadar yüksek yükseltme kazancı sağlamak

mümkündür. 0.98 μm 'de pompalanan bir EDFA'dan 11 dB/mW kadar verim elde edilebilmektedir.

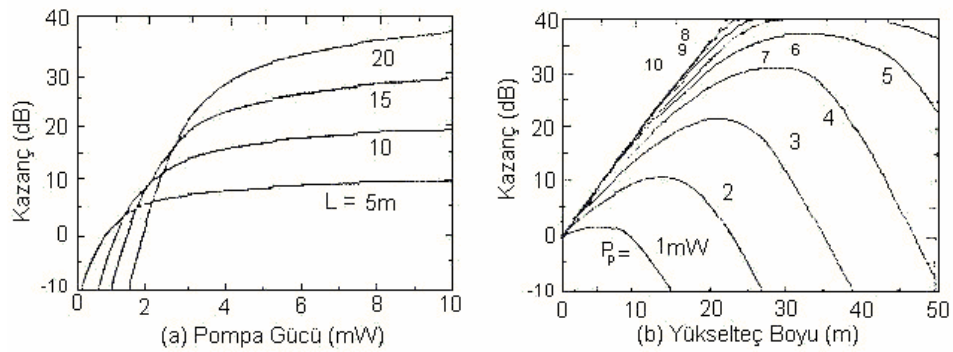
980 nm ve 1480 nm dalga boyunda çalışan pompalar çift-evreli ve çoklu-evreli EDFA'larda tamamlayıcı olarak kullanılabilir. Tipik bir çift-evreli konfigürasyonda, ilk evre yüksek kazanç ve düşük gürültü üretimine uygun olacak şekilde, ikinci evre ise yüksek çıkış gücü üretimine uygun olacak şekilde oluşturulmaktadır. Bu nedenle, ilk evre genel olarak 980 nm ileri yönde pompalı iken ikinci evre ise 1480 nm geri yönde pompalı olmaktadır⁽²²⁾. EDFA'lar geri yönde (backward pumping), ileri yönde (forward pumping) veya çift taraflı (bi-directional pumping) pompalanabilirler. İleri yönde pompalamada sinyal ve pompalama güçlerinin her ikisi de fiber boyunca aynı doğrultuda ilerler. Geri yönde pompalamada ise sinyal ve pompa güçleri fiber boyunca zıt yönde hareket ederler. Doyumsuz bölgede, her iki pompalama şeklinin performansları hemen hemen birbirine yakındır. Geri yönde pompalama yöntemiyle, doyum bölgesinde verim genelde daha iyidir. Çünkü geri yönde pompalamada yükseltilmiş kendiliğinden yayılım önemli bir etkidir⁽²³⁾. Çift taraflı pompalama yöntemi, iki pompa lazerine ihtiyaç duymasına rağmen, popülasyon ters birikimi açısından diğer konfigürasyonlara göre üstünlük sağlamaktadır. Ayrıca bu pompalama yönteminde küçük sinyal kazancı tüm yükseltme süreci boyunca düzgündür.

2.4. Kazanç Karakteristikleri

EDFA'ların kazanç spektrumu, silikanın tabii biçimsizliğinden oldukça etkilenmiştir. Doğal izolasyonda erbiyum iyonlarının kazanç profili düzenli olarak

genişler ve bu durum iyonların bant genişliğini dipol gevşeme zamanı T_2 kullanılarak denklem (3.2)'ye uygun olarak çözülebilir.

EDFA'ların kazancı, erbiyum iyon konsantrasyonu, fiber yarıçapı, yükselteç boyu ve pompa gücü gibi parametrelere bağlıdır. Şekil 2.8.a.'da literatürde verilen ve analitik olarak hesaplanan kazanç grafikleri, pompa gücü ve yükselteç boyuna göre karakteristik olarak gösterilmektedir. Bu grafikler için, $\lambda_s=1550$ nm, $\lambda_p=1480$ nm, $a=2$ μ m, $n_t=7 \times 10^{24}$ ion/m³ ve $P_s(0)=1\mu$ W değerleri kullanılmıştır. L uzunluğundaki yükselteç için başlangıçta yükselteç kazancı pompa gücü ile eksponensiyel olarak artmaktadır. Fakat pompa gücünün kritik değeri aşıldığında kazanç küçülmeye başlamaktadır. Şekilde verilen farklı pompa güçlerinde, optimum yükselteç boyu L için, yükselteç kazancı maksimuma ulaşmaktadır. Fakat optimum L uzunluğu geçildiği zaman kazancın hızla düşüşe geçtiği görülmektedir. L uzunluğunun optimum değeri pompa gücü P_p 'ye bağlı olduğundan, bu parametrelerin uygun değerlerde seçilmesi yükselteç performansı açısından çok önemlidir.



Şekil 2.8 1480 nm'de pompalanan EDFA'nın küçük sinyal kazancı⁽¹⁾ **a)** Pompa gücüne göre **b)** Yükselteç boyuna göre

Şekil 2.8.b.'de $L=30$ m için 1480 nm'de 5 mW'lık pompa gücüyle pompalanan yükseltecin yaklaşık 35 dB kazanç sağladığı görülmektedir. Bu tür

yükselteçlerde, yükseltecin fiber uzunluğu kısa tutularak yüksek kazanç elde edilebilir. Şekil 2.8’de EDFA’nın hemen hemen tüm karakteristiklerini görebilmek mümkündür. EDFA’nın teorikte ve pratikte elde edilen kazanç değerleri birbirine yakındır⁽¹⁾.

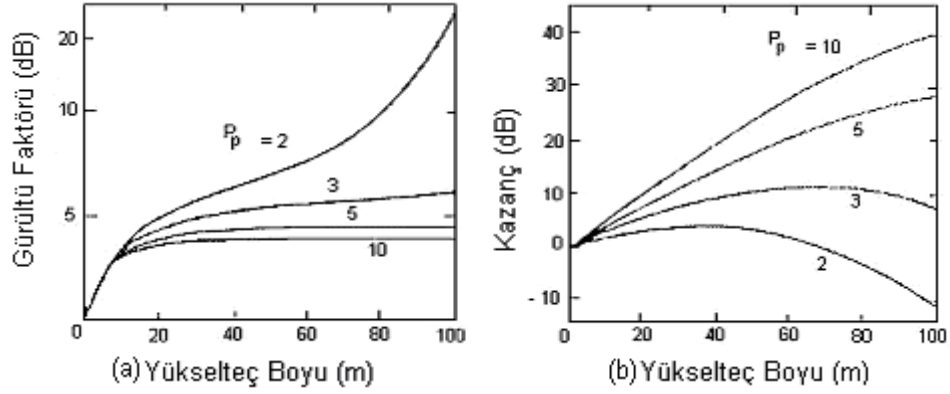
2.5. Gürültü Karakteristikleri

Yükselteç gürültüsü sistem uygulamalarında çok önemli bir sınırlayıcı faktör olarak ortaya çıktığı için üzerinde geniş kapsamlı araştırmalar yapılmıştır⁽²⁴⁾. Bölüm 2.1.3’de anlatıldığı gibi yükselteç gürültüsü, gürültü faktörü olarak $NF=2n_{sp}$ denklemiyle verilir. Kendiliğinden yayınım faktörü olan n_{sp} , toprak (alt seviye) ve uyarılma (üst seviye) durumlarındaki n_1 ve n_2 bağıl popülasyonlarına bağlıdır ve $n_{sp} = n_2/(n_2-n_1)$ şeklinde tanımlanır. Pratikte EDFA’ların üç seviyeli pompalama operasyonu için $n_1 \neq 0$ ve $n_{sp} > 1$ değerindedir. Bu yüzden EDFA’larda gürültü faktörü ideal değer olan 3 dB’den büyüktür.

EDFA’daki kendiliğinden yayınım faktörü, bölüm 3.1’de verilen iki seviyeli oran denklemleri modeli kullanılarak hesaplanabilir. Fiber boyunca n_1 ve n_2 değerleri değişkendir. Çünkü n_1 ve n_2 ’nin her ikisi de pompa ve sinyal güçlerine bağlıdır ve fiber boyunca pompa ve sinyal güçleri değişmektedir. Sonuç olarak gürültü faktörü pompa gücü ve fiber boyuna bağlıdır denilebilir. Şekil 2.9.a.’da P_p / P_p^{sat} ’ın farklı değerleri için yükselteç boyunca gürültü faktörünün değişimi gösterilmiştir. Bu grafikler 1550 nm’de sinyal için 1 mW’lık pompa gücü ile elde edilmiştir⁽²⁵⁾.

Şekil 2.9.b.’de ise aynı koşullar altında elde edilen yükselteç kazancı gösterilmektedir.

Bu iki grafikten de görülebileceği gibi $P_p \gg P_p^{sat}$ değeri için yüksek kazanç ve düşük gürültü (~3 dB) elde edilebilir.



Şekil 2.9 Farklı pompalama seviyeleri için yükselteç boyunun fonksiyonu olarak

a) Gürültü faktörü b) Yükselteç kazancı⁽¹⁾

Yapılan bir çalışmada 11 mW pompa gücü ile 980 nm’de pompalanan 30m’lik EDFA’da 3.2 dB değerinde bir gürültü faktörü ölçülmüştür. Bu değere çok yakın bir değer başka bir çalışmada 980 nm’de sadece 5.8 mW pompa gücü ile elde edilmiştir⁽²⁵⁾. Yüksek kazanç, düşük gürültü ve yüksek pompalama verimi gibi kavramların tümünü aynı anda elde etmek genelde çok zordur. 1992 yılında yapılan bir çalışmada 51 dB’lik bir kazanç 48 mW pompa gücü ve 3.1 dB gibi düşük bir gürültü faktörü elde edilebilmiştir⁽²⁶⁾.

1480 nm’de pompalanan EDFA’lar için ölçülen NF değeri 980 nm’ye göre genelde daha büyüktür. 1480 nm’de 24 mW pompa gücüyle pompalanan 60 m uzunluğundaki bir EDFA’da yaklaşık 4.1 dB’lik gürültü faktörü ölçülmüştür⁽²⁷⁾. 1480 nm’de pompalanan EDFA’lardaki yüksek gürültünün nedeni şekil 2.4’e bakılarak anlaşılabilir. Pompalama dalga boyu 1460 nm dalga boyu civarında iken $NF < 3.5$ dB elde etmek mümkündür. EDFA’ların diğer yükselteçlere nazaran daha düşük gürültü

seviyeleri, onların fiber optik sistem uygulamalarında tercih edilen eleman olarak seçilmesini sağlamıştır.

3. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

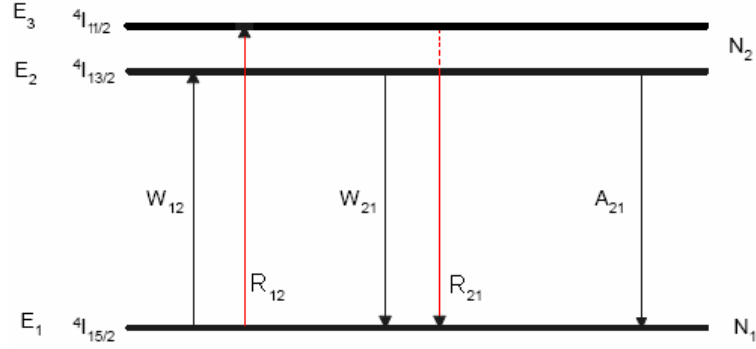
Bu bölümde, C bandında çalışan ve 1480 nm’de pompalanmış EDFA’yı karakterize eden oran ve yayılım denklemleri verilecektir. Üç seviyeli oran denklemleri her bir dalga boyunda çalışan EDFA’ya tatbik edilebilir. Soğurma, kendiliğinden yayılım ve uyarılmış yayılım sebeplerinden dolayı pompa ve sinyal güçleri fiber boyunca değişken değerler alır. EDFA’nın modellenmesi, oran denklemleri ile aktif fiber boyunca sinyal, pompa ve ASE güçlerinin denklemlerini karakterize eden yayılım denklemlerinin birlikte çözümlenmesini gerektirir. Bunun için ilk önce erbiyum atomunun enerji seviyeleri arasındaki geçişleri veren ve oran denklemleri olarak tanımlanan denklemler elde edilmelidir. EDFA yayılım denklemleri, oran denklemleri ile katkılı fiberin karakteristiklerine doğrudan bağlıdır ve doğrusal olmayan diferansiyel denklemlerden meydana gelir.

3.1. Oran Denklemleri

Şekil 3.1’de Er^{+3} iyonunun enerji seviye diyagramı verilmiştir. Burada sırasıyla, R_{12} , W_{12} pompa ve sinyal soğurma oranları, R_{21} , W_{21} pompa ve sinyal yayılım oranlarını ve A_{21} kendiliğinden yayılım oranıdır. $A_{21} = 1 / (\text{Seviye 2'deki yaşam süresi})$ olarak verilir. Buna göre seviye 2 ve 1’deki zamana bağlı popülasyon oranı:

$$\frac{dn_2}{dt} = (R_{12} + W_{12})n_1 - (R_{21} + W_{21} + A_{21})n_2 \quad (3.1)$$

$$\frac{dn_1}{dt} = -\frac{dn_2}{dt} \quad (3.2)$$



Şekil 3.1 Erbiyum İyonunun Enerji Seviyeleri

şeklinde verilebilir. n_i (ion/m^3) toplam iyonik popülasyon olarak adlandırılır ve her iki seviyedeki popülasyonun toplamına eşittir.

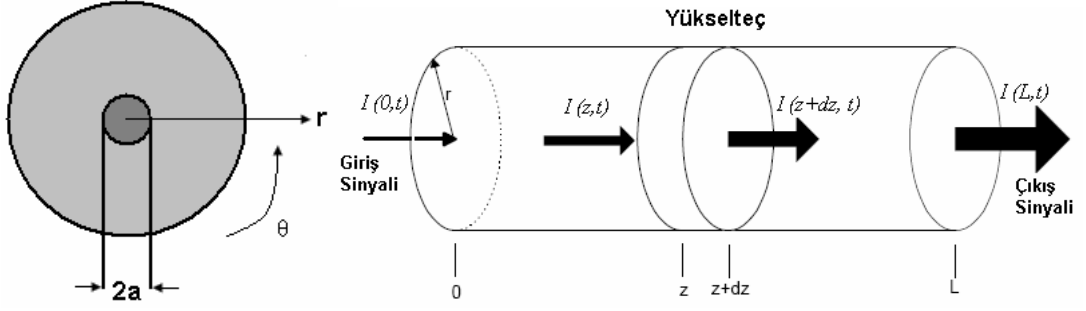
$$n_t = n_1 + n_2 \quad (3.3)$$

Seviye 1 ve 2 için iyonik popülasyonların toplam popülasyona oranı aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\frac{n_1}{n_t} = \frac{(R_{21} + W_{21} + A_{21})}{(R_{21} + R_{12} + W_{21} + W_{12} + A_{21})} \quad (3.4)$$

$$\frac{n_2}{n_t} = \frac{(R_{12} + W_{12})}{(R_{21} + R_{12} + W_{21} + W_{12} + A_{21})} \quad (3.5)$$

Görüldüğü gibi n_1 ve n_2 R_{12} , W_{12} , R_{21} , W_{21} ve A_{21} değerlerine bağlıdır. Bu değerler ise ışık şiddeti yoğunluğu I ya bağlıdır. Işık şiddetinin yoğunluğu ise (r, θ, z) koordinatlarına bağlıdır. Dolayısıyla n_1 ve n_2 değerleri de (r, θ, z) 'nin birer fonksiyonudurlar.



Şekil 3.2 Fiber nüvesinin koordinat sistemi ve gücün fiber içerisindeki değişimi⁽²⁸⁾

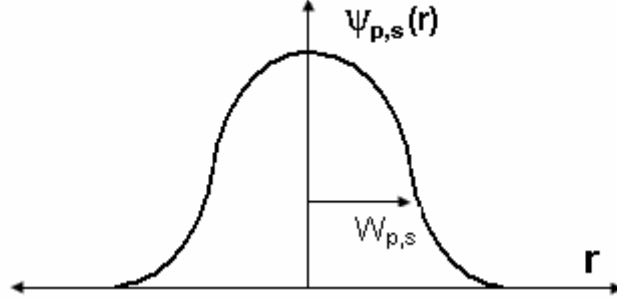
Şekil 3.2’de fiber nüvesinin koordinat yapısı görülmektedir. Fiber nüvesinde yayılan ışığın Gaussian dağılıma sahip olduğu bilinmektedir. Nüve yarıçapı a ’nın tipik değeri 1-5 μm arasındadır. Gaussian dalga modeli şekil 3.3’de verilmiştir. Buna göre ışık şiddetinin dağılımı:

$$I_{p,s}(r, z) = P_{p,s}(z) \Psi_{p,s}(r) = \frac{P_{p,s}(z) \exp[-r^2 / \omega_{p,s}^2]}{\pi \omega_{p,s}^2} = \frac{P_{p,s}(z) \psi_{p,s}(r)}{\pi \omega_{p,s}^2} \quad (3.6)$$

Burada $I_{p,s}(r, z)$ sırasıyla pompa ve sinyalin ışık şiddetleri, $P_{p,s}(z)$ pompa ve sinyal gücü ve $\omega_{p,s}$ pompa ve sinyal için hüzmeye (ışın demeti) yarıçapı olarak verilebilir⁽¹⁾.

$$\omega_{p,s} = \frac{a}{\sqrt{2}} \left[0.65 + \frac{1.619}{V_{p,s}^3} + \frac{2.879}{V_{p,s}^6} \right] \quad (3.7)$$

V parametresi normalize frekanstır ve bu denklem sadece tek modlu fiberler için geçerlidir. Soğurma ve yayılım oranlarının, pompa ve sinyal güçleri cinsinden ifade edilmesi, popülasyon denklemlerini daha anlaşılır hale getirir.



Şekil 3.3 Gaussian dalga modeli⁽⁵⁾

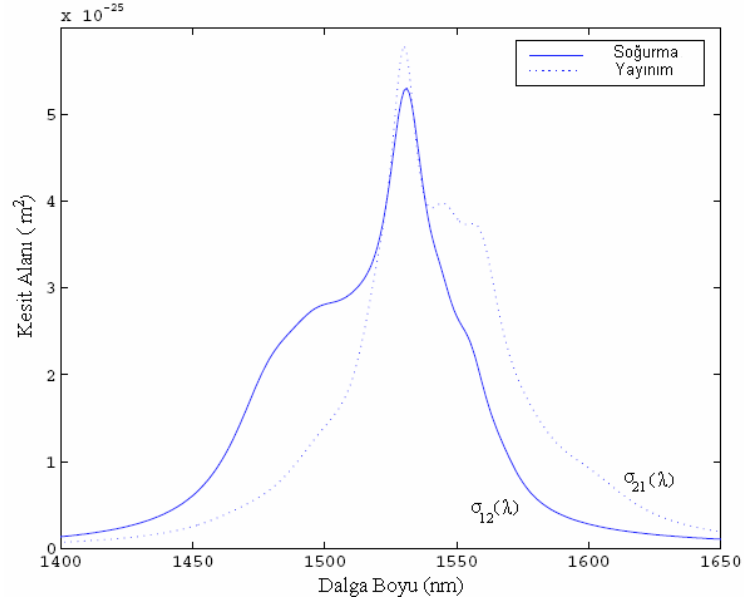
V parametresi normalize frekanstır ve bu denklem sadece tek modlu fiberler için geçerlidir. Soğurma ve yayınım oranlarının, pompa ve sinyal güçleri cinsinden ifade edilmesi, popülasyon denklemlerini daha anlaşılır hale getirir.

$$R_{ij} = \frac{P_p \sigma_{ij}^p \psi_p(r)}{h\nu_p} \quad ; \quad i, j=1, 2 \quad (\text{pompa}) \quad (3.8)$$

$$W_{ij} = \frac{P_s \sigma_{ij}^s \psi_s(r)}{h\nu_s} \quad ; \quad i, j=1, 2 \quad (\text{sinyal}) \quad (3.9)$$

Burada $\sigma_{ij}^{p,s}$ (ν) kesit alanı (m^2), $h\nu_{p,s}$ foton enerjisi (*joule*) ve $\psi_{p,s}(r, \theta)$ normalize çizgi fonksiyonu (m^{-2})'dir. Burada kullanılan kısaltmalar $ij=12$ soğurma; p , pompa ve $ij=21$ yayınım; s , sinyal içindir. Kesit alanı dalga boyuna bağlıdır. Genelde soğurma ve uyarılmış yayınım kesit alanları birbirlerine eşit değildir. Daha yüksek kazanç için, 1480 nm'de soğurma, 1550 nm'de yayınım kesit alanları daha yüksek değerlidir. Şekil 3.4'de dalga boyuna bağlı olarak soğurma ve yayınım kesit alanları gösterilmiştir.

Fiber için pompa dalga boyundaki eşik (quenching power) ve sinyal dalga boyundaki doyum güçleri:



Şekil 3.4 Dalga boyuna göre soğurma ve yayınım kesit alanları⁽²⁸⁾

$$P_{eş} = \frac{h\nu_p \pi \omega_p^2 A_{21}}{\sigma_{12}^p} \quad (3.10)$$

$$P_{doy} = \frac{h\nu_s \pi \omega_s^2 A_{21}}{\sigma_{12}^s} \quad (3.11)$$

şeklinde verilir. Bu eşitlik kullanılarak oran denklemleri güce bağlı olarak yazılabilir.

$$\frac{n_1(r)}{n_t} = \frac{1 + \left(\frac{\sigma_{21}^p}{\sigma_{12}^p} \right) \left(\frac{P_p \psi_p}{P_{eş}} \right) + \left(\frac{P_s \psi_s}{P_{doy}} \right)}{1 + \left(1 + \frac{\sigma_{21}^p}{\sigma_{12}^p} \right) \left(\frac{P_p \psi_p}{P_{eş}} \right) + \left(1 + \frac{\sigma_{12}^s}{\sigma_{21}^s} \right) \left(\frac{P_s \psi_s}{P_{doy}} \right)} \quad (3.12)$$

$$\frac{n_2(r)}{n_t} = \left(1 - \frac{n_1(r)}{n_t} \right) \quad (3.13)$$

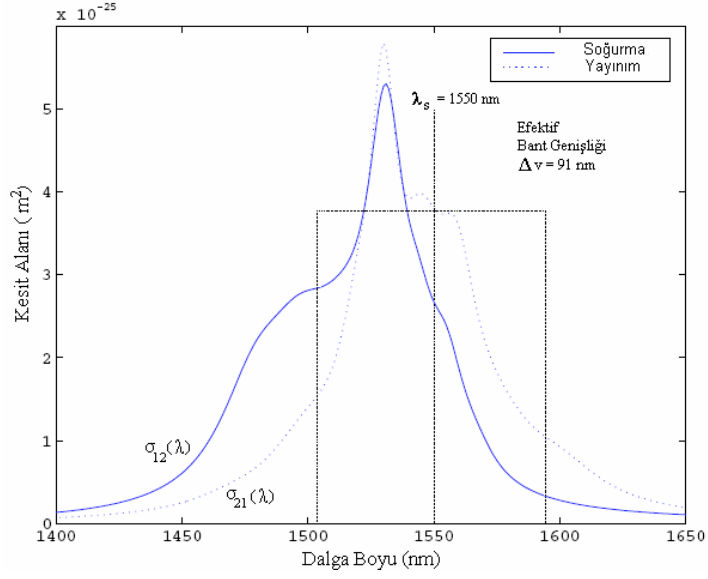
Kendiliğinden yayınım (spontaneous emission, SE), geniş bant genişliğine sahip ve aynı fazlı (kohorent) olmayan dalgadır. Rastgele polarizedir ve fiberde her iki yönde yayılır. Popülasyon ters birikimi sağlandığında, kendiliğinden yayınım sinyaliyle birlikte her iki yönde yükseltilebilir sinyal, yükseltilmiş kendiliğinden yayınım (amplified spontaneous emission, ASE) gücünü oluşturur. Bu analizde ileri yönde yayılan ASE P_a^+ ve geri yönde yayılan ASE P_a^- ile sembolize edilmiştir. Şekil 3.5’de gösterilen efektif bant genişliği $\Delta\nu$ ⁽²⁹⁾:

$$\Delta\nu = \frac{1}{\sigma_{21}(v_s)} \left[\int_{-\infty}^{+\infty} \sigma_{21}(v) dv \right] \quad (3.14)$$

ile tanımlanır. $P_0 = h \cdot v_s \cdot \Delta\nu$ kendiliğinden yayınımın eşdeğer giriş gücüdür ve efektif bant genişliği içerisinde yayılan siyah cisim (blackbody) radyasyon modu başına bir foton yükseltilmesi olarak tanımlanır. P_0 tipik olarak $1\mu W$ değerindedir⁽⁵⁾. Kendiliğinden yayınım genelde yükseltme kazancında azalma ve gürültü faktöründe artış olarak etki yapar. Bu bakımdan oran denklemlerine ileri ve geri yöndeki kendiliğinden yayınım gücü olan P_a^+ ve P_a^- değerleri de katılmalıdır. Efektif bant genişliğinde yayılan toplam güç P_s^+, P_a^+, P_a^- değerleriyle çok yakından ilgili olduğundan, popülasyon yoğunluk denklemleri (3.12) ve (3.13) aşağıdaki şekilde yeniden yazılabilir.

$$\frac{n_1(r)}{n_t} = \frac{1 + \left(\frac{\sigma_{21}^p}{\sigma_{12}^p} \right) \left(\frac{P_p \psi_p}{P_{es}} \right) + \left(\frac{(P_s + P_a^+ + P_a^-) \psi_s}{P_{doy}} \right)}{1 + \left(1 + \frac{\sigma_{21}^p}{\sigma_{12}^p} \right) \left(\frac{P_p \psi_p}{P_{es}} \right) + \left(1 + \frac{\sigma_{12}^s}{\sigma_{21}^s} \right) \left(\frac{(P_s + P_a^+ + P_a^-) \psi_s}{P_{doy}} \right)} \quad (3.15)$$

$$n_2 = n_t - n_1 \quad (3.16)$$



Şekil 3.5 Etkifif bant genişliği⁽⁵⁾

3.2. Yayınım Denklemleri

Fiber boyunca sinyal, pompa ve ASE gücünün değişimi veren yayınım denklemleri, pompalama yöntemine göre değişmektedir. 2. bölüm'de bahsedildiği gibi optik yükselteçler için üç çeşit pompalama yöntemi vardır. Tek taraflı pompalama için pompa ve ileri yönde yayılan sinyal gücü yayınım denklemleri⁽⁵⁾:

$$\frac{dP_p^+}{dz} = +2\pi \int_{r=0}^a [\sigma_{21}^p n_2 - \sigma_{12}^p n_1] P_p^+ \psi_p(r) r dr - \alpha_p P_p^+ \quad (3.17)$$

$$\frac{dP_s^+}{dz} = +2\pi \int_{r=0}^a [\sigma_{21}^s n_2 - \sigma_{12}^s n_1] P_s^+ \psi_s(r) r dr - a_s P_s^+ \quad (3.18)$$

şeklinde verilir. Her iki yönde yayılan yükseltilmiş kendiliğinden yayınım (ASE) ise aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\frac{dP_a^\pm}{dz} = \pm 2\pi \int_{r=0}^a [\sigma_{21}^s n_2 (P_a^\pm \psi_s + 2P_0) - \sigma_{12}^s n_1 P_a^\pm \Psi_s(r)] dr \mp \alpha_s P_a^\pm \quad (3.19)$$

Burada, α_p ve α_s sırasıyla pompa ve sinyal için fiber kaybıdır. Kısa erbiyum fiberler (EDF) için bu kayıplar ihmal edilebilecek seviyededir. Fakat uzun EDF'lerde, özellikle DEDF'ler için kayıpların dikkate alınması gereklidir.

Yayınım denklemleri doğrusal olmayan diferansiyel denklemlerdir. Bu denklemlerin çözümü ancak nümerik yöntemler kullanılarak gerçekleştirilebilir. Yukarıda verilen üç yayınım denklemindeki 2π değeri, θ' ya göre integrasyondan gelmektedir. Diğer integral ifadesi ise fiber içindeki ışık şiddetinin (I), r koordinatı ile değişimini ifade eder. Bu r yarıçapa bağlı integrasyon yerine, pompa ve sinyal ışınının fiber nüvesinde yoğunlaşma çakışma oranı (overlap) kullanılabilir. Buna göre (3.1), (3.2) ve (3.3) denklemleri overlap integrali kullanılarak⁽³⁰⁾:

$$\frac{dP_p^+(z,t)}{dz} = -P_p^+ \Gamma_p (\sigma_{12}^p n_1 - \sigma_{21}^p n_2) - \alpha_p P_p^+ \quad (3.20)$$

$$\frac{dP_s(z,t)}{dz} = P_s \Gamma_s (\sigma_{21}^s n_2 - \sigma_{12}^s n_1) - \alpha_s P_s \quad (3.21)$$

$$\frac{dP_a^\pm(z,t)}{dz} = \pm P_a^\pm \Gamma_s (\sigma_{21}^s n_2 - \sigma_{12}^s n_1) \pm 2\sigma_{21}^s n_2 \Gamma_s P_0 \mp \alpha_s P_a^\pm \quad (3.22)$$

ifadeleri elde edilir.

3.3. EDFA Kazanç ve Gürültü Faktörü

L uzunluğundaki bir erbiyum katkılı fiberde üretilen kazanç, çıkışta elde edilen gücünün girişte uygulanan sinyal gücüne oranıdır.

$$G = \frac{P_s(L)}{P_s(0)} \quad (3.23)$$

Bölüm 2.1.3.'de optik yükselteçler için gürültü faktörü kavramı verilmişti. Erbiyum katkılı fiber yükselteçlerde de gürültü faktörü bu kısımda verilen denklemlerle ifade edilmektedir.

$$NF = \frac{2S_{sp}(v)}{Ghv} \quad (3.24)$$

$S_{sp}(v)$ parametresi denklem (2.15)'de tanımlanmıştı. ASE gücü ise $P_a = S_{sp}(v)\Delta v$ olarak verilebilir. Buna göre $S_{sp}(v) = P_a / \Delta v$ denklem (3.2)'de yerine konularak EDFA'lar için gürültü faktörü denklemi⁽³¹⁾:

$$NF = \frac{2P_a}{Ghv\Delta v} \quad (3.25)$$

şeklinde verilebilir. Bu denklemde ASE gücünün her iki yönde de yayıldığı kabul edilmiştir. Bu nedenle NF denkleminin payında ki iki değeri yer almaktadır.

Denklem (3.25)'den görülebileceği gibi EDFA'lardaki gürültü faktörü değeri ASE gücü ve kazançla direkt olarak bağlıdır. Artan ASE gücü için gürültü faktörünün de arttığı söylenebilir. Paydada bulunan kazanç parametresi de, yüksek kazanç durumlarında gürültünün düşük seviyede olabileceğini göstermektedir.

3.3.1. Gürültünün İletim Performansına Etkisi

Bölüm 2.1.3.'de verildiği gibi, foto alıcıya gelen yükseltilmiş sinyal:

$$P_{yük} = GP_s + P_a \quad (3.26)$$

şeklindedir. Burada G yükselteç kazancı, P_s optik giriş sinyal gücüdür. P_a ise sinyale eklenen yükseltilmiş kendiliğinden yayınım (ASE - gürültü) gücüdür ve aşağıdaki gibi verilir.

$$P_a = S_{sp} \Delta v_{sp} \quad (3.27)$$

S_{sp} kendiliğinden yayınım spektral yoğunluğudur ve denklem (2.15)'de tanımlanmıştır. Δv_{sp} kendiliğinden yayınım bant genişliğidir ve etkin bant genişliğine eşit kabul edilir. Pratikte Δv_{sp} yükselteç bant genişliği olarak alınabilir. Alıcıda üretilen toplam foto akımı:

$$I = I_p + \Delta I \quad (3.28)$$

şeklinde verilir. Vuruş gürültüsü (shot noise), termal gürültü ve kendiliğinden yayınım gürültüsünün etkilerinin I_p sinyal akımında meydana getirdiği dalgalanma ΔI ile gösterilebilir. Sinyal foto akımı $I_p = R.P_{yük}$ denklemiyle verilir. Gürültü akımının varyansı $\sigma^2 = \langle (\Delta I)^2 \rangle$ bileşenleri cinsinden şu şekilde yazılabilir:

$$\sigma^2 = \sigma_T^2 + \sigma_s^2 + \sigma_{sig-sp}^2 + \sigma_{s-sp}^2 \quad (3.29)$$

Burada σ_T^2 termal gürültüyü, σ_s^2 vurma gürültüsünü, σ_{sp-sp}^2 kendiliğinden yayınımın kendiliğinden yayınımla çarpışma (örtüşme- overlap) gürültüsünü ve

σ_{s-sp}^2 kendiliğinden yayınının vurma gürültüsüyle örtüşme gürültüsünü göstermektedir.

$$\sigma_s^2 = 2q[R(GP_s + P_{sp}) + I_d] \Delta f \quad (3.30)$$

$$\sigma_{sp-sp}^2 = 4R^2 S_{sp}^2 \Delta v_{opt} \Delta f \quad (3.31)$$

$$\sigma_{sig-sp}^2 = 4R^2 GP_s S_{sp} \Delta f \quad (3.32)$$

$$\sigma_{s-sp}^2 = 4qRS_{sp} \Delta v_{opt} \Delta f \quad (3.33)$$

Burada $R = \eta q / h\nu$ foto alıcı duyarlılığıdır. Fiziksel olarak sinyal ve kendiliğinden yayınının optik frekansları aynı değildir. Δv_{opt} optik filtre bant genişliğidir⁽³²⁾.

Sayısal sinyaller için optik alıcı performansı, bit hata oranı (*bit error rate*, *BER*) ile ölçülür. Sayısal haberleşme bit hata oranı $BER \leq 10^{-9}$ istenir. Alıcıda, alıcı gürültüsü nedeniyle gelen bitlerin hatalı olma olasılığı aşağıdaki gibi verilir⁽¹⁾.

$$BER = p(1)P(0/1) + P(0)P(1/0) \quad (3.34)$$

$P(1)$ ve $P(0)$ sırasıyla iletilen bitlerin 1 ve 0 olma olasılıklarıdır. $P(0/1)$, 1 biti iletildiğinde alınan bitin 0 olarak algılanma olasılığı ve $P(1/0)$, 0 biti iletildiğinde alınan bitin 1 olarak algılanma olasılığıdır. 1 ve 0 bitlerinin iletilme olasılığı genelde eşittir ve $P(1) = P(0) = 1/2$ için:

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{Q}{\sqrt{2}} \right) \quad (3.35)$$

ile verilir ve burada:

$$Q = \frac{I_1 - I_0}{\sigma_1 + \sigma_0} = \frac{RG(2\bar{P}_{rec})}{\sigma_1 + \sigma_0} \quad (3.36)$$

Denklem (3.36)'da $I_0=0$ olarak kabul edilerek $I_1=RDP_1=RG(2\bar{P}_{rec})$ elde edilir. \bar{P}_{rec} , foto alıcıda algılanan ortalama optik güçtür. Minimum istenen bir *BER* değeri için alınması gereken minimum optik güç, alıcı duyarlılığı olarak tanımlanır. 1 ve 0 bitleri için sırasıyla $P_s = P_1 = 2\bar{P}_{rec}$ ve $P_s = 0$ yaklaşımları yapılarak σ_1 ve σ_0 rms gürültü akımları belirlenebilir. Buna göre minimum *BER* değerinin alıcı duyarlılığı \bar{P}_{rec} ve yükselteç gürültü bileşenlerine bağlı olduğu görülür. Foto alıcı tepkime oranı için $R = \eta q / hv$ ve denklem (2.15)'de *NF* cinsinden verilen S_{sp} tanımı denklem (3.30) – (3.33)'de kullanılırsa *NF*'e bağlı gürültü bileşenleri elde edilebilir.

$$\sigma_s^2 = 2q^2\eta GP_s \Delta f / hv \quad (3.37)$$

$$\sigma_{sp-sp}^2 = (q\eta G(NF))^2 \Delta v_{opt} \Delta f \quad (3.38)$$

$$\sigma_{sig-sp}^2 = 2(q\eta G)^2 (NF) P_s \Delta f / hv \quad (3.39)$$

$$\sigma_{s-sp}^2 = 2q^2\eta G(NF) \Delta v_{opt} \Delta f \quad (3.40)$$

1 ve 0 bitleri için toplam gürültü akımları sırasıyla $\sigma_1 = \sigma_T^2 + \sigma_s^2 + \sigma_{sp-sp}^2 + \sigma_{sig-sp}^2 + \sigma_{s-sp}^2$ ve $\sigma_0 = \sigma_T^2 + \sigma_{sp-sp}^2 + \sigma_{s-sp}^2$ ile verilir. Denklem (3.30)'da $R.P_a$ ve I_d terimlerinin ihmal edilmesi, vuruş gürültüsünün de ihmal edilmesini sağlar. Denklem (3.37) ile (3.39) karşılaştırıldığında, σ_s 'in σ_{sig-sp} 'ye göre ihmal edilebileceği görülebilir. Çünkü yüksek $\eta G.NF$ değerleri için σ_s çok küçüktür. Termal gürültü σ_T 'de diğer terimlerle

karşılaştırıldığında ihmal edilebilecek bir değerdedir. Buna göre σ_1 ve σ_0 yaklaşık olarak ifade edilebilir.

$$\sigma_1 = (\sigma_{sig-sp}^2 + \sigma_{sp-sp}^2)^{1/2} \quad \sigma_0 = \sigma_{sp-sp} \quad (3.41)$$

Denklem (3.41)'de verilen gürültü akımları (3.36)'da yerine yazılarak NF ve Q 'ya bağlı foto alıcıda algılanması gereken minimum optik güç bulunabilir.

$$\bar{P}_{rec} = h\nu NF \Delta f [Q^2 + Q(\Delta v_{opt} / \Delta f)^{1/2}] \quad (3.42)$$

Verilen bir BER için alıcı duyarlılığı ortalama bit başına foton sayısı cinsinden \bar{N}_p ifade edilebilir. $\bar{P}_{rec} = \bar{N}_p h\nu B$ ve tipik alıcı bant genişliği $\Delta f = B/2$ (bit oranı, B) için:

$$\bar{N}_p = \frac{1}{2} NF [Q^2 + Q(2\Delta v_{opt} / B)^{1/2}] \quad (3.43)$$

Denklemden de görüldüğü gibi optik yükselteçlerin NF değeri arttıkça verilen bir BER için alınması gereken optik güç (\bar{P}_{rec}) veya bit başına foton sayısının (\bar{N}_p) değeri artmaktadır.

3.4. EDFA Karakteristiklerinin İncelenmesi

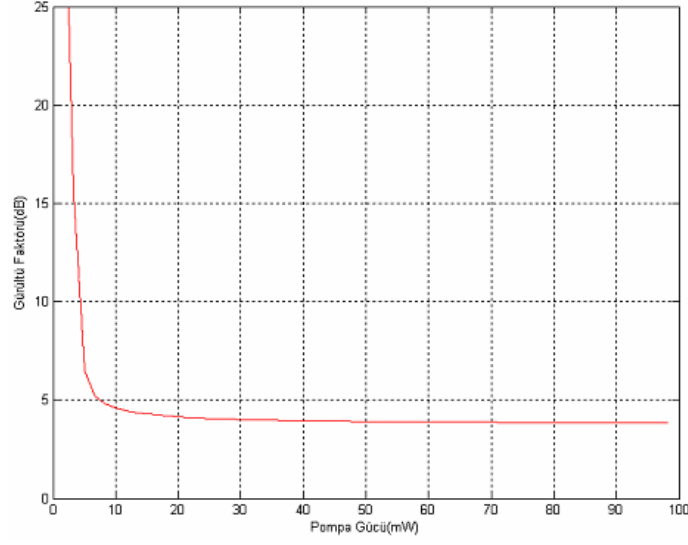
Bu bölümde Matlab programı kullanılarak elde edilen EDFA karakteristikleri incelenecektir. EDFA'nın temel parametreleri olan pompa gücü, fiber boyu, sinyal gücü ve erbiyum iyon yoğunluğundaki değişim, bu parametrelerin birer fonksiyonu olan kazanç, gürültü faktörü (NF) ve ASE gücü ile birlikte değerlendirilecek; teorik

bilgilerin, araştırma ve pratik deneyler sonucunda elde edilen verilerin ışığı altında yorumlanacaktır.

Parametre	Sembol	Değerler	Birim
Fiber Yarıçapı	a	2	μm
Pompa-Nüve Çakışma Değeri	Γ_p	0.4	-
Sinyal-Nüve Çakışma Değeri	Γ_s	0.4	-
Efektif Bant Genişliği Gücü	P_0	1	μW
Pompa Dalga Boyu	λ_p	1480	nm
Sinyal Dalga Boyu	λ_s	1550	nm
Kesim Dalga Boyu	λ_c	1400	nm
Pompa Kaybı Katsayısı	α_p	0	dB/m
Sinyal Kaybı Katsayısı	α_s	0	dB/m
Pompa Soğurma Kesit Alanı	σ_{12}^p	0.75×10^{-25}	m^2
Sinyal Soğurma Kesit Alanı	σ_{12}^s	2.40×10^{-25}	m^2
Pompa Yayınım Kesit Alanı	σ_{21}^p	0.19×10^{-25}	m^2
Sinyal Yayınım Kesit Alanı	σ_{21}^s	3.80×10^{-25}	m^2
Maksimum Giriş Pompa Gücü	P_p	20	mW
Giriş Sinyal Gücü	P_s	1	μW
Fiber Erbium Katkılama Oranı	nt	140	ppm
Pompa Doyum Gücü	$P_{\text{sat}}(\lambda_p)$	1	mW
Sinyal Doyum Gücü	$P_{\text{sat}}(\lambda_s)$	10	mW
Fiber Boyu	L	2,4,6,8,10,12,14	m
Pompa V-değeri	V_p	2.275	-
Sinyal V-değeri	V_s	2.172	-

Çizelge 3.1 EDFA parametreleri

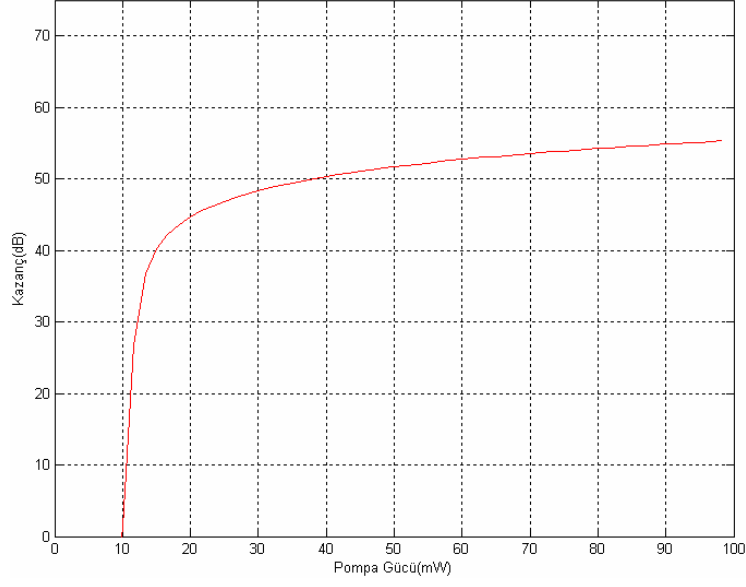
3.4.1. Gürültü Faktörü - Pompa Gücü Karakteristiği



Şekil 3.6 Gürültü faktörünün artan pompa gücüne göre değişimi

Şekil 3.6’da 100 m fiber uzunluğu için sabit bir sinyal giriş gücü ve erbiyum iyonu katkılama oranında, fiber yükselteçteki gürültü faktörünün pompa gücüne göre değişimi görülmektedir. Belirlenen 100 m fiber uzunluğu ve 1.8×10^{24} ion/m³ erbiyum iyonu katkılama oranına sahip bir EDFA’ya 100 μ W sinyal giriş gücü uygulanarak, pompa gücü 0-100 mW aralığında arttırılmıştır. Verilen parametreleri içeren bir fiber yükselteçte, pompa gücü artışıyla gürültü faktörü değerinde meydana gelen azalma grafikten görülebilmektedir. Gürültü faktöründe meydana gelen azalmanın nedeni, artan pompa güçleri için yükselteç kazancının artmasıdır. Artan kazanç, tam popülasyon ters birikimi sağlamış erbiyum katkılı fiberde, kendiliğinden yayınının düşük değerde olmasına, dolayısıyla gürültüye neden olan kendiliğinden yayınının düşük oranda kalmasına neden olur. Gürültü faktörü; denklem (3.25)’de verildiği gibi, ASE gücüyle doğru ve yükselteç kazancıyla ters orantılı olarak değişmektedir. Buradan, yükselteç gürültüsünün, artan kazançla ancak belirli bir değere kadar düşürülebileceği ($n_{sp}=1$) anlaşılmaktadır.

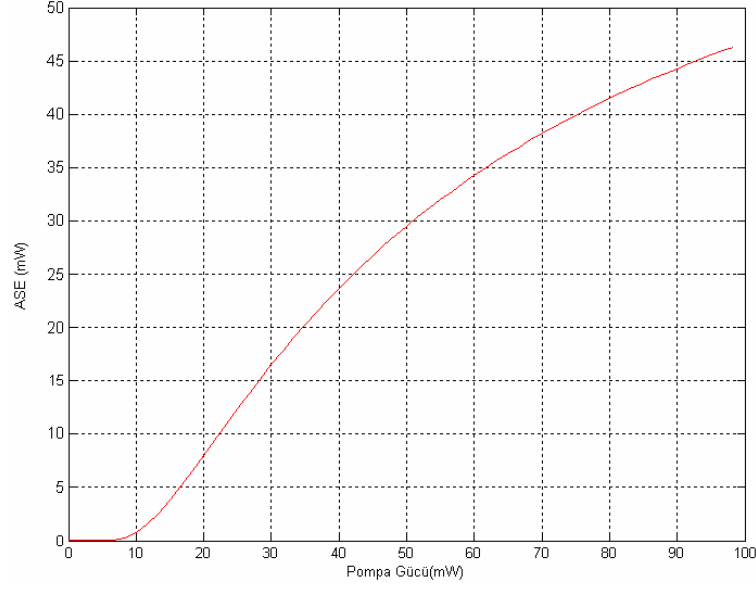
3.4.2. Kazanç – Pompa Gücü Karakteristiği



Şekil 3.7 Kazancın artan pompa gücüne göre değişimi

Şekil 3.7’de 200 m fiber uzunluğu için, sabit sinyal giriş gücü ve erbiyum iyonu katkılama oranında kazancın pompa gücüne göre değişimi gösterilmiştir. Bu grafikte 200 m fiber uzunluğu için 2×10^{24} ion/m³ erbiyum iyonu katkılama oranına sahip EDFA girişine 100µW sinyal giriş gücü uygulanmış ve pompa gücü 0-100 mW aralığında arttırılmıştır. Grafikte görülen eğriden; EDFA kazancının, uygulanan pompa gücü artışıyla hızla artmaya başladığı fakat belirli bir kazanç değerinden sonra popülasyon ters birikiminin, giriş sinyali çıkış gücü artışının ulaştığı yüksek seviyeden dolayı çıkış gücü beslemesi yapamadığı, bunun sonucunda ise kazanç artışının azaldığı ve belirli bir pompa gücünden sonra doyuma gittiği görülmektedir. Kazanç verimi, mW pompa gücü başına dB kazanç cinsinden, yüksek pompa güçleri için azalmaktadır. Ayrıca daha uzun erbiyum katkılı fiberler için yeterince pompalama yapılırsa, daha yüksek kazanç elde edilebilmektedir.

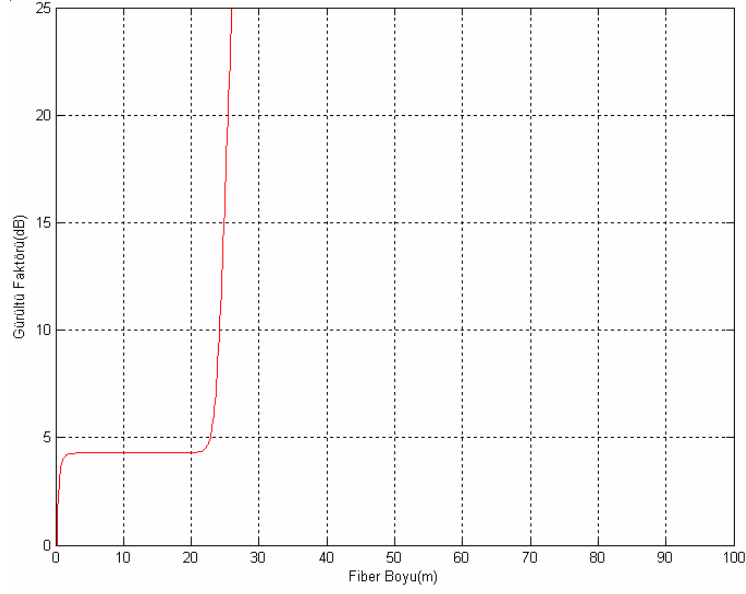
3.4.3. ASE Gücü – Pompa Gücü Karakteristiği



Şekil 3.8 ASE gücünün artan pompa gücüne göre değişimi

50 m fiber uzunluğunda, sabit bir sinyal giriş gücü ve erbiyum katkılama oranı için, fiber yükselteçteki ASE gücünün pompa gücüne göre değişimini gösteren grafik şekil 3.8’de verilmiştir. Şekildeki grafik, 2×10^{24} ion/m³ erbiyum katkılama oranına sahip bir EDFA’ya 1µW sinyal giriş gücü uygulanarak, pompa gücü 0-100 mW aralığında arttırılmasıyla elde edilmiştir. Grafikten görülebileceği gibi, uygulanan parametrelere sahip fiber yükselteçte, pompa gücünün artmasıyla ASE gücünde belirgin bir artış meydana gelmektedir. Bunun nedeni, erbiyum katkılı fiberde sağlanan kazanç nedeniyle, sinyal giriş gücü ve aynı zamanda kendiliğinden yayının gürültüsünün de kazançla birlikte yükseltilmesi (güçlendirilmesi) dir. Artan pompa gücüyle kazancın doyuma gitmesi, ASE gücünü maksimum seviyeye çıkarır. Bu seviye, fiberdeki erbiyum katkılama oranı ile doğru orantılıdır.

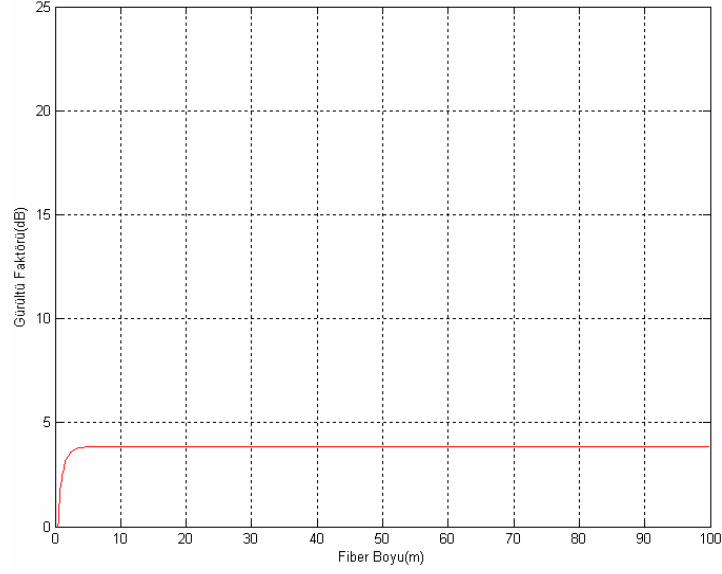
3.4.4.1.Gürültü Faktörü – Fiber Boyu Karakteristiği



Şekil 3.9 Gürültü faktörünün artan fiber boyuna göre değişimi

15 mW pompa giriş gücü, sabit bir sinyal giriş gücü ve erbiyum iyon yoğunluğu için, yükselteç gürültüsü faktörünün fiber boyunca değişimi şekil 3.9’da gösterilmektedir. Bu grafik 100 m uzunluğunda, 32×10^{24} ion/m³ katkılama oranına sahip bir EDFA’ya 100µW sinyal giriş gücü uygulanarak elde edilmiştir. 15 mW pompa gücü için, 20. metreden sonraki mesafeden sonra gürültü faktöründe meydana gelen ani artışın nedeni, bu mesafeden sonra pompa gücü hızla azalarak, yükselteçte aşırı miktarda ASE’nin üretilmesi olarak bilinen kendiliğinden doyuma (self-saturation) neden olması, bunun sonucunda ise kazancın aşırı derecede azalmasıdır.

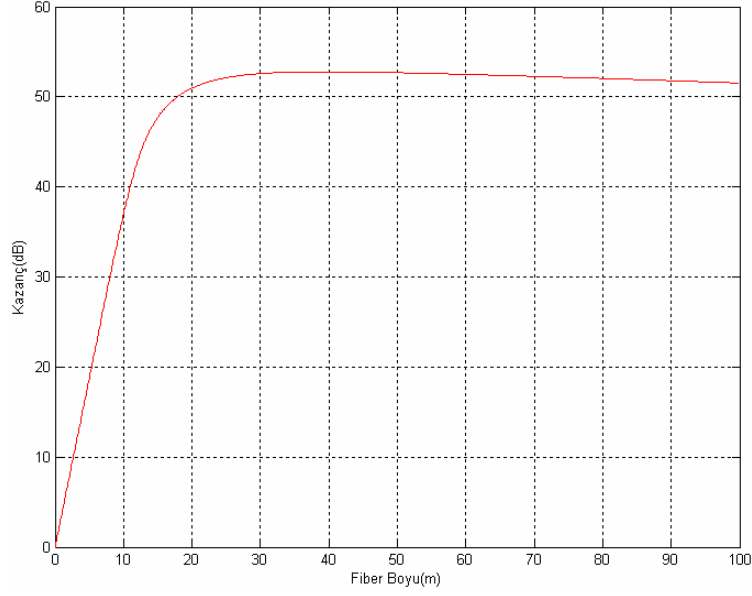
3.4.4.2.Gürültü Faktörü – Fiber Boyu Karakteristiği



Şekil 3.10 Gürültü faktörünün artan fiber boyuna göre değişimi

Sabit bir sinyal giriş gücü ve erbiyum iyon yoğunluğunda, 100 mW pompa gücü için elde edilen ve yükselteç gürültü faktörünün artan fiber boyuna göre değişimi gösteren grafik, şekil 3.10'da gösterilmektedir. Grafik, 100 m uzunluğunda, 32×10^{24} ion/m³ erbiyum iyon katkılama oranına sahip bir EDFA'ya 100 µW sinyal giriş gücü uygulanarak elde edilmiştir. 100 mW pompa gücü için, gürültü faktörü aniden belirli bir seviyeye yükselmekte ve bu seviyede artan fiber boyunda değişmeyerek sabit kalmaktadır. Bunun nedeni, bölüm 2.1.3'de verildiği gibi, optik yükselteçte kendiliğinden yayımının neden olduğu gürültünün spektral yoğunluğunun artan fiber boyu için sabit (beyaz gürültü) olmasıdır. EDFA gürültü faktörü değeri, denklem (2.19)'da verildiği gibi, kendiliğinden yayım etkisiyle doğru orantılı olarak sabit bir değer almaktadır.

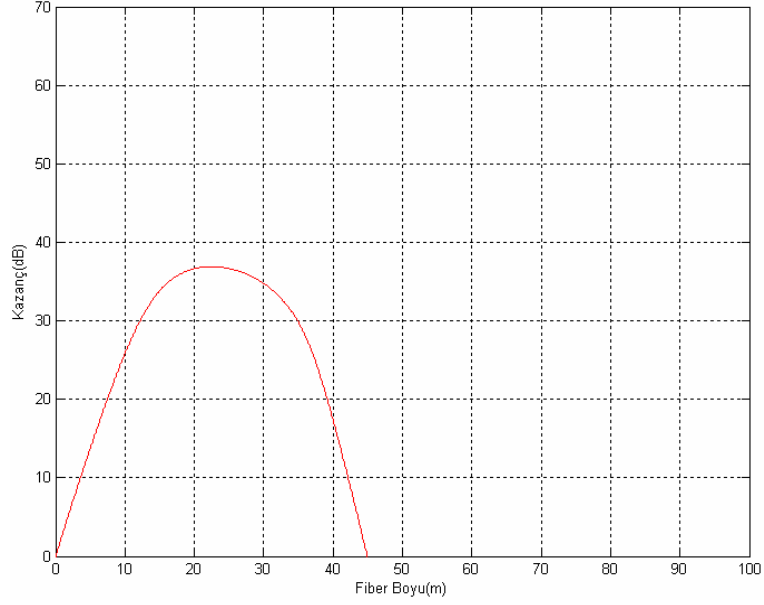
3.4.5.1.Kazanç – Fiber Boyu Karakteristiği



Şekil 3.11 Kazancın artan fiber boyu ile değişimi

Sabit bir sinyal giriş gücü ve erbiyum katkılama oranında, 60 mW pompa gücü için yükselteç kazancının fiber boyuna göre değişimini gösteren grafik, şekil 3.11’de gösterilmektedir. 100 m uzunluğunda, 9×10^{24} ion/m³ erbiyum katkılama oranına sahip bir EDFA’ya 100 µW sinyal giriş gücü uygulandığında, yükseltecin sağladığı kazanç değerleri 60 mW pompa gücü için verilmiştir. Grafikten de görüldüğü gibi, belirli bir fiber boyu uzunluğuna göre kazanç artmakta, sonra yavaşlayarak belirli bir değerden sonra azalmaya başlamaktadır. Bunun nedeni, şekil 3.7’de anlatıldığı gibi popülasyon ters birikiminin güçlenen giriş sinyali için çıkış gücü beslemesi yapamamasıdır.

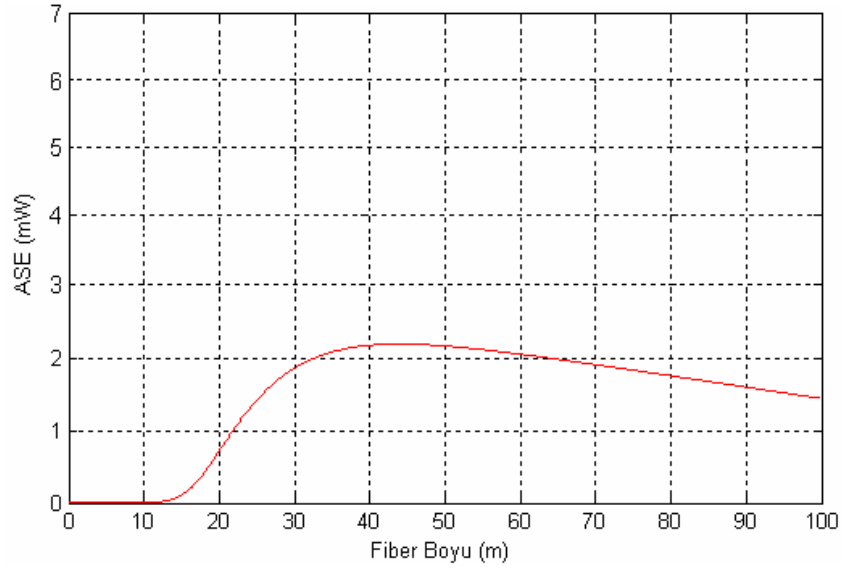
3.4.5.2 Kazanç – Fiber Boyu Karakteristiği



Şekil 3.12 Kazancın artan fiber boyuna göre değişimi

Sabit bir sinyal giriş gücü ve erbiyum katkılama oranında, 10 mW pompa gücü için yükselteç kazancının fiber boyuna göre değişimini gösteren grafik, şekil 3.12’de gösterilmektedir. 100 m uzunluğunda, 9×10^{-24} ion/m³ erbiyum katkılama oranına sahip bir EDFA’ya 100 µW sinyal giriş gücü uygulandığında, yükseltecin sağladığı kazanç değerleri 10 mW pompa gücü için verilmiştir. Grafikte görülen kazançtaki ani düşüşün nedeni şekil 3.9’da bahsedildiği üzere artan fiber uzunluğunda pompa gücündeki hızlı düşüş nedeniyle, popülasyon ters birikiminin sağlanamaması ve erbiyum katkılı fiberdeki arka plan kaybından kaynaklanan yüksek kayıp nedeniyle, giriş sinyalinin, sağlanan kazançla daha yüksek oranda kayba uğramasıdır.

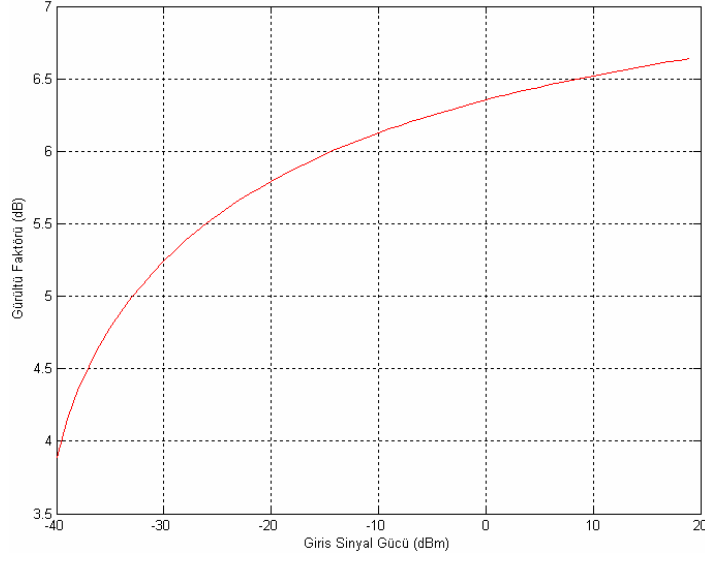
3.4.6. ASE Gücü – Fiber Boyu Karakteristiği



Şekil 3.13 ASE gücünün artan fiber boyuna göre değişimi

Şekil 3.13’de sabit 40 mW pompa gücü için, sabit bir sinyal giriş gücü ve erbiyum katkılama oranında, yükselteçteki ASE gücünün fiber boyuna göre değişimi gösterilmektedir. Şekilde görülen grafik, 100 m fiber uzunluğu, 7.8×10^{24} ion/m³ erbiyum katkılama oranı, 40 mW pompa giriş gücü, 10 μ W sinyal giriş gücü parametrelerine sahip EDFA için, artan fiber boyuna göre ASE gücü değişimini gözlemlemek amacıyla elde edilmiştir. ASE gücü EDFA’da ileri ve geri yönde yayılabilmektedir. Grafik, ileri yönde yayılan ASE gücü olup, artan fiber uzunluklarında, erbiyum katkılı fiberde elde edilen kazançla beraber katlanarak artmakta, doyuma giden kazanç nedeniyle belirli bir fiber uzunluğundan sonra azalmaktadır. ASE gücü, yüksek pompa güçlerinde elde edilen yüksek kazanç nedeniyle, kısa fiber uzunluklarında daha yüksek seviyelere ulaşabilmektedir.

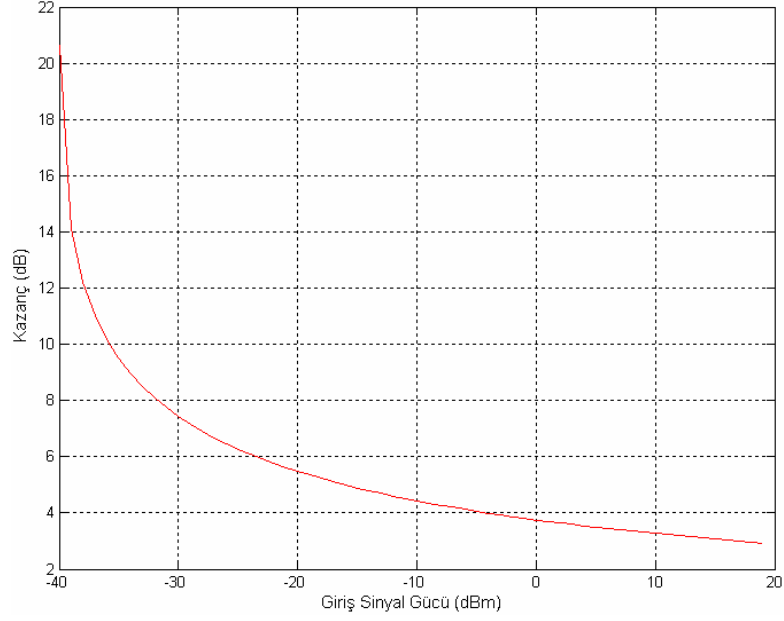
3.4.7. Gürültü Faktörü – Sinyal Giriş Gücü Karakteristiği



Şekil 3.14 Gürültü faktörünün artan sinyal giriş gücüne göre değişimi

Şekil 3.14’de sabit bir fiber boyu ve erbiyum iyon yoğunluğunda, artan sinyal giriş gücü için gürültü faktöründe meydana gelen değişim 50 mW pompa gücü için gösterilmiştir. Bu grafiğin elde edilmesinde kullanılan parametreler için, fiber boyu uzunluğu 50 m, erbiyum katkılama oranı 1×10^{24} ion/m³ ve pompa giriş gücü 50 mW olarak alınmıştır. Şekilde görülen grafikte, sinyal giriş gücü -40 dB den 20 dB’e kadar artmış buna bağlı olarak gürültü faktöründe doğrusal olmayan bir artış gözlemlenmiştir. Gürültü faktöründe gözlemlenen bu artışın nedeni, artan sinyal giriş gücüne bağlı olarak, yüksek popülasyon ters birikiminin tam anlamıyla sağlanamaması nedeniyle kendiliğinden yayılım faktöründe gözlemlenen artıştır. Gürültü faktöründeki artış, yükselteç kazancı doyuma ulaşmaya kadar sinyal giriş gücüyle beraber artarak maksimum değerine erişmiş, yükselteç kazancı doyuma ulaştıktan sonra ise sabit kalmıştır.

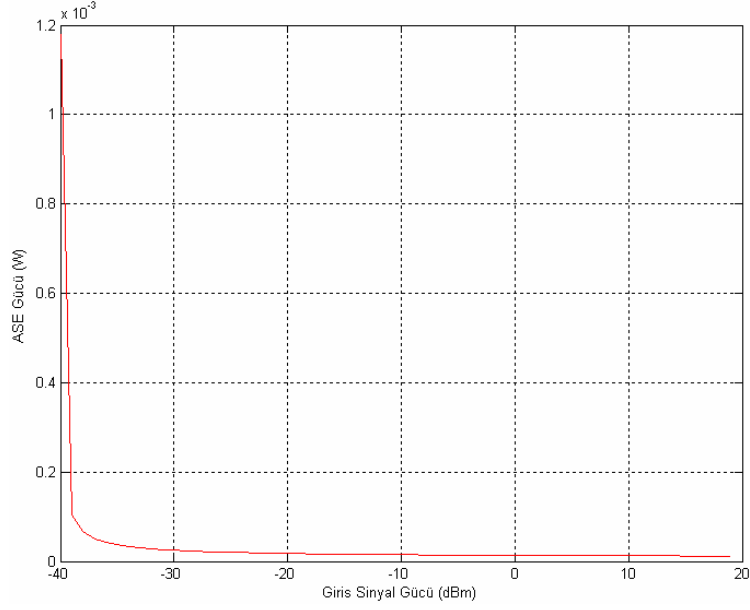
3.4.8. Kazanç – Sinyal Giriş Gücü Karakteristiği



Şekil 3.15 Kazancın artan sinyal giriş gücüne göre değişimi

Şekil 3.15’de sabit pompa gücü, fiber uzunluğu ve erbiyum katkılama oranı için, kazancın sinyal giriş gücüne göre fonksiyonel olarak değişimi gösterilmiştir. 50 m’lik bir EDFA’ya, 50 mW pompa gücü ile 1×10^{24} ion/m³ erbiyum katkılama oranı uygulanarak, sinyal giriş gücü -40 dB ile 20 dB arasında arttırılmıştır. Şekilden EDFA kazancının, artan giriş sinyal gücü ile azaldığı görülebilmektedir. Grafikten görülen bu azalmanın nedeni, artan giriş sinyal gücü ile beraber EDFA kazancının doyuma gitmesi ve buna bağlı olarak popülasyon ters birikiminin giriş sinyalini beslemek için yeterli olamamasıdır. Şekilde görülen kazancın büyük oranda azalmasının nedeni ise azalmanın daha anlaşılır görülebilmesi için, giriş sinyal gücü artış aralık değerinin geniş seçilmesidir.

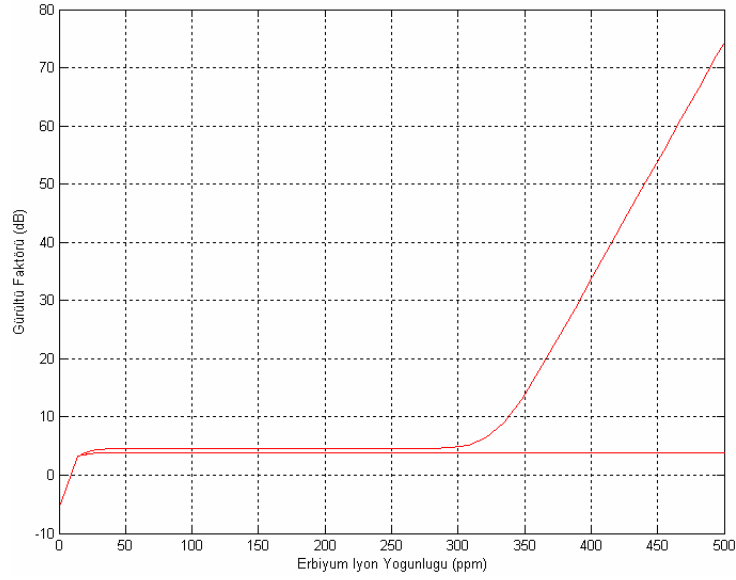
3.4.9. ASE Gücü – Sinyal Giriş Gücü Karakteristiği



Şekil 3.16 ASE gücünün artan sinyal giriş gücüne göre değişimi

Şekil 3.16’da, 50 mW pompa gücü, sabit bir fiber boyu ve erbiyum iyon yoğunluğu için ASE gücünde meydana gelen değişim, sinyal giriş gücünün bir fonksiyonu olarak gösterilmiştir. Şekilde görülen grafiğin elde edilebilmesi için, 50 m fiber boyu, 1.3×10^{24} ion/m³ katkılama oranında erbiyum iyonu ve sabit 50 mW pompa giriş gücü, -40 dB den 20 dB’e kadar artan sinyal giriş gücü uygulanmıştır. Grafikten de anlaşılacağı gibi, artan sinyal giriş gücü, erbiyum katkılı fiberde, uyarılmış yayının artışına neden olmaktadır. Bu durum ise, kendiliğinden yayının oranında azalmayla bir başka deyişle şekilde görülen ASE gücündeki azalmayla sonuçlanmaktadır. Şekil 3.16’da görülen ASE gücündeki hızlı azalmanın nedeni ise artan giriş sinyal gücü aralığının geniş seçilmesidir.

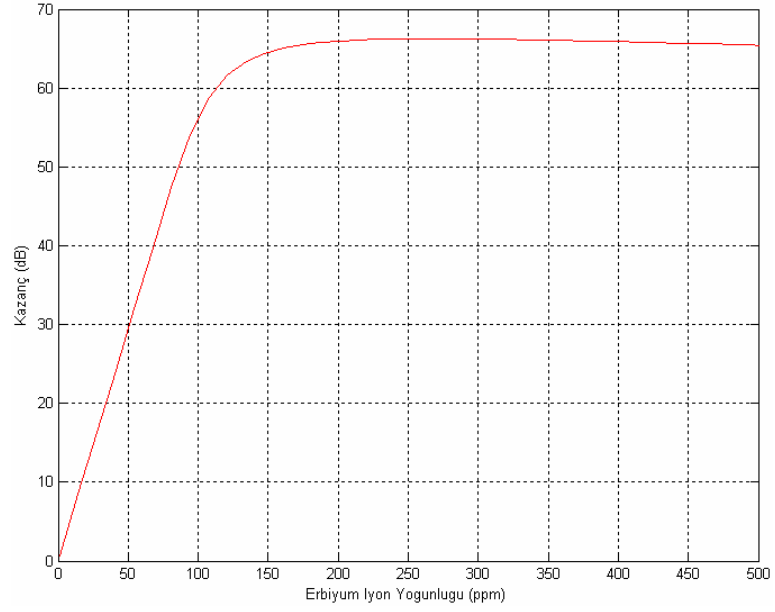
3.4.10. Gürültü Faktörü – Erbiyum İyon Yoğunluğu Karakteristiği



Şekil 3.17 Gürültü faktörünün erbiyum iyon yoğunluğuna göre değişimi

Sabit bir sinyal giriş gücü ve fiber boyunda, gürültü faktöründeki değişim, erbiyum iyon yoğunluğuna bağlı olarak 50 mW sabit pompa giriş gücü için şekil 3.17’de gösterilmektedir. Şekildeki grafik, 50 m uzunluğundaki erbiyum katkılı fibere, 1 μ W sinyal giriş gücü uygulanmasıyla elde edilmiştir. Grafikten de görülebildiği gibi; gürültü faktörü, yaklaşık olarak 30 ppm erbiyum iyon yoğunluğu seviyesine kadar artmış fakat bu noktadan sonra 500 ppm erbiyum iyon yoğunluğu değerine kadar değişmeden sabit kalmıştır. 300 ppm’den sonra 10 mW pompa gücü ile pompalanan EDFA için gürültü faktörünün daha önce şekil 3.12’de bahsedildiği üzere, yeterli olmayan pompalama gücü için gerekli olan popülasyon ters birikiminin sağlanamaması nedeniyle hızla arttığı görülmektedir. Bu durum, şekil 3.10 ile karşılaştırılarak, iki grafik arasındaki benzer bağlantıların bulunduğu görülebilir. 20 mW ve daha güçlü pompa güçleri, $n_{sp}=1$ ’i elde etmek için yeterlidir.

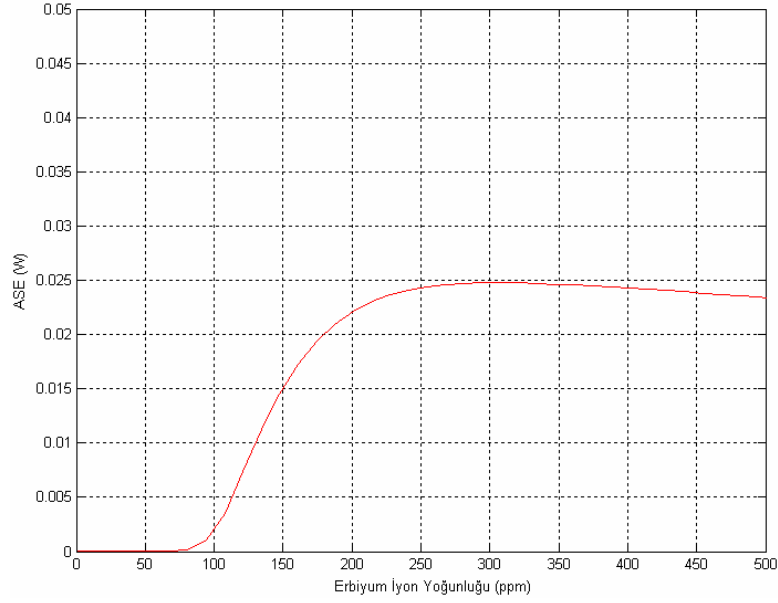
3.4.11. Kazanç – Erbiyum İyon Yoğunluğu Karakteristiği



Şekil 3.18 Kazancın erbiyum iyon yoğunluğuna göre değişimi

Şekil 3.18’de, sabit sinyal giriş gücü ve fiber boyu için, 50 mW pompa gücüne göre kazanç ile erbiyum iyon yoğunluğu arasındaki fonksiyonel ilişki gösterilmektedir. Şekilde görülen grafik, 50 mW pompa gücü, 50 m uzunluğunda EDFA’ya 1µW sinyal giriş gücü uygulanarak elde edilmiştir. Şekil 3.18’de erbiyum iyon yoğunluğundaki artış ile kazancın da arttığı fakat 150 ppm erbiyum iyon yoğunluğu seviyesinden sonra kazancın doyuma ulaştığı ve sabit kaldığı gözlemlenmiştir.

3.4.12. ASE Gücü – Erbiyum İyon Yoğunluğu Karakteristiği



Şekil 3.19 ASE gücünün erbiyum iyon yoğunluğuna göre değişimi

Şekil 3.19’da sabit bir fiber boyu ve sinyal giriş gücü için, 100 mW pompa gücüne göre erbiyum iyon yoğunluğuna bağlı olarak ASE gücünde meydana gelen değişim gösterilmektedir. Grafik, 100 mW sabit pompa gücü, 1 μ W sinyal giriş gücü ve 50 m uzunluğundaki EDFA parametreleri kullanılarak elde edilmiştir. Şekilden, yaklaşık 100 ppm erbiyum iyon yoğunluğundan sonra ASE gücünde hızlı bir artış olduğu, yaklaşık 250 ppm erbiyum iyon yoğunluğundan sonra ise hemen hemen sabit kaldığı, 350 ppm’den sonra ise yavaş bir azalmaya gittiği görülmektedir. Grafikteki ASE gücünün yaklaşık 100 ppm değerine kadar 0 W seviyesinde kalmasının nedeni, sabit pompa gücü ve düşük erbiyum iyon yoğunluklarında, yüksek popülasyon ters birikiminin kolaylıkla oluşabilmesidir. ASE gücündeki artışın nedeni ise artan erbiyum iyon yoğunluklarında oluşan düşük popülasyon ters birikimidir. 350 ppm’den sonra ASE gücündeki azalmanın nedeni ise, EDFA kazancının doyuma gitmesidir.

4. SONUÇ

Bu çalışmada, C bandında çalışan ve 1480 nm’de ileri yönde pompalanan EDFA’yı karakterize eden oran ve yayılım denklemlerinin hesaplanması, Matlab yazılım programı kullanılarak gerçekleştirilmiş ve sonuçlar EDFA’nın gürültü faktörü, kazanç, ASE gücü değişimi; fiber boyu, pompa gücü, sinyal giriş gücü ve erbiyum katkılama oranının birer fonksiyonu şeklinde grafiksel olarak görüntülenmiştir.

2. Bölümde verilen deneysel çalışma sonuçlarından elde edilen veriler ile bu çalışmadan elde edilen veriler birbirlerine uymaktadır. 3. Bölümde kullanılan parametrelerin, pratikte üretilecek olan erbiyum katkılı fiber yükselteç (EDFA) tasarımı için de katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

Daha ileri düzeyde çalışmalar için, hata oranı daha düşük nümerik yöntemler kullanılarak elde edilecek sonuçların pratikte elde edilen verilere daha çok yaklaşması sağlanabilir. Ayrıca, yapılan bu çalışmada EDFA’lar için kullanılan pasif elemanların etkisi ele alınmamıştır. Deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlara göre pasif elemanların etkisi önemlidir. Erbiyum Katkılı Fiber Yükselteç (EDFA)’lerde kullanılan pasif elemanlar karakterize edilerek, denklemlerde gerekli konumlara yerleştirilebilirse, elde edilen sonuçların pratikte elde edilen sonuçlara çok daha fazla yaklaşacağı tartışılmaz bir gerçektir.

KAYNAKLAR

1. G.P. Agrawal, Fiber Optic Communications Systems, John Wiley&Sons, New York, 1997.
2. G. Keiser, Cohorent Optical Fiber Communications, McGraw-Hill, New York, 1991.
3. J.M. Senior, Optical Fibre Communications, Prentice Hall, New York, 1992.
4. N. Kikuchi, S. Sasaki, Analytical Evaluation Technique of Self-Phase Modulation Effect on the Performans of Cascaded Optical Amplifiers Systems, **13**, 868(1995).
5. E. Desurvire, Erbiyum Doped Fiber Amplifiers Principles and Applications, John Wiley&Sons, New York, 1994.
6. <http://www.bell-labs.com/news/1998/march/2/2.html>, Y. Sun, 1 Tb/s Long Distance Transmission with 100 Optical Channels, Bell Labs Lucent Technologies R&D Team, 1998.
7. S. Özsoy, Fiber Optik, Birsen Yayinevi, Kayseri, 1998.
8. http://www.cisco.com/univercd/cc/td/doc/product/mels/cm1500/dwdm/dwdm_ovr.htm, Fundamentals of DWDM Technology, Cisco Systems Inc., 2004.
9. <http://photonics.ece.umd.edu/pubs/misc-presentations/MP-1/solitons.pdf>, Soluton Pulse Propagation in Optical Fiber, IEEE Journal, 2001.
10. <http://www.lunatechnologies.com/files/24introchromaticdispersionweb.pdf>, Introduction to Chromatic Dispersion, Luna Technologies, 2004.
11. A.R. Chraplyvy, Limitations on Lightwave Communications Imposed by Optical Fiber Nonlinearities, J. Lightwave Technol, **8**, 1548(1990).

12. <http://www.osa-opn.org/>, Managing Key Limitations In Optical Communication Systems, Alan E. Willner, 2002.
13. A.J. Antos, D.K.Smith, Design and Characterization of Dispersion Compensating Fiber Based on the LP₀₁ Mode, *J.Lightwave Technol*, **12**, 1739(1994).
14. <http://www.cleoconference.org/materials/XNRIWhitepaper.pdf>, New Paradigm in Chromatic Dispersion Measurement, K. Ogawa, 2005.
15. http://www.iec.org/online/tutorials/light_limit/topic03.html, Taming Dispersion in Tomorrows High Speed Networks, International Engineering Consortium - IEC, 2005.
16. <http://lib.tkk.fi/Diss/2002/isbn9512259869/isbn9512259869.pdf>, Dispersion Measurement of Fiber Optic Components and Applications of a Novel Tunable Filter for Optical Communications, Tapio Niemi, 2002.
17. A.E. Siegman, *Lazers*, University Science Boks, Mill Waley, California, 1986.
18. A. Yariv, Theory of Elliptical Defocusing in Anisotropic Nonlinear Optical Media, *Optics Letters*, **15**, 1064(1990).
19. C.J. Koester, E. Snitzer, Amplification in a Fiber Laser, **3**, 1182(1964).
20. <http://www.kerim.devisland.net/research.html>, Equalization on Advantages of OFFHM-CDMA over WDM in EDFAs, Kerim Fouli, 2003.
21. Bononi, L.A. Rusch, Doped-Fibre Amplifier Dynamics: A. System Perspective, *IEEE Journal of Lightwave Technol*, **16**, 945(1998).
22. R. Olshansky, Noise Figure for Erbium-Doped Optical Fiber Amplifiers, *Electron. Lett.*, **24**, 1363(1988).

23. R.I. Laming, J.E.Townsend, D.E. Payne, F. Meli, G. Grasso, I.J. Tarbox, Analysis of High-Power EDFA Operating in Saturated Regime at $\lambda = 1530$ nm and its Performance Evaluation in DWDM Systems, *IEEE Photon. Technol.*, **3**, 253(1991).
24. K.Kukichi, Laser Amplifiers, *Electro Lett.*, **26**, 1851(1990).
25. R.I. Laming, D.N. Payne, *IEEE Photon. Technol.*, **2**, 418(1990).
26. R.I. Laming, M.N. Zervas, D.E. Payne, *IEEE Photon. Technol.*, **4**, 1345(1992).
27. M.Yamada, M. Shimizu, M. Okayasu, T. Takeshita, M. Horiguchi, Y. Tachikawa, E. Sugita, *IEEE Photon. Technol.*, **2**, 205(1990).
28. Xiuli Wang, Etude du Gompportement du Gain Dynamique des Amplificateurs à Fibre Dopée à l'Erbium Dans Les Systèmes CDMA, M.Sc. Université Laval, Québec, 1998.
29. A. Bjarklev, *Optical Fiber Amplifiers: Design and System Applications*, Artech House Inc, 1993.
30. C.R. Giles, E. Desurvire, Propagation of Signal and Noise in Concatenated Erbium-Doped Fiber Optical Amplifiers, *J.Lightwave Technol.*, **9**, 147(1991).
31. C.R. Giles, E. Desurvire, Propagation of Signal and Noise in Concatenated Erbium-Doped Fiber Optical Amplifiers, *J.Lightwave Technol.*, **9**, 271(1991).
32. R.C.Steele, G.R. Walker, N.G. Walker, Sensitivity of Optically Preamplified Receivers with Optical Filtering, *IEEE Photon Technol. Lett.*, **3**, 545(1991).