



**ADNAN MENDERES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANABİLİM DALI
FİZ-YL-2010-0002**

**NONLİNEER İLETİM HATLARINDA DALGALARIN
WAVELET VE FOURIER TRANSFORM
YÖNTEMİYLE İNCELENMESİ**

Ali Rıza ÖZGEÇ

**Tez Danışmanı:
Prof. Dr. Halil YARANERİ**

AYDIN

**T.C.
ADNAN MENDERES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANABİLİM DALI
FİZ-YL-2010-0002**

**NONLİNEER İLETİM HATLARINDA DALGALARIN
WAVELET VE FOURIER TRANSFORM YÖNTEMİYLE
İNCELENMESİ**

Ali Rıza ÖZGEÇ

**Tez Danışmanı:
Prof. Dr. Halil YARANERİ**

AYDIN

T.C.
ADNAN MENDERES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜNE
AYDIN

Fizik Anabilim Dalı Yüksek Lisans Programı öğrencisi Ali Rıza ÖZGEÇ tarafından hazırlanan *Nonlineer İletim Hatlarında Dalgaların Wavelet Ve Fourier Transform Yöntemiyle İncelenmesi* başlıklı tez, 03/05/2010 tarihinde yapılan savunma sonucunda aşağıda isimleri bulunan jüri üyelerince kabul edilmiştir.

Ünvanı, Adı Soyadı	Kurumu	İmzası
Başkan : Prof. Dr. Halil YARANERİ	Adnan Menderes Üniv.	
Üye : Prof. Dr. Hamza POLAT	Dokuz Eylül Üniv.	
Üye : Doç. Dr. Cesur EKİZ	Adnan Menderes Üniv.	

Jüri üyeleri tarafından kabul edilen bu yüksek lisans tezi, Enstitü Yönetim Kurulunun Sayılı kararıyla (tarih) tarihinde onaylanmıştır.

Prof. Dr. Serap AÇIKGÖZ
Enstitü Müdürü

T.C.
ADNAN MENDERES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜNE
AYDIN

Bu tezde sunulan tüm bilgi ve sonuçların, bilimsel yöntemlerle yürütülen gerçek deney ve gözlemler çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, çalışmada bana ait olmayan tüm veri, düşünce, sonuç ve bilgilere bilimsel etik kuralların gereği olarak eksiksiz şekilde uygun atıf yaptığımı ve kaynak göstererek belirttiğimi beyan ederim.

03/05/2010

Ali Rıza ÖZGEÇ

ÖZET

NONLİNEER İLETİM HATLARINDA DALGALARIN WAVELET VE FOURIER TRANSFORM YÖNTEMİYLE İNCELENMESİ

Ali Rıza ÖZGEÇ

Yüksek Lisans Tezi, Fizik Anabilim Dalı
Tez Danışmanı: Prof. Dr. Halil YARANERİ
2010, 104 sayfa

Bu çalışmada, nonlinear iletim hatlarındaki dalgaların ilerlemesinin Wavelet ve Fourier Transform metotlarıyla incelenmesine çalışılmıştır. Bu amaçla bir boyutlu komşu ve ikinci komşu erimli nonlinear örgülere karşılık gelen nonlinear iletim hatları Electronic Workbench programı ile kurulmuştur. Farklı frekans ve genlikteki dalgaların hat üzerindeki ilerleyişi ve iletim hatlarının dalgalara etkileri arasındaki farklar incelenmiştir. Nonlinear etkiler offset voltajı ile kontrol altına alınmıştır. Veriler transient anazli metodu ile Elektronik Workbench programından alınmıştır. Fourier analiz grafikleri kipler arasındaki frekans transferini, wavelet grafikleri kipler arasındaki enerji dağılımını gösterdi. Nonlinear iletim hattında ilerleyen dalgaların genlikleri ve frekansları arttıkça harmoniklerin oluştuğu, enerjinin diğer kiplere paylaştırdığı gözlenmiştir. Ayrıca dalgaların frekansları arttıkça yeni kiplerin oluşması için daha düşük genlikli dalgalara ihtiyaç duyulduğu gözlenmiştir. Uzun dalga boyu için nonlinear iletim hattı süreklilik karakteri gösterdiği, dalgaların denkleminin KdV denkleminde olduğu gösterilmiş ayrıca denklemin simetri özellikleriyle dalgaların hattaki ilerlemesine arasında ilişki kurulmuştur. Uzun erimli etkileşmenin solitonları daha kararlı hale getirdiği sayılarını azalttığı görülmüş ve bunlarda nonlinearlikten dolayı enerjinin değişik kip frekanslarına aktarılması beklenirken (FPU) böyle olmadığı enerjinin ancak belli frekanslara aktarılmasına izin gözlenmiştir. İletim hattındaki hücreler arası erim ve nonlinearlik değiştirilerek soliton sayısı ve karakteristiği belirlenebilir. Bu çalışmadaki nonlinear iletim hattı soliton üretimi, nonergodiklik, recurrence üzerine çalışmak için iyi bir yapıdır. Nonlinearlik ve dispersiyon kolayca dengelenebilir. Çalışma sırasında hattın frekans dönüştürücü olarak kullanılabilmesi de bulunmuştur.

Anahtar Kelimeler: Nonlinear iletim hattı, Fourier Wavelet transform, FPU, soliton, dağılım

ABSTRACT**INVESTIGATION OF WAVES IN NONLINEAR TRANSMISSION LINES
BY WAVELET AND FOURIER TRANSFORMS**

Ali Rıza ÖZGEÇ

M.Sc. Thesis, Department of Physics
Supervisor: Prof. Dr. Halil YARANERİ
2010, 104 pages

This work has been conducted to investigate wave propagating in nonlinear transmission lines by Fourier and wavelet methods. For this purpose, nonlinear transmission lines equivalent of one dimension nonlinear crystal lattice with the first neighbor and the second neighbor interaction was constructed in Electronic Workbench. Propagation of the waves with different frequency and amplitude in the lines, and difference between the lines' reactions to the waves was examined. Nonlinearity was controlled by offset voltage. Data are obtained from transient analysis by using Electronic Workbench software. Fourier analysis graphics indicated frequency transfer among the mods, and wavelet graphics showed energy distribution between mods. It was observed that the waves propagating in the nonlinear transmission lines create new harmonics as their amplitude and frequency increase, and their energy is share among other mods, and as the wave frequencies increase, lower amplitude waves were observed to be needed for new mods to be created. For long wavelength wave nonlinear transmission line show continuum characteristics and wave equation obeys KdV equation and symmetry properties of this equation was established relation with wave propagating. It is found that long range interactions makes soliton more stable and prevents their decaying into more solitons. It was expected the energie distribution among modes because of nonlinearity, not to be, only among a few modes. Therefor by changing range of interactions and nonlinearity between unit cells one can arrange the number of solitons and their propagation characteristics. Therefor nonlinear transmission line used in this work is quite useful in soliton generation, to work on non-ergodicity and recurrence. One can easily balance nonlinearity and dispersion. It is found that the line used can behave as a frequency converter.

Keywords:Nonlinear transmission line, Fourier Wavelet transform, FPU, soliton, dispersion

ÖNSÖZ

Tez çalışması sırasında lineer bir dünyanın eğitimini almış ancak nonlineer etkileri pek çok örnekte görmüş bir insan olarak nonlineerliği anlamak ve açıklamak yoğun bir çaba sarf etmemi gerektirdi. Çalışılan alanın Dalgalar Fiziği, İstatistik Fizik, Katıhal Fiziği, Elektrik-Elektronik gibi fiziğin pek çok alanı ve Matematik, bilgisayar gibi alanlarla doğrudan ilişkili olması pek çok bilgiyi tazeleme yanında Fiziğin bütünlük ilkesine uygun olarak alt disiplinler arası ilişkileri kavramama çok yardımcı oldu. Electronics Workbench programından elde edilen verilerin Microsoft Excel 2003'ü bir arayüz olarak Matlab R2007a'ya tanıtmak, çalışmak çalışmanın en önemli adımlarından biri olmuştur. Aksi halde deneysel sonuçların analizi mümkün olmayabilirdi. Çalışmam sırasında benden desteğini esirgemeyen Eşim Seher'e, Ağabeyim Cem'e, bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan Prof. Dr. Halil YARANERİ'ne ve bölümdeki diğer öğretim üyelerine teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY SAYFASI.....	iii
BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI.....	v
ÖZET.....	vii
ABSTRACT.....	ix
ÖNSÖZ.....	xi
İÇİNDEKİLER.....	xiii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xv
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xix
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ / KURAMSAL TEMELLER.....	4
2.1. Bir Boyutlu Lineer Örgüler ve Fononlar.....	4
2.1.1. Bir Boyutlu Lineer Örgü Tanımı ve Modeli.....	4
2.1.2. Tek Atomlu Örgüde Tanecik Etkileşmeleri.....	7
2.1.3. Fononlar.....	12
2.2. Lineer İletim Hatlarında Dalgalar.....	14
2.2.1. Lineer ve Dağılımsız İletim Hatlarında Dalgalar.	14
2.2.1.1. Grup hızı.....	18
2.2.2. Lineer ve Dağılımlı İletim Hatlarında Dalgalar	19
2.2.2.1. Kesikli elektriksel iletim ağı.....	21
2.3. Bir Boyutlu Nonlineer Örgüler.....	23
2.3.1. Nonlineer Örgü Teorisi.....	23
2.3.2. FPU Paradoks ve Çözümleri	25
2.4. Nonlineer İletim Hatlarında Dalgalar.....	29
2.4.1. Nonlineer ve Dağılımsız İletim Hatlarında Dalgalar	30
2.4.2. Nonlineer ve Dağılımlı İletim Hatlarında Dalgalar.....	32
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	39
3.1. Elektronik Workbench Profesyonel	39
3.1.1. Osiloskop.....	40
3.1.2. Fonksiyon Üretici.....	41
3.1.3. Elektronik Devre Analizi.....	41
3.1.3.1. DC çalışma noktası.....	41
3.1.3.2. Sinyal analizi (Transient Analysis).....	42
3.1.3.3. AC frekans analizi (AC frequency sweep).....	42
3.2. Fourier Transform Metodu.....	43

3.3. Wavelet Transform Metodu	46
3.3.1. Sürekli Wavelet Dönüşümü.....	48
3.3.2. Kesikli Wavelet dönüşümü.....	50
3.4. Matlab R2007a Programı.....	52
3.5. Nonlinear İletim Hattının Oluşturulması.....	53
3.5. 1. Tek Atomlu Nonlinear Elektriksel İletim Hattı.....	53
3.5.1.1. Tek atomlu en yakın komşu erimli elektriksel iletim hattı	53
3.5.1.2. Tek atomlu ikinci komşu erimli elektriksel iletim hattı.....	54
3.5.2. Nonlinear Etkiler	55
3.5.3. Dağılımının Etkisi	57
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	60
4.1. Bir Boyutlu Tek Atomlu En Yakın Komşu Atom Erimli Nonlinear Elektriksel İletim Hattında Dalgalar	60
4.1.1. Sinüzoidal Bir Giriş Sinyalinin Frekans ve Genliğe Bağlı Olarak Solitonlara Dönüşmesi	60
4.1.2. Frekans ve Genliğe Bağlı Olarak İletim Hattı Üzerindeki Dalganın İncelenmesi	62
4.1.3. 100 KHz Frekanslı İlerleyen Dalganın İncelenmesi	66
4.1.4. 200 KHz Frekanslı İlerleyen Dalganın İncelenmesi	68
4.1.5. 300 KHz Frekanslı İlerleyen Dalganın İncelenmesi	71
4.1.6. 400 KHz Frekanslı İlerleyen Dalganın İncelenmesi	73
4.2. Bir Boyutlu Tek Atomlu İkinci Komşu Atom Erimli Nonlinear Elektriksel İletim Hattında Dalgalar	76
4.2.1. Sinüzoidal Bir Giriş Sinyalinin Frekans ve Genliğe Bağlı Olarak Solitonlara Dönüşmesi	76
4.2.2. Uzak Erimli İletim Hattındaki Dalganın Frekans ve Genliğe Bağlı Olarak İncelenmesi	78
4.2.3. Uzak Erimli İletim Hattında 100 KHz Frekanslı İlerleyen Dalganın İncelenmesi	83
4.2.4. Uzak Erimli İletim Hattında 200 KHz Frekanslı İlerleyen Dalganın İncelenmesi	86
4.2.5. Uzak Erimli İletim Hattında 300 KHz Frekanslı İlerleyen Dalganın İncelenmesi.....	90
4.2.6. Uzak Erimli İletim Hattında 400 KHz Frekanslı İlerleyen Dalganın İncelenmesi.....	93
5. TARTIŞMA VE SONUÇ	97

KAYNAKLAR	102
ÖZGEÇMİŞ.....	104

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Lineer örgü modeli.....	4
Şekil 2.2. Sürtünmesiz ortamda kütle yay sistemi	7
Şekil 2.3. (2.1.2.16) bağıntısının çizimi: Lineer kesikli örgünün dağıtım eğrisi.....	9
Şekil 2.4. Lineer dağıtımsız bir ortamda dalganın şeklinin bozulmadan ilerlemesi.....	10
Şekil 2.5. Lineer dağıtımlı bir ortamda dalganın ilerlerken şeklinin değişmesi.....	10
Şekil 2.6. Grup hızının k ile değişimi	11
Şekil 2.7. Dağıtım bağıntısının çizimi: Lineer sürekli ortamın dağıtım eğrisi	12
Şekil 2.8. Bir boyutlu atom zincirinde sinüs dalgası şeklindeki ilk üç kipte taneciklerin hareketi	13
Şekil 2.9. 1. kipte $n=1,2,3$ için kuantum durumları	14
Şekil 2.10. Sürekli iki telli iletim hattı	15
Şekil 2.11. Dağıtımsız ortamda ω - k ilişkisi	18
Şekil 2.12. Lineer ve dağıtımsız iletim hattında atmanın şeklini bozmadan ilerlemesi.....	18
Şekil 2.13. Dağıtımlı iletim hattının gösterimi	19
Şekil 2.14. Lineer ve dağıtımlı iletim hattında a) Dağıtım eğrisi b) Faz hızının k ya göre grafiği c) Grup hızının k ya göre grafiği	20
Şekil 2.15. Lineer ve dağıtımlı ortamda atma genişleyerek ilerler.....	20
Şekil 2.16. Bir boyutlu mono atomik örgüye karşılık gelen elektriksel ağ	21
Şekil 2.17. $\omega=f(k)$ grafiği LC iletim hattı üzerindeki dalgalarının dağıtım bağıntısı	23
Şekil 2.18. FPU recurrence grafiği	25
Şekil 2.19. FPU tarafından kullanılan nonlinear örgü modeli	26
Şekil 2.20. Solitonların birbiri içerisinden geçişi	28
Şekil 2.21. Sinüsel başlangıç koşullu bir atmanın solitonlara ayrılışı	29
Şekil 2.22. Nonlinear $l(i)$ indüktanslı ve nonlinear $c(V)$ kapasitanslı iletkeni denk iletim hattı	30
Şekil 2.23. Nonlinear ve dağıtımsız iletim hattında şok dalgasının yayılımı....	31
Şekil 2.24. Lineer indüktans ve nonlinear kapasitanslı hücrelerden oluşan elektriksel ağ devresi	32
Şekil 2.25. $V(x,t)-(x-vt)$ solitary dalga çözümü için L_{fw} genişliği	35
Şekil 2.26. Elektriksel iletim hatlarında dağıtım ve nonlinearliğin etkisi	36
Şekil 2.27. İkinci yakın komşu erimli nonlinear elektriksel iletim hattı ..	36
Şekil 2.28. İkinci yakın komşu erimli nonlinear elektriksel iletim hattının dağıtım eğrisi	38
Şekil 3.1. Osiloskop paneli	40
Şekil 3.2. Fonksiyon üretici paneli	41
Şekil 3.3. Sinyal analiz paneli	42
Şekil 3.4. AC analiz paneli	43
Şekil 3.5. Fourier dönüşümü, zaman bilgisi içeren sinyalden frekans bilgisi	

elde eder	45
Şekil 3.6. Herhangi bir sinyalden alınan kesikli veriler.....	45
Şekil 3.7. $f(t) = \sin(\omega t) + (1/3) \sin(3\omega t)$ sinyalinin Fourier spektrumu.....	46
Şekil 3.8. Çeşitli waveletler: a) Mexican Hat b) Morlet	47
Şekil 3.9. Sürekli Wavelet Dönüşümü'nün grafiksel gösterimi	49
Şekil 3.10. Wavelet analiz sonucu: Yatay eksen zamanı, düşey eksen frekansı gösterir	49
Şekil 3.11. Matlab programı ile elde edilen wavelet enerji diyagramı	52
Şekil 3.12. Bir boyutlu en yakın komşu erimli nonlineer elektriksel iletim hattı	54
Şekil 3.13. Bir boyutlu ikinci komşu erimli nonlineer elektriksel iletim hattı	55
Şekil 3.14. DC ters voltajın bir fonksiyonu olarak kapasite – voltaj grafiği.....	57
Şekil 3.15. Tek atomlu elektriksel iletim hattının a) Frekans spektrumu b) Dağılım eğrisi	58
Şekil 3.16. Uzak erimli elektriksel iletim hattının a) Frekans spektrumu b) Dağılım eğrisi	59
Şekil 4.1. Solitonların ortaya çıkışında genlik-frekans ilişkisi.....	61
Şekil 4.2. Sinüsel başlangıç koşullu sinyalin solitonlara dönüşmesi.....	61
Şekil 4.3. 100 KHz'lik giriş sinyalinin hat üzerinde oluşturduğu dalganın a) Transient analizi b) Fourier analizi.....	63
Şekil 4.4. 200 KHz'lik giriş sinyalinin hat üzerinde oluşturduğu dalganın a) Transient analizi b) Fourier analizi	64
Şekil 4.5. 300 KHz'lik giriş sinyalinin hat üzerinde oluşturduğu dalganın a) Transient analizi b) Fourier analizi	65
Şekil 4.6. 400 KHz'lik giriş sinyalinin hat üzerinde oluşturduğu dalganın a) Transient analizi b) Fourier analizi	66
Şekil 4.7. 100KHz'lik sinyalin a) Fourier analizi b) Wavelet analizi (250mV) c) Wavelet analizi (500mV).....	68
Şekil 4.8. 200KHz'lik sinyalin a) Fourier analizi b) Wavelet analizi (100mV) b) Wavelet analizi (250mV) c) Wavelet analizi (500mV).....	70
Şekil 4.9. 300 KHz'lik sinyalin a) Fourier analizi b) Wavelet analizi (100mV) c) Wavelet analizi (250mV) d) Wavelet analizi (500mV)	73
Şekil 4.10. 400 KHz'lik sinyalin a) Fourier analizi b) Wavelet analizi (100mV) c) Wavelet analizi (250mV) d) Wavelet analizi (500mV).....	75
Şekil 4.11. Uzak erimli hatda solitonların ortaya çıkışında genlik-frekans ilişkisi	77
Şekil 4.12. Uzak erimli hatda sinüsel başlangıç koşullu sinyalin solitonlara dönüşmesi.....	77
Şekil 4.13. 100 KHz'lik giriş sinyalinin hat üzerinde oluşturduğu dalganın a) Transient analizi b) Fourier analizi	79
Şekil 4.14. 200 KHz'lik giriş sinyalinin hat üzerinde oluşturduğu dalganın a) Transient analizi b) Fourier analizi	80
Şekil 4.15. 300 KHz'lik giriş sinyalinin hat üzerinde oluşturduğu dalganın a) Transient analizi b) Fourier analizi	81
Şekil 4.16. 400 KHz'lik giriş sinyalinin hat üzerinde oluşturduğu dalganın	

a) Transient analizi b) Fourier analizi.....	82
Şekil 4.17. 100 KHz'lik sinyalin a)Fourier analizi b)Wavelet analizi (100mV) c) Wavelet analizi (250mV) d) Wavelet analizi (500mV-100. hücre) e) Wavelet analizi (500mV-200. hücre)	86
Şekil 4.18. 200 KHz'lik sinyalin a)Fourier analizi b)Wavelet analizi (100mV) c) Wavelet analizi (250mV) d) Wavelet analizi (500mV- 100. hücre) e) Wavelet analizi (500mV-200. hücre)	89
Şekil 4.19. 300 KHz'lik sinyalin a)Fourier analizi b)Wavelet analizi (100mV) c) Wavelet analizi (250mV) d) Wavelet analizi (500mV- 100. hücre) e) Wavelet analizi (500mV-200. hücre)	92
Şekil 4.20. 400 KHz'lik sinyalin a)Fourier analizi b)Wavelet analizi (100mV) c) Wavelet analizi (250mV) d) Wavelet analizi (500mV- 100. hücre) e) Wavelet analizi (500mV-200. hücre)	96

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1. Dc voltaj değerine göre ölçülen frekans ve hesaplanan kapasite değeri	56
--	----

1. GİRİŞ

Enerji iletimi fizikte en temel konulardan biridir. Madde tanecikleri arası etkileşimin lineer olduğunun düşünülmesi, o ortamda enerji iletimi konusunun açıklanmasını engellemiştir. Yine lineerlik, maddenin genişmesini, ısı alan bir cismin termalizasyonu açıklayamamıştır. Tanecikleri düzenli olarak yerleşmiş bir kristal, enerji iletimi, termal denge, genişleme gibi konularda pratik çalışmalar yapmayı sağlayan ortamlardır.

Klasik istatistik mekanikte kristaldeki tanecikler birbirinden bağımsız birer harmonik salıncı gibi düşünülürken, kuantum mekaniksel tanımda bütün tanecikler belirli hareketin kısımları olarak düşünülür. Modern anlayışta her kip bir “Kuantum Harmonik Salıncı” olarak kabul edilir. Klasik mekanikte normal mod olarak bilinen titreşim hareketinin kuantum mekaniksel yeni tanımı fononlardır. Klasik mekanikte normal modlar dalga tabiatlı görünürken kuantum mekaniğinde bu modlar parçacık özelliği de kazanırlar. Fononlar bir katıda termal ve elektrik iletkenliğinde önemli rol oynarlar. Kristalde herhangi bir titreşim çok sayıda fononun toplamı olarak kabul edilir. Böylece kristaldeki titreşim analiz edildiğinde kristaldeki kuantum mekaniksel fonon frekansları bulunabilir. Kristale verilen düşük frekanslı bir kip diğer kiplerle etkileşirse verilen bir kipi enerjiyi diğer kiplere aktarılabilir. Böylece kristaldeki termal dengeye ulaşma, kipler arasındaki enerji eş bölüşümü (ergodiklik) ile sağlanabilir. Bu noktada, kristalde enerji eş bölüşümünün nasıl sağlanacağı önemli bir konu olarak yer almaktadır.

Uzun yıllar kristallerin lineer etkileşmeye sahip oldukları düşünülmüştür. Ortamdaki tanecikler arası etkileşme, taneciklerin bağıl yer değiştirmesinin birinci dereceden büyüklüğüne bağlı ise böyle bir ortam lineerdir. Lineer ortamlarda kipler birbirleriyle etkileşmezler. Bu sonuç enerjinin diğer kiplerce bölüşülmeyeceği gerçeğine götürür. Lineer örgü teorisinin bu yetersizliği nonlineer (anharmonik) örgü teorisinin ortaya atılmasına sebep olmuştur. Nonlineer örgü teorisine göre tanecik etkileşme kuvvetleri, lineer kuvvete ek olarak bağıl yer değiştirmelerin 2. ve 3. derece kuvvet terimlerinin eklenmesiyle sağlanır. Nonlineer termalizasyon koşulunu test etmek için *Enrico FERMI*, *John PASTA* ve *Stanislaw ULAM* adlarında üç bilim insanı 1953-1954 yıllarında zamanın en iyi bilgisayarı ile bir dizi nümerik deney yaptılar. Deneyler uyarılan en düşük frekanslı kipi ilk birkaç kiple etkileştiğini ve enerjinin daha sonra %2’lik

bir kayıpla verilen kipte geri toplandığını (recurrence) bu durumun periyodik olarak devam ettiğini gösterdi. Bu deneylerin sonuçları Nonlinear teorinin ergodikliğe garanti veremediğini gösterdi. Bu çalışma bilim tarihine FPU Paradoks olarak geçti. Paradoksu çözmek için su dalgası denklemi olarak türetilen Korteweg-de-Vries (KdV) denklemi Norman ZABUSKY ve Martin KRUSKAL tarafından sayısal olarak integre edildi. KdV denklemi nonlinear kesikli bir örgünün süreklilik limitinde (uzun dalga boyu) olarak ifade edilebilir. Yaptıkları çalışmalar nonlinear örgülerin dinamiğinin KdV denklemiyle ifade edilebileceğini ve bu denklemin çözümleriyle normal kiplerden ayrı olarak, şekillerinde herhangi bir değişme olmayan ve adlarına soliton, breather denilen nonlinear yerel kiplerin de var olabileceğini göstermiştir [1]. FPU da bunlar yerel kip veya soliton olarak bilinir.

İlk defa İskoç mühendis J.S. Russell'in solitary dalgaları keşfiyle başlayan tartışmalarda matematikte uzun yıllar önemsiz olarak görülen solitonlar nonlinear denklemlerin çözümü olarak hak ettikleri yeri aldılar. Daha sonraki çalışmalar dinamik sistemlerin bu tür kaotik davranış mekanizmasının sebebinin hemen her başlangıç koşulu için hareketin üstel karasızlığından kaynaklandığını gösterdi. Bu tür bir karasızlığın ortaya çıkmasına sebebi nonlinear rezonans etkileşmesidir.

Yukarıda bahsedilen nonlinear örgülerin inceleme yollarından biri kristal örgülere denk iletim hatları kurmaktır. Bu tür bir hat gözlenmek istenen dalga davranışına göre dağınımlı ve nonlinear özellikler içerebilir. İletim hattından elde edilen veri ve bilgiler kristallere uygulanabilir. Bu yolla koaksiyonel kablodan, fiber optik hatlara kadar geniş yelpazede pek çok ortam üzerinde sinyallerin ilerlemesi enerji taşınması araştırılabilir.

Bu çalışmada nonlinear bir boyutlu kristal bir örgünün benzetimi, Electronics Workbench programı ile kurulmuş ve kesikli bir ortam oluşturan hat üzerinde farklı frekans ve genlikli dalgaların ortamın özelliğine göre nasıl davrandığı ve KdV solitonların orta çıkış koşulları incelenmiştir. Bu çalışmanın amacı; komşu ve ikinci komşu etkileşmelerinin bulunduğu nonlinear iletim hattında dalgaların ilerlemesini Fourier ve Wavelet yöntemleriyle, genlik ve frekansına bağlılığını incelemektir.

Bu çalışmada yer alan bölümler ve içerikleri aşağıda belirtilmiştir.

Kaynak araştırması bölümünde, bir boyutlu tek atomlu lineer örgü ve bunun elektriksel eşdeğeri olan LC elektriksel iletim hattının dağınımlı ve dağınımsız özellikleri anlatılmıştır. Nonlineer örgüler ve bu örgülerin elektriksel benzetimi olan nonlinear elektriksel iletim hattı ve bu hatta ilerleyen dalgaların lineer elektriksel iletim hattından farklı olan özellikleri açıklanmıştır. Materyal ve metod bölümünde, deneylerin yapıldığı Electronics Workbench programının işlevleri açıklanmış, kullanılan iletim hatlarının bu yazılım ile nasıl hazırlandığı ve çalışmalarda kullandığımız yöntem belirtilmiştir. Çalışmada Fourier ve Wavelet yöntemleri tanıtılmış, kesikli ve sürekli veriler için uygulanma şekilleri açıklanmıştır. Fourier ve Wavelet transform yöntemleri için Matlab programı kullanılmıştır.

Bulgular ve tartışma kısmında, en yakın komşu etkileşmesinin bulunduğu nonlinear elektriksel iletim hattına gönderilen farklı frekans ve genlikli dalgalardan solitonların oluşmasına, belli frekanslarda genlikleri değiştirilen dalgaların iletim hattı üzerindeki ilerlemesine ve tüm elektriksel iletim hattı üzerindeki dalganın değişimine nonlinearliğin nasıl etki ettiği, sinyal analizi (Transient analiz), Fourier analizi ve Wavelet analizi ile gösterilmiştir. Aynı çalışma ikinci komşu etkileşmesinin olduğu iletim hattı için tekrarlanmıştır.

Sonuçlar ve öneriler kısmında çalışmalardan elde edilen sonuçlar belirtilmiş ve elektriksel iletim hattıyla yapılacak diğer çalışmalar hakkında öneriler sunulmuştur.

2. KAYNAK ÖZETLERİ / KURAMSAL TEMELLER

2.1. Bir Boyutlu Lineer Örgüler ve Fononlar

2.1.1. Bir Boyutlu Lineer Örgü Tanımı ve Modeli

Tabiattaki tüm olaylarda değişik şekillerde enerji dönüşümleri görülür. Olaylar fiziksel yönden incelendiğinde ya parçacıklar arasında ya da ortamlar arasında enerji aktarıldığı gözlenir. Maddeye aktarılan enerji cisimlerin mekanik enerji kazanmasını sağlayabilir. Bu enerji potansiyel olarak depolanabileceği gibi harekete de dönüştürebilir. Cisimler öteleme hareketi yapabileceği gibi dönme ya da titreşim hareketi de yapabilirler. Belli bir nokta etrafında git gel hareketi yapan cisme titreşim hareketi yapıyor denir. Titreşimin enerjisi ortamda ilerliyorsa bu durumda dalga hareketinden bahsedilebilir. Dalga, enerjinin bir ortamda yayılmasıdır. Dalga hareketi sırasında enerji yayılsa da ortam tanecikleri titreşim hareketi ile ortalama konumlarını korurlar.

Bir boyutlu lineer örgü, ilkel hücresinde tek bir atom bulunan bir boyutlu kristal olarak düşünülebilir. Kristaldeki atomların her biri kendi denge konumu etrafında titreşim hareketi yaparlar. Kristal modeli, atomlar arasındaki etkileşim Hook yasasına uyacak şekilde birbirlerine yaylarla bağlı kütle zinciridir. Lineer örgü modelinde atomlar arası etkileşime yerine yaylar kullanılmaktadır (Şekil 2.1). Lineer örgülerde atomlar arası kuvvet, en yakın komşu atomlar arası etkileşim dikkate alınarak atomların bağlı yer değiştirmesiyle doğru orantılıdır. Başka bir deyişle geri çağırma kuvveti sadece $-x$ yer değiştirmesine bağlı ise böyle bir sistem lineer olarak adlandırılır. Bu tür sistemleri ifade eden denklemler de lineer diferansiyel denklemler olarak adlandırılır.



Şekil 2.1. Lineer örgü modeli

Lineer denklemlerin çözümleri lineer dalga ifadesidir. Lineer bir dalga, bir ortamda sabit hızla enerji iletilmesidir. Lineer dalgaya en temel örnek olarak sinüzoidal dalga verilebilir. Böyle bir dalga

$$u(x,t) = a \sin(kx \mp \omega t + \delta) \quad (2.1.1.1)$$

bağıntısı ile gösterilebilir. Başlangıç koşullarında faz sabiti 0 seçilebilir. Dalga ifadesinde a genlik, k ve ω ise λ dalga boyu ve v frekansıyla ilişkili olarak; $k = 2\pi/\lambda$ ve $\omega = 2\pi\nu$ şeklinde yazılır. Dalga ifadesi titreşim ifadesine kx terimi eklenmesiyle elde edilir. kx titreşimin yayılmasını verir. Burada k dalga sayısı, ω ise açısal frekanstır. (1) denklemindeki “-” işareti dalganın sağa doğru ilerlediğini, “+” işareti ise sola doğru ilerlediğini gösterir. $v_f = \omega/k$ dalganın hızıdır. Bu hıza faz hızı denir. Dalganın hızı k ve ω dan bağımsız ise basit dalga

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (c = \text{sabit}) \quad (2.1.1.3)$$

denklemini ifade edilir. (2.1.1.3) denklemini klasik dalga denklemdir ve sadece u (genlik) ile orantılıdır. Denklem içerisinde u^2 ya da u^3 'e bağlı başka bir terim yoktur. İçinde u , $\frac{\partial u}{\partial t}$ ve $\frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$ gibi zamana göre türevlerinin yalnız birinci dereceli terimlerinden oluşan bir denkleme “lineer diferansiyel denklem” denir. Buna ek olarak denklemde u 'dan bağımsız bir terim bulunmazsa denkleme “homojen denklem” denir. Görüldüğü gibi klasik dalga denklemini lineer ve homojen bir denklemdir. Lineer ve homojen denklemlerin çok ilginç bir özelliği vardır: “Herhangi iki çözümün toplamı da bir çözümdür”. Bundan dolayı u_1 ve u_2 çözümleri bu dalga denkleminin iki ayrı çözümü olduğunda, bu iki çözümün toplamı da;

$$u(x,t) = u_1(x,t) + u_2(x,t)$$

dalga denkleminin çözümü olur. Buna üst üste binme (süperpozisyon) ilkesi denir. Böylece (2.1.1.3) denkleminin genel çözümü;

$$u(x,t) = \sum_k a_k \cos k(x - ct) + \sum_k b_k \cos k(x + ct) \quad (2.1.1.4)$$

şeklinde yazılır. Burada a_k ve b_k sabitlerdir. f ve g keyfi fonksiyonları cinsinden (2.1.1.4) denkleminin genel çözümü;

$$u(x,t) = f(x - ct) + g(x + ct) \quad (2.1.1.5)$$

şeklinde yazılır. (2.1.1.5) denklemi iki keyfi fonksiyon içerir çünkü (2.1.1.3) denklemi ikinci dereceden bir diferansiyel denklemdir. Lineer dalgaların bu çözümünü yazarken kompleks fonksiyonları kullanmak oldukça uygundur.

$$u(x, t) = e^{ik(x-ct)} = \cos k(x-ct) + i \sin k(x-ct) \quad (2.1.1.6)$$

(2.1.1.3) dalga denklemi;

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} - c \frac{\partial}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial}{\partial t} + c \frac{\partial}{\partial x} \right) u = 0 \quad (2.1.1.7)$$

veya

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + c \frac{\partial}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial}{\partial t} - c \frac{\partial}{\partial x} \right) u = 0 \quad (2.1.1.8)$$

şeklinde yazılabilir.

Dalgalar sağa veya sola doğru yayılabilirler. Dalganın sadece sağa doğru ilerlediğini düşünürsek dalga denklemi;

$$\frac{\partial u}{\partial t} + c \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad (c = \text{sabit}) \quad (2.1.1.9)$$

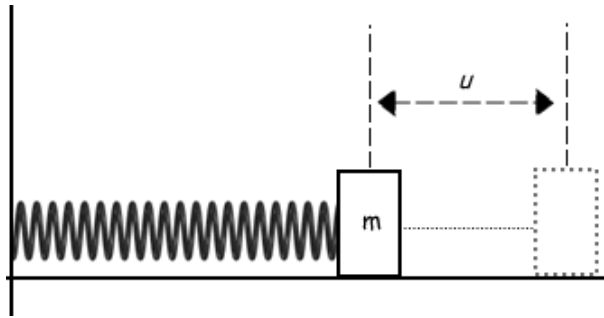
haline indirgenir.

Bir sistem çok büyük sayıda hareketli parçacıktan oluşmuş ise ve bu parçalar uzayın sınırlı bir bölgesine yerleşmişlerse, iki komşu parçacık arasındaki ortalama uzaklık çok küçük olur. Bir yaklaşıklık olarak, parçacık sayısının sonsuz olması durumunda komşu iki parçacık arasındaki uzaklığın sifıra doğru gittiği düşünülebilir. Böylece sistemin “sürekli” gibi davrandığı söylenebilir. Bu görüş, yakın kesimlerin hareketlerinin hemen hemen aynı olduğunu varsayar. Bu varsayım bir x, y, z noktasının hemen yakınındaki hareketli parçacıkların vektörel yer değiştirmelerini tek bir $u(x, y, z, t)$ vektörel büyüklüğü ile göstermemizi sağlar. Bu yüzden $u(x, y, z, t)$ yer değiştirmesi x, y, z yerinin ve t zamanının sürekli bir fonksiyonudur. Bu, tek tek parçacıkların yer değiştirmelerini gösteren $u_a(t), u_b(t)$ vb. fonksiyonların yerini alır ve artık dalgalarla uğraştığımızı söyleriz [2].

Başka bir sistem olarak kuvvet yer değiştirmenin u^2 , u^3 gibi yüksek dereceli terimlerine bağlı ise sistem nonlinear olarak adlandırılır. Nonlinear sistemler nonlinear diferansiyel denklemlerle ifade edilirler. Yer değiştirmenin yüksek sıcaklıklarda etkili olan 2. ve 3. dereceden terimleri lineer örgülerde dikkate alınmazlar. Bu model üzerinden elde edilecek bilgiler gerçek kristallere uygulanabilir. Kristal sabit uçlu olabileceği gibi L boylu halka şeklindeki periyodik sınır koşullarına uyan bir zincir de olabilir.

2.1.2. Tek Atomlu Örgüde Tanecik Etkileşmeleri

Atomlar arası kuvvet kristaldeki atomların yer değiştirmelerinin birinci dereceden bir fonksiyonu olmasından dolayı lineer örgü kavramı ortaya atılmış olduğu daha önce söylenmişti. Burada kuvvetin en yakın atomlar arası etkileşim kuvveti olduğu varsayılıp daha uzak tanecik etkileşimleri göz önünde bulundurulmaz.



şekil 2.2. Sürtünmesiz ortamda kütle yay sistemi

Komşu atomlar arasındaki etkileşimi anlatabilmek için Hook yasasından faydalanarak, kütle yay sistemi göz önüne alınabilir (şekil 2.2). Sürtünmenin önemsiz olduğu durumda kuvvet

$$F = -Ku \quad (2.1.2.10)$$

ifadesi ile verilir. (2.1.2.10) eşitliğinden de görülebileceği gibi kuvvet u yer değiştirmesinin lineer fonksiyonudur. Eşitlikte K yay sabitidir. F kuvveti kütlede

$$E = \frac{1}{2} Ku^2 \quad (2.1.2.10)$$

şeklinde bir potansiyel enerji depolanmasına neden olur. Kütle yay sistemindeki bilinenlerden yola çıkılarak içinde N sayıda atom olan bir örgüde s. atomun bağlı yer değiştirmesi u_s ise bu atoma etkiyen kuvvet

$$F_s = K(u_{s+1} + u_{s-1} - 2u_s) \quad (2.1.2.11)$$

dir. Newton'un hareket denklemini ve Hook yasasını birleştirilmesi ile

$$F_s = ma = m \frac{d^2 u_s}{dt^2} = K(u_{s+1} + u_{s-1} - 2u_s) \quad (2.1.2.12)$$

eşitliği elde edilir. Bu denklemin çözümü ile de s. taneciğin yer değiştirmesi

$$u_s = u_0 e^{i(ska - \omega t)} \quad (2.1.2.13)$$

olarak elde edilir. (2.1.2.13) bağıntısında k, n. kipi dalga vektörü, u_0 taneciğin denge konumundan ilk uzaklığı (başlangıç koşulu), K tanecikler arası etkileşimi veren kuvvet sabiti ve a da örgü atomları arasındaki uzaklıktır. (2.1.2.13) bağıntısının (2.1.2.12) bağıntısında yazılmasıyla s taneciğin dolayısıyla kipteki tüm taneciklerin frekansı

$$\omega_n = 2 \sqrt{\frac{K}{m}} \sin \frac{k_n a}{2} \quad (2.1.2.14)$$

bulunur. (2.1.2.14) bağıntısı *dağınım bağıntısı* olarak adlandırılır. Çok parçalıklı bir sistemin çok çeşitli hareketleri gözlenebilir. Bu hareketlerden özel bir durumda sistemin tanecikleri basit harmonik hareket yapıyorsa başka bir deyişle her bir tanecik $u = 0$ denge konumundan aynı anda geçiyor ve her bir kısma etkiyen geri çağırıcı kuvvet eşit ise sistemin bu özel davranışı kip olarak adlandırılır. Sürekli bir sistemin kiplerine duran dalgalar, normal kipler veya kısaca kipler denir. Sürekli bir sistem sonsuz sayıda hareketli parçacıktan oluşmuştur. Böylece sonsuz sayıda serbestlik derecesi olduğu söylenebilir. Ancak bir boyutlu kristal örgüde belli miktarda tanecik olacağından titreşim kiplerinin sayısı sonsuz değildir. Ayrıca böyle bir sistemde ilk birkaç kipten fazlasını uyarmak pratikte mümkün değildir. Bir boyutlu örgüde tanecik sayısı kadar normal mod (kip) ve her kipi frekansının farklı olmasından dolayı tanecik sayısı ile dalga vektörü arasında doğrudan bir ilişki vardır.

n. kipi dalga sayısı $k_n = \frac{n\pi}{(N+1)a}$, $\lambda_n = 2L/n$ ve $L = (N+1)a$ bilinenlerinden

n. kipi dalga vektörü

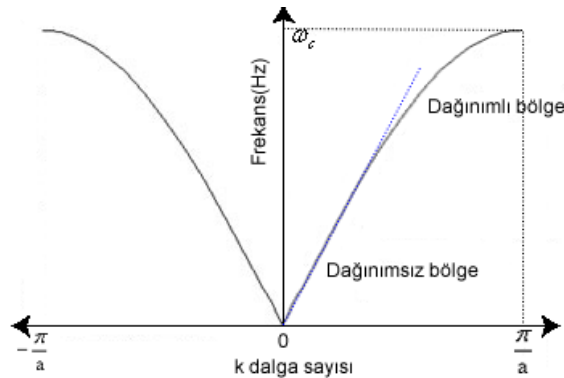
$$k_n = \frac{n\pi}{(N+1)a} \quad (2.1.2.15)$$

olarak bulunur. k_n değeri (2.1.2.14) dağılım ifadesinde yerine yazılırsa

$$\omega_n = 2\sqrt{\frac{K}{m}} \sin \frac{n\pi}{2(N+1)} \quad (2.1.2.16)$$

eşitliği elde edilir. Kip sayısı **n**, N tanecik sayısı ile sınırlı olacağından n. kip için bu ifade $k = \frac{\pi}{a}$ için $\omega_c = 2\sqrt{\frac{K}{m}}$ maksimum değerindedir. Buna *üst kesim frekansı* denir. $0 \leq \omega \leq \omega_c$ frekans aralığı, tüm olası frekans bölgesini verir. Maksimum frekandan (ω_c) daha büyük frekansa sahip bir salınım verildiğinde bu salınım örgü içerisinde ilerleyemez. Böylece kesikli bir örgü, ω_c eşik değerli alt-geçirim süzgeci olarak görev yapar. $k = \pm \frac{\pi}{a}$ değerleri *1. Brillouin Bölgesinin* sınırlarıdır.

Tek atomlu en yakın komşu erimli lineer sürekli ortamın sistemin dağılım ifadesi şekil 2.3' deki gibi olacaktır.



Şekil 2.3. (2.1.2.16) bağıntısının çizimi: Lineer kesikli örgütün dağılım eğrisi

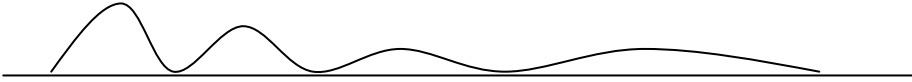
Şekil 2.3'de negatif k değerleri için grafik ω eksenine göre simetriktir. Grafikte görüldüğü gibi dağılım eğrisi noktalı çizgiye kadar sabit eğime sahiptir. Grafiğin

eğimine $v_g = \frac{d\omega}{dk}$ grup hızı denir. Fazın değişimini veren faz hızı $v_f = \frac{\omega}{k}$ ifadesi sabitse böyle bir ortama dağınimsız (nondispersif) ortam denir. Grafikte dağınimsız bölgede frekans dalga sayısına lineer bağlıdır. Dağınimsız bölgede bütün kipler aynı hızla ilerler. Bu durumda dalga şeklini bozmadan ilerler (şekil 2.4).



şekil 2.4. Lineer dağınimsız bir ortamda dalganın şeklinin bozulmadan ilerlemesi

Faz hızı dalga sayısından bağımsız değilse ortam bu defa dağınımlı (dispersif) başka bir değişle dağıtkan olarak adlandırılır. Dağınımlı ortamlarda dalganın faz hızı dalga sayısına (ya da frekansa) bağlı olduğu için farklı frekanslı dalga bileşenleri farklı hızlarla ilerleyecektir. Ayrılan dalga bileşenleri dalganın dağılmasına sebep olacaklardır (şekil 2.5)



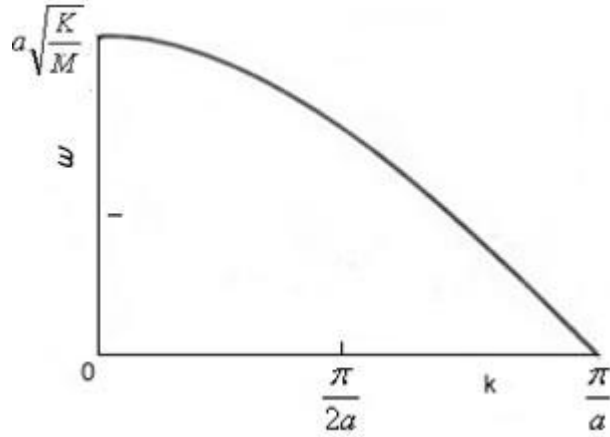
şekil 2.5. Lineer dağınımlı bir ortamda dalganın ilerlerken şeklinin değişmesi

şekil 2.3'de grafiğin eğimi dağınımlı bölgede azalır bu sonuç kristaldeki elastik dalganın $k = \pm \frac{\pi}{a}$ için ilerlemediğini yani enerjinin-dalga paketinin iletilmediğini gösterir. Matematiksel ifade

$$\omega_n = 2\sqrt{\frac{K}{m}} \sin \frac{ka}{2}$$

$$v_g = \frac{d\omega}{dk} = -a\sqrt{\frac{K}{M}} \cos \frac{ka}{2} \Big|_{k=\frac{\pi}{a}} = 0 \quad (2.1.2.16)$$

şeklinde ifade ve ispat edilebilir. Grup hızın k dalga sayısına bağlılığı şekil 2.6'da gösterilmiştir [3].



Şekil 2.6. Gurup hızının k ile değişimi

$a \rightarrow 0$ için örgü sürekli hal alır. Buna *süreklilik limiti* denir. Bu limite $ka \ll 1$ olacaktır. Bu durumda küçük ka değerleri için $\sin \frac{ka}{2}$ 'nin Taylor seri açılımından $\sin \frac{ka}{2} \approx \frac{ka}{2}$ (radyan cinsinden) olarak

$$\omega = \sqrt{\frac{Ka^2}{M}}k \quad (2.1.2.16)$$

haline gelir. (2.1.2.16) bağıntısı bir doğrusal denklemdir. Bu durumda frekans dalga vektörüne lineer bağlı yani kristaldeki elastik dalganın (sesin) yayılma hızı sabittir. Elastik dalga kristal hangi kipte titreşirse titreşsin aynı hızla ilerleyecektir (Şekil 2.7).



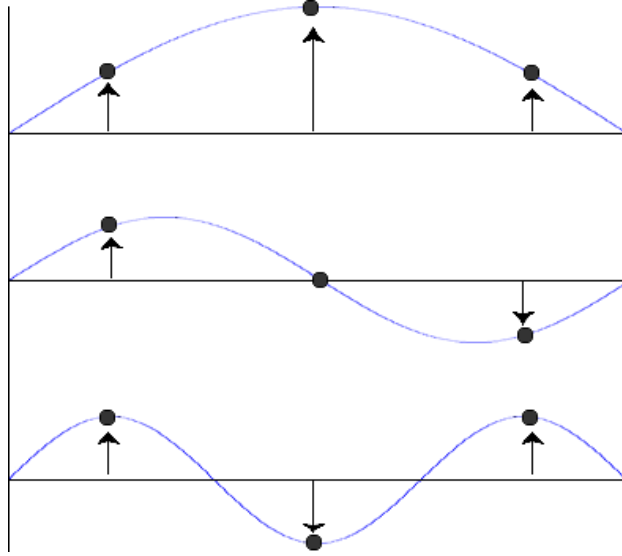
Şekil 2.7. Dağılım bağıntısının çizimi: Linear sürekli ortamın dağılım eğrisi

2.1.3. Fononlar

Klasik anlayışta bir kipte hareket eden taneciklerin hepsi birden aynı frekansla hareket eden harmonik salıncı olarak düşünülür. N parçalıklı sistemde j. kipte s. parçacığın uzanımı

$$u_s = u_0 \text{Sin} \frac{j\pi s}{N+1} \quad (2.1.3.1)$$

ifadesi ile verilir 1. kip hariç uç noktalar arasında bazı noktaların uzanımı sıfırdır. Bu noktalara düğüm noktası denir. Bir boyutlu bir atom zincirinin ilk üç kipi şekil 2.8'da gösterilmiştir.



Şekil 2.8. Bir boyutlu üç parçacıklı bir zincirinde sinüs dalgası şeklindeki ilk üç kipte taneciklerin hareketi

Klasik anlayışta kristaldeki her kip bir klasik harmonik salıncı olarak düşünülürken modern anlayışta her kip bir “*Kuantum Harmonik Salıncı*” olarak düşünülür. Fononlar klasik mekanikte normal kip olarak bilinen titreşim hareketinin kuantum mekaniksel yeni tanımıdır. Fonon, kristal sistemlerdeki kuantalanmış titreşimdir. Klasik mekanikte normal kipler dalga olarak görünürken kuantum mekaniğinde bu kipler parçacık özelliği de kazanırlar. Işıktaki foton kavramından benzetilerek kristal titreşim kipleri fonon adını almıştır. Fononlar bir katıda termal ve elektrik iletkenliğinde önemli rol oynarlar. Özellikle yalıtılmış bir katıda fononlar ısı iletiminde birincil rol oynarlar.

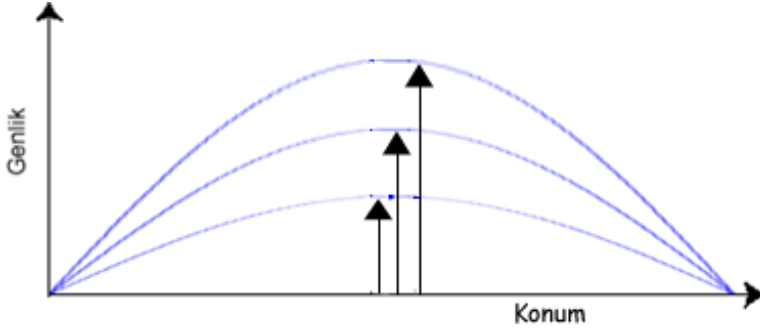
Klasik anlayışta bir kipin enerjisi bu kipteki tüm taneciklerin enerjileri toplamıdır. Bu toplam E ile gösterilirse N tanecikli bir sistemin enerjisi

$$E = \sum_{i=1}^N \frac{1}{2} m v_i^2 + \sum_{i=1}^N \frac{1}{2} K x_i^2 \quad (2.1.3.2)$$

ile verilirken kuantum mekaniğinde j . kipin enerjisi

$$E = \left(\frac{1}{2} + n \right) \hbar \omega_j \quad (2.1.3.3)$$

ile verilir. (2.1.3.3) eşitliğinde j kip numarası, n kipten uyarılma durumudur. Burada ilgi çekici bir nokta $n=0$ için sıfır nokta enerjisinin ortaya çıkmasıdır. Bu durumda kristal önemli titreşimler yapar. Sıfır nokta durumunda enerji pozitiftir. ω frekanslı bir kip n sayısına göre farklı genliklerde hareket edebilir. n sayısı arttıkça kipten genliği dolayısıyla titreşimin enerjisi de artacaktır. Şekil 2.9 farklı genliklerde 1.kipten durumunu göstermektedir.



Şekil 2.9. 1. kipten $n=1,2,3$ için kuantum durumları

Kristaldeki herhangi bir titreşim birçok normal kiplerin bir bileşimidir. Titreşim dalgasının bu kiplerin bir süper pozisyonu olmasından dolayı titreşimin enerjisi tüm kiplerin kuantum durumları üzerinden toplamıyla bulunur. Bu işlem dalga fonksiyonunun *Fourier çözümlenmesi* ile yapılır.

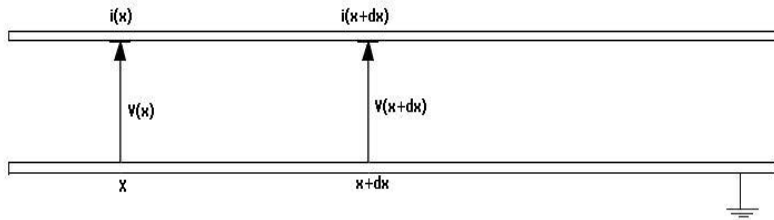
2.2. Lineer İletim Hatlarında Dalgalar

Günümüzde lineer iletim hatları bütün bilgisayar sistemlerinde hayati bir rol oynar. Paralel tel hatları, açık tel formunda koaksiyel kablolarda ve mikro şeritlerde hala yaygın olarak kullanılmaktadır. Bir boyutlu atomik örgünlere karşılık gelen lineer iletim hatları sönüm önemsenmeden dağınımlı ve dağınımsız olarak iki gruba ayrılabilir.

2.2.1. Lineer ve Dağınımsız İletim Hatlarında Dalgalar

Lineer dağınımsız iletim hattı şekil 2.10'daki gibi iki telli sürekli bir hattır. Tek yönlü x boyutunda akım $i(x,t)$ ile gösterilirse x den dx kadar ilerlendiğinde akım $i(x+dx)$ olur. x noktasında topraklı tel ile iletim teli arasındaki potansiyel fark $V(x)$ ise tel üzerinde x den dx uzaklıktaki tel noktaları arasındaki potansiyel fark

$V(x+dx)$ dir. Taşıyıcı telin özindüksiyonu ve toprak teli ile taşıyıcı tel arasındaki potansiyel fark elektriksel enerji birikmesine sebep olur.



Şekil 2.10. Sürekli iki telli iletim hattı[4]

Hatta l birim uzunluğun indüktansı; c birim uzunluğun kapasitansıdır. Sistem dx uzunluklu lc ünitelerinden oluşur ve sürekli dir. Bu yapı kütle yay sistemine benzer: m birim uzunluğun kütlesine bu iletim hattında l birim uzunluğun indüktansı; K birim uzunluğun kuvvet sabitine birim uzunluğun kapasitansının tersi $1/c$ değeri karşılık gelir. Gerçek sistemlerde hem iletim telinin direnci hem de iki tel arasındaki kapasitanslar kayba yol açar. Kirchhoff yasasından birim ünite için potansiyel değişimi

$$V(x) - V(x + dx) = dx \frac{\partial \Phi}{\partial t} \quad (2.2.1.1)$$

Denklemleri ile verilir. Burada $V(x)$, x konumunda iki tel arasındaki potansiyel fark; $\Phi = li$ birim uzunluk başına iki iletken arasındaki magnetik akıdır. Lineer durumda l , i 'den bağımsızdır. Böylece (2.2.1.1) denkleminin sağ kısmı

$$V(x) - V(x + dx) = dx \frac{\partial li(x)}{\partial t} \quad (2.2.1.2)$$

$$V(x) - V(x + dx) = dxl \frac{\partial i(x + dx)}{\partial t} \quad (2.2.1.3)$$

olarak elde edilir. Küçük dx değerleri için Taylor seri açılımından x ve $x+dx$ noktaları arasındaki akım farkı iletken teller arasındaki akıma eşittir. Fark denklemi

$$i(x) - i(x + dx) = dx \frac{\partial q(x)}{\partial t} \quad (2.2.1.4)$$

olarak elde edilir. Yük gerilimin lineer fonksiyonu olduğu zaman c, V den bağımsız olur.

$q = cV$, (2.2.1.4) denkleminde yazılırsa

$$i(x) - i(x + dx) = dx c \frac{\partial V(x)}{\partial t} \quad (2.2.1.5)$$

olarak yeni şekilde yazılabilir. dx çok küçük olduğunda (2.2.1.2) ve (2.2.1.4) denklemleri diferansiyel denklemler takımı olarak yazılabilir.

$V(x) - V(x + dx) = -\partial V(x)$ ve $i(x) - i(x + dx) = -\partial i(x)$ kullanılırsa

$$\frac{\partial V}{\partial x} = -l \frac{\partial i}{\partial t} \quad (2.2.1.6-a)$$

$$\frac{\partial i}{\partial x} = -c \frac{\partial V}{\partial t} \quad (2.2.1.6-b)$$

denklemleri elde edilir. Bu denklemlerden (2.2.1.6-a) x'e göre; (2.2.1.6-b) t'ye göre türevlenirse

$$-\frac{1}{l} \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 i}{\partial x \partial t} \quad (2.2.1.7-a)$$

$$\frac{\partial^2 i}{\partial t \partial x} = -c \frac{\partial^2 V}{\partial t^2} \quad (2.2.1.7-b)$$

denklemleri elde edilir. İki denklemin birleştirilmesinden telgraf denklemi denen

$$\frac{\partial^2 V}{\partial t^2} - \frac{1}{lc} \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} = 0 \quad (2.2.1.8-a)$$

denklemi elde edilir. Benzer şekilde bu defa (2.2.1.6) denklemlerinden ilkinin t'ye ikincisinin x'e göre türevi alınarak

$$\frac{\partial^2 i}{\partial t^2} - \frac{1}{lc} \frac{\partial^2 i}{\partial x^2} = 0 \quad (2.2.1.8-a)$$

denklemini elde edilir. Burada

$$\frac{1}{\sqrt{lc}} = v_0 \quad (2.2.1.9)$$

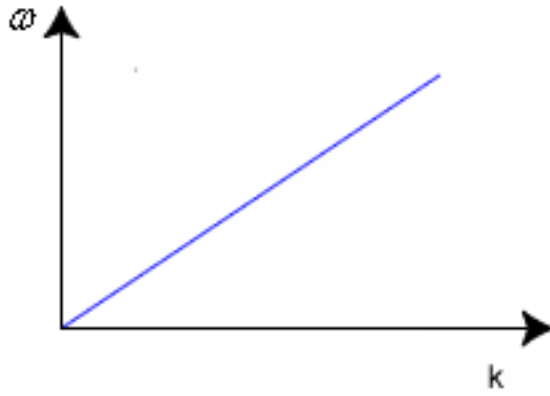
lineer dalğanın yayılma hızıdır. Bu hız sadece birim uzunluğun kapasitansına ve indüktansına bağlıdır. Hızın sabit indüktans ve sabit kapasitansa bağlı olması lineer dağınımsız hatta dalğanın yayılma hızının kiplere bağlı olmadığını başka bir değişle frekanslardan bağımsız olması gerektiğini, frekanslardan bağımsız olarak bütün dalgaların aynı sabit v_0 hızı ile yayılması gerektiğini söyler. (2.2.1.8) denklemleri $X = x - v_0.t$; $T = x + v_0.t$ şeklinde yeni değişkenlerle tanımlanabilir. X , x yönünde ilerleyen dalgayı; T , $-x$ yönünde ilerleyen dalgayı gösterir. Bu durumda

$$V = f(X) + g(T) = f(x-v_0t) + g(x+v_0t) \quad (2.2.1.10)$$

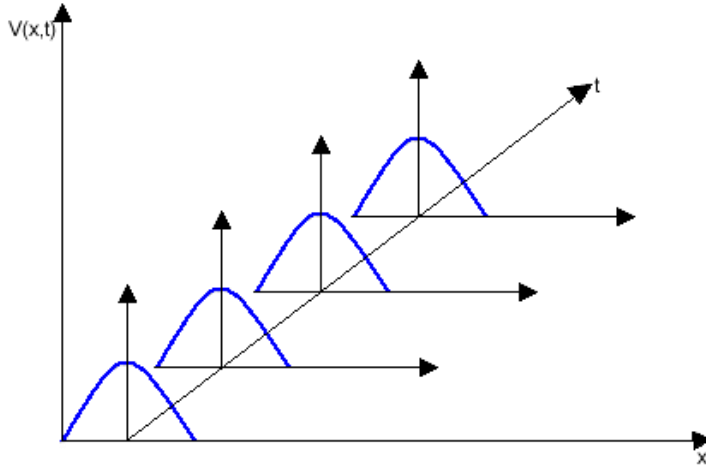
olarak yazılabilir. $+x$ yönünde ilerleyen bir sinüzoidal dalga göz önüne alındığında, bu dalğanın potansiyel ifadesi $V(x,t) = f(x-v_0.t)$ olarak yazılır. Zaman ve konuma bağlı voltaj eşitliği

$$V(x,t) = V_0 \text{Cos}k(x-v_0t) = V_0 \text{Cos}(kx-\omega t) \quad (2.2.1.11)$$

ifadesi ile verilir. V_0 maksimum voltaj genliğidir. Burada $k(x-v_0t) = (kx-\omega t) = \theta(x,t)$ dalğanın fazı, $v_0 = \frac{\omega}{k}$ = sabit faz hızıdır. Böyle bir dalga için dağınım eğrisi şekil 2.11'de gösterilmiştir. Dağınımsız ortamda atmanın bütün bileşenleri aynı hızla ilerleyeceğinden atma şeklini bozmadan ilerler (Şekil 2.12).



Şekil 2.11. Dağınımsız ortamda ω -k ilişkisi



Şekil 2.12. Lineer ve dağınımsız iletim hattında atmanın şeklini bozmadan ilerlemesi

2.2.1.1. Grup hızı

Sinüzoidal dalgaların bir süperpozisyonu olan gruplar, iletim hattında

$$v_g = \frac{d\omega}{dk} \quad (2.2.1.12)$$

hızı ile yayılırlar. Grupların oluşturduğu zarf dalgası grup hızı ile yayılır. Zarf dalgasının yayılma hızına grup hızı denir. Faz hızı eşitliği ile (2.2.1.12) eşitliği ile birleştirilirse

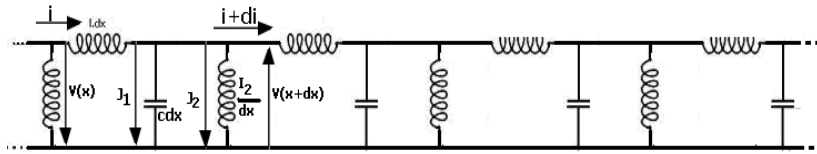
$$v_g = v_0 = \frac{d\omega}{dk} = v \quad (2.2.1.13)$$

elde edilir. Bu ifadeden grup hızının lineer dağınımsız ortamdaki dalga hızına eşit olduğu görülür. Böyle bir ortamda faz hızı grup hızına eşittir.

Faz hızı dalga sayısına bağlı olduğu zaman dağınım etkisi ortaya çıkar. Özellikle farklı hızlarda yayılan dalgalar birbirinden ayrılır.

2.2.2. Lineer ve Dağınımlı İletim Hatlarında Dalgalar

Lineer dağınımlı iletim hattı, lineer dağınımsız iletim hattında c kapasitörüne paralel ikinci bir l_2 indüktörü eklenerek elde edilir. Sistemin bir modeli şekil 2.13 'de gösterilmiştir.



Şekil 2.13. Dağınımlı iletim hattının gösterimi

Sistemde,

$$\frac{\partial V}{\partial x} = -l \frac{\partial i}{\partial t} \quad (2.2.2.1-a)$$

$$\frac{\partial i}{\partial x} = -(J_1 + J_2) \quad (2.2.2.1-b)$$

$$J_1 = \frac{\partial q}{\partial t} dx ; \frac{l_2}{dx} \frac{\partial J_2}{\partial t} = V \quad (2.2.2.1-c)$$

olmak üzere (2.2.2.1) denklemleri birleştirilirse

$$\frac{\partial^2 V}{\partial t^2} - \frac{1}{lc} \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{V}{l_2 c} = 0 \quad (2.2.2.2)$$

denklemi elde edilir. Denklemde $v_0 = \frac{1}{\sqrt{l_1 c}}$ ve $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{l_2 c}}$ dir.

(2.2.2.2) denklemine *Klein-Gordon* denklemi denir ve dağınımlı bir denklemdir.

Denklem

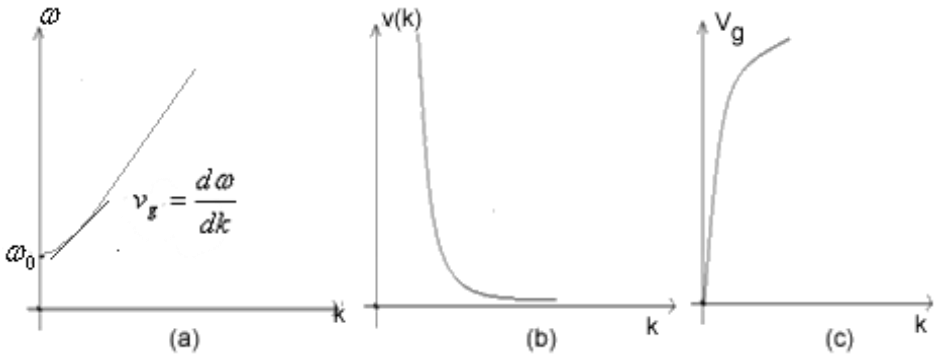
$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 + v_0^2 k^2} \quad (2.2.2.3)$$

şeklinde dağınım bağıntısını verir. Faz ve grup hızları k dalga sayısına bağlıdır.

$$v(k) = \frac{\omega}{k} = \frac{1}{k} \sqrt{\omega_0^2 + v_0^2 k^2} \quad (2.2.2.4-a)$$

$$v_g(k) = \frac{d\omega}{dk} = \frac{v_0^2 k}{\sqrt{\omega_0^2 + v_0^2 k^2}} \quad (2.2.2.4-b)$$

$k > 0$ için (2.2.2.3) denklemi Şekil 2.14 a ile (2.2.2.4 a-b)denklemleri Şekil 2.14 b-c ile gösterilmiştir.



Şekil 2.14. Lineer ve dağınımlı iletim hattında a) Dağınım eğrisi b) Faz hızının k 'ya göre grafiği c) Grup hızının k ya göre grafiği

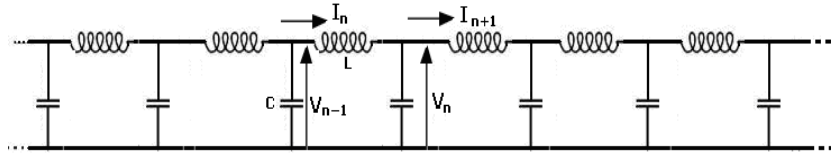


Şekil 2.15. Lineer ve dağınımlı ortamda atma genişleyerek ilerler.

Voltaj atması dağınımlı hatta ilerlerken yayılarak bozular. Çünkü atma farklı hızlarda yayılan sinüsel dalgaların bir süper pozisyonudur. Bu nedenle dağınımlı ortamda atmayı oluşturan bu dalgalar farklı hızlarla birbirinden ayrılarak atmayı dağıtırlar.

2.2.2.1. Kesikli elektriksel iletim ağı

Dağınımlı elektriksel hattı oluşturmanın diğer bir yolu lineer indüktör L, lineer kapasitör C gibi aynı elemanlardan oluşan özdeş N sayıda hücrelerden oluşan elektriksel ağ kurmaktır. Böyle bir ağ bir boyutlu lineer dağınımlı atomik bir örgünün elektriksel modelidir ve kesiklidir. Şekil 2.16 böyle bir ağı göstermektedir.



Şekil 2.16. Bir boyutlu mono atomik örgüye karşılık gelen kesikli elektriksel ağ

İlk yaklaşıklıkta küçük dağılmaları ve heterojenlikleri ihmal edilerek $V_n(t)$, n. kapasitörün uçları arasındaki gerilim; $I_n(t)$, n. indüktans boyunca akım olmak üzere Kirchhoff yasasından

$$V_{n-1} - V_n = \frac{d\Phi_n}{dt} ; I_n - I_{n-1} = \frac{dQ_n}{dt} \quad (2.2.2.1.1)$$

denklemleri elde edilir.

$\Phi_n = LI_n$ magnetik akısı ve $Q_n = CV_n$ kapasitör üzerindeki yük (2.2.2.1.1) denklemleri ile birleştirilirse $V_n(t)$ ve $I_n(t)$ diferansiyel denklem sistemleri elde edilir.

$$\frac{d^2V_n}{dt^2} = \frac{1}{LC} (V_{n+1} + V_{n-1} - 2V_n) ; n=1,2,3,\dots \quad (2.2.2.1.2-a)$$

$$\frac{d^2 I_n}{dt^2} = \frac{1}{LC} (I_{n+1} + I_{n-1} - 2I_n) ; n=1,2,3,\dots \quad (2.2.2.1.2-b)$$

(2.2.2.1.2-a) denkleminin çözümünün

$$V_n(t) = V_0 R_e \exp[i(\omega t - \kappa n)] \quad (2.2.2.1.3)$$

olduğu olarak kabul edilirse dağılım bağıntısı

$$\omega = \omega_c \left| \text{Sin} \frac{\kappa}{2} \right| \quad (2.2.2.1.4)$$

olarak elde edilir. Faz hızı $v(\kappa) = \frac{\omega_c}{\kappa} \left| \text{Sin} \frac{\kappa}{2} \right|$ kip numarasına bağlıdır. Uzun dalga boyu limitinde ($\kappa \rightarrow 0$), $v(\kappa) = \frac{\omega_c}{\kappa}$; ω_c kesme frekansı olarak bilinir ve bu frekansın üzerindeki hiçbir dalga iletim hattında yayılamaz. Grup hızı

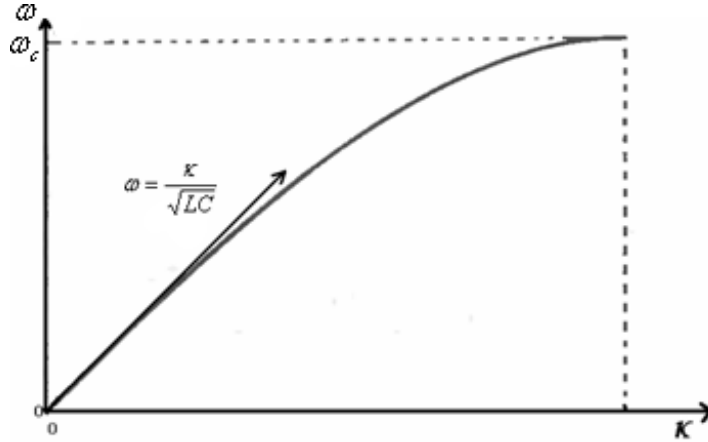
$$v_g(\kappa) = \frac{\omega_c}{2} \left| \text{Cos} \frac{\kappa}{2} \right| \quad (2.2.2.1.5)$$

olarak elde edilir. $\kappa = 0$ ve $\kappa = \pm \pi$ için 1. Brillouin bölge sınırında

$$v_g(0) = \frac{\omega_c}{2} = v_0 \quad (2.2.2.1.6-a)$$

$$v_g(\pm\pi) = 0 \quad (2.2.2.1.6-b)$$

grup hızı değerleri elde edilir. Burada, önceki iletim hattına zıt olarak dağılım boyunadır. Dağılım periyodik LC ünitelerinden oluşan elektrik ağı yapısından kaynaklanır. Önceki durumda olduğu gibi atma ağ boyunca yayılır.



Şekil 2.17. $\omega=f(\kappa)$ grafiği LC iletim hattının dağılım bağıntısı

2.3. Bir Boyutlu Nonlinear Örgüler

2.3.1. Nonlinear Örgü Teorisi

Lineer örgü modelinde taneciler sabit denge noktası etrafında maksimum u_0 genlikli salınım hareketi yapar; ilkel hücrede depolanan potansiyel enerji ikinci dereceden terimlerle sınırlıdır. Taneciğin bağıl yer değiştirmesi ile depolanan bir periyotluk ortalama üzerinden potansiyel enerji $E = \frac{1}{2} K u_0^2$ ile verilir. Lineer teoride kuvvetin yer değiştirmenin lineer fonksiyonu olmasından dolayı

- Termal genişleme olmaz,
- Eriye görülmez,
- Örgü dalgaları zamana göre şeklini bozmaz ve birbirlerinden etkilenmez,
- Isı iletim katsayısı sonsuzdur,
- Enerji eş ölüşümü görülmez,
- Elastik sabitler basınçla değişmez.

Lineer örgü teorisi ile bir kristalin davranışlarını açıklamak neredeyse imkânsızdır. Lineer teoriye göre atomlar denge noktaları etrafında titreşim yapacaklarından (kristale verilen enerji arttıkça taneciklerin titreşim genlikleri sadece artar) kristalin genleşmesi söz konusu olamayacaktır. Ayrıca kristalde üç fonon olayı ile iki fononun etkileşiminden üçüncü bir fonon yaratıldığı gözlenmiştir. Lineer örgü teorisine göre ısı iletimi sonsuz kısa sürede olmalıdır. Oysa ısı iletimi katının uzunluğuna ve uçları arasındaki sıcaklık farkına bağlıdır.

Klasik istatistik mekaniğe göre N parçalıklı bir sistemde herhangi bir s . parçacığa verilen enerji diğer parçacıklara eşit olarak paylaşılacaktır. *Eş-bölüşüm ilkesi* olarak adlandırılan bu ilke aynı zamanda *ergodiklik* olarak da bilinir. Lineer örgüler, etkileşimin tabiatı gereği ergodikliğe izin vermezler. Lineer bir örgüde bir kip uyarıldığında, diğer kiplerle etkileşmeyeceği için enerji zamanla diğer kiplere aktarılmaz. Bundan dolayı lineer bir örgü, eş bölüşüm ilkesine göre hiçbir zaman denge durumuna ulaşamaz. Bu durum “ergodik olmayan” durum (nonergodicity) olarak adlandırılır [5].

1914 yılında Debye tarafından, nonlinear bir sistem olması durumunda normal kiplerin birbirleriyle etkileşeceği ve ısısal enerji yayılımı ile sonlu bir ısısal iletkenliğin meydana gelebileceği öne sürülmüştür [6]. Ayrıca Peierl tarafından da nonlinear etkileşmelerin, ısısal denge ve eşbölüşüm ilkesinin bir sonucu olan her kipe eşit miktarda enerji akışına neden olabileceği ileri sürülmüştür [7].

Anharmonik etkileşmeler olarak da bilinen nonlinear etkiler atomlar arası kuvvete bağlı yer değiştirmelerin 2., 3. dereceden terimleri eklenmesiyle ifade edilebilir. Bunun sonucu olarak ilkel hücrede depolanan potansiyel enerji ifadesinde 3. ve 4. dereceden terimleri görülür.

Nonlinear örgüde kuvvet ifadesi

$$F = -au - bu^2 - cu^3 \quad (2.3.1.1)$$

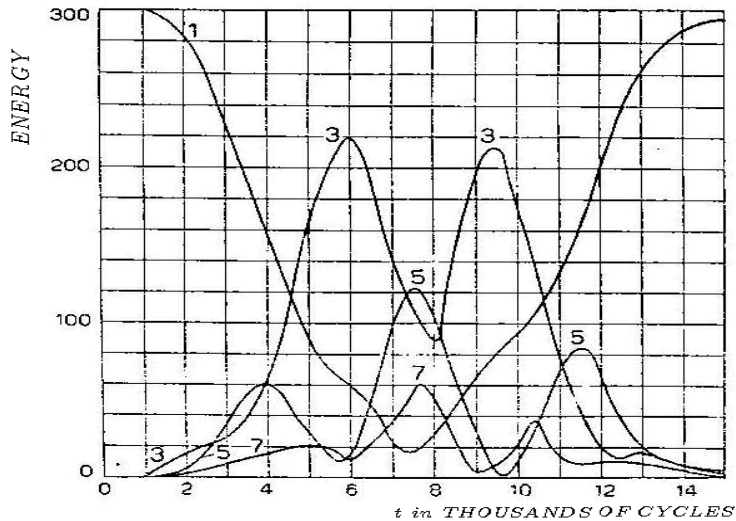
olarak verilir. Bu kuvvet kristal hücrede

$$U = -au^2 - \beta u^3 - \gamma u^4 \quad (2.3.1.2)$$

şeklinde potansiyel oluşturur. Düşük sıcaklıklarda nonlinear terimler ihmal edilebilir.

2.3.2. FPU Paradoks ve Çözümleri

Debye'in önerisinden yıllar sonra *Enrico FERMI*, *John PASTA* ve *Stanislaw ULAM* adlarında üç bilim insanı ergodiklik koşulunu gözlemek için Mary TSINGOU' dan programlama desteği alarak 1953-4 yıllarında Los Alamos 'da zamanın en iyi bilgisayarı olan MANIAC (Mathematical Analyzer Numerical Integrator And Computer) ile nümerik deney yaptılar [8]. Deneyin amacı nonlineer örgüde termalizasyon oranını bulmaktı. Deneyde birbirine atomlar arası etkileşim kuvveti zayıf nonlineer terimleri gösteren nokta kütlelere bağlı yaylar olan model kullanıldı. Sonuçlar beklenildiği gibiydi, ancak bir gün bilgisayarı uzun süre açık bırakıp geri döndüklerinde çalışmaya daha fazla zaman bulan program enerjinin tekrar 1. modda toplandığını gösterdi. Defalarca yapılan deneyler sonucunda enerji düşük kipten yüksek kiplere doğru akıyor ancak tekrar verilen kipte geri toplanıyordu, ayrıca enerjinin *Recurrence* denen bu davranışı periyodik olarak devam ediyordu: Enerji periyodik olarak düşük kiplerden yüksek kiplere aktarılıp tekrar %2 lük bir kayıpla verilen kipte toplanıyor (FPU recurrence phenomena). Deneylerde 32 ve 64 parçacıklı sistemlerin 1. modunun uyarılması ile ortaya çıkan enerjinin dağılım grafiği şekil 2.18'de gösterilmiştir. Daha sonraki yıllarda yapılan çalışmalar aynı fenomenin tekrarlandığını ayrıca *Super-Recurrence* periyodunun var olduğunu gösterdi. FPU paradoksu olarak bilinen bu olay nonlineerliğin de ergodikliğe garanti veremediğini göstermişti.



Şekil 2.18. FPU recurrence grafiği

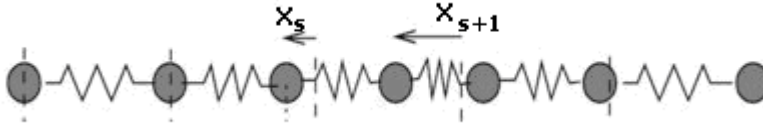
FPU sayısal hesaplama için tanecikler arası etkileşimin lineer olduğu kuvvet ifadesine bir deneyde quadratik kuvvet terimi diğerinde ise kübik kuvvet terimi ekleyerek nonlinear yaylardan oluşan sistemin modeli üzerinde çalıştılar. Deneyler 32 ve 64 parçacıklı sistemler üzerinde $X_0=X_{N+1}=0$ için gerçekleştirilmiş olup en yakın komşu atomların etkileştiği, diğer uzak atomlar arasında etkileşme olmadığı kabul edilmiştir. Deneylerde 1,2,3 gibi düşük modlar uyarılmıştır. s. parçacığa etkileyen nonlinear quadratik terimli kuvvet ifadesi,

$$F_s = (x_{s+1} + x_{s-1} - 2x_s) - \beta[(x_{s+1} - x_s)^2 - (x_s - x_{s-1})^2] \quad (2.3.2.1-a)$$

ve nonlieer kübik terimli kuvvet ifadesi

$$F_s = (x_{s+1} + x_{s-1} - 2x_s) - \gamma[(x_{s+1} - x_s)^3 - (x_s - x_{s-1})^3] \quad (2.3.2.1-b)$$

şeklinde kullanılmıştır. Kolaylık açısından $K=M=1$ alınmış olup x_s , s. taneciğin bağıl yer değiştirmesini; β ve γ nonlinear katsayıları göstermektedir. Şekil 2.19 nonlinear örgü modelini göstermektedir.



Şekil 2.19. FPU tarafından kullanılan nonlinear örgü modeli

Böyle bir örgünün birim hücresinde denklemler (2.3.2.1 a-b)' ye göre sırasıyla

$$U = -\frac{1}{2}[(x_{s+1} - x_s)^2 + (x_{s-1} - x_s)^2] - \frac{\beta}{3}[(x_{s+1} - x_s)^3 + (x_{s-1} - x_s)^3] \quad (2.3.2.2-a)$$

$$U = -\frac{1}{2}[(x_{s+1} - x_s)^2 + (x_{s-1} - x_s)^2] - \frac{\gamma}{4}[(x_{s+1} - x_s)^4 + (x_{s-1} - x_s)^4] \quad (2.3.2.2-b)$$

şeklinde potansiyel enerji depolanacaktır. (2.3.2.2 a-b) potansiyel eşitliklerinde x^2 li terimler lineer katkıyı, diğer terimler nonlinear katkıyı β ve γ ise nonlinear terimlerin kuvvetini gösterir. (2.3.2.2 a-b) denklemleri kesikli denklemlerdir. Daha önce söylendiği gibi örgü dinamiği teorisinde, kristaldeki dalganın birçok kipin bir

süper pozisyonu olduğu düşünülür. Dalgaya herhangi bir kipi katkı Fourier analizi ile bulunur. FPU deneyinde dalganın a_k genliğine k kipi katkı

$$a_k = \sum_{s=1}^N x_s \sin\left(\frac{iks\pi}{N}\right) \quad (2.3.2.3)$$

ile verilir. Burada x_s 'ler gerçek tanecik yer değiştirmelerini k kip numarasını N sistemdeki tanecik sayısını verir. a_k , $x_s(t)$ genliğinin Fourier gösterimidir. Herhangi bir k kipi için enerji ifadesi

$$E_k = \sum \frac{1}{2} \dot{a}_k^2 + \omega_k^2 a_k^2 \quad (2.3.2.4)$$

dır. (2.3.2.4) bağıntısı normal modlar arasında enerji eş bölüşümü olmayacağını söyler. Burada $\omega_k = 2\sin\frac{ik\pi}{2(N+1)}$ 'dir.

FPU çalışmasının, nonlinear terimlerin ergodikliğe garanti veremediğini göstermesi tüm inançların yeniden sorgulanması gerektiğini gösterdi. Fermi'nin ölümünden sonra (1954) yine bir dizi çalışma yapıldı bu çalışmalarda tipik olarak yine $k=1$ modu uyarıldı ancak $T_1 = 2\pi/\omega_1$ gibi pek çok temel mod için $E_k(t)$ enerjilerinin zamana bağlılığı üzerinde çalışıldı. FPU' nun çalışmasına ilaveten recurrence periyodunun nonlinear katkı arttıkça azalmakta olduğu gözlemlendi. Bu sonuç nonlinear terimlerin kesinlikle ihmal edilemeyeceğini gösterdi. Daha sonraki çalışmalarda 80000 T_1 için süper periyot bulundu. Bu zamandan sonra enerjinin %99'u ilk modda tekrar toplanıyordu.

FPU paradoksu çözmek için yapılan birçok çalışma fiziksel sistemlerdeki nonlinear etkilerin sayısal ve analitik çalışılmasını sağladı. FPU yeni bir fenomenle nonlinear denklemlerin ve dinamik kaosun integrallenebileceğini önerdi. FPU paradoksun sonuçlarıyla başlatılan keşiflerden biri bazı nonlinear diferansiyel denklemlerin integrallenebileceği idi. Bunu gösteren ilk çalışma olarak 19 yy. sonlarına doğru su dalgası denklemi olarak türetilen Korteweg-de-Vries (KdV) denklemin 1965 yılında Norman ZABUSKY ve Martin KRUSKAL tarafından sayısal olarak integre edilmesiydi.

Bu olayın sonuçlarından yola çıkarak Zabusky ve Kruskal, nonlinear örgülerin dinamiğinin KdV denklemiyle ifade edilebileceğini ve bu denklemin çözümleriyle

normal kiplerden ayrı olarak, şekillerinde herhangi bir değişme olmayan ve adlarına soliton, breather denilen nonlinear yerel kiplerin de var olabileceğini göstermişlerdir. Zabusky ve Kruskal tarafından denklemin nümerik çözümleri soliton olarak tanımlandı. Bu atmaların soliton olarak adlandırılmasının sebebi parçacık davranışı göstermeleridir. Solitonların en önemli özelliği birbirini içerisinden şekillerini ve hızlarını koruyarak geçmeleridir (Şekil 2.20).



Şekil 2.20. Solitonların birbirini içerisinden geçişi

(2.3.2.1-a) quadratik terimli kuvvet ifadesine süreklilik yaklaşımı uygulanırsa

$$u_t - 6uu_x + u_{xxx} = 0 \quad (2.3.2.5)$$

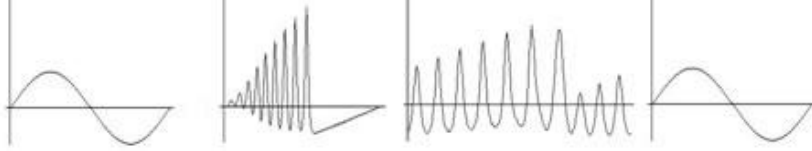
KdV denklemi elde edilirken (2.3.2.1-b) kübik terimli kuvvet ifadesine süreklilik yaklaşımı uygulanırsa

$$u_t - 6u_{xxx} + u^2u_x = 0 \quad (2.3.2.6)$$

mKdV denklemi elde edilir. Bu denklemde $-6uu_x$, $-u^2u_x$ nonlinear terimi, u_{xxx} dağınımlı terimi gösterir. Denklemde $u_t = \frac{\partial u}{\partial \tau}$ ve $u_x = \frac{\partial u}{\partial x}$, dir

Soliton kavramı Kruskal ve Zabusky'e Recurrence olma nedenini açıklama imkânı verdi. KdV denklemi kullanılarak özel bir periyodik sınır koşullu sistemde sinüsel başlangıç koşullu bir atma halka şeklindeki örgüde farklı hızlarda ilerleyen solitonlara ayrışır. Bu solitonlar birbirleriyle çarpıştıklarında az miktar faz değişiminden başka hiçbir özelliklerini kaybetmezler. Belli bir zaman sonra tüm solitonlar aynı anda aynı nokta çarpışarak hemen hemen başlangıç koşununa yakın olurlar (*Recurrence*). Bunun nedeni KdV denkleminin sonsuz sayıda hareket sabitinin olması yani sonsuz sayıda korunum yasasına uymasındır. Enerjinin diğer kiplere dağılımı bu korunum yasalarınca engellenir. Böylece enerji tekrar verilen büyüklüğüne geri toplanır.

Kararlı *solitary dalgalar* (solitonlar) tanımlanmış başlangıç koşullarında ortaya çıkar ve kimliklerini bozmadan birbirleriyle etkileşirler. Solitonlar, FPU modelin bütünüyle integrallenebilir olmasıyla açıklanabilirler. Şekil 2.21 Periyodik koşullardaki bir sistemde $\sin(x)$ ile verilen titreşimin solitonlara dönüşmesini göstermektedir.



Şekil 2.21. 1965 Zabusky ve Kruskal'ın yaptığı çalışma:Zabusky ve Kruskal KdV denkleminin nümerik çözümlerinden sinüsel başlangıç koşullu bir atmanın solitonlara ayrıştığını gösterdiler[9]

Periyodik koşullardaki bir sistemde $\sin(x)$ koşulunun uzay zaman değişimi KdV denkleminin uyar. İlk şekil başlangıç koşullarını gösterir, ikincisi şok dalgasının biçimini ve üçüncü şekil soliton trenini gösterir. Sinüzoidal başlangıç koşulu keskin bir cephe oluşturur ve solitonlar ortaya çıkar. Solitonlar periyodik sınır koşullu, sonlu bir sistemde hareketleri boyunca hızlarını ve şekillerini korurlar, daha sonra başlangıç koşullarına geri dönerler.

2.4. Nonlinear İletim Hatlarında Dalgalar

Solitonlar ve solitary dalgalar, su dalgaları ve örgü dinamiği üzerinde yapılan çalışmalarda keşfedildi. Üzerlerinde, kalıcı profilli soliton ve solitary dalgaların yayılımına izin veren nonlinear elektriksel iletim hatları son yıllarda çeşitli uygulama alanlarında araştırma konusu oldu. Nonlinear elektriksel iletim hatları deneysel amaçlar için en ucuz ve en kolay kurulan dağınımlı ortam araçlarıdır.

Şekil 2.22'de gösterilen nonlinear elektriksel iletim hattı, nonlinear bir örgüyle eşdeğerdir [10]. Bu tür bir elektriksel iletim hattı,

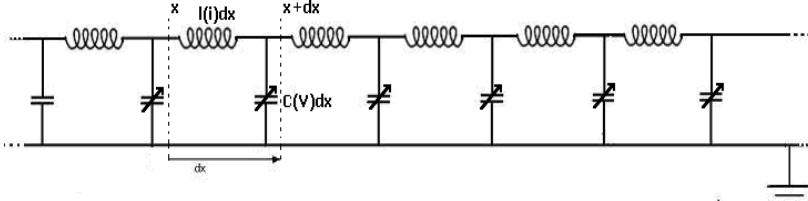
- Soliton dalgalarının incelenmesinin ve bunların birbirleriyle etkileşmesinin [11,12,13],
- Tekrarlanan olayların [14,15,16],
- Örgüde soliton özelliklerinin [17,18],
- Şok dalga özelliklerinin ,
- Kuantum mekaniğindeki potansiyel problemlerinin [19] ve
- Plazma dalgalarının [20]

incelenmesinde büyük kolaylık sağlarlar. Nonlineer elektriksel iletim hatlarında dalgalar sönüm ihmal edildiğinde dağınımlı ve dağınımsız etkiler altında incelenebilir.

2.4.1. Nonlineer ve Dağınımsız İletim Hatlarında Dalgalar

Şekil 2.22 'de gösterildiği gibi iletim hattında voltaj (V)'ın ve akım (i) 'ın genliği artarsa nonlineer etkiler ihmal edilemez. Başka bir deyişle artık birim uzunluğun c kapasitansı ve l indüktansı sabit değildir. Ancak her ikisi de sırasıyla gerilim ve akımın birer fonksiyonudurlar.

$$c = c(V); l = l(i)$$



Şekil 2.22. Nonlineer $l(i)$ indüktanslı ve nonlineer $c(V)$ kapasitanslı iletkene denk iletim hattı

Yüksek voltaj ve akım genliğinde bile bileşenler için nonlineer etkiler küçüktür. Bu etkileri gözlemek için özel bileşenler kullanılır. Bu tür öğeler kullanılarak

$$\frac{\partial V}{\partial x} = -l(i) \frac{\partial i}{\partial t} \quad (2.4.1.1-a)$$

$$\frac{\partial i}{\partial x} = -c(V) \frac{\partial V}{\partial t} \quad (2.4.1.1-b)$$

denklemleri elde edilir.

Basitlik için l' nin i den bağımsız c 'nin voltaja bağlı olduğunu kabul edilirse kapasitans-voltaj bağıntısı seriye açılabilir. Yeterince küçük voltaj için ilk iki terim alınabilir. Bu durumda kapasitans bağıntısı

$$c(V) = C_0(1-2bV) \quad (2.4.1.2)$$

şeklinde elde edilir. Burada b nonlineer katsayıdır. Nonlineerliğin ilk etkisi harmonik oluşturmaktır. İlk olarak $V = A \cos(\omega t - kx)$ alınırsa (2.4.1.1-b) bağıntısının sağ tarafında ikinci harmonik

$$\frac{\partial i}{\partial x} = A C_0 \omega \sin(\omega t - kx) - A^2 b C_0 \omega \sin 2(\omega t - kx)$$

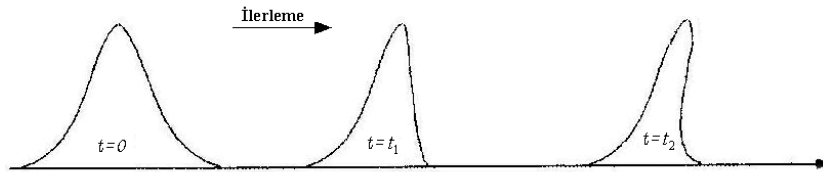
olarak elde edilir. Lineer dağılımsız iletim hattına benzer bir şekilde (2.4.1.1a-b) iletim denklemlerinin

$$V = f\{x \pm [Ic(V)]^{-1/2} t\} \quad (2.4.1.3)$$

şeklinde bir çözümü olduğunu ve voltaja bağlı yayılım hızının

$$v = [Ic(V)]^{-1/2} = \frac{1}{\sqrt{Ic_0(1-2bV)}} = \frac{1}{\sqrt{Ic_0}} (1+bV) \quad (2.4.1.4)$$

olduğu kabul edilir.



Şekil 2.23. Nonlineer ve dağılımsız iletim hattında şok dalgasının yayılımı

Eğer (2.4.1.2) denkleminde olduğu gibi voltaj arttıkça kapasitans azalırsa dalganın yüksek voltaj genliğine karşılık gelen kısımları düşük voltaj genliğine karşılık gelen kısımlarına göre daha hızlı yayılır. Böyle bir dalga şok dalgası olarak adlandırılır. Dalga kaynağı dalgadan hızlı hareket ederse şok dalgası oluşur.

Sadece nonlineerlik için analitik olarak anlamlı fiziksel çözüm hemen süreksizliğe geçen bir dalgayı içerir. $t = 0$ başlangıcında parabolik şekilli bir atma göz önüne alınırsa hesaplamalar kolay olur. Zaman arttıkça başlangıç parabolik şekilli dalga gitgide bozulur. $b = 0$ alınırsa bu durumda kapasitans sabit olur ve atma sabit hız ve şekille ilerler. Denklem (2.4.1.1-a) x 'e göre; (2.4.1.1-b) t ' ye göre türevlenir ve akım ifadesi olmayacak şekilde düzenleme yapılırsa

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} = l \frac{\partial}{\partial t} \left[c(V) \frac{\partial V}{\partial t} \right] \quad (2.4.1.5)$$

denklemini elde edilir. (2.4.1.1-b) bağıntısını kullanarak bu ikinci dereceden diferansiyel denklem

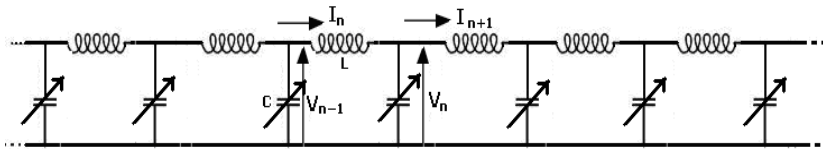
$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} V - lC_0 \frac{\partial^2}{\partial t^2} V = -lC_0 b \frac{\partial^2}{\partial t^2} V^2 \quad (2.4.1.6)$$

şekline dönüştürülür.

(2.4.1.6) denkleminin sol tarafı lineer terim içerirken sağ kısmı nonlineerliği anlatır. (2.4.1.6) denklemi (2.4.1.1 a-b) denklem takımının bir kombinasyonu olduğu için (2.4.1.6) denkleminin çözümleri (2.4.1.3) formunun şok dalgası çözümleridir.

2.4.2. Nonlinear ve Dağınımlı İletim Hatlarında Dalgalar

Bu kısma kadar nonlineerlik ve dağınım aynı ortamda bulunmadı. Lineer ve dağınımlı bir ortamda yeni üretilmiş bir atmanın gitgide bozulduğu gösterildi. Nonlinear ve dağınımsız iletim hattında atmanın çıkış şekli bozulur ve atmanın ön kısmı dikleşir. Nonlinear dağınımlı iletim hattında dağınımın nonlineerlik tarafından dengelendiği görülür. Bu durum soliton ya da solitary dalga denen sabit hızlı ve kalıcı şekilli atmaların oluşmasına sebep olur.



Şekil 2.24. Lineer indüktans ve nonlinear kapasitanslı hücrelerden oluşan elektriksel ağ devresi

İlk olarak diferansiyel kapasitans $C(V_n)$ 'in V_n voltajına nonlinear bağlı olduğu durumu göz önüne alınırsa

$$C(V_n) = \frac{d}{dV_n} Q_n(V_n) \quad (2.4.2.1)$$

$I_n - I_{n+1} = I_c$ ve $Q_n(V_n)$ n. Kapasitörde depolanan yükü göstermek üzere; $d\Phi = LdI$ olarak indüktans akımdan bağımsız alınır

$$\frac{d^2 Q_n}{dt^2} = \frac{d}{dt} [C(V_n) \frac{dV_n}{dt}] = \frac{1}{L} (V_{n+1} + V_{n-1} - 2V_n) \quad n=1,2,3,\dots \quad (2.4.2.2)$$

diferansiyel denklemi elde edilir. (2.4.1.2) bağıntısı gibi yeterince düşük voltaj için kapasitans voltaj bağıntısı yaklaşık olarak

$$C(V_n) = C_0(1 - 2bV_n) \quad (2.4.2.3)$$

formunda olabilir. (2.4.2.3) bağıntısını (2.4.2.2) denklemine yazarsak

$$LC_0 \frac{d^2}{dt^2} V_n - LC_0 b \frac{d^2}{dt^2} V_n^2 = (V_{n+1} + V_{n-1} - 2V_n) \quad n=1,2,3,\dots \quad (2.4.2.4)$$

(2.4.2.4) denklem sistemini (2.4.2.2) denklem sistemi ile karşılaştırdığımızda

$$Q_n = C_0(V_n - bV_n^2) \quad (2.4.2.5)$$

dir. (2.4.2.4) nonlinear denklem sistemi analitik olarak çözülemez. Ancak sadece nümerik metot kullanılarak çözülebilir (Eilbeck, 1991). Yaklaşık sonuç elde etmek için lineer dağılımlı dalgalardaki gibi süreklilik limiti kullanılır. $x = n\delta$ dönüşümü yapılırsa

$$V'' - \frac{\delta^2}{LC_0} V''_{xx} = \frac{\delta^4}{12LC_0} V''_{xxx} + bV''^2 \quad (2.4.2.6)$$

denklemi elde edilir. Bu KdV denklemidir. (2.4.2.6) denklemi sağa doğru yayılan dalgayı temsil eder ve zayıf dağılımlı nonlinear denklemdir. Denklemde sol kısım lineer dalga denklemdir; sağ kısımdaki ilk terim dağılımı veren terim; ikinci terim ise nonlineerliği veren terimdir.

Eğer nonlinear katsayı $b \sim O(\delta^4)$ şeklinde ise (2.4.2.6) denklemine nonlinear terim dağılımlı terimle dengelenir. Bu şartlar altında sabit v hızı ile ilerleyen, şeklini

değiştirmeyen (2.4.2.6) denkleminin çözümü gibi sabit şekilli dalga çözümleri bulmak için $v_0 = \delta / \sqrt{LC}$ dönüşümü yaparak

$$V = \frac{3}{2b} \frac{v^2 - v_0^2}{v^2} \operatorname{sech}^2 \left[\frac{\sqrt{3(v^2 - v_0^2)}}{v_0} \left(n - \frac{v}{\delta} t \right) \right] \quad (2.4.2.7)$$

şeklinde bir çözüm elde edilir. (2.4.2.7) bağıntısında $\left[n - \frac{v}{\delta} t \right] = \frac{x - vt}{\delta}$ alındı. Bu nedenle pratik çözümlerde alınan yol birim hücrelerden oluşur. (2.4.2.7) bağıntısıyla verilen atmanın maksimum genliği

$$V_m = \frac{3}{2b} \frac{v^2 - v_0^2}{v^2} \quad (2.4.2.8)$$

bağıntısıyla verilir. V_m , v hızına bağlıdır. Efektif kapasitans tanımlanarak C_{eff} ile $v = \frac{1}{\sqrt{LC_{eff}}}$ den atmanın maksimum yüksekliği

$$V_{max} = \frac{3}{2b} \frac{v^2 - v_0^2}{v^2} = \frac{3}{2b} \left(1 - \frac{C_{eff}}{C_o} \right) \quad (2.4.2.9)$$

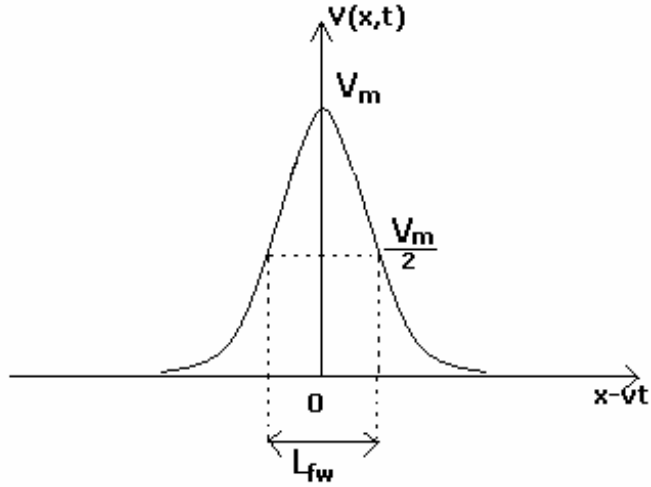
ile verilir. (2.4.2.5) bağıntısını kullanarak efektif kapasitansı efektif voltaja bağlayabiliriz. Efektif voltaj

$$V_{eff} = \frac{V_{max}}{3} \quad (2.4.2.10)$$

olarak verilir. Böylece efektif kapasitans efektif yayılım hızını belirler. (2.4.2.7) ve (2.4.2.10) bağıntılarını kullanarak L_{fw} genişliği hesaplanabilir. Sabit V_m genliğine bağlı L_{fw} genişliği $V_m/2$ genlik yarısına bağlı genliktir. $t = 0$ da ve $\frac{x}{\delta} = n = \frac{L_{fw}}{2}$ alınırsa

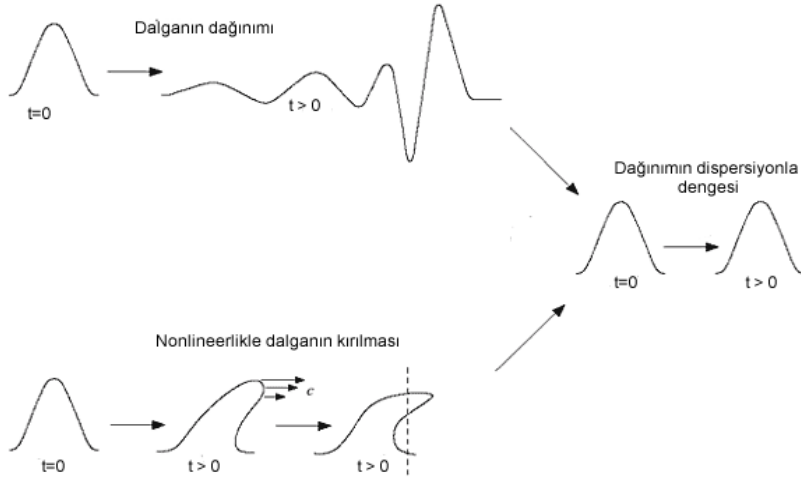
$$L_{fw} = 1.76 \frac{v_0}{\sqrt{3(v^2 - v_0^2)}} = \frac{v_0}{\sqrt{v^2 - v_0^2}} \quad (2.4.2.11)$$

eşitliği elde edilir. Sadece bir boyutlu ilerleyen dalgalar için zayıf genlik limitinde (2.4.2.6) denklemi standart nonlinear denklemi haline gelir.



Şekil 2.25. $V(x,t)$ - $(x-vt)$ solitary dalga çözümü için L_{fw} genişliği

Zayıf dağınımlı iletim hattında görüldüğü gibi nonlinearlik dağınımı engeller ve atma dağılmadan ilerler. Herhangi gibi t zamanında ve herhangi bir x noktasında ani hız $1/\sqrt{LC}$ ile verilir. (2.4.2.5) bağıntısıyla verilen karakteristiğe sahip olan kapasitörde yüksek voltajlar için kapasitans çok küçük olur. Bu nedenle voltaj dalgasının üst kısmındaki noktalar daha hızlı ilerler ve dalganın ön kısmında eğim sonsuza dönerek şok dalgası ortaya çıkar. Dağınım dalganın dağılmasına nonlinearlik ise dalganın toplanmasına neden olur. Her ikisinin birbirini dengelemesi ile atma solitona dönüşür. Şekil 2.26 nonlinearlik ve dağınım etkilerini göstermektedir.



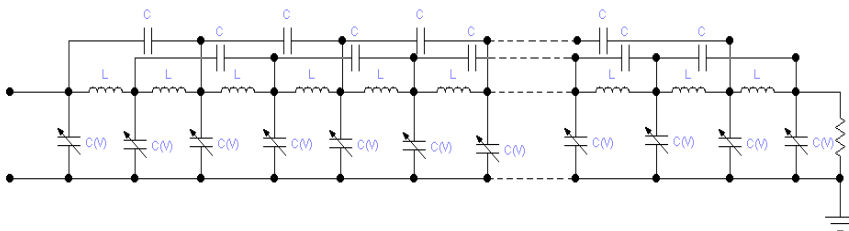
Şekil 2.26. Elektriksel İletim hatlarında dağınım ve nonlineerliğin etkisi [21]

Nonlinear iletim hatlarının temel özellikleri özetle:

1. Dalğanın genliği arttıkça hızı artar.
2. Atmanın hızı arttıkça genişliği azalır.
3. Atmanın genliği arttıkça genişliği azalır.

Bu sonuçlar altında büyük genlikli dar atmalar elde etmek için nonlinear iletim hatlarında kapasitans ve indüktans olabildiği kadar küçük olmalı ve b Nonlinear katsayı hattın dağınımını telafi etmek için yeterince büyük olmalıdır

Bu kısma kadar tek atomlu örgüde en yakın komşu etkileşmeleri göz önüne alındı. Bu hattın yanında ikinci yakın komşu etkileşmelerini de içerdiği duruma karşılık gelen nonlinear elektriksel iletim hattı Şekil 2.27' de gösterilmiştir [22].



Şekil 2.27. İkinci yakın komşu erimli nonlinear elektriksel iletim hattı

Şekil 2.27' de gösterilen iletim hattının diferansiyel-fark denklemleri,

$$\frac{d^2 q_n}{dt^2} = C \frac{d^2}{dt^2} (v_{n-2} - 2v_n + v_{n+2}) + \frac{1}{L} (v_{n-1} - 2v_n + v_{n+1}) \quad (2.4.2.12)$$

şeklinde yazılır. Burada t zamanı ve q_n ise n . nonlineer kapasitörde depolanan yükü belirtmektedir. n . kapasitörde depolanan yük,

$$\frac{dq_n}{dv_n} = C_N(v_n) = C_0 \left(1 + \frac{v_n}{F}\right)^\kappa \quad (2.4.2.13)$$

şeklinde yazılır. (2.4.2.12) ve (2.4.2.13) denklemleri kullanılarak gerekli matematiksel bağıntılar uygulandığında nonlineer elektriksel iletim hattını tanımlayan diferansiyel denklem;

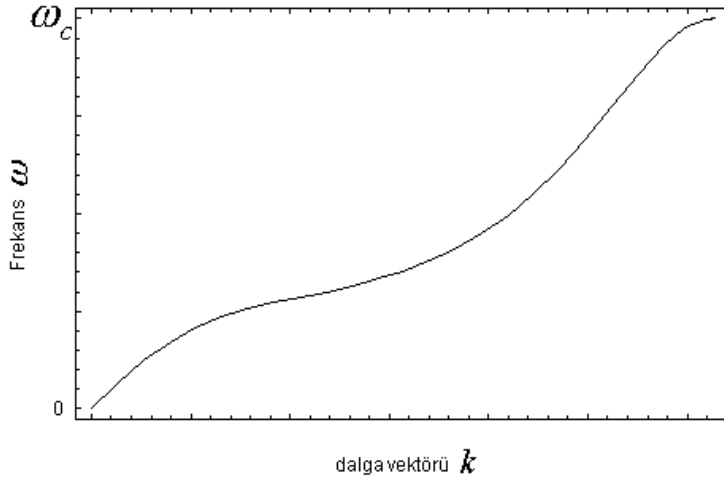
$$\frac{d^2 v_n}{dt^2} - \frac{\gamma}{4} \frac{d^2}{dt^2} (v_{n-2} - 2v_n + v_{n+2}) - V_0^2 (v_{n-1} - 2v_n + v_{n+1}) = -\frac{d^2}{dt^2} (\mu v_n^2)$$

(2.4.2.14)

şeklinde yazılır. Burada $\mu = \frac{\kappa}{2F}$, dir. Bu iletim hattının dağınım bağıntısı $v_n(t) = \exp[i(kn - \omega t)]$ şeklinde harmonik çözümlerin önerilmesiyle nonlineer elektriksel iletim hattında ilerleyen dağınımlı kipler ya da dalgalar için,

$$\omega = \omega_c \sin\left(\frac{k}{2}\right) / (1 + \gamma \sin^2 k)^{1/2} \quad (2.4.2.15)$$

denklemini elde edilir ve bu denkleme uygun dağınım eğrisi Şekil 2.28' de gösterilmiştir.



Şekil 2.28. İkinci yakın komşu erimli nonlinear elektriksel iletim hattının dağılım eğrisi

Burada ω ve k açılal frekans ve dalga sayısı, $\omega_c = \frac{2}{\sqrt{LC_0}}$ cut-off (üst kesim) frekansı ve $\gamma = \frac{4C}{C_0}$ dir. (2.4.2.14) denkleminde

$$V_{n\mp 2} = V_n \mp 2 \frac{\partial V}{\partial n} \mp 4 \frac{\partial^2 V}{\partial n^2} \mp 9 \frac{\partial^3 V}{n^3} \text{ seri açılımı kullanılırsa}$$

$$\frac{\partial^2 V}{\partial t^2} - \frac{1}{4} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \left(\frac{\partial^4 V}{\partial x^4} \right) - V_0 \frac{\partial^4 V}{\partial x^4} = - \frac{\partial^2 V^2}{\partial t^2} \quad (2.4.2.16)$$

elde edilir. $V_t \rightarrow \frac{\partial}{\partial t}$ ve $V_x \rightarrow \frac{\partial}{\partial x}$ olmak üzere (2.4.2.14) denklemini

$$V_{tt} - \frac{1}{4} (V_{tt})_{xxxx} - V_0 V_{xxxx} = -(V^2)_{tt} \quad (2.4.2.17)$$

formunu alır. (2.4.2.17) denklemini uzak erişimli sistemin KdV denkleminin bir başka şeklidir. Denkleminde sağ taraf nonlinearliği verirken V_{xxxx} dağılımı veren

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Çalışmada iletim hatları Elektronik Workbench Profesyonel 5.12 yazılımı ile kurulmuş olup, transient analiz için Elektronik Workbench Profesyonel 5.12 yazılımı kullanılmıştır. Transient analizinden elde edilen kesikli verilerin Wavelet ve Fourier transform metotları için Matlab R2007a yazılımı kullanılmıştır.

3.1. Elektronik Workbench Profesyonel

Elektronik Workbench şematik yakalama ve benzetim programıdır. Programın tasarım ekranı bir tür elektronik deney ve projelerin yapıldığı “Elektronik Çalışma Masası”dır. Bu ekranda analog ve digital devreler kurularak test edilebilirler. Program içeriğinde profesyonel bir elektronik devre kurmak için gerekli olan devre elemanları yanında kurulan devreleri çalıştırmak için gerekli olan sinyal üreteçlerini, güç kaynaklarını ve osiloskop, multimetre gibi test cihazlarını da içerir[23].

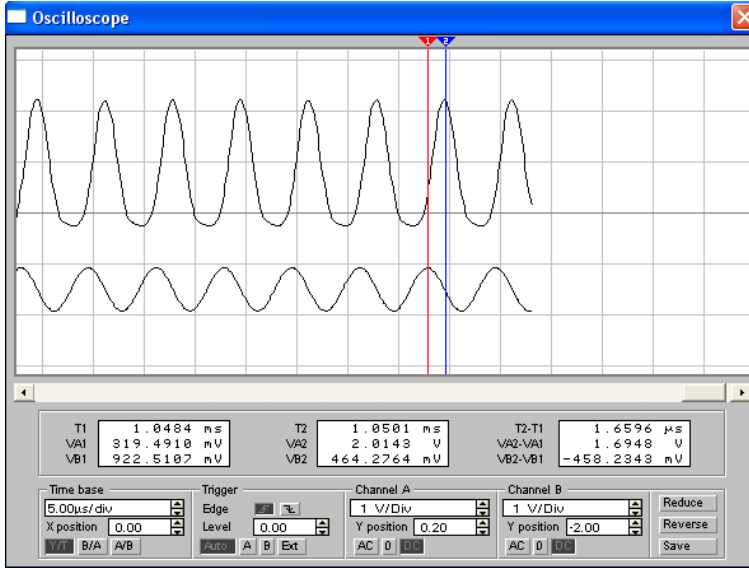
Program gerçek hayatta herhangi bir elektronik devre kurulurken karşılaşılabilecek pek çok problemin hızlı ve masrafsız giderilmesine olanak sağlar. Bu problemler alınan gerçek bir malzemenin kusurlu çıkması (çok sayıda malzemedeki kusurun tespit edilmesi doğrudan test süresini uzatır), elektronik devrenin gerektiğinde değiştirilebilmesi için ayrıca malzeme satın alınmaya ihtiyaç duyulması, devre elemanlarının hata oranları, elektronik malzemelere ödenecek bedel, tasarım ve testlerin uzun zaman alması sayılabilir. Grafik ara yüzlü program, kullanıcıların kurmak istedikleri devrelere ait malzemeleri seçip dilediği kadar kullanmasına olanak tanır. Bu tür bir özellik kurulmak istenen devrenin maliyetsiz olmasına imkan verir. Gerçek bir malzemedeki karşılaşılabilecek kaçınılmaz bir sorun malzemenin tolerans değerleridir. Bu değerler kullanılmak istenen malzemenin beklenen performansını etkileyecektir, Elektronik Workbench programı ile kusursuz malzemeler kullanılabilir ve bu istenen sonuçlara sapmadan ulaşılabilir. Benzer şekilde kurulacak bir devrede herhangi bir elemanın iç direnci de karşılaşılan fiziksel bir gerçekliktir. Örneğin bir devrede ne kadar çok bağlantı kabloları kullanılırsa o kadar büyük enerji kaybı başka bir deyişle sinyalde zayıflama ve parazitlerin ortaya çıkması görülecektir. Program ayrıca herhangi bir sinyalin davranışının incelenebilmesi için gerekli olan diferansiyel denklemleri hızlı bir şekilde çözebilir ve sonuçları istediğinde bir grafik ya da kesikli veriler olarak verebilir. Elde edilen veriler yetenekli programlarda işlenip fiziksel yorumlar

üretilebilir.

Kullanıcı herhangi bir elemanın parametrelerini değiştirebileceği gibi baştan parametrelerini seçtiği yeni bir eleman oluşturabilir, sürekli kullanacağı devre elemanlarından kendisi için bir veri tabanı hazırlayabilir.

3.1.1. Osiloskop

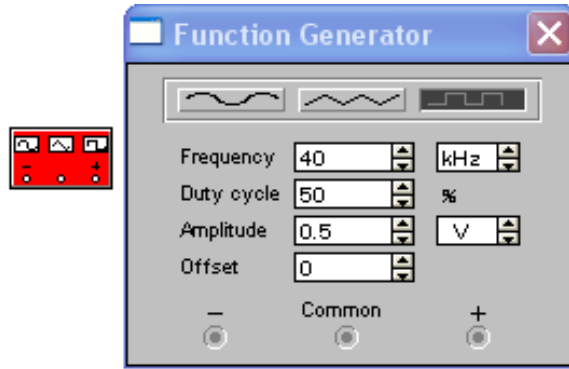
Elektronik Workbench programında çift kanallı bir osiloskop bulunur. Osiloskop elektronik sinyalin genlik ve frekans değişimlerini gösterir. Osiloskop zamana bağlı bir ya da iki sinyalin grafiğini verebilir ya da bir dalga şeklinin diğer bir dalga şekliyle karşılaştırılmasını destekler. Osiloskobun ön panelinde bulunan araç düğmeleri ile en iyi grafik gösterim için zaman (time/div) ve genlik (volt/div) ayarlamaları yapılabilir. Böylece sinyallerin osiloskop üzerinde frekansları ve genlikleri büyütülüp küçültülerek daha iyi bir gösterim sağlanabilir. Ayrıca osiloskop probunun yeri değiştirilerek devre üzerindeki farklı noktalarda sinyalin genliği gözlenebilir. Kaydet butonu ile simülasyon sonucu olan grafikler kaydedilebilir.



Şekil 3.1. Osiloskop paneli

3.1.2. Fonksiyon Üreteci

Fonksiyon Üreteci sinüs, üçgen ve kare dalga üretebilen bir gerilim kaynağı olarak kullanılır. Üreteç panelinde (Şekil 3.2) üretilen sinyalin şeklini, frekansını, gerilimini ve DC offset gerilim değerlerini değiştirmek mümkündür. Frekans kademeleri oldukça geniş olup ses ve radyo frekans değerlerine ulaşabilir. Fonksiyon üretici üç adet uça sahiptir. Bu uçlar yardımıyla sinyaller devreye uygulanabilirler. Genel terminal sinyal için bir referans düzeyi sağlar.



Şekil 3.2. Fonksiyon üretici paneli

3.1.3. Elektronik Devre Analizi

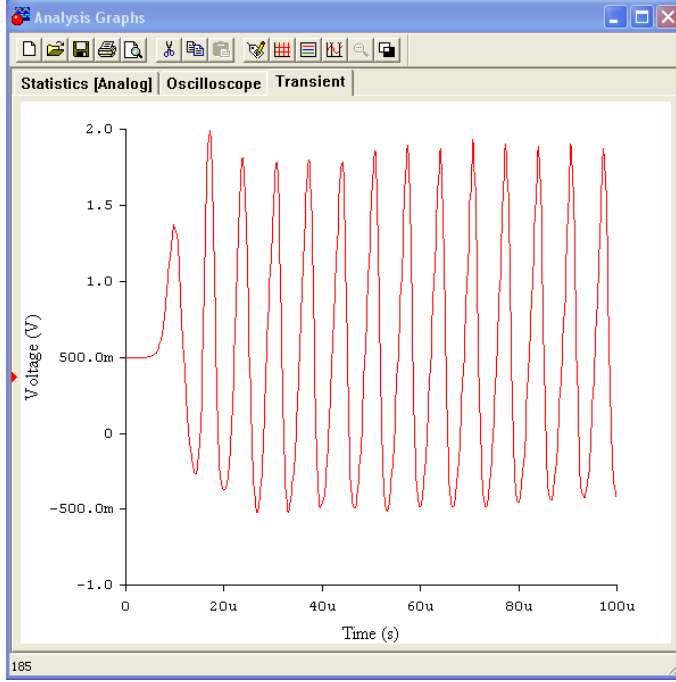
3.1.3.1. DC çalışma noktası

Bobinlerin kısa devre, kapasitörlerin açık devre ve AC kaynakların sıfır kabul edilmesiyle devre üzerinde bulunan düğüm noktalarındaki gerilim ve akım değerlerinin ayrıntılı olarak gösterilmesinde kullanılır. Bu analiz yardımıyla diyot ve transistörlerin bias noktaları kolaylıkla bulunabilir.

3.1.3.2. Sinyal analizi (Transient Analysis)

Bu analiz yardımıyla, devrenin davranışını zamanın fonksiyonu olarak inceleme imkânı vardır. Sıfırıncı saniyeden başlayarak belirlenen bir zaman aralığında ve test noktalarındaki akım ve gerilim durumları görülebilir. Böylece test noktalarındaki sinyalleri karşılaştırma imkânı sağlanır. Ayrıca belirlenen test

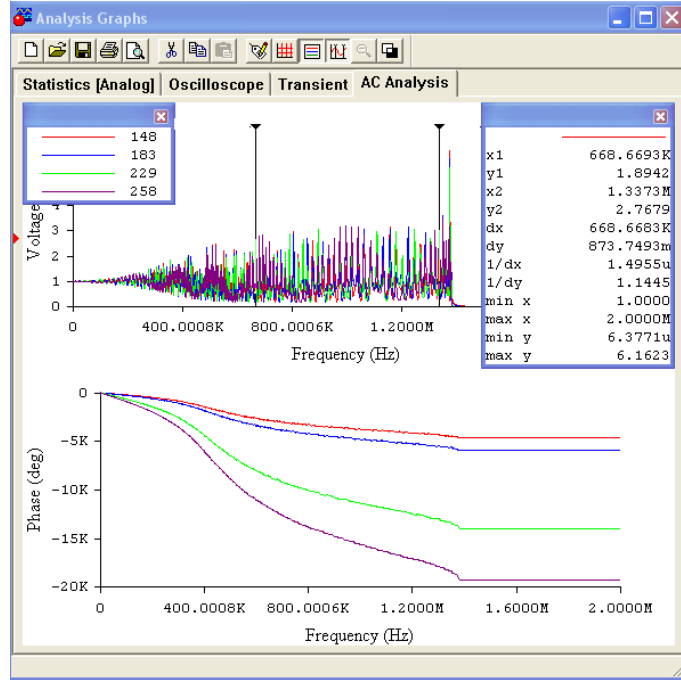
noktalarının frekansı, genliği ve bunlar arasındaki genlik ve frekans farkları da ölçülebilir (Şekil 3.3). Transient analiz grafikleri veri dosyası olarak saklanabilirler.



Şekil 3.3. Sinyal analiz paneli

3.1.3.3. AC frekans analizi (AC frequency sweep)

AC frekans analizi, belirlenen bir frekans aralığı içerisinde ve belirlenen test noktalarında devrenin AC yanıtını bulmakta kullanılır. AC analizi ile her bir frekansa karşılık, belirlenen test noktasında voltaj ve faz değişim grafiği çizilebilir (Şekil 3.4). Ayrıca bu analiz ile frekans ve genlik değerleri de ölçülebilir.



Şekil 3.4. AC analiz paneli

3.2. Fourier Transform Metodu

Dik koordinat sisteminde herhangi bir A vektörü $\vec{A} = x\vec{i} + y\vec{j} + z\vec{k}$ şeklinde gösterilebilir. Burada $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ vektörlerine baz vektörleri denir. Baz vektörleri bu koordinat sistemi için birbirine diktir. $\vec{i} \cdot \vec{j} = 0$; $\vec{j} \cdot \vec{k} = 0$; $\vec{i} \cdot \vec{k} = 0$ diklik bağıntısını sağlarlar. Benzer bir şekilde fonksiyon uzayında periyodik her hangi bir fonksiyon birbirine dik iki farklı periyodik fonksiyonun artan frekanslardaki değerlerinin dik toplamı şeklinde gösterilebilir. Joseph Fourier (1822) bu toplamı sinüs ve kosinüs baz fonksiyonlarını kullanarak göstermiştir. Bu bazlar $1, \cos(x), \cos(2x), \dots, \cos(nx)$; $0, \sin(x), \sin(2x), \dots, \sin(nx)$ dir. $[-L, L]$ aralığında tanımlı gerçek x değişkenli $2L$ periyotlu bir $f(x)$ fonksiyonu sinüs ve kosinüs fonksiyonlarının sonsuz toplamı şeklinde yazılabilir. Fourier analizi, başka bir deyişle Fourier transform metodu, fonksiyon uzayında periyodik fonksiyonları bileşenlerine ayırma işlemidir. L periyotlu bir fonksiyonun Fourier analizi şu şekilde yapılır: $[0, L]$ aralığında integrallenebilen $f(x)$ için,

$k = \frac{2\pi}{L}$ olmak üzere $\int_0^L |f(x)|^2 dx = \text{sonlu}$ ise

$$f(x) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(nkx) + b_n \sin(nkx) \quad (3.2.1)$$

bir seri toplamı şeklinde yazılabilir. Bu toplamda;

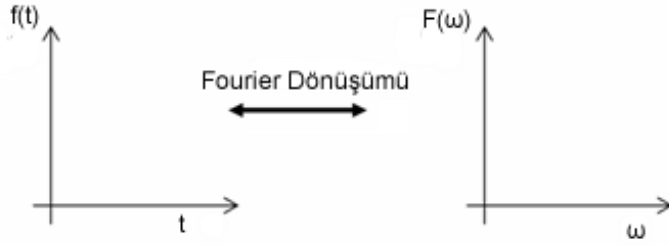
$$a_0 = \frac{2}{L} \int_0^L f(x) dx \quad (3.2.2.a)$$

$$a_n = \frac{2}{L} \int_0^L f(x) \cos\left(n \frac{2\pi}{L} x\right) dx \quad (3.2.2.b)$$

$$b_n = \frac{2}{L} \int_0^L f(x) \sin\left(n \frac{2\pi}{L} x\right) dx \quad (3.2.2.c)$$

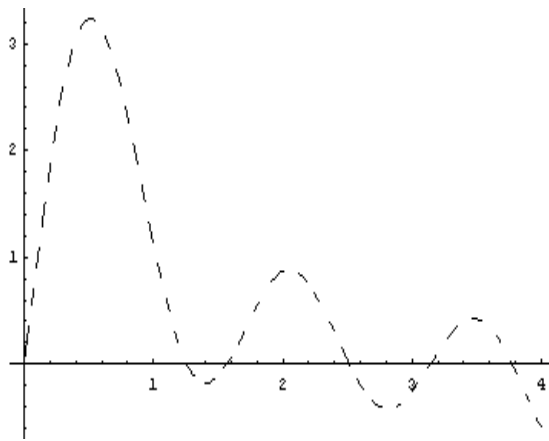
ve a_0, a_n, b_n sayıları f 'in Fourier katsayıları olarak adlandırılır. Bu katsayıların bulunması periyodik fonksiyonun veya sinyalin analizinde sinyal içinde bulunan frekansların orijinal sinyale katkılarının bulunmasını sağlar. Bütün n 'ler için Fourier katsayılarının bulunmasına Fourier çözümlemesi veya Fourier Analizi denir.

Sinyal işleme gibi uygulamalarda orijinal sinyaldeki bilgi zamandan gelir ve sinyal *time-domain* olarak adlandırılır. Yeni fonksiyonda bilgi frekanstadır ve bu Fourier dönüşümünün *frequency-domain* olarak adlandırıldığı söyler (Şekil 3.5). Böylece orijinal sinyalin içindeki var olan frekanslar tanımlanabilir. Fourier dönüşümü ile sinyalin içindeki frekanslar açığa çıkarılır ve fonksiyon başka bir fonksiyona dönüştürülerek işlenir. Zaman ve frekansın sınırlandırılmadığı bir bölgede Fourier dönüşümü optik ve dalga hareketi gibi fizik konularda önemli bir yer tutar.



Şekil 3.5. Fourier dönüşümü, zaman bilgisi içeren sinyalden frekans bilgisi elde eder.

Fourier dönüşümü sürekli ve kesikli Fourier dönüşümü olarak iki şekilde uygulanabilir. İki dönüşüm de bir nesneyi ortogonal iki uzay arasında eşler. Fourier dönüşümü bilgisayar ortamında kesikli teknikler kullanılarak hesaplanıyorsa bu tür hesaplamalar Discrete Fourier Transform (Kesikli Fourier Dönüşümü) olarak bilinir. Bu tür hesaplamada zaman ekseninin kesikli olduğu kabul edilir. Zaman ekseninde veriler kesikli olarak alınır ve işlenir. Kesikli Fourier analizi nümerik hesaplamalarda hızlı sonuç verir. Kesikli Fourier analizi uygulamak için sinyalden eşit aralıklı t değerleri alınır. 1. eleman genellikle t_0 olarak gösterilir, daha sonraki değer bundan Δt uzaklıktadır ve bu değişken için fonksiyonunun değerli $f(t + \Delta t)$ dir. k . değer ise $t_0 + k \Delta t$ ve örnek değer $f(t_0 + [M-1] \Delta t)$ dir. $F(\omega)$, $f(t)$ ile benzer özelliklere sahiptir ancak değer sırası gerçekten sıfırdan başlar. Δt ve $\Delta \omega$ birbirine $\Delta \omega = \frac{1}{\Delta t}$ ile ters olarak bağlıdır.



Şekil 3.6. Herhangi bir sinyalden alınan kesikli veriler

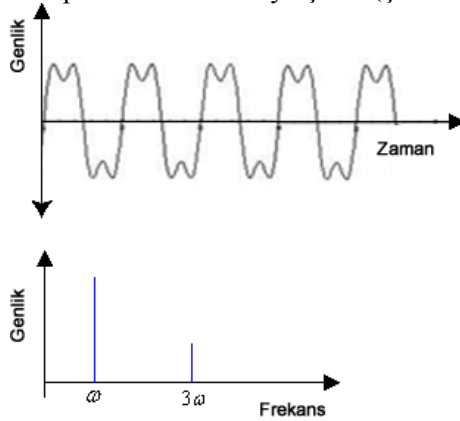
$t = 0, 1, 2, \dots, M-1$ ve $\omega = 0, 1, 2, \dots, M-1$ olmak üzere $f(t)$ kesikli fonksiyonun Fourier dönüşümü dönüşüm ifadesi

$$f(\omega) = \frac{1}{M} \sum_{t=0}^{M-1} f(t) e^{-i\omega t / M} \quad (3.2.3)$$

ile verilirken ters dönüşüm ifadesi

$$f(t) = \sum_{\omega=0}^{M-1} f(\omega) e^{-i\omega t / M} \quad (3.2.4)$$

ile verilir. M terimlerinin her biri Fourier bileşenleri olarak adlandırılır. Burada dönüşüm ve ters dönüşüm ifadeleri $f(\omega)$ ve $f(t)$ Fourier dönüşüm araçları olarak bilinirler. $f(\omega)$, $f(t)$ gibi aynı sayıda bileşenlere sahiptir. Bu bileşenler kesiklidir. Sonuç olarak kesikli Fourier analizi ile sinyal içindeki dalgalar frekans ve genliklerine göre Fourier spektrumunda ortaya çıkar (Şekil 3.7).



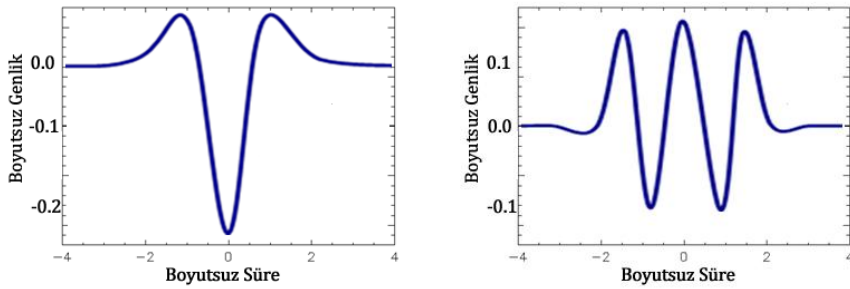
Şekil 3.7. $f(t) = \sin(\omega t) + (1/3) \sin(3\omega t)$ sinyalinin Fourier spektrumu

3.3. Wavelet Transform Metodu

Fourier dönüşümü orijinal sinyalde hangi frekanslar olduğu hakkında yeterli bilgi verir ancak bu frekansların ne zaman görüldüğü hakkında bilgi vermez. Sinyalin frekansı zamanla değişmeyen yani durağan olmuş olsaydı Fourier Dönüşümü sinyal analizinde oldukça başarılı olurdu. Ele alınan orijinal sinyalde bulunan frekanslar zamanla değişiyor ise başka bir deyişle zamanın birer fonksiyonu iseler Fourier dönüşümü yetersiz kalır. Fourier dönüşümünün bu yetersizliği çok serbestlik dereceli bir sistemde enerjinin diğer kipler arasındaki bölüşümü

konusunda yeterli bilgi sahibi olunmasını engeller. Fourier analizinin bu yetersizliği nedeniyle Wavelet transform metodu kullanılır.

Wavelet dönüşümü periyodik, gürültülü, kesikli ve taransient sinyallere özel olarak bulundu [24]. Wavelet analizi frekans ve zamanın eş zamanlı analizinde geleneksel Kısa Zaman Fourier Analizi'nden daha farklı yollarla geniş bilgi verir. Wavelet analizi iklim analizinden finansal analize, EKG sinyallerinden sismik sinyallerin analizine kadar pek çok alanda kullanılmaktadır. Wavelet analizi fikri çok eskilere gitmesine rağmen daha çok 1980'lerin ortalarından itibaren başladığı bilinir. İlk olarak sismik sinyallerin analizinde kullanılmıştır. Wavelet analizinde wavelet olarak bilinen küçük dalga görünümlü bir fonksiyon kullanır (Şekil 3.8.a-b). Başka bir deyişle Fourier dönüşümü her hangi bir sinyaldeki sinüs ve kosinüs sinyallerini ayırırken wavelet analizinde herhangi bir sinyali wavelet adı verilen sinyallere ayırır. Wavelet kullanılarak yapılan sinyal analizine Wavelet transform denir. Wavelet analizi 2 yolla kullanılır: 1. Wavelet sinyal üzerinde değişik konumlara hareket ettirilir. 2. Wavelet gerilip sıkıştırılır. Çok sayıda wavelet tipi bulunmaktadır Kullanılacak wavelet tipi wavelet analizinde çok önemli bir yer tutar.



a)

b)

Şekil 3.8. Çeşitli waveletler: a) Mexican Hat b) Morlet

Seçilen bir fonksiyonun wavelet olabilmesi için fonksiyon eğrisi altında kalan negatif ve pozitif alanların cebirsel toplamının sıfır olması gerekir. Matematiksel referanslarda ayrıntılarıyla açıklanan kabul edilebilir koşul olarak adlandırılan bu görüşün matematiksel ifadesi $\int_{-\infty}^{\infty} \Psi(t) dt = 0$ dir [25]. Wavelet seçilirken sinyalin

şekli dikkate alınır. Wavelet analizi ile sinyaldeki enerjiyi, sinyalde var olan frekansları ve bu frekansların görülme süresini veren grafiklere wavelet haritası denir. Wavelet haritasının sürekli bir şekilde doldurulması için Sürekli Wavelet Dönüşümü ve kesikli olarak doldurulması için kesikli verileri kullanan Kesikli Wavelet Dönüşümü kullanılır.

3.3.1.Sürekli Wavelet Dönüşümü

Sürekli Wavelet Dönüşümü çözünürlük problemini aşmak için Kısa Zamanlı Fourier Dönüşümü'ne alternatif olarak geliştirildi. Sürekli wavelet analizinin matematiksel ifadesi

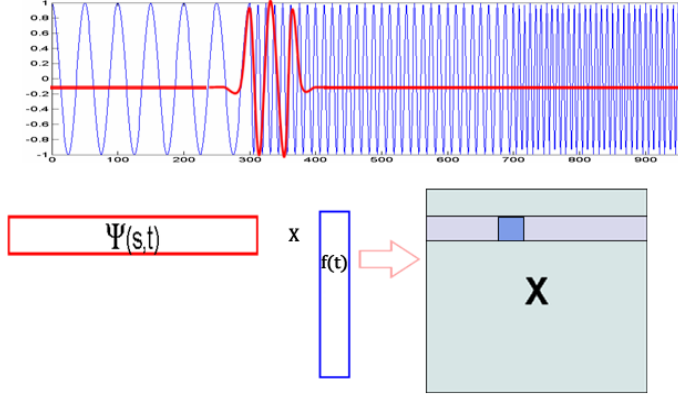
$$\text{CWT}_x^{\psi}(\tau, s) = \frac{1}{\sqrt{s}} \int f(t) \psi^* \left(\frac{t-\tau}{s} \right) dt \quad (3.3.1.1)$$

Şeklinde dir. (3.3.1.1)'de s wavelet in bir tür ölçeğidir. $s > 1$ değeri için wavelet gerilmiş başka bir de ğişle süresi uzatılmış, frekansı küçültülmüş; $s < 1$ için ise wavelet sıkıştırılmış, süresi kısaltılmış, frekansı artırılmıştır. τ ya dönüşüm sabiti denir ve wavelet fonksiyonunun konumunu verir. $f(t)$ orijinal sinyal, $\psi^* \left(\frac{t-\tau}{s} \right) dt$ ise ana wavelettir. Ana wavelet in sıkıştırılıp daraltılmasıyla analiz için yeni benzer waveletler türetilir. Sürekli wavelet dönüşümü aşağıdaki algoritmaya uyacak şekilde yapılır [26].

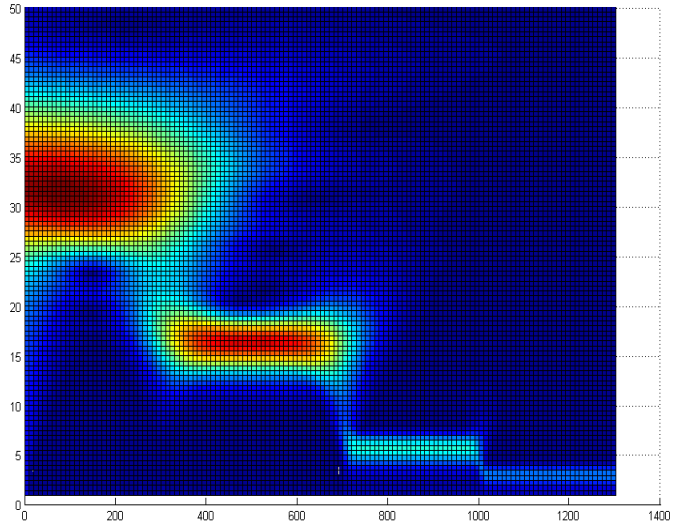
1. Adım: Wavelet sinyalin başına yerleştirilir ve $s = 1$ (en geniş wavelet) seçilir.
2. Adım: Wavelet sinyal ile çarpılır ve tüm zaman üzerinden integrali alınır. Elde edilen de ğer $\frac{1}{\sqrt{s}}$ ile çarpılır.
3. Adım: $t = \tau$ olarak de ğiştirilir ve $t = \tau$ ve $s = 1$ için dönüşüm değeri hesaplanır.
4. Adım: t değeri sinyalin sonuna ulaşınca ya kadar aynı hesaplamalar yapılır.
5. Adım: s ölçe ği yeterice küçük de ğerlerde artırılarak tüm s 'ler için önceki adımlar tekrarlanır.
6. Adım: Verilen s için her bir hesaplama zaman ölçekli düzlemin tek bir satır için

yapılır.

7. Adım: Bütün s değerleri için dönüşüm hesaplanmışsa diyagram elde edilir.



Şekil 3.9. Sürekli Wavelet Dönüşümü'nün grafiksel gösterimi[27].



Şekil 3.10. Wavelet analiz sonucu: Yatay eksen zamanı, düşey eksen frekansı gösterir

3.3.2. Kesikli Wavelet Dönüşümü

Kesikli Wavelet Dönüşümü wavelet analizinin hızlı hesaplanabilmesi için kullanılır. Kesikli Wavelet Dönüşümü'nün uygulanabilirliği kolaydır ayrıca hesaplama zamanını ve kaynak gereksinimini azaltır. En genel wavelet fonksiyonu

$$\Psi(s,t) = \frac{1}{\sqrt{s}} \Psi\left(\frac{t-\tau}{s}\right) \quad (3.3.2.1)$$

ile verilirse sürekli $f(t)$ sinyalin wavelet dönüşümünde kesikli niceliklerden s waveletin genişlemesini, τ waveletin konumunu verir. s ve τ parametrelerini örnek olarak denemenin doğal bir yolu s ölçüsü ve buna bağlı τ konumlarıyla alınan adımların büyüklüğü logaritmik kesikleştirmeyi kullanmaktır. τ 'yu a ya bağlamak için s 'yle orantılı τ 'nin her bir konumuna kesikli ilerlenmelidir. Waveletin bu tür bir kesikleştirilmesi

$$\Psi_{m,n}(t) = \frac{1}{\sqrt{s_0^m}} \Psi\left(\frac{t-n\tau_0 s_0^m}{a_0^m}\right) \quad (3.3.2.2)$$

formuna sahiptir. Bu ifadeye m ve n tam sayıları sırasıyla genişliği ve konumu kontrol eder. Burada s_0 a 'nın 1 den daha büyük bir değerinde özel olarak ayarlanmıştır; τ_0 ise konum parametresi olup 0'dan büyük olmak zorunudur. m ve n kontrol parametreleri pozitif ve negatif tüm tamsayıları içerir. Yukarıdaki ifadelere göre konum adımlarının büyüklüğü $\Delta s = \tau_0 s_0^m s_0^m$ ile doğru orantılıdır. (3.3.2.2) denklem formunun kesikli waveletini kullanan, $f(t)$ sürekli sinyalin wavelet dönüşümü

$$T_{m,n} = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \frac{1}{s_0^{m/2}} \Psi(s_0^{-m} t - n\tau_0) dt \quad (3.3.2.3)$$

şeklinde ifade edilir. (3.3.2.3)'de $T_{m,n}$ 'ler kesikli wavelet dönüşüm değerleridir.

Bu değerler m ve n ' in s - τ ızgarasında verilirler. Kesikli wavelet dönüşümü için $T_{m,n}$ wavelet katsayıları olarak bilinirler. Bu iki değişken birbirinin yerine kullanılabilir. Sinyalin ne kadar iyi gösterileceğini belirlemek wavelet uzayında yapılır. Bu durumda wavelet çerçeve teorisine başvurulabilir. Bu teori kesikli

waveletlerin özelliklerini çalışırken genel bir iskelet sağlar. Yukarıda yapıldığı gibi wavelet çerçeveleri sürekli wavelet dönüşümünden kesikli bir şekilde zaman ve genişlik parametrelerinden örnek olarak kurulur. Wavelet katsayılarından çıkan enerji

$$AE \leq \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} |T_{m,n}|^2 \leq BE \quad (3.3.2.4)$$

gibi orijinal sinyalin enerjisinin kesin sınırlandırılmış oranı içerisinde bulunur. Burada A ve B çerçeve sınırlarıdır.

$$E = \int_{-\infty}^{\infty} |f(t)|^2 dt = \|f(t)\|^2 \quad (3.3.2.5)$$

eşitliği sinyalin enerji ifadesidir. Burada A ve B çerçeve sınırları analiz ve wavelet fonksiyonu için seçilen s_0 ve τ_0 parametrelerine bağlıdır. $A = B$ ise çerçeve dar olarak bilinir. Böyle bir çerçeve

$$f(t) = \frac{1}{A} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} T_{m,n} \Psi_{m,n}(t) \quad (3.3.2.6)$$

sonsuz serisi ile verilen basit yeniden yapı formülüne sahiptir. $A = B > 1$ ise çerçeve aşırı dardır. Bununla beraber $A=B=1$ olduğu zaman wavelet ailesi ortonormal ilkeli çerçeve formuyla tanımlanır. $A \neq B$ olduğunda sinyali yeniden elde etmeyi sağlayan formül

$$f(t)' = \frac{2}{A+B} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} T_{m,n} \Psi_{m,n}(t) \quad (3.3.2.7)$$

olarak yazılabilir. s_0, τ_0 sırasıyla 2 ve 1 alındığında konum adımlarının ve genişlemenin her ikisinin birden logaritmik ölçütünün gücü diyadik grid düzeni olarak adlandırılır. Bu durumunda diyadik grid waveleti

$$\Psi_{m,n}(t) = \frac{1}{\sqrt{2^m}} \Psi\left(\frac{t-n2^m}{2^m}\right) \quad (3.3.2.8)$$

olarak yazılabilir. Diyadik grid wavelet kullanıldığında kesikli wavelet dönüşümü

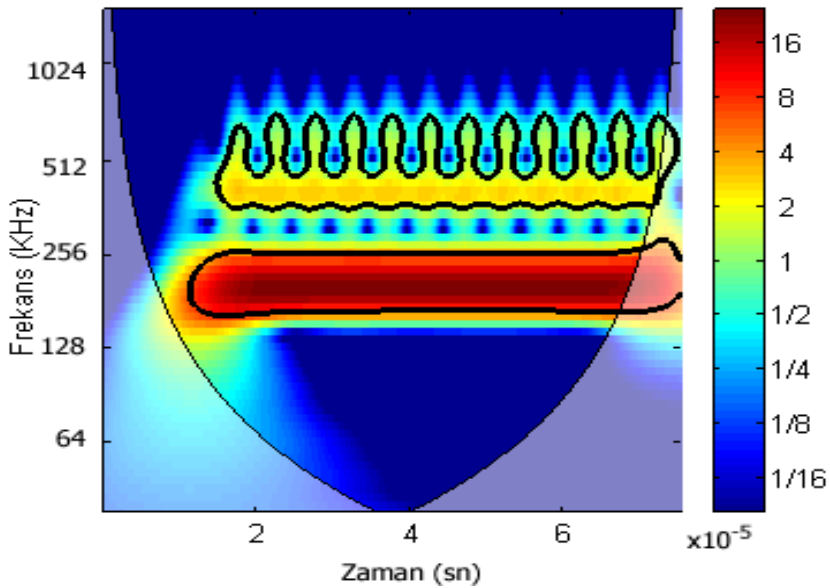
$$T_{m,n} = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)\Psi_{m,n}(t)dt \quad (3.3.2.9)$$

olarak yazılabilir.

3.4. Matlab R2007a Programı

Matlab R2007a yazılımı deneysel verilerin analiz edilip grafikselleştirilmesini sağlayan matematiksel analiz programıdır. Programda matris ve polinom işlemleri, diferansiyel hesaplama yanında 3 boyutlu grafik çizimi, 3. parti programlar için programlama sihirbazı gibi araçlar bulunur. Programın ara yüzü oldukça basit olup çok geniş bir yelpazede kullanıcıların analiz ve diğer matematiksel işlemlerine cevap verir. Analiz edilecek veriler ilk olarak yükleme çubuğu ile ana ekrana çağırılır ve programda tümleşik olarak bulunan ya da program için üretilmiş araçlar ile analiz edilir.

Çalışmada kesikli verilerin wavelet analizi için Matlab programının Wavelet Transform eklentisi kullanılmıştır.



Şekil 3.11. Matlab programı ile elde edilen wavelet enerji diyagramı

3.5. Nonlinear İletim Hattının Oluşturulması

Bir boyutlu atomik örgülere karşılık gelen elektriksel iletim hatları elektronik devre elemanları ile kolayca kurulabilir. İletim hatlarında nonlinear etkiler gerilimin fonksiyonu olan indüktörler kullanılarak oluşturulabileceği gibi benzer özelliklere sahip kapasitörler kullanılarak da oluşturulabilir. Atomların kütlelerine karşılık gelen lineer L indüktörleri ve bunlara seri atomlar arası nonlinear etkileşmelere karşılık gelen nonlinear C kapasitörleri kullanılır. Nonlinear kapasitör olarak ters beslemeli diyot seçilir. Bu diyotta kapasite voltajın ters fonksiyonudur. Bu şekilde LC birimleri atomik örgüye karşılık gelir. İndüktör ve kapasitörlerin direnç etkisini sıfırlamak için hattın sonuna bir sonlandırma direnci, hattın başına incelenecek sinyali veren bir sinyal üretici ve nonlinear etkileri arttırmak için offset kaynağı seri olarak bağlanır. DC olan offset voltajı nonlinear kapasitörün çalışma aralığını belirleyerek nonlinear etkilerin belirlenen düzeyde görülmesini sağlar. Sinyal üretici bir AC kaynağıdır ve sürücü kuvvete karşılık gelir.

Elektriksel iletim hattını oluşturmak için Elektronik Workbench elektronik simülasyon programı kullanılmıştır. Programda tek atomlu elektriksel iletim hattında en yakın ve ikinci komşu etkileşmeleri incelenmiştir.

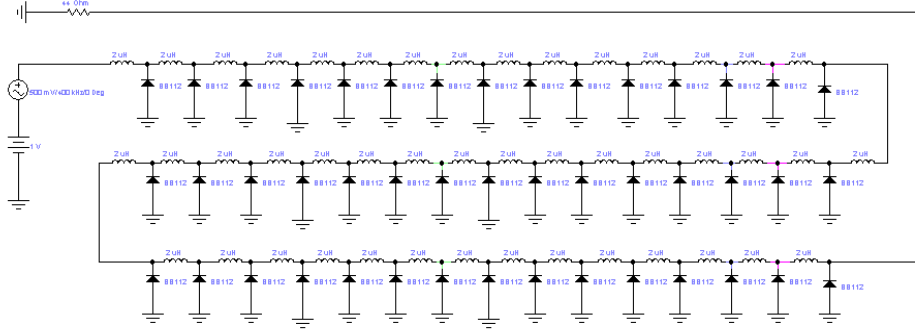
3.5. 1. Tek Atomlu Nonlinear Elektriksel İletim Hattı

3.5.1.1. Tek atomlu en yakın komşu erimli elektriksel iletim hattı

Elektronik Workbench programının yerel kütüphanesi kullanılarak ana çalışma ekranında indüktör, ters beslemeli diyot, AC kaynağı, DC kaynağı ve kullanılan devre elemanlarının iç dirençlerini sıfırlayarak hattın sonundaki yansımaları engelleyecek direnç kullanılarak elektriksel iletim hattı oluşturulmuştur. Hattın sonunda kullanılan direnç devre elemanlarının iç dirençlerine eşit olacak şekilde hattın sonuna paralel olarak bağlanmıştır. Bu empedansın değeri $Z = \sqrt{L/C}$ ile hesaplanmıştır [28,29].

İletim hattı 257 hücreden oluşmakta olup her bir hücre $L = 2\mu H$ indüktör, Phillips tarafından üretilmiş BB112 nonlinear varikap diyottan oluşur. Empedans direnci 44Ω olarak belirlenmiştir. Ters beslemeli varikap diyot çalışma aralığı

için 1V ofset voltajı kullanılmıştır. Offset voltajı seçiminde kapasitansın voltaja bağlılığı dikkate alınarak en hızlı değiştiği bunun bir sonucu olarak da nonlineer etkilerin en büyük değerde olduğu voltaj aralığı seçilmiştir. Şekil 3.12’de hattın 30 hücreli bir örneği gösterilmiştir.

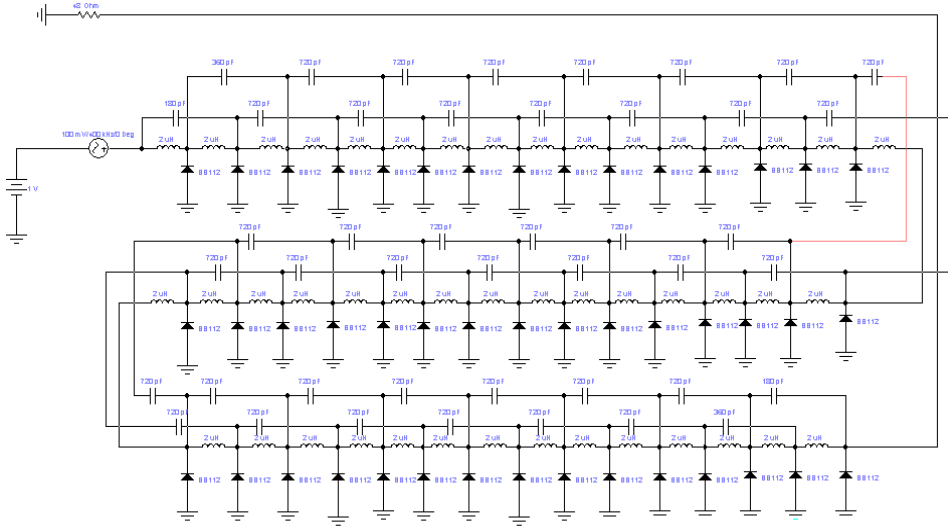


Şekil 3.12. Bir boyutlu en yakın komşu erimli nonlineer elektriksel iletim hattı

Hat üzerinde istenilen noktalarda sinyalin genlik ve faz değişimi incelenebilir, hattın dağılımı grafiği çizdirilebilir, sinyalin hat üzerinde ilerlemesiyle sinyalde meydana gelen değişimler detaylı bir şekilde incelenebilir.

3.5.1.2. Tek atomlu ikinci komşu erimli elektriksel iletim hattı

Çalışmada kullanılan ikinci tür elektriksel iletim hattı, en yakın erimli tek atomlu örgüye karşılık gelen iletim hattından farklı olarak atomların, 2. komşu atomları ile etkileştikleri durum dikkate alınarak. LC üniteleri 2. komşu LC ünitesine 720pF lık kapasitörle bağlanmıştır. 720pF kapasitör uzak etkileşimde kuvvet sabitine karşılık gelir. Benzer olarak 257 birimli hatta Philips BB112 varikap diyot, $2\mu H$ indüktör, 1V’luk ofset voltaj, 48 Ω ’luk sonlandırma direnci kullanılmıştır. Şekil 3.13’de hattın 30 hücreli bir örneği gösterilmiştir.



Şekil 3.13. Bir boyutlu ikinci komşu erimli nonlineer elektriksel iletim hattı

3.5.2. Nonlineer Etkiler

Elektriksel iletim hattında nonlineer etkilerin kaynağı ters beslemeli varikap diyottur. Bu tür bir diyotun çalışma voltajı ayarlanarak nonlineer etkinin büyüklüğü belirlenebilir. Bu amaçla diyotun C-V grafiği çizilerek en iyi bias voltaj noktası tespit edilmiştir. Offset voltajı tespit etmek için LC devresi çizilmiş ve Elektronik Workbench programında AC analiz ile bias voltaj artırılarak voltaj frekans grafiğinden elde edilen grafik çizgisinin frekansı rezonans frekansı olarak bulunmuş ve rezonans koşulundan bias voltaja karşılık gelen $C = 1/4\pi^2 f_{rez}^2 L$ kapasitans değerleri elde edilmiştir. Voltaj kapasitans eğrisi çizilerek nonlineer etkilerin en iyi görüleceği nokta. DC bias 1Volt olarak belirlenmiştir. Sonuçlar Çizelge 1’de verilmiştir.

Çizelge 1. DC voltaj değerine göre ölçülen frekans ve hesaplanan kapasite değeri

Sıra	Bias DC (V)	Rezonans Frekansı (MHz)	Kapasitans (nF)
1	0.25	2.6650	3.5701
2	0.50	2.9359	2.9417
3	0.75	3.1847	2.5000
4	1.00	3.4159	2.1731
5	1.25	3.6296	1.9247
6	1.50	3.8258	1.7324
7	1.75	4.0150	1.5729
8	2.00	4.1902	1.4441
9	2.25	4.3584	1.3348
10	2.50	4.5160	1.2433
11	2.75	4.6632	1.1660
12	3.00	4.8138	1.0942
13	3.25	4.9610	1.0302
14	3.50	5.0976	0.9758
15	3.75	5.2307	0.9267
16	4.00	5.3569	0.8836

Bu değerlere göre kapasitans – voltaj grafiği çizilerek şekil 3.14’de gösterilen grafik elde edilmiştir. DC bias 3V civarında, V voltajının yeterince küçük alınmasıyla kapasitansın lineer bir yaklaşımı yapılabilir.

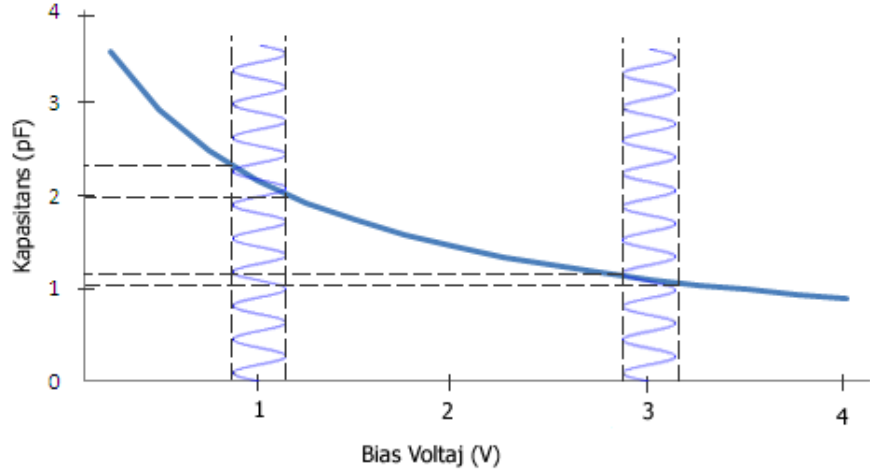
$$C(V) = C_0(1 + a_1V + a_2V + \dots) \quad (a_1 < 0 ; b > 0) \quad (3.5.2.1)$$

yeterince küçük voltaj için lineer durum ortaya çıkar ve serinin ilk iki terimi alınabilir.

$$C_0 \approx C_{01}(1 - 2bV_0) \quad (3.5.2.2)$$

$$b = -\frac{a_1}{2(1 + a_1V_0)} \approx -a_1/2 \quad (3.5.2.3)$$

Kapasitans–Voltaj eğrisinden $V_0 = 1V$ bias voltaj da 0.5 voltluk sinyal için kapasitans 1.9nF - 2.5nF aralığında değişir.



Şekil 3.14. DC ters voltajın bir fonksiyonu olarak kapasite – voltaj grafiği

3.5.3. Dağınımın Etkisi

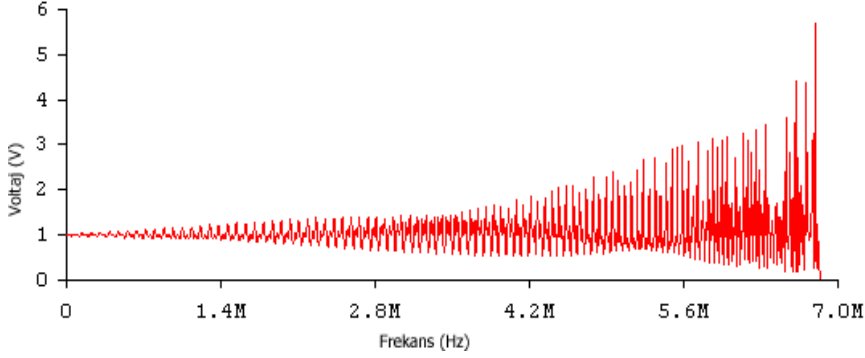
Kurulan iletim hattının dağınımli etkileri için AC analiz yapılmıştır. 257 hücreli hatta 1 volt bias altında 128. hücrede yapılan analiz sonucu hattın dağınım eğrisi ve voltaj-frekans eğrileri elde edilmiştir (Şekil 3.15). Dağınım eğrisi ile frekansın dalga vektörüne bağılılığı

$$\omega = \omega_c \sin \left| \frac{k}{2} \right| \quad (3.5.3.1)$$

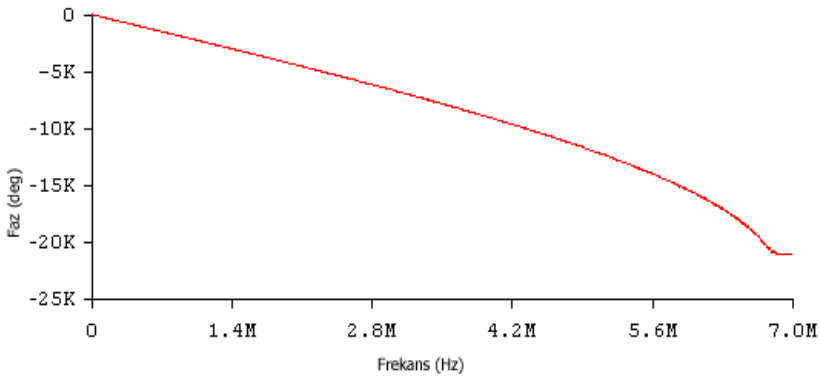
tek atomlu kesikli örgünün dağınım eğrisine uyacak şekilde elde edilmiştir. (3.5.3.1)'de

$$\omega_c = 2(LC)^{-1/2} \quad (3.5.3.2)$$

üst kesilim frekansıdır. ω 'nın k 'ya bağılılığında $0 \leq k \leq \pi$ değerleri arasında 1. Brillouin bölgesi sınırları içerisindedir. Ancak elde edilen grafiğin ω eksenine göre simetriği verilmemiştir.



(a)



(b)

Şekil 3.15. Tek atomlu elektriksel iletim hattının a) Frekans spektrumu b) Dağılım eğrisi

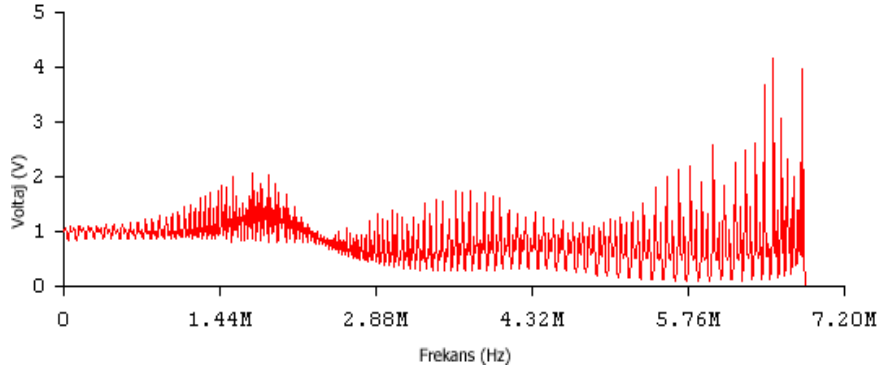
Benzer şekilde 2. derece komsu atom etkileşmelerine karşılık gelen nonlineer elektriksel iletim hattında dağılım bağıntısı ve voltaj-frekans bağıntıları

$$\omega = \omega_c \sin\left(\frac{k}{2}\right) / (1 + \gamma \sin^2 k)^{1/2} \quad (3.5.3.3)$$

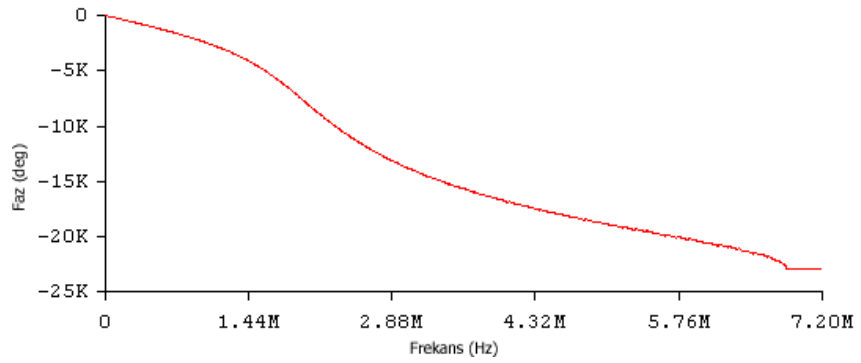
tek atomlu uzak erimli kesikli örgünün dağılım eğrisine uyacak şekilde elde edilmiştir (Şekil 3.16). (3.5.3.3)'de $\gamma = \frac{4C}{C_0}$ ve $\omega_c = \frac{2}{\sqrt{LC}}$ üst kesim

frekansıdır. \vec{k} dalga vektörü iletim hattında gerçek uzunlukların olmamasından

dolayı $[\pi, -\pi]$ aralığında değerler alır. Bu sonuç 1. Brillouin bölge sınırlarıdır. Grafik düşey eksene göre simetriktir. Dağınum eğrisi dalga hat üzerinde ilerlerken fazında meydana gelen kaymaları verir. Dağınum eğrisinin eğiminin arttığı bölgelerde kipler bir birine yaklaşır. AC analiz sonucu elde edilen frekans spektrumu ve dağınum eğrisi şekil 3.16'da verilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 3.16. Uzak erimli elektriksel iletim hattının a) Frekans spektrumu
b) Dağınum eğrisi

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Bir Boyutlu Tek Atomlu En Yakın Komşu Atom Erimli Nonlinear Elektriksel İletim Hattında Dalgalar

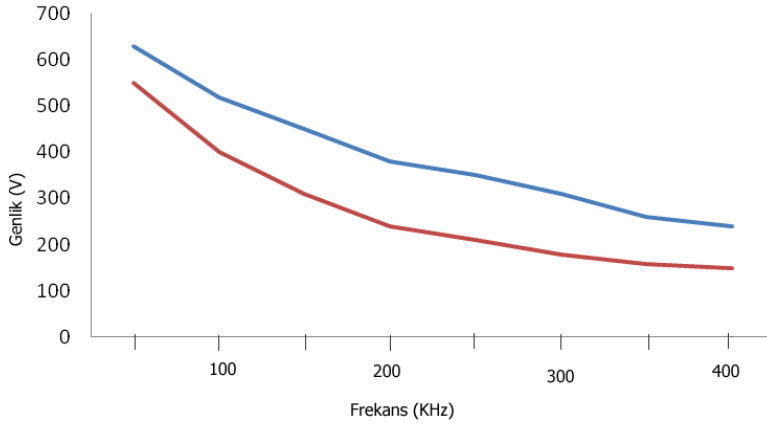
Bu bölümde bir boyutlu ve tek atomlu nonlinear ve dağınımlı örgüye karşılık gelen elektriksel iletim hattı kurulmuştur. İletim hattında etkileşmelerin en yakın hücre ile olduğu göz önüne alınmış olup 2. ve daha üst derece komşuluk etkileşmeleri dikkate alınmamıştır. Sinyal hattın başlangıç ucundan sinüzoidal AC kaynağı ile sürülmüştür. Çalışma üç kısımdan oluşmaktadır. İlk kısımda frekans, genlik ve iletim hattı üzerindeki konuma göre solitonların ortaya çıkması incelenmiş, ikinci kısımda iletim hattı üzerinde oluşan dalganın genlik ve frekansa göre değişimi incelenmiş ve son kısımda sürücü kuvvete karşılık gelen sinüzoidal dalganın iletim hattındaki hücrelerde değişimi incelenmiştir. Çalışmanın bu son kısmında 100, 200, 300 ve 400KHz'lik dört giriş sinyalinin 100, 250 ve 500mV genlik değerleri kullanılmıştır. Tüm veriler 2, 4, 6,...256 hücrelerden 0.3msn'lik sürelerde transient analiz ile alınmıştır. Bu verilerin Matlab yazılımı ile Fourier ve Wavelet analizleri yapılmıştır. Bu analizler sonucu sistemin davranışı açıklanmaya çalışılmıştır. Böylece iletim hattının başından verilen bir dalganın solitonlara dönüşmesi, tüm iletim hattı üzerindeki dalganın değişimi ve bir hücreden ötekine ilerleyen sinyaldeki değişim incelenmiştir.

4.1.1. Sinüzoidal Bir Giriş Sinyalinin Frekans ve Genliğe Bağlı Olarak Solitonlara Dönüşmesi

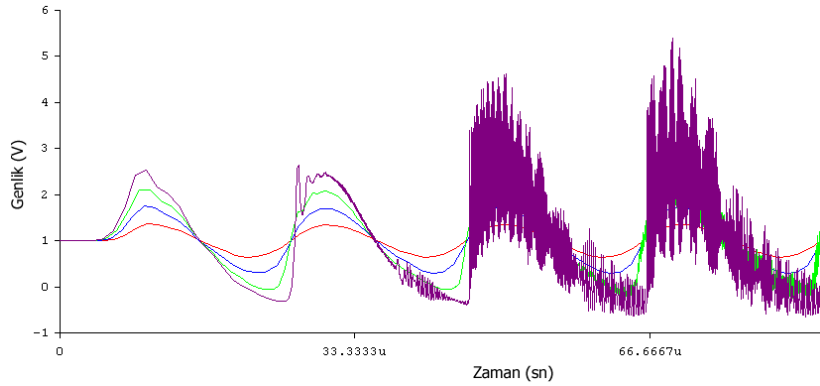
İletim hattına 50, 100, 150,...400KHz frekanslı 8 ayrı sinüzoidal sinyal gönderilmiş ve her bir frekans değeri için giriş sinyalinin genliği değiştirilerek 100. ve 200. hücrelerde sinüsel dalgaların kararsız hale gelmesi ve solitonların ortaya çıkışı incelenmiş ve sonuçlar Şekil 4.1'de gösterilmiştir. 50-400KHz'lik 8 farklı frekanslı sinyaller dağınım bağıntısının lineer bölgesinde bulunmaktadır. Bu dağınım bağıntısının uzun dalga boylarındaki bölgeye karşılık gelir ve bu uzun dalga boylu dalgalar için kesikli iletim hattı sürekli bir hat gibi davranır. Bu bölgede sistemin dalga denklemi KdV denklemine uyar. Elde edilen verilerden iletim hattına verilen sürücü sinyalin frekansı arttıkça sinüsel yapılı dalganın solitonlara ayrışması için gerekli olan genlik değerinin düştüğü gözlenmiştir. Dalga genlikleri arttıkça solitonların daha erken sürelerde ortaya çıktığı

gözlenmiştir. Ayrıca aynı genlikte fakat daha yüksek frekanslardaki giriş sinyalleri için dalga daha erken zamanlarda kararsız hale gelip solitonlara dönüşmektedir.

Ayrıca 128. hücrede yapılan transient analiz sonucu 50KHz lik giriş sinyalinin 250,500 ve 750 ve 1000mV'luk genlikleri için solitonlara dönüşümü değişimi grafiksel olarak şekil 4.2 'de gösterilmiştir. 50KHz gibi düşük frekanslı bir sinyalin solitonlara ayrışması daha yüksek bir genlik ve daha uzun süre aldığı bu nedenle de hattın üzerinde daha fazla ilerlemesi gerektiği gözlenmiştir.



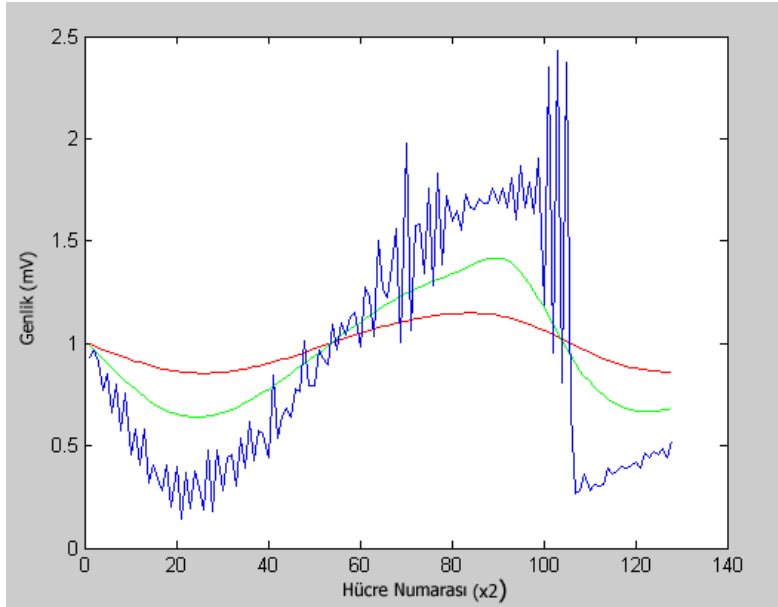
Şekil 4.1. Solitonların ortaya çıkışında genlik-frekans ilişkisi: Mavi çizgi 100. hücrede alınan ölçümü; kırmızı çizgi 200. hücrede alınan ölçümü gösterir



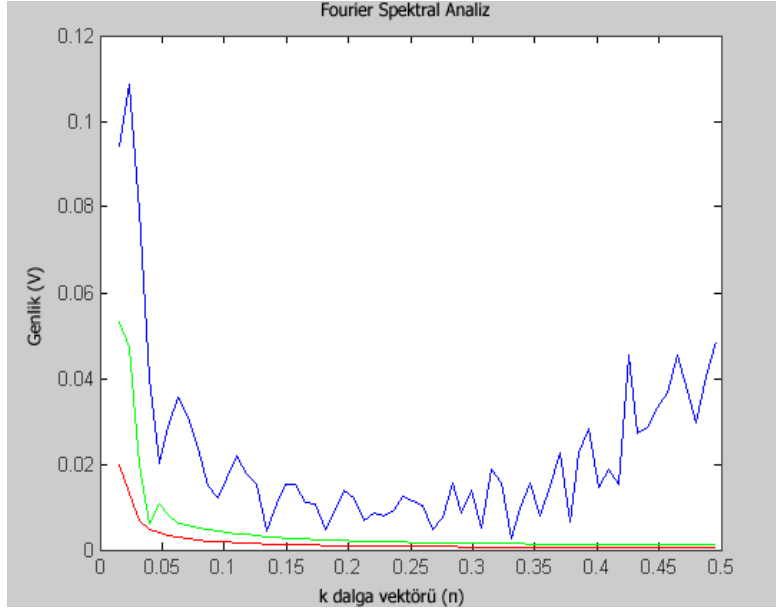
Şekil 4.2. Sinüsel başlangıç koşullu sinyalin solitonlara dönüşmesi: Kırmızı çizgi 250mV'luk sinyali; mavi çizgi 500mV'luk sinyali; yeşil çizgi 750mV'luk sinyali; mor çizgi 1000mV'luk sinyali gösterir

4.1.2. Frekans ve Genliğe Bağlı Olarak İletim Hattı Üzerindeki Dalganın İncelenmesi

Çalışmanın bu kısmında bir boyutlu en yakın komşu erimli nonlinear iletim hattına gönderilen 100, 200, 300 ve 400KHz'lik 4 sinyalin 100,250 ve 500mV'lu genlikleri için tüm hat üzerinde oluşan dalganın şekli ve spektral dağılım grafikleri, 2., 4.,...256. hücrelerden alınan verilerin Matlab programı kullanılarak elde edilmiştir. Dalga şekillerinde her bir frekans değeri için 100 ,250 ve 500mV'luk üç sinyal aynı grafiğe aktarılarak genliğe bağlı olarak sinyalin değişimi incelenmiştir. 100KHz'lik sinyal için 100,250 ve 500mV'luk genlikler uygulandığında 500mV'luk sinyalin ön cephesinin eğiminin arttığı gözlenmiştir (Şekil 4.3 (a),(b)). Giriş sinyalinin frekansı attırıldıkça iletim hattı üzerindeki dalganın daha küçük genliklerde de dalga cephesinin eğiminin arttığı (Şekil 4.4 (a), Şekil 4.5(a) ve Şekil 4.6 (a)), daha yüksek genlik değerlerinde ise dalganın solitonlara, solitonların da yeni solitonlara ayrıştığı gözlenmiştir. Grafiklerde kırmızı renkli çizgi 100mV'luk giriş sinyali, yeşil renkli çizgi 250mV'luk giriş sinyalini mavi renkli çizgi 500mV'luk giriş sinyalini gösterir.

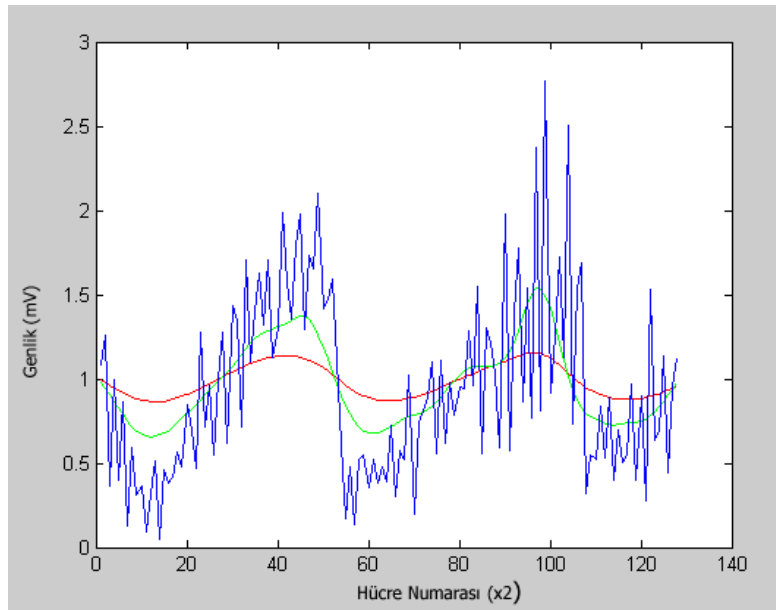


(a)

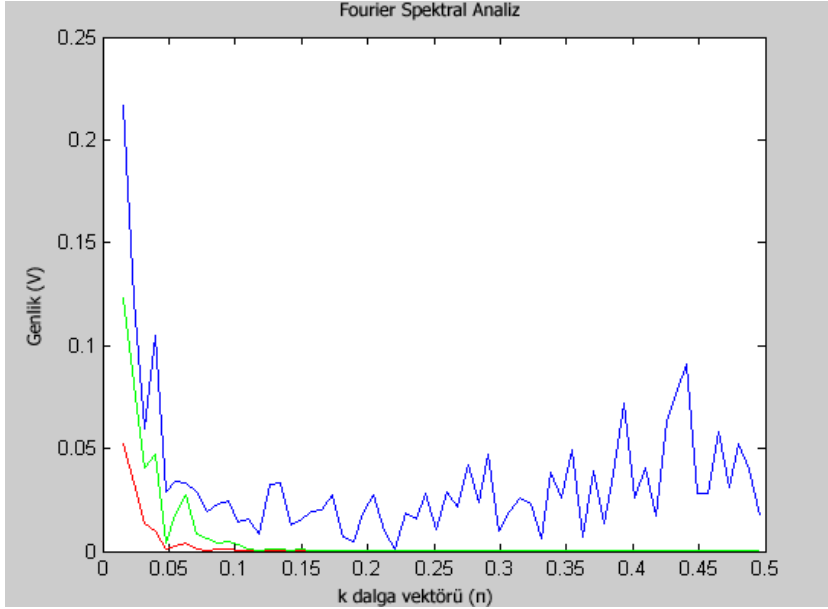


(b)

Şekil 4.3. 100 KHz'lik giriş sinyalinin hat üzerinde oluşturduğu dalganın
a) Transient analizi b) Fourier Analizi

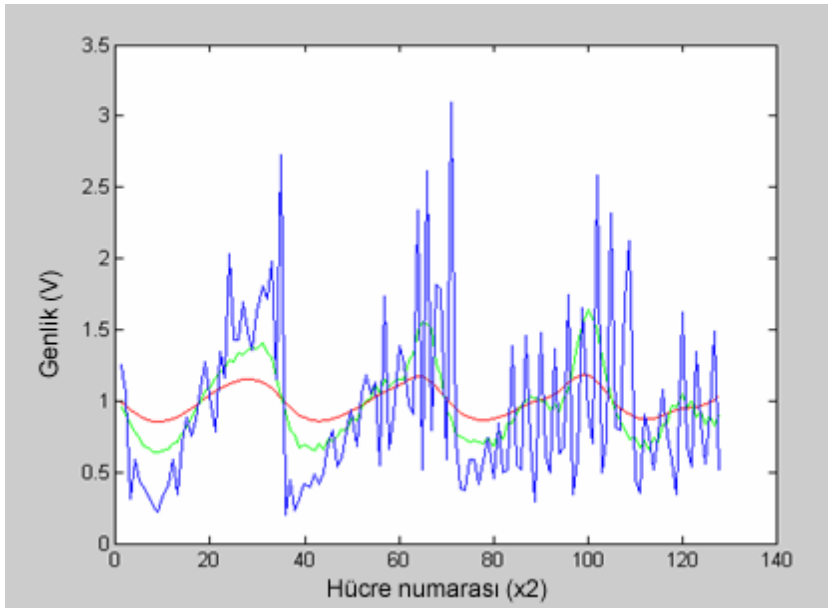


(a)

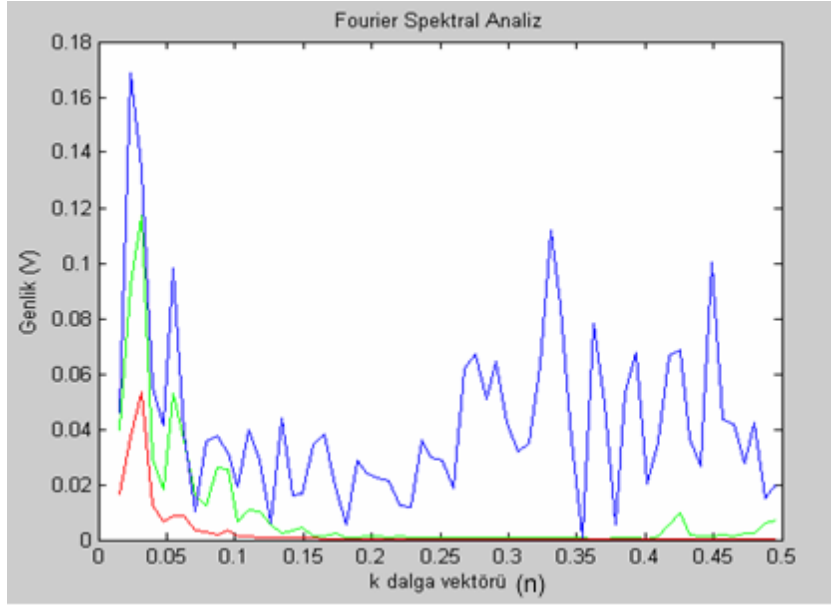


(b)

Şekil 4.4. 200 KHz'lik giriş sinyalinin hat üzerinde oluşturduğu dalganın
a) Transient analizi b) Fourier Analizi

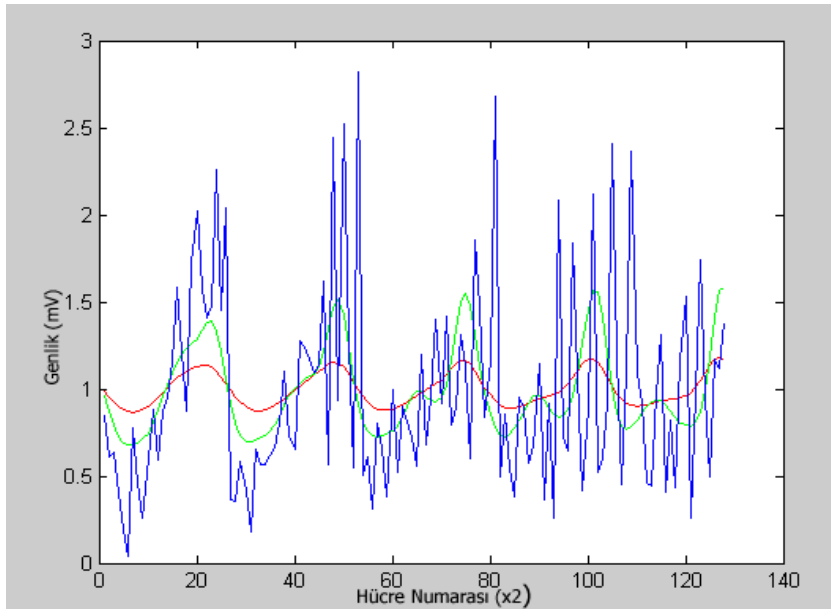


(a)

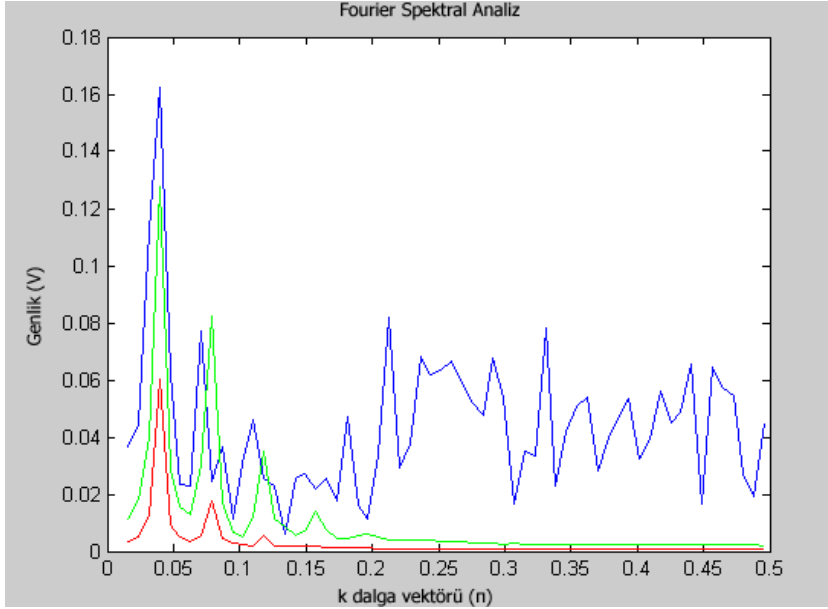


(b)

Şekil 4.5. 300 KHz'lik giriş sinyalinin hat üzerinde oluşturduğu dalganın
a) Transient analizi b) Fourier Analizi



(a)



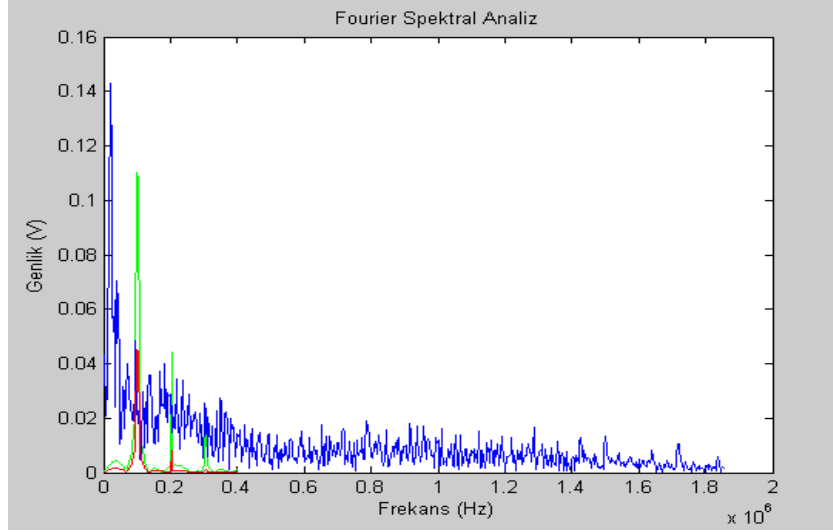
(b)

Şekil 4.6. 400 KHz'lik giriş sinyalinin hat üzerinde oluşturduğu dalganın
a) Transient analizi b) Fourier Analizi

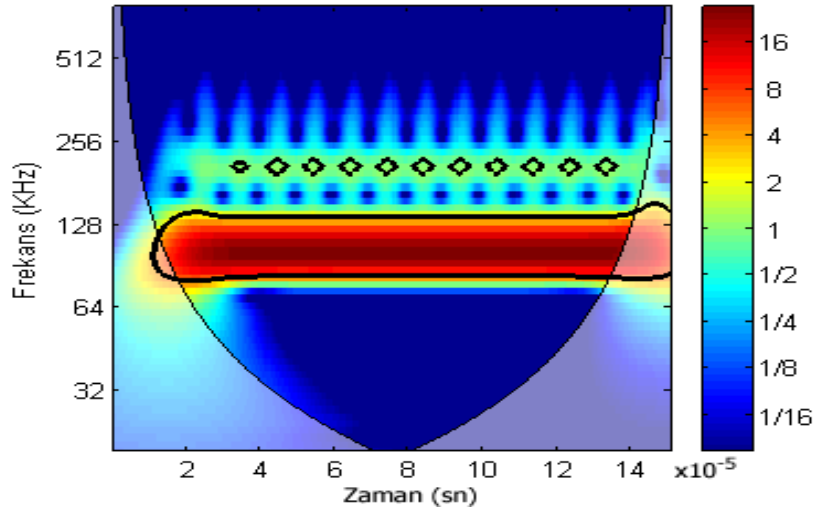
4.1.3. 100 KHz Frekanslı İlerleyen Dalganın İncelenmesi

100 KHz,'lik sinüs dalgası elektriksel iletim hattının lineer bölgesinde bulunan frekanslardan biridir. Bu dalga kullanılarak hat üzerinde belirli noktalarda alınan ölçümler sonucu Fourier analizi ve Wavelet analizi grafiksel olarak gösterilmiştir. Çalışmada 100mV,250mV ve 500mV genlikli üç sinyal kullanılmıştır. Fourier spektral analiz grafiğinde kırmızı renkli çizgi 100mV genlikli sinyali; yeşil renkli çizgi 250mV genlikli sinyali; mavi renkli çizgi 500mV genlikli sinyali göstermekte olup diğer frekanslarda da aynı renk sistemine uyulmuştur. Gerek Fourier gerekse Wavelet grafikleri çizdirilirken değişmelerin olduğu zaman dilimleri ve hücreler çalışmaya aktarılmıştır. Elde edilen grafikler 200. hücre üzerinden alınan veriler kullanılarak çizilmiştir. Her genlik değişiminde veriler elde edilip işleme alınmıştır. 100 mV'luk genliğe sahip sinyal hat üzerinde ilerlerken Fourier ve Wavelet analizleri sonucu sinüsel karakterle değişmeden ilerlediği gözlenmiştir 100 mV gibi küçük bir genliğe sahip sinüs dalgası Şekil 4.7 (a) 'da görüldüğü gibi 200KHz'lik bir harmonik oluşturmakta, 250mV genlikte ise 200KHz frekanslı harmoniğin genliği artmakta ve 300KHz'de üçüncü harmonik

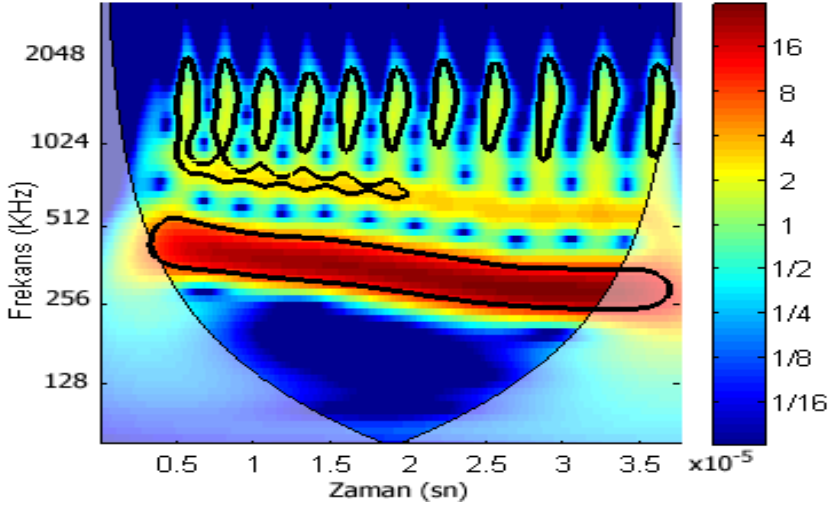
oluşmaktadır (Şekil 4.7 (a) ve (b)). Genlik 500mV'a çıktığında Şekil 4.7 (a) ve (c) incelendiğinde sistemde bir anomali olduğu görülür Bu frekans ve genlik aralıklarında yalnız sinüsel dalgalar değil solitonlar da kararlılığını kaybetmekte ve sistem kaotik bir duruma geçmektedir. Bu aralığın ilerde daha yakından incelenmesi ve nedeninin araştırılması planlanmaktadır.



(a)



(b)



(c)

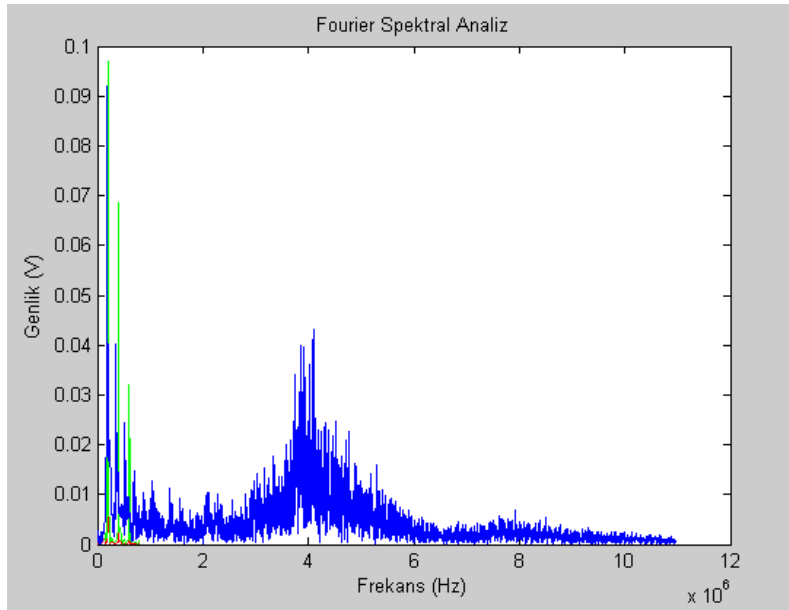
Şekil 4.7. 100KHz'lik sinyalin a) Fourier analizi b) Wavelet analizi (250mV) c) Wavelet analizi (500mV)

4.1.4. 200 KHz Frekanslı İlerleyen Dalganın İncelenmesi

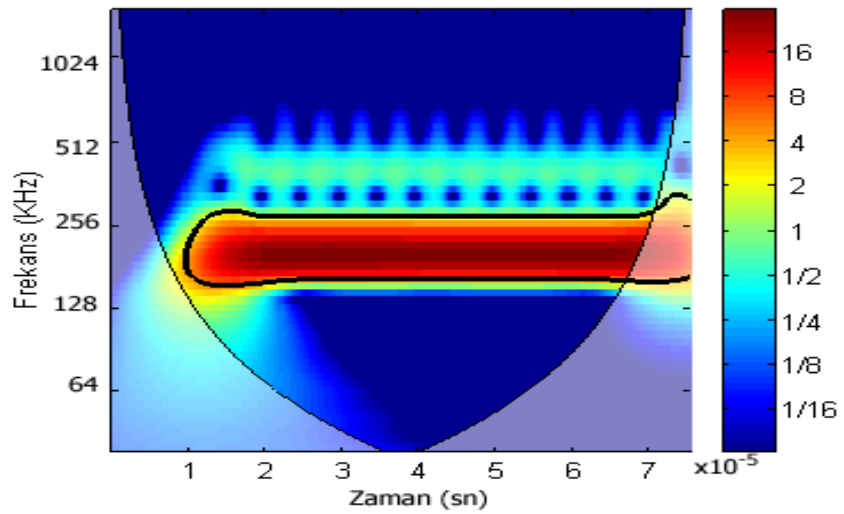
Bu bölümde sürücü kuvvet olarak 200KHz frekanslı sinüs dalgası 100, 250 ve 500mV genliklerle sürülmüştür. Elde edilen taransient verileri incelendiğinde 250 ve 500mV genliklerde kayda değer değışmeler görülmüştür. 200. hücrede Fourier dönüşümü ve Wavelet dönüşümü uygulanmış olup Fourier analizinde (Şekil 4.8 (a)) 100mV' genlikli sinyalden 1 adet 400KHz'lik harmonik oluşurken 250mV genlikte 400 ve 600KHz'lik iki yan bant 500mV genlikte 11MHz'e kadar geniş bir yelpazede harmonikler oluşmaktadır. Wavelet grafiklerinde ise 500mV genlikli sinyalden 8MHz' kadar harmonikler oluştuğu enerjinin yüksek frekanslı kiplere aktarıldığı hatta 4MHz civarında yüksek enerjili bir kip oluştuğu görülmektedir.

Özellikle wavelet analizlerinden enerjinin sadece belli frekanslara aktarıldığı ve diğer frekanslara aktarılmadığı açık olarak görülmektedir. Bu KdV denkleminin simetrisinden yani uyduğu korunum yasalarından ileri gelmektedir (Zabusky, Kruskal,1965).Enerji bu kipler arasında gidip gelmektedir. Ancak daha yüksek frekansdaki ve genlikteki dalgalarda ise özellikle Fourier analizinden enerjilerin kiplerin hepsine aktarılmaya başladığı açıkça görülüyor. Bu genliklerde artık dalga

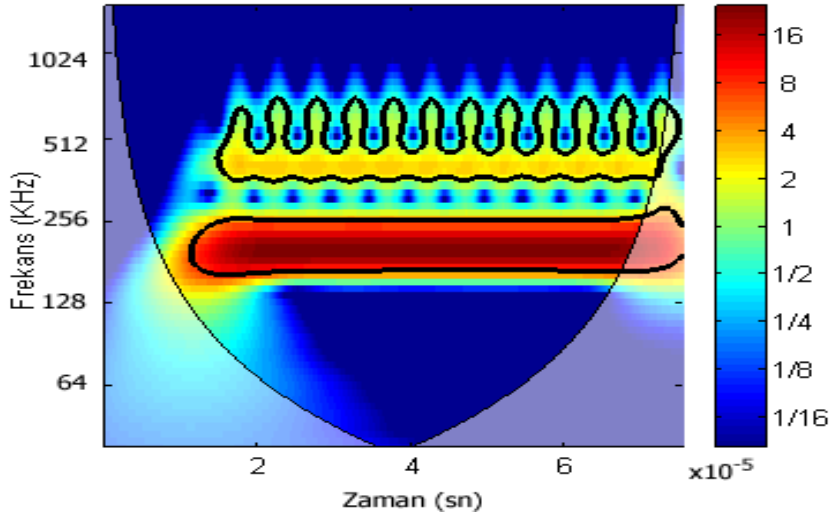
denklemleri KdV denklemi olarak davranmamakta ve sistem simetrik özelliklerini kaybetmektedir.



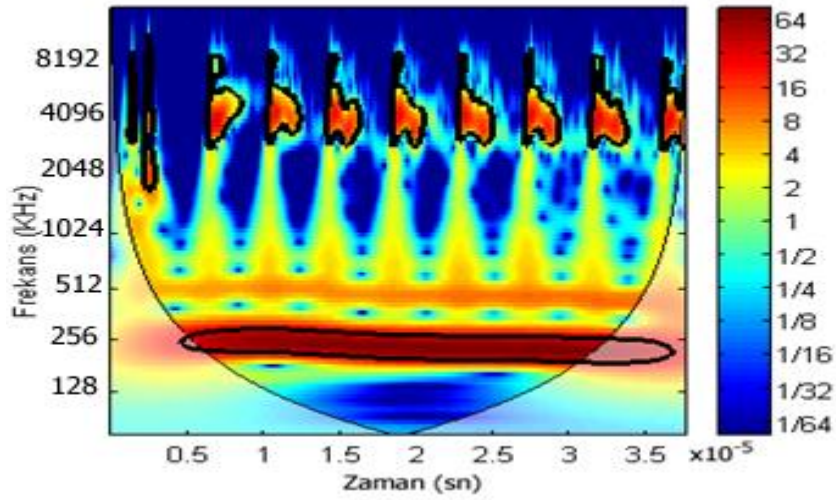
(a)



(b)



(c)



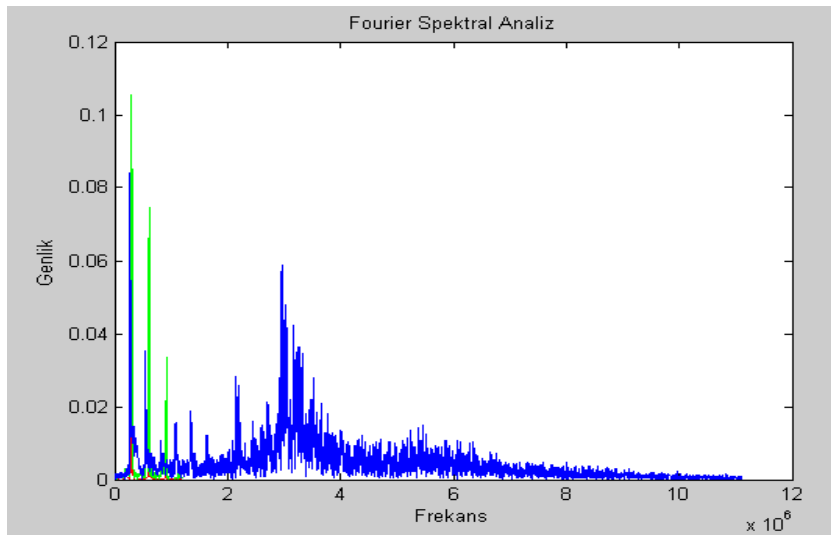
(d)

Şekil 4.8. 200KHz'lik sinyalin a) Fourier analizi b) Wavelet analizi (100mV)
c) Wavelet analizi (250mV) d) Wavelet analizi (500mV)

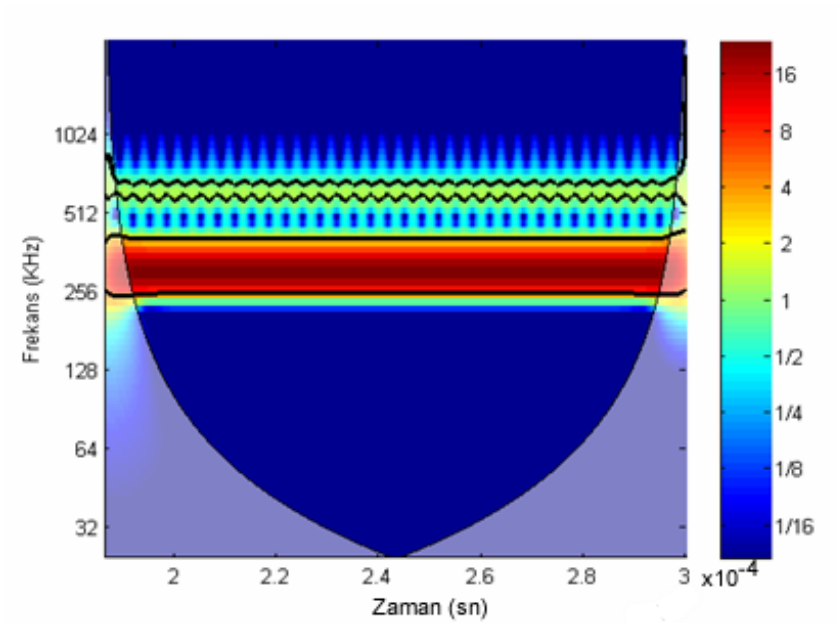
4.1.5. 300 KHz Frekanslı İlerleyen Dalganın İncelenmesi

Çalışmanın bu kısmında 300 KHz frekanslı sinüzoidal dalga elektriksel iletim hattına 100, 250 ve 500mV genliklerde gönderilmiştir. Elde edilen tarasient verilerinden Fourier analizi ve wavelet analiz yapılmıştır. Genliklere karşılık gelen 200. hücreden alınan verilerden elde edilen Fourier dönüşümleri grafiği (şekil 4.9 (a)) incelendiğinde 100mV, 250mV genlikli sinyallerin 600 ve 900KHz de harmoniklerinin, 500mV genlikli sinyalde ise 11MHz yüksek frekanslı harmoniklerin ve 3MHz civarında yüksek genlikli harmoniklerin oluştuğu görülmüştür. Wavelet grafiklerinde (Şekil 4.9 (b), (c) ve (d)) ise 100mV giriş sinyalinin sürekli 600KHz lik bir harmonik oluşturduğu ve enerjini bu harmonikte kaldığı; 250mV genlikli sinyalin 600KHz frekanslı harmoniğe yüksek enerji aktardığı, 26µs sonunda daha yüksek frekansların ortaya çıkmaya başladığı görülmüştür. 500mV giriş sinyalinin ise 3MHz civarında yüksek enerjili harmonikler oluşturduğu enerjinin geniş bir bant aralığında kiplere yayıldığı görülmektedir.

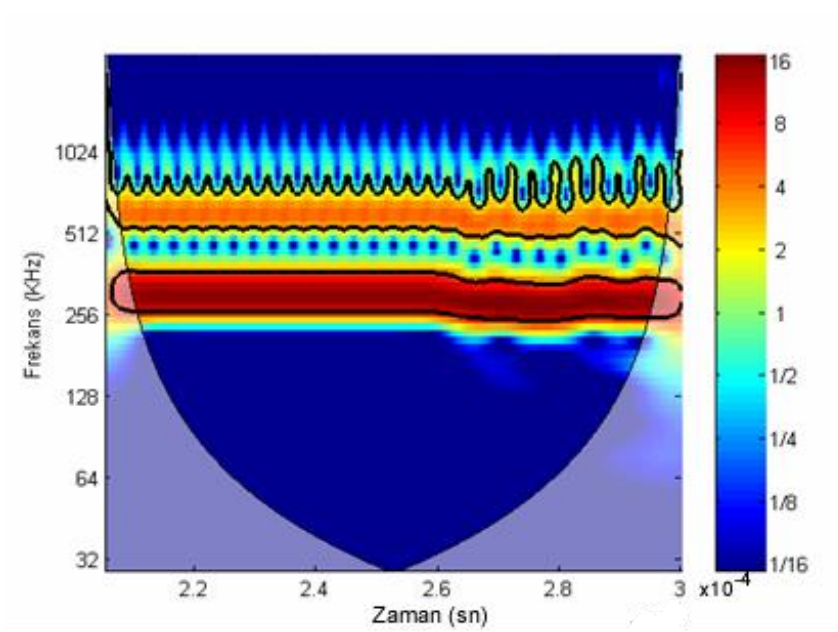
Büyük frekanslardaki büyük Wavelet genliklerindeki şekillerin zaman eksenini boyunca incelendiğinde bunların değiştiği ve tekrar aynı şekli aldıkları görülmektedir. Bu kipler arası enerji aktarımının zamanla değiştiğini ancak bu değişimin periyodik olduğunun bir göstergesi gibi alınabilir.



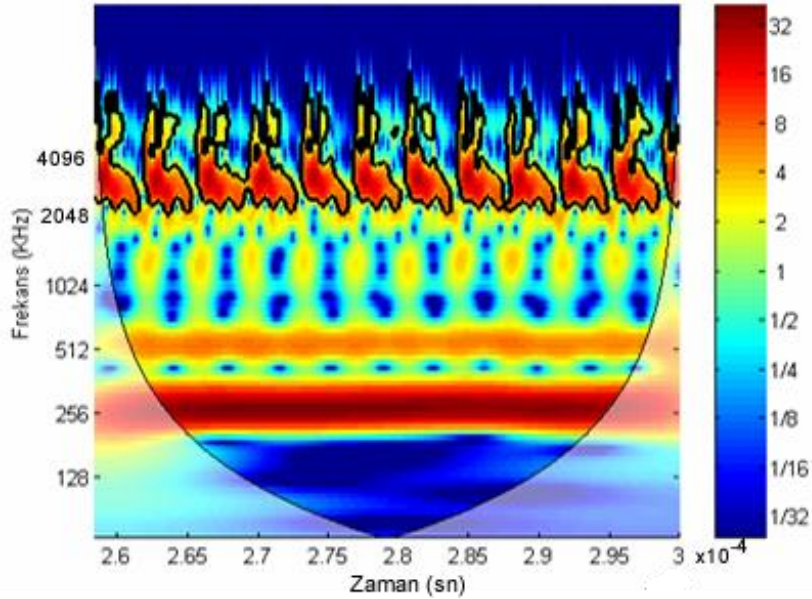
(a)



(b)



(c)



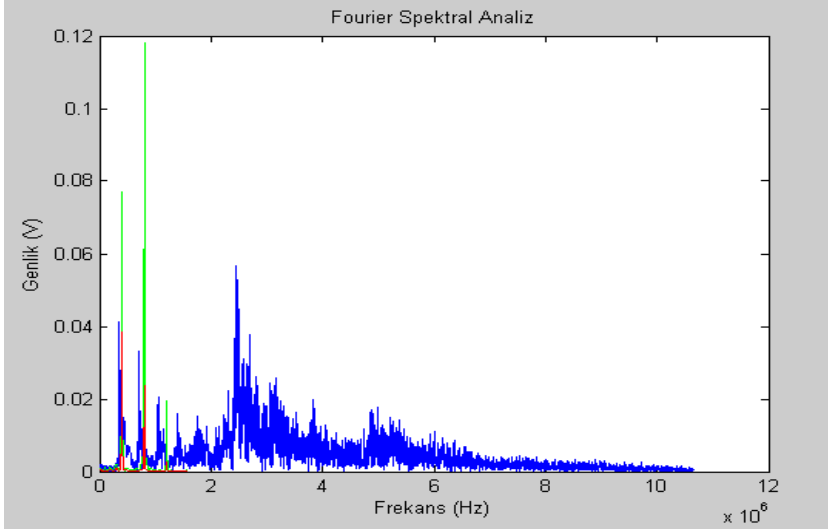
(d)

Şekil 4.9. 300 KHz'lik dalganın a) Fourier analizi b) Wavelet analizi (100mV) c) Wavelet analizi (250mV) d) Wavelet analizi (500mV)

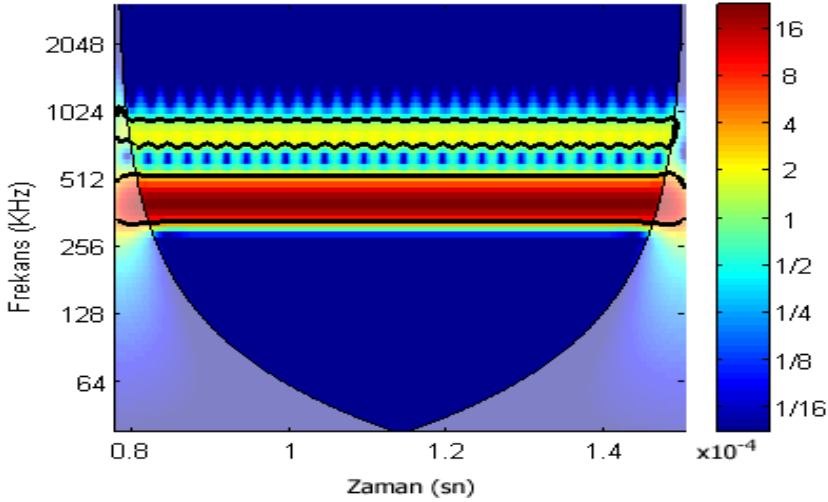
4.1.6. 400 KHz Frekanslı İlerleyen Dalganın İncelenmesi

Bu kısımda 400 KHz frekanslı sinüzoidal dalga elektriksel iletim hattına 100,250 ve 500mV genliklerde gönderilmiştir. Bu sinyallerin hat üzerindeki ilerlemesi incelenmiştir. 200. hücreden elde edilen verilerin Fourier analizi sonucunda elde edilen grafik (Şekil 4.10 (a)) incelendiğinde 100mV genlikli sinyalin 800KHz de bir harmoniğinin oluştuğu, 250mV genlikli sinyalin 800 ve 1200KHz de 2 adet harmoniğinin oluştuğu gözlenmiştir. Bunun yanında 500mV genlikli sinyalin 11MHz 'e kadar harmonikler oluşturduğu kiplerin sıklaştığı sistemin kaosa gittiği, 2.4MHz civarında yüksek genlikli bir harmonik oluşturduğu görülmüştür. Aynı verilerden wavelet grafikleri elde edilmiş ve şekil 4.10 (b), (c) ve (c) elde edilmiştir. Wavelet grafiklerinden 100mV ve 250mV genlikli sinyallerden yeni harmonikler çıktığı, bunun yanında 250mV genlikli sinyalden oluşan harmoniğin yüksek enerjili olduğu, 500mV genlikli sinyalin wavelet grafiği incelendiğinde pek çok yeni kipi oluştuğu, enerjinin 4MHz'e kadar sistem üzerinde kiplere aktarıldığı ve 1.2KHz frekanslı harmoniğin yüksek enerjili olduğu görülmüştür.

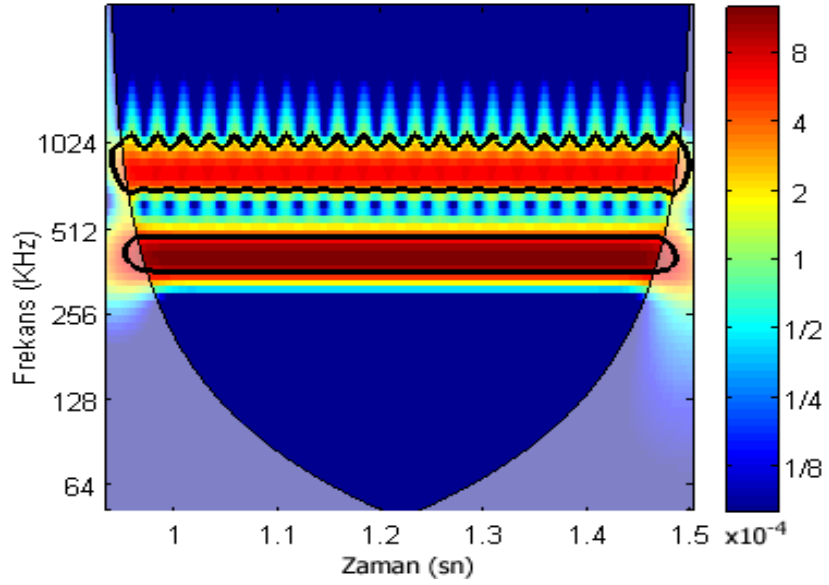
Bu inceleme aralığında büyük frekans ve genliklerde özellikle giriş dalgasının enerjisinin diğer kiplere daha fazla aktarıldığı ve belli zaman aralığında kendi frekansının bile daha alt frekanslara düştüğü görülmektedir. Bu sistemdeki enerjinin eşbölüşümüne doğru giden bir aşamanın başladığını da göstermektedir.



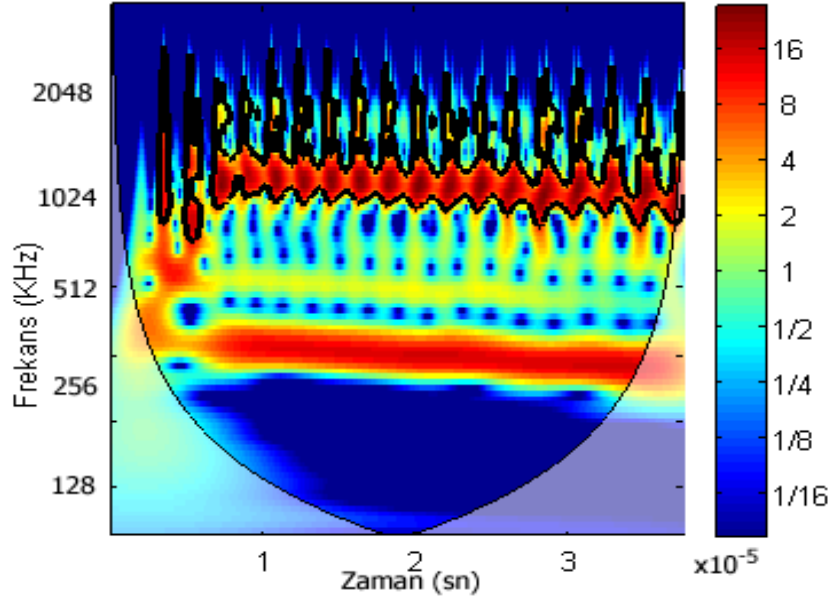
(a)



(b)



(e)



(d)

Şekil 4.10. 400 KHz'lik dalganın a) Fourier analizi b) Wavelet analizi (100mV)
c) Wavelet analizi (250mV) d) Wavelet analizi (500mV)

4.2. Bir Boyutlu Tek Atomlu İkinci Komşu Atom Erimli Nonlineer Elektriksel İletim Hattında Dalgalar

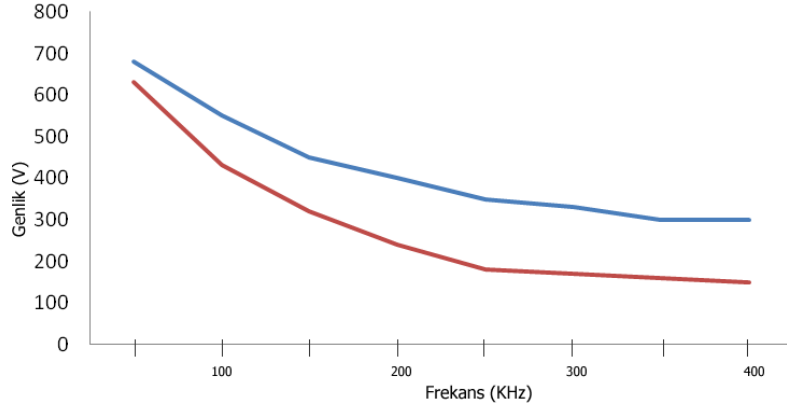
Çalışmanın bu kısmında bir boyutlu ve tek atomlu nonlineer ve dağınımlı örgüye karşılık gelen iletim hattında en yakın komşu atom etkileşmelerine ilaveten 2. derece atom komşuluğu göz önünde bulundurulmuştur. Çalışma böyle bir elektriksel iletim hattında dalgaların ilerlemesinin incelenmesi için 3 aşamadan oluşmaktadır. Birinci kısımda solitonların ortaya çıkış koşulları araştırılmış, ikinci kısımda frekans ve genliğe bağlı olarak tüm iletim hattı üzerindeki dalganın değişimi incelenmiş son kısımda ise sisteme gönderilen sinüzoidal sinyalin hat üzerindeki değişimi incelenmiştir. Tüm veriler transient analizden elde edilmiş olup bu veriler Matlab yazılım kullanılarak yazılan programlar ile Fourier analizler ve wavelet analizleri yapılmıştır. Tüm veriler 0.3ms'lik sürelerde alınmıştır.

4.2.1. Sinüzoidal Bir Giriş Sinyalinin Frekans ve Genliğe Bağlı Olarak Solitonlara Dönüşmesi

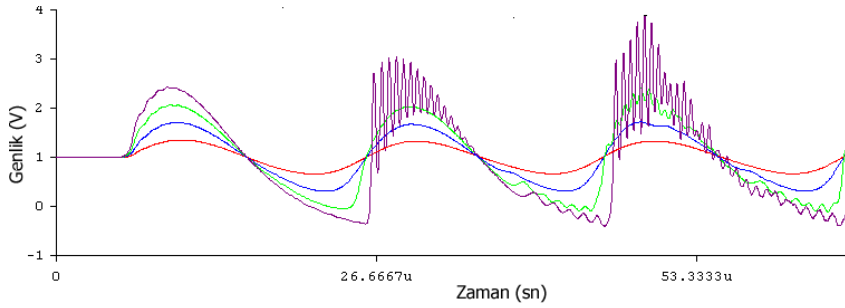
Çalışmanın bu kısmında iletim hattına sürücü kuvvete eş değer 50, 100, 150,..., 400KHz 8 sinüzoidal sinyal ayrı ayrı gönderilmiş ve her bir frekans değeri için giriş sinyalinin genliği değiştirilerek 100. ve 200. hücrelerde alınan ölçümler sonucu solitonları ortaya çıkışı şekil 4.11'de gösterilmiştir. Elde edilen verilerden iletim hattına verilen sürücü sinyalin frekansı arttıkça sinüsel yapılı dalganın solitonlara ayrışması için gerekli olan genlik değerinin düştüğü gözlenmiştir. 250KHz ve sonrası için voltaj-frekans eğrisinin eğimi azalmaktadır. Ayrıca giriş sinyalinin 100. hücre civarında solitonlara dönüşmesi için 200. hücreye göre daha yüksek genlikli giriş sinyali gerektiği görülmüş ancak her iki hücre için grafiklerin eğimleri birbirine yakındır. Sistem üzerinde 128. hücrede yapılan transient analiz sonucu 50KHz'lik giriş sinyalinin 250, 500 ve 750 ve 1000mV'luk genlikleri için solitonlara dönüşümü değişimi grafiksel olarak şekil 4.12 'de gösterilmiştir. 50KHz gibi düşük frekanslı bir sinyalin solitonlara ayrışması daha yüksek bir genlik ve daha uzun süre aldığı bu nedenle de hattın üzerinde daha fazla ilerlemesi gerektiği gözlenmiştir. 26µsn sürede 1000mV genlikli sinyal solitonlara dönüşürken diğer sinyaller hala sinüzoidal tabiatlıdır.

Uzak etkileşimin de etkili olduğu bu sistemde sinüsel dalgaların bu frekans ve genlik aralığında kararsız olduğu ancak solitonların ise kararlı olduğu

görülmektedir. KdV denklemindeki uzaktan etkileşim solitonları kararlı hale getirdiği anlaşılmaktadır. Ayrıca şekil 4.11'in yakın komşu etkileşimdekinden daha farklıdır ve özellikle bu farkı hattın daha uzak yerlerinde daha da belirgin hale gelmektedir.



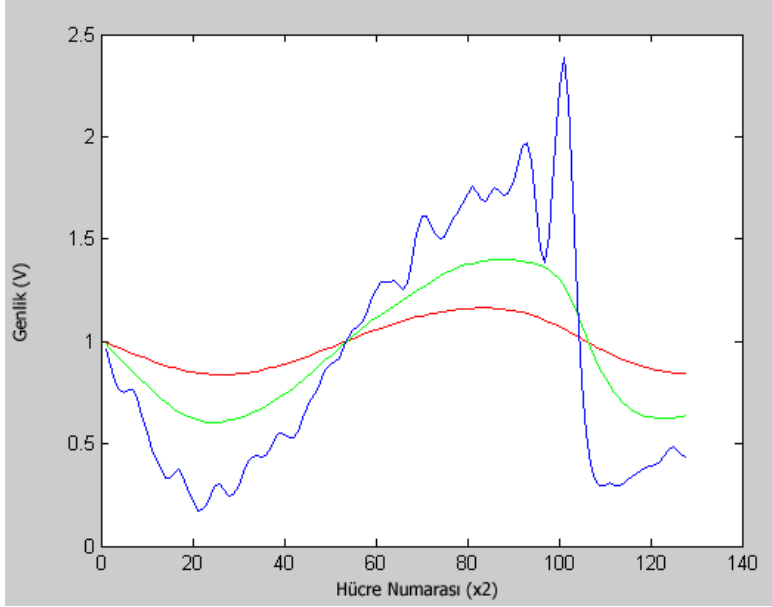
Şekil 4.11. Uzak erimli hatda solitonların ortaya çıkışında genlik-frekans ilişkisi: Mavi çizgi 100. hücrede alınan ölçümü; kırmızı çizgi 200. hücrede alınan ölçümü gösterir



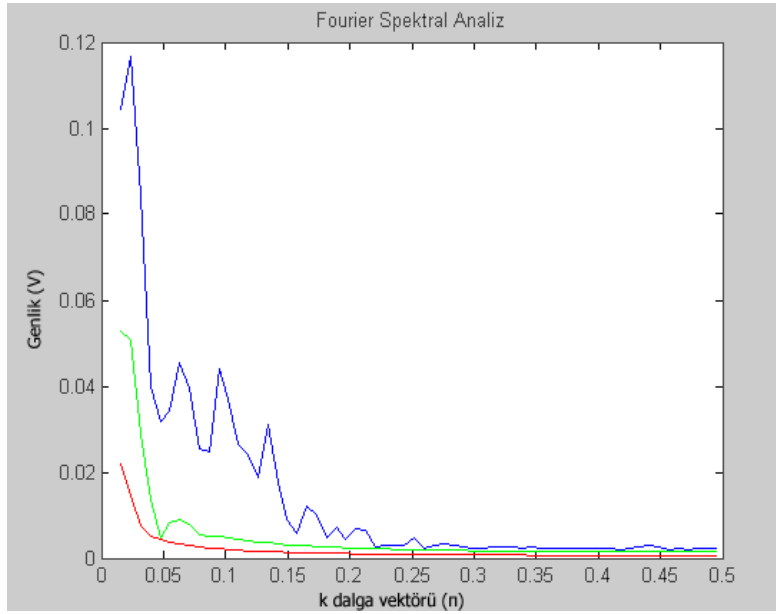
Şekil 4.12. Uzak erimli hatda sinüsel başlangıç koşullu sinyalin solitonlara dönüşmesi: Kırmızı çizgi 250mV'luk sinyali; mavi çizgi 500mV'luk sinyali; yeşil çizgi 750mV'luk sinyali; mor çizgi 1000mV'luk sinyali gösterir.

4.2.2. Uzak Erimli İletim Hattı Üzerindeki Dalganın Frekans ve Genliğe Bağlı Olarak Dalganın İncelenmesi

Çalışmanın bu kısmında bir boyutlu ikinci derece komşu etkileşimli nonlineer iletim hattına gönderilen 50, 100, ...,400KHz'lik 8 sinyalin 100, 250 ve 500mV'lu genlikleri için tüm hat üzerinde oluşan dalganın şekli ve spektral dağılım grafikleri, 2,4,...256.hücrelerden alınan verilerin Matlab programı kullanılarak elde edilmiştir. Tüm hücrelerin transient analiz verilerinin 30µsn'deki değerleri kullanılarak üzerinden dalga şekillerinde her bir frekans değeri için 100,250 ve 500mV'luk üç sinyal aynı grafiğe aktarılarak genliğe bağlı olarak sinyalin değişimi incelenmiştir. 50KHz'lik sinyal için 100,250 ve 500mV'luk genlikli sinyaller iletim hattına gönderildiğinde elde edilen dalga şekli ve spektral grafik şekil 4.13 (a) ve (b) ile gösterilmiştir. İletim hattı üzerinde 500mV genlikli sinyal girişinde dalga cephesi dikleşmektedir. Giriş sinyali 100KHz'e getirildiğinde 250mV girişli sinyalin dalga cephesi dikleşirken 500mV genlikli giriş sinyali durumunda solitonlar oluşmuş (Şekil 4.14 (a)). ve spektral grafikte yeni kipler görülmüştür (Şekil 4.14 (b)). Giriş sinyalinin frekansı attırıldıkça iletim hattı üzerindeki dalganın daha küçük genliklerde de dalga cephesinin dikleştiği (Şekil 4.15 ve Şekil 4.16) daha yüksek genlik değerlerinde ise dalganın solitonlara, solitonların da yeni solitonlara ayrıştığı gözlenmiştir. 400KHz frekanslı 500mV genlikli giriş sinyalinin hatta oluşturduğu dalga kararlı halde bulunmaktadır. Yüksek genlikli solitonlar daha hızlı ilerlemekte, solitonların birbiri içerisinden etkilenmeden geçtiği görülmektedir. Transient analiz grafiklerinde kırmızı renkli çizgi 100mV'luk giriş sinyalini, yeşil renkli çizgi 250mV'luk giriş sinyalini, mavi renkli çizgi 500mV'luk giriş sinyalini gösterir.

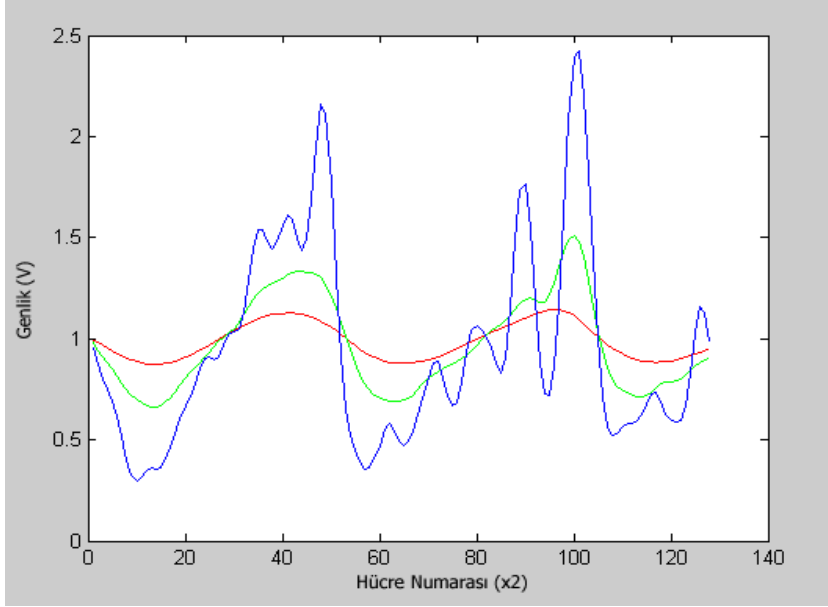


(a)

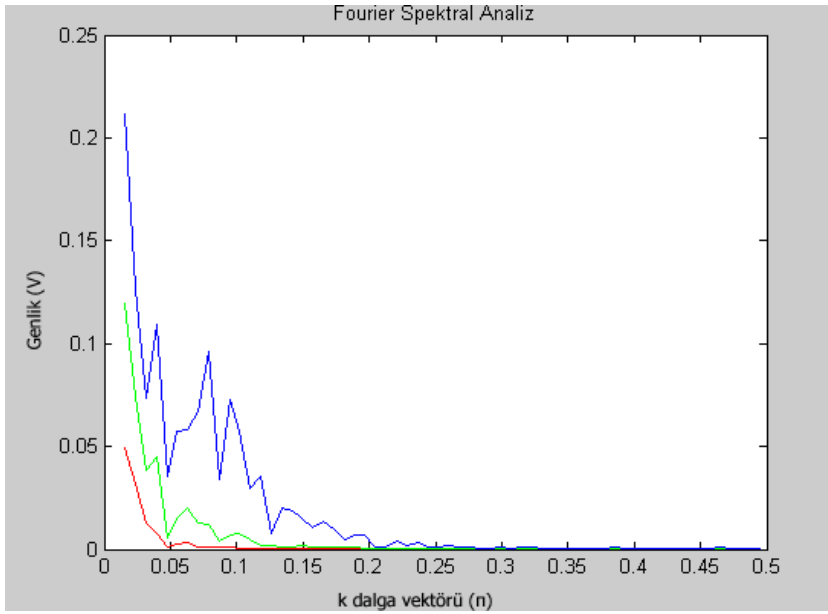


(b)

Şekil 4.13. 100 KHz'lik giriş sinyalinin hat üzerinde oluşturduğu dalganın
a) Transient analizi b) Fourier Analizi

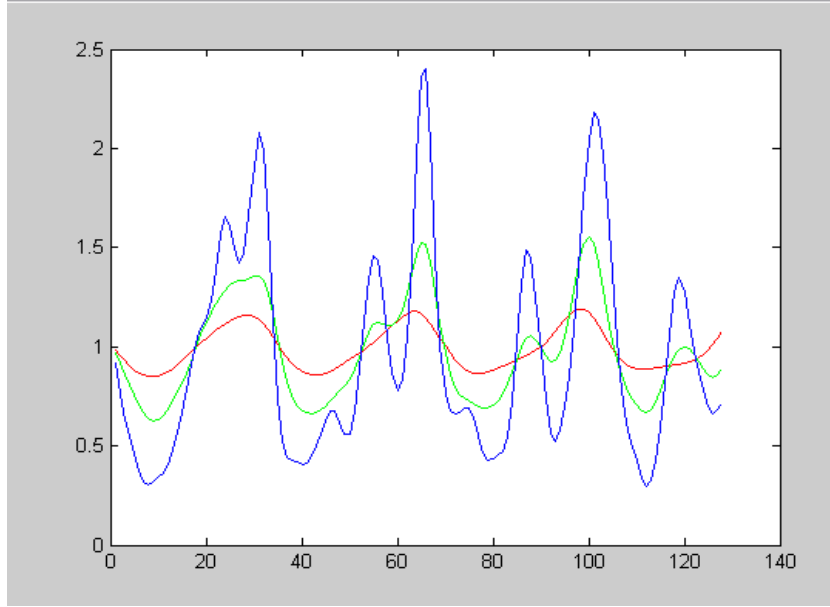


(a)

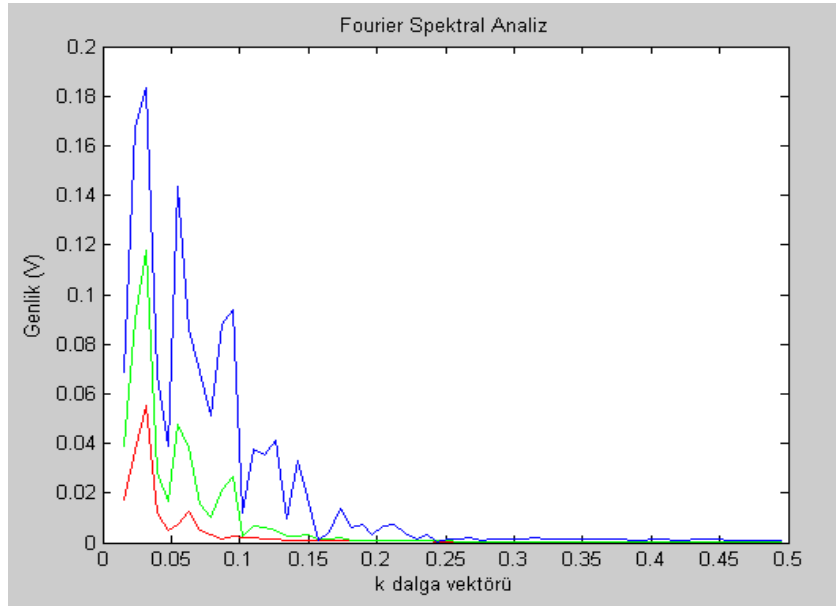


(b)

Şekil 4.14. 200 KHz'lik giriş sinyalinin hat üzerinde oluşturduğu dalganın
 a) Transient analizi b) Fourier Analizi

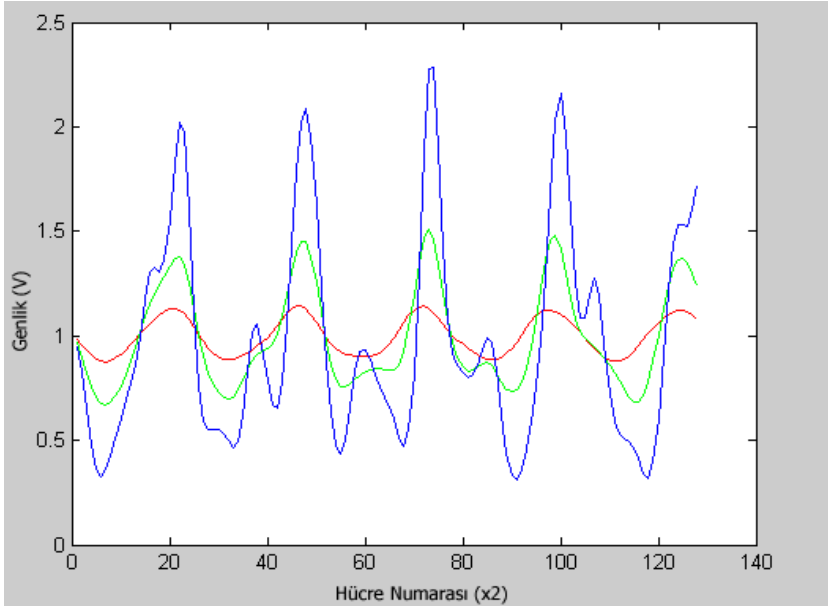


(a)

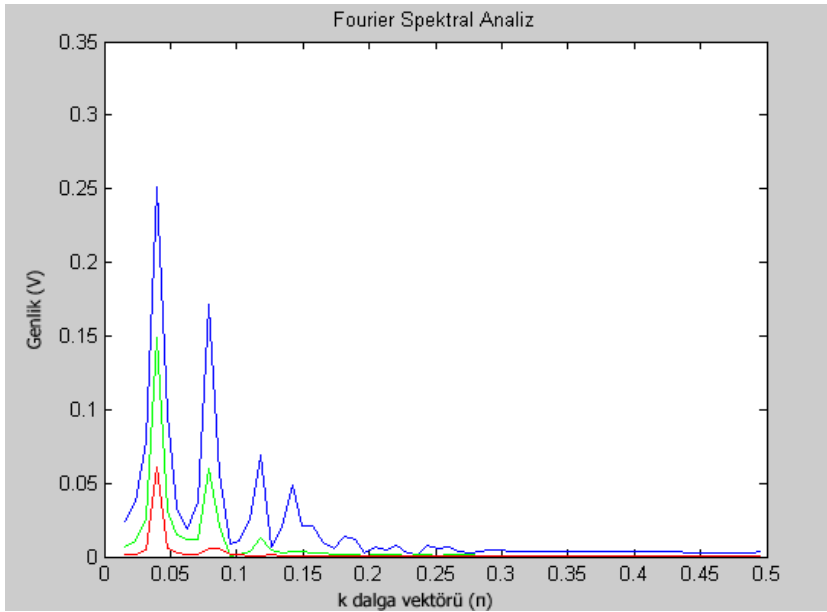


(b)

Şekil 4.15. 300 KHz'lik giriş sinyalinin hat üzerinde oluşturduğu dalganın
a) Transient analizi b) Fourier Analizi



(a)



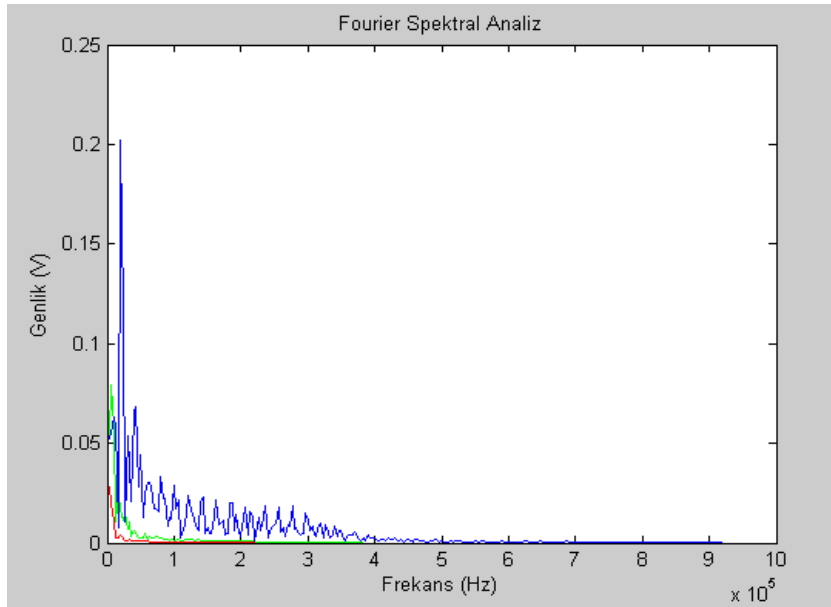
(b)

Şekil 4.16. 400 KHz'lik giriş sinyalinin hat üzerinde oluşturduğu dalganın
 a) Transient analizi b) Fourier Analizi

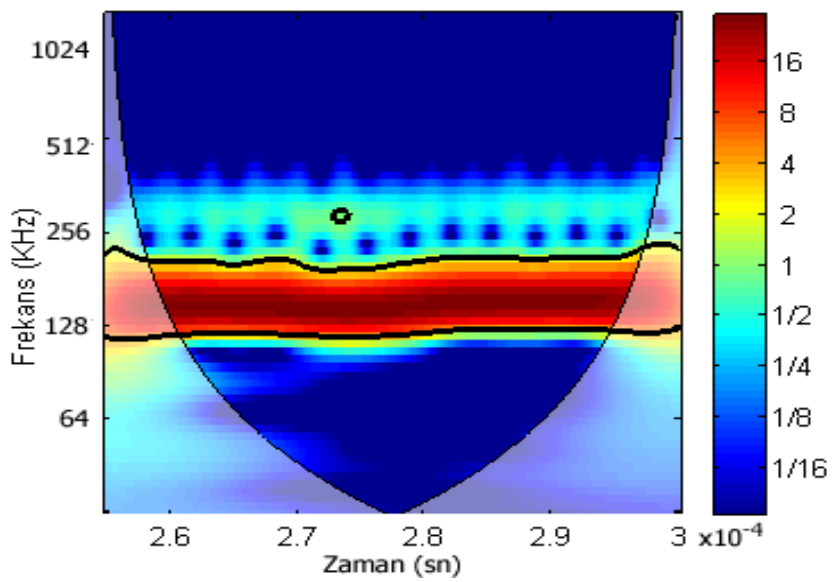
200-400KHz ve 500mV'luk giriş sinyali için aralığında solitonlar çok net bir şekilde ortaya çıkmaktadır. Hat boyunca solitonların incelenmesi genliği büyük olanların genişliğinin daha küçük, hızlarının daha büyük olduğu genliği küçük olanlara yetişip geçtiği gözlenmektedir. Bir önemli ayrıntıda solitonların geçişleri sırasında şekillerinin bozulmamasıdır. Genlik büyüdükçe hatta nonlineerlikten dolayı Fourier analizinde daha yeni frekansları ortaya çıkmakta yani enerji diğer kiplere aktarılmaktadır. Düşük genliklerde sistemin lineer olarak davranmaktadır.

4.2.3. Uzak Erimli İletim Hattında 100 KHz Frekanslı İlerleyen Dalganın İncelenmesi

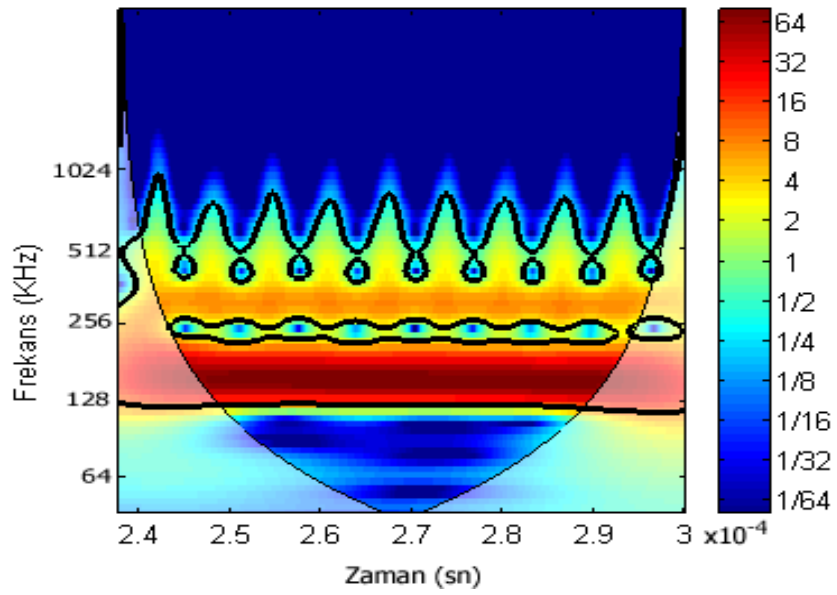
Bu bölümde uzak erimli nonlineer elektriksel iletim hattına 100KHz frekanslı 100, 250 ve 500mV genlikli üç farklı sinüzoidal sinyal gönderildiğinde 100 ve 250 mV genlikli sinyaller için 200. hücrede Fourier ve wavelet grafikleri (Şekil 4.17 (a) , (b) ve (c)) ile 500mV genlikli sinyal için 100. ve 200. hücrelerden alınan Transient analiz sonucu elde edilen verilerle sistemin Wavelet grafikleri incelenmiştir (Şekil 4.17 (a), (d) ve (e)). 100mV genlikli sinyalin Fourier analizi düşük genlikli bir harmonik oluşturduğu, wavelet grafiği incelendiğinde ise 200KHz civarında harmonik oluşturduğu ve enerjisi sürekli olarak bu harmoniğe aktardığı görülmüştür. 250mV genlikli sinyalin Fourier spektrumu incelendiğinde yeni harmoniklerin oluştuğu, Wavelet grafiği incelendiğinde 200 ve 300KHz frekanslı harmoniklere sürekli enerji aktarıldığı, 500mV genlikli sinyalin Fourier spektrumu incelendiğinde 500KHz'e kadar harmoniklerin oluştuğu görülmüştür. Aynı şartlar altında 100. ve 200. hücrelerde elde edilen wavelet grafikleri incelendiğinde 100. hücreden 200. hücreye doğru 2MHz' e kadar harmonikler görülmektedir.



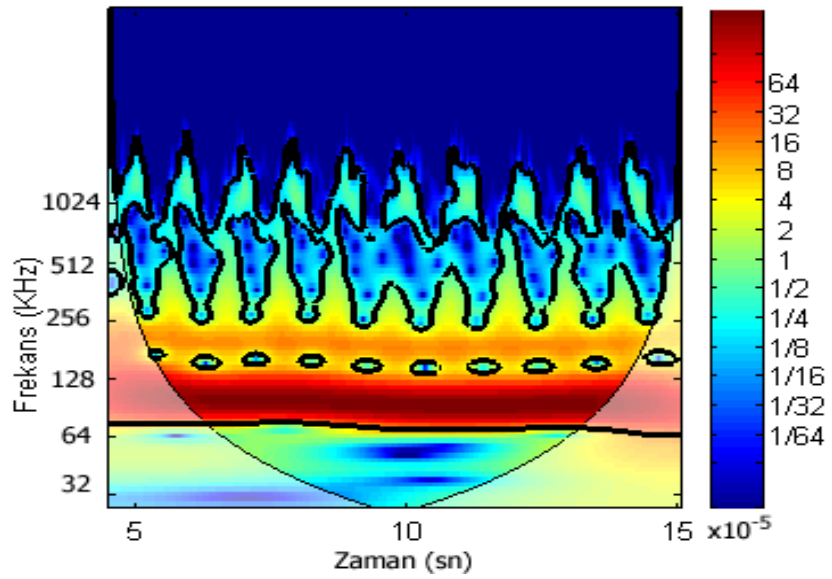
(a)



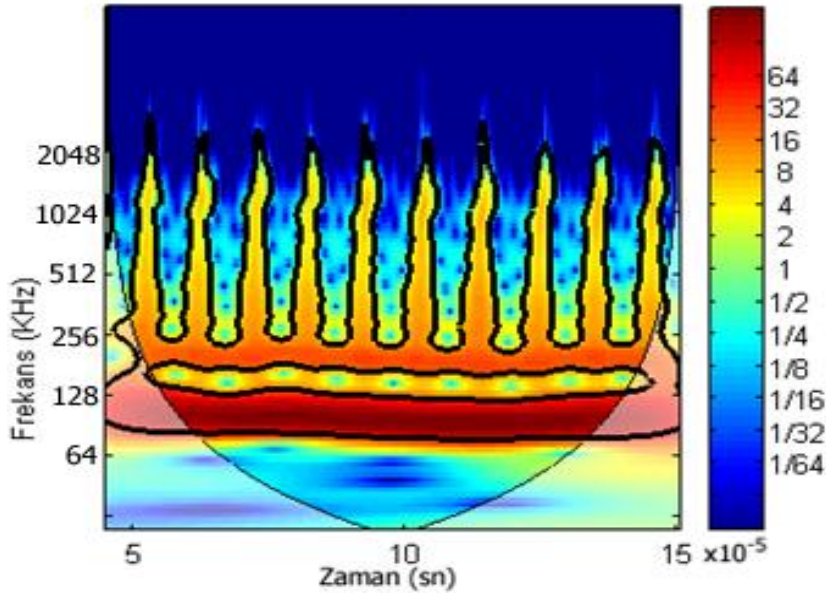
(b)



(c)



(d)



(e)

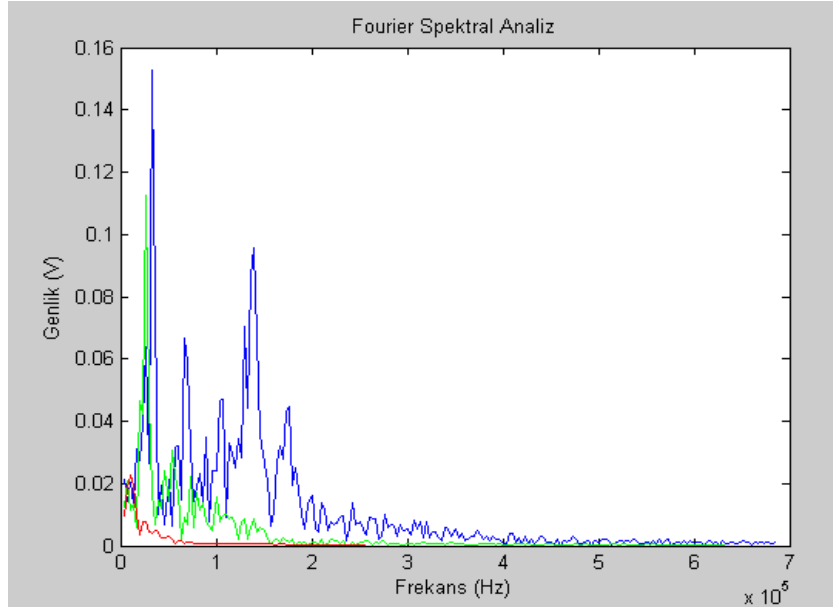
Şekil 4.17. 100 KHz'lik sinyalinin a) Fourier analizi b) Wavelet analizi (100mV) c) Wavelet analizi (250mV) d) Wavelet analizi (500mV-100. hücre) e) Wavelet analizi (500mV-200. hücre)

Bu frekansta hat boyunca ilerledikçe sinyalde enerjinin diğer frekanslara daha fazla aktarıldığı gözleniyor. Enerji aktarımı beklendiği gibi genlik arttıkça artıyor. Solitonlar bu aralıklarda çok iyi şekilde gözleniyor ve kararlılardır.

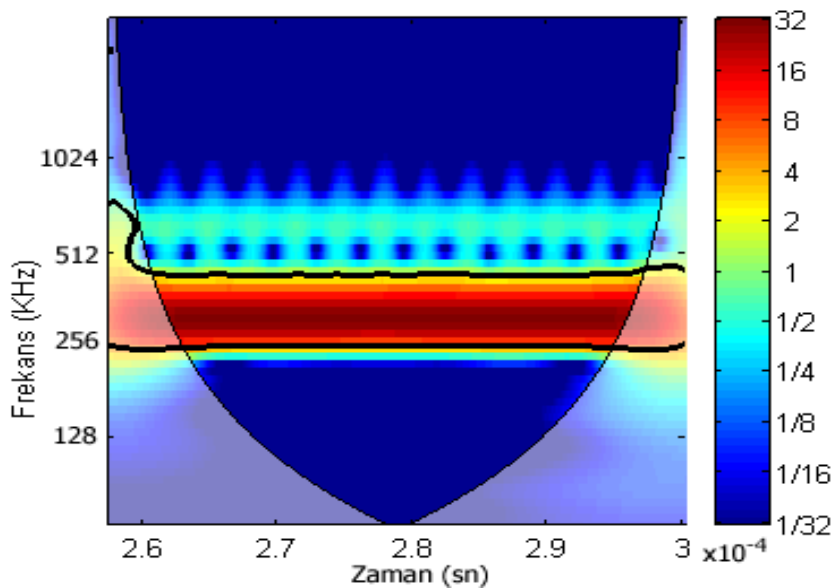
4.2.4. Uzak Erimli İletim Hattında 200 KHz Frekanslı İlerleyen Dalganın İncelenmesi

İkinci derece komşu atom etkileşmesine karşılık gelen nonlineer dağılımlı iletim hattında 200KHz frekanslı sinyalin 100, 250 ve 500mV genliklerinde hat üzerindeki değişimleri için 200. hücre üzerinde incelendiğinde, 100mV genlikli sinyalin 100KHz' e kadar harmonikler, 250mV genlikli sinyalin 200KHz'e kadar harmonikler, 500mV genlikli sinyal ise 800, 1000, 1200 ve 1600KHz'li yüksek genlikli harmonikler oluşturduğu görülmüştür (Şekil 4.18.(a)). Sistemin 100. ve 200. hücrelerinden alınan transient verileri sonucu wavelet grafikleri elde edildiğinde 100mV genlikli sinyal 100. hücrede kararlı değilken 200. hücrede 400 ve 600KHz genlikli harmonikler oluşturmaktadır. Enerji bu kiplerde sürekli

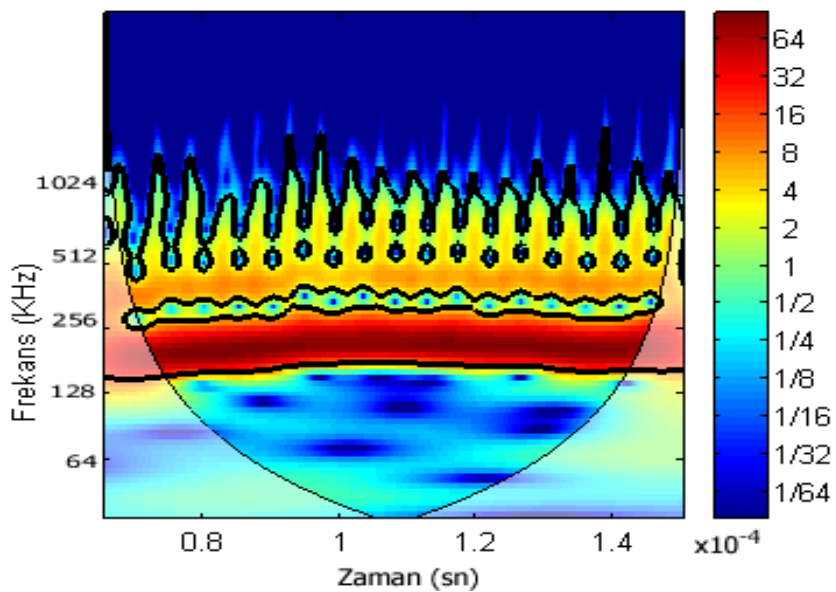
bulunmaktadır. 250mV genlikli sinyalin wavelet grafiği incelendiğinde 100. hücrede enerji dağılımı kararlı hale gelmeye bağlamış ve 400KHz'lik harmonik oluşturmuştur. Hatta üst frekanslı harmonikler periyodik olarak var olup yok olmaktadır. 500mV genlikli sinyalin wavelet grafikleri (Şekil 4.18 (d) ve (e)) incelendiğinde sistemin 100. ve 200. hücrelerde kararlı hale ulaştığı kararlı solitonların oluştuğu görülmüştür.



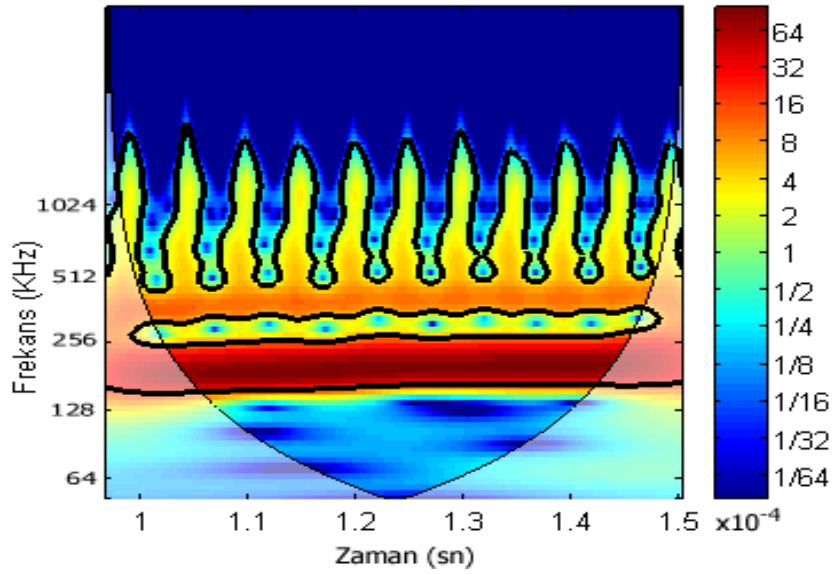
(a)



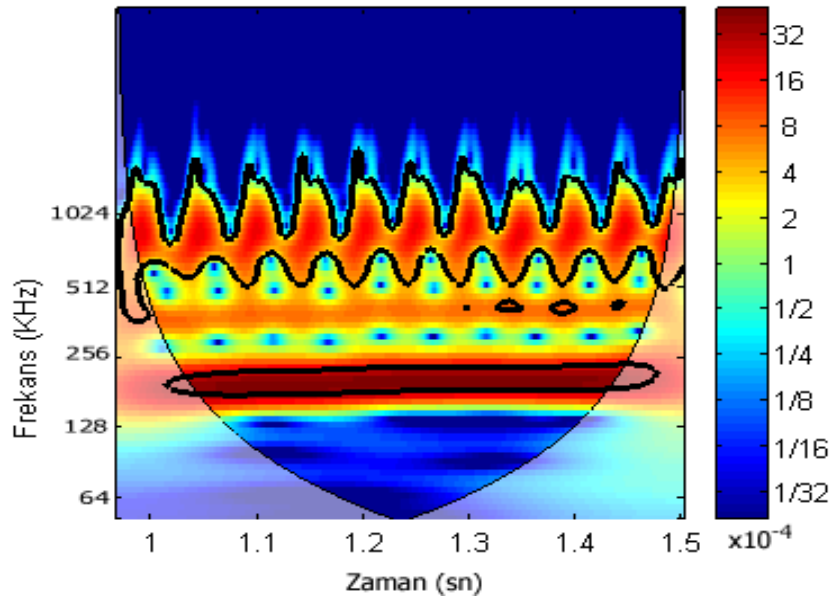
(b)



(c)



(d)

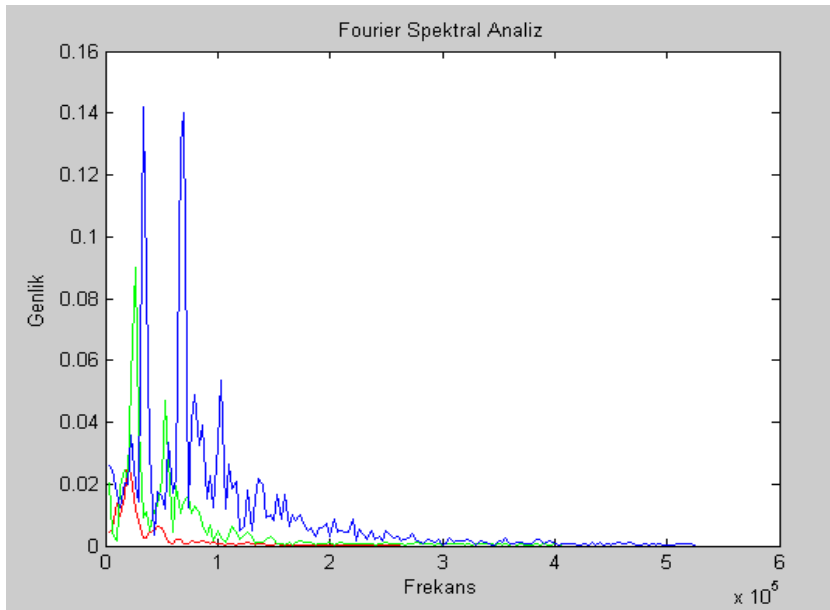


(e)

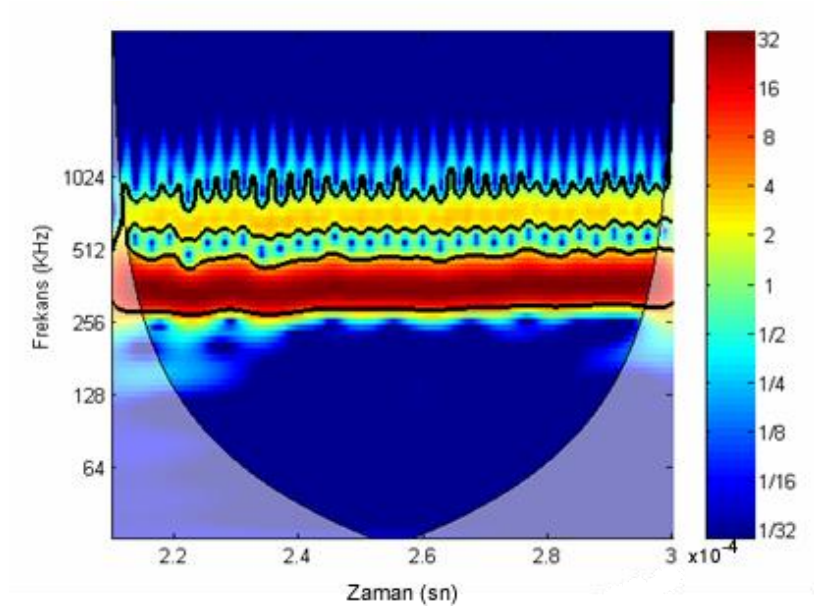
Şekil 4.18. 200 KHz'lik sinyalinin a) Fourier analizi b) Wavelet analizi (100mV) c) Wavelet analizi (250mV) d) Wavelet analizi (500mV-100.hücre) e) Wavelet analizi (500mV-200. hücre)

4.2.5. Uzak Erimli İletim Hattında 300 KHz Frekanslı İlerleyen Dalganın İncelenmesi

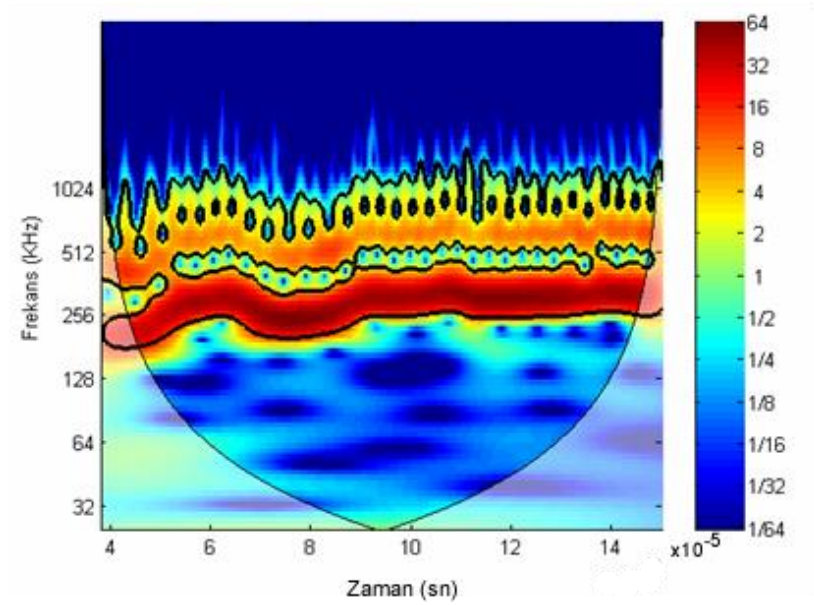
300KHz frekanslı sinyalin 100, 250 ve 500mV'luk üç genlikle sürücü sinyal olarak hatta gönderildiğinde 200. hücrede elde edilen Fourier spektrumundan 500mV genlikli frekansın 600KHz frekanslı yüksek enerjili bir harmonik oluşturduğu görülmüş olup yüksek frekanslara doğru harmonik genliği azalmaktadır (Şekil 4.19 (a)). Wavelet grafikleri (Şekil 4.19 (b), (c) (d) ve (e)) incelendiğinde enerji yüksek frekanslara doğru akmakta dağılım kararlı hale gelmekte ancak 500mV genlikli sinyalin 200. hücredeki wavelet analizinde üst frekanslar yok olmaktadır.



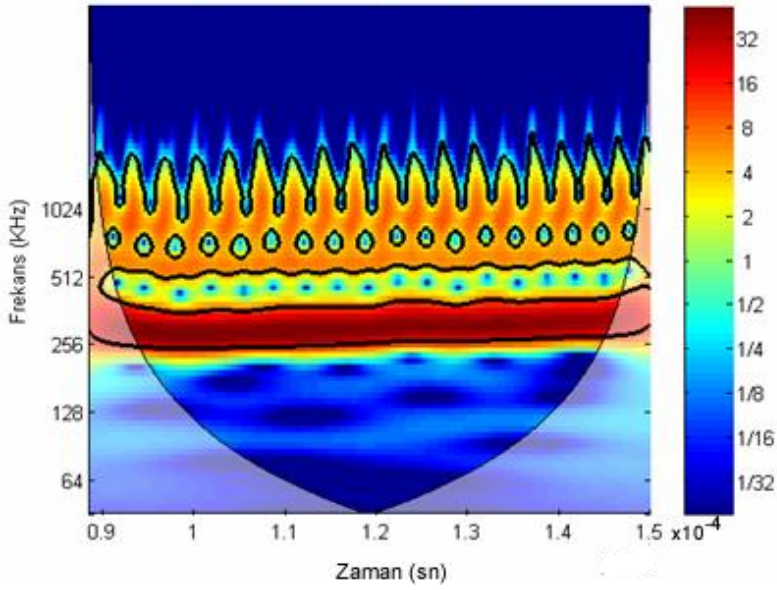
(a)



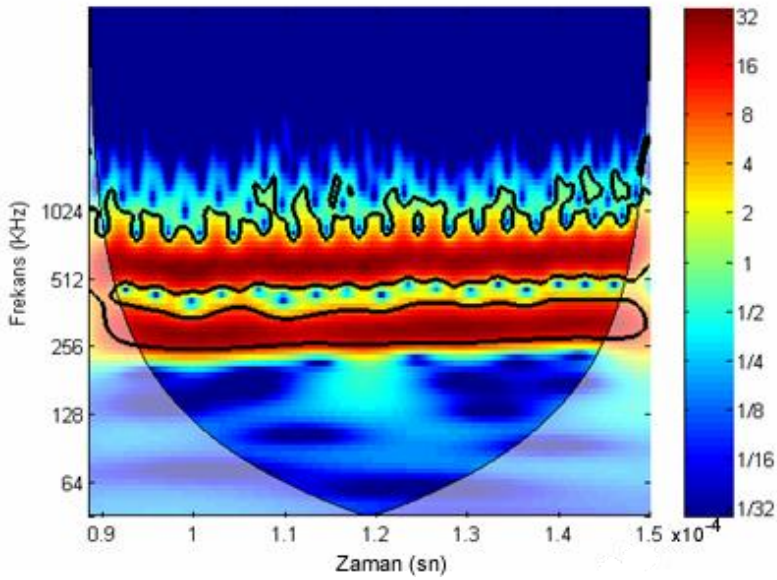
(b)



(c)



(d)



(e)

Şekil 4.19. 300 KHz'lik sinyalinin a) Fourier analizi b) Wavelet analizi (100mV) c) Wavelet analizi (250mV) d) Wavelet analizi (500mV–100.hücre) e) Wavelet analizi (500mV–200. hücre)

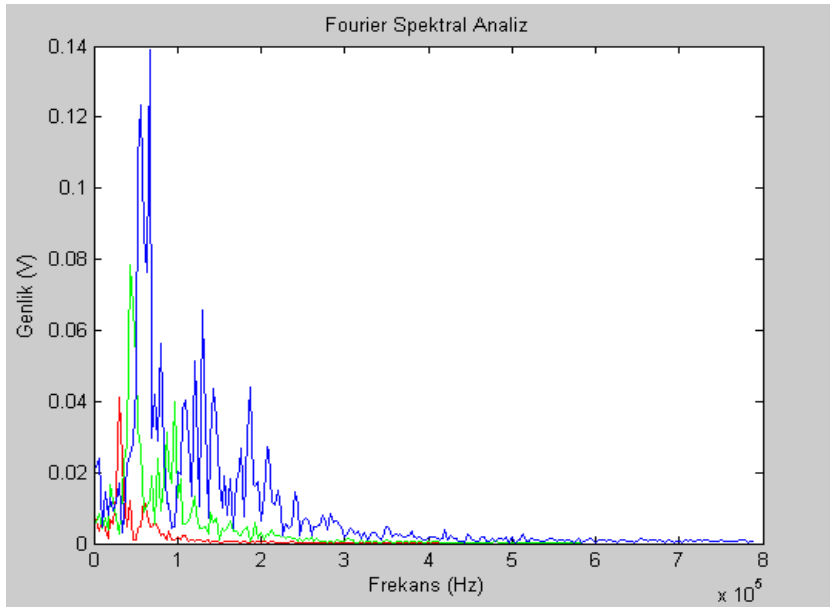
Genlik arttıkça solitonların kararlılıkları azalmakta ve sınırlı sayıdaki kipler arasındaki frekans geçişleri biraz daha düzensiz hale gelmektedir. Buradaki durumdan genlik arttıkça sistemin nonlineerliği dağıtkanlığının yanında daha da etkin hale geldiği anlaşılıyor. Solitonların şeklini değiştirmeden ilerlemesi ancak nonlineerlik ile dağıtkanlık arasındaki hassas dengeden ileri geldiğinden bu durumun ortaya çıkması gayet normaldir. Ayrıca 100 mV giriş için Wavelet ve Fourier analizinde bir kararsızlık görünmektedir.

4.2.6. Uzak Erimli İletim Hattında 400 KHz Frekanslı İlerleyen Dalganın İncelenmesi

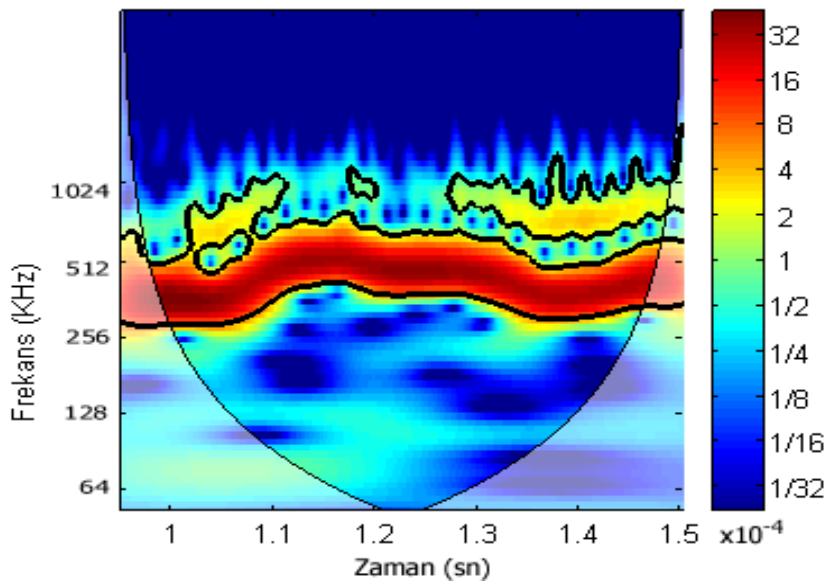
Bu bölümde 400KHz frekanslı sinyal nonlineer iletim hattında 100,250 ve 500mV genlikle sürücü sinyal olarak gönderilmiş ve hattın üzerindeki değişim incelenmiştir. 200. hücrede elde edilen Fourier spektrumu 100mV dan 500mV genliğe doğru 400, 800, 1200, 1600 ve 200KHz de yeni frekansların oluştuğunu göstermiştir (Şekil 4.20 (a)). Şekil 4.20 (b)'deki 100 mV genlikli dalga girişin Wavelet analizi diğer genlik değerlerinden farklı bir sonuç vermektedir. Bu aralıkta sistemin kararlılığının bozulduğu anlaşılmaktadır. Bu nonlineer sistemlerde beklenen bir durumdur.

Giriş sinyalinin genliği arttırıldıkça sistemin üst frekanslara enerjiyi kararlı halde aktardığı görülmektedir. 500 mV genlikli sinyalin wavelet grafiklerinde kararlı halde enerji aktarımı yaptığı solitonların oluştuğu gözlenmiştir. (Şekil 4.20 (c), (d) ve (e)).

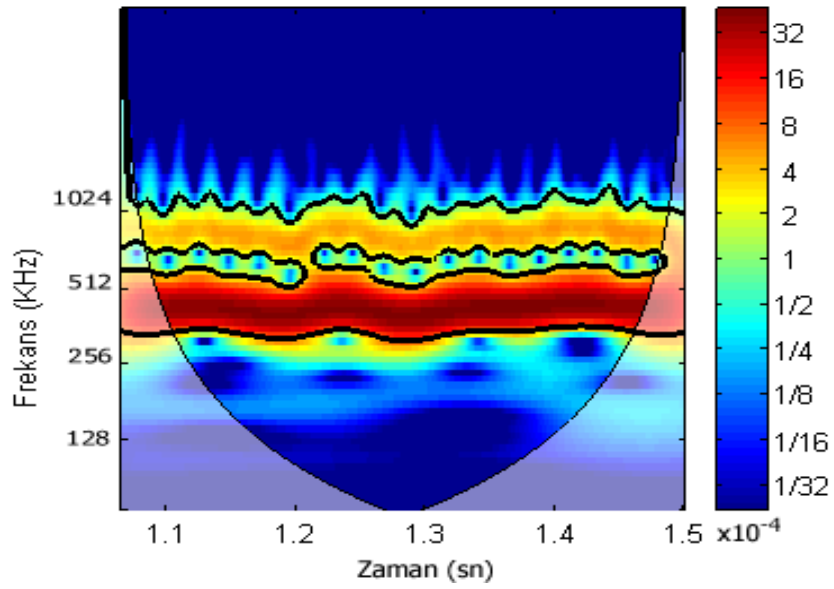
Gerek Fourier analizinden gerekse Wavelet analizinden artık bu aralıkta nonlineerliğin dağıtım terimine göre iyice baskın hale geldiği ve dalga şeklinin ve oluşan solitonların kararsızlaştığı ortaya çıkmıştır. Bu sonuçlar iletim hattının aktif bir hat olduğunun özelliklerinin de içinden geçen dalgalarla değiştiğinin de göstermektedir.



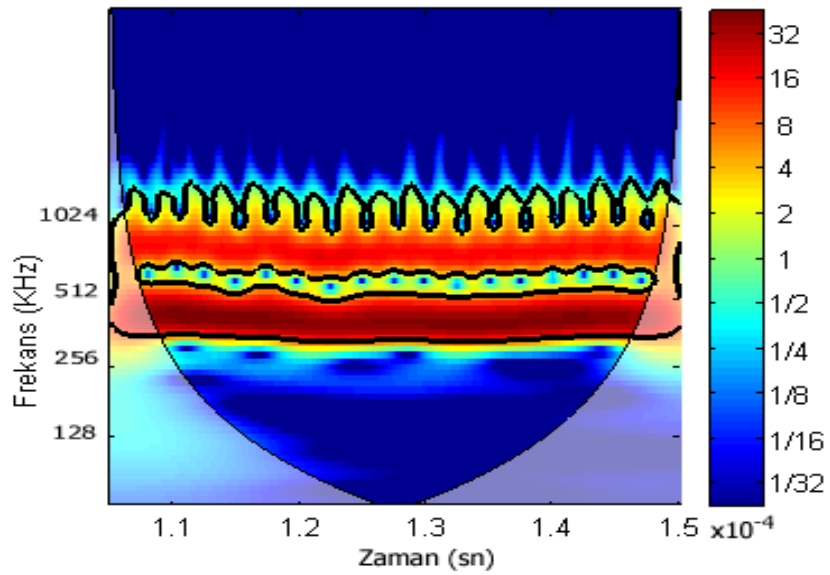
(a)



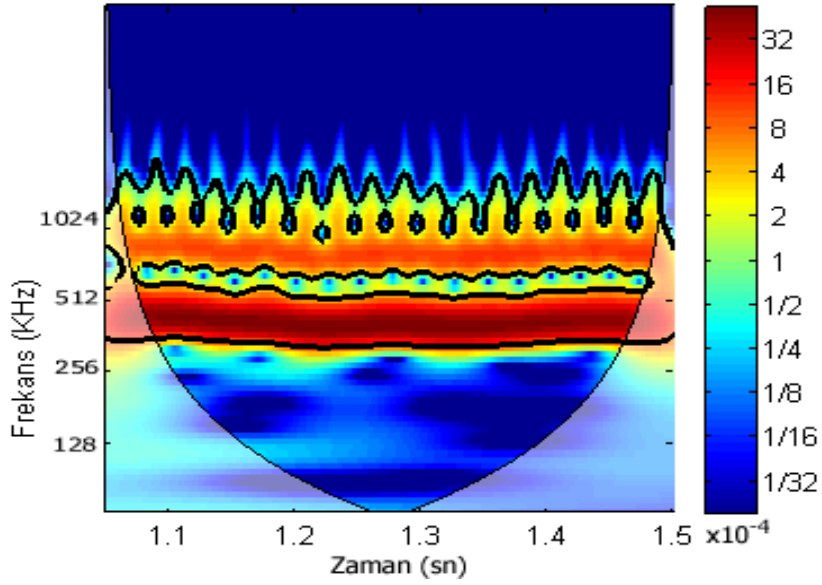
(b)



(c)



(d)



(e)

Şekil 4.20. 400 KHz'lik sinyalinin a) Fourier analizi b) Wavelet analizi (100mV) c) Wavelet analizi (250mV) d) Wavelet analizi (500mV-100.hücre) e) Wavelet analizi (500mV-200. hücre)

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bir boyutlu nonlinear örgülere karşılı gelen elektriksel iletim hatları bir boyutlu nonlinear örgülerin davranışlarını öğrenmede çok iyi birer modeldirler. Bu model ile çalışırken Elektronik Workbench elektronik devre analiz programı kullanılmıştır. Bu program ile bahsi geçen örgülere karşılık elektriksel iletim hatları hızlı bir şekilde kurulmuş, hızlı bir şekilde deneyler gerçekleştirilmiştir. Sistemin faz değişiminden, Fourier analizine kadar geniş bir yelpazede çalışma imkanı veren program ile masrafsız çalışmalar yapılabilir ve elde edilen sonuçlar gerçek fiziksel sistemlere uygulanabilir. Programın bu özellikleri kullanılarak LC ünitelerinden oluşan hat kurulmuş ve sistemin dağınım eğrisi ile frekansın dalga vektörüne bağlılığı, sinyallerin frekans ve genliklerine bağlı olarak hattın üzerindeki değişimleri incelenebilmiştir. Analiz seçeneklerinden parametre süpürücü ile her hangi bir elemanın adım adım değişimleri sistematik bir şekilde iletim hattına etkisi incelenebilmiş ve gerçek fiziksel bir sistemde ortaya çıkabilecek hatalar en aza indirilmiştir. Programın en önemli özelliği nümerik deneyleri yapabilmesidir. Sinyal analizi ya da AC analiz yapılırken pek çok diferansiyel denklem program tarafından çözülmüş ve sonuçlar grafiksel ya da veri sayfası halinde alınabilmiştir.

Elektronik Workbench programının gösterdiği kolaylıklara ek olarak Matlab programı elde edilen verileri analiz etmede frekans-zaman grafikleri çizdirmeye büyük kolaylık sağlamıştır. Bu grafikler klasik Fourier analizinin eksikliği olan enerjisinin paylaşım sürelerini, sistemin tepki süreleri göstermede büyük kolaylık sağlamıştır. Programın ofis yazılımlarına uyumlu olması veri taşınabilirliğini de kolaylaştırmıştır. Çalışmada yeni bir yöntem olarak nonlinear iletim hatlarında enerji aktarımı konusunda wavelet analizi kullanılmıştır.

Çalışmada iki tür iletim hattı kullanılmıştır. İlk tür hat en yakın komşu atom etkileşmelerini içerirken ikinci tür hat ikinci komşu erimli bir hattır. Böylece bir atom sadece en yakın komşusuyla değil ikinci uzak komşusuyla da etkileşim içinde bulunacak şekilde iletim hattı kurulmuştur. İletim hatlarında üst kesim frekanslarını belirlemek için $\omega_c = 2/\sqrt{LC}$ şeklinde 8 MHz geçmeyecek şekilde indüktör kullanılmış ve yine bu hatları sonlandırmak için $Z = \sqrt{L/C}$ şeklinde bir empedansı hattın sonuna ekleyerek hat sonundan yansımalar engellenmiştir.

Nonlinear etkileri gözleyebilmek için BB112 varikap diyodun voltaja bağlı değişim alanı olarak 1 volt kullanılmıştır.

Bu tezde iki grup çalışma yapılmıştır. Birinci grup çalışmada en yakın komşu atom etkileşmelerinin bulunduğu nonlinear dağınımlı iletim hattında 50, 100, ..., 400KHz frekanslı 8 adet sinüzoidal dalga hattın bir ucundan sürülmüş giriş sinyalinin genliği artırılarak solitonların ortaya çıktığı başka bir değişle sinüzoidal başlangıç koşullu bir dalganın solitonlara dönüşmesi incelenmiştir. Elde edilen ölçümler sonucu 100. hücrede soliton çıkması için 200. hücreye göre daha yüksek genlikli giriş sinyali uygulanmalıdır. İncelenme sonucu giriş sinyalinin genliği artırıldıkça hat üzerinde solitonlar ortaya çıkmakta benzer şekilde sürücü dalganın frekansı arttıkça soliton oluşma genliği düşmektedir. Bu sonucun sebebi solitonların ortaya çıkması için gerekli süredir. 200. hücre hattın daha sonrasında olduğu için dalga 200. hücreye erişinceye kadar nonlinear etkilerle solitonlara dönüşmektedir. Ancak her iki hücre için grafiklerin eğimleri aynıdır. Birinci grup çalışmanın ikinci aşamasında 50KHz frekanslı giriş sinyalinin 250, 500, 750 ve 1000mV genlikleri için KdV solitonların ortaya çıkışı incelenmiş olup voltaj arttıkça sinüzoidal sinyal önce şok dalgasına sonra bu şok dalgasının yarılmasıyla solitonlara dönüşmektedir. Üçüncü çalışmada sistemde sürücü frekans olarak 100, 200, 300 ve 400KHz'lik dört frekans 100, 250 ve 500mV genliklerde uygulanmış ve tüm hat üzerindeki dalganın değişimi 2., 4., 6., ..., 256 hücre üzerinden incelenmiştir. Bu aşamada solitonların yüksek genlikli olanlarının daha hızlı ilerlediği solitonların birbiri içerisinden geçerken şekillerini bozmadığı görülmüştür. Birinci grup çalışmanın son aşamasında hatta 100, 200, 300 ve 400KHz frekanslı sinüzoidal dalgalar verilmiş bu dalgaların 10., 100. ve 200. hücrelerde sinyal üzerinde meydana gelen değişmeler hem Fourier hem de Wavelet transform metotlarıyla incelenmiştir. İnceleme sonucunda değişmelerin olmadığı hücrelerin Fourier ve Wavelet grafikleri teze aktarılmamıştır. Değişmelerin görüldüğü hücrelerin grafikleri teze aktarılmış olup, 100KHz'lik sinyalin 500mV genlikli girişinde sistem kaosa gitmekte olup sistemde bir anomali görülmüştür. Tüm frekanslarda 100 ve 250 mV giriş genliklerinde harmonikler oluşmakta 250mV genlikli giriş sinyalinin harmonikleri 100mV genlikli giriş sinyalinin harmoniğine göre yüksek enerjilidir. 500mV genlikli sinyaller enerji yüksek frekanslara kadar dağılmakta ancak frekans yükseldikçe yüksek enerjinin aktarıldığı harmoniğin frekansı düşmektedir. Örneğin 200KHz 500mV genlikli dalga 4MHz de yüksek enerjili harmonik oluştururken, 300KHz 500mV genlikli

dalga 3MHz frekanslı yüksek enerjili harmonik oluşturmakta, 400KHz 500mV genlikli dalga 1.2MHz frekanslı yüksek enerjili harmonik oluşturmaktadır. Giriş dalgasının 100KHz frekans ve 100mV genlikte şeklini bozmadığı ve enerjisinin korunduğu gözlenmiştir. Bu sonuç hatta nonlinear etkilerin zayıf olduğu hattın hala lineer olduğu gösterir, aksi halde yeni harmoniklerin gözlenmesi gerekirdi. Giriş sinyali 100mV'dan itibaren artırıldıkça ya da frekans 200KHz ve üzere olduğu durumda harmoniklerin sayısı ve enerjileri artmakta ve oluşan harmonikler yüksek frekanslı olarak görülmektedir. Bu gözlem giriş sinyalinin genliği arttıkça elektriksel iletim hattının nonlinear etkilerinin arttığını gösterir. Hatta giriş sinyali 300KHz ve 500mV'a ulaştığında KdV solitonları görülmeye başlanmıştır. Böylece enerji lokalize olmuştur. Bu sonuç kesikli örgülerin tabiatından kaynaklanır. Ancak hala ergodiklikten söz edilemez.

İkinci grup çalışma birinci gruptaki tüm iş ve işlemlerin ikinci uzak komşu erimli nonlinear iletim hattı üzerinde tekrardır. Uzak erimli hatta yapılan çalışmada solitonların ortaya çıkması için birinci komşu atom erimli hatta göre daha yüksek genlikli sürücü frekans gerekmektedir. Tüm hat üzerindeki dalga incelendiğinde ikinci komşu atom erimli hatda dalga vektörü birinci komşu atom erimli hatta göre daha küçük değerler almaktadır. Bunun yanında uzak erimli hatda hücreler üzerinde Fourier ve Wavelet analizleri yapıldığında daha az sayıda harmonik oluşmaktadır. Bu gözlemlerin yanında sistem 400KHz ve 500mV genlikte recurrence görülmüştür. Ancak enerji eşbölüşümü için gerekli koşullar hala sağlanamamıştır.

Hem yakın hem de uzak etkileşimli nonlinear iletim hatlarında düşük frekanslı dalgalar kararsızdır. Bu kararsızlıklar hatta sürülen dalganın genliği ile doğru orantılıdır. 100-300 KHz frekans ve 0-400 mV genlik aralığındaki dalgalar için sinüsel dalgalar solitonlara dönüşmektedir. Ancak yakın komşu erimli hatta solitonlar oluştuktan sonra daha fazla solitona dönüşmektedirler. Uzak erimli hatta uzak erimin solitonların daha küçük solitonlara ayrışmasını engeller görülmektedir. Bunun nedeni bu hattaki dağılım bağıntısının değişmesidir. Bu dağılım bağıntısı frekanslar arasındaki etkileşimin karakterini değiştirmektedir.

Her iki hatta da frekanslar ancak belli frekanslara aktarılabildiği nonlinearliğe rağmen diğer frekanslara enerji aktarılamadığı gösterilmiştir. Enerjinin her frekansa aktarılamaması bu aralıktaki dalga denkleminin simetrik özellikleri olan

ve sonsuz sayıda korunum yasasına uyan KdV denklemine uymasının sonucudur[1]. O nedenle sistemde ergodiklik sağlanamamaktadır.

0-300mV genlik aralığında dalgalarda solitonların gözlenmesi nonlinearlik ile dağınımın etkisinin birbirlerini dengelediklerini gösteriyor. Genliğin artmasıyla sistem daha nonlinear hale geldiği ve dağınımın etkisine baskın hale geldiği gözlenmektedir. Bu durumda artık dalgaların denklemini KdV denklemine uymamakta sistem ergodikliğe doğru kaymaktadır.

Hatta verilen sinyal zaman zaman belli frekans ve genlik değerlerinde kaotik hale gelmektedir. Bu aralar sistem ergodik davranmaktadır. Bu nonlinear sistemlerden beklenen bir durumdur. Böylesi nonlinear dinamik sistemler belli koşullarda kaotik hale gelebilirler.

Kullanılan iletim hattı aktif bir hat olduğu sistemin davranışının bizzat içinden geçen dalga tarafından değiştirildiği ölçümlerimizden anlaşılmıştır. Dalgaların genliği arttığında dalga denklemini de değişmekte ve sistemde solitonların artık gözlenmediği anlaşılmıştır. Bu da artık bu genliklerde sistemin KdV denklemlerine uymadıklarını göstermiştir.

KdV denklemini çok sayıdaki nonlinear dalga denkleminde integrallenebilir olan birkaç denklemden biridir. Bunlar analitik olarak çözülebilir. Denklemin integral sabitleri sistemde korunan niceliklere karşılık gelir. Üstelik bunların sayısı da sonsuzdur. Bu denkleme uyan dalgalarda aralarında etkileşirken bu korunum yasalarına uyacaklarından her etkileşme mümkün olmaz.

Yapılan ölçümlerde belli bir düğüm noktasında başlangıç enerjisinin üst frekanslara aktarıldığı ve daha sonra dalganın gene eski haline dönerek üste geçen frekanslardaki enerjinin ilk kipe geri döndüğü de gözlenmiştir. Buna recurrence (tekrarlama) olgusu denmektedir.

Böylece nonlinear iletim hattında uzun boylu dalgalarda ortamın kesikliliğini fark etmediği ve ortamı sürekli gibi gördüğü ve bu dalgalarda denkleminin KdV veya onun bir çeşidi şeklinde yazılabileceği gösterilmiştir. Bu denklemin simetrik özellikleri denklemin nonlinear olduğu halde diğer kiplere enerji aktarımını engellediği sistemin ergodik olmadığını göstermiştir. Bu FPU paradoksunun da açıklamasıdır.

Denkleimde nonlineerliğin dağınım bağıntısı ile dengelenmesi solitonların oluşmasına olanak sağlamıştır. Verilerimizden 200-300 KHz frekans ve 100-400mV genlik aralıklarında bu koşulların sağlandığı görülmüştür. Genliğin artması nonlineerliği arttırdığından 400mV değerinden daha büyük genliklerde nonlineerlik dağınım bağıntısının katkısından daha büyük hale geliyor ve sinyalinin şekli değişerek değer kiplere enerji aktarmaya başlıyor. Bu genlik 200KHz frekans için ergodiklik eşik değeri olduğu düşünülmektedir. Daha ayrıntılı bir araştırma değişik frekanslar için eşik genlik değerlerinin hesaplanmasını sağlayabilir.

Diğer yandan daha uzak erimli etkileşmeli bir hatta ise solitonların daha kararlı olduğu ve oluşan soliton sayısının azaldığı görülmüştür. Bu dağınım bağıntısı-nonlineerlik dengesinin bu hat için daha iyi oluştuğunu göstermektedir. Solitonlar kararsız hale gelip daha küçük solitonlara dönüşmemektedir.

Kullanılan iletim hattının nonlineer kapasitansı, seri bağlı ve uzaktan erimi sağlayan lineer kapasitansların değişimi ile istenen özellikte solitonların hat üzerinde oluşturulabileceğini göstermesidir. Aslında burada yapılan hattın nonlineerlik-dağınım özelliklerini değiştirerek hattaki soliton oluşumunu ve bunların hareketlerini kontrol edilebileceğinin gösterilmesidir.

Bundan başka sistemin belli frekans ve genlik aralığında frekans konventörü olarak da kullanılması mümkün olacaktır. Çünkü verilen frekanstaki bir dalga hat boyunca ilerlerken belli düğüm noktalarında belli frekanslar oluşturulabilmektedir. Bu noktalardan istenen gerekli frekanstaki dalgalar seçilerek kullanılabilir.

Bundan sonraki çalışmalarımızda bu sistem daha ileri düzeyde incelenerek dalga denklemlerinin de matematiksel analizleri yapılacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] Zabusky, N. and Kruskal, M. 1965. Interaction of Solitons in a Collisionless Plasma and the Recurrence of Initial States, **Phys. Rev. Lett**, 15: 240-243.
- [2] Frank S, Crawford Jr Waves. 1968. Waves:Berkeley Physics Course Vol. 3. McGraw-Hill College,600p.,New York.
- [3] Kittel, C. 1996. Introduction Solid States Physics. John Wiley and Sons Inc. , 692p., New York.
- [4] Remoissenet, M. 1996. Waves Called Solitons: Concept and Experiments. Springer- Verlag, 260s., New York,
- [5] Ford, J. and Waters, J. 1963. Computer Studies of Energy Sharing and Ergodicity for Nonlinear Oscillator System. **Journal of Mathematical Physics**, 4 (10): 1293-1306.
- [6] Debye, P., Planck, M. 1914. In Vortrage über die kinetische der materie und der Elektrizitat ed. By Teuber, Leipzig. Germany.
- [7] Peierls, R.E. 1956. Quantum Theory of Solid, Oxford University, London.
- [8] Dauxoist, T., Peyrard, M. and Ruffo, S. 2004. The Fermi-Pasta-Ulam “Numerical Experiment”: history and pedagogical perspectives. Universita di Frienze 9p, Italy.
- [9] Takasaki, K. 2008. Many Face of Solitons, Kyoto University (<http://www.math.h.kyoto-u.ac.jp/~takasaki/soliton-lab/gallery/solitons/kdv-e.html>), Erişim Tarihi: 14.05.2009.
- [10] Hirota, R. And Suziki, K. 1970. Studies on Lattice Solitons by Using Electrical Networks. **J. PHYS. Soc.**, 28: 1366-1367.
- [11] Jager, D. 1978. Soliton Propagation Along Periodic Transmission Line. **Appl. Phys.**, 64: 3277-3281.
- [12] Watanabe, S. 1982..Solitons in Nonlinear Transmission Line. **J.Phys. Soc. Japan**, 51: 1030-1036.
- [13] Noguchi, A. 1985. Solitons in a Nonlinear Transmission Line. Elec. and Commun, 13p, Japan.
- [145] Fakushima, K., Wadati, M., Kotera, T., Sawada, K. and Narahara, Y. 1980. Experimental and Theoretical Study of Recurrence Phenomena in Nonlinear Transmission Line. **J. Phys. Soc.**, 48: 1029-1034.

- [15] Watanabe, S., Miyakawa, M. and Muroya, K. 1980. Experiment on Recurrence in Nonlinear LC Circuit. **J. Phys. Soc.**, 49: 825-831.
- [16] Watanabe, S., Miyakawa, M. and Toda, M. 1978. Asymptotic Behavior of Collisionless Shock in Nonlinear LC Circuit. **J. Phys. Soc.**, 45: 2030.
- [17] Nagashima, H. and Amagishi, Y. 1978. Experiment on the Toda Lattice Using Nonlinear Transmission Lines. **J. Phys. Soc.**, 45: 680-688.
- [18] Kofane, T., Michaux, B. and Remoissenet, M. 1988. Theoretical and Experimental Studies of Diatomic Lattice Solitons Using an Electrical Transmission Line. **J. Phys.**, 21: 1395-1412.
- [19] Yazaki, T. and Fukushima, K. 1985. Experimental Studies of Potential Problems in Quantum Mechanics. **Am. J. Phys.**, 53: 1186-1191.
- [20] Nejoh, Y. 1985. Envelope Soliton of the Electron Plasma Wave in a Nonlinear Transmission Line. **Phys. Script**, 31: 415-418.
- [21] Burunelli, J.C. 2000. Dispersionless Limit of Integrable Models. **Brazilian Journal of Physics**, 30 (2):460
- [22] Yoshinaga, T., Yamamoto, T. and Kakutani, T. Resonant Interaction Between Long and Short Waves on a Nonlinear Transmission Line, Bilkent University Library.
- [23] Altınbaşak, O. ve Taşbaşı, A. 1997. Elektronik Workbench Bilgisayarda Elektronik Laboratuvarı. Interactive Era Ltd., 290s, İstanbul.
- [24] Addison, P.S. 2002. "The Illustrate Wavelet Transform Hand Book Introductory Theory, Applications In Science, Engineering, Medicine, Finance". IOP Publishing Ltd, 353p., UK.
- [25] Daubechies I. 1992. Lectures on Wavelets. 10p., S.I.A.M.
- [26] Grap, A. 1995. An Introduction to Wavelets. **IEEE Computer Society**, 8-9.
- [27] Vasighi, M. 2009, Continuous Wavlet Taransform, (http://www.iasbs.ac.ir/students/m_vasigh/), Erişim Tarihi: 20.04.2009.
- [28] Blair, J. M. 1982. Standing and Traveling Waves on Lumped Component Lines. **Am. J. Phys.**, 50 (8): 753-756.
- [29] Hirota, R. and Suzuki, K. 1973. Theoretical and Experimental Studies of Lattice Solitons in Nonlinear Lumped Networks. **Proceedings of The IEEE**, 61: 1483-1491.

ÖZGEÇMİŞ**KİŞİSEL BİLGİLER**

Adı Soyadı : Ali Rıza ÖZGEÇ

Doğum Yeri ve Tarihi : Aydın 1979

EĞİTİM DURUMU

Lisans Öğrenimi : x

Yüksek Lisans Öğrenimi :

Bildiği Yabancı Diller : İngilizce

BİLİMSEL FAALİYETLERİ

a) Yayınlar
-SCI

-Diğer

b) Bildiriler
-Uluslararası

-Ulusal

c) Katıldığı Projeler

İŞ DENEYİMİ

Çalıştığı Kurumlar ve Yıl : MEB-8

İLETİŞİM

E-posta Adresi : ozgecali@gmail.com

Tarih :03/05/2010