

**ELASTOMERİK MALZEMELERİN DİNAMİK
KARAKTERİSTİKLERİNİN TEORİK VE DENEYSEL
İNCELENMESİ**

Murat KÖKSAL

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

EKİM 2012

ANKARA

Murat KÖKSAL tarafından hazırlanan “ELASTOMERİK MALZEMELERİN DİNAMİK KARAKTERİSTİKLERİNİN TEORİK VE DENEYSEL İNCELENMESİ” adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Yrd. Doç. Dr. Tuncay KARAÇAY

.....

Tez Danışmanı, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Makina Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Nizami AKTÜRK

.....

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, G. Ü.

Yrd. Doç. Dr. Tuncay KARAÇAY

.....

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, G. Ü.

Doç. Dr. Sadettin ORHAN

.....

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Y. B. Ü.

Tarih: 10/10/2012

Bu tez ile G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof.Dr. Şeref SAĞIROĞLU

.....

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Murat KÖKSAL

**ELASTOMERİK MALZEMELERİN DİNAMİK
KARAKTERİSTİKLERİNİN TEORİK VE DENEYSEL İNCELENMESİ
(Yüksek Lisans Tezi)**

Murat KÖKSAL

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

Ekim 2012

ÖZET

Bu çalışmada bir elastomer numunenin dinamik karakteristiği analitik olarak modellenmiştir. Analitik çalışma sonucu numune geometrisine, yer değiştirme genliğine ve numunenin kompleks Young modülüne bağlı bir kompleks katılık ifadesi elde edilmiştir. Elde edilen kompleks katılık ifadesinin bir değişkeni olan kompleks Young modülü, iki parametrelili Maxwell, iki parametrelili Voigt, üç parametrelili Maxwell, üç parametrelili Voigt ve beş parametrelili Voigt modelleri olmak üzere beş farklı konfigürasyona sahip viskoelastik modeller için frekansın fonksiyonu olarak modellenmiştir. Modellerin doğrulanması amacı ile bir deney prosedürü uygulanmıştır. Deney prosedürü, aynı numunenin farklı şekillerde bağlanması ile oluşturulan iki farklı konfigürasyon için uygulanmıştır. Birinci konfigürasyon 2,56 kN, 4,9 kN ve 10 kN ön yükleme koşulları için, ikinci konfigürasyon ise 0,5 kN ve 1,01 kN ön yükleme koşulları için test edilmiştir. Tüm bu testler 0,5 Hz, 1,0 Hz, 1,5 Hz ve 2,0 Hz frekans değerleri için gerçekleştirilmiştir. Ayrıca ikinci konfigürasyonda numune, 1,01 kN ön yükleme koşulu için 2 mm strok ile yine aynı frekanslarda, 3 mm ve 4 mm strok değerleri için 0,5 Hz’de test edilmiştir. Deneysel sonuçlar kullanılarak modellerdeki parametreler tüm ön yükleme koşulları için elde edilmiştir. Parametreler nümerik olarak MATLAB yazılımının “fsolve” komutu ile elde edilmiştir. Çıkarılan modeller ile deneysel sonuçlar karşılaştırılmış ve bu şekilde

modele ait konfigürasyon ve parametre sayısının modelin hassasiyetine olan etkisi araştırılmıştır.

Deneyssel çalışma ile elde edilen sonuçlara göre, K' ve K'' değerleri ön yükleme ile artmıştır. Bununla birlikte numuneye uygulanan gerininin genliği arttıkça K' ve K'' değerleri azalmıştır. Analitik çalışma sonucunda ise Maxwell modellerinin aynı sayıda parametreye sahip Voigt modellerine göre daha hassas olduğu görülmüştür. Bununla birlikte Voigt modellerinin hassaslığı parametre artışı ile arttırılabilmektedir. Analitik çalışma sonucu oluşturulan viskoelastik modellere ait histerezis döngüleri elde edilmiş ve deneyssel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre modellerin numunenin gösterdiği nonlinear davranışı simüle edemediği, ancak nonlinear davranışın daha az baskın olduğu yüksek ön yükleme koşullarında tutarlı sonuçlar verdiği görülmüştür.

Bilim Kodu : 914.1.003

Anahtar Kelimeler : Elastomerik malzeme, viskoelastik malzeme, dinamik karakteristik, depolama katılığı, sönüm katılığı, Maxwell modeli, Voigt modeli

Sayfa Adedi : 127

Tez Yöneticisi : Yrd. Doç. Dr. Tuncay KARAÇAY

**THEORETICAL AND EXPERIMENTAL ANALYSIS OF DYNAMIC
CHARACTERISTICS OF ELASTOMERIC MATERIALS**

(M. Sc. Thesis)

Murat KÖKSAL

**GAZİ UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY**

October 2012

ABSTRACT

In this study dynamic characteristics of an elastomer specimen is modelled analytically. As a result of the analytical study an expression for the complex stiffness of the specimen which is a function of geometry, displacement amplitude, and complex Young modulus of the specimen is obtained. Complex Young modulus of the specimen which is a variable of the complex stiffness is modelled for five different configuration which are Maxwell model with two parameters, Voigt model with two parameters, Maxwell model with three parameters, Voigt model with three parameters, and Voigt model with five parameters as a function of frequency. To verify the models a test procedure is presented. The test procedure is applied to two different configurations which are constituted by mounting the same specimen in different shapes. The first configuration is tested for 2,56 kN, 4,90 kN, and 10 kN preload conditions and the second configuration is tested for 0,5 kN, and 1,01 kN preload conditions. All these tests are repeated for the frequencies 0,5 Hz, 1,0 Hz, 1,5 Hz, and 2,0 Hz. For the second configuration, the specimen is also tested for 1,01 kN preload with 2 mm stroke at the same frequencies and with 3, and 4 mm strokes at 0,5 Hz frequency. By using the experimental results, the parameters of models are estimated. The estimation of the parameter is done numerically by using “fsolve” command of MATLAB software. The estimated models and experimental results are compared and with this process, the effects of

configuration and number of parameters on the sensitivity of the models are investigated

According to experimental results, K' and K'' values increases with the preload. However, these values decreases as the strain amplitude increases. According to the results of analytical study, Maxwell models are more sensitive than Voigt models which have the same numbers of parameters. However, the sensitivitiy of Voigt model is increased by increasing the number of parameters. As a result of analytical study, the hysteresis cycles of the viscoelastic models are obtained and compared with the experimental results. According to the results, it is seen that the models cannot simulate the nonlinear behavior of the specimen but for the higher preload conditions at which the nonlinear behavior of the specimen is not dominant the models give consistent hysteresis cycles with experimental results.

Science Code : 914.1.003

Key Words : Elastomeric material, viscoelastic material, dynamic characteristic, storage stiffness, loss stiffness, Maxwell model, Voigt model

Page Number : 127

Adviser : Assist. Prof. Dr. Tuncay KARAÇAY

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla bana yol gösteren, bilgi ve önerileriyle bana destek olan danışman hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Tuncay KARAÇAY'a, yine kıymetli tecrübelerinden faydalandığım hocam Sayın Prof. Dr. Nizami AKTÜRK'e, tez çalışmam süresinde destekleriyle beni yalnız bırakmayan teyze oğlum Makine Mühendisi Mehmet Çağrı SİVRİ'ye, arkadaşım Makine Yüksek Mühendisi Ali Rıza DOĞAN'a, bana sunduğu imkanlardan dolayı Gazi Üniversitesi'ne ve her aşamada manevi destekleriyle yanımda olan aileme teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ÇİZELGELERİN LİSTESİ	xii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xiii
RESİMLERİN LİSTESİ	xviii
SİMGELER VE KISALTMALAR	xix
1. GİRİŞ	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	3
3. ELASTOMERİK MALZEMELER	9
3.1. Elastomerlerin Dinamik Özellikleri	10
3.1.1. Histerezis	14
3.1.2. Kompleks modül yaklaşımı	16
3.1.3. Sıcaklığın dinamik cevap üzerindeki etkileri	19
3.1.4. Frekansın dinamik cevap üzerindeki etkileri	19
3.1.5. Gerinim genliğinin dinamik cevap üzerindeki etkileri	20
3.1.6. Statik ön yüklemenin dinamik cevap üzerindeki etkileri	21
3.2. Dinamik Test Kavramı	21
4. ELASTOMERLERİN ANALİTİK MODELLENMESİ	26
4.1. Numuneye Ait Kompleks Katılık İfadesinin Geometri, Deformasyon Şekli ve Young Modülüne Bağlı Olarak Belirlenmesi	26

Sayfa

4.1.1. Dikdörtgen kesitli numuneler için kompleks katılık.....	32
4.2. Kompleks Young Modülünün Viskoelastik Model ile Belirlenmesi	35
4.2.1. İki parametrelili Maxwell elemanı ile kompleks Young modülünün modellenmesi.....	37
4.2.2. İki parametrelili Voigt elemanı ile kompleks Young modülünün modellenmesi.....	39
4.2.3. Üç parametrelili genelleştirilmiş Maxwell modeli ile kompleks Young modülünün modellenmesi	41
4.2.4. Üç parametrelili genelleştirilmiş Voigt modeli ile kompleks Young modülünün modellenmesi.....	44
4.2.5. Beş parametrelili genelleştirilmiş Voigt modeli ile kompleks Young modülünün modellenmesi.....	47
5. DENEY DÜZENİĞİ VE DENEYLERİN YAPILIŞI.....	52
5.1. Deney Düzenliği	52
5.1.1. Dartec çekme cihazı	57
5.1.2. Kontrol birimi.....	57
5.1.3. Bilgisayarlı veri toplama sistemi.....	58
5.2. Test Prosedürü.....	59
6. BULGULAR VE TARTIŞMA	61
6.1. Deneysel Sonuçlar	61
6.1.1. Birinci konfigürasyona ait test sonuçları	61
6.1.2. İkinci konfigürasyona ait test sonuçları.....	69
6.2. Analitik Çalışma.....	77
6.2.1. Birinci konfigürasyon	79
6.2.2. İkinci konfigürasyon	98

	Sayfa
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	117
KAYNAKLAR.. ..	120
EKLER.....	123
EK-1 Numuneye Ait Dökümanlar	124
ÖZGEÇMİŞ.....	127

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 5.1. Test konfigürasyonları.....	52
Çizelge 5.2. Birinci konfigürasyon için yapılan testler.....	53
Çizelge 5.3. İkinci konfigürasyon için yapılan testler	54

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 3.1. Viskoelastik davranışı temsil eden basit bir yay amortisör sistemi	11
Şekil 3.2. Yay-sönümleyici sisteminin zamana göre davranışı.....	12
Şekil 3.3. Sinüzoidal yer değiştirme girişi sonucu yay, viskoz sönümleyici ve elastomer malzemede oluşan kuvvetler	14
Şekil 3.4. Histerezis çevrimi.....	15
Şekil 3.5. Lineer eliptik histerezis eğrisi ile depolama ve sönüm modüllerinin tanımı.	18
Şekil 3.6. Sıcaklığın depolama modülü ve sönüm faktörü üzerindeki etkisi	19
Şekil 3.7. Frekansın depolama modülü, sönüm modülü ve sönüm tanjantı üzerindeki etkileri.	20
Şekil 3.8. Ön yüklemenin dinamik özellikler üzerindeki etkisi	21
Şekil 3.9. Dinamik test cihazlarına ait genel bir şema	22
Şekil 3.10. Dinamik deneyde elde edilen gerilme ve gerinim sinyalleri	23
Şekil 4.1. Elastomer deformasyonunun gösterimi	27
Şekil 4.2. Dikdörtgen kesitli numune.....	33
Şekil 4.3. Viskoelastik modele ait temel elemanlar.....	36
Şekil 4.4. Genelleştirilmiş Voigt ve Genelleştirilmiş Maxwell modelleri.....	36
Şekil 4.5. İki parametrelili Maxwell elemanı ve tanımlanan değişkenler	37
Şekil 4.6. İki parametrelili Voigt elemanı	40
Şekil 4.7. Üç parametrelili Genelleştirilmiş Maxwell modeli	41
Şekil 4.8. Üç parametrelili Genelleştirilmiş Voigt modeli.....	44
Şekil 4.9. Beş parametrelili genelleştirilmiş Voigt Modeli	47
Şekil 5.1. Elastomer test numunesi	55

Şekil	Sayfa
Şekil 6.1. 0,5 Hz frekansta, ön yüklemesiz zorlama için histerezis eğrisi	62
Şekil 6.2. 0,5 Hz frekans ve 2,56 kN ön yükleme için histerezis eğrisi.....	62
Şekil 6.3. 1 Hz frekans ve 2,56 kN ön yükleme için histerezis eğrisi	63
Şekil 6.4. 1,5 Hz frekans ve 2,56 kN ön yükleme için histerezis eğrisi.....	63
Şekil 6.5. 2 Hz frekans ve 2,56 kN ön yükleme için histerezis eğrisi	63
Şekil 6.6. 0,5 Hz frekans ve 4,90 kN ön yükleme için histerezis eğrisi.....	64
Şekil 6.7. 1,0 Hz frekans ve 4,90 kN ön yükleme için histerezis eğrisi.....	64
Şekil 6.8. 1,5 Hz frekans ve 4,90 kN ön yükleme için histerezis eğrisi.....	65
Şekil 6.9. 2 Hz frekans ve 4,90 kN ön yükleme için histerezis eğrisi	65
Şekil 6.10. 0,5 Hz frekans ve 10 kN ön yükleme için histerezis eğrisi	66
Şekil 6.11. 1,0 Hz frekans ve 10 kN ön yükleme için histerezis eğrisi	66
Şekil 6.12. 1,5 Hz frekans ve 10 kN ön yükleme için histerezis eğrisi	66
Şekil 6.13. 2,0 Hz frekans ve 10 kN ön yükleme için histerezis eğrisi	67
Şekil 6.14. Birinci konfigürasyon için katılık ve sönüm özelliklerinin frekans ve ön yüklemeye göre değişimi.....	68
Şekil 6.15. 0,5 Hz frekans ve 0,5 kN ön yükleme için histerezis eğrisi	69
Şekil 6.16. 1,0 Hz frekans ve 0,5 kN ön yükleme için histerezis eğrisi	70
Şekil 6.17. 1,5 Hz frekans ve 0,5 kN ön yükleme için histerezis eğrisi	70
Şekil 6.18. 2 Hz frekans ve 0,5 kN ön yükleme için histerezis eğrisi	70
Şekil 6.19. 0,5 Hz frekans ve 1,01 kN ön yükleme için histerezis eğrisi.....	71
Şekil 6.20. 1 Hz frekans ve 1,01 kN ön yükleme için histerezis eğrisi	71
Şekil 6.21. 1,5 Hz frekans ve 1,01 kN ön yükleme için histerezis eğrisi.....	72
Şekil 6.22. 2 Hz frekans ve 1,01 kN ön yükleme için histerezis eğrisi	72

Şekil	Sayfa
Şekil 6.23. 2 mm strok, 0,5 Hz frekans ve 1,01 kN ön yükleme için histerezis eğrisi	73
Şekil 6.24. 2 mm strok, 1 Hz frekans ve 1,01 kN ön yükleme için histerezis eğrisi	73
Şekil 6.25. 2 mm strok, 1,5 Hz frekans ve 1,01 kN ön yükleme için histerezis eğrisi	73
Şekil 6.26. 2 mm strok, 2 Hz frekans ve 1,01 kN ön yükleme için histerezis eğrisi	74
Şekil 6.27. 3 mm strok, 0,5 Hz frekans ve 1,01 kN ön yükleme için histerezis eğrisi	74
Şekil 6.28. 4 mm strok, 0,5 Hz frekans ve 1,01 kN ön yükleme için histerezis eğrisi	75
Şekil 6.29. İkinci konfigürasyon için katılık ve sönüm özelliklerinin frekans ve ön yüklemeye göre değişimi	76
Şekil 6.30. İkinci konfigürasyon için katılık ve sönüm özelliklerinin yer değiştirme genliğine göre değişimi.....	76
Şekil 6.31. 2,56 kN ön yük için, viskoelastik modeller ile elde edilen K' değerlerinin karşılaştırılması	80
Şekil 6.32. 2,56 kN ön yük için, viskoelastik modeller ile elde edilen K'' değerlerinin karşılaştırılması	80
Şekil 6.33. 2,56 kN ön yükleme ve 0,5 Hz frekans değeri için elde edilen histerezis eğrilerinin karşılaştırılması	81
Şekil 6.34. 2,56 kN ön yükleme ve 1,0 Hz frekans değeri için elde edilen histerezis eğrilerinin karşılaştırılması	82
Şekil 6.35. 2,56 kN ön yükleme ve 1,5 Hz frekans değeri için elde edilen histerezis eğrilerinin karşılaştırılması	83
Şekil 6.36. 2,56 kN ön yükleme ve 2,0 Hz frekans değeri için elde edilen histerezis eğrilerinin karşılaştırılması	84
Şekil 6.37. 4,90 kN ön yük için, viskoelastik modeller ile elde edilen K' değerlerinin karşılaştırılması	86

Şekil	Sayfa
Şekil 6.38. 4,90 kN ön yük için, viskoelastik modeller ile elde edilen K'' değerlerinin karşılaştırılması	86
Şekil 6.39. 4,90 kN ön yükleme ve 0,5 Hz frekans değeri için elde edilen histerezis eğrilerinin karşılaştırılması	87
Şekil 6.40. 4,90 kN ön yükleme ve 1,0 Hz frekans değeri için elde edilen histerezis eğrilerinin karşılaştırılması	88
Şekil 6.41. 4,90 kN ön yükleme ve 1,5 Hz frekans değeri için elde edilen histerezis eğrilerinin karşılaştırılması	89
Şekil 6.42. 4,90 kN ön yükleme ve 2,0 Hz frekans değeri için elde edilen histerezis eğrilerinin karşılaştırılması	90
Şekil 6.43. 10 kN ön yük için, viskoelastik modeller ile elde edilen K' değerlerinin karşılaştırılması	92
Şekil 6.44. 10 kN ön yük için, viskoelastik modeller ile elde edilen K'' değerlerinin karşılaştırılması	92
Şekil 6.45. 10 kN ön yükleme ve 0,5 Hz frekans değeri için elde edilen histerezis eğrilerinin karşılaştırılması	93
Şekil 6.46. 10 kN ön yükleme ve 1,0 Hz frekans değeri için elde edilen histerezis eğrilerinin karşılaştırılması	94
Şekil 6.47. 10 kN ön yükleme ve 1,5 Hz frekans değeri için elde edilen histerezis eğrilerinin karşılaştırılması	95
Şekil 6.48. 10 kN ön yükleme ve 2,0 Hz frekans değeri için elde edilen histerezis eğrilerinin karşılaştırılması	96
Şekil 6.49. 0,5 kN ön yük için, viskoelastik modeller ile elde edilen K' değerlerinin karşılaştırılması	98
Şekil 6.50. 0,5 kN ön yük için, viskoelastik modeller ile elde edilen K'' değerlerinin karşılaştırılması	99
Şekil 6.51. 0,5 kN ön yükleme ve 0,5 Hz frekans değeri için elde edilen histerezis eğrilerinin karşılaştırılması	100
Şekil 6.52. 0,5 kN ön yükleme ve 1,0 Hz frekans değeri için elde edilen histerezis eğrilerinin karşılaştırılması	101

Şekil	Sayfa
Şekil 6.53. 0,5 kN ön yükleme ve 1,5 Hz frekans değeri için elde edilen histerezis eğrilerinin karşılaştırılması	102
Şekil 6.54. 0,5 kN ön yükleme ve 2,0 Hz frekans değeri için elde edilen histerezis eğrilerinin karşılaştırılması	103
Şekil 6.55. 1,01 kN ön yük için, viskoelastik modeller ile elde edilen K' değerlerinin karşılaştırılması	105
Şekil 6.56. 1,01 kN ön yük için, viskoelastik modeller ile elde edilen K'' değerlerinin karşılaştırılması	105
Şekil 6.57. 1,01 kN ön yükleme ve 0,5 Hz frekans değeri için elde edilen histerezis eğrilerinin karşılaştırılması	106
Şekil 6.58. 1,01 kN ön yükleme ve 1,0 Hz frekans değeri için elde edilen histerezis eğrilerinin karşılaştırılması	107
Şekil 6.59. 1,01 kN ön yükleme ve 1,5 Hz frekans değeri için elde edilen histerezis eğrilerinin karşılaştırılması	108
Şekil 6.60. 1,01 kN ön yükleme ve 2,0 Hz frekans değeri için elde edilen histerezis eğrilerinin karşılaştırılması	109
Şekil 6.61. 1,01 kN ön yük ve 2 mm strok girişi için, viskoelastik modeller ile elde edilen K' değerlerinin karşılaştırılması	111
Şekil 6.62. 1,01 kN ön yük ve 2 mm strok girişi için, viskoelastik modeller ile elde edilen K'' değerlerinin karşılaştırılması	111
Şekil 6.63. 2 mm strok girişi, 1,01 kN ön yükleme ve 0,5 Hz frekans değeri için elde edilen histerezis eğrilerinin karşılaştırılması	112
Şekil 6.64. 2 mm strok girişi, 1,01 kN ön yükleme ve 1,0 Hz frekans değeri için elde edilen histerezis eğrilerinin karşılaştırılması	113
Şekil 6.65. 2 mm strok girişi, 1,01 kN ön yükleme ve 1,5 Hz frekans değeri için elde edilen histerezis eğrilerinin karşılaştırılması	114
Şekil 6.66. 2 mm strok girişi, 1,01 kN ön yükleme ve 2,0 Hz frekans değeri için elde edilen histerezis eğrilerinin karşılaştırılması	115

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 5.1. Test düzeni (birinci konfigürasyon)	56
Resim 5.2. Kontrol birimi	58
Resim 5.3. Kontrol birimi ile veri toplama sistemi arasındaki bağlantı	59

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
a, b	Dikdörtgen kesitli numunenin yük uygulanan yüzeyine ait kenar ölçüleri
C_{eq}	Eşdeğer sönüm
E	Young modülü
E^*	Kompleks modül
E'	Depolama modülü
E''	Sönüm modülü
$E_i, i=1, 2, 3$	Viskoelastik model içindeki her bir yay elemanına ait Young modülü
F	Kuvvet
f	Polimer zincirinin deformasyonu sonrasındaki kuvvet vektörü
F_1	Maksimum yer değiştirmedeki kuvvet
f_i	Polimer zincirinin deformasyonu öncesindeki kuvvet vektörü
G	Numunenin kayma modülü
G^*	Kompleks kayma modülü
h	Numunenin yükseklik ölçüsü
k	Katılık ile orantılı bir malzeme sabiti
K	Katılık
K^*	Kompleks katılık
l, L	Numune boyu
N	Birim hacimdeki zincir sayısı
r	Polimer zincirlerinin deforme olduktan sonraki uçtan uca vektörü

Simgeler	Açıklama
S	Entropi
t	Zaman
T	Sıcaklık
U	Enerji
U_d	Çevrim başına sönmömlenen enerji
V	Hacim
W	Numunenin deformasyonu sırasında yapılan iş
w_x, w_y, w_z	Polimer zincirinin deformasyonu sırasında x, y, z eksenleri boyunca yapılan iş
x	Yer değıştirme
X, Y, Z	Deformasyondan sonra numunenin x, y, z eksenlerindeki ölçöleri
x, y, z	Asal eksenler
X_0	Yer değıştirme genliğı
X_l	Maksimum yer değıştirme
X_i, Y_i, Z_i	Numunenin x, y, z eksenlerindeki ilk ölçöleri
δ	Faz açısı
δh	Numune yüksekliğinin değışimi
$\varepsilon(t)$	Gerinim
ε^*	Kompleks gerinim
ε_0	Gerinim genliğı
η	Sönüm faktörü
$\eta_i, i=1, 2, 3$	Viskoelastik model içindeki her bir amortisör elemanına ait viskozite katsayısı
$\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$	x, y, z eksenlerindeki uzama oranları
ν	Numunedeki polimer zinciri sayısı
ρ	Sapma açısı
$\sigma(t)$	Gerilme
σ^*	Kompleks gerilme
σ'	Maksimum gerinimdeki gerilme

Simgeler**Açıklama** σ''

Sıfır gerinimdeki gerilme

 σ_0

Gerilme genliği

 ν

Poisson oranı

 ω

Frekans, rad/s

Kısaltmalar**Açıklama****BR**

Bütadien

EPDM

Etilen propilen dien monomer kauçuk

IR

İzopren kauçuk

NR

Doğal kauçuk

SBR

Sitrin bütadien kauçuk

1. GİRİŞ

Günümüzde birçok mekanik sistem için titreşim problem teşkil etmektedir. Gürültüye, aşınmalara yol açan titreşimin zararlı etkilerini önleyebilmek için birçok yöntem geliştirilmiştir. Özel makine tasarımları ile veya titreşimi oluşturan makine ile çevre arasına konan ek parçalarla titreşimin zararlı etkileri azaltılmaya çalışılmıştır [1]. Bu titreşimin zararlı etkilerini azaltan parçalara sönümleyici denilmektedir. Titreşen sistemin durumuna göre yağ filmleri, hidrolik veya pnomatik sönümleyiciler, yaylar ve elastomerik malzemeler kullanılmaktadır. Elastomer sönümleyiciler basit yapıları, yağa ve asitlere olan dayanımları, yaylanma ve titreşim sönümleme kabiliyetlerinden dolayı son zamanlarda birçok uygulamada tercih edilir olmuşlardır.

Elastomer sönümleyiciler titreşim kontrolünün her anında karşımıza çıkmaktadırlar. Helikopter rotorlarının lead-lag titreşimlerinin sönümlenmesinde [2, 3], turbo, türbin şaftları gibi yüksek hızda dönen elemanların titreşiminin sönümlenmesinde, tren raylarında, motor titreşimlerinin sönümlenmesinde, depreme dayanıklı binalarda, kaplin gibi bağlantı parçalarında, ürünlerin güvenli nakliyatı için paketlemede, hızlı tren raylarının bulunduğu köprülerde, üst geçitlerde, savunma sanayinde tank paletlerinde, tıp sektöründe, mikroskoplarda, ses izolasyonunda kullanılmaktadır [4, 6].

Endüstride kendine geniş kullanım alanı bulan elastomerik sönümleyicinin mutlaka titreşen sisteme uygun seçilmiş olması gerekmektedir. Her makine farklı bir frekans aralığında titreşim oluşturur. Bu yüzden, tek bir sönümleyici ile tüm frekans aralığında makineyi korumak mümkün değildir [1]. Bunun da ötesinde, yanlış seçilen elastomer sönümleyicinin titreşimi daha kötü hale getirmesi de mümkündür [4]. Genel olarak, kullanılan tüm sönümleyiciler belli frekans aralığında sönümleme yapabilmektedirler. Bu yüzden sönümleyici seçimi sırasında sönümleyicinin dinamik özelliklerinin (sönümleme ve katılık özellikleri) ve ayrıca belirli frekans aralığındaki cevaplarının bilinmesi önemlidir.

Günümüzde gittikçe küçülen fakat daha hızlı çalışan makine parçaları geliştirilmektedir. Tasarımcılar geliştirdikleri mekanik sistemlerin dinamik davranışlarını inceleyebilmek ve güvenilirliğini sağlayabilmek için matematiksel modeller oluşturmaktadırlar. Oluşturulan modellerin çözümlerinin doğru olabilmesi için kullanılan elastomer sönümleyiciye ait tüm parametrelerin bilinmesi gerekmektedir [7]. Elastomerlerin dinamik özellikleri uygulama alanlarına bakıldığı zaman yeterince bilinmemektedir [8].

Tezin amacı elastomerlerin dinamik karakteristiklerini, frekans, yer değiştirme genliği ve geometrinin fonksiyonu olarak modellemek ve deneysel çalışma ile modeli doğrulamaktır. Bu kapsamda önce, dikdörtgen kesitli prizmatik bir elastomer numune için numune geometrisi, malzeme özellikleri (Young modülü) ve yer değiştirme genliğinin fonksiyonu olarak bir kompleks katılık ifadesi elde edilmiştir. Elde edilen kompleks katılık ifadesinde malzeme özelliklerini kompleks Young modülü temsil etmektedir. Kompleks Young modülünü veren ifade ayrı ayrı beş farklı lineer viskoelastik model için frekansın fonksiyonu olarak elde edilmiştir. Burada söz konusu lineer viskoelastik modeller ise lineer yay ve lineer viskoz sönümleyici elemanların farklı sayı ve kombinasyonları ile oluşturulmuşlardır. Tezin sonraki bölümünde viskoelastik modellerdeki sabitleri belirlemek ve modelleri doğrulamak için bir deney prosedürü sunulmuştur. Bu kapsamda, daha önce yapılan çalışmalardan bahsedilmiş ve dinamik test kavramı ve analitik yöntemler ayrıca tanıtılmıştır. Sunulan deney prosedürü elastomer numunenin test sistemine farklı bağlanmasıyla oluşturulan iki farklı konfigürasyon için tekrar edilmiştir. Test sonuçlarına göre elastomer numunenin dinamik karakteristikleri üzerinde, frekansın, ön yüklemenin, yer değiştirme genliğinin ve geometrinin numune davranışı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çıkarılan modellere ait parametreler, test sonuçlarından elde edilen depolama ve sönüm katılığı değerlerinin analitik olarak elde edilen kompleks katılık ifadesinde (her bir model için) yerlerine konularak, nümerik yöntemlerle belirlenmiş ve model konfigürasyonu ile parametre sayısının, viskoelastik modelin hassaslığına olan etkisi incelenmiştir.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Elastomer malzemenin 16. Yüzyıl başlarında kullanılmaya başladığı bilinmektedir. Amerika yerlileri tarafından yere düşünce zıplaması yüzünden top olarak kullanılan malzeme 18'nci yüzyıl başlarına kadar kimsenin ilgisini çekmemiştir. Ciesielski'nin [9] kaydettiğine göre, İngiliz kimyacı J. B. Priestley'in kauçuğun kurşun kalem yazılarını silebildiğini keşfetmesiyle, kauçuk kırtasiyeciler arasında ticari bir mal halini almıştır. Ciesielski [9], Macintosh'un 1823 yılında kauçuğu eriyik hale getirmesi ve bu şekilde kumaşların üzerine uygulayarak yağmurluk imalatına geçmesinden bahsetmiştir. Ayrıca Ciesielski [9], o dönemde kauçuk malzemelerin sıcakta yapışkan, soğukta ise çok katı olmasının bu malzemenin temel sorunu olduğunu söylemiş, bu sorunun ise Charles Goodyear tarafından 1839 yılında ortaya konulan sülfürün sertleştirme etkisinin (vulkanizasyon) keşfi ile ortadan kaldırıldığını kaydetmiştir.

Elastomer sönümleyicilerin günümüzde birçok uygulama alanı bulunmaktadır. Dinamik özelliklerin araştırılmasının önemi uygulama alanlarının artmasıyla anlaşılmaktadır. Aktürk [4, 5], bir şaftı yataklayan rulmanların dışına elastomer sönümleyiciler yerleştirildiğini kabul ederek sistemin dinamik davranışını araştırmıştır. Aktürk [4, 5] elde ettiği sonuçlara göre, harici sönümleyici olarak tasarlanan elastomere ait dinamik özelliklerin bilinmesi ve eleman seçiminden önce ciddi bir şekilde araştırılması gerektiğini, aksi takdirde yanlış seçimin titreşimi daha kötü hale getirebileceğini kaydetmiştir. Muravyov [25] lineer dinamik viskoelastik ayırık sistemleri analiz etmiş ve bu viskoelastik sistemlerin motor bağlantı takozu olarak motor titreşimine etkisini araştırmıştır. Muravyov [25], elde ettiği optimum depolama ve sönüm modülü (storage modulus, loss modulus) değerlerini kullanarak ulaştığı sonuçlara göre, rijit bağlantı durumuna kıyasla sistemin kuvvet iletim çarpanının önemli ölçüde azaldığını görmüştür. Nakamura [28] asma köprülerde elastomer sönümleyici uygulamalarını gösterirken, Park [29] nükleer artıkların depolanacağı elastomer sönümleyiciler ile desteklenmiş bir deponun dinamik davranışını incelemiştir. 1970 yılından bu yana, elastomerik sönümleyiciler helikopter rotorlarının lead-lag titreşimlerini sönümlemekte kullanılmaktadır. SA-

431 Gazelle, MD500 ve AH64 Apache gibi pek çok helikopterde bu tarz sönümleyiciler kullanılmıştır [3]. Brackbill [3], elastomer rotor sönümleyicilerinin modellenmesi üzerine çalışmış ve oran-bağımlı (viskoz) ve oran-bağımsız (sürtünme tipi) nonlinearlikleri dahil ettiği bir zaman tanım bölgesi modeli geliştirmiştir. Bu yeni modeli önceki yaklaşımlarla karşılaştırmış ve önceki modelleme yaklaşımlarına göre hata ortalamalarının %38'e varan ölçüde azaldığını kaydetmiştir. Brackbill [3] elde ettiği sonuçlara göre, sönümleyici modeli seçiminin, sönümleyici yükleri ve rotor kararlılığının ön görülmesinde önemli rol oynadığını vurgulamıştır. Liang [30] elastomer sönümleyicilerle temelden desteklenmiş bir binanın rüzgar ve depremlerin neden olduğu titreşimlere karşı cevabını incelemiştir. Wu [31] tarihteki dört büyük depremi (Northridge 1994, Hachinohe 1968, El-Centro 1940, Kobe 1995) temeli elastomer sönümleyiciler ile desteklenmiş beş katlı bina modellerinde deneysel olarak test etmiştir. Wu [31], elastomer sönümleyici ile desteklenmiş yapıların her katında oluşan titreşimlerin sönümlenmesinin depremin yapısına, dolayısıyla titreşim karakteristiğine bağlı olduğunu ve elastomer sönümleyicilerin dinamik özelliklerinin önemini göstermiştir. El-Centro depreminde elastomer sönümleyiciler etkisiz kalmışlardır. Bassiouny [32] bir içten yanmalı motorun krank milinde oluşan titreşimleri ele almıştır. Bassiouny sistemi ikinci mertebeden nonlinear diferansiyel denklemlerle tanımlamış ve elastomer sönümleyicideki nonlinearliklerin etkilerini araştırmıştır. Bassiouny, çalışmasının sonucunda elastomer sönümleyicinin, krank milindeki titreşimlerin sönümlenmesi için etkili olduğunu belirtmiştir.

Elastomerik malzemelerin sertlik, dayanım, esneklik, yırtılma, aşınma gibi özellikleri elastomeri oluşturan bileşenlere ve üretim işlemine derinden bağlıdır. Bu değişkenleri kullanarak binlerce çeşit istenilen özelliklerde elastomer üretmek mümkündür. Fakat elastomerik malzemelerin yaylanma ve sönümleme gibi dinamik özellikleri sadece üretim şekli ve elastomeri oluşturan bileşenlere bağlı değildir. Çalışma şartlarına, bağlanma şekline, titreşimin frekans ve genliğine, ve çalışma ısısına da bağlıdır [4, 11, 12]. Bu kadar çok argümana bağlı olan elastomerik malzemelerin dinamik özelliklerinin kesin sonuçları çalışma şartlarını sağlayan test sistemlerinde test edilmesi ile bulunabilir [12]. Bu noktada birçok çalışma bulunmaktadır [7, 8, 12-14, 19, 23, 26, 31].

Cardillo [23], elastomer içerisindeki bileşenlerin etkisini incelemiş ve bu çalışma dahilinde bir grup malzemenin katılık ve sönüm özelliklerini hesaplamak için zorlanmış titreşim tipi bir hidrolik test sistemi kullanmıştır. Cardillo [23] çalışması sonucunda karbon karası içeriğindeki artışın dinamik katılık ve sönümü arttırdığını göstermiştir. Elastomer dinamik teknolojisini geliştirmek ve bu teknolojiyi tasarımda kullanılacak şekle indirgemek amacıyla kırk yılı aşkın bir süre önce NASA tarafından geniş bir araştırma raporu yayınlanmıştır. Chiang [12] yayınlanan ilk raporda temel test metotlarını tanıtmış, tasarlanan zorlanmış titreşim tipi test düzeneği ile elastomer test numunelerinin dinamik özelliklerini etkileyen frekans, titreşim genliği, ön yükleme kütesinin büyüklüğü gibi değişkenleri incelemiştir. Chiang [12], elde ettiği verileri eğri uydurma işlemi ve seçtiği üç parametrelili analitik elastomer modeli aracılığı ile işlemiş ve viskoelastik model sabitlerini elde etmiştir. Bu sabitlerin kullanımı ile, Chiang [12], ölçülen test verilerini farklı test konfigürasyonları için analitik olarak, geniş bir frekans bandını kapsayacak şekilde tekrar üretebilmiştir. Gupta [13] araştırmasında, Chiang'ın [12] hazırladığı test düzeneğini geliştirmek suretiyle, ortam sıcaklığını ve elastomer numunedeki güç sönümünü kontrol ederek test malzemesinin dinamik davranışındaki belirsizlikleri asgariye indirmiştir. Bu şekilde, sabit termal durum altındaki elastomer numunelerin dinamik davranışları üzerinde zorlama frekansının, ön yüklemenin, şekil faktörünün ve deformasyon genliğinin etkilerini belirlemiştir. Smalley [14], NASA raporunun üçüncü parçası olarak, sıcaklığın ve geometrinin dinamik özellikleri nasıl etkilediğini göstermiştir. Smalley [7] üç farklı malzemedan üretilen elastomer o-ring'lerin Chiang'ın [12] test düzeneğinde dinamik karakteristiklerini araştırmıştır.

Dinamik özellikleri araştırılacak numune için test metodu önemli bir etken olmaktadır. Bu noktada test yöntemlerinin birbirlerine göre avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Buna göre test yönteminin seçimi elastomerlerin kullanım alanına göre en uygun şekilde gerçekleştirilmelidir ve bu noktada dikkat edilmesi gereken pek çok etken vardır. Literatürde, elastomerlerin dinamik özelliklerini belirleme konusundaki en eski ve kapsamlı test çalışmalarından birini gerçekleştiren Chiang

[12], kendi tasarlamış oldukları zorlanmış titreşim tipi test düzeneğini kullanmıştır. Kolukisa [8], elastomer numunelerin dinamik özelliklerini ve bu özellikler üzerinde frekansın, ön yüklemenin, titreşim genliğinin ve geometrinin etkilerini geliştirdiği test aparatı ile araştırmıştır. Kolukisa [8], geliştirdiği test aparatı için, zorlanmış titreşim yöntemini esas almıştır. Bu noktada Kolukisa [8] bu yöntemin avantajlarını rezonans ve rezonans dışı bölgede, yeterince geniş bir frekans aralığında ve istenilen titreşim genliği için veri elde etme imkanı vermesi şeklinde özetlemiştir. Lin [26], darbe testi yöntemini kullanarak elastomer bir numunenin dinamik özelliklerini belirlemiştir. Lin [26], servo hidrolik sistemlerin tahrik elemanlarının getirdiği sınırlandırmaları sebep göstererek bu tip sistemlerle gerçekleştirilen testlerin frekans aralıklarının sınırlı olduğunu vurgulamış ve darbe testinin bu noktada daha avantajlı olduğunu belirtmiştir. Ooi [27], motor bağlantı takozlarının dinamik davranışlarını darbe testi ile incelemiştir. Ooi [27], darbe testini seçme gerekçesi olarak, gerçek uygulama koşullarında gerçekleştirilmesi muhtemel elastomer motor bağlantısının ölçümün çalışmasında yük hücresi kullanımının zorluğu üzerinde durmuştur ve bu noktada darbe çekici kullanımının daha avantajlı olduğunu vurgulamıştır. Hem Lin [26] hem de Ooi [27] çalışmalarında, darbe testi yöntemi ile gerçekleştirdikleri testleri elektromanyetik titreştirici kullanarak tekrar etmişler ve darbe testi yöntemiyle yakın sonuçlar elde etmişlerdir.

Test yöntemlerine ve bu yöntemlerin getirdikleri kısıtlamalara bağlı olarak elastomerlerin dinamik özellikleri farklılıklar da gösterebilmektedir. Matthew [33] iki farklı malzemeden oluşan numunelerin dinamik özelliklerini beş farklı test metodu ile belirlemiştir. Çalışma sonucunda, test metotları aynı malzemeler için farklı dinamik özellikleri vermişlerdir. Doğru olan test metodunu belirlemek için analitik bir metotla sonuçların karşılaştırılması ve doğrulukların ispatlanması gerekmektedir [8]. Aktürk [4] çalışmasında, farklı geometriler için elastomerlerin malzeme özelliklerinden dinamik özelliklerini veren formülasyonları türetmiştir. Burada Aktürk [4], deneysel sonuçlar ile formülasyonların sağladığı kestirimleri karşılaştırdığında formülasyonların deneysel sonuçlara uygun katılık ve sönüm faktörlerini verdiğini görmüştür. Gandhi [22], bir elastomerik sönümleyici için doğrusal olmayan yay-sönümleyici viskoelastik modeli ve bu model için bir

diferansiyel denklemi elde etmiştir. Ayrıca Gandhi [22], bu nonlinear viskoelastik modeli dahil ederek yapısal dinamik denklemler için bir çözüm şemasını ortaya koymuştur. Gandhi [22], tek Kelvin zincirli (3 parametrelili) viskoelastik modele doğrusal olmayan eleman eklemiş ve bu nonlinearliğin dinamik titreştirici davranışı üzerindeki etkisini incelemiştir. Gandhi [22], elde ettiği sonuçlara göre, nonlinear sistemdeki enerji sönümlenmesinin lineer sisteme göre daha az olduğunu görmüştür. Kunz [2], üç farklı lineer katı model için test gereksinimlerini belirlemiş ve sonrasında sonuçları nonlinear sönümleyici modelleri için genişletmiştir. Kunz [2], basit test prosedürlerinin Kelvin katısı (iki parametrelili-bir yay ve bir amortisör elemanının paralel bağlanmasıyla oluşur) ile katılık ve sönüm parametrelerini bulmak için kullanılabileceğini göstermiştir. Daha sonra aynı yöntemi, standart katı üzerinde (üç parametrelili- bir yay elemanı ile bir Voigt elemanının seri bağlanmasıyla oluşur) tek değerli katılık ve sönüm katsayılarının aynı prosedürlerden elde edilen verilerle bulunup bulunamayacağını görmek için kullanmıştır. Son olarak ise yöntemini, genelleştirilmiş Kelvin katısına (beş parametrelili-bir yay elemanına iki adet Kelvin katısının seri bağlanmasıyla oluşur) uygulanmıştır. Kunz [2], çalışması sonucunda, viskoelastik modele dahil edilen bileşen sayısındaki ufak artışların cevap fonksiyonlarının karmaşıklığını hızla arttırdığını göstermiş ancak parametre sayısındaki bu artışın, modelin uygunluk derecesini arttırabileceğini de vurgulamıştır. Zielnica [1] geniş frekans aralığında titreşim sönümleme kabiliyetine sahip bir sönümleyici üzerinde çalışmıştır. Sönümleyicilerin dinamik özelliklerini deneysel yollarla belirlemiş ve sonlu eleman analiz yöntemi ile karşılaştırmıştır. Çalışmalar sonucunda sonlu elemanlar analizi yönteminin sönümleyici tasarımında kullanılabilir bir uygulama olduğunu göstermiştir. Li [19], özellikle düşük genlikler için viskoelastik özellik gösteren başka bir malzeme olan lineer MR sönümleyicinin sinüzoidal zorlama altındaki mekanik özelliklerini deneysel ve teorik olarak incelemiştir. Li [19], MR sönümleyicinin düşük genlik için geçerli olan akma öncesi bölgesindeki davranışını üç parametrelili Standart Kelvin modeli (bir yay elemanı ile bir Kelvin katısının seri bağlanmasıyla oluşur) ile modellemiştir. Elde edilen sonuçlar göstermiştir ki model, deneysel verileri iyi bir şekilde simüle edebilmiş ve MR sönümleyici cevabını çok iyi bir şekilde vermiştir [19]. Petrone [34] elastomerik malzemelerin dinamik özelliklerini deneysel yollarla belirlemiş ve on üç serbestlik

dereceli rheological model ile karşılaştırmıştır. Analitik sonucun %5 hata ile gerçek sonuçlara yaklaştığı görülmüştür.

3. ELASTOMERİK MALZEMELER

Vulkanizasyonun keşfinden sonra, makine tasarımlarının önemli bir parçası olan elastomer malzemelerin en önemli özellikleri, düşük mekanik gerilmeler ile yüksek (on kata kadar) uzayabilme ve mekanik deformasyonun ardından tamamen eski haline dönebilmeleridir. Elastomerik malzemeler bu özelliklerini rastgele dağılmış, çapraz bağlı uzun esnek polimer zincirlerinden oluşmuş moleküler yapısına borçludur. Polimer zincirlerinin fiziksel olarak çapraz bağlanmalarında zincirler arasında kimyasal bağ yoktur, daha ziyade zincirler birbirlerine mafsallanmış gibi düşünülür. Elastomer üzerine kuvvet uygulandığı zaman, toplanmış halde bulunan bu elastomer zincirleri düzelmeye başlar ve bu şekilde tüm hacim yüksek uzama kabiliyeti gösterebilir [8, 10].

Elastomerler daha çok sönümleyici olarak kullanılırlar. Elastomerin şekil değiştirme sırasında yaptığı iş ile tekrar eski haline dönerken yaptığı iş arasındaki fark, elastomer üzerinde oluşan deformasyonun oluşturduğu iç sürtünmeden dolayı gerçekleşen bir enerji kaybıdır. Bu kaybolan enerji ısı enerjisine dönüşür. Sönümlenen enerjinin, sistemin toplam absorbe ettiği enerjiye oranı yüzde olarak sönüm büyüklüğünü verir. Doğal kauçuğun sönüm oranı %6-30 arasında değişmektedir. Kauçuğun sertliği arttıkça sönüm oranı büyümektedir [14].

Elastomerler, termoset elastomerler ve termoplastik elastomerler olmak üzere iki ana gruba ayrılmaktadır. Termosetler, uzun moleküllerin kimyevi bağlar ile bir arada tutulduğu, üç boyutlu molekül ağlarıdır ve solvent absorbe ederek şişerler, fakat çözünmezler ayrıca ısı uygulandığında yeniden işlenememektedirler. Diğer taraftan, termoplastik kauçukların molekülleri, primer kimyevi bağlar ile bağlanmış değildir. Bunun yerine moleküller, moleküllerin parçalarının sert bölgeler halinde fiili olarak bir araya gelmesi vasıtasıyla bağlanmışlardır. Bu sebeple, termoplastik kauçuklar uygun çözücülerde çözünürler ve ısıtılmakla yumuşarlar, böylece tekrar tekrar kullanılabilirler. Birçok hallerde, termoplastik ve termoset kauçuklar birbirinin yerine kullanılabilir. Fakat araç lastikleri, motor takozları ve yayları gibi maksatlar için kullanımlarda, daha iyi elastiklikleri, kalıcı şekil değişikliğine

mukavemetleri ve dayanıklılıkları sebebiyle genellikle termoset elastomerler kullanılırlar [8, 10].

Termoset elastomerler, elastomer ailesinin en geniş üyesidir. Doğal kauçuk (NR), sentetik polyisopren, izopren kauçuk (IR), bütadien (BR) ve sitrin bütadien kauçuk (SBR) bu grubun bilinen üyeleridir. Doğal kauçuğun gerilme dayanımı, yırtılma dayanımı, esnekliği, aşınma dayanımı ve yorulma dayanımı yüksektir [9]. Sentetik kauçuğun doğal kauçuğa göre maliyet avantajı dışında, enerji soğurmasının daha üstün olması, düşük sıcaklıklarda daha esnek olması ve yağa daha dayanıklı olması gibi üstün özellikleri vardır [9]. Polibütadien kauçuk ise özellik olarak poliizopren kauçuktan önemli farklar göstermektedir. Polibütadien kauçuğun gerilme dayanımı ve yırtılma dayanımı daha düşüktür. Esnekliği benzer olsa da çözücülere karşı dayanımı düşüktür [8, 9, 10].

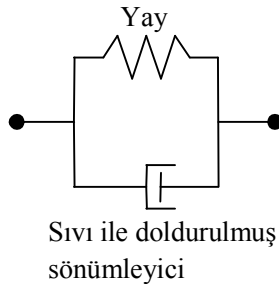
Termoplastik elastomer grubunun en önemlileri poliüretan ve etilen propilen dien monomer kauçuk (EPDM) dir. Poliüretan elastomerlerin aşınma dirençleri yüksek olduğu gibi darbe dayanımı da yüksektir. Araba tamponları, titreşim kontrolü uygulamalarında ve ses izolasyonunda kullanılmaktadır [8, 9, 10].

Bu bölümde önce, bir elastomer numunedeki kuvvet, yer değiştirme, gerilme ve gerinim arasındaki ilişki incelenecektir. Burada sıcaklığın, frekansın, gerinim genliğinin ve statik ön yüklemenin elastomerlerin dinamik özellikleri üzerindeki etkilerinden bahsedilmiştir. İkinci kısımda ise elastomerlerin dinamik testleri üzerinde durulacaktır.

3.1. Elastomerlerin Dinamik Özellikleri

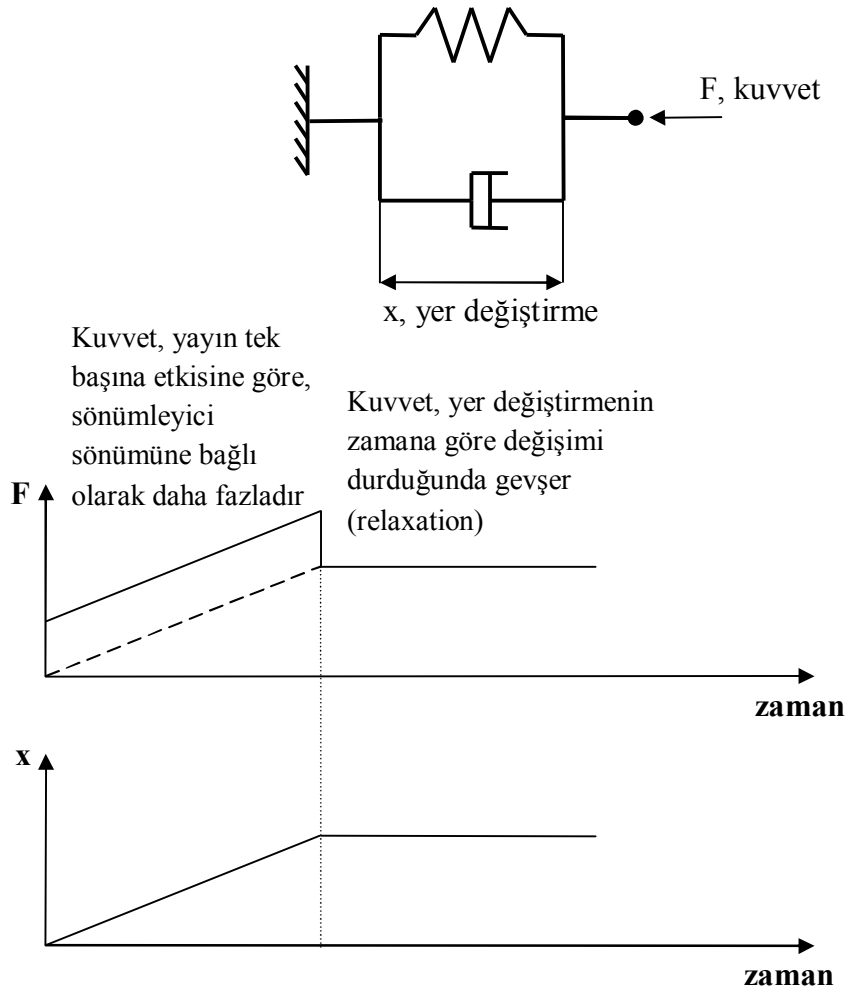
Elastomerler “viskoelastisite” olarak tanımlanan zamana bağlı bir davranış gösterirler: Eğer bir elastomer numune ani bir şekilde sıkıştırılır ve sonrasında kuvvet kaldırılırsa elastomerin eski halini alması zaman alacaktır. Daha ötesi malzemeyi sıkıştırmak için gerekli kuvvet, sıkıştırmanın hızına bağlı olacaktır. Buna göre viskoelastik davranışı veren basit bir model, yay (sıkıştırma miktarının fonksiyonu

olarak kuvvet oluşturur) ve viskoz sönümleyici (sıkıştırma hızının fonksiyonu olarak kuvvet oluşturur) elemanlarından oluşur [14, 15]. Şekil 3.1’de viskoelastik davranışı veren basit bir örnek model verilmiştir.



Şekil 3.1. Viskoelastik davranışı temsil eden basit bir yay amortisör sistemi

Şekil 3.1’de verilen modelde, yay Hooke kanununa uyar ve yer değiştirmeyeyle orantılı bir kuvvet verir ancak bu kuvvet hıza ya da diğer zamana bağlı etkilere bağlı değildir. Yayı sıkıştırmak için kullanılan enerji yay tarafından depolanır ve herhangi bir zamanda geri alınabilir [16]. Sönümleyici ise hızla orantılı bir kuvvet verir ancak hareket olmadığında kuvvet üretmez ve enerji depolamaz. Buna göre sönümleyiciye verilen enerji ısı olarak sönümlenir [16]. Bu basitleştirilmiş model, elastomerlerin elastik ortamda enerji depolama ve viskoz ortamda enerji sönümleme özelliklerini içerir. Bu kombinasyonun sonucu ise zamana bağlı davranışta gözlenir (Şekil 3.2).

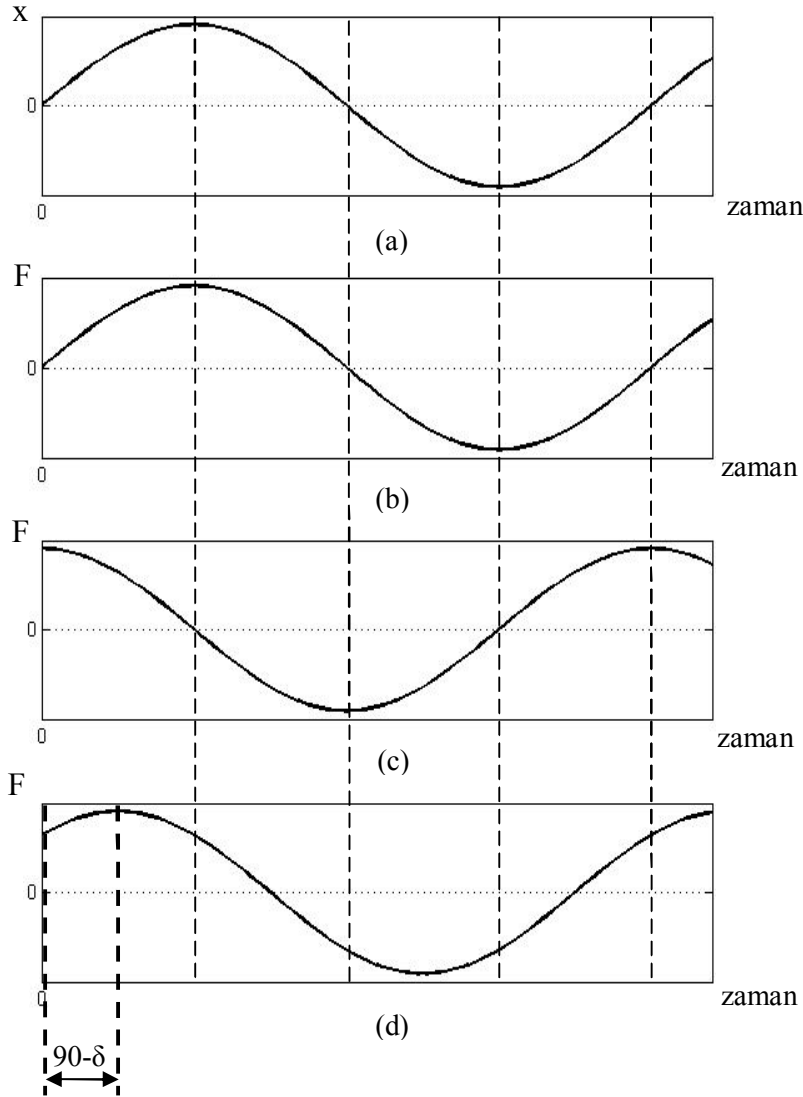


Şekil 3.2. Yay-sönümleyici sisteminin zamana göre davranışı

Şekil 3.2’de görüldüğü gibi yay-sönümleyici sisteminin doğrusal artan yer değiştirme girişine verdiği kuvvet cevabı, yayın tek başına verdiği kuvvet cevabından, yer değiştirmenin zamanla değiştiği bölgede daha fazladır. Ancak yer değiştirmenin zamana göre değişimi durduğunda yay-sönümleyici sisteminin kuvvet cevabı, modeldeki sönümleyici elemanın sadece hıza cevap vermesi sebebiyle düşer ve bu durum gevşeme (relaxation) durumu olarak adlandırılır.

Elastomerik malzeme sinüzoidal bir zorlamaya maruz kaldıklarında verdiği cevap benzer şekilde yay ve viskoz sönümleyici elemanlardan farklıdır. Bir yay, sinüzoidal bir yer değiştirmeye sıkıştırılırsa ya da çekilirse, tepki kuvveti yer değiştirme dalga formunu takip eder, buna göre sıfır yer değiştirmede sıfır kuvvet elde edilir. Yer

değiştirme arttıkça, kuvvet de artacaktır ve maksimum yer değiştirmede maksimum kuvvet elde edilecektir. Bu durum Hooke kanununun sonucudur ve kuvvetin uygulanan yer değiştirmeye kesin olarak aynı fazda olduğu görülür [15, 17]. Viskoz etki oldukça farklıdır. Oluşan kuvvetin, yer değiştirmeden bağımsız ve hızla orantılı olması sebebiyle, bir sinüs dalgası için, maksimum hızın sıfır yer değiştirmede gerçekleştiği ve maksimum yer değiştirmede ise hızın minimum (sıfır) olduğu görülür. Buna göre maksimum viskoz kuvvet sıfır yer değiştirme noktasında ve minimum kuvvet ise maksimum yer değiştirmede oluşacaktır. Hız, yer değiştirmenin türevidir ve buna göre hız ile yer değiştirme dalgaları arasında 90° faz farkı vardır [15, 17]. Elastomer malzemeler ise viskoelastik davranış gösterirler ve viskoelastik davranış, elastik ve viskoz özelliklerin bileşimidir. Buna göre viskoelastik davranış, yer değiştirme girişine verilen tepki kuvvetinin yer değiştirme sinyaline göre 0° ile 90° arasında bir faz farkına sahip olmasına neden olacaktır [8, 15, 17]. Şekil 3.3'te lineer yay, lineer viskoz sönümleyici ve bir elastomer sönümleyicinin sinüzoidal yer değiştirme girişine verdikleri tipik tepki kuvvetleri verilmiştir. Buna göre yay yer değiştirme sinyali ile aynı fazda, viskoz sönümleyici ise 90° faz farkına sahip kuvvet sinyalleri oluşturacaklardır. Elastomer sönümleyici ise yay ve viskoz sönümleyiciden farklı olarak, elastik ve viskoz özelliklerin baskınlığına bağlı olan δ ($0^\circ < \delta < 90^\circ$) faz farkına sahip bir kuvvet sinyali oluşturacaktır (Şekil 3.3d).

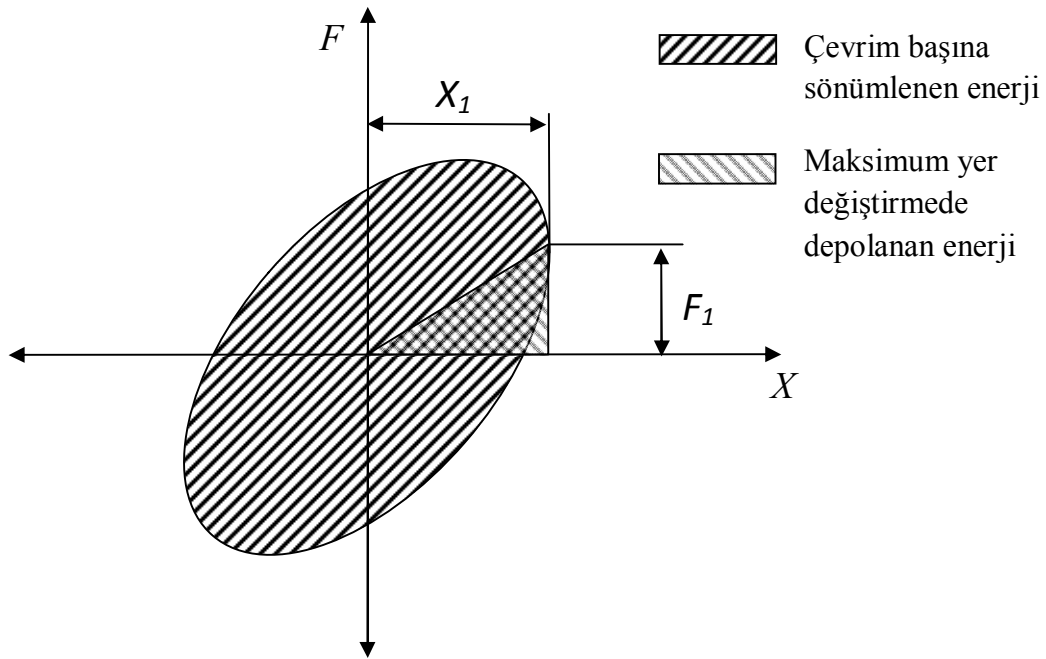


Şekil 3.3. Sinüzoidal yer değiştirme girişi sonucu yay, viskoz sönümleyici ve elastomer malzemede oluşan kuvvetler; (a) sinüzoidal yer değiştirme girişi; (b), (c) sırasıyla yay ve amortisör elemanlarında sinüzoidal yer değiştirme girişi sonucu oluşan kuvvetler; (d) elastomer numunede sinüzoidal yer değiştirme giriş sonucu oluşan toplam yük (yer değiştirmeye göre δ kadar faz farkıyla)

3.1.1. Histerezis

Denge durumunda olan zorlanmış titreşim esnasındaki anlık kuvvetin anlık yer değiştirmeye (ya da anlık gerilmenin anlık gerinime) göre olan grafiği histerezis döngüleri olarak tanımlanır [11]. Bir yük döngüsü tekrar eden biçimde bir elastomere

uygulanırsa, gevşeme (relaxation) (Bkz. Şekil 3.2) işlemi histerezeise neden olur. Histerezis, yükün genliğine olduğu kadar yük oranına da bağlı olan, bir yük-deformasyon eğrisidir ve lineer malzeme davranışı için histerezis çevrimi eliptiktir (Şekil 3.4) [14]. Bu tip bir yük-deformasyon eğrisi içinde kalan alan çevrim başına sönmölenen enerjiye eşittir [4, 8, 11, 14].



Şekil 3.4. Histerezis çevrimi [14]

Elastomer sönmöleyicilerin sönmö performansları geleneksel viskoz sönmöleyici ile karşılaştırılabilir ve bu noktada elastomer numune için bir eşdeğer sönmö katsayısı, C_{eq} , tanımlanabilir. Elastomer numune tarafından sönmölenen enerji, U_d , histerezis döngüsünün içinde aşağıdaki integrallerle verilmiştir [19];

$$U_d = \oint F dx = \int_0^{2\pi/\omega} F \dot{x} dt . \quad (3.1)$$

Burada; ω , zorlama frekansı, $\dot{x}$ sönmöleyici sıkışma hızıdır.

Viskoz sönümleyicinin bir çevriminde sönümlenen enerji ile Eş. (3.1)'de verilen enerji ifadesi eşitlenerek eşdeğer sönüm katsayısı, C_{eq} , hesaplanabilir [19]. Buna göre şu ifade elde edilir;

$$U_d = \oint F dx = \oint C_{eq} \dot{x} dx. \quad (3.2)$$

Viskoz sönümleyicinin sinüzoidal zorlamaya, $x = X_0 \sin \omega t$, maruz kaldığı kabul edilirse;

$$U_d = \oint C_{eq} \dot{x} dx = C_{eq} \int_0^{2\pi/\omega} (\dot{x})^2 dt; \quad (3.3)$$

$$U_d = C_{eq} X_0^2 \omega^2 \int_0^{2\pi/\omega} \cos^2 \omega t dt = C_{eq} \pi \omega X_0^2, \quad (3.4)$$

ifadesi elde edilir. Burada X_0 yer değiştirme genliği, ω ise frekanstır. Buna göre eşdeğer sönüm şöyledir;

$$C_{eq} = \frac{U_d}{\pi \omega X_0^2}. \quad (3.5)$$

3.1.2. Kompleks modül yaklaşımı

Viskoelastik malzemelere ait bir model elde etmek için genel bir yaklaşım, malzemenin basit harmonik yüklemeye olan cevabını ele almaktır. Verilen bir çalışma frekansı için viskoelastik malzeme belirli bir dinamik katılık ortaya koyar. Farklı bir frekans için, bu katılık da farklı olacaktır. Viskoelastik malzemelerde, elastik malzemelerden farklı şekilde, gerilme cevabı harmonik giriş gerinim sinyaline göre farklı fazda olacaktır. Buna göre, gerilme ve gerinimi ilişkilendiren modül, genlik ve faz terimleri ya da reel (aynı fazlı) ve imajiner (farklı fazlı) kısımlar cinsinden gösterilebilir [3].

Lineer viskoelastik bir malzemenin bir harmonik çekme gerinimi girişine olan gerilme cevabı aşağıdaki formda gösterilebilir [17]:

$$\sigma(t) = \varepsilon_0 (E' \sin \omega t + E'' \cos \omega t). \quad (3.6)$$

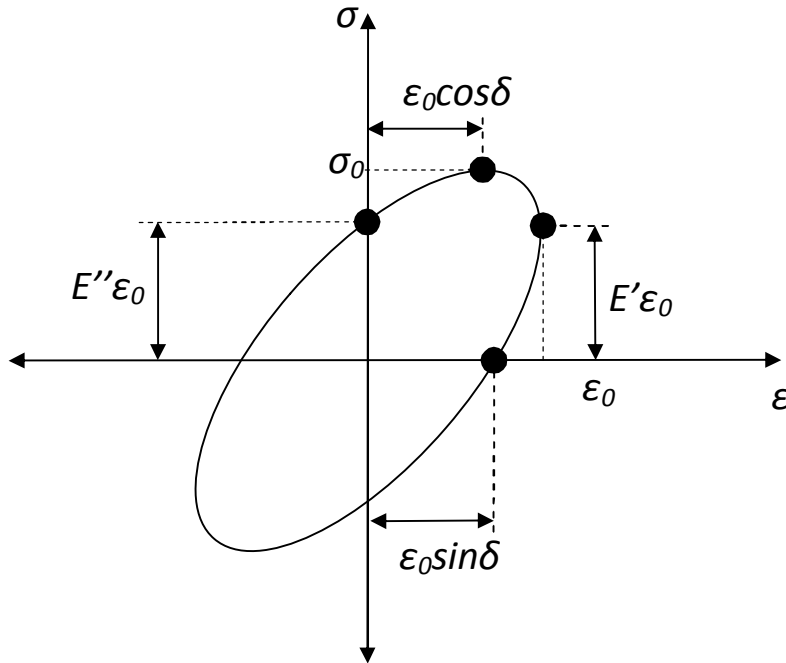
Burada ε_0 gerinim genliği ve ω frekanstır. E' ve E'' büyüklükleri ise, sırasıyla, depolama modülü (storage modulus) ve sönüm modülü (loss modulus) olarak tanımlanırlar. Sinüzoidal zorlama durumunda depolama modülü gerinimle (zorlama ile) aynı fazlı gerilmenin gerinime oranı olarak tanımlanır ve çevrim başına depolanıp geri alınan enerjinin bir ölçüsüdür [4, 10, 15, 17]. Sönüm modülü ise gerinimle 90° farklı fazdaki gerilmenin gerinime oranı olarak tanımlanır ve çevrim başına sönümlenen ya da ısı olarak kaybedilen enerjinin bir ölçüsüdür [4, 10, 15, 17]. Her iki büyüklük de frekansın (ω) fonksiyonudur [3]. Bununla birlikte, gerilme cevabı genlik ve gerilme ile gerinim arasındaki (açı olarak) faz farkı (δ) cinsinden de ifade edilebilir:

$$\sigma(t) = \sigma_0 \sin(\omega t + \delta) = \sigma_0 \cos \delta \sin \omega t + \sigma_0 \sin \delta \cos \omega t. \quad (3.7)$$

Bir başka kullanışlı parametre ise boyutsuz sönüm faktörü (loss factor) ya da sönüm tanjantıdır (η). Bu ifade, çevrim başına sönümlenen enerjinin depolanan enerjiye oranının bir ölçüsüdür:

$$\eta = \tan \delta = \frac{E''}{E'}. \quad (3.8)$$

Kompleks modül ifadelerine histerezis çevrimiyle de ulaşılabilir (Şekil 3.5). Depolama modülü sayısal olarak, orijinden maksimum gerinim noktasına giden doğrunun eğimine eşittir. Lineer bir elips için sönüm modülü ise sıfır gerinimdeki gerilmenin maksimum gerinime oranıdır [3].



Şekil 3.5. Lineer eliptik histerezis eğrisi ile depolama ve sönüm modüllerinin tanımı [3].

Gerilme, gerinim ve modül kompleks değerler olarak da gösterilebilir. Burada gerilme ve gerinim $e^{i\omega t}$ formundadır [3, 11]. Buna göre,

$$\sigma^* = \sigma_0 e^{i\omega t} \quad (3.9)$$

$$\varepsilon^* = \varepsilon_0 e^{i\omega t}, \quad (3.10)$$

şeklindedir. Buna göre, kompleks gerilme-gerinim ilişkisini veren eşitlik aşağıdaki gibidir:

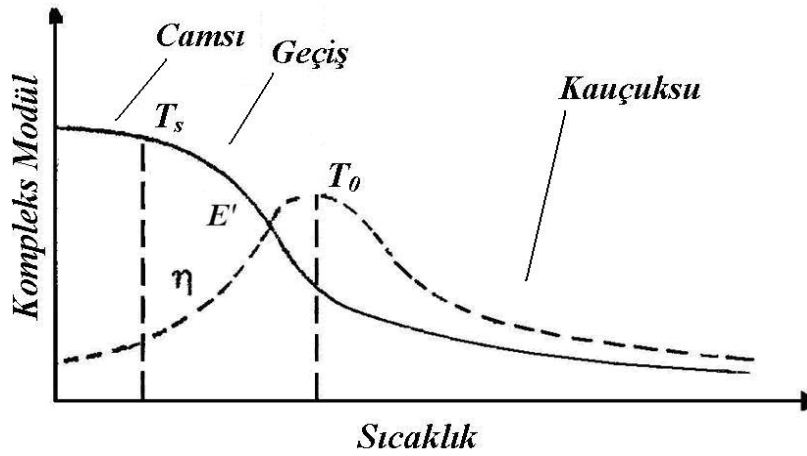
$$\sigma^* = E^* \varepsilon^*. \quad (3.11)$$

Burada E^* kompleks modüldür ve şu şekilde tanımlanır:

$$E^* = E' + iE''. \quad (3.12)$$

3.1.3. Sıcaklığın dinamik cevap üzerindeki etkileri

Viskoelastik malzemelerin kompleks modül özellikleri (depolama modülü, E' ve sönüm faktörü, η) sıcaklıkla etkili bir değişim gösterir [20]. Şekil 3.6 sıcaklığın viskoelastik malzemelerin dinamik özellikleri üzerindeki etkisini göstermektedir.

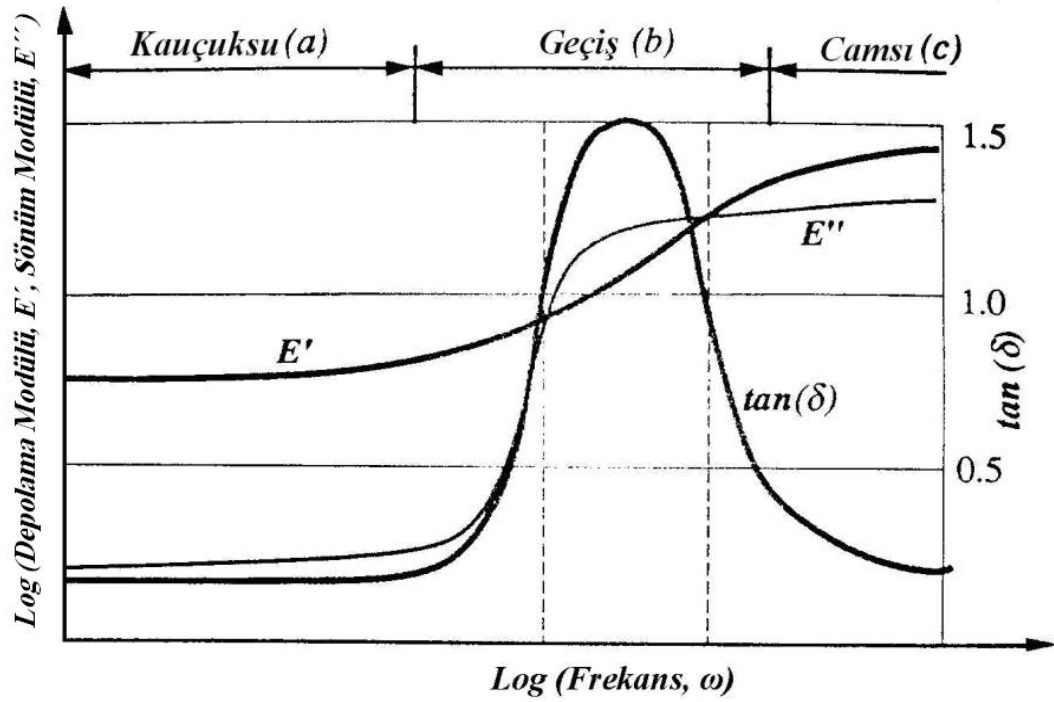


Şekil 3.6. Sıcaklığın depolama modülü ve sönüm faktörü üzerindeki etkisi [20].

Tipik bir elastomer için yumuşama sıcaklığı (T_s) çoğunlukla oda sıcaklığının altındadır. Yumuşama sıcaklığının üzerinde, depolama modülü hızla düşer, sönüm faktörü ise maksimum değerine yükselir ve tekrar düşmeye başlar ve bu bölge geçiş bölgesi olarak tanımlanır. Geçiş bölgesinin üzerindeki sıcaklıklarda, modül düşüktür ve sıcaklık arttıkça malzeme dağılacaktır.

3.1.4. Frekansın dinamik cevap üzerindeki etkileri

Viskoelastik malzemeler için frekansın dinamik davranış üzerindeki etkisi oldukça güçlüdür [20]. Frekansın etkisi sıcaklık etkisinin tam tersidir yani, frekans artışının etkisi sıcaklığın düşme etkisiyle benzerdir. Şekil 3.7'de frekansın depolama modülü, sönüm modülü ve sönüm tanjantı üzerindeki etkisi gösterilmektedir.



Şekil 3.7. Frekansın depolama modülü, sönüm modülü ve sönüm tanjantı üzerindeki etkileri [4, 14, 20].

Şekil 3.7'de (a) bölgesi (kauçuksu bölge) düşük sönümlü malzemeyi gösterirken, (b) bölgesi (geçiş bölgesi) ise yüksek sönümlü bir malzemeyi göstermektedir. Bu bölgedeki malzeme, özelliklerinde frekansa bağlılığı daha çok gösterir. Kauçuksu bölge ile geçiş bölgesi elastomerlerde normal şartlarda görülen bölgelerdir ve titreşim kontrolü için kullanımlarda en uygun durumu sunarlar [4, 14].

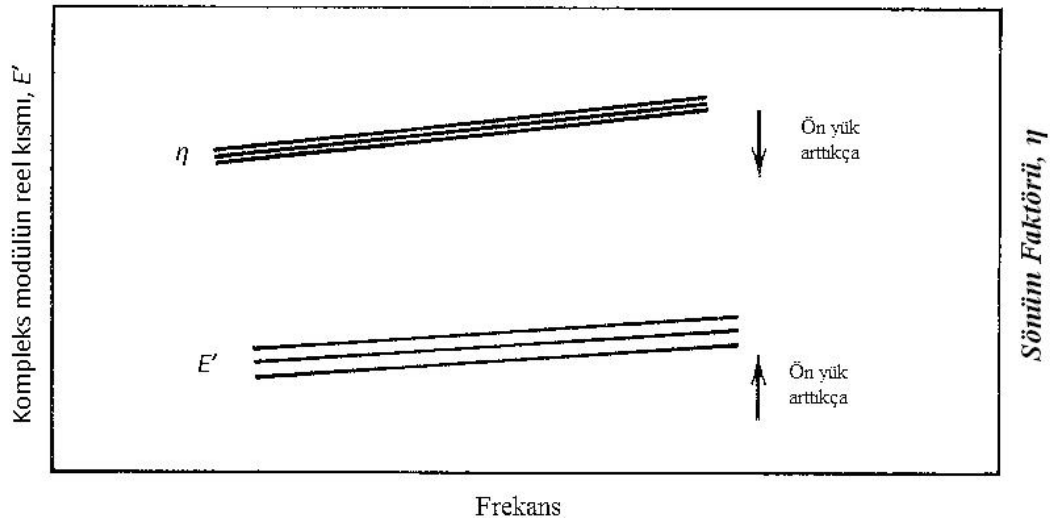
3.1.5. Gerinim genliğinin dinamik cevap üzerindeki etkileri

Dinamik gerinim genliğinin sönüm özellikleri üzerindeki etkilerini ölçmek oldukça zordur [11]. Bu durumun sebebi ise yüksek gerinim genlikleri yüksek enerji sönümüne ve dolayısı ile malzeme sıcaklığının hızla artmasına neden olur. Bu noktada gerinim genliğinin ve sıcaklığın etkileri bütünleşik hale gelir. Ancak kauçuksu bölgede modül ve sönüm faktörü, geçiş bölgesine nazaran sıcaklıkla daha yavaş değişir ve bu nedenle sıcaklığın etkisi ikincil hale gelir [11]. Buna göre dinamik gerinim genliğinin etkileri üzerine yapılan araştırmalar çoğunlukla kauçuksu

bölgeyle sınırlı kalmıştır. Sönüm özelliklerinin dinamik gerinimle değişimi sıcaklıkla değişime benzerdir. Ancak, gerinim etkisi sıcaklık etkisinden çok daha azdır. Burada da yine üç bölge mevcuttur: lineer, geçiş ve denge [11].

3.1.6. Statik ön yüklemenin dinamik cevap üzerindeki etkileri

Statik ön yüklemenin dinamik özellikler üzerindeki etkileri genellikle kauçuksu bölgede en çoktur. Ön yükleme arttıkça modül artar ancak sönüm faktörü azalır (Şekil 3.8) [11].



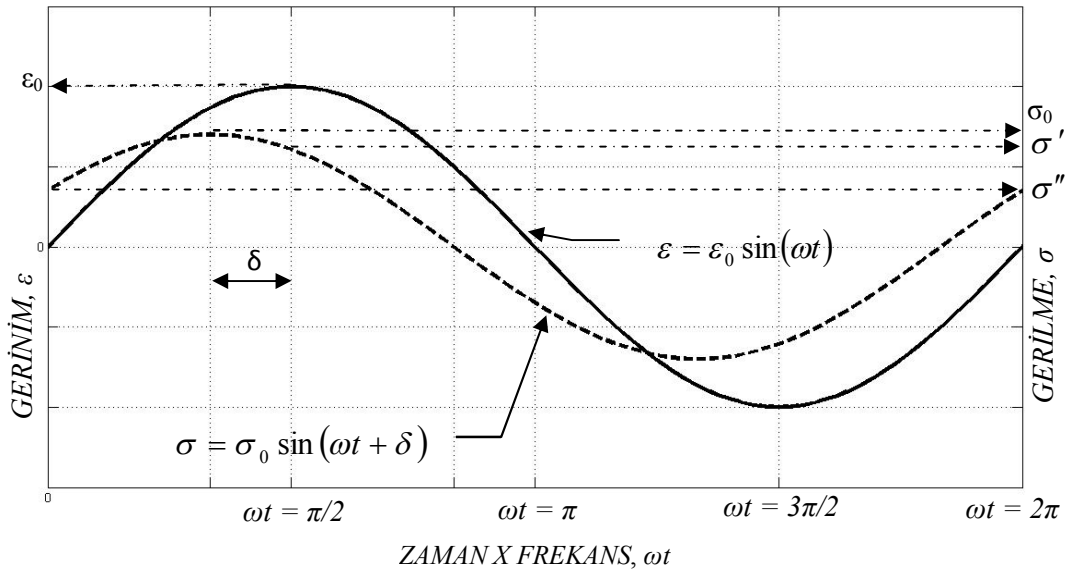
Şekil 3.8. Ön yüklemenin dinamik özellikler üzerindeki etkisi [11].

3.2. Dinamik Test Kavramı

Dinamik ve statik testler arasındaki fark sadece hızın mevcudiyeti değildir. Zira statik testlerde zaman zaman yüksek hızlar kullanılabilir. Bu testler arasındaki fark, esasen, ihtiyaç duyulan bilgide yatmaktadır. Elastomerlerle ilgili olarak, geleneksel bir statik testten elde edilen bilgi genellikle malzeme kalitesiyle ilgilidir. Ancak malzeme özelliklerinin uygulamadan nasıl etkilendiği hakkında çok az bilgi verir. Dinamik testin önemli bir sebebi gerçek çalışma şartlarını olabildiğince taklit etmektir.

bağlantısı arasındaki kalınlık ile konum sensörü gerinimin genliğini verecektir. Bu ikisinin oranı bir katsayı (modül) olacaktır, ancak bu modül öylece kullanılmayacaktır. Bunun yerine kompleks modül kavramı kullanılır.

Şekil 3.10'da bu tip dinamik bir deneyde elde edilebilecek gerilme ve gerinim sinyalleri gösterilmiştir.



Şekil 3.10. Dinamik deneyde elde edilen gerilme ve gerinim sinyalleri [4, 10, 15].

Şekil 3.10'da gösterildiği gibi, σ' , gerinimin tepe noktasındaki, yani $\omega t = \pi/2$ anındaki, gerilme değeri olup,

$$\sigma' = \sigma_0 \cos \delta \quad (3.13)$$

ifadesine eşittir. σ'' ise, gerinimin sıfır olduğu noktadaki, yani $\omega t = 0$ anındaki, gerilme değeridir ve

$$\sigma'' = \sigma_0 \sin \delta \quad (3.14)$$

şeklindedir. Şekil 3.10'a göre gerinimin sıfır olduğu yerde gerinimin değişim oranı (sinüs eğrisinin eğimi) maksimum değerindedir. Bu noktadaki gerilme, Şekil 3.10'da görüldüğü gibi sıfırdan farklıdır ve bu gerilme sadece gerinimin değişim oranına verilen cevaptır (saf viskoz davranış gibi). Kompleks modülün imajiner kısmı (E'') viskoelastik malzemenin viskoz özelliği ile ilgilidir ve bu değer sıfır gerinim durumunda ölçülen gerilme değerinin (σ'') maksimum gerinim değerine (ε_0) oranı olarak tanımlanır. Bununla birlikte gerinimin maksimum olduğu noktada gerinimin değişim oranı sıfırdır ve bu noktada numunede sadece gerinime cevap olarak gerilme oluşacaktır (saf elastik davranış gibi). Kompleks modülün reel kısmı (E') ise viskoelastik malzemenin elastik özelliği ile ilgilidir ve bu değer maksimum gerinim durumunda ölçülen gerilme değerinin (σ') maksimum gerinim değerine (ε_0) oranı olarak tanımlanır [4, 10, 15]. Buna göre Eş (3.12)'de verilen kompleks modül ifadesindeki reel ve imajiner kısımlar için şu ifadeler elde edilir;

$$E' = \frac{\sigma'}{\varepsilon_0} = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \cos \delta \quad (3.15a)$$

$$E'' = \frac{\sigma''}{\varepsilon_0} = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \sin \delta . \quad (3.15b)$$

Sönüm tanjantı (loss tangent) ise imajiner kısmın reel kısma oranıdır [4, 10, 15];

$$\tan \delta = \frac{\sigma''}{\sigma'} = \frac{E''}{E'} . \quad (3.16)$$

Burada δ , sönüm açısı (loss angle) dır.

Şekil 3.9'da şeması verilen test düzeneği, zorlamalı titreşim test yöntemi olarak tanımlanır [8]. [Kolukısa, 2005], [Chiang ve ark., 1972], bu yöntemi çalışmalarında kullanmışlardır. Bu yöntemde test numunesi, titreştirici ile numune üzerine yükleme yapan kütle arasına yerleştirilir. İstenilen frekans ve titreşim genliği değerlerinde titreştiricinin oluşturduğu salınım, test numunesinin dinamik özelliklerine göre

iletilerek kütleyi salınımına zorlar. Bununla birlikte literatürde farklı dinamik test yöntemleri de mevcuttur. Kolukısa [8] çalışması dahilinde diğer dinamik test yöntemlerinden, torsiyon sarkacı yöntemi, titreşen boru yöntemi, asılı kütle dinamik oran test yöntemi, dalga yayılım yöntemi, kiriş rezonans test yöntemi ve hidrolik dinamik test yöntemini incelemiştir. Bu tez çalışmasında yer verilen deney prosedürü, Kolukısa'nın [8] çalışması dahilinde incelediği hidrolik dinamik test yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Kolukısa'nın [8] tanımlamasına göre, hidrolik dinamik test yöntemi rezonans bölgesine bağlı olmayan zorlamalı titreşim test yöntemidir. Bu yöntemde dinamik özellikleri araştırılacak olan test numunesi, servo motor mekanizmasıyla kontrol edilen hidrolik piston başı ile yük hücresi arasına yerleştirilir. Yük hücresinden elastomer numunenin ilettiği kuvvet değeri alınırken, piston üzerine yerleştirilen doğrusal potansiyometre ile elastomer numunenin yer değiştirme bilgileri alınmaktadır. Oluşturulan histerezis çevrimi ile dinamik özellikler hesaplanabilir. Hidrolik dinamik test metodu en fazla 50 Hz'lik frekans değeri ile yavaş bir yöntemdir [8].

4. ELASTOMERLERİN ANALİTİK MODELLENMESİ

Bu bölümde önce, dikdörtgen kesitli bir elastomer numunede yer değiştirme ile kuvvet ilişkisini tanımlamak için bir kompleks katılık ifadesi çıkarılmıştır. Çıkarılan kompleks katılık ifadesi numune geometrisi, yer değiştirme genliği ve numuneye ait malzeme özelliğinin bir fonksiyonudur. Tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen testlerde dikdörtgen kesitli prizmatik bir numune kullanılması sebebiyle kompleks katılık ifadesi sadece bu geometri için çıkarılmıştır. Elde edilen kompleks katılık ifadesinin bir değişkeni olan numunenin malzeme özelliğini, malzemenin kompleks Young modülü temsil etmektedir. Bölümün sonraki kısmında bu kompleks Young modülü ifadesi, frekansın fonksiyonu olarak, beş farklı viskoelastik model için ayrı ayrı çıkarılmıştır. Burada sözü edilen viskoelastik modeller lineer yay ve lineer viskoz sönüm elemanlarının farklı sayı ve kombinasyonları ile oluşturulmuştur.

4.1. Numuneye Ait Kompleks Katılık İfadesinin Geometri, Deformasyon Şekli ve Young Modülüne Bağlı Olarak Belirlenmesi

Dikdörtgen kesitli bir numune için kuvvet ve yer değiştirme arasındaki ilişkiyi veren bir kompleks katılık ifadesi, bir elastomer malzemede deformasyon sonucu ortaya çıkan entropideki değişime bağlı olarak yüksek uzayabilme ve geri alma özelliklerinden türetilmiştir [4, 10]. Türetilen bu kompleks katılık ifadesi, deformasyon şekli, numune geometrisi ve numunenin kompleks Young modülünün bir fonksiyonudur. Aşağıda kompleks katılık ifadesinin türetilmesi anlatılmıştır.

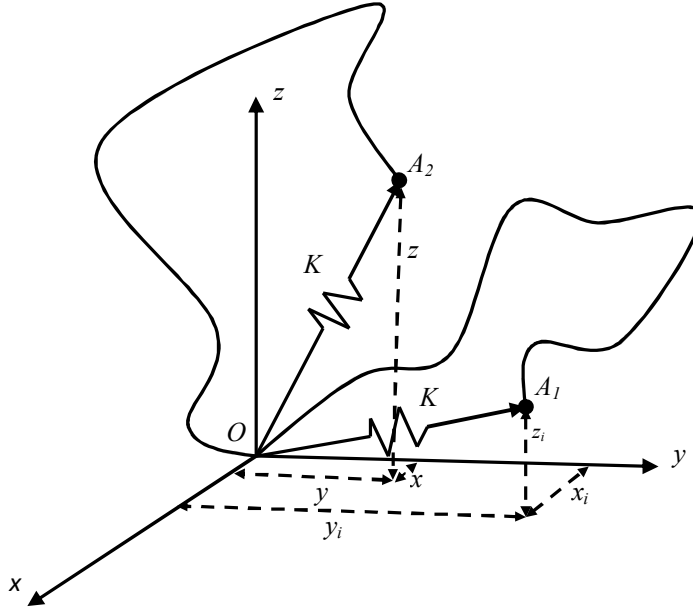
Helmholtz serbest enerji ifadesinin numunenin uzunluğuna (L) göre türevi dış çekme kuvvetine (F) eşittir [4, 10, 15]:

$$F = \left(\frac{\partial U}{\partial L} \right)_{T,V} - T \left(\frac{\partial S}{\partial L} \right)_{T,V} . \quad (4.1)$$

İdeal bir kauçuk için L nin değişimiyle entropi (S) değişirken U da bir değişiklik olmaz [4, 10]. Eş (4.1)'in sağ tarafındaki ikinci terim negatif olduğu için F deki artış, L nin artmasını sağlar.

İlk ölçüleri X_i , Y_i ve Z_i olan bir numune ele alınsın ve bu numune x , y ve z asal eksenleri boyunca etkiyen kuvvetlerce X , Y ve Z yeni ölçülerine kadar deforme edilsin. Kauçuk deforme edildiğinde hacminde belirgin bir değişiklik olmadığı gözlemlenir. Buna göre Şekil 4.1'de gösterilen üç asal eksendeki uzama oranları şöyledir:

$$\lambda_x = \frac{X}{X_i}; \lambda_y = \frac{Y}{Y_i}; \lambda_z = \frac{Z}{Z_i}. \quad (4.2)$$



Şekil 4.1. Elastomer deformasyonunun gösterimi (şekilde gösterilen deformasyon sırasında, A_1 noktası A_2 noktasına gitmiştir) [4, 10]

Hacmin sabit kalma durumu için bu üç uzama oranının çarpımı,

$$\lambda_x \lambda_y \lambda_z = 1 \quad (4.3)$$

olacaktır. Bu noktada amaç $\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$ ile tanımlanan rastgele deformasyonlara sebep olan dış kuvvetleri hesaplamaktır.

Deforme olmamış durumdaki uçtan uca vektör şu şekilde yazılabilir:

$$\vec{r}_i = \vec{i}x_i + \vec{j}y_i + \vec{k}z_i. \quad (4.4)$$

Numunenin her parçasının geri kalanıyla aynı şekilde deforme olduğu kabul edilerek deforme olmuş durumdaki uçtan uca vektör şu şekilde olacaktır [4, 10]:

$$\vec{r} = \vec{i}\lambda_x x_i + \vec{j}\lambda_y y_i + \vec{k}\lambda_z z_i. \quad (4.5)$$

Uçtan uca vektörün değişimi uçtan uca kuvvette bir değişime neden olacaktır. Deformasyon öncesinde kuvvet:

$$\vec{f}_i = K(\vec{i}x_i + \vec{j}y_i + \vec{k}z_i) \quad (4.6)$$

şeklinde olacaktır. Deformasyondan sonra ise bu uçtan uca kuvvet aşağıdaki gibidir:

$$\vec{f} = K(\vec{i}\lambda_x x_i + \vec{j}\lambda_y y_i + \vec{k}\lambda_z z_i). \quad (4.7)$$

Burada; zincirlerin her biri bir yay gibi düşünülebilir (Bkz. Şekil 4.1) [10]. Bir Gauss zinciri için, zincirin yay sabiti

$$K = \left(\frac{2kT}{\rho^2} \right) \quad (4.8)$$

şeklinde ve bu eşitlikte, T , sıcaklık, k , sertlik ile orantılı bir malzeme sabiti, ρ ise sapma açısıdır (misalignment angle) [4, 10]. Gerilme-gerinim özellikleri iç kuvvetler tarafından yapılan iş ile deformasyonu sağlayan dış kuvvetler tarafından yapılan iş

eşitlenerek hesaplanabilir [4, 10]. İlk olarak f_z tarafından yalpan iş (zincire etkiyen kuvvetin z eksenindeki bileşeninin, z ekseni boyunca yaptığı iş) ele alınsın ki burada z ölçüsü, z_i 'den $\lambda_z z_i$ 'ye değişmiştir. Bu iş bileşeni temsili zincir için w_z olsun:

$$w_z = \int_{z_i}^{\lambda_z z_i} f_z dz = \int_{z_i}^{\lambda_z z_i} \frac{2kT}{\rho^2} z dz = \left(\frac{2kT}{\rho^2} \right) [\lambda_z^2 - 1] z_i^2. \quad (4.9)$$

Eş. (4.9), bir tek zincir için f_z kuvveti tarafından yapılan iştir; yapılan iş, söz konusu zincirin uçtan uca vektörüne ait z bileşeninin ilk durumunun karesine (z_i^2) bağlıdır. Tüm v tane zincirin f_z bileşenleri tarafından yapılan toplam iş ifadesi ise şöyledir [4, 10]:

$$\sum_1^v w_z = \sum_1^v \left(\frac{kT}{\rho^2} \right) [\lambda_z^2 - 1] z_i^2. \quad (4.10)$$

Tüm zincirler aynı ρ ve λ_z değerine sahip olduğu için son ifade şu şekilde olur [4, 10]:

$$\sum_1^v w_z = \left(\frac{kT}{\rho^2} \right) [\lambda_z^2 - 1] \sum_1^v z_i^2. \quad (4.11)$$

Burada;

$$\sum_1^v z_i^2 = v \langle z^2 \rangle_i, \quad (4.12)$$

dir. $\langle z^2 \rangle_i$ ifadesi, deforme olmamış durumdaki z_i değerlerinin ortalama karesidir.

Deforme olmamış durum izotropiktir ve buna göre şu ifade geçerlidir [4, 10]:

$$\langle z^2 \rangle_i = \langle y^2 \rangle_i = \langle x^2 \rangle_i = \frac{\langle r^2 \rangle_i}{3}. \quad (4.13)$$

Buradan aşağıdaki ifade elde edilir:

$$\sum_1^v w_z = \left(\frac{kT}{\rho^2} \right) [\lambda_z^2 - 1] \frac{v \langle r^2 \rangle_i}{3} \quad (4.14)$$

Gauss zinciri için, ρ^2 ifadesi, (çapraz bağlar tarafından bağlanmamış zincir için) uçtan uca mesafenin ortalama karesini ($\langle r^2 \rangle_o$) kontrol eder [4, 10]. Buna göre:

$$\langle r^2 \rangle_o = \frac{3}{2} \rho^2 \quad (4.15)$$

ifadesi [4, 10] Eş (4.14)'te yerine konulursa aşağıdaki ifade elde edilir:

$$\sum_1^v w_z = \frac{vkT}{2} \cdot \frac{\langle r^2 \rangle_i}{\langle r^2 \rangle_o} [\lambda_z^2 - 1]. \quad (4.16)$$

Anlaşılaçağı gibi f_x ve f_y kuvvetleri tarafından yapılan iş ifadeleri için elde edilecek eşitlikler de benzer şekildedir. Buna göre deformasyon sırasında yapılan toplam iş aşağıdaki gibidir [4, 10];

$$W = \sum_1^v [w_x + w_y + w_z] \quad (4.17)$$

ya da

$$W = \frac{\nu kT}{2} \cdot \frac{\langle r^2 \rangle_i}{\langle r^2 \rangle_o} [\lambda_x^2 + \lambda_y^2 + \lambda_z^2 - 3]. \quad (4.18)$$

Eş. (4.18) ile verilen iş ifadesi, numune yüzeyine uygulanan kuvvet tarafından yapılan iş ile aynıdır ve Helmholtz serbest enerjisindeki değişime eşittir [4, 10]. Son denklemini birim hacimdeki zincir sayısı ($N = \nu/V$) cinsinden yazmak uygundur; [4, 10]. Buna göre,

$$W = \frac{VG}{2} [\lambda_x^2 + \lambda_y^2 + \lambda_z^2 - 3] \quad (4.19)$$

ifadesi yazılabilir [4, 10]. Burada,

$$G = NkT \cdot \frac{\langle r^2 \rangle_i}{\langle r^2 \rangle_o} \quad (4.20)$$

dir [4, 10] ve bununla birlikte, W , kauçuğun deformasyonu sırasında yapılan iş, V , deformasyona uğrayan kauçuğun hacmi, G , kauçuğun kayma modülü, λ_x , λ_y ve λ_z ise, sırasıyla, x , y , z eksenleri boyunca deforme olmuş ölçülerin deforme olmamış ölçülere oranıdır.

Tanım gereği, uygulanan kuvvet, gerinim enerjisi fonksiyonuna, boydaki değişime göre birinci mertebe bir kısmi türev aracılığı ile bağlanır. Benzer şekilde, katılık da uygulanan kuvvet ile boydaki değişime göre birinci mertebe bir kısmi türev aracılığı ile ilişkilendirilir [4] ve buna göre;

$$K = \frac{\partial}{\partial l} \left(\frac{\partial W}{\partial l} \right) \quad (4.21)$$

ifadesi geçerlidir [4]. Burada l numunenin boyudur. Bu eşitlik şu formda kullanılabilir:

$$K = \frac{\partial}{\partial \lambda} \left(\frac{\partial W}{\partial \lambda} \frac{\partial \lambda}{\partial l} \right) \frac{\partial \lambda}{\partial l}. \quad (4.22)$$

Eş. (4.22)'de Eş. (4.19)'da verilen iş ifadesi yerine konulursa, elde edilen fonksiyon aşağıdaki formda olacaktır [4]:

$$K = G f(\text{Geometri}, \text{deformasyon}). \quad (4.23)$$

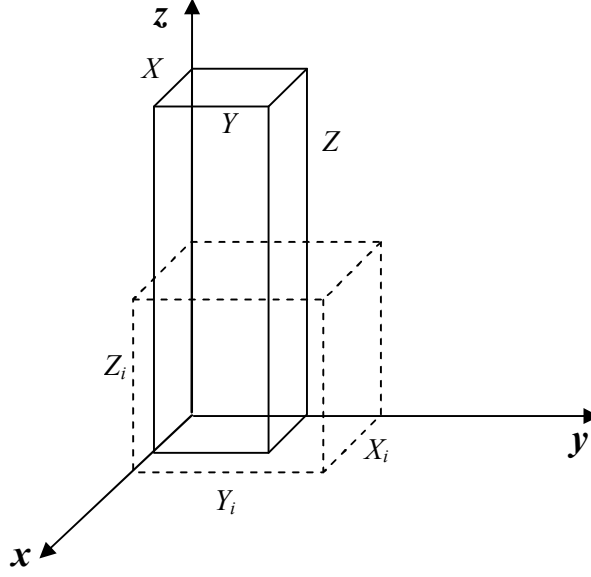
Titreşimler küçük genliklerde meydana geldiği için, dinamik (kompleks) katılık ise şu formda olacaktır [4]:

$$K^* = G^* f(\text{Geometri}, \text{deformasyon}). \quad (4.24)$$

Burada K^* kompleks katılık katsayısı ve G^* ise kompleks kayma modülüdür. Buna göre verilen bir elastomer sönümleyici için, kayma ya da Young modülünden katılığını türetmek mümkün olacaktır [4]. Bu bilgiden de anlaşılabileceği gibi öncelikle deformasyon sırasında uygulanan dış kuvvetin yaptığı işin belirlenmesi gerekmektedir.

4.1.1. Dikdörtgen kesitli numuneler için kompleks katılık

Bu bölümde, yukarıda verilen bilgiler ışığında, bir dikdörtgen prizmaya (Şekil 4.2) ait kompleks katılık ifadesi, Young modülünün, numune boyutlarının ve deformasyon genliğinin fonksiyonu olarak elde edilmiştir. Testlerde dikdörtgen kesitli numune kullanılması sebebiyle sadece dikdörtgen kesit için kompleks katılık ifadesi elde edilmiştir.



Şekil 4.2. Dikdörtgen kesitli numune

Dikdörtgen kesitli bir numuneyi deforme etmek için yapılan toplam iş için Eş. (4.19) geçerlidir [4, 10]. Küçük deformasyon değerleri için hacmin sabit olduğu kabul edilebilir [4, 10, 15] ve bu kabule göre Eş. (4.3) geçerli olacaktır. x ve y eksenlerindeki deformasyonlar (küçük deformasyonlar için) eşit kabul edilebilir çünkü bu durumda numune izotropik olacaktır [4]. Buna göre,

$$\lambda^2 \lambda_z = 1 \quad (4.25)$$

olacaktır. Burada $\lambda = \lambda_x = \lambda_y$ dir. Eş. (4.25), Eş. (4.19) ile verilen iş ifadesinde yerine konularak aşağıdaki iş ve katılık ifadeleri elde edilir [4, 10]:

$$W = \frac{VG}{2} \left[\frac{2}{\lambda_z} + \lambda_z^2 - 3 \right] \quad (4.26)$$

$$K = \frac{\partial}{\partial \lambda_z} \left(\frac{\partial W}{\partial \lambda_z} \frac{\partial \lambda_z}{\partial l} \right) \frac{\partial \lambda_z}{\partial l} = \frac{VG}{z_i^2} \left[\frac{2}{\lambda_z^3} + 1 \right] \quad (4.27)$$

Burada $z_i = h$ ve $\lambda_z = 1 + \delta h / h$ olarak ele alınırsa son denklem şu şekilde olacaktır [4]:

$$K = \frac{ab}{2h} G \left[\frac{2}{\left(1 + \frac{\delta h}{h}\right)} + 1 \right]. \quad (4.28)$$

Eş. (4.28) ile verilen ifade, Eş. (4.24) formunda yazılırsa,

$$K^* = \frac{ab}{2h} G^* \left[\frac{2}{\left(1 + \frac{\delta h}{h}\right)} + 1 \right] \quad (4.29)$$

şeklinde elde edilir [4]. Eş. (4.28) ile verilen katılık ifadesi numunenin kayma modülü cinsindendir. Klasik elastisite teorisine göre kayma modülü ile Young modülü arasındaki ilişki,

$$E = 2(1 + \nu)G \quad (4.30)$$

şeklindedir. Elastomerlerin küçük deformasyonları için hacimdeki değişiklik ihmal edilebilecek kadar küçüktür ve buna göre Poisson oranı yaklaşık 0,5 değerindedir [14, 15]. Bu şekilde ise aşağıdaki eşitlik elde edilir;

$$E = 3G. \quad (4.31)$$

Benzer şekilde, sabit hacim kabulü için kompleks Young modülü ile kompleks kayma modülü arasındaki ilişki Eş. 4.31'deki gibi olacaktır [14];

$$E^* = 3G^*. \quad (4.32)$$

Eş. (4.32), Eş. (4.29)'da yerine konulursa aşağıdaki ifade elde edilir:

$$K^* = \frac{ab}{6h} E^* \left[\frac{2}{\left(1 + \frac{\delta h}{h}\right)} + 1 \right]. \quad (4.33)$$

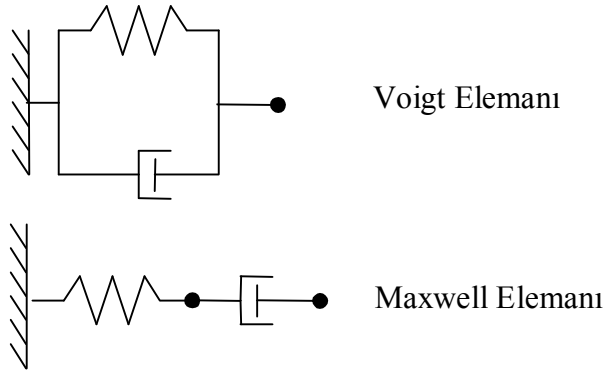
Eş. (4.33) numune geometrisine, yer değiştirme genliğine ve malzeme özelliğine bağlı bir kompleks katılık ifadesini vermektedir. Eş. (4.33)'ün bir değişkeni olan kompleks Young modülü (E^*) numunenin malzeme özelliğini temsil etmektedir. Aşağıda kompleks Young modülünü veren ifade, beş farklı viskoelastik model için frekansın fonksiyonu olarak ayrı ayrı çıkarılmıştır. Burada viskoelastik modeller lineer yay ve lineer viskoz sönüm elemanlarının farklı sayı ve kombinasyonları ile oluşturulmuştur.

4.2. Kompleks Young Modülünün Viskoelastik Model ile Belirlenmesi

Kompleks Young modülünün reel kısmı (depolama modülü E') ile imajiner kısmının (sönüm modülü, E'') frekansa olan bağlılıkları, belirli sayıda elastik (yay) ve viskoz (sönümleyici) elemana sahip olan ve “viskoelastik model” olarak tanımlanan bir mekanik model ile taklit edilebilir. Burada modelin uçlarına etkiyen kuvvet, gerilmenin (σ) uçlar arasındaki bağıl yer değiştirme ise gerinimin (ε) benzeridir. Her bir yay elemanı (çekme zorlaması için düşünüldüğünde) E_i modülüne benzer bir katılık, her bir sönümleyici elemanı ise η_i viskozite katsayısına benzer bir sürtünme direnci ile değerlendirilir [15, 17].

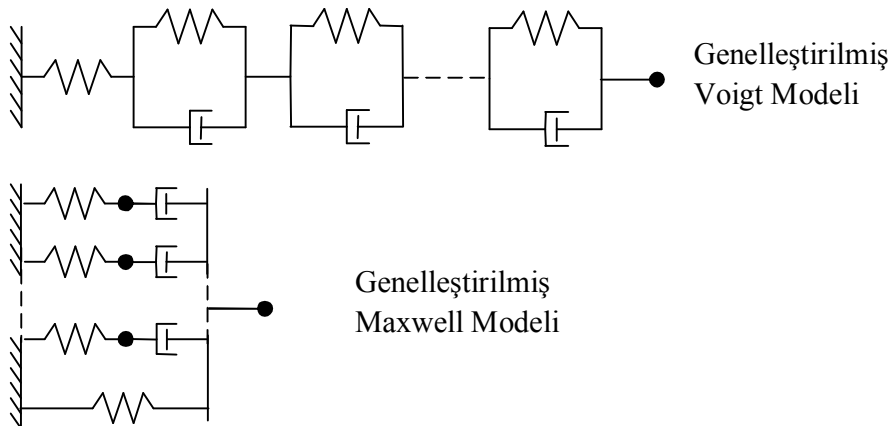
Viskoelastik modellerin en basitleri Maxwell ve Voigt elemanlarıdır (Şekil 4.3). Ancak, pratikte bu iki model genellikle birleştirilir [4]. Şekil 4.4'te genelleştirilmiş Maxwell ve genelleştirilmiş Voigt Modeli gösterilmektedir. Genelleştirilmiş Maxwell modeli bir ya da birden fazla Maxwell elemanı ile tek başına bir yay elemanının paralel bağlanmasıyla oluşturulur [15]. Genelleştirilmiş Voigt modeli ise

bir ya da birden fazla Voigt elemanı ile tek başına bir yay elemanın seri bağlanması ile oluşturulur [4, 15].



Şekil 4.3. Viskoelastik modele ait temel elemanlar

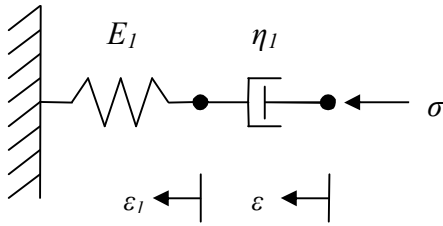
Bu bölümde, elastomer numune için gerilme ve gerinim arasındaki ilişkiyi veren kompleks Young modülünün beş farklı viskoelastik model ile modellenmesi üzerinde durulmuştur. Buna göre, Maxwell ve Voigt modellerinin cevaplarını karşılaştırmak amacıyla her bir tip için iki ve üç parametrelili modeller oluşturulmuştur. Sonrasında ise parametre sayısındaki artışın araştırılması amacıyla beş parametrelili geliştirilmiş Voigt modeli oluşturulmuştur. Tüm modeller için kompleks Young modülü ifadeleri çıkarılmış ve bu ifadeler Eş. (4.33)'te yerlerine konularak her bir model için numuneye ait kompleks katılık ifadeleri elde edilmiştir.



Şekil 4.4. Genelleştirilmiş Voigt ve Genelleştirilmiş Maxwell modelleri [4, 15]

4.2.1. İki parametrelili Maxwell elemanı ile kompleks Young modülünün modellenmesi

İki parametrelili Maxwell elemanı, tanımlanan değişkenleri ile birlikte, Şekil 4.5'te gösterilmektedir.



Şekil 4.5. İki parametrelili Maxwell elemanı ve tanımlanan değişkenler [15]

Yay elemanı için denklem şu şekildedir:

$$E_1 \varepsilon_1 = \sigma \quad (4.34a)$$

$$\dot{\varepsilon}_1 = \frac{\dot{\sigma}}{E_1} \quad (4.34b)$$

Viskoz eleman için ise denklem:

$$\eta_1 (\dot{\varepsilon} - \dot{\varepsilon}_1) = \sigma \quad (4.35)$$

şeklindedir. Buradaki ε_1 terimi yok edilmelidir. Bu yok etme işlemi, Eş. (4.34b)'nin, Eş. (4.35)'te yerine konulmasıyla sağlanabilir ve bu şekilde iki elemanlı Maxwell modeli için hareket denklemi aşağıdaki gibi elde edilir:

$$\eta_1 \left(\dot{\varepsilon} - \frac{\dot{\sigma}}{E_1} \right) = \sigma \quad (4.36a)$$

ya da

$$\dot{\varepsilon} = \frac{1}{E_1} \dot{\sigma} + \frac{1}{\eta_1} \sigma . \quad (4.36b)$$

Sönümleyiciye sinüzoidal bir zorlama uygulandığında, sönümleyici gerinimi (ε) kompleks olarak şu şekilde ifade edilebilir:

$$\varepsilon^* = \varepsilon_0 e^{i\omega t} = \varepsilon_0 (\cos \omega t + i \sin \omega t) \quad (4.37)$$

Viskoelastik kuvvet ise şu şekilde ifade edilebilir;

$$\sigma^* = E^* \varepsilon^* \quad (4.38a)$$

$$\sigma^* = (E' + iE'') \varepsilon_0 e^{i\omega t} \quad (4.38b)$$

Burada E^* kompleks Young modülü; E' ve E'' ise, sırasıyla, depolama modülü ve sönüm modülüdür. Kompleks gerilme ve gerinim ifadeleri hareket denkleminde yerine konulursa;

$$i\omega \varepsilon_0 e^{i\omega t} = i\omega \frac{(E' + iE'')}{E_1} \varepsilon_0 e^{i\omega t} + \frac{(E' + iE'')}{\eta_1} \varepsilon_0 e^{i\omega t} \quad (4.39)$$

ifadesi elde edilir. Bu ifade düzenlenip reel ve imajiner kısımlar kendi aralarında eşitlenerek kompleks modülün bileşenleri şu şekilde bulunur:

$$E' = \frac{\omega^2 \eta_1^2 E_1}{E_1^2 + \omega^2 \eta_1^2} \quad (4.40a)$$

$$E'' = \frac{\omega E_1^2 \eta_1}{E_1^2 + \omega^2 \eta_1^2} \quad (4.40b)$$

Eş. (4.40)'da verilen depolama ve sönüm modüllerine ait ifadeler Eş. (4.33)'te yerine konulursa;

$$K^* = \frac{ab}{6h} \left(\frac{\omega^2 \eta_1^2 E_1}{E_1^2 + \omega^2 \eta_1^2} + i \frac{\omega E_1^2 \eta_1}{E_1^2 + \omega^2 \eta_1^2} \right) \left[\frac{2}{\left(1 + \frac{\delta h}{h}\right)} + 1 \right] \quad (4.41a)$$

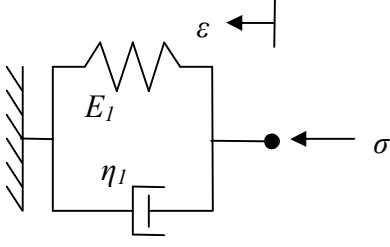
$$K' = \frac{ab}{6h} \left(\frac{\omega^2 \eta_1^2 E_1}{E_1^2 + \omega^2 \eta_1^2} \right) \left[\frac{2}{\left(1 + \frac{\delta h}{h}\right)} + 1 \right] \quad (4.41b)$$

$$K'' = \frac{ab}{6h} \left(\frac{\omega E_1^2 \eta_1}{E_1^2 + \omega^2 \eta_1^2} \right) \left[\frac{2}{\left(1 + \frac{\delta h}{h}\right)} + 1 \right] \quad (4.41c)$$

ifadeleri elde edilir. Eş. (4.41a)'da verilen ifade dikdörtgen kesitli bir elastomer numuneye ait kompleks katılık ifadesidir ve bu ifadenin bir değişkeni olan kompleks Young modülü iki parametrelili Maxwell modeli ile frekansın fonksiyonu olarak modellenmiştir.

4.2.2. İki parametrelili Voigt elemanı ile kompleks Young modülünün modellenmesi

İki parametrelili Voigt elemanı, tanımlanan değişkenleri ile birlikte Şekil 4.6'da gösterilmektedir.



Şekil 4.6. İki parametrelili Voigt elemanı [15]

Şekil 4.6’da verilen elemanın hareket denklemi şu şekildedir [15]:

$$\sigma = \varepsilon E_1 + \eta_1 \dot{\varepsilon} \quad (4.42)$$

Burada gerilme ve gerinim ifadeleri ve bu ifadeler arasındaki kompleks ilişki, Eş. (4.37), (4.38a) ve (4.38b) de verildiği gibi tanımlanırsa hareket denklemi;

$$(E' + iE'')\varepsilon_0 e^{i\omega t} = (E_1 + i\omega\eta_1)\varepsilon_0 e^{i\omega t} \quad (4.43)$$

şeklinde elde edilir. Burada gerekli sadeleştirmeler yapılarak reel ve imajiner kısımlar ayrı ayrı birbirlerine eşitlenirse kompleks Young modülünün bileşenleri aşağıdaki gibi elde edilir:

$$E' = E_1 \quad (4.44a)$$

$$E'' = \omega\eta_1 \quad (4.44b)$$

Eş. (4.44a) ve (4.44b)’de verilen depolama ve sönüm modüllerine ait ifadeler Eş. (4.33)’te yerine konulursa;

$$K^* = \frac{ab}{6h}(E_1 + i\omega\eta_1) \left[\frac{2}{\left(1 + \frac{\delta h}{h}\right)} + 1 \right] \quad (4.45a)$$

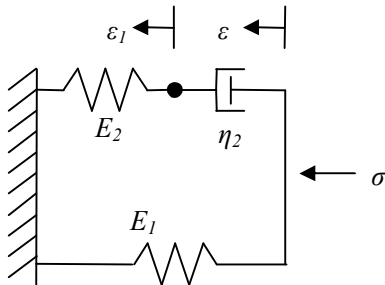
$$K' = \frac{ab}{6h}(E_1) \left[\frac{2}{\left(1 + \frac{\delta h}{h}\right)} + 1 \right] \quad (4.45b)$$

$$K'' = \frac{ab}{6h}(\omega\eta_1) \left[\frac{2}{\left(1 + \frac{\delta h}{h}\right)} + 1 \right] \quad (4.45c)$$

ifadeleri elde edilir. Eş. (4.45a)'da verilen ifade dikdörtgen kesitli bir elastomer numuneye ait kompleks katılık ifadesidir ve bu ifadenin bir değişkeni olan kompleks Young modülü iki parametrelili Voigt modeli ile frekansın fonksiyonu olarak modellenmiştir.

4.2.3. Üç parametrelili genelleştirilmiş Maxwell modeli ile kompleks Young modülünün modellenmesi

Bir yay elemanı ve bir Maxwell elemanın paralel bağlanmasıyla oluşan üç parametrelili Genelleştirilmiş Maxwell modeli ve modele ait değişkenler Şekil 4.7'de gösterilmiştir.



Şekil 4.7. Üç parametrelili Genelleştirilmiş Maxwell modeli [15]

Üç parametrelili genelleştirilmiş Maxwell modeli için aşağıdaki denklemler tanımlanabilir:

$$E_2 \varepsilon_1 = \sigma_2 \quad (4.46a)$$

$$\eta_2 (\dot{\varepsilon} - \dot{\varepsilon}_1) = \sigma_2 \quad (4.46b)$$

$$E_1 \varepsilon = \sigma_1 \quad (4.46c)$$

$$\sigma = \sigma_1 + \sigma_2 \quad (4.46d)$$

Eş. (4.46b) ile verilen viskoz eleman eşitliğindeki ε_1 değişkenini yok etmek için Eş.(4.46a) ile verilen yay eşitliği kullanılabilir. Buna göre;

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\dot{\sigma}_2}{E_2} + \frac{\sigma_2}{\eta_2} \quad (4.47)$$

ifadesi elde edilir. Eş. (4.47)'deki σ_2 gerilme terimini yok etmek gerekmektedir. Bunun için Eş. (4.46c) ile verilen yay eşitliği kullanılabilir ve bu eşitlikten, $\varepsilon = \sigma_1/E_1$ ve $\dot{\varepsilon} = \dot{\sigma}_1/E_1$ ifadeleri elde edilir. Bu ifadeler sırasıyla E_1/η_2 ve E_1/E_2 ile çarpılarak Eş. (4.47)'nin her iki tarafına eklenirlerse üç parametrelili genelleştirilmiş Maxwell modeline ait hareket denklemi aşağıdaki gibi elde edilir:

$$\left(1 + \frac{E_1}{E_2}\right) \dot{\varepsilon} + \frac{E_1}{\eta_2} \varepsilon = \frac{1}{E_2} \dot{\sigma} + \frac{1}{\eta_2} \sigma \quad (4.48)$$

Burada,

$$a_1 = \left(1 + \frac{E_1}{E_2}\right), \quad a_2 = \frac{E_1}{\eta_2}, \quad a_3 = \frac{1}{E_2}, \quad a_4 = \frac{1}{\eta_2} \quad (4.49)$$

değişkenleri tanımlanırsa hareket denklemi aşağıdaki gibi olur:

$$a_1 \dot{\varepsilon} + a_2 \varepsilon = a_3 \dot{\sigma} + a_4 \sigma . \quad (4.50)$$

Burada gerilme ve gerinim ifadeleri ve bu ifadeler arasındaki kompleks ilişki, Eş. (4.37), (4.38a) ve (4.38b) de verildiği gibi tanımlanırsa hareket denklemi:

$$(i\omega a_1 + a_2) \varepsilon_0 e^{i\omega t} = (i\omega a_3 + a_4) (E' + iE'') \varepsilon_0 e^{i\omega t} \quad (4.51a)$$

ya da

$$a_2 + i\omega a_1 = (a_4 E' - \omega a_3 E'') + i(a_4 E'' + \omega a_3 E') \quad (4.51b)$$

şeklinde elde edilir. Denklem (4.51b) de reel ve imajiner kısımlar kendi aralarında eşitlenip yeniden düzenlenirse kompleks modülün reel ve imajiner kısımları şu şekilde elde edilir;

$$E' = \frac{a_2 a_4 + \omega^2 a_1 a_3}{a_4^2 + (\omega a_3)^2} \quad (4.52a)$$

$$E'' = \frac{\omega (a_1 a_4 - a_2 a_3)}{a_4^2 + (\omega a_3)^2} \quad (4.52b)$$

Eş. (4.52a) ve (4.52b)'de verilen depolama ve sönüm modüllerine ait ifadeler Eş. (4.33)'te yerine konulursa;

$$K^* = \frac{ab}{6h} \left(\frac{a_2 a_4 + \omega^2 a_1 a_3}{a_4^2 + (\omega a_3)^2} + i \frac{\omega (a_1 a_4 - a_2 a_3)}{a_4^2 + (\omega a_3)^2} \right) \left[\frac{2}{\left(1 + \frac{\delta h}{h}\right)} + 1 \right] \quad (4.53a)$$

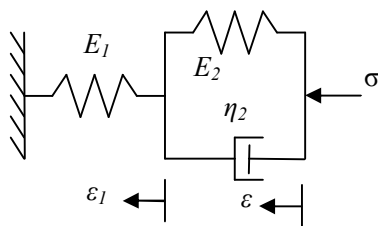
$$K' = \frac{ab}{6h} \left(\frac{a_2 a_4 + \omega^2 a_1 a_3}{a_4^2 + (\omega a_3)^2} \right) \left[\frac{2}{\left(1 + \frac{\delta h}{h}\right)} + 1 \right] \quad (4.53b)$$

$$K'' = \frac{ab}{6h} \left(\frac{\omega(a_1 a_4 - a_2 a_3)}{a_4^2 + (\omega a_3)^2} \right) \left[\frac{2}{\left(1 + \frac{\delta h}{h}\right)} + 1 \right] \quad (4.53c)$$

ifadeleri elde edilir. Eş. (4.53a)'da verilen ifade dikdörtgen kesitli bir elastomer numuneye ait kompleks katılık ifadesidir ve bu ifadenin bir değişkeni olan kompleks Young modülü üç parametrelili genelleştirilmiş Maxwell modeli ile frekansın fonksiyonu olarak modellenmiştir.

4.2.4. Üç parametrelili genelleştirilmiş Voigt modeli ile kompleks Young modülünün modellenmesi

Şekil 4.8'de üç parametrelili Genelleştirilmiş Voigt modeli ve tanımlanan değişkenler gösterilmiştir.



Şekil 4.8. Üç parametrelili Genelleştirilmiş Voigt modeli

Üç parametrelili modelin hareket denklemi ise;

$$\sigma = E_1 \epsilon_1 \quad (4.54a)$$

$$\sigma = E_2(\varepsilon - \varepsilon_1) + \eta_2(\dot{\varepsilon} - \dot{\varepsilon}_1). \quad (4.54b)$$

Eş. (4.51b)'deki ε_1 değişkenini yok etmek gerekmektedir. Zira numunenin ölçülecek olan gerinimi modeldeki ε değişkenidir. Buna göre;

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma}{E_1} \quad (4.55a)$$

$$\dot{\varepsilon}_1 = \frac{\dot{\sigma}}{E_1}. \quad (4.55b)$$

Bu ifadeler Eş (4.54b)'de yerlerine konulursa hareket denklemi şu şekilde elde edilir:

$$\sigma = E_2\varepsilon - \frac{E_2}{E_1}\sigma + \eta_2\dot{\varepsilon} - \frac{\eta_2}{E_1}\dot{\sigma}. \quad (4.56)$$

Bu ifade düzenlenirse;

$$\dot{\sigma} + \frac{E_1 + E_2}{\eta_2}\sigma = \frac{E_1 E_2}{\eta_2}\varepsilon + E_1\dot{\varepsilon}. \quad (4.57)$$

şeklinde bulunur. Burada;

$$p_1 = \frac{E_1 + E_2}{\eta_2}, \quad q_0 = \frac{E_1 E_2}{\eta_2}, \quad q_1 = E_1, \quad (4.58)$$

değişkenleri tanımlanırsa hareket denklemi aşağıdaki gibi sadeleştirilmiş olur:

$$\dot{\sigma} + p_1\sigma = q_0\varepsilon + q_1\dot{\varepsilon} \quad (4.59)$$

Burada gerilme ve gerinim ifadeleri ve bu ifadeler arasındaki kompleks ilişki, Eş. (4.37), (4.38a) ve (4.38b) de verildiği gibi tanımlanırsa hareket denklemi,

$$(E' + iE'')i\omega\varepsilon_0 e^{i\omega t} + (E' + iE'')\varepsilon_0 e^{i\omega t} p_1 = q_0\varepsilon_0 e^{i\omega t} + i\omega q_1\varepsilon_0 e^{i\omega t} \quad (4.60)$$

şeklinde elde edilir. Burada reel ve imajiner kısımlar ayrı ayrı birbirlerine eşitlenirse aşağıdaki iki denklem elde edilir:

$$q_0 = p_1 E' - \omega E'' \quad (4.61a)$$

$$\omega q_1 = \omega E' + p_1 E'' . \quad (4.61b)$$

Bu iki denklemin ortak çözümünden depolama modülü ve sönüm modülü aşağıdaki şekilde elde edilir:

$$E' = \frac{q_0 p_1 + \omega^2 q_1}{\omega^2 + p_1^2} \quad (4.62a)$$

$$E'' = \frac{(p_1 q_1 - q_0)\omega}{\omega^2 + p_1^2} . \quad (4.62b)$$

Eş. (4.62a) ve (4.62b)'de verilen depolama ve sönüm modüllerine ait ifadeler Eş. (4.33)'te yerlerine konulursa;

$$K^* = \frac{ab}{6h} \left(\frac{q_0 p_1 + \omega^2 q_1}{\omega^2 + p_1^2} + i \frac{(p_1 q_1 - q_0)\omega}{\omega^2 + p_1^2} \right) \left[\frac{2}{\left(1 + \frac{\delta h}{h}\right)} + 1 \right] \quad (4.63a)$$

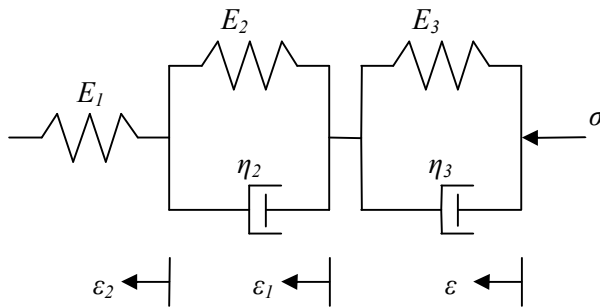
$$K' = \frac{ab}{6h} \left(\frac{q_0 p_1 + \omega^2 q_1}{\omega^2 + p_1^2} \right) \left[\frac{2}{\left(1 + \frac{\delta h}{h} \right)} + 1 \right] \quad (4.63b)$$

$$K'' = \frac{ab}{6h} \left(\frac{(p_1 q_1 - q_0) \omega}{\omega^2 + p_1^2} \right) \left[\frac{2}{\left(1 + \frac{\delta h}{h} \right)} + 1 \right] \quad (4.63c)$$

ifadeleri elde edilir. Eş. (4.63a)'da verilen ifade dikdörtgen kesitli bir elastomer numuneye ait kompleks katılık ifadesidir ve bu ifadenin bir değişkeni olan kompleks Young modülü üç parametrelili genelleştirilmiş Voigt modeli ile frekansın fonksiyonu olarak modellenmiştir.

4.2.5. Beş parametrelili genelleştirilmiş Voigt modeli ile kompleks Young modülünün modellenmesi

Viskoelastik davranışı taklit edecek modelin uygunluğunu arttırabilmek adına ek Voigt elemanları zincire eklenebilir [2]. Şekil 4.9'da beş parametrelili Genelleştirilmiş Voigt modeli ve model için tanımlanan değişkenler verilmiştir.



Şekil 4.9. Beş parametrelili genelleştirilmiş Voigt Modeli

E_1 yayı ve iki Voigt elemanın seri bağlanmasından oluşan model için hareket denklemi şu şekilde elde edilebilir;

$$E_2(\varepsilon_1 - \varepsilon_2) + \eta_2(\dot{\varepsilon}_1 - \dot{\varepsilon}_2) = \sigma, \quad (4.64a)$$

$$E_3(\varepsilon - \varepsilon_1) + \eta_3(\dot{\varepsilon} - \dot{\varepsilon}_1) = \sigma, \quad (4.64b)$$

$$E_1\varepsilon_2 = \sigma. \quad (4.64c)$$

Bu denklemlerin Laplace dönüşümü yapılırsa;

$$(E_2 + s\eta_2)[\varepsilon_1(s) - \varepsilon_2(s)] = \sigma(s) \quad (4.65a)$$

$$(E_3 + s\eta_3)[\varepsilon(s) - \varepsilon_1(s)] = \sigma(s) \quad (4.65b)$$

$$E_1\varepsilon_2(s) = \sigma(s) \quad (4.65c)$$

elde edilir. Burada Eş. (4.65a) ve Eş.(4.65b) taraf tarafa toplanırsa,

$$[\varepsilon(s) - \varepsilon_1(s)] + [\varepsilon_1(s) - \varepsilon_2(s)] = \varepsilon(s) - \varepsilon_2(s) = \sigma(s) \left[\frac{1}{(E_2 + s\eta_2)} + \frac{1}{(E_3 + s\eta_3)} \right] \quad (4.66a)$$

ya da

$$\begin{aligned} & [E_2E_3 + s(E_2\eta_3 + E_3\eta_2) + s^2\eta_2\eta_3]\varepsilon(s) \\ & = \sigma(s)[(E_2 + E_3) + s(\eta_2 + \eta_3)] + [E_2E_3 + s(E_2\eta_3 + E_3\eta_2) + s^2\eta_2\eta_3]\varepsilon_2(s) \end{aligned} \quad (4.66b)$$

olarak elde edilir. Burada Eş. (4.66b)'nin ters Laplace dönüşümü yapılırsa,

$$\begin{aligned}
& E_2 E_3 \varepsilon + (E_2 \eta_3 + E_3 \eta_2) \dot{\varepsilon} + \eta_2 \eta_3 \ddot{\varepsilon} \\
& = (E_2 + E_3) \sigma + (\eta_2 + \eta_3) \dot{\sigma} + E_2 E_3 \varepsilon_2 + (E_2 \eta_3 + E_3 \eta_2) \dot{\varepsilon}_2 + \eta_2 \eta_3 \ddot{\varepsilon}_2
\end{aligned} \tag{4.67}$$

elde edilir. Ayrıca lineer E_I yayı için $\varepsilon_2 = \frac{\sigma}{E_1}$, $\dot{\varepsilon}_2 = \frac{\dot{\sigma}}{E_1}$, $\ddot{\varepsilon}_2 = \frac{\ddot{\sigma}}{E_1}$ ifadeleri Eş.

(4.67)'de yerlerine konulursa,

$$\begin{aligned}
& E_2 E_3 \varepsilon + (E_2 \eta_3 + E_3 \eta_2) \dot{\varepsilon} + \eta_2 \eta_3 \ddot{\varepsilon} \\
& = \frac{(E_1 E_2 + E_2 E_3 + E_1 E_3)}{E_1} \sigma + \frac{[(E_1 + E_3) \eta_2 + (E_1 + E_2) \eta_3]}{E_1} \dot{\sigma} + \frac{\eta_2 \eta_3}{E_1} \ddot{\sigma}
\end{aligned} \tag{4.68}$$

ifadesi elde edilir. Burada,

$$\begin{aligned}
a_1 &= E_2 E_3; \quad a_2 = (E_2 \eta_3 + E_3 \eta_2); \quad a_3 = \eta_2 \eta_3; \quad a_4 = \frac{(E_1 E_2 + E_2 E_3 + E_1 E_3)}{E_1}; \\
a_5 &= \frac{[(E_1 + E_3) \eta_2 + (E_1 + E_2) \eta_3]}{E_1}; \quad a_6 = \frac{\eta_2 \eta_3}{E_1}
\end{aligned} \tag{4.69}$$

değişkenleri tanımlanırsa beş parametrelili Voigt modelinin hareket denklemi şu şekilde elde edilir:

$$a_3 \ddot{\varepsilon} + a_2 \dot{\varepsilon} + a_1 \varepsilon = a_6 \ddot{\sigma} + a_5 \dot{\sigma} + a_4 \sigma. \tag{4.70}$$

Burada gerilme ve gerinim ifadeleri ve bu ifadeler arasındaki kompleks ilişki, Eş. (4.37), (4.38a) ve (4.38b) de verildiği gibi tanımlanırsa hareket denklemi:

$$(-\omega^2 a_3 + i\omega a_2 + a_1) \varepsilon_0 e^{i\omega t} = (-\omega^2 a_6 + i\omega a_5 + a_4) (E' + iE'') \varepsilon_0 e^{i\omega t} \tag{4.71a}$$

ya da

$$\begin{aligned}
& (-\omega^2 a_3 + a_1) + i\omega a_2 \\
& = (a_4 E' - \omega^2 a_6 E' - \omega a_5 E'') + i(a_4 E'' + \omega a_5 E' - \omega^2 a_6 E'')
\end{aligned} \tag{4.71b}$$

ifadeleri elde edilir. Eş. (4.71b)'de reel ve imajiner terimler kendi aralarında eşitlenirse şu ifadeler elde edilir;

$$-\omega^2 a_3 + a_1 = (a_4 - \omega^2 a_6)E' - \omega a_5 E'' \tag{4.72a}$$

$$\omega a_2 = \omega a_5 E' + (a_4 - \omega^2 a_6)E'' \tag{4.72b}$$

Bu iki eşitlik E' ve E'' için çözülürse depolama ve sönüm modülleri,

$$E' = \frac{(a_4 - \omega^2 a_6)(a_1 - a_3 \omega^2) + \omega^2 a_2 a_5}{(a_4 - \omega^2 a_6)^2 + (\omega a_5)^2} \tag{4.73a}$$

$$E'' = \frac{\omega a_2 (a_4 - \omega^2 a_6) + \omega a_5 (a_3 \omega^2 - a_1)}{(a_4 - \omega^2 a_6)^2 + (\omega a_5)^2} \tag{4.73b}$$

şeklinde elde edilirler. Eş. (4.73a) ve (4.73b)'de verilen depolama ve sönüm modüllerine ait ifadeler Eş. (4.33)'te yerine konulursa;

$$\begin{aligned}
K^* &= \frac{ab}{6h} \left(\frac{(a_4 - \omega^2 a_6)(a_1 - a_3 \omega^2) + \omega^2 a_2 a_5}{(a_4 - \omega^2 a_6)^2 + (\omega a_5)^2} \right) \left[\frac{2}{\left(1 + \frac{\delta h}{h}\right)} + 1 \right] \\
&+ i \frac{ab}{6h} \left(\frac{\omega a_2 (a_4 - \omega^2 a_6) + \omega a_5 (a_3 \omega^2 - a_1)}{(a_4 - \omega^2 a_6)^2 + (\omega a_5)^2} \right) \left[\frac{2}{\left(1 + \frac{\delta h}{h}\right)} + 1 \right]
\end{aligned} \tag{4.74a}$$

$$K' = \frac{ab}{6h} \left(\frac{(a_4 - \omega^2 a_6)(a_1 - a_3 \omega^2) + \omega^2 a_2 a_5}{(a_4 - \omega^2 a_6)^2 + (\omega a_5)^2} \right) \left[\frac{2}{\left(1 + \frac{\delta h}{h}\right)} + 1 \right] \quad (4.74b)$$

$$K'' = \frac{ab}{6h} \left(\frac{\omega a_2 (a_4 - \omega^2 a_6) + \omega a_5 (a_3 \omega^2 - a_1)}{(a_4 - \omega^2 a_6)^2 + (\omega a_5)^2} \right) \left[\frac{2}{\left(1 + \frac{\delta h}{h}\right)} + 1 \right] \quad (4.74c)$$

ifadeleri elde edilir. Eş. (4.74a)'da verilen ifade dikdörtgen kesitli bir elastomer numuneye ait kompleks katılık ifadesidir ve bu ifadenin bir değişkeni olan kompleks Young modülü beş parametrelili genelleştirilmiş Voigt modeli ile frekansın fonksiyonu olarak modellenmiştir.

Elastomer numuneye ait kompleks katılık ifadeleri, beş farklı viskoelastik modele göre çıkarılan kompleks Young modüllerinin her biri için, numune geometrisi, yer değiştirme genliği ve kompleks Young modülünün fonksiyonu olarak elde edilmiştir. Burada beş farklı viskoelastik modelin her biri için elde edilen kompleks Young modülü ifadeleri frekansa bağılıdır. Elde edilen kompleks katılık ifadelerinde, viskoelastik modellere ait parametreleri belirlemek ve analitik çalışmayı doğrulamak için bir deney prosedürü gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışma sonucunda, viskoelastik modellerin oluşturulmasında seçilen elemanların sayısı ve kombinasyonunun kompleks katılık ifadesinin hassaslığına olan etkisi incelenmiştir.

5. DENEY DÜZENEGİ VE DENEYLERİN YAPILIŞI

Bu bölümde, Eş. (4.41a), (4.45a), (4.53a), (4.63a) ve (4.74a)'da verilen kompleks katılık ifadelerindeki viskoelastik modellere ait parametre değerlerini belirlemek ve analitik çalışmayı doğrulamak için bir deney prosedürü verilmiştir. Aşağıda deney prosedürü ve deney düzeneği açıklanmıştır.

5.1. Deney Düzeneği

Hidrolik dinamik test yöntemi esas alınarak, bir elastomer numune farklı frekans ve ön yükleme koşulları için iki farklı konfigürasyonda test edilmiştir. Söz konusu test konfigürasyonları, numunenin test cihazına iki farklı şekilde bağlanması ile oluşturulmuştur. Çizelge 5.1'de test konfigürasyonlarının ölçüleri verilmiş ve Şekil 5.1'de test konfigürasyonları şematik olarak gösterilmiştir. Testlerde kullanılan numune, 200x100x30 mm ölçülerine sahip bir dikdörtgenler prizması olup, Özdekan Kauçuk Sanayii tarafından üretilen neopren sentetik kauçuk malzemedir. Ek 1'de Özdekan Kauçuk Sanayii'nden elde edilen numuneye ait teknik özellikler verilmiştir.

Çizelge 5.1. Test konfigürasyonları

	Birinci Konfigürasyon	İkinci Konfigürasyon
Yük uygulanan yüzeye ait ölçüler (mm x mm)	200x100	200x30
Yükseklik (mm)	30	100

Birinci ve ikinci konfigürasyon için yapılan testler Çizelge 5.2 ve Çizelge 5.3'te verilmiştir.

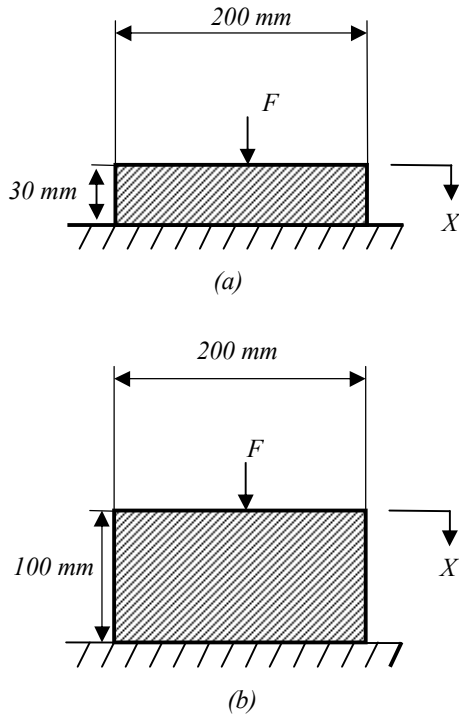
Çizelge 5.2. Birinci konfigürasyon için yapılan testler

Test No.	Ön Yükleme	Frekans (Hz)	Piston Stroğu
Test-1	0 kN	0,5	1 mm piston strok girişı için
Test-2	2,56 kN ön yükleme koşulunda	0,5	
Test-3	2,56 kN ön yükleme koşulunda	1,0	
Test-4	2,56 kN ön yükleme koşulunda	1,5	
Test-5	2,56 kN ön yükleme koşulunda	2,0	
Test-6	4,90 kN ön yükleme koşulunda	0,5	
Test-7	4,90 kN ön yükleme koşulunda	1,0	
Test-8	4,90 kN ön yükleme koşulunda	1,5	
Test-9	4,90 kN ön yükleme koşulunda	2,0	
Test-10	10,0 kN ön yükleme koşulunda	0,5	
Test-11	10,0 kN ön yükleme koşulunda	1,0	
Test-12	10,0 kN ön yükleme koşulunda	1,5	
Test-13	10,0 kN ön yükleme koşulunda	2,0	

Çizelge 5.3. İkinci konfigürasyon için yapılan testler

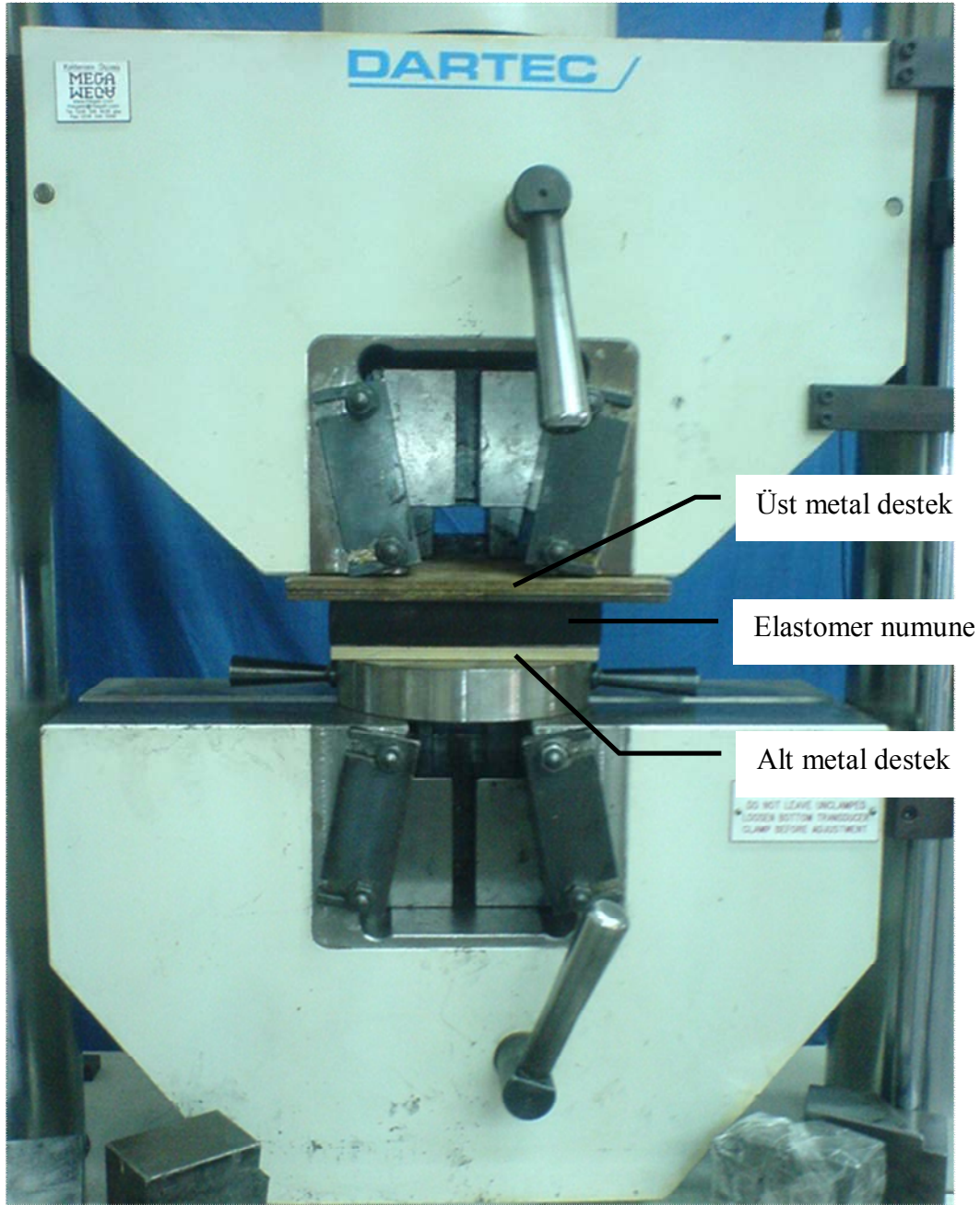
Test No.	Ön Yükleme	Frekans (Hz)	Piston Stroğu
Test-1	0,5 kN ön yükleme koşulunda	0,5	1 mm piston strok girişı için
Test-2	0,5 kN ön yükleme koşulunda	1,0	
Test-3	0,5 kN ön yükleme koşulunda	1,5	
Test-4	0,5 kN ön yükleme koşulunda	2,0	
Test-5	1,01 kN ön yükleme koşulunda	0,5	
Test-6	1,01 kN ön yükleme koşulunda	1,0	
Test-7	1,01 kN ön yükleme koşulunda	1,5	
Test-8	1,01 kN ön yükleme koşulunda	2,0	
Test-9	1,01 kN ön yükleme koşulunda	0,5	2 mm piston strok girişı için
Test-10	1,01 kN ön yükleme koşulunda	1,0	
Test-11	1,01 kN ön yükleme koşulunda	1,5	
Test-12	1,01 kN ön yükleme koşulunda	2,0	
Test-13	1,01 kN ön yükleme koşulunda	0,5	3 mm piston strok girişı için
Test-14	1,01 kN ön yükleme koşulunda	0,5	4 mm piston strok girişı için

Testlerin gerçekleştirildiği konfigürasyonlar için numunenin bağlanma şekilleri Şekil 5.1’de gösterilmiştir.



Şekil 5.1. Elastomer test numunesi: (a) birinci test konfigürasyonu; (b) ikinci test konfigürasyonu

Test çalışması, Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü’ne ait Mekanik-Mukavemet Laboratuvarı’nda, Dartec RF tipindeki çekme cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Elastomer numuneye etkiyen yükün homojen dağılması için numunenin alt ve üst yüzeylerine metal destekler yerleştirilmiştir. Test düzeni Resim 5.1’de gösterilmiştir.



Resim 5.1. Test düzeni (birinci konfigürasyon)

Test numunesinin dinamik özelliklerini belirlemek için sadece test cihazı yeterli değildir. Test numunesinin kontrollü zorlanması için test cihazına ait olan kontrol birimi ile kuvvet ve yer değiştirme bilgilerinin toplanabilmesi için bir bilgisayarlı veri toplama sistemi kullanılmıştır.

Dartec çekme cihazına ait kontrol birimi, test cihazını istenilen ön yükleme ve frekans değerleri ile yürütür ve yürütme sırasında eş zamanlı olarak test cihazından gelen kuvvet ve yer değiştirme verilerini bilgisayarlı kontrol sistemine aktarır. Bilgisayarlı veri toplama sisteminin topladığı, test cihazının pistonundan elde edilen kuvvet bilgisi (kN) ile pistonun yer değiştirme bilgisi kullanılarak elastomer numunenin histerezis eğrisi elde edilebilir ve histerezis eğrisi ile numunenin katılığı Bölüm 4’te verilen analitik ifadelerle hesaplanabilir. Elastomer numune, düşük frekanslarda (0,5-2,0 Hz) ve 1 dakikadan kısa sürelerde test edildiği için numune sıcaklığının test sırasında artması beklenmemiştir. Buna göre test sırasında numunenin soğutulması için ek bir sisteme gerek görülmemiştir.

5.1.1. Dartec çekme cihazı

Dartec RF tipindeki çekme cihazının ağırlığı 3350 kg’dır. Maksimum çekme kapasitesi 60 ton’ dur. Kullanılan motor M1000-I4 tipinde, 265 kg ağırlığında, 380 V ve 50 Hz’ lik bir motordur ve maksimum sağladığı tork 800 Nm’dir (Bkz. Resim 5.1).

5.1.2. Kontrol birimi

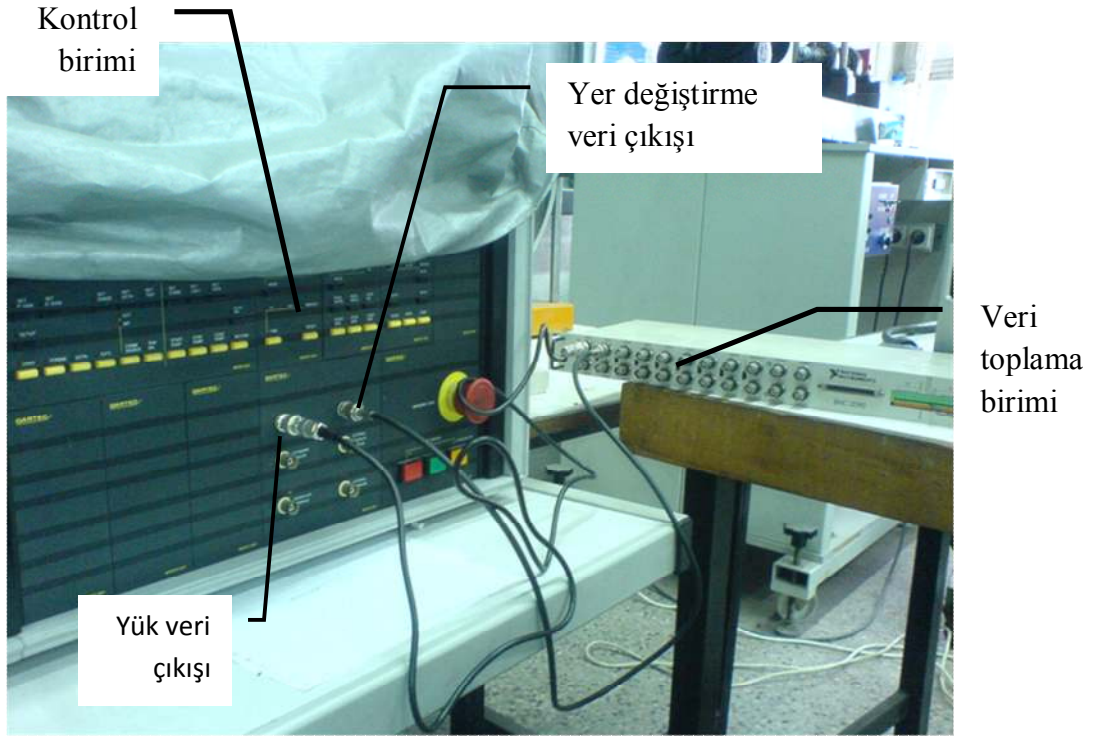
Kontrol ünitesi (Resim 5.2) ise M9500 tipinde ve 25 kg ağırlığındadır. 220 V ve 50 Hz de çalışmaktadır.



Resim 5.2. Kontrol birimi

5.1.3. Bilgisayarlı veri toplama sistemi

National Instrument'in NI 6052 veri toplama kartı, NI SH68-68 kalkanlı kablo, NI-BNC 2090 bağlantı bloğu ve bir standart bilgisayardan oluşur. Kontrol biriminden gelen analog sinyalleri dijital sinyallere dönüştürür. Bilgisayar, paket program (MATLAB) sayesinde veri toplama kartının aldığı kuvvet ve yer değiştirme bilgilerini zaman tanım bölgesinde grafik olarak gösterebilmektedir. Bilgisayarlı veri toplama sistemi ile kontrol biriminin birbirleri ile bağlantısı Resim 5.3'te gösterilmiştir. Kontrol biriminin yük çıkışı veri toplama sisteminin birinci kanalına, yer değiştirme çıkışı ise sistemin ikinci kanalına bağlanmıştır.



Resim 5.3. Kontrol birimi ile veri toplama sistemi arasındaki bağlantı

5.2. Test Prosedürü

Elastomer numunenin dinamik karakteristiğini belirlemek için yapılan deneyin işlem basamakları aşağıda belirtilmiştir:

1. Testi yapılacak numune ve numune üzerindeki yükün homojen dağılımını sağlayacak rijit metal destekler test cihazına yerleştirilir (Bkz. Resim 5.1).
2. Kontrol birimi aracılığı ile hidrolik pistonu bağlı üst çene üst metal desteğin yüzeyine temas edene kadar indirilir.
3. Hidrolik piston, elastomer numune üzerinde istenilen statik ön yüklemeyi oluşturacak şekilde (kontrol birimi aracılığı ile) indirilmeye devam edilir.
4. Kontrol birimi üzerinden istenilen frekans değeri belirlenir ve hidrolik pistonun numune üzerinde sinüzoidal yük oluşturması sağlanır.

5. Bilgisayarlı veri toplama sistemindeki program başlatılarak test cihazından gelen yer değiştirme ve kuvvet sinyalleri alınmaya başlanır.
6. Denenmek istenen tüm frekans değerleri için madde 4 ve 5 tekrar edilir.
7. Yeni bir ön yükleme koşulu için madde 3'ten 6'ya kadar basamaklar tekrar edilir.
8. İkinci konfigürasyonu oluşturacak şekilde, elastomer numune ve rijit destekler test cihazına tekrar yerleştirilir ve ardından madde iki uygulanır.
9. İstenilen ön yükleme ve frekans değerleri için madde 3'ten 7'ye kadar işlem basamakları tekrar edilir.
10. Test cihazı durdurulur ve test numunesi yerinden alınır.

6. BULGULAR VE TARTIŞMA

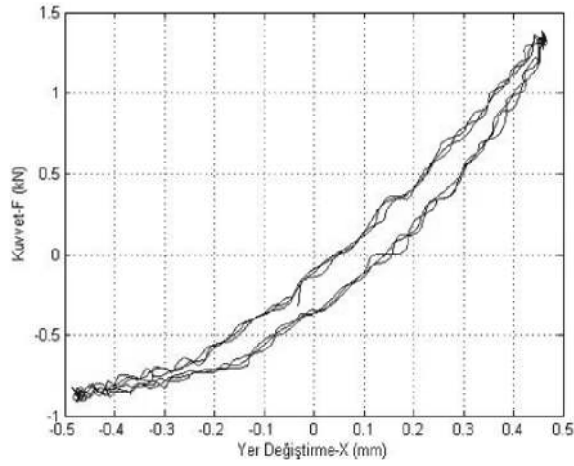
6.1. Deneysel Sonuçlar

Deneysel çalışma kapsamında elastomer numune iki farklı konfigürasyon için test edilmiş (Bkz Şekil 5.1) ve tüm testlere ait histerezis döngüleri elde edilmiştir. Histerezis döngüsü, kuvvetin yer değiştirmeye göre grafiğidir ve elastomer malzemenin sönüm ve katılık özellikleri hakkında bilgiler içerir (Bkz. Şekil 3.7). Histerezis döngüsünün dar ya da geniş olması numunenin sönüm özelliğine bağlıdır. Sıfır sönüm durumu için (ideal yayda olduğu gibi) histerezis döngüsü çizgi şeklinde olacaktır ($f=kx$ fonksiyonunun grafiği). Histerezis döngüsünün eğimi ise numunenin katılık özelliği ile ilgilidir ve katılık arttıkça eğimde artış gösterir. Elastomer numune üzerinde gerçekleştirilen testler sonucu elde edilen histerezis döngüleri X (yer değiştirme) ve F (kuvvet) eksenlerine göre normalize edilmiştir. Bu noktada lineer viskoelastik davranış için histerezis döngüsünün elips şeklinde olması beklenir.

6.1.1. Birinci konfigürasyona ait test sonuçları

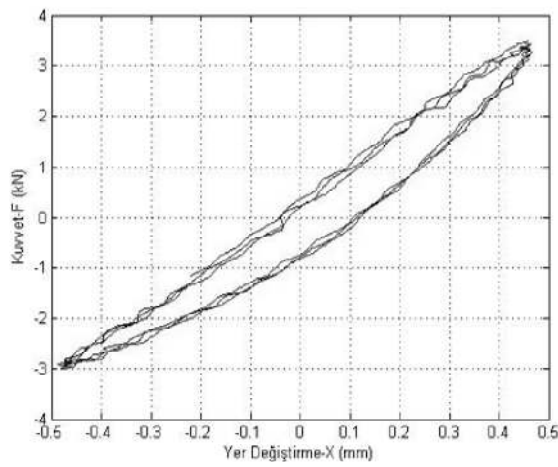
Elastomer numune, farklı ön yüklemelerde ve farklı frekanslarda test edilmiştir. İlk olarak ön yüklemesiz olarak 0,5 Hz’de test gerçekleştirilmiştir. Sonrasında sırasıyla 2,56 kN, 4,90 kN ve 10 kN ön yükleme koşullarında 0,5 Hz ile 2,0 Hz arasında testler tekrarlanmıştır. Birinci konfigürasyon için tüm strok girişleri, ön yüklemeli durum sıfır kabul edilerek, 0 ile -1 mm değerleri arasında ayarlanmıştır. Birinci konfigürasyona ait tüm veriler için 50 Hz üzerindeki sinyaller filtrelenmiştir.

Elastomer numune ilk olarak sıfır ön yükleme ile 0,5 Hz’de sinüzoidal olarak zorlanmıştır. Elastomer numunenin cevabına ait histerezis döngüsü Şekil 6.1’de gösterilmiştir. Elde edilen histerezis eğrisinin düzgün elips şekline sahip olmadığı görülmüştür. Buna göre söz konusu test için, elastomer numunenin nonlinear viskoelastik davranış gösterdiği söylenebilir.

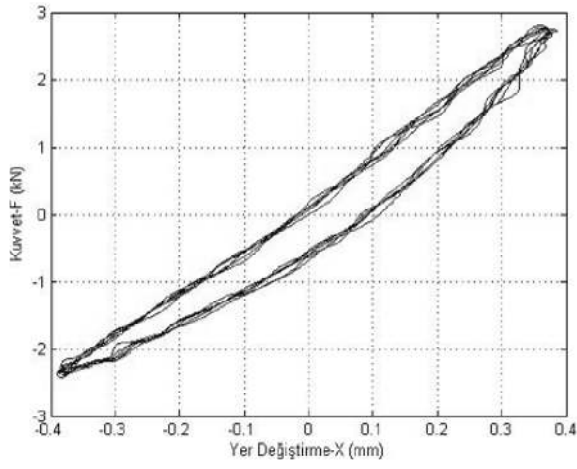


Şekil 6.1. 0,5 Hz frekansta, ön yükleme için histerezis eğrisi

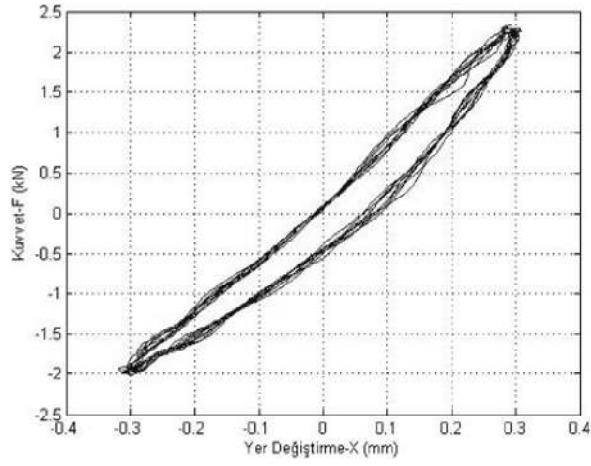
Elastomer numune, 2,56 kN ön yükleme koşulu için, 0,5 Hz, 1,0 Hz, 1,5 Hz ve 2,0 Hz frekans değerlerinde test edilmiştir. Bu testlere ait histerezis eğrileri, sırasıyla, Şekil 6.2, Şekil 6.3, Şekil 6.4 ve Şekil 6.5'te gösterilmiştir.



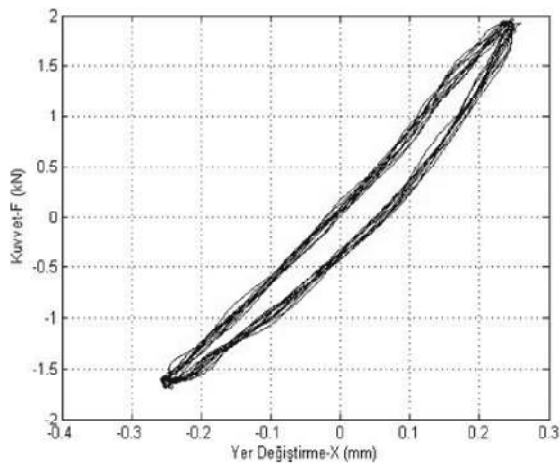
Şekil 6.2. 0,5 Hz frekans ve 2,56 kN ön yükleme için histerezis eğrisi



Şekil 6.3. 1 Hz frekans ve 2,56 kN ön yükleme için histerezis eğrisi

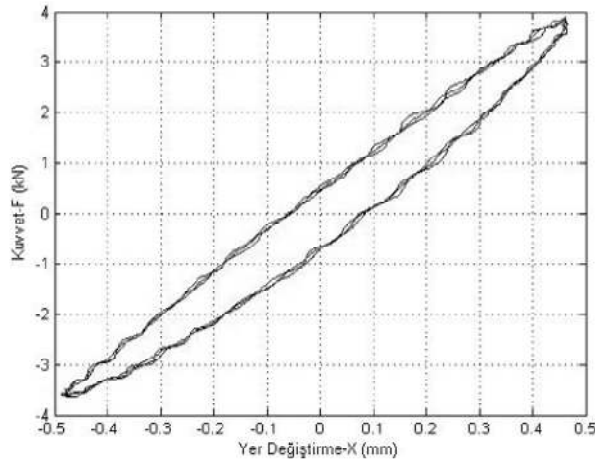


Şekil 6.4. 1,5 Hz frekans ve 2,56 kN ön yükleme için histerezis eğrisi

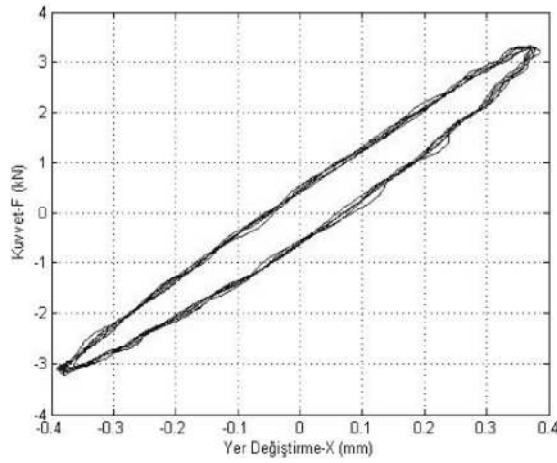


Şekil 6.5. 2 Hz frekans ve 2,56 kN ön yükleme için histerezis eğrisi

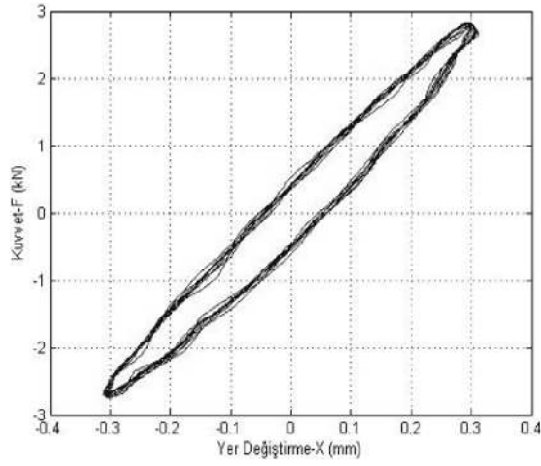
Elastomer numune, 4,90 kN ön yükleme koşulu için, 0,5 Hz, 1,0 Hz, 1,5 Hz ve 2,0 Hz frekans değerlerinde test edilmiştir. Bu testlere ait histerezis eğrileri, sırasıyla, Şekil 6.6, Şekil 6.7, Şekil 6.8 ve Şekil 6.9’da gösterilmiştir.



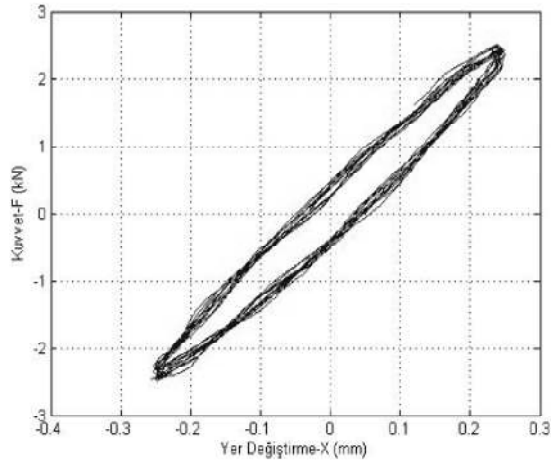
Şekil 6.6. 0,5 Hz frekans ve 4,90 kN ön yükleme için histerezis eğrisi



Şekil 6.7. 1,0 Hz frekans ve 4,90 kN ön yükleme için histerezis eğrisi

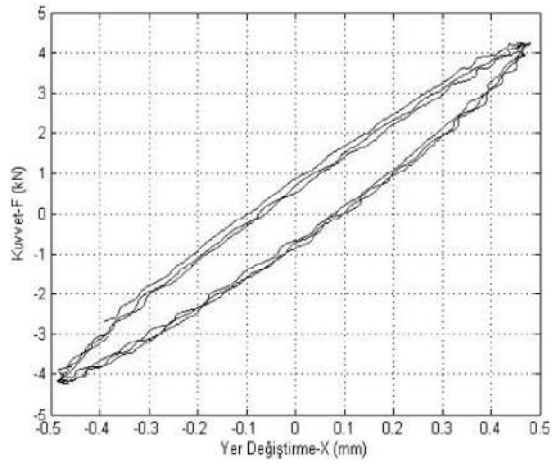


Şekil 6.8. 1,5 Hz frekans ve 4,90 kN ön yükleme için histerezis eğrisi

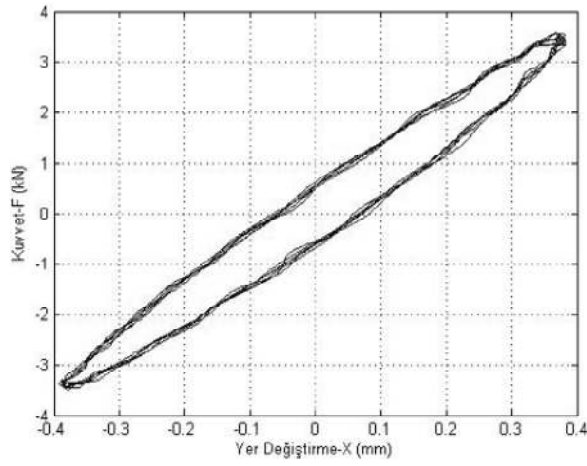


Şekil 6.9. 2 Hz frekans ve 4,90 kN ön yükleme için histerezis eğrisi

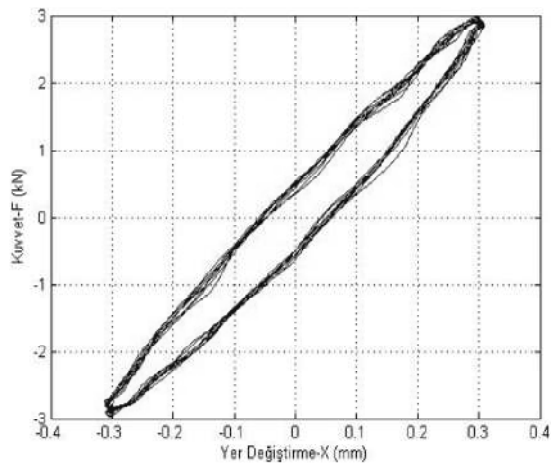
Elastomer numune, 10 kN ön yükleme koşulu için 0,5 Hz, 1,0 Hz, 1,5 Hz ve 2,0 Hz frekans değerlerinde test edilmiştir. Bu testlere ait histerezis eğrileri, sırasıyla, Şekil 6.10, Şekil 6.11, Şekil 6.12 ve Şekil 6.13'te gösterilmiştir.



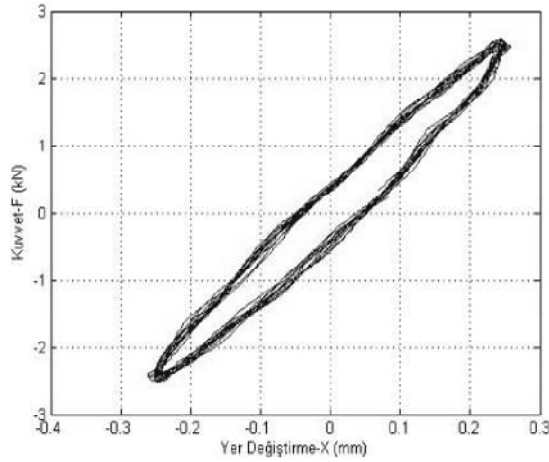
Şekil 6.10. 0,5 Hz frekans ve 10 kN ön yükleme için histerezis eğrisi



Şekil 6.11. 1,0 Hz frekans ve 10 kN ön yükleme için histerezis eğrisi



Şekil 6.12. 1,5 Hz frekans ve 10 kN ön yükleme için histerezis eğrisi



Şekil 6.13. 2,0 Hz frekans ve 10 kN ön yükleme için histerezis eğrisi

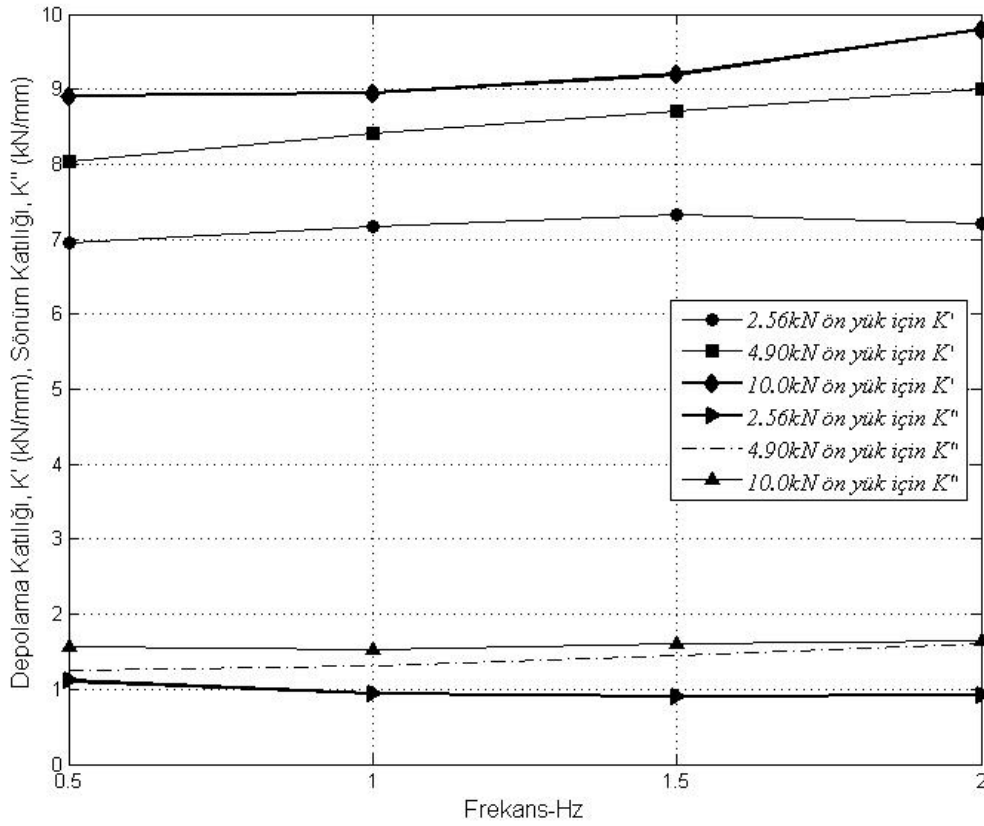
Histerezis döngülerinin eğimi ve genişliği, numunenin katılık ve sönüm özelliklerine bağlıdır. Viskoelastik davranış için, yer değiştirmenin sıfır olduğu noktada sinüzoidal eğrinin eğimi maksimum değerindedir. Bu noktada numune üzerinde oluşan kuvvet (elde edilen histerezis eğrilerinde de görüldüğü gibi) sıfırdan farklıdır ve bu kuvvet sadece hıza verilen cevaptır. Kompleks katılığın imajiner kısmı viskoelastik malzemenin sönüm özelliğini verir ve aşağıdaki eşitlik ile histerezis eğrisi üzerinden hesaplanabilir:

$$K'' = \frac{\text{Sıfır yer değiştirmede ölçülen kuvvet değeri}}{\text{Ölçülen maksimum yer değiştirme değeri}} \quad (6.1)$$

Bununla birlikte kompleks katılığın reel kısmı viskoelastik malzemenin elastik özelliği ile ilgilidir ve aşağıdaki eşitlik ile histerezis eğrisi üzerinden hesaplanabilir:

$$K' = \frac{\text{Maksimum yer değiştirmede ölçülen kuvvet değeri}}{\text{Ölçülen maksimum yer değiştirme değeri}} \quad (6.2)$$

Eş. 6.1 ve Eş. 6.2'ye göre elde edilen katsayıların frekansa ve ön yükleme koşuluna göre grafiği Şekil 6.14'te verilmiştir.



Şekil 6.14. Birinci konfigürasyon için katılık ve sönüm özelliklerinin frekans ve ön yükleme göre değişimi

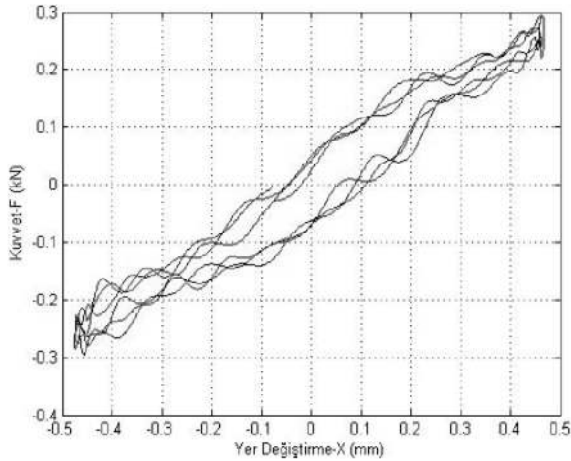
Şekil 6.14'te de görüldüğü gibi ön yükleme arttıkça, numuneye ait katılık ve sönüm değerleri artmıştır. Depolama katılığının ön yükleme ile artışı beklentileri karşılamıştır ancak sönüm katılığının artışı beklentilerin aksinedir (Bkz. Şekil 3.8). Test verilerindeki gürültü ve numunenin nonlineer davranışı sebebiyle ortaya çıkabilecek okuma hatalarının bu duruma sebep olduğu söylenebilir. Elastomer numunenin katılık özelliği, tüm ön yükleme koşulları için, frekansın artmasıyla bir artış gösterdiği ancak bu artışın yüksek olmadığı görülmüştür. Bununla birlikte, sönüm özelliğinde frekansa bağlı belirgin bir artış gözlenememiştir. Bu durum elastomerlerin kauçuksu bölgedeki davranışına benzemektedir ve numunenin düşük frekanslarda zorlanması sebebiyle bu sonuç beklentiler dahilindedir (Bkz. Şekil 3.7). Elde edilen grafiklerde, test cihazının istenilen genlikleri sağlayamadığı ve frekans arttıkça istenilen değerden sapmanın arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, elastomer numuneye uygulanan ön yükleme arttıkça elde edilen histerezis eğrilerinin lineer

davranışa yaklaştığı görülmüştür. Buna göre lineer davranıştan sapmanın, numunenin rijitliği ile ilişkili olduğu söylenebilir.

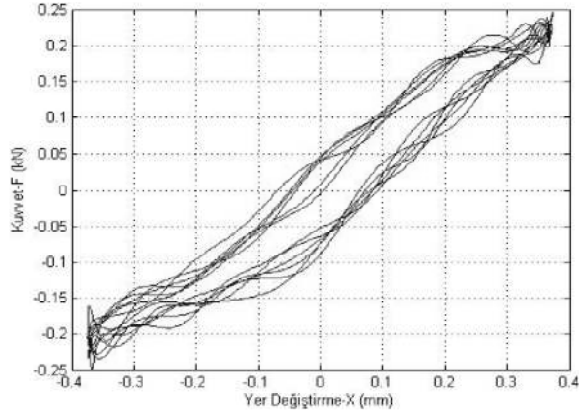
6.1.2. İkinci konfigürasyona ait test sonuçları

İkinci konfigürasyon için, elastomer numune, farklı ön yükleme koşulları ile farklı frekanslarda test edilmiştir. İkinci konfigürasyona ait tüm veriler için, yüksek gürültü sebebiyle, 15 Hz üzerindeki sinyaller filtrelenmiştir.

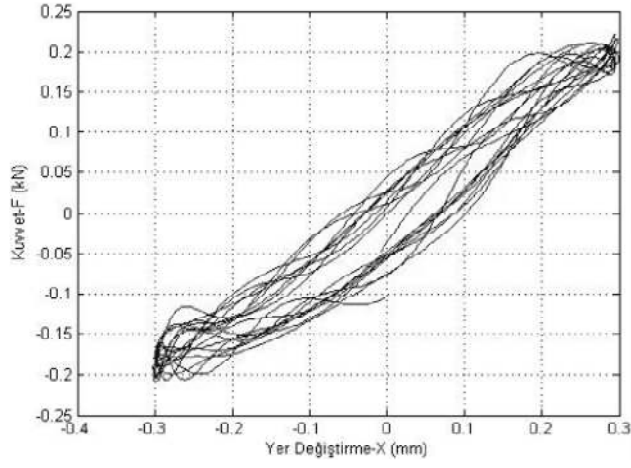
İlk olarak 0,5 kN ön yükleme değeri ile 0,5 Hz, 1,0 Hz, 1,5 Hz ve 2,0 Hz’de testler gerçekleştirilmiştir. Ayarlanan piston stroğu, ön yüklemeli durum sıfır kabul edilerek, 0 ile -1 mm değerleri arasındadır. Bu testler sonucunda elde edilen histerezis eğrileri Şekil 6.15, Şekil 6.16, Şekil 6.17 ve Şekil 6.18’de gösterilmiştir. Bu testler sonucunda numunenin nonlineer davranış gösterdiği görülmüştür.



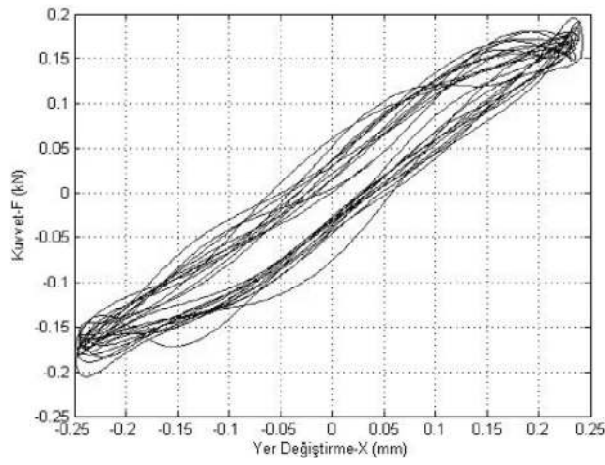
Şekil 6.15. 0,5 Hz frekans ve 0,5 kN ön yükleme için histerezis eğrisi



Şekil 6.16. 1,0 Hz frekans ve 0,5 kN ön yükleme için histerezis eğrisi

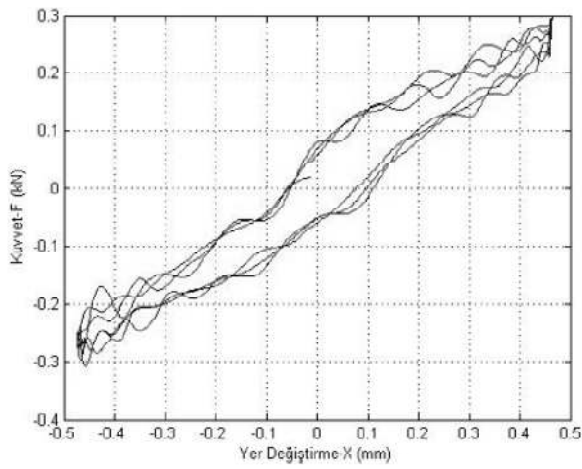


Şekil 6.17. 1,5 Hz frekans ve 0,5 kN ön yükleme için histerezis eğrisi

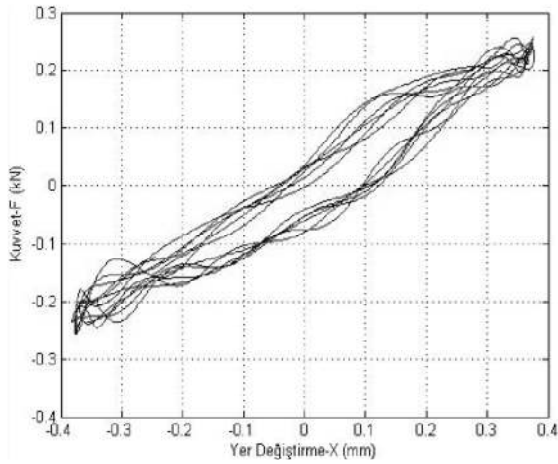


Şekil 6.18. 2 Hz frekans ve 0,5 kN ön yükleme için histerezis eğrisi

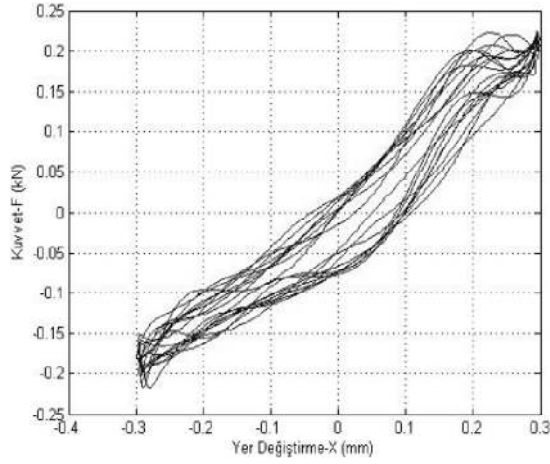
Elastomer numuneye etkiyen statik ön yükleme 1,01 kN'a çıkartılmış ve numune, 0,5 Hz, 1,0 Hz, 1,5 Hz ve 2,0 Hz frekans değerlerinde test edilmiştir. Ayarlanan piston stroğu, ön yüklemeli durum sıfır kabul edilerek, 0 ile -1 mm değerleri arasındadır. Bu testlere ait histerezis eğrileri, sırasıyla, Şekil 6.19, Şekil 6.20, Şekil 6.21 ve Şekil 6.22'de gösterilmiştir. 1,01 kN ön yükleme şartı için numunenin nonlineer davranış gösterdiği ve elde edilen kuvvet cevabında yüksek frekanslı titreşim bileşenlerinin oluştuğu görülmüştür.



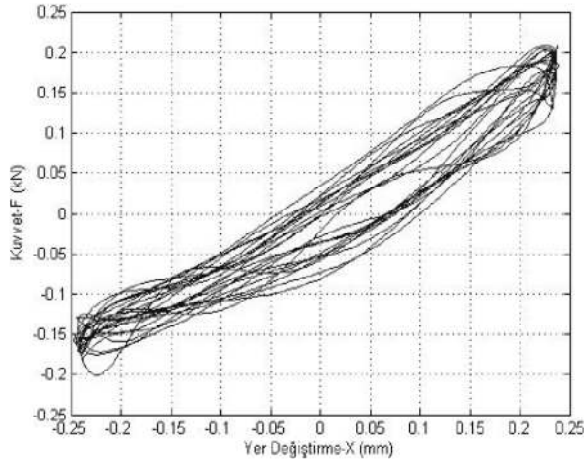
Şekil 6.19. 0,5 Hz frekans ve 1,01 kN ön yükleme için histerezis eğrisi



Şekil 6.20. 1 Hz frekans ve 1,01 kN ön yükleme için histerezis eğrisi

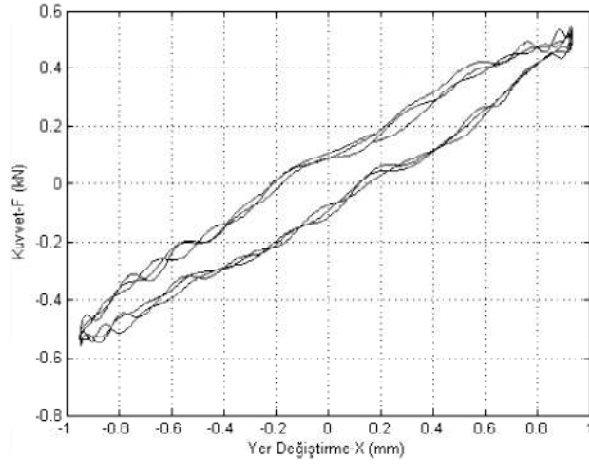


Şekil 6.21. 1,5 Hz frekans ve 1,01 kN ön yükleme için histerezis eğrisi

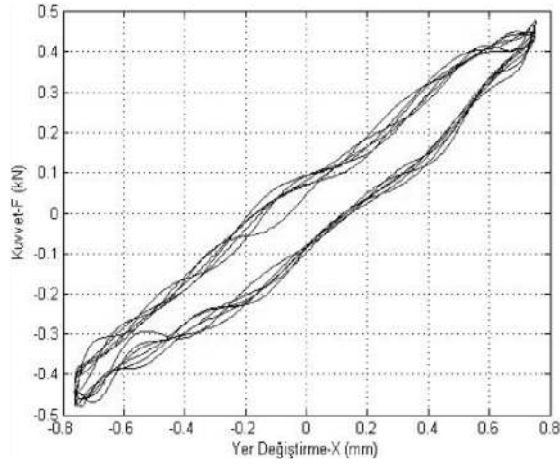


Şekil 6.22. 2 Hz frekans ve 1,01 kN ön yükleme için histerezis eğrisi

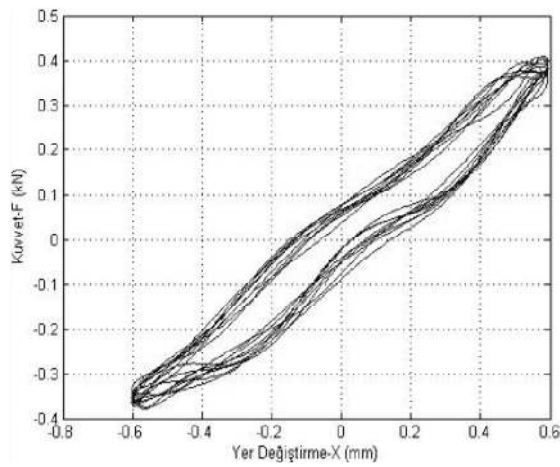
Statik ön yükleme 1,01 kN'da tutularak, piston stroğu ön yüklemeli durum sıfır kabul edilerek, 0 ile -2 mm değerleri arasında olacak şekilde kontrol birimi üzerinden ayarlanmıştır. Bu ayar için elastomer numune, 0,5 Hz, 1,0 Hz, 1,5 Hz ve 2,0 Hz frekans değerlerinde test edilmiştir. Bu testlere ait histerezis eğrileri, sırasıyla, Şekil 6.23, Şekil 6.24, Şekil 6.25 ve Şekil 6.26'da gösterilmiştir. Elde edilen genlik değerleri cihazın istenilen stroğu sağlayamadığını göstermiştir. Bununla birlikte genlik artışının, numunenin davranışındaki nonlineerliği ve yüksek frekanslı titreşim bileşenlerini azalttığı ve bu azalmanın frekans yükseldikçe daha etkili olduğu görülmüştür.



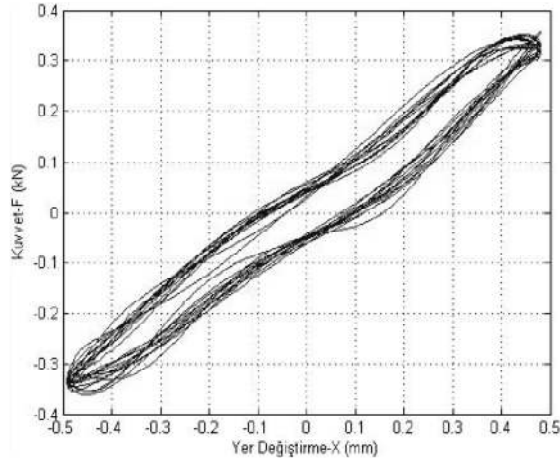
Şekil 6.23. 2 mm strok, 0,5 Hz frekans ve 1,01 kN ön yükleme için histerezis eğrisi



Şekil 6.24. 2 mm strok, 1 Hz frekans ve 1,01 kN ön yükleme için histerezis eğrisi

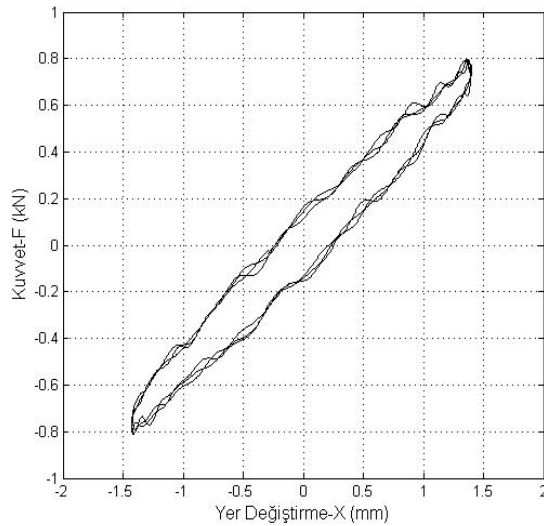


Şekil 6.25. 2 mm strok, 1,5 Hz frekans ve 1,01 kN ön yükleme için histerezis eğrisi

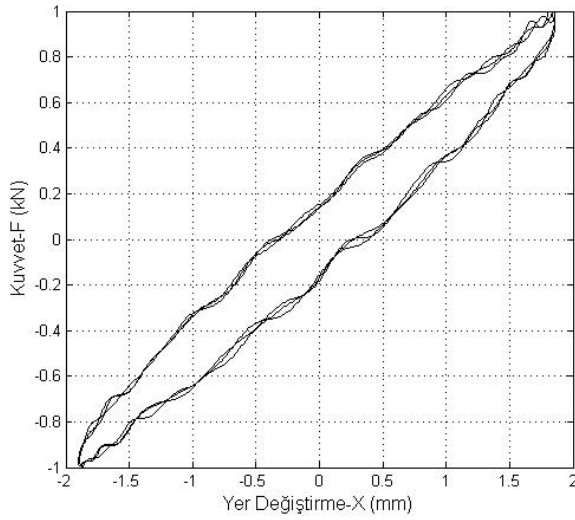


Şekil 6.26. 2 mm strok, 2 Hz frekans ve 1,01 kN ön yükleme için histerezis eğrisi

Ön yükleme 1,01 kN'da, frekans ise 0,5 Hz'de sabit tutularak testler, ön yüklemeli durum sıfır kabul edilerek, 0 ile -3 mm ve 0 ile -4 mm piston stroğu için tekrar edilmiştir. Elde edilen histerezis eğrileri, sırasıyla, Şekil 6.26 ve Şekil 6.27'de gösterilmiştir. Eğrilerde görülen genlik değerlerinden anlaşıldığı üzere cihaz, 0,5 Hz için kontrol birimi aracılığı ile ayarlanan strok değerine yakın değerlere ulaşabilmiştir. Genlik artışının yüksek frekanslı titreşim bileşenlerini ve nonlineer etkileri azalttığı görülmüştür.

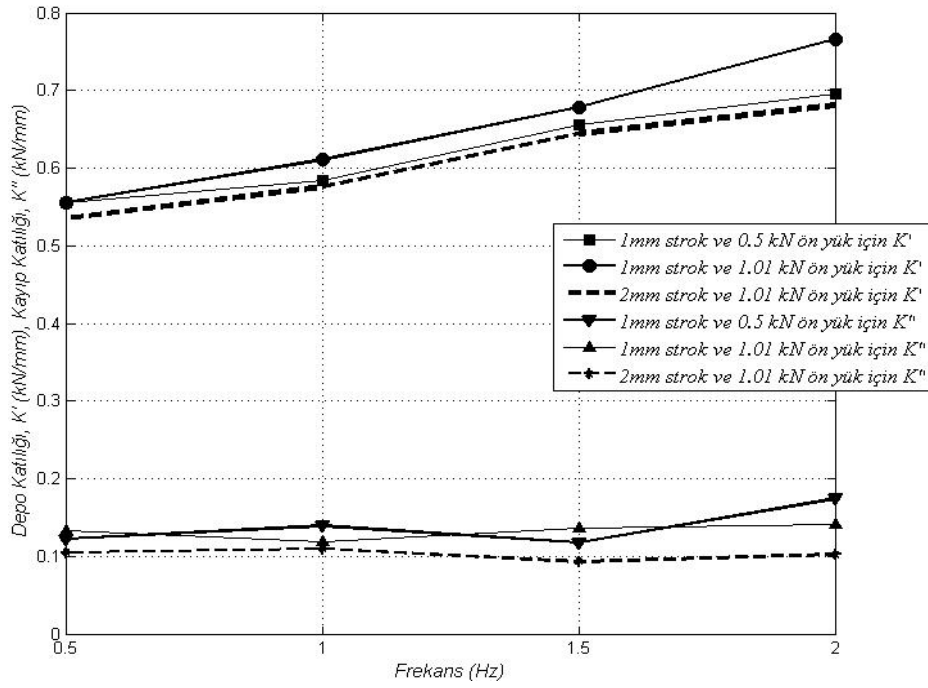


Şekil 6.27. 3 mm strok, 0,5 Hz frekans ve 1,01 kN ön yükleme için histerezis eğrisi

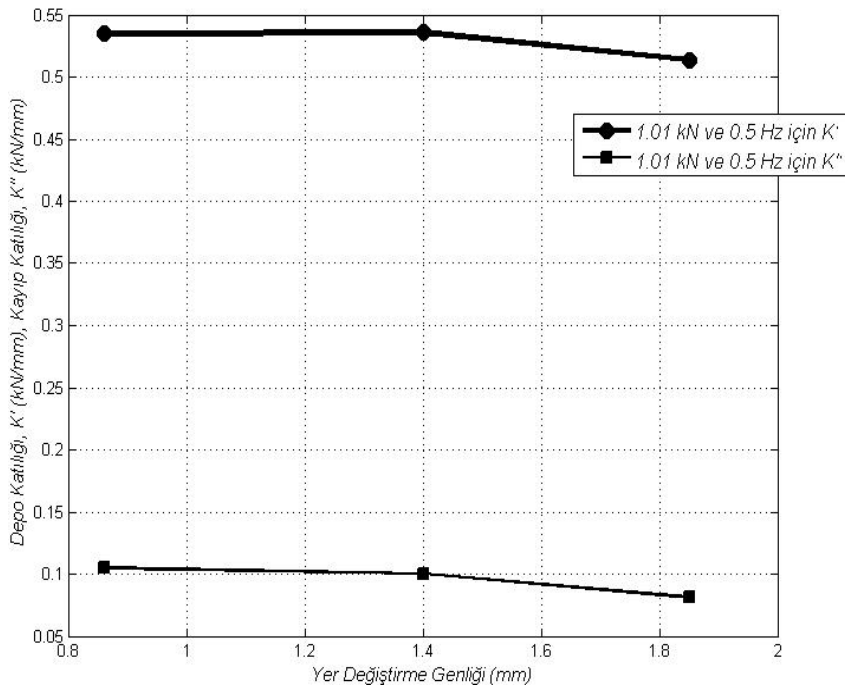


Şekil 6.28. 4 mm strok, 0,5 Hz frekans ve 1,01 kN ön yükleme için histerezis eğrisi

İkinci konfigürasyon için, Eş. 6.1 ve Eş. 6.2'ye göre her bir ön yükleme, frekans ve strok ayarı için depolama katılığı (K') ve sönüm katılığı (K'') değerleri elde edilmiştir. Şekil 6.29'da elde edilen katsayıların frekansa ve ön yükleme göre değişimi verilmiştir. Şekil 6.30'da ise bu katsayıların, 1,01 kN ön yük ve 0,5 Hz frekans için, yer değiştirme genliğine göre değişimi verilmiştir. K' beklediği gibi hem frekansla hem de ön yükleme ile artış göstermiştir. K'' değeri ise frekans ve ön yüklemeye bağlı olarak tutarlı sonuçlar vermemiştir. Bu durumun, yüksek frekanslı sinyal bileşenleri ve numunenin nonlinear davranışının sebep olduğu ölçüm ve okuma hatalarından kaynaklandığı söylenebilir. 1,01 kN ön yükleme koşulu için piston stroğunun, ön yüklemeli durum sıfır kabul edilerek, 0 ile -2 mm arasında olacak şekilde arttırılması sonucu K' ve K'' değerlerinin beklenenin aksine azaldığı ancak beklentilere uygun olarak değişimin küçük olduğu görülmüştür (Şekil 6.29). Benzer şekilde, 1,01 kN ön yükleme ve 0,5 Hz frekans için piston stroğu 2, 3 ve 4 mm olacak şekilde gerçekleştirilen testler sonucunda, katılık ve sönüm özelliklerinin, yer değiştirme genliği arttıkça azaldığı ancak değişimin düşük olduğu görülmüştür (Şekil 6.30).



Şekil 6.29. İkinci konfigürasyon için katılık ve sönüm özelliklerinin frekans ve ön yüklemeye göre değişimi



Şekil 6.30. İkinci konfigürasyon için katılık ve sönüm özelliklerinin yer değiştirme genliğine göre değişimi

6.2. Analitik Çalışma

Birinci ve ikinci konfigürasyonlara ait deneysel sonuçlardan elde edilen depolama ve sönüm katılıkları, her bir viskoelastik model için çıkarılan kompleks katılık ifadelerinde yerlerine konularak tüm ön yükleme koşullarına ait viskoelastik model parametreleri belirlenmiştir. Model parametreleri “MATLAB” yazılımına ait “fsolve” komutu kullanılarak nümerik olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan parametreler Eş. (4.41a), (4.45a), (4.53a), (4.63a) ve (4.74a)’da verilen kompleks katılık ifadelerinde yerlerine konulmuş ve her bir kompleks katılık ifadesi için depolama ve sönüm katılıkları hesaplanmıştır. Hesaplanan depolama ve sönüm katılıkları doğrudan deney sonuçlarından elde edilen depolama ve sönüm katılıkları ile grafiksel olarak karşılaştırılmıştır.

Her bir viskoelastik model için elastomer numunenin sinüzoidal girişe verdiği cevap analitik çalışma sonucunda elde edilmiş ve histerezis eğrisi olarak gösterilmiştir. Elde edilen histerezis eğrileri deneysel sonuçlarla grafiksel olarak karşılaştırılmıştır. Histerezis eğrilerinin elde edilişi aşağıda açıklanmıştır.

Yer değiştirme ile kuvvet arasındaki ilişkiyi veren katılık ifadesi Eş (4.28)’de verilmiştir. Buna göre Eş. (4.31)’de verilen Young modülü Eş. (4.28)’de yerine konulursa aşağıdaki ifade elde edilir;

$$K = \frac{ab}{6h} E \left[\frac{2}{\left(1 + \frac{\delta h}{h}\right)} + 1 \right]. \quad (6.3)$$

Kuvvet ile yer değiştirme arasındaki ilişki şu şekilde tanımlanır;

$$f = Kx \quad (6.4)$$

Eş. (6.3)’te verilen katılık ifadesi Eş. (6.4)’te yerine konulursa;

$$f = \frac{ab}{6h} \left[\frac{2}{\left(1 + \frac{\delta h}{h}\right)} + 1 \right] \cdot E \cdot x \quad (6.5)$$

ifadesi elde edilir. Yapılan testlerde elastomer numuneye sinüzoidal giriş uygulanmıştır. Buna göre;

$$x = X \sin(\omega t) \quad (6.6)$$

şeklinde dir. Burada Eş. (6.5) şu şekilde elde edilir,

$$f = E \cdot \frac{ab}{6h} \left[\frac{2}{\left(1 + \frac{\delta h}{h}\right)} + 1 \right] \cdot X \sin(\omega t). \quad (6.7)$$

Burada,

$$y = \frac{ab}{6h} \left[\frac{2}{\left(1 + \frac{\delta h}{h}\right)} + 1 \right] \cdot x \quad (6.8a)$$

$$y = \frac{ab}{6h} \left[\frac{2}{\left(1 + \frac{\delta h}{h}\right)} + 1 \right] \cdot X \sin(\omega t), \quad (6.8b)$$

şeklinde tanımlanırsa Eş. (6.7) şu şekilde olacaktır,

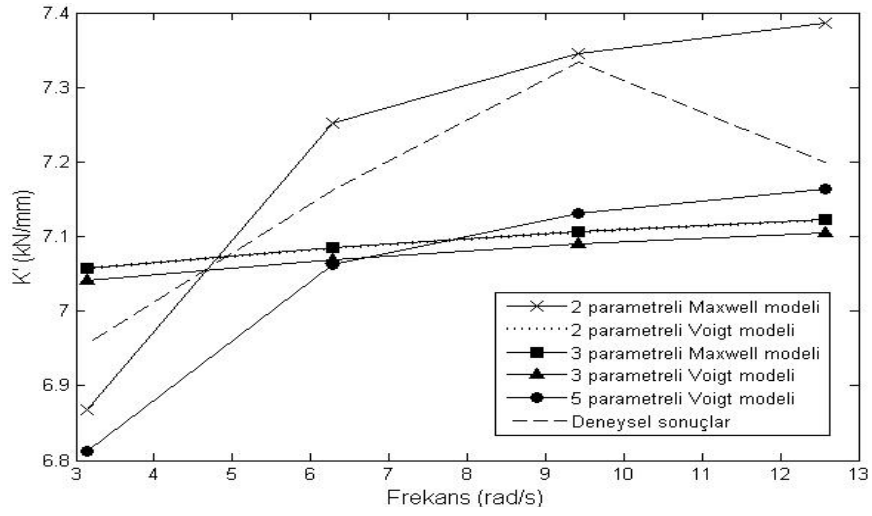
$$f = E \cdot y. \quad (6.9)$$

Burada E , elastomer numuneye ait frekansa bağı Young modülü, x , elastomer numuneye uygulanan yer değiştirme girişi, f ise elastomer numunenin kuvvet cevabıdır. Analitik çalışma sonucunda numunenin sinüzoidal yer değiştirme girişine verdiği kuvvet cevabını elde etmek için viskoelastik modellere ait hareket denklemleri “MATLAB-Simulink” yazılımı ile modellenip, “Runge-Kutta” teoremi ile nümerik olarak çözdürülmüştür. Burada dikkat edilmesi gereken nokta, Eş. (6.9)’dan da anlaşılacağı gibi, nümerik çözüm işleminin sonucunda gerilme cevabı yerine kuvvet cevabının elde edilebilmesi için giriş fonksiyonu olarak elastomer numuneye uygulanan x yer değiştirme girişi yerine Eş. (6.8)’de tanımlanan y ifadesinin girilmesi gerektiğidir. Bu prosedür tüm modellere ait hareket denklemleri ve viskoelastik modellere ait elemanların tüm ön yükleme koşullarındaki parametre değerleri için tekrarlanmıştır. Analitik çalışmaya ait histerezis eğrileri, bu prosedürle hesaplanan f kuvvet değerlerinin x yer değiştirme girişlerine göre grafiklerinin çizdirilmesiyle (tüm şartlar için) elde edilmiş ve deneysel sonuçlarla grafiksel olarak karşılaştırılmıştır.

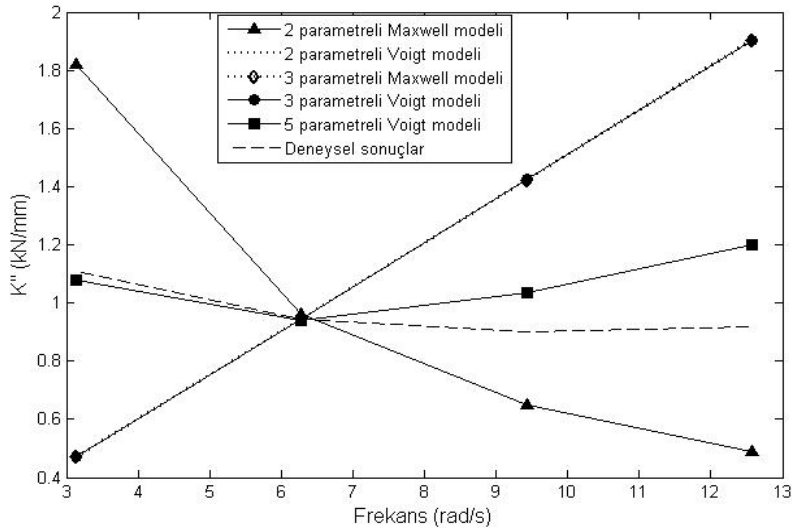
6.2.1. Birinci konfigürasyon

2,56 kN ön yükleme koşulu

Şekil 6.31 ve 6.32’de verilen grafiklerde, 2,56 kN önyükleme için, sırasıyla, katılık ve sönüm özelliklerinin karşılaştırılması gösterilmiştir.

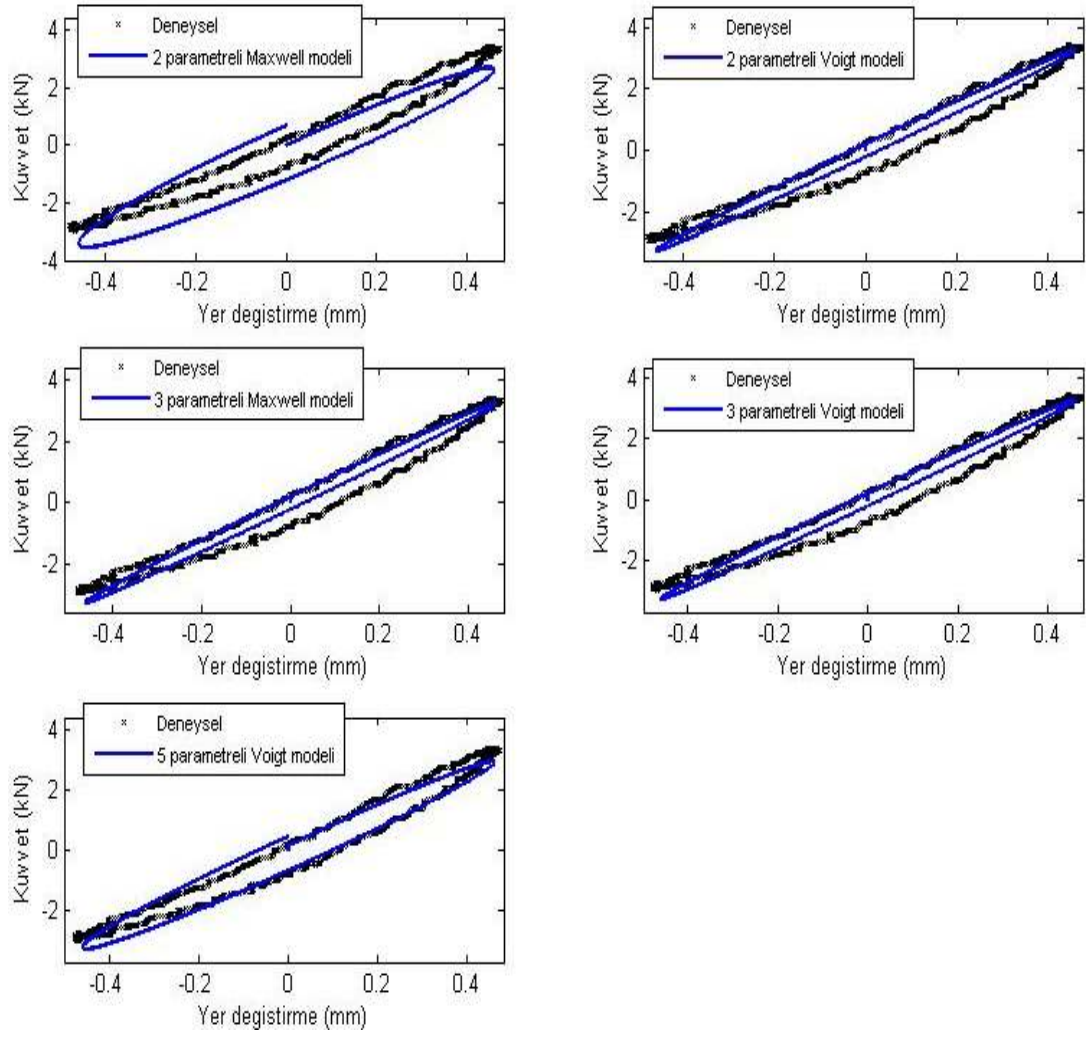


Şekil 6.31. 2,56 kN ön yük için, viskoelastik modeller ile elde edilen K' değerlerinin karşılaştırılması

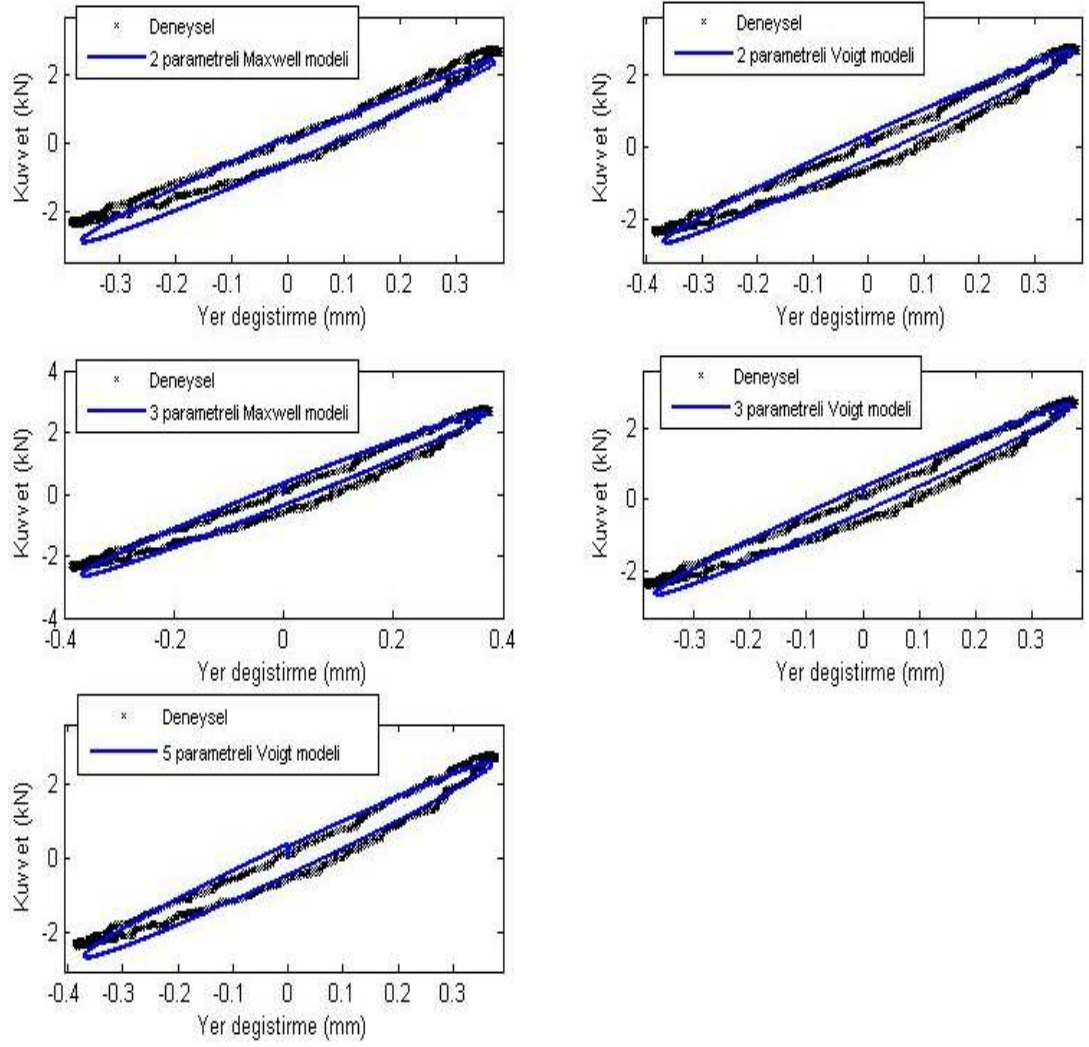


Şekil 6.32. 2,56 kN ön yük için, viskoelastik modeller ile elde edilen K'' değerlerinin karşılaştırılması

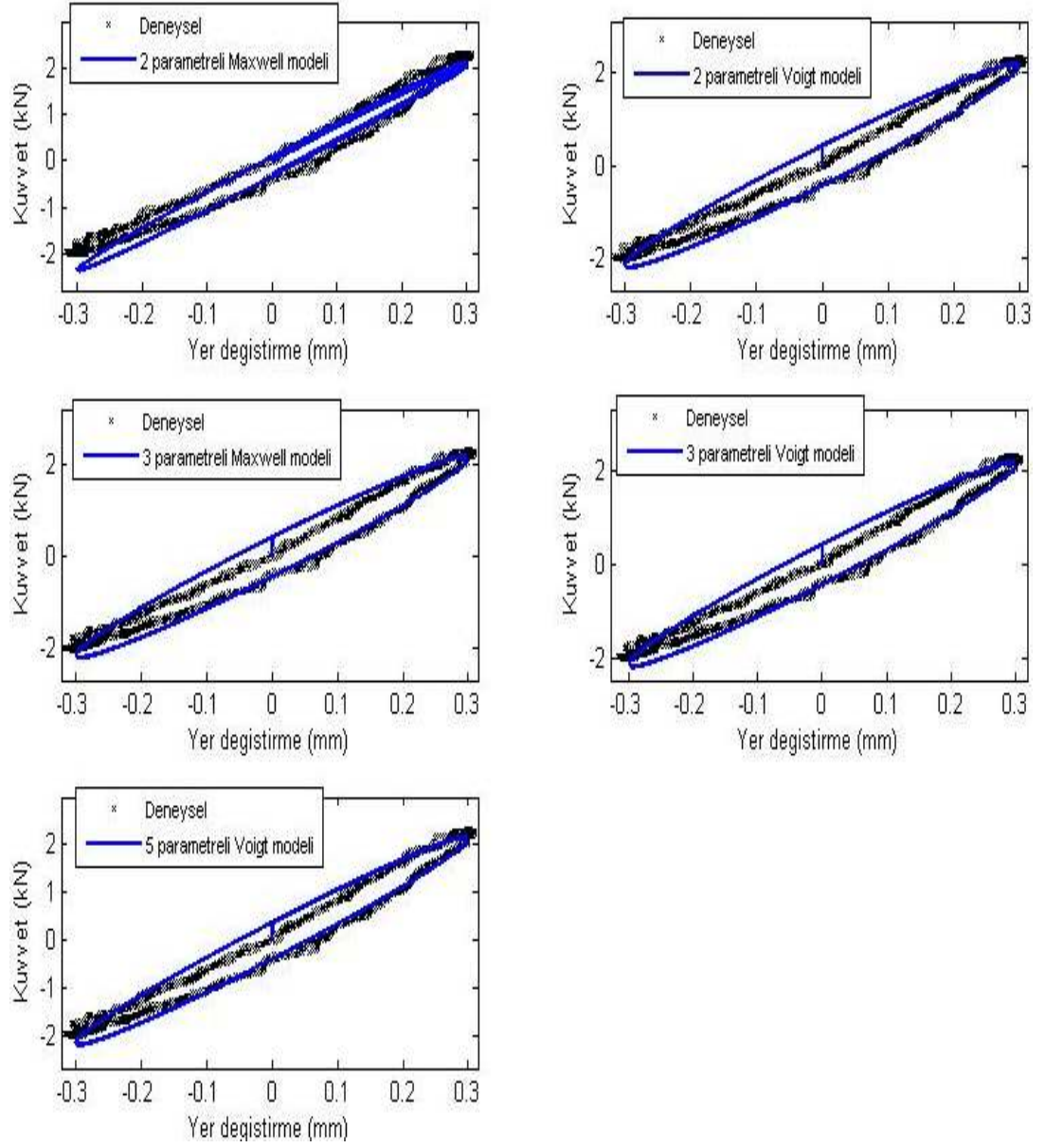
Deneyel yolla elde edilen histerezis eğrileri ile analitik yolla elde edilen histerezis eğrilerinin, 2,56 kN ön yükleme koşulu ve 0,5 Hz, 1,0 Hz, 1,5 Hz ve 2,0 Hz frekans değerlerindeki karşılaştırmaları Şekil 6.33, Şekil 6.34, Şekil 6.35 ve Şekil 6.36'da verilmiştir.



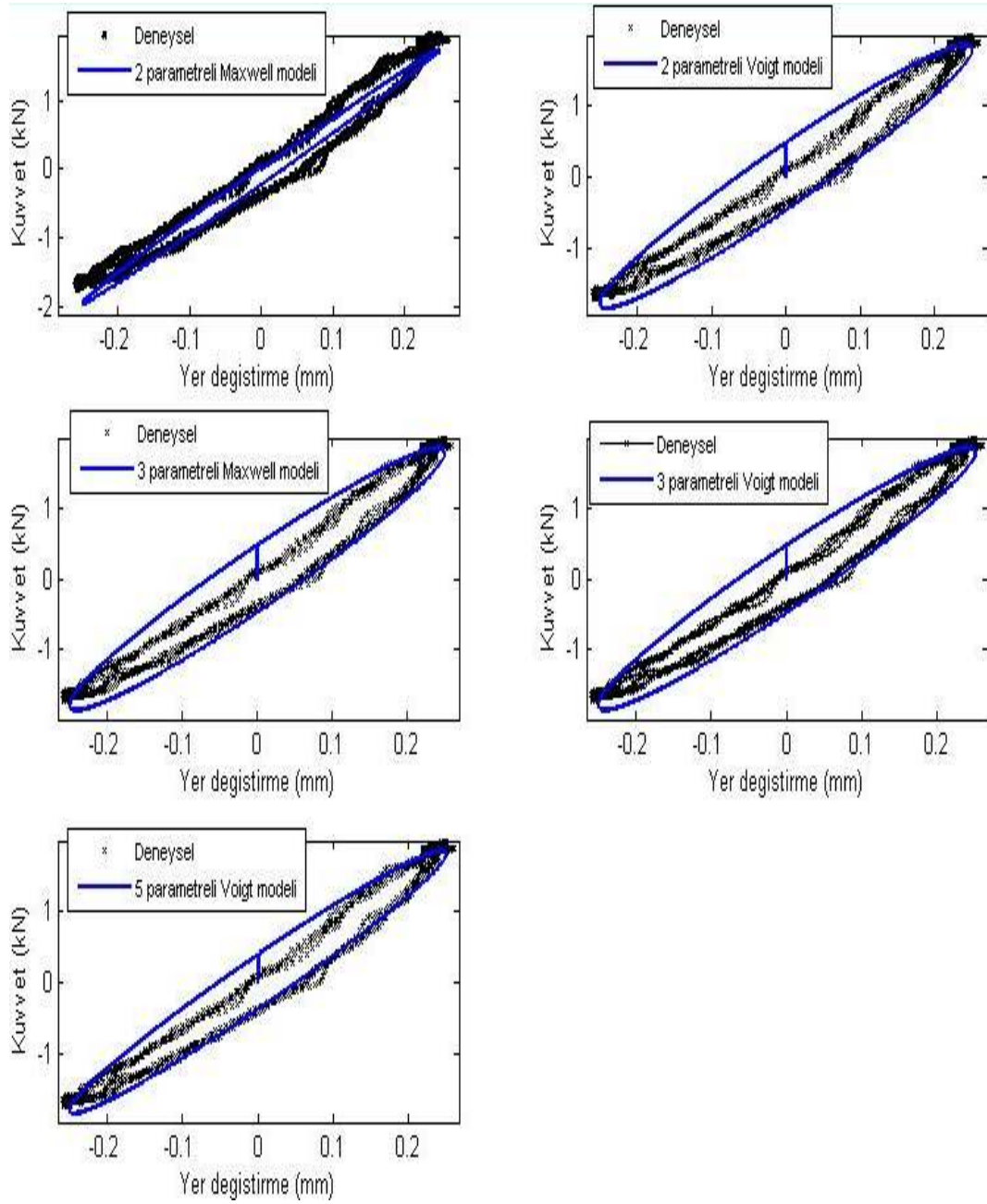
Şekil 6.33. 2,56 kN ön yükleme ve 0,5 Hz frekans değeri için elde edilen histerezis eğrilerinin karşılaştırılması



Şekil 6.34. 2,56 kN ön yükleme ve 1,0 Hz frekans değeri için elde edilen histerezis eğrilerinin karşılaştırılması



Şekil 6.35. 2,56 kN ön yükleme ve 1,5 Hz frekans değeri için elde edilen histerezis eğrilerinin karşılaştırılması



Şekil 6.36. 2,56 kN ön yükleme ve 2,0 Hz frekans değeri için elde edilen histerezis eğrilerinin karşılaştırılması

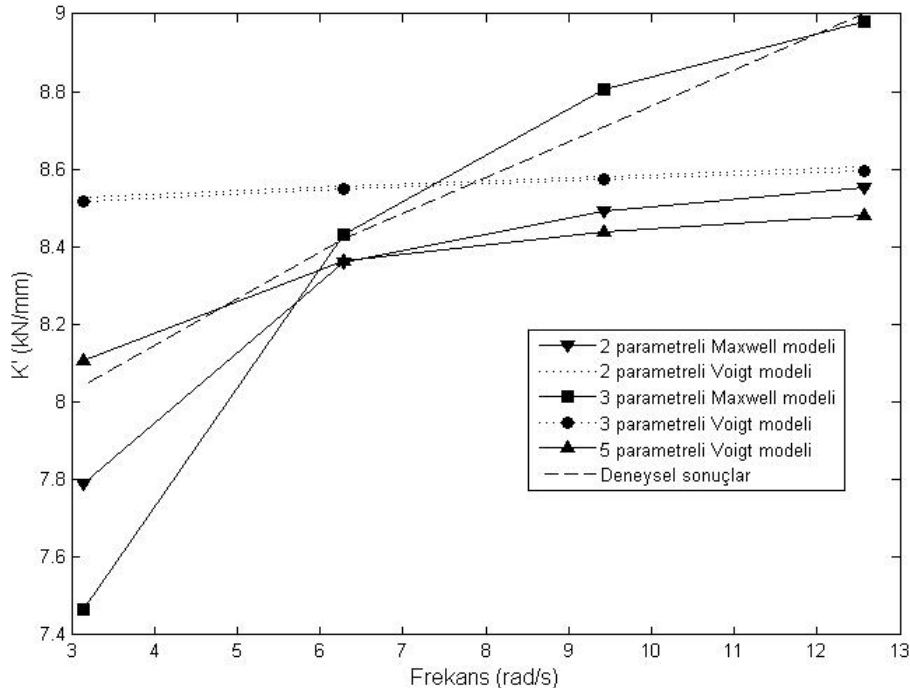
2,56 kN ön yükleme koşulu için analitik çalışma sonucunda hesaplanan depolama ve sönüm katılığı değerleri deneysel sonuçlarla tutarsızlık göstermiştir. En tutarlı değerleri iki parametrelili Maxwell modeli ile beş parametrelili genelleştirilmiş Voigt modeli vermiştir. Bununla birlikte iki parametrelili Voigt modeli ile üç parametrelili genelleştirilmiş Voigt modeli birbirlerine çok yakın sonuçlar vermiştir. Model

parametrelerinin nümerik olarak hesaplanmasında parametrelerin yakınsadığı değerlerin yüksek hata içermesi, test cihazının farklı frekans değerlerinde eşit yer değiştirme genliklerini sağlayamaması, numunenin nonlinear davranışının ve yüksek frekanslı sinyal bileşenlerinin neden olduğu okuma hataları sonuçlardaki tutarsızlıklara neden olmuştur.

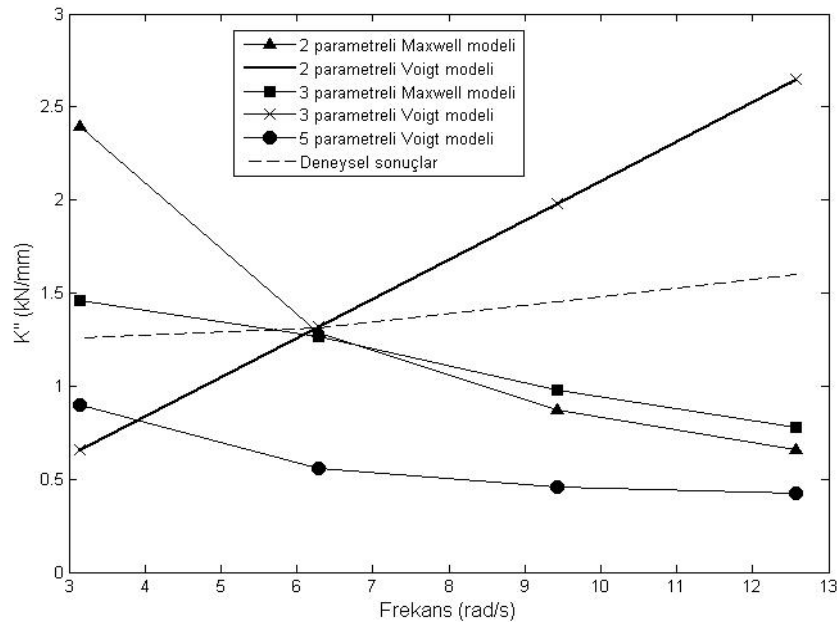
2,56 kN ön yükleme koşulu için deneysel ve analitik olarak elde edilen histerezis döngüleri karşılaştırılmıştır. Analitik yolla elde edilen histerezis döngülerinin, numunenin nonlinear davranışını simüle edemediği görülmüştür. Viskoelastik modellerin linear yay ve linear viskoz sönümleyici elemanların birleşiminden oluşturulması sebebiyle bu beklenen bir sonuçtur. Üç parametrelili Maxwell modelinin, beklendiği gibi, iki parametrelili Maxwell modeline göre daha hassas sonuçlar verdiği görülmüştür. İki ve üç parametrelili Voigt modelleri, deneysel sonuçlarla ve birbirleriyle tutarlı histerezis döngüleri oluşturabilmişlerdir. Ancak, beş parametrelili Voigt modeli beklenenin aksine iki ve üç parametrelili Voigt modellerine göre daha tutarsız sonuçlar verebilmiştir. Benzer şekilde, 0,5 ve 2,0 Hz frekans değerlerinde, üç parametrelili Maxwell modeli ile iki ve üç parametrelili Voigt modelleri deneysel sonuçlarla tutarsızlık göstermişlerdir. Tüm bu tutarsızlıkların sebebi olarak, oluşturulan modellere ait parametrelerin (E_1 , E_2 , E_3 , η_2 , η_3), “MATLAB” yazılımına ait “fsolve” komutu ile çözdürülmesi esnasında doğru köklere yakınsayamaması olduğu düşünülmektedir.

4,90 kN ön yükleme koşulu

4,90 kN ön yükleme koşulu için elde edilen K' ve K'' ifadeleri, sırasıyla, Şekil 6.37 ve 6.38’de grafiksel olarak karşılaştırılmıştır.



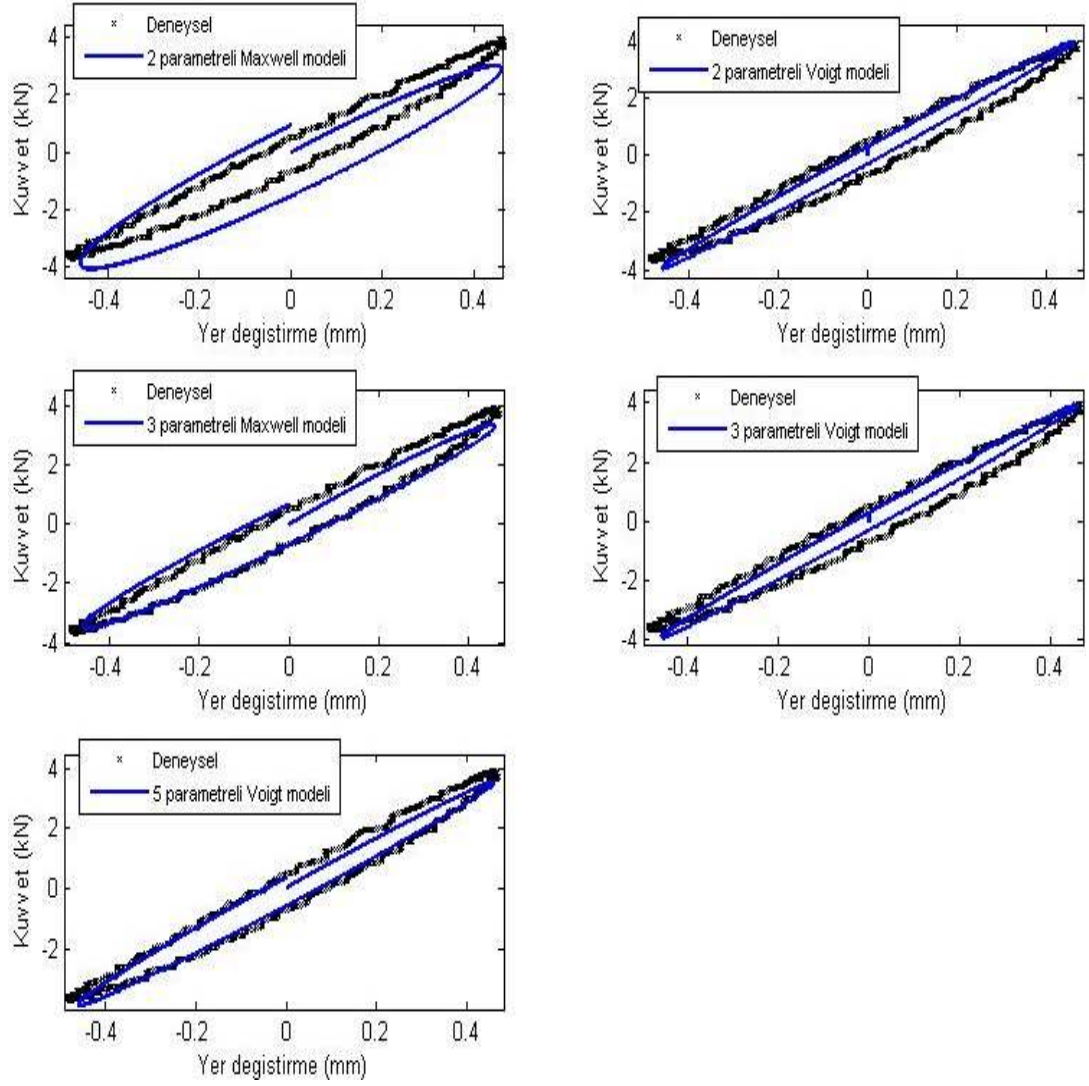
Şekil 6.37. 4,90 kN ön yük için, viskoelastik modeller ile elde edilen K' değerlerinin karşılaştırılması



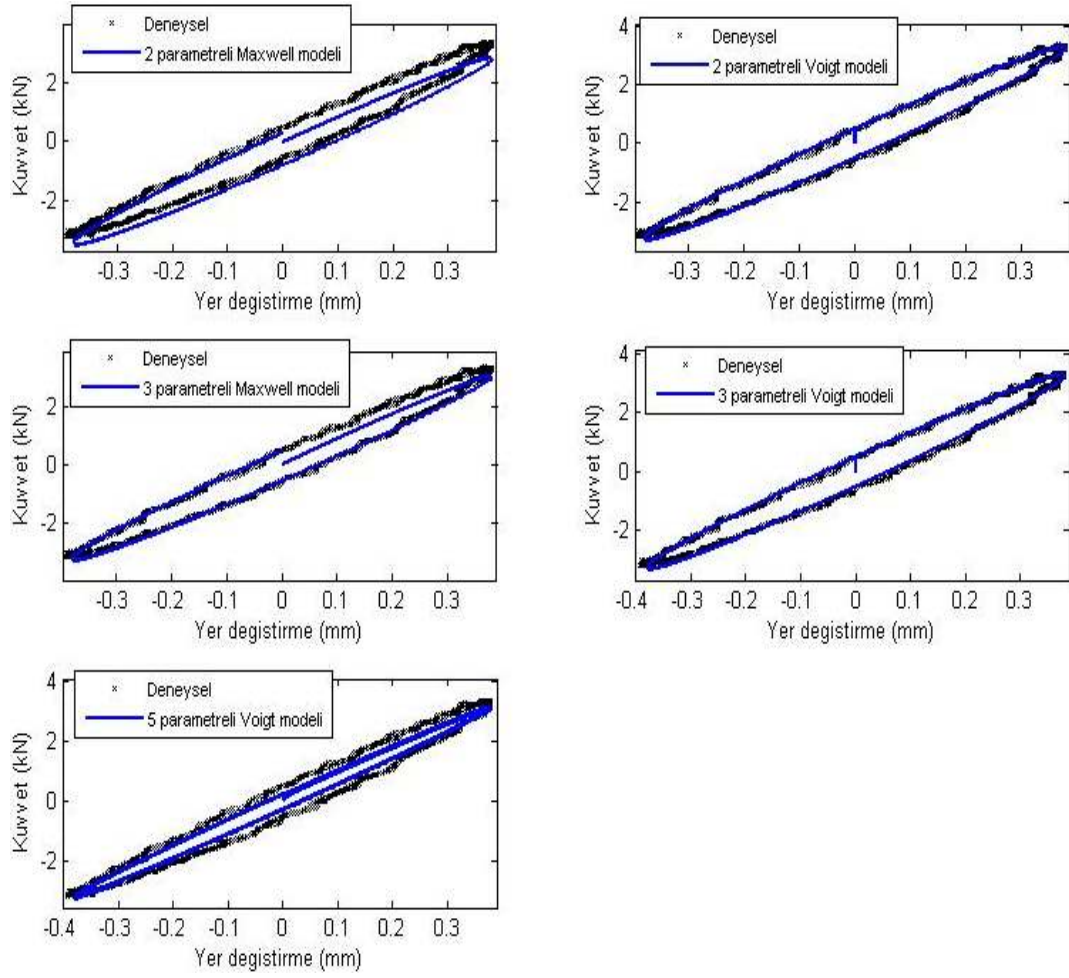
Şekil 6.38. 4,90 kN ön yük için, viskoelastik modeller ile elde edilen K'' değerlerinin karşılaştırılması

Deneyssel yolla elde edilen histerezis eğrileri ile analitik yolla elde edilen histerezis eğrilerinin, 4,90 kN ön yükleme koşulu ve 0,5 Hz, 1,0 Hz, 1,5 Hz ve 2,0 Hz frekans

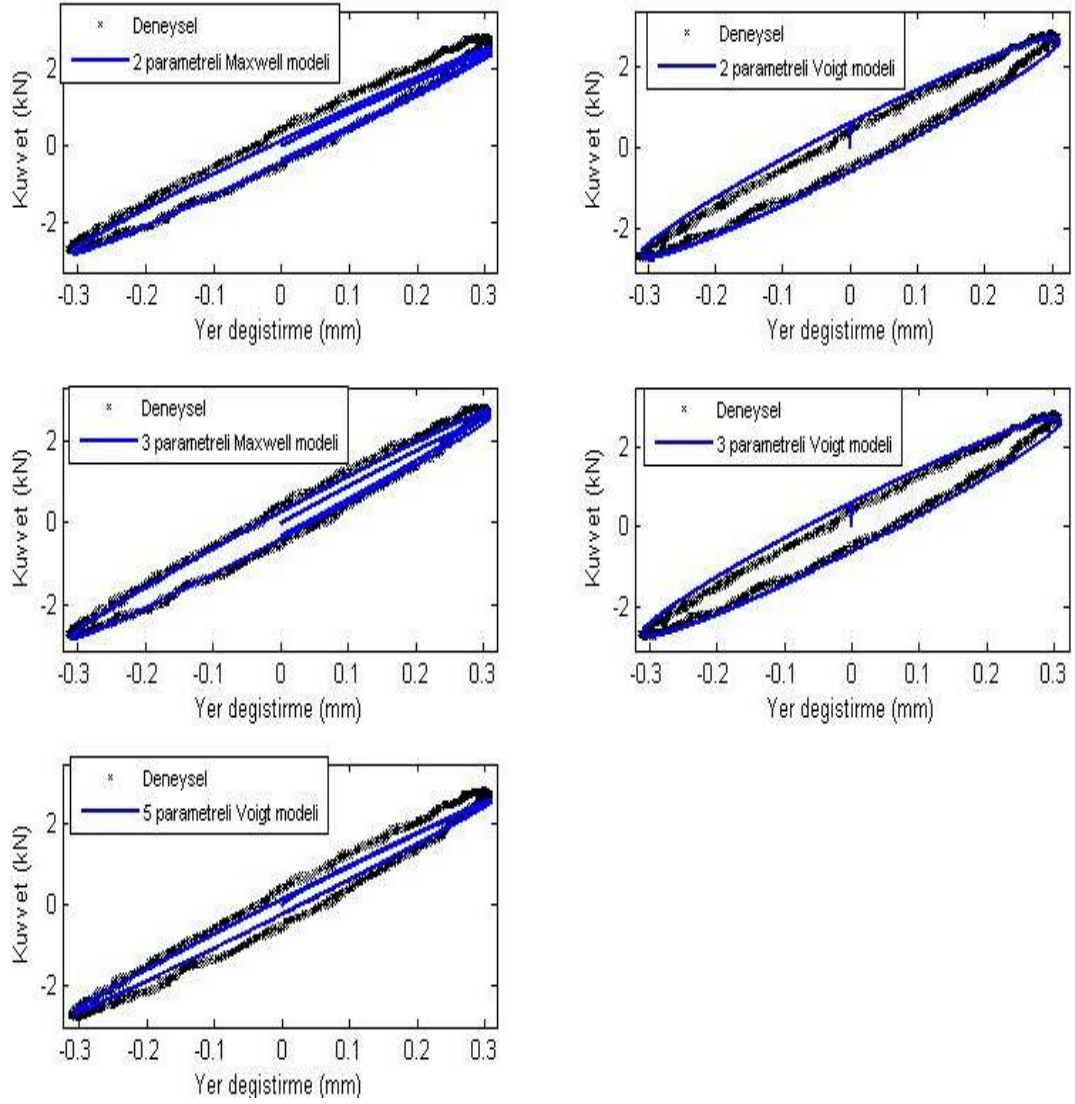
değerlerindeki karşılaştırmaları Şekil 6.39, Şekil 6.40, Şekil 6.41 ve Şekil 6.42’de verilmiştir.



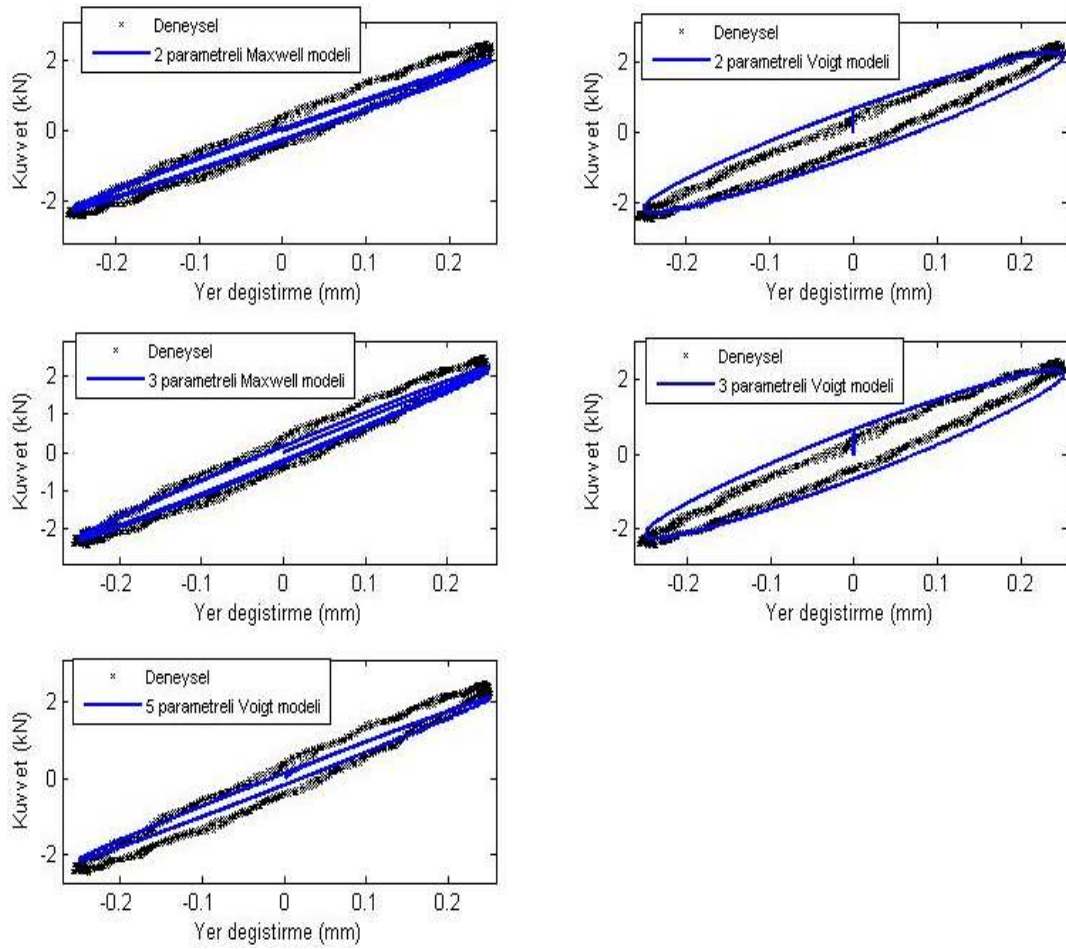
Şekil 6.39. 4,90 kN ön yükleme ve 0,5 Hz frekans değeri için elde edilen histerezis eğrilerinin karşılaştırılması



Şekil 6.40. 4,90 kN ön yükleme ve 1,0 Hz frekans değeri için elde edilen histerezis eğrilerinin karşılaştırılması



Şekil 6.41. 4,90 kN ön yükleme ve 1,5 Hz frekans değeri için elde edilen histerezis eğrilerinin karşılaştırılması



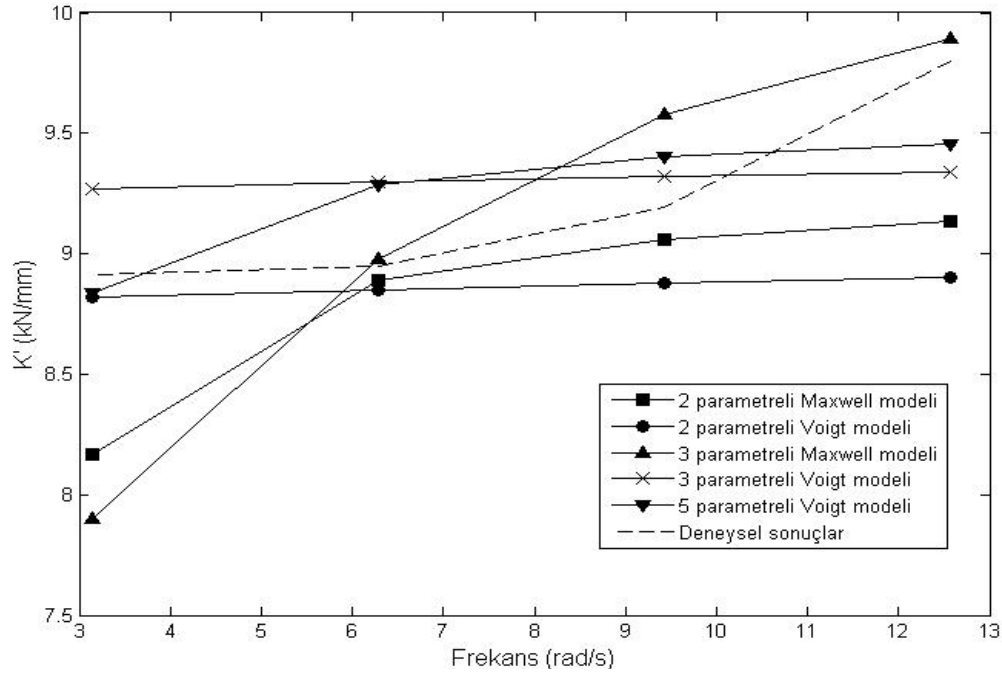
Şekil 6.42. 4,90 kN ön yükleme ve 2,0 Hz frekans değeri için elde edilen histerezis eğrilerinin karşılaştırılması

4,90 kN ön yükleme koşulu için analitik çalışma sonucunda depolama ve sönüm katılığı değerleri hesaplanmış ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlarda tutarsızlıklar görülmüştür. 4,90 kN ön yükleme koşulunda K' için en tutarlı sonuçları üç parametrelili genelleştirilmiş Maxwell modeli vermiştir. K'' için ise modellerin deneysel sonuçlarla tutarlı olmadığı görülmüştür. 2,56 kN ön yükleme koşuluna benzer şekilde, oluşan tutarsızlıkların sebepleri model parametrelerinin nümerik olarak hesaplanmasında parametrelerin yakınsadığı değerlerin yüksek hata içermesi, test cihazının farklı frekans değerlerinde eşit yer değiştirme genliklerini sağlayamaması, numunenin nonlineer davranışının ve yüksek frekanslı sinyal bileşenlerinin neden olduğu okuma hataları şeklinde sıralanabilir.

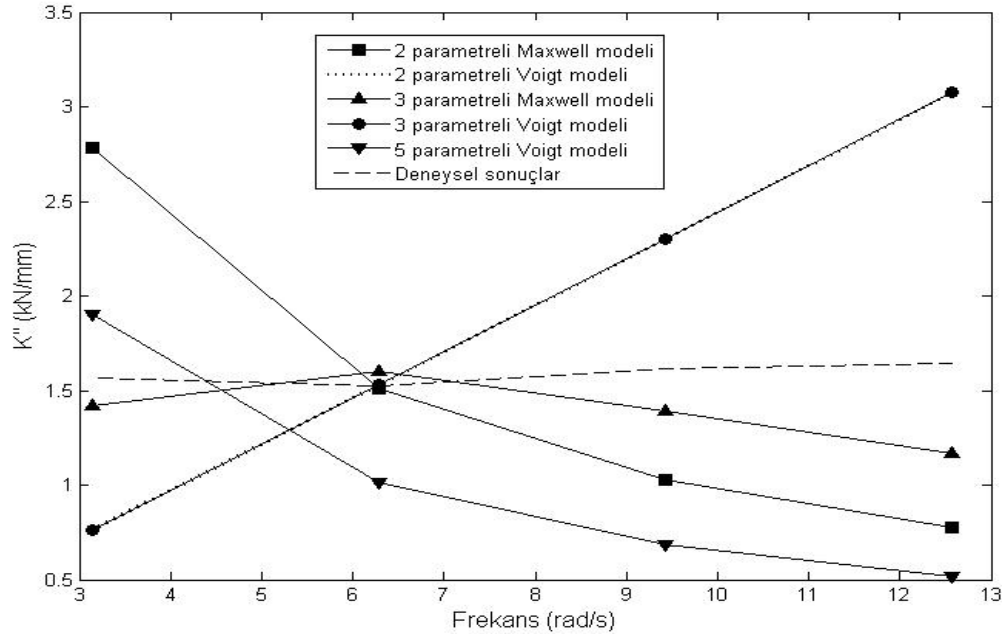
4,90 kN ön yükleme koşulu için deneysel ve analitik olarak elde edilen histerezis döngüleri karşılaştırılmıştır. 2,56 kN ön yükleme koşuluna kıyasla 4,90 kN ön yükleme koşulunda numune davranışının lineere daha yakın olmasından dolayı bu ön yükleme koşulunda daha tutarlı sonuçlar elde edilmiştir. 4,90 kN ön yükleme koşulu için elde edilen histerezis döngülerinin karşılaştırılması sonucunda, 2,56 kN ön yükleme koşuluna benzer sonuçlar elde edilmiştir. Buna göre, üç parametrelili Maxwell modelinin beklendiği gibi iki parametrelili Maxwell modeline göre daha hassas sonuçlar verdiği görülmüştür. İki ve üç parametrelili Voigt modelleri deneysel sonuçlarla ve birbirleriyle tutarlı histerezis döngüleri oluşturabilmişlerdir. Ancak, beş parametrelili Voigt modeli beklenenin aksine iki ve üç parametrelili Voigt modellerine göre daha tutarsız sonuçlar verebilmiştir. Benzer şekilde, 0,5 ve 2,0 Hz frekans değerlerinde, üç parametrelili Maxwell modeli ile iki ve üç parametrelili Voigt modelleri deneysel sonuçlarla tutarsızlık göstermişlerdir. Bu durumun sebebi olarak, oluşturulan modellere ait parametrelerin ($E_1, E_2, E_3, \eta_2, \eta_3$), “MATLAB” yazılımına ait “fsolve” komutu ile çözdürülmesi esnasında doğru köklere yakınsayamaması olduğu düşünülmektedir.

10 kN ön yükleme koşulu

Şekil 6.43 ve 6.44’te, sırasıyla, 10 kN ön yükleme koşulu için elde edilen K' ve K'' ifadeleri karşılaştırılmıştır.



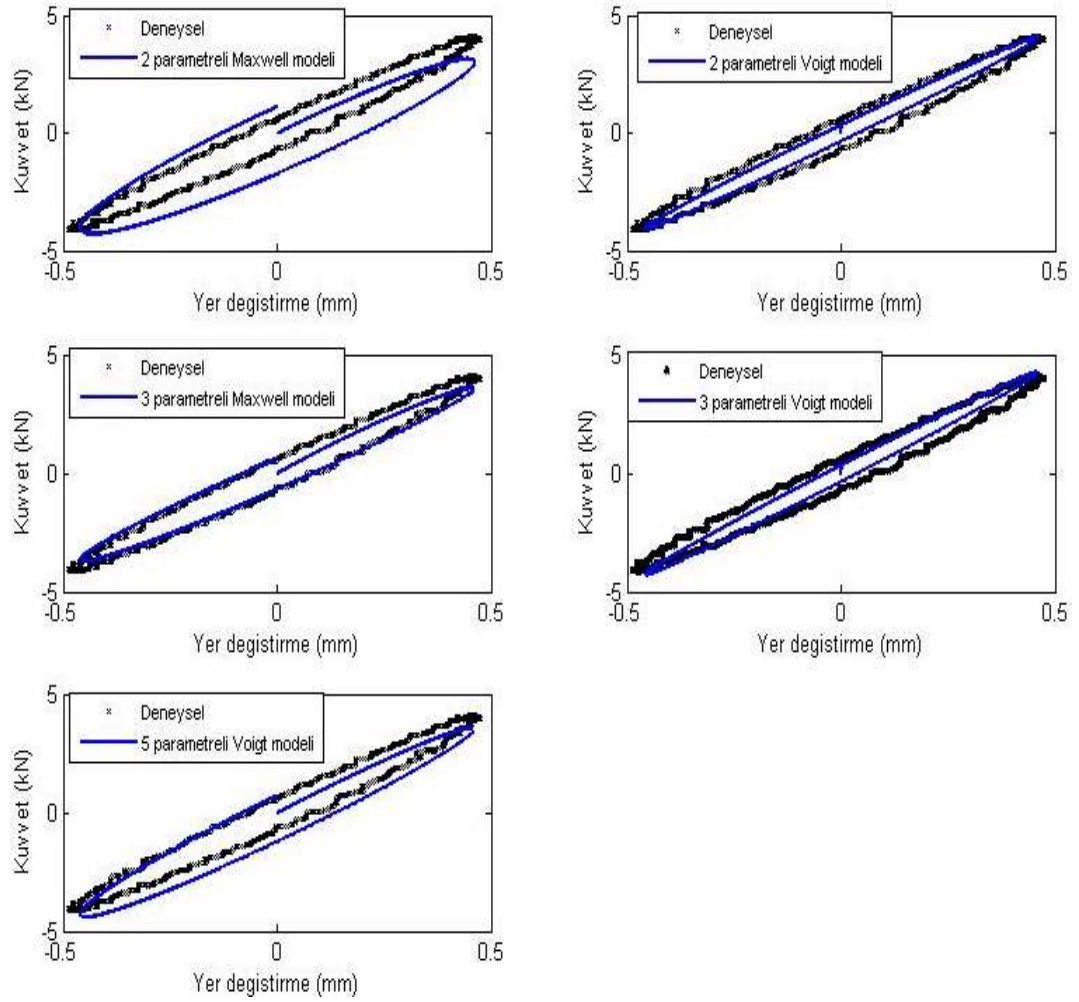
Şekil 6.43. 10 kN ön yük için, viskoelastik modeller ile elde edilen K' değerlerinin karşılaştırılması



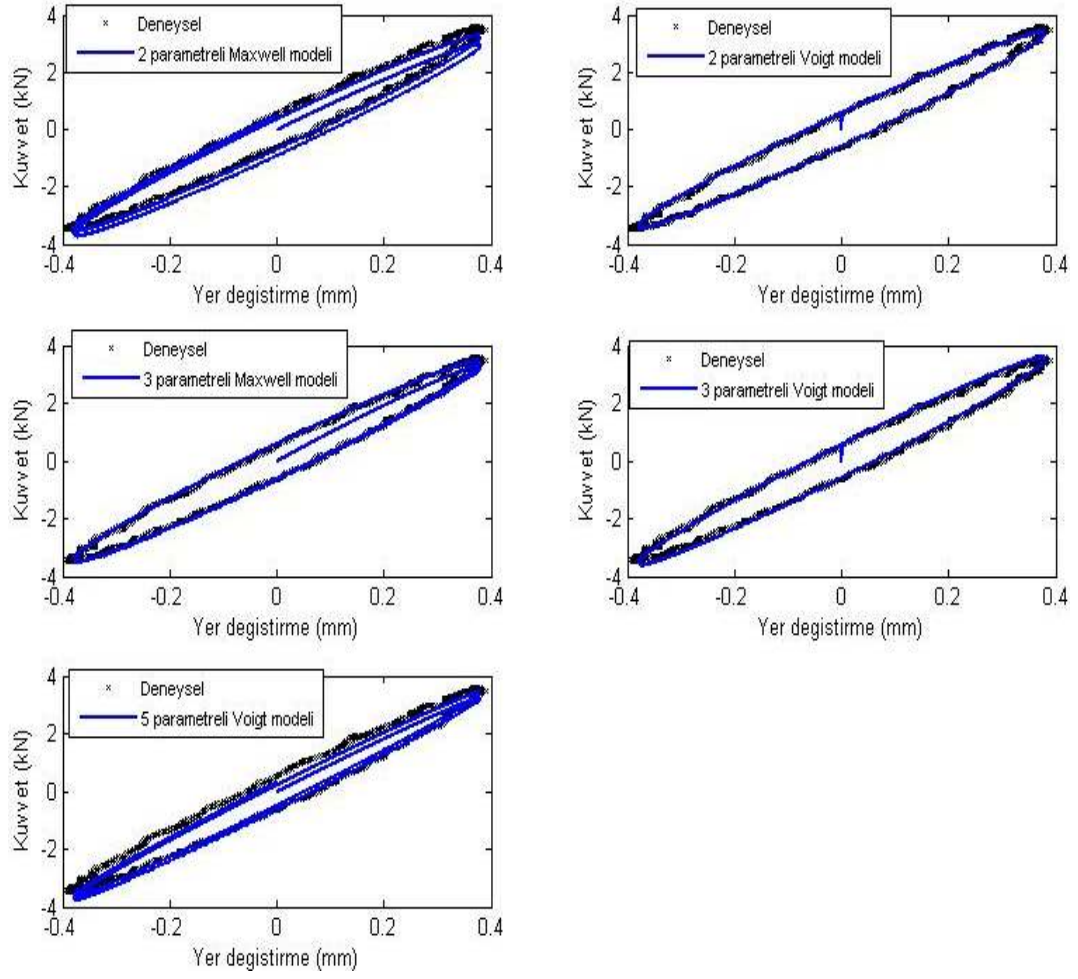
Şekil 6.44. 10 kN ön yük için, viskoelastik modeller ile elde edilen K'' değerlerinin karşılaştırılması

Deneysel yolla elde edilen histerezis eğrileri ile analitik yolla elde edilen histerezis eğrilerinin, 10 kN ön yükleme koşulu ve 0,5 Hz, 1,0 Hz, 1,5 Hz ve 2,0 Hz frekans

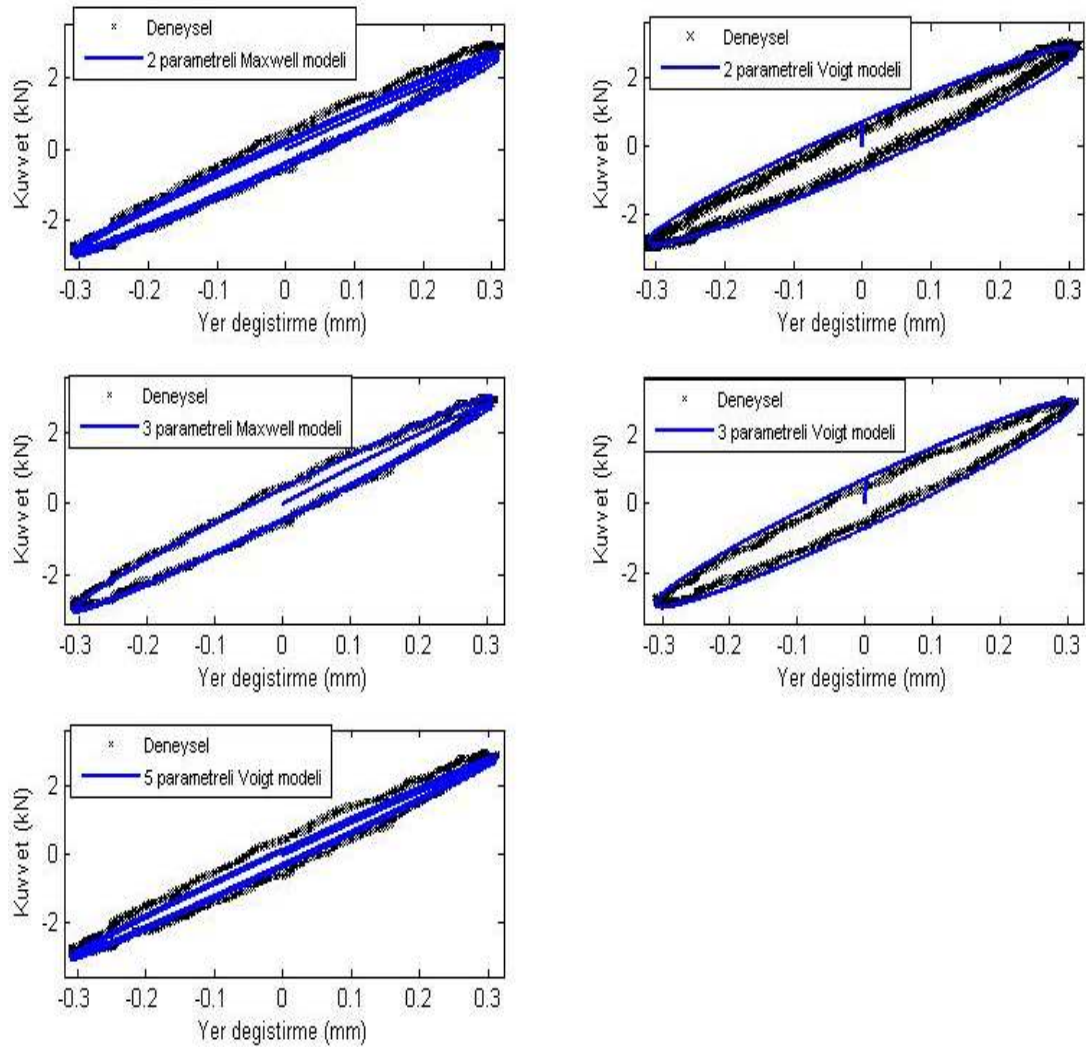
değerlerindeki karşılaştırmaları Şekil 6.45, Şekil 6.46, Şekil 6.47 ve Şekil 6.48’de verilmiştir.



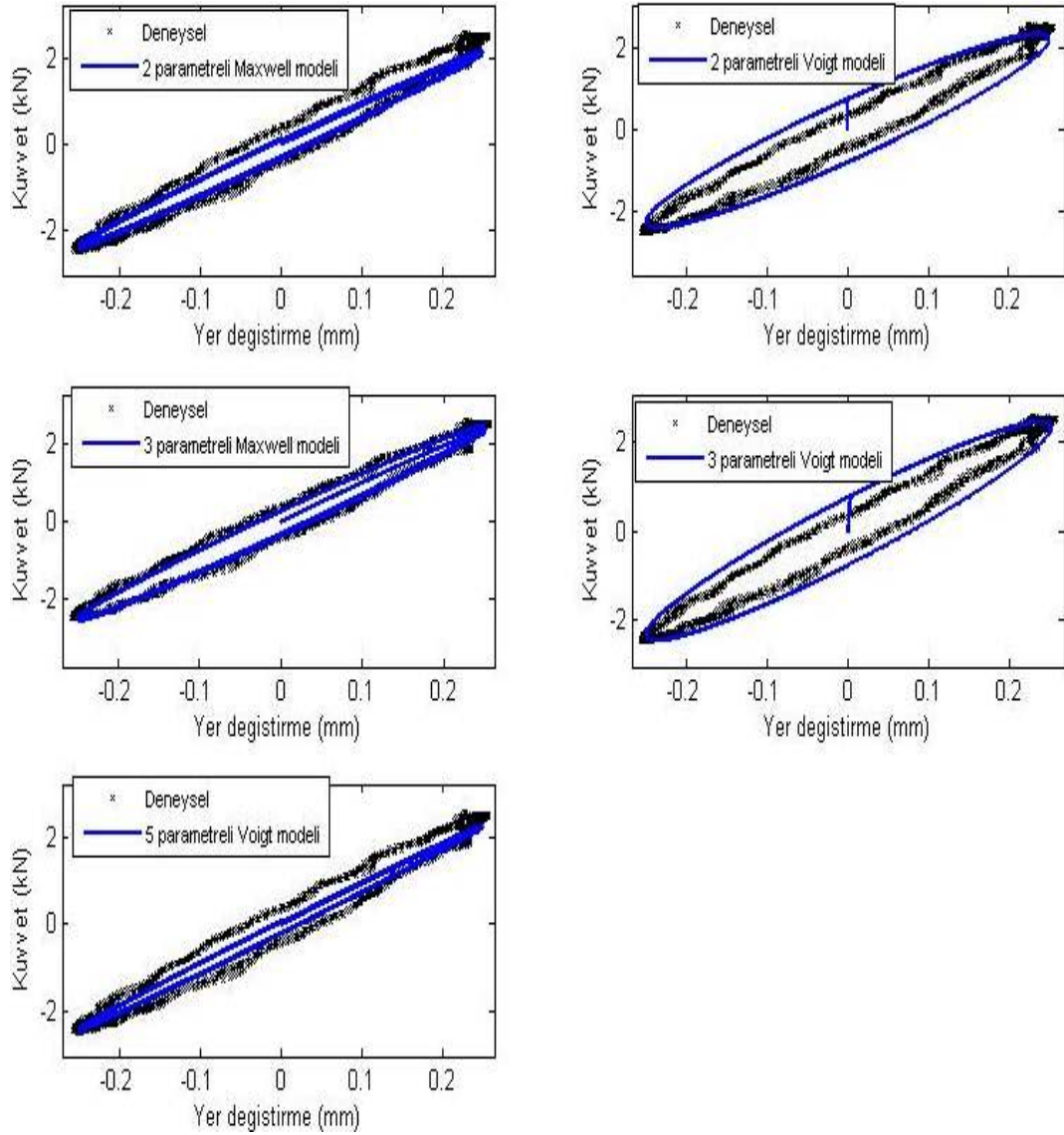
Şekil 6.45. 10 kN ön yükleme ve 0,5 Hz frekans değeri için elde edilen histerezis eğrilerinin karşılaştırılması



Şekil 6.46. 10 kN ön yükleme ve 1,0 Hz frekans değeri için elde edilen histerezis eğrilerinin karşılaştırılması



Şekil 6.47. 10 kN ön yükleme ve 1,5 Hz frekans değeri için elde edilen histerezis eğrilerinin karşılaştırılması



Şekil 6.48. 10 kN ön yükleme ve 2,0 Hz frekans değeri için elde edilen histerezis eğrilerinin karşılaştırılması

10 kN ön yükleme koşulu için analitik çalışma sonucunda depolama ve sönüm katılığı değerleri hesaplanmış ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlarda tutarsızlıklar görülmüştür. 10 kN ön yükleme koşulunda K' için deneysel verilere en yakın sonuçları üç parametrelili genelleştirilmiş Maxwell modeli ile beş parametrelili genelleştirilmiş Voigt modeli vermiştir. İki parametrelili Maxwell modeli ise nispeten deneysel verilerle tutarlı sonuçlar vermiştir. K'' için ise en tutarlı sonucu üç parametrelili genelleştirilmiş Maxwell modeli vermiştir. İki ve üç parametrelili Voigt modellerinin birbirleriyle tutarlı sonuçlar verdiği görülmüştür. Diğer ön yükleme

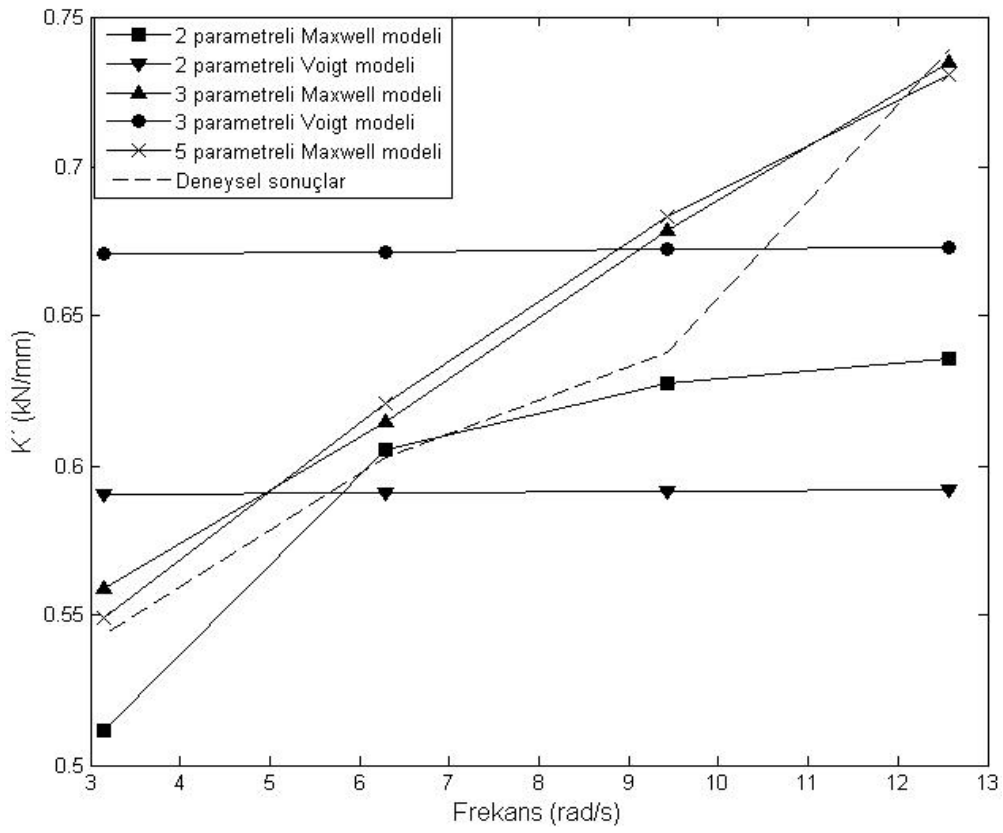
koşullarına benzer şekilde, oluşan tutarsızlıkların sebepleri model parametrelerinin nümerik olarak hesaplanmasında parametrelerin yakınsadığı değerlerin yüksek hata içermesi, test cihazının farklı frekans değerlerinde eşit yer değiştirme genliklerini sağlayamaması, numunenin nonlinear davranışının ve yüksek frekanslı sinyal bileşenlerinin neden olduğu okuma hataları şeklinde sıralanabilir. 10 kN ön yükleme koşulunda nonlinear davranışın ve yüksek frekanslı sinyal bileşenlerinin daha az etkili olması sebebiyle bu ön yükleme şartındaki okuma hatalarının en düşük olduğu söylenebilir. Buna göre 10 kN ön yükleme koşulu esas alınarak, Maxwell modellerinin aynı parametre sayısına sahip Voigt modellerine göre, deneysel verilerden elde edilen katılık değerleri ile daha tutarlı sonuçlar verdiği görülmüştür. İki ve üç parametrelili Voigt modelleri deneysel sonuçlarla tutarlılık göstermemelerine karşı birbirlerine paralel sonuçlar vermişlerdir. Beş parametrelili Voigt modeli ise diğer Voigt modellerinin aksine deneysel sonuçlarla tutarlılık gösterebilmiştir. Buna göre, parametre sayısındaki artışın modelin hassasiyetini arttırdığı söylenebilir.

10 kN ön yükleme koşulu için deneysel ve analitik olarak elde edilen histerezis döngüleri karşılaştırılmıştır. Daha düşük ön yükleme koşuluna kıyasla 10 kN ön yükleme koşulunda numune davranışının lineere daha yakın olmasından dolayı bu ön yükleme koşulunda daha tutarlı sonuçlar elde edilmiştir. 10 kN ön yükleme koşulu için elde edilen histerezis döngülerinin karşılaştırılması sonucunda, diğer ön yükleme koşullarına benzer sonuçlar elde edilmiştir. Buna göre, üç parametrelili Maxwell modelinin beklendiği gibi iki parametrelili Maxwell modeline göre daha hassas sonuçlar verdiği görülmüştür. İki ve üç parametrelili Voigt modelleri deneysel sonuçlarla ve birbirleriyle tutarlı histerezis döngüleri oluşturabilmişlerdir. Ancak, beş parametrelili Voigt modeli beklenenin aksine iki ve üç parametrelili Voigt modellerine göre daha tutarsız sonuçlar verebilmiştir. Benzer şekilde, 0,5 Hz ve 2,0 Hz frekans değerlerinde, üç parametrelili Maxwell modeli ile iki ve üç parametrelili Voigt modelleri deneysel sonuçlarla tutarsızlık göstermişlerdir. Bu durumun sebebi olarak, oluşturulan modellere ait parametrelerin (E_1 , E_2 , E_3 , η_2 , η_3), “MATLAB” yazılımına ait “fsolve” komutu ile çözülmesi esnasında doğru köklere yakınsayamaması olduğu düşünülmektedir.

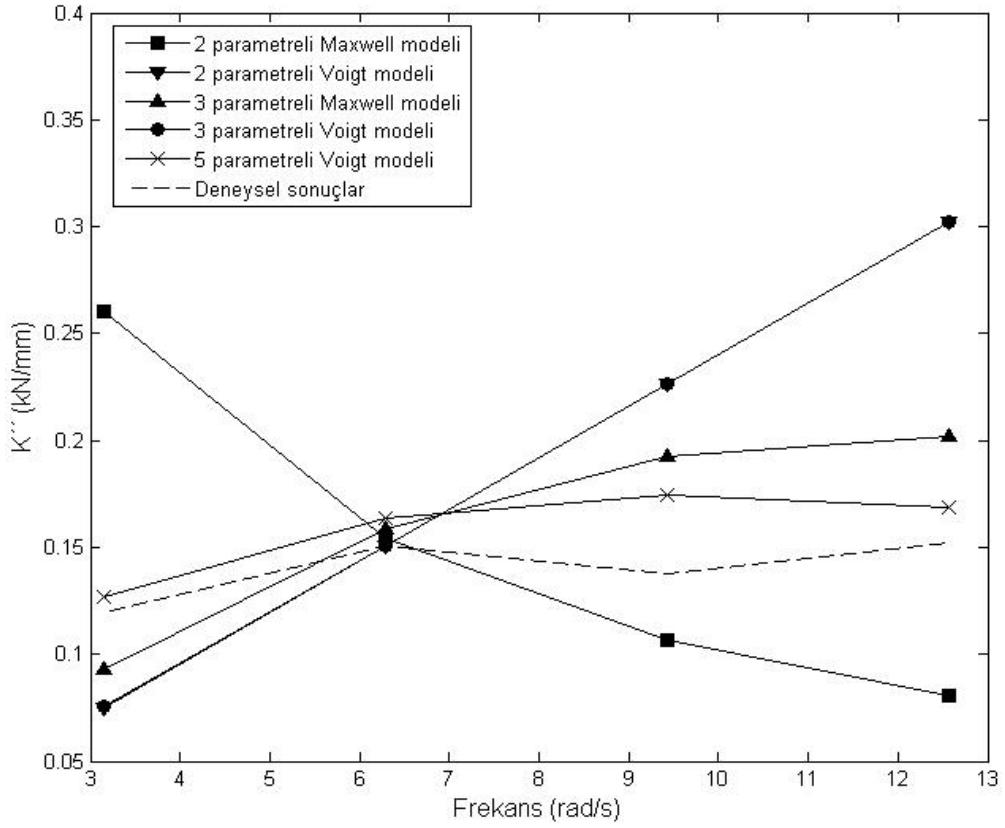
6.2.2. İkinci konfigürasyon

0,5 kN ön yükleme koşulu ve 1 mm strok girişi

Şekil 6.49 ve 6.50’de verilen grafiklerde, 0,5 kN önyükleme ve 1 mm strok girişi için, sırasıyla, katılık ve sönüm özelliklerinin karşılaştırılması gösterilmiştir.

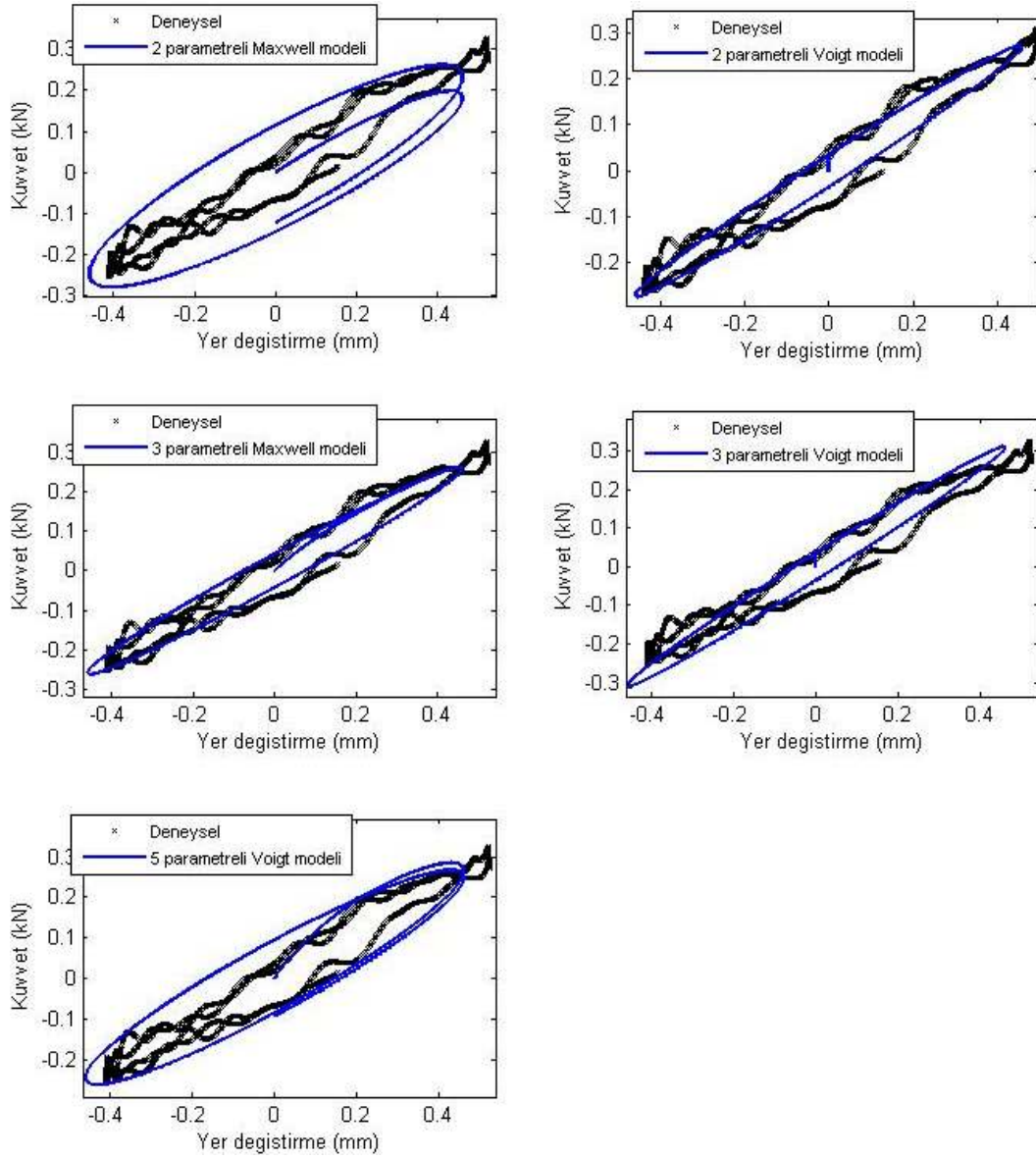


Şekil 6.49. 0,5 kN ön yük için, viskoelastik modeller ile elde edilen K' değerlerinin karşılaştırılması

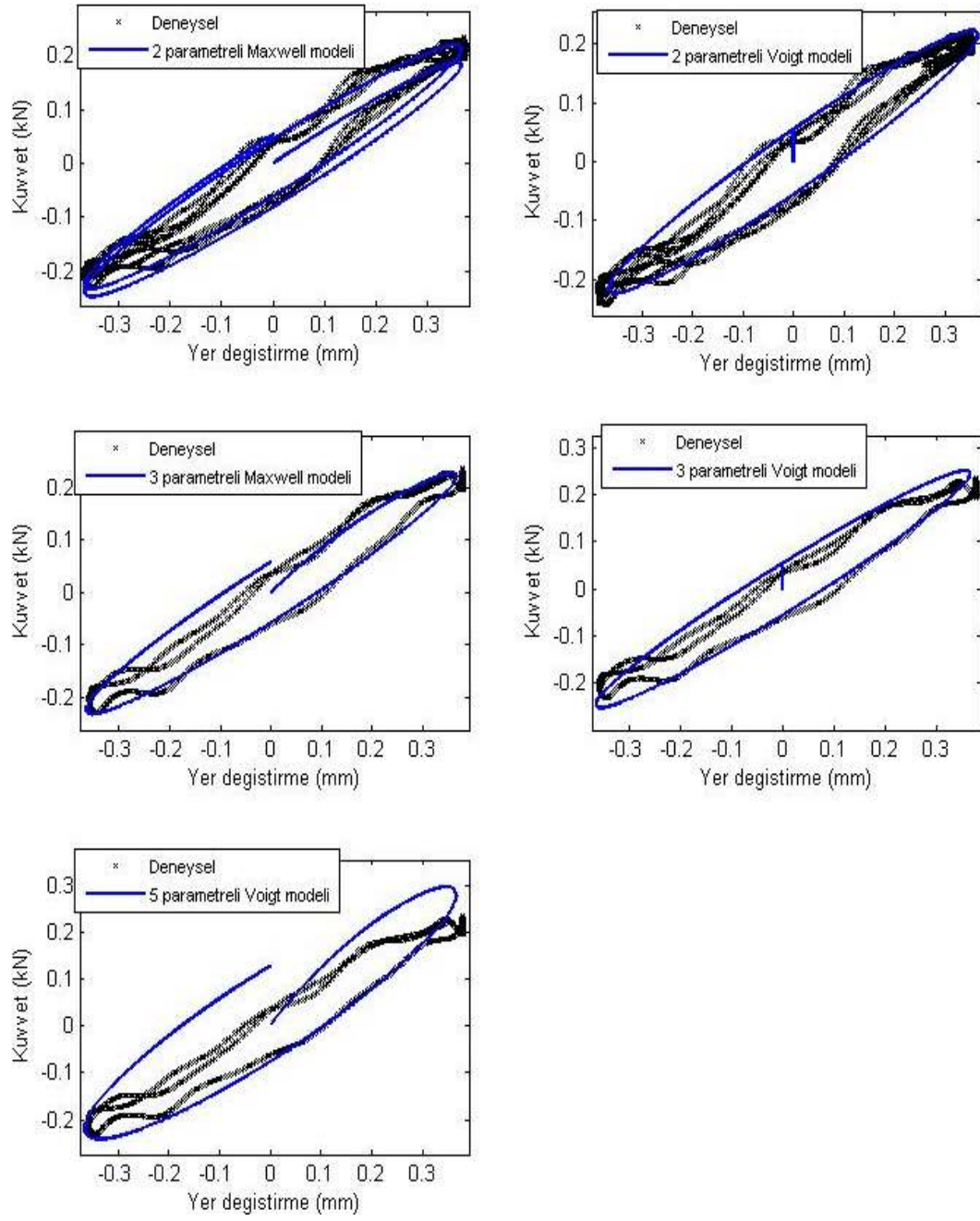


Şekil 6.50. 0,5 kN ön yük için, viskoelastik modeller ile elde edilen K'' değerlerinin karşılaştırılması

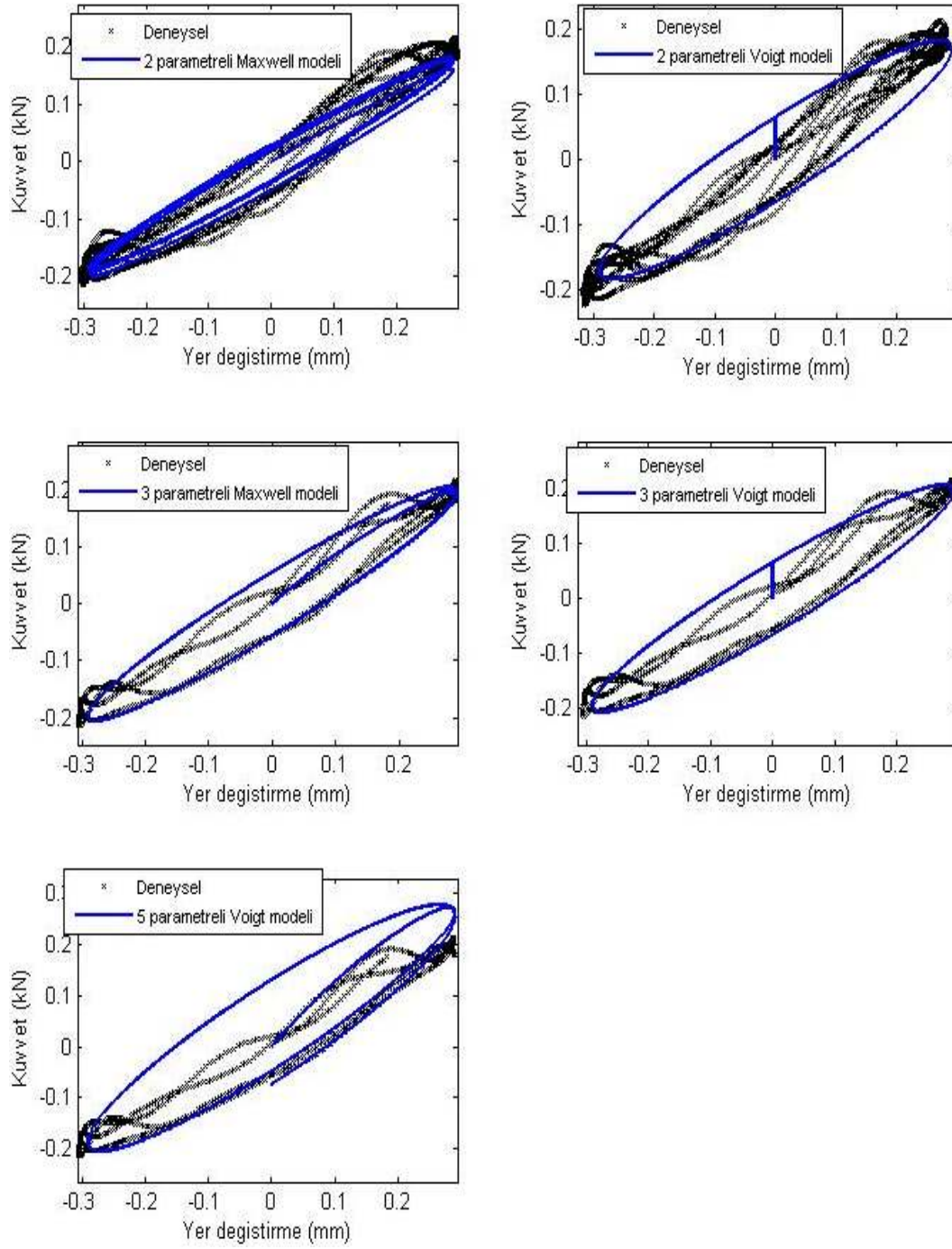
Deneysel yolla elde edilen histerezis eğrileri ile analitik yolla elde edilen histerezis eğrilerinin, 0,5 kN ön yükleme koşulu ve 0,5 Hz, 1,0 Hz, 1,5 Hz ve 2,0 Hz frekans değerlerindeki karşılaştırmaları Şekil 6.51, Şekil 6.52, Şekil 6.53 ve Şekil 6.54'te verilmiştir.



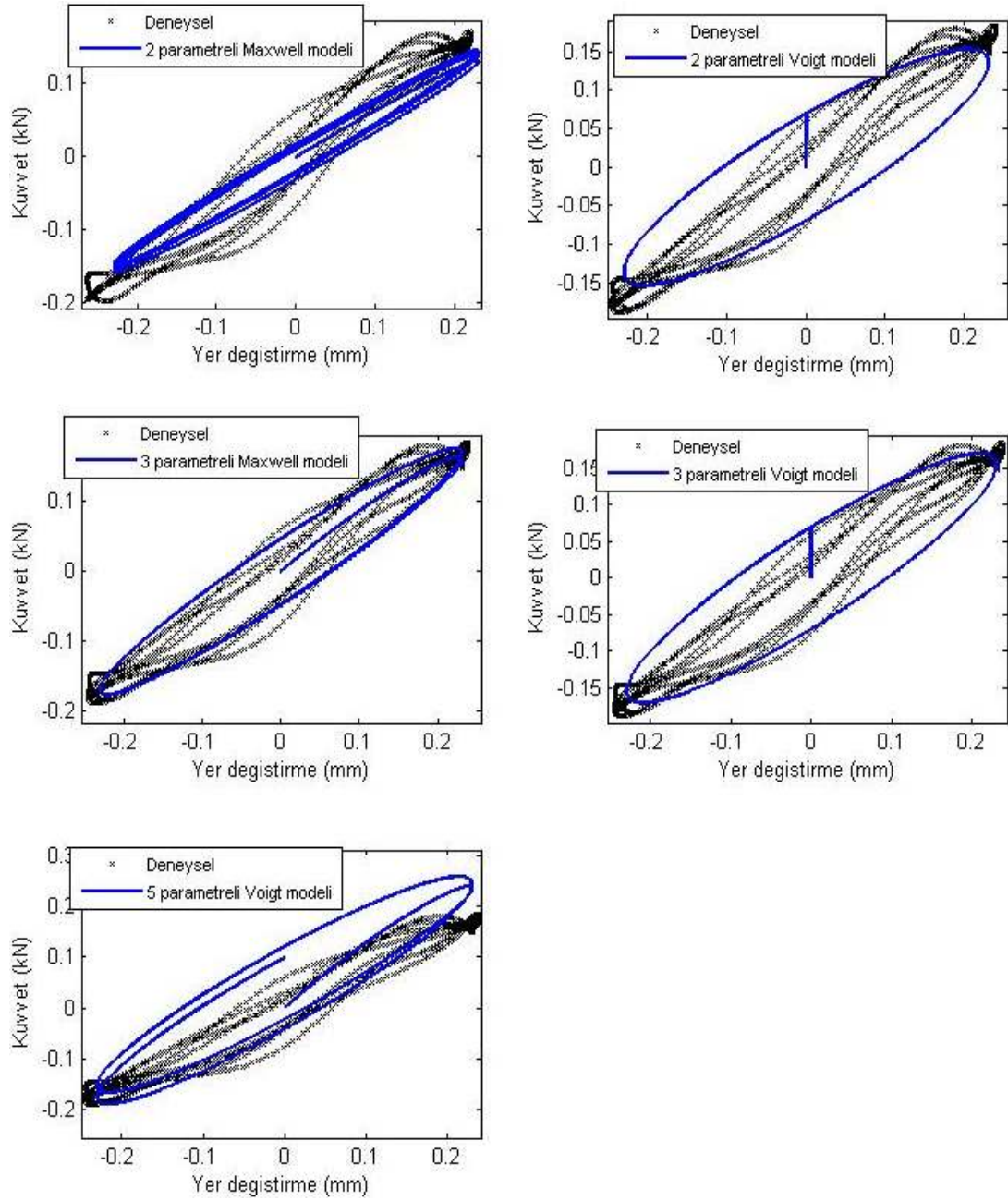
Şekil 6.51. 0,5 kN ön yükleme ve 0,5 Hz frekans değeri için elde edilen histerezis eğrilerinin karşılaştırılması



Şekil 6.52. 0,5 kN ön yükleme ve 1,0 Hz frekans değeri için elde edilen histerezis eğrilerinin karşılaştırılması



Şekil 6.53. 0,5 kN ön yükleme ve 1,5 Hz frekans değeri için elde edilen histerezis eğrilerinin karşılaştırılması



Şekil 6.54. 0,5 kN ön yükleme ve 2,0 Hz frekans değeri için elde edilen histerezis eğrilerinin karşılaştırılması

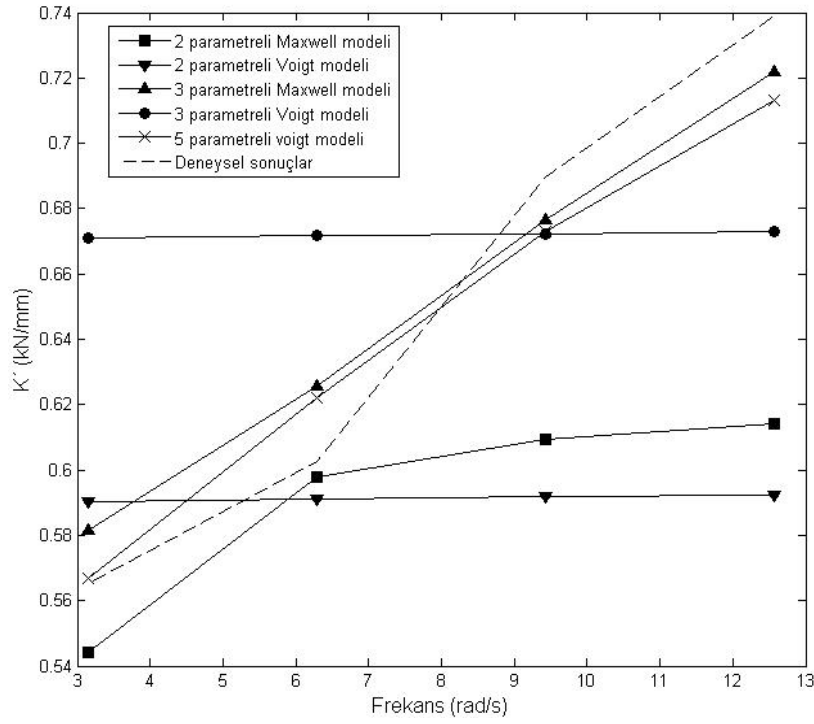
0,5 kN ön yükleme koşulu için elde edilen depolama ve sönüm katılıklarının karşılaştırılmalarına göre, her iki özellik için de olmak üzere, deneysel sonuçlarla en tutarlı değerleri üç parametrelil genelleştirilmiş Maxwell modeli ile beş parametrelil genelleştirilmiş Voigt modeli vermiştir. Bununla birlikte iki parametrelil Voigt modeli ile üç parametrelil genelleştirilmiş Voigt modeli deneysel verilerle tutarsız

olmakla birlikte birbirlerine paralel sonuçlar vermiştir. Elde edilen sonuçlarda görülen tutarsızlıkların sebepleri, model parametrelerinin nümerik olarak hesaplanmasında parametrelerin yakınsadığı değerlerin yüksek hata içermesi, test cihazının farklı frekans değerlerinde eşit yer değiştirme genliklerini sağlayamaması, numunenin nonlinear davranışının ve yüksek frekanslı sinyal bileşenlerinin neden olduğu okuma hataları şeklinde sıralanabilir.

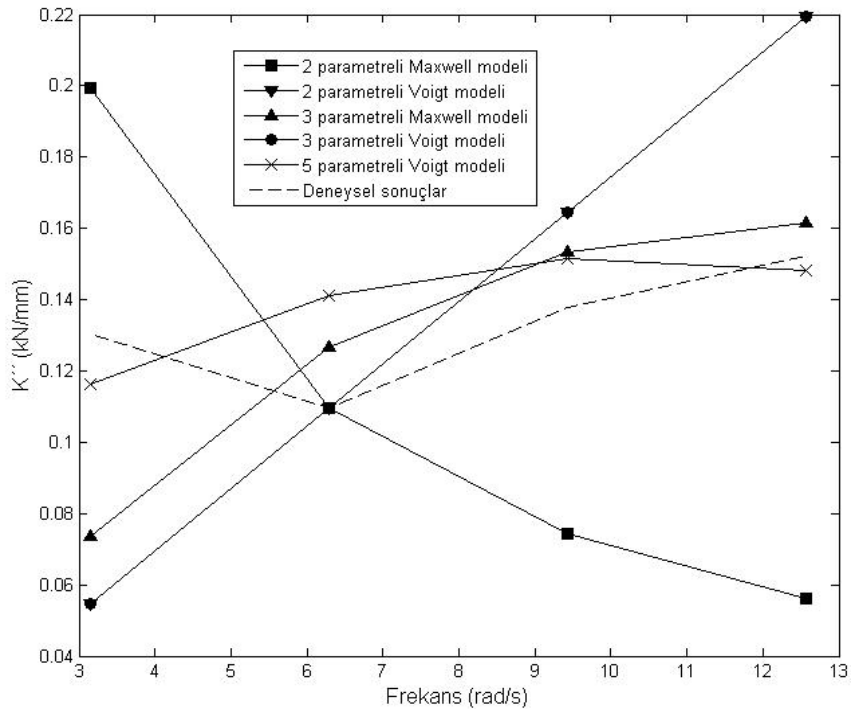
İkinci konfigürasyon için, deneysel ve analitik olarak elde edilen histerezis döngülerinin karşılaştırılması birinci konfigürasyona benzer sonuçları ortaya koymuştur. İkinci konfigürasyonda da, analitik yolla elde edilen histerezis döngüleri, numunenin nonlinear davranışını simüle edememiştir. Ayrıca analitik sonuçların, ikinci konfigürasyonda gerçekleştirilen testlerde ortaya çıkan yüksek frekanslı sinyal bileşenlerini de simüle edemediği daha açık şekilde görülmüştür. Birinci konfigürasyona ait sonuçlara benzer şekilde, üç parametrelili Maxwell modelinin, iki parametrelili Maxwell modeline göre daha hassas sonuçlar verdiği, iki ve üç parametrelili Voigt modellerinin ise, deneysel sonuçlarla ve birbirleriyle tutarlı histerezis döngüleri oluşturabildikleri görülmüştür. Yine birinci konfigürasyon sonuçlarına benzer şekilde, beş parametrelili Voigt modeli, beklenenin aksine, iki ve üç parametrelili Voigt modellerine göre daha tutarsız sonuçlar verebilmiştir. Bununla birlikte, 0,5 ve 2,0 Hz frekans değerlerinde, üç parametrelili Maxwell modeli ile iki ve üç parametrelili Voigt modelleri deneysel sonuçlarla tutarsızlık göstermişlerdir. Bu tutarsızlıkların sebebi olarak, birinci konfigürasyonda olduğu gibi, oluşturulan modellere ait parametrelerin nümerik yöntemlerle (“MATLAB” yazılımına ait “fsolve” komutu kullanılarak) hesaplanmasında doğru köklere yakınsayamaması olduğu düşünülmektedir.

1,01 kN ön yükleme koşulu ve 1 mm strok girişi

1,01 kN ön yükleme koşulu ve 1 mm strok girişi için elde edilen K' ve K'' ifadeleri, sırasıyla, Şekil 6.55 ve 6.56'da grafiksel olarak karşılaştırılmıştır.

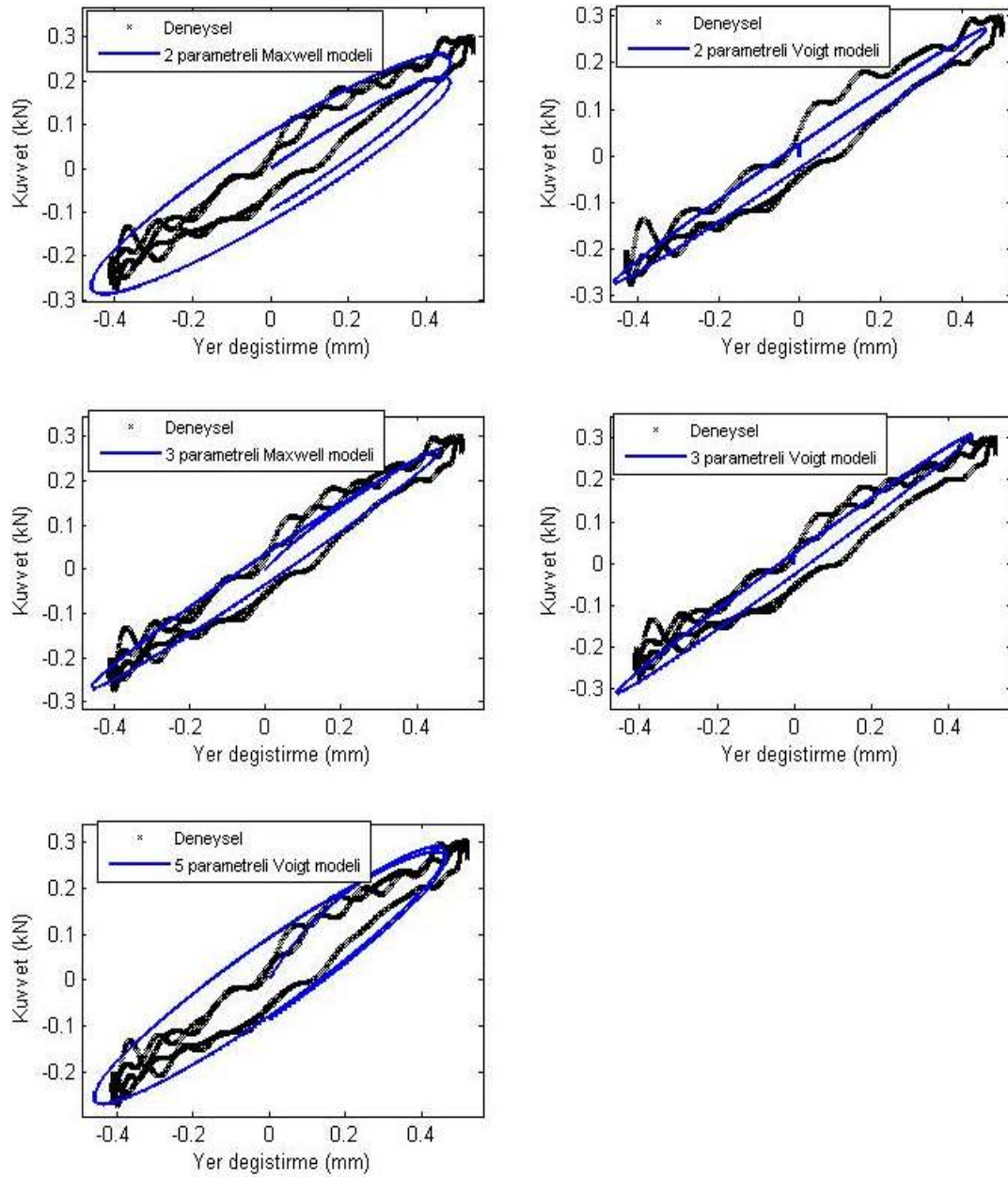


Şekil 6.55. 1,01 kN ön yük için, viskoelastik modeller ile elde edilen K' değerlerinin karşılaştırılması

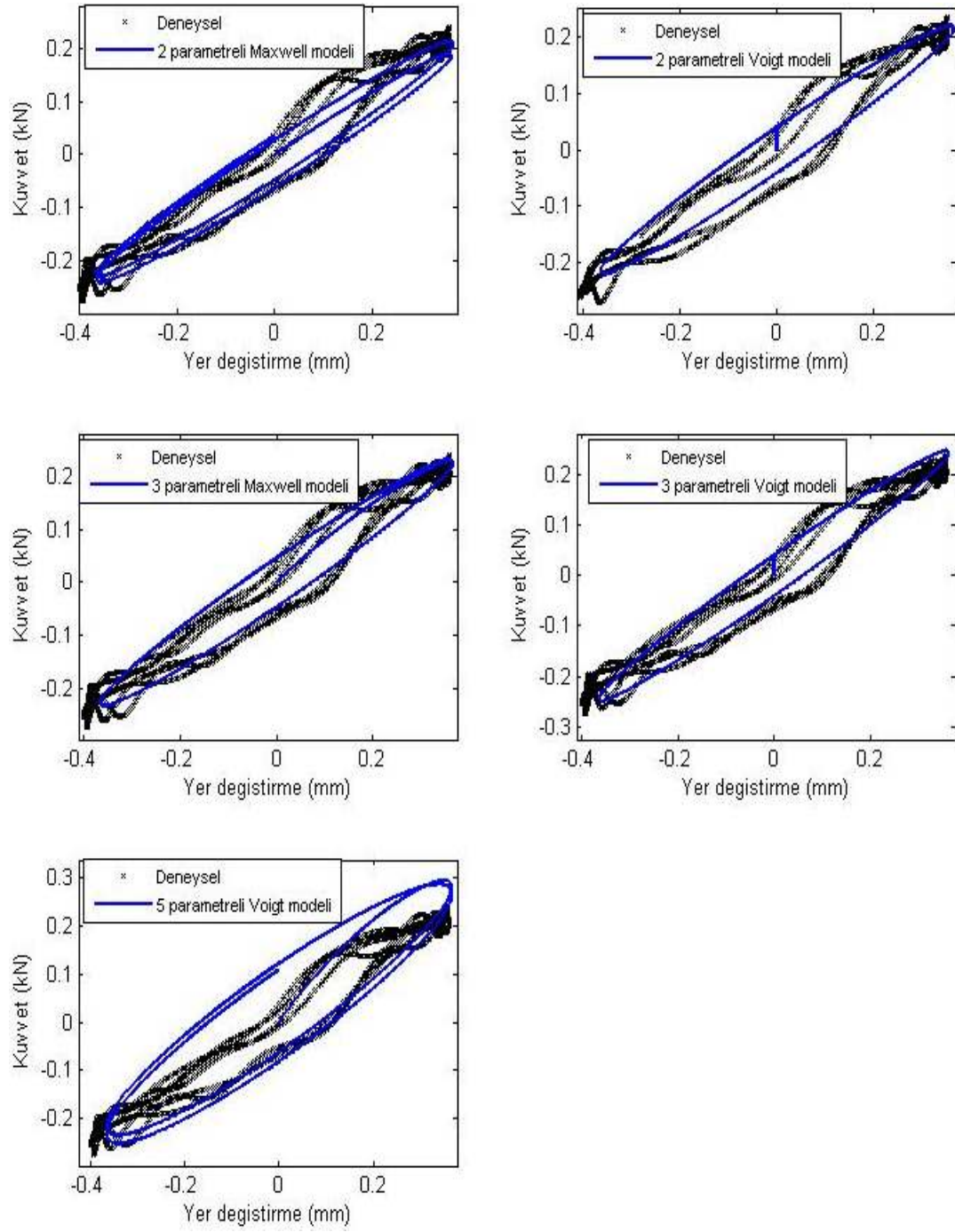


Şekil 6.56. 1,01 kN ön yük için, viskoelastik modeller ile elde edilen K'' değerlerinin karşılaştırılması

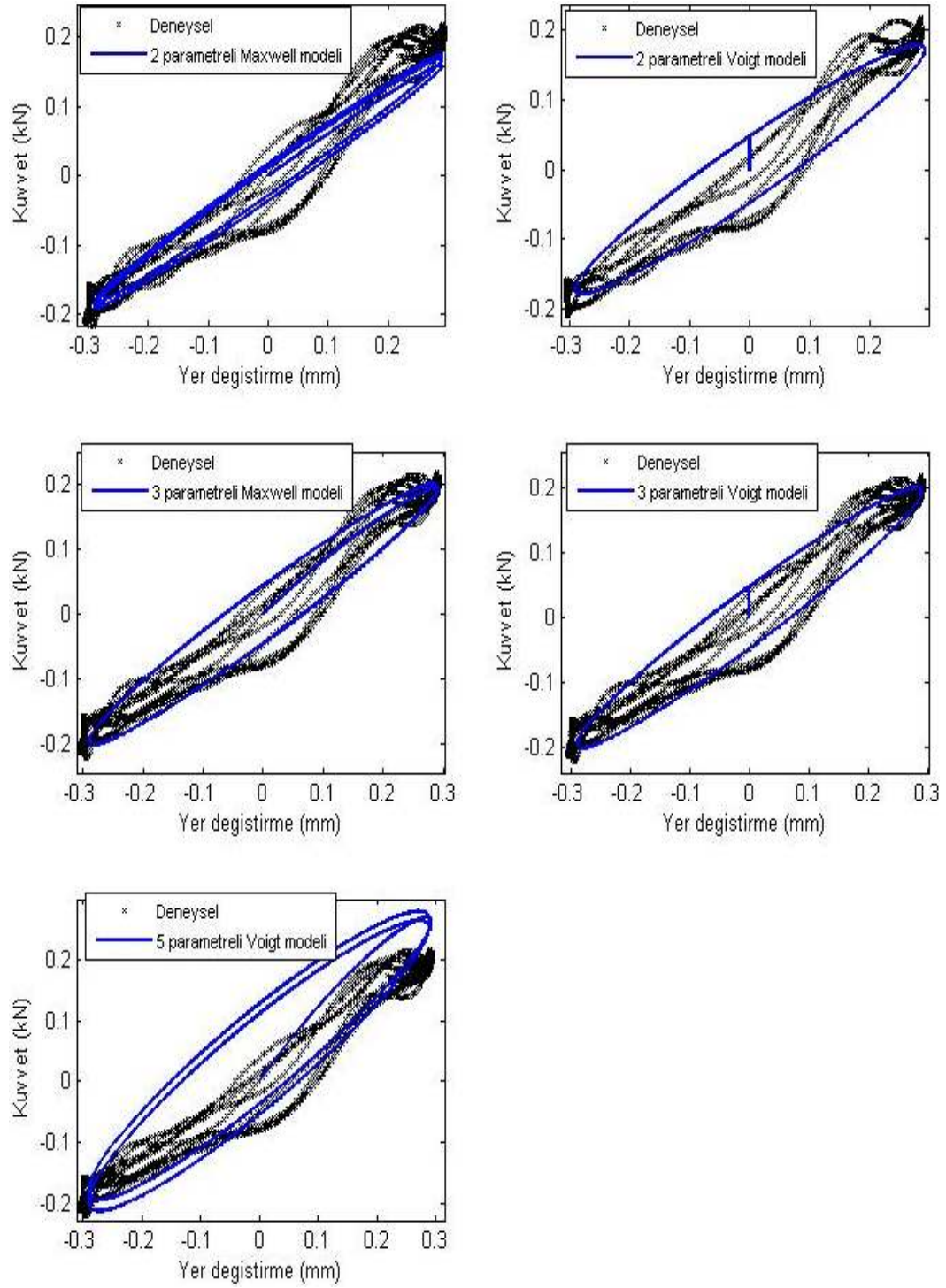
Deneysel yolla elde edilen histerezis eğrileri ile analitik yolla elde edilen histerezis eğrilerinin, 1,01 kN ön yükleme koşulu ve 0,5 Hz, 1,0 Hz, 1,5 Hz ve 2,0 Hz frekans değerlerindeki karşılaştırmaları Şekil 6.57, Şekil 6.58, Şekil 6.59 ve Şekil 6.60'ta verilmiştir.



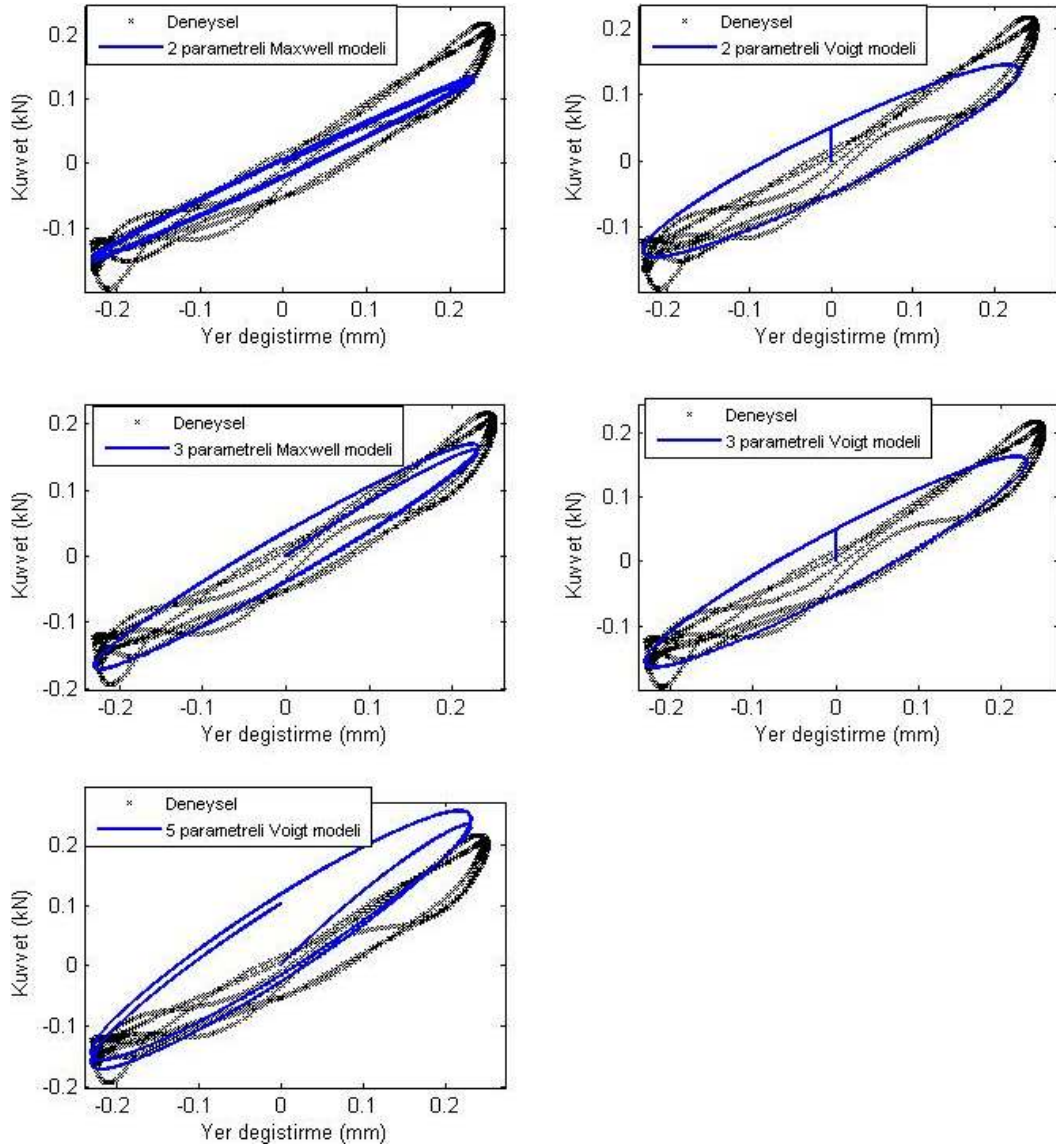
Şekil 6.57. 1,01 kN ön yükleme ve 0,5 Hz frekans değeri için elde edilen histerezis eğrilerinin karşılaştırılması



Şekil 6.58. 1,01 kN ön yükleme ve 1,0 Hz frekans değeri için elde edilen histerezis eğrilerinin karşılaştırılması



Şekil 6.59. 1,01 kN ön yükleme ve 1,5 Hz frekans değeri için elde edilen histerezis eğrilerinin karşılaştırılması



Şekil 6.60. 1,01 kN ön yükleme ve 2,0 Hz frekans değeri için elde edilen histerezis eğrilerinin karşılaştırılması

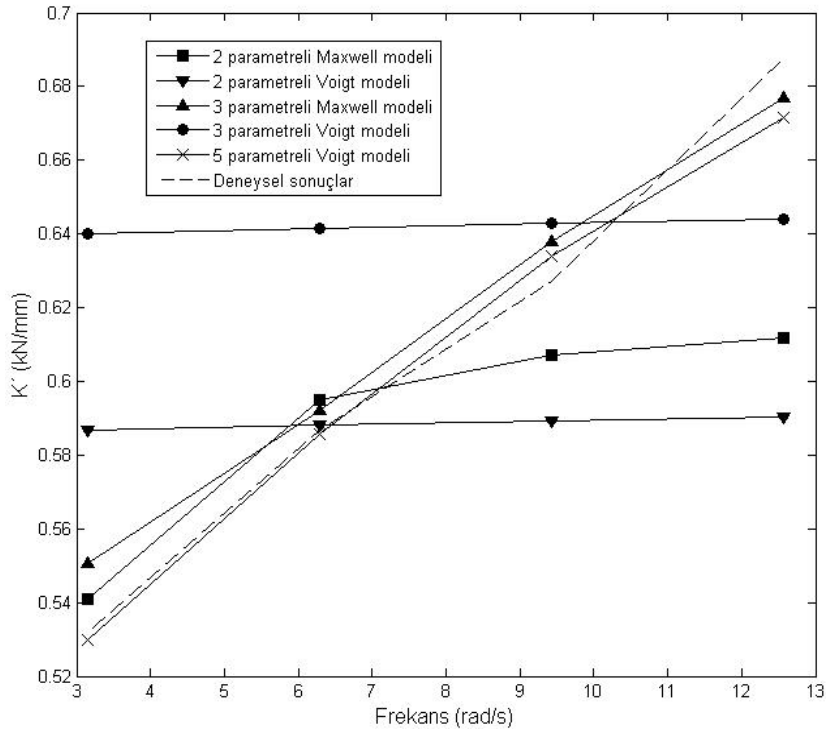
1,01 kN ön yükleme koşulu için hesaplanan depolama ve sönüm katılıklarının karşılaştırılması 0,5 kN ön yükleme koşuluna benzer sonuçlar vermiştir. Buna göre göre, 1,01 kN ön yükleme koşulu için hesaplanan katılık değerlerinin karşılaştırılmasında en tutarlı sonuçları üç parametrelili genelleştirilmiş Maxwell modeli ile beş parametrelili genelleştirilmiş Voigt modeli vermiştir. Elde edilen sonuçlarda görülen tutarsızlıkların sebepleri model parametrelerinin nümerik olarak hesaplanmasında parametrelerin yakınsadığı değerlerin yüksek hata içermesi, test cihazının farklı frekans değerlerinde eşit yer değiştirme genliklerini sağlayamaması,

numunenin nonlinear davranışının ve yüksek frekanslı sinyal bileşenlerinin neden olduğu okuma hataları şeklinde sıralanabilir.

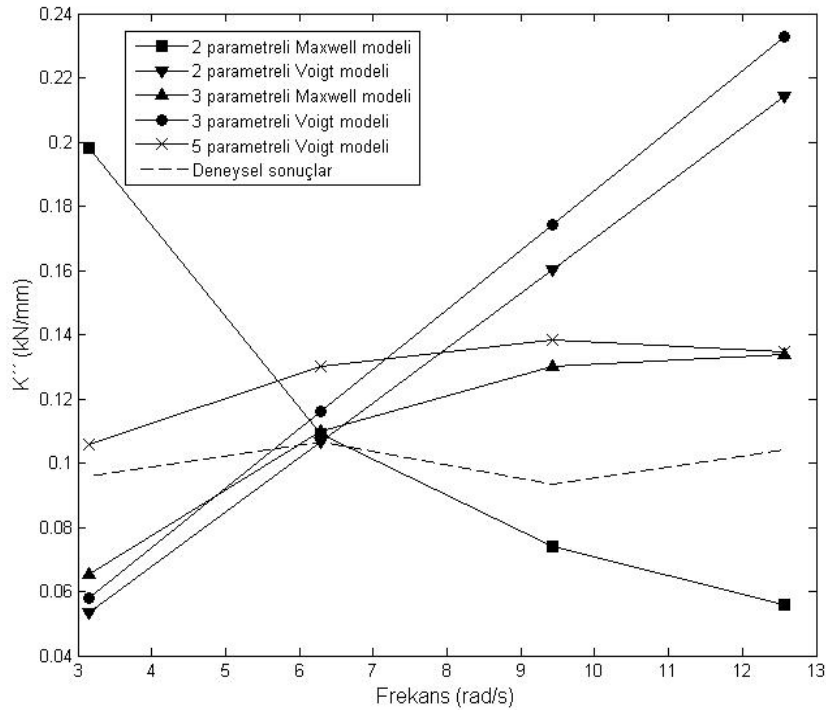
1,01 kN ön yükleme ve 1 mm strok girişi için deneysel ve analitik olarak elde edilen histerezis döngülerinin karşılaştırılması birinci konfigürasyona benzer sonuçları ortaya koymuştur. Buna göre, analitik yolla elde edilen histerezis döngüleri, numunenin nonlinear davranışını simüle edememiştir. Ayrıca analitik sonuçların, ikinci konfigürasyonda gerçekleştirilen testlerde ortaya çıkan yüksek frekanslı sinyal bileşenlerini de simüle edemediği daha açık şekilde görülmüştür. Birinci konfigürasyona ait sonuçlara benzer şekilde, üç parametrelili Maxwell modelinin, iki parametrelili Maxwell modeline göre daha hassas sonuçlar verdiği, iki ve üç parametrelili Voigt modellerinin ise, deneysel sonuçlarla ve birbirleriyle tutarlı histerezis döngüleri oluşturabildikleri görülmüştür. Yine birinci konfigürasyon sonuçlarına benzer şekilde, beş parametrelili Voigt modeli, beklenenin aksine, iki ve üç parametrelili Voigt modellerine göre daha tutarsız sonuçlar verebilmiştir. Bununla birlikte, 0,5 ve 2,0 Hz frekans değerlerinde, üç parametrelili Maxwell modeli ile iki ve üç parametrelili Voigt modelleri deneysel sonuçlarla tutarsızlık göstermişlerdir. Bu tutarsızlıkların sebebi olarak, birinci konfigürasyonda olduğu gibi, oluşturulan modellere ait parametrelerin nümerik yöntemlerle, “MATLAB” yazılımına ait “fsolve” komutu kullanılarak) hesaplanması esnasında doğru köklere yakınsayamaması olduğu düşünülmektedir.

1,01 kN ön yükleme koşulu ve 2mm strok girişi

Şekil 6.61 ve 6.62’de, sırasıyla, 1,01 kN ön yükleme koşulu ve 2 mm strok girişi için elde edilen K' ve K'' ifadeleri karşılaştırılmıştır.

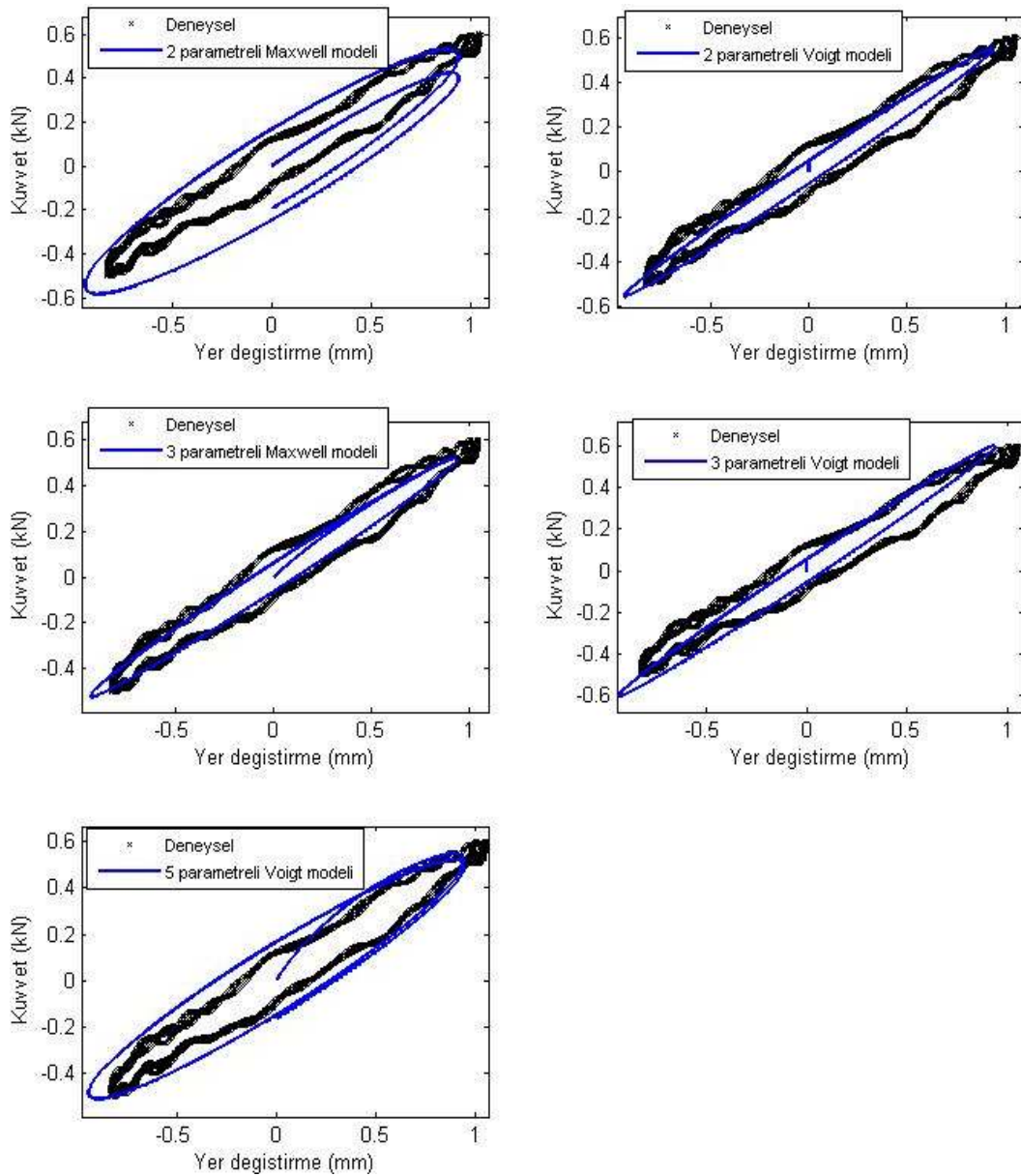


Şekil 6.61. 1,01 kN ön yük ve 2 mm strok girişi için, viskoelastik modeller ile elde edilen K' değerlerinin karşılaştırılması

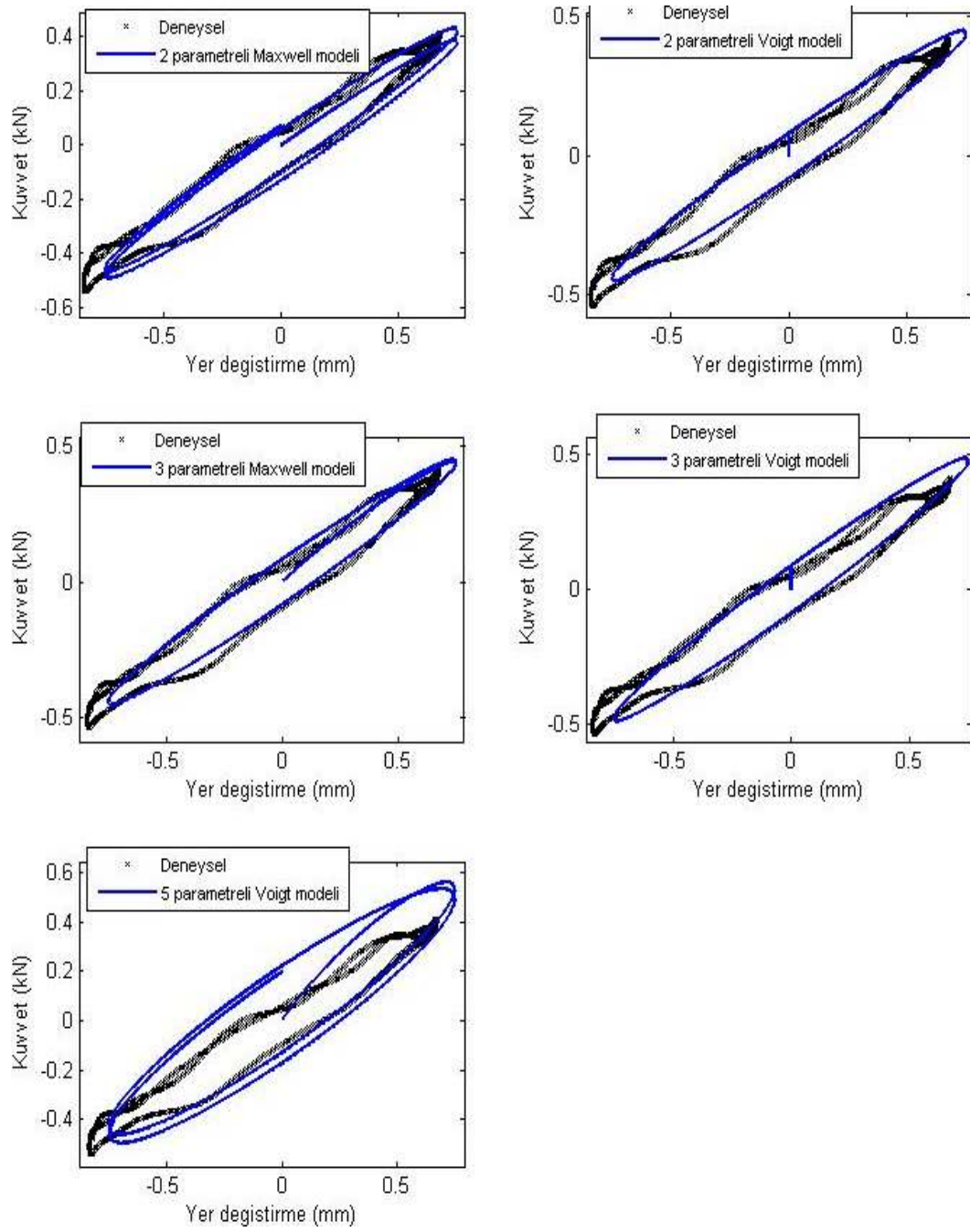


Şekil 6.62. 1,01 kN ön yük ve 2 mm strok girişi için, viskoelastik modeller ile elde edilen K'' değerlerinin karşılaştırılması

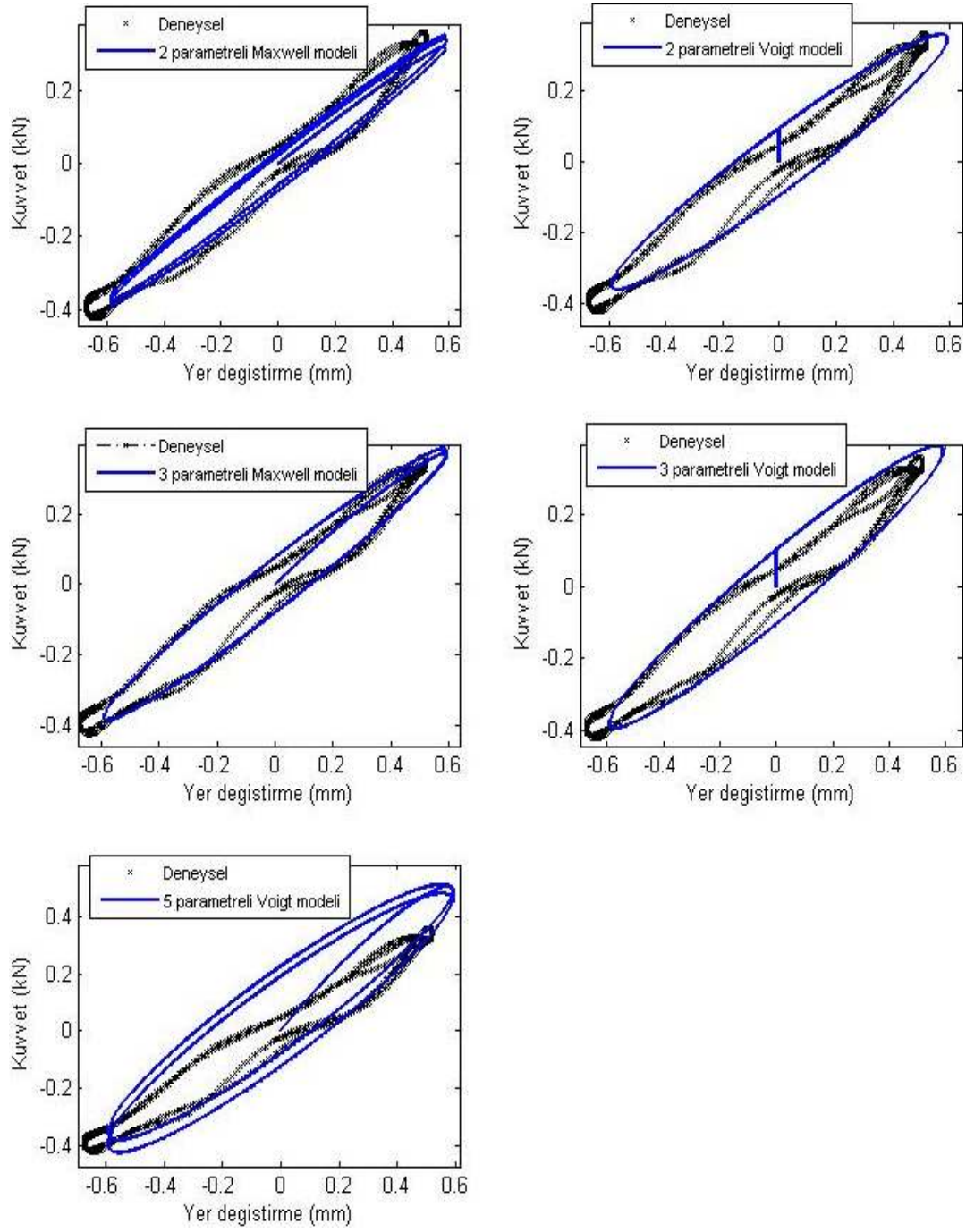
Deneysel yolla elde edilen histerezis eğrileri ile analitik yolla elde edilen histerezis eğrilerinin, 2 mm piston stroğu girişi için, 1,01 kN ön yükleme koşulu ve 0,5 Hz, 1,0 Hz, 1,5 Hz ve 2,0 Hz frekans değerlerindeki karşılaştırmaları Şekil 6.63, Şekil 6.64, Şekil 6.65 ve Şekil 6.66'da verilmiştir.



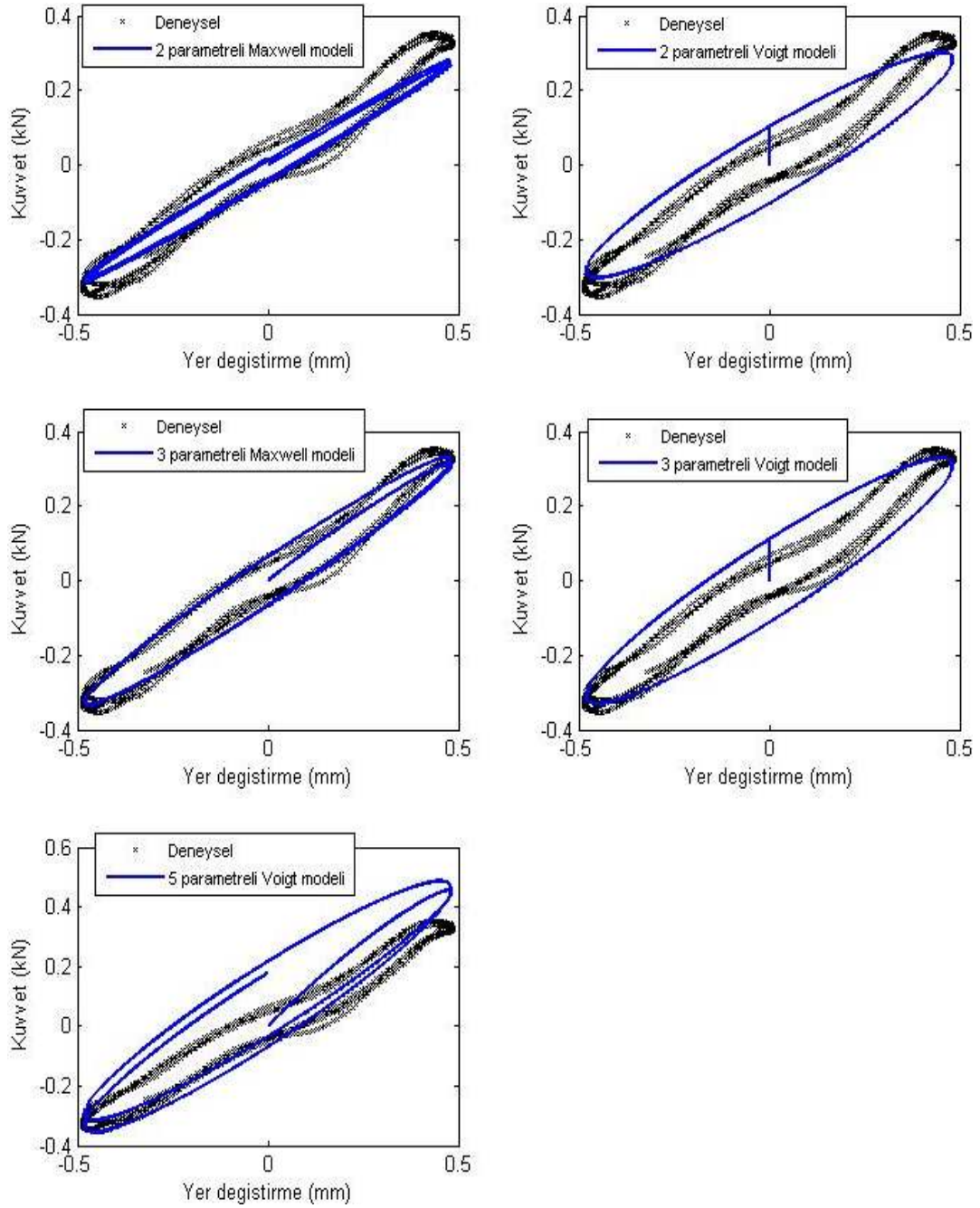
Şekil 6.63. 2 mm strok girişi, 1,01 kN ön yükleme ve 0,5 Hz frekans değeri için elde edilen histerezis eğrilerinin karşılaştırılması



Şekil 6.64. 2 mm strok girişi, 1,01 kN ön yükleme ve 1,0 Hz frekans değeri için elde edilen histerezis eğrilerinin karşılaştırılması



Şekil 6.65. 2 mm strok girişi, 1,01 kN ön yükleme ve 1,5 Hz frekans değeri için elde edilen histerezis eğrilerinin karşılaştırılması



Şekil 6.66. 2 mm strok girişi, 1,01 kN ön yükleme ve 2,0 Hz frekans değeri için elde edilen histerezis eğrilerinin karşılaştırılması

1,01 kN ön yükleme koşulu sabit tutulup strok girişinin 2 mm'ye çıkarıldığı durum için analitik yolla hesaplanan depolama ve sönüm katılıklarının deneysel sonuçlarla karşılaştırılmasında diğer ön yükleme koşullarına benzer sonuçlar gözlemlenmiştir. Buna göre, elde edilen sonuçlara göre Maxwell modellerinin, doğrudan deneysel

verilerle elde edilen katılık değerleri ile, aynı parametre sayısına sahip Voigt modellerine göre, daha tutarlı sonuçlar verdiği görülmüştür. Beş parametrelili genelleştirilmiş Voigt modeli diğer Voigt modellerinin aksine deneysel sonuçlarla tutarlılık gösterebilmiştir ve buna göre, ikinci konfigürasyon için de, parametre sayısındaki artışın modelin hassasiyetini arttırdığı söylenebilir. Elde edilen sonuçlarda görülen tutarsızlıkların sebepleri, model parametrelerinin nümerik olarak hesaplanmasında parametrelerin yakınsadığı değerlerin yüksek hata içermesi, test cihazının farklı frekans değerlerinde eşit yer değiştirme genliklerini sağlayamaması, numunenin nonlinear davranışının ve yüksek frekanslı sinyal bileşenlerinin neden olduğu okuma hataları şeklinde sıralanabilir.

1,01 kN ön yükleme ve iki mm strok girişi için deneysel ve analitik olarak elde edilen histerezis döngülerinin karşılaştırılması birinci konfigürasyona benzer sonuçları ortaya koymuştur. Buna göre, analitik yolla elde edilen histerezis döngüleri, numunenin nonlinear davranışını simüle edememiştir. Ayrıca analitik sonuçların, ikinci konfigürasyonda gerçekleştirilen testlerde ortaya çıkan yüksek frekanslı sinyal bileşenlerini de simüle edemediği daha açık şekilde görülmüştür. Birinci konfigürasyona ait sonuçlara benzer şekilde, üç parametrelili Maxwell modelinin, iki parametrelili Maxwell modeline göre daha hassas sonuçlar verdiği, iki ve üç parametrelili Voigt modellerinin ise, deneysel sonuçlarla ve birbirleriyle tutarlı histerezis döngüleri oluşturabildikleri görülmüştür. Yine birinci konfigürasyon sonuçlarına benzer şekilde, beş parametrelili Voigt modeli, beklenenin aksine, iki ve üç parametrelili Voigt modellerine göre daha tutarsız sonuçlar verebilmiştir. Bununla birlikte, 0,5 ve 2,0 Hz frekans değerlerinde, 3 parametrelili Maxwell modeli ile iki ve üç parametrelili Voigt modelleri deneysel sonuçlarla tutarsızlık göstermişlerdir. Bu tutarsızlıkların sebebi olarak, birinci konfigürasyonda olduğu gibi, oluşturulan modellere ait parametrelerin nümerik yöntemlerle, “MATLAB” yazılımına ait “fsolve” komutu kullanılarak) hesaplanması esnasında doğru köklere yakınsayamaması olduğu düşünülmektedir.

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tezde bir elastomer numunenin dinamik karakteristiği analitik olarak modellenmiştir. Bu kapsamda numunenin dinamik karakteristiğini veren kompleks katılık ifadesi geometri, yer değiştirme genliği ve kompleks Young modülünün fonksiyonu olarak türetilmiştir. Kompleks katılık ifadesinin bir değişkeni olan kompleks Young modülü ifadesi beş farklı viskoelastik model için frekansın fonksiyonu olarak ayrı ayrı çıkarılmış ve çıkarılan her bir Young modülü ifadesi için bir kompleks katılık ifadesi elde edilmiştir. Burada söz konusu viskoelastik modeller lineer yay ve lineer viskoz sönümleyici elemanların farklı ve sayı ve kombinasyonları ile oluşturulmuştur. Bu modeller iki parametrelili Maxwell, iki parametrelili Voigt, üç parametrelili genelleştirilmiş Maxwell, üç parametrelili genelleştirilmiş Voigt ve beş parametrelili genelleştirilmiş Voigt modelleridir. Modellerin doğrulanması amacı ile bir deney prosedürü uygulanmıştır. Deney prosedürü, hidrolik dinamik test yöntemi kullanılarak, aynı numunenin farklı şekillerde bağlanması ile oluşturulan iki farklı konfigürasyon için uygulanmıştır.

Elastomer numune üzerinde yapılan analitik ve deneysel çalışmalar için aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Frekansın artmasıyla depolama katılığı (K') ve sönüm katılığı (K'') artış göstermiştir ve bu sonuca göre elastomer numunenin çevrim başına sönümlendiği ve depoladığı enerji değerleri frekansla artmıştır. Bu sonuçlara göre numunenin davranışı beklentileri karşılamıştır.
- Ön yükleme miktarının artması elastomer numunenin depolama ve sönüm katılıklarını arttırmıştır. Buna göre elastomer numunenin davranışı, depolama katılığı için beklentileri karşılamış ancak sönüm katılığı için beklentilerin tersi sonuçlar vermiştir.
- Titreşim genliğinin artması elastomer malzemenin depolama ve sönüm katılıklarını, dolayısı ile rijitlik ve sönümleme değerlerini düşürmüştür.

- Analitik ve deneysel olarak elde edilen sönüm ve depolama katılıklarının karşılaştırılması sonucunda, Maxwell modellerinin aynı parametre sayısına sahip Voigt modellerine göre daha tutarlı sonuçlar verdiği görülmüştür.
- Analitik çalışma sonucunda, oluşturulan modellere ait histerezis döngüleri elde edilmiş ve deneysel olarak elde edilen döngülerle karşılaştırılmıştır. Analitik yolla elde edilen histerezis döngülerinin, numunenin nonlinear davranışını ve yüksek frekanslı titreşim bileşenlerini simüle edemediği görülmüştür. Ancak, özellikle nonlinear davranışın daha az baskın olduğu yüksek ön yükleme koşullarındaki testler için, viskoelastik modellerin deneysel sonuçlarla tutarlı histerezis döngüleri oluşturabildikleri görülmüştür.

Bir elastomer malzemenin dinamik karakteristiği frekans, yer değiştirme genliği ve geometrinin fonksiyonu olarak modellenmiştir. Çıkarılan modellerin doğrulanması amacıyla bir deney prosedürü uygulanmıştır. Deney prosedürünün daha geniş frekans bandında gerçekleştirilmesi ve deney yönteminin bu şartı sağlayacak şekilde değiştirilmesinin modellerin doğrulanması için daha hassas sonuçlar vereceği düşünülmektedir.

Deneysel çalışma sonucunda ön yüklemenin dinamik davranış üzerinde ciddi etkileri olduğu görülmüştür. Buna göre çıkarılan modellerin, ön yükleme durumunu da değişken olarak içine alacak şekilde genişletilmesi gelecek çalışmalar için önemli görülmektedir.

Lineer yay ve lineer viskoz sönümleyici elemanlar ile oluşturulan modellerin, özellikle düşük ön yükleme koşullarında, numunenin nonlinear davranışını simüle edemediği görülmüştür. Buna göre nonlinear davranışın simüle edilebilmesi için, nonlinear elemanlı modeller oluşturulabilir.

Tez kapsamında gerçekleřtirilen deneysel çalıřmaların dūřuk frekanslarda ve kısa sūreler için yūrūtūlmesi sebebiyle elastomer numunenin sıcaklıęı çalıřmaya baęlı olarak deęiřmemiřtir. Ancak, yūksek frekanslardaki ve uzun sūreli çalıřmalarda sıcaklıęın önemli lūde deęiřkenlik göstereceği bilinmektedir. Buna göre gerçek çalıřma kořullarının daha doęru řekilde simūle edilebilmesi için sıcaklık deęiřiminin fonksiyonu olan modellerin geliřtirilmesi gerekmektedir.

KAYNAKLAR

1. Zielnica, J., Zilksowski, A., Cempel, C., “Non-Linear Vibroisolation pads Design, Numerical Fem analysis and Introductory Experimental Investigations”, *Mechanical Sysem and Signal Processing*, 17(2):409-422 (2003).
2. Kunz, D.L., “Letters to the Editor: Elastomer Modelling for Use in Predicting Helicopter Lag Damper Behavior”, *Journal of Sound and Vibration*, 226(3): 585-594 (1999).
3. Brackbill, C.R., “Helicopter Rotor Aeroelastic Analysis Using a Refined Elastomeric Damper Model”, Doktora Tezi, *The Pennsylvania State University Department of Aerospace Engineering*, The United States of America, 13-76 (2000).
4. Aktürk, N., “Dynamics of a Rigid Shaft Supported by Angular Contact Ball Bearings”, Doktora Tezi, *Imperial College of Science, Technology and Medicine University of London*, Londra, 139-170, 277-278 (1993).
5. Aktürk, N., Gohar, R., “Damping the Vibrations of a Rigid Shaft Supported by Ball Bearings by Means of External Elastomeric O-ring Dampers”, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 208:183-190 (1994).
6. Lapcik, L., Augustin, P., Pistek, A., “Measurement of the Dynamic Stiffness of Recycled Rubber Based Railway Track Mats According to the DB-TL 918.071 Standard”, *Applied Acoustics*, 62:1123-1128 (2001).
7. Smalley, A.J., Tessarzik J.M., Badgley, R.H., “Testing for Material Dynamic Properties”, *Mechanical Technology Inc. Latham*, New York, 117-141 (1975).
8. Kolukısa, G., “Elastomerik Malzemelerin Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 1-75 (2005).
9. Ciesielski, A., “An Introduction to Rubber Technology”, *Rapra Technology Limited*, United Kingdom, 1-44 (1999).
10. McCrum, N.G., Buckley, C.P., Bucknall, C.B., “Principles of Polymer Engineering”, *Oxford Science Publications*, Great Britain, 1-9, 72-122, 323-331 (1988).
11. Nashif, A.D., Jones, D.I.G., Henderson, J.P., “Vibration Damping”, *John Willey & Sons*, The United States of America, 88-145 (1985).

12. Chiang, T., Tessarzik, J.M., Badgley, R.H., "Development of Procedures for Calculating Stiffness and Damping Properties of Elastomers in Engineering Applications. Part I: Verification of Basic Methods," **NASA Contractor Report No. CR-120965**, The United States of America, 5-49 (1972).
13. Gupta, P.K., Tessarzik, J.M., Cziglenyi, L., "Development of Procedures for Calculating Stiffness and Damping Properties of Elastomers in Engineering Applications. Part II: Elastomer Characteristics at Constant Temperature," **NASA Contractor Report No. CR-134704**, The United States of America, 6-65 (1974).
14. Smalley, A.J., Tessarzik, J.M., "Development of Procedures for Calculating Stiffness and Damping Properties of Elastomers in Engineering Applications, Part III: The Effect of Temperature, Dissipation Level and Geometry", **NASA Contractor Report No. CR-134939**, The United States of America, 11-53, 60-106 (1975).
15. Shaw, M.T., MacKnight, W.J., "Introduction to Polymer Viscoelasticity", **Wiley-Interscience**, The United States of America, 7-69, 165-209 (2005).
16. Ercan, Y., "Mühendislik Sistemlerinin Modellenmesi ve Dinamiği", **Literatür Yayıncılık**, İstanbul, 7-34 (2003).
17. Ferry, J.D., "Viscoelastic Properties of Polymers", **John Willey & Sons**, The United States of America, 1-55 (1980).
18. Internet: Alpha Testing Systems, "The Dynamic Testing of Elastomers", <http://www.alphatestingsystems.com/downloads/dynamic-testing.pdf> (2012).
19. Li, W.H., Yao, G.Z., Chen, G., Yeo, S.H., Yap, F.F., "Testing and Steady State Modelling of a Linear MR Damper Under Sinusoidal Loading", **Smart Mater. Struct.**, 9: 95-102 (2000).
20. Jones, D.I.G., "Handbook of Viscoelastic Vibration Damping", **John Willey & Sons**, The United States of America, 39-73 (2001).
21. Darlow, M., Zorzi, E., "Mechanical Design Handbook for Elastomers", **NASA Contractor Report 3423**, The United States of America, 5-137, 156-203 (1981).
22. Gandhi, F., Chopra, I., "A Time-Domain Non-linear Viscoelastic Damper Model", **Smart Mater. Struct.**, 5: 517-528 (1996).
23. Cardillo, R.M., "Dynamic Testing of Elastomer Mountings", **J. Appl. Poly. Sc.**, 8: 53-71 (1964).
24. Gent, A.N., Lindley, P.B., "The Compression of Bonded Rubber Blocks", **Proc. Inst. Mech. Engrs.**, 173(3): 111-117 (1959).

25. Muravyov, A., "Discrete Dynamic Systems and Vibration Analysis of an Engine Supported on Viscoelastic Mounts", Doktora Tezi, ***The University of British Columbia Department of Mechanical Engineering***, Canada, 2-37, 57-68 (1997).
26. Lin, T.R., Farag, N.H., Pan, J., "Evaluation of Frequency Dependent Rubber Mount Stiffness and Damping by Impact Test", ***Applied Acoustics***, 66: 829-844 (2005).
27. Ooi, L.E., Ripin, Z.M., "Dynamic Stiffness and Loss Factor Measurement of Engine Rubber Mount by Impact Test", ***Materials and Design***, 32: 1880-1887 (2011).
28. Nakamura, A., Kasuga, A., Arai, H., "The Effects of Mechanical Dampers on Stay Cables with High-Damping Rubber", ***Construction and Building Materials***, 12: 115-123 (1998).
29. Park, J., Koh, H.M., Kim, J.K., "Seismic Isolation of Pool-Type Tanks for the Storage of Nuclear Spent Fuel Assamblies", ***Nuclear Engineering and Design***, 199: 143-154 (2000).
30. Liang, B., Shishu, X., Jiexiang, T., "Wind Effects on Habitability of Base Isolated Buildings", ***Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics***, 90: 1951-1958 (2002).
31. Wu, Y.M., Samali, B., "Shake Table Testing of a Base Isolated Model", ***Engineering Structures***, 24: 1203-1215 (2002).
32. El-Bassiouny, A.F., "Effects of Non-Linearities in Elastomeric Material Dampers on Torsional Oscillation Control", ***Elsevier Applied Mathematics and Computation***, 162: 835-854 (2005).
33. Matthew, F., Kluesener, P.E., "Comparison of Damping Material Properties by Various Test Methods", ***University of Daytona Research Institute Dayton, Ohio***, AB1-AB22 (1986).
34. Petrone, F., Lacagnina, M., Scionti, M., "Dynamic Characterization of Elastomers and Identification with Rheological Models", ***Journal of Sound and Vibration***, 271: 339-363 (2004).
35. Arifoğlu, U., "MATLAB 7.6 Simulink ve Mühendislik Uygulamaları", ***Alfa Yayıncılık***, 9.1-9.42 (2008).
36. Chapra, S.C., Canale, R.P., "Numerical Methods for Engineers: With Programming and Software Applications", ***WCB McGraw-Hill***, Singapore, 162-165, 259-263 (1998).

EKLER

EK-1. Numuneye Ait Dökümanlar

 ÖZDEKAN KAUÇUK SANAYİİ	KAUÇUK LABORATUARI TEST RAPORU		
Sayfa No:1/1			
ÜRETİM YAPILAN FİRMA: ÜRÜN ADI : NUMUNE KODU (ÖLÇÜ) : RAPOR TARİHİ : RAPOR NO : Laboratuvarımıza gelen yukarıda açık ismi belirtilen numunede istediğiniz doğrultuda SERTLİK,KOPMA DAYANIMI,KOPMA UZAMASI TESLERİ yapılmış olup sonuçlar aşağıda belirtilmiştir. Not: Bu partide 1 adet test plaka kullanılmıştır.			
<u>TESTLER</u>	<u>TEST MODU</u>	<u>TEST SONUÇLARI</u>	<u>SONUÇLAR</u>
SERTLİK KOPMA DAYANIMI	ASTM D 2240 ASTM D 412	ShA 58,62,63 % 572,1-63,1-642,7	
KOPMA UZAMASI	KALIP C ASTM D 412	N/mm ² 18,2-16,2-16,3	
TEST SONUÇLARI:Numune,yapılan testlerde yukarıdaki sonuçlar gözlemlenmiştir.			
<u>DENEY YAPANLAR</u>	<u>KONTROL EDEN</u>	<u>ONAY</u>	
AÇIKLAMALAR: 1.ASLININ AYNIDIR onayını taşımayan kopyalar GEÇERSİZDİR. 2.Bu rapor 1 (bir) sayfa olarak düzenlenmiştir. 3.sonuçlar sadece yukarıda kodu geçen ürünler için geçerlidir.			
ÖZDEKAN KAUÇUK SANAYİİ Ostim Organize Sanayi Bölgesi 29.Sk.No:2 ANKARA			
Telefon:03123540644-3852232 Faks:03123543037 info@ozdekankaucuk.com www.ozdekankaucuk.com			

EK-1. (Devam) Numuneye Ait Dokümanlar



ÖZDEKAN
KAUÇUK SANAYİİ

29.Sokak No:2 06370 Ostim ANKARA-TÜRKİYE
Web : www.ozdekankaucuk.com
E-mail: info@ozdekankaucuk.com
Tel: +90 312 3540644 - 3852232
Fax: +90 312 3543037

ELASTOMER KÖPRÜ MESNET LASTİKLERİ
NEOPRENE BRIDGE BEARINGS

Tanım _____ :

Neopren yatak blokları kalıpta dökülerek veya yüksek yoğunluklu plakadan kesilerek imal edilen neopren sentetik kauçuk malzemedir.

Kullanım _____ :

Ekonomik verimli yatak plakaları olarak, köprü ve inşaatlarda ön gerilmeli beton veya çelik kirişlerde kullanılır. Neopren bloklar kirişten alt yapıya yükün uniform ve yumuşak hareketine izin verir ve yük altında kirişin sapmasına göre yatakta dönme sağlar. Temel kuvvetler nedeniyle sebep olan kirişin enine ve boyuna hareketini kolaylaştırır. Neopren blok ısı genleşme ve hareketli parçalara sahip değildir ve termal nedenlerden kaynaklanan genleşme ve daralma neopren blok tarafından söğürülür. Blok ile kiriş arasında herhangi bir kayma hareketi olmaz.

SIKIŞMADA NEOPREN

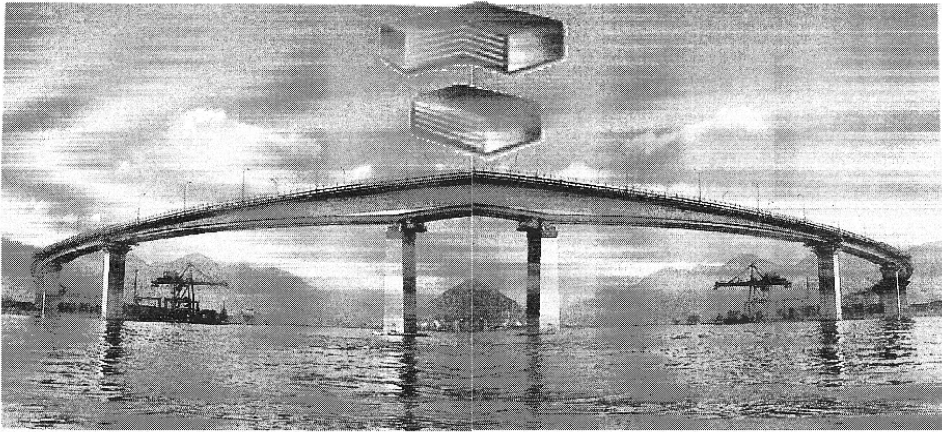
Sıkıştırılmalı çelik takviyeli neopren mesnetler

Malzeme _____ :

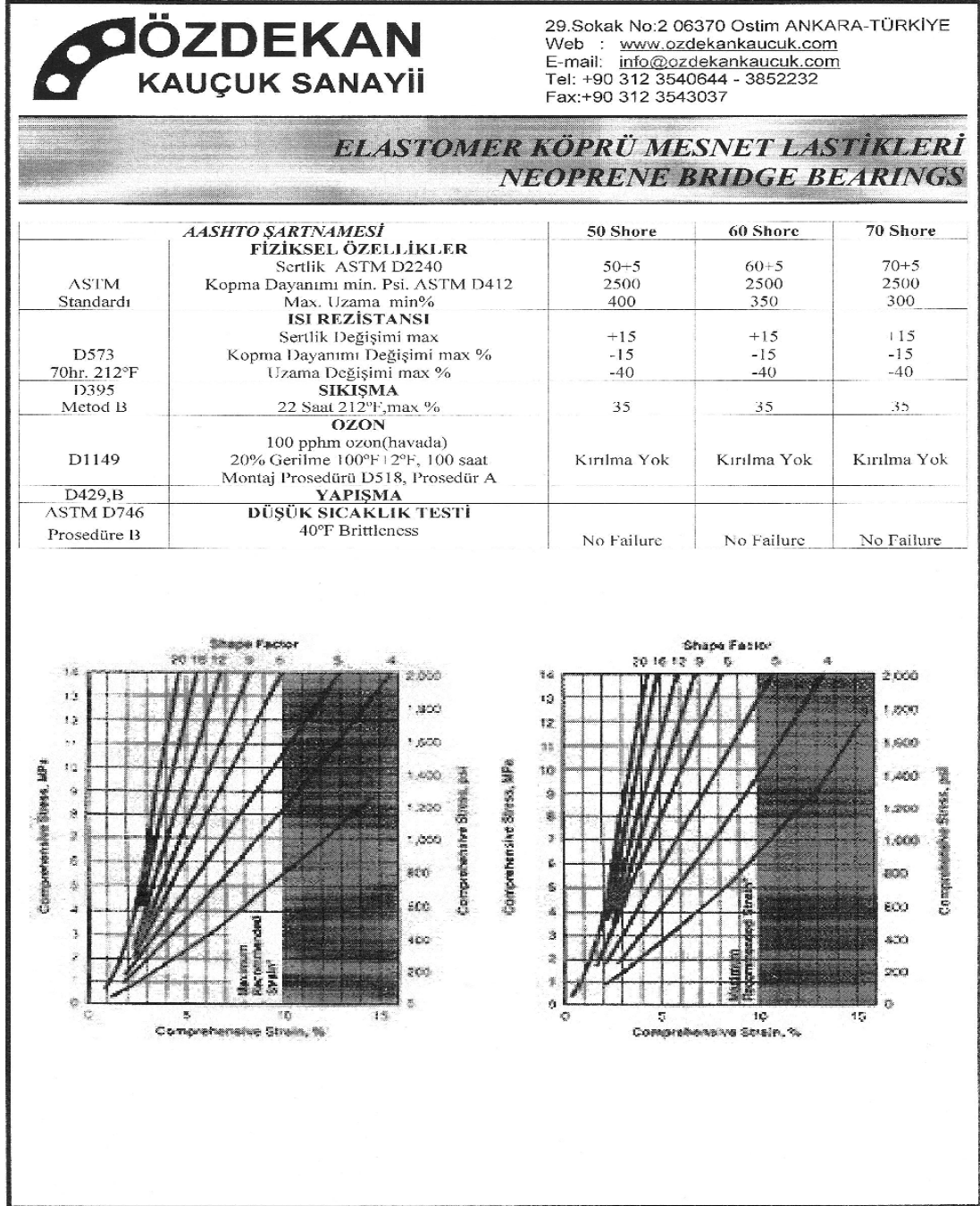
Elastomerik yataklama için malzeme özelliği AASHTO M 251 Standardındadır.

İmalat _____ :

Elastomer Mesnetler çelikte güçlendirilerek ayrıştırılmış elastomerik malzemenin çoklu yapraklarından oluşmuştur. Elastomerik tabakaları ayrıştıran çelik plakalar bütün yüzeylerde elastomer malzemeye vulkanize olarak tam birleşmiştir.



EK-1. (Devam) Numuneye Ait Dökümanlar



ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : KÖKSAL, Murat
 Uyuğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 06.03.1986 Samsun
 Medeni hali : Bekar
 Telefon : 0 (505) 685 73 57
 e-mail : kkslmurat@gmail.com

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek Lisans	Gazi Üniversitesi /Makina Mühendisliği Bölümü	2012
Lisans	Gazi Üniversitesi/Makina Mühendisliği Bölümü	2009
Lise	Yenimahalle Alparsalan Yabancı Dil Ağırlıklı Lisesi	2004

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2010-	MEGE Teknik Ltd.	Tasarım Mühendisi

Bilgisayar Bilgileri

Microsoft Office Programları, MATLAB-Simulink, Fortran, CATIA, ProEngineer, Autocad

Yabancı Dil

İngilizce

Hobiler

Fotoğraf çekmek, model uçak/otomobil yapmak, yüzmek