

# SOLİTON TABANLI OPTİK İLETİŞİMDEKİ ZAMAN KAYMASI ETKİLERİ

Murat ARI<sup>1</sup> M.Cengiz TAPLAMACIOĞLU<sup>2</sup> İsa NAVRUZ<sup>3</sup>

<sup>1,3</sup>Ankara Üniversitesi, Çankırı Meslek Yüksekokulu,  
Teknik Programlar Bölümü 18200 Çankırı

<sup>2</sup>Gazi Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi  
Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü Maltepe – Ankara

<sup>1</sup>e-posta: [mari@cmyo.ankara.edu.tr](mailto:mari@cmyo.ankara.edu.tr) <sup>2</sup>e-posta: [taplam@gazi.edu.tr](mailto:taplam@gazi.edu.tr)

<sup>3</sup>e-posta: [inavruz@cmyo.ankara.edu.tr](mailto:inavruz@cmyo.ankara.edu.tr)

*Anahtar sözcükler: Soliton, Zaman Kayması Etkileri, Optik İletişim*

## ABSTRACT

*Solitons are a special type of optical pulse that may propagate through a fiber-optic communication system without distortion for tens of thousands of kilometers. This is accomplished by carefully balancing the opposite chirping effects of chromatic dispersion and self-phase modulation. Assuming that the optical amplifiers appropriately compensate for fiber attenuation, the total transmission distance of a soliton system is primarily limited by timing jitter. This paper discusses the origins and effects of timing jitter, and it describes how timing jitter may be controlled in order to increase the maximum transmission distance of a soliton link.*

## 1. GİRİŞ

Optik soliton ilk defa teorik olarak Hasegawa ve Tappert tarafından gösterilmiş [1] ve Mollenauer tarafından deneysel olarak gözlenmiştir [2]. Fiber optik iletişim sistemlerinde, ışık yayılımını olumsuz etkileyen dispersiyon ve nonlineerlik birbirleri ile dengelenebilir. Bu dengeyi gösteren dalga denkleminde elde edilen Nonlinear Schrödinger Eşitliği (NLS) uygun fiber parametrelerinin seçimini sağlar. Soliton, dispersif bir ortamda optik darbenin nondispersif yayılımını tanımlayan NLS denkleminin bir çözümdür [3].

Silika fiberler kızılötesi (infrared) frekanslar için mükemmel bir geçirgenlik sağlasa da, ışık sinyalinde her zaman soğurma ve saçılma nedeni ile kayıplar vardır. Bu zayıflama darbenin gücünü azaltır. Buna bağlı olarak aynı karakteristiği muhafaza edebilmek için darbe genişlemek zorunda kalır.

Bu nedenle komşu solitonların girişimlerini engellemek için sinyaller yükseltilmelidir. Bu

yükseltme sistemin alıcı tarafına yeterli sinyalin gitmesini de sağlar. Hem dağıtılmış, hem de ayrık yükseltme yöntemleri deneysel olarak kullanılmıştır. Fakat maliyetler nedeni ile Erbium katkılı fiber yükselteçler (EDFA) ticari olarak tercih edilir hale gelmiştir.

Optik yükselteçlerin fiber zayıflamasının uygun şekilde giderildiği varsayılırsa, bir soliton sisteminin toplam iletim mesafesi öncelikli olarak zaman kayması tarafından belirlenir.

Bu çalışmada zaman kaymasının (timing jitter) oluşumu ve etkileri incelenerek bir soliton linkinin iletim mesafesini artırmak için zaman kaymasının nasıl kontrol edilebileceği açıklanacaktır.

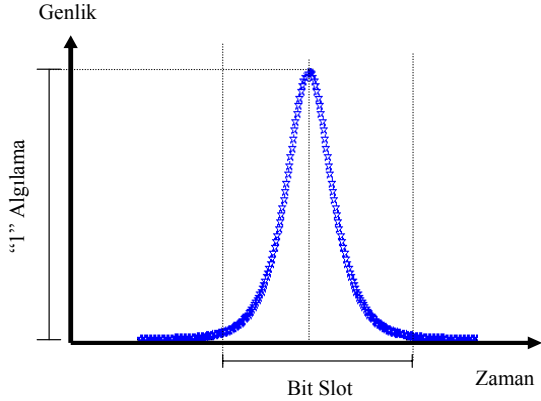
## 2. TEORİ

Bir haberleşme sisteminin bit oranı birim zamanda transfer edilen bilgi sayısıdır. Sistemin sonundaki alıcı, periyodik olarak sinyalden bir örnek almalı ve bit oranı ile orantılı bir algılama periyodu kullanılmalıdır. Örneğin 40 Gbit/sn bit oranında olan bir alıcı sistemi, her saniyede 40 milyar bit algılamalıdır. Bu nedenle alıcı her 25 pSn'de bir sinyal olarak örnekleme yapmalıdır.

Optik darbeler alıcıya bitslot diye bilinen bir aralıkta ulaşmalıdır. Alıcı her bitin orta noktasını örnekleyerek bilginin "0" mı yoksa "1" mi olduğunu anlar. Bitslot'unda bir solitonun varlığı "1" olarak, yokluğu ise "0" olarak algılanır. Alıcıya gelen sıralı bitler (bit treni) verici tarafından gönderilen bilgiyi oluşturmak için uygun bir şekilde yeniden oluşturulmalıdır.

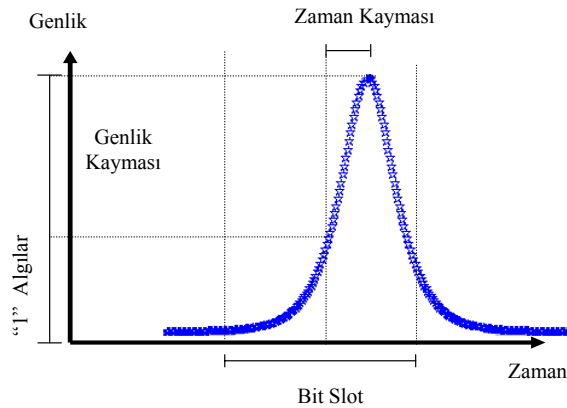
İdeal durumda (zaman kayması olmadan) her solitonun kendisine karşılık gelen bitslot'ın merkezinde varması gerekir.

Bu durumda algılama işleminde herhangi bir hata olmayacaktır. Böyle ideal bir bit yerleşimi Şekil 1’de verilmektedir. Dikkat edilirse solitonun tepe genliği bitslot’unun merkezinde oluşmaktadır. Bu nedenle alıcı solitonu “1” olarak algılamada zorluk çekmeyecektir.



Şekil-1. Zaman Kayması olmadan ulaşan bir soliton darbenin genliği

Gerçekte alıcıya varan solitonların varma zamanlarında bazı dalgalanmalar vardır. Bu dalgalanmalara zaman kayması denir. Örnek olarak Şekil 2’ye bakılırsa; solitonun tepe değeri bitslot’ın merkezinden bir miktar kaymıştır. Bit slot’ının merkezi ile solitonun tepe değeri arasındaki farka bu darbenin zaman kayması denir. Alıcı gelen sinyali bit slotlarının merkezinde örnekler. Fakat bu durumda görüldüğü gibi algılanan genlik solitonun merkeze yerleşmiş konumuna göre çok düşüktür. Solitonun tepe değeri ile alıcı tarafından algılanan tepe değeri arasındaki farka bu darbenin genlik kayması (Amplitude jitter) denir.

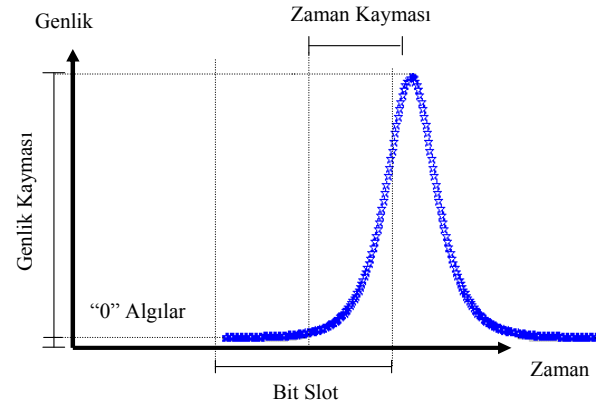


Şekil-2. Zaman kayması olmasına rağmen “1” olarak algılanan soliton darbe şekli

Darbe, kendisine ayrılan bit slot’ın içinde kaldığı sürece alıcı tarafından algılanan sinyal genliği solitonu “1” olarak algılamak için yeterlidir. Fakat darbe, bit slot’ının dışında kalırsa bir algılama hatası oluşur. Örneğin Şekil 3’te gösterilen soliton’un tepe değeri tamamen dışarı kaydığında ölçülen genlik değerine

göre “0” olarak algılanmaktadır. Şekil 2’deki zaman kayması gelen bilgiyi doğru olarak algılamak için yeterlidir. Ancak, Şekil 3’teki zaman kayması gelen bilgiyi doğru olarak algılamak için yeterli değildir.

Buraya kadar her bir solitondaki zaman kayması açıklandı. Ancak bir bütün olarak sistemin zaman kaymasını açıklamak ta önemlidir. Bütün sistemi kapsayan bu tür zaman kaymaları her bir solitonun zaman kaymalarının standart sapması olarak tanımlanır. Eğer standart sapma biliniyorsa Gaussian istatistiği kullanılarak, ne kadar soliton darbesinden kendisine ayrılan bölgeye varmayanların sayısı hesaplanabilir. Çoğu iletişim sistemlerinin hata toleransı çok düşüktür. Müsaade edilen hata oranları  $10^{-12}$  ile  $10^{-9}$  arasındadır. Diğer bir deyişle zaman kaymalarının merkezleri öyle ayarlanmalıdır ki hatalar minimum olsun.

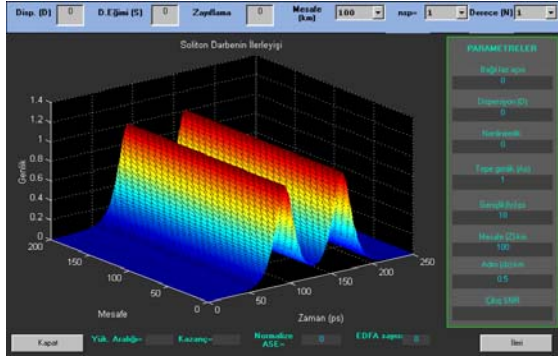


Şekil-3. Bir solitonun kendi slotunun dışında gelmesi sonucu oluşan hatalı soliton darbe şekli

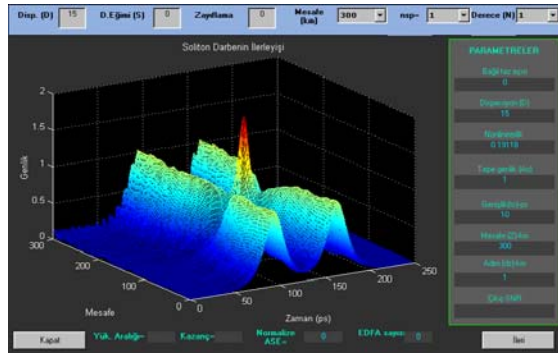
### 3. SOLİTON ETKİLEŞİMİ

Soliton haberleşme sistemlerinde, fiber optik kablolarda birbirine yakın yüksek bit oranlarında darbeler gönderilmek istenir. Eğer birbirini takip eden solitonlar çok yakın olursa birbirleri ile etkileşerek soliton yayılım eşitliği sağlamak için uygun bir şekil alırlar. Bu girişimler iki komşu solitonun periyodik olarak birleşmesine ve ayrılmasına sebep olur [4]. Şekil 4 dispersiyon ve zayıflama etkisi olmayan komşu solitonların ilerleyişini gösterir. Şekil 5 ise iki komşu solitonun periyodik olarak birleşmesi ve ayrılmasını gösteren üç boyutlu bir soliton etkileşim grafiğidir. Bu durum gerideki solitonunun grup hızının artmasına neden olurken, öndeki solitonun grup hızının azalmasına neden olur. Grup hızlarındaki bu değişimler alıcı tarafında zaman ve genlik kayması olarak kendini gösterir [5]. Darbeler arasında oluşan bu doğrusal olmayan itme ve çekme etkileri ilk defa 400 km’lik bir iletim hattında ve 20 G bit/sn’de gözlenmiştir [6]. Birbirine yakın olan solitonlar arasındaki etkileşim hem aynı frekanslardaki hem de farklı frekanslardaki solitonlarda görülür. Aynı ve benzer frekanslardaki solitonlarda itme ve çekme kuvvetleri oluşur [7]. Bu itme kuvvetlerinin büyüklüğü genlik, faz ve ilk ayrışma bağlıdır [8,9].

Farklı frekanslardaki solitonlarda ise her bir soliton değeri için potansiyel kuyular açar, bu kuyularda solitonların hızını artırır. Birbirini geçerken karşılıklı etkileşim nedeni ile hızları azalır.



Şekil-4. Dispersiyon ve zayıflama etkisi olmayan komşu solitonların fiber boyunca ilerleyişi



Şekil-5. 300 km'lik soliton tabanlı fiber iletim hattındaki, eşit genlikli ve aynı fazlı iki soliton darbe arasındaki etkileşim grafiği (üç boyutlu görünüş)

Bu kayma soliton soliton girişimleri azaltılarak düşürülebilir. Soliton soliton etkileşimleri komşu solitonların her biri arasında yeterli mesafe olmasını sağlayarak azaltılabilir [4].

Bir dalga boyu bölmeli çoklayıcı sistemde (WDM) soliton çarpışmaları farklı kanallar arasında da oluşabilir. Tek kanallı sistemde olduğu gibi karşılıklı faz etkileşim modülasyonu nedeni ile bu çarpışmalar zaman kaymasına sebep olur [10]. Bu tür kaymalar zig zag kaymalar, Bragg grating filtreleri kullanılarak kontrol edilebilir. Bu filtreler hem Dispersiyon Dengeleme Fibri (DCF) ve hem de filtre görevi görür.

Daha önce belirtildiği gibi doğrusal olmayan indis darbenin kırılmasına sebep olur ki bu frekansta darbenin ön kenarı alçaltılırken arka kenarı yükseltilir. İzole edilmiş simetrik bir darbe için kırılma işlemi de simetriktir. Şimdi ise ikinci bir darbe tarafından örtülen darbe için yoğunluk dağılımı ve kırılması dengesiz olacaktır. Darbe altındaki dalgalar aynı fazda ise yoğunluk dağılımı ve kırılması dengesiz olacaktır. Darbe altındaki dalgalar aynı fazda ise

yoğunluk artırılabilecek ve kırılma azalacaktır. (Kırılma yoğunluğunun eğimi ile orantılıdır. Böylece darbelerin birbirine doğru net bir ivmeleme (çekim) olacaktır. Aynı şekilde dalgalar aynı fazda değilse yukarıdaki işlemlerin tersi gerçekleşecektir [11].

### 3.1. Soliton Etkileşim İndirilmesi İçin Kullanılan Metotlar

Soliton darbeleri arasındaki karşılıklı etkileşim solitona dayalı iletişim sisteminin maksimum bit oranlı uzun mesafe performansını sınırlar. Bu yüzden, soliton darbe çiftleri arasında karşılıklı etkileşimden sakınmak için yöntemler bulmak gereklidir. Burada iki yöntem sunulmaktadır.

1) Birinci yol, etkileşim dinamiklerinde başlangıç soliton faz farkının etkisini bulmaktır [12]. Soliton etkileşiminin bireysel soliton fazındaki başlangıç faz farkına hassas bir şekilde bağlı olduğu görülür. Darbe çekimi (pulse attraction) yalnızca, başlangıç faz farkının  $\pi/2$ 'den daha az olduğu durumlarda meydana geldiği görülür. Aynı zamanda faz farkının  $\pi/2$ 'den daha büyük olması durumunda etkileşimin itici olduğu ve solitonların yayılım sırasında ayrışacağı görülür [13]. Bu yüzden uygun faz kayması yoluyla doğrusal olmayan etkileşimden sakınılabılır. İyi ayrılmış darbelerin, birleşmesinden kaçınmak için faz kayması miktarı küçük olmalıdır. Bununla birlikte, N soliton etkileşiminin azaltılması için eşit olmayan soliton trenlerinde bulunan komşu darbeler arasındaki başlangıç faz farkının girişi bir metod olarak düşünülemez [14].

Bu bağlamda uzun mesafeli soliton iletim sistemindeki soliton etkileşimini azaltmanın diğer bir metodu da her yükselteçten sonra uygun band geçiren optik fiberlerin sisteme uyarlanmasıdır. Uzun mesafeli soliton iletim kanallarının band genişliğinin her yükselteçten sonra sıra filtreler konularak, iki katına çıkarılabileceği kuvvetle muhtemeldir.

2) Optik fiberlerin 3.derece dispersiyonu, fiberin doğrusal olmayan kullanımında soliton etkileşimini azaltmak için bir metod olarak kullanılabilir [9]. Diğer bir deyişle eğer fiber sıfır dispersiyon dalga boyuna yakın kullanılırsa, daha yüksek dereceli dispersiyon etkisi göz önüne alınmalıdır. Bu durumda fiber sıfır dispersiyon dalga boyunda kullanılırsa 3.derece dispersiyon büyük bir genişlemeye neden olabilir. Bu, solitonlar arasında büyük bir etkileşim meydana getirir ve sonuç olarak yararlı band genişliklerini sınırlar.

Soliton etkileşimi için diğer parametre, kaynak cıvıdamasının varlığıdır. Küçük cıvıdamaya için, soliton etkileşimi eşit olmayan genlikli solitonların metodu ile azaltılabilir. Bununla birlikte büyük kaynaklı cıvıdamaya için, bu metod kullanılamaz. Lazer kaynağı cıvıdaması, soliton darbe etkileşimini ciddi şekilde azaltır. Bundan dolayı, kararlı bir sisteme sahip olmak için, cıvıdamayı azaltmak veya solitonlar

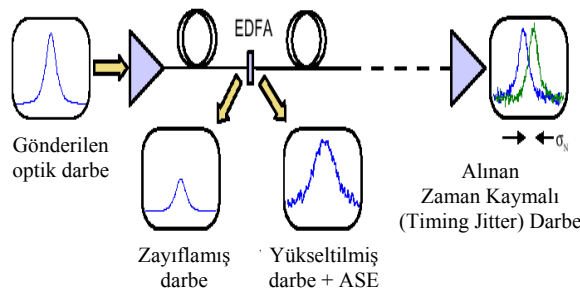
arasındaki boşluğu artırmak gereklidir. Bu da band genişliğinin azalımı ile sonuçlanacaktır.

#### 4. GORDON HAUS ETKİSİ

Optik iletişim sisteminde, optik darbeleri mümkün olduğunca uzağa göndermek arzu edilir. Yayına bağlı kayıplara göre, soliton darbelerinin yoğunluğu azalır ve doğrusal olmayan etki zayıflar.

Sonuç olarak bu solitonların yayınımmı etkiler ve üzerinde ışığın iletiildiği mesafede bir üst sınır belirler. Optik fiberdeki en az kayba yakın frekansları kullanan soliton darbeler uzak mesafe ve yüksek bit oranlı iletişim sistemi için bile periyodik yükseltmeye ihtiyaç duyulur. Bu yükseltme, fiber dispersiyonu dengeleyen soliton darbelerin enerjisini muhafaza etmek için gereklidir [15].

Bununla birlikte yükselteçlerin kullanımı zaman kaymasına neden olur. Bu durum, EDFA'larda görülen yükseltilmiş anlık emisyon gürültüsü (ASE) sonucu oluşan bir olaydır [16,17]. ASE sistemin sadece sinyal gürültü oranını azaltmakla kalmaz, aynı zamanda sinyal solitonlarında frekans kayması oluşturur. Bu frekans kayması solitonun ortalama taşıyıcı frekansında küçük değişiklikler oluşturur. Kromatik dispersiyon nedeni ile de grup hızında kayma oluşur. Alıcıya vardığı andaki kaymanın nedeni grup hızındaki değişimdir. Görüldüğü gibi zaman kayması, genlik kayması olarak karşımıza çıkmaktadır ve bu da algılamada hatalara neden olur. Gordon Haus etkisinin orijinal formülasyonu genel durum için Marcuse tarafından güncelleştirilmiştir [18]. Gordon Haus Kayma Etkisinin temsili açıklaması Şekil 7'de görülmektedir.



Şekil-7. Gordon Haus Kayma Etkisi

Bir soliton darbesi, bir yükselteç katından her geçişinde, solitona gürültü eklenir. Eğer soliton darbesi 50ps uzunluğunda olursa soliton darbe zarfının altındaki optik alanın 50.000 sayıklı vardır. Şimdi eğer bu zarfa küçük bir sarsım (Perturbation) eklersek, bu sarsımın eklenmesi solitonun pozisyonunu değiştirir. Aynı zamanda şeklin simetrik olmayan sarsımı soliton frekansını değiştirir [7]. Bu yüzden bir yükselteçten eklenen gürültü, hem solitonların durumunu, hem de frekansını değiştirir.

#### 4.1. Gordon Haus Limitinin İndirgenmesi İçin Kullanılan Metotlar

Gordon Haus etkisinin, maksimum bit oranlı uzak mesafe sistem ürünlerini sınırladığını biliyoruz. Bu sorunu ortadan kaldırmanın bir yolu, yüksek hızlı optik modülatör ile darbeleri periyodik olarak senkronize etmektir. Bu metod yolu ile, 10 Gbit/sn'lik darbeler bir milyon km'den daha öteye taşınabilir [19]. Bununla birlikte bu teknik, çok kanallı iletişim dalga boyu için uygun değildir.

Gordon Haus sınırlamasını ortadan kaldırmanın bir diğer yolu da doğrusal filtreleri düzenli olarak fiber kablo içinde kullanmaktır. Filtreler, her yükselteç sonrasında kullanılan Fabry Perot'lardır. Filtrelere bağlı olarak oluşan kayıplar yükseltecin kazancı artırılarak giderilir. Filtre band genişliği oldukça önemlidir. Eğer band genişliği çok büyükse, filtre darbe iletişimde ihmal edilebilir bir etkiye sahip olacaktır. Diğer yandan filtre genişliği çok küçük olursa soliton spektrumu sapabilir ve solitonlar daha fazla var olamazlar [7]. Genel olarak filtrelerin etkisi aşağıdaki gibi tanımlanabilir.

Filtresiz bir sistemde soliton frekansı, kendiliğinden yayılım gürültü sebebi ile rasgele bir salınım yapar. Frekans dalgalanmasının ortalama karesi, zaman veya yayılım mesafesi ile doğrusal olarak artar [18]. Bu filtreler kullanılarak soliton darbeler filtre edilir. Bunun anlamı, filtrelerin dağıtık solitonları filtre merkez frekansına doğru geri itmesidir [12]. Diğer bir deyişle, filtre merkez frekansına göre merkezlenmemiş darbe spektrumu, merkez frekansından daha uzakta olan spektrum bölgesinde daha yüksek kayıp içerir. Gordon Haus zaman kayması etkisini azaltmanın diğer bir tekniği Dispersiyon Dengeleme Fibri (DCF) kullanmaktır. Böylece soliton grup hızlarının yayılması azaltılır. DCF, normal transmisyon fiberine göre zıt dispersiyon katsayısına sahiptir. Böylece Gordon Haus etkisi transmisyon fiberindeki soliton grup hızını artırır, DCF'deki orijinal grup hızından çok daha fazla zayıflayacaktır. Bu hareket solitonların ideal konumuna daha yakın gelmesini sağlar. Dispersiyon yönetimli optik sistemlerde, DCF belli bir sayıdaki fiberden sonra yerleştirilir, böylece biriken dispersiyon çok büyük olmaz. Bu nedenle Gordon Haus kaymasını azaltmanın en etkili yollarından biri dispersiyon yönetimi (Dispersiyon management) kullanmaktır [18].

Gordon Haus kaymasını azaltmanın son bir yöntemi de Raman yükselteçleri kullanmaktır. Raman yükselteçlerinin gürültü kapma oranı EDFA'lardan çok daha düşüktür. Böylece daha az ASE gürültüsü üretirler. ASE'de meydana gelen bu düşme Gordon Haus etkisini azaltır. Bunun sonucunda zaman kayması azalır.

## 5. AKUSTİK KAYMA

Zaman kayması, fiberlerde akustik dalga üretimi sonucunda olabilir. Sinyalin optik alanı fiber çekirdeği ile sınırlıdır ve oluşan bu alan fiber kesiti alanı etrafında oluşur. Daha sonra bu elektrik alan elektrostriktion yöntemi ile akustik dalgalar üretir. Optik darbelerin elektrik alan vektörlerdeki değişmelerin bir sonucu olarak küçük yoğunluk farklılıkları oluşur. Yoğunluktaki bu kayma doğal olarak fiberin kırılma indisinde bir kaymaya sebep olur. Bu nedenle farklı solitonlar farklı grup hızlarına sahip olabilir. Daha önce açıklandığı gibi grup hızlarındaki bu değişme, solitonların varma zamanlarında değişmeye yol açar. Zamanlama ve genlik kaymasına ve muhtemel hatalara sebep olarak sistemin yapısı gereği akustik kaymanın genliğini azaltmak zordur. Bununla birlikte akustik kayma nedeni ile oluşan bit hataları bir sonlu impals filtresi kullanılarak azaltılabilir veya önlenir. Kayma için bit slot'larını dinamik olarak yeniden yerleştirerek alıcılar solitonları uygun bir şekilde algılar ve hatanın oluşması engellenir.

## 6. POLARİZASYON MOD DİSPERSİYON TARAFINDAN OLUŞAN KAYMA

Solitonlar bir fibere verildiklerinde aynı polarizasyon durumunu paylaşırlar. Bununla birlikte optik yükselteçler tarafından oluşturulan ASE gürültüsü bu polarizasyon durumlarını rasgele hale getirir, bunun sonucunda zaman kaymasına sebep olur. Bu durum, ancak fiberin solitonların iki dikey polarize edilmiş durumuna göre birden fazla çift kırılma indisine sahip olması ile oluşur. Bu olaya Polarizasyon Mod Dispersiyonu (PMD) denir ve iki dikey komponentin farklı grup hızlarında yayılmasına sebep olur. Solitonların polarizasyon durumları rasgele olduğundan alıcı tarafına merkezden kaymış bir şekilde vararak zaman kaymasına sebep olurlar. Polarizasyon kaynaklı çift kırılma etkilerini minimize etmek için fiber imalat işlemleri daha dikkatli kontrol edilirse PMD etkili kayma azaltılabilir.

## 7. SONUÇ

Eğer kontrol edilmezse, zaman kaymaları soliton iletişim sistemlerindeki iletişim mesafesini ciddi oranda sınırlayabilir. Soliton etkileşimi, Gordon Haus Etkisi, akustik dalga üretimi ve PMD'nin her biri zaman kayması oluşumunda önemli katkılar sağlar. Bu etkilerin her birini kontrol etmek için farklı yöntemler kullanıldığı yukarıda belirtildi. Burada dikkat edilmesi gereken bir başka nokta hem Gordon Haus Etkisinin ve hem de soliton etkileşiminin sinyal solitonlarında frekans kaymasına neden olduğu sonucunun tespitidir. Bu çalışma ile, kaynakları farklı fakat etkileri aynı olan zaman kaymaları için yapılacak nümerik analizler ile soliton tabanlı yüksek bit oranlı uzun mesafe iletişim sistemlerinin optimizasyonunun sağlanabileceği sonucuna ulaşılmıştır.

## KAYNAKLAR

- [1] A. Hasegawa and F. Tappert, "Transmission of stationary optical pulses in dispersive dielectric fibers", APPL. PHYS. LETT., 23 (3): 142-144 (1973).
- [2] Mollenauer L. F. Stolen R. H. and Gordon J.P., "Experimental observation of picosecond pulse narrowing and solitons in optical fibres", PHYSICS REV. Lett. 45:1095-96 (1980).
- [3] G.P. Agrawal, "Non-linear fibre optics, 2<sup>nd</sup> Ad." ACADEMIC PRESS, London, 142-156 (1995).
- [4] M.Nakazawa, et.al., "Optical soliton trans.", ELECT.& COMM. IN JAPAN, 75 (5): 1 (1992).
- [5] A.N. Pinto, G.P. Agrawal, "Effect of soliton interaction on timing jitter in comm. Syst.," J. LIGHTWAVE TECH., 16(4): 381-385 (1998).
- [6] M.Nakazawa, et.al., "Observation of non-linear interaction in 20 Gbit/s soliton transmission over 500 km using erbium doped fiber amplifiers", ELECTRON. LETT., 27 (18): 1962 (1991).
- [7] M. Arı "Soliton girişimi ve gordon haus jitter etkilerinin kompanzasyonu yolu ile soliton iletişim sist. modell." GAZİ ÜNİV. DOK. TEZ. 2004
- [8] J.P. Gordon, "Interac. forces among solitons in optical fibers", OPT.LETT., 8 (11): 596 (1983).
- [9] C. Desem and P.L. Chu, "Soliton propag. in the presence of source chirping and mutual interac. in single mode fibre", ELECT. LETT., 23 (6): 260 (1985).
- [10] V.S. Grigoryan, "Efficient approach for modeling collision-induced timing jitter in WDM return-to-zero dispersion-managed systems," J. LIGHTWAVE TECH., 18 (8): 1-1264 (2000).
- [11] F.M. Mitscheke "Experimental observation of interaction forces between solitons in optical fibers", OPT. LETT., 12 (5): 355 (1987).
- [12] H. Göktaş, M. Arı "Soliton iletişim sistemlerinin optimizasyonu üzerine bir yaklaşım modeli" GAZİ ÜNİV. MMF DERGİSİ vol.19 no.3 Eylül 2004
- [13] D. Anderson and M. Lisak, "Bandw. limits due to mutual pulse interaction in optical soliton commun. systems", OPT. LETT., 11 (3): 174 (1986).
- [14] I.M. Uzunov, et. al., "Influence of the initial phase difference between pulses on the N-soliton interaction of unequal solitons in optical fibers.", OPT. COMMUN., 97: 307 (1993).
- [15] D. A. Chapman, "Erbium doped fiber amplifiers: the latest revolution in optical communications.", ELECTRO. & COMMUN. ENGINE. J., 59-62 (1994).
- [16] M. Arı, A. Altuncu, C. Nakipoğlu "Erbiyum Katkılı Fiber Optik Yükselteçlerin (EDFA) Modellemesi ve Bilgisayarlı Kazanç Simülasyonu", ELEKTR.-ELEKTRO.-BİLG. MÜH. 8.ULUSAL KONG., Gaziantep, 487-491 (1999).
- [17] M. Arı, C. Taplamacıoğlu, H. Göktaş, "Analysis of Erbium Doped Fibre Amplifiers", THIRD INT. CONF. ON ELECTR. AND ELECTRO. ENG. DEC., Bursa, 1-680 (2003).
- [18] D. Marcuse, "An alternative derivation of the Gordon-Haus effect.", J. OF LIGHT. TEC., 10 (2): 273 (1992).
- [19] M.Nakazawa, E.Yamada "10 Gbit/s soliton data transmission over one million kilometers.", ELECTR. LETT., 27 (14): 1270 (1991).