

**Doğrusal Olmayan Sistemlerin Frekans Boyutunda
Modellenmesi ve Analizi İçin Yeni Bir Hesaplama
Algoritması Tasarımı ve Uygulaması**

Program Kodu: 1001

Proje No: 116E176

Proje Yürütücüsü:
Doç. Dr. Sezgin KAÇAR

Araştırmacı(lar):

Prof. Dr. İlyas ÇANKAYA
Doç. Dr. Devrim AKGÜN
Doç. Dr. Cüneyt BAYILMIŞ

Danışman(lar):

...

Bursiyer(ler):

Arş. Gör. Yasin CANTAŞ
Emre GÜLERYÜZ

Kasım 2019
SAKARYA

ÖNSÖZ

Doğrusal Olmayan Sistem (DOS)'lerin modellenmesi ve analizi konusu ele alındığında yöntemlerin zaman ve frekans boyutunda olmak üzere iki temel sınıfa ayrıldığı görülmektedir. Zaman boyutundaki yöntemler ile DOS'larda görülen atlama, çatallanma, kaos gibi doğrusal olmayan davranışların incelenmesi çok zordur. Bu nedenle frekans boyutundaki yöntemler DOS'ların analizi için daha çok tercih edilmektedir. Frekans boyutundaki yöntemler ele alındığında ise analitik olan yöntemler içerisinde Volterra Serileri temelli olan TF yöntemi hem iki boyutlu sunum kolaylığı hem de birçok farklı sisteme uygulanabilirliği açısından tercih edilmektedir. Bu projede TF yönteminin dezavantajı olan hesaplama yükünün azaltılmasını sağlayacak yeni ve özgün bir hesaplama algoritması geliştirilmiştir. Geliştirilen yeni algoritma, günümüzde standart PC donanımları haline gelen çok çekirdekli işlemciler ve grafik işlemciler barındıran bilgisayarlar için uyumlu hale getirilerek paralel hesaplama ile çok daha hızlı şekilde sonuçlar elde edilmiştir.

Bu proje 116E176 proje numarası ile TÜBİTAK 1001 - Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Projelerini Destekleme Programı kapsamında desteklenmiştir. Projeye olan maddi desteğinden dolayı proje yürütücüsü ve proje ekibi TÜBİTAK'a teşekkürlerini bildirmektedir.

İÇİNDEKİLER

1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ÖZETİ	3
3. GEREÇ VE YÖNTEM	7
3.1 Volterra Serileri ve Volterra Serileri Temelli Tanımlama Fonksiyonları	7
3.1.1 Doğrusal Olmayan Sistemlerin Volterra Serileri ile Zaman ve Frekans Boyutunda Tanımlanması	7
3.1.2 Yüksek Dereceli Frekans Cevabı Fonksiyonlarının Elde Edilmesi	8
3.1.3 Genelleştirilmiş Tanımlama Fonksiyonlarının Elde Edilmesi	11
3.1.4 Örnek Uygulama	12
3.2 Tanımlama Fonksiyonu Metodunun MATLAB Ortamında Kodlanması ve MATLAB GUI ile Arayüz Tasarımı	14
3.3 Sürelerin Tespiti ve Sürelerin Kısaltılması İçin Yeni Algoritmalar	21
3.3.1 TF Metodunda Harcanan Sürelerin Tespiti	21
3.3.2 TF Yönteminde İşlem Yüğü Fazla Olan İşlemlerin Daha Az İşlem Yüğü Oluşturacak Şekilde Revize Edilerek Yeni Algoritmanın Tasarımı	23
3.3.2.1 Sayısal Sonuçların Daha Hızlı Elde Edilmesi İçin Permütasyon Sayısının Düşürülmesi	24
3.3.2.2 Sayısal Sonuçların Daha Hızlı Elde Edilmesi İçin Düşük Dereceli Tanımlama Fonksiyonlarının Kaydedilerek Kullanılması	25
3.3.3 Önerilen Yöntemlerin Kullanıldığı Yeni TF Algoritması ve Performans Değerlendirmesi	26
3.4 Paralel Hesaplamalar	28
3.4.1 Yeni Algoritmanın Çok Çekirdekli İşlemci ile Hızlandırılması	28
3.4.1.1 MATLAB Paralel Hesaplama Araç Kutusu	28
3.4.1.2 İşlem Yüğünün Bölünmesi ve Paralel Hesaplama Akış Diyagramı	30
3.4.1.3 Paralel Hesaplama Sonucu Elde Edilen Hızlanma Oranları	32
3.4.2 GPU ile Hızlandırma	32
3.5 Belirlenen Sistemlere ait Frekans Cevaplarının MATLAB Simulink ile Elde Edilmesi	33

3.5.1	MATLAB Simulink.....	33
3.5.2	Sistemlerin Frekans Cevabının MATLAB Simulink ile Elde Edilmesi	34
3.5.3	Belirlenen Doğrusal Olmayan Sistemlerin Tanıtılması ve Simulink Modelleri	38
3.5.3.1	Duffing Sistemi (Sistem 1).....	38
3.5.3.2	Kübik Söndürücü ve Kübik Sertlik Terimi İçeren Sistem Modeli (Sistem 2).....	38
3.5.3.3	Kuadratik Söndürücü ve Kübik Sertlik Terimleri İçeren Sistem Modeli (Sistem 3)	39
3.6	Devre Tasarımları ve Deneysel Sonuçlar	40
3.6.1	Pspice	40
3.6.2	Belirlenen Sistemlerin Pspice Modellerinin Elde Edilmesi	41
3.6.2.1	Kullanılan Elektronik Araçlar	41
3.6.2.1.1	Eviren Yükselteç Devresi.....	41
3.6.2.1.2	İntegral Alıcı Devre	42
3.6.2.1.3	Analog Çarpma Devresi.....	42
3.6.2.2.	Sistemlerin Pspice Modelleri	43
3.6.2.2.1	Sistem 1'in Pspice Modeli.....	43
3.6.2.2.2	Sistem 2'nin Pspice Modeli.....	44
3.6.2.2.3	Sistem 3'ün Pspice Modeli.....	45
3.6.3	Pspice Ortamında Frekans Cevabı Elde Edilmesi	47
3.6.4	Deneysel Elektronik Devre Tasarımıyla Frekans Cevabı Elde Edilmesi.....	47
3.6.4.1	Sistem 1'in Deneysel Olarak Frekans Cevabının Bulunması	48
3.6.4.2	Sistem 2'nin Deneysel Olarak Frekans Cevabının Bulunması	49
3.6.4.3	Sistem 3'ün Deneysel Olarak Frekans Cevabının Bulunması.....	51
4.	BULGULAR VE TARTIŞMA	54
4.1	Arayüz, Simulink, Pspice ve Deneysel Sonuçların Karşılaştırılması	54
4.1.1	Sistem 1 Frekans Cevapları	54
4.1.2	Sistem 2 Frekans Cevapları	58
4.1.3	Sistem 3 Frekans Cevapları	63

4.2 Çok Çekirdekli Paralel Hesaplama İçin Maliyet, Hızlanma ve Verim Değerlerinin İncelenmesi	66
4.2.1 Sistem 1'in Çok Çekirdekli Çalışmada Hızlanma, Verim Oranları ve Maliyetleri	66
4.2.2 Sistem 2'nin Çok Çekirdekli Çalışmada Hızlanma, Verim Oranları ve Maliyet ...	73
4.2.3 Sistem 3'ün Çok Çekirdekli Çalışmada Hızlanma, Verim Oranları ve Maliyet	79
4.3 GPU ile Paralel Hesaplama için Hızlanma Değerlerinin İncelenmesi	86
5. SONUÇ	90
6. KAYNAKLAR.....	93

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1. Metodların kullanımı için oluşturulan .m dosyaları ve fonksiyonlar	14
Şekil 2. MATLAB GUI ile tasarlanan arayüz	15
Şekil 3. Çalıştırılan arayüz ekranı	16
Şekil 4. Örnek sisteme ait birinci derece TF için arayüz ile sonuçların elde edilmesi	18
Şekil 5. Üretilen fonksiyon dosyaları	18
Şekil 6. Kazanç-Frekans grafiği	19
Şekil 7. Faz açısı-Frekans grafiği	20
Şekil 8. Beşinci derece TF elde edilmesi	20
Şekil 9. n. Derece FCF'ye ait sonuç için daha düşük dereceli FCF'lerin hesaplanması.....	22
Şekil 10. Örnek sisteme ait farklı derecelerdeki TF'ler için sonuçların elde edilme süreleri	23
Şekil 11. Klasik yöntemin akış diyagramı.....	24
Şekil 12. n.derece FCF sonucu hesaplanırken daha düşük FCF'lerden gerekli sonuçların çağırılması.....	26
Şekil 13. Geliştirilen yeni TF hesaplama akış diyagramı	26
Şekil 14. Örnek sistemin için eski ve yeni algoritmaların TF derecelerine göre harcadıkları zamanlar	28
Şekil 15. MATLAB paralel işleme araç kutusunun sağladığı görev paralel yapı [5]	29
Şekil 16. MATLAB paralel işleme araç kutusunun sağladığı veri paralel yapı [5]	30
Şekil 17. Girilen frekans değerlerine göre işlem yükünün işlemci sayısına bölünmesi	30
Şekil 18. Yeni algoritmanın paralel hesaplama akış diyagramı	31
Şekil 19. Duffing sisteminin simulink modeli	34
Şekil 20. Frekans cevabı analizi için girişin belirlenmesi	35
Şekil 21. Frekans cevabı analizi için çıkışın belirlenmesi	35
Şekil 22. Simulink frekans cevabı simülasyonu	36
Şekil 23. Simulink frekans cevabı için giriş sinyali ayarları.....	37
Şekil 24. Elde edilen frekans cevabı sonuçları.....	37
Şekil 25. Duffing sisteminin Simulink Modeli	38
Şekil 26. Kübik söndürücü ve sertlik terimi içeren sistemin simulink modeli	39
Şekil 27. Kuadratik Söndürücü ve Kübik Sertlik Terimleri İçeren Sistemin Simulink Modeli ..	40
Şekil 28. Elektronik elemanlarla gerçekleştirilen eviren yükselteç devresi	41
Şekil 29. Elektronik elemanlarla gerçekleştirilen integral alıcı devresi.....	42
Şekil 30. AD633 entegresinin yapısı (Datasheet, AD633).....	42
Şekil 31. Sistem 1'in elektronik devre tasarımı.....	43
Şekil 32. Sistem 2'nin elektronik devre tasarımı.....	44
Şekil 33. Sistem 3'ün elektronik devre tasarımı	46

Şekil 34. Örnek bir giriş sinyali ve ona karşılık gelen çıkış sinyali	47
Şekil 35. Sistem 1 elektronik devresi	48
Şekil 36. Sistem 1 elektronik devresinden bir veri alınırken	48
Şekil 37. Sistem 1 giriş sinyalini 0.1 V 1.7 rad/sn.....	49
Şekil 38. Sistem 2 elektronik devresi	50
Şekil 39. Sistem 2 elektronik devresinden bir veri alınırken	50
Şekil 40. Sistem 2 giriş sinyalini 0.2 V 5.2 rad/sn.....	51
Şekil 41. Sistem 3 elektronik devresi	52
Şekil 42. Sistem 3 elektronik devresinden bir veri alınırken	52
Şekil 43. Sistem 3 giriş sinyalini 0.5 V 3 rad/sn.....	53
Şekil 44. Sistem 1 giriş sinyalinin genliği 0.1V iken kazanç grafiği	54
Şekil 45. Sistem 1 giriş sinyalinin genliği 0.1V iken faz farkı grafiği.....	55
Şekil 46. Sistem 1 giriş sinyalinin genliği 0.2V iken kazanç grafiği	55
Şekil 47. Sistem 1 giriş sinyalinin genliği 0.2V iken faz farkı grafiği.....	56
Şekil 48. Sistem 1 giriş sinyalinin genliği 0.3V iken kazanç grafiği	56
Şekil 49. Sistem 1 giriş sinyalinin genliği 0.3V iken faz farkı grafiği.....	57
Şekil 50. Sistem 1 giriş sinyalinin genliği 0.5V iken kazanç grafiği	57
Şekil 51. Sistem 1 giriş sinyalinin genliği 0.5V iken faz farkı grafiği.....	58
Şekil 52. Sistem 2 giriş sinyalinin genliği 0.1V iken kazanç grafiği	59
Şekil 53. Sistem 2 giriş sinyalinin genliği 0.1V iken faz farkı grafiği.....	59
Şekil 54. Sistem 2 giriş sinyalinin genliği 0.2V iken kazanç grafiği	60
Şekil 55. Sistem 2 giriş sinyalinin genliği 0.2V iken faz farkı grafiği.....	60
Şekil 56. Sistem 2 giriş sinyalinin genliği 0.3V iken kazanç grafiği	61
Şekil 57. Sistem 2 giriş sinyalinin genliği 0.3V iken faz farkı grafiği.....	61
Şekil 58. Sistem 2 giriş sinyalinin genliği 0.5V iken kazanç grafiği	62
Şekil 59. Sistem 2 giriş sinyalinin genliği 0.5V iken faz farkı grafiği.....	62
Şekil 60. Sistem 3 giriş sinyalinin genliği 0.3V iken kazanç grafiği	63
Şekil 61. Sistem 3 giriş sinyalinin genliği 0.3V iken faz farkı grafiği.....	64
Şekil 62. Sistem 3 giriş sinyalinin genliği 0.5V iken kazanç grafiği	64
Şekil 63. Sistem 3 giriş sinyalinin genliği 0.5V iken faz farkı grafiği.....	65
Şekil 64. Sistem 3 giriş sinyalinin genliği 0.7V iken kazanç grafiği	65
Şekil 65. Sistem 3 giriş sinyalinin genliği 0.7V iken faz farkı grafiği.....	66
Şekil 66. Sistem 1 için 2 işlem birimi ile hesaplama oranları	68
Şekil 67. Sistem 1 için 4 işlem birimi ile hesaplama oranları	68
Şekil 68. Sistem 1 için 8 işlem birimi ile hesaplama oranları	69
Şekil 69. Sistem 1 için 1.derecede verim oranları	69

Şekil 70. Sistem 1 için 3.derecede verim oranları	70
Şekil 71. Sistem 1 için 5.derecede verim oranları	70
Şekil 72. Sistem 1 için 7.derecede verim oranları	71
Şekil 73. Sistem 2 için 2 işlem birimi ile hesaplama oranları	74
Şekil 74. Sistem 2 için 4 işlem birimi ile hesaplama oranları	75
Şekil 75. Sistem 2 için 8 işlem birimi ile hesaplama oranlar	75
Şekil 76. Sistem 2 için 1.derecede verim oranları	76
Şekil 77. Sistem 2 için 3.derecede verim oranları	76
Şekil 78. Sistem 2 için 5.derecede verim oranları	77
Şekil 79. Sistem 2 için 7.derecede verim oranları	77
Şekil 80. Sistem 3 için 2 işlem birimi ile hesaplama oranlar	81
Şekil 81. Sistem 3 için 4 işlem birimi ile hesaplama oranlar	82
Şekil 82. Sistem 3 için 8 işlem birimi ile hesaplama oranlar	82
Şekil 83. Sistem 3 için 1.derecede verim oranları	83
Şekil 84. Sistem 3 için 3.derecede verim oranları	83
Şekil 85. Sistem 3 için 5.derecede verim oranları	84
Şekil 86. Sistem 3 için 7.derecede verim oranları	84
Şekil 87. Sistem 1'in GPU hız oranları	87
Şekil 88. Sistem 2 GPU hız oranları	88
Şekil 89. Sistem 3 GPU hız oranları	89

TABLO LİSTESİ

Tablo 1. TF metodu ile sonuçların elde edilmesi sırasında işlem basamakları için harcanan süreler	22
Tablo 2. TF metodu için FCF'ler hesaplanırken oluşabilecek permütasyon sayıları	22
Tablo 3. Örnek sistem modeli için TF'lerin elde edilme süreleri ($\omega=1$ rad/sn için)	27
Tablo 4. Hesaplamalarda kullanılan bilgisayarın özellikleri	32
Tablo 5. Sistem 1 için tek işlem birimi (sıralı hesaplama) ile elde edilen süreler (saniye).....	67
Tablo 6. Sistem 1 için iki işlem birimi ile elde edilen süreler (saniye)	67
Tablo 7. Sistem 1 için dört işlem birimi ile elde edilen süreler (saniye).....	67
Tablo 8. Sistem 1 için sekiz işlem birimi ile elde edilen süreler (saniye).....	68
Tablo 9. Sistem 1 için 1. Derece de maliyet.....	71
Tablo 10. Sistem 1 için 3. Derece de maliyet.....	72
Tablo 11. Sistem 1 için 5. Derece de maliyet.....	72
Tablo 12. Sistem 1 için 7. Derece de maliyet.....	72
Tablo 13. Sistem 2 için tek işlem birimi ile elde edilen süreler (saniye)	73
Tablo 14. Sistem 2 için iki işlem birimi ile elde edilen süreler (saniye)	73
Tablo 15. Sistem 2 için dört işlem birimi ile elde edilen süreler (saniye).....	73
Tablo 16. Sistem 2 için sekiz işlem birimi ile elde edilen süreler (saniye).....	74
Tablo 17. Sistem 2 için 1.derecede maliyet	78
Tablo 18. Sistem 2 için 3.derecede maliyet	78
Tablo 19. Sistem 2 için 5.derecede maliyet	79
Tablo 20. Sistem 2 için 7.derecede maliyet	79
Tablo 21. Sistem 3 için tek işlem birimi ile elde edilen süreler (saniye)	80
Tablo 22. Sistem 3 için iki işlem birimi ile elde edilen süreler (saniye)	80
Tablo 23. Sistem 3 için dört işlem birimi ile elde edilen süreler (saniye).....	81
Tablo 24. Sistem 3 için sekiz işlem birimi ile elde edilen süreler (saniye).....	81
Tablo 25. Sistem 3 için 1.derecede maliyet	85
Tablo 26. Sistem 3 için 3.derece maliyet	85
Tablo 27. Sistem 3 için 5.derece maliyet	86
Tablo 28. Sistem 3 için 7.derece maliyet	86
Tablo 29. Sistem 1 için GPU ile elde edilen süreler (saniye).....	87
Tablo 30. Sistem 2 için GPU ile elde edilen süreler (saniye).....	87
Tablo 31. Sistem 3 için GPU ile elde edilen süreler (saniye).....	88

ÖZET

Doğrusal olmayan sistemlerin modellenmesi ve analizi konusu ele alındığında yöntemlerin zaman ve frekans boyutunda olmak üzere iki temel sınıfa ayrıldığı görülmektedir. Zaman boyutundaki yöntemler ile doğrusal olmayan sistemlerde görülen çatallanma, kaos gibi doğrusal olmayan davranışların incelenmesi çok zordur. Bu nedenle frekans boyutundaki yöntemler doğrusal olmayan sistemlerin analizi için daha çok tercih edilmektedir. Doğrusal olmayan sistemlerin analitik olarak modellenmesinde ve analizinde kullanılan yöntemler incelendiğinde Volterra Serilerini temel alan yöntemlerin yaygın olarak kullanıldığı görülmektedir. Volterra Serileri doğrusal olmayan sistemlerin frekans boyutunda genlik kazancı ve faz açısı gibi frekans cevabı değerlerinin bulunmasını sağlar. Genlik ve faz cevaplarının elde edilmesi için Volterra serileri temelli farklı yöntemlerde bulunmaktadır. Bu yöntemlerden bir tanesi de polinom tip doğrusal olmayan terimler içeren diferansiyel denklemler ile tanımlanan doğrusal olmayan sistemler için kullanılan Tanımlama Fonksiyonları yöntemidir. Bu yöntem hem iki boyutlu sunum kolaylığı hem de birçok farklı sisteme uygulanabilirliği açısından tercih edilmektedir.

Bu projede, doğrusal olmayan sistemlerin frekans analizinde çok yaygın olarak kullanılan Volterra serileri temelli Tanımlama Fonksiyonları üzerinde çalışılmıştır. Volterra serileri ve Tanımlama Fonksiyonları örnek bir uygulamayla açıklanmıştır. Tanımlama Fonksiyonlarının daha kullanılabilir olabilmesi ve yaygınlaştırılması için bir arayüz tasarlanmıştır. Belirlenen farklı doğrusal olmayan sistemler için arayüz ve simulink ile frekans analizleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca farklı doğrusal olmayan sistemlerin analog elektronik devre tasarımları yapılmıştır. Analog elektronik devreler kullanılarak simülasyon sonuçları ve gerçekleyerek deneysel sonuçlar elde edilmiştir. Tasarlanan arayüz ile frekans cevabı sonuçları ve simülasyon sonuçları karşılaştırılarak Tanımlama Fonksiyonunun geçerliliği gösterilmiştir. Sonuçta, dört farklı yöntem ile elde edilen frekans cevapları karşılaştırılarak sonuçlar yorumlanmış ve Tanımlama Fonksiyonu yönteminin kullanılabilirliği ortaya konmuştur.

ABSTRACT

When the modeling and analysis of nonlinear systems are considered, it is seen that the methods are divided into two main classes: time and frequency. It is very difficult to examine nonlinear behaviors such as bifurcation and chaos in time-domain methods. Therefore, the methods in the frequency dimension are more preferred for the analysis of nonlinear systems. When the methods used in analytical modeling and analysis of nonlinear systems are examined, it is seen that the methods based on Volterra Series are widely used. Volterra Series provides frequency response values such as amplitude gain and phase angle in frequency dimension of nonlinear systems. There are different methods for obtaining amplitude and phase responses based on Volterra series. One of these methods is the Definition Functions method used for nonlinear systems defined by differential equations containing polynomial type nonlinear terms. This method is preferred both for ease of presentation in two dimensions and its applicability to various systems.

In this project, the definition functions based on Volterra series which are widely used in frequency analysis of nonlinear systems are studied. Volterra series and Description Functions are described in an exemplary embodiment. An interface has been designed to make the Description Functions more usable and popular. Frequency analysis was performed with interface and simulink for different nonlinear systems. In addition, analog electronic circuit designs of different nonlinear systems have been made. Simulation results were obtained using analog electronic circuits and experimental results were obtained. The validity of the Identification Function has been shown by comparing the interface design and frequency response results and simulation results. As a result, the frequency responses obtained by four different methods were compared and the results were interpreted and the usability of the Identification Function method was demonstrated.

1. GİRİŞ

Birçok disiplinler arası ilişkilerin bilimsel yaklaşımlarla incelediği sistem kavramı, bir hedefe veya amaca ulaşmak için bir arada bulunan ve aralarında ilişkili olan parçalardan meydana gelen, girdileri-çıktıları bulunan bir bütündür. Sistemler, davranışlarının ve özelliklerinin ortaya çıkarılması için matematiksel olarak tanımlanması ve matematiksel yöntemlerle analizleri yapılması gerekir. Bu şekilde analizleri yapılamayan sistemler ise deneysel bir ortamda gerçekleştirilerek, analizleri elde edilir. Fakat bir sistemin deneysel olarak yapılması, işlemin tehlikeli ve maliyetli olacağından aynı zamanda gerekli ortam koşullarının sağlanamama ihtimali göz önünde bulundurulduğunda, matematiksel olarak modellenmesi ve analizlerinin yapılması daha faydalı, kolay ve akılcı bir çözüm sunmaktadır.

Çok geniş bir ifadeye karşılık gelen sistem kavramı günlük hayatın içerisinde, bilimsel çalışmalar gibi pek çok sürecin ve yapının içerisinde yer almaktadır. Her türlü süreci ve yapıyı ifade ettiği için sistemlerin belirli sınıflara ayrılmaları incelenmeleri açısından gereksinim durumuna gelmektedir. Sistemler giriş çıkış sayısına göre ve yapılarına göre sınıflandırılabilirler.

Çoğunlukla sınıflandırmalar, kısmi diferansiyel veya adi diferansiyel denklem sistemleri, stokastik veya deterministik sistemler, sürekli zamanlı veya ayrık zamanlı sistemler, doğrusal olan ya da doğrusal olmayan sistemler, zaman gecikmeli veya zaman gecikmesiz sistemler, zamanla değişen ya da zamanla değişmeyen, nedensel veya nedensel olmayan, bellekli veya belleksiz sistemler, dinamik veya statik sistemler olarak yapılmaktadır (Brogan, 1974; Hsu, 1995; Kuo & Bir, 2009).

Sistemlerin en çok kullanılan sınıflandırma türlerinden birisi doğrusal sistem olup olmadığıdır. Doğrusal sistemler, matematiksel olarak doğrusal fonksiyonlardan oluşmakta olup, sistemlerin analizinde, modellenmesinde ve tasarımında bu sistem biçimi kullanılmaktadır. Bunun nedeni ise doğrusal sistemlerin analizi daha basit bir şekilde yapılmasıdır. Fakat evrende meydana gelen her şey doğrusal değildir, her sistemin doğrusallığı sınırlıdır.

Doğrusal Olmayan Sistemler (DOS)'de doğrusal olmayan bileşenler ivmelendirici, zayıflatıcı, pekiştirici veya geciktirici etkiler yapabilmektedir. DOS modellerindeki doğrusal olmayan terimler; değişkenlerin üstel, köklü, paydada, birbirleri ile çarpılmış veya mutlak ifadeleri olabilir. DOS'da atlama, çatalanma, kaos gibi çeşitli davranış olayları görülmektedir.

DOS'ların analizine yönelik zaman ve frekans boyutunda uygulanan birçok yöntem geliştirilmiştir (Billings, Stephen A., 1980; Kerschen, Worden, Vakakis, & Golinval, 2006).

DOS'ların modellenmesi ve analizi için kullanılan yöntemler zaman ve frekans boyutunda uygulanan yöntemler olarak ikiye ayrılabilir. Zaman boyutunda uygulanan yöntemler daha kolay uygulanabilir olmakla birlikte çoğu zaman DOS'un tüm davranışlarını incelemek için yeterli olmaz. Örneğin atlama olayı gibi DOS'lar için geçerli bir olayı ancak daha karmaşık olan frekans boyutundaki yöntemlerle incelemek mümkündür.

DOS'ların frekans boyutunda analizine yönelik en yaygın olarak kullanılan yöntemler olan Volterra serileri metodudur. Diğer kullanılan yöntemler içerisinde yer alan genelleştirilmiş harmonik denge metodu, tanımlama fonksiyonları metodu gibi analiz metotlarının hepsi Volterra modelini temel almaktadır (Kaçar & Çankaya, 2010). Bu model oldukça geneldir, fakat çok boyutlu frekans analizlerinde dezavantaja sahiptir (JONES, 1995). Bu dezavantajdan kurtulmak için Tanımlama Fonksiyonu kullanılabilir. Eğer giriş sinyali Tanımlama Fonksiyonu modelinde olduğu gibi belirli bir dalga formuyla sınırlandırılırsa Volterra modelinde oluşan dezavantaj engellenebilir ve problem basitleşebilir. Tanımlama fonksiyonu modelinde frekans cevabı fonksiyonu genliğe bağımlı olduğundan sistem yarı doğrusal olarak temsil edilir (Gelb & Van der Velde, 1968).

2. LİTERATÜR ÖZETİ

Volterra, Volterra serileri ile ilgili ilk çalışmayı yapmıştır (Volterra, 1930). Brilliant tarafından, ilk başlarda sadece sürekli zaman özelliği gösteren sistemlerde kullanılan Volterra serilerinin aynı zamanda DOS'lar içinde kullanılabileceği gösterilmiştir (Brilliant, 1958). Barrett tarafından, diferansiyel denklemler ile tanımlanan DOS'ların Volterra Serileri ile çözülebileceğini çalışmalarında göstermişlerdir (Barrett, 1965). Narayanan tarafından, transistörlü geri beslemeli yükselteçlerde karşılaşılan ve önemli bir problem olarak görülen girişim bozulma analizleri için Volterra serileri kullanılmıştır (Narayanan, 1970).

Bedrosian ve arkadaşlarının çalışmasında ise Volterra serileri Fourier dönüşümü ile zaman boyutundan frekans boyutuna taşınmış ve harmonik irdeme algoritması üretilmiştir (Bedrosian & Rice, 1971). Chua ve Tang tarafından, sinüsoidal osilatörlerde genlik ve frekansın hesaplanabilmesi ve analizleri için Volterra serileri kullanılarak bir algoritma geliştirmişlerdir (Chua & Tang, 1982).

Billings ve arkadaşları da Volterra serileri algoritmasını ayırık zamanlı sistemlerde uygulamışlardır (S. A. Billings & Tsang, 1989). Peyton Jones ve Billings, Volterra serilerini kullanarak elde ettiği genelleştirilmiş frekans cevabı fonksiyonlarının dinamik bir sistem olan integrodiferansiyel denklemler için doğrudan üretildiği, kendini çağıran fonksiyonlar içeren bir algoritma tasarlamışlardır (S. A. Billings & Peyton Jones, 1990). Tymerski tarafından, Darbe genişlik modülasyonlu dönüşüm sistemlerinin çıkış cevabının doğrusal olmayan kontrolü Volterra fonksiyonel serileri ile tanımlanmıştır (Tymerski, 1991).

Biswas ve Mcgee tarafından, yarı iletken lazer diyotun doğrusal olmayan teorik bir modelinin analizleri için Volterra transfer fonksiyonları hesaplanarak analizler elde edilmiştir (Biswas & McGee, 1991). Tomlinson ve arkadaşları tarafından, doğrusal olmayan osilatörün çıkış cevabı, Volterra serileri kullanılarak frekans cevabı fonksiyonlarının toplamı olarak ele alınmıştır (Tomlinson, Manson, & Lee, 1996). Worden ve arkadaşları tarafından, harmonik irdeme metodu için Volterra Serileri yapısı kullanılarak çok giriş ve çok çıkışlı doğrusal olmayan sistemlerin ait frekans cevabı fonksiyonlarını sonuç verecek şekilde genişletilmiştir (Worden, Manson, & Tomlinson, 1997).

Billings ve Lang tarafından Volterra serileri analizinde kullanılacak ve kullanılmayacak terimlerin belirlenmesi için bir algoritma geliştirmiş ve bir simülasyonla gösterilmiştir (S. A. Billings & Lang, 1997). Petkovska ve Dos tarafından, adsorbsiyon sistemlerinin doğrusal

olmayan frekans cevabı Volterra serileri kullanılarak hesaplanan yüksek dereceli frekans cevabı fonksiyonlarıyla sonuç vermiştir (Petkovska & Do, 1998). Chatterjee ve Vyas Volterra Serileri yöntemini kullanarak doğrusal olmayan sistem cevaplarının yakınsama limitlerinin belirlenmesi için bir çalışma gerçekleştirmişlerdir (Chatterjee & Vyas, 2000). Swain ve Billings tarafından, doğrusal olmayan çok giriş çok çıkışlı sistemlere ait frekans cevaplarının elde edilmesinde Volterra serileri kullanılmıştır (Swain & Billings, 2001).

Bui ve arkadaşları tarafından, manyetik rezonans görüntüleme işleminde duyarlılık hatalarından dolayı oluşan doğrusal olmayan bozulmaların modellenmesi ve analizi için Volterra serileri yaklaşımı ve ardından karşılaşılan bozulmaları düzeltmek için ikinci derece Volterra serileri kullanılmıştır (Bui, Li, Bott, & Mintchev, 2001). Brenner ve Xu yüksek dereceli Volterra sistemlerinin modellenmesi ve kararlılık analizi için çarpanlara ayırma temelli bir yöntem ortaya koymuşlardır (Brenner & Xu, 2002).

Chatterjee ve Vyas tarafından yüksek dereceli harmoniklerin en iyi biçimde belirlenebilmesi için, Volterra kernellerinin kendini çağıran fonksiyonlarla işlendiği yeni bir parametre ile frekans değerlerinin ve sınır gerilim değerlerinin iyi sonuç verdiği bir Duffing osilatörünün sayısal simülasyonu ile karşılaştırılarak görülmüştür (Chatterjee & Vyas, 2003). Yine Chatterjee ve Vyas tarafından çok girişli Volterra Serileri ile bir sistemin çoklu harmonik giriş altında cevap yapısı geliştirilmiştir (Chatterjee & Vyas, 2004).

Chadwick ve arkadaşları tarafından, ayrık zamanlı doğrusal olmayan sistemlerin frekans cevabı için Volterra Serileri kullanılmıştır ve hızlı örneklenmiş doğrusal olmayan sistemlerin modellenmesi ve analizi için yeni bir yöntem sunulmuştur (Chadwick, Kadiramanathan, & Billings, 2006). Lang ve arkadaşları tarafından polinom yapıdaki diferansiyel denklem ile tanımlanan doğrusal olmayan bir sistemin frekans cevabı ile sistem parametreleri arasında bir ilişki olup olmadığı Volterra Serileri kullanılarak sunulmuştur (Peng & Lang, 2007).

Peyton Jones ise ortaya koyduğu basitleştirilmiş bir algoritma ile frekans cevap fonksiyonlarını doğrudan elde etmiştir (Peyton Jones, 2007). Masugi ve Takuma tarafından, IP ağlar üzerinden video paket iletiminin doğrusal olmayan analizinde Volterra serileri kullanılmıştır (Masugi & Takuma, 2007). Helie ve Rose tarafından, telli enstrümanların doğrusal olmayan modelleri Volterra serileri kullanılarak simüle edilmiş ve modellemeleri yapılmıştır (Hélie & Roze, 2008). Jing ve arkadaşları doğrusal olmayan çıkış terimleri içeren ve doğrusal olmayan bir durum denklemini doğrusal olmayan Volterra sistemleri için sistem

frekans cevabı fonksiyonları ve karakteristikleri geliştirilmiş ve tartışılmıştır (X. J. Jing, Lang, & Billings, 2008).

Peng ve Lang tarafından çıkış frekans cevabı fonksiyonları Volterra Serileri teorisi kullanılarak doğrusal olmayan sistemlerin frekans analizi için kullanılmak üzere sunulmuştur (Peng, Lang, Billings, & Tomlinson, 2008). Jing ve Lang, Narx (nonlinear autoregressive with exogenous input) modeli ile tanımlanan Volterra sistemleri için genelleştirilmiş frekans cevabı fonksiyonlarının parametrik karakteristiklerini kullanan yeni bir gösterim fonksiyonu geliştirilmiştir (X. Jing & Lang, 2009). Li ve Billings tarafından, dördüncü derece doğrusal olmayan sertlik içeren sistemlerin frekans analizleri için Volterra Serisini incelenmiştir (X. J. Jing, Lang, & Billings, 2010). Jing ve arkadaşları tarafından, Volterra Serileri kullanılarak analiz edilebilen doğrusal olmayan sistemlerin çıkış frekans özellikleri araştırılmıştır (X. J. Jing vd., 2010). Li ve Billings tarafından, Volterra serileri temelli cebirsel bir frekans boyutu metodu geliştirmişlerdir (Li & Billings, 2012).

Manson ve arkadaşları tarafından, doğrusal olmayan sistemlerdeki karşılıklı kırılması (reciprocity breakdown) olan davranışı Volterra serileri kullanılarak yüksek dereceli frekans cevabını fonksiyonlarını elde etmişlerdir (Manson, Worden, & Wood, 2012). Guo ve arkadaşları tarafından belirli koşullardaki yarı doğrusal başlangıç değer problemlerinin Volterra seri kullanılarak çözülebileceği sunulmuştur (Guo, Guo, Billings, Coca, & Lang, 2013).

Kaçar ve Çankaya Volterra serileri yönteminin üzerinde çalışarak, yöntemin web tabanlı olarak yaygınlaştırılmasını sağlamıştır (Kacar S. & Cankaya, 2012). Daha sonra Kaçar ve arkadaşları bu yöntemin yüksek dereceli Doğrusal olmayan sistemlerde uzun işlem süresini azaltmak için daha hızlı bir hesaplama algoritması geliştirmiş ve bu yeni algoritma paralel hesaplama yöntemlerine uygunlaştırılarak, yüksek dereceli DOS'ların frekans analizinin çok daha hızlı biçimde gerçekleştirilmesi sağlanmıştır (S. Kacar, Cankaya, & Boz, 2014).

Söz konusu Frekans Cevabı Fonksiyonları yöntemi çok geniş bir uygulama alanına sahip olmakla birlikte, sahip olduğu çok boyutlu yapı nedeniyle görselleştirme ve yorumlama problemlerine sahiptir. Bu problemin ortadan kaldırılması için Tanımlama Fonksiyonları (TF) yöntemi önerilmiştir (S. A. Billings & Peyton Jones, 1990; Jones & Billings, 1991).

Volterra Serileri temelli TF yöntemi ile ilgili olarak, ilk aşamada FCF ile TF arasındaki bağlantı tanımlanmıştır (S. A. Billings & Peyton Jones, 1990; Jones & Billings, 1991). Sonrasında

diferansiyel denklemler ve fark denklemleri ile tanımlanan DOS'ların frekans boyutunda modellenmesi ve analizi için Volterra Serileri temelli TF yönteminin kullanımı bir algoritma halinde ortaya konmuştur (Peyton Jones, 1995). Bu sayede Frekans Cevabı Fonksiyonları yöntemindeki çok boyutluluktan ileri gelen kullanım zorluğu aşılmıştır.

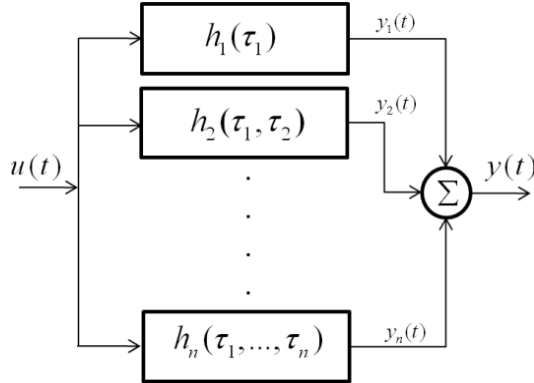
3. GEREÇ VE YÖNTEM

3.1 Volterra Serileri ve Volterra Serileri Temelli Tanımlama Fonksiyonları

3.1.1 Doğrusal Olmayan Sistemlerin Volterra Serileri ile Zaman ve Frekans Boyutunda Tanımlanması

Doğrusal olmayan sistemlerin analizinde kullanılan en temel analitik yöntemlerden bir tanesi Volterra Serileri yöntemidir. Bu yöntem doğrusal olmayan sistemlerin frekans boyutunda analizinin gerçekleştirilmesine olanak sağlar. Bu sayede analizi gerçekleştirilen sisteme ait genlik ve faz cevapları elde edilebilmektedir.

Doğrusal olmayan sistemler zaman boyutunda tanımlanırken sistemlerin girişi ile çıkışı arasındaki ilişki Volterra fonksiyonel serileri ile Şekil 1'deki gibi açıklanabilir (Volterra, 1931).



Şekil 1. Volterra model yapısı (Kaçar ve Çankaya, 2010)

Şekil 1'e bakıldığında doğrusal olmayan bir sistemin $h_1(\tau_1)$ 'den başlayarak $h_n(\tau_1, \dots, \tau_n)$ 'e kadar N adet alt sistemden oluştuğu görülmektedir. Tüm bu alt sistemlere $u(t)$ girişi uygulanmakta ve her bir alt sistemden bir $y_n(t)$ çıkışı elde edilmektedir. Sonuçta tüm bu alt sistem çıkışları toplanarak tüm sistemin çıkışı olan $y(t)$ 'yi oluşturmaktadır. Bu yapı Eşitlik 1'de görülen ifade ile matematiksel olarak tanımlanabilir.

$$y(t) = \sum_{n=1}^N y_n(t) \quad (1)$$

Her bir alt sistem çıkışı ise zaman boyutunda Eşitlik 2'deki gibi tanımlanır. Bu eşitlik doğrusal konvolüsyon integralinin yüksek dereceli açılımıdır. Eşitlik 2'de görülen $h_n(\tau_1, \dots, \tau_n)$ fonksiyonu ise sistemin n . derece anlık darbe (impuls) cevabıdır.

$$y_n(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} h_n(\tau_1, \dots, \tau_n) \prod_{i=1}^n u(t - \tau_i) d\tau_i \quad n > 0 \quad (2)$$

Eşitlik 2'ye, Eşitlik 3 ve 4'deki şartlar göz önüne alınarak çok boyutlu Fourier transformu uygulanırsa $y_n(t)$ fonksiyonu Eşitlik 5'deki gibi frekans boyutuna taşınmış olur.

$$y_n(t) = y_n(t_1, \dots, t_n) \Big|_{t_1 = \dots = t_n = t} \quad (3)$$

$$\omega = \sum_{i=1}^n \omega_i \quad (4)$$

$$Y_n(j\omega) = \frac{1/\sqrt{n}}{(2\pi)^{n-1}} \int_{\omega = \sum_{i=1}^n \omega_i} H_n(j\omega_1, \dots, j\omega_n) \prod_{i=1}^n U(j\omega_i) d\omega_1, \dots, d\omega_{n-1} \quad (5)$$

Eşitlik 5'deki $U(j\omega)$, girişin Fourier dönüşümü karşılığı, $H_n(j\omega_1, \dots, j\omega_n)$ ifadesi ise n . derece Frekans Cevabı Fonksiyonu (FCF) olarak adlandırılır. Sonuçta sistemin frekans boyutundaki çıkış ifadesi her derecedeki çıkış bileşeninin toplamı olarak Eşitlik 6'daki gibi yazılabilir.

$$Y(j\omega) = \sum_{n=1}^N A^n Y_n(j\omega) \quad (6)$$

3.1.2 Yüksek Dereceli Frekans Cevabı Fonksiyonlarının Elde Edilmesi

Sistemlerin matematiksel olarak modellenmesinde kullanılan en yaygın yöntemler diferansiyel veya fark denklemleri gibi parametrik yaklaşımları kullanan yöntemlerdir. Bunlardan birisi de sürekli zamanlı doğrusal olmayan zaman gecikmesiz sistemlerin gösteriminde kullanılan NDE (Non-linear Differential Equations – Doğrusal olmayan diferansiyel denklem) modelidir.

$$\sum_{m=1}^M \sum_{p=0}^m \sum_{l_1, \dots, l_{p+q}=0}^L c_{p,q}(l_1, \dots, l_{p+q}) \prod_{i=1}^p \frac{d^{(l_i)} y(t)}{dt^{(l_i)}} \prod_{i=p+1}^{p+q} \frac{d^{(l_i)} u(t)}{dt^{(l_i)}} = 0 \quad (7)$$

Eşitlik 7'de görülen NDE modelinde l_i ile türev derecesi, $c_{p,q}(l_1, \dots, l_{p+q})$ ifadesi ile sistemin model denkleminde p tane çıkış bileşeni ve q tane giriş bileşeninden oluşan bir terimin katsayısı tanımlanır. Örnek olarak Eşitlik 8'de, doğrusal olmayan gemi modelinin diferansiyel denklem ile gösterilen matematiksel karşılığı verilmiştir. Bu diferansiyel denkleminde bulunan terimlerin NDE modeline göre belirlenmiş katsayıları ise Eşitlik 9'daki gibidir.

$$y''(t) + 0.18y'(t) + 27.8562y(t) + 0.096y'(t)^3 + 19.9047y(t)^3 - u(t) = 0 \quad (8)$$

$$\left. \begin{aligned} c_{1,0}(2) = 1, \quad c_{1,0}(1) = 0.18, \quad c_{1,0}(0) = 27.8562, \quad c_{0,1}(0) = -1, \\ c_{3,0}(0,0,0) = 19.9047, \quad c_{3,0}(1,1,1) = 0.096 \quad \text{diğer terimler } c_{p,q} = 0 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Doğrusal olmayan sistemin frekans analizinin gerçekleştirilmesi için Volterra Serileri temelli Frekans Cevabı Fonksiyonarı, 1989 ve 1990 yıllarında Billings ve Peyton Jones tarafından yapılan çalışmalar sonucu ortaya konmuştur. Bu metod ile sadece sistem parametreleri kullanılarak sistemin frekans cevabı fonksiyonları elde edilmektedir. Böylece sistemlerin davranışları frekans boyutunda incelenebilmektedir.

Bu metod kapsamında sistem terimleri ve bu terimlerin n . derece FCF'ye yaptıkları katkılar üç grupta incelenir: sadece giriş bileşeni içeren doğrusal olmayan terimler ($H_{n_u}(\cdot)$), sadece çıkış bileşeni içeren doğrusal olmayan terimler ($H_{n_y}(\cdot)$) ve giriş-çıkış bileşenlerini birlikte içeren doğrusal olmayan terimler ($H_{n_{uy}}(\cdot)$) (Kaçar ve Çankaya, 2010). Bu metod ile n . derece asimetrik yapıdaki bir FCF aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$H_n^{asym}(j\omega_1, \dots, j\omega_n) = \frac{-\left[H_{n_u}(j\omega_1, \dots, j\omega_n) + H_{n_y}(j\omega_1, \dots, j\omega_n) + H_{n_{uy}}(j\omega_1, \dots, j\omega_n) \right]}{\sum_{l_1=0}^L c_{1,0}(l_1)(j\omega_1 + \dots + j\omega_n)^{l_1}} \quad (10)$$

Eşitlik 10'da $H_{n_u}(\cdot)$, $H_{n_y}(\cdot)$ ve $H_{n_{uy}}(\cdot)$ ile ifade edilen fonksiyonların n . derece FCF'ye yaptığı katkılar ise aşağıdaki formüllerle tanımlanır.

$$H_{n_u}(j\omega_1, \dots, j\omega_n) = \sum_{l_1, l_n=0}^L c_{0,n}(l_1, \dots, l_n) \prod_{i=1}^n (j\omega_i)^{l_i} \quad (11)$$

$$H_{n_y}(j\omega_1, \dots, j\omega_n) = \sum_{q=1}^{n-1} \sum_{p=1}^{n-q} \sum_{l_1, \dots, l_{p+q}=0}^L c_{p,q}(l_1, \dots, l_{p+q}) H_{n-q,p}(j\omega_1, \dots, j\omega_{n-q}) \prod_{i=n-q+1}^{p+q} (j\omega_i)^{l_i} \quad (12)$$

$$H_{n_y}(j\omega_1, \dots, j\omega_n) = \sum_{p=2}^n \sum_{l_1, \dots, l_p=0}^L c_{p,0}(l_1, \dots, l_p) H_{n,p}(j\omega_1, \dots, j\omega_n) \quad (13)$$

Yukarıdaki eşitlikler dikkatli biçimde incelendiğinde sadece giriş bileşeni içeren terimlerin kendi doğrusal olmama derecelerindeki FCF'lere katkı yaptıkları görülebilir. Çıkış bileşeni içeren terimlerin n . derece FCF'ye yaptıkları katkılar ise Eşitlik 14'deki $H_{n,p}(\cdot)$ ile ifade edilen fonksiyon kullanılarak belirlenmektedir (Kaçar ve Çankaya, 2010). Bu fonksiyon incelendiğinde ise kendini çağıran (recursive) yapıdaki bir algoritma olduğu görülmektedir. (Billings ve Peyton Jones, 1990).

$$H_{n,p}^{asym}(j\omega_1, \dots, j\omega_n) = \sum_{i=1}^{n-p+1} H_i(j\omega_1, \dots, j\omega_i) H_{n-i,p-1}(j\omega_{i+1}, \dots, j\omega_n) (j\omega_1 + \dots + j\omega_i)^{l_p} \quad (14)$$

$$H_{n,1}^{asym}(j\omega_1, \dots, j\omega_n) = H_n(j\omega_1, \dots, j\omega_n) (j\omega_1 + \dots + j\omega_n)^{l_p} \quad (15)$$

Eşitlik 14 ve 15 ile ifade edilen uygulama kendini çağıran yapıda olduğundan özellikle yüksek dereceli fonksiyonların üretilmesinde çok büyük bir işlem yükü getirmektedir (Kaçar ve Çankaya, 2010). Bu problem İP-2 kapsamında giderilmesi için yeni bir hesaplama algoritması önerilmiştir.

Eşitlik 14 ve 15, Eşitlik 12 ve 13'de yerine konduğunda H_n^{asym} Eşitlik 10 ile hesaplanabilir. Ancak hesaplanan sonucun tam doğru olabilmesi için simetrik fonksiyon olarak isimlendirilen H_n^{sym} fonksiyonunun Eşitlik 16 ile hesaplanması gerekmektedir. Bu eşitlik de ise tüm giriş harmoniklerinin tüm permütasyonları için hesaplama yapıldığından yine çok büyük bir işlem yükü ortaya çıkmaktadır. Bu probleme de yine İP-2'de çözüm önerilmiştir.

$$H_n^{sym}(j\omega_1, \dots, j\omega_n) = \frac{1}{n!} \sum_{\substack{\{\omega_1, \dots, \omega_n\} \text{ setinin} \\ \text{tüm permütasyonları}}} H_n^{asym}(j\omega_1, \dots, j\omega_n) \quad (16)$$

Her ne kadar işlem yüküne ait problemler çözülsede dahi frekans cevabı fonksiyonlarının çok boyutluluğu söz konusu olduğundan sonuçların yorumlanması ve görsel olarak sunulması en büyük problem olarak görülmektedir. Bu probleme ise çözüm olarak Genelleştirilmiş Tanımlama Fonksiyonları metodu ortaya konmuştur (Peyton Jones ve Billings 1991).

3.1.3 Genelleştirilmiş Tanımlama Fonksiyonlarının Elde Edilmesi

Volterra Serilerini temel alan Tanımlama Fonksiyonlarının elde edilmesi yöntemi Peyton Jones ve Billings tarafından yapılan çalışmada ayrıntılı olarak açıklanmış ve bu proje kapsamında referans kaynak olarak bu çalışma kullanılmıştır.

Volterra modelinin çok boyutluluğu, n sayıdaki herhangi genel ve bağımsız, frekans bileşenleri arasındaki etkiyi karakterize eden bir mekanizma olarak ortaya çıkar. Eğer girişin frekans bileşeni herhangi bir yolla tespit edilirse, bunların mümkün olan frekans bileşenleri arasındaki tesirlerinin tamamı önceden tanımlanır ve sadece giriş genliği geride kalır. Tespit edilmiş dalga formu için aynı frekanstaki giriş ve çıkış bileşenleri aşağıda verilen denklemlerle ifade edilebilir (Eşitlik 17),

$$Y(j\omega) = N(A, j\omega)AU(j\omega) \quad (17)$$

Burada bildiğimiz doğrusal transfer fonksiyonu $H(j\omega)$ 'nin yerine genlik bağımlı "Tanımlama Fonksiyonu" $N(A, j\omega)$ kullanılmıştır. Eşitlik 18'de tek sinüs girişi için n . derece TF hesaplanması görülmektedir.

$$N_n(A, j\omega) = \sum_{i=1}^n \frac{i(i-2)(i-4)\dots(3)}{(i+1)(i-1)(i-3)\dots(4)} A^{i-1} H_i^{sym}(j\omega_1, \dots, j\omega_n) \quad (18)$$

Eşitlik 18'de n hesaplanacak TF'nin derecesi olmak üzere, paydaki değer 3, paydadaki ise 4 olana kadar eksiltme işlemi yapılarak katsayı belirlenir. Burada A uygulanan sinüs girişinin genliğidir.

Örnek olarak $n=7$ için katsayı Eşitlik 19'daki gibi hesaplanır.

$$Katsayı = \frac{7 \times 5 \times 3}{8 \times 6 \times 4} A^6 = \frac{35}{64} A^6 \quad (19)$$

Sonuç olarak n .derece TF hesaplanması için kullanılabilcek formül açık şekilde Eşitlik 20'deki gibi verilebilir.

$$N(A, j\omega_1) = H_1(j\omega_1) + \frac{3}{4} A^2 H_3^{sym}(j\omega_1, j\omega_1, -j\omega_1) + \frac{5}{8} A^4 H_5^{sym}(j\omega_1, j\omega_1, j\omega_1, -j\omega_1, -j\omega_1) + \frac{35}{64} A^6 H_7^{sym}(j\omega_1, j\omega_1, j\omega_1, j\omega_1, -j\omega_1, -j\omega_1, -j\omega_1) + \dots \quad (20)$$

3.1.4 Örnek Uygulama

Bu başlıkta sistem modeli üzerinden istenilen derecedeki TF'nin elde edilmesini göstermek amacıyla Eşitlik 8'deki sistem modeli kullanılarak 3. derece Tanımlama Fonksiyonun hesaplanması anlatılmıştır. İlk olarak Eşitlik 18'e göre $H_1^{sym}(\cdot)$ ve $H_3^{sym}(\cdot)$ hesaplanması gerekmektedir.

Hesaplanacak her FCF için Eşitlik 8'deki model parametreleri ile Eşitlik 11,12 ve 13 kullanılarak $H_{n_u}(\cdot)$, $H_{n_y}(\cdot)$ ve $H_{n_{dy}}(\cdot)$ ile ifade edilen fonksiyonların FCF'ye yaptıkları katkılar hesaplanmalıdır. Buna göre $H_1^{sym}(\cdot)$ fonksiyonuna katkı yapan sadece giriş bileşeni olabileceğinden Eşitlik 11'in kullanılması sonucu Eşitlik 21'deki ifade elde edilmiştir. Eşitlik 12 ve 13 çıkış bileşeni içerdiğinden $H_1^{sym}(\cdot)$ fonksiyonuna katkı yapamaz ve sonuçları sıfırdır. Sonuç olarak $H_1^{sym}(\cdot)$ için elde edilen FCF Eşitlik 22'da görülmektedir.

$$H_{1_u}(j\omega_1) = \sum_{l_1, l_n=0}^L c_{0,n}(l_1, \dots, l_n) \prod_{i=1}^n (j\omega_1)^{l_i} = -1(j\omega_1)^0 = -1 \quad (21)$$

$$H_1^{sym}(j\omega_1) = -\frac{1}{(j\omega_1)^2 + 0.18j\omega_1 + 27.8562} \quad (22)$$

$H_3^{sym}(\cdot)$ 'nin bulunması için yine Eşitlik 11, 12, 13 uygulanarak $\dot{y}(t)^3$ ve $y(t)^3$ terimlerinin 3. derece FCF etkilerinin hesaplanması gerekmektedir.

$\dot{y}(t)^3$ teriminin 3. derece FCF'ye katkısı Eşitlik 14 ve 15 kullanılarak Eşitlik 23'deki gibi elde edilmiştir. Eşitlik 23'de ortaya çıkan $H_{2,2}(\cdot)$ ve $H_{1,1}(\cdot)$ fonksiyonlarının hesaplanması ise

yine Eşitlik 14 ve 15 kullanılarak Eşitlik 24 ve 25'de verilmiştir. Eşitlik 24 ve 25, Eşitlik 23'de yerine konduğunda Eşitlik 26'da verilen $H_{3,3}(\cdot)$ sonucu elde edilmektedir.

$$H_{3,3}(j\omega_1, j\omega_2, j\omega_3) = H_1(j\omega_1).H_{2,2}(j\omega_2, j\omega_3).(j\omega_1) \quad (23)$$

$$H_{2,2}(j\omega_2, j\omega_3) = H_1(j\omega_2).H_{1,1}(j\omega_3).(j\omega_2 + j\omega_3) \quad (24)$$

$$H_{1,1}(j\omega_3) = H_1(j\omega_3).(j\omega_3) \quad (25)$$

$$H_{3,3}(j\omega_1, j\omega_2, j\omega_3) = H_1(j\omega_1).H_1(j\omega_2).H_1(j\omega_3).(j\omega_1).(j\omega_2 + j\omega_3).(j\omega_3) \quad (26)$$

Aynı adımlar kullanılarak $y(t)^3$ terimi için hesaplanan fonksiyonlar sırasıyla Eşitlik 27, 28, 29 ve 30'da verilmiştir.

$$H_{3,3}(j\omega_1, j\omega_2, j\omega_3) = H_1(j\omega_1).H_{2,2}(j\omega_2, j\omega_3).(j\omega_1)^0 \quad (27)$$

$$H_{2,2}(j\omega_2, j\omega_3) = H_1(j\omega_2).H_{1,1}(j\omega_3).(j\omega_2 + j\omega_3)^0 \quad (28)$$

$$H_{1,1}(j\omega_3) = H_1(j\omega_3).(j\omega_3)^0 \quad (29)$$

$$H_{3,3}(j\omega_1, j\omega_2, j\omega_3) = H_1(j\omega_1).H_1(j\omega_2).H_1(j\omega_3) \quad (30)$$

Eşitlik 26 ve 30'da elde edilen sonuçlar Eşitlik 12'de yerine konduğunda Eşitlik 31'deki fonksiyon elde edilir.

$$H_{3,y} = 0.096.H_1(j\omega_1).H_1(j\omega_2).H_1(j\omega_3).(j\omega_1).(j\omega_2 + j\omega_3).(j\omega_3) \\ + 19.9047.H_1(j\omega_1).H_1(j\omega_2).H_1(j\omega_3) \quad (31)$$

Eşitlik 31, Eşitlik 10'da yerine konduğunda $H_3^{asym}(\cdot)$ Eşitlik 32'deki gibi elde edilir.

$$H_3^{asym}(j\omega_1, j\omega_2, j\omega_3) = \\ \frac{[0.096.H_1(j\omega_1).H_1(j\omega_2).H_1(j\omega_3).(j\omega_1).(j\omega_2 + j\omega_3).(j\omega_3) + 19.9047.H_1(j\omega_1).H_1(j\omega_2).H_1(j\omega_3)]}{(j\omega_1 + j\omega_2 + j\omega_3)^2 + 0.18(j\omega_1 + j\omega_2 + j\omega_3) + 27.8562} \quad (32)$$

Elde edilen $H_3^{asym}(\cdot)$ fonksiyonu 3 farklı giriş harmoniği için elde edilmiştir. Bununla birlikte Tanımlama Fonksiyonlarında tek sinüs girişi uygulandığından Eşitlik 32, Eşitlik 33'deki gibi düzenlenebilir.

$$H_3^{sym}(j\omega_1, j\omega_1, -j\omega_1) = \frac{[0.096.H_1(j\omega_1).H_1(j\omega_1).H_1(-j\omega_1).(j\omega_1).(j\omega_1 - j\omega_1).(-j\omega_1) + 19.9047.H_1(j\omega_1).H_1(j\omega_1).H_1(-j\omega_1)]}{(j\omega_1 + j\omega_1 - j\omega_1)^2 + 0.18(j\omega_1 + j\omega_1 - j\omega_1) + 27.8562} \quad (33)$$

Tanımlama Fonksiyonların hesaplanmasında simetrik FCF'ler kullanıldığından Eşitlik 32'ye, Eşitlik 16'daki algoritma uygulandığında $H_3^{sym}(\cdot)$ hesaplanmış olur. Yukarıda elde edilen $H_1^{sym}(\cdot)$ ve $H_3^{sym}(\cdot)$ kullanılarak 3.derece Tanımlama Fonksiyonu Eşitlik 34'deki gibi hesaplanabilir.

$$N_3(A, j\omega_1) = H_1^{sym}(j\omega_1) - \frac{3}{4}A^2H_3^{sym}(j\omega_1, j\omega_1, -j\omega_1) \quad (34)$$

3.2 Tanımlama Fonksiyonu Metodunun MATLAB Ortamında Kodlanması ve MATLAB GUI ile Arayüz Tasarımı

Proje kapsamında İP-1 olarak TF metodunun kodlanması, kodlanan metodun kolay uygulanabilmesi ve yaygınlaştırılması amacıyla arayüz tasarımının gerçekleştirilmesi planlanmıştır. Bu kapsamda, raporun "Yöntemler" başlığı altında açıklanan FCF ve TF metodlarının uygulanması için kullanılan algoritmalar 6 farklı MATLAB dosyasında kodlanmıştır. Şekil 1'de bu dosyaların bir kısmı tek bir editör penceresinde sunulmuştur.

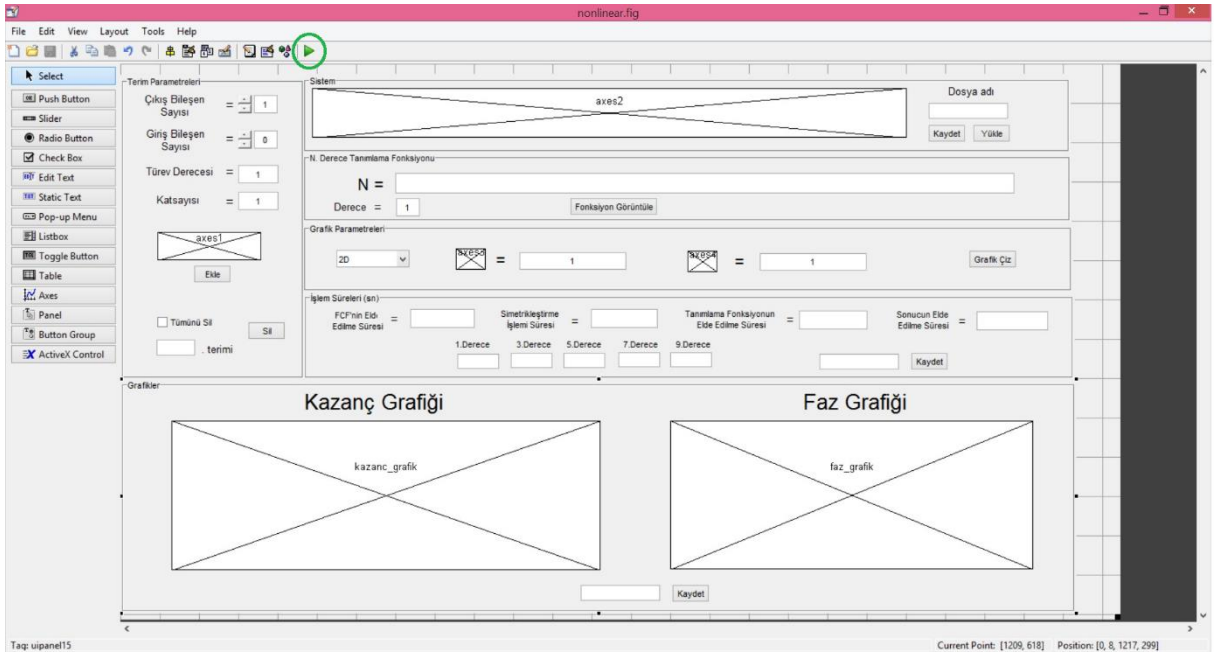
```

1 function varargout = nonlinear(varargin)
2 % NONLINEAR MATLAB code for nonlinear.fig
3 % NONLINEAR, by itself, creates a new NONLINEAR or raises
4 % singleton*.
5 %
6 % H = NONLINEAR returns the handle to a new NONLINEAR or t
7 % the existing singleton*.
8
1 function tr_fonk = terim_tr_fonk(w,n,p,li)
2 tr_fonk = [];
3 komb = kombinasyon(1:n,p);
4 [kombsat kombsut] = size(komb);
5 for ksat=1:kombsat
6 W = []; % Üretilen her kombinasyon için harmoniklerin gruplandı
7 w_ = w; % harmoniklerin belirlendiği w dizinin üzerinde işlem
8
1 function C = kombinasyon(n,p)
2 if p==1
3 C = n(end);
4 else
5 C = [];
6 ymax = floor(n(end)/p);
7 for i=n(1):ymax,
8 Q = kombinasyon([i:n(end)-i,p-1]);
9
1 function [ output_args ] = dosya_ac(sys,w,n)
2 for drc=1:n
3 degisken = []; degisken2 = []; degisken3 = [];
4 [fid, msg] = fopen(['H' num2str(drc) '_asym.m'], 'w');
5 if fid == -1, error(msg); end;
6 for deg=1:drc
7 degisken = [degisken 'jw' num2str(deg)];
8 degisken2 = [degisken2 'perm(i,' num2str(deg) ')'];
9

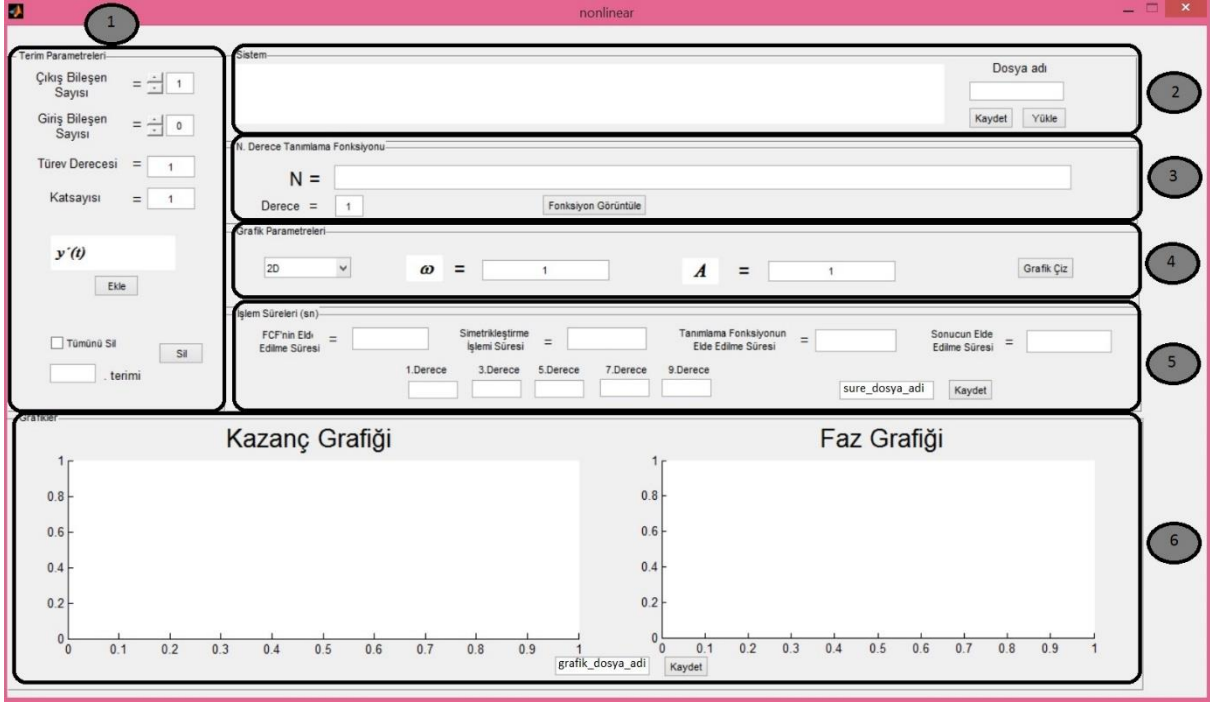
```

Şekil 1. Metodların kullanımı için oluşturulan .m dosyaları ve fonksiyonlar

Şekil 1’de görülen dosyalardan “**nonlinear.m**” dosyası tasarlanan arayüzde yapılan işlemlerde fonksiyonların çağrıldığı ve arka planda çalışan Kullanıcı Arayüzü (Graphical User Interface – GUI) programıdır. Bu programda hem arayüzün çalışması sağlanmakta hem de diğer fonksiyonlardan elde edilen sonuçlar anlamlı biçimde bir araya getirilerek istenen derecedeki sembolik TF’ları ve grafiksel sonuçlar sunulmaktadır. “**sys_tr_fonk.m**” dosyası ise terim_tr_fonk isimli fonksiyondan gelen sonuçları kullanarak tüm sistemin istenen derecedeki TF’si için gerekli FCF’lerini üretir. “**terim_tr_fonk.m**” dosyasındaki, dosyayla aynı isimli fonksiyon sistemdeki her bir terimin FCF’lere katkısını hesaplar. “**kombinasyon.m**” ve “**permutasyon.m**” dosyalarındaki fonksiyonlar ise gerekli FCF algoritması işlenirken yapılması gereken kombinasyon ve permütasyon işlemlerini gerçekleştirir. “**dosya_ac.m**” dosyası oluşan FCF’lerin istenilen dereceye kadar ayrı ayrı dosyalarda fonksiyonlar halinde kaydedilmesini sağlar. Daha sonra kaydedilen bu FCF’ler gerekli yerlerde çağırılarak istenen sonuçlar elde edilmektedir. Açıklanan tüm bu dosya ve fonksiyonların doğru ve organize bir şekilde kullanılmasını sağlayan “**nonlinear.m**” dosyasına bağlı olarak çalışan GUI’nin tasarım ekranı Şekil 2’de görülmektedir. Bu arayüz çalıştırıldığında ise kullanıcılar Şekil 3’deki gibi bir görüntü ile karşılaşmaktadır.



Şekil 2. MATLAB GUI ile tasarlanan arayüz



Şekil 3. Çalıştırılan arayüz ekranı

Şekil 3'deki arayüz altı farklı kısımdan oluşmaktadır. 1 ile gösterilen "Terim Parametreleri" kısmında sistem modelini oluşturan terimler "çıkış bileşen sayısı", "giriş bileşen sayısı", "türev derecesi" ve "katsayısı" girilerek terim tanımlanmış olur. Sonrasında "Ekle" butonuna basılarak terim "Sistem Modeli" kısmına eklenir. Silinmek istenen terimin sistem modelindeki sırası "Sil" butonunun yanındaki metin kutusuna yazılıp butona basılırsa istenen terim silinir. Tüm modeli silmek için "Tümünü Sil" seçeneği işaretlenmelidir.

2 ile gösterilen "Sistem" kısmında, tanımlanan model görüntülenir. "Dosya adı" kutusuna bir isim yazılıp "Kaydet" butonuna basılırsa tanımlanan model, .m uzantılı bir dosyada saklanabilir. Yine bu kutuya, kaydedilmiş bir modelin ismi yazılıp "Yükle" butonuna basılırsa önceden kaydedilmiş model programa yüklenir.

3 ile gösterilen "N. Derece Tanımlama Fonksiyonu" kısmında hesaplanması istenen Volterra serileri temelli Tanımlama Fonksiyonunun derecesi "Derece" yazısının eşitliğindeki metin kutusuna girilir ve "Fonksiyon Görüntüle" butonuna basıldığında, programda tanımlanmış olan sistem modeline ait n . Dereceye kadar hesaplanan Tanımlama Fonksiyonu üretilerek uzun metin kutusunda görüntülenir.

4 ile gösterilen "Grafik Parametreleri" kısmında "2D" ve "3D" seçenekleri bulunmaktadır. "2D" seçiminde w "radyan/sn" cinsinden bir aralık girilerek ve A değeri de eşitliğindeki metin

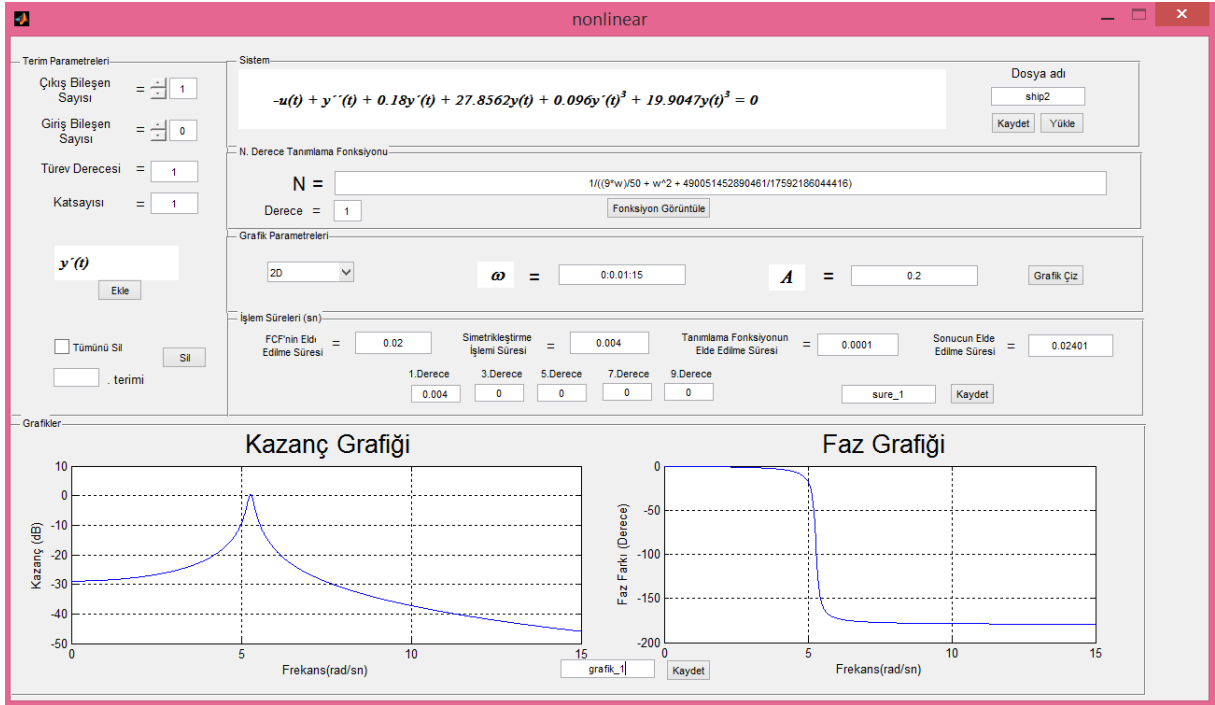
kutusuna yazılarak x-ekseni “w” y-ekseni kazanç ya da faz açısı olacak şekilde grafikler üretilir. “3D” seçiminde ise hem w değeri için bir aralık hem de A değeri için bir aralık girilerek bir boyutu “w”, ikinci boyutu “A”, üçüncü boyutu kazanç veya faz açısı olacak şekilde grafikler üretilir.

5 ile gösterilen “İşlem süreleri” kısmında İP-1 kapsamında gerçekleştirilmesi planlanan TF’lerin elde edilmesi için yapılan işlemlere ait sürelerin belirlenmesi sağlanmaktadır. Bu kısımda, gerekli FCF’lerin elde edilme süreleri, elde edilen Asimetrik FCF’lerin simetrikleştirme süreleri, simetrikleştirme sona erdikten sonra Tanımlama Fonksiyonun hesaplanma süresi ve sonucun elde edilme süresi olmak üzere işlemler sırasında harcanan süreler verilmektedir. Aynı zamanda simetrikleştirme bittikten sonra girilen dereceye kadar olan asimetrik FCF’lerin simetrikleştirilmesinin her dereceye ait süreleri de verilmektedir. Bu süreleri kaydedebilecek şekilde “sure_dosya_adi” yazan metin kutusuna bir metin girip “kaydet” butonuna basıldığında “Current Folder”da süreleri veren bir “.m” uzantılı dosya oluşmaktadır.

6 ile gösterilen “Grafikler” kısmında Kazanç ve Faz açıları grafikleri bulunmaktadır. “Grafik parametreleri” kısmında seçilen boyuta ve girilen “w” ile “A” değerlerine göre “grafik çiz” butonuna basıldığında üretilen grafikler burada gösterilir. Aynı zamanda “grafik_dosya_adi” yazan metin kutusuna bir metin girilip “kaydet” butonuna basıldığında grafikleri çizilen TF, parametre değerleri ve grafikler “.m” uzantılı bir dosyaya kaydedilir.

Şekil 4’de görülen örnek uygulamada Eşitlik 8’de verilen örnek doğrusal olmayan sistem modeli için 1. derece TF’nin, hesaplama sürelerinin ve grafiksel sonuçların elde edilmesi gerçekleştirilmiştir. Bu uygulama ayrıca Şekil 5’de görülen birinci derece FCF’ye ait simetrik “H1.m” ve asimetrik “H1_asym.m” fonksiyon dosyaları, analizi gerçekleştirilen sistem modelinin parametrelerini içeren “ship2.m” dosyası, elde edilen TF ile frekans cevabını hesaplayıp grafikleri çizdiren “grafik_1.m” dosyası ve süreleri kaydeden “sure_1.m” dosyası üretilir.

Arayüz ile istenen TF elde edildikten ve grafik parametrelerini kaydeden dosya üretildikten sonra grafikler çizdirilir. Şekil 6’da elde edilen kazanç grafiği görülmektedir. Grafiğin x-ekseni “radyan/sn” cinsinden açısal frekans, y-ekseni ise dB cinsinden kazançtır. Kazanç grafiği incelendiğinde rezonans frekansının sistem parametreleri ile uyumlu olarak yaklaşık 5.3 rad/sn civarında olduğu ve farklı frekanslarda uygulanan giriş sinyalini oldukça fazla zayıflattığı görülmektedir.



Şekil 4. Örnek sisteme ait birinci derece TF için arayüz ile sonuçların elde edilmesi

```

EDITOR
H1.m H1_asym.m shp2.m sure_1.m grafik_1.m
C:\Users\Emre Güler\u00fcd\u00fcs\Desktop\Non-Linear Tez\Aray\u00fcd\u00fcs_son\1\sure_1.m
1 fcf_sure=0.17209;
2 s1_sure=0.0092044;
3 s3_sure=0;
4 s5_sure=0;
5 s7_sure=0;
6 s9_sure=0;
7 simetrik_sure=0.0092044;
8 Tanimlama_sure=2.4376e-05;
9 sonuc_sure=0.18132;
10 save sure_1

C:\Users\Emre Güler\u00fcd\u00fcs\Desktop\Non-Linear Tez\Aray\u00fcd\u00fcs_son\1\H1.m
1 function [sonuc]= H1(jw1)
2 sonuc=0;perm=perms([jw1]);
3 for i=1:size(perm,1)
4 sonuc=sonuc+H1_asym(perm(i,1));
5 end
6 sonuc=sonuc/size(perm,1);
7 end

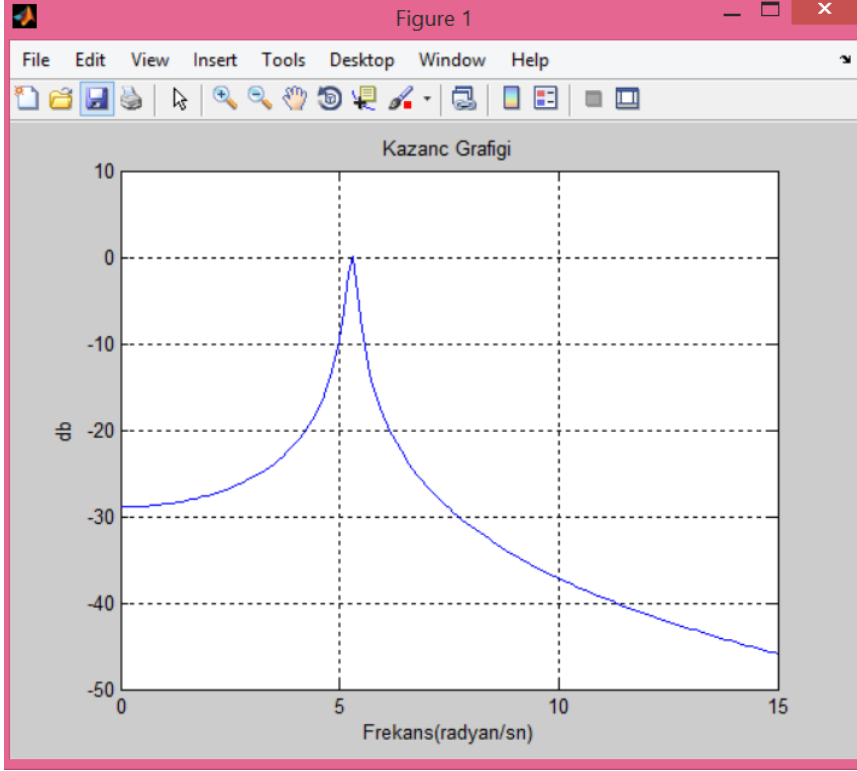
C:\Users\Emre Güler\u00fcd\u00fcs\Desktop\Non-Linear Tez\Aray\u00fcd\u00fcs_son\1\H1_asym.m
1 function [fonk]= H1_asym(jw1)
2 fonk=-1*((-1*(jw1)^0)+(0.096*(0)))+(19.9047*(0))/((1*(jw1)^2)+(0.18*
3 end

C:\Users\Emre Güler\u00fcd\u00fcs\Desktop\Non-Linear Tez\Aray\u00fcd\u00fcs_son\1\grafik_1.m
1 syms w
2 N=1/((9*w)/50 + w^2 + 490051452890461/17592186044416);
3 w=0:1:15;
4 A=1;
5 N1=strrep(char(N),'A',num2str(A));
6 N2=inline(sym(N1));
7 N3=N2(i*w);
8 figure(1)
9 plot(w,log10(abs(N3))*20)
10 title('Kazanç Grafiği');

C:\Users\Emre Güler\u00fcd\u00fcs\Desktop\Non-Linear Tez\Aray\u00fcd\u00fcs_son\1\shp2.m
1 function terimler=shp2()
2 terimler(1).coeff=-1;
3 terimler(1).p=0;
4 terimler(1).q=1;
5 terimler(1).li=[0];
6 terimler(1).str='-u(t)';
7 terimler(2).coeff=1;
8 terimler(2).p=1;
9 terimler(2).q=0;
10 terimler(2).li=[2];
11 terimler(2).str='y''(t)';
12 terimler(3).coeff=0.18;
13 terimler(3).p=1;
14 terimler(3).q=0;
15 terimler(3).li=[1];
16 terimler(3).str='0.18y'(t)';
17 terimler(4).coeff=27.8562;
18 terimler(4).p=1;

```

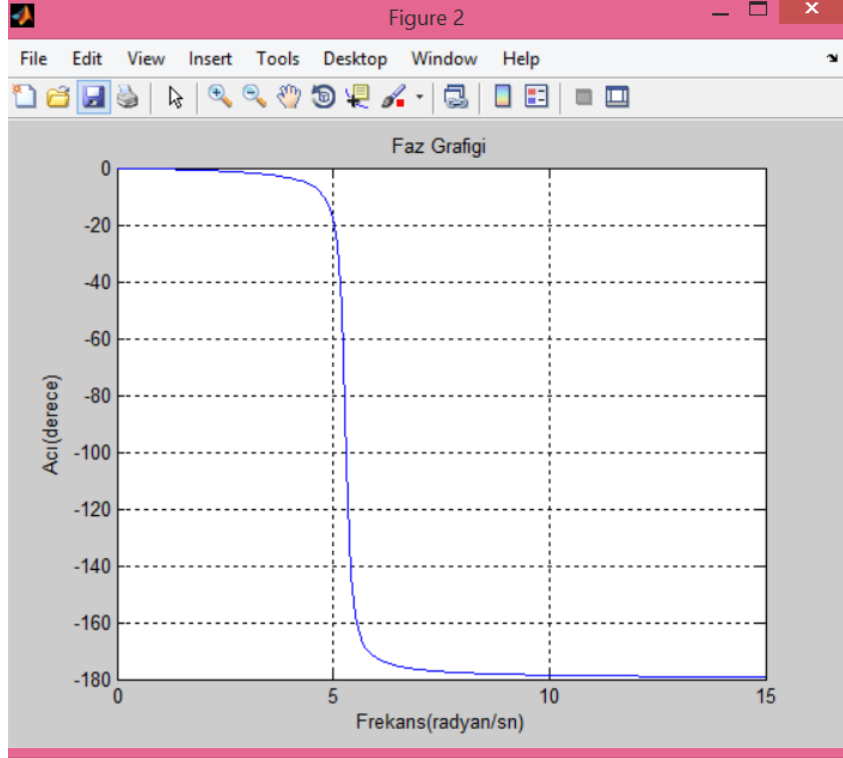
Şekil 5. Üretilen fonksiyon dosyaları



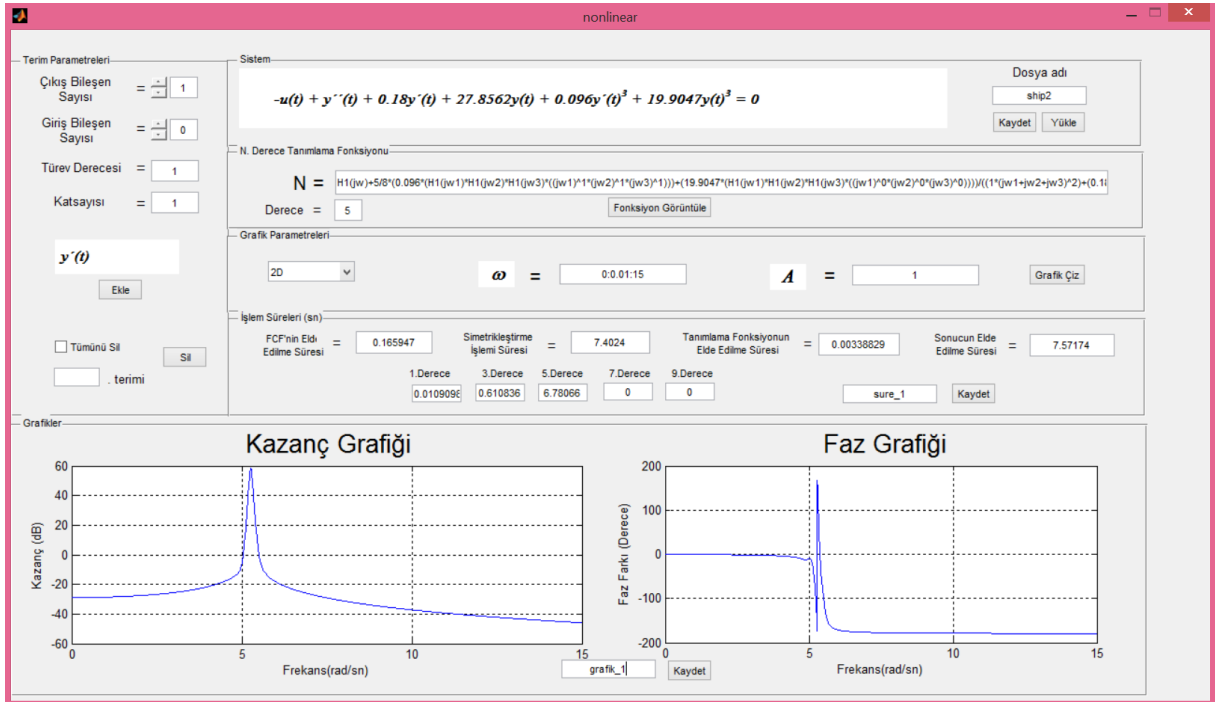
Şekil 6. Kazanç-Frekans grafiği

Şekil 7'de elde edilen faz grafiği görülmektedir. Bu grafiğin x-ekseni "radyan/sn" cinsinde açısal frekans, y-ekseni ise derece cinsinden faz açılarıdır. Bu uygulamada faz farkının 0° ile -180° arasında değiştiği görülmektedir.

Şekil 8'de örnek sisteme ait beşinci derece TF için elde edilen sonuçlar görülmektedir. Hesaplanan TF'nin oldukça uzun bir fonksiyon olmasına karşın, sembolik olarak elde edilme süresi yaklaşık olarak 0.002 saniye olarak belirlenmiştir. Buna karşın sayısal sonuçların hesaplanması için gerekli simetrikleştirme işlemi verilen frekans aralığı için yaklaşık 110 saniye sürmektedir. Bu durumda metodun uygulanması ve sonuçların elde edilmesi için geçen sürenin tamamına yakın bir bölümü simetrikleştirme işleminde harcanmaktadır. Bu nedenle metodun hızlandırılması için simetrikleştirme işlemi üzerinde durulması gerekmektedir.



Şekil 7. Faz açısı-Frekans grafiği



Şekil 8. Beşinci derece TF elde edilmesi

3.3 Sürelerin Tespiti ve Sürelerin Kısaltılması İçin Yeni Algoritmalar

3.3.1 TF Metodunda Harcanan Sürelerin Tespiti

İP-1 kapsamında proje takvimine uygun olarak TF metodunun kodlanması, arayüz tasarımı ve sonuçların doğrulanması aşamalarının ardından TF'lerin hesaplanması, sayısal ve grafiksel sonuçların elde edilmesi için harcanan zamanlar tespit edilmiştir. Bu aşamada, TF metodu ile sonuçlar elde edilirken en fazla zaman harcayan işlemlerin tespit edilmesi ve böylece bir sonraki aşamada (İP-2'de) bu işlemlerin daha hızlı gerçekleştirilmesi için gerekli iyileştirmelerin yapılabilmesine olanak sağlanması amaçlanmıştır.

Tasarlanan arayüzde TF metodunun uygulanması sırasında gerçekleştirilen işlemlere ait harcanan süreleri gösteren bölüm kullanılarak, TF metodundaki işlem basamaklarında harcanan süreler örnek sistem modeli üzerinden Tablo 1'deki gibi elde edilmiştir. Bu tabloda elde edilen süreler $\omega = 1$ rad/sn olmak üzere tek bir frekans değeri için tespit edilen sürelerdir. Tablo 1 incelendiğinde en çok sürenin TF'yi oluşturan FCF'lerin simetrikleştirilmesi sırasında harcadığı görülmektedir. Bunun nedeni simetrikleştirme işleminde giriş harmoniklerinin tüm permütasyonları için sonuçlar elde edilerek ortalaması hesaplanmaktadır. Tüm permütasyonlar için gerekli FCF'lerin tekrar tekrar hesaplanması işlem yükünü ve harcanan zamanı oldukça artırmaktadır. FCF derecelerine göre hesaplanması gereken permütasyon sayıları Tablo 2'de verilmiştir. Tablo 2 incelendiğinde yüksek dereceli FCF'ler elde edilirken yapılması gereken hesaplama sayısının logaritmik olarak arttığı görülmektedir. Bunun yanında her bir FCF içerisinde daha düşük dereceli FCF'lerin de hesaplandığı göz önüne alındığında (Şekil 9) oluşan işlem yükünün ve harcanan zamanın artış nedeni ortaya çıkmaktadır. Şekil 9'da görüldüğü üzere n. derece FCF'ye ait sonucun bulunabilmesi için ona katkı sağlayan daha düşük dereceli FCF'lere ait sonuçların da hesaplanması gerekmektedir. Bununla birlikte n. dereceden daha düşük dereceli FCF'ler için de aynı durum geçerlidir. Farklı bir ifade ile 1. derece FCF'ye dışında tüm derecelerdeki FCF'ler içerisinde kendinden düşük dereceli FCF'lerin tekrar tekrar hesaplanması gerekmektedir. Sonuçta çok sayıda permütasyonun oluşması ve her permütasyonda daha küçük dereceli FCF'lerin tekrar tekrar hesaplanması yüksek dereceli TF'lerin hesaplanma sürelerini logaritmik olarak artırmaktadır. Şekil 10'da bu artış net olarak görülmektedir. Şekil 10'da tek bir frekans değeri ($\omega=1$ rad/sn) için sonuçların elde edilirken harcanan süreler grafiksel olarak sunulmuştur. Buna göre 1. ve 3. derece gibi düşük dereceli TF'lerde sonucun elde edilmesi daha yüksek dereceli TF'lara karşı oldukça kısa sürmektedir. Buna karşın yüksek dereceli TF'lerde harcanan süreler ise çok büyük olarak görülmektedir.

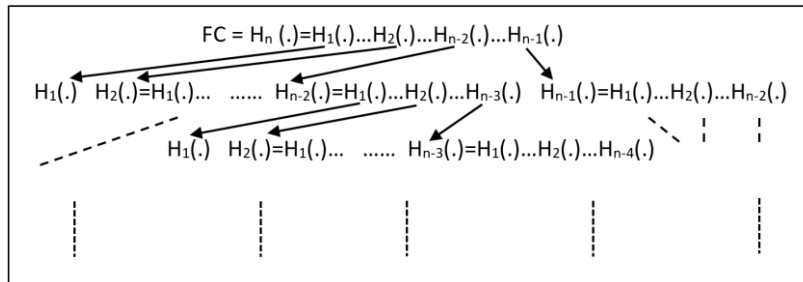
Çok fazla işlem yükü nedeniyle bilgisayarların kapasiteleri de zorlandığından yüksek dereceli TF'lerin hesaplanması çok büyük zamana ihtiyaç duymaktadır.

Tablo 1. TF metodu ile sonuçların elde edilmesi sırasında işlem basamakları için harcanan süreler

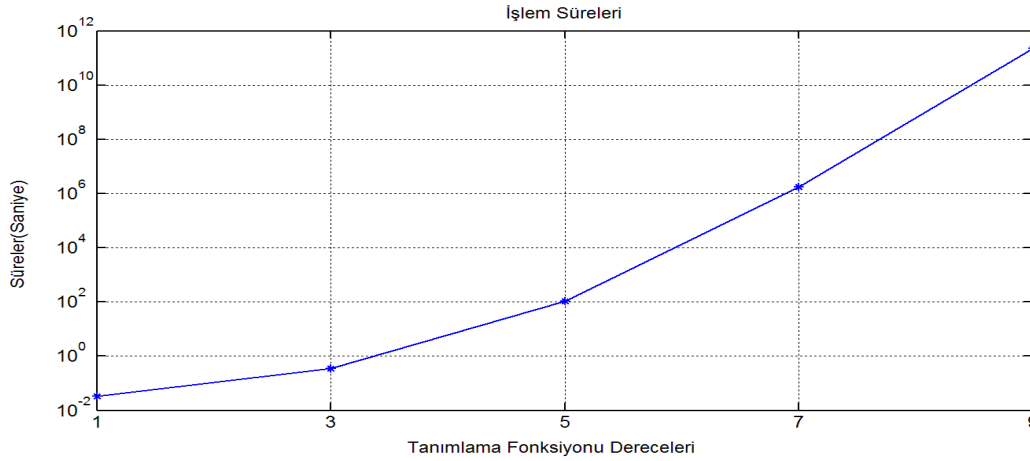
TF Dereceleri	İşlem basamağı	İşlem süresi (sn)
1	FCF'nin Elde Edilme Süresi	0.02
	Simetrikleştirme Süresi	0.004
	Tanımlama Fonksiyonunun Elde Edilme Süresi	0.0001
	Harcanan Toplam Süre	0.02401
3	FCF'nin Elde Edilme Süresi	0.05
	Simetrikleştirme Süresi	0.3540
	Tanımlama Fonksiyonunun Elde Edilme Süresi	0.0006
	Harcanan Toplam Süre	0.4046
5	FCF'nin Elde Edilme Süresi	0.09
	Simetrikleştirme Süresi	109.65
	Tanımlama Fonksiyonunun Elde Edilme Süresi	0.0011
	Harcanan Toplam Süre	109.7411
7	FCF'nin Elde Edilme Süresi	0.2
	Simetrikleştirme Süresi	1715394.24
	Tanımlama Fonksiyonunun Elde Edilme Süresi	0.005
	Harcanan Toplam Süre	1715394.445
9	FCF'nin Elde Edilme Süresi	0.33
	Simetrikleştirme Süresi	$2.23 \cdot 10^{13}$
	Tanımlama Fonksiyonunun Elde Edilme Süresi	0.012
	Harcanan Toplam Süre	$2.23 \cdot 10^{13}$

Tablo 2. TF metodu için FCF'ler hesaplanırken oluşabilecek permütasyon sayıları

Dereceler	Permütasyon Sayıları
1	2
3	6
5	120
7	5040
9	362880



Şekil 9. n. Derece FCF'ye ait sonuç için daha düşük dereceli FCF'lerin hesaplanması



Şekil 10.Örnek sisteme ait farklı derecelerdeki TF'ler için sonuçların elde edilmiş süreleri

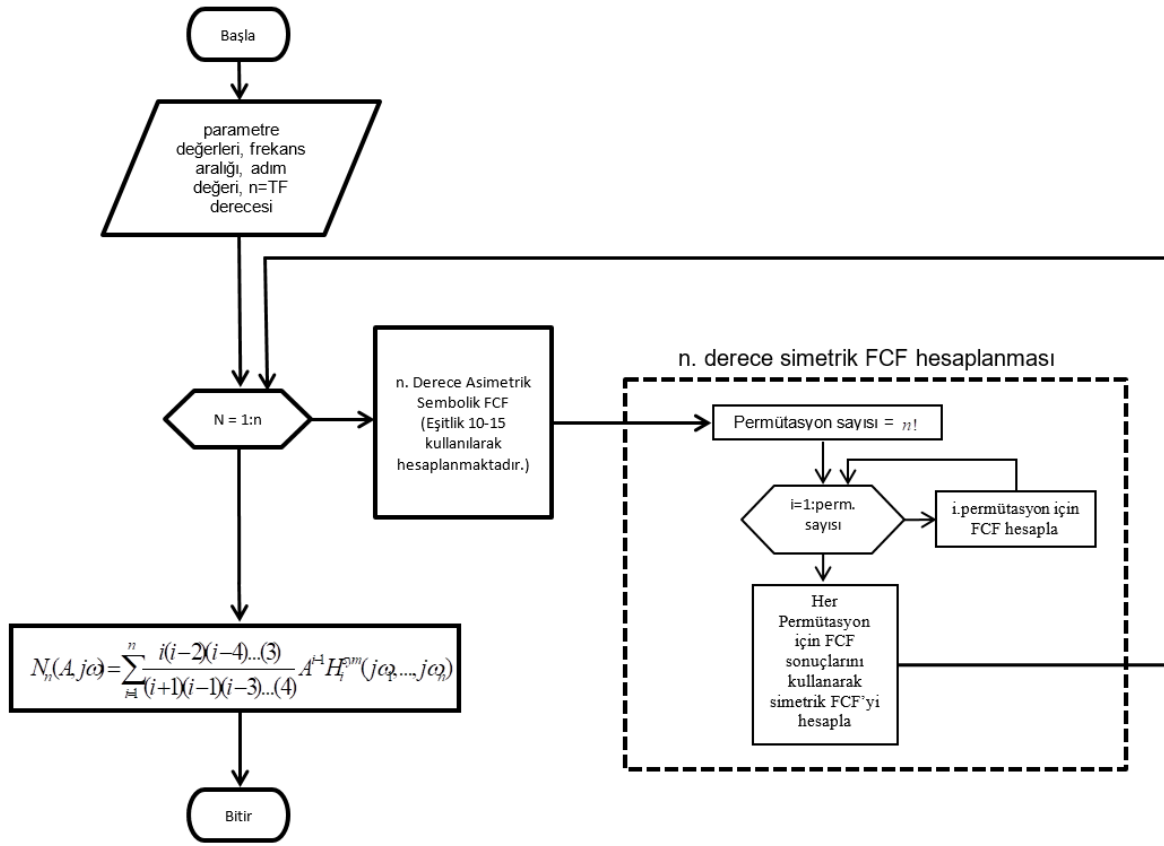
3.3.2 TF Yönteminde İşlem Yükü Fazla Olan İşlemlerin Daha Az İşlem Yükü Oluşturacak Şekilde Revize Edilerek Yeni Algoritmanın Tasarımı

Bir önceki bölümde TF yönteminde yüksek dereceli fonksiyonlara ait sonuçların elde edilmesinde işlem sürelerini arttıran problem ortaya konmuştur. Ortaya çıkan yüksek sürelerin sayısal sonuçlar elde edilirken simetrikleştirme işlemi sırasında hesaplanması gereken çok sayıda giriş permütasyonu ile yüksek dereceli FCF'ler için daha düşük dereceli FCF'lerin tekrar tekrar hesaplanmasından dolayı oluştuğu belirtilmişti. Bu bölümde İP-2 kapsamında TF metodunun hızlandırılması için önerilecek yeni algorithmada bu iki probleme çözüm önerilmiştir.

Yeni algoritma önerilmeden önce normalde kullanılan iyileştirme yapılmamış TF akış diyagramı Şekil 11'deki gibi verilmiştir. Şekil 11'de görüldüğü üzere TF metodunun anlatıldığı bölümde verilen eşitliklerdeki hesaplama algoritmaları kullanılarak sonuçların elde edildiği görülmektedir.

Şekil 11'den görüldüğü üzere öncelikle analizi gerçekleştirilecek sistemin parametre değerleri, hesaplanacak giriş frekans aralığı, adım değeri ve istenen Tanımlama Fonksiyonu derecesi değeri girilmektedir. Sonrasında istenen Tanımlama Fonksiyonu derecesine kadar gerekli tüm FCF'ler sembolik olarak hesaplanmaktadır. FCF'ler hesaplandıktan sonra istenen derecedeki TF sonuçları hesaplanır. Bu program akışı basit olmasına karşın daha önce açıklanan nedenlerden dolayı simetrikleştirme işlemi oldukça vakit alıcı bir işlemdir. n. derece bir FCF, içerisinde n-1. dereceye kadar farklı derecelerde FCF'ler içermektedir. Örneğin 5. derece bir FCF içerisinde 3 adet 1.derece, 2 adet 2.derece, 4 adet de 3. derece FCF olduğu

varsayalım. Bunu yanında 3. derece FCF’de 2 adet 1. derece ve 1 adet 2. derece FCF olduğunu kabul edilsin. Ayrıca 2. derece FCF’de de 2 adet 1. derece FCF olduğu düşünölsün. Bu durumda 5. derece FCF’nin tek bir giriş frekans permütasyonu için sayısal sonuç elde edilmek istendiğinde 3. Derece FCF’yi 4 defa, 2. derece FCF’yi 6 defa ve 1. derece FCF’yi 23 defa çağırarak çalıştırmak zorunda kalınır. Karmaşık sistemler, daha yüksek dereceli FCF’ler ve daha fazla sayıda frekans değeri düşünöldüğünde bu işlemin çok büyük bir işlem yükü oluşturacağı açıktır. Bu durumda yukarıda sözü edilen çözüm yolları ile iyileştirilecek algoritma için Şekil 11’deki “n. Derece Simetrik FCF” işlem bloğu üzerine yoğunlaşılacaktır.



Şekil 11. Klasik yöntemin akış diyagramı

3.3.2.1 Sayısal Sonuçların Daha Hızlı Elde Edilmesi İçin Permütasyon Sayısının Düşürülmesi

Proje kapsamında TF’ler tek sinüs girişi için hesaplandığından Volterra Serileri temelli FCF’lerin tek bir giriş frekansı ve negatif simetriği ile hesaplanması yeterlidir (Eşitlik 22). Ancak Eşitlik 10 ve 16 incelendiğinde n. derece FCF hesaplamalarında n farklı giriş frekansı için tanımlandıkları görölmektedir. Buna karşın TF hesaplanmasında tek bir giriş frekansının pozitif ve negatif işaretlisi olmak üzere iki farklı frekans kullanılmaktadır. Buna göre n. derece

TF için kullanılacak tek girişe ait pozitif ve negatif frekans sayısı Eşitlik 35 ve 36'deki gibi bulunabilir.

$$m = \frac{(n+1)}{2} \quad (35)$$

$$e = n - m \quad (36)$$

Burada n hesaplanacak TF'nin derecesi, m kullanılacak pozitif frekans sayısı, e kullanılacak negatif frekans sayısıdır. Örnek olarak 3.derece TF için $n=3$, $m=2$, $e=1$ olmaktadır. 5. derece TF için ise $n=5$, $m=3$, $e=2$ olur. Simetrikleştirme işleminde amaç oluşabilecek tüm farklı permütasyonlar için hesaplama yapmaktır. Ancak n elemanlı bir dizinin permütasyonu $n!$ ile hesaplandığından yüksek dereceli FCF'lerde permütasyon sayısı çok fazla olmaktadır. Yukarıda yapılan açıklama dikkate alınır TF hesaplamasında aynı giriş frekansının pozitif ve negatif değerlisi kullanıldığı için oluşabilecek permütasyon sayısı Eşitlik 37'deki gibi hesaplanabilir.

$$\text{Permütasyon sayısı} = \frac{n!}{e!.m!} \quad (37)$$

Bu sayede 3. derece TF için hesaplanacak permütasyon sayısı 6'dan 3'e düşerken, 5. derece TF için 120'den 10'a düşmektedir. Daha yüksek derecelerde permütasyon sayısındaki azalma oranı daha fazla olacaktır. Bu durum hesaplanan TF derecesi yükselirken harcanan süredeki artışın makul oranlarda kalmasına olanak sağlamaktadır.

3.3.2.2 Sayısal Sonuçların Daha Hızlı Elde Edilmesi İçin Düşük Dereceli Tanımlama Fonksiyonlarının Kaydedilerek Kullanılması

Klasik TF hesaplanmasında ihtiyaç duyulan FCF'lerin içerisinde kendinden küçük derecelerdeki FCF'lerin de bulunduğu ve her defasında tekrar tekrar çağırılarak hesaplandığı Şekil 9'da ayrıntılı olarak gösterilmiş ve bunun işlem yükü açısından oldukça külfetli olduğu görülmüştü. Bir önceki başlıkta permütasyon sayılarının azaltılmasının da etkisiyle hesaplanacak her FCF için gerekli tüm permütasyon sonuçları bir defada hesaplanıp sonuçları kaydedildiği ve sonrasında ihtiyaç duyulduğu her anda bu kaydedilen sonuçların kullanıldığı bir yöntem çok daha düşük bir işlem yükü oluşturacaktır. Örneğin her bir giriş frekans permütasyonu için 1., 2., ve 3. derece FCF'lere ait sayısal sonuçlar hesaplanıp kaydedilse ve 5.derece FCF'nin sayısal sonucu hesaplanırken hepsi daha önce hesaplanmış sonuçlar kaydedildikleri yerden çağırılarak kullanılsa sadece sonuçlara ulaşım için işlem yapılmış olur. Böylece her FCF'nin tekrar tekrar hesaplanması yerine sadece sonuçların çağırılarak kullanılması ile çok daha kısa bir süre harcanacaktır. Bu durum Şekil 12'de görsel

olarak sunulmuştur. Şekil 12, Şekil 9 ile karşılaştırıldığında önerilen yeni yöntemin işlemi ne kadar sadeleştiği görülmektedir. Şekil 12 incelendiğinde önerilen yeni yöntemde n. derece FCF için daha düşük FCF'lere ait kaydedilen sonuçlara tek bir defada ulaşılarak işlemin sonuçlandırıldığı görülmektedir.

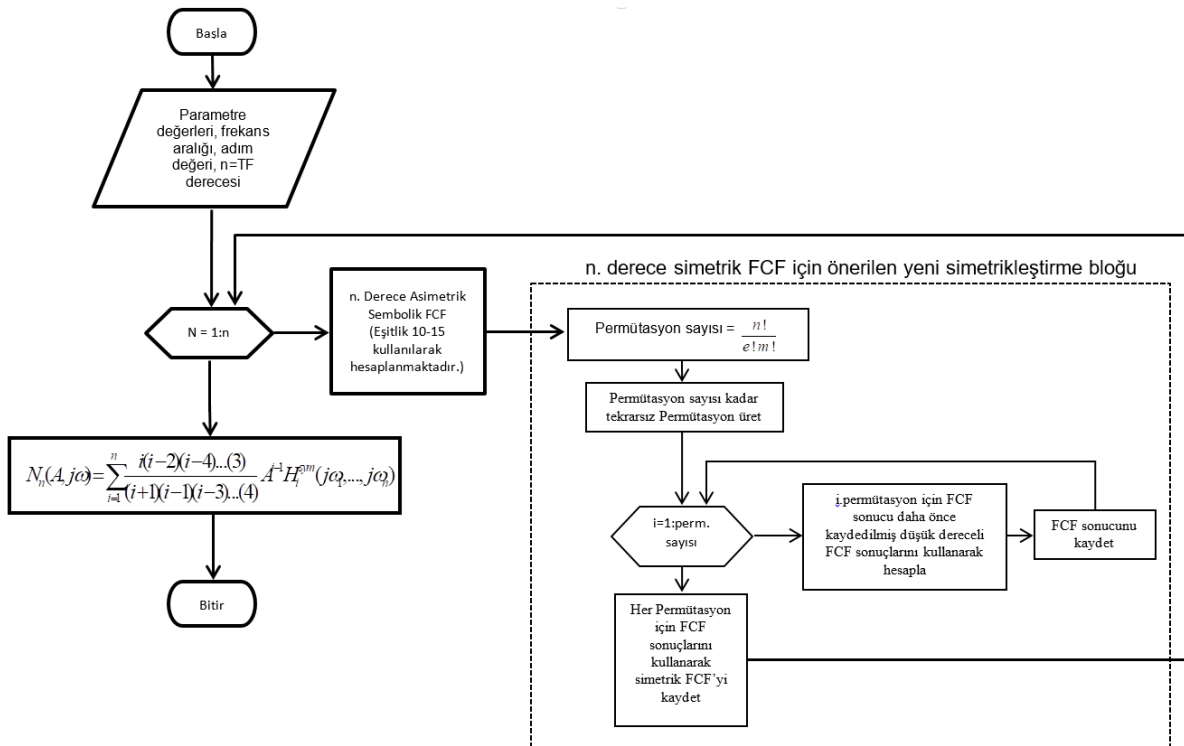
$$H_n(\cdot) = H_1(\cdot) \dots H_2(\cdot) \dots H_{n-2}(\cdot) \dots H_{n-1}(\cdot)$$

\swarrow \swarrow \downarrow \swarrow
 $H_1 = [\dots]$ $H_2 = [\dots]$ $H_{n-2} = [\dots]$ $H_{n-1} = [\dots]$

Şekil 12. n.derece FCF sonucu hesaplanırken daha düşük FCF'lerden gerekli sonuçların çağırılması

3.3.3 Önerilen Yöntemlerin Kullanıldığı Yeni TF Algoritması ve Performans Değerlendirmesi

Klasik algoritmanın daha kısa sürede sonuca ulaşabilmesi için önerilen iki farklı yöntem kullanılarak yeni TF hesaplama algoritması Şekil 13'de verilen akış diyagramındaki gibi geliştirilmiştir.



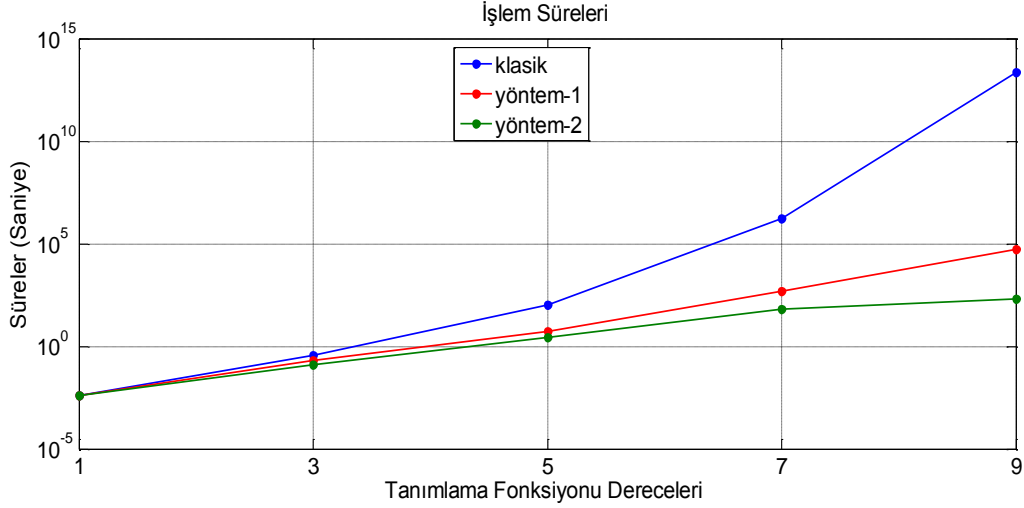
Şekil 13. Geliştirilen yeni TF hesaplama akış diyagramı

Önerilen hızlandırma yöntemleri simetrikleştirme işlemi ile ilgili olduğu için klasik yöntemin akış diyagramındaki “n. Derece Simetrik FCF” işlem bloğu önerilen yöntemlere göre değiştirilerek Şekil 13’deki yeni TF hesaplama algoritması/akış diyagramı elde edilmiştir. Şekil 13’de görülen işlem basamakları ile ilgili açıklamalar önceki bölümlerde yapıldığından, doğrudan önerilen iyileştirmelerin etkisinin görülmesi daha yerinde olacaktır. Buna yönelik olarak, Tablo 3’de örnek sistem modeli için farklı derecelerdeki TF’ler hesaplanırken klasik yöntem ve yeni önerilen yöntemlerde harcanan süreler verilmiştir. Elde edilen süreler ayrıca Şekil 14’de grafiksel olarak sunulmuştur.

Tablo 3. Örnek sistem modeli için TF’lerin elde edilme süreleri ($\omega=1$ rad/sn için)

TF derecesi	Klasik Yöntem	Permütasyon sayısının azaltılması sonrası	FCF sonuçlarının kaydedilmesi sonrası
1	0.004	0.004	0.004
3	0.3540	0.1974	0.13
5	109.65	5.46	2.614
7	1715394.24	468.741	63.691
9	$2.23 \cdot 10^{13}$	52945.2	214.91

Tablo 3 incelendiğinde klasik yöntemde yapılan her iki iyileştirmenin de düşük dereceli (1 ve 3) TF’lerde harcanan süreleri çok fazla etkilemediği ancak asıl kayda değer hızlanmayı yüksek dereceli TF’lerde sağladığı görülmektedir. Şekil 14 incelendiğinde ise önerilen her iki çözümün de kendi başlarına hızlanmaya çok büyük katkı yaptığı görülmektedir. TF dereceleri yükseldikçe hızlanma oranının da arttığı görülmektedir. Sonuç olarak yapılan iyileştirmeler sonucunda geliştirilen yeni algoritmanın yeterli hızlanmayı sağladığı ve TF yönteminde harcanan süreleri makul seviyelere çektiği söylenebilir.



Şekil 14. Örnek sistemin için eski ve yeni algoritmaların TF derecelerine göre harcadıkları zamanlar

3.4 Paralel Hesaplamalar

3.4.1 Yeni Algoritmanın Çok Çekirdekli İşlemci ile Hızlandırılması

İP-3 kapsamında yeni geliştirilen algoritmanın çok çekirdekli işlemci ve paralel hesaplama kullanılarak hızlandırılması ve sonuçların daha kısa sürede hesaplanması hedeflenmektedir. Bunun için proje kapsamında MATLAB programının Paralel Hesaplama Araç Kutusu kullanılarak, standart bir kişisel bilgisayarda paralel hesaplama yapılabilmesi sağlanmıştır. Bu bölümde ilk olarak MATLAB programındaki Paralel Hesaplama Araç Kutusu tanıtılmış ve çok çekirdekli işlemcilerde paralel hesaplama yapabilmeyi sağlayan parfor (paralel-for) döngüsü açıklanmıştır. Ardından geliştirilen yeni algoritmanın çok çekirdekli işlemci kullanılarak paralel hesaplama ile çalıştırılması için gerekli veri bölme ve paralel akış diyagramı açıklanmıştır.

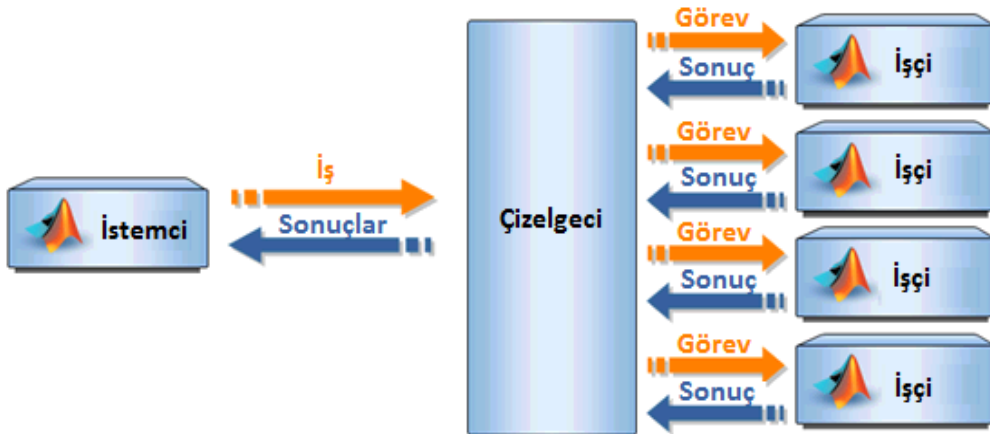
3.4.1.1 MATLAB Paralel Hesaplama Araç Kutusu

MATLAB'ın Paralel İşlem Araç Kutusu yerel bir bilgisayarda açılan MATLAB oturumunun yanında kullanıcı tarafından belirlenen sayıda (en fazla on iki adet) işlem birimi ile tanımlanan MATLAB kopyalarının çalışmasını ve bunların ana oturumla haberleşmesini sağlayan bir eklentidir. Bu araç kutusu sayesinde, çözülecek problem oluşturulan MATLAB kopyaları adedince farklı birimde paralel yapıda işlenerek daha kısa sürede istenen çözüme ulaşılabilmektedir [5]. MATLAB ile paralel işlemler görev (task) paralel (Şekil 15) ve veri (data) paralel (Şekil 16) olmak üzere iki temel yapıda gerçekleştirilebilmektedir [5]. Görev

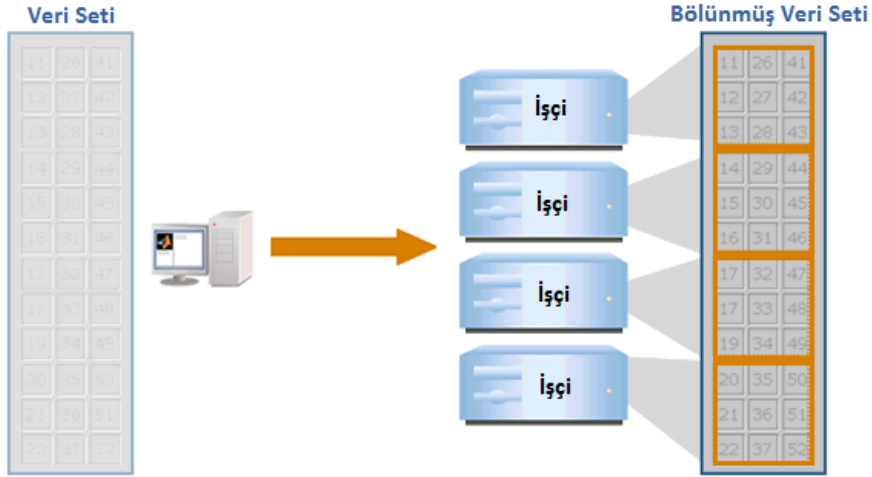
paralel yapıda büyük bir iş daha küçük görevlere ayrılarak paralel formda işlenirken, veri paralel yapıda büyük ölçekli bir veri seti işçiler arasında paylaştırılarak işlenmektedir [5]. Bu çalışmada veri paralel yapı temel alınmış ve bu bağlamda MATLAB'ın paralel-for (parfor) yapısı kullanılmıştır.

Parfor döngüsü normal bir for döngüsünün yaptığı işi paralel yapıda gerçekleştirmektedir. Parfor döngüsünün gövdesinde bulunan kodların bir defa işlenmesine iterasyon denir. Eğer dört iterasyonluk bir döngünüz ve dört adet işlem biriminiz varsa her bir işlem birimi bir iterasyonu gerçekleştirir ve sonucunu istemciye geri gönderir. Parfor'da her bir iterasyon birbirinden bağımsız çalıştırılır ve herhangi bir sıra takip edilmez. Bu nedenle Parfor'da işçiler arası senkronizasyon garantisi yoktur.

Yukarıda bahsedilen özellikleri göz önüne alındığında Parfor döngülerinin birbirini etkilemeyen, sonucu daha önceki iterasyonların sonuçlarına bağlı olmayan, herhangi bir sıra ile işlenmesi gerekmeyen problemlerde kullanılmasının uygun olduğu görülmektedir. Tanımlama Fonksiyonları yöntemi ve yeni geliştirilen algoritmada her bir frekans değeri için bulunan sonuçlar önceki veya sonraki frekans değerleri ve sonuçları ile ilişkili olmadığından parfor kullanımını yeni algoritmanın paralel hesaplaması için uygun bir yöntemdir.



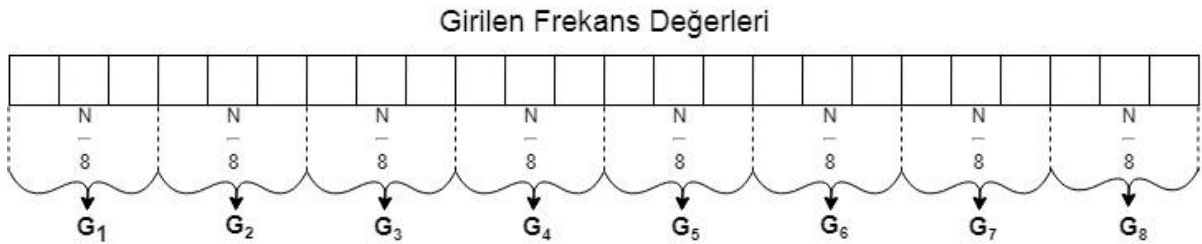
Şekil 15. MATLAB paralel işleme araç kutusunun sağladığı görev paralel yapı [5]



Şekil 16. MATLAB paralel işleme araç kutusunun sağladığı veri paralel yapısı [5]

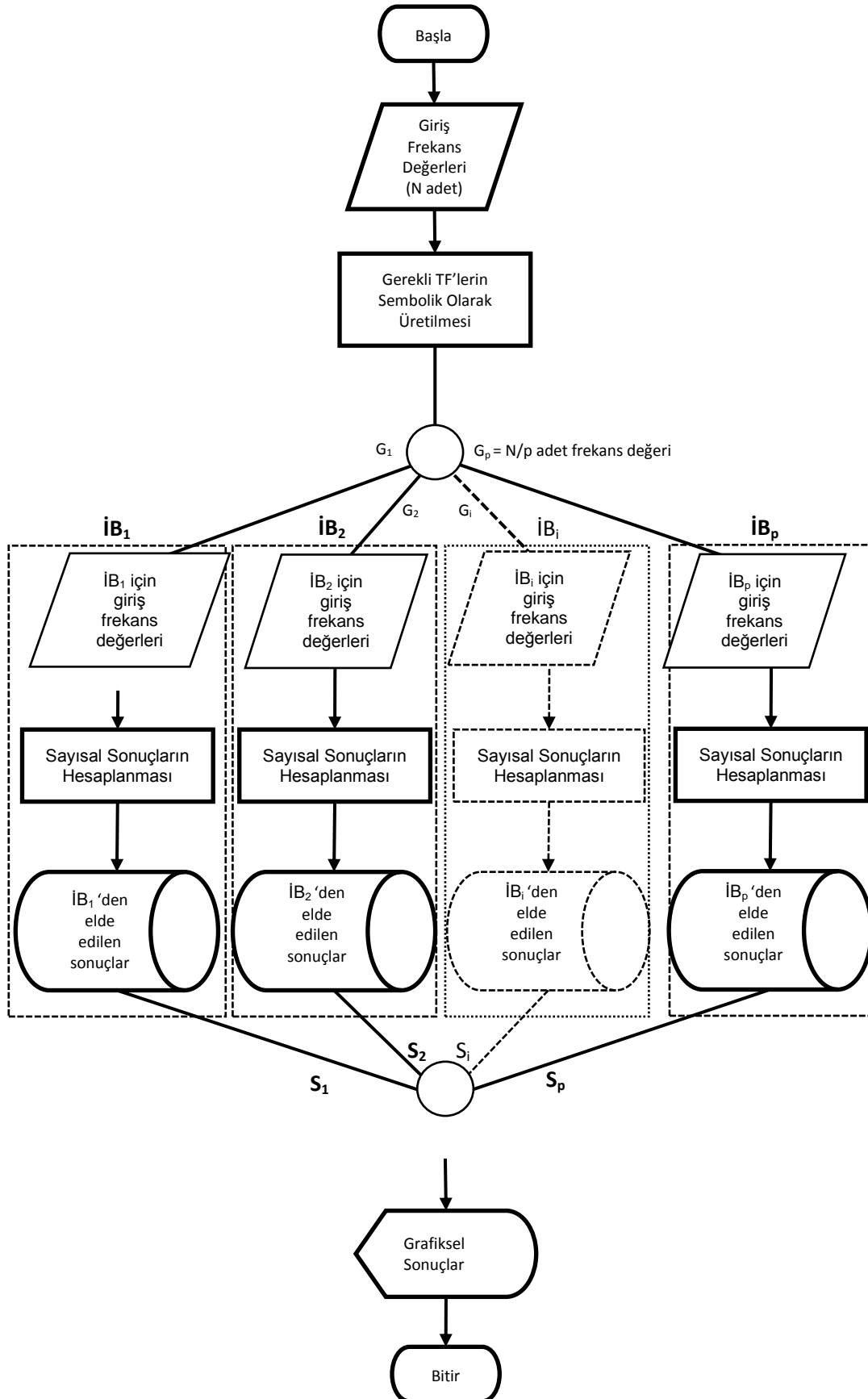
3.4.1.2 İşlem Yükünün Bölünmesi ve Paralel Hesaplama Akış Diyagramı

Tanımlama Fonksiyonları yönteminde ve yeni geliştirilen algorithmada belirli bir frekans değer aralığında N adet frekans değeri için DOS modelinden frekans cevabı sonuçları elde edilmektedir. Bununla birlikte girilen her frekans değeri tek başına hesaplanmakta ve diğer sonuçları etkilememektedir. Buna göre girilen N adet frekans değeri kullanılacak işlem birimi sayısına (p) bölünerek her bir işlemciye N/p adet frekans değeri hesaplanmak üzere giriş (G_i) olarak gönderilmektedir. Şekil 17’de açıklan bu işlem $N=8$ adet işlem birimi için görülmektedir.



Şekil 17. Girilen frekans değerlerine göre işlem yükünün işlemci sayısına bölünmesi

Şekil 18’de görülen akış diyagramında yeni algoritmanın paralel hesaplama akış diyagramı görülmektedir. Akış diyagramından anlaşıldığı üzere N adet frekans değeri algorithmaya giriş olarak verildikten sonra, istenen Tanımlama Fonksiyonu derecesine göre gerekli Tanımlama Fonksiyonları sembolik olarak üretilmektedir. Bu işlemden sonra giriş frekans değerleri p adet işlem birimine (İB) eşit sayıda bölünerek, her işlem birimine G_i giriş vektörü olarak gönderilir. Her İB kendisine gelen giriş vektöründeki frekans değerleri için sayısal sonuçları (S_i) hesaplar ve tüm İB’lerden gelen sonuçlar tekrar tek bir sonuç matrisinde birleştirilerek grafiksel olarak sunulur.



Şekil 18. Yeni algoritmanın paralel hesaplama akış diyagramı

3.4.1.3 Paralel Hesaplama Sonucu Elde Edilen Hızlanma Oranları

Bu bölümde, Bölüm 1’de belirlenen üç farklı sistem için farklı sayıda işlem birimi ile farklı sayıda frekans değerleri ve Tanımlama Fonksiyonu dereceleri için hesaplama süreleri belirlenerek paralel hesaplama hızlanma oranları tespit edilmiştir. Burada farklı sayıda frekans değeri kullanılması hesaplaması yapılacak problemin boyutunu, Tanımlama Fonksiyonu dereceleri ise problemin karmaşıklığını nitelemektedir.

Belirlenen süreler kullanılarak hızlanma oranları yüzde olarak Eşitlik 38’deki formül ile hesaplanmıştır. Bu formülde T_1 tek işlemci (sıralı hesaplama) ile elde edilen süreyi, T_p ise p adet işlem birimi kullanılarak gerçekleştirilen paralel hesaplama sonucu elde edilen süreyi ifade etmektedir. Verim ise hızlanma oranının T_p ’ye bölünerek bulunur Eşitlik 39’daki gibi.

$$\% \text{ Hızlanma} = [(T_1 / T_p) - 1] * 100 \quad (38)$$

$$\text{Verim} = \text{Hızlanma} / T_p \quad (39)$$

Süreler belirlenirken üç farklı sistem (Sistem 1, 2 ve 3) için hesaplamalar yapılmıştır. Hesaplamalar için 1., 3., 5. ve 7. derece Tanımlama Fonksiyonları ile 8, 40, 80, 160 ve 320 adet frekans değeri, hesaplama sürelerinin belirlenmesinde kullanılmıştır. Belirlenen bu kriterlerin yanında her sistem için 2, 4 ve 8 adet işlem biriminin kullanıldığı paralel hesaplamalar gerçekleştirilmiştir. Bu hesaplamalar için kullanılan bilgisayarın özellikleri Tablo 4’de görülmektedir.

Tablo 4. Hesaplamalarda kullanılan bilgisayarın özellikleri

İşlemci	Intel İ7-4
Bellek	16 GB DDR3
İşletim Sistemi	Windows 10 - 64 bit
Çekirdek Sayısı	Donanımsal:4 - Mantıksal:8

3.4.2 GPU ile Hızlandırma

Özellikle yüksek dereceli tanımlama fonksiyonu yöntemi ile frekans analizi yaparken işlem yoğunluğundan dolayı çok yüksek işlem gücü gerektirmektedir. Buna benzer yüksek

hesaplama gücü gerektiren problemleri çözmek için araştırmacılar CPU, GPU ve FPGA gibi donanımları kullanarak çok farklı yöntemler denemektedirler. GPU hızlı ve etkin çözümler sağlaması sayesinde, son yıllarda görüntü işlemede, bilimsel hesaplamalarda, biyoloji ve tıp alanında kullanılmaya başlamıştır (Akinci & Yılmaz, 2013). GPU paralel akışları yürütebilmek için tüm komutları aynı anda işler. GPU'nun özellikle matris vektör işlemlerini optimize edecek şekilde tasarlanmaları, iterasyona bağlı sonuç üreten denklem sistemleri çözüm algoritmalarının hızlı bir şekilde uygulanabilmelerini sağlamıştır.

MATLAB'da GPU üzerinde işlemler yapabilmek için "gpuArray" fonksiyonu kullanılır. "gpuArray" fonksiyonu ile verilerin GPU üzerine aktarılarak, GPU üzerinde işlemlerin gerçekleştirilmesi sağlanır. "gpuArray" fonksiyonu CPU üzerinde yapılabilen, matris çarpma, bölme, toplam, çıkarma, determinant bulma, ters alma, traspoz alma, eşlenik alma gibi birçok işlemin GPU üzerinde de yapılabilmesini destekler (Altman, 2014). "gpuArray" fonksiyonu, tanımları GPU üzerinde otomatik olarak yaparak işlemlerin gerçekleştirilmesini sağlar.

3.5 Belirlenen Sistemlere ait Frekans Cevaplarının MATLAB Simulink ile Elde Edilmesi

Bu bölümde İP-6 kapsamında bir önceki bölümde belirlenen sistemlerin MATLAB Simulink ile frekans cevapları bulunmuştur. Bunun için öncelikle Simulink ortamı tanıtılmış. Ardından simulink'te sistemlerin frekans cevabının nasıl elde edildiği açıklanmıştır. Sonrasında ise belirlenen 3 farklı doğrusal olmayan sistemin Simulink modelleri yapılmıştır.

3.5.1 MATLAB Simulink

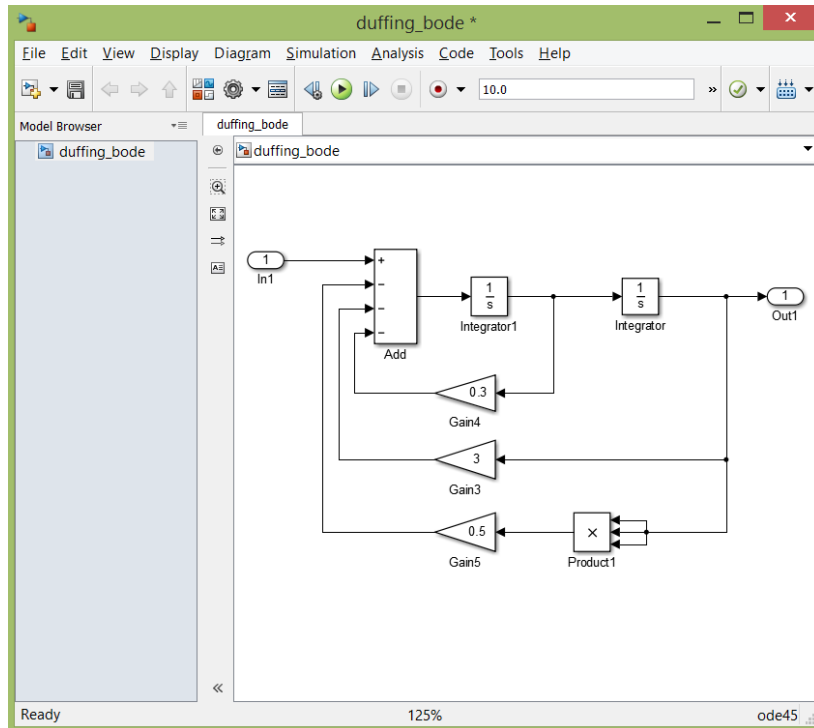
MATLAB yani matris laboratuvarı (MATrix LABoratory), Clever Moler tarafından ABD'de 1985 yılında ilk olarak Fortran dili ile geliştirilmiş daha sonraları ise C++ ile geliştirilmiş Mathworks firması ürünüdür bir sayısal analiz programıdır. MATLAB programı veri analizleri, programlama ve algoritma geliştirme, modellemeler, sayısal hesaplamalar, grafiklendirmeler, simülasyonlar, yapay zekâ, optimizasyon gibi alanlar kullanılacak şekilde geliştirilmiştir.

Matematik yardımları için parametrik komutlar ve alt programlar geliştiren MATLAB, bu konuda kolaylaştırıcı bir araç durumuna gelmiştir. MATLAB, 10^{-307} ile 10^{-308} hesaplama aralığında işlem yapabilmekte, buna ilaveten oldukça güçlü ve kullanışlı grafik çizim imkânları da sunabilmektedir.

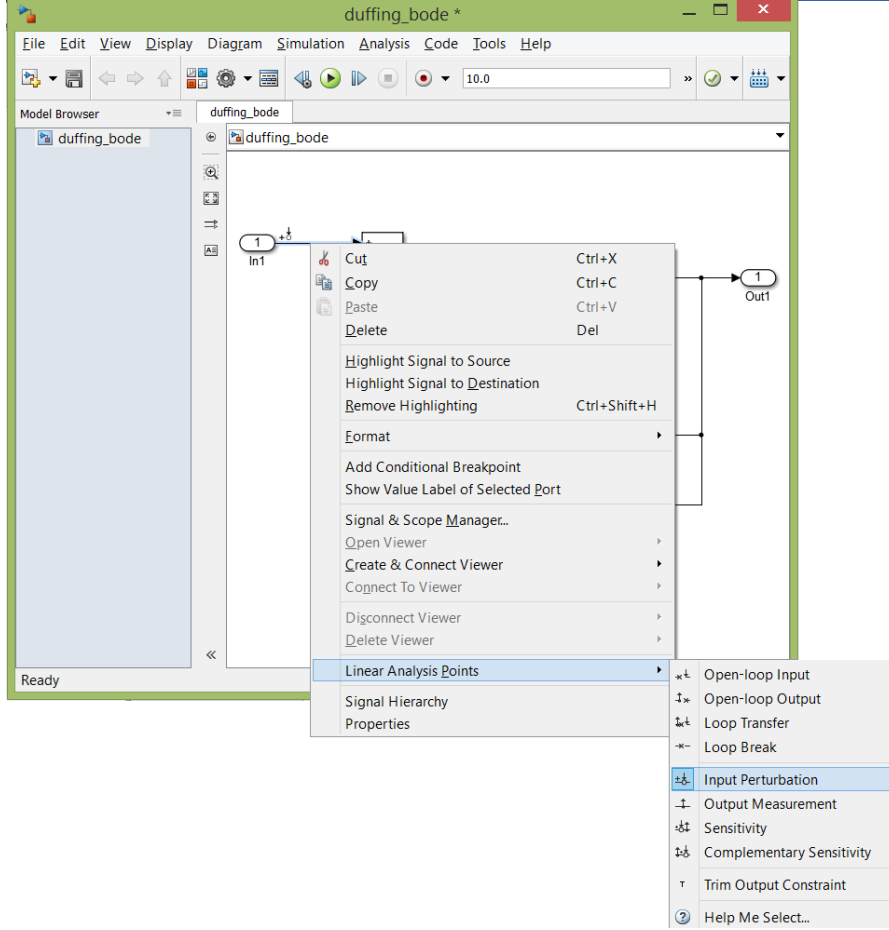
MATLAB içinde çok önemli ve görsel bir yazılım ortamı olan Simulink, dinamik sistemler için bloklar kullanılarak bağlanan sinyal yönelimli grafik programlama eklentisidir. Modelde kullanılacak her türlü veri tabanları model içerisine katılır. Simulink sürekli zaman veya ayrık zaman modellemeleri yapılmış doğrusal olmayan sistemleri destekler. Bu eklenti model kurmak için tıkla ve sürükle gibi fare işlemleri kullanan ve MATLAB’da kodlar yardımıyla programlanabilen bir grafik kullanıcı arabirimi sağlar. Grafik kullanıcı arabirimi, modelleri sanki bir kâğıda bir kalem ile çiziyormuş gibi kolaylıkla oluşturmayı sağlamaktadır. Doğrusal ve doğrusal olmayan elemanlar, kaynaklar ve bağlantıları içeren geniş bir blok kütüphanesine sahiptir. Ayrıca kullanıcı da kendi bloklarını oluşturabilir.

3.5.2 Sistemlerin Frekans Cevabının MATLAB Simulink ile Elde Edilmesi

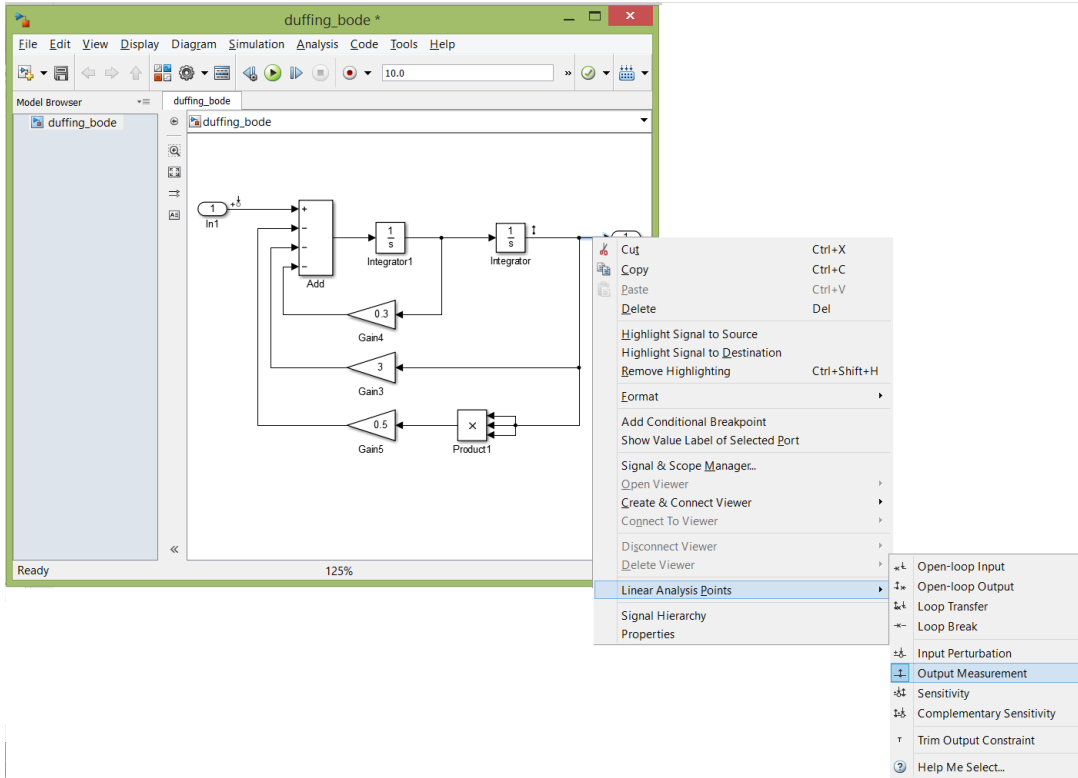
Bu başlık altında MATLAB Simulink ile bir sistemin frekans cevabının en kolay biçimde nasıl elde edilebileceği Duffing sistemi üzerinden anlatılmıştır. MATLAB Simulink ile bir sisteme ait frekans cevabı elde edilirken, sisteme ait blok diyagram hatasız biçimde giriş ve çıkış portları da eklenerek Simulink modeli olarak oluşturulmalıdır (Şekil 19). Sonrasında Şekil 20’de görüldüğü üzere giriş portunun bağlantısı seçilerek sağ tıklama ile açılan menüden “*Linear Analysis Points*” seçeneği üzerinden “*Input Perturbation*” seçilerek frekans cevabı analizi için giriş belirlenir. Benzer bir işlem Şekil 21’deki gibi çıkış portunun bağlantısı üzerinden gerçekleştirilir ve frekans cevabı analizi için çıkış “*Output Measurement*” seçimi belirlenir.



Şekil 19. Duffing sisteminin simulink modeli



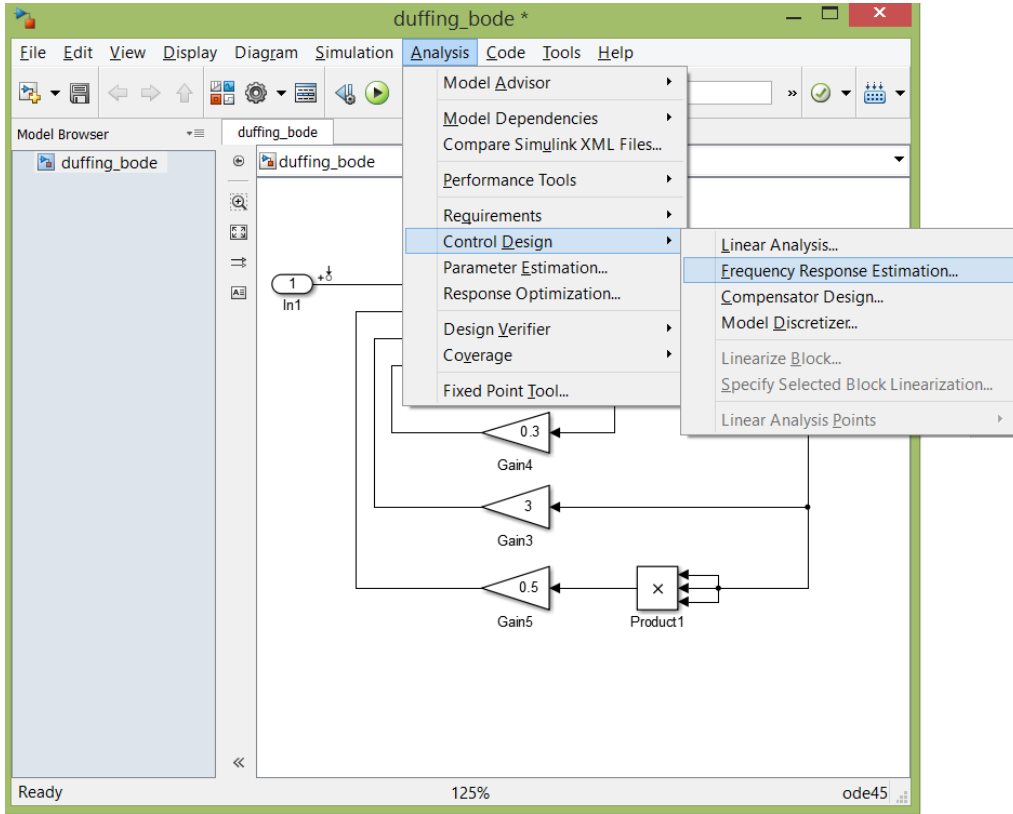
Şekil 20. Frekans cevabı analizi için girişin belirlenmesi



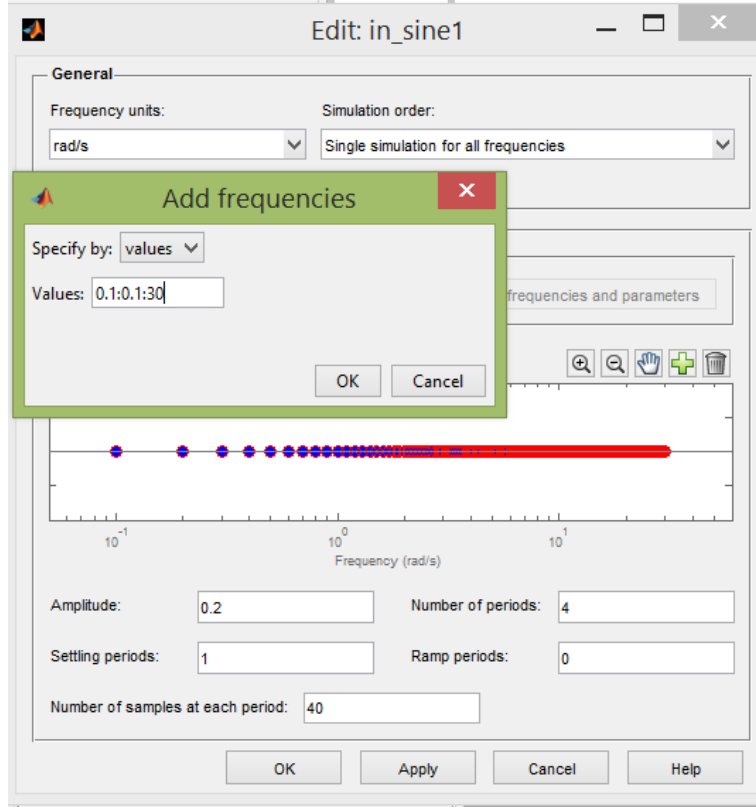
Şekil 21. Frekans cevabı analizi için çıkışın belirlenmesi

Giriş ve çıkışın belirlenmesinin ardından frekans cevabının hesaplanması için Şekil 22'deki gibi "Analysis" menüsünden "Control Design" seçeneği üzerinden "Frequency Response Estimation" seçilir.

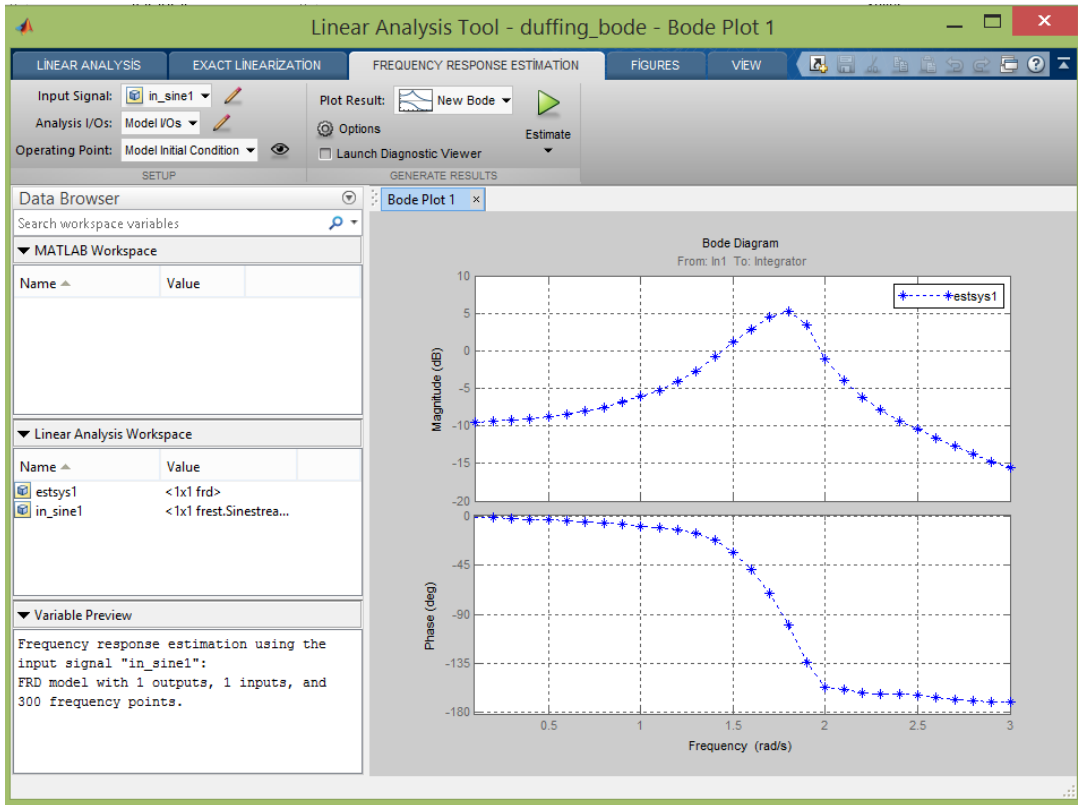
Bu seçimin ardından ortaya çıkan diyalog kutusunda görülen grafik üzerindeki frekans noktaları seçilerek analizi yapılacak frekans değerleri Şekil 23'deki gibi tekrar girilir. Bu diyalog kutusu ile aynı zamanda giriş sinyalinin genliği, uygulanacak periyot sayısı ve her periyottaki örnek sayısı gibi parametreler girilebilir. Gerekli ayarlar yapıp diyalog kutusu kapatıldığında Şekil 24'deki pencerede "Estimate" butonu tıklanarak ilgili sistemin frekans cevabı sonuçları grafiksel olarak görülebilir.



Şekil 22. Simulink frekans cevabı simülasyonu



Şekil 23. Simulink frekans cevabı için giriş sinyal ayarları



Şekil 24. Elde edilen frekans cevabı sonuçları

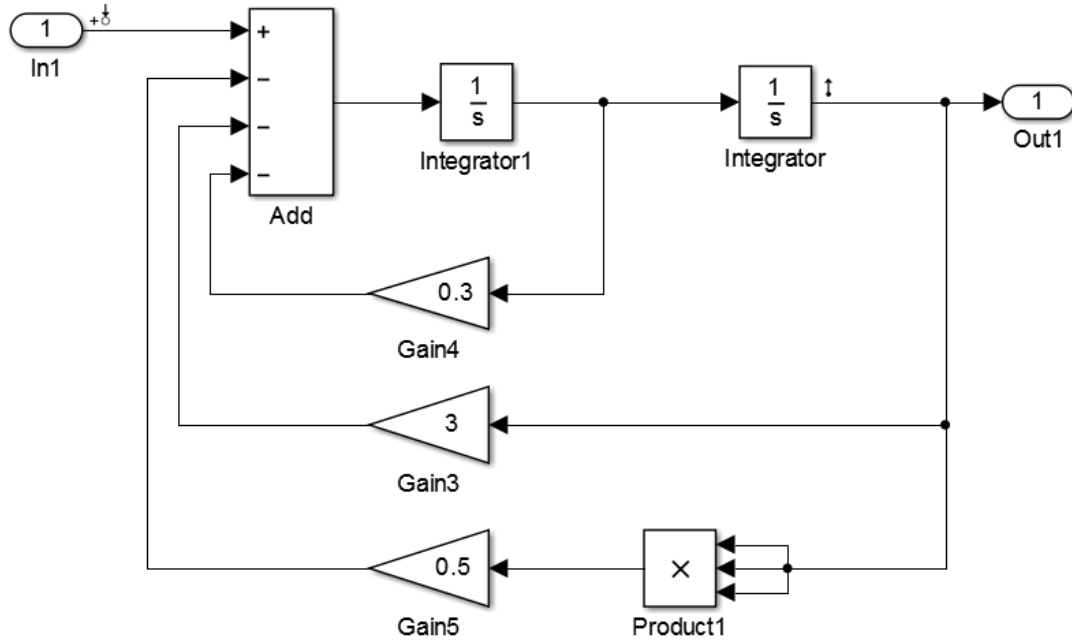
3.5.3 Belirlenen Doğrusal Olmayan Sistemlerin Tanıtılması ve Simulink Modelleri

3.5.3.1 Duffing Sistemi (Sistem 1)

Eşitlik 40'da Duffing sistemine ait doğrusal olmayan sistem modeli görülmektedir. Bu model doğrusal olmayan 3. derece kübik sertlik terime sahip ikinci mertebeden diferansiyel bir denklemdir.

$$y''(t) + ay'(t) + by(t) + cy(t)^3 - u(t) = 0 \quad (40)$$

En yaygın kullanılan doğrusal olmayan sistemlerden biri olan Duffing sistemi, kübik sertlik yapısıyla birçok sistemi modellemekte kullanıldığından tercih edilmiştir (Kovacic & Brennan, 2011; Chen, 2003; Cveticanin, 2001). Eşitlik 1'deki Duffing sistemine ait faz değişim blok diyagramı elde edilerek MATLAB Simulink modeli Şekil 25'deki gibi oluşturulmuştur. Şekil 25'de sistem parametrelerinin $a=0.3$, $b=3$ ve $c=0.5$ olarak belirlendiği görülmektedir.



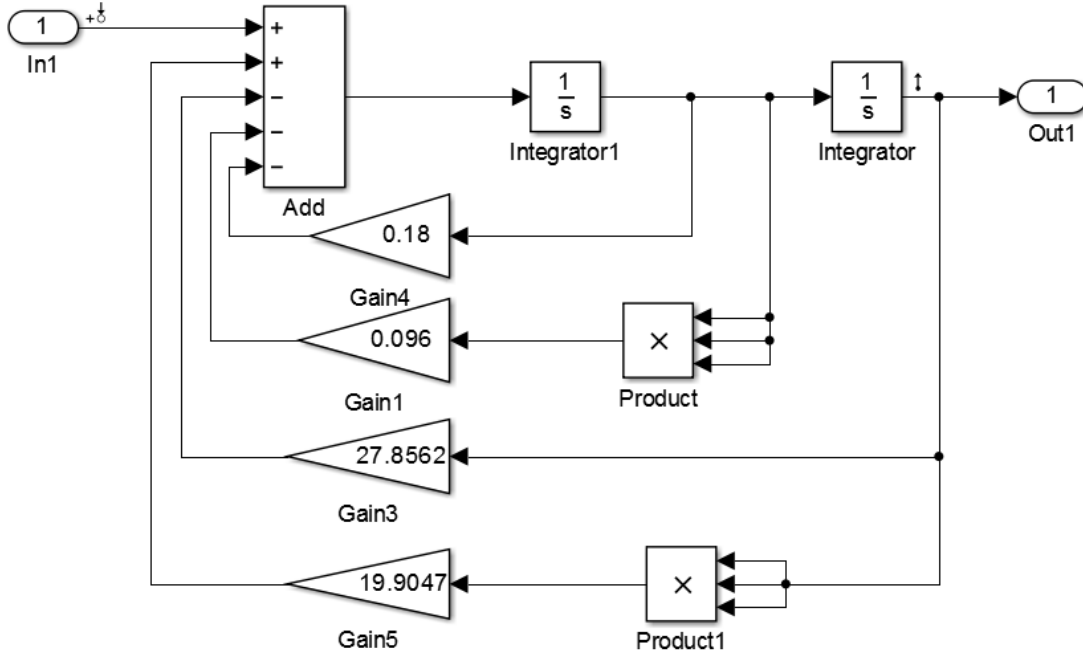
Şekil 25. Duffing sisteminin Simulink Modeli

3.5.3.2 Kübik Söndürücü ve Kübik Sertlik Terimi İçeren Sistem Modeli (Sistem 2)

Duffing sistemi sadece sertlik terimi içerdiğinden, söndürücü terim içeren farklı bir sistemin, geliştirilen algoritma ile hesaplamasının, algoritmanın performansının ortaya konması açısından gerekli olduğu düşünülmektedir. Bu sebeple, literatür incelendiğinde söndürücü ve sertlik terimi içeren bir model olarak Eşitlik 2'deki doğrusal olmayan gemi modeli tercih edilmiştir (Peyton Jones, 2007). Eşitlik 41'deki modelde söndürücü ve sertlik olmak üzere iki

adet doğrusal olmayan kübik terim bulunmaktadır. Sistem parametreleri $a=0.18$, $b=27.8562$, $c=0.096$ ve $d=19.9047$ olmak üzere Eşitlik 41'deki sisteme ait faz değişim blok diyagramı elde edilerek MATLAB Simulink modeli Şekil 26'daki gibi oluşturulmuştur.

$$y''(t) + ay'(t) + by(t) + cy'(t)^3 + dy(t)^3 - u(t) = 0 \quad (41)$$

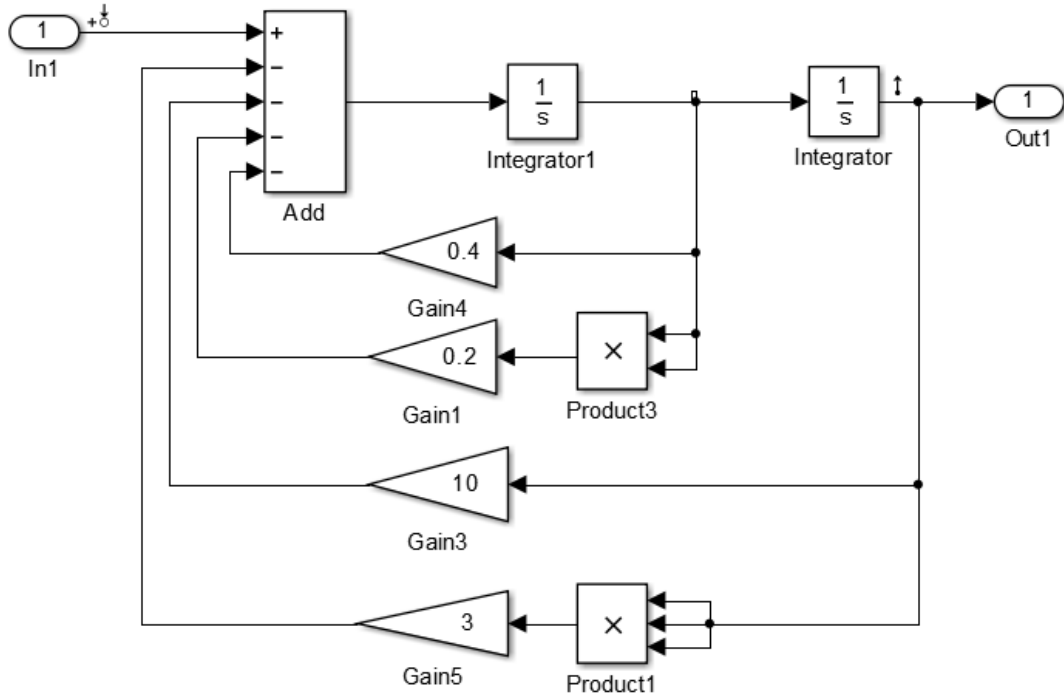


Şekil 26. Kübik söndürücü ve sertlik terimi içeren sistemin simulink modeli

3.5.3.3 Kuadratik Söndürücü ve Kübik Sertlik Terimleri İçeren Sistem Modeli (Sistem 3)

Geliştirilen algoritmanın performansı düşünüldüğünde, farklı derecelerde terim içeren bir sistem modelinin de göz önüne alınmasının, algoritmanın performans değerlendirmesi için önemli olacağı düşünülmektedir. Bu nedenle içerisinde farklı derecelerde hem sertlik hem de söndürücü terim içeren bir modelin belirlenmesi uygun olacaktır. Buna göre Eşitlik 3'de görülen kuadratik söndürücü ve kübik sertlik terimi içeren sistem modeli proje kapsamında kullanılacak üçüncü sistem olarak belirlenmiştir. Sistem parametreleri $a=0.4$, $b=10$, $c=0.2$ ve $d=3$ olmak üzere Eşitlik 42'deki sisteme ait faz değişim blok diyagramı elde edilerek MATLAB Simulink modeli Şekil 27'deki gibi oluşturulmuştur.

$$y''(t) + ay'(t) + by(t) + cy'(t)^2 + dy(t)^3 - u(t) = 0 \quad (42)$$



Şekil 27. Kuadratik Söndürücü ve Kübik Sertlik Terimleri İçeren Sistemin Simulink Modeli

3.6 Devre Tasarımları ve Deneysel Sonuçlar

3.6.1 Pspice

SPICE (Simulation Program for Integrated Circuits Emphasis) elektronik devreleri bilgisayar ortamında simüle etmek için yazılmış bir programdır. Pspice ise Cadence/Orcad firmasının 1984'de piyasaya sürdüğü Windows tabanında çalışan, bilgisayar destekli tasarım ve simülasyon programıdır. Pspice kütüphanesinde 20,000'den fazla simülasyon modeli içerir. Dünyanın en popüler şematik giriş sistemlerinden biri olan OrCAD Capture ve OrCAD Capture CIS kütüphanelerindeki modelleri kullanarak simülasyon amaçlı şematik tasarımlar oluşturulabilir.

Pspice DC, AC ve Geçici analiz türlerini desteklemektedir. DC analizi zamanla değişmeyen kaynaklar yani sabit durumlu DC kaynaklara sahip olan devreler için, AC analizi farklı frekanslar kaynaklarına sahip olan devreler için, Geçici analiz ise zaman değişkenli kaynakların yani örneğin Sinüzoidal kaynakların sahip olduğu devreler için, düğüm gerilimlerinin ve çevre akımlarının büyüklüklerini ve faz açılarını anlık ve belli bir frekans aralığında hesaplar. Matematiksel ifade ve fonksiyonları kullanarak fonksiyonel bloklar oluşturulabilir, Laplace dönüşüm formüllerini kullanarak zaman ve frekans domeninde devre davranışlarını tanımlanabilir.

3.6.2 Belirlenen Sistemlerin Pspice Modellerinin Elde Edilmesi

Belirlenen 3 farklı doğrusal olmayan sistemlerin Pspice modelleri için analog devre elemanları kullanılmıştır. Bunun için öncelikle bu modellerle uygun hale getirilmiştir.

Eşitlik 40 göz önüne alındığında $x=y(t)$, $y=y'(t)$ olduğunda, Eşitlik 43 ve Eşitlik 44'deki sonuçlar elde edilir.

$$x' = y \quad (43)$$

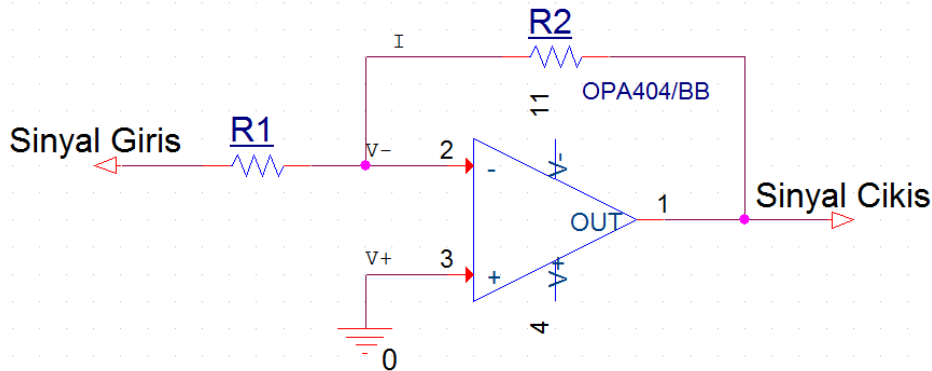
$$y' = u(t) - 0,3y - 3x - 0,5x^3 \quad (44)$$

Eşitlik 43 ve 44'e göre tasarlanacak elektronik devrede, integral alıcı, eviren yükselteç, toplayıcı ya da fark alıcı devre ve çarpma entegresi kullanılması gerekir.

3.6.2.1 Kullanılan Elektronik Araçlar

3.6.2.1.1 Eviren Yükselteç Devresi

Eviren yükselteç devresi, devrenin giriş kısmına verilen gerilimi belli bir katsayı ile çarpan ve tersleyen bir değer olarak çıkış kısmına vermektedir. Bu işlemler için opamp ve direnç kullanılmaktadır.



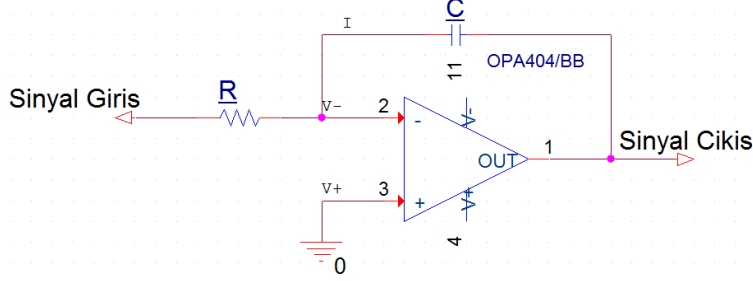
Şekil 28. Elektronik elemanlarla gerçekleştirilen eviren yükselteç devresi

Şekil 28'deki devrenin akım yönlerine ve opamp özelliklerine göre yapılan işlemler sonucunda Eşitlik 45'de elde edilmektedir.

$$V_{çıkış} = -\frac{R2}{R1} V_{giris} \quad (45)$$

3.6.2.1.2 İntegral Alıcı Devre

İntegral alıcı devresi, sistem giriş sinyalinin belli bir değerle çarpılıp integral almasıyla sistem çıkışına verilen sinyal olarak tanımlanır. Bu işlemler için direnç, kondansatör ve opamp kullanılmaktadır.



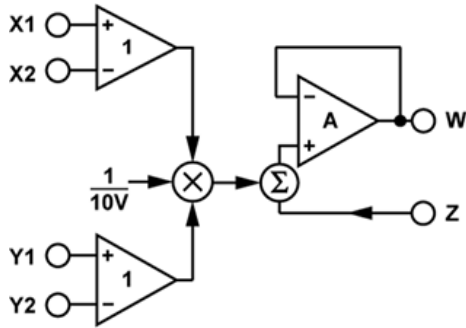
Şekil 29. Elektronik elemanlarla gerçekleştirilen integral alıcı devresi

Şekil 29'daki devrenin akım yönlerine göre, opamp özelliklerine göre ve kondansatörün yapısına göre yapılan işlemler sonucu Eşitlik 46 elde edilmektedir.

$$V_{cikis} = -\int \frac{1}{RC} V_{giris} dt \quad (46)$$

3.6.2.1.3 Analog Çarpma Devresi

Analog çarpma devresi için, AD633 entegresi kullanılmıştır. Yapısı Şekil 30'da verilmiştir. Çalışma prensibi Eşitlik 47'de verilmiştir.



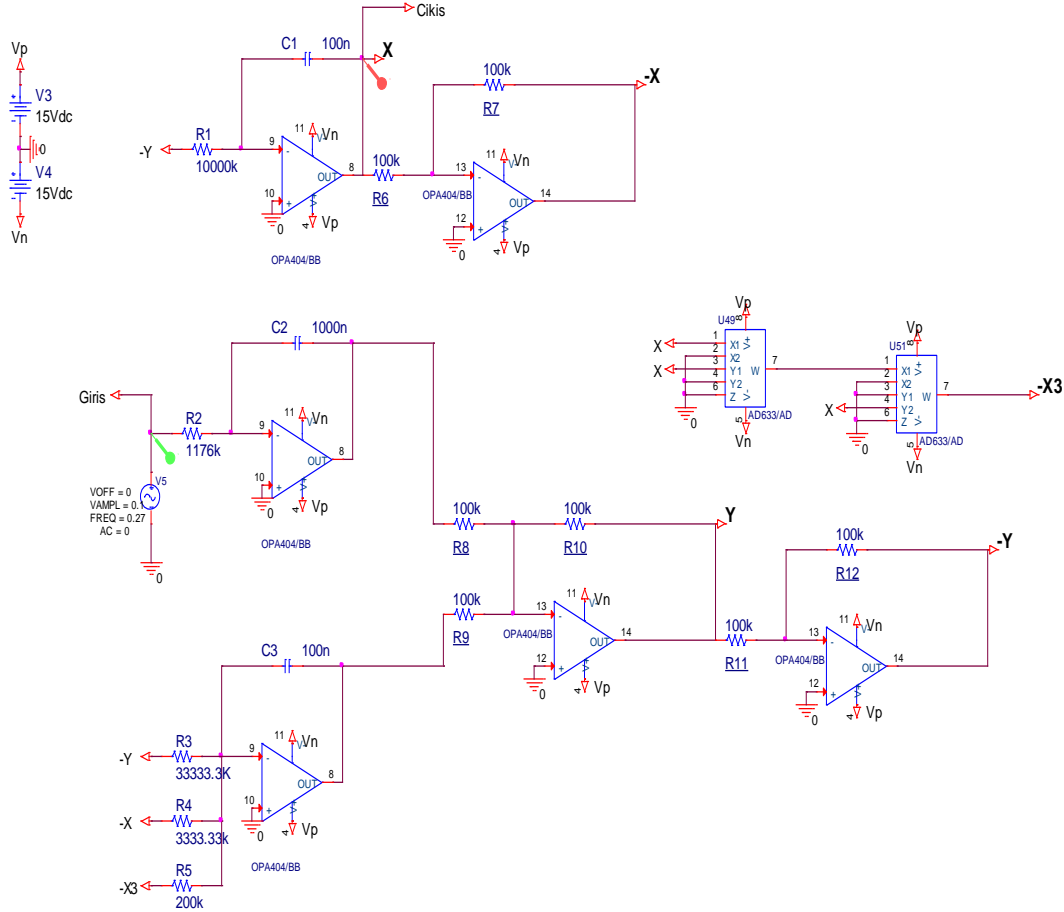
Şekil 30. AD633 entegresinin yapısı (Datasheet, AD633)

$$W = \frac{(X1 - X2)(Y1 - Y2)}{10} + Z \quad (47)$$

3.6.2.2. Sistemlerin Pspice Modelleri

3.6.2.2.1 Sistem 1'in Pspice Modeli

Modellemeye uygun hale getirilen Duffing sisteminin Eşitlik 43 ve 44'de verilen denklemlere göre Pspice modelleri Şekil 31'de verilmiştir.



Şekil 31. Sistem 1'in elektronik devre tasarımı

Şekil 31'deki elektronik devre tasarımında, integral alıcıların kondansatörü $C1=C3=100\text{nF}$ ve $C2=1000\text{nF}$ olarak seçilmiştir. Bu kondansatörlerin değerleri seçildikten sonra $R1$, $R2$, $R3$, $R4$ ve $R5$ direnç hesapları aşağıdaki (Eşitlik 48 - 52) gibi yapılmıştır. $R6$, $R7$, $R8$, $R9$, $R10$, $R11$ ve $R12$ eviren yükselteçlerin dirençleri olduğu için eşit seçilmiştir.

$$R1 = \frac{1}{C1} = \frac{1}{10^{-7}} = 10^4 \text{ k}\Omega \quad (48)$$

$$R2 = \frac{1}{\omega C2} = \frac{1}{1,7 * \frac{1}{2} * 10^{-6}} = 1176 \text{ k}\Omega \quad (49)$$

$$R3 = \frac{1}{0,3 * C3} = \frac{1}{0,3 * 10^{-7}} = 33333,33k\Omega \quad (50)$$

$$R4 = \frac{1}{3 * C3} = \frac{1}{3 * 10^{-7}} = 3333,33k\Omega \quad (51)$$

$$R5 = \frac{1}{0,5 * 100 * C3} = \frac{1}{0,5 * 100 * 10^{-7}} = 200k\Omega \quad (52)$$

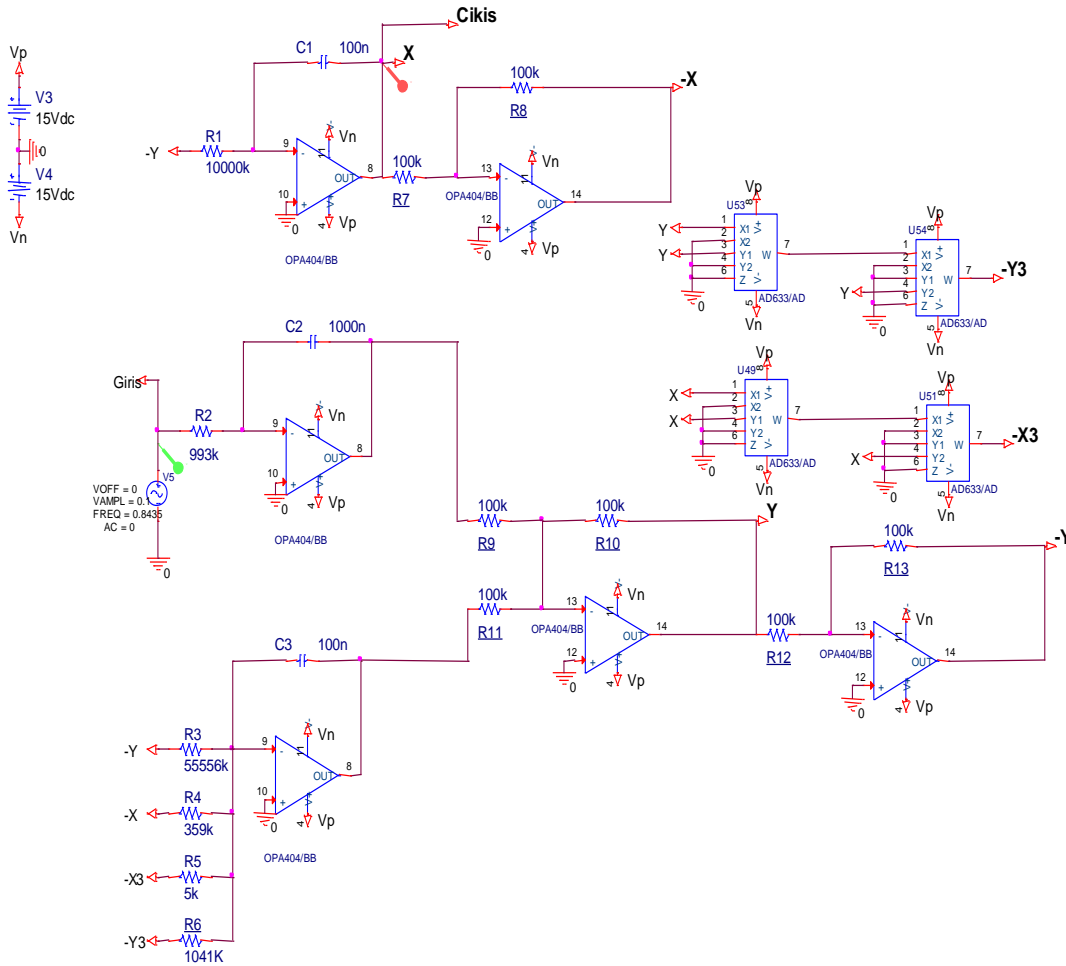
3.6.2.2.2 Sistem 2'nin Pspice Modeli

Pspice modelinden önce Eşitlik 41'in modellemeye uygun hale getirilmiştir. Eşitlik 41'de $x = y(t)$, $y = y'(t)$ olduğunda Eşitlik 53 ve 54 sonuçları elde edilmiştir.

$$x' = y \quad (53)$$

$$y' = u(t) - 0,18y - 27,8562x - 0,096y^3 - 19,9047x^3 \quad (54)$$

Eşitlik 53 ve Eşitlik 54 kullanılarak Sistem 2'nin Pspice modeli Şekil 32'de verilmiştir.



Şekil 32. Sistem 2'nin elektronik devre tasarımı

Şekil 32'deki elektronik devre tasarımında, integral alıcıların kondansatörü $C1=C3=100\text{nF}$ ve $C2=1000\text{nF}$ olarak seçilmiştir. Bu kondansatörlerin değerleri seçildikten sonra $R1, R2, R3, R4, R5$ ve $R6$ direnç hesapları aşağıdaki (Eşitlik 55 - 60) gibi yapılmıştır. $R7, R8, R9, R10, R11, R12$ ve $R13$ eviren yükselteçlerin dirençleri olduğu için eşit seçilmiştir.

$$R1 = \frac{1}{C1} = \frac{1}{10^{-7}} = 10^4 k\Omega \quad (55)$$

$$R2 = \frac{1}{wC2} = \frac{1}{5,3 * \frac{0,38}{2} * 10^{-6}} = 993 k\Omega \quad (56)$$

$$R3 = \frac{1}{0,18 * C3} = \frac{1}{0,18 * 10^{-7}} = 55556 k\Omega \quad (57)$$

$$R4 = \frac{1}{27,8562 * C3} = \frac{1}{27,8562 * 10^{-7}} = 359 k\Omega \quad (58)$$

$$R5 = \frac{1}{19,9047 * 100 * C3} = \frac{1}{19,9047 * 100 * 10^{-7}} = 5 k\Omega \quad (59)$$

$$R6 = \frac{1}{0,096 * 100 * C3} = \frac{1}{0,096 * 100 * 10^{-7}} = 1041 k\Omega \quad (60)$$

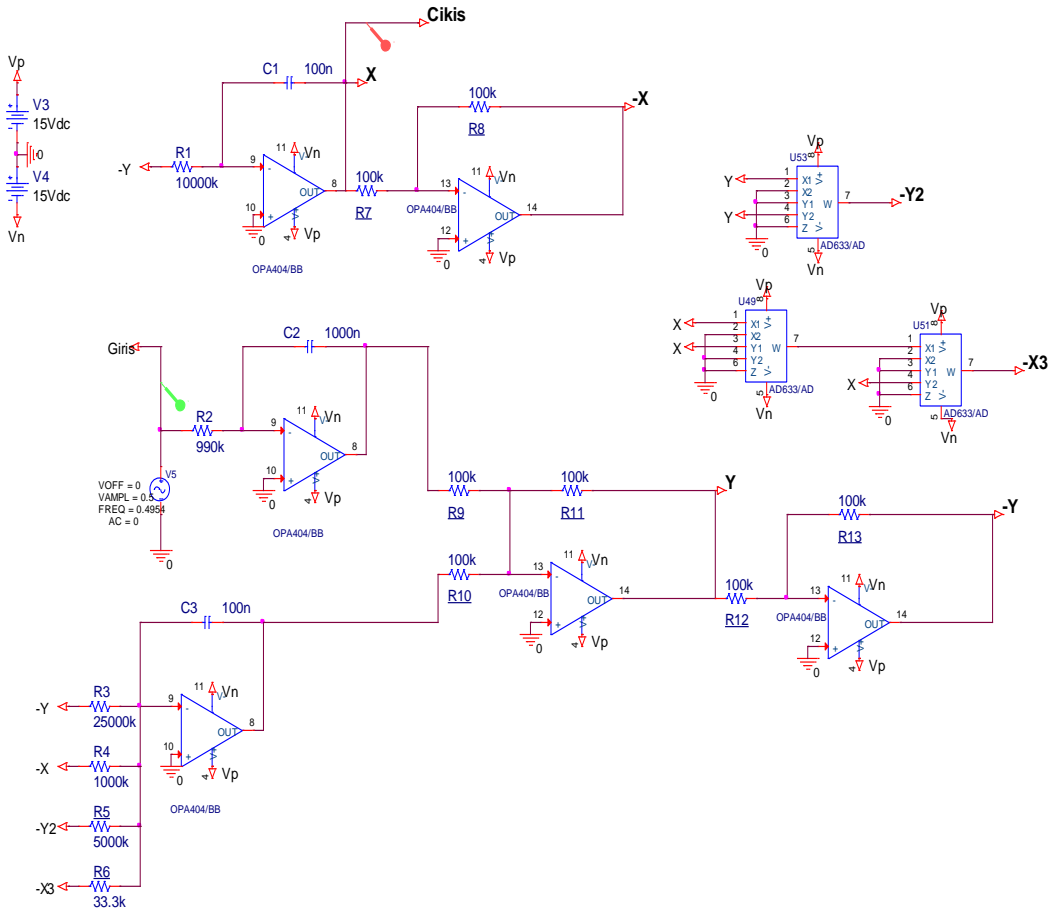
3.6.2.2.3 Sistem 3'ün Pspice Modeli

Pspice modelinden önce Eşitlik 42'nin modellemeye uygun hale getirilmiştir. Eşitlik 42'de $x = y(t)$, $y = y'(t)$ olduğunda Eşitlik 61, 62 sonuçları elde edilmiştir.

$$x' = y \quad (61)$$

$$y' = u(t) - 0,4y - 10x - 0,2y^2 - 3x^3 \quad (62)$$

Eşitlik 61 ve Eşitlik 62 kullanılarak Sistem 3'ün Pspice modeli Şekil 33'de verilmiştir.



Şekil 33. Sistem 3'ün elektronik devre tasarımı

Şekil 33'deki elektronik devre tasarımında, integral alıcıların kondansatörü $C1=C3=100n$ ve $C2=1000n$ olarak seçilmiştir. Bu kondansatörlerin değerleri seçildikten sonra $R1$, $R2$, $R3$, $R4$, $R5$ ve $R6$ direnç hesapları aşağıdaki (Eşitlik 63 - 68) gibi yapılmıştır. $R7$, $R8$, $R9$, $R10$, $R11$, $R12$ ve $R13$ eviren yükselteçlerin dirençleri olduğu için eşit seçilmiştir.

$$R1 = \frac{1}{C1} = \frac{1}{10^{-7}} = 10^4 k\Omega \quad (63)$$

$$R2 = \frac{1}{wC2} = \frac{1}{3,1 * 0,325 * 10^{-6}} = 990k\Omega \quad (64)$$

$$R3 = \frac{1}{0,4 * C3} = \frac{1}{0,4 * 10^{-7}} = 25000k\Omega \quad (65)$$

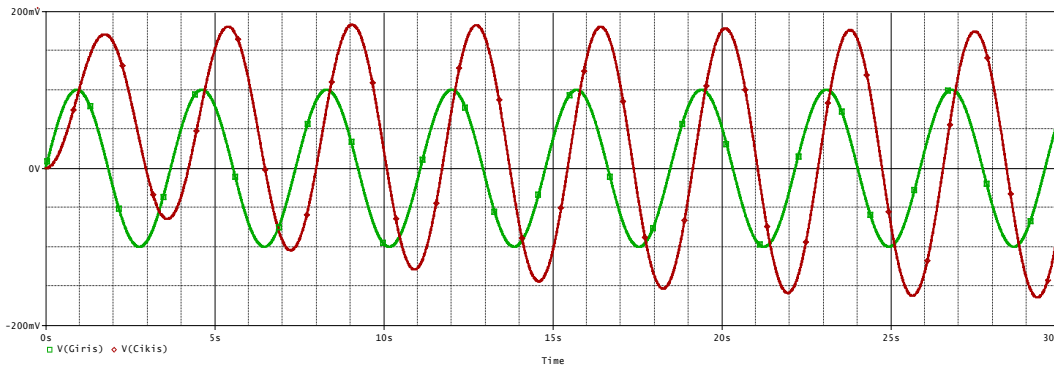
$$R4 = \frac{1}{10 * C3} = \frac{1}{10 * 10^{-7}} = 1000k\Omega \quad (66)$$

$$R5 = \frac{1}{0,2 * 10 * C3} = \frac{1}{0,2 * 10 * 10^{-7}} = 5000k\Omega \quad (67)$$

$$R6 = \frac{1}{3 \cdot 100 \cdot C3} = \frac{1}{3 \cdot 100 \cdot 10^{-7}} = 33,3k\Omega \quad (68)$$

3.6.3 Pspice Ortamında Frekans Cevabı Elde Edilmesi

Pspice ile frekans cevabının elde edilmesinde Şekil 31'de bulunan Duffing Pspice modeli kullanılarak anlatılmıştır. Şekil 31'de bulunan devrenin giriş kısmına frekansı 1,7 rad/sn, genliği 0.1 Volt olan bir sinüs sinyali verildiğinde buna karşılık gelen çıkış sinyali Şekil 34'de verilmektedir.



Şekil 34. Örnek bir giriş sinyali ve ona karşılık gelen çıkış sinyali

Şekil 34'e göre eğer kazanç ve faz farkı hesaplanmak istenirse, db cinsinden kazanç Eşitlik 69'da, derece cinsinden faz farkı ise Eşitlik 70'de verilmektedir. Eşitlik 70'de giriş sinyalinin bir periyotluk kısmının başlangıcı 7,4 saniye, bitişi 11,11 saniyedir. Çıkış sinyalinin başlangıcı ise 8,15 saniyedir.

$$Kazanç(db) = 20 \log_{10} \frac{V_{cikis}}{V_{giris}} = 20 \log_{10} \frac{0,17}{0,1} = 4,6 \quad (69)$$

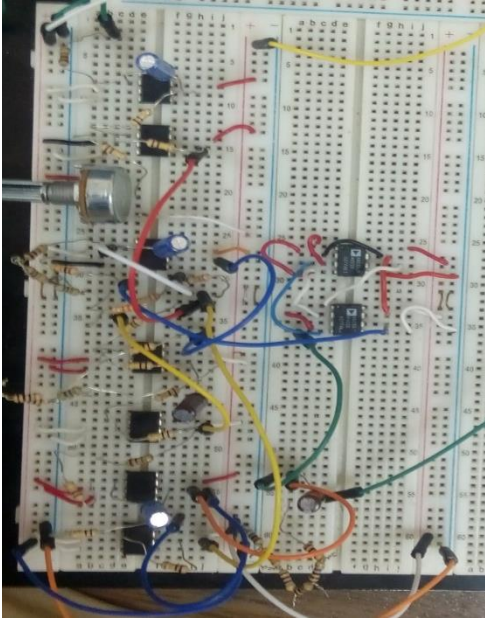
$$Fazfarkı(derece) = \frac{360(7,4 - 8,15)}{11,11 - 7,4} = -72,7 \quad (70)$$

3.6.4 Deneysel Elektronik Devre Tasarımıyla Frekans Cevabı Elde Edilmesi

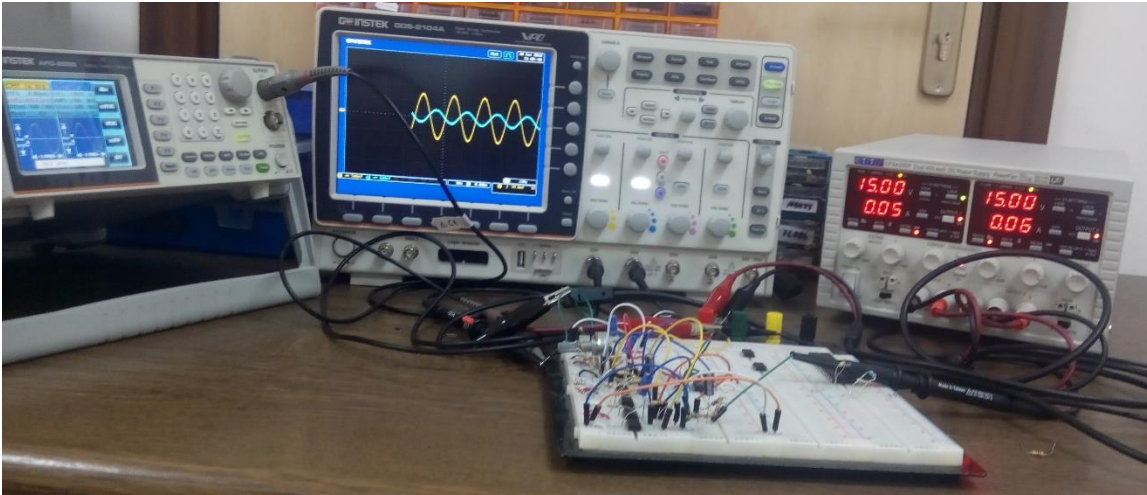
Doğrusal olmayan sistemlerin elektronik devre tasarımı ile frekans cevaplarını bulmak için Pspice programında tasarlanan devreler deneysel olarak gerçekleştirilir. Bölüm 3.6.3'de anlatılan, belirlenen 3 doğrusal olmayan sistemde elektronik devre tasarımına uygun modelleme yapıp kullanılan elektronik malzemeler direnç, kondansatör değer hesaplarından sonra deneysel olarak gerçekleştirilir.

3.6.4.1 Sistem 1'in Deneysel Olarak Frekans Cevabının Bulunması

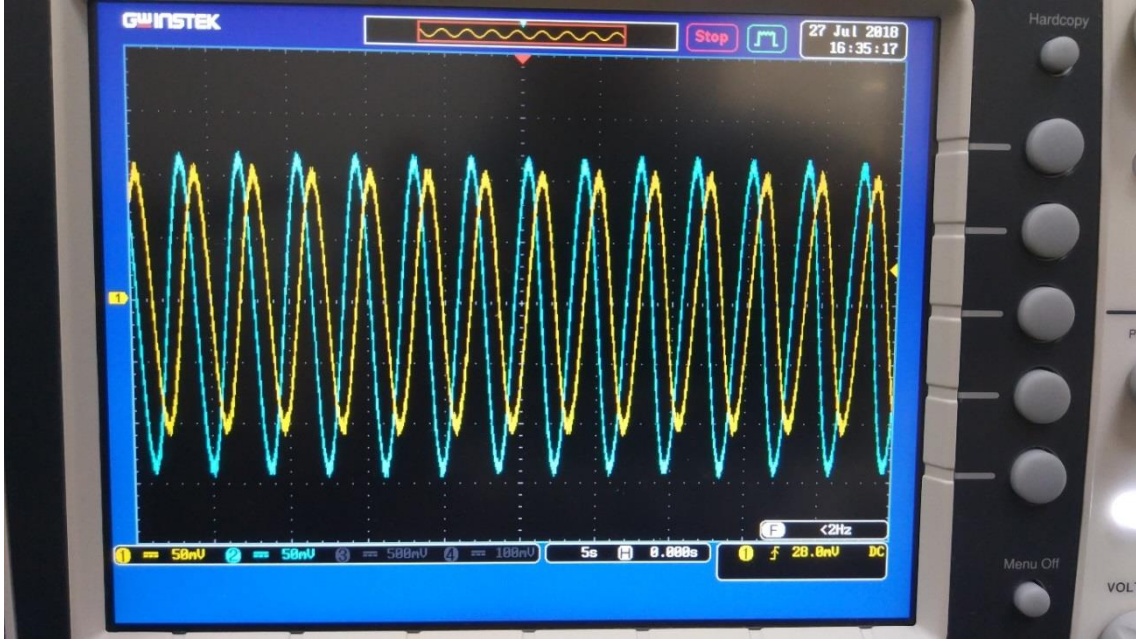
Şekil 31'de bulunan sistem 1'in Pspice simülasyon devresi, board üzerinde gerçekleyerek deneysel sonuçlar ile frekans cevabı bulunmuştur. Gerçekleştirilen devre Şekil 35'te gösterilmiştir.



Şekil 35. Sistem 1 elektronik devresi



Şekil 36. Sistem 1 elektronik devresinden bir veri alınırken kullanılan deneysel düzenek

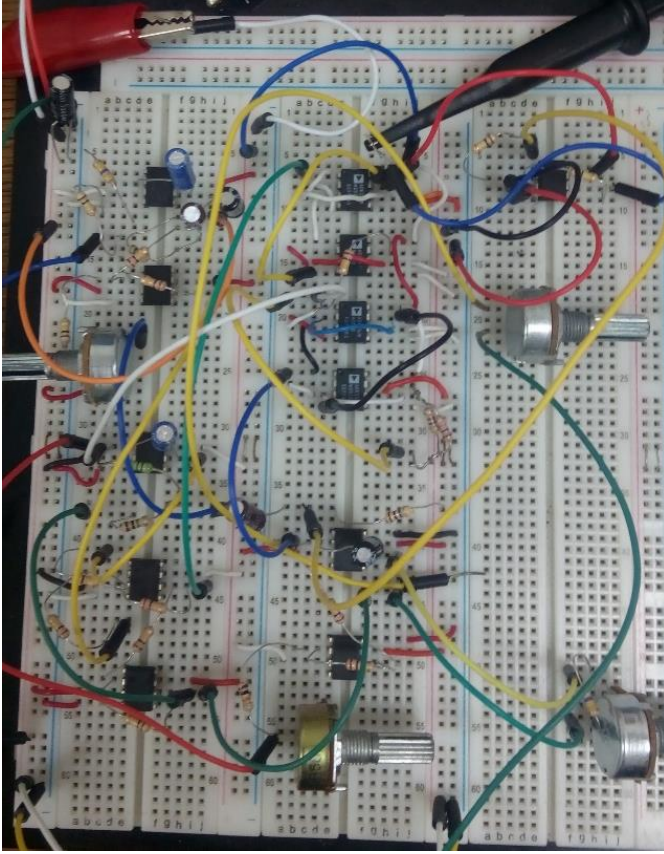


Şekil 37. Sistem 1 giriş sinyalini 0.1 V 1.7 rad/sn

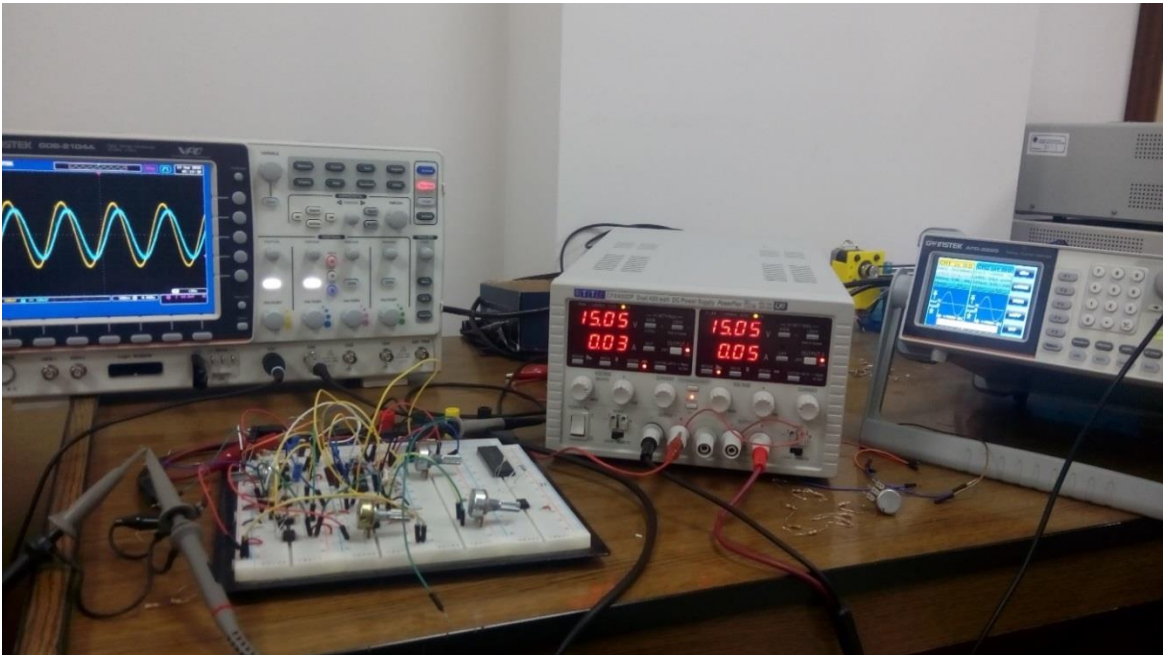
Şekil 36'da sistem 1'in elektronik devresi ve bazı malzemeler; güç kaynağı, osilatör ve osiloskop kullanılarak bir giriş değeri verildiğinde çıkış değerinin alınması gösterilmiştir. Şekil 37'de sarı renkli sinyal giriş sinyali iken, mavi renkli sinyal çıkış sinyalidir. Giriş sinyalinin tepeden tepeye değeri 0.2 V iken çıkış 0.3 V'a yakın bir değeri vermiştir. Eşitlik 69 kullanılarak sonucun yaklaşık 4.5 dB, Eşitlik 70 kullanılarak da faz farkının yaklaşık 80 derece olduğu görülmektedir.

3.6.4.2 Sistem 2'nin Deneysel Olarak Frekans Cevabının Bulunması

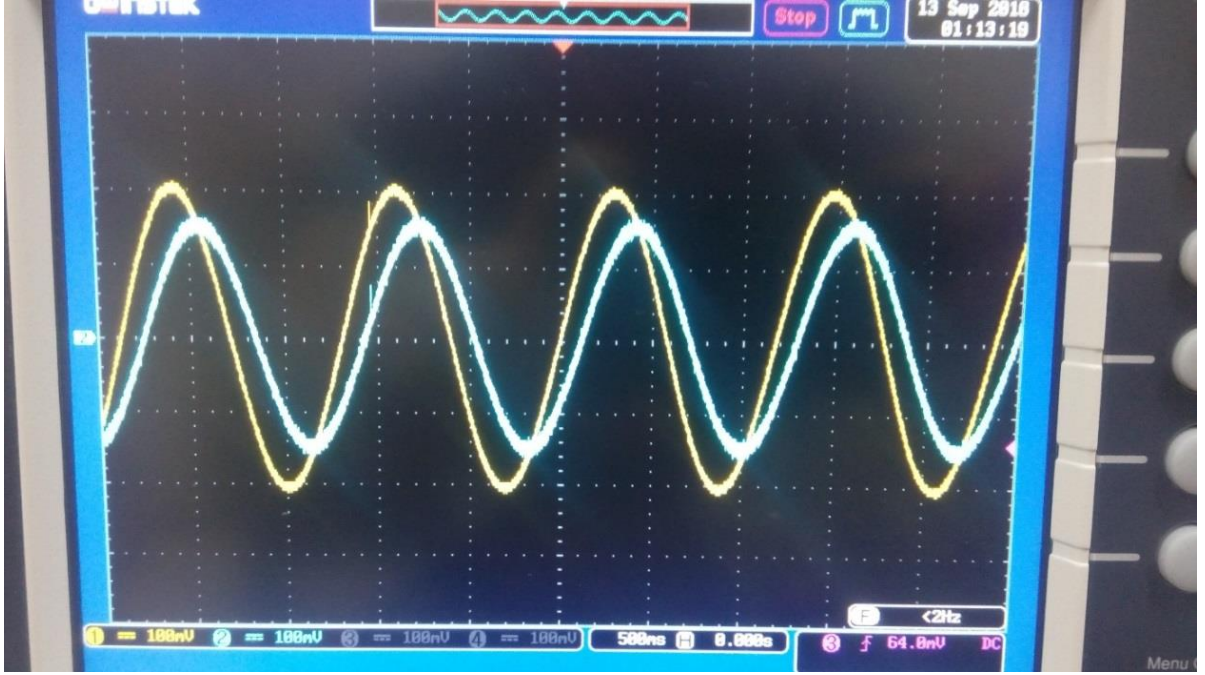
Şekil 32'de bulunan sistem 2'nin Pspice simülasyon devresi, board üzerinde gerçekleyerek deneysel sonuçlar ile frekans cevabı bulunmuştur. Gerçekleştirilen devre Şekil 38'te gösterilmiştir.



Şekil 38. Sistem 2 elektronik devresi



Şekil 39. Sistem 2 elektronik devresinden bir veri alınırken kullanılan deneysel düzenek

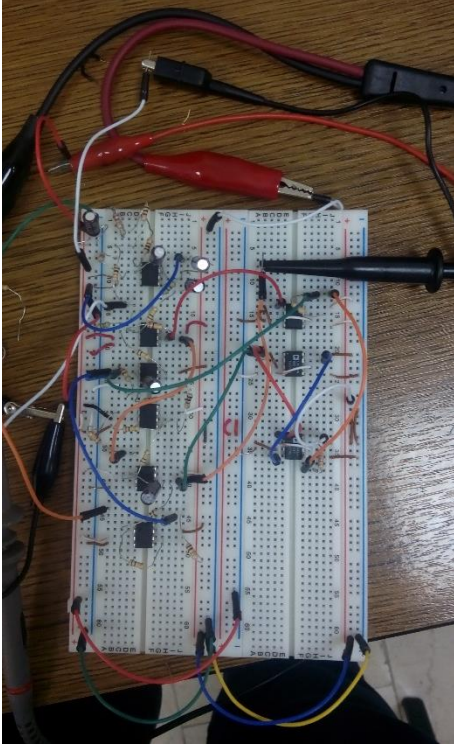


Şekil 40. Sistem 2 giriş sinyalini 0.2 V 5.2 rad/sn

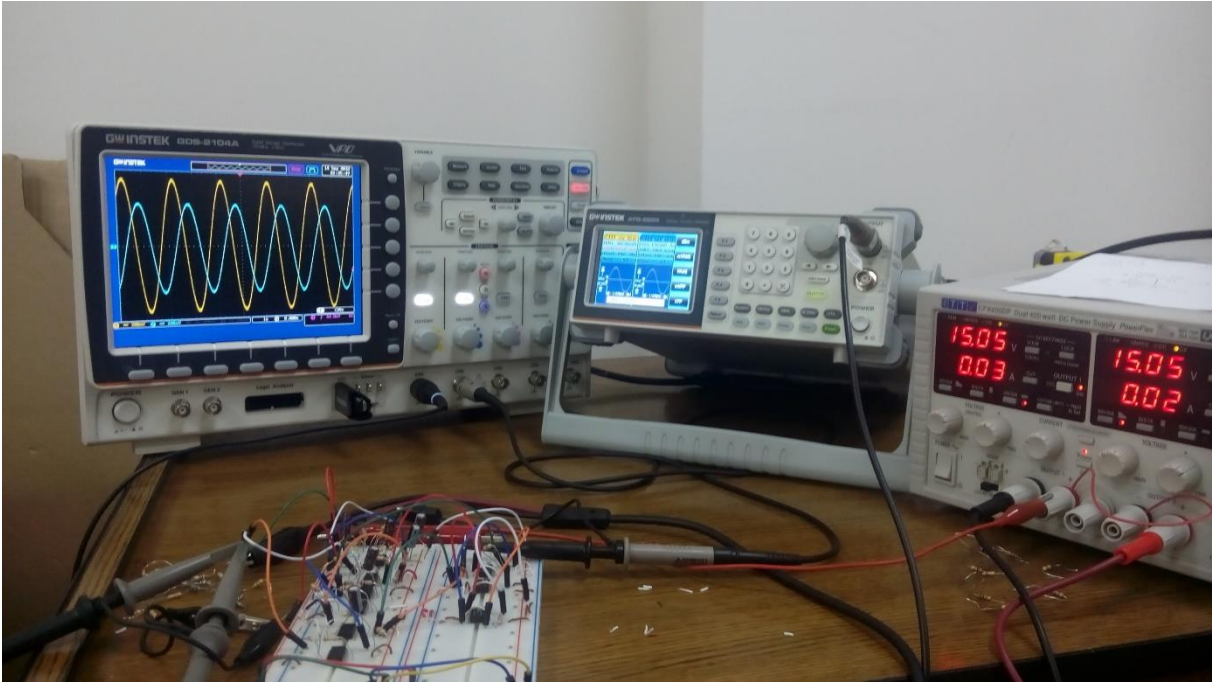
Şekil 39'da sistem 2'nin elektronik devresi ve bazı malzemeler; güç kaynağı, osilatör ve osilaskop kullanılarak bir giriş değeri verildiğinde çıkış değerinin alınması gösterilmiştir. Şekil 40'da sarı renkli sinyal giriş sinyali iken, mavi renkli sinyal çıkış sinyalidir. Giriş sinyalinin tepeden tepeye değeri 0.4 V iken çıkış 0.28 V'a yakın bir değeri vermiştir. Eşitlik 69 kullanılarak sonucun yaklaşık -3.8 db, Eşitlik 70 kullanılarak da faz farkının yaklaşık 30 derece olduğu görülmektedir.

3.6.4.3 Sistem 3'ün Deneysel Olarak Frekans Cevabının Bulunması

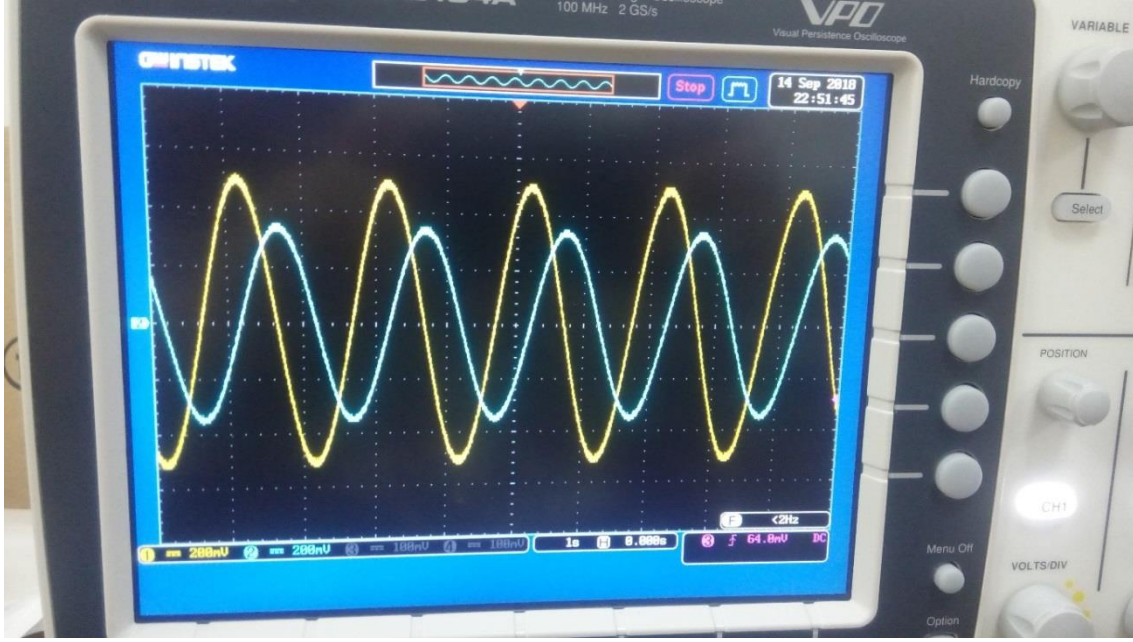
Şekil 33'de bulunan sistem 3'ün Pspice simülasyon devresi, board üzerinde gerçekleştirilerek deneysel sonuçlar ile frekans cevabı bulunmuştur. Gerçekleştirilen devre Şekil 41'de gösterilmiştir.



Şekil 41. Sistem 3 elektronik devresi



Şekil 42. Sistem 3 elektronik devresinden bir veri alınırken kullanılan deneysel düzenek



Şekil 43. Sistem 3 giriş sinyalini 0.5 V 3 rad/sn

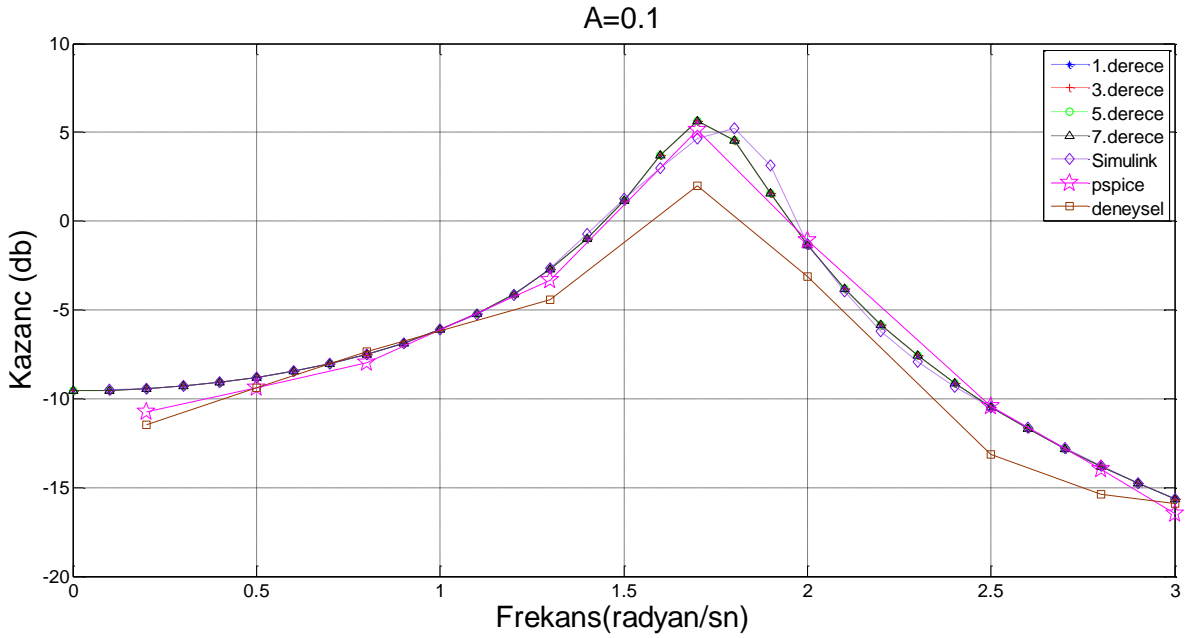
Şekil 42'de sistem 3'ün elektronik devresi ve bazı malzemeler; güç kaynağı, osilatör ve osilaskop kullanılarak bir giriş değeri verildiğinde çıkış değerinin alınması gösterilmiştir. Şekil 40'da sarı renkli sinyal giriş sinyali iken, mavi renkli sinyal çıkış sinyalidir. Giriş sinyalinin tepeden tepeye değeri 1 V iken çıkış 0.38 V'a yakın bir değeri vermiştir. Eşitlik 69 kullanılarak sonucun yaklaşık -2 db, Eşitlik 70 kullanılarak da faz farkının yaklaşık 50 derece olduğu görülmektedir.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

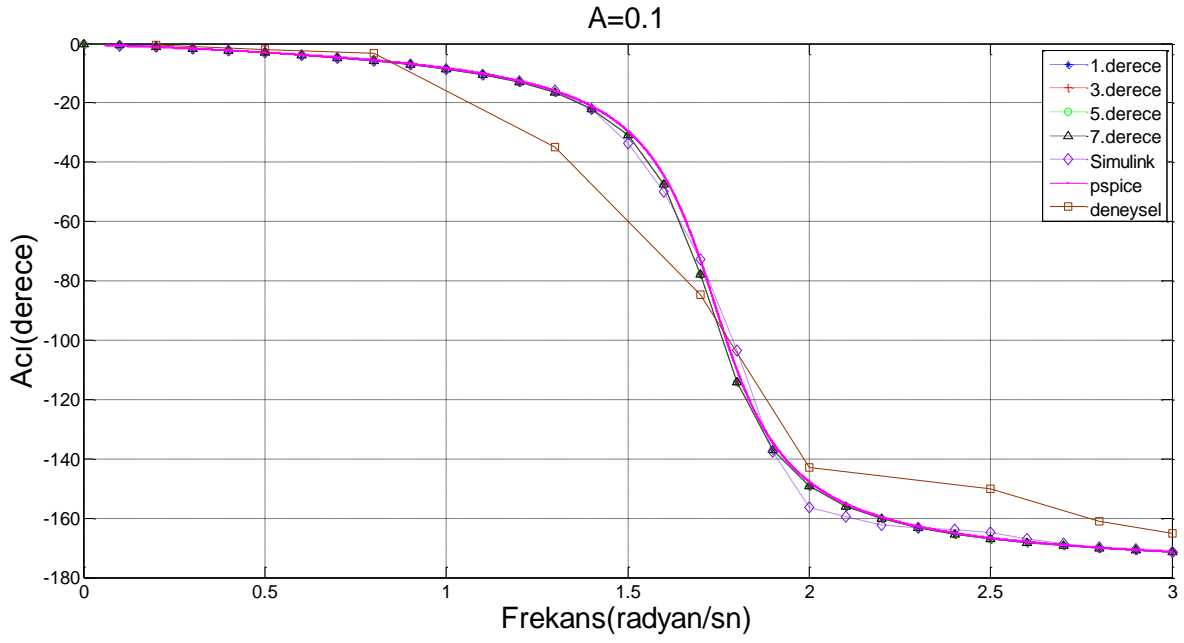
4.1 Arayüz, Simulink, Pspice ve Deneysel Sonuçların Karşılaştırılması

4.1.1 Sistem 1 Frekans Cevapları

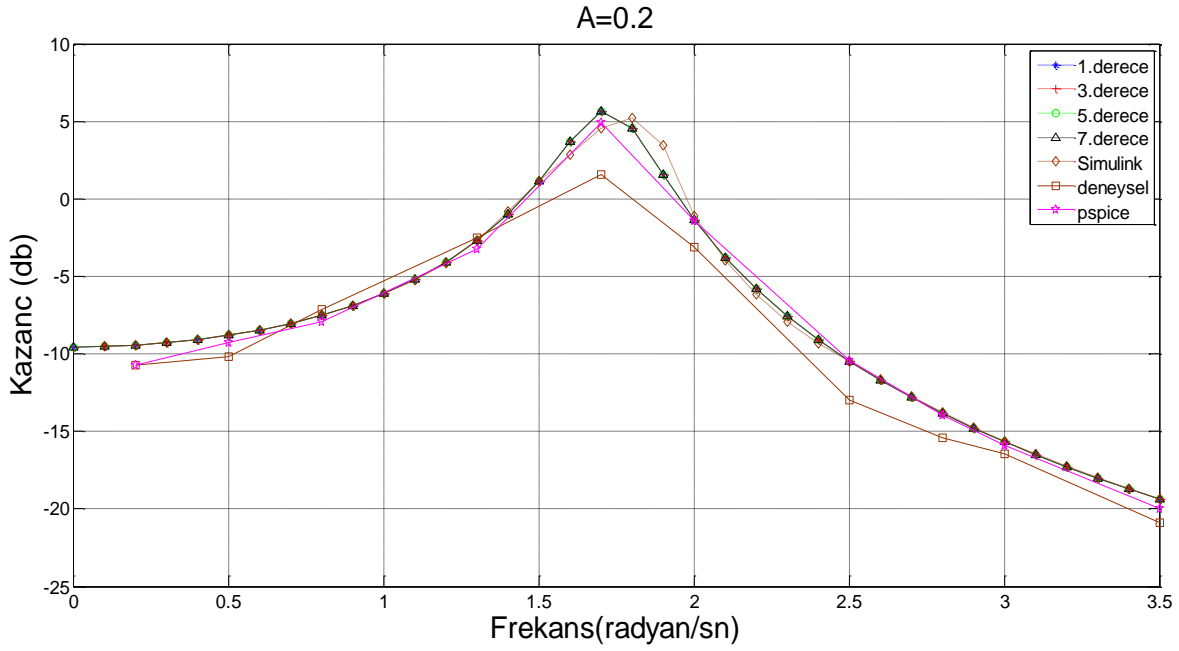
Tasarlanan arayüzde tanımlama fonksiyonu kullanılarak, MATLAB Simulink'de, Pspice elektronik devre tasarlama programında ve deneysel elektronik devrelerden elde edilen frekans cevapları Şekil 44-51 arasında verilmiştir. Bu şekillerde 0.1 V, 0.2 V, 0.3 V ve 0.5 V giriş sinyalinin genliklerine göre ve 0.1 rad/sn ile 3 rad/sn değerleri arasındaki giriş sinyalinin frekanslarına göre verilmiştir. Grafiklere bakıldığında, giriş sinyali yaklaşık 1,7 rad/sn frekans değeri aldığıda frekans cevapları sonucu o değerde rezonansa girmektedir. Kazanç değeri rezonans değerine kadar yükselirken sonrasında üstel olarak azalmaya başlamıştır. Faz açısı değeri ise rezonans değerinden sonra giriş ile çıkış sinyali arasındaki derece farkının daha da fazla olduğu görülmektedir.



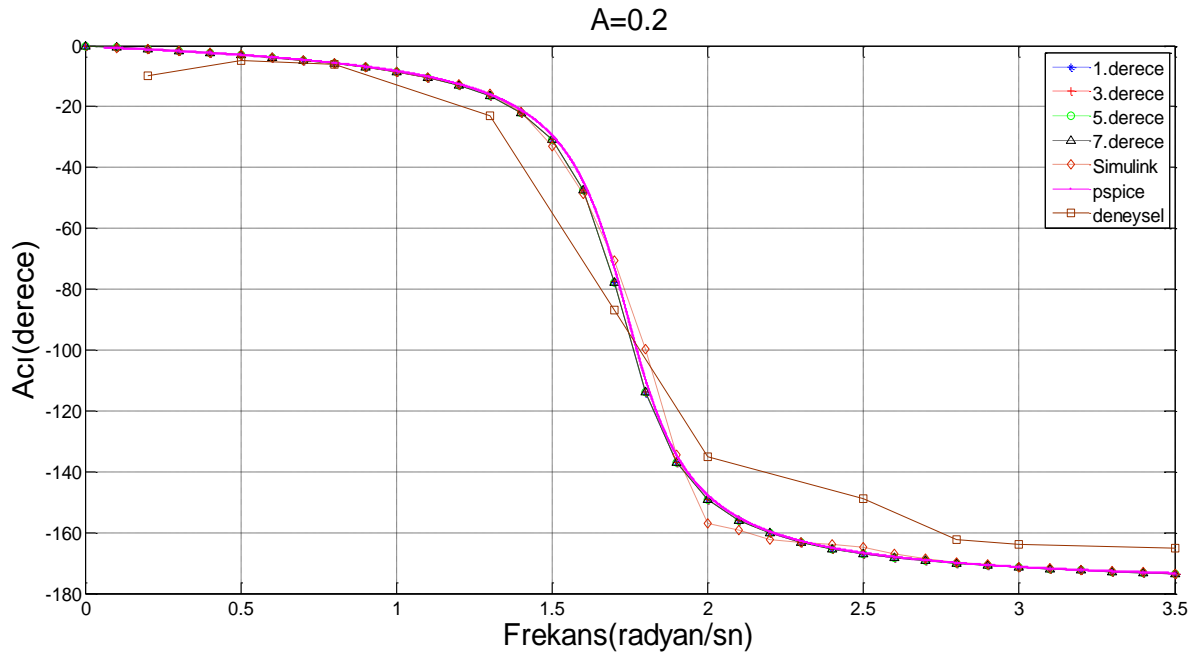
Şekil 44. Sistem 1 giriş sinyalinin genliği 0.1V iken kazanç grafiği



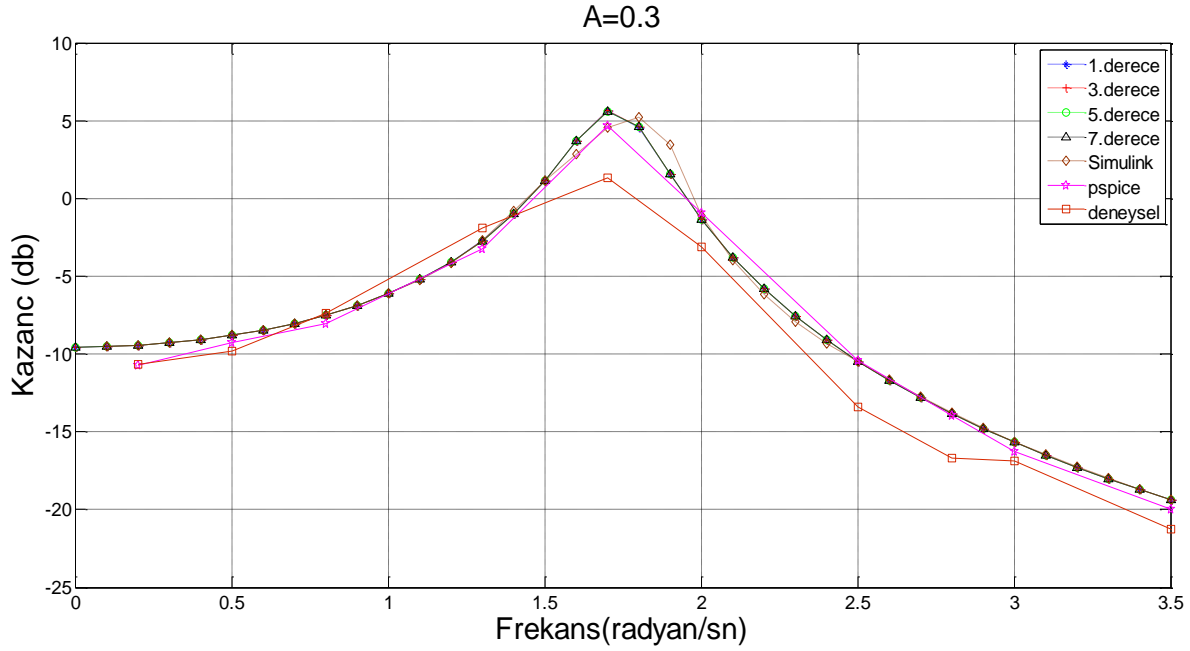
Şekil 45. Sistem 1 giriş sinyalinin genliği 0.1V iken faz farkı grafiği



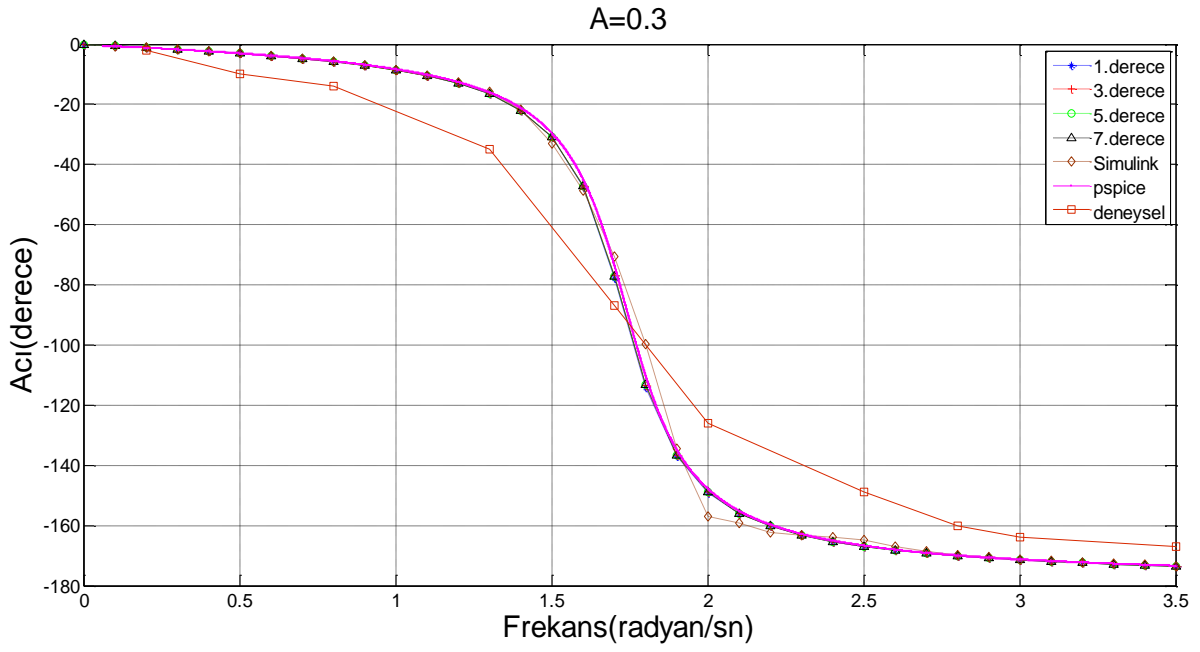
Şekil 46. Sistem 1 giriş sinyalinin genliği 0.2V iken kazanç grafiği



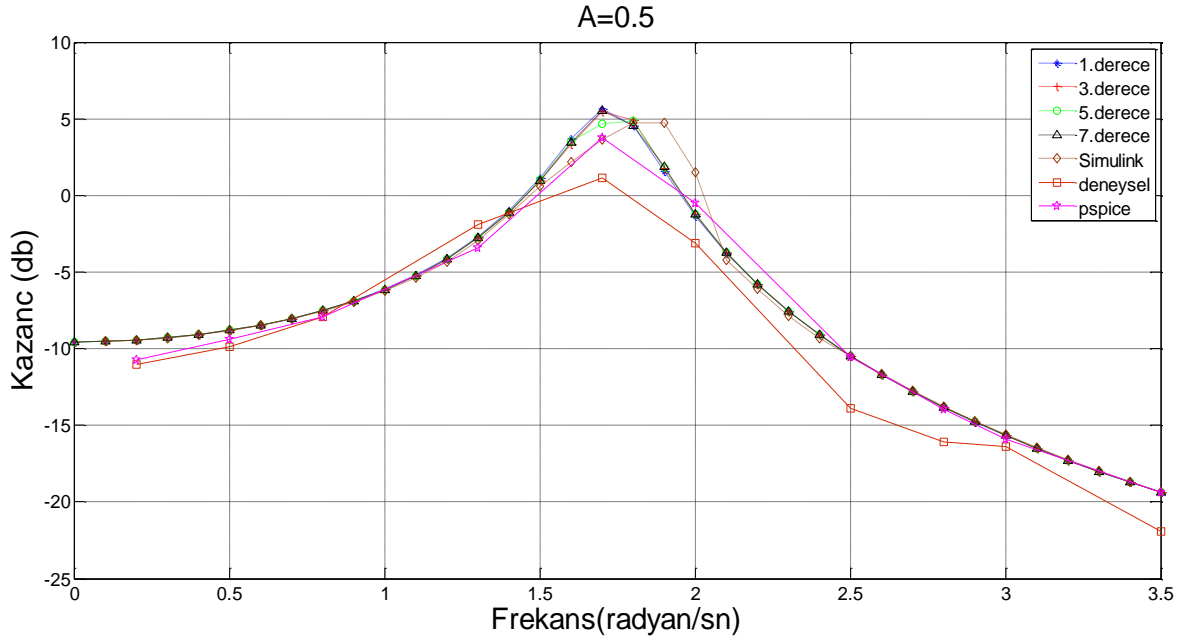
Şekil 47. Sistem 1 giriş sinyalinin genliği 0.2V iken faz farkı grafiği



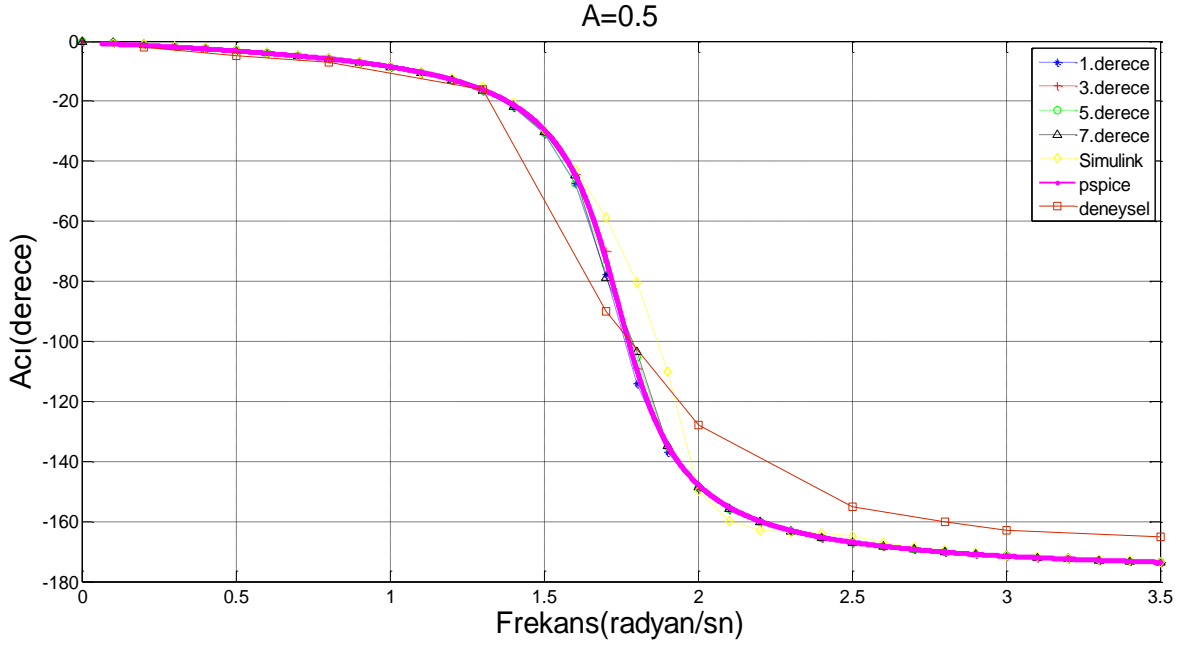
Şekil 48. Sistem 1 giriş sinyalinin genliği 0.3V iken kazanç grafiği



Şekil 49. Sistem 1 giriş sinyalinin genliği 0.3V iken faz farkı grafiği



Şekil 50. Sistem 1 giriş sinyalinin genliği 0.5V iken kazanç grafiği

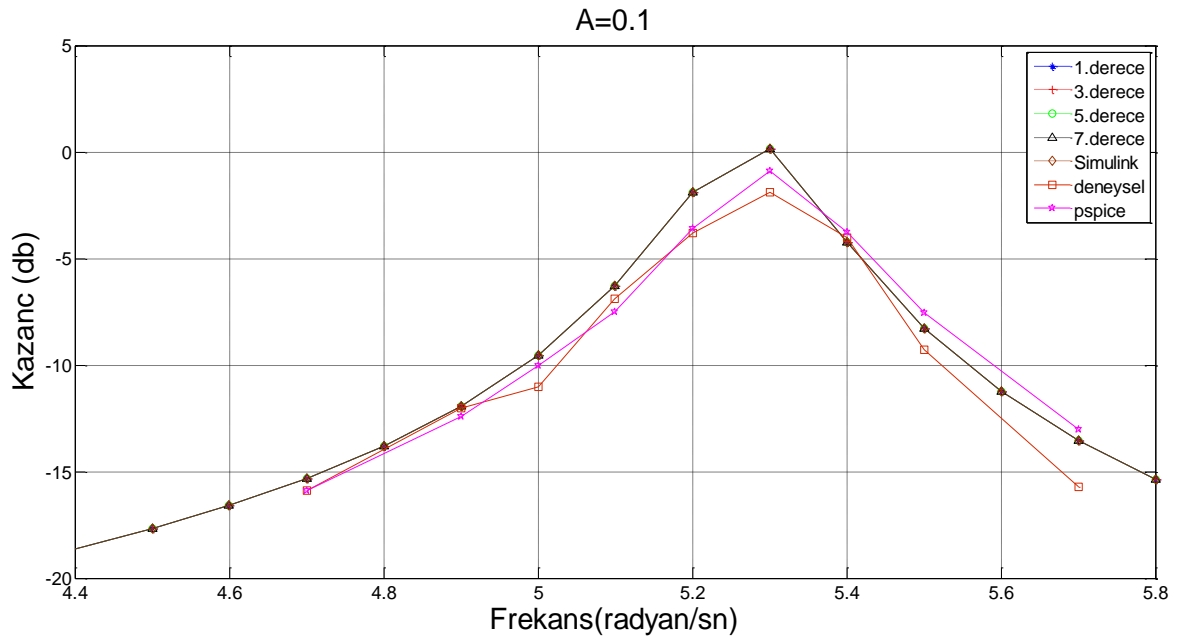


Şekil 51. Sistem 1 giriş sinyalinin genliği 0.5V iken faz farkı grafiği

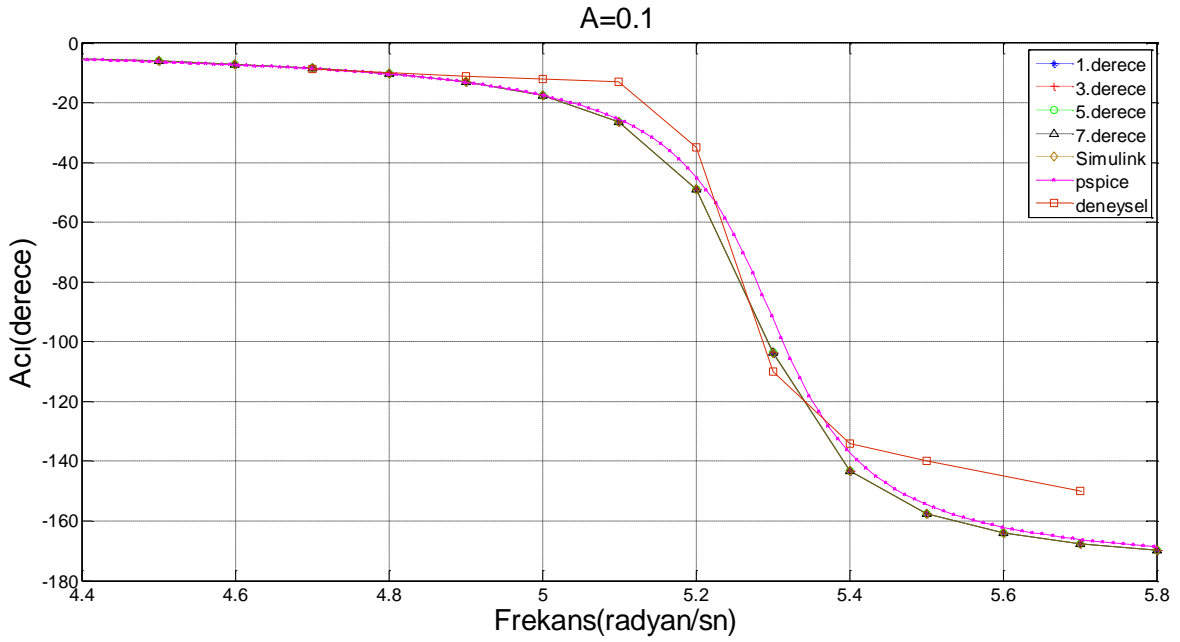
Şekillere bakıldığında, tasarlanan Arayüz yardımıyla elde edilen frekans cevapları, Simulink ve Pspice'dan ile deneysel elde edilen frekans cevapları rezonans değerleri haricinde neredeyse eşittir. Rezonans değerinde ise elde edilen frekans cevap değerleri birbirine çok yakın çıkmıştır. Aynı zaman giriş sinyalinin genliği arttıkça arayüzden bulunan yüksek dereceli tanımlama fonksiyon frekans cevap değerleri ile Simulink'ten elde edilen frekans cevap değerleri birbirinden uzaklaşmaktadır. Bunun da nedeni tanımlama fonksiyonunun giriş sinyalinin genliğine bağımlı olmasıdır.

4.1.2 Sistem 2 Frekans Cevapları

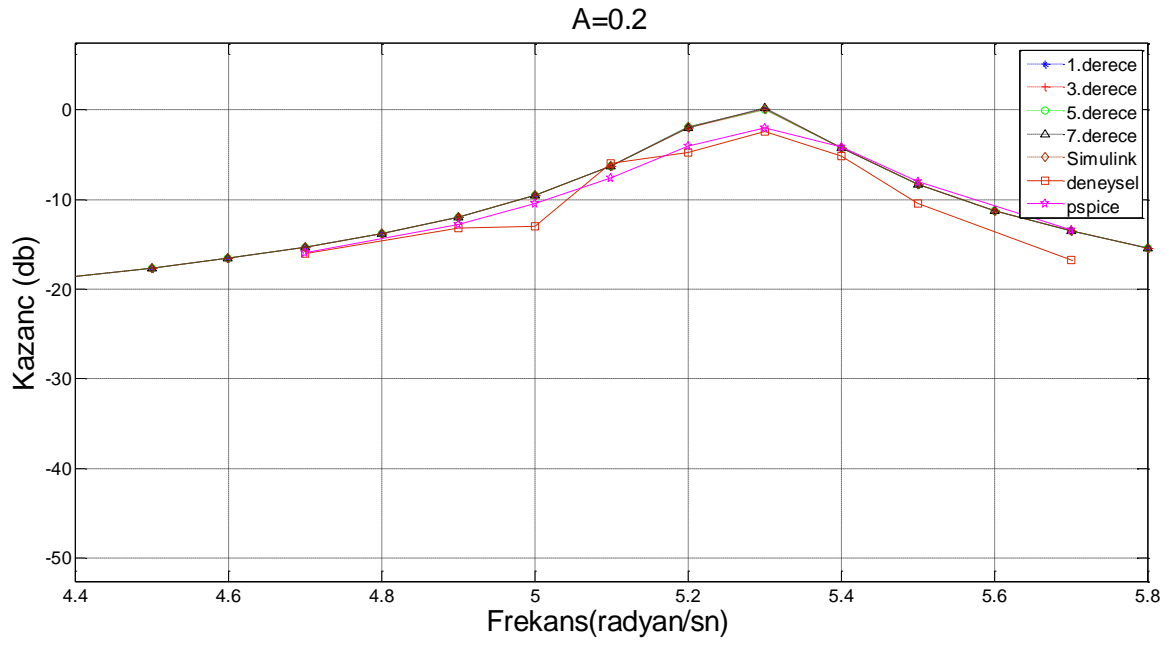
Tasarlanan arayüzde tanımlama fonksiyonu kullanılarak, MATLAB Simulink'de, Pspice elektronik devre tasarlama programında ve deneysel elektronik devrelerden elde edilen frekans cevapları Şekil 52-59 arasında verilmiştir. Bu şekillerde 0.1 V, 0.2 V, 0.3 V ve 0.5 V giriş sinyalinin genliklerine göre ve 4,4 rad/sn ile 5,8 rad/sn değerleri arasındaki giriş sinyalinin frekanslarına göre verilmiştir. Grafiklere bakıldığında, giriş sinyali yaklaşık 5,3 rad/sn frekans değeri aldığıında frekans cevapları sonucu o değerde rezonansa girmektedir. Kazanç değeri rezonans değerine kadar yükselirken sonrasında üstel olarak azalmaya başlamıştır. Faz açısı değeri ise rezonans değerinden sonra giriş ile çıkış sinyali arasındaki derece farkının daha da fazla olduğu görülmektedir.



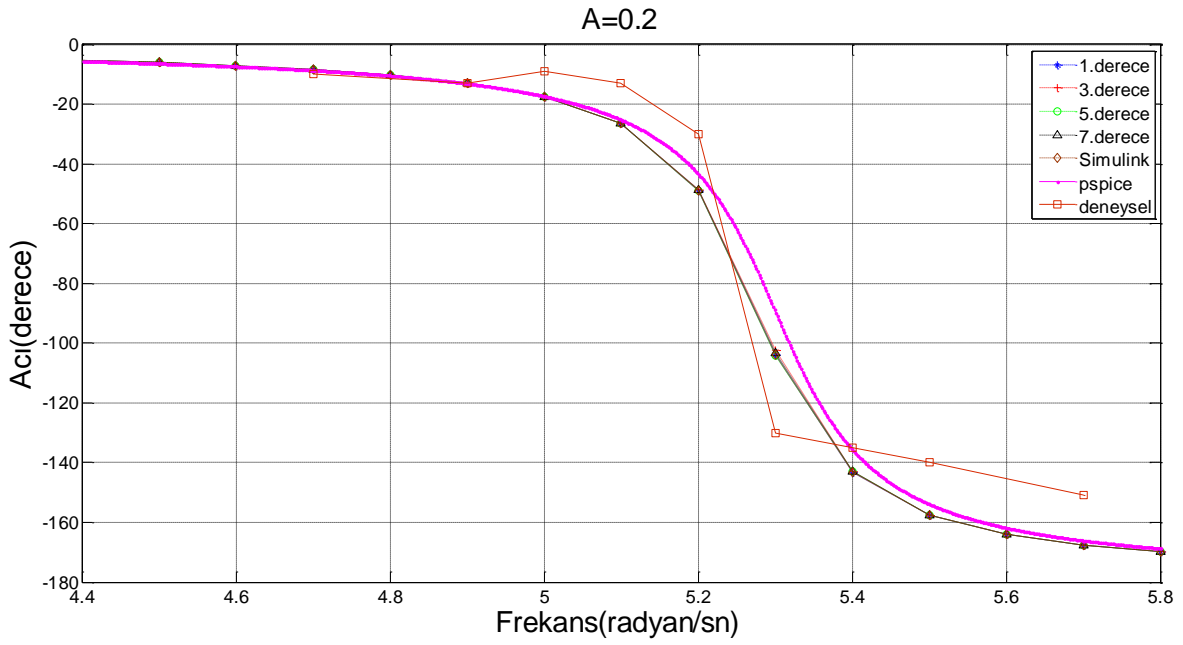
Şekil 52. Sistem 2 giriş sinyalinin genliği 0.1V iken kazanç grafiği



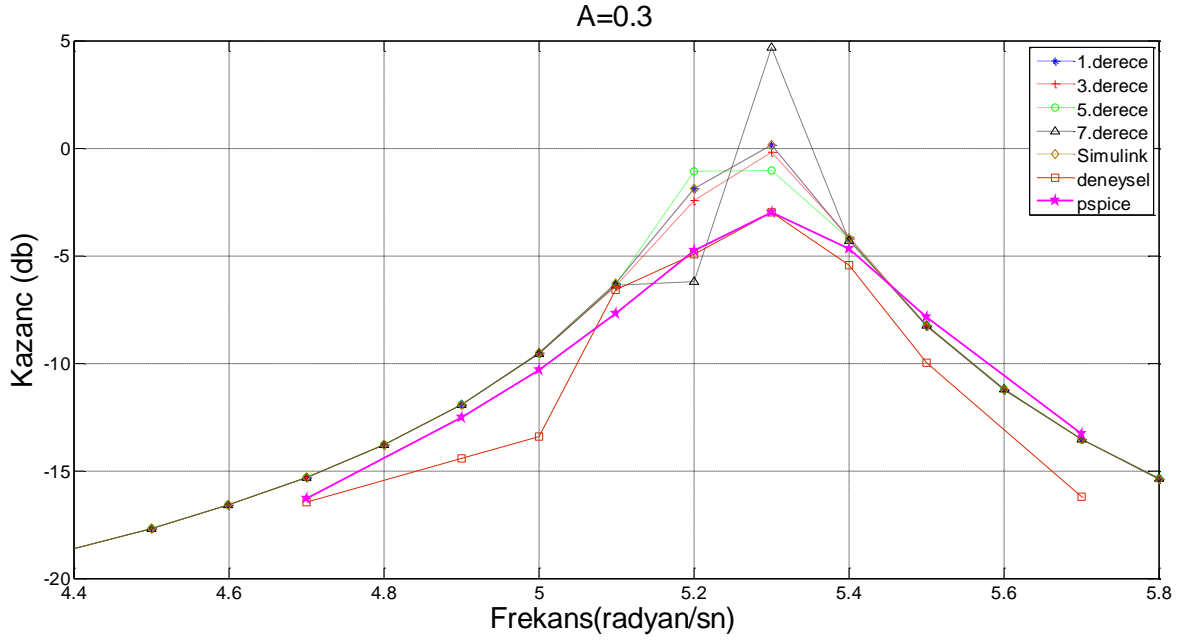
Şekil 53. Sistem 2 giriş sinyalinin genliği 0.1V iken faz farkı grafiği



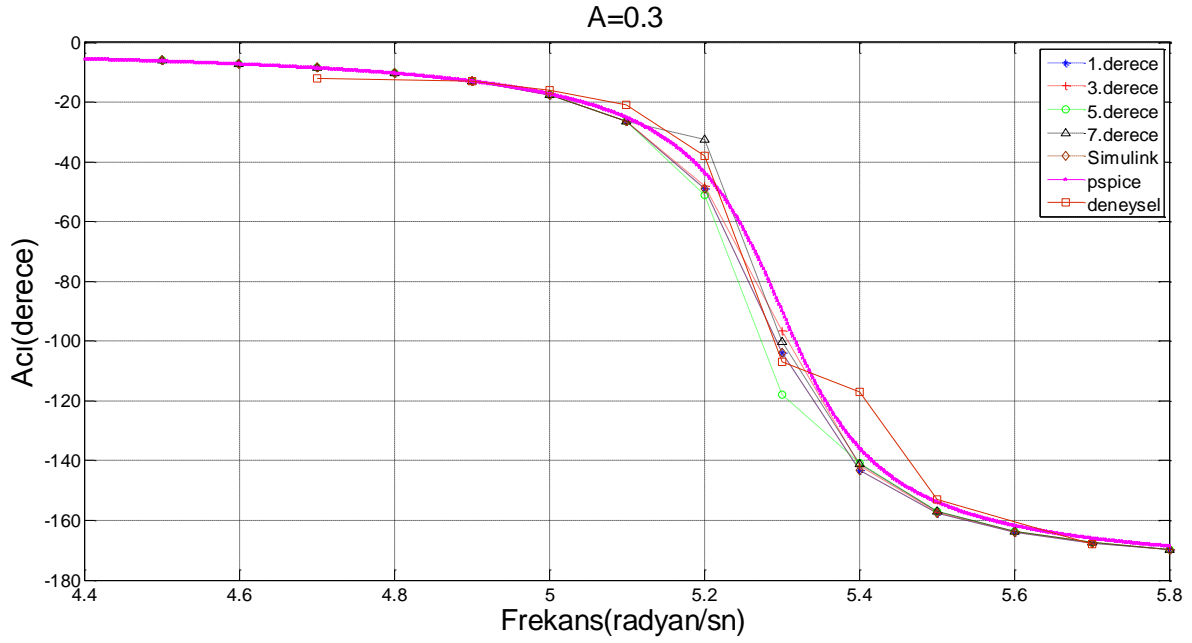
Şekil 54.Sistem 2 giriş sinyalinin genliği 0.2V iken kazanç grafiği



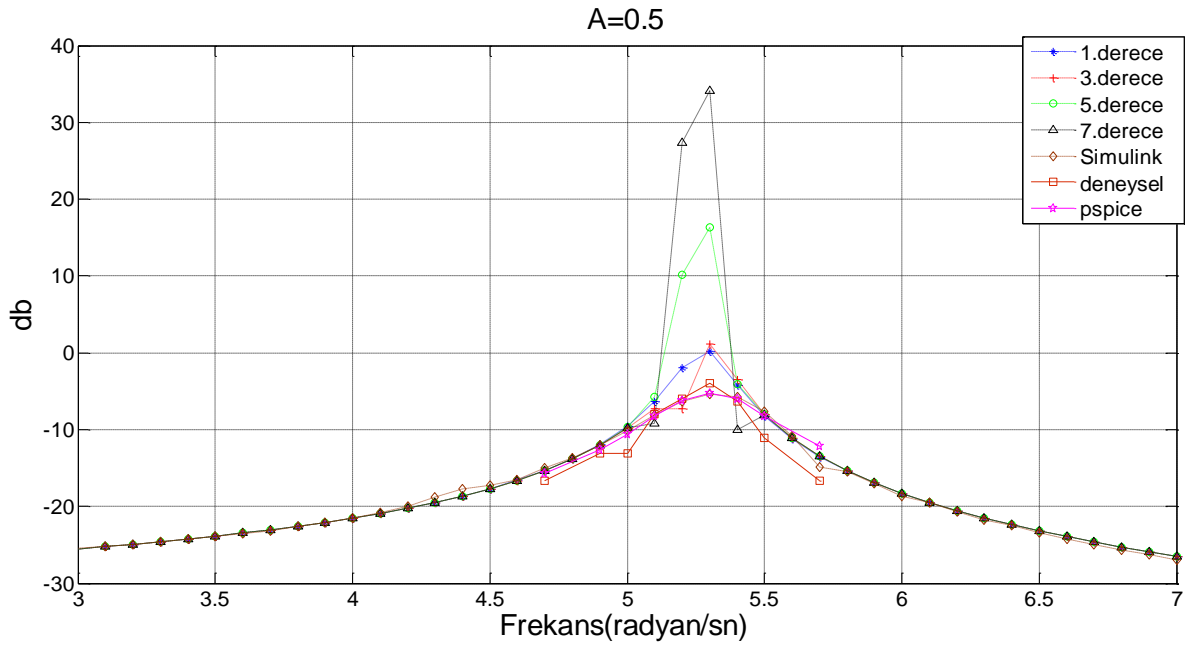
Şekil 55. Sistem 2 giriş sinyalinin genliği 0.2V iken faz farkı grafiği



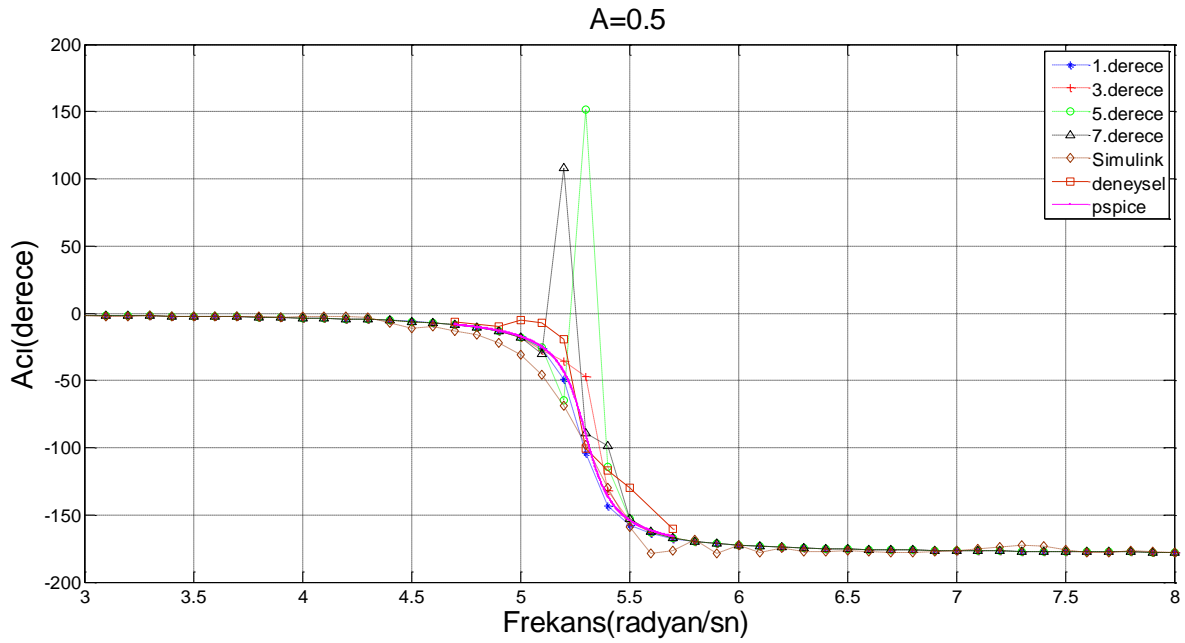
Şekil 56. Sistem 2 giriş sinyalinin genliği 0.3V iken kazanç grafiği



Şekil 57. Sistem 2 giriş sinyalinin genliği 0.3V iken faz farkı grafiği



Şekil 58. Sistem 2 giriş sinyalinin genliği 0.5V iken kazanç grafiği



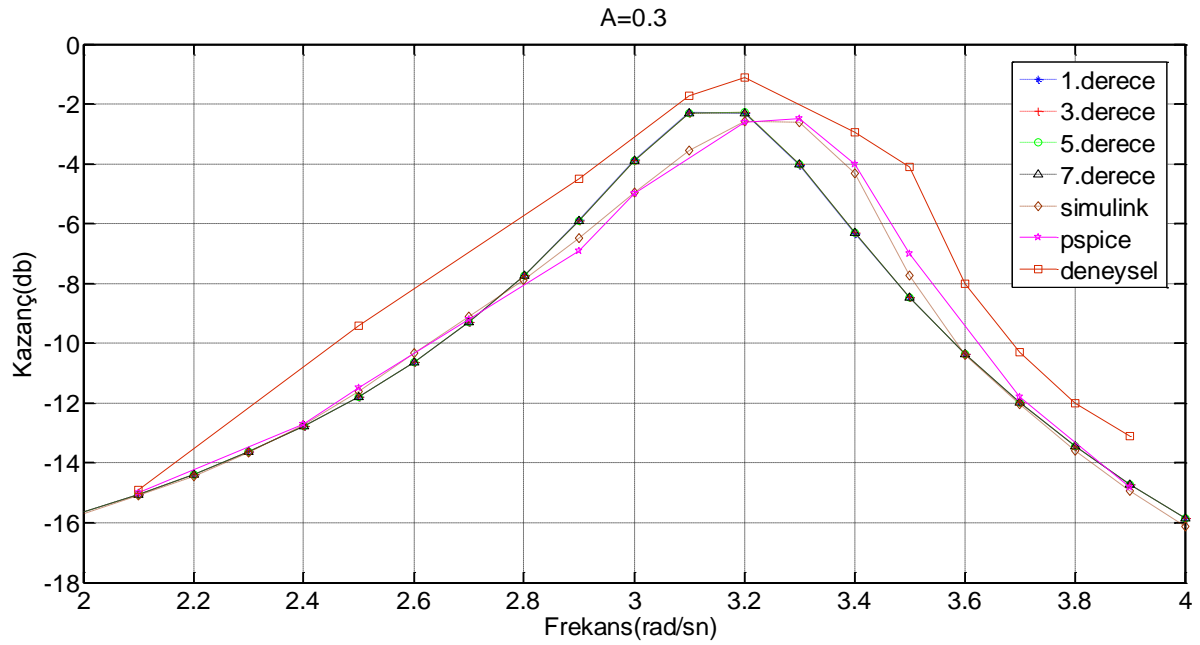
Şekil 59. Sistem 2 giriş sinyalinin genliği 0.5V iken faz farkı grafiği

Şekillere bakıldığında, tasarlanan Arayüz yardımıyla elde edilen frekans cevapları, Simulink ve Pspice'dan ile deneysel elde edilen frekans cevapları rezonans değerleri haricinde neredeyse eşittir. Rezonans değerinde ise elde edilen frekans cevap değerleri birbirine çok yakın çıkmıştır. Aynı zaman giriş sinyalinin genliği arttıkça arayüzden bulunan yüksek dereceli tanımlama fonksiyon frekans cevap değerleri ile Simulink'ten elde edilen frekans

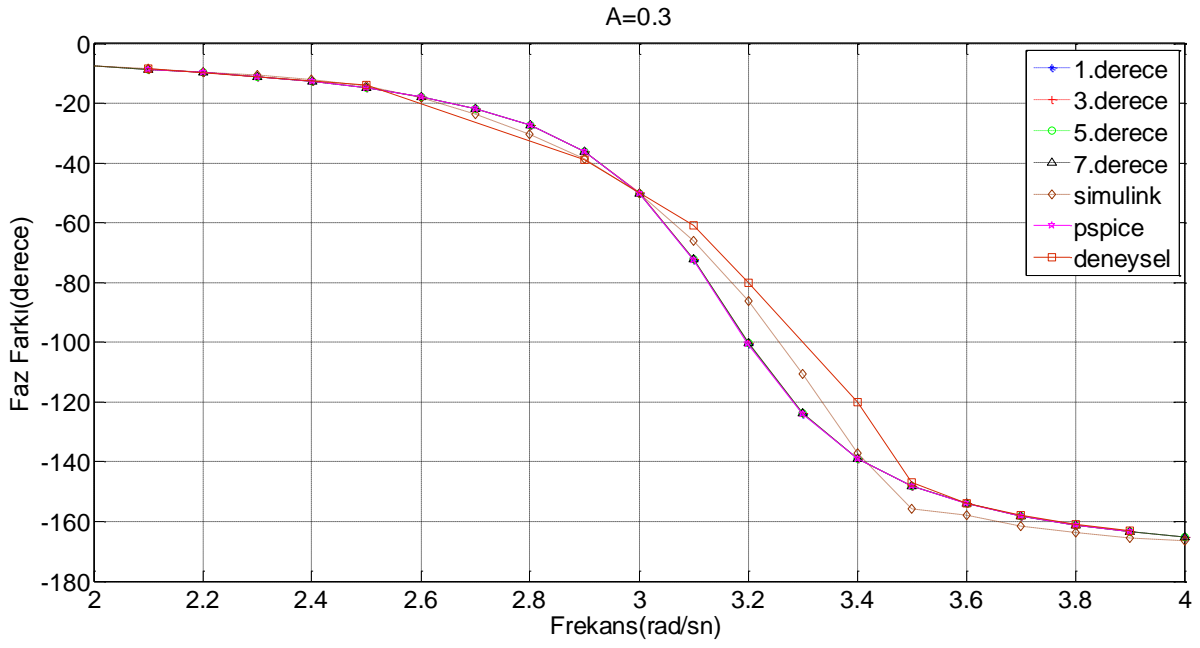
cevap değerleri birbirinden uzaklaşmaktadır. Bunun da nedeni tanımlama fonksiyonunun giriş sinyalinin genliğine bağımlı olmasıdır.

4.1.3 Sistem 3 Frekans Cevapları

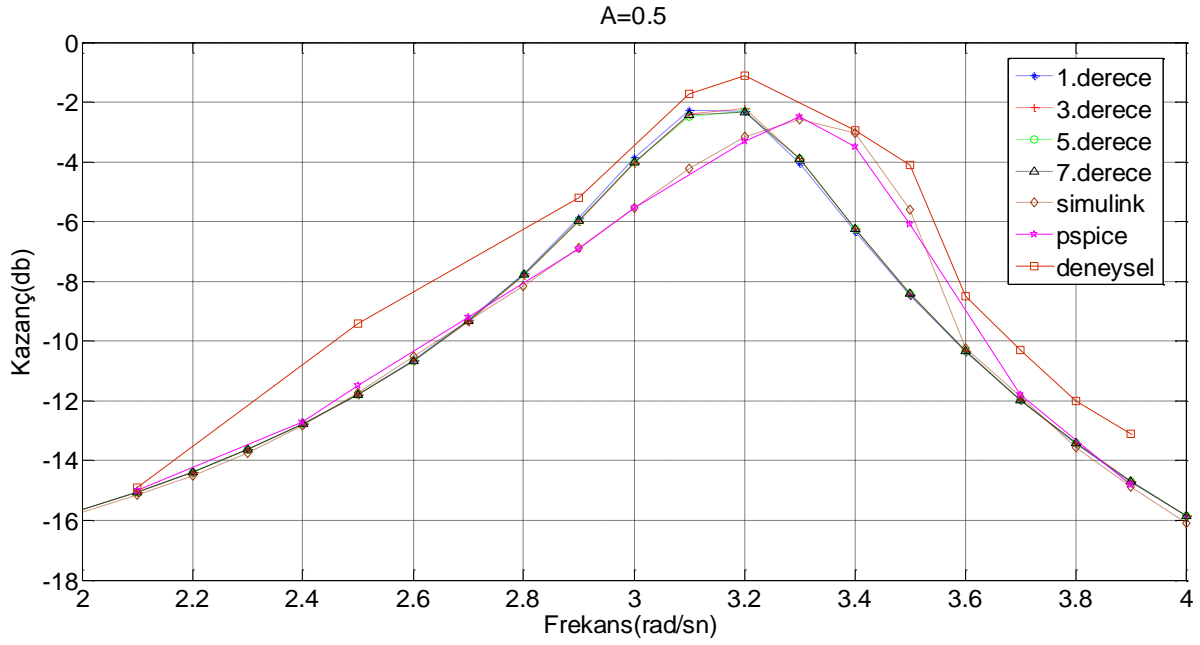
Tasarlanan arayüzde tanımlama fonksiyonu kullanılarak, MATLAB Simulink'de, Pspice elektronik devre tasarlama programında ve deneysel elektronik devrelerden elde edilen frekans cevapları Şekil 60-65 arasında verilmiştir. Bu şekillerde 0.3 V, 0.5 V ve 0.7 V giriş sinyalinin genliklerine göre ve 2 rad/sn ile 4 rad/sn değerleri arasındaki giriş sinyalinin frekanslarına göre verilmiştir. Grafiklere bakıldığında, giriş sinyali yaklaşık 3,2 rad/sn frekans değeri aldığıında frekans cevapları sonucu o değerde rezonansa girmektedir. Kazanç değeri rezonans değerine kadar yükselirken sonrasında üstel olarak azalmaya başlamıştır. Faz açısı değeri ise rezonans değerinden sonra giriş ile çıkış sinyali arasındaki derece farkının daha da fazla olduğu görülmektedir.



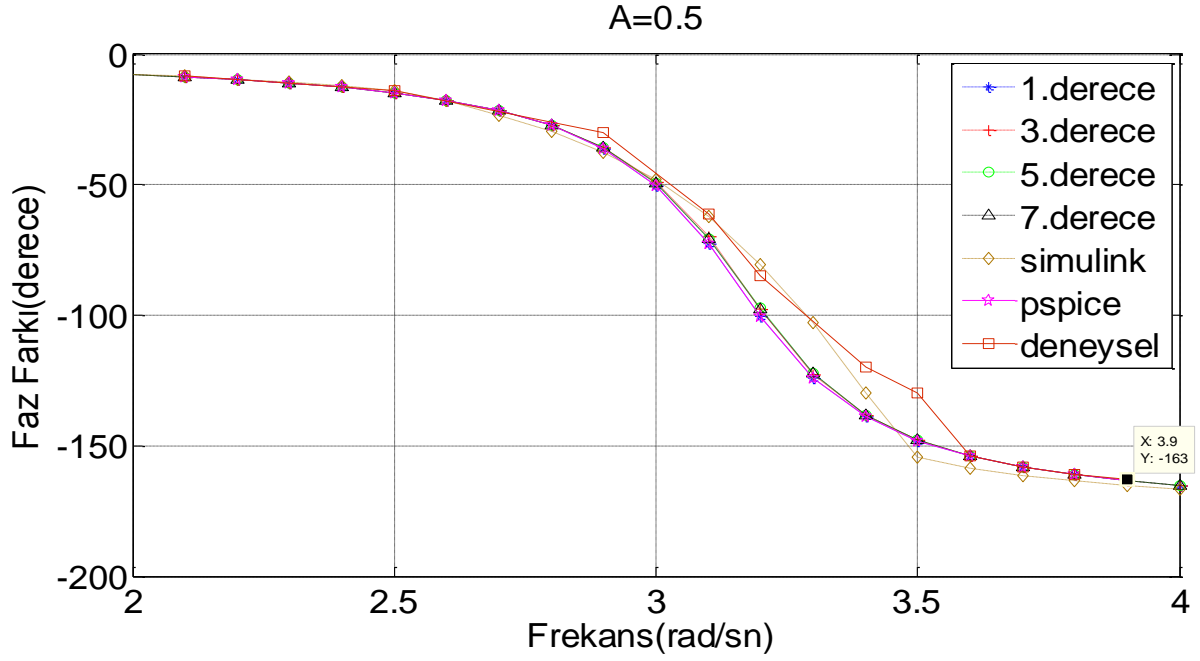
Şekil 60. Sistem 3 giriş sinyalinin genliği 0.3V iken kazanç grafiği



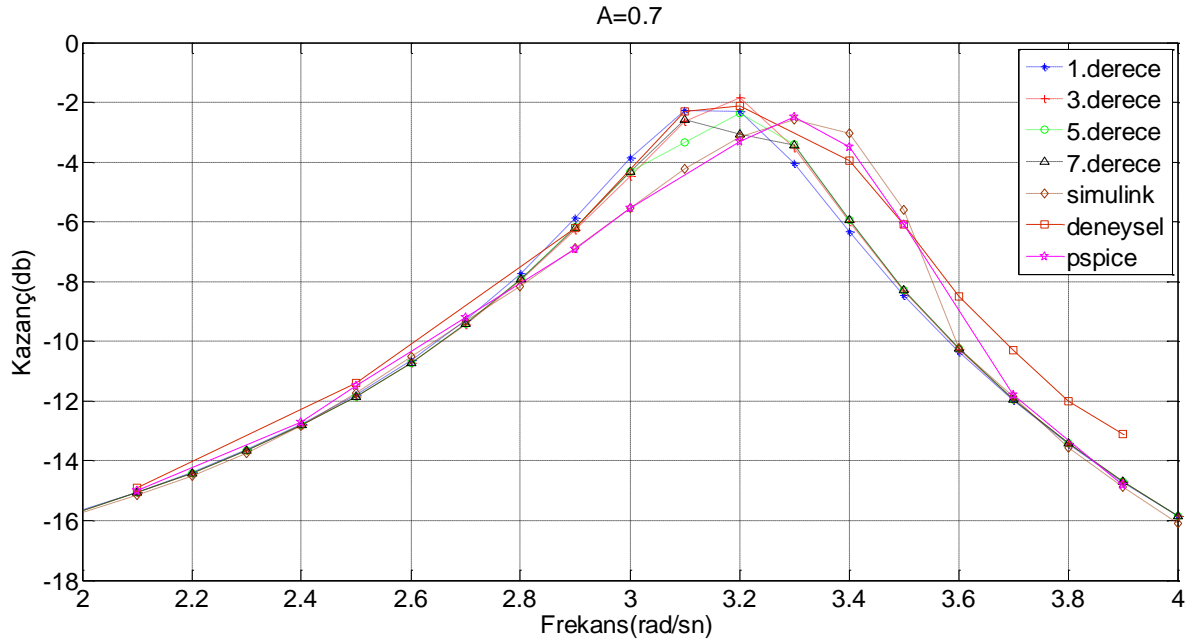
Şekil 61. Sistem 3 giriş sinyalinin genliği 0.3V iken faz farkı grafiği



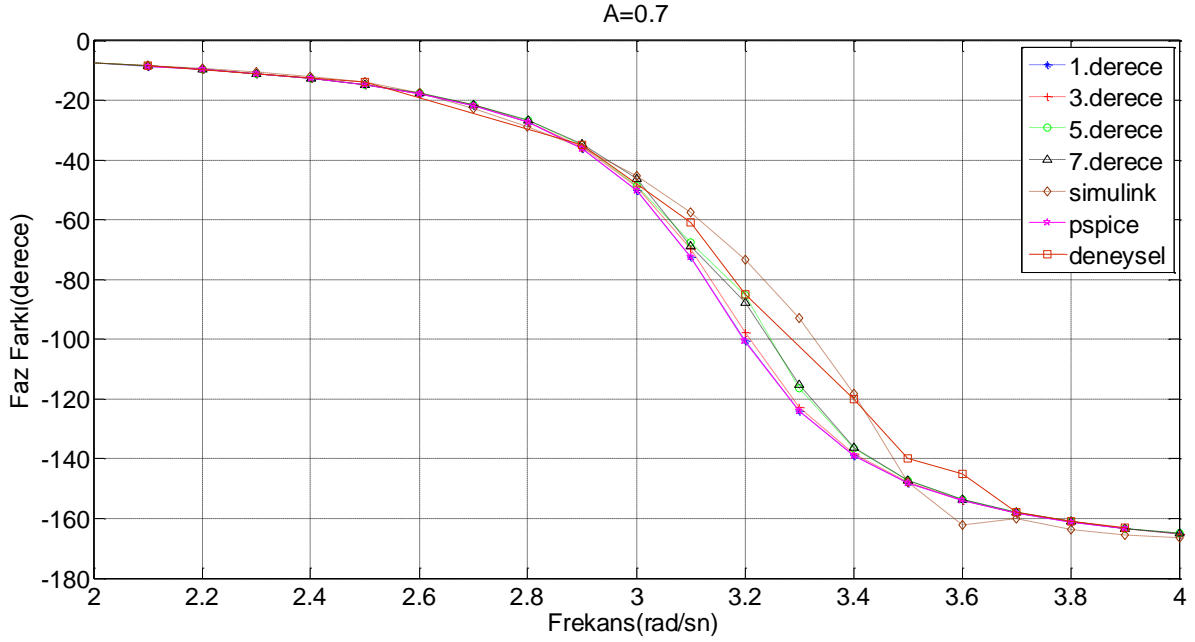
Şekil 62. Sistem 3 giriş sinyalinin genliği 0.5V iken kazanç grafiği



Şekil 63. Sistem 3 giriş sinyalinin genliği 0.5V iken faz farkı grafiği



Şekil 64. Sistem 3 giriş sinyalinin genliği 0.7V iken kazanç grafiği



Şekil 65. Sistem 3 giriş sinyalinin genliği 0.7V iken faz farkı grafiği

Şekillere bakıldığında, tasarlanan Arayüz yardımıyla elde edilen frekans cevapları, Simulink ve Pspice'dan ile deneysel elde edilen frekans cevapları rezonans değerleri haricinde neredeyse eşittir. Rezonans değerinde ise elde edilen frekans cevap değerleri birbirine çok yakın çıkmıştır. Aynı zaman giriş sinyalinin genliği arttıkça arayüzden bulunan yüksek dereceli tanımlama fonksiyon frekans cevap değerleri ile Simulink'ten elde edilen frekans cevap değerleri birbirinden uzaklaşmaktadır. Bunun da nedeni tanımlama fonksiyonunun giriş sinyalinin genliğine bağımlı olmasıdır.

4.2 Çok Çekirdekli Paralel Hesaplama İçin Maliyet, Hızlanma ve Verim Değerlerinin İncelenmesi

4.2.1 Sistem 1'in Çok Çekirdekli Çalışmada Hızlanma, Verim Oranları ve Maliyetleri

Tablo 5, 6, 7 ve 8'de Sistem 1 için belirlenen süreler görülmektedir. Tablo 5'de tek işlem birimi kullanılarak sıralı hesaplama için harcanan süreler ile Tablo 6'de iki işlem birimi, Tablo 7'de dört işlem birimi ve Tablo 8'de sekiz işlem birimi ile paralel hesaplama için harcanan süreler bulunmaktadır. Bu tablolardaki süreler kullanılarak Eşitlik 38'deki formül ile hızlanma oranları hesaplanmış ve Şekil 66'da iki işlem birimi, Şekil 67'de dört işlem birimi ve Şekil 68'de 8 işlem birimi için hızlanma oranları grafiksel olarak sunulmuştur. Şekil 66, 67, ve 68 incelendiğinde hesaplanan hızlanma oranlarının, proje başvuru formunda İP-3 için verilen "Kullanılan her işlem birimi için en az %5 daha hızlı hesaplama" kriterini fazlasıyla sağladığı

görülmektedir. Bu grafiklerdeki işlem birimi başına en düşük hızlanma oranı Şekil 68'de 8 işlem biriminin kullanıldığı, 8 frekans değeri için 1. ve 5. Derece Tanımlama Fonksiyonlarının hesaplandığı işlemlerdir. Bu işlemlerde işlem birimi başına hızlanma oranı yaklaşık %18 olarak tespit edilmiştir. Bu oran diğer hesaplamalarda giderek artmış ve Şekil 34'deki 8 işlem biriminin kullanıldığı, 320 frekans değeri için 7. Derece Tanımlama Fonksiyonunun hesaplandığı işlemde yaklaşık %50 oranına ulaşmıştır. Bu durum Sistem 1 için gerçekleştirilen paralel hesaplama uygulamasının oldukça başarılı olduğunu göstermektedir.

Tablo 5. Sistem 1 için tek işlem birimi (sıralı hesaplama) ile elde edilen süreler (saniye)

		HESAPLANAN FREKANS SAYISI				
		8	40	80	160	320
TANIMLAMA FONKSİYONU DERECESİ	1	0.41	1.29	2.42	4.7	9.13
	3	0.48	1.5	3.02	5.43	10.73
	5	0.52	2.13	4.11	8.49	15.94
	7	2.52	12.26	24.42	48.75	97.53

Tablo 6. Sistem 1 için iki işlem birimi ile elde edilen süreler (saniye)

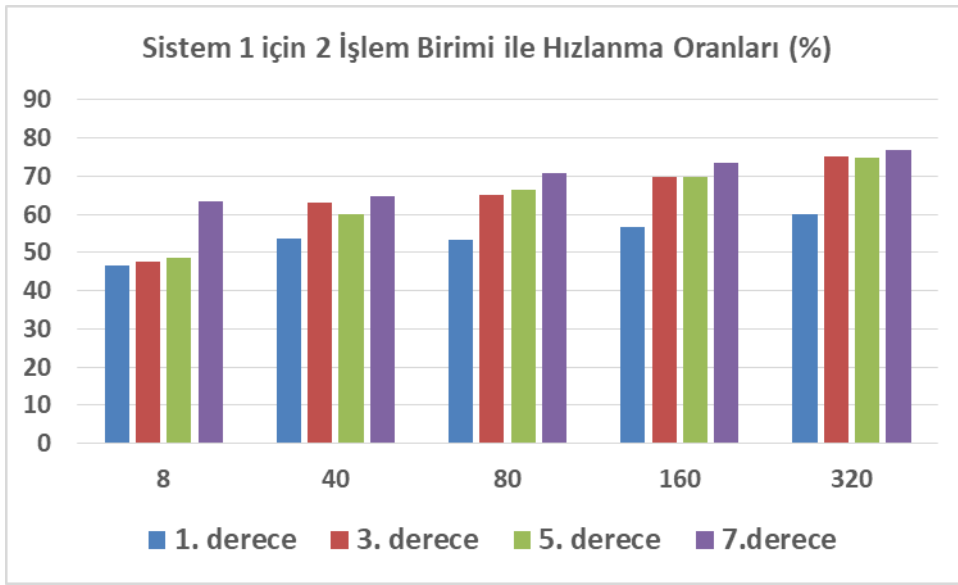
		HESAPLANAN FREKANS SAYISI				
		8	40	80	160	320
TANIMLAMA FONKSİYONU DERECESİ	1	0.28	0.84	1.58	3	5.71
	3	0.325	0.92	1.83	3.2	6.13
	5	0.35	1.33	2.47	5	9.11
	7	1.541	7.44	14.3	28.09	55.16

Tablo 7. Sistem 1 için dört işlem birimi ile elde edilen süreler (saniye)

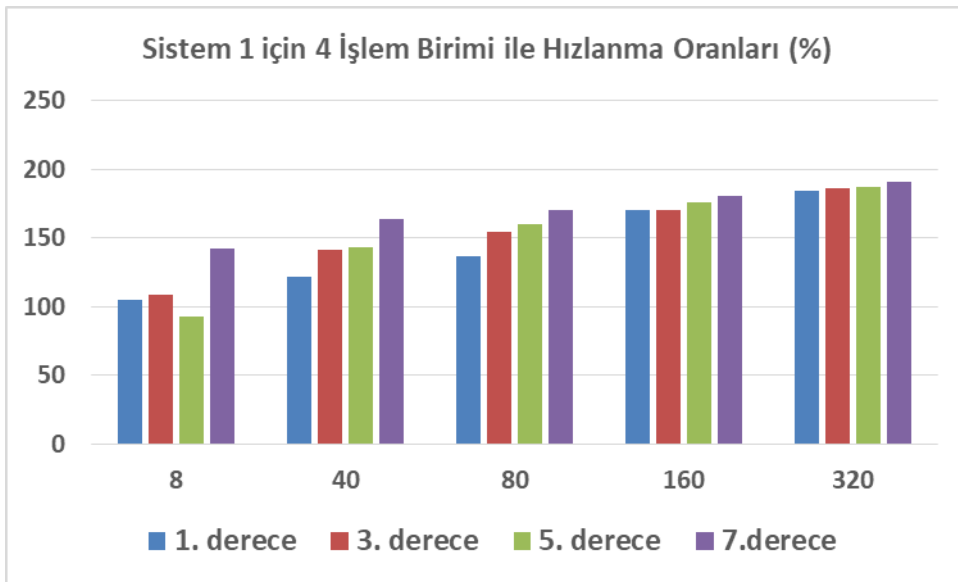
		HESAPLANAN FREKANS SAYISI				
		8	40	80	160	320
TANIMLAMA FONKSİYONU DERECESİ	1	0.2	0.581	1.021	1.74	3.214
	3	0.23	0.622	1.184	2.01	3.75
	5	0.27	0.875	1.581	3.07	5.55
	7	1.04	4.64	9.037	17.348	33.52

Tablo 8. Sistem 1 için sekiz işlem birimi ile elde edilen süreler (saniye)

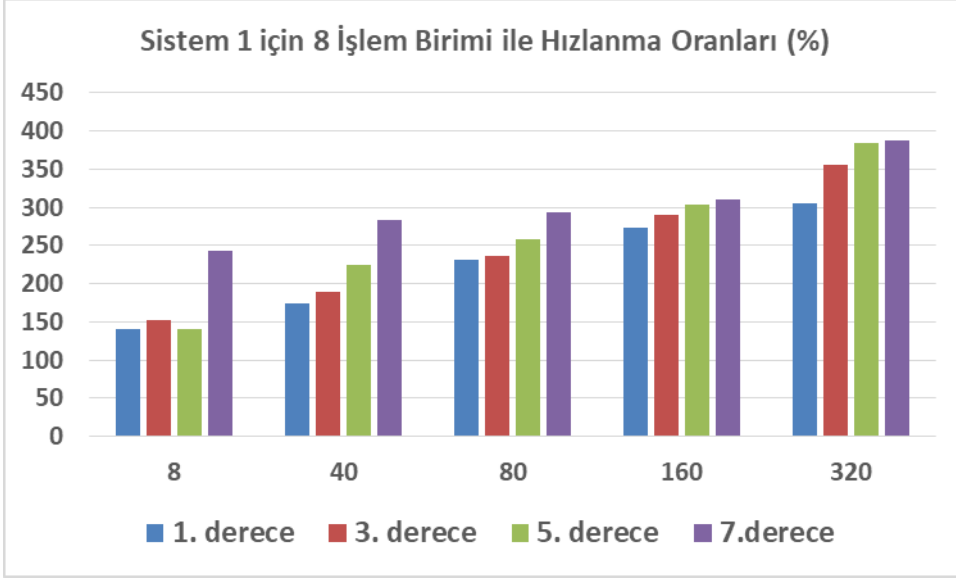
		HESAPLANAN FREKANS SAYISI				
		8	40	80	160	320
TANIMLAMA FONKSİYONU DERECESİ	1	0.17	0.47	0.731	1.26	2.254
	3	0.19	0.52	0.9	1.39	2.353
	5	0.217	0.656	1.146	2.1	3.29
	7	0.736	3.2	6.21	11.86	19.98



Şekil 66. Sistem 1 için 2 işlem birimi ile hesaplama oranları

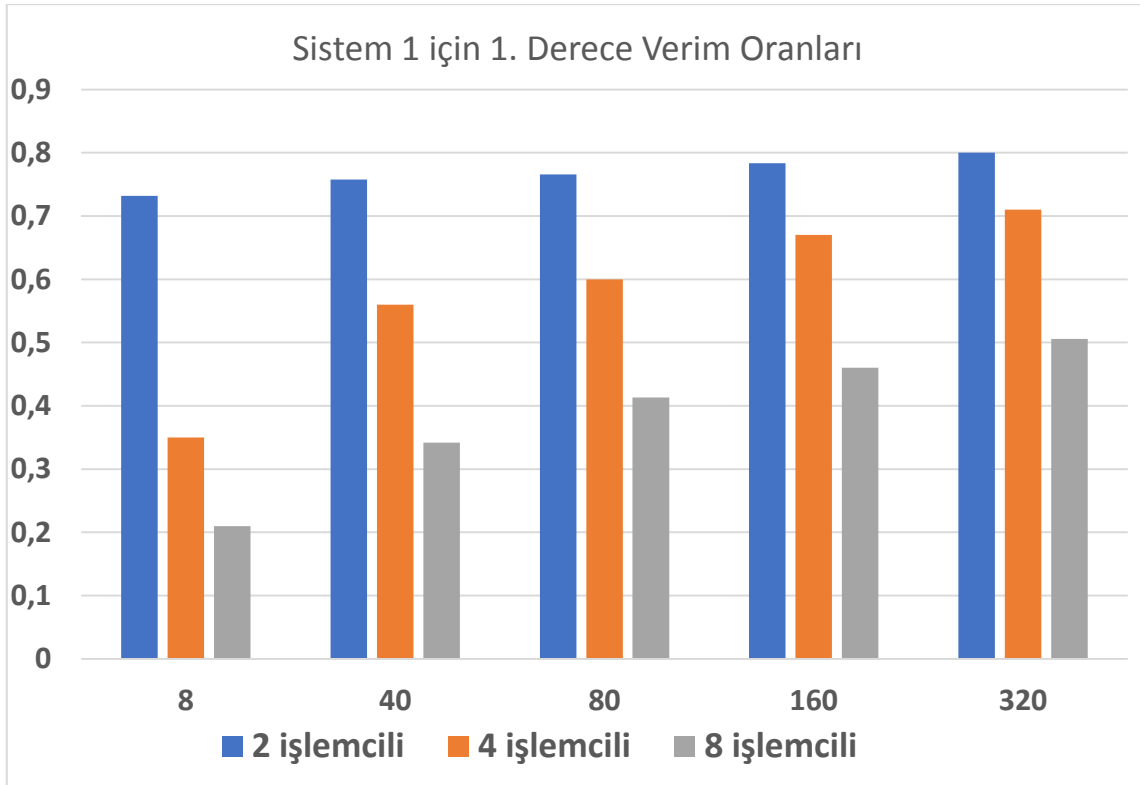


Şekil 67. Sistem 1 için 4 işlem birimi ile hesaplama oranları

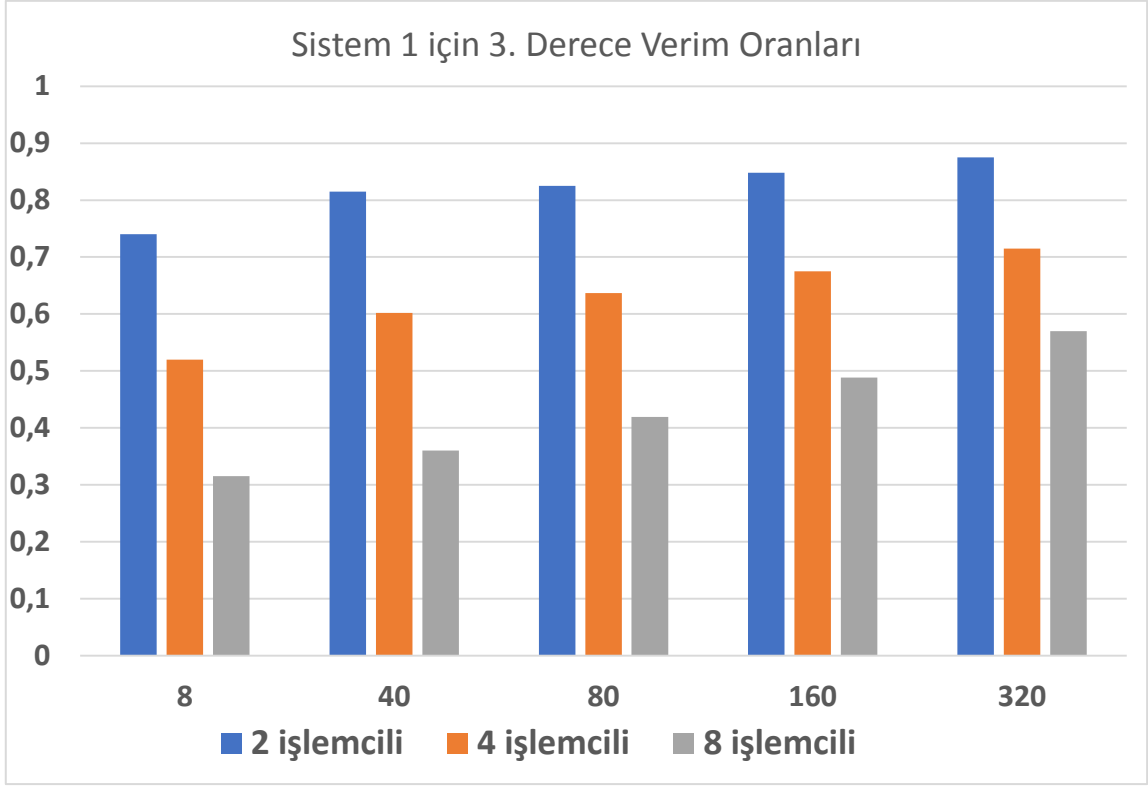


Şekil 68. Sistem 1 için 8 işlem birimi ile hesaplama oranları

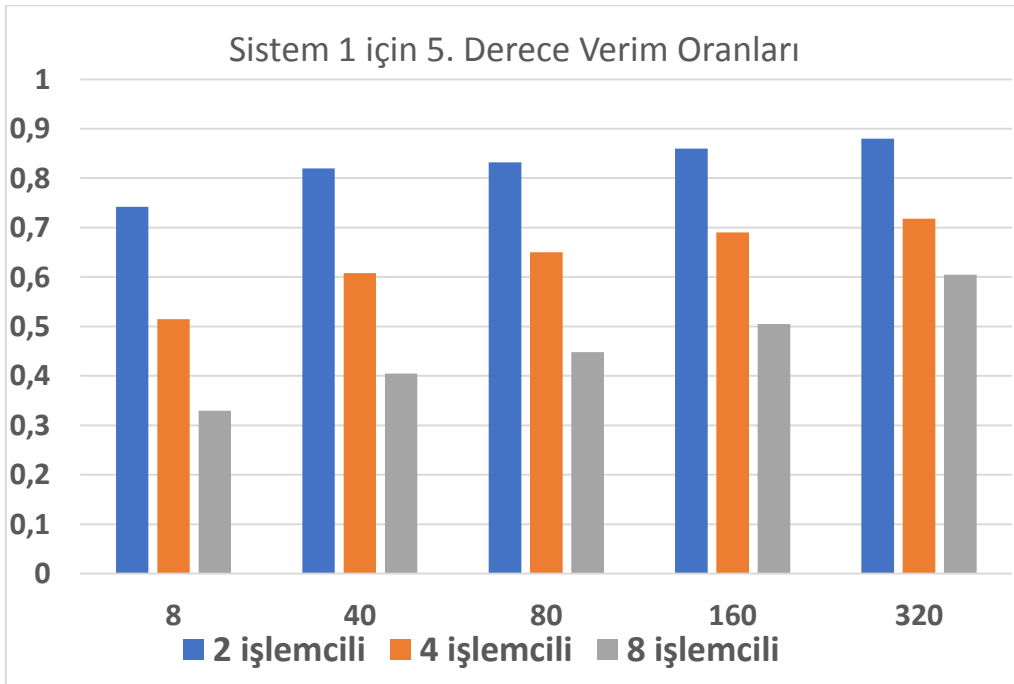
Şekil 69, 70, 71 ve 72'de çok çekirdekli işlemcilerle çalışan sistemlerin verim oranları gösterilmiştir. Verim oranları Eşitlik 39 kullanılarak hesaplanmıştır.



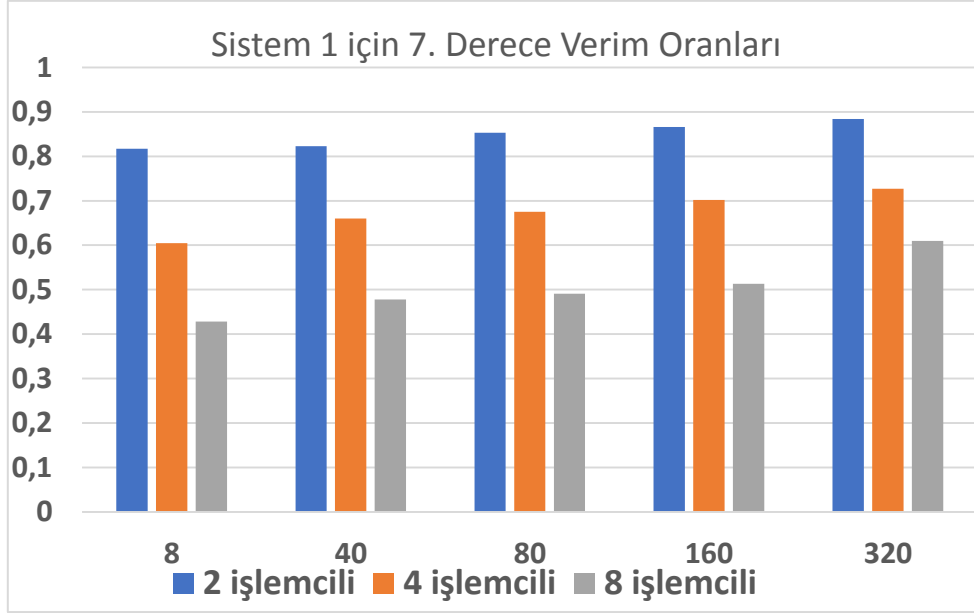
Şekil 69. Sistem 1 için 1.derecede verim oranları



Şekil 70. Sistem 1 için 3.derecede verim oranları



Şekil 71. Sistem 1 için 5.derecede verim oranları



Şekil 72. Sistem 1 için 7.derecede verim oranları

Şekil 69, 70, 71 ve 72'ye bakıldığında aynı işlemciler arasında hesaplanan frekans sayısı ve TF derecesi arttığında verim oranı da yükselmektedir. Örneğin sistem 1'in 2 işlemcili 8 frekans değerinde 1. Derece frekans cevabı hesaplama süresinin verimi 0.73 iken 40 frekans değeri için bu sayı 0.75, 80 frekans değeri içinse bu sayı 0.76'ye çıkmaktadır. Sistem 1'in 2 işlemcili 8 frekans değerinde 5. Derece frekans cevabı hesaplama süresinin verimi ise 0.74, 40 frekans değerinde 0.81, 80 frekans değerinde ise 0.832 olarak hesaplanmıştır.

Tablo 9, 10, 11 ve 12'de Sistem 1 için 1, 3,5 ve 7.derece TF için maliyetler verilmiştir. Maliyet hesabı Eşitlik 71 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\text{Maliyet} = \text{İşlemci} * \text{süre (saniye)}$$

(71)

Tablo 9.Sistem 1 için 1. Derece de maliyet

		HESAPLANAN FREKANS SAYISI				
		8	40	80	160	320
İŞLEMCI SAYISI	1	0.41	1.29	2.42	4.7	9.13
	2	0.56	1.78	3.16	6	11.4
	4	0.8	2.3240	4.0840	6.9600	12.8560
	8	1.3600	3.7600	5.8480	10.0800	18.0320

Tablo 10. Sistem 1 için 3. Derece de maliyet

		HESAPLANAN FREKANS SAYISI				
		8	40	80	160	320
İŞLEMCİ SAYISI	1	0.48	1.5	3.02	5.43	10.73
	2	0.6500	1.8400	3.6600	6.4	12.26
	4	0.9200	2.4880	4.7360	8.04	15
	8	1.5200	4.1600	7.2000	11.1200	18.8240

Tablo 11. Sistem 1 için 5. Derece de maliyet

		HESAPLANAN FREKANS SAYISI				
		8	40	80	160	320
İŞLEMCİ SAYISI	1	0.52	2.13	4.11	8.49	15.94
	2	0.7	2.66	4.94	10	18.22
	4	1.0800	3.500	6.3240	12.2800	22.2000
	8	1.7360	5.2480	9.1680	16.8	26.3200

Tablo 12. Sistem 1 için 7. Derece de maliyet

		HESAPLANAN FREKANS SAYISI				
		8	40	80	160	320
İŞLEMCİ SAYISI	1	2.52	12.26	24.42	48.75	97.53
	2	3	14.88	28.6	56.18	110.32
	4	4.16	18.56	36.12	69.2	134.08
	8	5.888	25.6	49.68	94.88	160

4.2.2 Sistem 2'nin Çok Çekirdekli Çalışmada Hızlanma, Verim Oranları ve Maliyet

Sistem 2 için belirlenen hesaplama süreleri Tablo 13, 14, 15 ve 16'da görülmektedir. Tablo 9'da tek işlem birimi kullanılarak sıralı hesaplama için harcanan süreler bulunmaktadır. Tablo 14'de iki işlem birimi, Tablo 15'de dört işlem birimi ve Tablo 16'da sekiz işlem birimi ile paralel hesaplama için harcanan süreler yer almaktadır. Bu hesaplama süreleri ile hızlanma oranları hesaplanmış ve Şekil 73'de iki işlem birimi, Şekil 74'de dört işlem birimi ve Şekil 75'de sekiz işlem birimi için hızlanma oranları grafiksel olarak sunulmuştur.

Tablo 13. Sistem 2 için tek işlem birimi ile elde edilen süreler (saniye)

		HESAPLANAN FREKANS SAYISI				
		8	40	80	160	320
TANIMLAMA FONKSİYONU DERECESİ	1	0.39	1.3	2.55	4.76	9.34
	3	0.53	1.93	3.56	7.09	14.22
	5	1.32	5.84	11.62	23.15	45.25
	7	17.22	89.25	168.25	337.34	670.65

Tablo 14. Sistem 2 için iki işlem birimi ile elde edilen süreler (saniye)

		HESAPLANAN FREKANS SAYISI				
		8	40	80	160	320
TANIMLAMA FONKSİYONU DERECESİ	1	0.317	0.902	1.593	2.91	5.24
	3	0.45	1.162	2.131	3.938	7.73
	5	0.88	3.518	6.71	12.66	24.7
	7	9.48	47.625	88.974	176.15	347.487

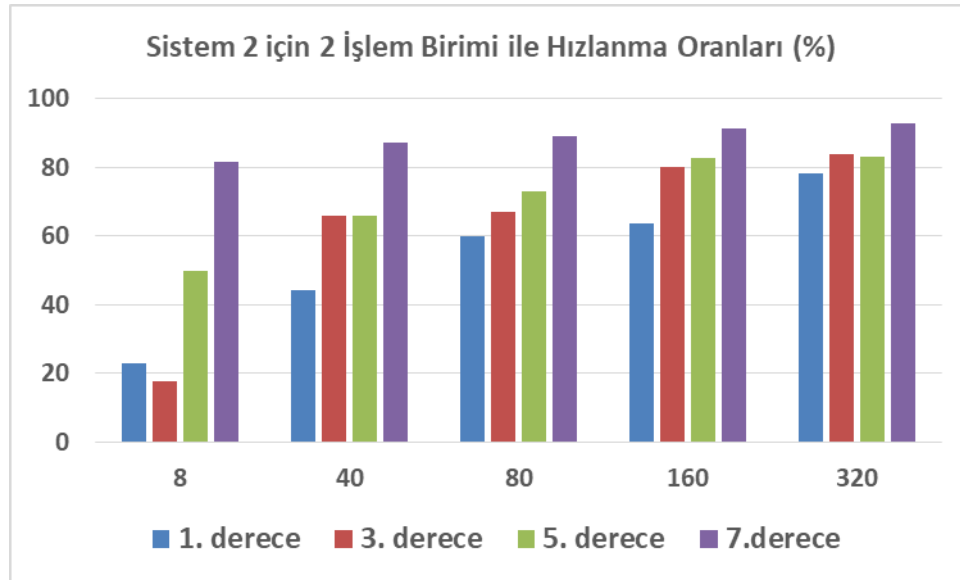
Tablo 15. Sistem 2 için dört işlem birimi ile elde edilen süreler (saniye)

		HESAPLANAN FREKANS SAYISI				
		8	40	80	160	320
TANIMLAMA FONKSİYONU DERECESİ	1	0.23	0.71	1.07	1.76	3.27
	3	0.38	0.744	1.34	2.58	4.787
	5	0.7	2.08	4.06	7.96	15.3
	7	5.89	29.95	54.8	105.09	194.4

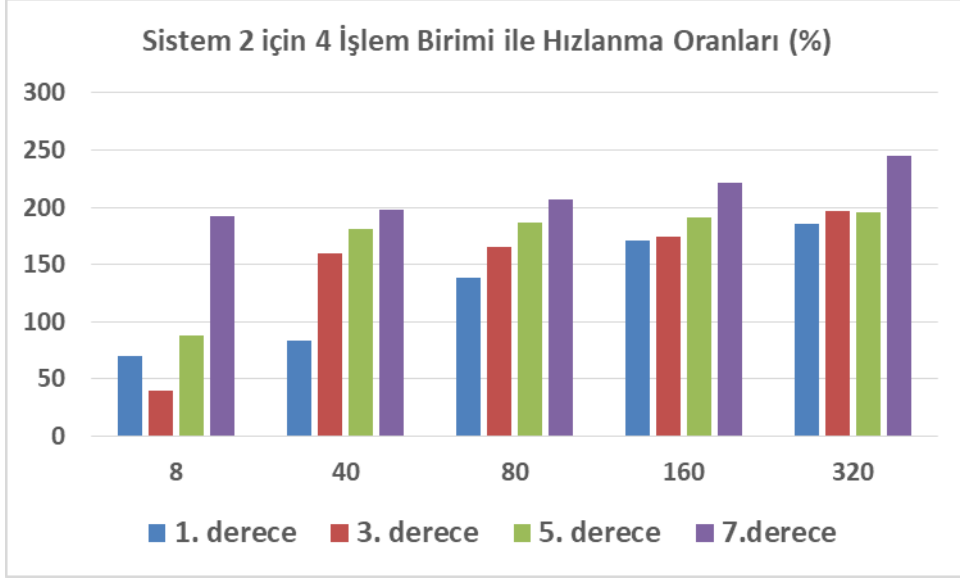
Tablo 16. Sistem 2 için sekiz işlem birimi ile elde edilen süreler (saniye)

		HESAPLANAN FREKANS SAYISI				
		8	40	80	160	320
TANIMLAMA FONKSİYONU DERECESİ	1	0.22	0.68	0.8	1.33	2.45
	3	0.311	0.7	1.06	1.85	3.57
	5	0.66	1.61	3.07	6.01	11.11
	7	4.53	22.6	42.1	83.3	159.3

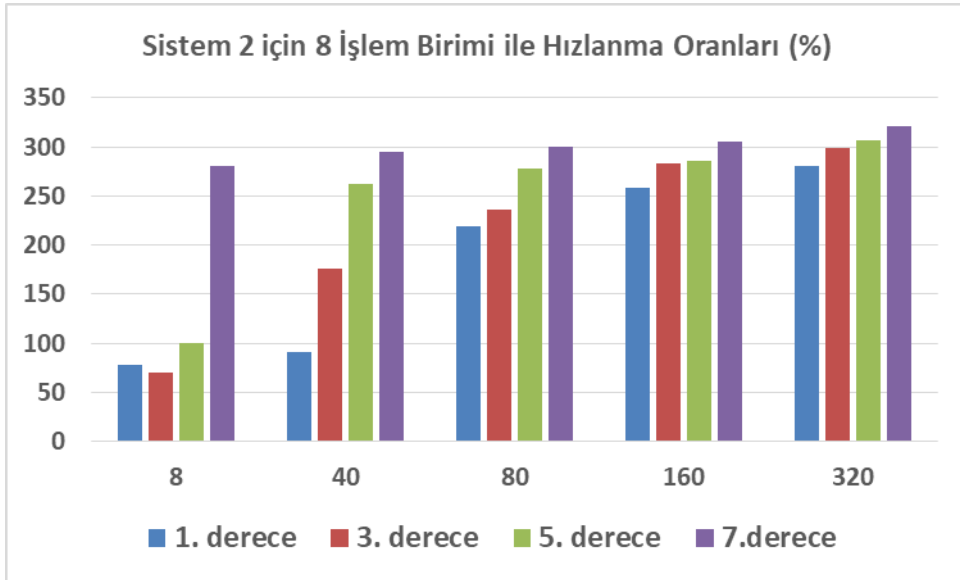
Şekil 35, 36, ve 37 incelendiğinde hızlanma oranlarının, İP-3 için belirlenen başarı ölçütünü sağladığı tespit edilmiştir. Şekil 73, 74, ve 75'deki grafiklerdeki işlem birimi başına en düşük hızlanma oranı 8 frekans değeri için 3. Derece Tanımlama Fonksiyonlarının hesaplandığı işlemlerdir. Bu işlemlerde işlem birimi başına hızlanma oranı yaklaşık %9 olarak tespit edilmiştir. Hesaplanan fonksiyonların dereceleri ve hesaplanan frekans sayıları arttıkça işlem birimi başına hızlanma oranları da artmaktadır. Şekil 74'de 4 işlem biriminin kullanıldığı ve 320 frekans değeri için 7. Derece Tanımlama Fonksiyonunun hesaplandığı işlemde yaklaşık %60 hızlanma oranına ulaşılmıştır. Bu sonuçlar Sistem 2 için de gerçekleştirilen paralel hesaplamaların başarılı olduğunu göstermektedir.



Şekil 73. Sistem 2 için 2 işlem birimi ile hesaplama oranları

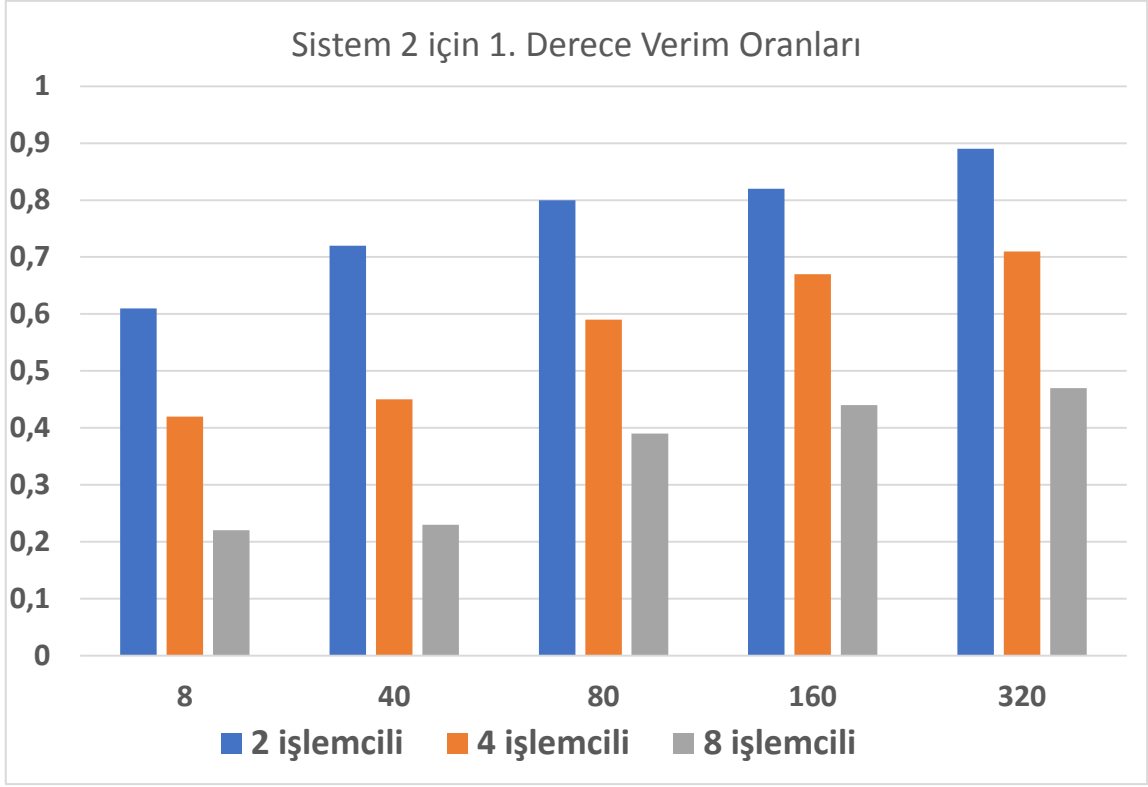


Şekil 74. Sistem 2 için 4 işlem birimi ile hesaplama oranları

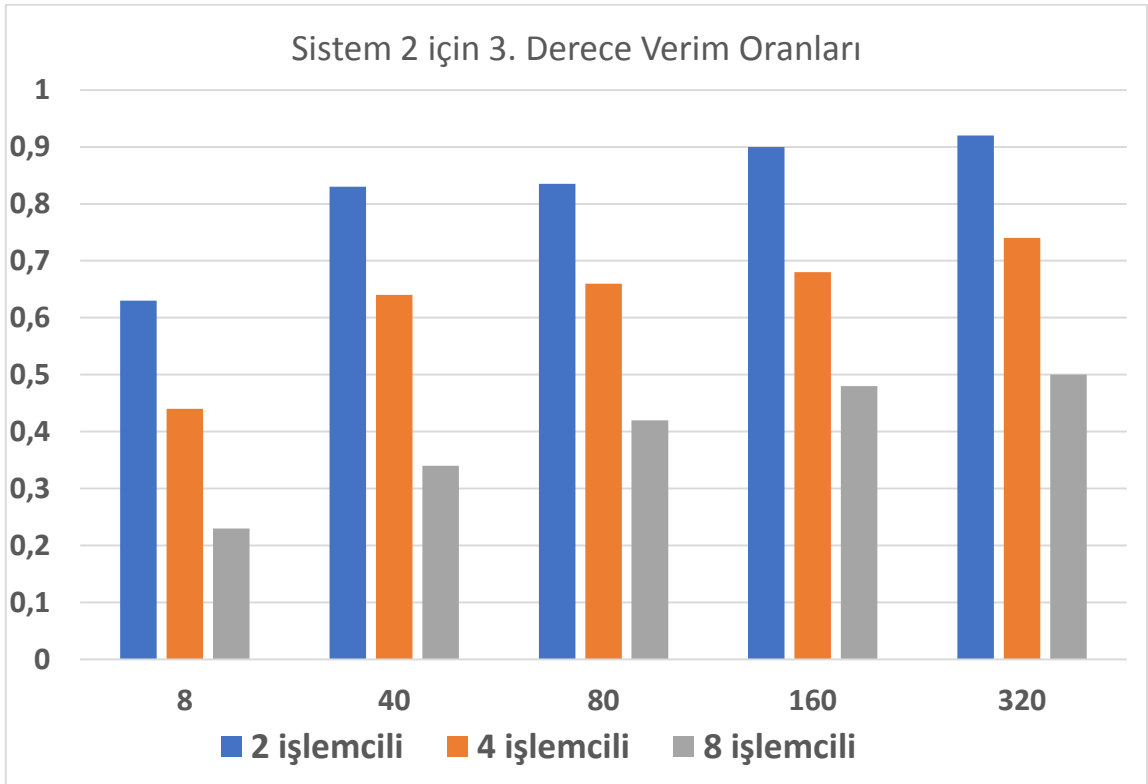


Şekil 75. Sistem 2 için 8 işlem birimi ile hesaplama oranlar

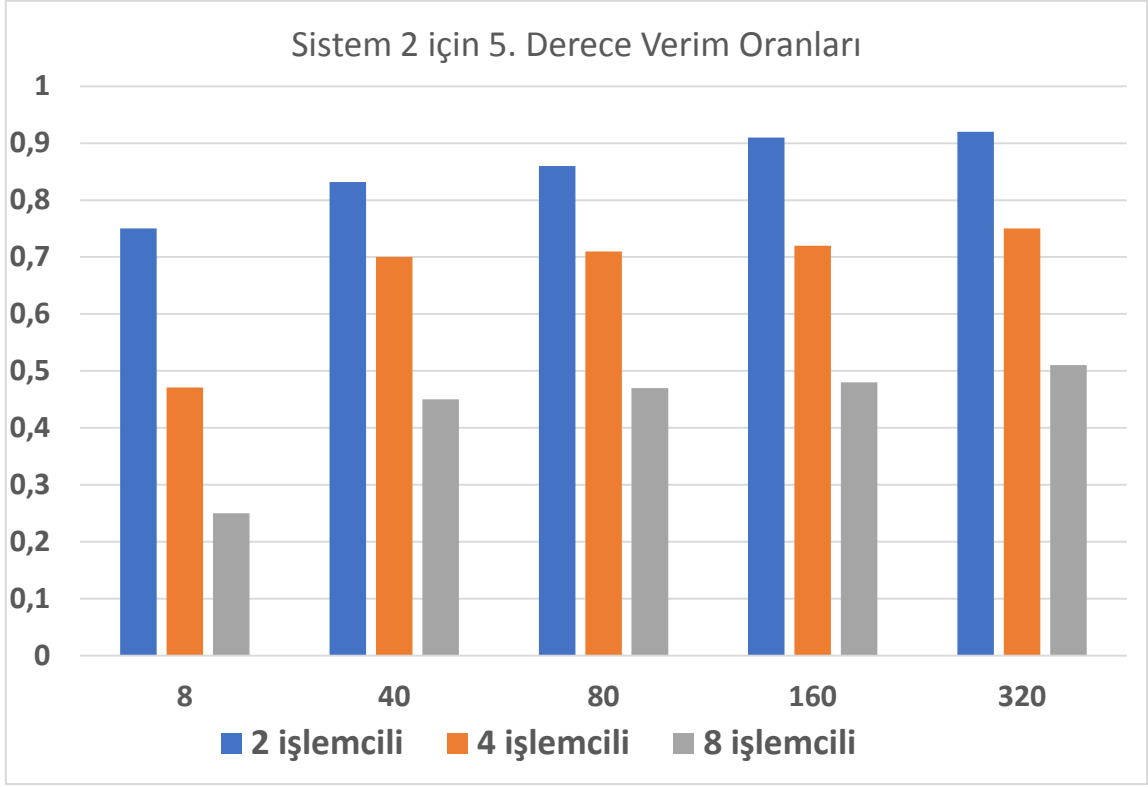
Şekil 76, 77, 78 ve 79 'da çok çekirdekli işlemcilerle çalışan sistemlerin verim oranları gösterilmiştir.



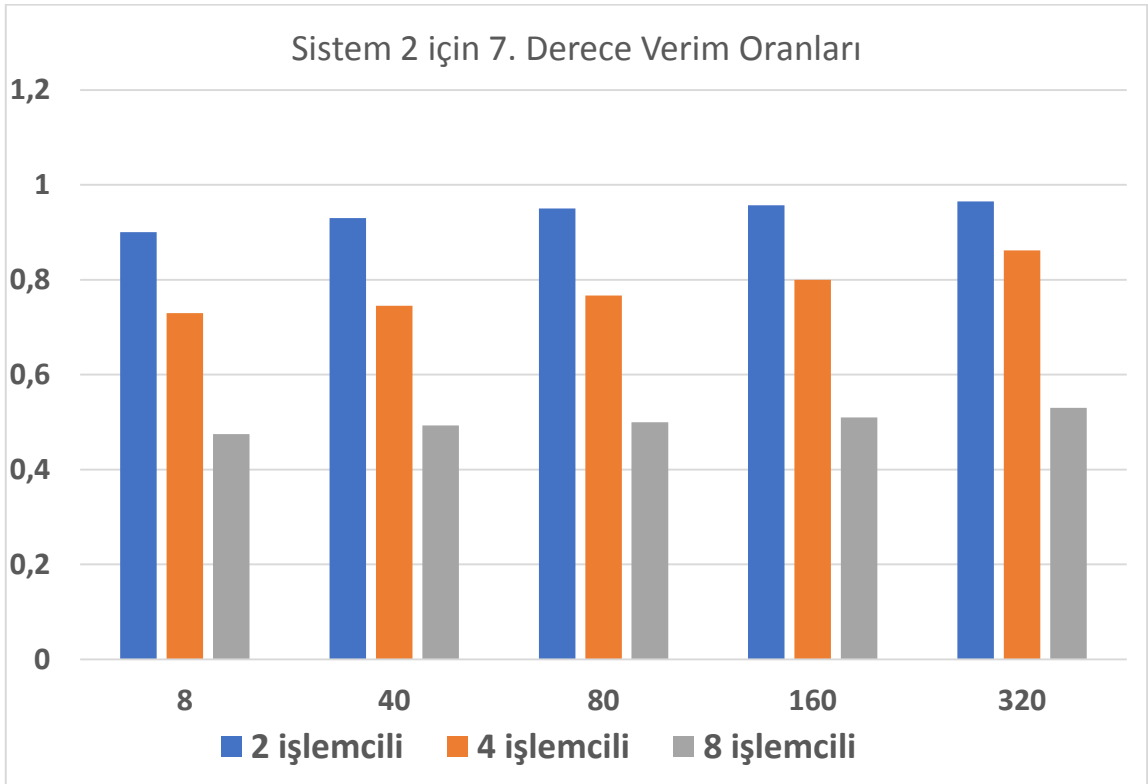
Şekil 76. Sistem 2 için 1.derecede verim oranları



Şekil 77. Sistem 2 için 3.derecede verim oranları



Şekil 78. Sistem 2 için 5.derecede verim oranları



Şekil 79. Sistem 2 için 7.derecede verim oranları

Şekil 76, 77, 78 ve 79'a bakıldığında aynı işlemciler arasında hesaplanan frekans sayısı ve TF derecesi arttığında verim oranı da yükselmektedir. Örneğin sistem 2'in 4 işlemcili 8 frekans değerinde 3. Derece frekans cevabı hesaplama süresinin verimi 0.44 iken 40 frekans değeri için bu sayı 0.64, 160 frekans değeri içinse bu sayı 0.68'e çıkmaktadır. Sistem 2'in 4 işlemcili 8 frekans değerinde 5. Derece frekans cevabı hesaplama süresinin verimi ise 0.47, 40 frekans değerinde 0.7, 80 frekans değerinde ise 0.72 olarak hesaplanmıştır.

Tablo 17, 18, 19 ve 20'de Sistem 2 için 1, 3,5 ve 7.derece TF için maliyetler verilmiştir. Maliyet hesabı Eşitlik 71 kullanılarak hesaplanmıştır.

Tablo 17. Sistem 2 için 1.derecede maliyet

		HESAPLANAN FREKANS SAYISI				
		8	40	80	160	320
İŞLEMCI SAYISI	1	0.39	1.3	2.55	4.76	9.34
	2	0.63	1.8	3.1	5.8	10.4
	4	0.92	2.84	4.28	7.04	13.08
	8	1.76	5.44	6.4	10.64	19.6

Tablo 18. Sistem 2 için 3.derecede maliyet

		HESAPLANAN FREKANS SAYISI				
		8	40	80	160	320
İŞLEMCI SAYISI	1	0.53	1.93	3.56	7.09	14.22
	2	0.9	2.32	4.26	8	15.4
	4	1.52	2.97	5.36	10.32	19.12
	8	2.48	5.6	8.48	14.8	28.56

Tablo 19. Sistem 2 için 5.derecede maliyet

		HESAPLANAN FREKANS SAYISI				
		8	40	80	160	320
İŞLEMCI SAYISI	1	1.32	5.84	11.62	23.15	45.25
	2	1.76	7	13.4	25.2	49.4
	4	2.8	8.32	16.24	31.84	61.20
	8	5.28	12.88	24.56	48.08	88.88

Tablo 20. Sistem 2 için 7.derecede maliyet

		HESAPLANAN FREKANS SAYISI				
		8	40	80	160	320
İŞLEMCI SAYISI	1	17.22	89.25	168.25	337.34	670.65
	2	18.9	95.2	177.8	342.3	694.8
	4	23.56	119.8	219.2	420.4	777.6
	8	36.24	180.8	336.8	670.4	2074

4.2.3 Sistem 3'ün Çok Çekirdekli Çalışmada Hızlanma, Verim Oranları ve Maliyet

Sistem 3 için belirlenen hesaplama sonuçları tek işlem birimi için Tablo 21'de, iki işlem birimi için Tablo 22'de, dört işlem birimi için Tablo 23'de ve sekiz işlem birimi için Tablo 24'de verilmiştir. Bu tablolardaki süreler kullanılarak hesaplanan hızlanma oranları ise iki işlem birimi için Şekil 80'de, dört işlem birimi için Şekil 81'de ve sekiz işlem birimi için Şekil 82'de grafiksel olarak sunulmuştur. Bu üç grafik incelendiğinde işlem birimi başına en düşük hızlanma oranı yaklaşık %10 ile Şekil 82'de 1. derece Tanımlama Fonksiyonunun 8 frekans değeri için yapılan hesaplamada ortaya çıkmıştır. En yüksek oran ise Şekil 81'da 7. derece Tanımlama Fonksiyonunun 320 frekans değeri için yapılan hesaplamasında işlem birimi başına yaklaşık %65 hızlanma oranı olarak tespit edilmiştir. Sistem 3 için bulunan oranların da İP-3'ün başarı ölçütünü sağladığı görülmektedir.

Sonuç olarak üç farklı doğrusal olmayan sistem için gerçekleştirilen hesaplamalar ve elde edilen hızlanma oranları, yeni algoritmanın çok çekirdekli işlemci ile hızlandırılması hedefine

ulaşıldığını ve İP-3 için belirlenen başarı ölçütünün sağlandığını göstermektedir. Tüm hızlanma grafikleri incelendiğinde, hesaplanan fonksiyon derecesi ve frekans sayısı arttığında işlem birimi başına hızlanma oranlarının da arttığı görülmektedir. Bunun sebebi paralel hesaplama yönteminin yapısı gereği, işlem yükü ve karmaşıklığı arttığında, paralel hesaplamanın etkinliğinin artmasıdır. Çünkü işlem yükü ve karmaşıklığı az olduğunda, paralel hesaplamanın getirdiği yük etkinliği azaltırken, yükü ve karmaşıklığı daha yüksek olan işlemlerde paralel hesaplama yükü toplam yükte daha az etki oluşturur ve paralel hesaplamanın etkinliği artar. Elde edilen sonuçlar bu durumu doğrulamaktadır. Bununla birlikte, işlem yükünün ve karmaşıklığının daha az olduğu, düşük dereceli fonksiyonlar ve az sayıda frekans değeri hesaplamalarında da hedeflenenden daha fazla hızlanma sağlandığından, yeni algoritmanın çok çekirdekli işlemciler ve paralel hesaplama ile kullanılabilmesi rahatlıkla söylenebilir.

Tablo 21. Sistem 3 için tek işlem birimi ile elde edilen süreler (saniye)

		HESAPLANAN FREKANS SAYISI				
		8	40	80	160	320
TANIMLAMA FONKSİYONU DERECESİ	1	0.379	1.29	2.39	4.61	9.07
	3	0.55	2.10	4.00	7.88	15.57
	5	4.56	21.54	42.88	86.17	170.23
	7	320	1602.3	3220.67	6458.5	13091.11

Tablo 22. Sistem 3 için iki işlem birimi ile elde edilen süreler (saniye)

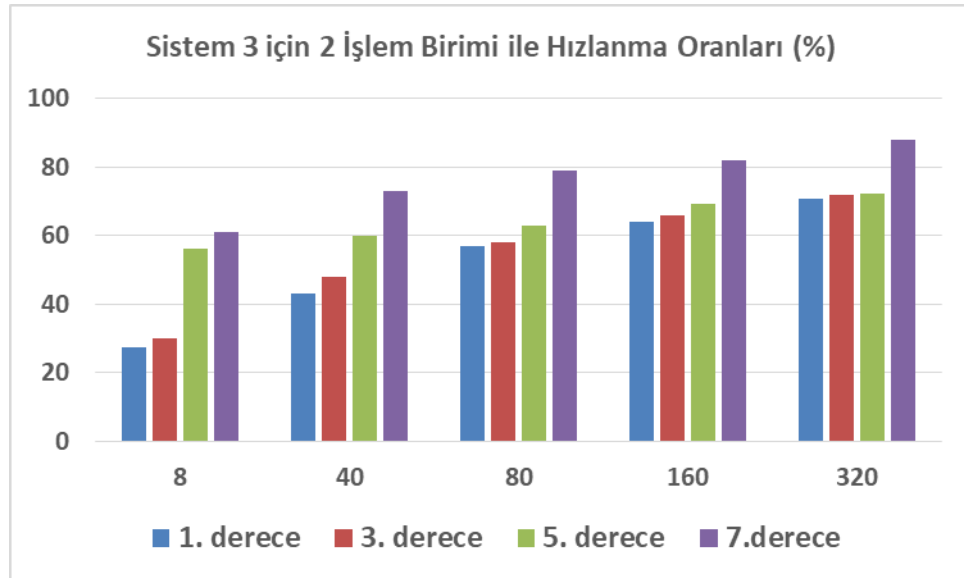
		HESAPLANAN FREKANS SAYISI				
		8	40	80	160	320
TANIMLAMA FONKSİYONU DERECESİ	1	0.297	0.9	1.522	2.811	5.304
	3	0.423	1.42	2.53	4.75	9.05
	5	2.92	13.46	26.3	50.837	98.684
	7	198.75	926.18	1800.2	3548.6	6963.41

Tablo 23. Sistem 3 için dört işlem birimi ile elde edilen süreler (saniye)

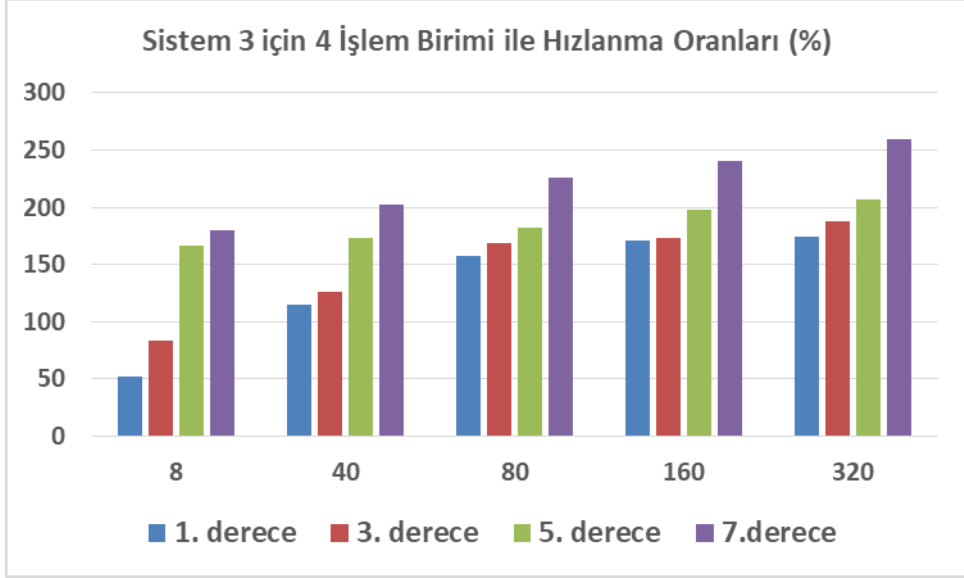
		HESAPLANAN FREKANS SAYISI				
		8	40	80	160	320
TANIMLAMA FONKSİYONU DERECESİ	1	0.25	0.6	0.93	1.7	3.3
	3	0.3	0.93	1.49	2.88	5.4
	5	1.714	7.87	15.21	28.9	55.44
	7	114.28	529.686	988.31	1894	3636.45

Tablo 24. Sistem 3 için sekiz işlem birimi ile elde edilen süreler (saniye)

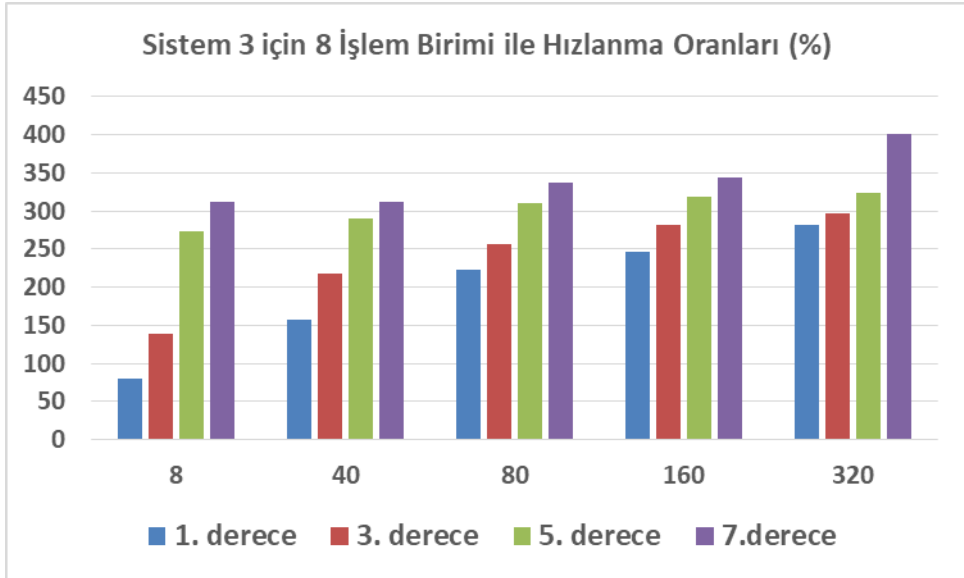
		HESAPLANAN FREKANS SAYISI				
		8	40	80	160	320
TANIMLAMA FONKSİYONU DERECESİ	1	0.21	0.5	0.74	1.33	2.38
	3	0.23	0.66	1.12	2.06	3.93
	5	1.22	5.53	10.45	20.56	40.14
	7	77.66	388.9	737.27	1454.68	2613



Şekil 80. Sistem 3 için 2 işlem birimi ile hesaplama oranlar

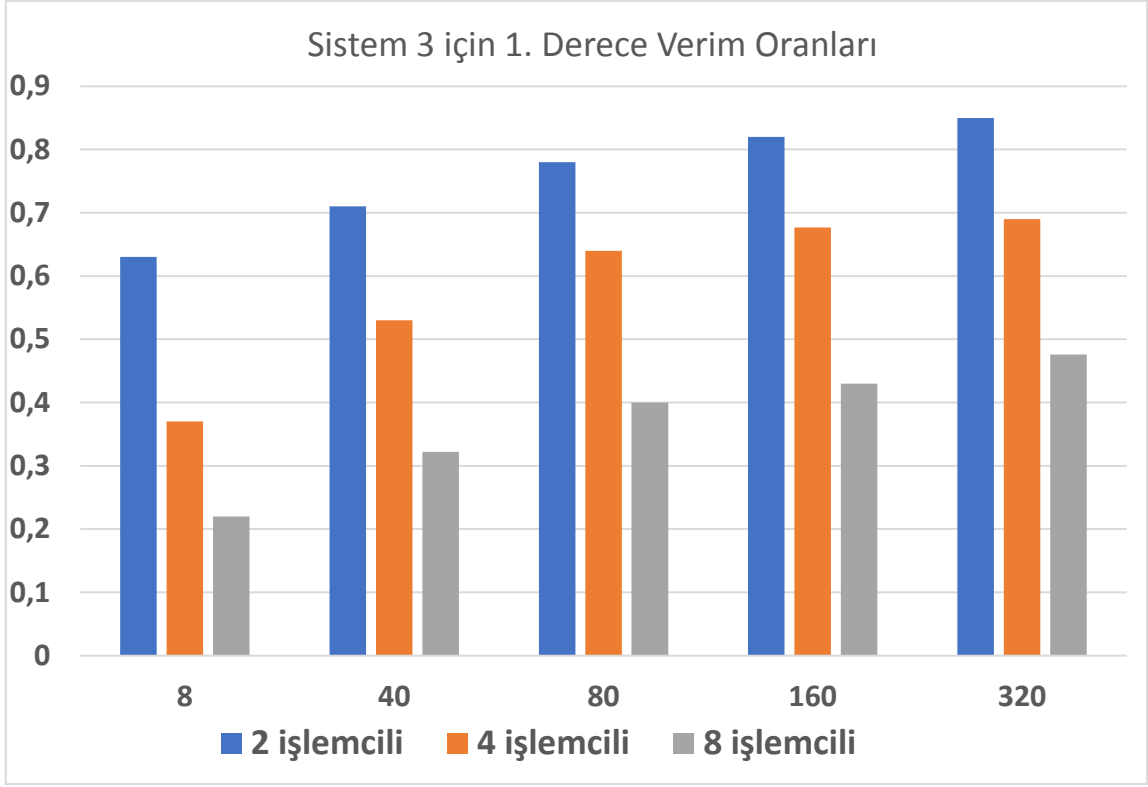


Şekil 81. Sistem 3 için 4 işlem birimi ile hesaplama oranlar

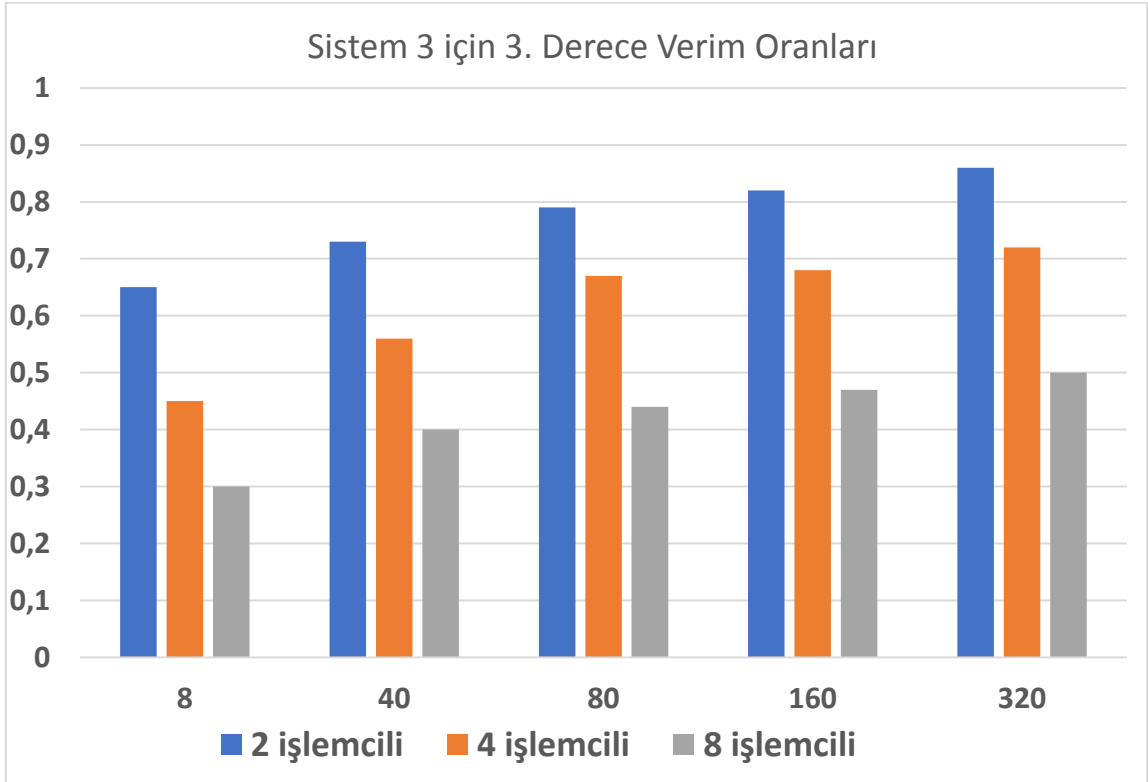


Şekil 82. Sistem 3 için 8 işlem birimi ile hesaplama oranlar

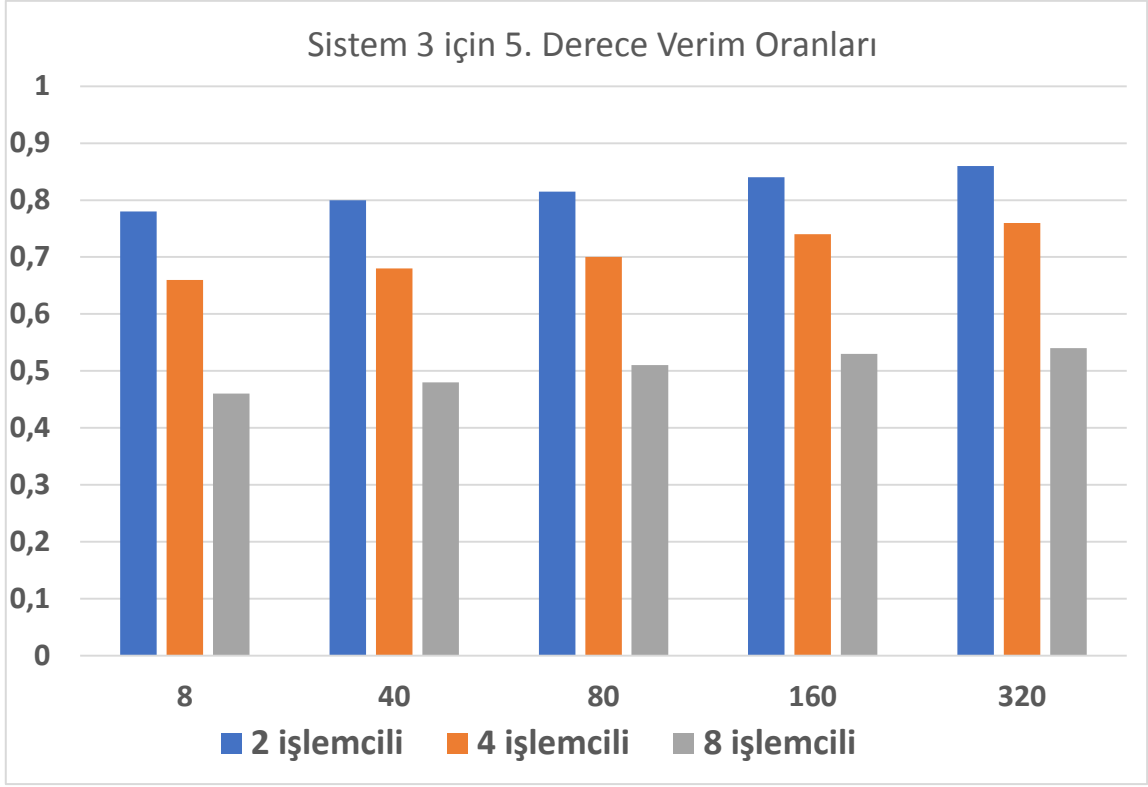
Şekil 83, 84, 85 ve 86'da çok çekirdekli işlemcilerle çalışan sistemlerin verim oranları gösterilmiştir.



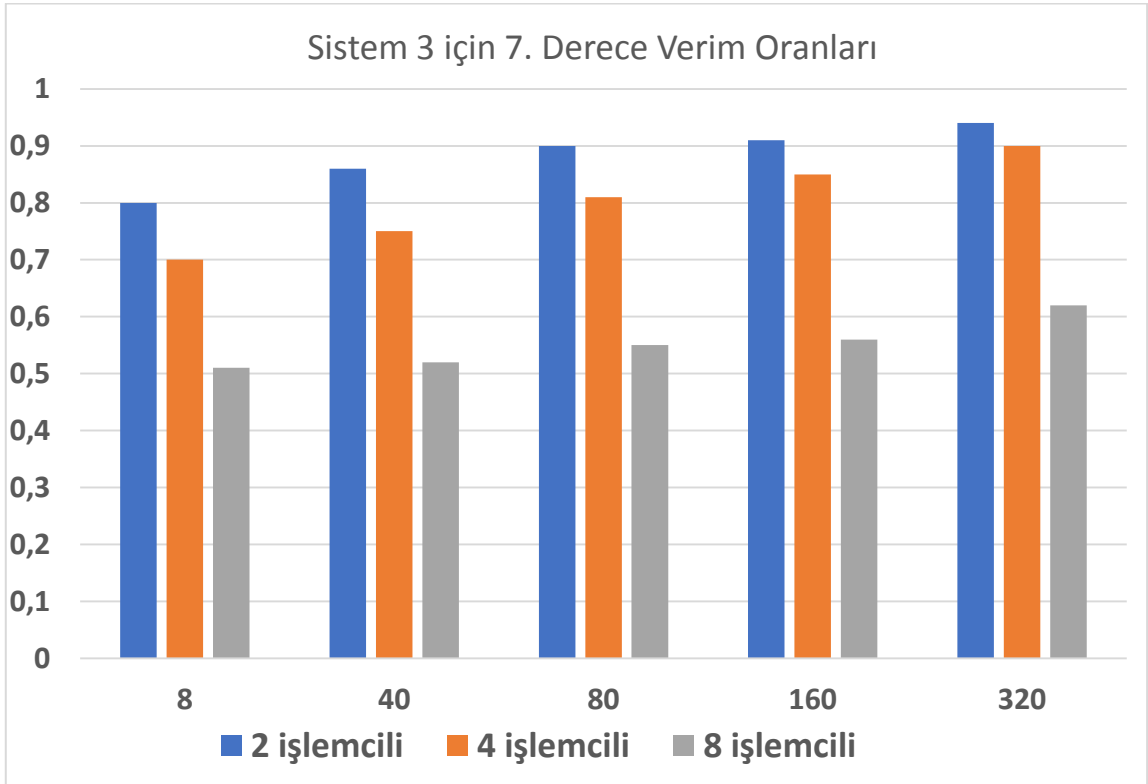
Şekil 83. Sistem 3 için 1.derecede verim oranları



Şekil 84. Sistem 3 için 3.derecede verim oranları



Şekil 85. Sistem 3 için 5.derecede verim oranları



Şekil 86. Sistem 3 için 7.derecede verim oranları

Şekil 83, 84, 85 ve 86'da bakıldığında aynı işlemciler arasında hesaplanan frekans sayısı ve TF derecesi arttığında verim oranı da yükselmektedir. Örneğin sistem 3'ün 8 işlemcili 8 frekans değerinde 5. Derece frekans cevabı hesaplama süresinin verimi 0.46 iken 80 frekans değeri için bu sayı 0.51, 320 frekans değeri içinse bu sayı 0.54'e çıkmaktadır. Sistem 3'ün 8 işlemcili 8 frekans değerinde 7. Derece frekans cevabı hesaplama süresinin verimi ise 0.51, 40 frekans değerinde 0.55, 80 frekans değerinde ise 0.62 olarak hesaplanmıştır.

Tablo 25, 26, 27 ve 28'de Sistem 3 için 1, 3,5 ve 7.derece TF için maliyetler verilmiştir. Maliyet hesabı Eşitlik 71 kullanılarak hesaplanmıştır.

Tablo 25. Sistem 3 için 1.derecede maliyet

		HESAPLANAN FREKANS SAYISI				
		8	40	80	160	320
İŞLEMCİ SAYISI	1	0.379	1.29	2.39	4.61	9.07
	2	0.6	1.8	3.04	5.62	10.6
	4	1	2.4	3.72	6.8	13.2
	8	1.68	4	5.92	10.64	19.04

Tablo 26. Sistem 3 için 3.derece maliyet

		HESAPLANAN FREKANS SAYISI				
		8	40	80	160	320
İŞLEMCİ SAYISI	1	0.55	2.1	4	7.88	15.57
	2	0.846	2.84	5	9.4	18.1
	4	1.2	3.72	5.96	11.52	21.6
	8	1.84	5.28	8.96	16.48	31.44

Tablo 27. Sistem 3 için 5.derece maliyet

		HESAPLANAN FREKANS SAYISI				
		8	40	80	160	320
İŞLEMCI SAYISI	1	4.56	21.54	42.88	86.17	170.23
	2	5.8	26.8	52.6	101.6	197.2
	4	6.85	31.48	60.84	115.6	221.76
	8	9.76	44.24	83.6	164.48	321.12

Tablo 28. Sistem 3 için 7.derece maliyet

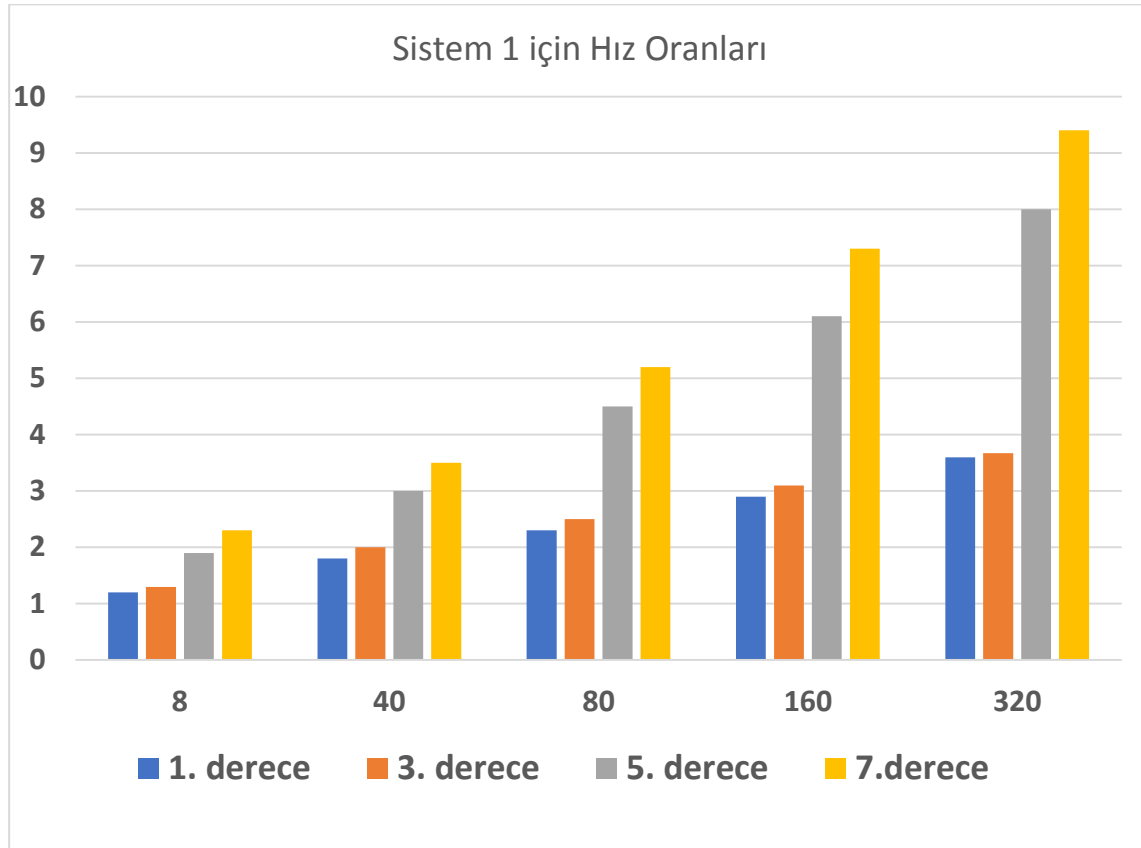
		HESAPLANAN FREKANS SAYISI				
		8	40	80	160	320
İŞLEMCI SAYISI	1	320	1602.3	3220.67	6458.5	13091.11
	2	396	1852	3600	7096	13926
	4	456	2116	3952	7576	14544
	8	616	3104	5896	11632	20904

4.3 GPU ile Paralel Hesaplama için Hızlanma Değerlerinin İncelenmesi

Paralel hesaplama araçlarından en yaygın olarak kullanılanlarından bir tanesi Grafik İşlem Birimi (GPU) olarak tanımlanan grafik kartlarıdır. Proje kapsamında geliştirilen hesaplama algoritması GPU kullanılarak, üç farklı sistem analizinde farklı frekans sayıları ve farklı TF dereceleri için çalıştırılmış ve hesaplama süreleri elde edilmiştir. Tablo 29'da Sistem 1, Tablo 30'da Sistem 2 ve Tablo 31'de Sistem 3 için elde edilen süreler görülmektedir. Bu tablolardaki süreler kullanılarak, sıralı hesaplama sürelerine göre hızlanma oranları da hesaplanmıştır. Hesaplanan hızlanma oranları Sistem 1 için Şekil 87'de, Sistem 2 için Şekil 88'de ve Sistem 3 için Şekil 89'da grafiksel olarak sunulmuştur.

Tablo 29. Sistem 1 için GPU ile elde edilen süreler (saniye)

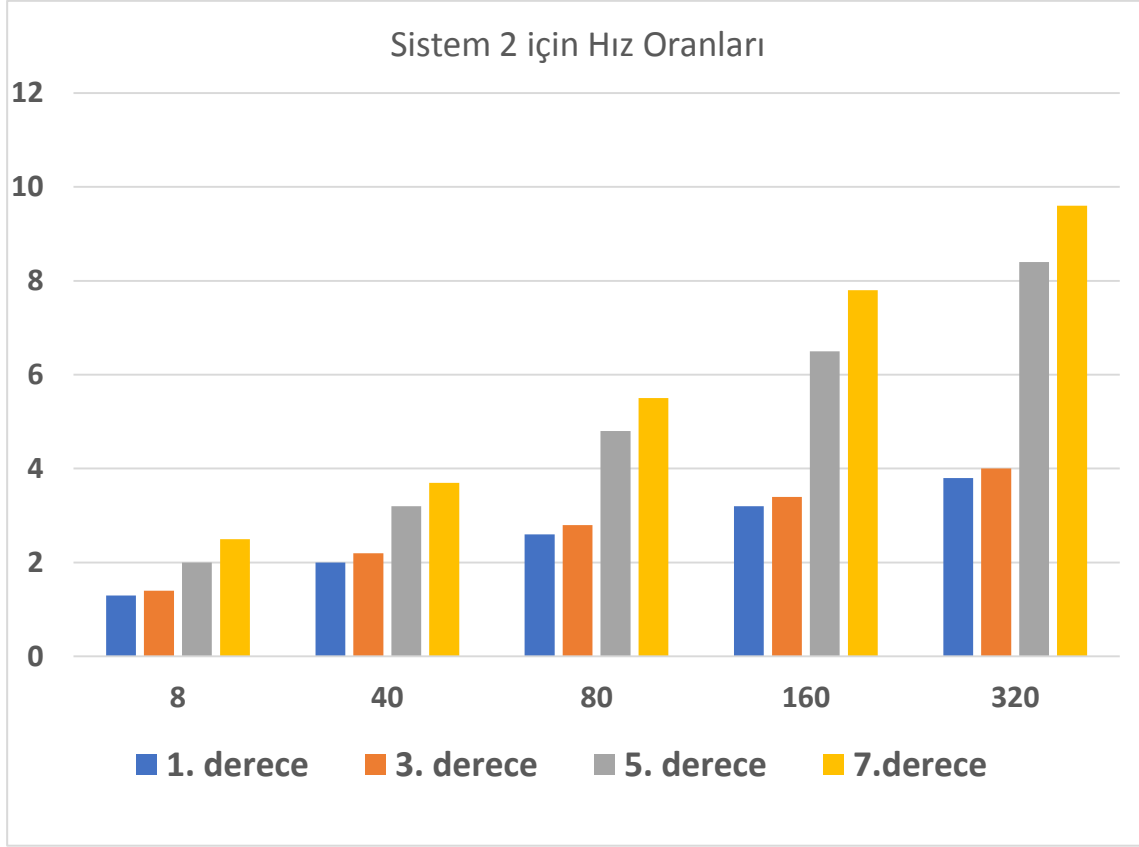
		HESAPLANAN FREKANS SAYISI				
		8	40	80	160	320
TANIMLAMA FONKSİYONU DERECESİ	1	0.34	0.716	1.05	1.62	2.53
	3	0.36	0.75	1.208	1.751	2.92
	5	0.27	0.71	0.91	1.39	1.99
	7	1.09	3.50	4.69	6.67	10.37



Şekil 87. Sistem 1'in GPU hızlanma oranları

Tablo 30. Sistem 2 için GPU ile elde edilen süreler (saniye)

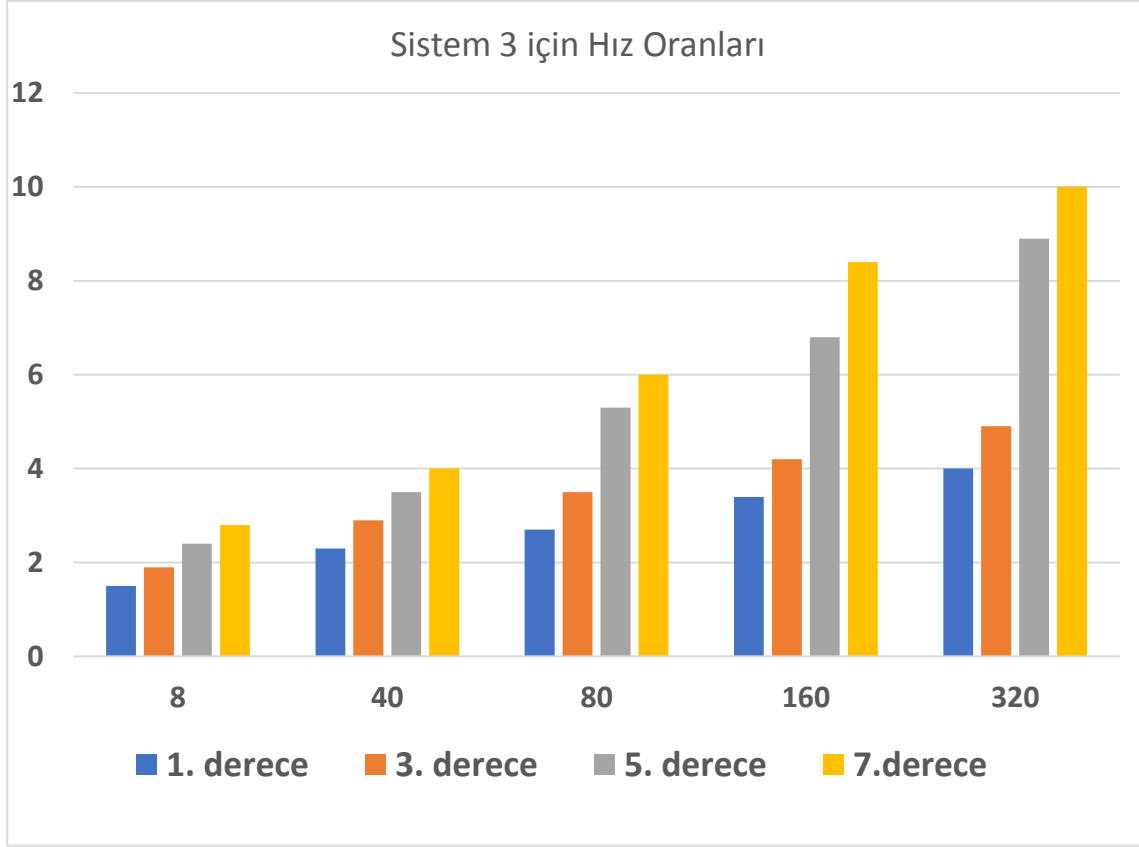
		HESAPLANAN FREKANS SAYISI				
		8	40	80	160	320
TANIMLAMA FONKSİYONU DERECESİ	1	0.3	0.65	0.98	1.48	2.45
	3	0.37	0.87	1.27	2.08	3.55
	5	0.66	1.82	2.42	3.56	5.38
	7	6.88	24.12	30.59	43.24	69.85



Şekil 88. Sistem 2 GPU hızlanma oranları

Tablo 31. Sistem 3 için GPU ile elde edilen süreler (saniye)

		HESAPLANAN FREKANS SAYISI				
		8	40	80	160	320
TANIMLAMA FONKSİYONU DERECESİ	1	0.25	0.56	0.88	1.35	2.26
	3	0.289	0.724	1.14	1.876	3.17
	5	1.9	6.15	8.09	12.67	19.12
	7	114.3	400.6	536.14	768.19	1309.7



Şekil 89. Sistem 3 GPU hızlanma oranları

Sistem 1, 2 ve 3 için elde edilen GPU hesaplama süreleri ve hızlanma oranları incelendiğinde, en düşük işlem yüküne sahip 8 frekans değeri için 1. Derece TF hesaplanması işleminde tüm sistemler için en az yaklaşık 1.5 kat (%50) hızlanma sağlanmaktadır. Hesaplanan frekans sayıları ve TF dereceleri (işlem yükü) arttıkça hızlanma oranları da artmakta ve her üç sistemde 320 frekans değeri ve 7. Derece TF için sonuçlar 10 kat daha hızlı elde edilmektedir. Bu sonuçlar İP-4 için öngörülen başarı ölçütünün sağlandığını göstermekle birlikte, özellikle işlem yükünün fazla olduğu işlemler için geliştirilen algortimanın GPU ile oldukça verimli şekilde çalışabildiğini ortaya koymaktadır.

5. SONUÇ

Doğrusal olmayan sistemlerin analizi zaman ve frekans boyutunda olmak üzere farklı yöntemler kullanılarak gerçekleştirilebilmektedir. Zaman boyutundaki yöntemler sistemin davranışlarının analizi açısından yetersiz kalabilmektedir. Örneğin atlama olayı gibi doğrusal olmaya sistem davranışları frekans boyutunda incelenmektedir. Bu nedenle frekans boyutunda analiz yöntemlerinden birisi olan Volterra Serileri temelli Tanımlama Fonksiyonları yöntemi ele alınmıştır. Bu yöntem ile doğrusal olmayan sistemlerin frekans cevabı iki boyutlu genlik kazancı ve faz farkı grafikleri ile sunulabilmektedir. Bu yöntemin daha kolay uygulanabilmesi ve yaygınlaştırılması için bir arayüz tasarlanmıştır. 3 farklı doğrusal olmayan sistem için geliştirilen arayüzde sonuçlar elde edilmiş ve bu sistemler için MATLAB Simulink sonuçları karşılaştırılarak tasarlanan Arayüzün doğruluğu gösterilmiştir. Ayrıca Pspice elektronik simülasyon platformunda da projede kullanılan 3 farklı doğrusal olmayan sistem için analog devreler tasarlanıp simüle edilmiştir. Simülasyon sonuçlarının ardından devreler gerçekleştirilerek deneysel sonuçlar elde edilmiştir. Elde edilen simülasyon ve deneysel sonuçlar ile önceki sonuçlar karşılaştırılarak projede ele alınan yöntemin geçerliliği ortaya konmuştur.

Dördüncü bölümdeki sonuç grafikleri incelendiğinde farklı platformlar ve yöntemler ile elde edilen tüm sonuçların (simülasyon sonuçları ve deneysel sonuçlar) Tanımlama Fonksiyonları ile elde edilen sonuçlarla uyum içinde olduğu ve birbirini doğruladığı görülmüştür. Burada, doğrusal olmayan terim yapıları ve dereceleri farklı sistemler üzerinde, farklı genlik ve frekans değerleri için gerçekleştirilen simülasyonlar ile Tanımlama Fonksiyonları yöntemleri kullanılarak hesaplanan frekans cevaplarının doğru olduğu ortaya konmuştur. Bu durum hem MATLAB Simulink ile gerçekleştirilen simülasyonları, hem de Pspice elektronik devre simülasyonunda ile gösterilmiştir. Ayrıca elektronik devreler gerçekleştirilerek elde edilen deneysel sonuçlar da proje kapsamında tasarlanan arayüz ile elde edilen frekans cevaplarının geçerli olduğunu göstermektedir.

Sonuçta, dört farklı platform/yöntem ile elde edilen frekans cevapları karşılaştırılarak sonuçlar yorumlanmış ve Tanımlama Fonksiyonu yönteminin kullanılabilirliği gösterilmiştir. Özellikle daha düşük genliklerdeki düşük dereceli Tanımlama Fonksiyonları sonuçları ile simülasyon sonuçları tam olarak örtüşmektedir. Daha yüksek genliklerdeki yüksek dereceli Tanımlama Fonksiyonları sonuçları ile simülasyon sonuçları arasında ise rezonans frekansında küçük farkların olduğu tespit edilmiştir. Bunun nedeni Tanımlama fonksiyonları yönteminin genlik bağımlı bir yöntem olması, yüksek derece ve yüksek genliklerin yöntemin yapısı gereği rezonans frekansı civarında farklı sonuçlar oluşturmasıdır. Rezonans frekansı

dışındaki değerler için ise bu durum bir problem oluşturmamakta ve elde edilen tüm sonuçlar tam olarak örtüşmektedir. Buna göre, elde edilen sonuçların proje kapsamında öngörülen başarı ölçütlerini fazlasıyla sağladığı görülmektedir.

Proje kapsamında elde edilen bir diğer sonuç, doğrusal olmayan sistemlerin analog elektronik devre tasarımının basitçe yapılabileceğinin gösterilmesi ve deneysel olarak frekans analizi için uygun bir yöntem olduğudur.

Tanımlama Fonksiyonlarının doğrusal olmayan sistemlerin frekans analizi için kullanılabilirliğinin gösterilmesinin yanında, proje kapsamında sağlanan en önemli çıktı Tanımlama Fonksiyonları ile frekans cevabının daha hızlı elde edilebileceği yeni bir algoritma tasarlanmasıdır. Bu algoritma sayesinde ele alınan yöntem ile sonuçların elde edilmesi çok büyük oranda hızlandırılmış ve ilgili başarı ölçütü fazlasıyla sağlanmıştır. Bölüm 3’de elde edilen ilgili sonuçlar (Tablo 3 ve Şekil 14) hızlanmanın yüksek dereceli fonksiyonlar için logaritmik olarak arttığını göstermektedir.

Proje kapsamında ele alınan Tanımlama Fonksiyonları yönteminde yeni algoritma ile hızlandırmanın yanında, paralel hesaplama kullanılarak da hızlandırma yapılmış ve yöntemin günümüz teknolojisine uyumlu olarak çalışması sağlanmıştır. Bu bağlamda, hem çok çekirdekli işlemci hem de grafiksel işlem birimi (GPU) kullanılarak yöntemin paralelleştirilmesi sağlanmış ve sonuçların elde edilme süreleri kısaltılarak önemli ölçüde hızlanma gerçekleştirilmiştir.

Sonuç olarak, proje kapsamında elde edilen bilimsel katkılar aşağıdaki maddeler halinde özetlenebilir;

- Tanımlama Fonksiyonları yöntemi için bir arayüz tasarlanmıştır,
- Tanımlama Fonksiyonları yöntemi için yeni bir hesaplama algoritması geliştirilmiştir,
- Geliştirilen yeni algoritma ile paralel hesaplama teknolojileri uyumlu hale getirilerek daha hızlı sonuçlar elde edilmiştir,
- Biribirinden farklı doğrusal olmayan sistemlerin simulink modelleri elde edilmiştir,
- Biribirinden farklı doğrusal olmayan sistemlerin pspice modelleri elde edilmiştir,
- Biribirinden farklı doğrusal olmayan sistemlerin analog elektronik devreleri tasarlanmış ve gerçekleştirilmiştir,
- Doğrusal olmayan sistemlerin frekans analizi farklı yöntemler kullanılarak, hem simülasyon, hem analitik, hem de deneysel olarak gerçekleştirilmiştir,

- Elde edilen tüm sonuçlar karşılaştırılarak, kullanılan tüm yöntemlerin doğru sonuç verdiği gösterilmiştir.

Bu maddeler göz önüne alındığında proje kapsamında öngürülen tüm İş paketlerinin zamanında ve başarılı olarak tamamlandığı, tüm başarı ölçütlerinin sağlandığı görülmektedir. Buna göre projenin başarılı bir şekilde sonuçlandırıldığı değerlendirilmektedir.

Proje kapsamında, proje konusu ve iş paketleri ile ilgili (Tübitak katkısının belirtildiği) 2 adet uluslararası bildiri yayınlanmıştır. Şu anda 4 adet makalenin hazırlanmasına devam edilmekte ve en kısa sürede ilgili ulusal ve uluslararası indeksli dergilere gönderilmesi planlanmaktadır. Ayrıca, projenin imkanları kullanılarak hazırlanmış ve proje konusu ile dolaylı olarak ilgili olan (Tübitak katkısının belirtildiği) 3 adet uluslararası sempozyum bildirisi ve (Tübitak katkısının belirtildiği) 2 adet SCI indeksli makale yayınlanmıştır.

6. KAYNAKLAR

Akıncı, G. ve Yılmaz, A. E. 2013. "CPU ve GPU Üzerinde Eşlenik Gradyan Yöntemi İmplementasyonlarının Performanslarının Karşılaştırılması", 6. Mühendislik ve Teknoloji Sempozyumu (MTS6), 259-262.

Altman, Y. 2014. "Accelerating MATLAB Performance: 1001 tips to speed up MATLAB programs", London/England: CRC Press, 308.

Barrett, J. F. 1965. "The use of Volterra series to find region of stability of a non-linear differential equation", International Journal of Control, 1(3), 209–216.

Bedrosian, E., & Rice, S. O. 1971. "The output properties of Volterra systems (nonlinear systems with memory) driven by harmonic and Gaussian inputs", Proceedings of the IEEE, 59(12), 1688–1707.

Billings, Stephen A. 1980. "Identification of nonlinear systems—a survey", IEE Proceedings D (Control Theory and Applications), 127, 272–285. IET.

Billings, S. A., & Tsang, K. M. 1989. "Spectral analysis for non-linear systems, Part I: Parametric non-linear spectral analysis", Mechanical Systems and Signal Processing, 3(4), 319–339.

Billings, S. A., & Peyton Jones, J. C. 1990. "Mapping non-linear integro-differential equations into the frequency domain", International Journal of Control, 52(4), 863–879.

Billings, S. A., & Lang, Z.-Q. 1997. "Truncation of nonlinear system expansions in the frequency domain", International Journal of Control, 68(5), 1019–1042.

Brenner, M., & Xu, Y. 2002. "A factorization method for identification of Volterra systems", Journal of computational and Applied Mathematics, 144(1-2), 105–117.

Brilliant, M. B. 1958. "Theory of the analysis of nonlinear systems (No. TR-345)", MASSACHUSETTS INST OF TECH CAMBRIDGE RESEARCH LAB OF ELECTRONICS.

Biswas, T. K., & McGee, W. F. 1991. "Volterra series analysis of semiconductor laser diode", IEEE Photonics Technology Letters, 3(8), 706–708.

Brogan, W. L. 1974. Modern control theory, Pearson education india.

Bui, F. M., Li, J., Bott, K., & Mintchev, M. P. 2001. "Volterra series modelling and compensation of non-linear distortions caused by susceptibility difference artefacts related to the presence of ferromagnetic implants in magnetic resonance imaging", *Medical engineering & physics*, 23(3), 207–215.

Chadwick, M. A., Kadiramanathan, V., & Billings, S. A. 2006. "Analysis of fast-sampled non-linear systems: generalised frequency response functions for δ -operator models", *Signal Processing*, 86(11), 3246–3257.

Chatterjee, A., & Vyas, N. S. 2000. "Convergence analysis of Volterra series response of nonlinear systems subjected to harmonic excitation", *Journal of Sound and Vibration*, 236(2), 339–358.

Chatterjee, A., & Vyas, N. S. 2003. "Non-linear parameter estimation with Volterra series using the method of recursive iteration through harmonic probing", *Journal of Sound and Vibration*, 268(4), 657–678.

Chatterjee, A., & Vyas, N. S. 2004. "Non-linear parameter estimation in multi-degree-of-freedom systems using multi-input Volterra series", *Mechanical Systems and Signal Processing*, 18(3), 457-489.

Chen, Y. Z. 2003. "Evaluation of motion of the Duffing equation from its general properties", *Journal of Sound and Vibration*, 264, 491–497.

Chua, L., & Tang, Y.-S. 1982. "Nonlinear oscillation via Volterra series", *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, 29(3), 150–168.

Cveticanin, L. 2001. "Analytic approach for the solution of the complex-valued strong non-linear differential equation of Duffing type", *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 297, 348–360.

Gelb, A., & Van der Velde, W. E. 1968. "Multiple-input describing functions and non-linear system design", McGraw-Hill Electronic Sciences Series, New York, NY: McGraw-Hill.

Guo, Y., Guo, L. Z., Billings, S. A., Coca, D., & Lang, Z. Q. 2013. "Volterra Series Approximation of a Class of Nonlinear Dynamical Systems Using the Adomian Decomposition Method", *Nonlinear Dynamics*, 74(1), 359-371

Hélie, T., & Roze, D. 2008. "Sound synthesis of a nonlinear string using Volterra series", *Journal of Sound and Vibration*, 314(1-2), 275–306.

Hsu, H. P. 1995. "Schaum's outline of theory and problems of signals and systems", *Schaum's Outline Series*. New York, NY: McGraw-Hill.

Jing, X. J., Lang, Z. Q., & Billings, S. A. 2008. "Frequency domain analysis for non-linear Volterra systems with a general non-linear output function", *International Journal of Control*, 81(2), 235–251.

Jing, X., & Lang, Z. 2009. "On the Generalized Frequency Response Functions of Volterra Systems", *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 131(6), 061002-061002-061008.

Jing, X. J., Lang, Z. Q., & Billings, S. A. 2010. "Output frequency properties of nonlinear systems", *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 45(7), 681-690.

Jones, J. C. P., & Billings, S. A. 1991. "Describing functions, Volterra series, and the analysis of non-linear systems in the frequency domain", *International Journal of Control*, 53(4), 871-887.

Jones, J. C. P. 1995. "Mapping nonlinear integro-differential equations to a generalized describing function form", *International Journal of Control*, 62(5), 1145-1160.

Kaçar, S., & Çankaya, İ. 2010. "Volterra Serileri Metodu İle Doğrusal Olmayan Sistemlerin Frekans Boyutunda Analizi İçin .Net Tabanlı Arayüz Tasarımı", *Deü Mühendislik Fakültesi Fen Bilimleri Dergisi*, 12(3), pp. 87-102.

Kacar, Sezgin, & Cankaya, I. 2012. "Analysis of nonlinear systems using MATLAB and Asp. Net based web interface", *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 27(4), 795–806.

Kacar, S., Cankaya, I., & Boz, A. F. 2014. "Investigaton of computational load and parallel computing of Volterra series method for frequency analysis of nonlinear systems", *Optoelectronics and advanced materialsrapid communications*, 8(5-6), 555–566.

Kerschen, G., Worden, K., Vakakis, A. F., & Golinval, J.-C. 2006. "Past, present and future of nonlinear system identification in structural dynamics", *Mechanical Systems and Signal Processing*, 20(3), 505-592.

Kovacic, I., & Brennan, M. J. 2011. "The Duffing equation: nonlinear oscillators and their behaviour," John Wiley & Sons.

Kuo, B. C., & Bir, A. 2009. *Otomatik kontrol sistemleri. Literatür Yayınları.*

Li, Y., Billings, S. A., Wei, H. L., & Liao, X. F. 2012. "Time-varying linear and nonlinear parametric model for Granger causality analysis", *Physical Review E*, 85(4), 041906.

Manson, G., Worden, K., & Wood, M. 2012. "Analysis of Reciprocity Breakdown in Nonlinear Systems", *Journal of Physics: Conference Series*, 382, 012031.

Masugi, M., & Takuma, T. 2007. "Using a Volterra system model to analyze nonlinear response in video-packet transmission over IP networks", *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 12(3), 411-421.

Narayanan, S. 1970. "Application of Volterra series to intermodulation distortion analysis of transistor feedback amplifiers", *IEEE Transactions on Circuit Theory*, 17(4), 518-527.

Peng, Z. K., & Lang, Z. Q. 2007. "On the convergence of the Volterra-series representation of the Duffing's oscillators subjected to harmonic excitations", *Journal of Sound and Vibration*, 305(1), 322-332.

Peng, Z. K., Lang, Z. Q., Billings, S. A., & Tomlinson, G. R. 2008. "Comparisons between harmonic balance and nonlinear output frequency response function in nonlinear system analysis", *Journal of Sound and Vibration*, 311(1), 56-73.

Petkovska, M., & Do, D. D. 1998. "Nonlinear frequency response of adsorption systems: isothermal batch and continuous flow adsorbers", *Chemical Engineering Science*, 53(17), 3081-3097.

Peyton Jones, J. C. 1995. "Generalised Describing Functions for a Class of Nonlinear Difference and Differential Equation Models", *IFAC Proceedings Volumes*, 28(14), 825-830.

Peyton Jones, J. C. 2007. "Simplified computation of the Volterra frequency response functions of non-linear systems", *Mechanical Systems and Signal Processing*, 21(3), 1452-1468.

Swain, A. K., & Billings, S. A. 2001. "Generalized frequency response function matrix for MIMO non-linear systems", *International Journal of Control*, 74(8), 829-844.

Tomlinson, G. R., Manson, G., & Lee, G. M. 1996. "A Simple Criterion For Establishing An Upper Limit To The Harmonic Excitation Level Of The Duffing Oscillator Using The Volterra Series", *Journal of Sound and Vibration*, 190(5), 751-762.

Tymerski, R. 1991. "Volterra series modeling of power conversion systems", *IEEE Transactions on Power Electronics*, 6(4), 712-718.

Volterra, V. 1930. "Theory of Functionals and of Integral and Integro", *Differential Equations*, 61.

Volterra, V. 1931. "Théorie mathématique de la lutte pour la vie", Gauthiers-Villars.

Worden, K., Manson, G., & Tomlinson, G. R. 1997. "A Harmonic Probing Algorithm For The Multi-Input Volterra Series", *Journal of Sound and Vibration*, 201(1), 67-84.

TÜBİTAK
PROJE ÖZET BİLGİ FORMU

Proje Yürütücüsü:	Doç. Dr. SEZGİN KAÇAR
Proje No:	116E176
Proje Başlığı:	Doğrusal Olmayan Sistemlerin Frekans Boyutunda Modellenmesi Ve Analizi İçin Yeni Bir Hesaplama Algoritması Tasarımı Ve Uygulaması
Proje Türü:	1001 - Araştırma
Proje Süresi:	30
Araştırmacılar:	İLYAS ÇANKAYA, CÜNEYT BAYILMIŞ, DEVİRİM AKGÜN
Danışmanlar:	
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi:	SAKARYA Ü. TEKNOLOJİ F. ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ B.
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri:	01/05/2017 - 01/11/2019
Onaylanan Bütçe:	197954.0
Harcanan Bütçe:	155250.43

TÜBİTAK

<p>Öz:</p>	<p>Doğrusal Olmayan Sistemlerin (DOS) analitik olarak modellenmesinde ve analizinde kullanılan yöntemler incelendiğinde Volterra Serilerini temel alan yöntemlerin yaygın olarak kullanıldığı görülmektedir. Bu yöntemlerden bir tanesi de diferansiyel denklemler ile tanımlanan DOS?ların frekans boyutunda modellenmesi ve analizi için kullanılan Tanımlama Fonksiyonları (TF) yöntemidir. Bu yöntem, DOS?ların frekans cevabının elde edilmesinde kullanılan etkin bir yöntem olmakla birlikte, yüksek dereceli doğrusal olmayan terimlerin bulunduğu sistemlerin frekans cevaplarının sayısal olarak hesaplanmasında oldukça fazla işlem yükü oluşturmakta ve sonuçların uzun sürede elde edilmesine neden olmaktadır. Bu projenin amacı TF ile DOS?ların frekans cevabının elde edilmesi için yeni, hızlı ve etkin bir hesaplama algoritmasının tasarlanarak, yöntemin kullanılabilirliğini arttırmaktır.</p> <p>DOS?ların modellenmesi ve analizi konusu ele alındığında yöntemlerin zaman ve frekans boyutunda olmak üzere iki temel sınıfa ayrıldığı görülmektedir. Zaman boyutundaki yöntemler ile görülen davranışların incelenmesi çok zordur. Bu nedenle frekans boyutundaki yöntemler DOS?ların analizi için daha çok tercih edilmektedir. Frekans boyutundaki yöntemler ele alındığında ise analitik olan yöntemler içerisinde Volterra Serileri temelli olan TF yöntemi hem iki boyutlu sunum kolaylığı hem de birçok farklı sisteme uygulanabilirliği açısından tercih edilmektedir. Bu projede TF yönteminin dezavantajı olan hesaplama yükünün azaltılmasını sağlayacak yeni ve özgün bir hesaplama algoritması tasarlanmıştır. Tasarlanan yeni algoritma, günümüzde standart PC donanımları haline gelen çok çekirdekli işlemciler ve grafik işlemciler barındıran bilgisayarlar için uyumlu hale getirilerek paralel hesaplama ile çok daha hızlı şekilde sonuçlar elde edilmiştir.</p> <p>Proje kapsamında gerçekleştirilen çalışmalar dört temel aşamadan meydana gelmektedir. Birinci aşamada ilk olarak TF yöntemi ayrıntılarıyla işlem basamakları halinde incelenerek, işlem yükü oluşturan kısımlar belirlenmiştir. Ardından, yöntemin bu kısımları işlem yükünü azaltacak şekilde yeni yaklaşımlar ile oluşturulmuş ve yeni algoritma tasarımı gerçekleştirilmiştir. Projenin ikinci temel aşamasında, oluşturulan yeni algoritma, çok çekirdekli işlemciler ve grafik işlemciler ile paralel hesaplama yöntemleri kullanılarak daha hızlı sonuç elde edebilecek paralel hesaplama yapısına kavuşturulmuştur. Üçüncü aşamada, tasarlanan yeni hesaplama algoritması, mekaniksel, elektriksel, hidrolik sistemler gibi doğrusal olmayan diferansiyel denklemler ile tanımlanan farklı DOS modelleri ile denenmiş ve bu sistemler için elde edilen benzetim sonuçları ile karşılaştırılarak doğrulama yapılmıştır. Son olarak, benzetim sonuçları elde edilen DOS modellerinin (örneğin, aktif süspansiyonlar, piezoelektrik osilatörler, v.b. DOS?un modellenmesi için kullanılan Duffing Denklemi gibi) karşılığı olan analog elektronik devrelerden fiziksel sistem verileri elde edilerek tasarlanan yeni algoritmanın deneysel doğrulaması da gerçek sistemler üzerinden yapılmıştır.</p> <p>Bu proje, temel analitik bir yöntem olan TF yönteminin kullanılabilirliğinin artırılması ve günümüz teknolojilerine uyumlu hale getirilerek yaygınlaştırılmasına katkı sağlamıştır. TF yöntemi için geliştirilmiş yeni hesaplama algoritması ve bunun paralel hesaplama araçları ile birlikte kullanılması projenin bilimsel alanda literatüre katkı sağlayan iki temel çıktısını oluşturmaktadır. Ayrıca proje kapsamında geliştirilen TF yöntemine yönelik kullanıcı arayüzü sayesinde, yönteme derinlemesine vakıf olmayan araştırmacılar için yöntemin kullanılabilir olması sağlanmıştır. Bununla birlikte geliştirilen algoritma ve arayüz ile yöntemin kullanılması esnasındaki zaman kaybının önüne geçilerek daha hızlı ve doğru sonuçlar elde edilmiştir. Böylelikle yüksek teorik ve matematik altyapıya sahip bir yöntem konuyla ilgili bilim insanlarının kolay kullanımına açılmış ve çalışmalarına katkı sağlamıştır</p>
<p>Anahtar Kelimeler:</p>	<p>Doğrusal olmayan sistemler, Frekans cevabı, Tanımlama Fonksiyonları, Paralel hesaplama.</p>
<p>Fikri Ürün Bildirim Formu Sunuldu Mu?:</p>	<p>Evet</p>

Proje Yapılan Yayınlar:	<p>1- New class of chaotic systems with equilibrium points like a three-leaved clover (Makale - Diğer Hakemli Makale),</p> <p>2- A Novel 4D Chaotic System Based on Two Degrees of Freedom Nonlinear Mechanical System (Makale - Diğer Hakemli Makale),</p> <p>3- Circuit Implementations of A Nonlinear System for Integer and Fractional Orders (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Sözlü Sunum),</p> <p>4- A New 4D Chaotic System with Single Parameter and its RNG Application (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Sözlü Sunum),</p> <p>5- Transfer Function Estimation of Continuous and Discrete Time Systems Based on Matlab (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Sözlü Sunum),</p> <p>6- DOĞRUSAL OLMAYAN SİSTEMLERİN FREKANS CEVABININ ELDE EDİLMESİ İÇİN ANALOG DEVRE TASARIMI (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Sözlü Sunum),</p> <p>7- DOĞRUSAL OLMAYAN SİSTEMLERİN FREKANS CEVABININ ELDE EDİLMESİ İÇİN VOLTERRA SERİLERİ TEMELLİ TANIMLAMA FONKSİYONLARININ KULLANILMASI (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Sözlü Sunum),</p>
-------------------------	--

TÜBİTAK