



**DOKUMA KUMAŞLARIN VİSKOELASTİK
ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

Barış HASÇELİK



T.C.
ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DOKUMA KUMAŞLARIN VİSKOELASTİK ÖZELLİKLERİNİN
ARAŞTIRILMASI**

Barış HASÇELİK

Prof. Dr. Recep EREN
(Danışman)

DOKTORA TEZİ
TEKSTİL MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2015
Her Hakkı Saklıdır

TEZ ONAYI

Barış HASÇELİK tarafından hazırlanan “Dokuma Kumaşların Viskoelastik Özelliklerinin Araştırılması” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği/oy çokluğu ile Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tekstil Mühendisliği Anabilim Dalı’nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. Recep EREN

Başkan : Unvanı, Adı Soyadı

İmza

Üye : Prof. Dr. Halil Rifat ALPAY
U.Ü. Mühendislik Fakültesi,
Tekstil Mühendisliği Anabilim Dalı

İmza

Üye : Prof. Dr. Ferruh ÖZTÜRK
U.Ü. Mühendislik Fakültesi,
Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı

İmza

Üye : Prof. Dr. Cevza CANDAN
İTÜ. Tekstil Teknolojisi ve Tasarım Fakültesi,,
Tekstil Mühendisliği Anabilim Dalı

İmza

Üye : Prof.Dr. Binnaz KAPLANGİRAY
U.Ü. Mühendislik Fakültesi,
Tekstil Mühendisliği Anabilim Dalı

İmza

Yukarıdaki sonucu onaylarım

Prof. Dr. Ali Osman DEMİR
Enstitü Müdürü

...../...../.....

BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM

U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumun da ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

09/09/2015

Barış HASÇELİK

ÖZET

Doktora Tezi

DOKUMA KUMAŞLARIN VİSKOELASTİK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Barış HASÇELİK

Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Tekstil Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Recep EREN

Tezin amacı viskoelastik teori kullanılarak dokuma kumaşların mekanik davranışını belirlemektir. Tez çalışması kapsamında öncelikle, lineer viskoelastik kavramlar ve viskoelastik değişkenlerin ölçümü incelenmiştir. Dokuma kumaşların mekanik özelliklerinin ölçümü için elektromekanik universal bir test cihazı tasarlanmış ve üretilmiştir. Test cihazının çalıştırılması ve test rutinlerinin gerçekleştirilmesi için gerekli algoritmalar Matlab programında Data Acquisition Toolbox kullanılarak geliştirilmiştir. Test rutini sonucunda elde edilen sinyal verileri, Prony serisinde değerlendirilmiş ve kumaşların viskoelastik davranışı belirlenmiştir. Tez çalışması kapsamında, döşemelik dokuma kumaşların viskoelastik karakteristikleri verilen denklemler ile incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Viskoelastik, dokuma, cihaz tasarımı, mekatronik

2015, x + 196 sayfa.

ABSTRACT

PhD Thesis

INVESTIGATION VISCOELASTIC PROPERTIES OF WOVEN FABRICS

Barış HASÇELİK

Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Textile Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Recep EREN

The aim of this dissertation is to determine the mechanical behavior of woven fabrics by using viscoelastic theory. In the scope of this, linear viscoelastic concepts and measurement of viscoelastic variables are investigated. For the measurement of mechanical properties of woven fabrics, electromechanical universal tensile testing system is designed and built. The algorithms needed to run test instrument and the routine are developed in the Matlab using the Data Acquisition Toolbox. Signal data from the test is evaluated with Prony series, and then the viscoelastic behavior of woven fabrics is obtained. The viscoelastic properties of upholstery woven fabrics are modelled by experimental data.

Key words: Viscoelastic, woven, design, instrument, mechatronic,

2015, x +196 pages.

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Tekstilin geleneksel üretimi olarak görülen ve neredeyse teknolojik gelişimini tamamladığı düşünülen, dokuma teknolojisi alanında daha ne yapılabilir sorusu karşısında; kuramsal olarak geliştirilen fiziksel olguların nasıl inceleneceği, araştırma alanına uygun cihazların nasıl tasarlanacağı ve cihazlar ile bilgisayar arasındaki haberleşme tekniklerinin nasıl kullanılacağı konularındaki eşsiz deneyimlerini benimle paylaşan ve bu alanda yetişmemi sağlayan, tüm doktora çalışmam süresince ve bu tezin ortaya çıkmasında, desteğini her zaman yanımda hissettiğim doktora danışmanım sayın Prof. Dr. Recep Eren'e, tekstilde mühendislik yaklaşımını örnek aldığım ve değerli fikirlerine başvurduğum sayın Prof. Dr. Halil Rifat Alpay'a, tez çalışmasıyla ilgili görüş ve önerileriyle katkı sağlayan sayın Prof. Dr. Ferruh Öztürk'e teşekkür ederim.

Tezimle ilgili konularda görüşlerine başvurduğum çalışma arkadaşlarım Araş. Gör. Dr. Serkan Tezel, Araş. Gör. Dr. Fatih Suvani, Araş. Gör. Mahmut Oğuz Kesimci ve Araş. Gör. Özge Çelik'e teşekkür ederim. Elektrik-Elektronik devreler hakkında bilgilerini paylaşan Öğr. Gör. Dr. Okan Süle Öğr. Gör. Dr. İsmail Tekin ve Araş. Gör. Dr. Metin Hatun'a ayrıca teşekkür ederim.

Tezin kapsamında yürütülen, KUAP(M)-201321 nolu Tekstil Malzemelerinin Mekanik Özelliklerinin Analizi için Üiversal Bir Test Cihazının Tasarımı ve İmalatı isimli Küçük Ölçekli Uygulamalı Araştırma Projesine maddi destekte bulunan ve bu çalışmanın ortaya çıkmasını sağlayan ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ REKTÖRLÜĞÜ-BAP'a teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Son olarak desteğiyle her zaman yanımda olan aileme teşekkürlerimi sunarım.

Barış HASÇELİK
09/09/2015

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER	iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	v
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
1. GİRİŞ	1
2. KURAMSAL TEMELLER	12
2.1. Mekanik Benzeşim Yöntemi.....	23
2.1.1. Maxwell modeli	24
2.1.2. Kelvin-Voigt modeli	26
2.1.3. Standart katı model	29
2.1.4. Genelleştirilmiş Maxwell ve Kelvin-Voigt katı modelleri.....	30
2.1.5. Genel diferansiyel modelin Prony serisi ile çözümü.....	33
2.2. Test Cihazları	38
3. Materyal VE Yöntem	43
3.1. Materyal	43
3.2. Yöntem.....	45
3.2.1. Test cihazı tasarımı	45
3.2.2. Kumaşlar üzerinde yapılan testler.....	65
3.2.3. Deneysel sonuçların matematiksel analiz yöntemi	66
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	78
4.1. Geliştirilen Cihazın Test Edilmesi	78
4.2. Viskoelastik Davranışın Matematiksel Analizi.....	85
4.3. Kumaş Numunelerinin Viskoelastik Davranışının Analizi.....	109
4.3.1. Sabit uzama altında gevşeme test (relaksasyon) sonuçları ve analizi	110
4.3.2. Sabit gerilme altında uzama (sürünme) test sonuçları	152
4.3.3. Dinamik zorlama test sonuçları.....	155
5. KAYNAKLAR	162
EKLER.....	165
EK 1	166
EK 2	167
EK 3	171
EK 4	176
EK 5	182
EK 6	187
EK 7	189
EK 8	190
EK 9	192
EK 10	194
ÖZGEÇMİŞ	196

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
ε_0	Ani uzama ve başlangıç uzama değeri
σ_0	Ani gerilme ve başlangıç gerilme değeri
ε	Birim uzama
e	Doğal logaritma tabanı
E	Elastisite modülü
E_∞	Elastisite modülü (sınır)
$E(0)$	Başlangıç modülü
σ	Gerilme
$\sigma(t)$	Gerilme azalması
$\sigma(s)$	Gerilme azalması (Laplace formu)
$E(t)$	Gevşeme modülü
$E(s)$	Gevşeme modülü (Laplace formu)
τ	Gevşeme veya gecikme süresi
$J(t)$	Komplians
$J(s)$	Komplians (Laplace formu)
J_∞	Komplians (sınır)
s	Laplace değişkeni
$\dot{\varepsilon}$	Sabit hızda uzama
σ_0	Sabit gerilme
ε_∞	Sınır birim uzama
$\varepsilon(t)$	Sürünme
$\varepsilon(s)$	Sürünme (Laplace formu)
μ	Viskoz katsayısı
t	Zaman
λ_j	Zaman sabiti
A_j	Sabit katsayı

Kısaltmalar	Açıklama
ATA	Automated Tensile Analyzer
CRE	Sabit Numune Uzama Hız Prensibi
DAQ	Veri Toplama Kartı
SVD	Tekil Değer Ayırıştırma

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. Bir viskoelastik piramidin zamana bağlı deformasyonu (Lakes 2009)	12
Şekil 2.2. Viskoelastik ve ideal malzemelerin genel histeriz eğrisi (Lakes 2009).....	13
Şekil 2.3. Sürünme davranışı (Hosford 2005).....	13
Şekil 2.4. Gerilme azalması (Hosford 2005).....	14
Şekil 2.5. Lineer viskoelastik davranış (Hosford 2005).....	15
Şekil 2.6. Değişken gerilme grafiği (Bower 2002)	17
Şekil 2.7. Bir süre uygulanan sabit gerilme etkisindeki sürünme davranışı (Bower 2002)	18
Şekil 2.8. Yay elemanın karakteristiği	23
Şekil 2.9. Sönümleyici elemanın karakteristiği.....	23
Şekil 2.10. Mekanik bir benzeşim modeli.....	24
Şekil 2.11. Maxwell modeli	25
Şekil 2.12. Maxwell modeli ve ilişkilerin grafik gösterimi	26
Şekil 2.13. Kelvin-Voigt modeli	27
Şekil 2.14. Kelvin Voigt modeli ve ilişkiler	28
Şekil 2.15. Standart katı model	29
Şekil 2.16. Genelleştirilmiş Kelvin-Voigt modeli	31
Şekil 2.17. Genelleştirilmiş Maxwell modeli.....	32
Şekil 2.18. Sürünme test cihazının görünüşü (Anonim 2008a)	39
Şekil 2.19. Gerilme azalması test cihazının ölçme elemanı (Anonim 2005).....	40
Şekil 2.20. Gerilme azalması test cihazı (Anonim 2005).....	40
Şekil 2.21. Elektromekanik üniversal test cihazı (Anonim 2015)	41
Şekil 2.22. Bir üniversal test cihazı ve deney şartlarını denetleyen kontrol sisteminin mantığı (Davis 2004'den değiştirilerek alınmıştır.)	42
Şekil 3.1. Geliştirilen üniversal test cihazı.....	44
Şekil 3.2. Tasarlanan test cihazının temel üniteleri.....	47
Şekil 3.3. Sabit ve hareketli çeneler	51
Şekil 3.4. Sabit çeneye yük hücresinin montajı	52
Şekil 3.5. Cihazın elektronik elemanları ve sinyal akışı	53
Şekil 3.6. Kalibrasyonda elektronik el tartısının kullanımı.....	56
Şekil 3.7. Cihazın kalibrasyon eğrisi.....	56
Şekil 3.8. Yazılımın basitleştirilmiş algoritması	58
Şekil 3.9. Veri okuma algoritması	59
Şekil 3.10. Kuvvet uzama testi için algoritma	60
Şekil 3.11. Gerilme gevşemesi testi için algoritma.....	61
Şekil 3.12. Sürünme testi algoritması	62
Şekil 3.13. Dinamik zorlama testi algoritması	64
Şekil 3.14. Gürültü sinyalinin dijital filtre kullanılarak uzaklaştırılması.....	73
Şekil 3.15. Tek basamaklı ani zorlama (Sorvari ve Malinen 2006).....	75
Şekil 4.1. Perdelik kumaşta test sonuçlarının karşılaştırılması	79
Şekil 4.2. Perdelik kumaşta düzeltme katsayısının etkisi	80
Şekil 4.3. Çarşaflık kumaşının test sonuçlarının karşılaştırılması	80
Şekil 4.4. Döşemelik-4 kumaşının test sonuçlarının karşılaştırılması	81

Şekil 4.5. Döşemelik-5 kumaşının test sonuçlarının karşılaştırılması	81
Şekil 4.6. Döşemelik-6 kumaşının test sonuçlarının karşılaştırılması	81
Şekil 4.7. Sürünme test sonuçları	82
Şekil 4.8. Kumaşlardaki gerginlik azalması	83
Şekil 4.9. Kumaşlardaki gerilme azalması	83
Şekil 4.10. Döşemelik-5 kumaşının dinamik zorlama testi	84
Şekil 4.11. Doğal kauçuğun gerilme fonksiyonunun simülasyonu	86
Şekil 4.12. Zaman sabitleri için belirlenen köklerin yerleşimi	89
Şekil 4.13. Zaman sabitlerinin 10, 100 ve 1000 sütunlu Hankel matrisi ile bulunması ..	89
Şekil 4.14. Çizelge 4.4 için verilen 10, 100 ve 1000 sütunlu Hankel matrisi ile bulunan polinom fonksiyonunun kökleri	91
Şekil 4.15. Çizelge 4.4'te verilen 500 sütunlu Hankel çözümünün kökleri	91
Şekil 4.16. Çizelge 4.6 için verilen 10, 50 ve 100 sütunlu Hankel çözümünün kökleri ..	94
Şekil 4.17. Çizelge 4.7 için üç bölgede belirlenen polinom fonksiyonunun kökleri	96
Şekil 4.18. Çizelge 4.9 için üç bölgede belirlenen polinom fonksiyonunun kökleri	98
Şekil 4.19. Çizelge 4.10 için üç bölgede belirlenen polinom fonksiyonunun kökleri	99
Şekil 4.20. Çizelge 4.10 için üç bölgede belirlenen polinom fonksiyonunun kökleri	100
Şekil 4.21. Çizelge 4.11 için üç bölgede belirlenen polinom fonksiyonunun kökleri	101
Şekil 4.22. Denklem 4.2'nin simülasyon grafiği	104
Şekil 4.23. Denklem 4.3'ün simülasyon grafiği	105
Şekil 4.24. Gerilme azalması testinde görülen tipik bir gürültülü sinyal	106
Şekil 4.25. Gürültü sinyali eklenen doğal kauçuğun gerilme fonksiyonunun simülasyonu	107
Şekil 4.26. Viskoelastik davranışı incelenen kumaşların kuvvet uzama eğrisi	110
Şekil 4.27. Viskoelastik davranışı incelenen kumaşların gerilme uzama eğrisi	110
Şekil 4.28. Gerilme azalması 1 nolu grup	111
Şekil 4.29. Gerilme azalması 2 nolu grup	111
Şekil 4.30. Gerilme azalması 3 nolu grup	111
Şekil 4.31. Döşemelik-11: $y,t,12,1,0$ koşulunun belirlediği 3 terimli model	114
Şekil 4.32. Döşemelik-11: $y,t,50,1,0$ koşulunun belirlediği 4 terimli model	114
Şekil 4.33. Döşemelik-11: $y,t,500,1,0$ koşulunun belirlediği 5 terimli model	115
Şekil 4.34. Döşemelik-11: $y,t,1500,1,0$ koşulunun belirlediği 5 terimli en iyi model ..	115
Şekil 4.35. Döşemelik-11: $y,t,1500,1,0$ koşulunun belirlediği ve 5 terimli en iyi modelin simülasyonu	116
Şekil 4.36. Döşemelik-11: $y,t,10,0,1$ koşulunun belirlediği 2 terimli model	117
Şekil 4.37. Döşemelik-11: $y,t,100,0,1$ koşulunun belirlediği 4 terimli model	117
Şekil 4.38. Döşemelik-11: $y,t,2000,0,1$ koşulunun belirlediği ve 5 terimli en iyi model	118
Şekil 4.39. Döşemelik-11: $y,t,2000,0,1$ koşulunun belirlediği ve 5 terimli en iyi modelin simülasyonu	118
Şekil 4.40. Döşemelik-11: $y,t,10,0,0,1$ koşulunun belirlediği 1 terimli model	119
Şekil 4.41. Döşemelik-11: $y,t,100,0,0,1$ koşulunun belirlediği 2 terimli model	120
Şekil 4.42. Döşemelik-11: $y,t,1000,0,0,1$ koşulunun belirlediği ve 4 terimli en iyi model	120
Şekil 4.43. Döşemelik 11: $y,t,1500,0,0,1$ koşulunun ilk 20000 veri ile belirlediği 4 terimli model	121
Şekil 4.44. Döşemelik-11: $y,t,1000,0,0,1$ koşulunun belirlediği ve 4 terimli en iyi modelin simülasyonu	121

Şekil 4.45. Döşemelik-11: gerilme azalması davranışının incelendiği bölgedeki modülü	123
Şekil 4.46. Döşemelik-12: y,t,500,1.0 koşulunun belirlediği 5 terimli en iyi model...	127
Şekil 4.47. Döşemelik-12: en iyi 5 terimli modelin simülasyonu.....	127
Şekil 4.48. Döşemelik-12: gerilme azalması davranışının incelendiği bölgedeki modülü	128
Şekil 4.49. Döşemelik-13: y,t,500,1.0 koşulunun belirlediği 5 terimli en iyi model....	130
Şekil 4.50. Döşemelik-13: en iyi 5 terimli modelin simülasyonu.....	130
Şekil 4.51. Döşemelik-13: gerilme azalması davranışının incelendiği bölgedeki modülü	131
Şekil 4.52. Döşemelik-21: y,t,1700,1.0 koşulunun belirlediği 4 terimli en iyi model.	133
Şekil 4.53. Döşemelik-21: en iyi 4 terimli modelin simülasyonu.....	134
Şekil 4.54. Döşemelik-21: gerilme azalması davranışının incelendiği bölgedeki modülü	134
Şekil 4.55. Döşemelik-22: y,t,500,1.0 koşulunun belirlediği 5 terimli en iyi model...	136
Şekil 4.56. Döşemelik-22: en iyi 5 terimli modelin simülasyonu.....	137
Şekil 4.57. Döşemelik-22: gerilme azalması davranışının incelendiği bölgedeki modülü	137
Şekil 4.58. Döşemelik-23: y,t,1700,1.0 koşulunun belirlediği 4 terimli en iyi model.	139
Şekil 4.59. Döşemelik-23: en iyi 4 terimli modelin simülasyonu.....	140
Şekil 4.60. Döşemelik-23: gerilme azalması davranışının incelendiği bölgedeki modülü	140
Şekil 4.61. Döşemelik-31: y,t,500,1.0 koşulunun belirlediği 5 terimli, en iyi model..	143
Şekil 4.62. Döşemelik-31: en iyi 5 terimli modelin simülasyonu.....	143
Şekil 4.63. Döşemelik-31: gerilme azalması davranışının incelendiği bölgedeki modülü	144
Şekil 4.64. Döşemelik-32: y,t,1500,1.0 koşulunun belirlediği 5 terimli en iyi model.	146
Şekil 4.65. Döşemelik-32: 5 terimli en iyi modelin simülasyonu.....	146
Şekil 4.66. Döşemelik-32: gerilme azalması davranışının incelendiği bölgedeki modülü	147
Şekil 4.67. Döşemelik-33: y,t,1500,1.0 koşulunun belirlediği 5 terimli en iyi model.	149
Şekil 4.68. Döşemelik-33: en iyi 5 terimli modelin simülasyonu.....	149
Şekil 4.69. Döşemelik-33: gerilme azalması davranışının incelendiği bölgedeki modülü	150
Şekil 4.70. Sürünme 1 nolu grup.....	152
Şekil 4.71. Sürünme 2 nolu grup.....	153
Şekil 4.72. Sürünme 3 nolu grup.....	153
Şekil 4.73. Dinamik zorlama test rutinin çalışma mantığı	155
Şekil 4.74. Döşemelik 11: dinamik zorlama testi 5 tekrar	155
Şekil 4.75. Döşemelik 11: dinamik zorlama testi	156
Şekil 4.76. Döşemelik 21: dinamik zorlama testi 5 tekrar	156
Şekil 4.77. Döşemelik 31: dinamik zorlama testi 5 tekrar	157

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 3.1. Testlerde kullanılan dokuma kumaş yapıları	45
Çizelge 3.2. Servo motorun teknik özellikleri	49
Çizelge 3.3. Bilyeli vidanın teknik özellikleri	50
Çizelge 3.4. Seçilen yük hücrelerine ait teknik özellikler.....	51
Çizelge 3.5. Seçilen NI PCIe-6343 X serisi veri toplama kartının (DAQ) teknik özellikleri.....	53
Çizelge 4.1. Cihazın deneme testinde kullanılan kumaş tipleri	78
Çizelge 4.2. Döşemelik-5 kumaşının dinamik zorlama testinden elde edilen veriler	84
Çizelge 4.3. Gerilme fonksiyonun simülasyon değerleri	87
Çizelge 4.4. 0,001 s aralıkla simülasyonu yapılan sinyalin bileşenleri.....	88
Çizelge 4.5. 0,01 s'lik artışlar ile örneklenen simülasyon sinyalinin bileşenleri.....	90
Çizelge 4.6. 0,00001 s aralıkla simülasyonu yapılan sinyalin bileşenleri.....	93
Çizelge 4.7. 0,00001 s aralıkla simülasyonu yapılan sinyalin k=10 için üç bölgede bulunan bileşenleri	95
Çizelge 4.8. 0,00001 s aralıkla simülasyonu yapılan sinyalin k=50 için üç bölgede bulunan bileşenleri	97
Çizelge 4.9. 0,00001 s aralıkla simülasyonu yapılan sinyalin k=100 için üç bölgede bulunan bileşenleri	98
Çizelge 4.10. 0,00001 s aralıkla simülasyonu yapılan sinyalin k=500 için üç bölgede bulunan bileşenleri	100
Çizelge 4.11. 0,00001 s aralıkla simülasyonu yapılan sinyalin k=900 için üç bölgede bulunan bileşenleri	101
Çizelge 4.12. Çözümlerde elde edilmiş Prony terimleri ve sabit katsayılarındaki hata sınıflandırması.....	102
Çizelge 4.13. Modele ait olmayan hatalı değerler.....	103
Çizelge 4.14. Modele ait olmayan ama testi geçen değerler.....	103
Çizelge 4.15. Denklem 4.2'in gürültüsüz ve gürültülü sinyallerinde bulunan bileşenler	105
Çizelge 4.16. Denklem 4.3'ün gürültüsüz ve gürültülü sinyallerinde bulunan bileşenler	106
Çizelge 4.17. Gürültü sinyali eklenen doğal kauçuğun gerilme fonksiyonunda bulunan bileşenler	107
Çizelge 4.18. Test gruplarında gerilme azalmasının miktarı	112
Çizelge 4.19. 1790 verinin kullanıldığı Döşemelik -1'in gerilme azalması modelleri	113
Çizelge 4.20. 17900 verinin kullanıldığı Döşemelik-11'in gerilme azalması modelleri	116
Çizelge 4.21. 179000 verinin kullanıldığı Döşemelik 11'in gerilme azalması modelleri	119
Çizelge 4.22. 1790 verinin kullanıldığı Döşemelik-11'in gevşeme ve başlangıç modülleri	123
Çizelge 4.23. 17900 verinin kullanıldığı Döşemelik-11'in gevşeme ve başlangıç modülleri	124

Çizelge 4.24. 179000 verinin kullanıldığı Döşemelik-11'in gevşeme ve başlangıç modülleri	124
Çizelge 4.25. 1790 verinin kullanıldığı Döşemelik-11'in modül ve başlangıç modüllü	124
Çizelge 4.26. 17900 verinin kullanıldığı Döşemelik-11'in modül ve başlangıç modüllü	125
Çizelge 4.27. 179000 verinin kullanıldığı Döşemelik-11'in modül ve başlangıç modüllü	125
Çizelge 4.28. Döşemelik-12: gerilme azalması modelleri	126
Çizelge 4.29. Döşemelik-12: gevşeme ve başlangıç modülleri	128
Çizelge 4.30. Döşemelik-12: modül ve başlangıç modüllü	129
Çizelge 4.31. Döşemelik-13: gerilme azalması modelleri	129
Çizelge 4.32. Döşemelik-13: gevşeme ve başlangıç modülleri	131
Çizelge 4.33. Döşemelik-13: modül ve başlangıç modüllü	132
Çizelge 4.34. Döşemelik-21: gerilme azalması modelleri	133
Çizelge 4.35. Döşemelik-21: gevşeme ve başlangıç modülleri	135
Çizelge 4.36. Döşemelik-21: modül ve başlangıç modüllü	135
Çizelge 4.37. Döşemelik-22: gerilme azalması modelleri	136
Çizelge 4.38. Döşemelik-22: gevşeme ve başlangıç modülleri	138
Çizelge 4.39. Döşemelik-22: modül ve başlangıç modüllü	138
Çizelge 4.40. Döşemelik-23: gerilme azalması modelleri	139
Çizelge 4.41. Döşemelik-23: gevşeme ve başlangıç modülleri	141
Çizelge 4.42. Döşemelik-23: modül ve başlangıç modüllü	141
Çizelge 4.43. Döşemelik-31: gerilme azalması modelleri	142
Çizelge 4.44. Döşemelik-31: gevşeme ve başlangıç modülleri	144
Çizelge 4.45. Döşemelik-31: modül ve başlangıç modüllü	145
Çizelge 4.46. Döşemelik-32: gerilme azalması modelleri	145
Çizelge 4.47. Döşemelik-32: gevşeme ve başlangıç modülleri	147
Çizelge 4.48. Döşemelik-32: modül ve başlangıç modüllü	148
Çizelge 4.49. Döşemelik-33: gerilme azalması modelleri	148
Çizelge 4.50. Döşemelik-33: gevşeme ve başlangıç modülleri	150
Çizelge 4.51. Döşemelik-33: modül ve başlangıç modüllü	151
Çizelge 4.52. Test gruplarında 250 N sabit yük altında uzama miktarı	154

1. GİRİŞ

Tekstil ürünleri üretim ve kullanım aşamaları esnasında maruz kaldıkları uzama ve yüklemelerden dolayı, mekanik özellikleri önemli ölçüde etkilenmektedir. Malzemelerin mekanik özelliklerinin istenen fonksiyonu ve kalite şartlarını sağlayıp sağlayamadıkları gerilme deneyleri ile test edilir. Bu açıdan; tekstil ürünlerinin elastik, plastik ve viskoelastik davranışlarının belirlenmesi pratik anlamda da büyük önem arz etmektedir.

Malzemelerin maruz kaldıkları kuvvetlere karşı gösterdikleri uzama davranışları, mekanik özellikler olarak nitelendirilir. Yüklenen mekanik kuvvetin malzemeye olan etkisi ve malzemenin buna karşı davranışı, gerilme birim uzama eğrisi ile açıklanabilmektedir. Gerilme birim uzama eğrilerinin farklı rejimleri ve malzemenin mekanik davranışını tanımlayan karakteristik verileri; mukavemet, rijitlik, yorulma, elastiklik, plastiklik ve viskoelastiklik gibi kavramlar ile açıklanır.

Malzemelerin mekanik davranışını açıklamak için ideal katı ve ideal akışkan kavramlarından yararlanılmaktadır. Katılar küçük deformasyonlarında, Hook yasası olarak bilinen elastik davranışa sahiptir. Sıvılar ise akış olarak adlandırılan zamana bağlı sürekli deformasyona uğramaları nedeniyle plastik davranış sergilerler. Hook'un elastik katı ve Newton'un viskoz akışkan öngörülerinin dışında kalan malzeme özelliklerinin keşfi oldukça uzun zaman almıştır. Wilhelm Weber'in 1835'de ipek ipliklerinin mekanik özellikleri ile ilgili araştırması, katıların mekanik davranışının viskoz bileşenlere sahip olabildiğini göstermiştir. 1867'de ise akışkan tanımına James Clerk Maxwell, elastik özellikleri de katmaktadır (Marques ve Creus 2012). Gerçekte de malzemelerin deformasyonu sırasında, elastik katı ve viskoz akışkan davranışı birlikte gözlenir. Viskoelastisite; katıların elastik katı ve viskoz akışkan davranışlarının birlikte gözlemlendiği malzemelerin mekanik davranış biçimini açıklamaktadır.

Lifler, tekstil ürünlerini oluşturan en temel yapı olmaları nedeniyle, tekstil alanında mekanik davranışları en fazla incelenen malzemelerdir. Liflerin gerilme ve uzama özellikleri çeşitli test yöntemleri ile kolaylıkla ölçülebilmektedir. Ancak, elde edilen verilerin değerlendirilmesi aşamasında belirli güçlükler bulunmaktadır. Liflerin gerçek mekanik davranışı; elastik olmayan, nonlinear ve zamana bağımlı fonksiyonel bir ilişki

içermektedir. Gerilme, liflerin önceki mekanik geçmişine ve çevre şartlarına da bağımlı olmak zorundadır ve asla uzamaya bağı tek değişkenli bir fonksiyon ile temsil edilemez (Chen 2010).

Temel matematiksel ilişkiler ile bu ifade daha iyi açıklanabilir.

Elastik malzemeler için Hook yasası ($\sigma = E\varepsilon$), gerilme ve uzama arasındaki ilişkiyi tanımlar. Eşitlikteki orantı sabiti E , Young modülü ya da elastisite modülü olarak adlandırılır. Elastik malzemeler için Hook yasası lineer ve her zaman (kararlı hal denklemi) geçerli bir tersinir ilişkiyi açıklamaktadır. Lineer viskoelastik malzemeler için elastisite modülü artık sabit değildir (Söderström ve Rensfelt 2011). Bu yüzden Hook yasasının yerine $\sigma(t) = E(t)\varepsilon_0$ denklemi ile ifade edilen zamana bağımlı geçiş denkleminin (dinamik) kullanılması gerekli olmaktadır. Bu yaklaşım elastik teori ile viskoelastik teori arasındaki en temel ayrımı vermektedir. Elastisite teorisinden farklı olarak viskoelastik davranışı açıklamak için kullanılan bağıntılarda, zaman en önemli parametredir ve bağıntılarda açık bir şekilde ifade edilmektedir. Bu anlamda Yunan filozofu Heraklitus'un "Herşey akar, hiçbir şey sabit değildir." önermesi, viskoelastik katılar için de geçerlidir. Bu sebeple tekstil malzemelerinin viskoelastik davranışı, zamana bağı mekanik davranış (Hockenberger 2004) ya da zamanın etkisi (Morton ve Hearle 2008) olarak tanımlanmaktadır.

Aşağıda viskoelastik malzemelerin özellikleri ile ilgili gözlemler verilmektedir (Lakes 2009).

- 1- Sabit bir gerginlik altında, zamanla malzemenin uzama değerinde artış gözlenir (Sürünme-creep).
- 2- Sabit bir uzamada, zamanla malzemenin gerilme değerinde azalma olur (Gerilme azalması- relaxation).
- 3- Malzemelerin rijitliği, yükleme hızı ve uzamaya bağıdır.
- 4- Zorlama kaldırıldığında, zamana bağı malzeme boyunda kısalma gözlemlenir (toparlanma-recovery).

5- Periyodik zorlamalarda ise histeriz davranışı gözlemlenir ve mekanik enerjinin bir kısmı kaybolur.

6- Viskoelastik malzemeler ses dalgalarını sönümler.

Belirtilen viskoelastik malzeme özellikleri, dokuma kumaşların materyal olarak seçildiği pek çok bilimsel çalışmada inceleme konusu olmuştur. Bu nedenle dokuma kumaşlar ve diğer tekstil ürünleri viskoelastik özellikler taşıyan bir malzeme olarak tanımlanabilir.

Temel bilimlerde bir olguya sebep olan değişkenleri belirlemek ve değişkenlerin değişimini gözlemleyerek, araştırılan olgu üzerinde nasıl bir etkisi olduğunu incelemek analitik yöntemlerin temel yaklaşımıdır. Yirminci yüzyılın başından itibaren tekstil araştırmacıları, lif topluluklarının matematiksel modelleri¹ için yoğun biçimde analitik çözümler geliştirdiler. Tekstil malzemeleri; viskoelastik özelliklere sahip, esnek, anisotropik, düzensiz ve boşluklu bir yapı olarak düşünüldüğünde, ayrıca tekstil malzemelerinin lineer yoğunluğu ile hesaplanan spesifik değerlerinin değişken olmasından dolayı mekanik davranışın incelenmesi (Okur 2002) ve modellenmesi oldukça zordur. Temel bilimlerde ve diğer teknik dallarda elde edilen başarılı sonuçlar ile karşılaştırıldığında analitik yöntemler, lif topluluklarının özel yapıları nedeniyle beklenen düzeyde tekstil teknoloji ve bilimlerine katkı sağlayamamaktadır. Bu durumu, Marschik, “İplik eğirme ve dokuma işlemleri sırasında karşılaştığımız olguların açıklanması ve bu olguların teorik incelemelerinin neredeyse imkânsız olduğu” sözleri ile belirtmektedir (Neckar ve İbrahim 2003).

Tekstil yapılarının viskoelastik davranışı ile ilgili çalışmalar incelendiğinde; mekanik davranışın zamana ve çevre şartlarına bağlı değişiminin araştırıldığı ve tekstil yapısının davranış üzerindeki etkilerinin incelendiği görülmektedir. Bu anlamda tekstil malzemelerinin mekanik davranışının incelenmesi açısından lineer viskoelastik teori uygun bir araç olabilir.

¹ Dokuma kumaşların mekanik davranışı; yapısal parametrelerin değişimini (geometrik modeller), kıvrım dengesi dikkate alınarak (iç enerji değişiminin ihmal edildiği), sadece iplik uzamaların meydana geldiği (eğilme enerjisinin ihmal edildiği ve kıvrımın sabit kaldığı), her iki mekanizmanın birbirini destekleyerek birlikte çalıştığı ve küçük deformasyonları dikkate alan enerji metotları gibi farklı matematiksel modeller altında incelendiği görülmektedir.

Liflerin viskoelastik davranışını tanımlamak amacıyla çok sayıda denklem önerilmiştir. Bunların bir kısmı malzemelerin moleküler yapısını ve değişimini temel alırken, bir kısmı da gerçekleşen deformasyonu matematiksel ilişkiler yardımıyla tanımlamaya çalışmaktadır.

Leaderman, lifler üzerine yaptığı çalışmasında kalıcı deformasyonla ilişkili olan ikincil sürünme davranışının testlere olan etkisini ortadan kaldırmak için test örneklerine mekanik kondisyonlama uygulamış ve süperpozisyon prensibini test etmiştir (Morton ve Hearle 2008). Boltzmann'ın süperpozisyon prensibinde ifade edildiği gibi; viskoelastik malzemelerin davranışı, ölçüm zamanına kadar olan mekanik etkilerin tamamına bağlı olduğu görülmüştür.

Gotlih (1998) seçilen benzeşim modeline ait katsayıları optimizasyon metodu kullanarak belirlemiştir. 19,5 tex pamuk ipliklerinin viskoelastik katsayılarını belirlemek için sabit hızla uzama (CRE) durumunda elde edilen kopma mukavemeti testinden elde ettiği verileri kullanmıştır. Benzeşim metoduna ait diferansiyel denklemin yüksek dereceli türev ifadeleri için zamana bağlı polinom tipinde regresyon denklemi kurmuştur (Kelvin-Voight lineer model için uzama değerlerini ikinci dereceden regresyon denklemi ile ifade etmektedir). Diferansiyel denklemin katsayıları quasi-Newton optimizasyon yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. Bu şekilde belirli bir yük altındaki ipliklerin uzama miktarlarını belirleyen sürünme fonksiyonunu elde etmiştir.

Çözgü iplikleri, dokuma işlemi esnasında tekrarlı zorlamaya maruz kalır. Tezgâh duruşunda ise çözgü ipliklerinin gerilmesinde azalma görülür. Vangheluwe (1993) gerilme azalmasını tahmin etmek için standart katı modelden yararlanmaktadır. Modelde, viskoz sönümlenme elemanına paralel bağlı olan yayın davranışını nonlineer ($\sigma = b\varepsilon^2$ ve $\varepsilon = rt$) tanımlamıştır. Testlerde 20 tex PES/CO open-end ipliklerine, 500 kez yarı değişkenli zorlama uygulandıktan sonra 300 s süresince ölçümler yapılmıştır. Çözgü ipliklerinin önceki yükleme geçmişlerine bağlı olarak basit ($\sigma_{\max} = 5$ cN/tex dan başlayan ve σ_t değerine kadar monoton azalan), tersine ($\sigma_{\min} = 2,5$ cN/tex başlayarak σ_t değerine kadar monoton artan) ve karma (dinamik zorlamanın az sayıda tekrarlanması durumunda σ_{\min} başlayarak önce artıp, sonra tekrar monoton azalan) olmak üzere üç tip gerilme değişimi gözlemiştir.

Dokuma kumaş parametrelerinin hesaplama yöntemlerinde, ipliklerin elastik modeli dikkate alınmaktadır. Peirce (1937), dokuma kumaş içinde bulunan iplikleri; rijitliği olan mükemmel elastik ve isotropik malzeme olarak kabul edilebileceği varsayımını önermiştir. Bu model yaklaşımı: bağlantı noktasında iplikler arasındaki kuvvetlerin tahmin edilmesine yardımcı olmaktadır. Eğilme direnci ise kumaş içindeki ipliğin aldığı formu belirler ve kıvrım dengesi üzerinde belirgin bir etkiye sahiptir. Elastik teori kumaştaki kıvrım dengesinin belirlenmesinde kullanışlıdır (Behera ve Hari 2010). Kumaştaki ipliklerin gerçekteki mekanik davranışı ise temel elastisite teorisinden sapma göstermektedir. Tekstil malzemelerini viskoelastik özellikleri sebebiyle, iplikler üzerinde etkili olan gerilme zamana bağlı bir fonksiyonla ifade edilebilecek tarzda azalacaktır. Olofsson (1964) bu durumu; kumaş içerisinden kıvrım almış ipliğin kumaştan çıkartıldığında, ipliğin kıvrım yapısının belirli bir kısmını koruduğunu gözlemleyerek açıklamaktadır.

Sebastian ve ark. (2008) şerit formunda dokunmuş Kevlar kumaşların viskoelastik davranışını açıklamak için diferansiyel yöntemi kullanmıştır. Yüksek dereceli diferansiyel denklemin viskoelastik davranışı tanımlamak için gerekli olduğunu ancak, kabul edilebilir bir hata değeri için diferansiyel denklemin daha düşük dereceli olarak sadeleştirilebileceğini bildirmektedir. Gerilme değişim fonksiyonu ile kompians fonksiyonunu konvülsyan çarpımını kullanarak belirledikleri sürünme fonksiyonu ile ön gördükleri benzeşim modelinin katsayılarını belirlemiştir. Harmonik tam değişken zorlama deneylerindeki frekans değişimleri için yüksek viskoz sönümleme katsayısının karmaşık modülün çok hızlı değişmesine neden olduğunu belirtmiştir. Diferansiyel denklemin katsayılarını belirlerken; katsayıların test verilerine uygun olarak biçimlendirilmesinin yanı sıra, benzeşim modelinin mümkün olduğu kadar çok elemandan oluşması gerektiği vurgulanmıştır.

Asayesh ve Jeddi (2010) tekstüre PES ipliklerinden dokunmuş kumaşların sürünme davranışlarını incelemiştir. Bir yay elemanını Kelvin Void benzeşim modeline seri ekleyerek ipliğin elastik uzamasını temsil etmişler ve sabit gerilme altında modelin herhangi bir zamandaki birim uzama miktarını belirlemiştir. İpliklerin nonlineer davranışı için standart katı modelin viskoz sönümleyici elemanın uzama hızını, sinüs hiperbolik fonksiyon ile tanımlamışlardır. İplikler için benzeşim modeline ait

parametreleri regresyon analizi kullanarak belirlemişlerdir. Ön gerilme (1 N) uygulanan 5x1 cm² test örneklerini, 10 N/s sabit yükleme hızı ile 40 N değerine ulaştıktan sonra 2000 s süresince sürünme davranışını incelemişlerdir. Çalışmalarında Pierce bezayağı geometrik kumaş modelinde iplik ekseni ile kumaş düzlemi arasındaki açıyı (θ) ipliklerin sıkıştırılması sonucu tam kıvrım dengesinin ulaştığı durum için hesaplamış ve sürünme davranışı süresince sabit kaldığı kabulünde bulunmuşlardır. Kumaşlara uygulanan sabit gerilmenin $\sigma \sin\theta$ bileşeni, tekstüre ve kumaş kıvrımın açılmasını ifade eden kumaş ilk modülüne orantılanarak kıvrım azalmasına bağlı uzama olarak tanımlamışlardır. Gerilmenin $\sigma \cos\theta$ bileşeninin etkisi altında ipliklerin sürünme davranışını gösterdiğini ifade etmişlerdir. Çalışmalarında, kumaş sıklığının artması ile modelle deneysel sonuçlar arasındaki hatanın arttığını, yine de en büyük hatanın % 20'nin altında kaldığını belirlemişlerdir.

Vangheluwe ve Kiekens (1996) daha önce çözümlenen iplikleri için çalıştıkları modeli, genişletilmiş nonlinear Maxwell model olarak yeniden ele almışlardır. Çözümlenen ve kumaşın gerilme azalması davranışının ortak etkisinin, dokuma makinesi üzerinde kumaş çizgisi pozisyonunun değişimine sebep olduğunu belirterek, her iki modeli birleştirmişlerdir. Çözümlenen ve kumaş benzeşim modelleri için ayrı ayrı Marquardt nonlinear regresyonu algoritması ile viskoelastik model parametrelerini belirlemişlerdir. Parametreleri belirledikten sonra, çözümlenen ve kumaş gerilmesi arasında eğer fark varsa $\varepsilon = (\ell_y \varepsilon_y + \ell_f \varepsilon_f) / (\ell_y + \ell_f)$ formülü ile yeni uzama değeri belirleyerek, gerilmeler arası fark yeterince küçük oluncaya kadar hesaplamalarını tekrarlamışlardır. Tezgâh üzerindeki gerçek pozisyon ile hesaplamalar arasındaki ilişki ise en küçük kareler yöntemi ile belirlenen lineer regresyon formülü ile tanımlanmıştır.

Fonksiyonel tekstil olarak tanımlanan yeni nesil inovatif kumaşlar, özel üretim teknikleriyle farklı tekstil yüzeylerinin birleştirildiği tekstil yapılarıdır. Fonksiyonel tekstil, ihtiyaçları en iyi karşılayan kumaş yapılarını geliştirmek amacıyla düşünülmektedir. Bu tip yapılardan olan ısı ile birleştirilen (fused) tekstil sistemleri; içine PES veya PA termoplastik polimerlerin katıldığı ve tarama yöntemi ile üretilmiş dokusuz yüzeylerin, ısı ve basınç etkisi ile dokuma ve örme yapılarının birleştirildiği fonksiyonel tekstillerdir (Gutauskas ve ark. 1997). Urbelis ve ark. (2004, 2007) ısı ile birleştirilmiş tekstil sistemleri ile ilgili araştırmalarında, sürünme ve toparlanma

davranışlarını geliştirdikleri test cihazında belirlemişlerdir. 50x250 mm test örneklerine, 0,2 N ön gerilme uygulayarak deneylerine başlamışlar ve sonra 30 dakika süresince 50N sabit gerginlik altında bırakılan test örneklerinde meydana gelen uzamayı gözlemlemişlerdir. Deneylerinin devamında, ön gerilme değeri olan 0,2 N gerginlikte 30 dakikalık süre içinde test örneklerinde gerçekleşen toparlanmayı gözlemlemişlerdir.

Literatürde, tekstil malzemelerinin viskoelastik davranışını yoğun bir şekilde mekanik benzeşim modellerine dayanarak araştırıldığı görülmektedir. Katıların gerçek gerilme uzama davranışlarının tek bir Maxwell ya da Kelvin Voigt mekanik modelleri ile temsil edilmesi durumunda, araştırmada belirli sınırlamalar ile karşılaşılacaktır. Daha gerçekçi matematik modellerin daha fazla sayıda eleman içeren mekanik benzeşim modelleri ile elde edilebileceği literatürde belirtilmektedir (Drabousky 2009). Diğer taraftan bir malzemenin viskoelastik davranışını, yay ve viskoz sönümleyici elemanların sayısı ve bağlantı düzenlerini önceden tahmin ederek geliştirmek ve ayrıca malzeme olarak tanımlanan ortamın bahsedilen soyut elemanlardan oluştuğunu düşünmek; problemin çözüm zorluğu ve geçerliliği ilişkisi arasında araştırmacının sürekli bir dengeleme (optimizasyon) problemi ile olguyu incelemesine ve konuya dar bir çerçeveden bakmasına neden olmaktadır.

Bu durumda literatürde bulunan boşluklar özetlenirse:

- 1- Mekanik benzeşim modelleri yerine, tekstil malzemelerinin viskoelastik davranışını uzama, gerilme, ölçümden önceki zorlamalar ve süre değişimlerini dikkate alarak integral yöntemleri ile incelenmesi (Volterra integral denklemlerinin çözümü).
- 2-Viskoelastik davranışın genel diferansiyel denklemin çözümünü sağlayan matematiksel yöntemleri kullanarak incelenmesi (sayısal yöntem, seri yaklaşımı vs.).
- 3- Tekstil malzemeleri nadiren plastik davranış göstermelerine karşın, kuvvet altında kolaylıkla deformasyona uğramaktadırlar. Bu nedenle mekanik davranış ölçümleri için kullanılan mühendislik yaklaşımının tekstil malzemeleri için tekrar gözden geçirilmesi.
- 4- Viskoelastik teori yardımıyla dokuma kumaşların mekanik davranışını belirlemek olarak sayılabilir.

Dokuma kumaşların viskoelastik davranışını açıklayacak modelin belirlenmesi, tez çalışmasının ilk aşamasını oluşturmuştur. Bu amaçla; dokuma kumaşlarda gözlemlenen sürünme ve gerilme azalması davranışlarını temsil edecek, lineer viskoelastik davranış modeli (gerilme ve uzama büyüklüğünden bağımsız sadece zamana bağlı) belirlenmeye çalışılmıştır. Modelleme çalışmasında, termodinamik açıdan izoterm koşulu, zorlamanın tek eksenli olduğu ve kumaşların deneyler öncesi herhangi bir zorlamaya maruz kalmadığı kabullerinde bulunulmuştur. Önerilen model, dokuma kumaşın atkı ya da çözgü doğrultusunda ani bir uzama ya da gerilmeye maruz bırakıldığında, sadece zamana bağlı lineer viskoelastik davranışını açıklamaktadır.

Gerilme testlerinin (tekstil malzemeleri için Instron testleri) temel çalışma prensibi mühendislik gerilme birim uzama eğrisini elde etmek yönündedir. Bu nedenle liflerin gerçek davranışı için sabit hacim kabulü yapılarak (plastik davranış), birim uzamayı ve değişimini içeren hesaplamalar ile veriler tekrar değerlendirilir (Hockenberger 2004). Tekstil malzemelerinin gerçek mekanik davranışını belirleme konusunda mühendislik gerilme-birim uzama eğrisi yeterli bilgiyi sunamamaktadır.

Lineer viskoelastik teoriye dayanan gerilme ve birim uzama arasındaki ilişkiler (uzun periyotlu (sürelili) tek basamaklı zorlama deneyleri); $\sigma(t) = E(t) \varepsilon_0$, $\varepsilon(t) = J(t) \sigma_0$, genel bir gerilme veya uzama eğrisinin etkisi altında ise (Dinamik ve tekrarlı zorlama deneyleri); $\sigma(t) = \int_0^t E(t-\tau_1) \frac{d\varepsilon(\tau)}{d\tau} d\tau$, $\varepsilon(t) = \int_0^t J(t-\tau_1) \frac{d\sigma(\tau)}{d\tau} d\tau$ eşitlikleri kullanılarak açıklanabilir.

Matematiksel ilişkiler aşağıdaki ifadeleri içermektedir.

Komplians ($J(t)$) ve gevşeme modülü ($E(t)$) lineer viskoelastik davranış için yalnızca zamana bağlı bir fonksiyondur. Başka bir deyişle gerilme ve birim uzamanın büyüklüğünden bağımsızdır.

Malzemenin yaşlanmadığı kabul edilirse, komplians $J(t-\tau_1)$ ve gevşeme modülü $E(t-\tau_1)$ malzemenin sabit karakteristik özelliğidir. Bu koşullar altında fonksiyonlar, herhangi bir ani etkinin uygulandığı ana ötelenebilir (Hosford 2005).

Sürünme testleri için Boltzman'ın ileri sürdüğü süperpozisyon prensibi (Bower 2002):

a- Her bir gerilim artışı malzemenin uzamasını, birbirinden bağımsız olarak etkiler ve herhangi gözlemlenen uzama, gerilme artışlarının etkisinde oluşan uzamaların toplamına eşittir.

b- Herhangi bir zamanda gözlemlenen uzama, gözlemlenen zamana kadar malzemeye uygulanan gerilmelerin etkilerinin tamamına bağlıdır.

Süperpozisyon prensibi, matematiksel ilişkilerde integral işlemiyle belirtilmektedir.

En basit haliyle kompliansın belirlenebilmesi için gerilme etkisi ile malzeme üzerinde oluşacak deformasyon miktarlarını belirli zaman aralıklarında ölçmek gerekmektedir (Denklem 1.1).

$$J(t) = \frac{\varepsilon(t)}{\sigma_0} \quad (1.1)$$

Viskoelastik çalışmalarının tarihsel gelişim süreci dikkate alındığında, sürünme davranışının gözlemlenmesi, gerilme azalması davranışının incelenmesinden daha kolay yapılabilmesi nedeni ile lineer viskoelastik teori sürünme davranışı üzerine kurulmuştur. Bu sebeple tez çalışmasının kuramsal temeller bölümünde yapılan analizler, sürünme davranışını açıklar nitelikte sürdürülecek ve viskoelastik davranışlar arasındaki benzerlikler yardımıyla denklemler gerilme azalması davranışına uyarlanacaktır.

$$E(t) = \frac{\sigma(t)}{\varepsilon_0} \quad (1.2)$$

Denklem 1.2'nin bu biçimi gevşeme modülünün, uzamadan bağımsız olduğunu belirtmektedir. Günümüz teknolojisi ile lineer viskoelastik davranış için bu değişimi ölçmek bir sorun oluşturmamaktadır.

Instron ve benzeri universal test cihazları tekstil malzemelerinin gerilme deneylerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Instron test cihazları, belirli test standartlarında tekstil malzemelerinin gerilme deneylerini gerçekleştirebilmek için kendine has bir yazılım kullanmaktadır. Test cihazlarının yazılımları, doğal olarak kullanıcının çalışma rutinine müdahalesini sınırlamaktadır. Ticarileşmiş test cihazlarının kullanım imkânının bulunmadığı, ancak gerilme deneylerin yapılmasının zorunlu olduğu özel çalışmalar bulunabilir ve dokuma kumaşların mekanik özelliklerinin ve davranışının araştırılması

bu özel alanlardan biridir. Dokuma kumaşların mekanik davranışının incelenmesi çok sayıda temel problem barındırır. En dikkat çekici problem, modülün uzama ile birlikte büyük oranda değişmesidir. Bu durum, kumaş geometrisindeki değişime ve kumaşın anisotropik oluşuna bağlı olduğu gibi dokuma kumaşların viskoelastik davranışının da bir sonucudur.

Mevcut ticari test sistemleri, pahalı olmaları ve yukarıda açıklanmaya çalışılan yazılımlarındaki kısıtlamalar nedeni ile yetersiz kalmaktadırlar. Dokuma kumaşların ve ipliklerin mekanik davranışının (özellikle de sürünme ve gerilme azalması) incelenmesinde, gerekli deney şartlarının (kopma gerilmesi ve uzaması, gerilme özellikleri, tekrarlı zorlama ve uzun periyotlu (sürekli) zorlama deneyleri) denetlenebilmesi için kullanıcıya açık bir yazılım gereksinimini karşılamak amacıyla, Uludağ Üniversitesi Rektörlüğü-BAP'ın maddi destek sağladığı KUAP(M)-201321 nolu "Tekstil Malzemelerinin Mekanik Özelliklerinin Analizi için Ünlversal Bir Test Cihazının Tasarımı ve İmalatı" isimli Küçük Ölçekli Uygulamalı Araştırma Projesi kapsamında elektromekanik ünlversal bir test cihazının tasarımı ve imalatı gerçekleştirilmiştir.

Tez çalışmasının mevcut çalışmalar içerisindeki yeri ve önemi aşağıda belirtilmiştir.

Kuramsal açıdan; malzeme biliminin teorik bir alanı olarak görülen viskoelastisite konusu; deney yoluyla tekstil malzemelerinin mekanik davranışının belirlendiği uygulamalı bir araştırma konusuna dönüştürülmüştür.

Metot açısından; literatürde yapılan açıklamalarda yazarlar tarafından farklı test metotlarının uygulandığı görülmektedir. Dokuma kumaşların viskoelastik davranışı için belirli bir test standardı bulunmamaktadır. Mevcut (tekstil malzemeleri, plastikler, kompozitler ve metal malzemeler için belirtilen) test standartlarının modifikasyonu ile uygun bir test metodunun geliştirilmesi düşünülebilir.

Ulusal ekonomi açısından; tekstil malzemelerinin gerilme testleri için önerilen ticari test cihazlarının fiyatlarının 100.000 TL üzerinde olduğu dikkate alındığında, bu türden bir cihazın yerli imalat, elektronik ve bilişim teknoloji kullanılarak tasarımının ve üretiminin gerçekleştirilebilmesi, orta ve uzun vadede ticarileştirme potansiyeli düşünüldüğünde ülke ekonomisine olumlu katkı sağlayacaktır.

Akademik çevre açısından; dokuma kumaş üretiminde karşılaşılan duruş izi probleminin çözümüne katkı sağlayacak kumaş davranışının elde edilmesi, farklı disiplin alanları olarak görülen doku mühendisliği ve tekstil mühendisliği alanlarının ortak bir payda altında birleştirilerek, gelecekte ortak projelerin geliştirilmesi yolunda önemli bir adım atılması sağlanabileceği düşünülmektedir.

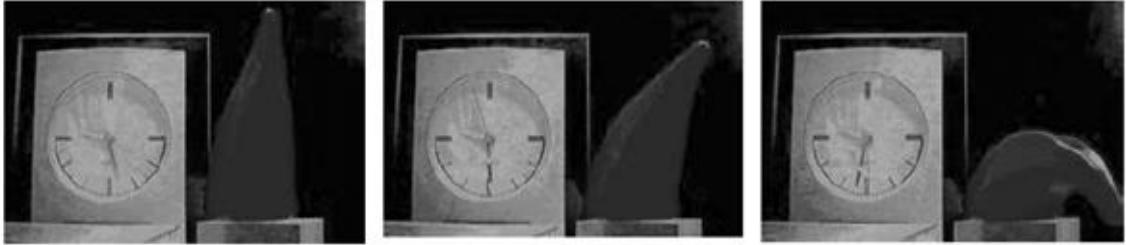
Tekstil sanayisi açısından; tekstil malzemelerinin gerilme özellikleri üretim ve ürün kalitesinde önemli bir rol oynar. Eğirme, sarım, örme ve dokuma gibi üretim aşamalarında farklı yapıya sahip lif içerikli tekstil malzemelerin gerilme birim uzama eğrisinin kesin olarak belirlenmesi, üretim aşamalarının planlanabilmesine katkı sağlayabilecektir. Teknik tekstiller alanında faaliyet gösteren ulusal tekstil firmalarının konu ile ilgili olarak tekstil ürünlerinde performans testleri konusunda bilgilendirme ve ihracata yönelik ürün geliştirme çalışmalarına katkıda bulunabilme potansiyeli bulunmaktadır.

Nitelikli insan kaynağının yetiştirilmesi açısından; birebir tasarım aşamasından başlayarak, problem çözme, üretim, bilgisayar ve çevre birimleri arasında veri alışverişi sağlama, yazılım geliştirme ve deneysel çalışmaların yürütülmesi konusunda uzmanlaşma olanağı sunulmuştur.

2. KURAMSAL TEMELLER

Bu bölümde malzemelerin mekanik davranışını temsil eden matematiksel yöntem ve geliştirilen modeller ile sunduğu bilgiler açıklanmaya çalışılmaktadır. Ayrıca malzemelerin mekanik davranışını ölçen test cihazlarının çalışma prensipleri ve özellikleri hakkında bilgiler verilmektedir.

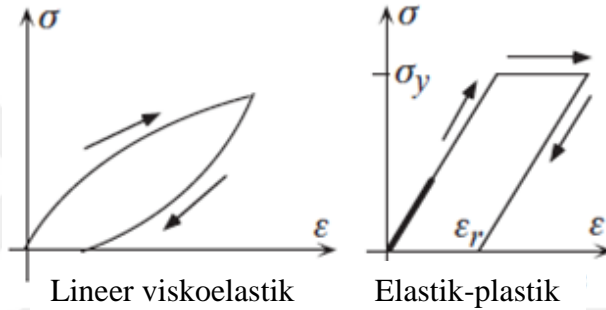
Malzemelerin genel mekanik davranışı Lakes'in (2009) verdiği, örnek gözlem ile açıklanabilir. Viskoelastik piramitin kendi ağırlığının oluşturduğu gerilmenin etkisinde, gözlemlenen deformasyonun zamana bağlı olduğu Şekil 2.1'de temsili olarak gösterilmiştir. Şayet piramit ideal bir elastik malzeme olsaydı, piramit ani bir deformasyona uğrayarak kararlı duruma geçecek ve ne kadar uzun süre geçerse geçsin, üzerinde daha fazla bir deformasyon gözlenmeyecektir. Piramidin ideal bir plastik malzeme (akışkan) olması durumunda ise, piramit her an deformasyona uğrayacak ve asla belirli bir forma sahip olamayacaktır. Viskoelastik bir piramitin ise, gözlem süresi ile orantılı olarak, miktarı zamana bağlı olarak sürekli azalan bir deformasyona uğradığı ve deformasyonun belirli bir sınır değere ulaştığı gözlenecektir.



Şekil 2.1. Bir viskoelastik piramidin zamana bağlı deformasyonu (Lakes 2009)

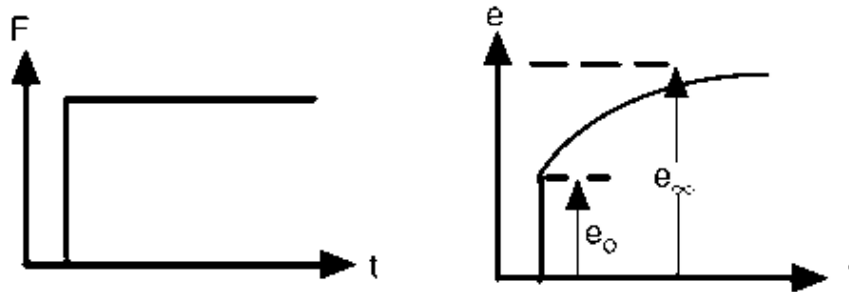
İdeal ve viskoelastik malzemelerin davranışı Şekil 2.2'de verilen gerilme uzama diyagramlarında gösterilmiş ve ideal elastik-plastik davranış ile viskoelastik davranış açıklanmaya çalışılmıştır. Zamanla değişmeyen sabit bir gerilmeye maruz bırakılan ideal elastik malzeme, gerilmenin büyüklüğü ile orantılı birim uzama değerinde, ani olarak şekil değiştirecektir. Elastik malzemenin birim uzama değeri gerilmenin etki ettiği süre boyunca sabit kalacaktır. Gerilme etkisi malzemenin üzerinden kaldırıldığında, ideal elastik malzeme başlangıçta sahip olduğu ilk boyuta geri dönecektir. Çünkü malzemenin birim uzama miktarı ölçülen zaman aralıklarında değişmeden sabit kalmaktadır. İdeal plastik malzemenin davranışı incelendiğinde ise sabit gerilme etkisi

altında birim uzama değerinin sürekli olarak arttığı gözlenmekte ve birim uzama değerinin bir değişim hızına sahip olduğu görülmektedir. Birim uzama değerinin hızı sıvılardaki gibi bir akış hızına karşılık gelmektedir. Gerilmenin etkisi kaldırıldığında ise malzemenin ulaştığı birim uzama miktarı kadar şekil değiştirmiş olduğu görülecektir. Viskoelastik malzeme üzerinde etkili olan gerilme ve birim uzama değerlerinin gösterildiği grafik incelendiğinde; gerilme etkisinin ortadan kaldırıldığında malzemenin başlangıçtaki şekline hemen geri dönemediği görülmekte ve eğrinin eğiminin (modülün) grafik üzerinde sürekli değiştiği gözlenmektedir. Modülün dikkat çekici olan değişimi ve değişiminin belirlenmesi konusu lineer viskoelastik kavramlar ile açıklanmaktadır.



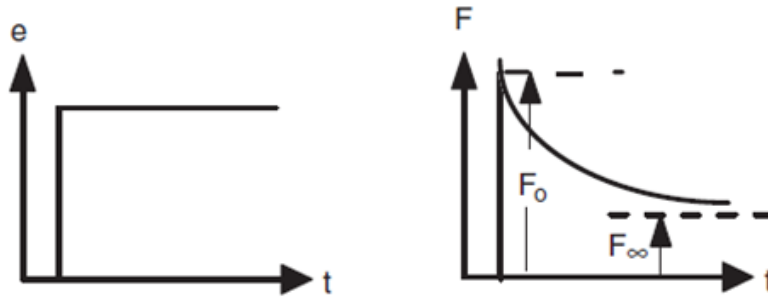
Şekil 2.2. Viskoelastik ve ideal malzemelerin genel histeriz eğrisi (Lakes 2009)

Viskoelastik malzemeye sabit bir gerilme uygulandığında, ani elastik uzamayı takip eden, hızı değişen ve zamana bağlı uzama gözlemlenir (Şekil 2.3). Malzemelerin bu davranışı sürünme (creep) olarak adlandırılır. Zamana bağlı olarak gerçekleşen uzama sürekli artarak, sınır değere asimptotik olarak yaklaşır. Şayet uzama sınırsız bir şekilde artmış olsaydı; malzeme, sıvıların akış davranışını göstermiş olurdu (Wineman 2009).



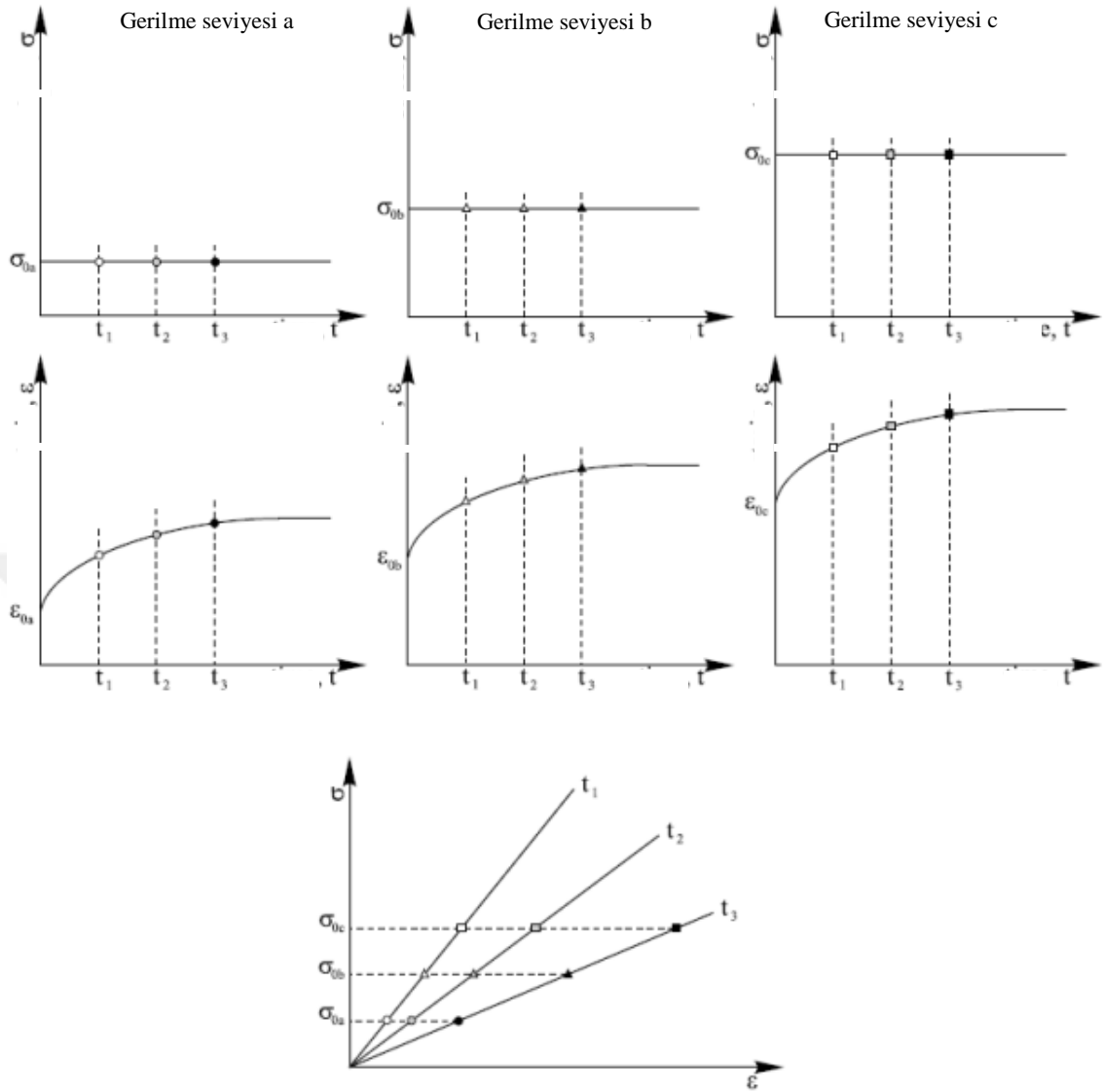
Şekil 2.3. Sürünme davranışı (Hosford 2005)

Viskoelastik malzemeye sabit bir uzama uygulandığında ise, ani bir gerilme artışından sonra gerilme değerinde zamana bağlı olarak gittikçe azalan bir düşüş gözlemlenir (Şekil 2.4). Malzemelerin bu davranışı gerilme azalması (gevşeme, relaksasyon) olarak adlandırılır. Zamana bağlı gerçekleşen sürekli gerilme azalması, sınır değere asimptotik olarak yaklaşır. Bu sabit gerilme, katıların davranışdır ve uzama kaldırıldıktan sonra malzemenin boyutsal olarak kısmen toparlanmasını sağlar. Şayet gerilme sıfır değerine ulaşmış olsaydı; malzeme, sıvı davranışı gösterecek ve sabit uzama miktarı kadar plastik deformasyona uğrayarak yeni şeklini alacaktır (Wineman 2009).



Şekil 2.4. Gerilme azalması (Hosford 2005)

Lineer viskoelastik teori, malzemelerin davranışını incelemeye kullanılan önemli bir teoridir. Viskoelastik malzemelerin sürünme ve gerilme azalmasının lineer davranış gösterdiğinin belirlenmesi, titiz bir deneysel çalışma gerektirir (Şekil 2.5). Üç farklı gerilme değerinde aynı zaman aralıkları için malzemenin sürünme grafikleri çizilir. Bu grafiklerde t_1 , t_2 ve t_3 zamanlarına karşılık gelen birim uzama değerleri, sabit gerilme seviyeleri için gerilme uzama grafiğine taşınarak işaretlenir. Her bir ölçüm zamanına karşılık elde edilen birim uzama ve gerilme değerleri aynı doğru üzerinde bulunuyorsa malzemenin viskoelastik davranışı lineerdir (orantısal). Her bir ölçüm süresi için uzama değerleri ile gerilme seviyeleri arasındaki oran (Denklem 2.1a, Denklem 2.1b ve Denklem 2.1c), komplians olarak tanımlanmaktadır. Komplians, gerilmedeki bir birimlik değişim sonucunda malzemenin uzamasındaki oransal değişimi ifade etmektedir.



Şekil 2.5. Lineer viskoelastik davranış (Hosford 2005)

t_1 süresinde gerçekleşen sürünme davranışının sabit kompians değeri $J(t_1)$, gerilme büyüklüğünden bağımsız olarak elde edilir ve Denklem 2.1a ile verilir. Benzer şekilde t_2 ve t_3 süreleri için kompians değerleri Denklem 2.1b ve Denklem 2.1c ile elde edilir.

$$J(t = t_1) = \frac{\varepsilon_a(t_1)}{\sigma_0|_a} = \frac{\varepsilon_b(t_1)}{\sigma_0|_b} = \frac{\varepsilon_c(t_1)}{\sigma_0|_c} \quad (2.1a)$$

$$J(t = t_2) = \frac{\varepsilon_a(t_2)}{\sigma_0|_a} = \frac{\varepsilon_b(t_2)}{\sigma_0|_b} = \frac{\varepsilon_c(t_2)}{\sigma_0|_c} \quad (2.1b)$$

$$J(t = t_3) = \frac{\varepsilon_a(t_3)}{\sigma_0|_a} = \frac{\varepsilon_b(t_3)}{\sigma_0|_b} = \frac{\varepsilon_c(t_3)}{\sigma_0|_c} \quad (2.1c)$$

Komplians lineer viskoelastik davranış için yalnızca zamana bağlı bir fonksiyondur ve Denklem 2.2 ile ifade edilebilir.

$$J(t) = \frac{\varepsilon_a(t)}{\sigma_0|_a} = \frac{\varepsilon_b(t)}{\sigma_0|_b} = \frac{\varepsilon_c(t)}{\sigma_0|_c} \quad (2.2)$$

Ölçüm süreleri için gerilme azalma değerlerinin sabit birim uzama değerlerine oranı (Denklem 2.3), gevşeme (relaksasyon) modülü olarak tanımlanmaktadır. Gevşeme modülü, uzamadaki bir birimlik artışı sağlayacak gerilme büyüklüğünü ifade etmektedir.

$$E(t) = \frac{\sigma_a(t)}{\varepsilon_0|_a} = \frac{\sigma_b(t)}{\varepsilon_0|_b} = \frac{\sigma_c(t)}{\varepsilon_0|_c} \quad (2.3)$$

Malzemenin yaşlanmadığı kabul edilirse, komplians ve gevşeme modülleri malzemenin sabit karakteristik özellikleridir. Bu koşullar altında komplians ve gevşeme modülü fonksiyonları (Denklem 2.4a ve Denklem 2.4b) herhangi bir ani etkinin uygulandığı ana ötelenebilir.

$$J(t) = J(t - t_1) \quad (2.4a)$$

$$E(t) = E(t - t_1) \quad (2.4b)$$

Maxwell'in lineer viskoelastik davranış açıklaması, Boltzmann'ın ileri sürdüğü süperpozisyon prensibi (Denklem 2.5) ile genelleştirilmiştir.

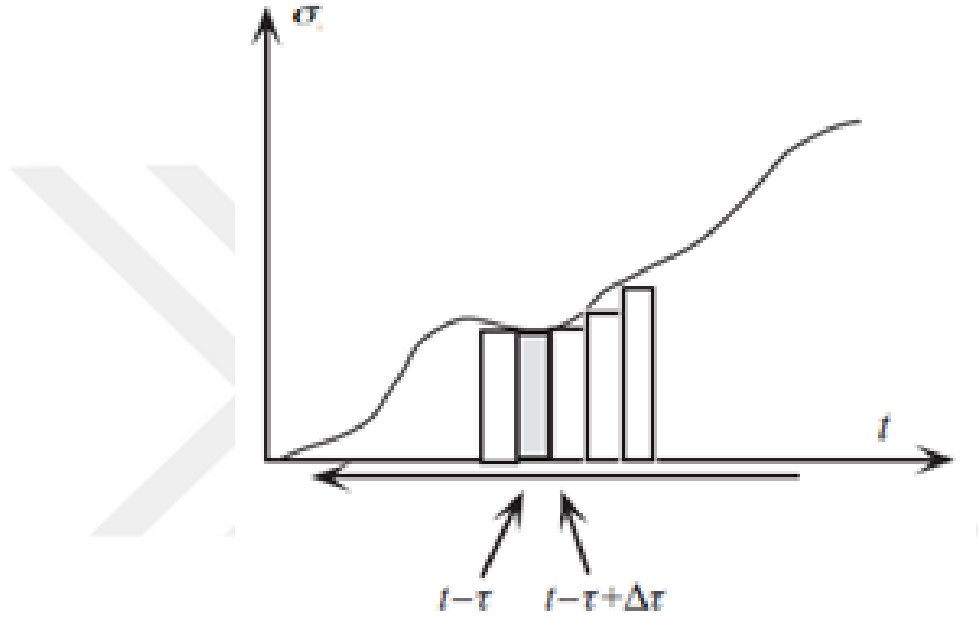
$$\varepsilon(t) = J(t - t_1)\sigma_1 + J(t - t_2)(\sigma_2 - \sigma_1) + \dots + J(t - t_i)(\sigma_i - \sigma_{i-1}) \quad (2.5)$$

Burada sürünme testleri için aşağıdaki kabullerde bulunulmuştur (Bower 2002).

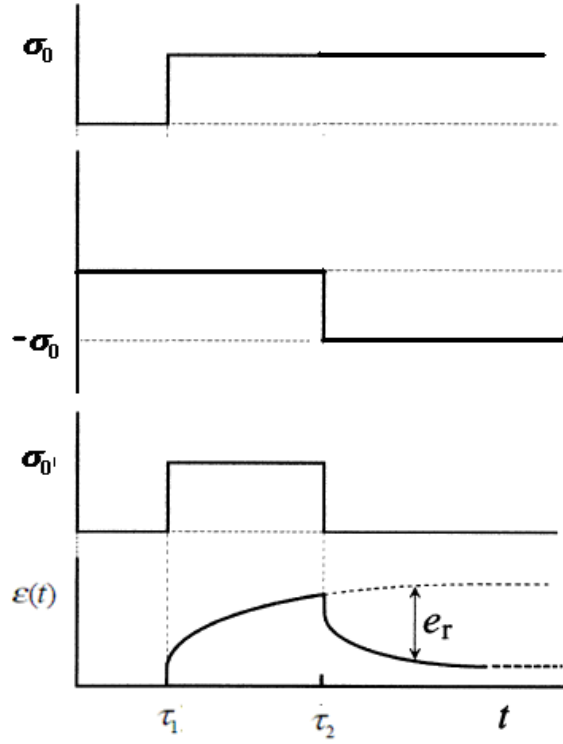
- Her bir gerilim artışı malzemenin uzamasını birbirinden bağımsız olarak etkiler ve gözlemlenen herhangi bir uzama, gerilme artışlarının etkisinde oluşan uzamaların toplamına eşittir.

- Herhangi bir zamanda gözlemlenen uzama, Denklem 2.5’de ifade edildiği gibi gözlemlenen zamana kadar malzemeye uygulanan gerilmelerin etkilerini tamamına bağlıdır.

Genel bir gerilme eğrisinin integral elemanı (Şekil 2.6, şekilde içi dolu dikdörtgen) için gözlenen sürünme miktarı, Boltzmann süperpozisyon prensibi ile belirlenebilmektedir (Şekil 2.7).



Şekil 2.6. Değişken gerilme grafiği (Bower 2002)



Şekil 2.7. Bir süre uygulanan sabit gerilme etkisindeki sürünme davranışı (Bower 2002)

$$\varepsilon(t) = \sigma_0 [J(t - \tau_1) - J(t - \tau_2)]$$

İlişki, türev ifadesinin negatif değerini ifade etmektedir.

$$d\varepsilon(t) = \lim_{\Delta\tau \rightarrow 0} \frac{\sigma(\tau) [J(t - \tau_1) - J(t - \tau_1 + \Delta\tau)]}{\Delta\tau}$$

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 - \int_0^t \sigma(\tau) \frac{dJ(t - \tau_1)}{d\tau} d\tau$$

Burada $\varepsilon_0 = \sigma(t)J(0)$ elastik uzamayı temsil eder.

Eşitliğin sağ tarafında bulunan, belirli integral için kısmi integral metodu uygulandığında integral denklemi gerilme fonksiyonunun değişimini ifade edecek şekilde Denklem 2.6 yazılabilmektedir.

$$\varepsilon(t) = \int_0^t J(t - \tau_1) \frac{d\sigma(\tau)}{d\tau} d\tau \quad (2.6)$$

Boltzmann süperpozisyon ilkesi yardımıyla genel bir gerilme yüklemesi için malzemelerin viskoelastik uzama davranışı, integral gösterimi ile temsil edilebilmektedir.

Benzer bir şekilde, genel bir uzama için gerilme fonksiyonunun integral denklemi, Denklem 2.7'deki gibi kurulabilmektedir.

$$\sigma(t) = \sigma_0 - \int_0^t \varepsilon(\tau) \frac{dE(t-\tau_1)}{d\tau} d\tau$$

$$\sigma(t) = \int_0^t E(t-\tau_1) \frac{d\varepsilon(\tau)}{d\tau} d\tau \quad (2.7)$$

Birim şekil değiştirme ve gerilme fonksiyonları (Denklem 2.6 ve Denklem 2.7), integral içindeki iki fonksiyonun konvolüsyon çarpımının bir sonucu olduğunu ifade etmektedir.

Konvolüsyon çarpımı:

$$\mathcal{L}\{f(t)*g(t)\} = \int_0^\infty e^{-st} \left(\int_0^t f(\tau)g(t-\tau)d\tau \right) dt \quad \mathcal{L}(f(t)*g(t)) = \mathcal{L}(f(t)).\mathcal{L}(g(t))$$

Sürünme $\varepsilon(t)$ ve gerilme azalması $\sigma(t)$ fonksiyonlarının Laplace formu (sırasıyla Denklem 2.8a ve Denklem 2.8b) konvolüsyon çarpımı yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$\mathcal{L}(\varepsilon(t)) = \mathcal{L}(J(t)).\mathcal{L}\left(\frac{d\sigma(t)}{dt}\right)$$

$$\varepsilon(s) = J(s)s\sigma(s) \quad (2.8a)$$

$$J(s) = \frac{\varepsilon(s)}{s\sigma(s)} \quad (2.9a)$$

$$\mathcal{L}(\sigma(t)) = \mathcal{L}(E(t)).\mathcal{L}\left(\frac{d\varepsilon(t)}{dt}\right)$$

$$\sigma(s) = E(s)s\varepsilon(s) \quad (2.8b)$$

$$E(s) = \frac{\sigma(s)}{s\varepsilon(s)} \quad (2.9b)$$

Komplians (Denklem 2.9a) ve gevşeme modülünün (Denklem 2.9b) Laplace formları arasındaki ilişki, sürünme ve gerilme azalması fonksiyonlarının Laplace dönüşümlerinin çarpımları ile bulunmaktadır. Bu ilişkide tek tip bir viskoelastik davranış incelenirse, Denklem 2.10a ve Denklem 2.10b'de verilen eşitlikler ile diğer davranışında belirlenebileceğini ifade eder.

$$J(s)E(s) = \frac{\varepsilon(s)}{s\sigma(s)} \frac{\sigma(s)}{s\varepsilon(s)} \quad (2.10a)$$

$$J(s)E(s) = \frac{1}{s^2} \quad (2.10b)$$

Komplians ve gevşeme modül fonksiyonları arasındaki ilişkiye ters Laplace dönüşümü uygulandığında davranış fonksiyonları, arasındaki ilişki aşağıdaki gibi doğrudan elde edilebilmektedir.

$$\mathcal{L}^{-1}\left(\frac{1}{s^2}\right) = \mathcal{L}^{-1}\{J(s)E(s)\} = J(t) * E(t)$$

$$t = \int_0^t J(t-\tau)E(\tau)d\tau \quad (2.11a)$$

ya da

$$t = \int_0^t E(t-\tau)J(\tau)d\tau \quad (2.11b)$$

İntegral denkleminde t ile ifade edilen sonuç ölçüm zamanına karşılık gelmektedir. Denklemde $(t-\tau)$ parametresini içeren fonksiyon, çekirdek fonksiyon olarak adlandırılır. Çekirdek fonksiyon malzemenin $[0, t]$ zaman aralığında gerçekleşen zorlamalarına ait mekanik geçmişin bir ifadesidir ve tanımlıdır (bkz. Boltzmann sürepozisyon). Diğer taraftan (τ) parametresini içeren fonksiyon bilinmeyen fonksiyondur. Verilen integral denklemi birinci tip Volterra integral denklemi olarak sınıflandırılır (Denklem 2.11a ve

Denklem 2.11b). Bu tür denklemler, sayısal integral hesaplama yöntemi ya da Taylor seri açılımı kullanılarak çözülebilmektedir.

Malzeme üzerinde ani bir mekanik zorlanma (ε_0) varsa, $sJ(s)E(s) = \frac{1}{s}$ Laplace eşitliği ile kompians ve gevşeme modülü arasında farklı bir integral denklemi kurulabilir.

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 - \int_0^t \sigma(\tau) \frac{dJ(t-\tau)}{d\tau} d\tau$$

$$\mathcal{L}\{\varepsilon(t)\} = \mathcal{L}\{J(0)\sigma(t)\} - \mathcal{L}\left\{\int_0^t \sigma(\tau) \frac{dJ(t-\tau)}{d\tau} d\tau\right\}$$

$$\varepsilon(s) = J(0)\sigma(s) - \sigma(s)[sJ(s) - J(0)]$$

$$\frac{1}{s} = J(0) \frac{\sigma(s)}{s\varepsilon(s)} - \frac{\sigma(s)}{s\varepsilon(s)} [sJ(s) - J(0)]$$

Eşitlikte Denklem 2.9b kullanıldığında ve kompians fonksiyonu belirli olduğu durumda Denklem 2.13 ile gevşeme modülü (Denklem 2.17) elde edilebilir.

$$\mathcal{L}\left\{\frac{1}{s}\right\} = \mathcal{L}\{J(0)E(s)\} - \mathcal{L}\{E(s)[sJ(s) - J(0)]\} \quad (2.12)$$

$$1 = J(0)E(t) - \int_0^t \frac{dJ(t-\tau)}{d\tau} E(\tau) d\tau \quad (2.13)$$

Malzemenin daha önce hiç zorlanmadığı kabulünde bulunulursa, kompians $J(0)$ değeri sifıra eşit olur. Denklem 2.12'deki ters Laplace eşitliği sadeleştirilerek Denklem 2.14 elde edilir.

$$\mathcal{L}\left\{\frac{1}{s}\right\} = \mathcal{L}\{J(s)sE(s)\} \quad (2.14)$$

$$1 = \int_0^t J(t-\tau) \frac{dE(\tau)}{d\tau} d\tau$$

$$1 = J(t-\tau)E(\tau) \Big|_0^t - \int_0^t \frac{dJ(t-\tau)}{dt} E(\tau) d\tau \quad (2.15)$$

Denklem 2.15’de integral sınırları uygulandığında, $J(t-t)E(t) - J(t-0)E(0)$ eşitliğinde önceki zorlamalara ait gevşeme modülünün $E(0)$ değeri sıfıra eşit olacaktır. Birinci terim, ilk ani gerilmenin etkisindeki $J(0)$ komplians değeridir.

$$1 = J(0)E(t) - \int_0^t \frac{dJ(t-\tau)}{dt} E(\tau) d\tau \quad (2.16)$$

Denklem 2.16 düzenlenirse, ikinci tip Volterra integral denklemi (Denklem 2.17) elde edilir. Komplians fonksiyonu belirli olduğu durumlar için gevşeme modülü integral denkleminin çözümü olacaktır.

$$E(t) = J^{-1}(0) + J^{-1}(0) \int_0^t \frac{dJ(t-\tau)}{dt} E(\tau) d\tau \quad (2.17)$$

Benzer bir ilişki, Denklem 2.18 ve Denklem 2.19 için de elde edilir.

$$1 = E(0)J(t) - \int_0^t \frac{dE(t-\tau)}{dt} J(\tau) d\tau \quad (2.18)$$

$$J(t) = E^{-1}(0) + E^{-1}(0) \int_0^t \frac{dE(t-\tau)}{dt} J(\tau) d\tau \quad (2.19)$$

İlişkileri açıklamak için sunulan denklemler (Denklem 2.18 ve Denklem 2.19) ile literatürde verilen temel denklemler (Denklem 2.20a ve Denklem 2.20b) arasında toplama ve çıkarma işaretlerinde fark bulunmaktadır. Bu gösterimdeki farklılık ani gerilme ya da uzama etkisini eşitlik içerisinde tanımlamadan kaynaklanmaktadır. Literatürde verilen denklemler ani elastik uzama ve gerilmeyi $[0- 0+]$ kapalı integral aralığında tanımlamaktadır. Sunulan ilişkilerde ise böyle bir etkinin bir ön gerilme ya da uzama olarak eşitliklere eklendiğini ifade etmektedir. Sonuçlar arasındaki değerlendirme ancak deneysel çalışmalardan elde edilecek bulgular yardımıyla yapılabilir.

$$G(t) = J_g^{-1} + J_g^{-1} \int_0^t \dot{J}(t-\tau)G(\tau)d\tau \quad (2.20a)$$

$$J(t) = G_g^{-1} + G_g^{-1} \int_0^t \dot{G}(t-\tau)J(\tau)d\tau \quad (2.20b)$$

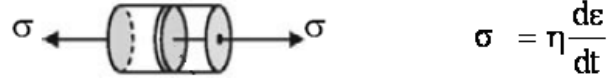
Mainardi'nin (2010) verdiği ilişkide $G(t)$ fonksiyonu, gevşeme modülünü ifade etmektedir.

2.1. Mekanik Benzeşim Yöntemi

Viskoelastik davranışı tanımlamada kullanılan denklemlerin geliştirilmesinde mekanik benzeşim yaklaşımını kullanmak oldukça kolaylık sağlamaktadır. Mekanik benzeşim; katıların rijitliğini temsil eden elastik yaylar (Şekil 2.8) ve sıvıların akmasını temsil eden viskoz sönümleyici (Şekil 2.9) elemanların seri ve/veya paralel kombinasyonları ile oluşturulmuş mekanik cihazlar olarak düşünülebilir.

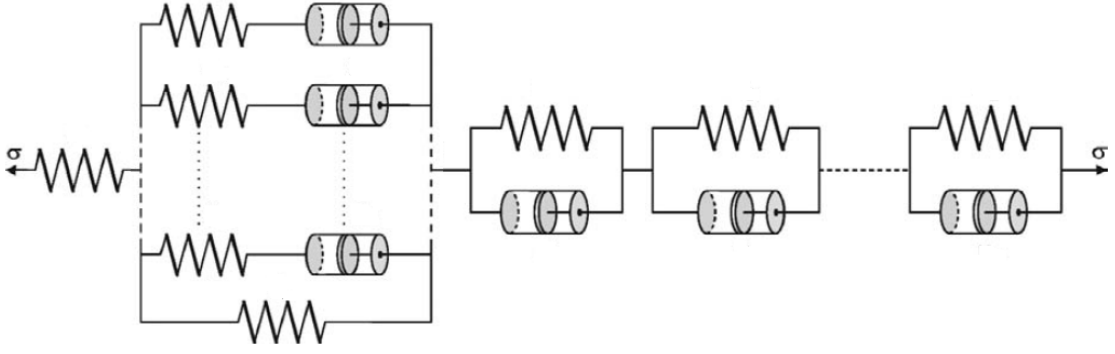


Şekil 2.8. Yay elemanın karakteristiği



Şekil 2.9. Sönümleyici elemanın karakteristiği

Bu cihazlar, sabit gerilme altında sürünme ve sabit deformasyon altında gerilmedeki azalma olarak adlandırılan viskoelastik malzemelerin gözlemlerine benzer zamana bağlı davranış sergilemektedir. Bu sebeple cihazlar viskoelastik davranışın mekanik benzetimi olarak değerlendirilmektedir. Şekil 2.10'da örnek bir benzeşim modeli verilmiştir.



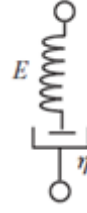
Şekil 2.10. Mekanik bir benzeşim modeli

Benzeşim yöntemi uygulanırken, aşağıdaki işlem sırasına dikkat edilmelidir.

- 1- Paralel kolların gerilmeleri toplanır ve bu değer sistemi etkileyen gerilme olarak ifade edilir. Paralel kolların uzama değerleri birbirine eşittir.
- 2- Seri kolların uzama değerleri toplanır ve bu değer sistemin toplam uzamasını ifade eder. Seri kollar üzerindeki elemanlara aynı gerilme etki eder.
- 3- Benzeşimde kullanılan elemanların sayısı ve bağlantı kombinasyonları arttıkça, model davranışını ifade eden diferansiyel denklemin mertebesi artmakta ve çözümü zorlaşmaktadır. Bu durumda modele ait ilişki, başlangıç ve sınır koşullarının sifıra eşit alındığı Laplace dönüşümleri yardımıyla basit aritmetik işlemlere dönüştürülerek daha kolay çözülebilmektedir.

2.1.1. Maxwell modeli

Maxwell modeli (Şekil 2.11) elastik yay ve sönümleyici elemanın seri bağlanması ile oluşmaktadır. Bu modelde ani bir uzama meydana geldiğinde, yay ani olarak uzar ve modeli etkileyen gerilmeyi sağlar. Sönümleyici eleman ani uzayamaz ve yayın oluşturduğu gerilmeyle orantılı hızda uzamaya başlar. Sönümleyici elemanın uzaması ile birlikte yayın gerilmesi ve uzaması azalır. Model denge koşullarına ulaştığında yayın gerilmesi sifıra ve sönümleyicinin elemanın uzaması ani uzama değerine ulaşır. Bu model, gerilmenin üstel fonksiyonla azaldığını ifade eder. Davranışı temsil eden denklemlerin çıkarılışı aşağıda verilmiştir.



Şekil 2.11. Maxwell modeli

$$\sigma = \sigma_y = \sigma_s$$

$$\varepsilon_{\text{toplamlam}} = \varepsilon_y + \varepsilon_s$$

$$\frac{d\varepsilon_{\text{toplamlam}}}{dt} = \frac{d\varepsilon_y}{dt} + \frac{d\varepsilon_s}{dt}$$

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{1}{E} \frac{d\sigma}{dt} + \frac{\sigma}{\eta}$$

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = 0$$

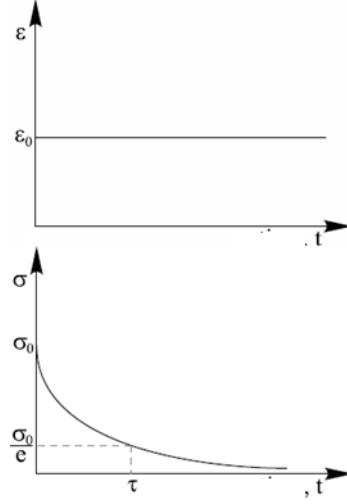
$$\frac{d\sigma}{\sigma} = -\frac{E}{\eta} dt$$

$$\int_{\sigma_0}^{\sigma} \frac{d\sigma}{\sigma} = \int_0^t -\frac{E}{\eta} dt$$

$$\sigma = \sigma_0 e^{-\frac{E t}{\eta}}$$

$$\sigma(t) = \sigma_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (2.21)$$

Gerilme azalması denkleminde (Denklem 2.21) $\tau = \eta/E$ parametresi gevşeme süresi olarak tanımlanmıştır. Ani uzamaya karşılık oluşan başlangıç gerilmesi $\sigma(0) = \sigma_0$ olarak belirlenirse, gevşeme süresi sonunda gerilme $\sigma(\tau) = \sigma_0/e$ değerine ulaşacaktır. Gevşeme süresi gerilme azalması deneylerinde elde edilen grafikte σ_0/e değerine karşılık gelen süre olarak belirlenir (Şekil 2.12).



Şekil 2.12. Maxwell modeli ve ilişkilerin grafik gösterimi

Gevşeme modülünün fonksiyonu, gerilme azalma fonksiyonunun sabit ani uzamaya bölünmesi ile elde edilmektedir (Denklem 2.22). Gevşeme modülü, uzamadaki bir birimlik artışı sağlayacak gerilme büyüklüğü olarak tanımlanmaktadır.

$$E(t) = \frac{\sigma(t)}{\varepsilon_0} = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (2.22)$$

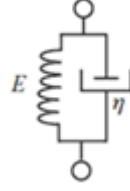
$$E(t) = E_0 e^{-\frac{t}{\tau}}$$

Model gerilmesinin sıfıra ulaşması, katıların gerçek davranışını temsil etmemektedir. Bu model sürünme davranışını açıklayamaz. Çünkü modele göre; sabit bir gerilme uygulandığında, sistem sabit bir hızda sürekli deformasyona uğrayacaktır.

2.1.2. Kelvin-Voigt modeli

Kelvin-Voigt Modeli (Şekil 2.13) elastik yay ve sönümleyici elamanın paralel bağlanmasıyla oluşmaktadır. Bu modele ani bir sabit gerilme uygulandığında, sönümleyici eleman ani olarak uzayamaz ve böylece yayın uzaması da sönümleyici eleman tarafından sınırlandırılmış olur. Sönümleyici eleman, sabit gerilme ve yayın meydana getirdiği gerilme arasındaki farka orantılı hızda uzamaya başlar ve model sabit gerilim altında sürünme davranışı gösterir. Sabit gerilme yayın uzamasıyla oluşan gerilme ile dengelenene kadar model sürünme davranışı gösterir. Model denge durumunda sınır uzama değerine ulaşmış olarak kalır. Model sürünme davranışının üstel

fonksiyonla artarak sınır değere ulaştığını ifade eder. Modeli temsil eden denklemlerin çıkarılışı aşağıda verilmiştir.



Şekil 2.13. Kelvin-Voigt modeli

$$\varepsilon = \varepsilon_y = \varepsilon_s$$

$$\sigma_{toplam} = \sigma_0 = \sigma_y + \sigma_s$$

$$\sigma_0 = E\varepsilon + \eta \frac{d\varepsilon}{dt}$$

$$\frac{d\varepsilon}{dt} + \frac{E}{\eta} \varepsilon = \frac{\sigma_0}{\eta}$$

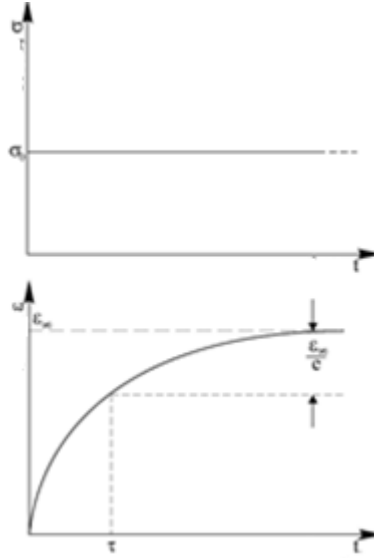
$$\varepsilon = e^{-\int_0^t \frac{E}{\eta} dt} \left[\int_0^t \frac{\sigma_0}{\eta} e^{\int_0^t \frac{E}{\eta} dt} dt + c \right]$$

$$\varepsilon = e^{-\frac{E}{\eta} t} \frac{\sigma_0}{E} \left[e^{\frac{E}{\eta} t} - 1 + c \right]$$

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E} \left[1 - e^{-\frac{E}{\eta} t} + c \right]$$

$$\varepsilon(0) = 0 \Rightarrow c = 0$$

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E} \left[1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right] \quad (2.23)$$



Şekil 2.14. Kelvin Voigt modeli ve ilişkiler

Sürünme denkleminde (Denklem 2.23) $\tau = \eta/E$ parametresi geri kalma süresi olarak tanımlanmıştır. Ani gerilmeye karşılık oluşan sınır uzama değeri $\varepsilon(\infty) = \varepsilon_\infty$ olarak belirlenirse, geri kalma süresi sonunda uzama $\varepsilon(\tau) = \varepsilon_\infty - \varepsilon_\infty/e$ değerine ulaşacaktır. Geri kalma süresi, sürünme deneyinde elde edilen grafikte $\varepsilon_\infty - \varepsilon_\infty/e$ değerine karşılık gelen süre olarak belirlenir (Şekil 2.14).

Kompliansın değişim fonksiyonu, sürünme fonksiyonunun ani gerilme değerine bölünmesi ile elde edilmektedir (Denklem 2.24). Komplians, gerilmedeki bir birimlik değişim sonucunda malzemenin uzamasındaki oransal değişim olarak kabul edilmektedir.

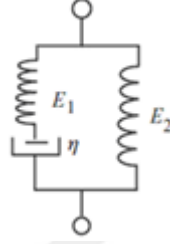
$$J(t) = \frac{\varepsilon(t)}{\sigma_0} = \frac{\varepsilon_\infty}{\sigma_0} \left[1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right] \quad (2.24)$$

$$J(t) = J_\infty \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right)$$

Uzama sabit tutulduğunda model gerilme azalmasını açıklayamayacağı için sistemin gerilmesi de sürekli sabit kalacaktır.

2.1.3. Standart katı model

Standart katı model (Şekil 2.15) viskoelastik malzemelerin sürünme ve gerilme azalmasının her ikisini de tanımlayabilmek için önerilmiş bir modeldir. Model, Maxwell modeline paralel bağlanan bir elastik yay ilave edilerek geliştirilmiştir. Davranış denklemleri Laplace dönüşümleri ile elde edilmiştir.



Şekil 2.15. Standart katı model

Maxwell Elemanı + Yay Elemanı = Standart Katı Model

$$\mathfrak{L}\left(\frac{d\varepsilon}{dt}\right) = \mathfrak{L}\left(\frac{1}{E_1} \frac{d\sigma_m}{dt} + \frac{\sigma_m}{\eta}\right) + \mathfrak{L}(\sigma_y) = \mathfrak{L}(E_2 \varepsilon) = \mathfrak{L}(\sigma) = \mathfrak{L}(\sigma_m) + \mathfrak{L}(\sigma_y)$$

Başlangıç ve sınır koşulları $\varepsilon(0) = 0$ $\sigma_m(0) = 0$ $\sigma(s) = \sigma_m(s) + \sigma_y(s)$

$$\sigma_m(s) = \frac{E_1 s}{s + 1/\tau} \varepsilon(s) + \sigma_y(s) = E_2 \varepsilon(s) = \sigma(s) = \frac{E_1 s}{s + 1/\tau} \varepsilon(s) + E_2 \varepsilon(s)$$

$$\sigma(s) = \frac{E_1 s}{s + 1/\tau} \varepsilon(s) + E_2 \varepsilon(s)$$

$$sE(s)\varepsilon(s) = \frac{E_1 s}{s + 1/\tau} \varepsilon(s) + E_2 \varepsilon(s)$$

$$E(s) = \frac{E_1}{s + 1/\tau} + \frac{E_2}{s}$$

$$\mathfrak{L}^{-1}(E(s)) = \mathfrak{L}^{-1}\left(\frac{E_1}{s + 1/\tau} + \frac{E_2}{s}\right)$$

$$E(t) = E_2 + E_1 e^{-\frac{t}{\tau}}$$

$$\sigma(t) = \left(E_2 + E_1 e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \varepsilon_0$$

$$\mathfrak{L}^{-1}(J(s)) = \mathfrak{L}^{-1} \left(\frac{1}{sE(s)} \right)$$

$$J(t) = \frac{1}{E_2} - \frac{E_1}{E_2(E_1 + E_2)} e^{-\frac{t}{\tau}}$$

$$\varepsilon(t) = \left(\frac{1}{E_2} - \frac{E_1}{E_2(E_1 + E_2)} e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \sigma_0$$

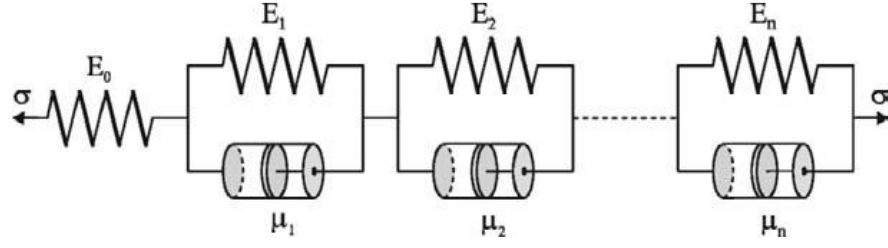
Modelde zamanın sonsuz kabul edilmesi durumu, malzemenin viskoelastik davranışının denge koşuluna ulaştığını temsil etmektedir. Gevşeme modülü, denge koşulunda elastisite modülünü temsil eden E_2 sabitine eşit olacaktır. Bu durumda komplians ise $1/E_2$ değerine eşittir.

Bu yöntemin uygulanabilmesi için testlerden elde edilen veriler ile denklemlerdeki sabit E ve τ parametrelerinin belirlenmesi gerekmektedir.

2.1.4. Genelleştirilmiş Maxwell ve Kelvin-Voigt katı modelleri

Yukarıda katıların gerçek gerilme uzama davranışlarının tek bir Maxwell ya da Kelvin Voigt mekanik modelleri ile temsil edilmesi durumunda karşılaşılan sınırlamalardan bahsedilmiştir. Daha gerçekçi matematik modellerin daha fazla sayıda eleman içeren mekanik benzeşim modelleri ile sağlanabileceği literatürde belirtilmektedir. Genelleştirilmiş Maxwell ve Kelvin Voigt katı modelleri, viskoelastik davranışın n 'inci mertebeden diferansiyel denklem yerine n adet birinci mertebeden diferansiyel denklemin çözümü olarak sunulmasını sağlamaktadır (Drabousky 2009).

Genelleştirilmiş Kelvin-Voigt modelinde (Şekil 2.16) toplam uzama $\varepsilon = \varepsilon_0 + \sum_{j=1}^n \varepsilon_j$ eşitliği ile ve sistemi zorlayan sabit gerilme değeri $\sigma = \sigma_0$ ile tanımlanmaktadır.



Şekil 2.16. Genelleştirilmiş Kelvin-Voigt modeli

Sabit zorlamanın etkisinde n elemanlı genelleştirilmiş Kelvin-Voigt elemanın davranış modeli yardımıyla sürünme ve komplians fonksiyonlarının çıkarılışı aşağıda verilmiştir.

$$\frac{d\varepsilon_j}{dt} + \frac{E_j}{\eta_j} \varepsilon_j = \frac{\sigma_0}{\eta_j}$$

$$\tau_j = \frac{\eta_j}{E_j}$$

$$\varepsilon_j(t) = \frac{\sigma_0}{E_j} \left[1 - e^{-\frac{t}{\tau_j}} \right]$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \sum_{j=1}^n \varepsilon_j$$

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E_0} + \sum_{j=1}^n \frac{\sigma_0}{E_j} \left[1 - e^{-\frac{t}{\tau_j}} \right]$$

$$\frac{\varepsilon(t)}{\sigma_0} = \frac{1}{E_0} + \sum_{j=1}^n \frac{1}{E_j} \left[1 - e^{-\frac{t}{\tau_j}} \right]$$

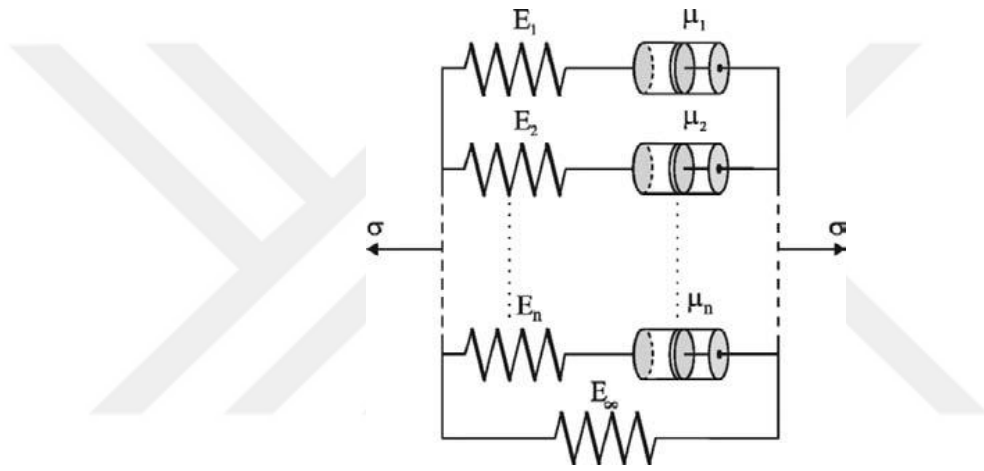
$$J(t) = \frac{1}{E_0} + \sum_{j=1}^n \frac{1}{E_j} \left[1 - e^{-\frac{t}{\tau_j}} \right]$$

$$J(t) = J_\infty + \sum_{j=1}^n J_j \left[1 - e^{-\frac{t}{\tau_j}} \right]$$

Viskoelastik davranış modelinin sürünme ve komplians fonksiyonları sırasıyla

$$\sum_{j=1}^n \frac{\sigma_0}{E_j} \left[1 - e^{-\frac{t}{\tau_j}} \right], \sum_{j=1}^n J_j \left[1 - e^{-\frac{t}{\tau_j}} \right]$$
 serileri ile tanımlanmaktadır.

Genelleştirilmiş Maxwell modeli için n adet Maxwell elemanından oluşturulmuş mekaniksel benzeşim modeli Şekil 2.17’de verilmektedir. Modelde sabit ani uzama miktarı $\varepsilon = \varepsilon_0$ olarak belirtildiği durumda, sistemde oluşan toplam gerilme miktarı $\sigma = \sigma_0 + \sum_{j=1}^n \sigma_j$ olarak tanımlanmaktadır.



Şekil 2.17. Genelleştirilmiş Maxwell modeli

Sabit zorlamanın etkisinde n elemanlı genelleştirilmiş Maxwell modelinin davranışına ait sürünme ve komplians fonksiyonlarının çıkarılması aşağıda verilmiştir.

$$0 = \frac{1}{E_j} \frac{d\sigma_j}{dt} + \frac{\sigma_j}{\eta}$$

$$\tau_j = \frac{\eta_j}{E_j}$$

$$\sigma_j(t) = \sigma_{j_0} e^{-\frac{t}{\tau_j}}$$

$$\sigma = \sigma_0 + \sum_{j=1}^n \sigma_j$$

$$\sigma_j(t) = \sigma_0 + \sum_{j=1}^n \sigma_{j_0} e^{-\frac{t}{\tau_j}}$$

$$\frac{\sigma(t)}{\varepsilon_0} = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} + \sum_{j=1}^n \frac{\sigma_{j_0}}{\varepsilon_0} e^{-\frac{t}{\tau_j}}$$

$$E(t) = E_\infty + \sum_{j=1}^n E_{j_\infty} e^{-\frac{t}{\tau_j}}$$

Viskoelastik davranış modelinin gerilme azalması ve gevşeme modülü (relaksasyon)

fonksiyonları sırasıyla $\sum_{j=1}^n \sigma_{j_0} e^{-\frac{t}{\tau_j}}$, $\sum_{j=1}^n E_{j_\infty} e^{-\frac{t}{\tau_j}}$ serileri ile tanımlanmaktadır.

2.1.5. Genel diferansiyel modelin Prony serisi ile çözümü

Mekanik benzeşim yöntemi incelendiğinde, gerilme ve uzama ile ilgili ifadelerin eşitliğin farklı taraflarına alınarak tekrar düzenlenebileceği görülmektedir. Bu durumda viskoelastik davranış n 'inci mertebeden genel diferansiyel denklem yardımıyla ifade edilebilmektedir. Bundan dolayı bu yaklaşım ile viskoelastik davranışın incelenmesi diferansiyel yöntem olarak adlandırılmaktadır. Aşağıda genel bir viskoelastik davranışın diferansiyel denklemi verilmektedir.

$$p_n \frac{d^n \sigma}{dt^n} + p_{n-1} \frac{d^{n-1} \sigma}{dt^{n-1}} + \dots + p_1 \frac{d \sigma}{dt} + p_n \sigma = q_n \frac{d^n \varepsilon}{dt^n} + q_{n-1} \frac{d^{n-1} \varepsilon}{dt^{n-1}} + \dots + q_1 \frac{d \varepsilon}{dt} + q_1 \varepsilon$$

Genel diferansiyel denklemin kısa gösteriminde operatör gösteriminden yararlanılır. Başlangıç ve sınır şartları sıfır olduğu kabulü ile diferansiyel denklemin Laplace dönüşümü aşağıdaki gibi gerçekleştirilir (Lakes 2009).

$$\sum_{k=0}^n p_k \frac{d^k \sigma(t)}{dt^k} = \sum_{k=0}^n q_k \frac{d^k \varepsilon(t)}{dt^k}$$

$$\mathcal{L}\{P(D)\sigma(t)\} = \mathcal{L}\{Q(D)\varepsilon(t)\}$$

$$P(s)\sigma(s) = Q(s)\varepsilon(s)$$

$$E(s) = \frac{\sigma(s)}{s\varepsilon(s)} = \frac{Q(s)}{sP(s)}$$

$$J(s) = \frac{\varepsilon(s)}{s\sigma(s)} = \frac{P(s)}{sQ(s)}$$

Viskoelastik davranış fonksiyonları arasındaki ilişkiler (bkz. Denklem 2.9a ve Denklem 2.9b) yardımıyla gevşeme modül ve komplians fonksiyonları belirlenmektedir. İki polinom fonksiyonunun bölümü olarak gösterilen Laplace fonksiyonlarının ters dönüşümleri, Heaviside formülü (Denklem 2.25) ile bulunabilmektedir (Aydın ve ark. 1999). Diferansiyel denklemin n 'inci mertebeden analitik çözümü n adet üstel fonksiyonun toplamı olmaktadır. Bu çözüm, viskoelastik davranış fonksiyonlarının seriler ile tanımlanabileceğini göstermektedir.

$$\mathfrak{L}^{-1} \left\{ \frac{P(s)}{Q(s)} \right\} = \sum_{k=1}^n \frac{P(s_k)}{\dot{Q}(s_k)} e^{s_k t} \quad t \geq 0 \quad (2.25)$$

Genel terimi $f(t) = \sum_{j=1}^n A_j e^{-\lambda_j t}$ formülü ile verilen seriler, Prony serisi olarak adlandırılır. Viskoelastik ile ilgili çalışmalarda gevşeme modül fonksiyonu Prony serisi ile temsil edilebilmektedir (Govindjee 2011). Problemin çözümü gerilme azalması testlerinden elde edilen ölçüm sonuçları ile A_j ve λ_j sabitlerinin belirlenmesi durumunda elde edilebilecektir.

Prony serisinin parametrelerinin belirlenmesi amacıyla, öncelikle nonlinear formdaki

Prony serisi $\alpha_j = e^{-\lambda_j t}$ dönüşümü ile $f(t) = \sum_{j=1}^n A_j \alpha_j$ biçiminde lineerleştirilir ve $f(t)$ fonksiyonununsa $f(0)$, $f(\Delta t)$, $f(2\Delta t)$... $f(k\Delta t)$ (ölçüm) değerleri için denklem çözümü gerçekleştirilir.

Seri yaklaşımının her bir ölçüm sonucu ile olan ilişkisini belirlemek amacıyla,

$f(t) = \sum_{j=1}^n A_j e^{-\lambda_j t}$ formül ile belirtilen ilişki aşağıdaki gibi elde edilir (Denklem 2.26).

İlişkilerde: t ölçüm anını, Δt ölçüm aralığını, $f(k\Delta t)$ gerilme azalması ya da sürünme fonksiyonun t süresinde aldığı değerleri ifade etmektedir.

$$\begin{array}{l}
t \\
\hline
0 \\
t_1 = \Delta t \\
t_2 = 2\Delta t \\
t_3 = 3\Delta t \\
\vdots \\
t_k = k\Delta t
\end{array}
\begin{array}{l}
f(t) = \sum_{j=1}^n A_j e^{-\lambda_j t} \\
f(0) = \sum_{j=1}^n A_j e^{-\lambda_j 0} \\
f(\Delta t) = \sum_{j=1}^n A_j e^{-\lambda_j \Delta t} \\
f(2\Delta t) = \sum_{j=1}^n A_j e^{-\lambda_j 2\Delta t} \\
f(3\Delta t) = \sum_{j=1}^n A_j e^{-\lambda_j 3\Delta t} \\
\vdots \\
f(k\Delta t) = \sum_{j=1}^n A_j e^{-\lambda_j k\Delta t}
\end{array}
\begin{array}{l}
f(t) = \sum_{j=1}^n A_j \alpha_j \\
f(0) = \sum_{j=1}^n A_j \\
f(\Delta t) = \sum_{j=1}^n A_j \alpha_j \\
f(2\Delta t) = \sum_{j=1}^n A_j \alpha_j^2 \\
f(3\Delta t) = \sum_{j=1}^n A_j \alpha_j^3 \\
\vdots \\
f(k\Delta t) = \sum_{j=1}^n A_j \alpha_j^k
\end{array}
\quad (2.26)$$

Prony serisinin α_j terimleri n 'inci mertebeden bir polinom fonksiyonunun kökleri olarak tanımlanırsa, kurulan polinom fonksiyonu Denklem 2.27 ile ifade edilir.

$$p(\alpha) = \prod_{j=1}^n (\alpha - \alpha_j) = \alpha^n + c_{n-1} \alpha^{n-1} + c_{n-2} \alpha^{n-2} + \dots + c_0 \quad (2.27)$$

Polinom fonksiyonunun her bir α_j kökü, aşağıdaki eşitliği sağlar.

$$p(\alpha_j) = \alpha_j^n + c_{n-1} \alpha_j^{n-1} + c_{n-2} \alpha_j^{n-2} + \dots + c_0 = 0$$

Bu polinom eşitliğinin, bir A_j katsayısı ile çarpım sonucu Denklem 2.28'deki gibi yine sifıra eşit olur.

$$A_j p(\alpha_j) = A_j \alpha_j^n + A_j c_{n-1} \alpha_j^{n-1} + A_j c_{n-2} \alpha_j^{n-2} + \dots + A_j c_0 = 0 \quad (2.28)$$

Denklem 2.28'deki c_n katsayıları paranteze alınarak, gerilme azalmasının değerlerini ifade eden polinomun $A_j \alpha_j$ terimlerinin toplamı, Denklem 2.29'da verilmiştir.

$$\sum_{j=1}^n A_j \alpha_j^n + c_{n-1} \sum_{j=1}^n A_j \alpha_j^{n-1} + c_{n-2} \sum_{j=1}^n A_j \alpha_j^{n-2} + \dots + c_0 \sum_{j=1}^n A_j = 0 \quad (2.29)$$

Denklemdaki c katsayılarının yaklaşık değerleri, en küçük kareler yöntemi kullanılarak belirlenebilir. Bu durumda her bir c katsayısı için bir test yaparak ağırlıklı c katsayısı

hesaplanabilir ya da c katsayılarının sayısı kadar bir denklem sistemi kurularak tam değerler hesaplanabilir. Bu amaçla, aşağıdaki denklemlerin sırasıyla $\alpha_j, \alpha_j^2, \alpha_j^3 \dots$ ve α_j^{n-1} terimleri ile çarpılarak genişletilmesi gerekmektedir.

$$\begin{aligned}
 A_j p(\alpha_j) &= A_j \alpha_j^n + A_j c_{n-1} \alpha_j^{n-1} + A_j c_{n-2} \alpha_j^{n-2} + \dots + A_j c_0 = 0 \\
 \alpha_j A_j p(\alpha_j) &= A_j \alpha_j^{n+1} + A_j c_{n-1} \alpha_j^n + A_j c_{n-2} \alpha_j^{n-1} + \dots + A_j c_0 \alpha_j = 0 \\
 \alpha_j^2 A_j p(\alpha_j) &= A_j \alpha_j^{n+2} + A_j c_{n-1} \alpha_j^{n+1} + A_j c_{n-2} \alpha_j^{n-1} + \dots + A_j c_0 \alpha_j^2 = 0 \\
 &\dots\dots\dots \\
 \alpha_j^{n-1} A_j p(\alpha_j) &= A_j \alpha_j^{2n-1} + A_j c_{n-1} \alpha_j^{2n} + A_j c_{n-2} \alpha_j^{2n-1} + \dots + A_j c_0 \alpha_j^{n-1} = 0
 \end{aligned}$$

Yukarıda kurulan denklem sisteminde, c_n ortak katsayıları için tüm A_j ve α_j terimleri toplanırsa aşağıdaki denklem sistemi oluşturulur.

$$\begin{aligned}
 \sum_{j=1}^n A_j \alpha_j^n + c_{n-1} \sum_{j=1}^n A_j \alpha_j^{n-1} + c_{n-2} \sum_{j=1}^n A_j \alpha_j^{n-2} + \dots + c_0 \sum_{j=1}^n A_j &= 0 \\
 \sum_{j=1}^n A_j \alpha_j^{n+1} + c_{n-1} \sum_{j=1}^n A_j \alpha_j^n + c_{n-2} \sum_{j=1}^n A_j \alpha_j^{n-1} + \dots + c_0 \sum_{j=1}^n A_j \alpha_j &= 0 \\
 \sum_{j=1}^n A_j \alpha_j^{n+2} + c_{n-1} \sum_{j=1}^n A_j \alpha_j^{n+1} + c_{n-2} \sum_{j=1}^n A_j \alpha_j^{n-1} + \dots + c_0 \sum_{j=1}^n A_j \alpha_j^2 &= 0 \\
 &\dots\dots\dots \\
 \sum_{j=1}^n A_j \alpha_j^{2n-1} + c_{n-1} \sum_{j=1}^n A_j \alpha_j^{2n} + c_{n-2} \sum_{j=1}^n A_j \alpha_j^{2n-1} + \dots + c_0 \sum_{j=1}^n A_j \alpha_j^{n-1} &= 0
 \end{aligned}$$

$f(k\Delta t) = \sum_{j=1}^n A_j \alpha_j^k$ ölçüm sonuçları denklem sistemi için uygun yerlere yazılırsa aşağıdaki gibi matris formunda gösterilebilir.

$$\begin{bmatrix} f(0) & f(\Delta t) & f(2\Delta t) & \dots & f((n-1)\Delta t) \\ f(\Delta t) & f(2\Delta t) & f(3\Delta t) & \dots & f(n\Delta t) \\ f(2\Delta t) & f(3\Delta t) & f(4\Delta t) & \dots & f((n+1)\Delta t) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ f((n-1)\Delta t) & f(n\Delta t) & f((n+1)\Delta t) & \dots & f((2n-2)\Delta t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_0 \\ c_1 \\ c_2 \\ \vdots \\ c_{n-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f(n\Delta t) \\ f((n+1)\Delta t) \\ f((n+2)\Delta t) \\ \vdots \\ f((2n-1)\Delta t) \end{bmatrix}$$

Denklem sisteminin çözümü için iterasyon yöntemleri kullanılarak, denklem sistemini sağlayan c değerleri hesaplanır. Bu tür sistemler için eşlenik gradyan (conjugate

gradient) metodunun kullanılabilir (Shewchuk 1994). Çünkü iterasyona başlangıç değerleri sıfır olarak seçilse de hızlı bir çözüm elde edilebilmektedir.

c_n katsayıları belirlendikten sonra aşağıdaki polinom fonksiyonunun çözümü yapılır.

$$p(\alpha) = \prod_{j=1}^n (\alpha - \alpha_j) = \alpha^n + c_{n-1}\alpha^{n-1} + c_{n-2}\alpha^{n-2} + \dots + c_0$$

Polinom fonksiyonun eş matrisinin öz değerlerinin bulunması ile polinomun α_j kökleri hesaplanır. Bu yöntemin diğer kök bulma algoritmalarına olan üstünlüğü bir kökün bulunabilmesi için önceden bir başlangıç değerine ya da kökün bulunacağı aralık değerine ihtiyaç duymamasıdır. Polinom fonksiyonlarının köklerini hesaplanması sırasında Matlab programı bu yöntemi başarılı bir şekilde kullanmaktadır.

Prony serisinin λ_j terimleri, $\lambda_j = \ln(\alpha_j)/\Delta t$ dönüşümü ile belirlenmektedir. Prony serisinin ikinci terimi olan A_j değerlerinin hesaplanması için denklem sistemi belirtilen α_j kökleri ile tekrar düzenlenmelidir.

$$\begin{aligned} f(0) &= \sum_{j=1}^n A_j & f(0) &= A_1 + A_2 + A_3 + \dots + A_n \\ f(\Delta t) &= \sum_{j=1}^n A_j \alpha_j & f(\Delta t) &= A_1 \alpha_1 + A_2 \alpha_2 + A_3 \alpha_3 + \dots + A_n \alpha_n \\ f(2\Delta t) &= \sum_{j=1}^n A_j \alpha_j^2 & f(2\Delta t) &= A_1 \alpha_1^2 + A_2 \alpha_2^2 + A_3 \alpha_3^2 + \dots + A_n \alpha_n^2 \\ f(3\Delta t) &= \sum_{j=1}^n A_j \alpha_j^3 & f(3\Delta t) &= A_1 \alpha_1^3 + A_2 \alpha_2^3 + A_3 \alpha_3^3 + \dots + A_n \alpha_n^3 \\ \vdots & & \vdots & \\ f(k-1)\Delta t &= \sum_{j=1}^n A_j \alpha_j^{k-1} & f(k-1)\Delta t &= A_1 \alpha_1^{k-1} + A_2 \alpha_2^{k-1} + A_3 \alpha_3^{k-1} + \dots + A_n \alpha_n^{k-1} \end{aligned}$$

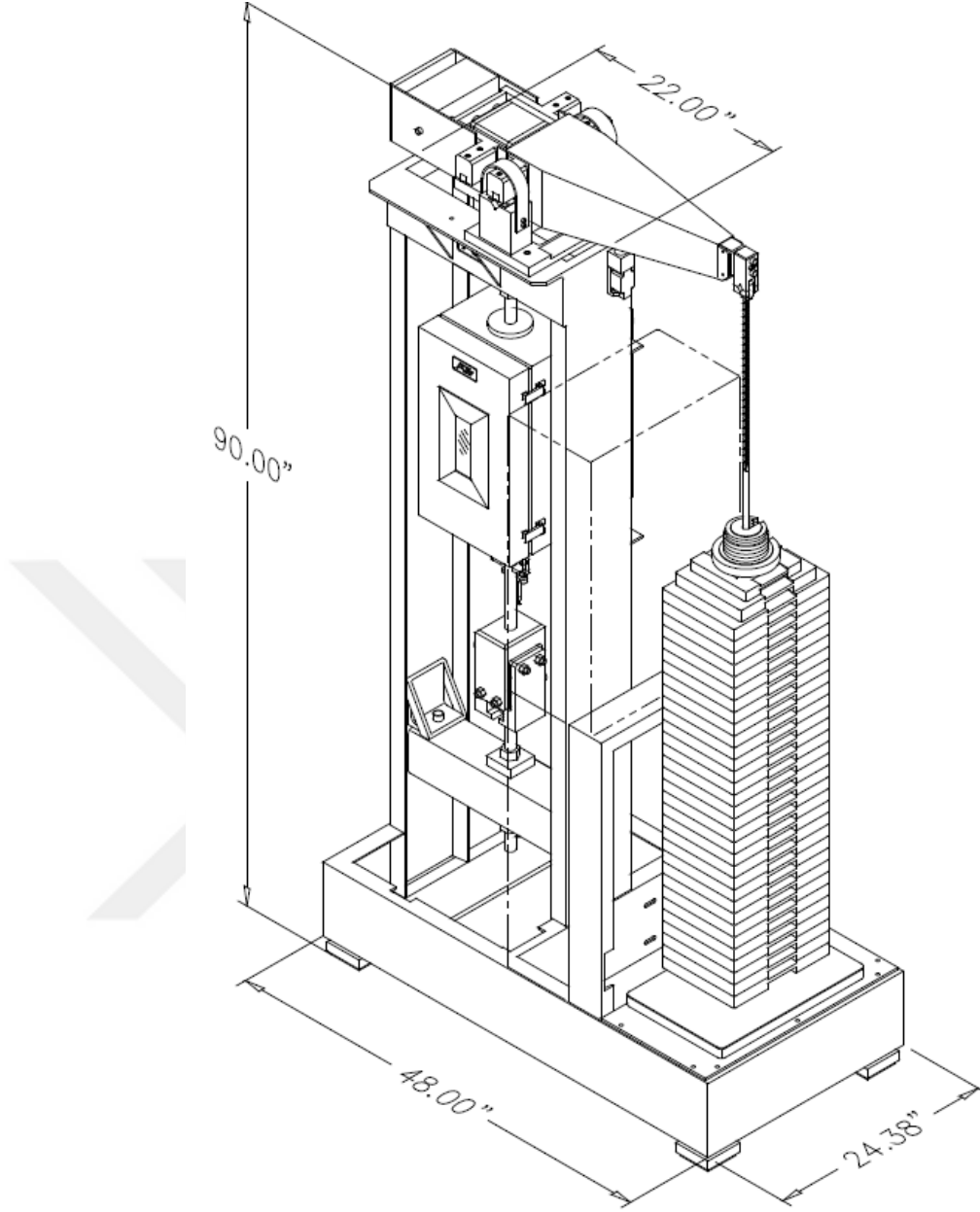
Denklem sisteminin matris formu aşağıda verilmiştir. Matris çözümü için eşlenik gradyen yöntemi uygun bir yöntem olmaktadır.

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & \dots & 1 \\ \alpha_1 & \alpha_2 & \alpha_3 & \dots & \alpha_n \\ \alpha_1^2 & \alpha_2^2 & \alpha_3^2 & \dots & \alpha_n^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \alpha_1^k & \alpha_2^k & \alpha_3^k & \dots & \alpha_n^k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ \vdots \\ A_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f(0) \\ f(\Delta t) \\ f(2\Delta t) \\ \vdots \\ f(k\Delta t) \end{bmatrix}$$

Prony serisi yardımıyla çözümü gerçekleştirilen gerilme azalması fonksiyonu için lineer viskoelastik model kurulmuş olur. Yaklaşım için önceden belirlenmesi gereken tek değer, modeli oluşturan sistemin kaç elemanlı olduğudur. Sabestian ve ark. (2008) Kevlar şerit kumaş için iki parametreliliğin bir parametreliliğe göre daha iyi olduğunu, Vangheluwe ve Kiekens (1996) kumaş ve çözgü sistemi için ise üç parametreliliğin yeterli olduğunu belirtmişlerdir. Literatürdeki çalışmalara uygun olarak, tezde öncelikle üç parametreliliğin ve sonrasında daha yüksek sayılarda eleman içeren modellerin deneysel çalışmalar ile uygunluğu araştırılacaktır.

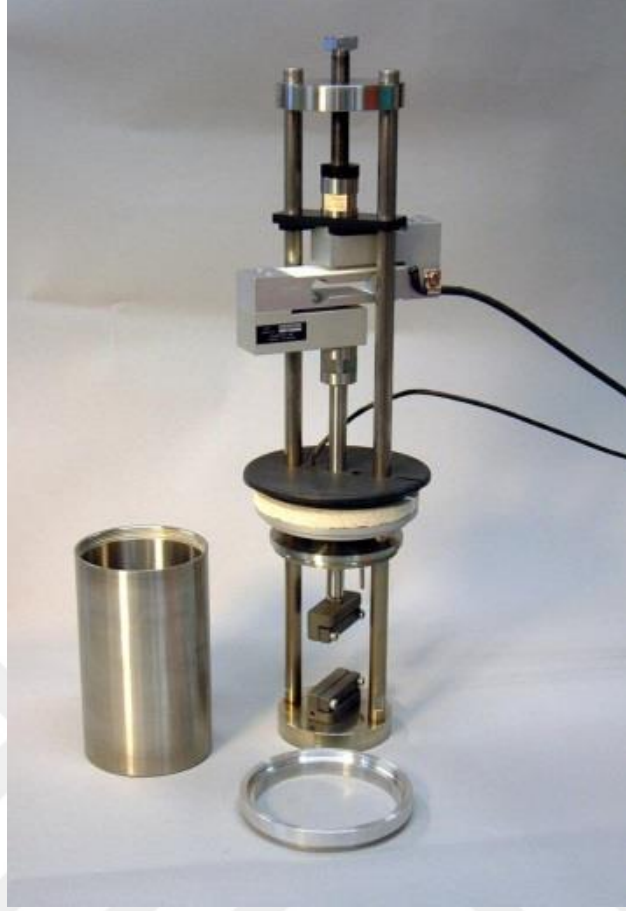
2.2. Test Cihazları

Sürünme deneyleri için kullanılan test cihazlarının temel yapısı, düşey doğrultuda ölçüm yapan cihazlar tipindedir (Şekil 2.18). Testlerde sabit gerilme, seçilen ağırlıklar kullanılarak uygulanmaktadır. Cihazdaki algılayıcı, metal parçanın düşey konumunu ölçer. Cihaz ölçüm değerini, test örneklerinin zamana bağlı uzaması olarak belirler.



Şekil 2.18. Sürünme test cihazının görünüşü (Anonim 2008a)

Gerilme azalması, test örneğinin uzama değerinin sabit tutulduğu şartlarda gözlemlenir. Sabit birim uzama sonucu test örneğinde meydana gelen gerilme değişimi, yük hücresinden okunan analog sinyal ile ölçülmektedir (Şekil 2.19, Şekil 2.20).



Şekil 2.19. Gerilme azalması test cihazının ölçme elemanı (Anonim 2005)



Şekil 2.20. Gerilme azalması test cihazı (Anonim 2005)

Gerilme-uzama deneyleri için kullanılan üniversal test cihazlarının elektromekanik ve servo hidrolik olmak üzere iki tipi bulunmaktadır. Şekil 2.21’de görüldüğü gibi teste tabi tutulacak olan numune cihazda bulunan alt ve üst çenelere sabitlenir. Test

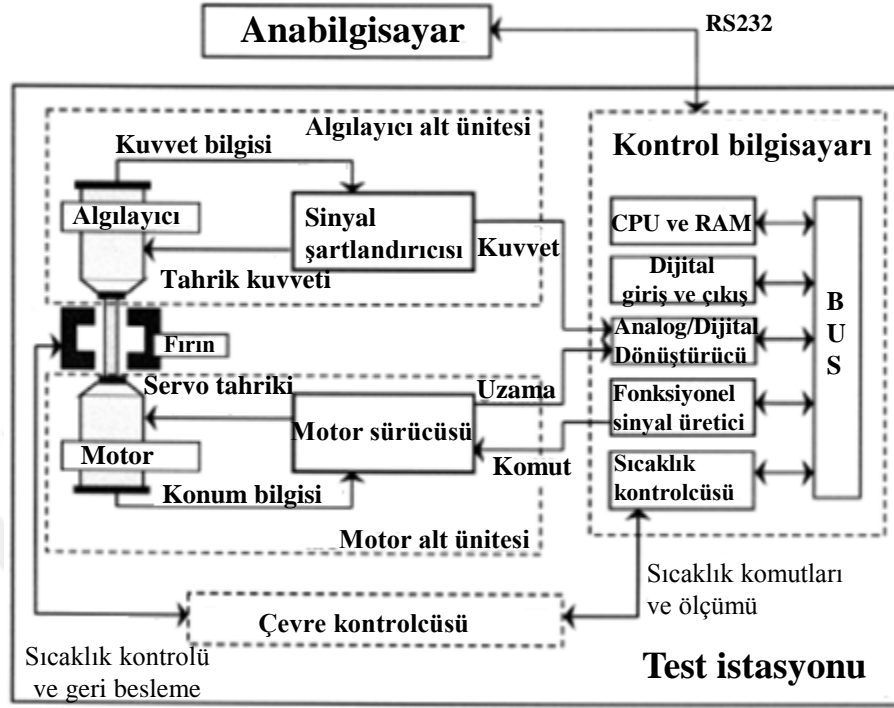
esnasında, etkiyen kuvvetten dolayı numune ve çeneler arasında kayma oluşmaması için çene yüzeyleri sürtünme katsayısı yüksek bir malzeme ile kaplanır. Bir servo motor veya hidrolik bir piston ile hareketli çene tahrik edilir. Bu esnada test numunesinin uzamasından dolayı numunede oluşan kuvvet, çoğunlukla hareketli çeneye bağlanan yük hücresiyle ölçülür ve cihazın kontrol sistemine iletilir.



Şekil 2.21. Elektromekanik üniversal test cihazı (Anonim 2015)

Üniversal test cihazları Şekil 2.22’de gösterilen kontrol sistemlerine sahiptirler. Kontrol sistemi algılayıcıdan aldığı sinyallere uygun olarak, test rutinini gerçekleştirir. İstenilen

test standardına göre oluşturulacak yazılımların sisteme rahatlıkla uygulanabilmesi nedeniyle, universal test cihazları her alanda yaygın olarak kullanılmaktadır.



Şekil 2.22. Bir universal test cihazı ve deney şartlarını denetleyen kontrol sisteminin mantığı (Davis 2004'den değiştirilerek alınmıştır.)

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Tezin bu bölümünde testlerde kullanılan dokuma kumaşların özellikleri ve testlerin uygulanması konusunda bilgiler verilmiştir. Ölçümler, Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Tekstil Mühendisliği Bölümü'nde, tekstil malzemelerinin mekanik özelliklerinin analizi için geliştirilen Otomatik Gerilme Uzama Analiz Cihazı (Automated Tensile Analyzer (ATA)) ve Instron 4301 cihazlarında gerçekleştirilmiştir.

3.1. Materyal

Bu çalışmanın materyal kısmını, geliştirilen universal bir test cihazı ve bu cihazda gerçekleştirilen testlerde kullanılan değişik konstrüksiyonlara sahip dokuma kumaşlar oluşturmaktadır.

Geliştirilen universal test cihazı için hedeflenen teknik özellikleri aşağıda verilmektedir.

-Hareketli çenenin ayarlanabilir hız aralığı: 0-300 mm/dak

-İplik ve kumaş ölçümleri için kullanılan üç farklı yük hücresinin gerginlik ölçme aralıkları: 0-200 N, 0-2000 N, 0-5000 N

-Çeneler arası mesafe 1300 mm kadar açılabilir

-Cihazda gerçekleştirilmesi hedeflenen testler:

-Yük-uzama eğrisi (kopma mukavemeti ve kopma uzaması)

-Gevşeme testi (relaksasyon)

-Sürünme testi (creep)

-Dinamik (tekrarlı) zorlama testi

Şekil 3.1'de test kapsamında geliştirilen universal test cihazının genel yapısı gösterilmektedir. Cihaz temel olarak; sabit çene, hareketli çene, gerginlik ölçümünü gerçekleştiren yük hücresi, hareketli çeneyi tahrik eden servo motor ile kontrol devresi ve test yazılımlarından oluşmaktadır. Gerginlik ölçümünü gerçekleştiren yük hücresi, sabit çeneye aksel rulmanlı bir yatak ile bağlanmıştır. Servo motorun hareketi, bilyeli

vida ve somun mekanizması ile hareketli çeneye iletilmiştir. Bilyeli vidanın kullanım amacı; servo motordan daha yüksek verim ile hareketli çeneye güç iletiminin sağlanmasıdır.



Şekil 3.1. Geliştirilen üniversal test cihazı

Üniversal test cihazlarında olduğu gibi bu test cihazında da hangi test yapılsa yapılsın, test sonucu gerginlik ve uzama olmak üzere iki parametrenin belirlenmesi ve aralarındaki ilişkinin elde edilmesine dayanmaktadır. Gerginliğin değeri, yük hücresinden elektriksel gerilim değeri olarak elde edildikten sonra, bir sinyal kuvvetlendirme devresinden geçirilerek ölçme aralığını kapsayacak şekilde 0-10 V sinyal değişim aralığına kalibre edilmektedir. Kuvvetlendirilmiş gerginlik sinyali, sayısal filtreleme tekniği ile gürültüden arındırıldıktan sonra bilgisayar tarafından okunup kaydedilmektedir. Uzamanın belirlenmesi ise; servo motorun dönüş açısının ve dolayısı ile devir sayısının motor milindeki bir artımlı mil kodlayıcıdan alınan dijital sinyallerin bilgisayar tarafından okunması işleminden sonra, dişli ve vida-somun mekanizmasına ait kinematik ilişkiler kullanılarak gerçekleştirilir. Yazılım, eş zamanlı

olarak her iki parametreyi bilgisayar tarafından okunmasını ve veri dosyasına kaydedilmesini sağlamaktadır.

Geliştirilen test cihazı ile viskoelastik davranışı araştırmak üzere, çözgü sıklığı 11 çözgü/cm olan, 6 Nm şenil çözgü ile atkı sıklığı 7 atkı/cm olan, 1100 denye polyester ve şenil (çözgüde kullanılan) atkı iplikleriyle, bezayağı, dimi 2/2 ve beşli saten örgülü kumaşlar dokunmuştur. Çizelge 3.1’de görüldüğü gibi üç farklı örgü, iki farklı atkı tipi olmak üzere toplam üç farklı konstrüksiyona sahip kumaş numuneleri elde edilmiştir. Üretilen kumaşlara ait ölçülen özellikler çizelgede verilmiştir. Bu numunelere gerilme azalması, sürünme ve dinamik zorlama testleri uygulanmıştır.

Çizelge 3.1. Testlerde kullanılan dokuma kumaş yapıları

Kumaş tipi	Kumaş örgüsü	Kumaş ağırlığı (g/m ²)	Kumaş kalınlığı (mm)	İplik tipi	İplik numarası		İplik sıklığı (iplik/cm)	
					Atkı	Çözgü	Atkı	Çözgü
Döşemelik-1	Bezayağı	328	1,52	Atkı PES puntalı Çözgü PES Şenil	1100 denye	6 Nm	7,6	11,8
Döşemelik-2	Dimi 2/2	333	1,7	Atkı PES puntalı Çözgü PES Şenil	1100 denye	6 Nm	7,6	11,8
Döşemelik-3	Saten 5/1	354	1,98	PES Şenil	6 Nm	6 Nm	7,6	11,8

3.2. Yöntem

Tez kapsamında yapılan çalışmalarda kullanılan yöntemler üç grupta değerlendirilecektir. Bunlar; cihaz tasarımında kullanılan yöntemler, kumaş testlerinde kullanılan yöntemler ve kumaşın gerilme azalması davranışının incelenmesinde kullanılan matematiksel yöntemlerdir.

3.2.1. Test cihazı tasarımı

Bölüm 3.1’de verilen teknik özellikleri sağlayacak şekilde, cihaz tasarımında aşağıdaki hususlar göz önüne alınmıştır.

-Yük hücresinin sabit çeneye takılması ile mekanik titreşimlerin olumsuzluklarından kaçınılmaktadır.

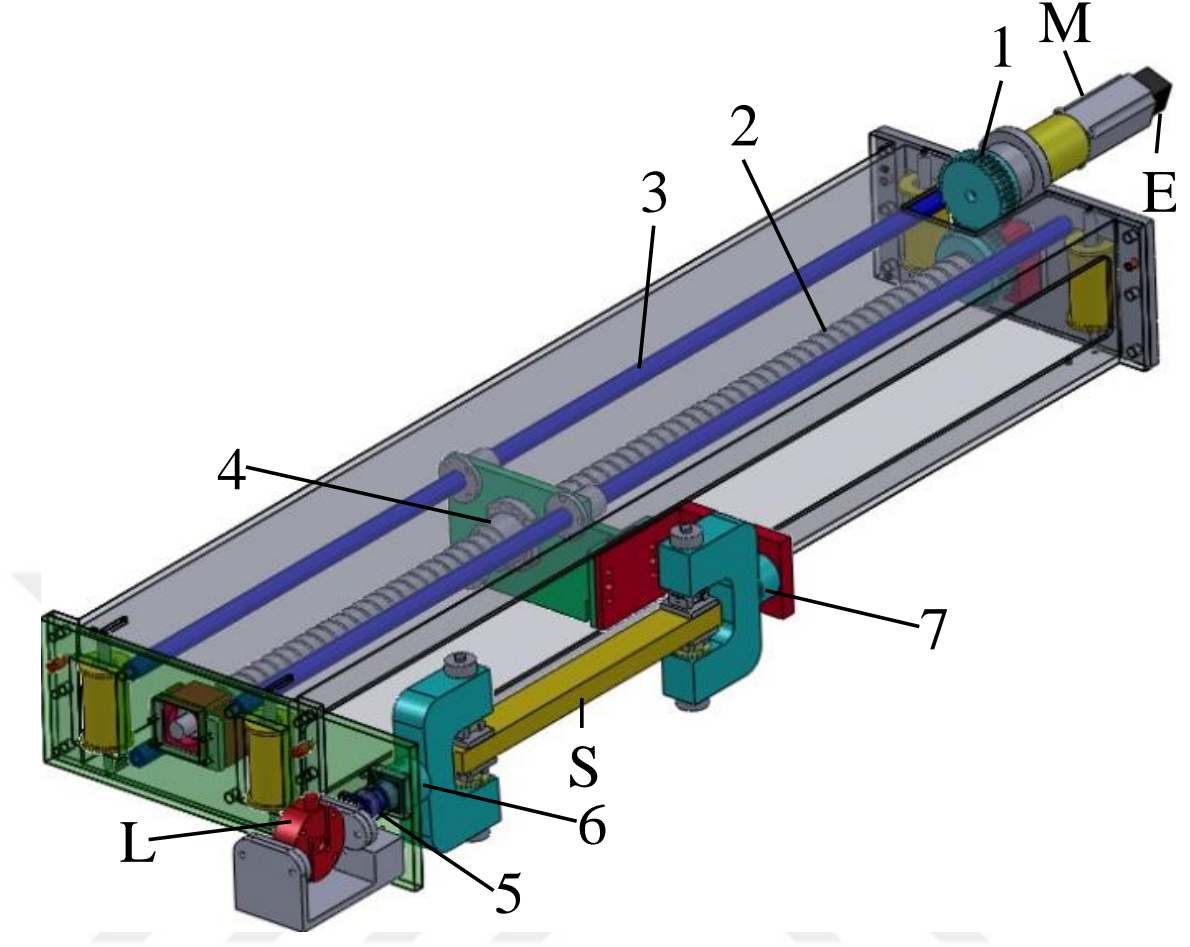
-Servo motorla doğrudan tahrik edilen bilyeli sonsuz vida ile hareketli çenenin yer değiştirmesi sağlanmakta ve yüksek çözünürlüklü artımlı mil kodlayıcı ile kontrol edilmektedir.

-Test sırasında kumaşın uzama ve gerilme değerlerinin cihaz üzerinden takip edilebilecek şekilde gerekli göstergeler ve kumanda anahtarları bulunmaktadır.

-Kazaları önlemek ve kontrollü bir test ortamı sağlamak amacıyla kapalı bir test ortamı kurulmuştur.

-Yük hücrelerinden doğru ölçüm sonuçlarının elde edilebilmesi için yük hücresinin zorlanma doğrultusu ile sabit ve hareketli çenenin kumaş tutma düzlemleri aynı hizada kalacak şekilde hareketli çenenin tahriki sağlanmıştır.

Bu noktalar göz önüne alınarak tasarlanan test cihazının genel görünüşü ve temel üniteleri Şekil 3.2'de verilmektedir. Cihazda, 1:25 çevrim oranına sahip dişli mekanizması (1) aracılığı ile servo motorun (M) ürettiği hareket, bilyeli vidaya (2) aktarılmaktadır. Somun (4) bilyeli vida üzerine monte edilmiştir. Bilyeli vida cihazın önünden arkaya doğru gövde üzerine yataklanmıştır. Hareketli çene (7) somuna sabitlenmiş olup somunla birlikte hareket ettirilmektedir. Sabit çene (6) cihazın gövdesine aksel olarak yataklanmıştır. Sabit çenenin sol ucuna yük hücresi (L) monte edilmiştir. Yük hücresi, test bölgesinin dışında kalacak şekilde cihazın sol tarafından rijit bir şekilde gövdeye sabitlenmiştir. Bunun sonucu olarak, sabit çeneye etki eden kuvvet doğrudan yük hücresine iletilir. Etkiyen kuvvetin neticesinde gerçekleşen çok küçük bir uzama, sabit çenenin aksel rulmanlı yatakta ileri hareketi ile yük hücresine iletilmektedir. Yük hücresinin ölçme prensibi gereği; 5 kN'luk kuvvetin etki etmesi durumunda yük hücresinde 0,4 mm'lik bir esneme gerçekleşmektedir.



Şekil 3.2. Tasarlanan test cihazının temel üniteleri

3.2.1.1. Servo motor ve hareket iletim mekanizmasının seçimi

Servo motoru seçme işlemi, cihazın gerilme ölçüm aralığı ve güvenli çalışma hız aralığını karşılayacak şekilde aşağıdaki hesaplar yapılarak gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, cihazda ölçülmek istenilen maksimum gerginlik aşağıdaki verilen güç iletim formülü ile servo motor miline etki eden indirgenmiş moment olarak yansıtılmıştır. Denklem 3.1'in sol tarafındaki ifade; motor tarafından sağlanan gücü ifade ederken, sağ taraftaki ifadeler; sırasıyla vidalı mil tarafından hareketli çeneye aktarılan gücü ve hareket iletim sistemindeki kayıp gücü temsil etmektedir.

$$M_m \omega_m = F_c V_c + \text{Kayıp Güç} \quad (3.1)$$

Dişli ve bilyeli milin kinematik ilişkileri dikkate alınarak somun hızı (V_c) aşağıdaki gibi yazılabilmektedir.

$$V_c = \omega_m ih / 2\pi \quad (3.2)$$

Denklem 3.1’de V_c yerine Denklem 3.2’deki eşiti yazılırsa, Denklem 3.3 elde edilir.

$$M_m \omega_m = F_c \omega_m ih / 2\pi + \text{Kayıp Güç} \quad (3.3)$$

Mekanik sistemdeki güç kaybı verim faktörü ile temsil edildiğinde Denklem 3.3, 3.4 nolu denkleme dönüşür.

$$M_m = F_c ih / 2\pi 10\delta \quad (3.4)$$

Burada

M_m : Motorun maksimum torku (Nm)

F_c : Cihazda ölçülmek istenilen maksimum gerginlik (N)

i : Dişli çevrim oranı

h : Bilyeli vida hatvesi (mm)

δ : Mekanik sistemin toplam güç iletim verimi (%)

parametrelerini ifade etmektedir.

Cihazın 0-300 mm/dakika çene hız aralığı, servo motorun hız aralığı ile karşılanması gerekmektedir. Buna göre Denklem 3.2’den motorun açısal hızı (ω_m) aşağıdaki gibi verilebilir.

$$\omega_m = 2\pi V_c / ih \quad (3.5)$$

Bilyeli milin vida hatvesi ve dişli mekanizmasının çevrim oranı için 5 mm ve 1:25 değerleri seçilmiştir. Sistemin toplam güç iletim verimi %50 olarak alınmıştır. İstenen cihaz gerginlik ölçümü ve çalışma hızı aralıkları için motorun maksimum hızı ve maksimum tork değeri, aşağıdaki işlemler ile belirlenmektedir:

$$\omega_m = 2\pi \times 300 / \left(\frac{1}{25} \times 5 \right)$$

$$\omega_m \cong 9424 \text{ rad/dakika}$$

$$\omega_m \cong 157 \text{ rad/s} \cong 1500 \text{ devir/dakika}$$

$$M_m = 5000x \left(\frac{1}{25} \right) x5 / (2\pi x10x50)$$

$$M_m \cong 0.318 \text{ Nm}$$

Bu hesaplamalara göre test cihazının tahriki için 1,27 Nm tork üreten 400 W ve 3000 devir/dakika anma çalışma hızına sahip bir servo motor seçilmiştir. Testler için gerekli olan maksimum hız seçilen servo motorun anma hızı tarafından sağlanırken, yeni bir test için hareketli çenenin test başlangıç konumuna yaklaşık iki kat hızda geri dönebilmesine 5000 devir/dakikalık motor hızı (boşta çalışma) izin vererek test süresini azaltmaktadır. 1,27 Nm tork değeri ise cihazın maksimum ölçme değerinin (5 kN) çok üzerinde kuvvetleri karşılayabilecek düzeyde olup, gerginlik ölçümünü güvenli bir şekilde gerçekleştirebilecek seviyededir. Çizelge 3.2’de seçilen Delta ECMA-C30804GSW servo motorun (Anonim 2009) ve Çizelge 3.4’te seçilen Thomson KGF_D(FK) bilyeli vidanın (Anonim 2013) teknik özelliklerini verilmektedir. Seçilen 32 mm çapındaki bilyeli vidanın statik yük taşıma kapasitesi 36,3 kN ve dinamik yük taşıma kapasitesi 19,3 kN olup testlerde karşılaşılabilecek olan 5 kN’luk üst sınırın oldukça üzerinde bulunmaktadır. Cihazdan istenilen çalışma şartları için bilyeli mil ve servo motorun rahatlıkla kullanılabilmesi yapılan hesaplamalar ile gösterilmiştir.

Çizelge 3.2. Servo motorun teknik özellikleri

Anma gücü (kW)	0,4
Anma torku (Nm)	1,27
En büyük torku (Nm)	3,82
Anma hızı (devir/dakika)	3000
En büyük hızı (devir/dakika)	5000
Dişli oranı (gezegen-güneş mekanizmasına sahip helisel dişli redüktör)	1:25
Güç iletim verimliliği (%)	85
Mil kodlayıcı çözünürlüğü (puls/tur)	10000

Çizelge 3.3. Bilyeli vidanın teknik özellikleri

Bilyeli mil çapı (mm)	32
Hatve ya da adım (mm)	5
Doğrusallık hata miktarı (C7 tolerans sınıfı) ($\mu\text{m}/\text{mm}$)	$\pm 50/300$
Dinamik yük taşıma kapasitesi (kN)	19,3
Statik yük taşıma kapasitesi (kN)	36,3
Eksenel rijitlik (kN/ μm)	5
Güç iletim verimlik katsayısı (%)	93 %

3.2.1.2. Yük hücresinin seçimi

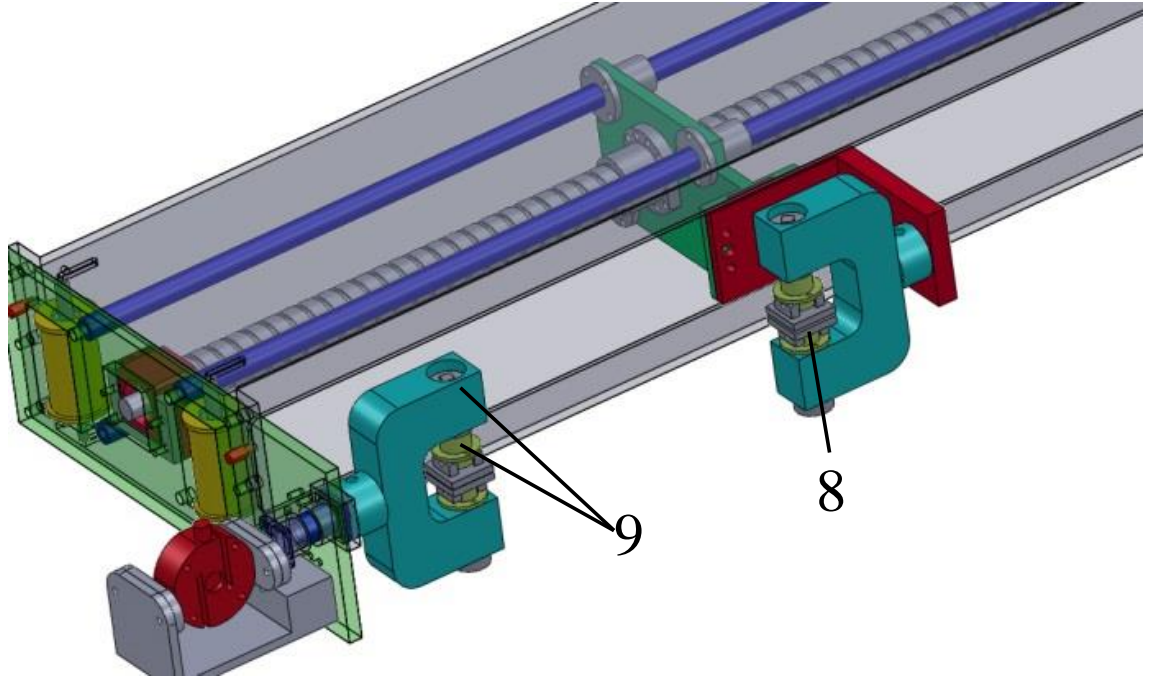
Özel olarak tasarlanmış ve üzerlerinde strain gauge olarak isimlendirilen dirençlere sahip yük hücreleri, maruz bırakıldıkları yük neticesinde kendisinde ve dolayısıyla boyutsal değişimin direnç değerinde sebep olduğu etkiyi elektriksel sinyale dönüştürmek amacıyla kullanılan ölçme elemanlarıdır. Çekme, basma, eğilme ve burulma zorlamalarını ölçecek şekilde özel geometriye sahip yük hücreleri, belirli ölçme aralıklarında üretilip satılmaktadır. Yük hücrelerinin 0-10 V aralığındaki sinyal çıkışı, lineer eğri karakteristiğine sahiptir. Bu test cihazında çekme zorlamasına maruz kalan tekstil malzemelerinin mekanik özelliklerinin ölçülebilmesi amaçlandığından, çekme kuvvetine göre çalışan S tipi yük hücresi kullanılmıştır. İplik ve kumaşların mekanik özelliklerinin ölçülebilmesi için de ölçme aralıkları farklı yük hücreleri seçilmiştir. Bundan dolayı, 0-500 N ölçüm aralığına sahip yük hücresi ipliklerin testi için seçilmiştir. 0-2000 N ve 0-5000 N ölçüm aralığına sahip yük hücreleri ise kumaş testleri için seçilmiştir. Tüm ölçme aralıkları için yerli üretim olan EŞİT S-tipi yük hücreleri ve kuvvetlendiricisi satın alınmıştır. Seçilen yük hücrelerine ait teknik özellikler Çizelge 3.4'de verilmektedir (Anonim 2008b).

Çizelge 3.4. Seçilen yük hücrelerine ait teknik özellikler

Ürün kodu	STCS50	STCS200	TB500
Kapasite (kg)	50	200	500
Maksimum yükte esneme (mm)	0,4	0,4	0,4
Çözünürlük (g)	5	20	50
Doğruluk sınıfı (OIMLR60 standardına göre)	C3	C3	C3
Toplam hata (%)	$\leq\pm 0,02$	$\leq\pm 0,02$	$\leq\pm 0,02$
En büyük besleme gerilimi (DCV)	15	15	15
Amplifier kazanç değeri (mV/V)	$2\pm 0,1\%$	$2\pm 0,1\%$	$2\pm 0,1\%$

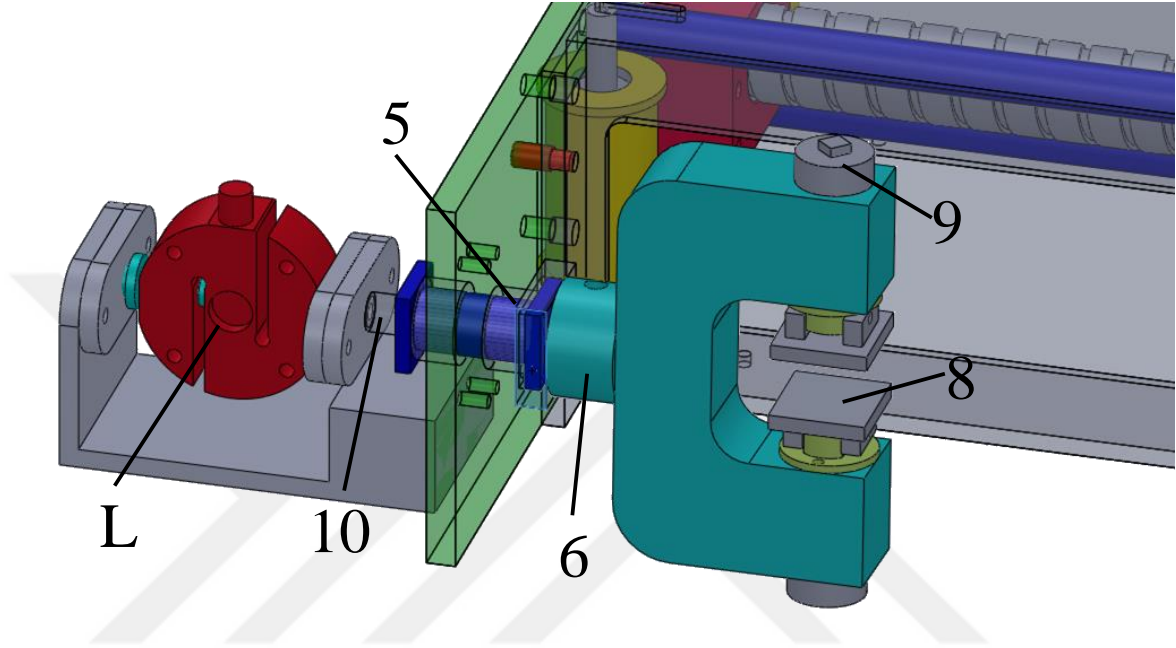
3.2.1.3. Çenelerin tasarımı ve yük hücrelerinin cihaza montajı

Metal çene yüzeyi, kumaşı tutabilmek için yeterli basıncı sağlamak zorundadır. Bu amaçla çene yüzeyleri bir vida-somun (9) mekanizması kullanılarak dikey doğrultuda hareket edecek şekilde tasarlanmıştır (Şekil 3.3). Kumaşın çeneler arasında ezilmesini ve kaymasını engellemek için metal çenelerin yüzeyine (8) yumuşak ve sürtünmeli malzeme yapıştırılmıştır.



Şekil 3.3. Sabit ve hareketli çeneler

Şekil 3.4'te görüldüğü gibi bir aksenal rulman içerisinde geçen mil (10) ile sabit çene yük hücresine bağlanmıştır. Yük hücresinin diğer ucu gövdeye sabitlenmiştir. Test örneğini geren kuvvetin, yük hücresine aksenal doğrultuda etki etmesini sağlamak amacıyla; test numunesini tutan çeneler ile yük hücresi aynı doğrultu üzerinde olacak şekilde mekanik tasarım ve montajı yapılmıştır.



Şekil 3.4. Sabit çeneye yük hücresinin montajı

3.2.1.4. Elektronik tasarım

Cihazın elektronik sistem ve sinyal akışı Şekil 3.5'te gösterilmektedir. Bir bilgisayar kullanarak yük hücresinden veri okunmakta ve servo motor kontrol edilmektedir. Ayrıca servo motora bağlı bir mil kodlayıcısından pozisyon bilgisi okunmakta ve bilgisayara kaydedilmektedir. Hareketli çenenin yer değiştirmesi, servo motorun pozisyon bilgisi kullanılarak belirlenmektedir. Servo motor, yük hücresi, servo motor milindeki mil kodlayıcı ve bilgisayar arasındaki veri alış-verişi bir veri toplama kartı aracılığı ile sağlanmaktadır. Bu amaç için National Instrument NI PCIe-6343 X Serisi veri toplama kartı seçilmiştir. Seçilen veri toplama kartına ait teknik özellikler Çizelge 3.5'te verilmektedir (Anonim 2014).



Şekil 3.5. Cihazın elektronik elemanları ve sinyal akışı

Çizelge 3.5. Seçilen NI PCIe-6343 X serisi veri toplama kartının (DAQ) teknik özellikleri

Analog giriş	32 giriş kanalı, 16 bitlik çözünürlük 500 kS/s örnekleme hızı, ± 10 V DC sinyal giriş aralığı, 4095 veri tutma kapasitesi (FIFO buffer)
Analog çıkış	4 çıkış kanalı, 16 bitlik çözünürlük, 900 kS/s tek kanal için yenilenme hızı, ± 10 V DC sinyal çıkış aralığı, 8191 veri tutma kapasitesi (FIFO buffer)
Dijital giriş/çıkış	48 toplam I/O ve PFI kanalları, statik ve zamanlanmış dijital sinyal, 2.2-5.25 V DC dijital okuma
Sayaç giriş/çıkış	4 toplam kanal, 32 bitlik çözünürlük, frekans, olay sayma ve mil kodlayıcı ölçümleri; X1, X2 ya da X4 dörtlü çözümleme, kanal Z: iki puls konum ölçüm çözümlemesi için Z tekrar yükleme kanalı, 127 veri tutma kapasitesi (FIFO buffer), 100 MHz kadar internal clock

Veri toplama kartı analog sinyal girişi, analog sinyal çıkışı, dijital sinyal girişi, dijital sinyal çıkışı ile sayaç ve zaman devrelerinden oluşmaktadır. Test cihazının gereksinim duyduğu hızda analog ve dijital veri giriş çıkış işlemleri seçilen arabirim kartı ile rahatlıkla sağlanabilmektedir.

Bir servo motor 0-10 V DC arasındaki değişen analog sinyal ya da dijital sinyaller kullanarak iki şekilde kontrol edilebilmektedir. Cihazda uygulanan farklı test rutinleri için hareketli çenenin pozisyon ve hızının birlikte kontrol edilmesi gerekmektedir. Hız ve pozisyon kontrolünün birlikte kolaylıkla uygulanabildiği pozisyon esaslı servo motor kontrolü (dijital yöntem) test cihazında tercih edilmiştir.

Bu yöntemle göre servo motorun hız ve pozisyon kontrolü için aşağıdaki ilişkiler kullanılmıştır. Motorun hız ve pozisyon ölçümleri için geri besleme elemanı olarak, servo motor milinde bulunan artımlı tip bir mil kodlayıcı kullanılmıştır. Motor pozisyonu ve bu yolla hareketli çenenin yer değiştirmesi, mil kodlayıcısından gelen puls (kare dalga şeklinde sinyal) sayısı ile ölçülmektedir. Servo motorun istenilen hız ve pozisyonu için tahrikinde kullanılan bağıntılar aşağıda verilmektedir.

$$N_m = N_p/R \quad (3.6)$$

$$x = N_m i h \quad (3.7)$$

Burada

N_p : Mil kodlayıcısından alınan toplam puls sayısı

N_m : Motorun toplam dönüş sayısı

R : Mil kodlayıcısının çözünürlüğü (bir turda alınan toplam puls sayısı: puls/tur)

x : Hareketli çenenin yer değiştirmesi (mm)

parametrelerini ifade etmektedir.

Hareketli çenenin istenilen yer değiştirmesi için gerekli puls sayısı Denklem 3.6 ve Denklem 3.7 kullanılarak aşağıdaki gibi hesaplanabilmektedir.

$$N_p = R \frac{x}{i h}$$

Hareketli çenenin doğrusal hızı Denklem 3.8 ve Denklem 3.9 ile hesaplanabilmektedir.

$$\dot{x} = V_c = n_m i h \quad (3.8)$$

$$f_p = n_m R / 60 \quad (3.9)$$

Burada

\dot{x} : Hareketli çenenin doğrusal hızı (mm/dakika)

f_p : Servo motoru süren puls tekrar frekansı (Hz)

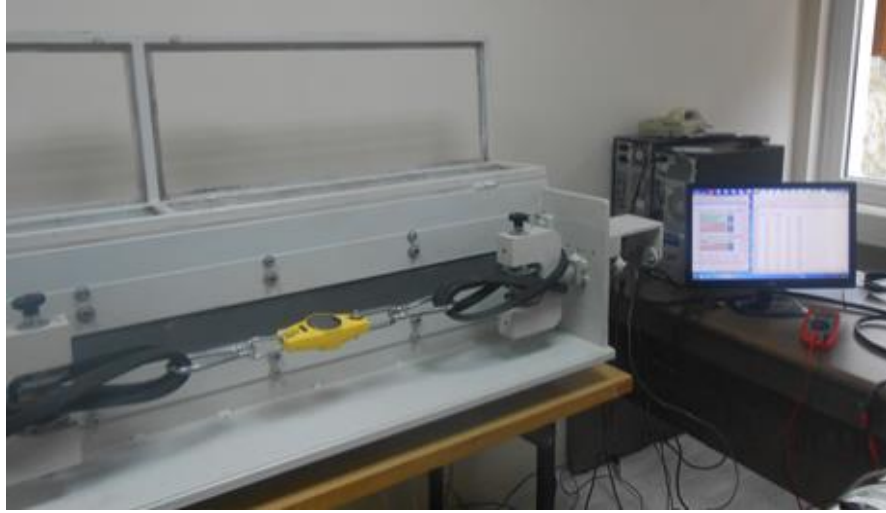
n_m : Motorun dönüş hızı (Devir/dakika)

parametrelerini ifade etmektedir.

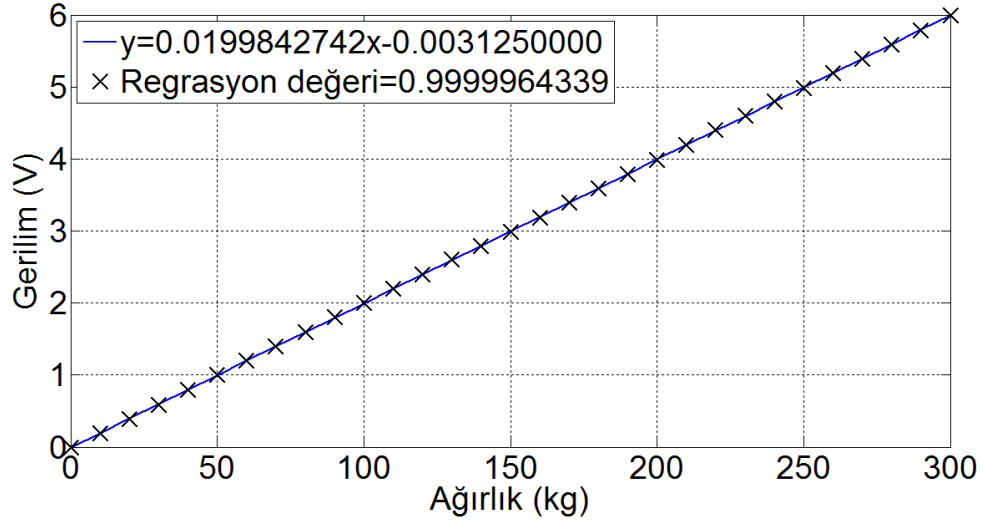
Motoru tahrik etmek için gerekli puls frekansı Denklem 3.8 ve Denklem 3.9 kullanılarak aşağıdaki gibi belirlenmektedir.

$$f_p = \frac{V_c R}{60ih}$$

Yük hücresinin ölçme işleminde kullanılabilmesi için cihaz üzerinde kalibre edilmesi gerekmektedir. Yük hücresinin kalibrasyonunda bir elektronik el tartısı (300 kg kapasiteli) kullanılmıştır. Hareketli ve sabit çeneler arasına el tartısı Şekil 3.6'da gösterildiği gibi bağlanmıştır. Kalibrasyon ağırlığına eşdeğer yük değeri el tartısından okunana kadar el tartısı ve kayışlar, çene hareketi ile gerdirilmiştir. Yük hücresinin çıkış sinyalinin el tartısından okunan değere eşitlemek amacıyla; yük hücresi kuvvetlendiricisinin kazanç ve sıfırlama ayarları yapılarak kalibrasyon işlemi gerçekleştirilir. Kalibrasyon işleminden sonra el tartısında 10 kg yük artışları ile 300 kg değerine kadar sağlanan kalibrasyon ağırlıkları uygulanmış ve Şekil 3.7'deki kalibrasyon eğrisi elde edilmiştir. Kuvvetlendirici ayarlarının ve ölçüm değerlerinin doğruluğu regrasyon değerine bakılarak karar verilmiştir. Kalibrasyon eğrisi test makinelerinin kuvvet göstergelerini doğrulamak için kuvvet ölçme aletleri ile kalibrasyon standardında (ASTM E74-13a) gösterildiği gibi doğrusal bir eğri olarak elde edilmiştir.



Şekil 3.6. Kalibrasyonda elektronik el tartısının kullanımı



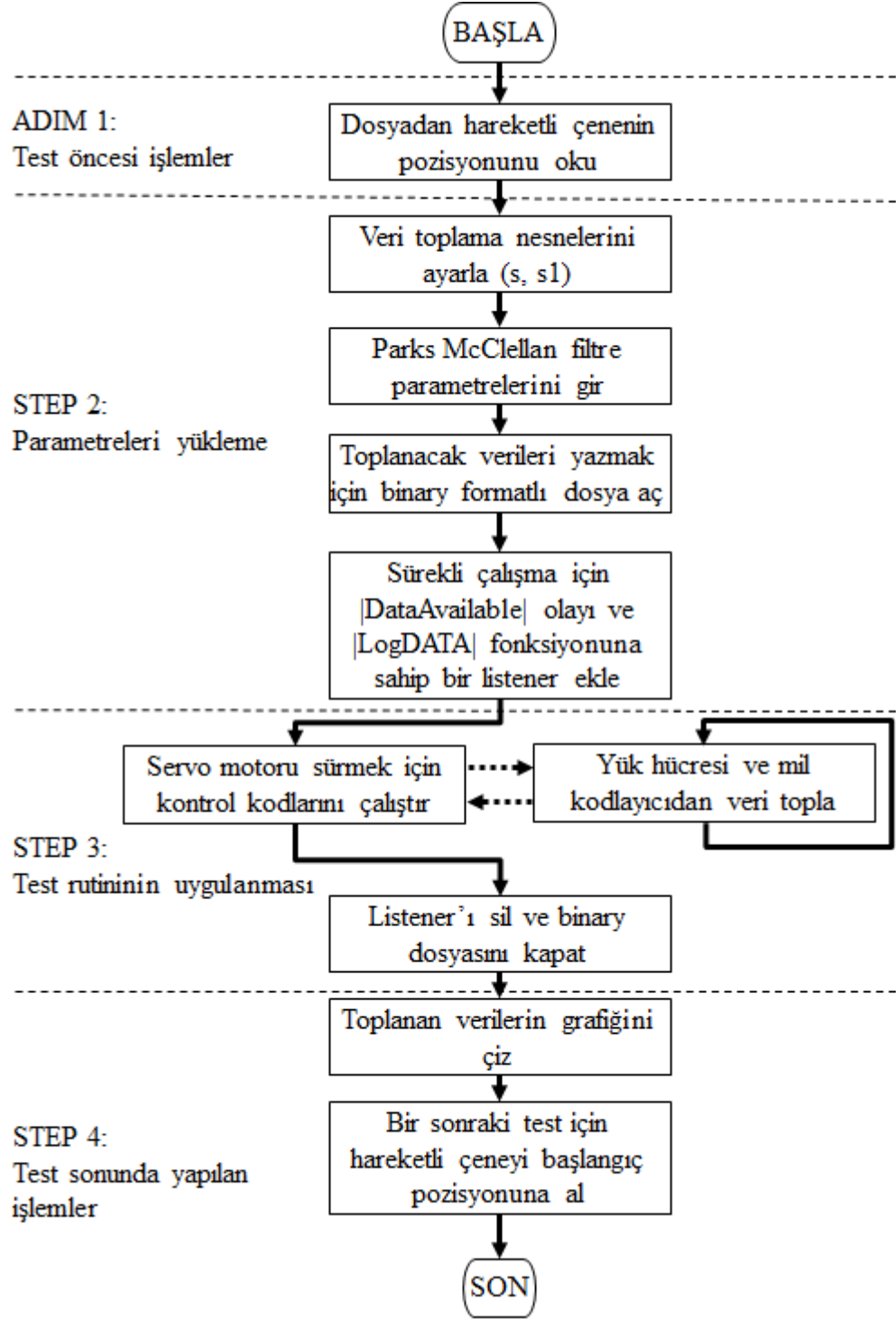
Şekil 3.7. Cihazın kalibrasyon eğrisi

3.2.1.5. Yazılım geliştirme

Tüm test rutinleri kapsayacak şekilde geliştirilen yazılımın basitleştirilmiş algoritması Şekil 3.8’de verilmektedir. Birinci adımda, servo motorun sürülmesi ile hareketli çene test uzunluğuna karşılık gelen başlangıç pozisyonuna getirilmektedir. Her bir test sonunda hareketli çenenin pozisyon bilgisi bir veri dosyasına kaydedilmektedir. Yeni bir teste başlamadan önce, bu veri bilgisayar tarafından okunmaktadır. Hareketli çeneyi başlangıç pozisyonuna almak için bilgisayar pozisyon bilgisini kullanarak servo motoru sürmektedir. İkinci aşamada test parametreleri girilir ve girilen parametreler veri

toplama nesnelere yüklenir. Üçüncü adımda, gerçekleştirilecek test rutini çalıştırılmaktadır. Bu adım için yük uzama eğrisi, sabit uzama altında gerginlik değişimi, sürünme testi ve tekrarlı zorlama altında kuvvet ve uzama değişimi gibi testlerin uygulandığı modüller geliştirildi. Birbirinden bağımsız olan her bir test modülü seçilerek çalıştırılmakta ve elde edilen ölçümler bir veri dosyasına kaydedilmektedir. Son adımda, elde edilen test verileri grafik olarak çizdirilmekte ve bir sonraki test için hareketli çene, başlangıç pozisyonuna geri getirilmektedir.

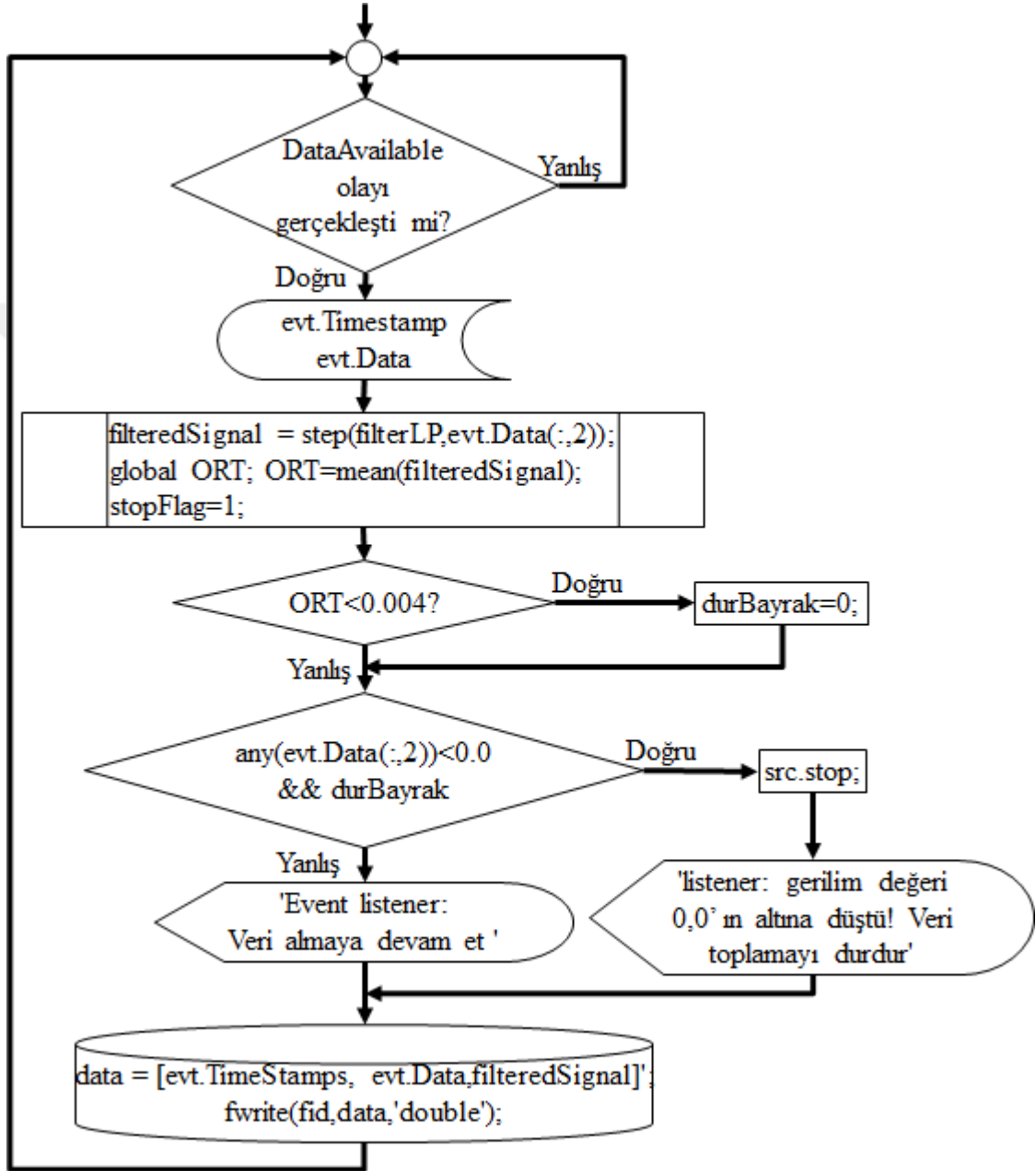




Şekil 3.8. Yazılımın basitleştirilmiş algoritması

Test rutinleri için kullanılan veri okuma modülünün akış şeması Şekil 3.9'da verilmektedir. Rutinde, algılayıcı (sensör) sinyalleri sürekli okunarak, veri toplama kartının (DAQ) arabelleğinde saklanmaktadır. Arabellekte tutulan verilerin sayısı sürekli kontrol edilir ve yeterli sayıya ulaşıldığında; arabellekte tutulan veriler rutin

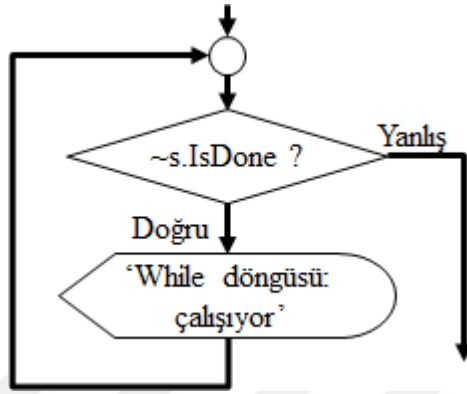
tarafından bilgisayarın hardiskinde açılan bir binary formatlı dosyaya kaydedilir. Yük hücresinden okunan analog sinyal değeri önceden belirlenmiş değerin altına düşerse kumaşın koptuğu anlaşılır ve test rutini durdurulur. Ek 1’de veri okuma modülü için hazırlanan Matlab programı verilmiştir.



Şekil 3.9. Veri okuma algoritması

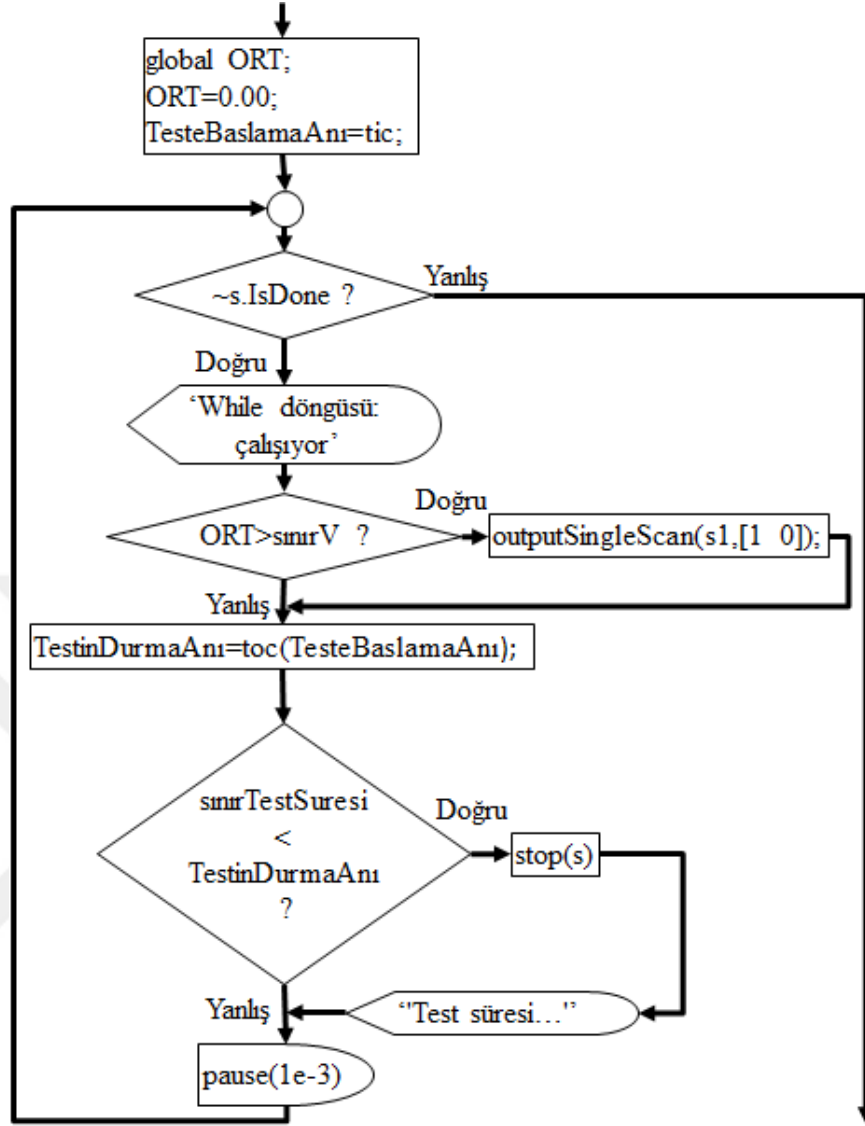
Şekil 3.10 kuvvet uzama testi için akış şemasını göstermektedir. Test algoritması, sabit bir hızda servo motoru test örneğinin kopma anına kadar sürmektedir. Yük hücresinden ve servo motor miline takılı olan mil kodlayıcısından test süresince verilerin okunması

eş zamanlı olarak gerçekleştirilir ve dosyaya kaydedilir. Test işlemi tamamlandıktan sonra kuvvet uzama eğrisi, her bir zaman değerinde okunan yük hücresi sinyalinden elde edilen kuvvet değerleri ve servo motor mil kodlayıcısından elde edilen pozisyon bilgisi arasındaki ilişki olarak çizdirilmektedir. Ek 2’de kuvvet uzama testi için hazırlanan Matlab programı verilmiştir.



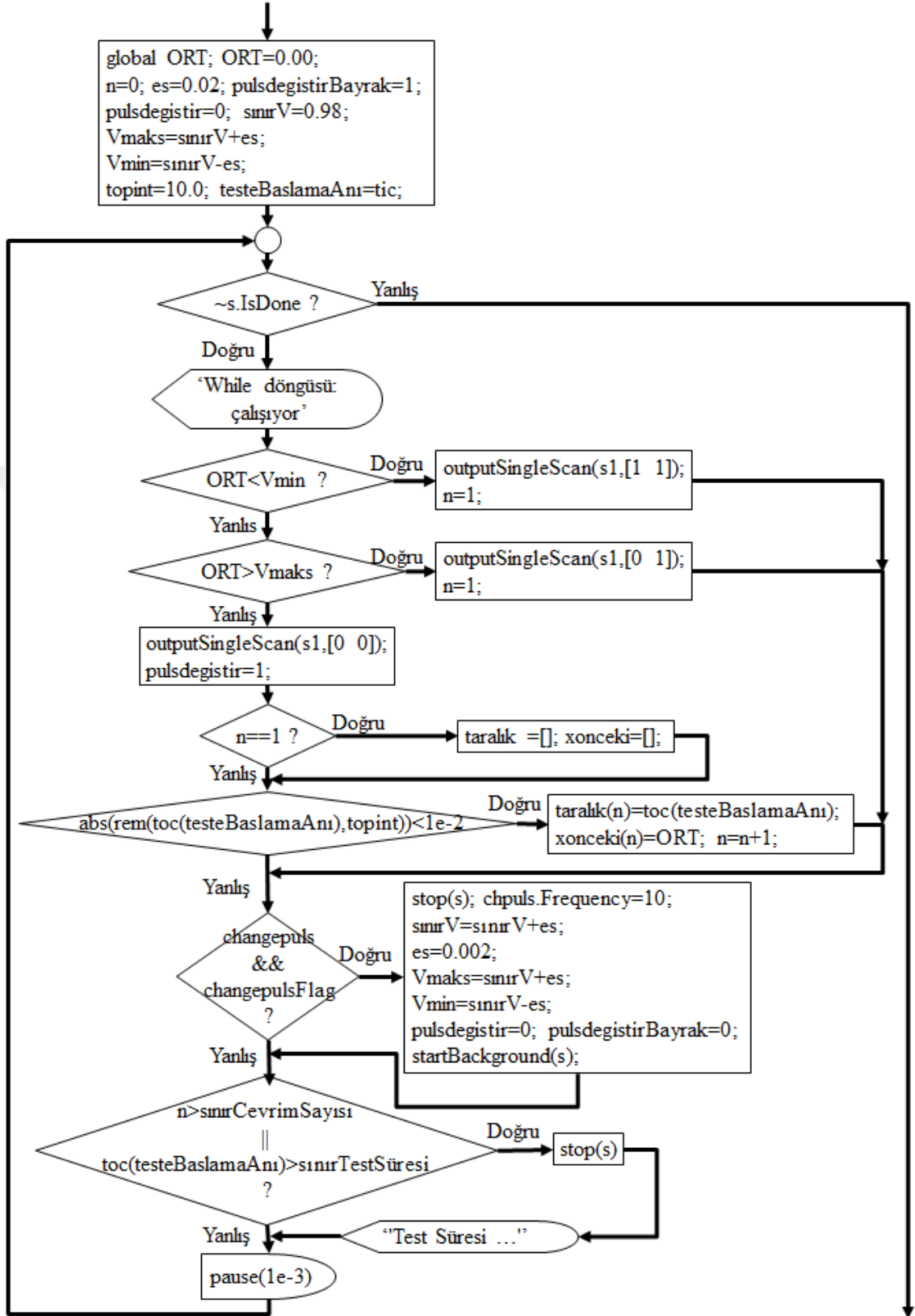
Şekil 3.10. Kuvvet uzama testi için algoritma

Sabit uzama altında gerilme gevşemesi testinin yazılım modülüne ait akış şeması Şekil 3.11’de gösterilmektedir. Öncelikle test süresi algoritmaya girilir. Algoritmadaki döngü, kumaş gerilme gevşemesinin istendiği gerginlik değeri elde edilinceye kadar servo motoru sürmektedir. Daha sonra servo motor durdurulur ve hareketli çenenin pozisyonu sabitlenir ve test başlatılır. Kumaş gerginliği eşit zaman aralıkları ile test süresi boyunca kaydedilir. Test süresi tamamlandığında, zamana göre gerginlik değişimi bir eğri olarak çizdirilir. Ek 3’te gerilme azalması testi için hazırlanan Matlab programı verilmiştir.



Şekil 3.11. Gerilme gevşemesi testi için algoritma

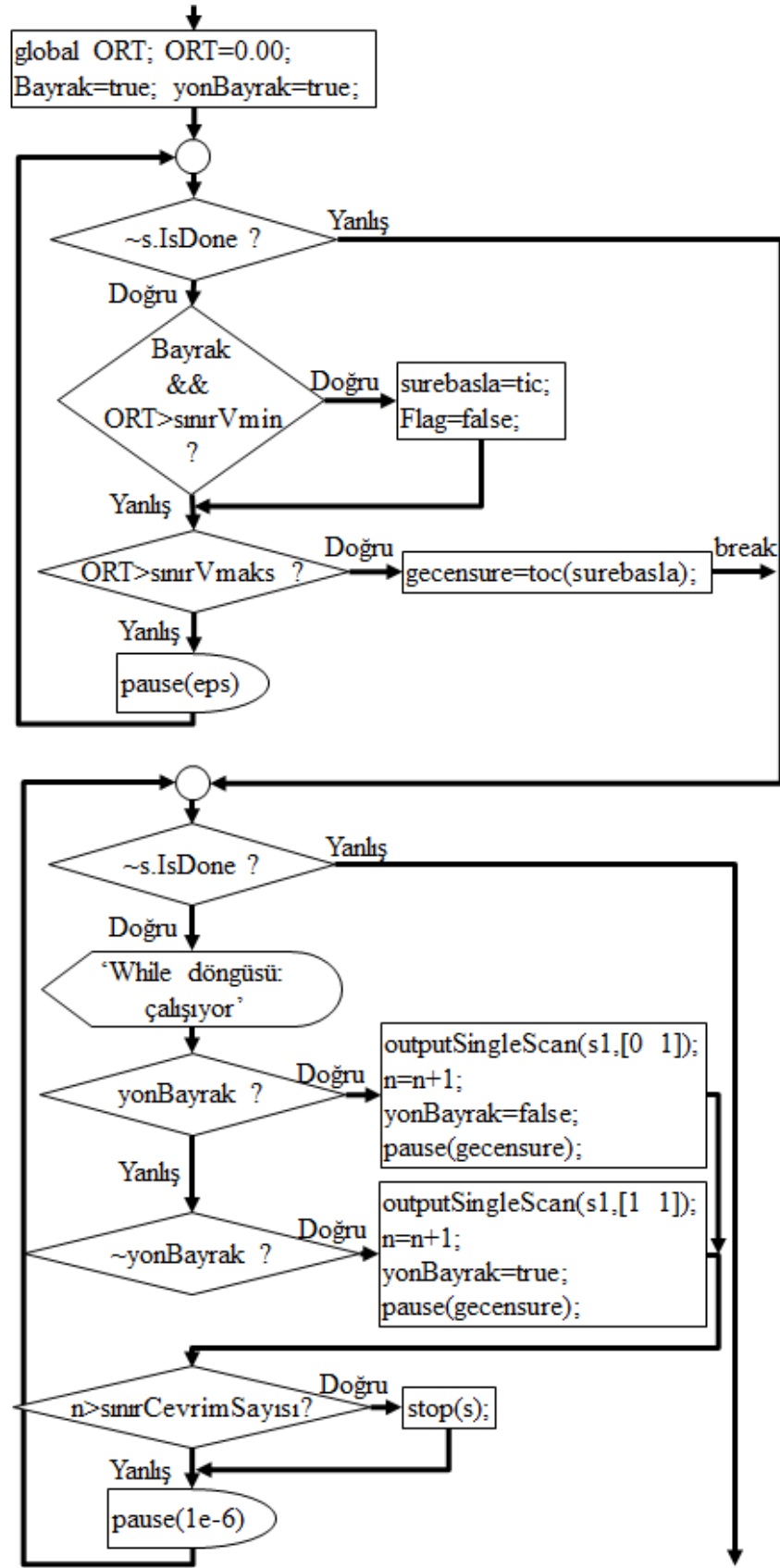
Sürünme testinin (sabit yük altında uzama ya da creep) yazılımına ait işlem adımları Şekil 3.12’de gösterilmektedir. Başlangıçta test süresi ve yük değeri algoritmaya girilmektedir. Geri besleme kontrol yöntemi ile kumaş gerginliği test yüküne ulaşmaya kadar servo motor sürülerek kumaşın uzamasını sağlanmaktadır. Kumaş gerginliği yük hücresinden sürekli olarak okunmakta ve test gerginliği ile karşılaştırılmaktadır. Gerginlik test gerginliğinin altına düştüğünde, algoritma tekrarlı olarak kumaşı test gerginliğine ulaştırmak için servo motoru sürerek kumaşın uzamasını sağlamaktadır. Test süresinin ya da test periyodunun sonuna kadar bu işlem basamakları tekrar ettirilmektedir. Test tamamlandıktan sonra, zamana göre uzama değerleri grafik olarak çizdirilmektedir. Ek 4’te sürünme testi için hazırlanan Matlab programı verilmiştir.



Şekil 3.12. Sürünme testi algoritması

Tekrarlı zorlama şartı altında uzama ve gerilme kaybının gözlemlendiği dinamik zorlama testinin işlem basamakları Şekil 3.13'teki akış şemasında gösterilmektedir. Test için uzama ya da gerilme değerinin üst ve alt sınırları ile testin tekrar sayısı test rutinine girilen değerlerdir. Test rutini iki uzama veya iki gerilme sınır değeri arasında zorlama şeklinde çalıştırılabilmektedir. Test rutini iki uzama sınır değerine göre çalıştırıldığında, servo motor hareketli çeneyi iki uzama değeri arasında ileri ve geri yönde sürekli olarak hareket ettirmektedir. Test süresince gerginlik ve uzama eş zamanlı olarak kaydedilmektedir. İstenilen tekrar sayısına ulaşıldığında test sonlandırılır. Kaydedilen kuvvet uzama eğrisi her bir tekrar ya da seçilmiş sayıda tekrar için çizdirilmektedir. Ek 5'te dinamik zorlama testi için hazırlanan Matlab programı verilmiştir.





Şekil 3.13. Dinamik zorlama testi algoritması

3.2.2. Kumaşlar üzerinde yapılan testler

Kumaşların mukavemet özelliklerinin belirlendiği mekanik testler; kuvvet uzama, dinamik zorlama, sürünme ve gerilme azalması testleri kumaş numunelerine uygulanmıştır. Kumaş numuneleri çözümlü doğrultularında test edilmiştir. Çene arası mesafe testlerde 20 cm seçilmiştir. Test numuneleri, kumaşın çözümlü doğrultusunda 6 cm genişliğinde şeritler halinde kesilmiş ve sonra her iki kenardan eşit sayıda çözümlü iplikleri sökülerek 5 cm genişliğinde numuneler elde edilmiştir. Hazırlanan numunelerden sırasıyla üç tekrarlı olacak şekilde, gerilme gevşemesi, sürünme ve dinamik zorlama testleri yapılmıştır.

3.2.2.1. Sabit uzama altında gevşeme testleri (relaksasyon)

Test numuneleri 250 N gerginlik değerine 120 mm/dak çene hızıyla çıkartılmış ve 30 dakika boyunca çene hareketsiz bırakılmıştır. Bu sürede test numunesi üzerindeki gerginlik değişimi yük hücresinden okunan analog sinyal ile belirlenmiştir. Veri toplama işleminde okuma hızı 1000 veri/s değeri kullanılmıştır.

3.2.2.2. Sabit yük altında uzama testleri (sürünme)

Test numunelerinin öncelikle 120 mm/dak hız ile 240 N gerginlik seviyesine çıkartılmış ve 250 N gerilme kuvveti yük hücresinden alınan sinyal doğrultusunda 1,2 mm/dak çene hızıyla 30 dakika boyunca dengelenmeye çalışılmıştır. Testlerde okuma hızı 1000 veri/s değeri kullanılmıştır.

3.2.2.3. Dinamik zorlama testleri

Test numuneleri için öncelikle 120 mm/dak hız ile 200 N'luk gerginlik değerinden 250 N gerginlik seviyesine çıkartılması için gerekli uzama miktarı süre ölçümü ile belirlenmiştir. Beş tekrarlı dinamik zorlama deney numunelerine uygulanmıştır. Testlerde okuma hızı 1000 veri/s değeri kullanılmıştır.

3.2.3. Deneysel sonuçların matematiksel analiz yöntemi

Literatür incelendiğinde malzemelerin viskoelastik davranışını belirlemek için ağırlıklı olarak yay ve sönümlenme elemanlarından oluşan mekanik benzeşim modellerinin kullanıldığı görülmektedir. Bunun yanında herhangi bir mekanik benzeşim modeli kurmadan üstel fonksiyonlardan oluşan Prony serileri ile genel çözüm elde etmeye yönelik matematiksel yöntemde kullanılabilir. Bu yöntemde, belirli bir miktar deneysel veriden hareketle malzemelerin viskoelastik davranışını belirlemek önceden bir mekanik benzeşim modeli kurmadan elde edilebilmektedir. Dokuma kumaşların üretiminde kullanılan iplik malzemelerinin çeşitliliği ve kumaş konstrüksiyonundaki değişimler farklı mekanik benzeşim modellerini gerekli kılmaktadır. Bu açıdan bu çalışmada Prony serisi yöntemi kullanılarak dokuma kumaşların viskoelastik davranışını, mekanik benzeşim modelini gözönüne alınmadan belirli sayıdaki deneysel veriye dayanarak araştırılması tercih edilmiştir.

Prony serisinin parametrelerinin belirlenmesinde kullanılan iterasyona dayalı çözüm yöntemleri (nonlinear least squares), parametrelerin başlangıç değerlerinin önceden belirlenmesine ihtiyaç duyar. Kurulan matematiksel modelin ölçüm verilerini temsil etmesi ve bu nedenle denklem sisteminin katsayılar matrisine ait sütun rankının, çözüm boyunca korunması beklenir. Ayrıca başlangıç değerinin global minimum noktası civarında çözüm verdiği için farklı iterasyon başlangıç değerleriyle kontrol edilmesi gerekir. Bu yüzden analiz yönteminde modelin terim sayısı ve yaklaşıma ait iterasyon başlangıç değerlerinin iyi tahmin edilmesi gereklidir. Bu şekilde çok terimli üstel fonksiyonun parametrelerini belirlemek için expfitdemo.m programı kullanılabilir (Moler 2008).

Bölüm 2.1.5'te açıklanan Prony serisinin terim sayısı ile modelin kurulmasında, terim parametreleri için bir öngöründe bulunulmasına gereksinim duyulmaz. Bu sebeple öncelikle ölçülmüş gerginlik sinyalinden sadece terim sayısını belirleyerek matematiksel model araştırılmıştır. Ancak parametre sayısı, sinyal bölgesi ve sinyal verisini örnekleyerek yapılan çözümlerde, çok az sayıda sabit katsayı (A_j) ve zaman katsayısı (λ_j) için pozitif reel kök değeri bulunabilmiş ve gerilme azalmasını temsil edecek model belirlenememiştir. Hazırlanan `[Aj, lamdaj]=run_prony(nterim,data,deltat)` Matlab programı Ek 6'da verilmiştir. Programda girilen terim sayısı, Prony serisini

lineerleştirmek için kullanılan polinom fonksiyonunun derecesini ve c (polinom fonksiyonun sabit katsayıları) katsayılarının sayısını belirlemektedir. Terim sayısının sürekli arttırılması, kurulan denklem sistemi için katsayı matrisinin sütunlarının lineer bağımsız olma koşulunu ortadan kaldırdığı fark edilmiştir. Bu sebeple modelin önceden belirlenmesi yerine deneysel verilere uygun model çıkarımının yapıldığı analiz yöntemi çalışılmıştır (Lupu ve Tudor 1995, Neilsen 2003).

Gerilme azalmasının modellenebilmesi için öncelikle ölçüm verilerinden elde edilen katsayılar matrisinin rankının belirlenmesi, dolayısı ile modelin terim sayısının çıkarılması gerekli olmuştur. Katsayılar matrisinin rankının belirlenmesinde tekil değer ayrıştırması (SVD) kullanılmıştır. Bir matrisin SVD ayrıştırması ile iki orthonormal matris ve bir tekil değerleri taşıyan köşegen matris elde edilir (Denklem 3.10).

$$A_{m \times n} = u_{m \times r} s_{r \times r} v_{r \times n}^T \quad (3.10)$$

Aşağıda orthonormal ve köşegen matrislerin açık gösterimi verilmektedir.

$$A_{m \times n} = \begin{bmatrix} u_{11} & u_{12} & \dots & u_{1r} \\ u_{21} & u_{22} & \dots & u_{2r} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ u_{m1} & u_{m2} & \dots & u_{mr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{11} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \sigma_{22} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \sigma_{rr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{11} & v_{12} & \dots & v_{1n} \\ v_{21} & v_{22} & \dots & v_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ v_{r1} & v_{r2} & \dots & v_{rn} \end{bmatrix}^T$$

Ayrıştırma işleminde elde edilen $\sigma_{11} \geq \sigma_{22} \geq \dots \geq \sigma_{rr}$ tekil değerler, büyükten küçüğe doğru s matrisinin köşegeni üzerinde sıralanırlar. Tekil değerler arasında bulunan farklar; sinyal işleme prosesinde katsayılar matrisinin etkin rakının belirlenmesi, azaltılmış rank yaklaşımı ile veri sıkıştırma (Orfanidis 2007) ve sinyal ayrıştırma işlemlerinde (Acer ve ark. 2014) kullanılır. Bu yöntem, katsayılar matrisinin rankının belirlenmesi ve yük hücresinden elde edilen gerilme azalması sinyalinin bileşenlerine ayrıştırılmasında kullanılmıştır (Shrager ve Hendler 1998). Katsayılar matrisinin (Hankel) sütun genişliği artırılarak SVD yaklaşımı ile tekil değerler ve temsil ettiği sinyal bileşenleri belirlenmeye çalışılmıştır.

Bölüm 2.1.5'te açıklanan zaman sabiti (λ_j) ve sabit katsayı (A_j) değerlerinin hesaplanmasında kullanılan yöntemler, aşağıda verilen Matlab programı işlem basamaklarında uygulanmıştır. Programın giriş parametreleri; eşit zaman aralıklarda

okunan sinyal verileri (veri), verilerin okunma zamanı (süre), Hankel matrisin sütun sayısı (K) ve veriler arasındaki sabit zaman aralığıdır (deltat).

```
function [lamdaj, Aj] =pronySVDhankel(veri, sure, K, deltat)
```

```
%% Giriş parametreleri
```

```
% veri: gerginlik azalması ölçümünden elde edilen veriler
```

```
% süre: verilerin okunduğu süreler
```

```
% deltat: ölçüm aralıkları arasındaki süre
```

```
% K: Hankel matrisinin sütun genişliği (katsayılar matrisi)
```

```
%% Çıkış parametreleri
```

```
% lamdaj: zaman sabiti
```

```
% Aj: sabit katsayı
```

```
clc;
```

```
format long;
```

```
clf;
```

```
[H]=hfun(veri); % Hankel matrisini oluşturan subfunction (katsayılar matrisi)
```

```
[u,s,v]=svd(H,0); % Tekil değerlere ayırma (SVD)
```

```
% rank belirleme
```

```
sdiag=diag(s); % s matrisinin diagonal elemanlarını diziye dönüştürür.
```

```
tol =1.5*sdiag(7); % s matrisinin 7'inci elemanına göre tolerans belirlenir.
```

```
p = sum(sdiag> tol); % tolerans değerinden büyük değerler sistemin karakteristik  
%sinyal verileridir ve modelin terim sayısını belirler.
```

```
%%Prony serisini lineerleştiren polinom fonksiyonun kökleri hesaplanır.
```

```
c=pinv(v(2:K-1,1:p))*(v(1,1:p))'; % polinom fonksiyonun sabit katsayıları hesaplanır.
```

```
alfai=roots([1;-c]); % polinom katsayıları ile polinomun kökleri bulunur.
```

```
real_alfai =real(alfai);% kökün reel değeri belirlenir.
```

```
imag_alfai = imag(alfai);% kökün sanal kısmı belirlenir.
```

```
%figure(2) köklerin karmaşık sayılar düzlemindeki yerlerini grafik üzerinde gösterir.
```

```
figure(2)
```

```

% elde edilen bütün kökler daire içine alınır.
plot(real_alfai,imag_alfai,'k o','MarkerSize',5,'LineWidth',1.2)
% pozitif reel kökler çözüm içerisinde belirlenir.
proots=alfai((imag_alfai==0) & (real_alfai>eps));
np=length(proots); % pozitif reel kök sayısı;
znp=zeros(1,np);
hold on;
%pozitif reel kökler x işareti ile işaretlenir.
plot(proots,znp,'k x','MarkerSize',15,'LineWidth',1.5)
axis([-1.2 1.2 -1.2 1.2])
set(gca,'FontSize',40,'FontName','TimesNewRoman'); % font size 40 19

%% zaman sabitleri bulunur.
xk=log(proots)/deltat;
lamdaj=sort(xk); % zaman sabitleri küçükten büyüğe doğru sıralanır.
% gevşeme süreleri bulunur.
tauk=1./lamdaj;

%% sabit katsayılar bulunur.
A=fdata(lamdaj,sure);
%Sabit katsayılar en küçük kareler yöntemi ile hesaplanır.
Aj=pinv(A)*veri(:);

%% veri dizisini Hankel matrisine dönüştüren subfunction
function [verihankel]= hfun(x)
a=flip(x(:)); %verileri sütun dizilimine dönüştürür ve veri sırlaması sondan başa
% doğru değiştirilir.
m=size(a); % veri dizisinin uzunluğu
rh=a(m-K:m-1); % satır sayısı belirlenir.
ch=a(1:m-K); % sütun sayısı belirlenir
verihankel=hankel(ch,rh); %hankel function ile Hankel matrisi oluşturulur.
end

```

%% bulunan lamdaj değerleri kullanarak Aj sabit katsayıların bulunması için denklem
%sistemi tekrar düzenlenir

```
function A = fdata(lambda, sure)
```

```
    m=length(t);      %sadır sayısı belirlenir.
```

```
    n=length(lambda); %sütun sayısı belirlenir.
```

```
    X=zeros(m,n);    %mxn boyutunda sıfır matris oluşturur.
```

```
    t=sure(:);
```

% lamdaj değerleri için Prony serisinin üstel ifadelerinin değerleri hesaplanır.

```
    for j=1:n
```

```
        X(:,j)=exp(lambda(j).*t); %matrisinin elamanları hesaplanır.
```

```
    end
```

```
    A=X; % katsayılar matrisi oluşturulur.
```

```
end
```

```
end
```

Prony yöntemini ile gerçekleştirilen matematiksel modelleme yaklaşımı, gürültüye oldukça duyarlıdır ve gürültü seviyesine bağlı olarak parametrelerin hesaplanmasında hatalı sonuçlar vermektedir (Istratov ve Vyvenko 1999). Ölçme sistemdeki gürültü problemiyle yük hücresinden sinyal okuma, gerilme azalması ve sürünme test rutinlerinin hazırlanması sırasında karşılaşılmıştır.

Çok özel test cihazlarının kullanılması durumunda bile, ölçülen analog sinyalin üzerinde mutlaka bir gürültü mevcuttur. Gürültünün bir kısmı sistemde sürekli var olan sistematik bir hatayı gösterirken, bir kısmı da sürekli ve rastgele değişen koşulların veri toplama sistemi üzerinde yarattığı etkileri yansıtır. Gürültü kaynağının belirli olduğu durumlarda; gürültü sinyalinin kablo bağlantıları ile veri toplama sistemine iletiminin kesilmesi, elektromanyetik dalgaların ölçme sistemi üzerinde ve sinyal iletim kablolarında gerilim indüklemesine engel olunması ve sistemde indüklenen gerilimin topraklanarak uzaklaştırılması yolu ile ölçme sisteminin gürültüden korunması sağlanır.

Yük hücresinden elde edilen sinyal üzerindeki gürültü oluşumunu engellemek için aşağıdaki işlemler yapılmıştır.

- Cihazın elektronik devre elemanları arasında elektromanyetik korumalı ekranlı kablolar kullanılmıştır.

- Servo motor ve sürücüsünün sebep olduğu gürültü sinyallerinin mil kodlayıcı, hız, yön, dijital giriş ve çıkış sinyalleri ile veri toplama sistemine iletim yoluyla geçişi, optokuplör ve 2 kOhm'luk direnç devre elemanları kullanılarak elektronik devrelerin birbirinden yalıtılması prensibi (dekuplaj) ile engellenmiştir.
- Yük hücresi kuvvetlendiricisi elektrik panosundan sökülerek, ayrı bir çelik pano içerisine yerleştirilmiş (Faraday kafesi) ve farklı bir güç kaynağından beslenmiştir.
- Yük hücresinin sinyal kablosunun ekranlama ucu veri toplama kartının toprak (ground) ucuna bağlanarak impulse (ani değişim) şeklindeki gürültü sinyalleri giderilmiştir.

Alınan önlemler ile gürültünün ölçme sinyali üzerinde 20 mV genliğinde kalması sağlanmıştır. Daha etkin bir filtreleme için basit bir RC elektronik filtre devresi kurulmaya çalışılmıştır. Bobin, direnç ve kondansatör devre elemanları kullanılarak uygun bir RC filtre devresi elde edilemediği için aynı çözüm yazılımsal olarak, dijital filtreleme (sayısal filtreleme) tekniklerinin uygulanması ile gerçekleştirilmiştir. Temel bir sayısal filtreleme tekniği olan alçak frekans geçirimli RC filtreleme yazılımı ve etkinliği Ek 8'de gösterilmiştir. Temel filtre uygulaması ile test rutinlerinin kontrolünün sağlandığı görülmüştür. Ancak katsayıların ayarlanmasında karşılaşılan güçlükler nedeniyle, firgr() Matlab filtre tasarlama kodu ile Marks McClellan FIR filtresi tasarlanarak test rutinlerinin kontrolünde kullanılmıştır.

Denklem 3.11 ve Denklem 3.12'de verilen hesaplamalar ile filtreleme işleminden elde edilen yük hücresi sinyali test numunesinin gerilme değerlerine dönüştürülmüştür.

$$F = \frac{W \times g}{V} v \quad (3.11)$$

$$\sigma = \frac{F}{ab} \quad (3.12)$$

Denklemlerde

W: Yük hücresinin ölçme kapasitesi (kg)

V: Kalibrasyon aralığının maksimum değeri (V)

g: 9,80665 yerçekimi ivmesi (m/s^2)

v: Ölçülen sinyal değeri (V)

F: Gerginlik kuvveti (N)

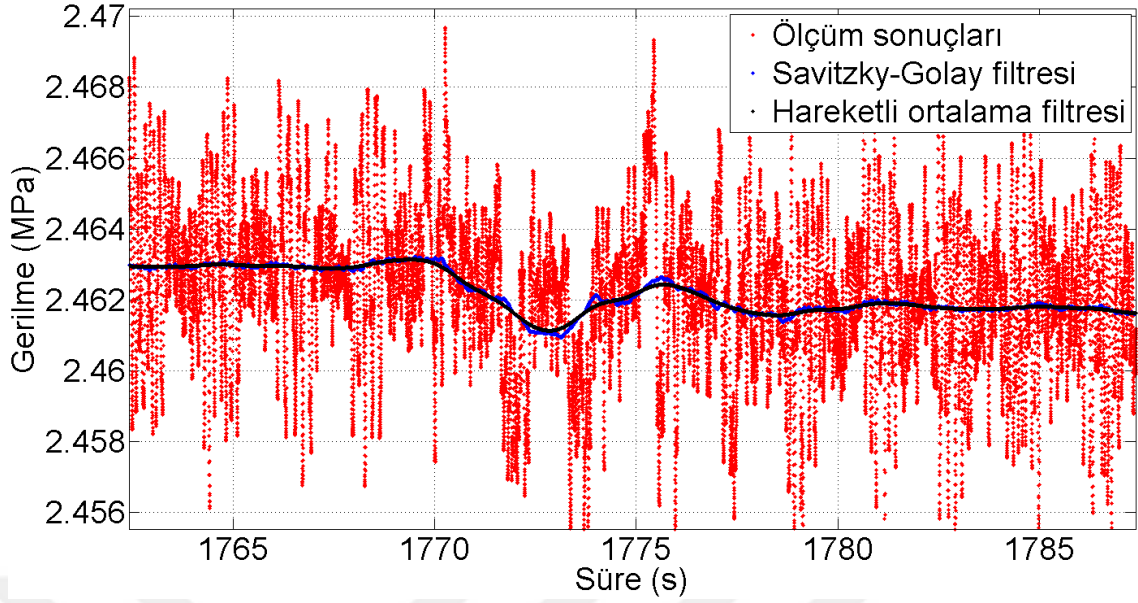
a: Test numunesinin genişliği (mm)

b: Test numunesinin kalınlığı (mm)

σ : Gerilme (MPa)

parametrelerini ifade etmektedir.

Gerilme sinyali üzerinde analiz çalışmasını etkileyebileceği düşünülen gürültü bileşenleri bulunmaktadır. Bu bileşenler veri düzgünleştirme (smoothing) algoritmaları kullanılarak giderilmiştir. Gerilme sinyali ve dijital filtreleme tekniklerinin etkinliği Şekil 3.14'te gösterilmiştir. Gerilme sinyali üzerindeki 2,47 MPa ve 2,456 MPa değerleri kullanılarak, gürültü sinyalinin değişim genliği 0.014 MPa değerinde bulunmuştur. Savitzky-Golay ve hareketli ortalama (moving average) filtresi kullanılarak gürültü sinyalinin genliği azaltılmıştır (O'Haver 1997). Savitzky-Golay filtresi ölçüm verileri için polinom fonksiyonu kullanarak eğri uydurma, hareketli ortalama filtresi ise verilerin ortalama değerlerini kullanarak birbirini takip eden veriler arasında gürültüden kaynaklı varyasyonları azaltmak için kullanılmıştır. Filtreleme işlemlerinin sırası ve filtrelemede kullanılan veri sayısı denenerek belirlenmiştir. Ek 9'da verilen Matlab komutları sinyal filtrelemede kullanılmış ve yapılan tüm analizlerde kodlar üzerinde hiçbir değişiklik yapılmamıştır.



Şekil 3.14 Gürültü sinyalinin dijital filtre kullanılarak uzaklaştırılması

Test rutininin çalıştırılması ile gerilme azalması ve sürünme fonksiyonlarının değerleri ölçüm sonuçları elde edilmektedir. Ölçüm sonuçlarının tezin kuramsal temeller bölümünde ve bu bölümde açıklanan Prony seri yaklaşımı ile viskoelastik model tanımlanmıştır. Ancak viskoelastik davranış için öngörülen ani uzama ve gerilme yüklemesi ideal şartları hiçbir zaman deneysel çalışmalarda gerçekleştirilememektedir. Herhangi bir test cihazı, istenilen sabit uzama ve gerilme değerine ancak belirli bir süre sonunda ulaşabilecektir. Üstelik viskoelastik davranışın sürünme ve gerilme azalması fonksiyonlarına ait veriler, deneysel çalışmalar ile doğrudan ölçülebilmekte iken gevşeme modülü ve komplians verileri dolaylı olarak sürünme ve gerilme azalması testlerinden elde edilen verilere dayanarak belirlenebilmektedir.

Denklemlerin analizinde verilmiş olan viskoelastik davranışın, denge koşullarına ulaştığı andaki J_{∞} ve E_{∞} değerlerinin ne olacağı ve deneylerin ne kadar süre devam ettirileceği probleminin çözülmesi gerekmektedir.

İlk yaklaşımda viskoelastik davranış denge koşullarına ulaştığında, gevşeme modülün elastisite modülüne (E) eşit olduğu ve komplians modülünün ise bu koşulda $J_{\infty} = 1/E$ değerine ulaşacağı varsayımında bulunulabilir. Ancak bu yaklaşımda farklı dokuma kumaşlar için elastisite modül değerlerinin deneysel çalışma ile önceden belirlenmesi gereklidir.

İkinci yaklaşımda ise viskoelastik model kullanılarak gevşeme modüllerinin belirlenmesi ve elastik modülün model yardımıyla alacağı değerlerin tahminlenmesidir. Aşağıda ilişkiler sunulmuştur.

$$E(t) = E_{\infty} + \sum_{i=1}^n E_i e^{-\frac{t}{\tau}}$$

$$E(0) = E_{\infty} + \sum_{i=1}^n E_i$$

$$E_{\infty} = E(0) - \sum_{i=1}^n E_i$$

$$E(t) = E(0) - \sum_{i=1}^n E_i + \sum_{i=1}^n E_i e^{-\frac{t}{\tau}}$$

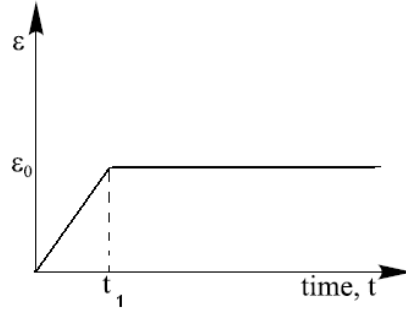
$$E(t) = E(0) - \sum_{i=1}^n E_i \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right)$$

Denklemlerde E_i gevşeme modüllerini E_{∞} gevşeme süresi sonsuz olan modülü ve $E(0)$ başlangıç modülünü ifade etmektedir.

Deneysel çalışmaların $E_{\infty} = E(0) - \sum_{i=1}^n E_i$ değerine kadar sürdürülmesi ve denge koşullarına ulaşıldığını belirtmek amacıyla bir miktar süre daha devam ettirilmesi istenebilir. Ön denemeler bu sürenin beklenenden çok uzun olduğunu göstermesi durumunda, model ile ölçüm sonuçları arasındaki hata oranı belirlenerek modelin uygunluğunu test etme yolu tercih edilebilir. Tez kapsamında deney süresini kısaltmak ve oluşturulan modellerin uygunluğunu belirlemek amacıyla hata oranı belirlenerek modelleme çalışmaları yapılmıştır.

Başlangıç modülünün belirlenmesi, yürütülen test çalışmaları için oldukça önemlidir. Gevşeme modülü için gerilme azalması testlerinin sonuçlarının değerlendirilmesinde, Sorvari ve Malinen (2006) tarafından önerilen yöntem uygulanmıştır. Aşağıda metodun uygulanması ile ilgili denklemler ve ilişkiler açıklanmaktadır.

Test cihazında gerçekleştirilecek deneyler için uygulama şartları parametrik olarak incelendiğinde; sabit $\dot{\varepsilon}$ çene hızında ancak t_1 süresi sonunda sabit uzama değerine (ε_0), ulaşılabilecektir (Şekil 3.15). Sabit uzama değerine ulaşıldıktan sonra çene hiçbir şekilde hareket ettirilmeyerek, gerilme azalması deneyi denge şartlarına kadar devam ettirilecektir.



Şekil 3.15. Tek basamaklı ani zorlama (Sorvari ve Malinen 2006)

İntegral ifadesinin verilen test şartları (viskoelastik davranışın gerilme azalması fonksiyonu) için yorumlanması aşağıda verilmektedir.

$$\varepsilon(t) = \begin{cases} \dot{\varepsilon}_0 t & t < t_1 \\ \varepsilon_0 & t > t_1 \end{cases} \quad \sigma(t) = \begin{cases} \sigma(t) = \dot{\varepsilon}_0 \int_0^t E(t-\tau) d\tau & t < t_1 \\ \sigma(t) = \dot{\varepsilon}_0 \int_0^{t_1} E(t-\tau) d\tau & t \geq t_1 \end{cases}$$

Gerilme azalması fonksiyonun $t > t_1$ değerleri göz önüne alınırsa, gerilme fonksiyonun türevi ile aşağıdaki ilişki kurulmaktadır.

$$\sigma(t) = \dot{\varepsilon}_0 \int_0^{t_1} E(t-\tau) d\tau \quad t \geq t_1$$

$$\frac{d\sigma(t)}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\dot{\varepsilon}_0 \int_0^{t_1} E(t-\tau) d\tau \right)$$

Sınırları sabit belirli integralin türevi için Leibniz kuralı uygulandığında integral ve türev operatörleri arasında $D_t I_t = I_t D_t$ değişme özelliği bulunmaktadır.

$$\dot{\sigma}(t) = \dot{\varepsilon}_0 \int_0^{t_1} \frac{d}{dt} [E(t-\tau)] d\tau$$

$$u = t - \tau \Rightarrow \frac{dE(u)}{du} = \frac{dE(t - \tau)}{dt}$$

$$\frac{dt}{du} = \frac{dE(t - \tau)}{d\tau} \frac{d\tau}{du}$$

$$\frac{dE(t - \tau)}{dt} = - \frac{dE(t - \tau)}{d\tau}$$

$$\dot{\sigma}(t) = -\dot{\varepsilon}_0 \int_0^{t_1} \frac{dE(t - \tau)}{d\tau} d\tau$$

$$\dot{\sigma}(t) = \dot{\varepsilon}_0 [E(t) - E(t - t_1)]$$

$$E(t) = \frac{\dot{\sigma}(t)}{\dot{\varepsilon}_0} + E(t - t_1)$$

Gerilme azalma fonksiyonu, yamuklar yöntemi kullanarak $[0-t_1]$ aralığında sayısal integral ile hesaplanmaktadır.

$$\sigma(t) = \dot{\varepsilon}_0 \int_0^{t_1} E(t - \tau) d\tau \quad t \geq t_1$$

$$\sigma(t) = \dot{\varepsilon}_0 \frac{[E(t - t_1) - E(t)]}{2} t_1$$

Gevşeme modülünün $E(t)$ değerinin eşitlik içerisinde kullanılması durumunda;

$$E(t - t_1) = \frac{\sigma(t)}{\varepsilon_0} - \frac{\dot{\sigma}(t)}{2\dot{\varepsilon}_0} \quad t \geq t_1$$

$$E(t + t_1 - t_1) = \frac{\sigma(t + t_1)}{\varepsilon_0} - \frac{\dot{\sigma}(t + t_1)}{2\dot{\varepsilon}_0} \quad t + t_1 \geq t_1$$

$$E(t) = \frac{\sigma(t + t_1)}{\varepsilon_0} - \frac{\dot{\sigma}(t + t_1)}{2\dot{\varepsilon}_0} \quad t \geq 0$$

merkezi sonlu farklar yönteminin kullanıldığı ölçüm değerleri ile gerilme fonksiyonun diferansiyeli gösterildiğinde aşağıdaki denklemler elde edilmektedir.

$$E(t) = \frac{\sigma(t + t_1)}{\varepsilon_0} - \frac{\dot{\sigma}(t + t_1)}{2\dot{\varepsilon}_0} \quad t \geq 0$$

$$E(t) = \frac{\sigma(t+t_1)}{\varepsilon_0} - \frac{\sigma(t+t_1+h) - \sigma(t+t_1-h)}{2\dot{\varepsilon}_0 2h}$$

Denklemden h sonlu farklar yönteminde seçilen aralık uzunluğudur.

Verilen ilişkiler ile teste başlama anındaki başlangıç modülü $E(0)$ değeri ve kumaşın test bölgesindeki elastik modülü belirlenerek modellerdeki hatalar ve eksiklikleri bulgular kısmında araştırılmıştır. Test verilerinin kullanılarak belirlenen elastik modül ve Sorvari ve Malinen önerdiği başlangıç modülü için yazılan program Ek 10'da verilmektedir.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Tezin bu kısmında geliştirilen test cihazının çalışma performansı ve ölçülen değerlerin doğruluğuna ilişkin test sonuçları sunulacak, testler için geliştirilen yazılımlar test edilip sonuçları değerlendirilecek ve kumaş numunelerinin viskoelastik davranışları tartışılacaktır.

4.1. Geliştirilen Cihazın Test Edilmesi

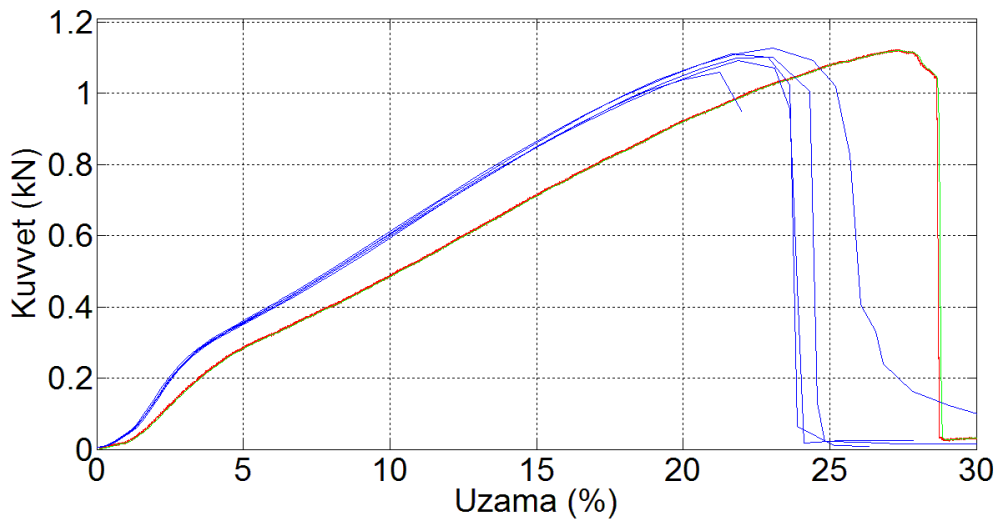
Cihazın verdiği sonuçları değerlendirmek amacıyla Çizelge 4.1’de verilen kumaş tipleri için deneysel çalışma yapılmıştır. İlk deneme çalışması kuvvet uzama eğrileri üzerinde gerçekleştirilmiştir. Test cihazının ölçüm sonuçlarının doğruluğunu değerlendirmek amacıyla, belirtilen kumaş tipleri için Instron 4301 üniversal test cihazında da ölçümler gerçekleştirilerek sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Çizelge 4.1. Cihazın deneme testinde kullanılan kumaş tipleri

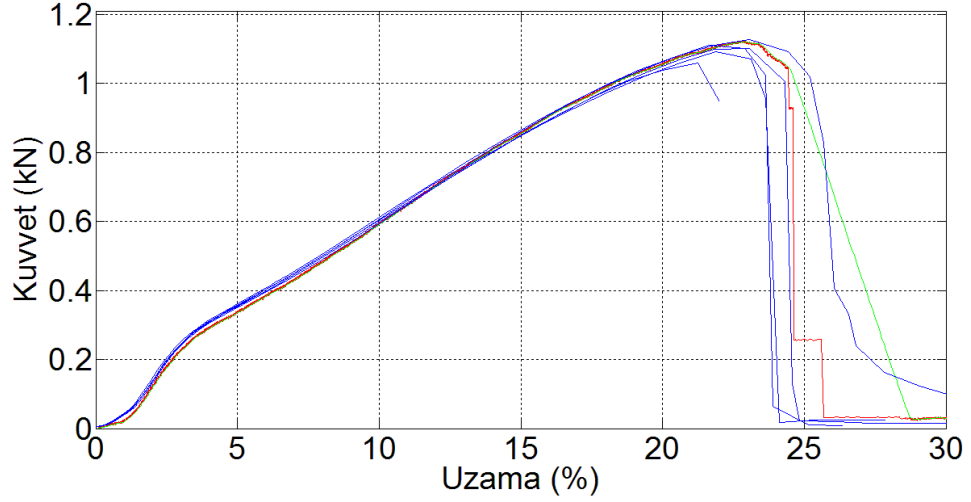
Kumaş tipi	Kumaş örgüsü	Kumaş ağırlığı (g/m ²)	Kumaş kalınlığı (mm)	İplik tipi	İplik numarası		İplik sıklığı (iplik/cm)	
					Atkı	Çözü	Atkı	Çözü
Çarşaflık	Bezayağı	126	0,26	CO penye	Ne 30	Ne 30	26	32
Perdelik	Saten 5/1	136	0,26	PES puntalı	150 denye	100 denye	25	85
Döşemelik-4	Bezayağı	290	0,45	PES puntalı	450 denye	150 denye	25	66
Döşemelik-5	Bezayağı	450	1,48	PES şenil	6 Nm	6 Nm	10,5	10
Döşemelik-6	Dimi 2/2	490	0,80	%40 CO %20 PES %20 CV %20 LI Open-End	Ne 10/2	Ne 10/2	17,6	17,6

Kumaş numuneleri ve çene yüzeyleri arasında cihazda gerçekleştirilen deneme testlerinde kaymalar tespit edilmiştir. Çene yüzeyleri yumuşak ve sürtünme katsayısı yüksek bir malzeme ile kaplanmış ve kaymalar engellenmeye çalışılmıştır. Kumaş ve çene arasında kaymayı belirlemek için kumaşın çeneye tespit noktasına işaret çizgileri konulmuştur. Bu şekilde yapılan testlerde kumaş ve çene yüzeyleri arasında yeterli tutuculuğun sağlanarak kaymanın engellendiği görülmüştür. Cihaza kumaş bağlamadan yapılan ölçümlerde, hareketli çenenin ölçülen yer değiştirmesi ile servo motor hareketinden hesaplanan değer uyumlu olduğu görülmüştür. Diğer yandan deneme

testleri esnasında çenenin hareket miktarı ile servo motor hareketinden hesaplanan uzama arasında bir miktar fark görülmüştür. Yapılan ayrıntılı incelemede; test esnasında kumaşa oluşan kuvvetin hareketli çenede bir miktar eğilmeye sebep olduğu görülmüştür. Hareketli çene ünitesinde mekanik iyileştirmeler yapılmıştır ve rijitliği artırmak için metal parçalar kaynatılmıştır. Bu iyileştirmelerden sonra testler tekrar edilmiştir. Şekil 4.1 Instron 4301 ve geliştirilen cihazda elde edilen kuvvet uzama eğrilerini göstermektedir. Grafiklerde Instron 4301'e ait olan sonuçlar mavi renkte, geliştirilen cihazdan elde edilen sonuçlar ise kırmızı renkte verilmiştir. Eğriler incelendiğinde, kopma uzamaları arasında önemli derecede farklar bulunmakta iken, kopma kuvvetinin her iki cihazda neredeyse aynı olduğu görülmüştür. Sonuçların analizi kumaş ve çeneler arasındaki kaymanın ortadan kaldırılmasına karşın, hareketli çenedeki eğilmenin bir kısmının sistem üzerinde yine de kaldığı görülmüştür. Eğilmenin pratik açıdan etkisiz seviyeye getirilebilmesi için hareketli çenenin tek bir parça olarak yeniden tasarlanıp imal edilmesini gerekliliği görülmüştür. Zaman kısıtlaması nedeniyle bu yapılamamıştır. Farka neden olan eğilmenin miktarı, deneysel olarak tesbit edilmiş ve bir düzeltme faktörü ile kuvvet uzama eğrisi elde edilmiştir (Lomaev 1965). Şekil 4.2 düzeltme faktörü kullanılarak elde edilen kuvvet uzama eğrisi ile Instron 4301'den elde edilen eğrileri göstermektedir. Şekilde görüldüğü üzere, düzeltme katsayısı yardımıyla test cihazı ve Instron 4301'den elde edilen ölçümler arasında oldukça iyi bir uyum olduğu gözlenmektedir. Kopma kuvveti ve uzaması değerleri arasındaki uyumun yanı sıra, her iki cihazın test eğrilerinin de birbiriyile uyumlu olduğu görülmektedir.

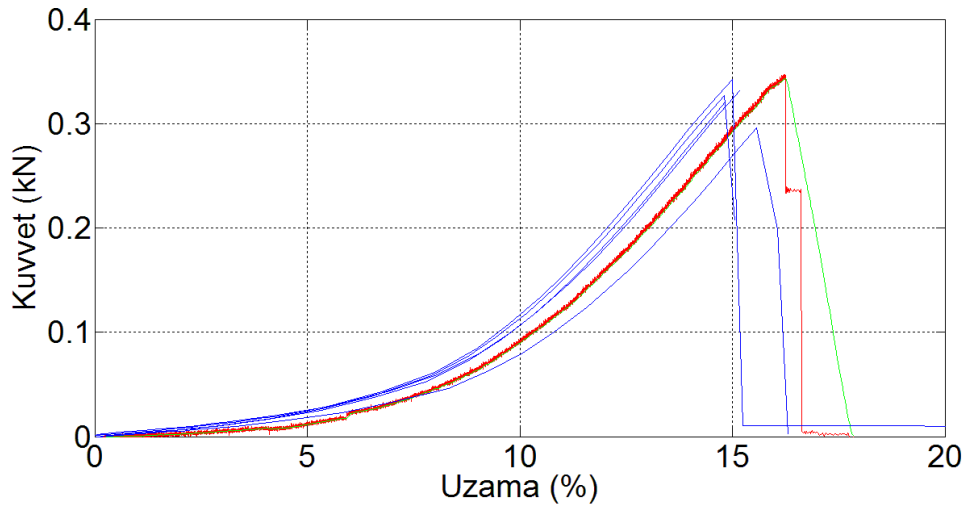


Şekil 4.1. Perdelik kumaşa test sonuçlarının karşılaştırılması

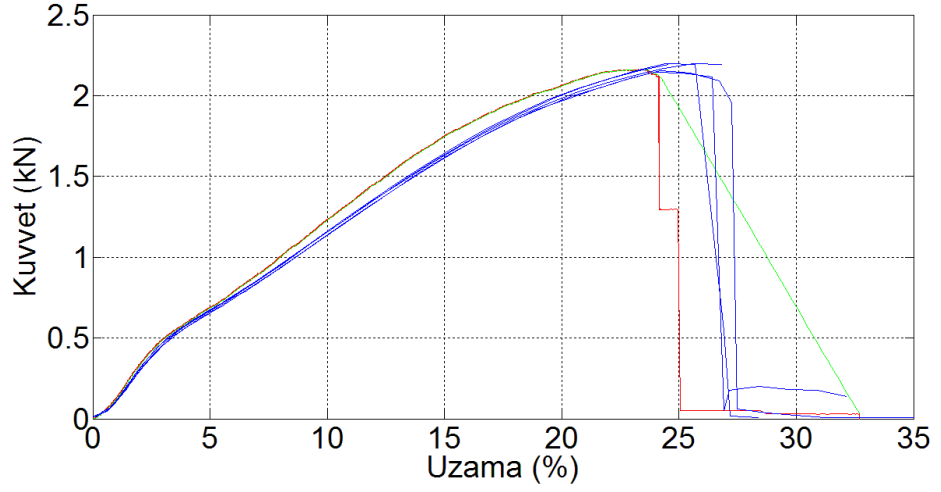


Şekil 4.2. Perdelik kumaşta düzeltme katsayısının etkisi

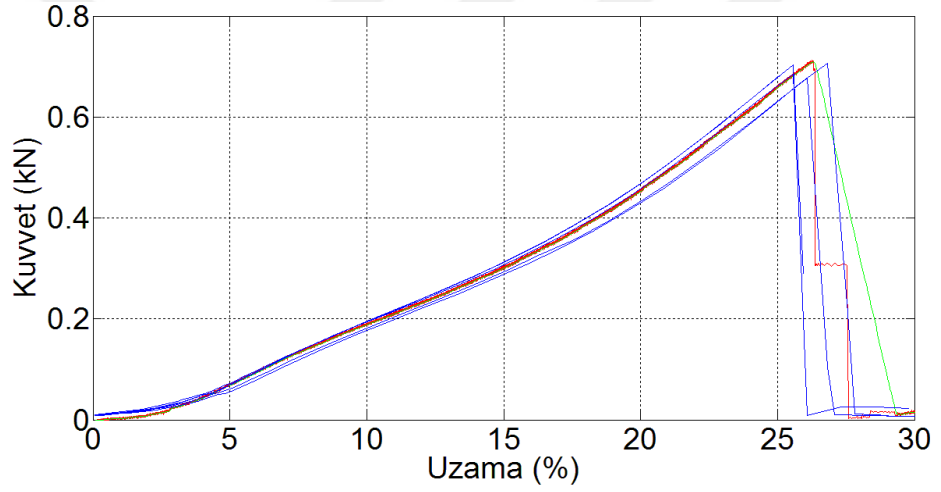
Sonuçların tutarlılığını test etmek için kuvvet uzama testi diğer kumaşlar üzerinde de uygulanmıştır. Her iki cihazdan elde edilen kuvvet uzama eğrileri, Şekil 4.3'ten Şekil 4.6'ya kadar verilen grafiklerde gösterilmektedir. Şekiller incelendiğinde, Instron 4301 ve test cihazında elde edilen kopma kuvvetlerinin aynı olduğu ve küçük sapmalara rağmen kopma uzamasının da birbirlerine oldukça yakın olduğu görülmektedir. Kuvvet uzama eğrilerinin belirli bir bölümünde küçük sapmalar olmasına karşın, değişimlerin birbirine yakın olduğunu görülmektedir. Bu küçük sapmaların, hareketli çenenin eğilme davranışı ve hareketli çenenin bilyeli mil somununa yapılan civata bağlantısındaki mekanik zayıflıklardan kaynaklandığı düşünülmektedir.



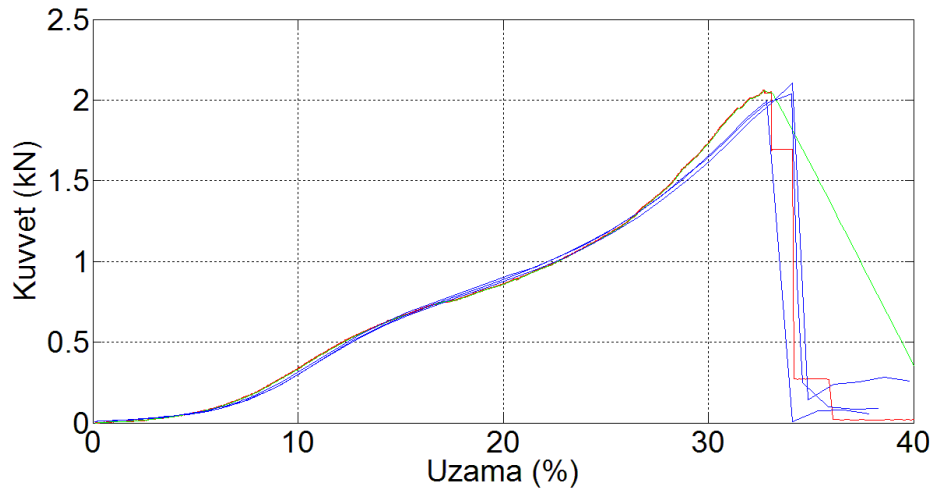
Şekil 4.3. Çarşaflık kumaşının test sonuçlarının karşılaştırılması



Şekil 4.4. Döşemelik-4 kumaşının test sonuçlarının karşılaştırılması



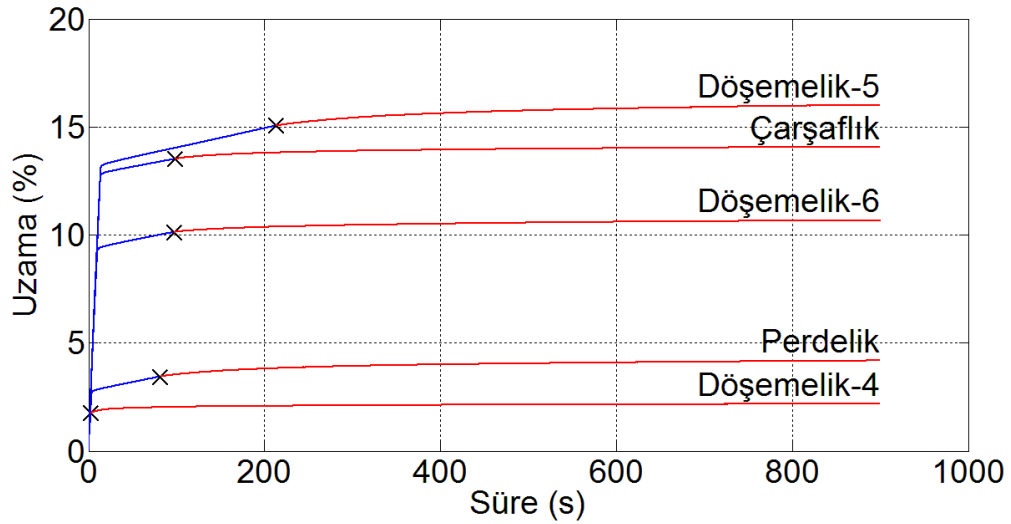
Şekil 4.5. Döşemelik-5 kumaşının test sonuçlarının karşılaştırılması



Şekil 4.6. Döşemelik-6 kumaşının test sonuçlarının karşılaştırılması

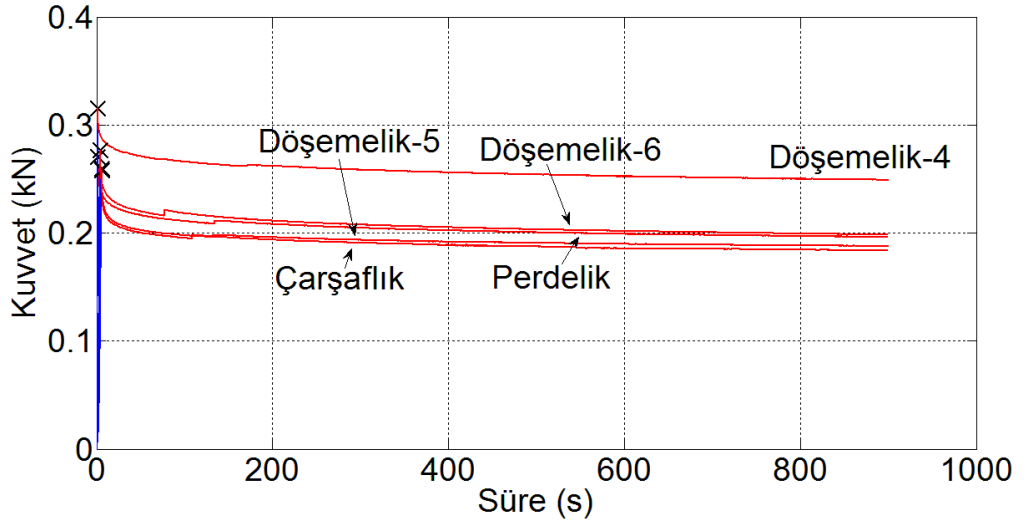
Cihaz ve Instron 4301 gerilme test cihazından elde edilen kuvvet uzama eğrileri arasındaki uyum göz önünde bulundurularak, diğer test rutinlerinin deneme aşamasına geçilmiş ve Şekil 4.7’den Şekil 4.10’a kadar olan grafiklerde gösterilen sonuçlar elde edilmiştir.

Şekil 4.7 sürünme test sonuçlarını göstermektedir. Eğriler üzerindeki çarpı işareti (x) test şartlarına ulaşıldığı anı göstermektedir. Çarpı işaretinin öncesinde bulunan eğri, sürünme test şartlarına kadar olan uzamadaki değişimi göstermektedir. Testler 900 s süresince uygulanmıştır. Belirtilen kumaş tipleri için uzamalar 250 N yüklemeye karşılık gelmektedir. Eğriler incelendiğinde 900 s’lik süre boyunca aynı gerginliği sağlamak için kumaşlarda uzamanın olduğu ve kumaş tipine bağlı olarak bu uzamaların % 0,05-1,5 arasında gerçekleştiği görülmektedir.

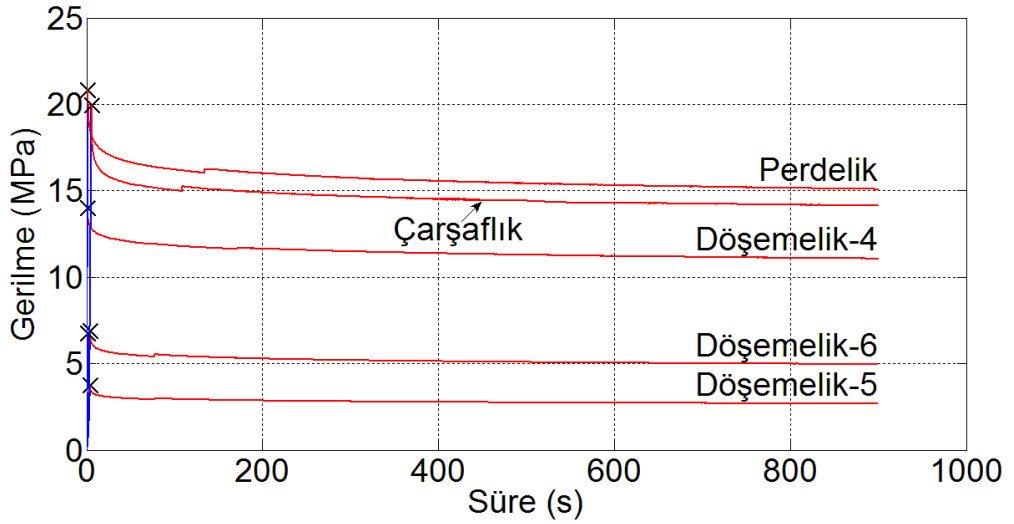


Şekil 4.7. Sürünme test sonuçları

Bir başlangıç yüklemesinden sonra 900 s süresince gerçekleşen gerilme azalması Şekil 4.8’de verilmektedir. Kumaş tiplerinde başlangıçtaki gerginlik değeri (ilk 10-20 s) hızlı bir şekilde azalmaktadır. Gerginlik azalması, daha sonra düşük bir hızda devam etmektedir. Şekil 4.9’da ise gerilme (kuvvet/kesit alanı) azalmasını göstermektedir. Gerginlik sabit bir değer olan kesit alanına bölünerek elde edildiği için aynı değişim gözlenmektedir.

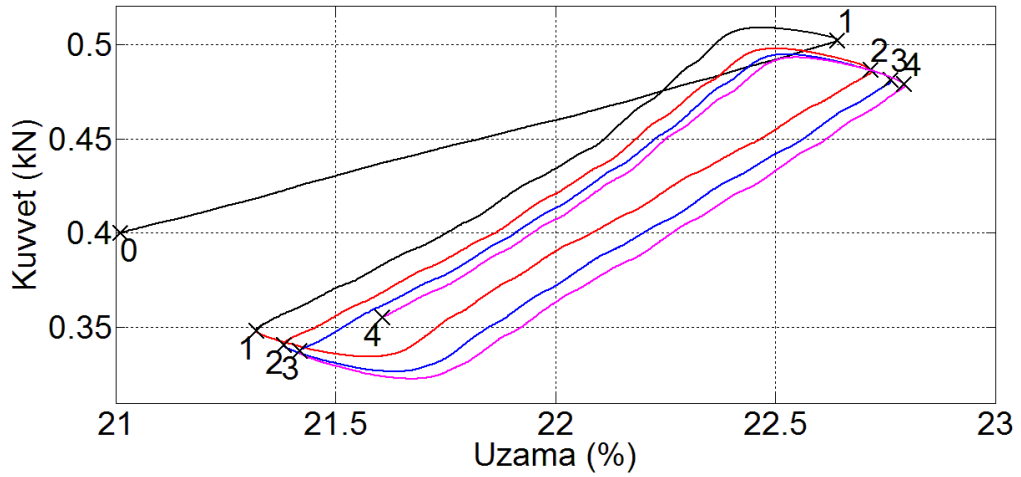


Şekil 4.8. Kumaşlardaki gerginlik azalması



Şekil 4.9. Kumaşlardaki gerilme azalması

Şekil 4.10'da dinamik yükleme testi sonuçları verilmektedir. Bu test sonuçları sadece, test rutinin çalıştığını göstermek ve cihazın dinamik zorlama testinde kullanılabilir olduğunu kanıtlamak için verilmiştir. Teste ileri ve geri yönde çenenin 0,8 s süresince sabit hızda (300 mm/dak) hareketi öngörülmüş, bu sürede elde edilen yer değiştirme miktarı test numunesinde %1,3' lük bir uzama değişimine karşılık gelmiştir. Üç tekrarlı zorlama her bir tekrardan sonra kuvvet uzama eğrisinde bir miktar kaymanın olduğunu göstermektedir. Dinamik zorlama test sonuçları Çizelge 4.2'de sayısal olarak ta verilmektedir.



Şekil 4.10. Döşemelik-5 kumaşının dinamik zorlama testi

Çizelge 4.2. Döşemelik-5 kumaşının dinamik zorlama testinden elde edilen veriler

Tekrar sayısı	0	1	1	2	2	3	3	4	4
Test zamanı (s)	9,0070	9,8260	10,625	11,428	12,218	13,018	13,809	14,608	15,299
Hareket süresi(s)		0,819	0,799	0,803	0,79	0,8	0,791	0,799	0,691
Yer değiştirme (puls)	22610	24649	22714	24663	22746	24688	22769	24709	23028
Yer değiştirme (mm)	42.020	45.281	42.641	45.434	42.764	45.524	42.837	45.584	43.212
Uzama (%)	21,010	22,640	21,320	22,717	21,382	22,762	21,418	22,792	21,605
Kuvvet (kN)	0,3999	0,5021	0,3483	0,4864	0,3409	0,4814	0,3375	0,4791	0,3555

Test sonuçlarının değerlendirilmesi:

Yatay bir gerilme test cihazı tasarlanmış, üretilmiş ve Instron 4301 gerilme test cihazından elde edilen kuvvet uzama eğrileri ile karşılaştırılarak performansı ve tekstil malzemelerinin gerilme testlerine uygunluğu değerlendirilmiştir. Kuvvet uzama eğrilerinden elde edilen ilk sonuçlar, cihazlar arasında önemli bir farkın olduğunu göstermiştir. Bu fark cihazdan kaynaklı bir sistematik hata olarak değerlendirilmiştir. Sistematik hatanın kumaş ve çeneler arasındaki kayma, hareketli çenenin eğilmesinden ve mekanik kusurlardan kaynaklandığı görülmüştür. Yumuşak ve sürtünmeli bir malzeme çene yüzeylerine yapıştırılmış ve test edilen kumaşlar için kaymayı engelleyen bir önlem sağlamıştır. Hareketli çenenin rijitliğini artırıcı lama parçaları kaynatılarak sistemin eğilmesi azaltılmıştır. Yine de motor hareketi ve hareket iletim sisteminin kinematığından hesaplanan değerler ile gerçek çene yer değiştirmesi arasında bir fark bulunmuştur. Hesaplanmış değerlerden gerçek uzamayı elde etmek için bir düzeltme

katsayısı kullanılmış ve kuvvet uzama eğrilerinin bu yolla Instron 4301 gerilme test cihazı ile uyumlu olması sağlanmıştır.

Kuvvet uzama eğrisine benzer; dinamik yükleme, sürünme ve sabit yük altında gerginlik azalması testleri için farklı algoritmalar geliştirilmiştir. Test rutinleri numune kumaşlara uygulanmış ve düzgün çalıştıkları gösterilmiştir.

Instron 4301 gerginlik test cihazı ve cihazının her ikisinde aynı kopma kuvveti değerleri elde edilmiştir. Ancak her iki cihaz arasında kopma uzaması değerleri arasında küçük bir fark bulunmaktadır. Her iki cihazın kuvvet-uzama eğrilerinin karakteristiklerinin büyük bir ölçüde uymasına karşın bazı sapmalar hala mevcuttur.

Gelecekteki çalışmalarda; hareketli çenenin rijitliğinin artırılması ve mekanik kusurların ortadan kaldırılmasına odaklanılacaktır. Bu yolla, cihazın ticarileşmiş gerilme test cihazlarının ölçme karakteristiğine ulaşılabileceği beklenilmektedir.

4.2. Viskoelastik Davranışın Matematiksel Analizi

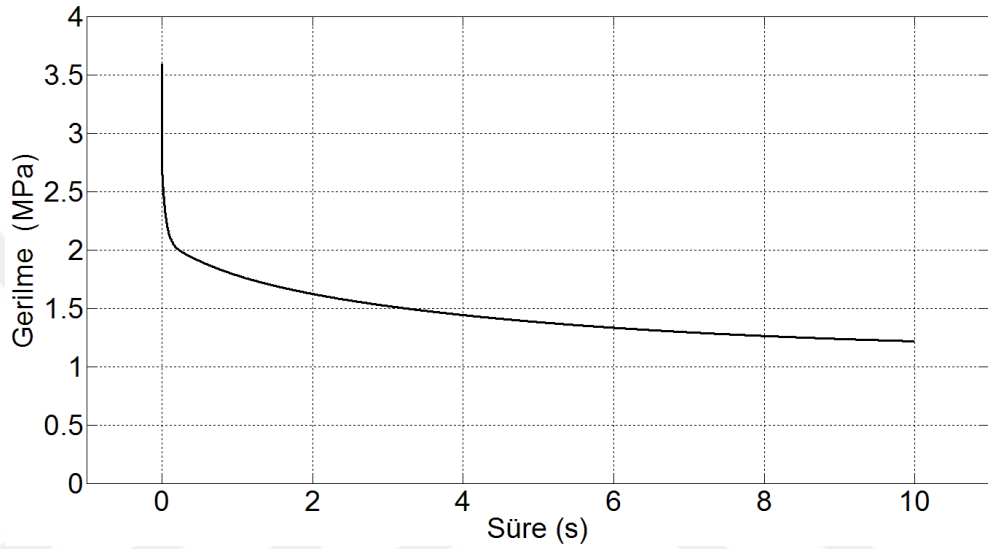
Sürünme ve gerilme azalması davranışları Kuramsal Temeller bölümünde açıklandığı gibi çok terimli üstel fonksiyonlar ile temsil edilmektedir. Bölüm 3.2.3'te verilen pronySVDhankel programı, çok terimli üstel azalan fonksiyonların simülasyon sonuçları kullanılarak test edilmiştir. Deneysel çalışma verileri kullanılarak gerilme azalması için çok terimli üstel azalan bir matematiksel modelin kurulabilirliği elde edilen sonuçlar ile gösterilmeye çalışılmıştır.

Programın test işlemlerinde ilk olarak, Lemini'nin (2014) problem P.7.5'de doğal kauçuk için verdiği Prony terimleri kullanılmıştır.

$[Y_i, Y_{gi}, Z_{ij}] = \text{simulatenexpdata}(\lambda_{daj}, A_j, t)$ matlab fonksiyonunun çalıştırılması ile modelin ve modeli oluşturan terimlerin simülasyon değerleri elde edilmiştir. Simülasyon programı Ek 7'de verilmiştir. Programın A_j ve λ_{daj} giriş parametreleri, Prony terimlerinin zaman sabiti (λ_j) ve sabit katsayı (A_j) değerlerini ifade etmektedir. Modelin değişken parametresi olan zaman, t giriş parametresi ile programda tanımlanmaktadır. Programın çıkış parametreleri sırasıyla, $t(i)$ anında gerilme değerini (Y_i), gürültü sinyalinin eklendiği gerilme değerini (Y_{gi}) ve Prony terimlerinin (Z_{ij}) simülasyon sonuçlarını ifade etmektedir.

Modelin değişken parametresi olan zamana ait değerler, 0-10 s aralığında 0.001 s'lik artımlar ($t=0:0.001:10$) ile belirlenmiştir. Zaman parametresinin 0.001 s'lik artımları, deneysel çalışmalarda veri toplama aşamasında kullanılan 1000 veri/s'lik analog sinyali okuma hızına karşılık gelmektedir.

Gerilmenin zamana göre değişimini (Y_i) ifade eden simülasyon sonucu Şekil 4.11'deki grafikte verilmiştir.



Şekil 4.11. Doğal kauçuğun gerilme fonksiyonun simülasyonu

Grafikteki değişimi sağlayan Prony terimlerinin katsayıları ve terimlerin hesaplanan değerleri izelge 4.3'te verilmiştir. İncelemeyi kolaylaştırmak için Prony terimlerinin gevşeme süreleri, kekten büyüğe sıralanarak çizelgede sunulmuştur. Simülasyon süresince kullanılan terimleri belirlemek için Prony terimlerinin hesaplanan değerleri çizelgeye eklenmiştir. Bu amaçla, yalnızca terimlerin hesaplanan değerinin sıfıra ulaştığı andaki değerleri çizelgede verilmiştir. Prony terimine ait gevşeme süresi azaldıkça, terimin gerilme fonksiyonu içinde bulunduğu sürenin azaldığı grlmştir. Gevşeme süresi artıkça, ölçülen gerilme sinyali içerisinde ilgili Prony teriminin daha uzun süre bulunacağı, hatta gevşeme süresinin sonsuz olması durumunda ise ölçülen sinyal içerisinde hep bulunacağı ve gerilme değerinin asimptotik olarak bu terime ait sabit katsayısı değerine yaklaşacağı grlmştir.

Çizelge 4.3. Gerilme fonksiyonun simülasyon değerleri

Terim no	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Sabit katsayı A_j (MPa)	0,0674	0,0913	0,0698	0,2193	0,4200	0,6357	0,2295	0,7263	0,8341	0,3
Gevşeme süresi τ_j (s)	9,1159E-8	2,902E-6	3,076E-5	8,107E-5	7,085E-4	4,862E-2	7,706E-1	4,641	3,334E+3	∞
Zaman sabiti $-\lambda_j$ (-1/ τ_k)	-10969843	-344589	-32557	-12334	-1411	-20,5685	-1,2976	-0,2155	-0,0003	0,0
Gerilme fonksiyonu Y_i (MPa)	Terimlerin aldığı değerler Z_{ij}									
$Y(0,000 \text{ s}) = 3,593234$	0,0674	0,0913	0,0698	0,2193	0,4200	0,6357	0,2295	0,7263	0,8341	0,3
$Y(0,001 \text{ s}) = 2,814484$	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,1024	0,6227	0,2292	0,7261	0,8340	0,3
$Y(0,002 \text{ s}) = 2,723925$	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0250	0,6101	0,2289	0,7260	0,8340	0,3
$Y(0,003 \text{ s}) = 2,692176$	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0061	0,5976	0,2286	0,7258	0,8340	0,3
$Y(0,006 \text{ s}) = 2,649059$	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0001	0,5619	0,2277	0,7254	0,8340	0,3
$Y(0,007 \text{ s}) = 2,637102$	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,5504	0,2274	0,7252	0,8340	0,3
$Y(0,459 \text{ s}) = 1,918369$	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0001	0,1265	0,6579	0,8339	0,3
$Y(0,460 \text{ s}) = 1,918062$	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,1263	0,6578	0,8339	0,3
$Y(6,497 \text{ s}) = 1,311593$	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0001	0,1791	0,8324	0,3
$Y(6,498 \text{ s}) = 1,311554$	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,1791	0,8324	0,3
$Y(9,999 \text{ s}) = 1,215774$	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0842	0,8316	0,3
$Y(10,00 \text{ s}) = 1,215756$	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0842	0,8316	0,3

Bir algoritmanın veya bir amaç için yazılan programın doğru sonuçlar verip vermediği, çözümü bilinen bir problem ile test edilerek belirlenmektedir. Bu amaçla, gerilme değerinin gürültüsüz ve gürültü eklenmiş analog sinyalinin simülasyon sonuçları (Y_i ve Y_{gi}) kullanılarak, Lemini'nin verdiği Prony terimlerinin katsayıları tekrar hesaplanmaya çalışılmıştır.

Aşağıdaki incelemelerde programın verdiği sonuçlar değerlendirilmiştir. İnceleme sırasında öncelikle, katsayıların sahip olduğu işaretlerin doğruluğuna ve problemin çözüm koşullarının değiştirilmesi ile tekrar aynı değerlerin elde edilebilirliğine dikkat edilmiştir. Son olarak bulunan katsayı değerleri ile problemde verilen değerleri arasındaki hata miktarının anlamlı olup olmadığı değerlendirilmiştir. Gürültüsüz gerilme değerleri için sırasıyla $k=10, 50, 100, 500, 1000$ ve 5000 sütunlu Hankel matrisleri kullanılarak elde edilen çözümler verilmiştir.

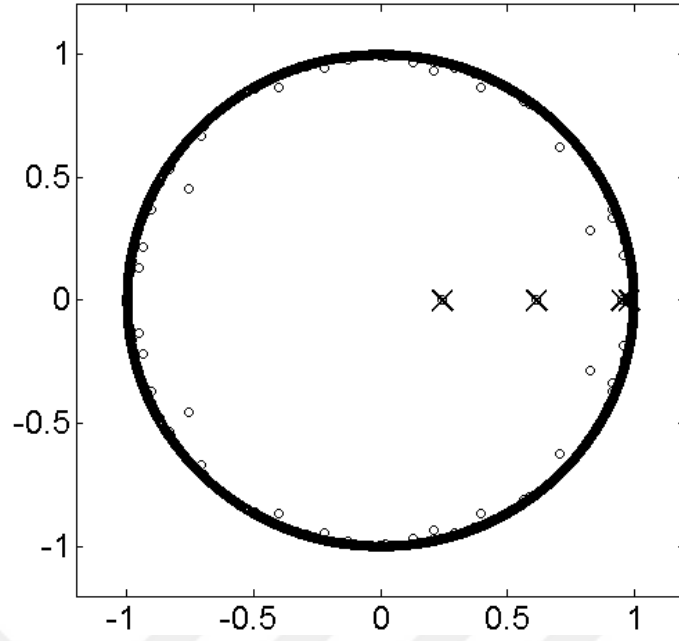
Çizelge 4.4 incelendiğinde, Prony serisinin ilk dört teriminin katsayılarının bulunamadığı görülmektedir. Hankel matrisinin sütun sayısının artırılması ile belirlenemeyen Prony terimlerinin bulunabildiği ve belirlenen zaman sabitleri (λ_j) için

hata miktarının azaldığı görülmektedir. Birbirini takip eden serinin ilk ve son Prony terimlerinin sabit katsayı (A_j) değerleri için hata miktarı büyük iken, serinin aradaki terimleri için önemli bir fark bulunmamaktadır.

Çizelge 4.4. 0,001 s aralıklarla simülasyonu yapılan sinyalin bileşenleri

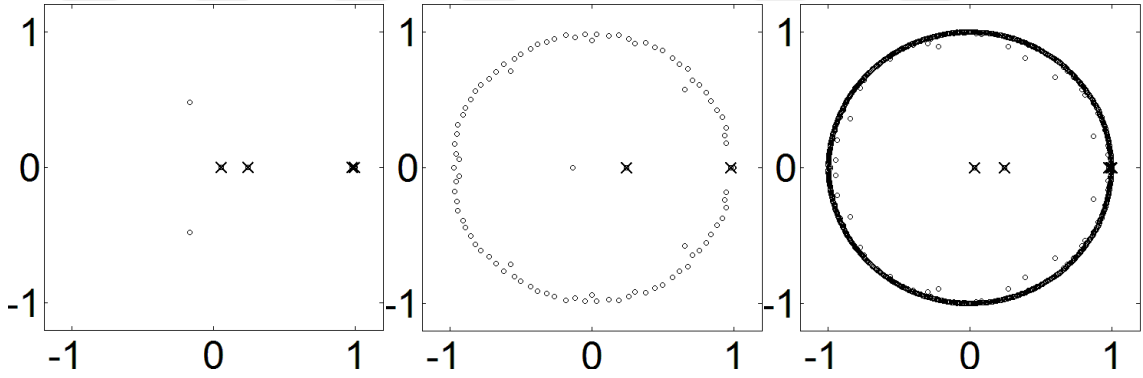
Terim			Çözüm koşulu					
No	Katsayı	Sembol	$y,t,10,0.001$	$y,t,50,0.001$	$y,t,100,0.001$	$y,t,500,0.001$	$y,t,1000,0.001$	$y,t,5000,0.001$
5	-1411,5322	λ_5	-1411,4326	-1411,4326	-1411,4326	-1411,4326	-1411,4326	-1411,4326
	0,4200	A_5	-1,7664*	0,3859	1,3820	0,8473	0,8473	0,8473
6	-20,5685	λ_6	-20,5676	-20,5677	-20,5677	-20,5677	-20,5677	-20,5677
	0,6357	A_6	1,6341	0,6432	0,6380	0,6302	0,6302	0,6302
7	-1,2976	λ_7	-1,2414	-1,2973	-1,2977	-1,2977	-1,2977	-1,2977
	0,2295	A_7	-2,0740*	0,2152	0,2292	0,2303	0,2303	0,2303
8	-0,2155	λ_8	x	-0,2175	-0,2155	-0,2155	-0,2155	-0,2155
	0,7263	A_8	x	0,7541	0,7264	0,7253	0,7254	0,7254
9	-0,0003	λ_9	x	x	-0,0002	-0,0002	-0,0003	-0,0003
	0,8341	A_9	x	x	1,1340	1,1310	0,9233	1,0062
10	0,0000	λ_{10}	x	x	x	x	0,0000	0,0000
	0,3000	A_{10}	x	x	x	x	0,2113	0,1284
Model ile ilişkilendirilemeyen değerler								
Çözüm koşulu			λ	A	λ	A	λ	A
$y,t,10,0.001$			-4962,9666	2,1956	-0,41286	3,23096	0,14116	0,3737
$y,t,50,0.001$			-4641,6331	0,47855	0,0015	1,1163		
$y,t,100,0.001$			-900,4174	-0,5205				
$y,t,500,0.001$			-0,01774	0,0037				

Zaman sabitlerinin (λ_j) belirlenmesinde kullanılan polinom fonksiyonuna ait köklerin karmaşık sayılar düzlemindeki yerleri Şekil 4.12’de gösterilmektedir. Şekilde çarpı işaretine sahip kökler reel kökü ifade etmektedir. Hesaplanan diğer karmaşık kökler ise daire içine alınarak gösterilmektedir. Zaman sabiti sıfıra yakın olan reel kökler karmaşık sayılar düzleminde 1 değerine yakın yerleşmiştir. Çünkü $e^0=1$ ’dir. Araştırılan diğer reel kökler (0-1] aralığında bulunmuştur. Çünkü $e^{-\infty}=1/e^{\infty} \approx 0$ ’dır. Çoğu zaman karmaşık kökler bir değişim içerisinde yer alan harmonik değişimleri ifade etmektedir. Çözümde bulunan karmaşık köklerin, birim çember üzerinde toplandığı görülmektedir. Bu köklerin değerleri $e^{0+i\theta}$ ile ifade edilir.



Şekil 4.12. Zaman sabitleri için belirlenen köklerin yerleşimi

Çizelge 4.4'te bazı zaman sabitlerinin (λ_j) sütun genişliği az Hankel matrisi ile belirlenebildiği görülmektedir. Şekil 4.13'te sırasıyla 10, 100 ve 1000 sütunlu Hankel matrisleri ile sağlanan çözümler verilmiştir.



Şekil 4.13. Zaman sabitlerinin 10, 100 ve 1000 sütunlu Hankel matrisi ile bulunması

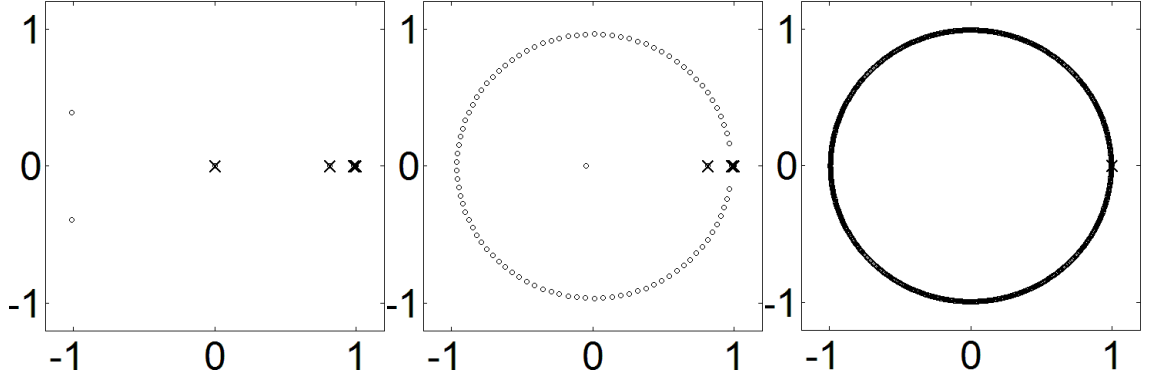
Önceki incelemede kullanılan veri dizisi içerisinde birbirini takip eden her on veriden biri seçilerek yeni bir veri dizisi elde edilmiştir. Bu şekilde iki ölçüm arasındaki zaman aralığı $10 \times 0,001 = 0,01$ değerine düşürülmüştür. Başka bir ifade ile aynı sinyal, saniyede 100 veri okunarak elde edilmiştir ($Y1=Y(1:10:10001)$; $t1=t(1:10:10001)$; $\text{deltat1}=10*\text{deltat}$;) Elde edilen sonuçlar

Çizelge 4.5'te verilmiştir. Değerlendirmede kullanılan veri sayısının 1000 olması nedeniyle, 1000 sütunu aşan Hankel matrisleri için çözüm verilememiştir.

Çizelge 4.5. 0,01 s'lik artışlar ile örneklenen simülasyon sinyalinin bileşenleri

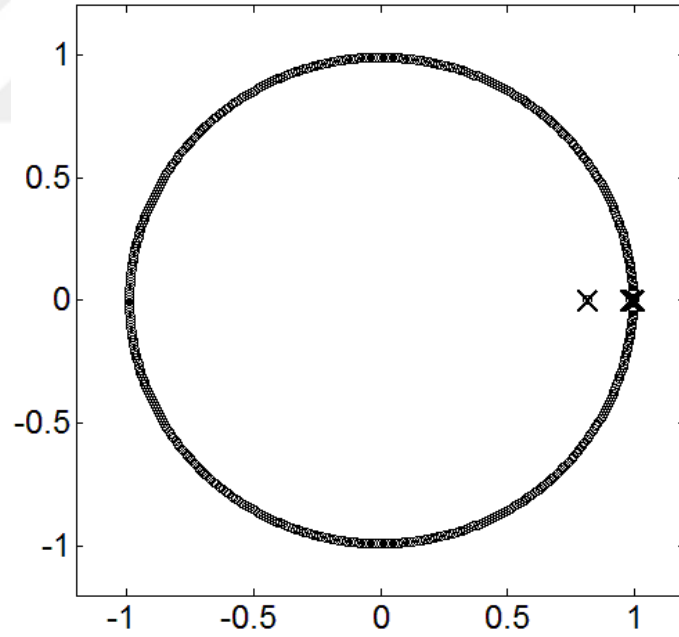
Terim			Çözüm koşulu				
No	Katsayı	Sembol	y1,t1,10,0.01	y1,t1,50,0.01	y1,t1,100,0.01	y1,t1,500,0.01	y1,t1,1000,0.01
5	-1411,5322	λ_5	x	x	x	x	x
	0,42	A5	x	x	x	x	x
6	-20,5685	λ_6	-20,5677	-20,5677	-20,5677	-20,5677	x
	0,6357	A6	0,0000*	0,9830	0,9830	0,9830	x
7	-1,2976	λ_7	-1,2969	-1,2977	-1,2977	-1,2977	x
	0,2295	A7	0,0000*	0,1754	0,1756	0,1756	x
8	-0,2155	λ_8	-0,2201	-0,2154	-0,2155	-0,2155	x
	0,7263	A8	0,0000*	0,7865	0,7851	0,7850	x
9	-0,0003	λ_9	x	x	x	-0,0003	x
	0,8341	A9	x	x	x	-10,2481*	x
10	0	λ_{10}	x	x	x	0,0000	x
	0,3	A10	x	x	x	11,3447	x
Model ile ilişkilendirilemeyen değerler							
Çözüm koşulu	λ	A	λ	A	λ	A	
y1,t1,10,0.01	-536,4799	0,0000	0,0036	0,0000	55,3055	0,0000	
y1,t1,50,0.01	-0,0083	-0,2402	0,0009	1,3355			
y1,t1,100,0.01	-0,0007	-3,8567	0,0001	4,9532			
y1,t1,1000,0.01	-0,0358	1,7361					

Prony terimlerinin zaman sabitlerinin (λ_j) sütun sayısı veri sayısının yarısından az Hankel matrisleriyle de belirlenebildiği ve katsayıların çözüm koşulunun değiştirilmesi ile tekrar bulunabildiği görülmektedir. Bazı terimlerin sabit katsayılarında (A_j) bir miktar hata ile tekrar buldukları görülmektedir. Ancak terimlerin sabit katsayıları için hata oranları azaltılamamıştır. Sabit katsayılarında oluşan hata miktarlarının, gerilme değerlerini daha az sayıdaki Prony terimleri ile temsil edilmesinden kaynaklandığı düşünülmüştür. Şekil 4.14'te belirlenen zaman sabitleri (λ_j) için elde edilmiş köklerin karmaşık sayılar düzleminde yerleşimi verilmiştir.



Şekil 4.14. Çizelge 4.4 için verilen 10, 100 ve 1000 sütunlu Hankel matrisi ile bulunan polinom fonksiyonun kökleri

Köklerin yerleşimi incelendiğinde düzgün bir yerleşim olduğu görülmektedir. Bu iyileşme; hesaplamada kullanılan işlemler sırasında sayısal değerlerin yuvarlatılmasından kaynaklanan hataların, işleme giren sayısal değerlerin yanında ihmal edilebilecek seviyede kalması ile açıklanabilir. Zaman sabitlerinin (λ_j) çizelgede verilen 500 sütunlu Hankel matrisiyle çözümünde önemli bir hata belirlenmemiştir (Şekil 4.15).



Şekil 4.15. Çizelge 4.4'te verilen 500 sütunlu Hankel çözümünün kökleri

Önceki değerlendirmede belirlenen 5 nolu Prony teriminin bu çözümde bulunamadığı görülmektedir. Aynı sinyale ait farklı veri değerleri kullanılarak elde edilen analiz sonuçları karşılaştırıldığında, terimlerin gevşeme süresinin değeri küçüldükçe, belirlenmesinde karşılaşılan güçlükler işaret ettiği görülmüştür. Araştırılan Prony

teriminin periyot uzunluğu τ_j gevşeme süresi olarak değerlendirilirse, terimin frekansının Denklem 4.1’de belirlenen zaman sabitine eşit olduğu görülmektedir.

$$-\lambda_j = -\frac{1}{\tau_j} \quad (4.1)$$

Belirlenemeyen terimlerin zaman katsayıları incelendiğinde veri okuma hızından (100 veri/s) çok yüksek olduğu görülmektedir. Bu durum, aynı zamanda Prony serisinin ilk dört teriminin daha önceki denemede bulunamama nedenini açıklamaktadır. Bu değerlendirme, veri okuma hızının artırılarak hızlı değişen terimler için daha sık veri toplanması anlamına gelmektedir.

Çizelge 4.5’teki serideki elastik modülü temsil eden 10 nolu terimin sabit katsayısının (A_j) uygun değerde bulunmadığı görülmektedir. Verilerin analizinde zaman katsayısı sıfıra eşit olan terimin belirlenebilmesi, gerilme değerindeki düşüşün sınır değerini veya elastik modülün tahmin edilebilmesi açısından önemlidir. Gerilme değerindeki düşüşün ihmal edilebilir olduğu seviyeye kadar uzun süreli bir ölçüm yapıldığında, sabit katsayısı (A) okunan en son gerilme değeri olarak alınabilir, çünkü simülasyon incelendiğinde 10 nolu terimin zaman katsayısının sıfır olması, başka bir ifade ile gevşeme süresinin sonsuz olacağı ve ölçülen sinyal içerisinde değerini değiştirmeden sürekli bulunacağı anlamına gelmektedir. Diğer taraftan ölçme sistemi üzerinde rastgele ve sürekli oluşan ölçüm hataları eğer normal dağılım gösteriyorsa, zaman sabiti sıfıra eşit olacaktır. Bu durum, aynı zaman sabitine sahip olan iki bileşenin belirlediği katsayı ile elastik modülün yaklaşık olarak tahmin edilebileceği anlamına gelmektedir. Her iki analiz karşılaştırıldığında; Hankel matrisinin sütun sayısının artması durumunda, birbirine yakın kök değerlerinin ayrıştırılabildiği ve dolayısı ile zaman katsayısı sıfıra yakın olan terimlerin sabit katsayılarının düşük hata miktarı ile bulunabildiği görülmüştür.

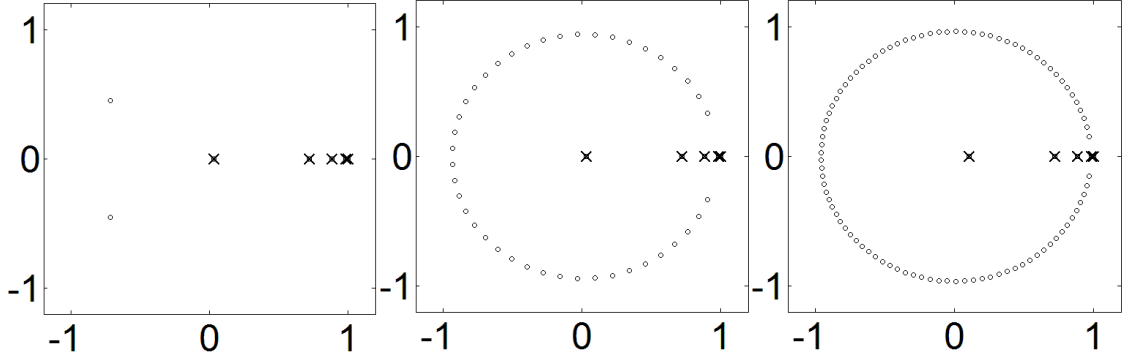
Hızlı değişen terimlerin belirlenebilmesi amacıyla, 0-10 saniye aralığında 10^{-8} s’lik artımlar ($\lambda_1 = -10.969.843$ dikkate alındı.) ile gerilme azalmasının simülasyonu denenmiştir. Ancak bellek yetersizliği hatası ile karşılaşmıştır (Out of memory). Gerilme değerleri için verilerin simülasyonu 10^{-6} s’lik artımlar ile tekrar denenmiştir. Bu durumda da 100 sütundan yüksek Hankel matrisinin kurulmasında yine bellek sorunu ile karşılaşmıştır. Elde edilen verilerden her on veriden biri seçilerek ($\Delta t = 10 \times$

deltat), $t_2=t(1:10:1000001)$ ve $y_2=y(1:10:1000001)$ değerleri düzenlenmiştir. Bu şekilde veriler arasında 10^{-5} s'lik artışlar ile 100 ve daha az sütunlu Hankel matrisleri için çözüm araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar Çizelge 4.6'da verilmektedir.

Çizelge 4.6. 0,00001 s aralıkla simülasyonu yapılan sinyalin bileşenleri

Terim			Çözüm koşulu		
No	Katsayı	Sembol	$y_2,t_2,10,0.00001$	$y_2,t_2,50,0.00001$	$y_2,t_2,100,0.00001$
1	-10969844	λ_1	x	x	x
	0,067406	A1	x	x	x
2	-344589,94	λ_2	-344589,7791	-341754,5122	x
	0,091256	A2	0,1528	0,3468	x
3	-32557,382	λ_3	-32552,0785	-32551,4162	-32527,7543
	0,069792	A3	0,0945	-0,5872*	-0,6430*
4	-12334,563	λ_4	-12335,0106	-12334,9265	-12333,9347
	0,21931	A4	0,1921	0,8861	0,9061
5	-1411,5322	λ_5	-1411,3824	-1411,3635	-1411,3276
	0,42	A5	0,4334	0,1076	0,1067
6	-20,5685	λ_6	-19,4311	-19,4414	-19,4337
	0,6357	A6	0,6721	0,9123	0,9123
7	-1,2976	λ_7	x	x	x
	0,2295	A7	x	x	x
8	-0,2155	λ_8	x	x	x
	0,7263	A8	x	x	x
9	-0,0003	λ_9	x	x	x
	0,8341	A9	x	x	x
10	0	λ_{10}	x	x	x
	0,3	A10	x	x	x
Model ile ilişkilendirilemeyen değerler					
	Çözüm koşulu	λ	A	λ	A
	$y_2,t_2,10,0.01$	-0,0779	2,0483		
	$y_2,t_2,50,0.01$	-0,0622	1,9300		
	$y_2,t_2,100,0.01$	-224778,8881	0,3880	-0,0622	1,9299

Simülasyon, 100000 veri/s okuma hızında elde edilen gerilme değerlerini temsil etmektedir. Verilerin incelenmesi sonucunda, serinin 2'inci terimine kadar belirlenebildiği görülmektedir. Ancak 50 ve 100 sütunlu Hankel matrisle çözümlerde sabit katsayıların (A_j) aşırı farklı değerler aldığı görülmektedir.



Şekil 4.16. Çizelge 4.6 için verilen 10, 50 ve 100 sütunlu Hankel çözümünün kökleri

Simülasyon verileri arasından seçilen değerler ile köklerin karmaşık sayılar düzleminde yerleşiminin düzenli ve köklerin hesaplanmasında ortaya çıkan yuvarlama hatalarının etkisiz olduğu görülmektedir. Bu şekilde belirlenen zaman sabitlerinde (λ_j) karşılaşılan hata miktarının oldukça küçük olduğu görülmektedir.

Şimdiye kadar yapılan incelemede; tek bir seferde sırasıyla 6, 4 ve 5 Prony teriminin belirlenebilmiştir. Bellek sorununu aşmak ve daha fazla terimi belirlemek amacıyla, takip eden incelemede simülasyon verileri üç alt guruba ayrılması ile elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir. Üç eşit parçaya ayrılan bölümler sırasıyla başlangıç bölümü, orta bölüm ve son bölüm olarak isimlendirilmiştir. Bölümlerin temsil ettiği veriler aşağıdaki sıralama ile verilmiştir.

Başlangıç bölümü; $t_{31}=t(1:333334)<3,33$ s ve $y_{31}=y(1:333334)$

Orta bölüm; $3,33$ s < $t_{32}=t(333334:666668)<6,66$ s ve $y_{32}=y(333334:666668)$

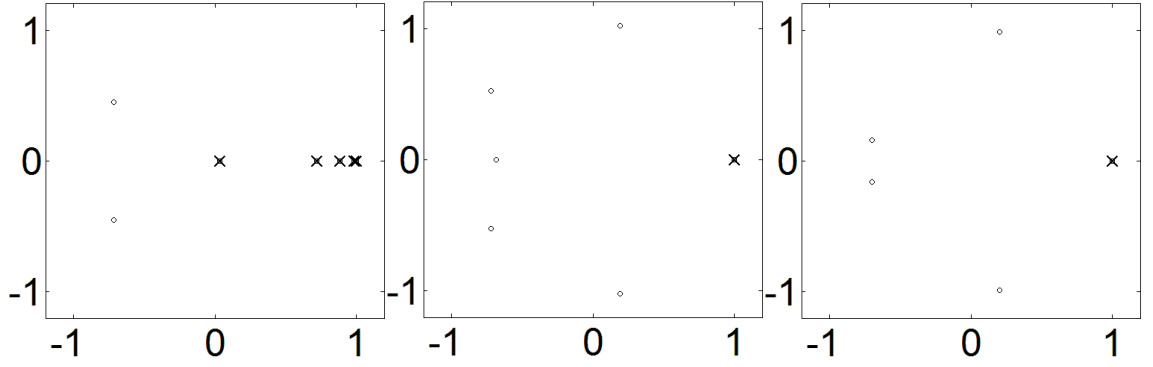
Son bölüm; $6,66$ s < $t_{33}=t(666668:1000001)$ ve $y_{33}=y(666668:1000001)$

Kullanılan Hankel matrisinin sütun büyüklüğüne göre üç bölgede araştırılan çözümler için çizelgeler düzenlenmiştir. Hankel matrisinin sütun sayısı $k=10, 50, 100, 500$ ve 900 olarak problemin çözümünde seçilmiştir. Bellek yetersizliği sütun sayısının 900 'ün üzerine çıkartılmasını engellemiştir.

Çizelge 4.7. 0,00001 s aralıkla simülasyonu yapılan sinyalin k=10 için üç bölgede bulunan bileşenleri

Terim			Çözüm koşulu		
No	Katsayı	Sembol	y31,t31,10,0.00001	y32,t32,10,0.00001	y33,t33,10,0.00001
1	-10969843,9	$\lambda 1$	x	x	x
	0,067406	A1	x	x	x
2	-344589,938	$\lambda 2$	-344589,8436	x	x
	0,091256	A2	0,23689941	x	x
3	-32557,38239	$\lambda 3$	-32552,08043	x	x
	0,069792	A3	-0,201503152*	x	x
4	-12334,56268	$\lambda 4$	-12335,01405	x	x
	0,21931	A4	0,49359003	x	x
5	-1411,5322	$\lambda 5$	-1411,4024	x	x
	0,42	A5	0,291646711	x	x
6	-20,5685	$\lambda 6$	-19,82366888	x	x
	0,6357	A6	0,763372569	x	x
7	-1,2976	$\lambda 7$	x	-1,294981819	x
	0,2295	A7	x	-68,02071595*	x
8	-0,2155	$\lambda 8$	x	x	x
	0,7263	A8	x	x	x
9	-0,0003	$\lambda 9$	x	x	x
	0,8341	A9	x	x	x
10	0	$\lambda 10$	x	x	x
	0,3	A10	x	x	x
Model ile ilişkilendirilemeyen değerler					
Çözüm koşulu		λ	A	λ	A
y31,t31,10,0.00001		-0,1033	2,0101		
y32,t32,10,0.00001		-0,5676	11,9992	0,2208	0,2533
y33,t33,10,0.00001		-0,3234	0,0000	0,1123	0,0000
y33,t33,10,0.00002		3,8478	0,0000		

Çizelge 4.7’de verilen çözüm incelendiğinde bir önceki incelemede belirlenemeyen 7 nolu terimin belirlenebildiği görülmektedir. Belirlenen zaman sabiti katsayılarında hata miktarının oldukça küçük olduğu görülmektedir. Ancak sabit katsayı (Aj) değerlerinde aşırı farklar bulunmaktadır. Sütun sayısı az matris ile çözümlerde zaman sabitlerinin (λ_j) doğruluğu hakkında köklerin yerleşim grafiği (Şekil 4.17) üzerinden yorum yapılamamıştır. Ancak zaman sabitlerinin (λ_j) değerlerinin doğruluğu, hesaplamalarda programın sistematik bir hata meydana getirmediğini düşündürmektedir.



Şekil 4.17. Çizelge 4.7 için üç bölgede belirlenen polinom fonksiyonun kökleri

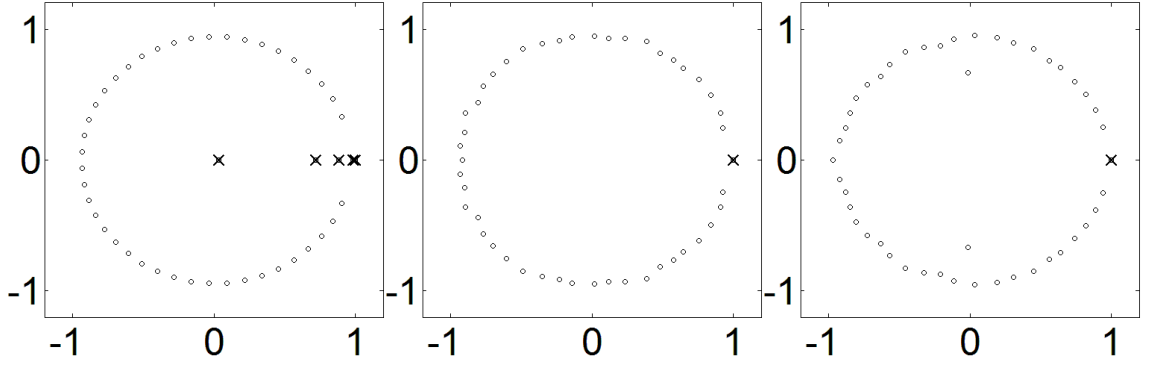
Hankel matrisinin sütun sayısının artırılması ile zaman sabiti sıfıra yakın terimlerin belirlenebilmesi hedeflenmiştir.

Çizelge 4.8’de çözümde 50 sütunlu Hankel matrisinin kullanılması ile elde edilen sonuçlar verilmektedir. Eğrinin başlangıç bölümünde; 7’inci terimin yerine 8’inci terimin geçtiği, orta bölümünde; 7’inci terimle beraber 8’inci terimin tekrar elde edildiği ve 7’inci terimdeki işaret farkının giderildiği ve hata miktarında ciddi bir iyileşme olduğu ve eğrinin son bölümünde; bir önceki analizde (bkz. Çizelge 4.6) hiç belirlenememiş olan 8 ve 9’uncu terimlerin bulunduğu görülmektedir. Çok az sayıda terimin sabit katsayı (A_j) değerlerinin doğru olduğu görülmektedir. Bu incelemede bulunabilen terim sayısının sekize ulaştığı görülmektedir.

Çizelge 4.8. 0,00001 s aralıkla simülasyonu yapılan sinyalin k=50 için üç bölgede bulunan bileşenleri

Terim			Çözüm koşulu		
No	Katsayı	Sembol	y31,t31,50,0.00001	y32,t32,50,0.00001	y33,t33,50,0.00001
1	-10969843,9	$\lambda 1$	x	x	x
	0,067406	A1	x	x	x
2	-344589,938	$\lambda 2$	-342961,1673	x	x
	0,091256	A2	0,24393933	x	x
3	-32557,38239	$\lambda 3$	-32551,69381	x	x
	0,069792	A3	-0,225931286	x	x
4	-12334,56268	$\lambda 4$	-12334,96453	x	x
	0,21931	A4	0,518324504	x	x
5	-1411,5322	$\lambda 5$	-1411,391352	x	x
	0,42	A5	0,280059675	x	x
6	-20,5685	$\lambda 6$	-19,82177741	x	x
	0,6357	A6	0,772143548	x	x
7	-1,2976	$\lambda 7$	x	-1,244516137	x
	0,2295	A7	x	1,902962803	x
8	-0,2155	$\lambda 8$	-0,101876354	-0,180705691	-0,218716704
	0,7263	A8	2,005670928	0,22708145	0,73470633
9	-0,0003	$\lambda 9$	x	x	-0,000230006
	0,8341	A9	x	x	1,135971972
10	0	$\lambda 10$	x	x	x
	0,3	A10	x	x	x
Model ile ilişkilendirilemeyen değerler					
Çözüm koşulu		λ	A	λ	A
y31,t31,50,0.00001					
y32,t32,50,0.00001		-0,0242	1,4507		
y33,t33,50,0.00001		-59,5316	0,0000		

Eğrilerinin sonuna doğru bulunan verilerin çözümde kullanılması durumunda, bulunan polinom köklerinin yerleşiminde kötüleşme görülmektedir (Şekil 4.18). Simülasyon sonucunun gösterildiği grafikte eğrinin sonundaki gerilme değerlerinin birbirine çok yakın olduğu görülmekte ve bu nedenle yapılan hesaplamalarda yakın değerlerin hata oranını arttıracakları öngörüsünde bulunulmuştur.



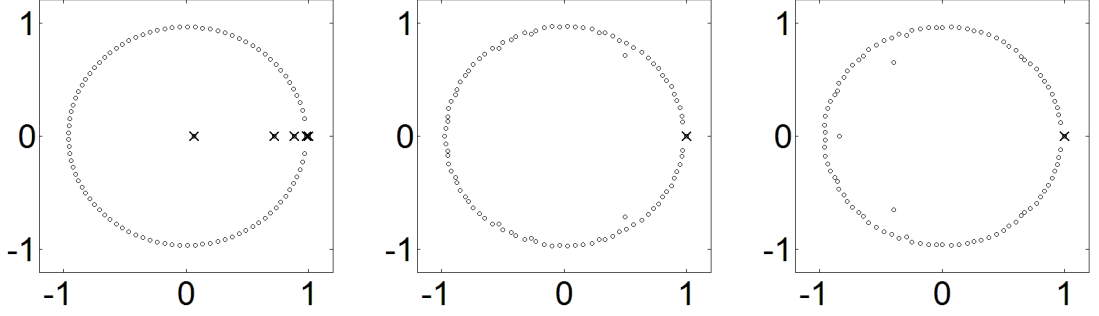
Şekil 4.18. Çizelge 4.9 için üç bölgede belirlenen polinom fonksiyonun kökleri

Çizelge 4.9’da 100 sütunlu Hankel matrisi ile elde edilen çözüm verilmiştir. Eğrinin başlangıç bölümünde 2’inci terimin bulunamadığı görülmektedir. Eğrinin orta ve son bölümünde belirlenen terim sayısında da bir değişim gözlenmemiştir. Sabit katsayı (A_j) değerlerinde önemli bir değişim gözlenmemiştir. Ancak 7’inci terimin sabit katsayısının önemli derecede beklenen değerinden saptığı belirlenmiştir.

Çizelge 4.9. 0,00001 s aralıkla simülasyonu yapılan sinyalin $k=100$ için üç bölgede bulunan bileşenleri

Terim			Çözüm koşulu		
No	Katsayı	Sembol	y31,t31,100,0.00001	y32,t32,100,0.00001	y33,t33,100,0.00001
1	-10969843,9	λ_1	x	x	x
	0,067406	A1	x	x	x
2	-344589,938	λ_2	x	x	x
	0,091256	A2	x	x	x
3	-32557,38239	λ_3	-32539,8114	x	x
	0,069792	A3	-0,241719989*	x	x
4	-12334,56268	λ_4	-12334,43049	x	x
	0,21931	A4	0,523849146	x	x
5	-1411,5322	λ_5	-1411,370814	x	x
	0,42	A5	0,279865119	x	x
6	-20,5685	λ_6	-19,81719951	x	x
	0,6357	A6	0,772145814	x	x
7	-1,2976	λ_7	x	-1,2532	x
	0,2295	A7	x	0,0344	x
8	-0,2155	λ_8	x	-0,2234	-0,2225
	0,7263	A8	x	0,7474	0,7328
9	-0,0003	λ_9	x	x	-0,0005
	0,8341	A9	x	x	1,1432
10	0	λ_{10}	x	x	x
	0,3	A10	x	x	x
Model ile ilişkilendirilemeyen değerler					
Çözüm koşulu	λ	A	λ	A	
y31,t31,100,0.00001	-269975,9881	0,2553	-0,1019	2,0056	
y32,t32,100,0.00001	0,0005	1,1327	1,3987	0,0000	

Şekil 4.19’da polinom kökleri için bir önceki analizde belirtilen yerleşim düzensizliğinin gözlenmesi ile zaman sabitlerinde (λ_j) bir miktar hatanın varlığına işaret ettiği düşünülmüştür.



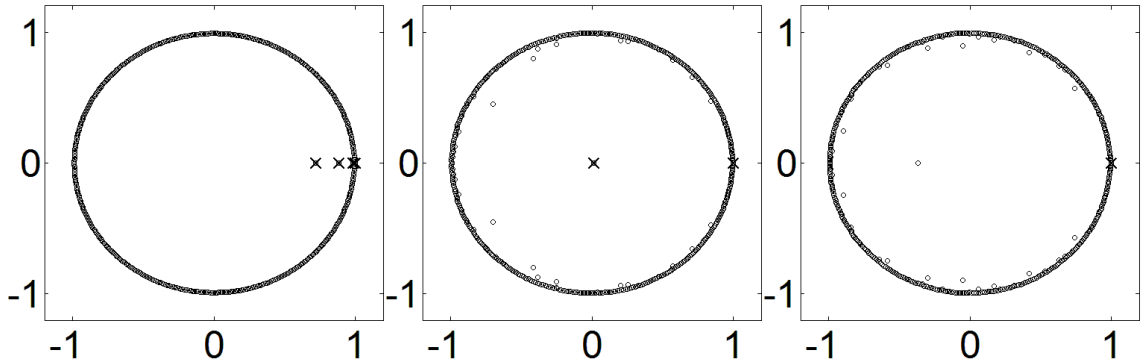
Şekil 4.19. Çizelge 4.10 için üç bölgede belirlenen polinom fonksiyonun kökleri

Çizelge 4.10’de verilen çözümlerde 1’inci, 2’inci ve 10’uncu terimler belirlenememiştir. Daha önce eğrinin son bölümünde belirlenen 9’uncu terim, eğrinin orta bölümünde katsayılarında önemli bir değişim olmaksızın tekrar elde edilmiştir. Belirlenen terim sayısı yediye düşmüştür. Ancak elde edilen terimlerin katsayılarında hata miktarı oldukça düşük kalmıştır.

Çizelge 4.10. 0,00001 s aralıklarla simülasyonu yapılan sinyalin k=500 için üç bölgede bulunan bileşenleri

Terim			Çözüm koşulu		
No	Katsayı	Sembol	y31,t31,500,0.00001	y32,t32,500,0.00001	y33,t33,500,0.00001
1	-10969843,9	λ_1	x	x	x
	0,067406	A1	x	x	x
2	-344589,938	λ_2	x	x	x
	0,091256	A2	x	x	x
3	-32557,38239	λ_3	-32637,3220	x	x
	0,069792	A3	0,2427	x	x
4	-12334,56268	λ_4	-12336,6514	x	x
	0,21931	A4	0,1368	x	x
5	-1411,5322	λ_5	-1411,4341	x	x
	0,42	A5	0,4308	x	x
6	-20,5685	λ_6	-20,5675	x	x
	0,6357	A6	0,6300	x	x
7	-1,2976	λ_7	x	-1,2972	x
	0,2295	A7	x	0,2558	x
8	-0,2155	λ_8	x	-0,2149	-0,2158
	0,7263	A8	x	0,7215	0,7479
9	-0,0003	λ_9	x	-0,0005	x
	0,8341	A9	x	1,1363	x
10	0	λ_{10}	x	x	x
	0,3	A10	x	x	x
Model ile ilişkilendirilemeyen değerler					
Çözüm koşulu	λ	A	λ	A	
y31,t31,500,0.00001	-1,0932	0,3402	-0,0504	1,7526	
y32,t32,500,0.00001	-451129,7110	0,0000			
y33,t33,500,0.00001	-1,1307	-1,0931	0,0003	1,1258	

Şekil 4.20’de köklerin yerleşim grafiği verilmiştir. Grafikten pek çok polinom kökünün yerleşiminin ağırlıklı olarak düzgün olduğu bilgisi edinilmiştir.

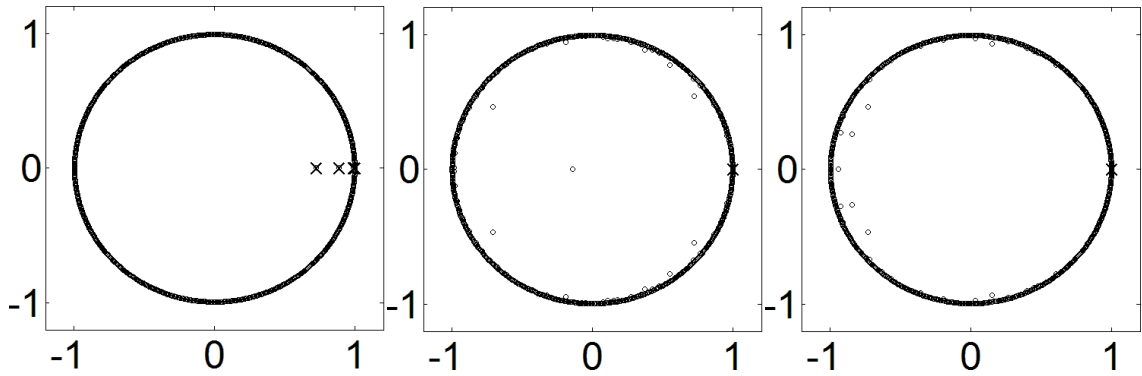


Şekil 4.20. Çizelge 4.10 için üç bölgede belirlenen polinom fonksiyonun kökleri

Çizelge 4.11’de verilen çözümde eğrinin orta ve son bölümünde belirlenen terim sayısının artışı görülmektedir. Belirlenen terimlerin sadece 3’üncü terimin katsayılarında diğerlerine nazaran daha fazla hata bulunmaktadır. Belirlenen terim sayısı yedi olarak gerçekleşmiştir. Şekil 4.21’de kökler gösterilmektedir.

Çizelge 4.11. 0,00001 s aralıklı simülasyonu yapılan sinyalin k=900 için üç bölgede bulunan bileşenleri

Terim			Çözüm koşulu		
No	Katsayı	Sembol	y31,t31,900,0.00001	y32,t32,900,0.00001	y33,t33,900,0.00001
1	-10969843,9	λ_1	x	x	x
	0,067406	A1	x	x	x
2	-344589,938	λ_2	x	x	x
	0,091256	A2	x	x	x
3	-32557,38239	λ_3	-32633,2276	x	x
	0,069792	A3	0,2416	x	x
4	-12334,56268	λ_4	-12336,4368	x	x
	0,21931	A4	0,1382	x	x
5	-1411,5322	λ_5	-1411,4329	x	x
	0,42	A5	0,4301	x	x
6	-20,5685	λ_6	-20,5648	x	x
	0,6357	A6	0,6309	x	x
7	-1,2976	λ_7	x	-1,2971	-1,2615
	0,2295	A7	x	0,2162	1,0132
8	-0,2155	λ_8	x	-0,2156	-0,2152
	0,7263	A8	x	0,7291	0,7196
9	-0,0003	λ_9	x	-0,0001	-0,0004
	0,8341	A9	x	1,1325	1,1363
10	0	λ_{10}	x	x	x
	0,3	A10	x	x	x
Model ile ilişkilendirilemeyen değerler					
Çözüm koşulu		λ	A	λ	A
y31,t31,900,0.00001		-0,0492	1,7449	-1,0683	0,3473



Şekil 4.21. Çizelge 4.11 için üç bölgede belirlenen polinom fonksiyonun kökleri

Çizelge 4.12’de programın belirlediği sabit katsayılar (A_j) gerçek değerleri ile karşılaştırılmıştır. İnceleme sırasında belirlenemeyen terimler boş bırakılmıştır. Belirlenen terimlerin ise sabit katsayısı yanlış bulunan değerleri kırmızı renkte, hata oranı bir değerini aşmayan değerleri sarı renkte ve tam olarak belirlenebilmiş değerler ise yeşil renkte çizelgede verilmiştir. İncelemede, zaman sabiti veri okuma hızına eş sayılabilecek terime kadar programın çözüm verdiği ve Hankel matrisinin sütun sayısının artırılması ile simülasyon sinyali içinde daha fazla bileşenin ayrıştırılarak modelin terim sayısının arttığı görülmektedir. Aynı veri sıklığında eğrinin farklı bölgelerinde yapılan incelemelerde ise terimin simülasyon değeri incelenen bölgede mevcutsa kolaylıkla belirlenebildiği görülmüştür.

Çizelge 4.12. Çözümlerde elde edilmiş Prony terimleri ve sabit katsayılarındaki hata sınıflandırması

k→	10										50										100									
Y	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10
Y1	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10
Y2	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10
Y31	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10
Y32	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10
Y33	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10
k→	500										1000										5000									
Y	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10
Y1	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	Terimlerin bulunduğu bölgeler									
Y2	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	900 sütunlu Hankel matrisi										< 3,3s			< 6,66 s			< 10 s			
Y31	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10
Y32	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10						A6	A7	A8	A9	A10
Y33	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10								A8	A9	A10

Çizelge 4.13’te ise modelle ilişkilendirilemeyen ancak programın sonuç olarak verdiği hatalı terimler verilmiştir. Modelle ilişkilendirilemeyen bazı terimlerin sabit katsayılarının sıfır olduğu fark edilmiştir. Bu değerlerin gerilme değerlerinin değişimini hiçbir şekilde açıklamamaktadır. Diğer taraftan bazı terimlerin ise işaret kontrolüne uymadığı belirlenmiştir. Bu testi geçen ve modelle ilişkilendirilemeyen terimler Çizelge 4.14’te verilen değerlerdir. Bulunan değerler şayet bir çözüm olsalardı, çözüm koşullarının değiştirilmesine rağmen daha sık karşılaşılması gerekirdi.

Çizelge 4.13. Modele ait olmayan hatalı değerler

Model ile ilişkilendirilemeyen değerler						
Çözüm koşulu	λ	A	λ	A	λ	A
Katsayı kontrolü $A_j=0$						
y1,t1,10,0.01	-536,4799	0,0000	0,0036	0,0000	55,3055	0,0000
y33,t33,10,0.00001	-0,3234	0,0000	0,1123	0,0000		
y33,t33,10,0.00002	3,8478	0,0000				
y33,t33,50,0.00001	-59,5316	0,0000				
y32,t32,500,0.00001	-451129,7110	0,0000				
İşaret kontrolü ($-\lambda_j, A_j$)						
y,t,10,0.001	0,14116	0,3737		y1,t1,100,0.01	0,0001	4,9532
y,t,50,0.001	0,0015	1,1163		y32,t32,10,0.00001	0,2208	0,2533
y,t,100,0.001	-900,4174	-0,5205		y32,t32,10,0.00001	0,2208	0,2533
y1,t1,50,0.01	0,0009	1,3355		y32,t32,100,0.00001	0,0005	
y1,t1,50,0.01	-0,0083	-0,2402		y33,t33,500,0.00001	0,0003	1,1258
y1,t1,100,0.01	-0,0007	-3,8567		y33,t33,500,0.00001	-1,1307	-1,0931

Çizelge 4.14. Modele ait olmayan ama testi geçen değerler

Model ile ilişkilendirilemeyen değerler						
Çözüm koşulu	λ	A		Çözüm koşulu	λ	A
Tekrar sayısı kontrolü						
y,t,500,0.001	-0,01774	0,0037		y,t,10,0.001	-0,41286	3,23096
y1,t1,1000,0.01	-0,0358	1,7361		y32,t32,10,0.00001	-0,5676	11,9992
y31,t31,900,0.00001	-0,0492	1,7449		y31,t31,900,0.00001	-1,0683	0,3473
y31,t31,500,0.00001	-0,0504	1,7526		y31,t31,500,0.00001	-1,0932	0,3402
y2,t2,100,0.01	-0,0622	1,9299		y,t,50,0.001	-4641,6331	0,47855
y2,t2,50,0.01	-0,0622	1,9300		y,t,10,0.001	-4962,9666	2,1956
y2,t2,10,0.01	-0,0779	2,0483		y2,t2,100,0.01	-224778,8881	0,3880
y31,t31,100,0.00001	-0,1019	2,0056		y31,t31,100,0.00001	-269975,9881	0,2553
y31,t31,10,0.00001	-0,1033	2,0101				

Doğal kauçuğun gerilme azalması davranışını modelleyen Prony serisi program sayesinde belirlenebilmektedir. Yapılan incelemelerde 4, 5 ve 6 terim sayısına kadar çözümün gerçekleştirebildiği görülmüştür. Bu durum deneysel verilere uygun olarak matematiksel modellemenin yapılabileceğini göstermektedir.

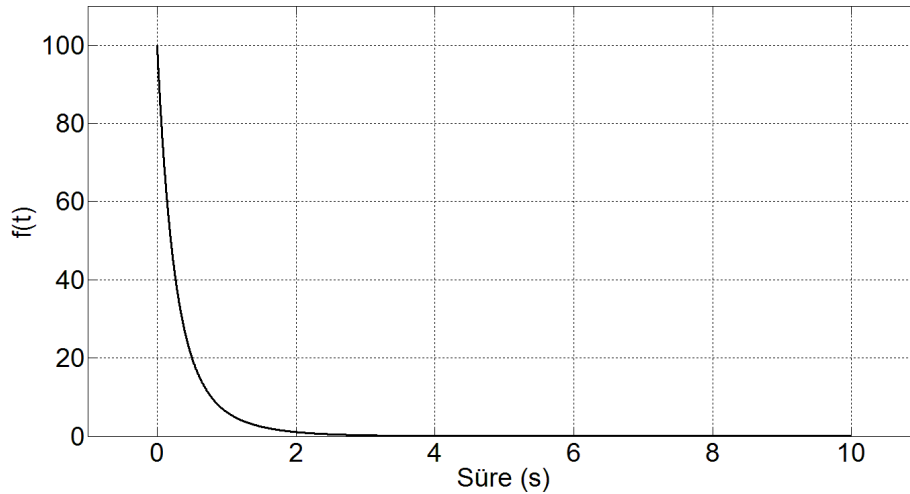
Bazı çözümlerde modelle ilişkilendirilemeyen terimler belirlenmiştir. Simülasyonu yapılan üstel fonksiyonun çok sayısında terim içermesi nedeniyle bu terimlerin

bulunduğu düşünölmektedir. Bu amaçla, terim sayısı altı ile sınırlandırılmış çok terimli azalan üstel fonksiyonlar seçilerek program test edilmiştir.

Lupu ve Todor'un (1995) NMR (nükleer manyetik rezonans) relaksasyon sinyalleri için geliştirdikleri çok terimli üstel eğri uydurma algoritmasının testinde kullandıkları fonksiyon kullanılmıştır. Üç terimli test fonksiyonu Denklem 4.2'de verilmiştir.

$$f(t) = 50e^{-5t} + 30e^{-3t} + 20e^{-1,5t} + w(t) \quad (4.2)$$

Denklemden $w(t)$, tanımlanan fonksiyon içerisinde bulunan gürültü sinyalini temsil etmektedir. Buradaki incelemede gürültü değişim aralığı 0,05 olan değer seçilerek yapılmıştır. Fonksiyon değerleri 0-10 s aralığında 0,001 s'lik artışlarla elde edilmiştir. Test fonksiyonuna ait simülasyon grafiği Şekil 4.22'de verilmiştir.



Şekil 4.22. Denklem 4.2'nin simülasyon grafiği

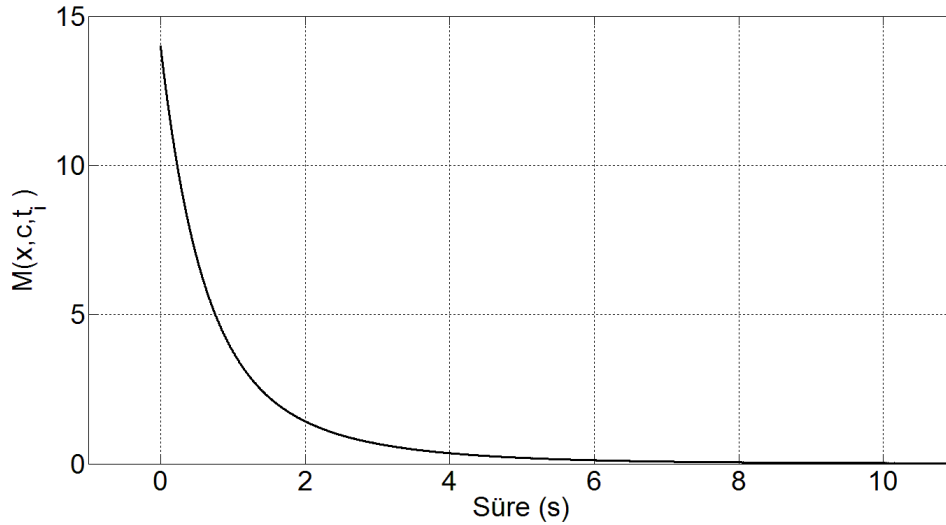
Çizelge 4.15'te gürültüsüz ve gürültü eklenmiş sinyal için belirlenen parametreler verilmiştir. Gürültüsüz sinyal için farklı sütun genişliğine sahip Hankel matrislerinin kullanılmasına rağmen katsayılar hatasız belirlenmiştir. Gürültü eklenmiş sinyalde ise 500,1000 ve 2000 sütun genişlikleri için çok küçük bir hata miktarı ile katsayılar belirlenebilmiştir. Sütun genişliği 10 ve 100 olan çözümlerde ise bir terimin belirlenemediği görölmektedir. Önceki çözümlerde karşılaşılan ilişkilendirilemeyen terim bulunmamıştır.

Çizelge 4.15. Denklem 4.2'in gürültüsüz ve gürültülü sinyallerinde bulunan bileşenler

Terim			Gürültüsüz sinyal sonuçları					Sinyale 0,05 seviyesinde gürültü eklendikten sonraki sonuçlar						
No	Katsayı	Sembol	10	100	500	1000	2000	5000	10	100	500	1000	2000	5000
1	-5,0000	$\lambda 1$	-5,0000					-6,9654	-4,6728	-4,9487	-5,0294	-4,9474	-6,2674	
	50,0000	$A 1$	50,0000					16,6905	66,2937	52,6131	48,5683	51,8491	13,5105	
2	-3,0000	$\lambda 2$	-3,0000					-2,8408	x	-2,8595	-3,0635	-2,9430	-3,9442	
	30,0000	$A 2$	30,0000					81,9237	x	28,6112	31,0294	28,3633	63,0791	
3	-1,5000	$\lambda 3$	-1,5000					x	-1,7775	-1,4784	-1,5061	-1,4957	-1,5342	
	20,0000	$A 3$	20,0000					x	33,7059	18,7752	20,4044	19,7713	23,3626	

Gevşeme süresi sonsuz olan terimlerin belirlenebilirliği, Nielsen'in (2000) Denklem 4.3'te verdiği fonksiyon kullanılarak test edilmiştir. Gürültü sinyalini denklemde ε_i parametresi ile ifade edilmektedir. Fonksiyona ait simülasyon grafiği Şekil 4.23'te verilmektedir.

$$M(x, c, t_i) = 10^{-2} + 2e^{-0,5t_i} + 4e^{-1t_i} + 8e^{-2t_i} + \varepsilon_i \quad (4.3)$$



Şekil 4.23. Denklem 4.3'ün simülasyon grafiği

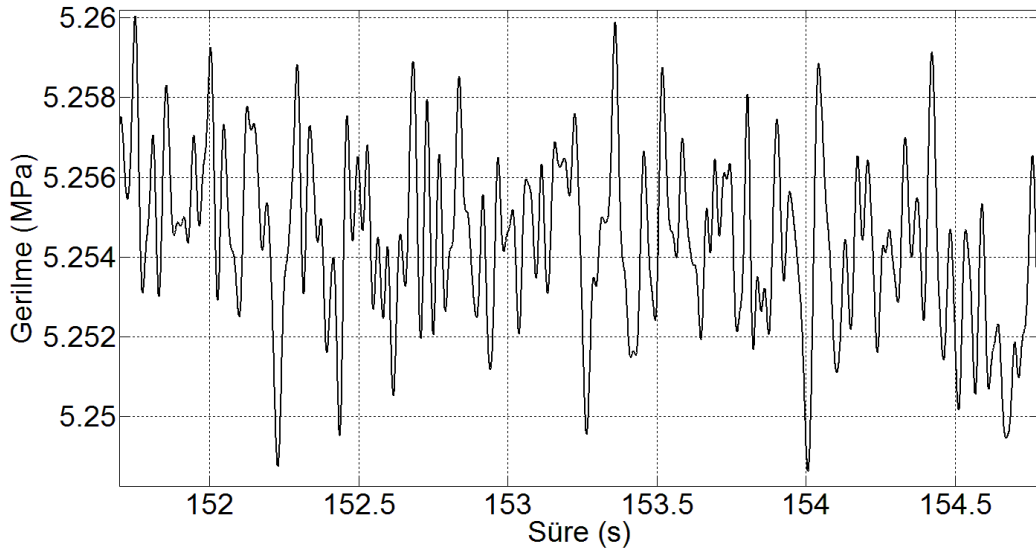
Çizelge 4.16'da problemin çözümünden elde edilen terimler sunulmaktadır. Gürültüsüz sinyalde 10 sütunlu Hankel matrisi ile yapılan çözümde oldukça düşük bir hata oranı belirlenmiştir. Diğer çözümlerde ise terimlerin katsayıları hatasız belirlenmiştir. Gürültülü sinyalin çözümünde ise matris boyutu arttıkça bulunan terimlerin sayısının arttığı ve artan parametre sayısı ile katsayılardaki hata oranının düştüğü görülmektedir.

Problemin çözümüne yönelik zaman sabiti sıfır olan terim yaklaşık olarak belirlenmiştir.

Çizelge 4.16. Denklem 4.3'ün gürültüsüz ve gürültülü sinyallerinde bulunan bileşenler

Terim			Gürültüsüz sinyal sonuçları					Sinyale 0,05 seviyesinde gürültü eklendikten sonraki sonuçlar						
No	Katsayı	Sembol	10	100	500	1000	2000	5000	10	100	500	1000	2000	5000
1	-2,0000	$\lambda 1$	-1,9999						x	-1,9254	-1,8833	-1,8344	-1,9206	-2,0296
	8,0000	$A 1$	7,9965						x	9,4005	9,6367	9,9444	9,0274	7,6646
2	-1,0000	$\lambda 2$	-1,0003						-1,3402	-0,6548	-0,6376	-0,6137	-0,7346	-1,0397
	4,0000	$A 2$	4,0067						13,9348	4,6290	4,3699	4,0378	4,7422	4,2767
3	-0,5000	$\lambda 3$	-0,4996						x	x	x	x	-0,2121	-0,5000
	2,0000	$A 3$	1,9966						x	x	x	x	0,2248	2,0644
4	0,0000	$\lambda 4$	-0,0002						x	x	x	x	x	0,0165
	0,0100	$A 4$	0,0100						x	x	x	x	x	0,0073

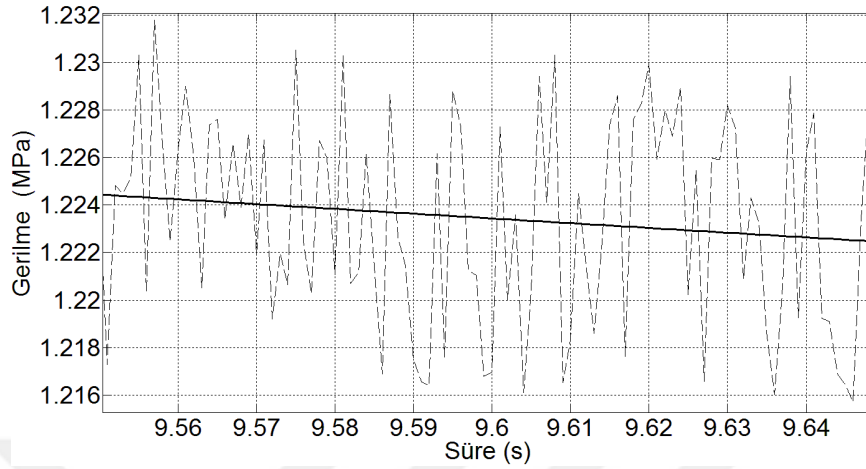
Geliştirilen test cihazında yapılan gerilme ölçümü deneylerinde gözlemlenen gürültü içeren sinyal Şekil 4.24'te gösterilmiştir. Sinyalin değişim genliği gürültü seviyesi olarak belirlenmiştir. Sinyaldeki 5,26 MPa ve 5,248 MPa değerleri kullanılarak gürültü seviyesi 0,012 MPa olarak bulunmuştur. Deneysel çalışmalarda okuma hızı, daha öncede belirtildiği gibi saniyede 1000 veridir.



Şekil 4.24. Gerilme azalması testinde görülen tipik bir gürültülü sinyal

Lemini'nin doğal kauçuk için verdiği modele 0,015 MPa gürültü sinyali eklenmiştir (Şekil 4.25). Elde edilen sinyalden gürültü seviyesini belirlemek amacıyla simülasyonun

sonundaki değerler kullanılmıştır. Simülasyondaki 1,23 MPa ve 1,216 MPa değerleri kullanılarak 0,014 MPa'lık gürültü seviyesi belirlenmiştir.



Şekil 4.25. Gürültü sinyali eklenen doğal kauçuğun gerilme fonksiyonun simülasyonu
Problemin çözümünden elde edilen sonuçlar Çizelge 4.17’de verilmektedir. Gürültünün etkisi ile daha önce belirlenen 5’inci ve 10’uncu terimler (bkz. Çizelge 4.4) belirlenememiştir. Diğer terimler ise önceki değerlerinden biraz sapmalarına rağmen tekrar belirlenmişlerdir.

Çizelge 4.17. Gürültü sinyali eklenen doğal kauçuğun gerilme fonksiyonunda bulunan bileşenler

Terim			Çözüm koşulu				
No	Katsayı	Sembol	y,t,100,0.001	y,t,500,0.001	y,t,1000,0.001	y,t,2000,0.001	y,t,5000,0.001
5	-1411,532	$\lambda 5$	x	x	x	x	x
	0,42	A5	x	x	x	x	x
6	-20,5685	$\lambda 6$	-17,25067187	-19,70509381	-21,0753187	-21,63175299	-20,20922484
	0,6357	A6	0,929683692	0,637170736	0,661759513	0,695250448	0,680448265
7	-1,2976	$\lambda 7$	x	x	-1,182112325	-1,340395157	-1,301545639
	0,2295	A7	x	x	0,324138659	0,220412258	0,221237096
8	-0,2155	$\lambda 8$	x	x	x	-0,22916747	-0,21723828
	0,7263	A8	x	x	x	0,695315185	0,725214164
9	-0,0003	$\lambda 9$	x	x	x	x	-0,000475278
	0,8341	A9	x	x	x	x	1,138193716
10	0	$\lambda 10$	x	x	x	x	x
	0,3	A10	x	x	x	x	x
Model ile ilişkilendirilemeyen değerler							
Çözüm koşulu	λ	A	λ	A	λ	A	
y,t,100,0.001	-0,0602	1,913292805					
y,t,500,0.001	-0,7485	0,533936465	-0,026519044	1,568078863			
y,t,2000,0.001	-0,1226	1,003392011	0,016269945	0,776136018			
y,t,2000,0.001	-0,0025	1,174058536					

Simülasyon sonuçlarının değerlendirilmesi:

Prony serisiyle tanımlanan azalan üstel fonksiyonların simülasyon sonuçları viskoelastik davranışı deneysel verilere dayalı modellenmesi amacıyla incelenmiştir. İncelemede üç terimli, zaman sabiti sıfır olan dört terimli ve doğal kauçuk için belirlenmiş on terimli üstel azalan fonksiyonlar kullanılmıştır. Ayrıca test şartlarını yansıtabilmek için fonksiyonların simülasyon sonuçlarına gürültü sinyal bileşeni eklenerek gürültünün analiz yöntemine etkisi araştırılmıştır. Analiz için mümkün olan ideal şartları sunan az sayıda terim içeren test fonksiyonlarının gürültüsüz simülasyon sinyalinin analizinde başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Ancak simülasyonun içerisinde altı terimden daha çok sinyal bileşeni varsa, ayrıştırılmayan sinyal bileşenlerinin belirlenen terimleri etkilendiği ve özellikle terimlerin sabit katsayılarının farklı değerler almasına sebep olduğu belirlenmiştir. Tekil ayrıştırmada tolerans değerinin düşürülmesi bir çözüm yolu sağlayabilmektedir. Yine de deneysel verilerde mevcut olan gürültü sinyalinin yalnızca değişim genliği hakkında bir bilgi edinilebilmekte ve gürültü sinyalinin tekil değeri bilinmediği için tolerans değerlerinin azaltılması, gürültü bileşeni eklenmiş sinyal simülasyonlarında görüldüğü gibi, daha fazla hatalı sonuçlar verebilmesi söz konusu olmaktadır. Bu durum, yük hücresinden elde edilecek sinyalin mümkün olduğu kadar gürültüden arındırılmış olması gerektiğini göstermiştir. Farklı çözüm koşulları deneyerek yapılan analizler, deneysel verilere uygun olarak terim sayısı yediye kadar olan modellerin belirlenebileceğini göstermiştir.

Çizelgelerde yıldız ile işaretlenen, negatif işaretli veya sıfır değerine sahip bazı sabit katsayı değerleri bulunmaktadır. Bu değerler modelde belirlenen diğer terimleri olumsuz etkilemiştir. Hankel matrisinin sütun genişliğini değiştirilerek hesaplamaların tekrarlanması gerektiği görülmüştür.

Veri okuma hızından daha yüksek zaman sabitlerine sahip terimlerin belirlenemediği görülmüştür. Simülasyonda görüldüğü gibi bu terimlerin belirlenmesi, test sisteminde kullanılacak olan veri toplama sisteminin işlem hızı ve bilgisayarın (ram bellek) kapasitesi tarafından kısıtlanmaktadır. Ayrıca sinyalin analizinde gürültülü bileşeni, modelin elastik modülünün tahmin edilmesinde kullanılacak olan zaman sabiti sıfır olan terimin belirlenmesini de zorlaştırmıştır.

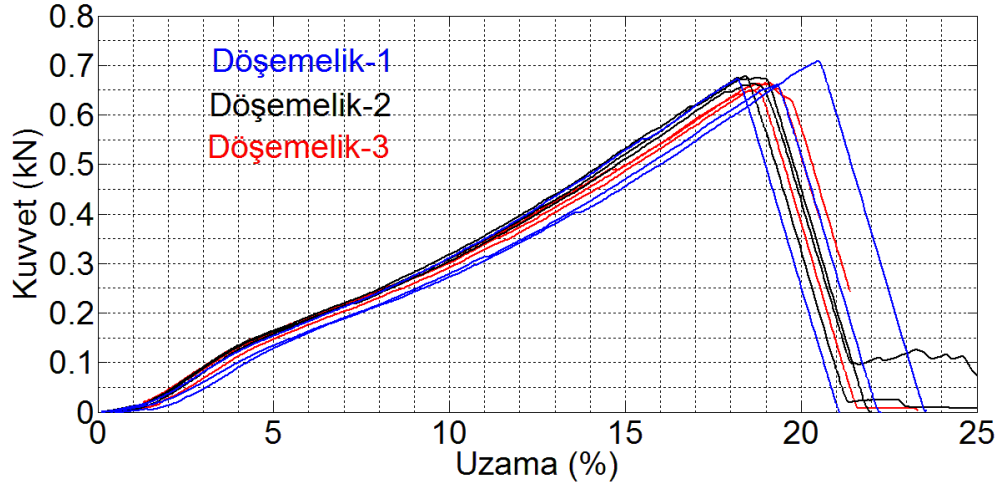
Prony serisiyle tanımlanan üstel fonksiyonların simülasyon sonuçları ile analizde kullanılan programın verdiği sonuçlar incelenmiş ve program test edilmiştir. Üstel fonksiyonların katsayısı belirli olduğu için analiz sonuçlarının doğruluğu için niteliksel bir değerlendirme yapılmıştır. Test verileri ile elde edilecek dokuma kumaşların viskoelastik modelleri için toplam hata miktarı karşılaştırılmalıdır.

4.3. Kumaş Numunelerinin Viskoelastik Davranışının Analizi

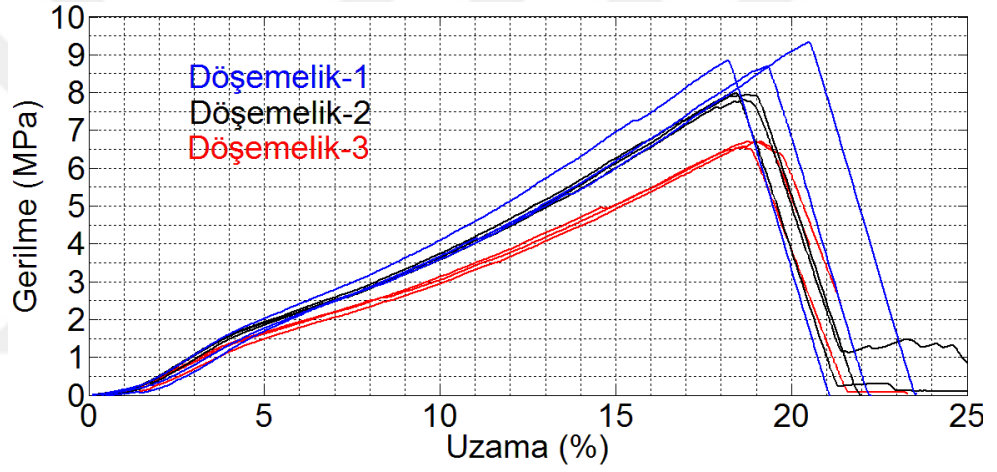
Dokuma kumaşların viskoelastik davranışını belirlemek amacıyla Çizelge 3.1'deki döşemelik kumaşlar kullanılmıştır. Örgü raporuna göre çözgü ipliklerinin yüzey değiştirme sayıları (sırasıyla bezayağı, dimi2/2 ve saten5/1 örgü raporlarına göre her 20 atkı ipliğinde onar, beşer ve dörder kere yüzey değiştirerek atkı iplikleriyle bağlantı oluşturmuşlardır.), kumaş kalınlığı ve metrekare ağırlığından başka testlerde kullanılan dokuma kumaşların özelliklerinde belirgin bir fark bulunmaktadır. Kumaşlara yapılan testler, kumaş tipi ve tekrar sayısına göre guruplandırılarak ayrı grafiklerde verilmiştir. Grup numaraları, kumaş tipi onlar basamağındaki rakam, test tekrarı ise birler basamağındaki rakam ile gösterilmiştir. Kumaş tipleri belirtilerek test verileri ayrı renklerde grafikler üzerinde sunulmuştur.

Test numuneleri 350x50 mm ölçülerinde hazırlanarak gerilme uzama, gerilme azalması, sürünme ve dinamik zorlama testleri uygulanmıştır. Testlerde çeneler arası mesafe 200 mm olarak seçilmiş ve hesaplamalarda test numunesinin ilk boyu olarak alınmıştır.

Kumaş tiplerinin çözgü doğrultusunda kuvvet uzama eğrileri ve gerilme uzama eğrileri Şekil 4.26 ve Şekil 4.27'deki grafiklerde verilmiştir. Eğrilerin tepe noktasından sonraki eğik doğrular çenenin eğilmesinden kaynaklı uzamayı test sonuçlarına yansıtılmamak için kullanılan düzeltme faktörü ve test rutininde kullanılan sinyal filtresinin etkileridir ve kumaşın davranışı ile ilgili değildir. Yapılan tüm testlerde kopma kuvveti değeri büyük oranda birbirine yakın elde edilmiş ancak kopma uzaması değerinde Döşemelik-1 kumaş tipinde farklı değerler bulunmuştur. Aynı tip kumaşta bu farkların oluşması hatalı testler olarak değerlendirilmiştir.



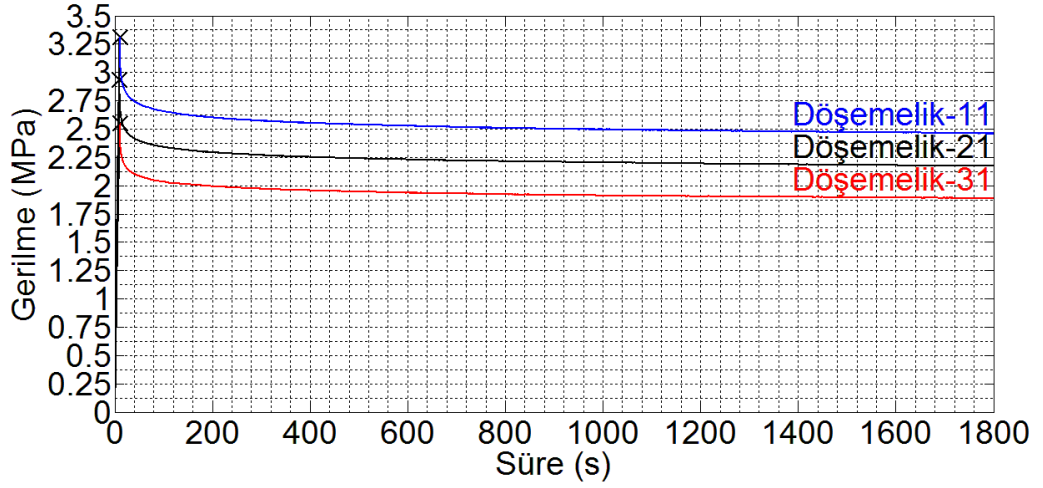
Şekil 4.26. Viskoelastik davranışı incelenen kumaşların kuvvet uzama eğrisi



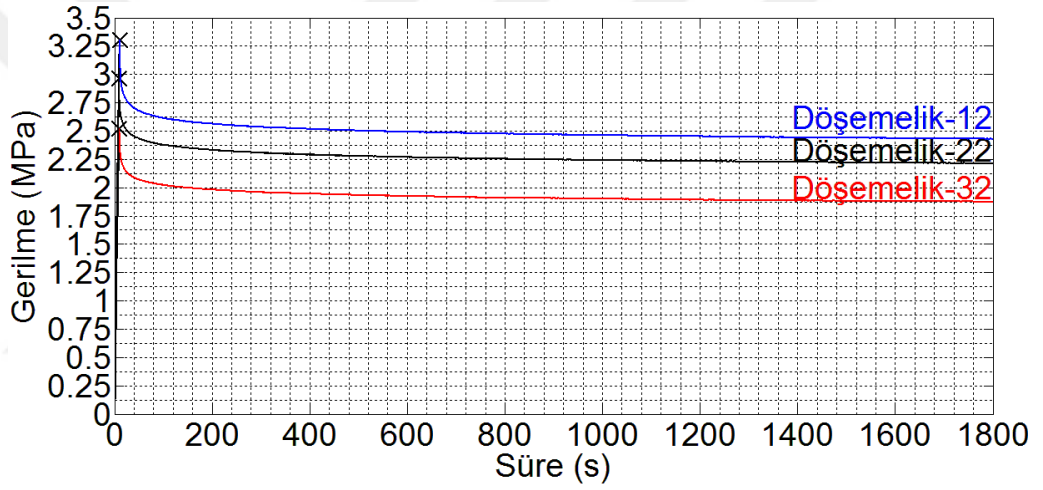
Şekil 4.27. Viskoelastik davranışı incelenen kumaşların gerilme uzama eğrisi

4.3.1. Sabit uzama altında gevşeme test (relaksasyon) sonuçları ve analizi

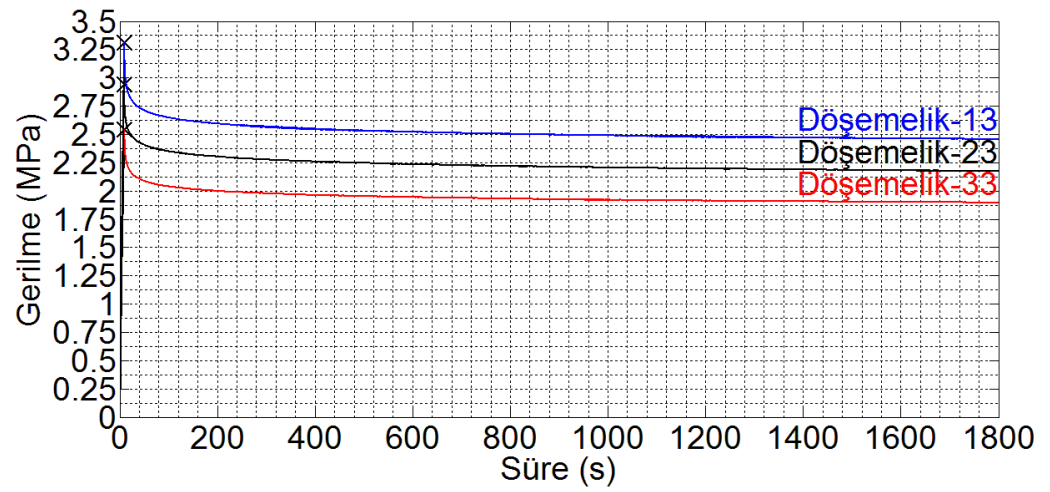
Gerilme azalması test rutininin 1800 s süresince çalıştırılması ile kumaşların gerilme azalması davranışı ölçülmüştür. Şekil 4.28, Şekil 4.29 ve Şekil 4.30'da ölçüm sonuçları verilmektedir.



Şekil 4.28. Gerilme azalması 1 nolu grup



Şekil 4.29. Gerilme azalması 2 nolu grup



Şekil 4.30. Gerilme azalması 3 nolu grup

Test süresince grafiklerde gösterilen gerilme değerindeki azalma miktarı Çizelge 4.18'de verilmektedir. Başlangıç gerilmesinin ölçüm süresince en az 0,6250 MPa (% 21,74) ve en fazla 1 MPa (% 29,63) azaldığı görülmüştür.

Çizelge 4.18. Test gruplarında gerilme azalmasının miktarı

Test grubu		Gerilme değeri (MPa)			
Kumaş tipi	Test tekrarı	Başlangıç	Test sonunda	Azalma miktarı	Azalma miktarı (%)
Döşemelik 1	1	3,3750	2,5000	0,8750	25,93
	2	3,3750	2,3750	1,0000	29,63
	3	3,3750	2,4500	0,9250	27,41
Ortalama değeri		3,3750	2,4417	0,9333	27,65
Döşemelik 2	1	2,8750	2,1250	0,7500	26,09
	2	2,8750	2,2500	0,6250	21,74
	3	2,8750	2,1250	0,7500	26,09
Ortalama değeri		2,8750	2,1667	0,7083	24,64
Döşemelik 3	1	2,5000	1,8750	0,6250	25,00
	2	2,5000	1,8750	0,6250	25,00
	3	2,6000	1,9000	0,7000	26,92
Ortalama değeri		2,5333	1,8833	0,6500	25,66

Kumaş tipleri için gerilme azalması davranışını modelleme çalışmasında, gerilme azalması testinden elde edilen veriler kullanılmıştır. Kumaşdaki gerginlik değişimini ölçmek için 1000 veri/s veri okuma hızı ile 1800 s süresince test rutini çalıştırılmıştır. Bölüm 4.2'de belirtildiği gibi, ölçüm verileri gerilme değerine dönüştürülmüş ve gürültünün etkisini azaltmak için filtreleme yöntemleri ile düzgünleştirilmiştir. Sabit uzama altında ölçülen gerilme azalması değerleri analiz programı kullanılarak modellenmiştir.

Dokuma kumaşların gerilme azalması davranışının terim sayısı ve veri okuma hızından yüksek sinyal bileşeni içerip içermedikleri öncelikle araştırılmıştır. Gerilme değerleri arasından eşit aralıklar ile örnekleme yapılarak, veri okuma hızları 1, 10 ve 100 veri/s olacak şekilde, terim sayısı ve sinyal bileşenleri incelenmiştir. Bu işlemde, Hankel matrisinin sütun sayısı artırılarak tekil değer ayrıştırma yöntemi ile model ve parametreleri bulunmaya çalışılmıştır. Elde edilen modeller ile ölçüm sonuçları arasındaki hata miktarları incelenerek en iyi model belirlenmiştir. Belirlenen en iyi modelin simülasyonu ile gerilme azalması tahmin edilmiştir. Bu aşamadan sonra, modelin sabit katsayılarıyla kumaşın gevşeme modülleri hesaplanmıştır. Gevşeme

modülleri ile ölçüm bölgesindeki kumaşın elastik modülü ve ölçüm verilerinden hesaplanan başlangıç modülü karşılaştırılmıştır.

En uygun modeli kurma yöntemini belirlemek amacıyla diğer kumaş tiplerine nazaran Döşemelik-1 için daha fazla analiz yapılmıştır. Diğer kumaş tipleri için de incelemeler doğrultusunda, gerilme azalması davranışını temsil edecek terim sayısı farklı modeller belirlenmiştir.

Döşemelik-1'in gerilme azalması davranışının modellenmesi ve değerlendirilmesi:

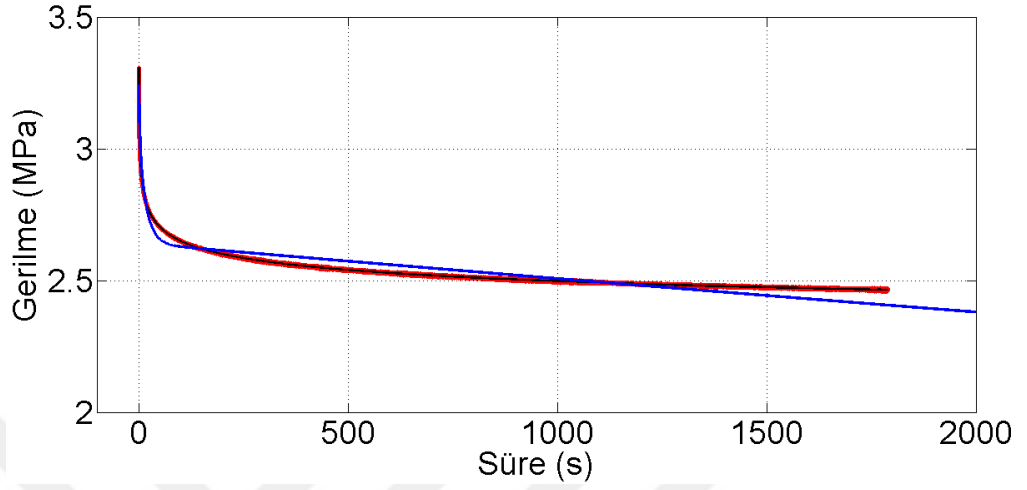
Modeller birbirini takip eden her 1000 veriden biri seçilerek 1790 verinin bulunduğu ölçüm sonucunun (gerilme sinyalinin 1veri/s okuma hızına karşılık gelen) analiz programında kullanılmasıyla belirlenmiştir. Katsayıların işareti açısından uygun çözüm bulunamadığı durumlarda, modellemede kullanılan Hankel matrisinin sütun genişliği artırılarak çözümün araştırılmasına devam edilmiştir. Gerilme azalmasını temsil eden modeller Çizelge 4.19'da verilmiştir.

Modeller arasındaki farkları göstermek için modelin terim sayısının arttığı durumda ölçüm sonuçları ile birlikte modelin 2000 s simülasyon sonucu aynı grafik üzerinde gösterilmiştir. Grafiklerde, ölçüm sonuçları kırmızı renkli, gürültüden arındırılmış gerilme sinyali siyah renkli ve ölçüm süresinden daha uzun simülasyonu yapılan model sonuçları mavi renkli eğriler ile çizdirilmiştir. Kumaş tipi, test grubu, çözüm koşulu ve belirlediği terim sayısı belirtilerek şekiller isimlendirilmiştir.

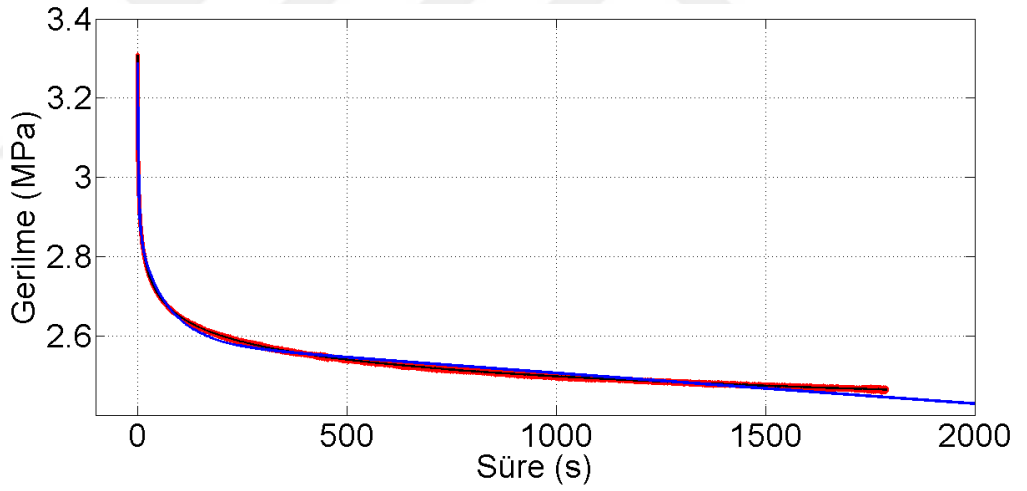
Çizelge 4.19. 1790 verinin kullanıldığı Döşemelik -1'in gerilme azalması modelleri

Terim		Çözüm koşulu						
No	Sembol	y,t,12,1.0	y,t,50,1.0	y,t,100,1.0	y,t,500,1.0	y,t,1000,1.0	y,t,1500,1.0	y,t,1700,1.0
1	$\lambda 1$	-0,484429	-0,505910	-0,218832	-0,203837	-0,364982	-0,372525	-0,055394
	A1	0,197557	0,361877	0,368041	0,355746	0,360497	0,350862	0,332733
2	$\lambda 2$	-0,057589	-0,092399	-0,043610	-0,034517	-0,040124	-0,052026	-0,004227
	A2	0,403300	0,088051	0,086308	0,111067	0,178658	0,152266	0,173862
3	$\lambda 3$	-0,000052	-0,013591	-0,006817	-0,008623	-0,006787	-0,010839	-0,000016
	A3	2,640406	0,254213	0,200734	0,109672	0,121569	0,125046	2,535645
4	$\lambda 4$	x	-0,000031	-0,000022	-0,001893	-0,001201	-0,002000	x
	A4	x	2,585642	2,557467	0,121172	0,130968	0,127804	x
5	$\lambda 5$	x	x	x	-0,000010	-0,000005	-0,000010	x
	A5	x	x	x	2,502856	2,468944	2,504765	x
Hata miktarı (MPa)		1,188886	0,387465	0,201871	0,143518	0,077166	0,075745	0,332808

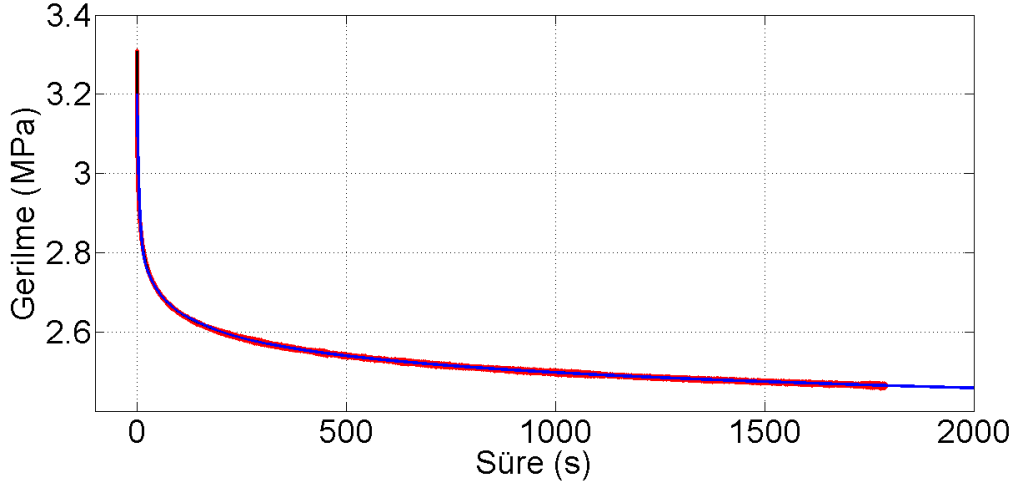
Hankel matrisinin sütun sayısının artması ile daha çok sayıda model teriminin bulunduğu ve hata miktarının azaldığı, Şekil 4.31'den başlayarak Şekil 4.35'e kadar verilen grafikler ve Çizelge 4.19 incelendiğinde görülmektedir.



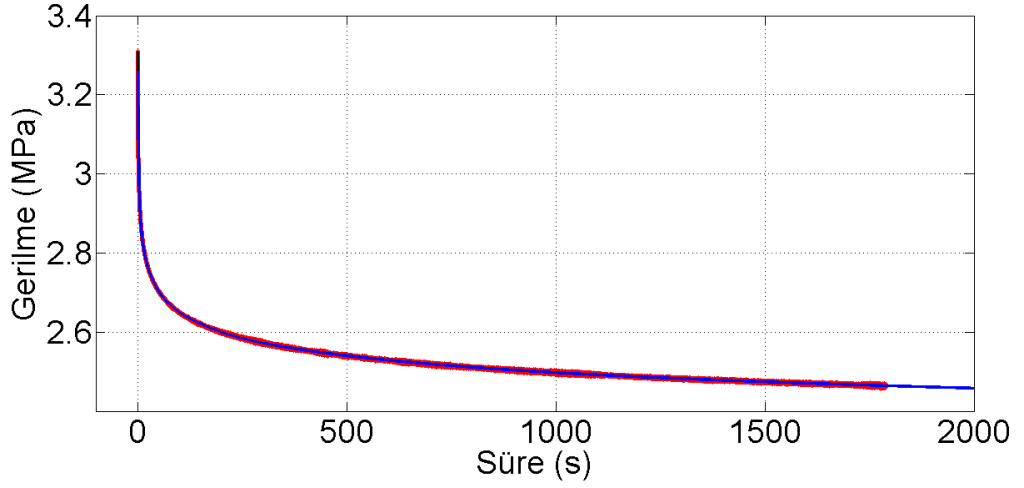
Şekil 4.31. Döşemelik-11: y,t,12,1.0 koşulunun belirlediği 3 terimli model



Şekil 4.32. Döşemelik-11: y,t,50,1.0 koşulunun belirlediği 4 terimli model

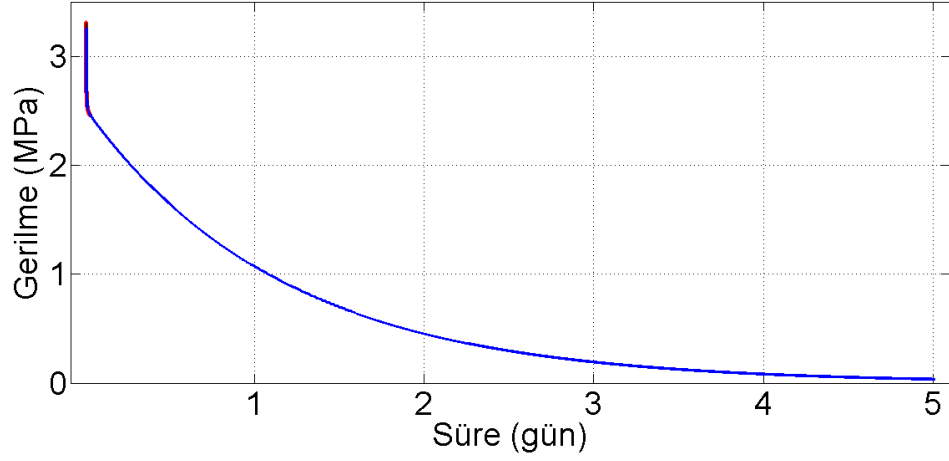


Şekil 4.33. Döşemelik-11: $y,t,500,1.0$ koşulunun belirlediği 5 terimli model



Şekil 4.34. Döşemelik-11: $y,t,1500,1.0$ koşulunun belirlediği 5 terimli en iyi model

En iyi olarak belirlenen 5 terimli modelin simülasyonu Şekil 4.35'te verilmiştir. Gerilmenin 3,261 MPa'lık başlangıç değeri azalarak, 5'inci günün sonunda 0,033 MPa değerine ulaştığı simülasyon ile belirlenmiştir. Modelde gevşeme süresi 100000 s ($\lambda_5 = -0,000010$) olan 5'inci terimin zaman sabiti sıfır olan terimi temsil ettiği düşünülmüştür.



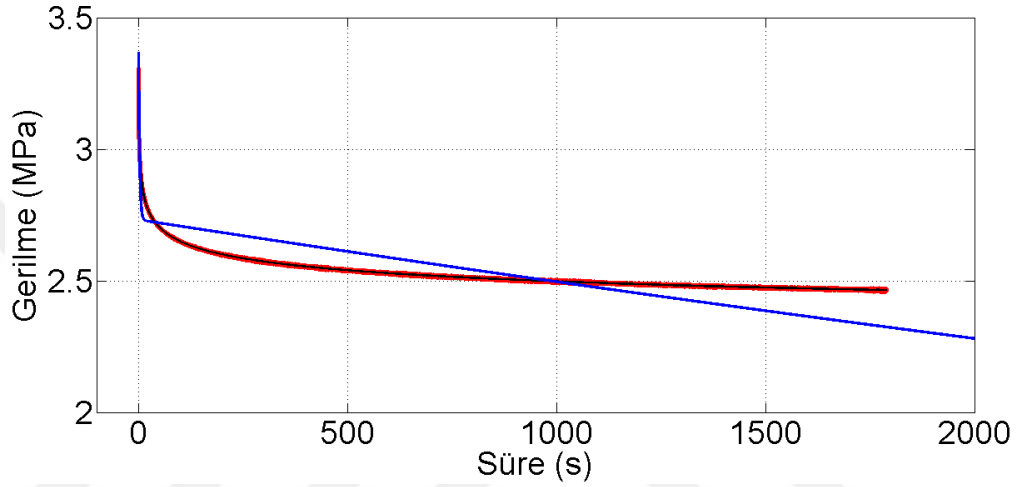
Şekil 4.35. Döşemelik-11: y,t,1500,1.0 koşulunun belirlediği ve 5 terimli en iyi modelin simülasyonu

Birbirini takip eden her 100 veriden biri seçilerek 17900 verinin bulunduğu ölçüm sonucunun (10 veri/s okuma hızına karşılık gelen gerilme sinyali) analiz programında kullanılması ile modeller belirlenmiştir. Gerilme azalmasını temsil eden modeller Çizelge 4.20’de verilmiştir. Sinyalin okuma hızı on kat ve sinyal ayrıştırılmasında kullanılan Hankel matrisinin 5000’e kadar sütun genişliğinin artırılmasına rağmen belirlenebilen terim sayısında bir artış gözlenmemiştir. Veri okuma hızının artırılması sonucunda, 100 sütünlü Hankel matrisli çözüm ile bir terimin zaman katsayısının $\lambda_1 = -2,634668$ değerine ulaştığı ve toplam hata miktarlarının arttığı çizelgede görülmektedir.

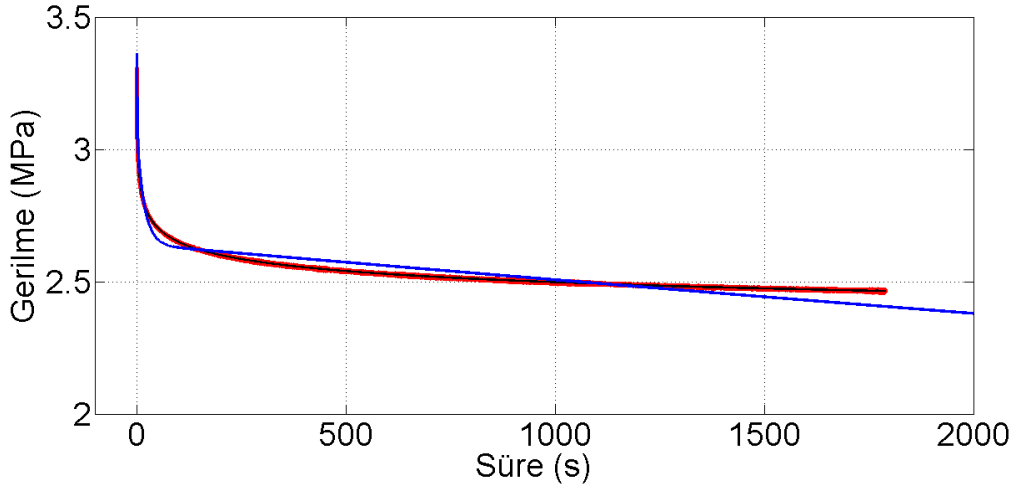
Çizelge 4.20. 17900 verinin kullanıldığı Döşemelik-11’in gerilme azalması modelleri

Terim		Çözüm koşulu							
No	Sembol	y,t,10,0.1	y,t,50,0.1	y,t,100,0.1	y,t,500,0.1	y,t,1000,0.1	y,t,1500,0.1	y,t,2000,0.1	y,t,5000,0.1
1	λ_1	-0,382554	-0,154350	-2,634668	-0,533687	-0,278259	-0,208644	-0,407704	-0,261017
	A1	0,637582	0,542853	0,273336	0,334706	0,329767	0,324893	0,287006	0,317343
2	λ_2	-0,000090	-0,000072	-0,438737	-0,094022	-0,047736	-0,034125	-0,079476	-0,038225
	A2	2,731403	2,687376	0,032734	0,099776	0,113862	0,119558	0,145420	0,143063
3	λ_3	x	x	-0,055818	-0,013594	-0,007218	-0,005383	-0,019403	-0,009160
	A3	x	x	0,414501	0,254205	0,203285	0,181086	0,118059	0,105096
4	λ_4	x	x	-0,000052	-0,000031	-0,000023	-0,000019	-0,003520	-0,001978
	A4	x	x	2,640481	2,585244	2,559434	2,548081	0,150908	0,124021
5	λ_5	x	x	x	x	x	x	-0,000015	-0,000010
	A5	x	x	x	x	x	x	2,531369	2,504903
Hata miktarı (MPa)		9,422072	6,521985	3,741462	1,215273	0,579028	0,444429	0,203697	0,236245

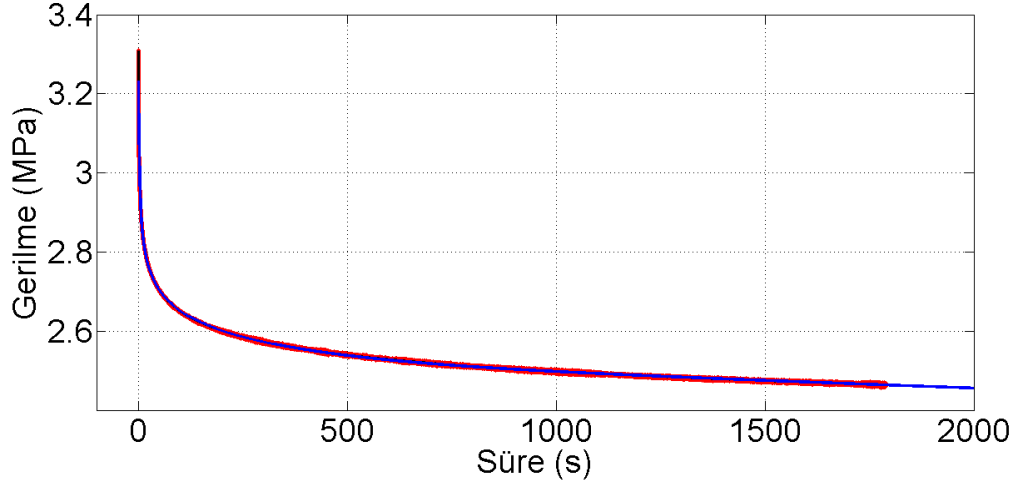
Şekil 4.37, Şekil 4.38 ve Şekil 4.39'da bu çözümde belirlenen modellerin grafikleri verilmiştir. Bir önceki çözümden farklı olarak iki terimli modeller belirlenmiştir. Bu modellerin sadece ölçüm verilerinin hızlı değiştiği başlangıç bölümünü ve gerilme azalmasını uzun süre devam ettiğini temsil eden terimi içerdiği görülmüştür. Ayrıca toplam hata miktarının bu modeller için oldukça yüksek olduğu çizelgede görülmektedir. Az sayıda terime sahip modellerin gerilme azalması davranışını belirlemede yetersiz oldukları anlaşılmıştır.



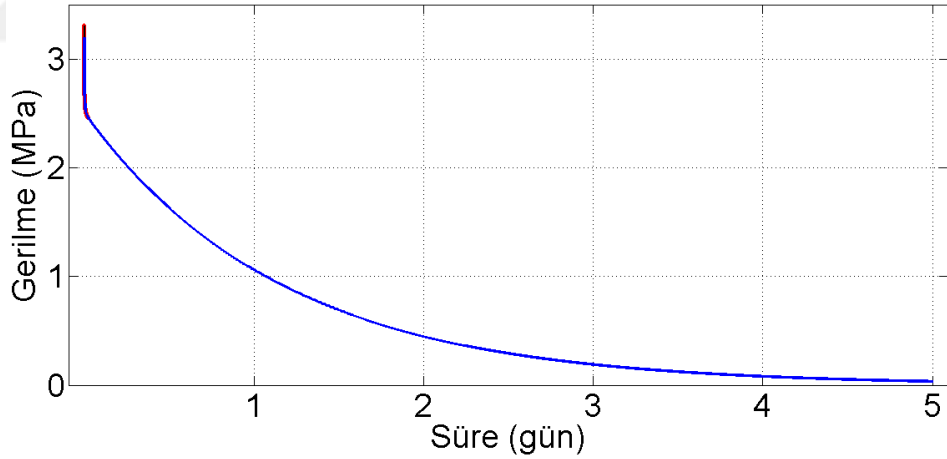
Şekil 4.36. Döşemelik-11: $y,t,10,0.1$ koşulunun belirlediği 2 terimli model



Şekil 4.37. Döşemelik-11: $y,t,100,0.1$ koşulunun belirlediği 4 terimli model



Şekil 4.38. Döşemelik-11: y,t,2000,0.1 koşulunun belirlediği ve 5 terimli en iyi model En iyi olarak belirlenen 5 terimli modelin simülasyonu Şekil 4.39'da verilmiştir. Gerilmenin 3,309 MPa değerinden azalarak 5'inci günün sonunda 0,033 MPa değerine ulaştığı modelden hesaplanarak bulunmuştur. Modelde gevşeme süresi 66666 s ($\lambda_5 = -0,000015$) olan 5'inci terimin zaman sabiti sıfır olan terimi temsil ettiği düşünülmüştür.



Şekil 4.39. Döşemelik-11: y,t,2000,0.1 koşulunun belirlediği ve 5 terimli en iyi modelin simülasyonu

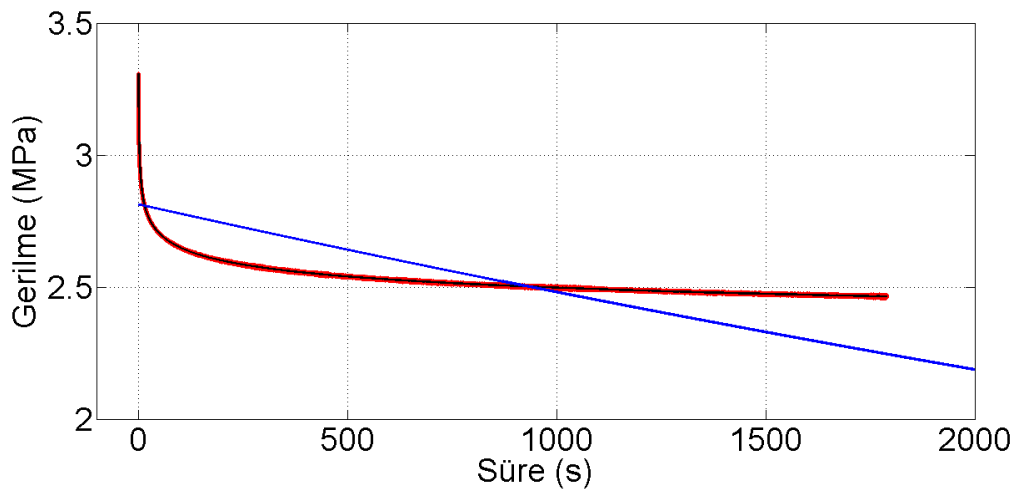
Çizelge 4.21'de verilen modeller, birbirini takip eden her 10 veriden biri seçilerek oluşturulan (100 veri/s okuma hızına karşılık gelen gerilme sinyali) 179000 veri ile belirlenmiştir. Sinyalin okuma hızının yüz kat ve sinyal ayrıştırılmasında kullanılan Hankel matrisinin 1000'e kadar sütun genişliğinin artırılmasına rağmen önceki analizlerde belirlenen terim sayısından daha çok terim bulunamamıştır. 50'den

başlayarak 85 sütünlü Hankel matrisi ile bulunan modellerde sürekli negatif sabit katsayı bulunduğu için model verilememiştir. Bu yüzden, analizlere 100 sütünlü Hankel matrisi kullanılarak devam edilmiştir. Bellek yetersizliği sebebiyle, 1500, 2100 ve 5000 sütünlü Hankel matrisli çözümlerde ilk 20000 ölçüm verisi kullanılmıştır. Okuma hızına eşdeğer terimleri bulmak amacıyla bu çözümler de araştırılmıştır. Bu çözümlerde hata miktarlarında ciddi oranda arttığı çizelgede görülmektedir.

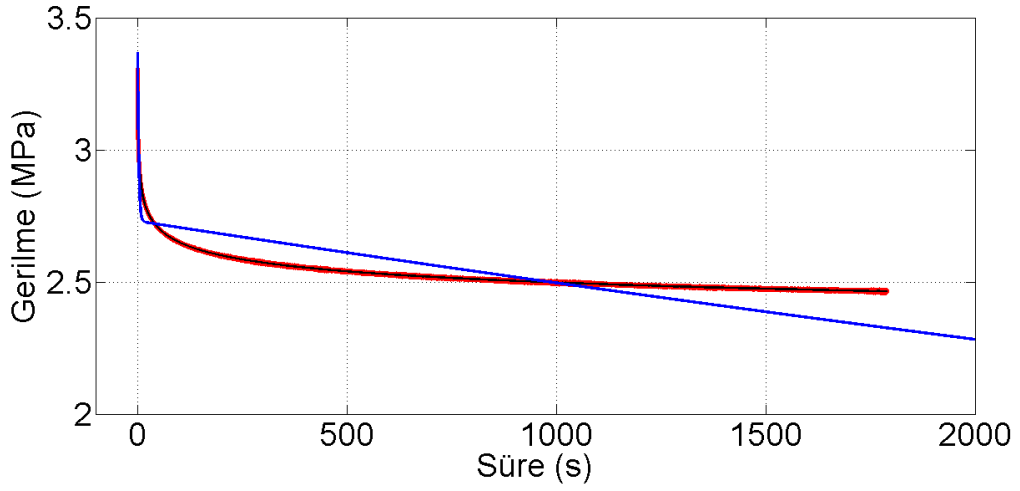
Çizelge 4.21. 179000 verinin kullanıldığı Döşemelik 11'in gerilme azalması modelleri

Terim		Çözüm koşulu						
No	Sembol	y,t,10,0.01	y,t,100,0.01	y,t,500,0.01	y,t,1000,0.01	y,t,1500,0.01	y,t,2100,0.01	y,t,5000,0.01
1	λ_1	-0,000126	-0,373641	-0,153939	-2,483854	-0,686444	-4,355859	-2,079381
	A1	2,813592	0,638331	0,541456	0,299525	0,263150	0,101206	0,138391
2	λ_2		-0,000090	-0,000071	-0,433143	-0,205227	-0,575724	-0,439594
	A2		2,729682	2,687236	0,022214	0,091965	0,224877	0,201822
3	λ_3				-0,055574	-0,041354	-0,146487	-0,099584
	A3				0,414596	0,224268	0,133307	0,151868
4	λ_4				-0,000052	-0,000185	-0,029817	-0,020470
	A4				2,640454	2,695675	0,192526	0,166308
5	λ_5						-0,000150	-0,000115
	A5						2,678748	2,657701
Hata miktarı (MPa)		48,171235	29,428271	20,595690	11,823016	*	92,640651	64,226830

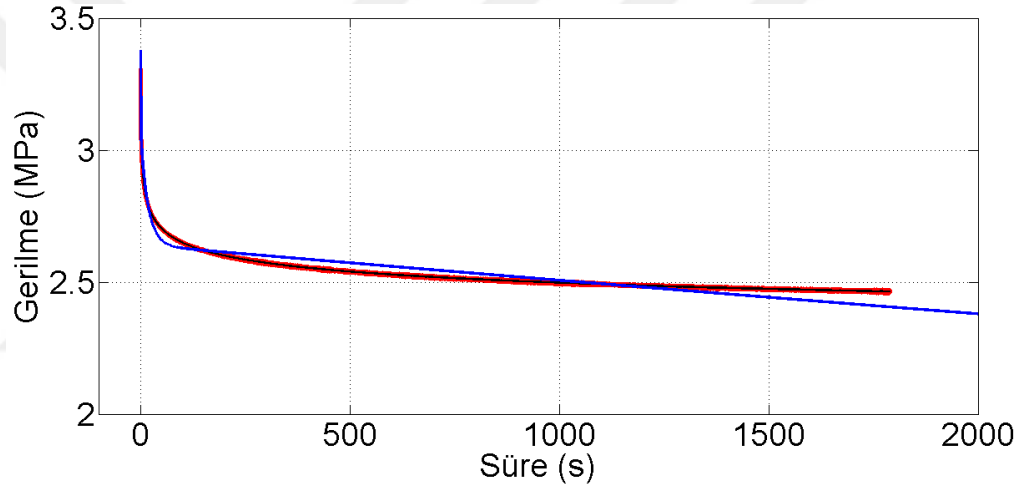
Şekil 4.40, Şekil 4.41 ve Şekil 4.42'de ölçüm verilerinin tamamı ile belirlenen modellerin grafikleri verilmiştir. Bu çözümde tek terimli modelle karşılaşılmıştır. En az toplam hata miktarının 4 terimli modelde bulunduğu görülmüştür.



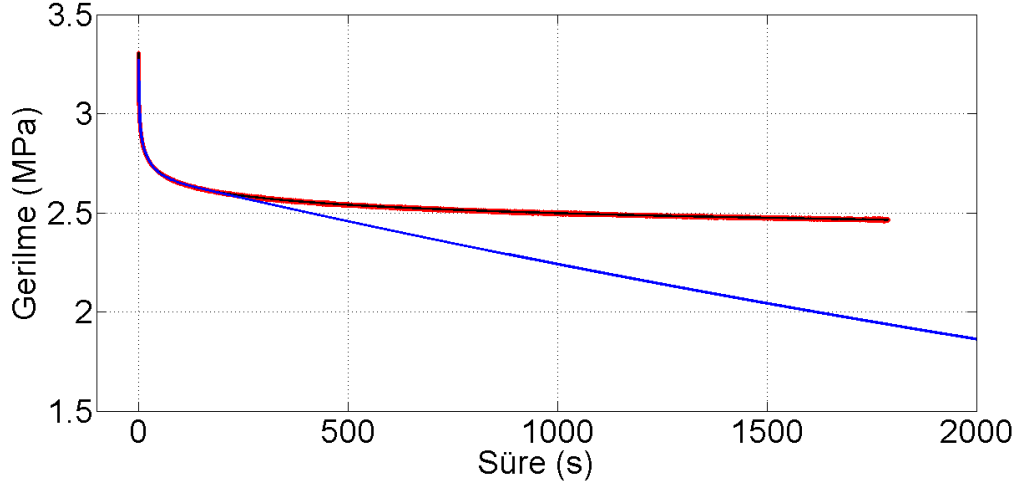
Şekil 4.40. Döşemelik-11: y,t,10,0.01 koşulunun belirlediği 1 terimli model



Şekil 4.41. Döşemelik-11: $y,t,100,0.01$ koşulunun belirlediği 2 terimli model

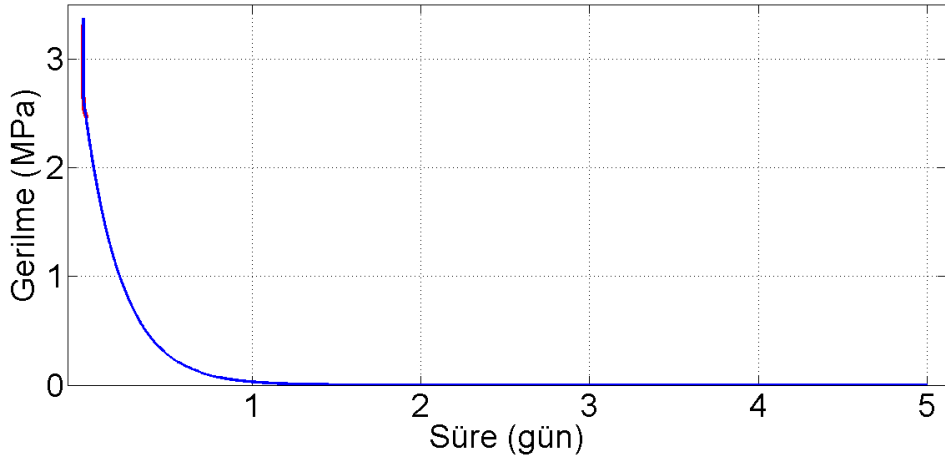


Şekil 4.42. Döşemelik-11: $y,t,1000,0.01$ koşulunun belirlediği ve 4 terimli en iyi model
Bellek yetersizliği sebebiyle, 1500 sütunlu Hankel matrisinde ilk 20000 ölçüm verisi kullanılarak analizlere devam edilmiştir. Modelin tüm ölçüm sonuçlarını temsil edemediği ve hata miktarının çok yüksek olduğu Şekil 4.43'te görülmektedir. Az sayıda veri ile belirlenen modellerin gerilme azalması davranışını temsil etmekte yetersiz kaldığı görülmüştür.



Şekil 4.43. Döşemelik 11: y,t,1500,0.01 koşulunun ilk 20000 veri ile belirlediği 4 terimli model

Gerilme azalması davranışının tahmin edilmesinde en az hata miktarına sahip 4 terimli model kullanılmıştır (Şekil 4.44). Gerilme değeri 3,309 MPa başlangıç değerinden azalarak $4,47 \cdot 10^{-10}$ MPa değerine düşmüştür. Modelin zaman sabiti sıfır olan terimi, gevşeme süresi 19231 s ($\lambda_4 = -0,000052$) olan terim olduğu düşünülmüştür.



Şekil 4.44. Döşemelik-11: y,t,1000,0.01koşulunun belirlediği ve 4 terimli en iyi modelin simülasyonu

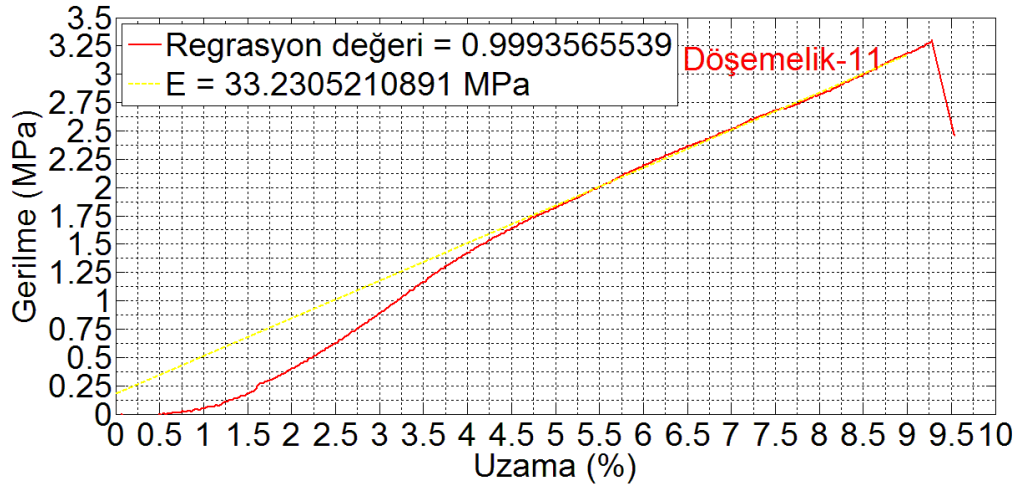
Analiz sonuçlarının değerlendirilmesi:

Veri okuma hızının artırılması ile hızlı değişen terimler araştırılmıştır. Bu işlem için veri okuma hızı 1, 10, ve 100 veri/s karşılık gelen örnekleme ile üç farklı ölçüm verisi kullanılmıştır. Veri okuma hızından daha yüksek zaman sabitleri, sütun sayıları farklı Hankel matrislerin kullanıldığı birbirini takip eden analizlerde belirlenmemiştir. En hızlı

değişen terimin zaman sabitinin $-4,355859$ değerinde olduğu görülmüştür. Modellemede bulunan terim sayısı beş ile sınırlı kalmıştır. En az hata miktarına sahip modellerin saniyede 1 veri okuma hızı ile belirlenenler olduğu görülmüştür. Bellek yetersizliği nedeniyle veri sayısının azaltılması ile bulunan modellerin ise ölçüm sonuçlarını bile temsil edemedikleri görülmüştür. İncelemelerde bir ve iki terimli olarak belirlenen az sayıda terim içeren modeller de belirlenmiştir. Bu modellerin toplam hata değerleri ve grafiklerinin incelenmesi ile deneysel verileri tam olarak temsil etmedikleri görülmüş ve az sayıda parametre içeren modellerin yetersiz kaldığı görülmüştür. Belirtilen durumlar, kumaşın gerilme azalması davranışının yüksek sayıda bileşene sahip olmadığını ve altı ve daha az sayıda terim sayısına sahip Prony serisi ile modellenebileceğini göstermiştir. Modellemelerde çok hızlı değişen terimlerin bulunmaması nedeniyle, test işlemlerinde kullandığımız veri okuma hızının 1000 veri/s değerinin analizler için yeterli olduğu görülmüştür. Ancak zaman sabiti sıfır olan terim belirlenememiştir. Yine de gevşeme süresi en uzun olan terimler ile gerilme azalması için yaklaşık bir tahminleme yapılabilmektedir.

Bu aşamadan sonra, en iyi modelin sabit katsayılarıyla kumaşın gevşeme modülleri hesaplanmıştır. Belirlenen gevşeme modülleri ile ölçüm bölgesindeki kumaşın elastik modülü ve ölçüm verileri kullanılarak hesaplanan başlangıç modülü karşılaştırılmıştır.

Döşemelik-11 kumaşının gerilme azalması test verileri ile çizdirilen gerilme uzama grafiği Şekil 4.45'te verilmiştir. Gerilme uzama grafindeki lineer bölge % 5 uzama değeri (grafik üzerinde yaklaşık olarak belirlendi) ile test rutinin başlama anı arasında belirlenerek bulunmuştur. Gerilme uzama grafiğindeki lineer bölgedeki ölçüm verileri, en küçük kareler yöntemi uygulanarak doğru denklemi belirlenmiştir. Doğru denkleminin eğimi elastik modül olarak karşılaştırmada kullanılmıştır. Sorvari ve Malinen (2007) açıkladığı sonlu farklar yöntemi ile test verileri kullanılarak çizelgelerde verilen başlangıç modülü hesaplanmıştır.



Şekil 4.45. Döşemelik-11: gerilme azalması davranışının incelendiği bölgedeki modülü Döşemelik-11'in Çizelge 4.19, Çizelge 4.20 ve Çizelge 4.21'deki sabit katsayı değerlerinin kumaşın birim uzama değerine (ϵ_0) bölünmesiyle sırasıyla Çizelge 4.22, Çizelge 4.23 ve Çizelge 4.24'te verilen modelin gevşeme modülleri hesaplanmıştır. Zaman sabiti sıfır olarak kabul edilen analizlerdeki en küçük zaman sabitlerine ait sabit katsayıları ile hesaplanan modül değerleri, modellerin en son terimleri olarak çizelgede gösterilmiş ve kumaşın elastik modülü ile karşılaştırılmıştır. Modellerin gevşeme modüllerinin toplamı ise çizelgelerin alt satırında, başlangıç modülü olarak verilmiştir. Belirtilen bu değerler modellenin terim sayısı, analizde kullanılan verilerin örnekleme sonucu verilerin sayısı ve değerlerinin değişmesine rağmen oldukça az bir değişim gösterdikleri görülmektedir. Bu iki modül değerinin sınırlı değişimi nedeniyle modele ait diğer katsayıların ve hesaplanan diğer gevşeme modüllerinin analizde toplam hata miktarını en az olabilmesi için modelin terim sayısına göre değişkenlik gösterdikleri görülmüştür.

Çizelge 4.22. 1790 verinin kullanıldığı Döşemelik-11'in gevşeme ve başlangıç modülleri

Modül $E_j(0)$ (MPa)	Çözüm koşulu						
	y,t,12,1.0	y,t,50,1.0	y,t,100,1.0	y,t,500,1.0	y,t,1000,1.0	y,t,1500,1.0	y,t,1700,1.0
E1	2,129549	3,900821	3,967255	3,834729	3,885940	3,782079	3,586666
E2	4,347333	0,949133	0,930344	1,197236	1,925823	1,641334	1,874123
E3	28,461988	2,740261	2,163792	1,182194	1,310444	1,347915	27,332729
E4		27,871662	27,567949	1,306159	1,411753	1,377652	
E5				26,979282	26,613728	26,999851	
Başlangıç Modülü $E(0)$ (MPa)	34,938870	35,461877	34,629341	34,499600	35,147688	35,148831	32,793518

Çizelge 4.23. 17900 verinin kullanıldığı Döşemelik-11'in gevşeme ve başlangıç modülleri

Modül E _j (0) (MPa)	Çözüm koşulu						
	y,t,10,0.1	y,t,50,0.1	y,t,100,0.1	y,t,500,0.1	y,t,1000,0.1	y,t,1500,0.1	y,t,2000,0.1
E1	6,872755	5,851625	2,946399	3,607933	3,554686	3,502149	3,093756
E2	29,442877	28,968289	0,352856	1,075527	1,227364	1,288762	1,567538
E3			4,468067	2,740177	2,191289	1,951999	1,272606
E4			28,462791	27,867368	27,589160	27,466776	1,626696
E5							27,286626
Başlangıç Modülü E(0) (MPa)	36,315632	34,819914	36,230114	35,291005	34,562499	34,209686	34,847222

Çizelge 4.24. 179000 verinin kullanıldığı Döşemelik-11'in gevşeme ve başlangıç modülleri

Modül E _j (0) (MPa)	Çözüm koşulu					
	y,t,10,0.01	y,t,100,0.01	y,t,500,0.01	y,t,1000,0.01	y,t,1500,0.01	y,t,2100,0.01
E1	30,328826	6,880821	5,836564	3,228700	2,836594	1,090937
E2		29,424329	28,966780	0,239450	0,991322	2,424034
E3				4,469099	2,417479	1,436968
E4				28,462501	29,057752	2,075315
E5						28,875289
Başlangıç Modülü E(0) (MPa)	30,328826	36,305150	34,803344	36,399750	35,303148	35,902543

Çizelge 4.25, Çizelge 4.26 ve Çizelge 4.27 elastik modül ve başlangıç modül değerleri ve gevşeme modüllerinden hesaplanan değerleri arasındaki hata miktarları verilmiştir.

Çizelge 4.25. 1790 verinin kullanıldığı Döşemelik-11'in modül ve başlangıç modüllü

Gerilme uzama grafiği	
Modül (MPa)	33,230521
Sorvari ve Malinen (2007)	
Uzama ϵ_0 (%)	9,28
Uzama hızı $\dot{\epsilon}$ (1/s)	0,01
E _{min} (0)	30,415691
E _{mak} (0)	43,298824
Başlangıç Modülü E(0) (MPa)	41,083589
Model	
Zaman sabiti $\lambda \approx 0$ ($1/\lambda \approx \infty$ s)	-0,000010
Sabit katsayı A($\lambda \approx 0$) (MPa)	2,504765
Uzama ϵ_0 (%)	9,28
Modül E ($\lambda \approx 0$) (MPa)	26,999851
Modülün hata miktarı (%)	-18,75
Başlangıç modülü E(0)	35,148831
Başlangıç modülünün hata miktarı (%)	-14,45

Çizelge 4.26. 17900 verinin kullanıldığı Döşemelik-11'in modül ve başlangıç modüllü

Gerilme uzama grafiği	
Modül (MPa)	33,230521
Sorvari ve Malinen (2007)	
Uzama ϵ_0 (%)	9,28
Uzama hızı $\dot{\epsilon}$ (1/s)	0,01
$E_{\min}(0)$	30,415691
$E_{\max}(0)$	43,298824
Başlangıç Modülü $E(0)$ (MPa)	41,083589
Model	
Zaman sabiti $\lambda \approx 0$ ($1/\lambda \approx \infty$ s)	-0,000015
Sabit katsayı $A(\lambda \approx 0)$ (MPa)	2,531369
Uzama ϵ_0 (%)	9,28
Modül $E(\lambda \approx 0)$ (MPa)	27,286626
Modülün hata miktarı (%)	-17,89
Başlangıç modülü $E(0)$	34,847222
Başlangıç modülünün hata miktarı (%)	-15,18

Çizelge 4.27. 179000 verinin kullanıldığı Döşemelik-11'in modül ve başlangıç modüllü

Gerilme uzama grafiği	
Modül (MPa)	33,230521
Sorvari ve Malinen (2007)	
Uzama ϵ_0 (%)	9,28
Uzama hızı $\dot{\epsilon}$ (1/s)	0,01
$E_{\min}(0)$	30,415691
$E_{\max}(0)$	43,298824
Başlangıç Modülü $E(0)$ (MPa)	41,083589
Model	
Zaman sabiti $\lambda \approx 0$ ($1/\lambda \approx \infty$ s)	-0,000052
Sabit katsayı $A(\lambda \approx 0)$ (MPa)	2,640454
Uzama ϵ_0 (%)	9,28
Modül $E(\lambda \approx 0)$ (MPa)	28,462501
Modülün hata miktarı (%)	-14,35
Başlangıç modülü $E(0)$	36,399750
Başlangıç modülünün hata miktarı (%)	-11,40

Elastik modül değerinde belirlenen hata miktarının büyük oranda da başlangıç modülündeki hata miktarını belirlediği düşünülmüştür. Çünkü elastik modülü temsil eden gevşeme modülünün ağırlığı diğer gevşeme modüllerinin etkisiyle azalarak başlangıç modülünün hesabındaki hataya yansımıştır. Modül değerleri arasındaki orantı ile başlangıç modülündeki hata miktarı kullanılarak aşağıda verilen denklem ile hesaplanabilir. Burada e hata miktarlarını (%) ve E ise modül değerlerini ifade etmektedir.

$$e_{E(0)} = \frac{E(\lambda \approx 0)}{E(0)} e_{E(\lambda \approx 0)}$$

Elastik modüldeki hata miktarı ile başlangıç modülünün hata miktarının hesaplanması sonucunda sırasıyla % -14,40, -14,01 ve -11,23 değerleri bulunmuştur. Solvari ve Malinen'in uyguladığı sonlu farklar yöntemi ile modelden belirlenen başlangıç modülleri arasındaki hata miktarları ise % -14,45, -15,18 ve -11,40 bulunmuştur. Her iki hata değerleri karşılaştırıldığında birbirine oldukça yakın sonuçlar verdiği görülmektedir. Bu durum, test verileri ile elde edilecek model içerisinde zaman sabiti sıfır olan terimin kesin olarak belirlenmesi gerektiğini göstermektedir. Ancak tez çalışması süresince bu hedef sağlanamamıştır.

Döşemelik-11 için yapılan değerlendirmeler doğrultusunda diğer kumaş tipleri için: ölçüm sonuçları okuma hızı saniyede bir veri olarak örneklenmiş, test verilerinden modeller oluşturulmuş, en iyi model belirlenmiş, en iyi model ile beş gün süresince gerilme azalması tahminlenmiş, gevşeme modülleri bulunmuş, elastik modül ve başlangıç modül değerleri karşılaştırılmıştır.

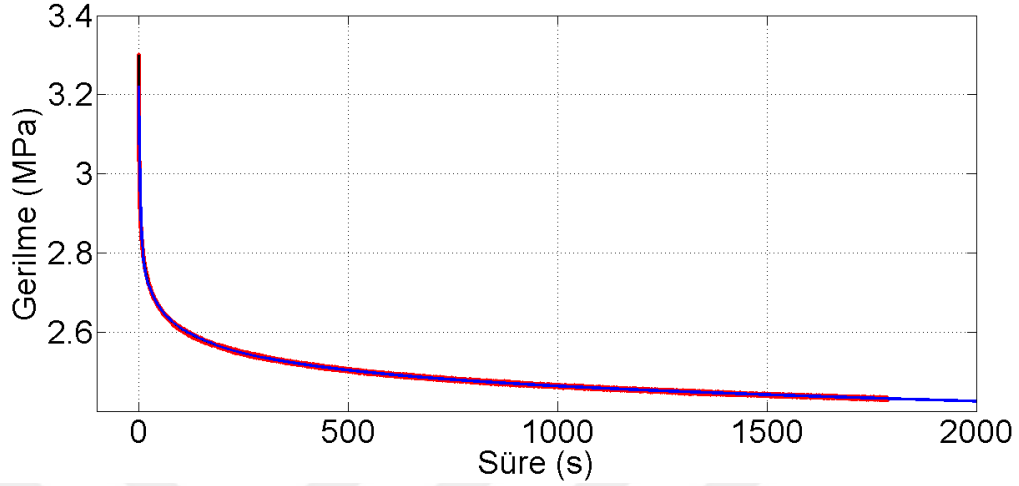
Döşemelik-12'nin gerilme azalması davranışının modellenmesi:

Döşemelik-12 için belirlenen modeller Çizelge 4.28'de verilmiştir. 500 sütunlu Hankel matrisli çözümden bulunan beş parametrelili modelin hata miktarı en az olduğu belirlenmiş ve gerilme azalması davranışını en iyi temsil eden model olarak seçilmiştir.

Çizelge 4.28. Döşemelik-12: gerilme azalması modelleri

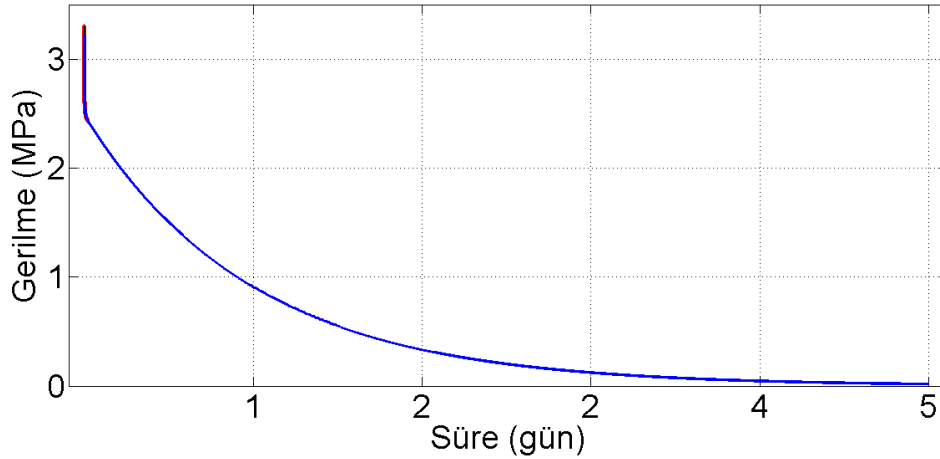
Terim		Çözüm koşulu						
No	Sembol	y,t,10,1.0	y,t,50,1.0	y,t,100,1.0	y,t,500,1.0	y,t,1000,1.0	y,t,1500,1.0	y,t,1700,1.0
1	$\lambda 1$	-1,512411	-0,510284	-0,263739	-0,264390	-0,188006	-0,031443	-0,089078
	A1	0,244077	0,404370	0,408165	0,398988	0,391486	0,314531	0,391236
2	$\lambda 2$	-0,919104	-0,092248	-0,044473	-0,042439	-0,028037	-0,002778	-0,005156
	A2	0,004019	0,088092	0,105251	0,114133	0,122388	0,136221	0,186050
3	$\lambda 3$	-0,071380	-0,013877	-0,006810	-0,011108	-0,005711	-0,000013	-0,000017
	A3	0,445357	0,250939	0,190697	0,107674	0,114472	2,486070	2,505877
4	$\lambda 4$	-0,000054	-0,000030	-0,000021	-0,002397	-0,001070	x	x
	A4	2,609227	2,546706	2,520840	0,120334	0,116427	x	x
5	$\lambda 5$	x	x	x	-0,000012	-0,000004	x	x
	A5	x	x	x	2,481097	2,433739	x	x
Hata miktarı (MPa)		1,296784	0,366965	0,179782	0,113500	0,164390	0,471639	0,297035

Beş parametrelili gerilme azalması modelinin ölçüm sonuçları ile uyumu Şekil 4.46’da verilen grafikte sunulmuştur.



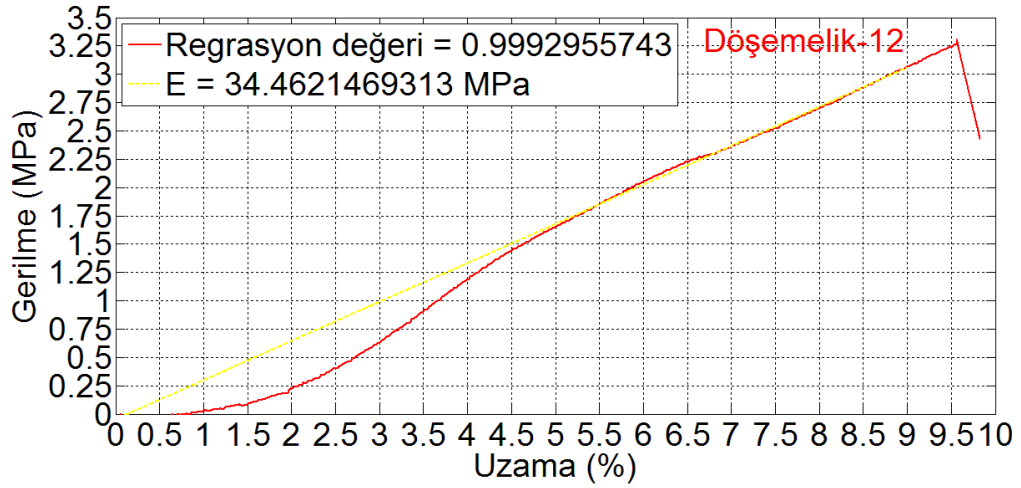
Şekil 4.46. Döşemelik-12: y,t,500,1.0 koşullarının belirlediği 5 terimli en iyi model

Beş terimli en iyi modelin simülasyonu Şekil 4.47’de verilmiştir. Gerilme değerinin 3,222 MPa değerinden azalarak 0.016 MPa değerine düştüğü belirlenmiştir. Modelin zaman sabiti sıfır olan terimi, gevşeme süresi 83333 s ($\lambda_5 = -0,000012$) olan terim olduğu düşünülmüştür.



Şekil 4.47. Döşemelik-12: en iyi 5 terimli modelin simülasyonu

Döşemelik-12 kumaşının gerilme azalması testinde ölçülen veriler ile gerilme uzama grafiği Şekil 4.48’te çizdirilmiştir. Kumaşın elastik modülünün 34.46 MPa olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.48. Döşemelik-12: gerilme azalması davranışının incelendiği bölgedeki modülü Çizelge 4.28’deki sabit katsayı değerlerinin kumaşın birim uzama değerine (0,0956) bölünmesiyle Çizelge 4.29’da verilen modelin gevşeme modülleri hesaplanmıştır.

Çizelge 4.29. Döşemelik-12: gevşeme ve başlangıç modülleri

Modül $E_j(0)$ (MPa)	Çözüm koşulu						
	$y,t,10,1.0$	$y,t,50,1.0$	$y,t,100,1.0$	$y,t,500,1.0$	$y,t,1000,1.0$	$y,t,1500,1.0$	$y,t,1700,1.0$
E1	2,552197	4,228314	4,267996	4,172038	4,093590	3,288910	4,090971
E2	0,042023	0,921135	1,100564	1,193441	1,279751	1,424401	1,945440
E3	4,656898	2,623957	1,994030	1,125898	1,196985	25,995691	26,202806
E4	27,283491	26,629734	26,359263	1,258274	1,217426	0,000000	0,000000
E5	0,000000	0,000000	0,000000	25,943693	25,448487	0,000000	0,000000
Başlangıç Modülü $E(0)$ (MPa)	34,534609	34,403140	33,721854	33,693344	33,236239	30,709003	32,239217

Çizelge 4.30’da elastik modül ve başlangıç modül değerleri verilmiş, gevşeme modüllerinden belirlenen değerleri ile aralarındaki fark hesaplanmıştır.

Çizelge 4.30. Döşemelik-12: modül ve başlangıç modüllü

Gerilme uzama grafiği	
Modül (MPa)	34,462147
Sorvari ve Malinen (2007)	
Uzama ε_0 (%)	9,56
Uzama hızı $\dot{\varepsilon}$ (1/s)	0,01
$E_{\min}(0)$	28,982547
$E_{\max}(0)$	42,138369
Başlangıç Modülü $E(0)$ (MPa)	40,025860
Model	
Zaman sabiti $\lambda \approx 0$ ($1/\lambda \approx \infty$ s)	-0,000012
Sabit katsayı $A(\lambda \approx 0)$ (MPa)	2,481097
Uzama ε_0 (%)	9,56
Modül $E(\lambda \approx 0)$ (MPa)	25,943693
Modülün hata miktarı (%)	-24,72
Başlangıç modülü $E(0)$ (MPa)	33,693344
Başlangıç modülünün hata miktarı (%)	-15,82

Başlangıç modülünün hata miktarının elastik modüldeki hata miktarıyla hesaplanan sonucu % -19,03 olarak bulunmuştur.

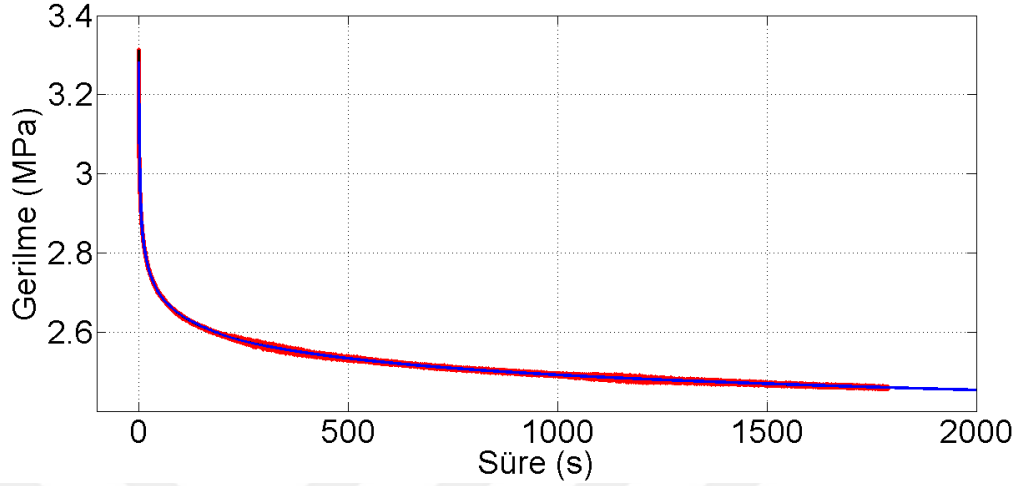
Döşemelik-13'nin gerilme azalması davranışının modellenmesi:

Döşemelik-13 için belirlenen modeller Çizelge 4.31'de verilmiştir. 500 sütunlu Hankel matrisli çözümden bulunan beş parametrelili modelin hata miktarı en az olduğu belirlenmiş ve gerilme azalması davranışını en iyi temsil eden model olarak seçilmiştir.

Çizelge 4.31. Döşemelik-13: gerilme azalması modelleri

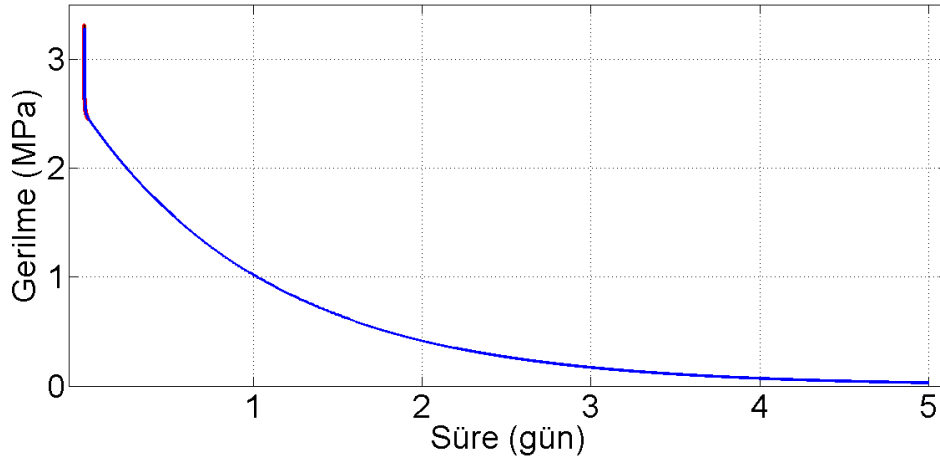
No	Terim Sembol	Çözüm koşulu						
		y,t,12,1.0	y,t,50,1.0	y,t,100,1.0	y,t,500,1.0	y,t,1000,1.0	y,t,1500,1.0	y,t,1700,1.0
1	$\lambda 1$	-0,483340	-0,464706	-0,224565	-0,482497	-0,141833	-0,058363	-0,137276
	A1	0,209442	0,382601	0,378347	0,341022	0,350534	0,312766	0,341482
2	$\lambda 2$	-0,056594	-0,086301	-0,045614	-0,064621	-0,032276	-0,013737	-0,022063
	A2	0,402717	0,072194	0,081374	0,181768	0,089637	0,088129	0,141579
3	$\lambda 3$	-0,000052	-0,013132	-0,007167	-0,011637	-0,006594	-0,002186	-0,002971
	A3	2,633171	0,261764	0,207078	0,128027	0,129465	0,139783	0,150678
4	$\lambda 4$	0,000000	-0,000029	-0,000022	-0,002198	-0,001133	-0,000010	-0,000013
	A4	0,000000	2,573029	2,551003	0,127879	0,129572	2,501677	2,515803
5	$\lambda 5$	0,000000	0,000000	0,000000	-0,000010	-0,000004	0,000000	0,000000
	A5	0,000000	0,000000	0,000000	2,503193	2,458549	0,000000	0,000000
Hata miktarı		1,187030	0,354996	0,212605	0,058463	0,200046	0,339881	0,2073913920

Beş parametrelili gerilme azalması modelinin ölçüm sonuçları ile uyumu Şekil 4.49’da verilen grafikte sunulmuştur.



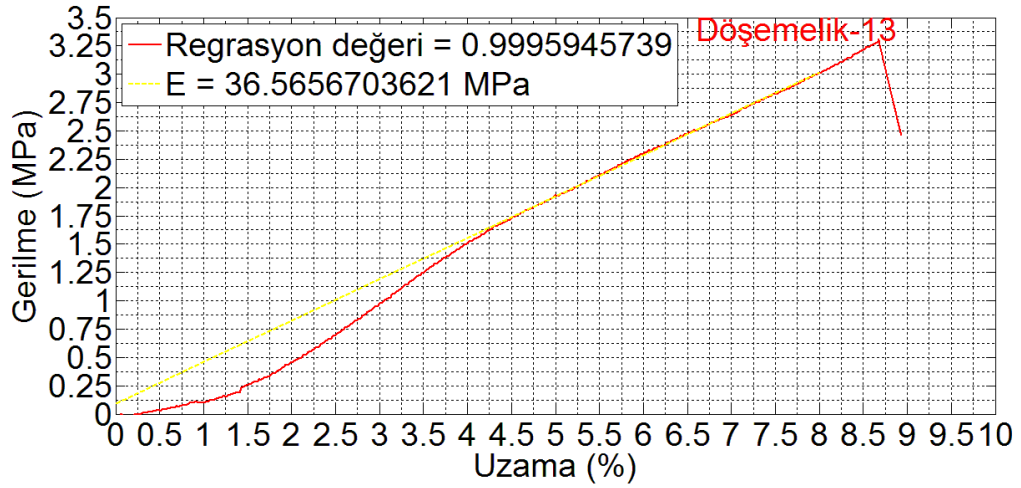
Şekil 4.49. Döşemelik-13: $y,t,500,1.0$ koşulunun belirlediği 5 terimli en iyi model

Beş terimli en iyi modelin simülasyonu Şekil 4.50’de verilmiştir. Gerilme değerinin 3,282 MPa değerinden azalarak 0.027 MPa değerine düştüğü belirlenmiştir. Modelin zaman sabiti sıfır olan terimi, gevşeme süresi 100000 s ($\lambda_5 = -0,000001$) olan terim olduğu düşünülmüştür.



Şekil 4.50. Döşemelik-13: en iyi 5 terimli modelin simülasyonu

Döşemelik-13 kumaşının gerilme azalması testinde ölçülen veriler ile gerilme uzama grafiği Şekil 4.51’de çizdirilmiştir. Kumaşın elastik modülünün 36.56 MPa olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.51. Döşemelik-13: gerilme azalması davranışının incelendiği bölgedeki modülü Çizelge 4.31'deki sabit katsayı değerlerinin kumaşın birim uzama değerine (0,0867) bölünmesiyle Çizelge 4.32'de verilen modelin gevşeme modülleri hesaplanmıştır.

Çizelge 4.32. Döşemelik-13: gevşeme ve başlangıç modülleri

Modül $E_j(0)$ (MPa)	Çözüm koşulu						
	$y,t,12,1.0$	$y,t,50,1.0$	$y,t,100,1.0$	$y,t,500,1.0$	$y,t,1000,1.0$	$y,t,1500,1.0$	$y,t,1700,1.0$
E1	2,415013	4,411666	4,362616	3,932235	4,041907	3,606423	3,937540
E2	4,643616	0,832447	0,938306	2,095920	1,033580	1,016193	1,632512
E3	30,36237	3,018324	2,387761	1,476249	1,492824	1,611798	1,737423
E4	x	29,66889	29,414923	1,474536	1,494055	28,846156	29,009032
E5	x	x	x	28,86363	28,348857	x	x
Başlangıç Modülü $E(0)$ (MPa)	37,42100	37,93133	37,103606	37,842568	36,411223	35,080570	36,316506

Çizelge 4.33'te elastik modül ve başlangıç modül değerleri verilmiş, gevşeme modüllerinden belirlenen değerleri arasındaki fark hesaplanmıştır.

Çizelge 4.33. Döşemelik-13: modül ve başlangıç modüllü

Gerilme uzama grafiği	
Modül (MPa)	36,565670
Sorvari ve Malinen (2007)	
Uzama ε_0 (%)	8,67
Uzama hızı $\dot{\varepsilon}$ (1/s)	0,01
$E_{\min}(0)$	34,984985
$E_{\max}(0)$	46,268477
Başlangıç Modülü $E(0)$ (MPa)	44,121583
Model	
Zaman sabiti $\lambda \approx 0$ ($1/\lambda \approx \infty$ s)	-0,000010
Sabit katsayı $A(\lambda \approx 0)$ (MPa)	2,503193
Uzama ε_0 (%)	8,67
Modül $E(\lambda \approx 0)$ (MPa)	28,863628
Modülün hata miktarı (%)	-21,06
Başlangıç modülü $E(0)$ (MPa)	37,842568
Başlangıç modülünün hata miktarı (%)	-14,23

Başlangıç modülünün hata miktarının elastik modüldeki hata miktarıyla hesaplanan sonucu % -16,06 olarak bulunmuştur.

Döşemelik-1 kumaşın kurulan modellerinin değerlendirilmesi:

Döşemelik-1 kumaşın gerilme azalması, sütun sayısı 500 ve 1000 Hankel matrisli çözümlerin belirlediği, toplam hata miktarı en az olan 5 terimli modeller ile temsil edilmiştir. Ölçüm sonuçlarında başlangıç gerilmesi 3,375 MPa olarak belirlenirken modellerin simülasyonunda başlangıç gerilmesi sırasıyla 3,231, 3,222 ve 3,282 MPa olarak belirlenmiştir. Gevşeme süresi sonsuz olan terim belirlenemediği için gerilme azalmasının sınır değeri hakkında yorum yapılamamıştır. Ancak kumaş modellerinde en yüksek gevşeme süreleri 100000 ve 83333 s olarak belirlenmiştir. Gerilme uzama eğrilerinde ise elastik modül 33,23, 34,56 ve 36,46 MPa olarak regresyon değeri bire oldukça yakın belirlenmiştir. Gevşeme modüllerin hesaplanmasıyla elastik modül % -18,75, -24,72 ve -21,06 sapmalar ile 26,61, 25,94 ve 28,86 MPa olarak belirlenmiştir. Oluşan farklar tamamiyle zaman katsayısı sıfır olan terimin belirlenmesinde karşılaşılan güçlükten kaynaklandığı düşünülmektedir. Çünkü başlangıç modülünün hesaplanmasında kullanılan iki yöntem arasında da sırasıyla % -14,45, -15,82 ve -14,23 değerinde sapmalar görülmüş, model yardımıyla belirlemeye çalışılan elastik ve başlangıç modülünün orantısal ilişkisi ile elastik modüldeki hata ile başlangıç modülü

hata değerleri tekrar hesaplanarak sırasıyla % -14,40, -19,03 ve -16,06 değerinde bulunmuştur.

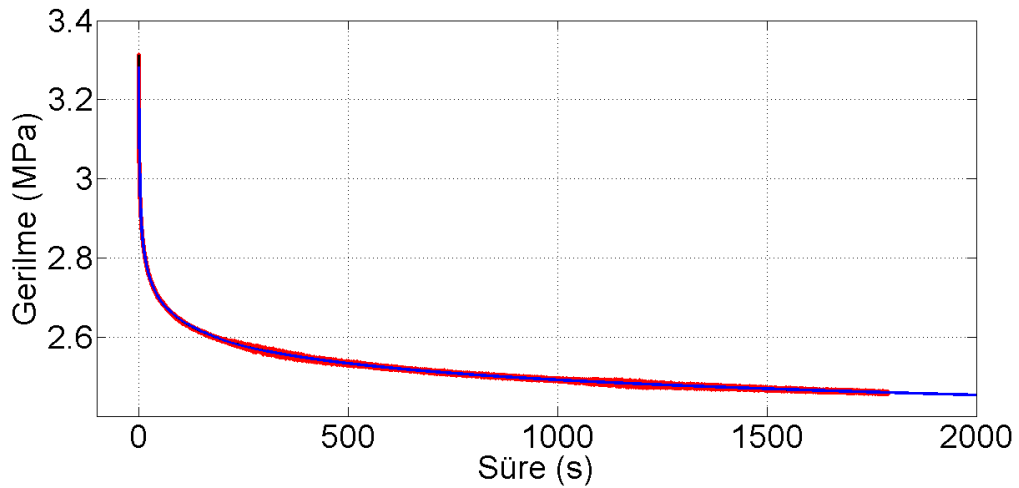
Döşemelik-21'nin gerilme azalması davranışının modellenmesi:

Döşemelik-21 için belirlenen modeller Çizelge 4.34'te verilmiştir. İncelemede, 1700 sütunlu Hankel matrisli çözüm ile bulunan dört parametrelili modelin hata miktarı en az olduğu belirlenmiş ve gerilme azalması davranışını en iyi temsil eden model olarak seçilmiştir.

Çizelge 4.34. Döşemelik-21: gerilme azalması modelleri

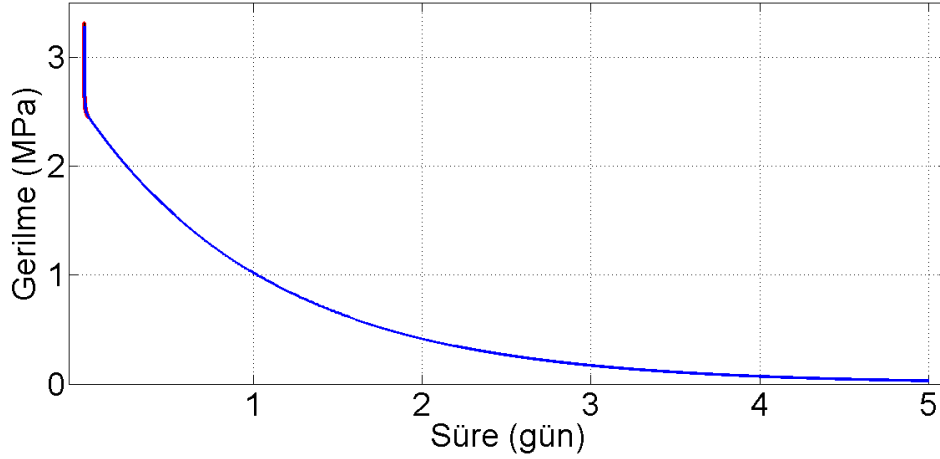
Terim		Çözüm koşulu						
No	Sembol	y,t,12,1.0	y,t,50,1.0	y,t,107,1.0	y,t,500,1.0	y,t,1000,1.0	y,t,1500,1.0	y,t,1700,1.0
1	λ_1	-0,493390	-0,364340	-0,049519	-0,069182	-0,046285	-0,064748	-0,123583
	A1	0,197601	0,356622	0,227051	0,293837	0,279407	0,294723	0,207796
2	λ_2	-0,058497	-0,078501	-0,007991	-0,012963	-0,007352	-0,006815	-0,055483
	A2	0,348279	0,045408	0,163550	0,070129	0,071825	0,126333	0,182342
3	λ_3	-0,000052	-0,012020	-0,000023	-0,002639	-0,001876	-0,000120	-0,003122
	A3	2,329618	0,218214	2,260712	0,118393	0,092755	1,588382	0,147684
4	λ_4	x	-0,000028	x	-0,000013	-0,000012	0,000145	-0,000013
	A4	x	2,274060	x	2,224561	2,217286	0,689385	2,226613
Hata miktarı (MPa)		1,041970	0,274044	0,400537	0,281517	0,339229	0,287494	0,272383

Dört parametrelili gerilme azalması modelinin ölçüm sonuçları ile uyumu Şekil 4.52'de verilen grafikte sunulmuştur.



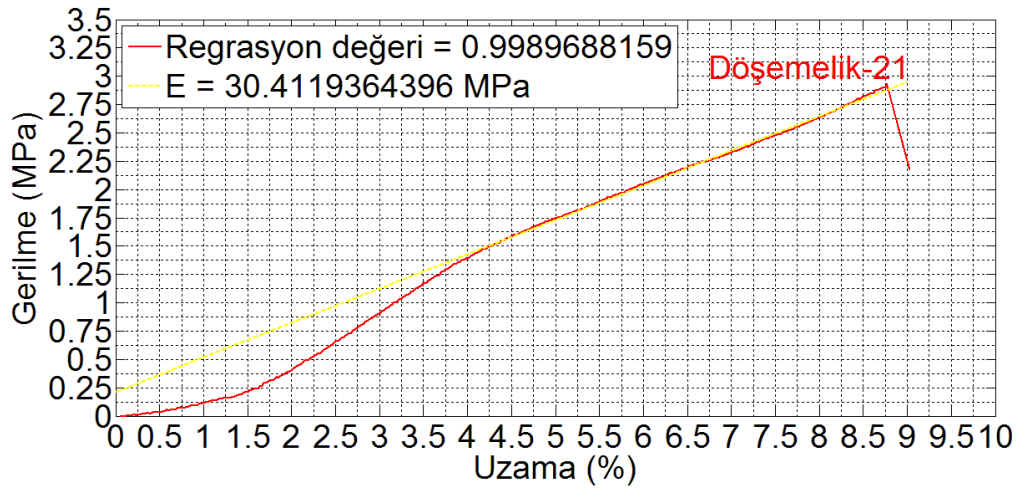
Şekil 4.52. Döşemelik-21: y,t,1700,1.0 koşulunun belirlediği 4 terimli en iyi model

Dört terimli en iyi modelin simülasyonu Şekil 4.53'te verilmiştir. Gerilme değerinin 2,894 MPa değerinden azalarak $1,32 \cdot 10^{-5}$ MPa değerine düştüğü belirlenmiştir. Modelin zaman sabiti sıfır olan terimi, gevşeme süresi 76923 s ($\lambda_4 = -0,000013$) olan terim olduğu düşünülmüştür.



Şekil 4.53. Döşemelik-21: en iyi 4 terimli modelin simülasyonu

Döşemelik-21 kumaşının gerilme azalması testinde ölçülen veriler ile gerilme uzama grafiği Şekil 4.54'te çizdirilmiştir. Kumaşın elastik modülünün 30,41 MPa olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.54. Döşemelik-21: gerilme azalması davranışının incelendiği bölgedeki modülü Çizelge 4.34'teki sabit katsayı değerlerinin kumaşın birim uzama değerine (0,0877) bölünmesiyle Çizelge 4.35'te verilen modelin gevşeme modülleri hesaplanmıştır.

Çizelge 4.35. Döşemelik-21: gevşeme ve başlangıç modülleri

Modül E _j (0) (MPa)	Çözüm koşulu						
	y,t,12,1.0	y,t,50,1.0	y,t,107,1.0	y,t,500,1.0	y,t,1000,1.0	y,t,1500,1.0	y,t,1700,1.0
E1	2,253610	4,067225	2,589492	3,351168	3,186603	3,361281	2,369883
E2	3,972071	0,517873	1,865263	0,799811	0,819156	1,440814	2,079584
E3	26,568989	2,488704	25,783129	1,350260	1,057853	18,115285	1,684312
E4	x	25,935352	x	25,370822	25,287853	7,862342	25,394227
Başlangıç Modülü E(0) (MPa)	32,794670	33,009154	30,237884	30,872062	30,351466	30,779722	31,528007

Çizelge 4.36'da elastik modül ve başlangıç modül değerleri verilmiş, gevşeme modüllerinden belirlenen değerleri arasındaki fark hesaplanmıştır.

Çizelge 4.36. Döşemelik-21: modül ve başlangıç modüllü

Gerilme uzama grafiği	
Modül (MPa)	30,411936
Sorvari ve Malinen (2007)	
Uzama ϵ_0 (%)	8,77
Uzama hızı $\dot{\epsilon}$ (1/s)	0,01
E _{min} (0)	26,778925
E _{mak} (0)	40,512053
Başlangıç Modülü E(0) (MPa)	38,385429
Model	
Zaman sabiti $\lambda \approx 0$ ($1/\lambda \approx \infty$ s)	-0,000028
Sabit katsayı A($\lambda \approx 0$) (MPa)	2,274060
Uzama ϵ_0 (%)	8,77
Modül E ($\lambda \approx 0$) (MPa)	25,935352
Modülün hata miktarı (%)	-14,72
Başlangıç modülü E(0) (MPa)	33,009154
Başlangıç modülünün hata miktarı (%)	-14,01

Elastik modüldeki hata miktarı ile başlangıç modülünün hata miktarının hesaplanması sonucunda % -11,57 değeri bulunmuştur.

Döşemelik-22'nin gerilme azalması davranışının modellenmesi :

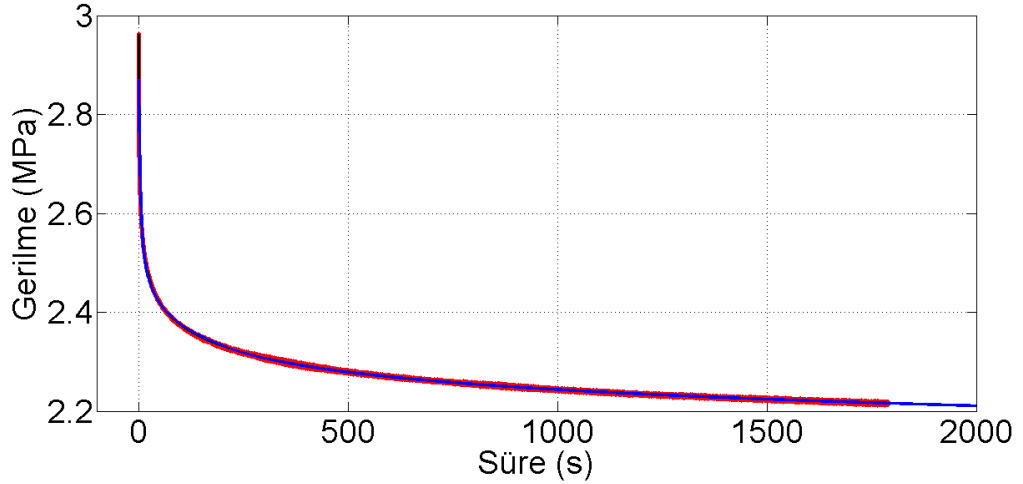
Döşemelik-22 için belirlenen modeller

Çizelge 4.37'de verilmiştir. İncelemede, 1500 sütunlu Hankel matrisli çözümden bulunan beş parametrelili modelin hata miktarı en az olduğu belirlenmiş ve gerilme azalması davranışını en iyi temsil eden model olarak seçilmiştir.

Çizelge 4.37. Döşemelik-22: gerilme azalması modelleri

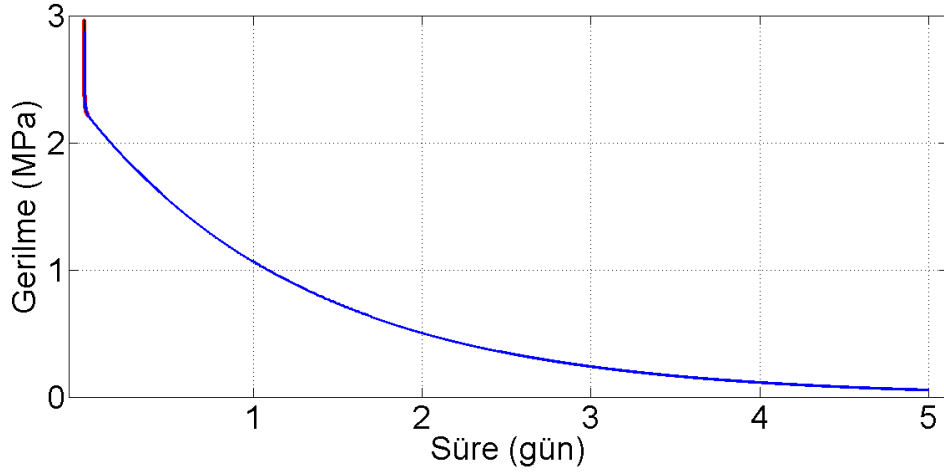
Terim		Çözüm koşulu						
No	Sembol	y,t,12,1.0	y,t,50,1.0	y,t,107,1.0	y,t,500,1.0	y,t,1000,1.0	y,t,1500,1.0	y,t,1700,1.0
1	$\lambda 1$	-0,485032	-0,465864	-0,218254	-0,202997	-0,077815	-0,234490	-0,275957
	A1	0,185957	0,340581	0,330154	0,317736	0,290290	0,303845	0,270849
2	$\lambda 2$	-0,057973	-0,093679	-0,043424	-0,035294	-0,011706	-0,049828	-0,049131
	A2	0,348015	0,051365	0,073935	0,095097	0,097580	0,108262	0,182750
3	$\lambda 3$	-0,000050	-0,014095	-0,006700	-0,008506	-0,002038	-0,008800	-0,003839
	A3	2,366290	0,230149	0,173385	0,094839	0,114529	0,110980	0,151687
4	$\lambda 4$	x	-0,000029	-0,000020	-0,001956	-0,000009	-0,001837	-0,000014
	A4	x	2,317108	2,293111	0,101858	2,249500	0,101463	2,272087
5	$\lambda 5$	x	x	x	-0,000009	x	-0,000009	x
	A5	x	x	x	2,249812	x	2,246666	x
Hata miktarı (MPa)		1,037953	0,338069	0,180994	0,136927	0,255279	0,128084	0,146911

Beş parametrelili gerilme azalması modelinin ölçüm sonuçları ile uyumu Şekil 4.55'te verilen grafikte sunulmuştur.



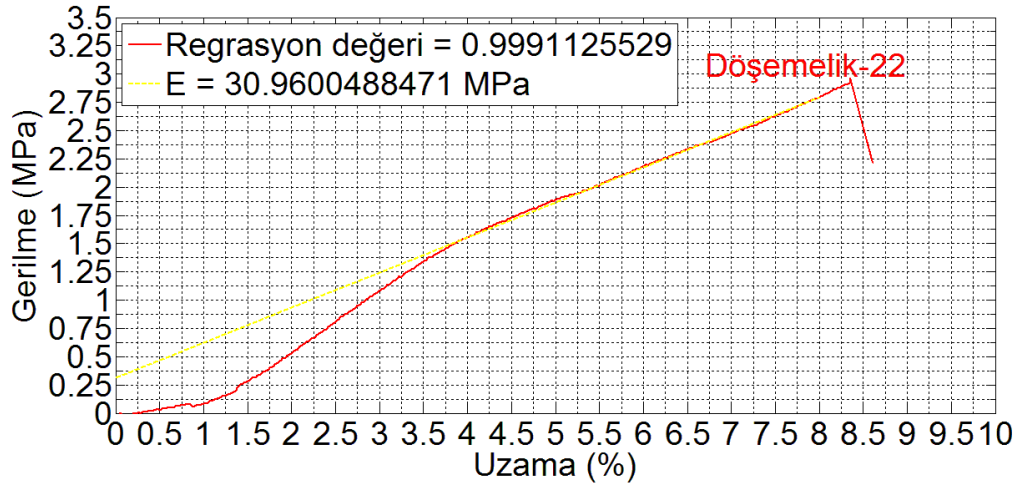
Şekil 4.55. Döşemelik-22: y,t,500,1.0 koşulunun belirlediği 5 terimli en iyi model

Beş terimli en iyi modelin simülasyonu Şekil 4.56'da verilmiştir. Gerilme değerinin 2,871 MPa değerinden azalarak 0,053 MPa değerine düştüğü belirlenmiştir. Modelin zaman sabiti sıfır olan terimi, gevşeme süresi 111111 s ($\lambda 5 = -0,000009$) olan terim olduğu düşünülmüştür.



Şekil 4.56. Döşemelik-22: en iyi 5 terimli modelin simülasyonu

Döşemelik-22 kumaşının gerilme azalması testinde ölçülen veriler ile gerilme uzama grafiği Şekil 4.57’de çizdirilmiştir. Kumaşın elastik modülünün 30,96 MPa olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.57. Döşemelik-22: gerilme azalması davranışının incelendiği bölgedeki modülü

Çizelge 4.37’deki sabit katsayı değerlerinin kumaşın birim uzama değerine (0,0835) bölünmesiyle Çizelge 4.38’de verilen modelin gevşeme modülleri hesaplanmıştır.

Çizelge 4.38. Döşemelik-22: gevşeme ve başlangıç modülleri

Modül $E_j(0)$ (MPa)	Çözüm koşulu						
	y,t,12,1.0	y,t,50,1.0	y,t,107,1.0	y,t,500,1.0	y,t,1000,1.0	y,t,1500,1.0	y,t,1700,1.0
E1	2,226148	4,077201	3,952373	3,803713	3,475145	3,637426	3,242413
E2	4,166200	0,614906	0,885094	1,138440	1,168162	1,296041	2,187760
E3	28,327580	2,755181	2,075643	1,135350	1,371064	1,328579	1,815891
E4	x	27,738802	27,451530	1,219367	26,929452	1,214647	27,199849
E5	x	x	x	26,933180	x	26,895523	x
Başlangıç Modülü E(0) (MPa)	34,719927	35,186089	34,364640	34,230051	32,943823	34,372216	34,445913

Çizelge 4.39'da elastik modül ve başlangıç modül değerleri verilmiş, gevşeme modüllerinden belirlenen değerleri arasındaki fark hesaplanmıştır.

Çizelge 4.39. Döşemelik-22: modül ve başlangıç modüllü

Gerilme uzama grafiği	
Modül (MPa)	30,960049
Sorvari ve Malinen (2007)	
Uzama ϵ_0 (%)	8,35
Uzama hızı $\dot{\epsilon}$ (1/s)	0,01
$E_{min}(0)$	25,727948
$E_{mak}(0)$	42,875480
Başlangıç Modülü E(0) (MPa)	40,535119
Model	
Zaman sabiti $\lambda \approx 0$ ($1/\lambda \approx \infty$ s)	-0,000009
Sabit katsayı A($\lambda \approx 0$) (MPa)	2,246666
Uzama ϵ_0 (%)	8,35
Modül E ($\lambda \approx 0$) (MPa)	26,895523
Modülün hata miktarı (%)	-13,13
Başlangıç modülü E(0) (MPa)	34,372216
Başlangıç modülünün hata miktarı (%)	-15,20

Elastik modüldeki hata miktarı ile başlangıç modülünün hata miktarının hesaplanması sonucunda % -10,27 değeri bulunmuştur.

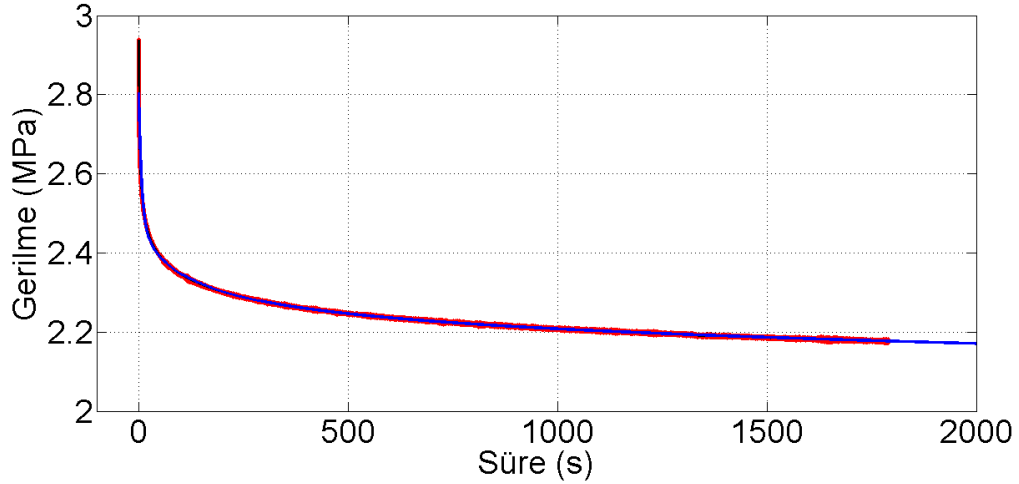
Döşemelik-23'nin gerilme azalması davranışının modellenmesi :

Döşemelik-23 için belirlenen modeller Çizelge 4.40'da verilmiştir. İncelemede, 1700 sütunlu Hankel matrisli çözümden bulunan dört parametrelili modelin hata miktarı en az olduğu belirlenmiş ve gerilme azalması davranışını en iyi temsil eden model olarak seçilmiştir.

Çizelge 4.40. Döşemelik-23: gerilme azalması modelleri

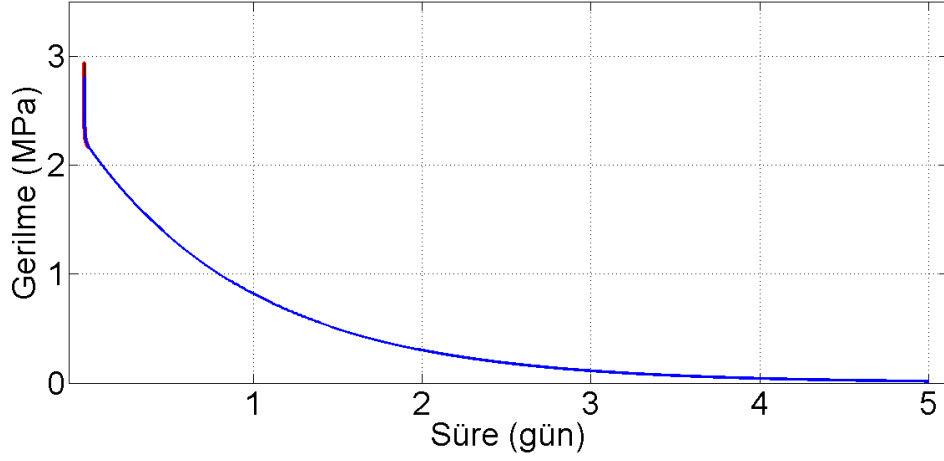
Terim		Çözüm koşulu						
No	Sembol	y,t,12,1.0	y,t,50,1.0	y,t,107,1.0	y,t,500,1.0	y,t,1182,1.0	y,t,1500,1.0	y,t,1700,1.0
1	$\lambda 1$	-0,480697	-0,376410	-0,216630	-0,148144	-0,058242	-0,112267	-2,368518
	A1	0,181497	0,350609	0,331562	0,316329	0,288925	0,299237	0,300654
2	$\lambda 2$	-0,057189	-0,084219	-0,042589	-0,030773	-0,006873	-0,015613	-0,048031
	A2	0,355535	0,033764	0,073298	0,066714	0,112902	0,125320	0,251146
3	$\lambda 3$	-0,000053	-0,012951	-0,006779	-0,008494	-0,000853	-0,002241	-0,003950
	A3	2,337964	0,233739	0,179412	0,096604	0,154018	0,123248	0,152077
4	$\lambda 4$	x	-0,000030	-0,000023	-0,002044	0,000000	-0,000012	-0,000017
	A4	x	2,283864	2,263134	0,105095	2,142842	2,221530	2,242264
5	$\lambda 5$	x	x	x	-0,000012	x	x	x
	A5	x	x	x	2,219787	x	x	x
Hata miktarı (MPa)		1,062403	0,314632	0,181152	0,171274	0,290135	0,207910	0,149630

Dört parametrelili gerilme azalması modelinin ölçüm sonuçları ile uyumu Şekil 4.58’de verilen grafikte sunulmuştur.



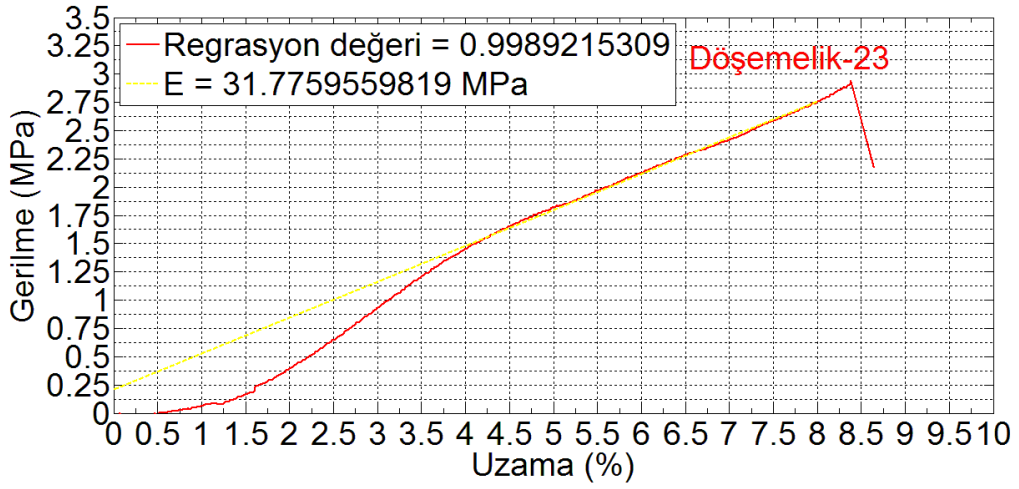
Şekil 4.58. Döşemelik-23: y,t,1700,1.0 koşulunun belirlediği 4 terimli en iyi model

Dört terimli en iyi modelin simülasyonu Şekil 4.59’da verilmiştir. Gerilme değerinin 2,805 MPa değerinden azalarak 0,014 MPa değerine düştüğü belirlenmiştir. Modelin zaman sabiti sıfır olan terimi, gevşeme süresi 58824 s ($\lambda 4 = -0,000017$) olan terim olduğu düşünülmüştür.



Şekil 4.59. Döşemelik-23: en iyi 4 terimli modelin simülasyonu

Döşemelik-23 kumaşının gerilme azalması testinde ölçülen veriler ile gerilme uzama grafiği Şekil 4.60'da çizdirilmiştir. Kumaşın elastik modülünün 31,77 MPa olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.60. Döşemelik-23: gerilme azalması davranışının incelendiği bölgedeki modülü

Çizelge 4.40'daki sabit katsayı değerlerinin kumaşın birim uzama değerine (0,0838) bölünmesiyle Çizelge 4.41'de verilen modelin gevşeme modülleri hesaplanmıştır.

Çizelge 4.41. Döşemelik-23: gevşeme ve başlangıç modülleri

Modül $E_j(0)$ (MPa)	Çözüm koşulu						
	y,t,12,1,0	y,t,50,1,0	y,t,107,1,0	y,t,500,1,0	y,t,1182,1,0	y,t,1500,1,0	y,t,1700,1,0
E1	2,164869	4,181998	3,954815	3,773123	3,446247	3,569245	3,586152
E2	4,240763	0,402732	0,874280	0,795752	1,346673	1,494794	2,995620
E3	27,886822	2,787993	2,139997	1,152278	1,837101	1,470085	1,813947
E4	x	27,241527	26,994269	1,253549	25,559447	26,498025	26,745332
E5	x	x	x	26,477226	x	x	x
Başlangıç Modülü $E(0)$ (MPa)	34,292454	34,614250	33,963361	33,451928	32,189468	33,032149	35,141051

Çizelge 4.42’de elastik modül ve başlangıç modül değerleri verilmiş, gevşeme modüllerinden belirlenen değerleri arasındaki fark hesaplanmıştır.

Çizelge 4.42. Döşemelik-23: modül ve başlangıç modüllü

Gerilme uzama grafiği	
Modül (MPa)	31,775956
Sorvari ve Malinen (2007)	
Uzama ϵ_0 (%)	8,38
Uzama hızı $\dot{\epsilon}$ (1/s)	0,01
$E_{min}(0)$	29,529911
$E_{mak}(0)$	42,588416
Başlangıç Modülü $E(0)$ (MPa)	40,362633
Model	
Zaman sabiti $\lambda \approx 0$ ($1/\lambda \approx \infty$ s)	-0,000012
Sabit katsayı $A(\lambda \approx 0)$ (MPa)	2,219787
Uzama ϵ_0 (%)	8,38
Modül $E(\lambda \approx 0)$ (MPa)	26,477226
Modülün hata miktarı (%)	-16,68
Başlangıç modülü $E(0)$ (MPa)	33,451928
Başlangıç modülünün hata miktarı (%)	-17,12

Başlangıç modülünün hata miktarının elastik modüldeki hata miktarıyla hesaplanan sonucu % 13,20 olarak bulunmuştur..

Döşemelik-2 kumaşının kurulan modellerinin değerlendirilmesi:

Sütun sayısı 1500 ve 1700 Hankel matrislerinin analiz programında kullanılması ile toplam hata oranı en az olan 4 ve 5 terimli modeller Döşemelik-2 (dimi 2/2, 333 gr/m², 1,7 mm) kumaşları için belirlenmiştir. En küçük hata miktarı (0,128 MPa) yinede 5 terimli modelde görülmüştür. Ölçüm sonuçlarında başlangıç gerilmesi 2,875 MPa olarak belirlenirken modellerin simülasyonunda başlangıç gerilmesi 2,805, 2,871 ve

2,894 MPa olarak belirlenmiştir. Gevşeme süresi sonsuz olan terim belirlenemediği için gerilme azalmasının sınır değeri hakkında yorum yapılamamıştır. Ancak kumaş modellerinde en yüksek gevşeme süreleri 58824, 76923 ve 111111 s olarak belirlenmiştir. Gerilme uzama eğrilerinde ise elastik modül 30,41, 30,96 ve 31,77 MPa olarak regrasyon değeri yine bire yakın belirlenmiştir. Gevşeme modüllerin hesaplanmasıyla elastik modül % -14,72, -13,13 ve -16,68 sapmalar ile 25,39, 26,89 ve 26,75 MPa olarak belirlenmiştir. Başlangıç modülünün hesaplanmasında kullanılan iki yöntem arasında da sırasıyla % -14,72, -13,13 ve -16,68 değerinde sapmalar görülmüş, model yardımıyla belirlemeye çalışılan elastik ve başlangıç modülünün orantısal ilişkisi ile elastik modüldeki hata ile başlangıç modülü hata değerleri tekrar hesaplanarak sırasıyla % -11,27, -10,27 ve -13,20 değerinde bulunmuştur.

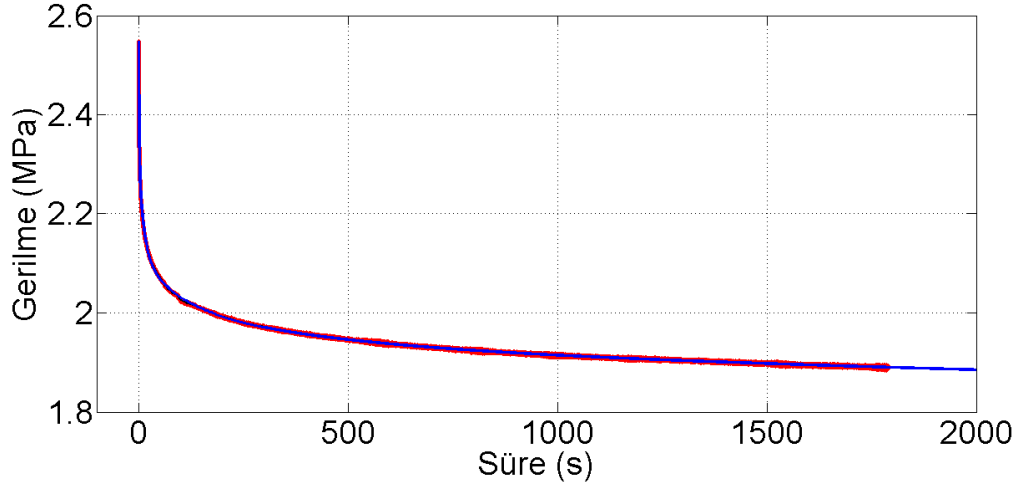
Döşemelik-31'nin gerilme azalması davranışının modellenmesi:

Döşemelik-31 için belirlenen modeller Çizelge 4.43'te verilmiştir. İncelemede, 500 sütunlu Hankel matrisli çözümden bulunan beş parametrelili modelin hata miktarı en az olduğu belirlenmiş ve gerilme azalması davranışını en iyi temsil eden model olarak seçilmiştir.

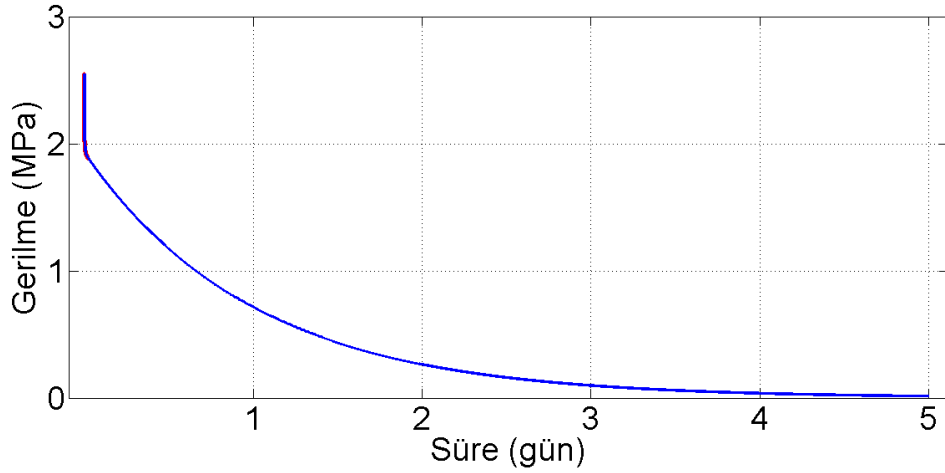
Çizelge 4.43. Döşemelik-31: gerilme azalması modelleri

Terim		Çözüm koşulu						
No	Sembol	y,t,15,1.0	y,t,50,1.0	y,t,103,1.0	y,t,500,1.0	y,t,1182,1.0	y,t,1500,1.0	y,t,1700,1.0
1	$\lambda 1$	-0,428464	-0,187937	-0,137517	-0,949306	-0,176308	-0,120098	-0,069641
	A1	0,171975	0,225527	0,297709	0,240157	0,264857	0,273482	0,262581
2	$\lambda 2$	-0,050920	-0,019445	-0,028032	-0,082127	-0,026193	-0,015652	-0,005278
	A2	0,295005	0,218461	0,012895	0,186240	0,123668	0,101159	0,145076
3	$\lambda 3$	-0,000050	-0,000034	-0,007874	-0,011830	-0,003201	-0,002657	-0,000017
	A3	2,020680	1,988283	0,149096	0,096731	0,118111	0,104303	1,948314
4	$\lambda 4$	x	x	-0,000026	-0,002446	-0,000014	-0,000012	x
	A4	x	x	1,969680	0,096607	1,935684	1,930921	x
5	$\lambda 5$	x	x	x	-0,000012	x	x	x
	A5	x	x	x	1,928304	x	x	x
Hata miktarı (MPa)		0,879334	0,430788	0,230763	0,041258	0,137435	0,171086	0,246986

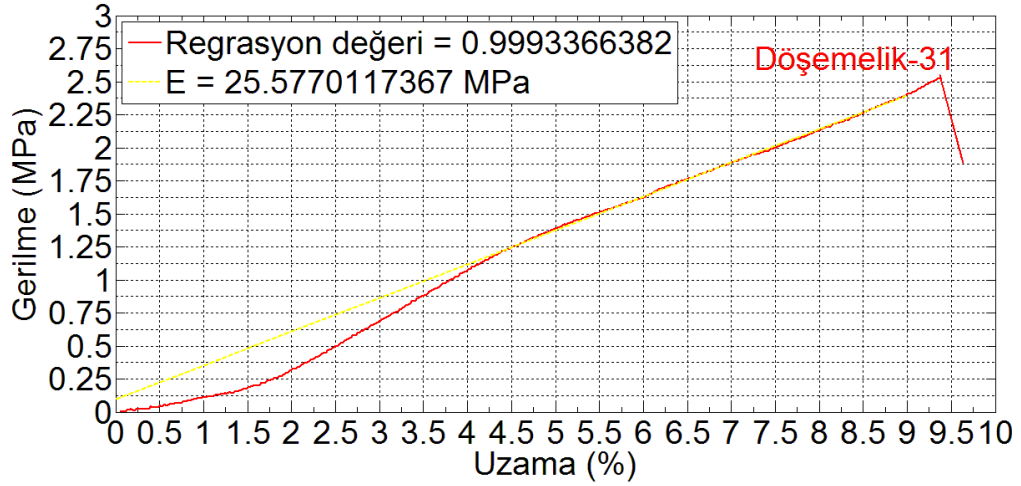
Beş parametrelili gerilme azalması modelinin ölçüm sonuçları ile uyumu Şekil 4.61'de verilen grafikte sunulmuştur.



Şekil 4.61. Döşemelik-31: y,t,500,1.0 koşulunun belirlediği 5 terimli, en iyi model Beş terimli, en iyi modelin simülasyonu Şekil 4.62’de verilmiştir. Gerilme değerinin 2,548 MPa değerinden azalarak 0,013 MPa değerine düştüğü belirlenmiştir. Modelin zaman sabiti sıfır olan terimi, gevşeme süresi 83333 s ($\lambda_5 = -0,000012$) olan terim olduğu düşünülmüştür.



Şekil 4.62. Döşemelik-31: en iyi 5 terimli modelin simülasyonu Döşemelik-31 kumaşının gerilme azalması testinde ölçülen veriler ile gerilme uzama grafiği Şekil 4.63’te çizdirilmiştir. Kumaşın elastik modülünün 25,57 MPa olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.63. Döşemelik-31: gerilme azalması davranışının incelendiği bölgedeki modülü Çizelge 4.43'teki sabit katsayı değerlerinin kumaşın birim uzama değerine (0,0937) bölünmesiyle Çizelge 4.44'te verilen modelin gevşeme modülleri hesaplanmıştır.

Çizelge 4.44. Döşemelik-31: gevşeme ve başlangıç modülleri

Modül $E_j(0)$ (MPa)	Çözüm koşulu						
	$y,t,15,1.0$	$y,t,50,1.0$	$y,t,103,1.0$	$y,t,500,1.0$	$y,t,1182,1.0$	$y,t,1500,1.0$	$y,t,1700,1.0$
E1	1,834840	2,406190	3,176323	2,562280	2,825815	2,917838	2,801536
E2	3,147467	2,330801	0,137578	1,987033	1,319437	1,079287	1,547850
E3	21,559054	21,213401	1,590741	1,032044	1,260153	1,112828	20,786957
E4	x	x	21,014925	1,030723	20,652210	20,601397	x
E5	x	x	x	20,573472	x	x	x
Başlangıç Modülü $E(0)$ (MPa)	26,541361	25,950391	25,919567	27,185551	26,057615	25,711350	25,136342

Çizelge 4.45'te elastik modül ve başlangıç modül değerleri verilmiş, gevşeme modüllerinden belirlenen değerleri arasındaki fark hesaplanmıştır.

Çizelge 4.45. Döşemelik-31: modül ve başlangıç modüllü

Gerilme uzama grafiği	
Modül (MPa)	25,577012
Sorvari ve Malinen (2007)	
Uzama ε_0 (%)	9,37
Uzama hızı $\dot{\varepsilon}$ (1/s)	0,01
$E_{\min}(0)$	22,523659
$E_{\max}(0)$	32,890946
Başlangıç Modülü $E(0)$ (MPa)	31,354676
Model	
Zaman sabiti $\lambda \approx 0$ ($1/\lambda \approx \infty$ s)	-0,000012
Sabit katsayı $A(\lambda \approx 0)$ (MPa)	1,928304
Uzama ε_0 (%)	9,37
Modül $E(\lambda \approx 0)$ (MPa)	20,573472
Modülün hata miktarı (%)	-19,56
Başlangıç modülü $E(0)$ (MPa)	27,185551
Başlangıç modülünün hata miktarı (%)	-13,30

Elastik modüldeki hata miktarı ile başlangıç modülünün hata miktarının hesaplanması sonucunda % -14,80 değeri bulunmuştur.

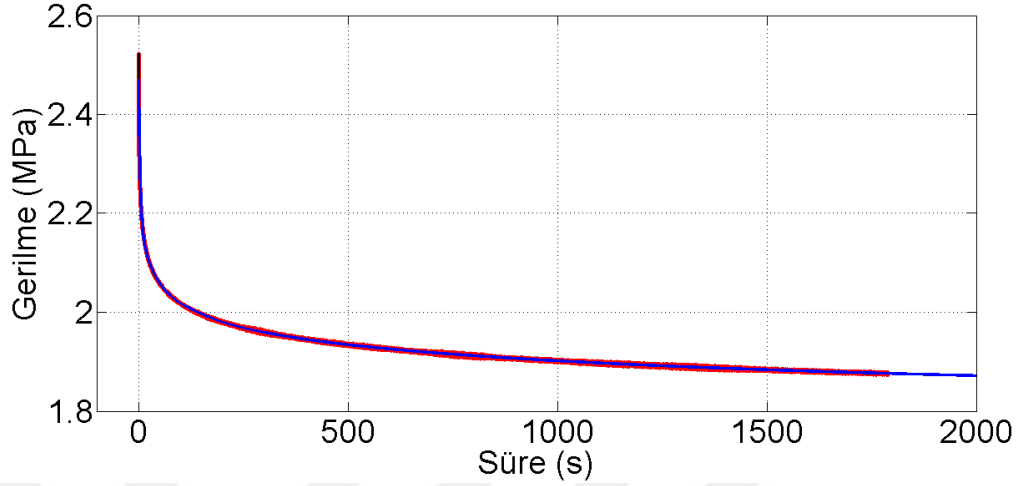
Döşemelik-32'nin gerilme azalması davranışının modellenmesi :

Döşemelik-32 için belirlenen modeller Çizelge 4.46'da verilmiştir. İncelemede, 1500 sütunlu Hankel matrisli çözümden bulunan beş parametrelili modelin hata miktarı en az olduğu belirlenmiş ve gerilme azalması davranışını en iyi temsil eden model olarak seçilmiştir.

Çizelge 4.46. Döşemelik-32: gerilme azalması modelleri

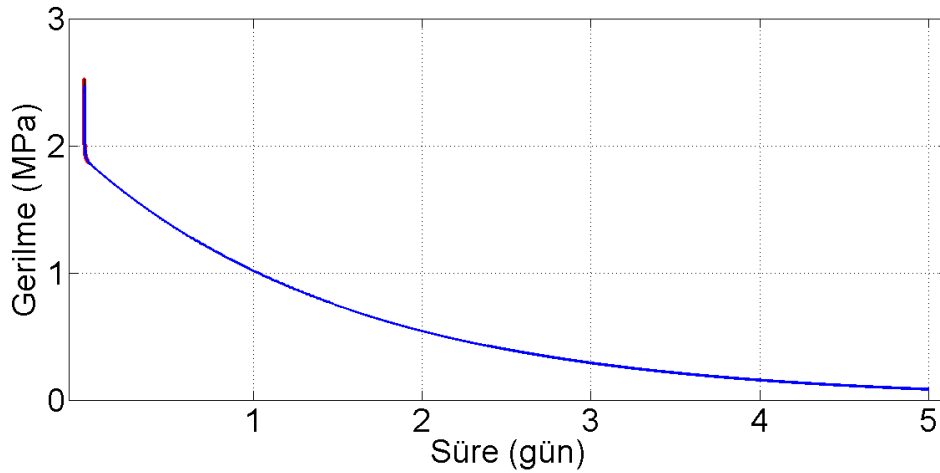
Terim		Çözüm koşulu						
No	Sembol	y,t,13,1.0	y,t,50,1.0	y,t,103,1.0	y,t,500,1.0	y,t,1000,1.0	y,t,1500,1.0	y,t,1700,1.0
1	$\lambda 1$	-0,444024	-0,385464	-0,212659	-0,174659	-0,144800	-0,299565	-0,144306
	A1	0,164113	0,294044	0,286436	0,277315	0,272518	0,278782	0,261220
2	$\lambda 2$	-0,052405	-0,082817	-0,041649	-0,031111	-0,025448	-0,038749	-0,020585
	A2	0,294502	0,042334	0,060436	0,062456	0,066983	0,112388	0,112223
3	$\lambda 3$	-0,000051	-0,012437	-0,006653	-0,009895	-0,007555	-0,008131	-0,002663
	A3	2,008303	0,192960	0,152927	0,078906	0,069537	0,088363	0,114177
4	$\lambda 4$	x	-0,000029	-0,000022	-0,002113	-0,002048	-0,001532	-0,000012
	A4	x	1,964784	1,946400	0,098627	0,088519	0,097156	1,916432
5	$\lambda 5$	x	x	x	-0,000010	-0,000011	-0,000007	x
	A5	x	x	x	1,908842	1,910717	1,894246	x
Hata miktarı (MPa)		0,858632	0,264845	0,157800	0,125659	0,145192	0,075471	0,149872

Beş parametrelı gerılme azalması modelının ölçüm sonuçları ile uyumu Şekil 4.64'te verilen grafikte sunulmuştur.



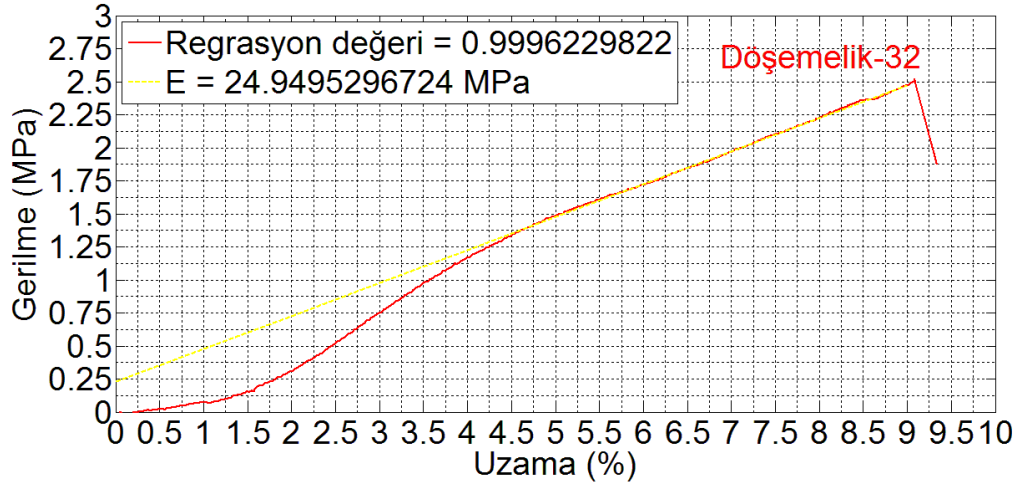
Şekil 4.64. Döşemelik-32: y,t,1500,1.0 koşulunun belirlediği 5 terimli en iyi model

Beş terimli en iyi modelin simülasyonu Şekil 4.65'te verilmiştir. Gerilme değerinin 2,471 MPa değerinden azalarak 0,082 MPa değerine düştüğü belirlenmiştir. Modelin zaman sabiti sıfır olan terimi, gevşeme süresi 142857 s ($\lambda_5 = -0,000007$) olan terim olduğu düşünülmüştür.



Şekil 4.65. Döşemelik-32: 5 terimli en iyi modelin simülasyonu

Döşemelik-32 kumaşının gerilme azalması testinde ölçülen veriler ile gerilme uzama grafiği Şekil 4.66'da çizdirilmiştir. Kumaşın elastik modülünün 24,95 MPa olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.66. Döşemelik-32: gerilme azalması davranışının incelendiği bölgedeki modülü Çizelge 4.46'daki sabit katsayı değerlerinin kumaşın birim uzama değerine (0,0908) bölünmesiyle Çizelge 4.47'de verilen modelin gevşeme modülleri hesaplanmıştır.

Çizelge 4.47. Döşemelik-32: gevşeme ve başlangıç modülleri

Modül $E_j(0)$ (MPa)	Çözüm koşulu						
	$y,t,13,1.0$	$y,t,50,1.0$	$y,t,103,1.0$	$y,t,500,1.0$	$y,t,1000,1.0$	$y,t,1500,1.0$	$y,t,1700,1.0$
E1	1,807280	3,238132	3,154341	3,053903	3,001079	3,070052	2,876661
E2	3,243169	0,466202	0,665544	0,687787	0,737646	1,237659	1,235840
E3	22,116209	2,124949	1,684088	0,868948	0,765767	0,973086	1,257367
E4	x	21,636967	21,434517	1,086124	0,974810	1,069922	21,104490
E5	x	x	x	21,020903	21,041558	20,860173	x
Başlangıç Modülü $E(0)$ (MPa)	27,166658	27,466250	26,938490	26,717665	26,520860	27,210891	26,474357

Çizelge 4.48'de elastik modül ve başlangıç modül değerleri verilmiş, gevşeme modüllerinden belirlenen değerleri arasındaki fark hesaplanmıştır.

Çizelge 4.48. Döşemelik-32: modül ve başlangıç modüllü

Gerilme uzama grafiği	
Modül (MPa)	24,949530
Sorvari ve Malinen (2007)	
Uzama ϵ_0 (%)	9,08
Uzama hızı $\dot{\epsilon}$ (1/s)	0,01
$E_{\min}(0)$	24,472084
$E_{\max}(0)$	33,714591
Başlangıç Modülü $E(0)$ (MPa)	31,801788
Model	
Zaman sabiti $\lambda \approx 0$ ($1/\lambda \approx \infty$ s)	-0,000007
Sabit katsayı $A(\lambda \approx 0)$ (MPa)	1,894246
Uzama ϵ_0 (%)	9,08
Modül $E(\lambda \approx 0)$ (MPa)	20,860173
Modülün hata miktarı (%)	-16,39
Başlangıç modülü $E(0)$ (MPa)	27,210891
Başlangıç modülünün hata miktarı (%)	-14,44

Elastik modüldeki hata miktarı ile başlangıç modülünün hata miktarının hesaplanması sonucunda % -12,56 değeri bulunmuştur.

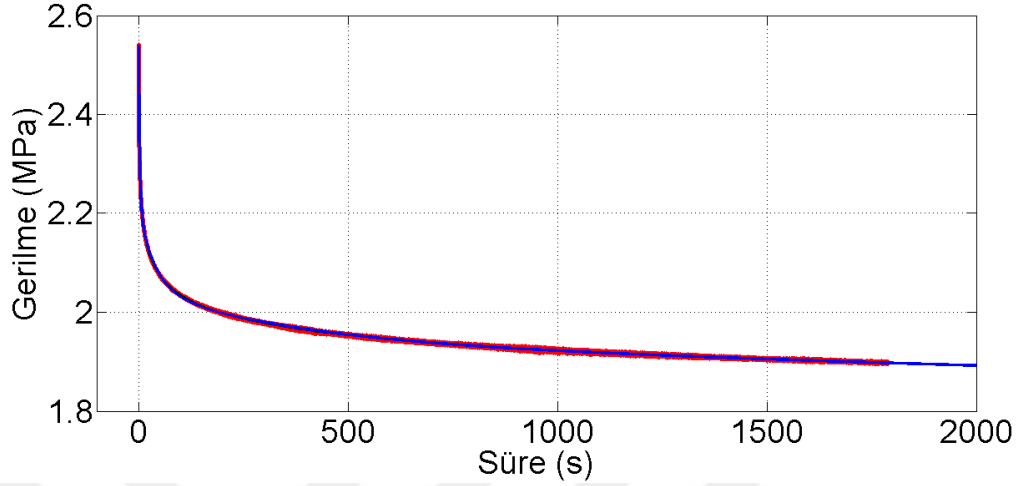
Döşemelik-33'nin gerilme azalması davranışının modellenmesi :

Döşemelik-33 için belirlenen modeller Çizelge 4.49'da verilmiştir. İncelemede, 1500 sütunlu Hankel matrisli çözümden bulunan beş parametrelili modelin hata miktarı en az olduğu belirlenmiş ve gerilme azalması davranışını en iyi temsil eden model olarak seçilmiştir.

Çizelge 4.49. Döşemelik-33: gerilme azalması modelleri

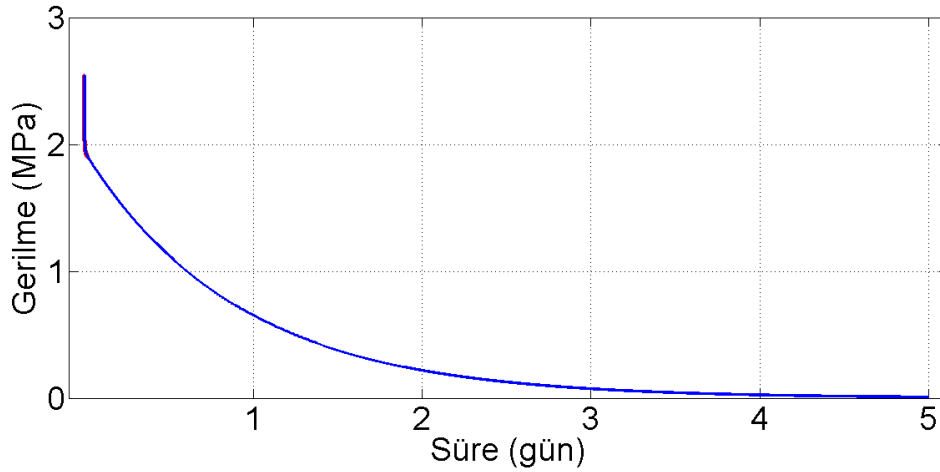
Terim		Çözüm koşulu						
No	Sembol	y,t,13,1.0	y,t,50,1.0	y,t,100,1.0	y,t,500,1.0	y,t,1000,1.0	y,t,1500,1.0	y,t,1700,1.0
1	$\lambda 1$	-0,464183	-0,461402	-0,222231	-0,195169	-0,061302	-2,521107	-0,127986
	A1	0,161477	0,286532	0,284228	0,272860	0,247136	0,098667	0,259455
2	$\lambda 2$	-0,055435	-0,092073	-0,043826	-0,035300	-0,009758	-0,316577	-0,020001
	A2	0,297459	0,052266	0,065457	0,079386	0,071991	0,226060	0,101826
3	$\lambda 3$	-0,000050	-0,013789	-0,006889	-0,008905	-0,002022	-0,027518	-0,002896
	A3	2,028615	0,197116	0,151448	0,081150	0,093238	0,164967	0,109060
4	$\lambda 4$	x	-0,000029	-0,000021	-0,002155	-0,000010	-0,002824	-0,000013
	A4	x	1,985864	1,966182	0,085837	1,929699	0,109938	1,940798
5	$\lambda 5$	x	x	x	-0,000011	x	-0,000013	x
	A5	x	x	x	1,933495	x	1,940092	x
Hata miktarı (MPa)		0,890852	0,281485	0,152168	0,115958	0,243099	0,051688	0,161440

Beş parametrelili gerilme azalması modelinin ölçüm sonuçları ile uyumu Şekil 4.67’de verilen grafikte sunulmuştur.



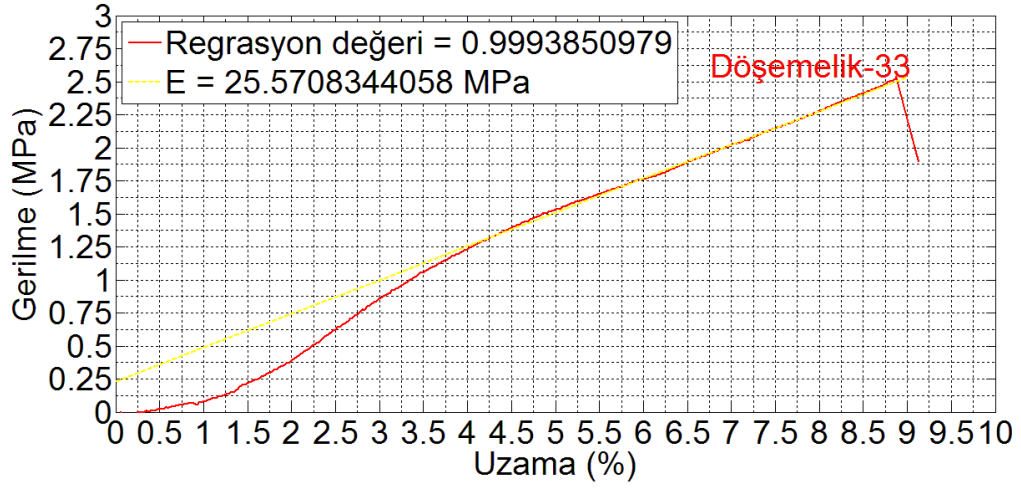
Şekil 4.67. Döşemelik-33: y,t,1500,1.0 koşulunun belirlediği 5 terimli en iyi model

Beş terimli en iyi modelin simülasyonu Şekil 4.68’de verilmiştir. Gerilme değerinin 2,540 MPa değerinden azalarak 0,008 MPa değerine düştüğü belirlenmiştir. Modelin zaman sabiti sıfır olan terimi, gevşeme süresi 76923 s ($\lambda_5 = -0,000013$) olan terim olduğu düşünülmüştür.



Şekil 4.68. Döşemelik-33: en iyi 5 terimli modelin simülasyonu

Döşemelik-33 kumaşının gerilme azalması testinde ölçülen veriler ile gerilme uzama grafiği Şekil 4.69’da çizdirilmiştir. Kumaşın elastik modülünün 25,57 MPa olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.69. Döşemelik-33: gerilme azalması davranışının incelendiği bölgedeki modülü Çizelge 4.49'daki sabit katsayı değerlerinin kumaşın birim uzama değerine (0,0887) bölünmesiyle Çizelge 4.50'de verilen modelin gevşeme modülleri hesaplanmıştır.

Çizelge 4.50. Döşemelik-33: gevşeme ve başlangıç modülleri

Modül $E_j(0)$ (MPa)	Çözüm koşulu						
	$y,t,13,1.0$	$y,t,50,1.0$	$y,t,100,1.0$	$y,t,500,1.0$	$y,t,1000,1.0$	$y,t,1500,1.0$	$y,t,1700,1.0$
E1	1,819717	3,228980	3,203011	3,074901	2,785021	1,111892	2,923848
E2	3,352113	0,588990	0,737644	0,894611	0,811282	2,547504	1,147500
E3	22,860818	2,221340	1,706697	0,914495	1,050714	1,859042	1,229014
E4	x	22,379047	22,157249	0,967316	21,746114	1,238907	21,871189
E5	x	x	x	21,788896	x	21,863236	x
Başlangıç Modülü $E(0)$ (MPa)	28,032648	28,418356	27,804601	27,640218	26,393131	28,620582	27,171551

Çizelge 4.51'de elastik modül ve başlangıç modül değerleri verilmiş, gevşeme modüllerinden belirlenen değerleri arasındaki fark hesaplanmıştır.

Çizelge 4.51. Döşemelik-33: modül ve başlangıç modüllü

Gerilme uzama grafiği	
Modül (MPa)	25,570834
Sorvari ve Malinen (2007)	
Uzama ϵ_0 (%)	8,87
Uzama hızı $\dot{\epsilon}$ (1/s)	0,01
$E_{\min}(0)$	25,251497
$E_{\max}(0)$	34,609987
Başlangıç Modülü $E(0)$ (MPa)	32,763474
Model	
Zaman sabiti $\lambda \approx 0$ ($1/\lambda \approx \infty$ s)	-0,000013
Sabit katsayı $A(\lambda \approx 0)$ (MPa)	1,940092
Uzama ϵ_0 (%)	8,87
Modül $E(\lambda \approx 0)$ (MPa)	21,863236
Modülün hata miktarı (%)	-14,50
Başlangıç modülü $E(0)$ (MPa)	28,620582
Başlangıç modülünün hata miktarı (%)	-12,64

Elastik modüldeki hata miktarı ile başlangıç modülünün hata miktarının hesaplanması sonucunda % -11,08 değeri bulunmuştur.

Döşemelik-3 kumaşın kurulan modellerinin değerlendirilmesi:

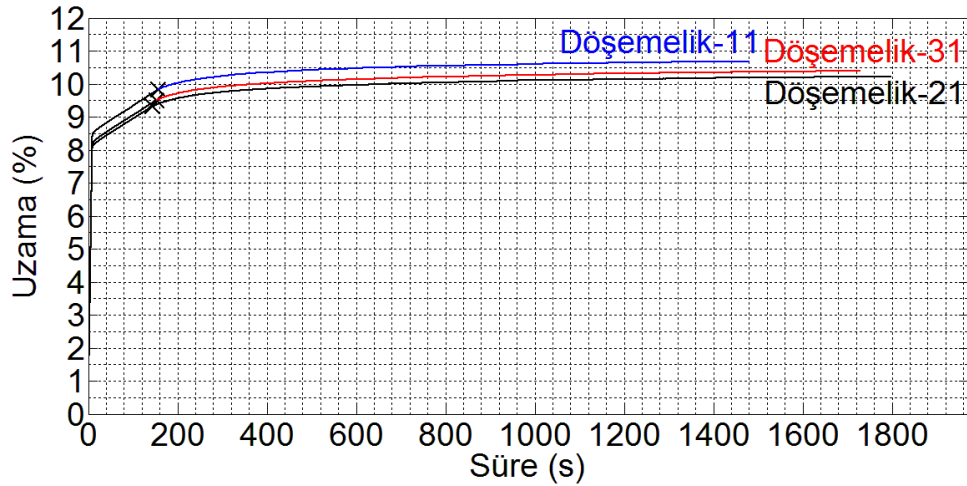
Döşemelik-3 kumaşın gerilme azalması, sütun sayısı 1500 Hankel matrisli çözümlerin belirlediği, toplam hata miktarı en az olan 5 terimli modeller ile temsil edilmiştir. Ölçüm sonuçlarında başlangıç gerilmesi 2,533 MPa olarak belirlenirken modellerin simülasyonunda başlangıç gerilmesi sırasıyla 2,548, 2,471 ve 2,540 MPa olarak belirlenmiştir. Gevşeme süresi sonsuz olan terim belirlenemediği için gerilme azalmasının sınır değeri hakkında yorum yapılamamıştır. Ancak kumaş modellerinde en yüksek gevşeme süreleri 76923, 83333 ve 142857 s olarak belirlenmiştir. Gerilme uzama eğrilerinde ise elastik modül 25,57, 24,95 ve 25,57 MPa olarak regresyon değeri bire yakın belirlenmiştir. Gevşeme modüllerin hesaplanmasıyla elastik modül % -19,56, -16,39 ve -14,50 sapmalar ile 20,57, 20,86 ve 28,86 MPa olarak belirlenmiştir. Oluşan farklar tamamıyla zaman katsayısı sıfır olan terimin belirlenmesinde karşılaşılan güçlükten kaynaklandığı düşünülmektedir. Çünkü başlangıç modülünün hesaplanmasında kullanılan iki yöntem arasında da sırasıyla % -13,30, -14,44 ve -12,64 değerinde sapmalar görülmüş, model yardımıyla belirlemeye çalışılan elastik ve başlangıç modülünün orantısal ilişkisi ve elastik modüldeki hata ile başlangıç

modülünün hata değerleri tekrar hesaplanarak sırasıyla % -14,80, -12,56 ve -11,08 değerinde bulunmuştur.

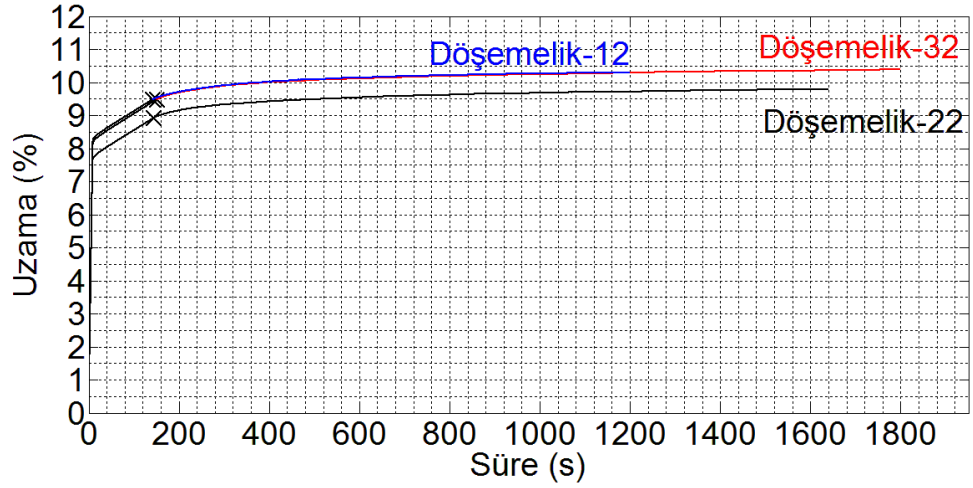
4.3.2. Sabit gerilme altında uzama (sürünme) test sonuçları

Sürünme test rutininin test periyodu veya 1800 s süresince çalıştırılması ile 250 N gerginlik altında bırakılan test numunesinin uzamasındaki değişimleri ölçülmüştür. Üç kumaş tipi için çözgü doğrultusunda sürünme davranışı Şekil 4.70, Şekil 4.72 ve Şekil 4.72' deki grafiklerde çizilmiştir.

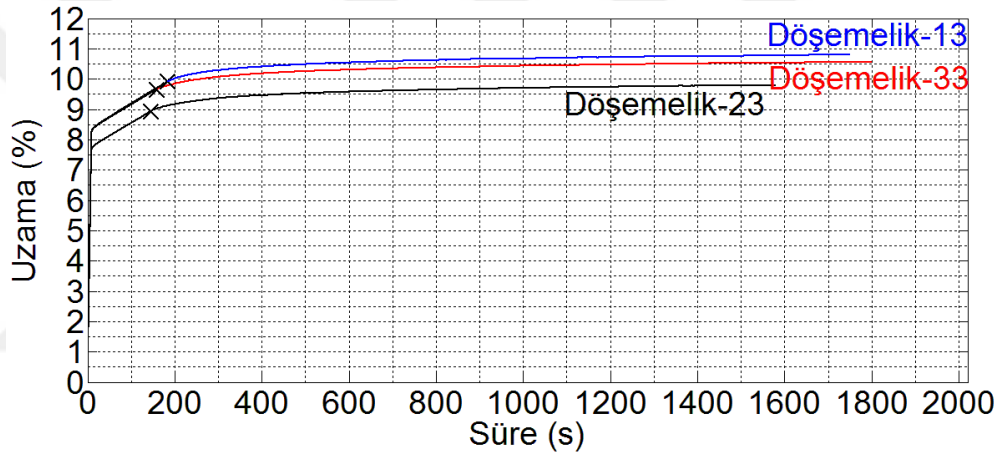
Sürünme test rutininde gerilme azalması test rutininden farklı olarak, 10 s'lik test periyodu aralıklarında uzamada değişim 10 kez kontrol edilmektedir. Uzamada bir değişim gözlenmiyorsa program testi sonlandırmaktadır. Bu test periyodu kontrol uygulaması, cihaz üzerinde uzun süreli sürünme davranışını ölçmek için geliştirilmiştir. Test gruplarında farklı süreler için ölçüm sonuçlarının çizdirilmesi belirtilen test periyodu kontrol uygulamasından kaynaklanmaktadır. Test numuneleri 250 N gerginlik seviyesine aşamalı olarak ulaşmıştır. Birinci aşamada 120 mm/dakika sabit çene hızında test numunesine 250 ± 10 N gerilme kuvveti yüklenmiş, ikinci aşamada ise test numunesi üzerinde 250 ± 1 N gerilme kuvveti oluşacak şekilde 1,2 mm/dakkika sabit hızda hareketli çenenin yer değiştirmesi kontrol altında tutularak sağlanmıştır.



Şekil 4.70. Sürünme 1 nolu grup



Şekil 4.71. Sürünme 2 nolu grup



Şekil 4.72. Sürünme 3 nolu grup

Sürünme testinde kumaş tiplerinde görülen uzama miktarındaki artışlar Çizelge 4.52 verilmiştir. Kumaş tipine göre test numunelerinin 250 ± 1 N gerginlik değerine çizelgede başlangıç bölümünde belirtilen test süresinde ve uzama miktarlarında ulaştıkları görülmektedir. Kumaş tiplerinin test süresince ölçülen uzama miktarı başlangıçtaki uzama miktarından çıkartılarak sürünme değeri bulunmaktadır. Çizelgede sürünme miktarları 1000 s test süresi ve test sonundaki değerleri hesaplanarak verilmiştir.

Çizelge 4.52. Test gruplarında 250 N sabit yük altında uzama miktarı

Test grubu		250 N gerginlik altında uzama							
		Başlangıç		1000 s			Test sonunda		
Kumaş tipi	Test tekrarı	Süre (s)	Uzama (%)	Süre (s)	Uzama (%)	Sürünme (%)	Süre (s)	Uzama (%)	Sürünme (%)
Döşemelik 1	1	156	9,83	1156	10,62	0,79	1480	10,68	0,85
	2	141	9,48	1141	10,30	0,82	1200	10,30	0,82
	3	183	9,91	1183	10,72	0,81	1750	10,79	0,88
Ortalama değeri			9,74		10,55	0,81		10,59	0,85
Döşemelik 2	1	143	9,32	1143	10,13	0,81	1796	10,22	0,90
	2	144	8,92	1144	9,71	0,78	1640	9,79	0,86
	3	145	8,94	1145	9,73	0,79	1580	9,79	0,85
Ortalama değeri			9,06		9,86	0,80		9,93	0,87
Döşemelik 3	1	152	9,51	1152	10,31	0,80	1730	10,39	0,88
	2	150	9,48	1150	10,28	0,80	1795	10,39	0,91
	3	158	9,66	1158	10,46	0,80	1800	10,56	0,90
Ortalama değeri			9,55		10,35	0,80		10,45	0,90

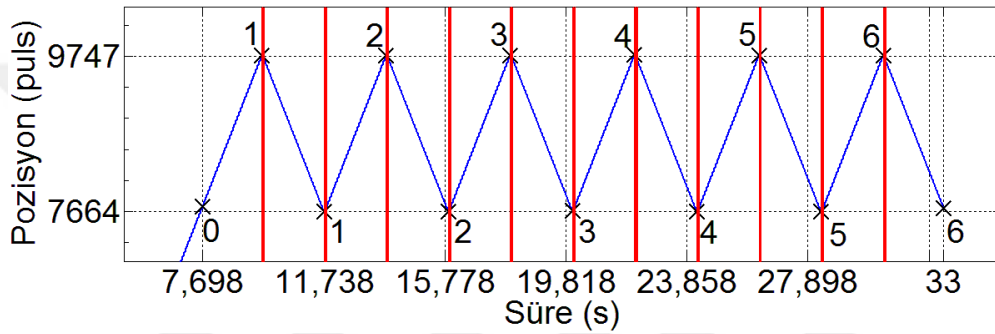
Çizelgede kumaş tipleri, 250 ± 1 N'luk gerilme kuvveti seviyesine neredeyse aynı uzama değerlerinde ulaştıkları görülmektedir. Başlangıçtaki uzama değerleri arasındaki farklar test numunelerinin aynı gerginlikte cihazın çeneleri arasına yerleştirilememesinden ve test rutininde bir ön gerilme kontrolünün olmamasından kaynaklanmaktadır. Testi yapan kişinin deneyimine bağlı olarak başlangıçtaki uzama değerleri arasında belirli miktar farkın olması doğal karşılanmıştır. Sürünme miktarının hesaplanması ile belirtilen test başında ki değişimler giderilmiştir çünkü 250 N gerilme kuvveti test numunelerine bir ön gerilme yüklemiştir.

Testin 1000 s'inde kumaş tiplerinde belirlenen ortalama sürünme miktarları sırasıyla 0,81, 0,80 ve 0,80 belirlenmiştir. Belirlenen sürünme miktarlarının birbirine eşit çıkması çözümlü doğrultusunda kumaş özelliklerinin büyük ölçüde aynı olmasından ve test süresinin az seçilmesinden kaynaklanmış olabilir.

Tez çalışması kapsamında sürünme davranışı için analiz yöntemi doktora süresinin bitmesi nedeniyle çalışılmamıştır. Ancak sürünme fonksiyonlarının çıkarılması, komplians katsayılarının belirlenmesi ve kuramsal bölümde tanıtılan Voltera integral denklemleri kullanarak gevşeme modülü ile komplians arasında dönüşüm ilişkileri (bkz Denklem 2.17 ve 2.19) üzerinde, viskoelastik davranışların araştırılması konusunun devamı niteliğinde çalışmayı sürdürmek istemekteyiz.

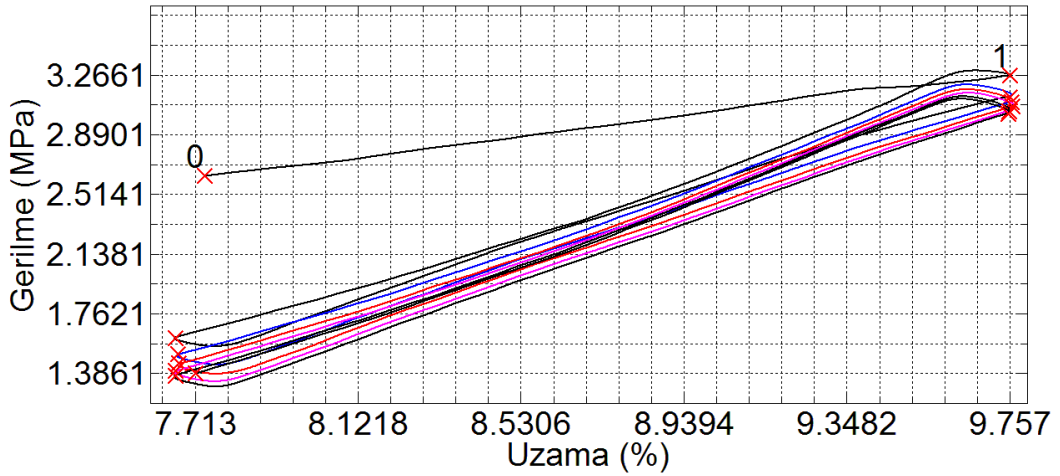
4.3.3. Dinamik zorlama test sonuçları

Kumaş tiplerine beş tekrarlı zorlama testleri uygulanmıştır. Test numunelerinin 200 N ve 250 N gerginlik değerleri arasındaki uzama miktarı süre ile ölçülerek bulunmuştur. Test rutini tarafından ölçülen süre sonunda çenenin yön değiştirmesi sağlanarak 120 mm/dakika hareketli çene hızında test tekrarları test numunelerine uygulanmış ve tekrarlanan zorlamada gerginlik değişimi ölçülmüştür. Kontrol mantığının çalışması Şekil 4.73'te gösterilmiştir. Grafikte motorun pozisyonunu mavi renkte motorun yön değiştirmesi sırasında durma anlarını ise kırmızı renkte çizilmiştir.



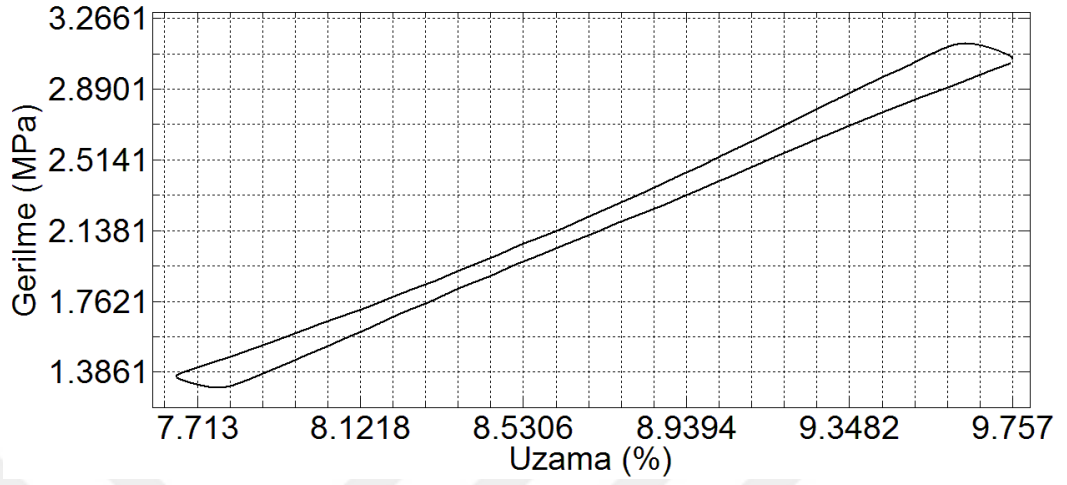
Şekil 4.73. Dinamik zorlama test rutinin çalışma mantığı

Şekil 4.74'te verilen beş tekrarlı dinamik testinde gerilme uzama eğrilerinin grafik üzerinden takip edilebilmesi için ayrı renklerde gösterilmiştir. Test tekrarlarının sabit uzama değerleri arasında gerçekleştirilmiş ve bu esnada numune üzerindeki gerginlik değişimleri izlenebilmiştir.



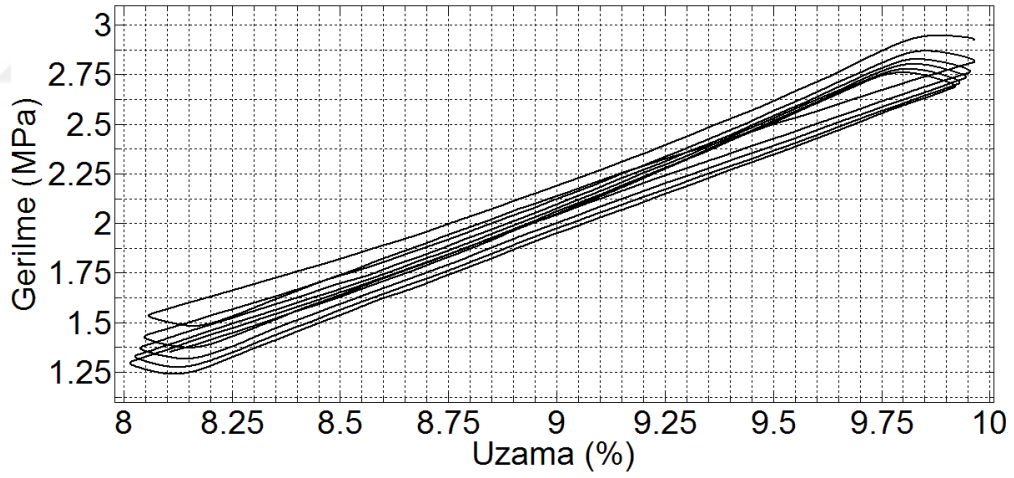
Şekil 4.74. Döşemelik 11: dinamik zorlama testi 5 tekrar

Şekil 4.74'te gerçekleştirilen test verilerinden sadece bir tekrarı Şekil 4.75'te gösterilmiştir.

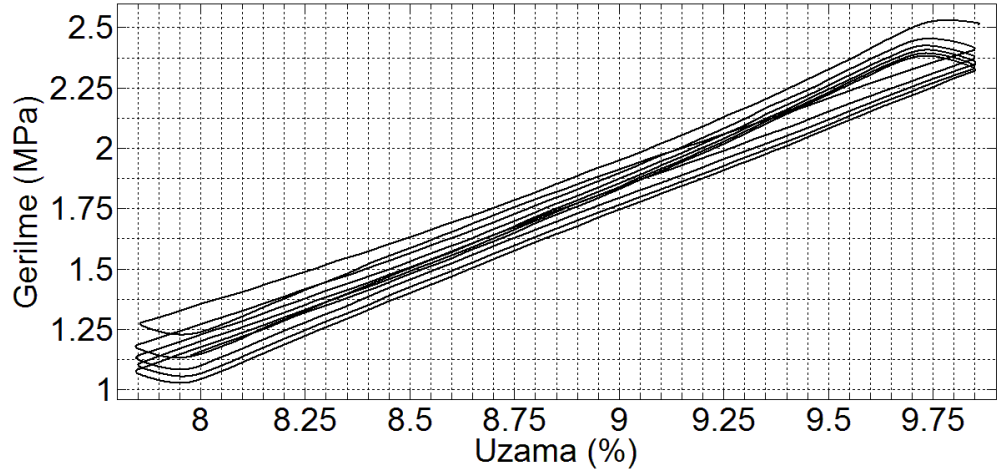


Şekil 4.75. Döşemelik 11: dinamik zorlama testi

Şekil 4.76 ve Şekil 4.77'de diğer kumaş tipleri için yapılan testlerin sonuçları verilmiştir.



Şekil 4.76. Döşemelik 21: dinamik zorlama testi 5 tekrar



Şekil 4.77. Döşemelik 31: dinamik zorlama testi 5 tekrar

Grafikler incelendiğinde testin tekrar sayılarında iki uzama değeri sabit kalacak şekilde zorlanan test numunelerinde gerilme değerlerinin azaldığı görülmektedir. Bu durum elastik olmayan uzamaların test numuneleri üzerinde yeterince geri toparlanamaması nedeniyle gerilme değerindeki azalmayı göstermektedir.

Kumaşların dinamik zorlama testleri, universal test cihazında farklı test rutinlerinin yazılımsal olarak uygulanabildiğini göstermek için verilmiştir.

5. SONUÇLAR

Bu tezin kapsamı iki kısımdan oluşmaktadır. Birinci kısımda; yatay bir gerilme test cihazı tasarlanmış, üretilmiş ve performansı ve tekstil malzemelerinin gerilme testlerine uygunluğu Instron 4301 test cihazından elde edilen kuvvet uzama eğrileri ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. İkinci kısımda; test cihazından elde edilen sonuçlar kullanılarak, dokuma kumaşların viskoelastik davranışı matematiksel yöntem kullanılarak araştırılmıştır.

Tasarlanıp üretilen yatay gerilme test cihazının performans testleri yapıp, ticari test cihazları ile sonuçlarının uyumu araştırılmıştır. Kuvvet uzama eğrilerinden elde edilen ilk sonuçlar, cihazlar arasında önemli bir farkın olduğunu göstermiştir. Bu fark cihazdan kaynaklı bir sistematik hata olarak değerlendirilmiştir. Sistematik hatanın; kumaş ve çeneler arasındaki kayma, hareketli çenenin eğilmesinden ve hareketli çene ile somun arasındaki civata bağlantısında bulunan mekanik kusurlardan kaynaklandığı görülmüştür. Yumuşak ve sürtünmeli bir malzeme çene yüzeylerine yapıştırılmış ve test edilen kumaşlar için kaymayı engelleyen bir önlem sağlanmıştır. Testin başlangıcında çenelerin kumaşı tutma noktasında kumaş üzerine konulan yatay bir çizginin konumu, kumaş koptuğunda gözlenmiş ve pratik açıdan kumaş ve çene arasında önemli bir kaymanın olmadığı görülmüştür. Diğer yandan, hareketli çene ve somun arasındaki civata bağlantıları kontrol edilerek, sağlamlaştırılmış ve hareketli çenenin rijitliğini artırıcı metal parçalar kaynaklanarak sistemin rijitliği arttırılmıştır. Buna rağmen, motor hareketi ve hareket iletim sisteminin kinematikinden hesaplanan çene hareketi ile ölçülen çene yer değiştirmesi arasında pratik açıdan anlamlı bir fark bulunmuştur. Kumaşın kopma uzamasına yakın bir yükte cihazın durdurulup hareket miktarı ölçüldüğünde, aradaki sapmanın hareketli çenenin eğilmesinden kaynaklandığı belirlenmiştir. Zaman sınırlamasından dolayı mekanik sistem üzerinde daha rijit bir yapıya sahip hareketli çene tasarımına yönelik çalışma yapılamamış olup, çenedeki eğilme bir düzeltme katsayısı kullanılarak gerçek uzama değeri elde edilmiştir. Bu şekilde belirlenen uzama değerleriyle elde edilen yük uzama eğrileri, Instron 4301'den elde edilen eğriler ile karşılaştırılmıştır. Her iki cihazdan elde edilen kopma kuvveti değerleri hemem hemen aynı iken, kopma uzaması değerlerinde küçük sapmalar

gözlenmiştir. Ayrıca her iki cihazdan elde edilen yük uzama eğrilerinin karakteristikleri büyük ölçüde örtüştüğü görülmüştür.

Servo motor çalıştırılıp hareket ettirildiğinde, yük hücresinden elde edilen ilk gerginlik sinyali üzerinde önemli oranda ani değişimler gösteren gürültü sinyal bileşenlerinin olduğu görülmüştür. Bunun yanında sürekli değişen gürültü sinyalinin varlığı da tesbit edilmiştir. Sağlıklı bir gerginlik sinyali elde etmek için bu gürültü bileşenlerinin ortadan kaldırılması, üzerinde çalışılan diğer bir konu olmuştur. Bu amaçla; yük hücresi kuvvetlendirici devresi ve güç kaynağı motor sürücü devresinin bulunduğu panodan ayrılarak, ayrı bir pano içerisine yerleştirilmiş ve sürücü devrenin etkisi azaltılmıştır. Gürültü sinyalini azaltmaya yönelik olarak; elektronik devreler arasında ekranlı kablo kullanmak ve veri toplama kartına yapılan optokuplör elemanları üzerinden dijital sinyal göndermek gibi ek önlemler alınmıştır. Bu sayede sistemdeki gürültü seviyesi en aza indirilmiştir. Ancak analog sinyal üzerinde bulunan ± 10 mV değerindeki gürültü sinyalinin önüne geçilememiştir. Dijital filtreleme yöntemleri uygulanarak, mevcut olan gürültü sinyal bileşeni azaltılmaya çalışılmıştır. Bu amaçla, öncelikle alçak frekans geçirimli bir RC filtre yazılımı uygulanmıştır. Bu temel dijital filtreleme tekniğinin uygulamada verdiği sonuçlardan yola çıkarak yük hücresinin analog sinyalinin dijital filtreleme teknikleri ile azaltılabileceği görülmüştür. Ancak RC dijital filtreleme tekniğinde kullanılan kesikli fonksiyonun katsayılarının belirlenmesinde zorluklarla karşılaşmıştır. Bu nedenle, dijital sinyal işleme için geliştirilen Matlab'ın hazır filtreleme fonksiyonları kullanılmıştır. Test rutinlerinin uygulanmasında alçak geçirimli Parks McClellan filtresi kullanılmış ve olumlu sonuçlar elde edilmiştir. Buna ilave olarak analog sinyalin gerilme değerlerine dönüştürülmesi sırasında $\pm 0,007$ MPa değerindeki gürültü sinyali belirlenmiş ve gürültü Savitzky-Golay ve hareketli ortalama (moving average) filtresi kullanılarak gerilme eğrisi ölçüm sonuçlarını yansıtacak şekilde düzeltilmiştir.

Cihaz üzerinde ve sinyal işleme çalışmalarından sonra, kuvvet uzama eğrisine benzer dinamik zorlama, sabit yük altında sürünme ve sabit uzama altında gerginlik azalması testleri için test rutinleri geliştirilmiş ve yapılan kumaş testleri ile düzgün çalışmaları gösterilmiştir.

Çalışmanın ikinci kısmında Prony serisi kullanılarak dokuma kumaşlar için herhangi bir mekanik benzeşim modeli kurulmadan matematiksel analiz yöntemi ile viskoelastik davranış modelinin belirlenebilmesi araştırılmıştır. Prony serisi kullanılarak viskoelastik davranışın modellenmesi belirli miktar deneysel veriye ihtiyaç duymaktadır. Bu şekilde test cihazı ile elde edilen ölçüm sonuçları kullanılarak, matematiksel denklemler elde edilmeye çalışılmış ve elde edilen denklemlerin deneysel verilerle uyumu hata miktarları ile değerlendirilmiştir. Bu yöntemin kullanılmasındaki esas amaç nispeten kısa sürede elde edilen ölçüm sonuçları ile daha uzun sürede gerçekleşen viskoelastik davranışın belirlenmesidir. Ancak denklemlerin çözümündeki matematiksel zorluklar ve ölçülen sinyal üzerindeki gürültü bileşenleri bu tez kapsamında yapılan çalışmalarda istenilen sonuca ulaşılmasını mümkün kılmamıştır. Yine de daha uzun sürede elde edilen daha fazla ölçüm verisinin kullanılması ile ölçülen değerlerle uyumlu model çözümleri verilebilmiştir.

Gerek dokuma kumaşların viskoelastik davranışının araştırılmasında mekanik benzeşim modelleri gözönüne almadan matematiksel analiz yaklaşımının kullanılması, gerekse test cihazının geliştirilmesi konusu tarafımızdan yapılan ilk çalışmalar olup, üzerinde daha fazla çalışılmasını gerektirmektedir. Bu konular ile ilgili bundan sonra yapılacak çalışmalar için aşağıdaki önerilerde bulunmaktadır.

- Hareketli çenesinin rijitliğini artıracak yeni tasarımlar yapılmalı ve test esnasında gerilme kuvvetinin etkisi ile oluşan eğilmeler engellenmelidir.
- Hareketli çenenin yerdeğiştirmesi yüksek çözünürlüklü bir lazer yerdeğiştirme sensörü ile ölçülmeli ve servo motor hareketinden hesaplanan yerdeğiştirme miktarı ile uyumu hassas bir şekilde sağlanmalıdır.
- Bu iyileştirmelerden sonra test cihazından elde edilecek yük uzama eğrisi piyasada mevcut olan ticari test cihazlarından elde edilen yük uzama eğrileri ile karşılaştırılmalı ve eğrilerin uyumu teyit edilmelidir.
- Test cihazında yapılacak bu iyileştirmelerden sonra test rutinlerinin hassas bir şekilde çalıştığı doğrulanmalıdır.

- Dokuma kumaşların viskoelastik davranışlarını açıklayan matematiksel yöntemler üzerinde daha ayrıntılı çalışma gerçekleştirilmeli ve elde edilen çözümlerin uzun süreli test verileri ile uyumu araştırılmalıdır.



5. KAYNAKLAR

- Acer, Ç. G., Latifoğlu, F., Eset, K., Kuduz, H. 2014.** Elektromiyogram Sinyallerinden Tekil Spektrum Analizi Kullanarak Öznelik Çıkarımı. Tıp Teknolojileri Ulusal Kongresi 2014 25 – 27 Eylül 2014, Kapodokya 50-53 s
- Anonim, 2008b.** Load Cells S-type Specifications. http://www.esit.com.tr/en/urun/201/100/load_cells_s_type_stcs (Erişim tarihi:14.08.2014).
- Anonim, 2005.** Elastocon Stress Relaxation Systems EB02 Artec Testnology Hertogenbosch. <http://www.elastocon.se/index.php/en/download/category/8-brochures> (Erişim tarihi:24.01.2015).
- Anonim, 2008a.** Product Bulletin: Series 2300/2400/2500 Laver Arm Creep Testing Systems. Applied Test Systems.Inc USA, http://www.atspa.com/2300_r2.pdf (Erişim tarihi:24.01.2015).
- Anonim, 2009.** ASDA-B Series User Manual. http://www.delta.com.tw/product-em/motion/motion_servo/download/manual/ASDA-B_M_EN_20090628.pdf (Erişim tarihi: 27.03.2014).
- Anonim, 2011.** Testing at High Strain Rates: Testing Brief Catalog. Axel Products Inc., <http://www.axelproducts.com> (Erişim tarihi:04.04.2014).
- Anonim, 2012.** Removing High-Frequency Noise from an ECG Signal <http://www.mathworks.com/examples/matlab-dsp-system/2352-removing-high-frequency-noise-from-an-ecg-signal> (Erişim tarihi: 3.12.2015).
- Anonim, 2013.** Thomson Precision Ball Screws and Lead Screws. http://www.thomsonlinear.com/downloads/screws/Precision_Screws_ctuk.pdf (Erişim tarihi: 07.05.2014).
- Anonim, 2014.** NI PCIe-6343 X Series Data Acquisition. <http://www.ni.com/pdf/manuals/374567a.pdf> (Erişim tarihi: 3.12.2014).
- Anonim, 2015.** 5960 Serisi Çift Kolonlu Masaüstü Genel Amaçlı Test Sistemleri (Çekme, Basma, Eğme, Soyma). <http://www.instron.com/tr-tr/products/testing-systems/universal-testing-systems/electromechanical/5900/5960-dual-column> (Erişim tarihi:09.09.2015).
- Asayesh, A., Jeddi, A. 2010.** Modeling the Creep Behavior of Plain Woven Fabrics Constructed from Textured Polyester Yarn. *Textile Research Journal*, 80(7): 642–650p.
- Aydın, M., Gündüz, G., Kuryel, B., Oturanç, G. 1999.** Diferansiyel Denklemler ve Uygulamaları, Barış Yayınları,İzmir, 552 s.
- Bower, D.I. 2002.** An Introduction to Polymer Physics. Cambridge University Pres, 425 pp.

- Chen X. 2010.** Modelling and predicting textile behaviour. CRC Press, 510 pp.
- Drabousky, D. P. 2009.** Prony Series Representation And Interconversion Of Viscoelastic Material Functions Of Equine Cortical Bone. MS Thesis, Department of Mechanical and Aerospace Engineering Case Western Reserve University.
- Gotlih, K. 1998.** Viscoelastic Parameter Determination For A Yarn. *International Journal Of Clothing Science And Technology*, 10(3/4): 226-233.
- Govindjee, S. 2011.** Fitting Prony's Series: Lecture note. Department of Civil Engineering, University of California, Berkeley, 3 pp.
- Gutauskas, M., Masteikaite, V. 1997.** Mechanical Stability Of Fused Textile Systems. *International Journal of Clothing Science and Technology*, 9(5):360-366.
- Gutierrez-Lemini, D. 2014.** Engineering Viscoelasticity. New York: Springer, 351 pp.
- Hockenberger, A. 2004,** Tekstil Fiziği. Alfa Yayınları, 255 s.
- Hosford, W.F. 2005.** Mechanical Behavior of Materials. Cambridge University Press 425 pp.
- Istratov, A. A., Vyvenko, O. F. 1999.** Exponential analysis in physical phenomena. *Review of Scientific Instruments*, 70(2), 1233-1257.
- Lakes, R. S. 2009.** Viscoelastic Materials. Cambridge University Press 480 pp.
- Lomaev, G. Z., 1965,** "Methods for Determining The Rigidity of Universal Tensile Test Machines", *Measurement Techniques*, 8(7), pp:617-619
- Lupu, M., Todor, D. 1995.** A singular value decomposition based algorithm for multicomponent exponential fitting of NMR relaxation signals. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 29(1), 11-17.
- Mainardi, F. 2010.** Fractional Calculus And Waves In Linear Viscoelasticity: An Introduction To Mathematical Models. Imperial College Press, London, 368 pp.
- Moler, C. B., 2008.** Numerical Computing with MATLAB: Revised Reprint. Siam.
- Morton, W., E., Hearle, J., W., S. 2008.** Physical Properties of Textile Fibres. Woodhead Publication, Fourth edition, 743 pp.
- Neckar, B., İbrahim, S. 2003.** Structural Theory of Fibrous Assemblies and Yarns Part I: Structure of Fibrous Assemblies. Isbn 80-7083-714-4, 167p.
- Nielsen, H. B. 2000.** Multi-exponential fitting of low-field 1H NMR data. Informatics and Mathematical Modelling. Technical University of Denmark. DTU.
- O'Haver, T., 1997.** A Pragmatic Introduction to Signal Processing. P126
<http://www.terpconnect.umd.edu/~toh/spectrum/IntroToSignalProcessing.pdf>

Okur, A. 2002. Tekstil Materyallerinde Mukavemet Testleri. DEÜ Müh. Fak. Basım Ünitesi, İzmir, 211 s.

Olofsson, B. A. 1964. General Model of a Fabric As a Geometric Mechanical Structure. *Journal of the Textile Institute*, 55(11): 541-557.

Orfanidis, S. J. 2007. SVD, PCA, KLT, CCA, and all that. Rutgers University Electrical and Computer Engineering Department, Optimum Signal Processing, 77pp.

Peirce, F.T. 1937. The geometry of cloth structure, *Journal of the Textile Institute*, Vol. 28, No. 3,T45-97.

Sebastian, M. S., Unnikrishnan, K.C., Narayanan, S. 2008. Viscoelastic Properties Of Kevlar-29 Fabric Tape Strength Member. *Mechanics of Materials*, 40:949–960.

Shewchuk J. R. 1994. An Introduction to the Conjugate Gradient Method Without the Agonizing Pain: Lecture note. School of Computer Science Carnegie Mellon University, 64 pp.

Shrager, R. I., Hendler, R. W.,1998. Some pitfalls in curve-fitting and how to avoid them: A case in point. *Journal of biochemical and biophysical methods*, 36(2), 157-173.

Sorvari, J., Malinen M. 2007. Numerical Interconversion between Linear Viscoelastic Material Functions with Regularization. *International Journal of Solids and Structures*, 44 :1291–1303.

Sorvari, J., Malinen, M. 2006. Determination of The Relaxation Modulus of A Linearly Viscoelastic Material. *Mech Time-Depend Mater*, 10:125–133.

Söderström, T., Rensfelt, A. 2011. Estimation of Material Functions Using System Identification Techniques. Proceedings of the 2011 4th International Symposium on Advanced Control of Industrial Processes, May 23-26, 2011, Thousand Islands Lake, Hangzhou, P.R. China,

Urbelis, V., A. Petrauskas, Vitkauskas,A. 2004. Time-dependent Mechanical Behaviour of Heterogeneous Textile Fabric Systems. *Fibres & Textiles in Eastern Europe*, 12 (4-48): 37-42.

Urbelis, V., Petrauskas, A., Vitkauskas, A. 2007 Stress Relaxation of Clothing Fabrics and Their Systems Materials. *Science (Medžiagotyra)*. 13(4):327-332.

Vangheluwe, L. 1993. Relaxation and Inverse Relaxation of Yarns after Dynamic Loading. *Textile research journal*, 63(9):552-556.

Vangheluwe,L., Kiekens, P. 1996. Modeling Mechanical Behavior of Fabric and Warp Yarn During Loom Stops .*Textile Research Journal*, 66(4): 722-727.

Wineman, A. 2009. Nonlinear Viscoelastic Solids: A Review. *Mathematics and Mechanics of Solids*, 14: 300-366.

EKLER

- EK 1 Veri okuma modülü için Matlab programı
- EK 2 Kuvvet uzama testi için Matlab programı
- EK 3 Gerilme azalması testi için Matlab programı
- EK 4 Sürünme testi için Matlab programı
- EK 5 Dinamik zorlama testi için Matlab programı
- EK 6 Prony serisinin terim sayısı ile çözüm için Matlab programı
- EK 7 Test problemlerinin simülasyonu için Matlab programı
- EK 8 RC sayısal filtre ile yük hücresinin analog sinyalini süzme
- EK 9 Savitzky-Golay ve moving average filtresi ile gerilme sinyalini süzme
- EK 10 Kumaşların elastik ve başlangıç modülünü hesaplayan Matlab programı

EK 1

Aşağıda verilen Matlab programı veri okuma modülü olarak kullanılmıştır. LogDATA function file dosyası bir lh (listener handle) ile test rutinine dahil edilmektedir. Veri toplama nesnesinin s.IsNotifyWhenDataAvailableExceedsAuto=true; özelliği tanımlanmış ve DataAvailable olayı saniyede 20 kez gerçekleştirilmesi istenmiştir. Her DataAvailable olayı gerçekleştiğinde, LogDATA function rutine katılarak veri toplama kartının buffer belleğinde saklanmış veriyi bilgisayar hardiskinde açılan log.bin binary dosyasına kaydetmektedir. Matlab kodu aşağıda verilmiştir.

```
function LogDATA(src, evt, fid,filterLP)

%% Giriş parametreleri
% src: listener için veri toplama kaynak nesnesi s'dir.
% evt: listener için DataAvailable olayıdır (saniyede 20 kez gerçekleşmesi istenir.).
% fid: log.bin dosyasının tanımlayıcısı (file identifier)
% filterLP: alçak geçirimli Parks McClellan filtresi için handle atamasıdır.

%% Çıkış parametreleri
% ort: Global tanımlı çıkış parametresi (test rutinlerinin denetimi için yük hücresinden
% okunan gerginlik sinyalinin ortalama değeridir.)

filteredSignal = step(filterLP,evt.Data(:,2));      % sinyal filtreleme
global ort;
ort=mean(filteredSignal);      % sinyal ortalaması bulunur.
stopFlag=1;                    % testi durdurma koşulu belirlendi.

% testin başındaki düşük sinyal değerleri için test cihazı durdurulmaz.
if ort<0.002
    stopFlag=0;
end

if (any(filteredSignal<0.0 )&& stopFlag) % Sinyal değeri ve cihazı durdurma koşulu
    disp('Event listener: Sinyal değeri 0.002 nin altına düştü! Test numunesi koptu. ');
    src.stop(); % Döngüdeki veri toplama nesnesi durdurudu ve while döngüsünden
    % çıkıldı.
else
    disp('Event listener:Veri toplama devam ediyor');
end

% Verileri dosyaya yazdırmak için sütun matrise çevrilir.
data = [evt.TimeStamps, evt.Data,filteredSignal]';
fwrite(fid,data,'double');
```

EK 2

Aşağıda verilen Matlab script file dosyası, kuvvet uzama test rutini için yazılan programdır. Test rutini, yük hücresinden okunan en küçük sinyal değeri olan 0,002 V değerini tekrar okuyana kadar sonsuz döngüde çalıştırır. Sinyalin 0,002 V'un altına düşmesi, test numunesinde koptuğu anlamına gelir. Matlab kodu aşağıda verilmiştir.

```
clear;           % Bir önceki test için oluşturulan veriler silindi.
clc;            % Ekran temizlendi.
close all;     % Grafik pencereleri kapatıldı.

%% Hareketli çenenin pozisyonunu kaydetmek için STARTfile.mat dosyası oluşturulur.
if exist('STARTfile.mat')
    disp('STARTfile.mat exists');
else
    finalPosition=0;
    save('STARTfile.mat','finalPosition');
end

load('STARTfile.mat'); % Dosya yüklendi.
startPosition=finalPosition; % Çenenin pozisyonu değişkene atandı.

%% Veri toplama işlemleri için session nesnesi oluşturulur.
%
% Bu uygulamada National Instruments(R) PCIE Series
% NI PCIE-6343 veri toplama kartı ID |Dev1| kullanıldı.
% Puls sinyali için bir counter output channel eklendi.
% Yük hücresinin analog sinyalini okumak için bir analog input channels eklendi
% Enkoder sinyallerini saymak için bir counter input channel ekledi.
%

% Session nesnesi oluşturulur.
s = daq.createSession('ni');
s.Rate=1000; % ASTM D76 göre standart okuma hızı atandı.
Fs=s.Rate; % Alçak geçirimli filtre için örnekleme hızı atandı.

% Enkoder için session nesnesine Counter Input Channel eklenir.
% Birinci sayaç devresinde pozisyon ölçme işlemi gerçekleşir.
chcounter=addCounterInputChannel(s,'Dev1','ctr1','Position');
chcounter.EncoderType='X2'; % Her puls için dört sinyal okuma işlemi gerçekleştirilir.
Chcounter % Kanal bilgileri ekranda gösterildi.

% Yük hücresi için session nesnesine Analog Input Channels eklenir.
% Birinci analog giriş kanalından gerilim ölçme işlemi gerçekleşir.
chai0=s.addAnalogInputChannel('Dev1','ai0','Voltage');
```

```

% Motoru sürmek için session nesnesine Counter Output Channel eklenir.
% Sıfıncı sayaç devresinde sabit frekanslı kare hız sinyali üretilmiştir.

chpuls=addCounterOutputChannel(s,'Dev1','ctr0','PulseGeneration');
chpuls.Frequency=2500;    % Hız sinyalin frekans değeri atandı.
chpuls                    % Kanal bilgileri ekranda gösterildi.
s                          % Session nesnesinin bilgileri ekranda gösterildi.

%% Motorun kontrol işlemleri için yeni bir session nesnesi oluşturulur.
s1=daq.createSession('ni');

% Sıfıncı portun sıfıncı ve birinci kanallarından çıkış sinyali oluşturulur.
addDigitalChannel(s1,'Dev1','port0/line0:1','OutputOnly');

% Sıfıncı kanal yön sinyali için kullanılır
% Birinci kanal motoru devreye sokmak için kullanılır.
outputSingleScan(s1,[1 1]); % Çıkış sinyal değerleri kanallara gönderildi.

%% Alçak geçirimli filtre tasarlanır.
Fpass = 0;    % Geçirilen sinyalin alt frekans değeri atandı.
Fstop = 58;   % Kesilen sinyalin alt frekans değeri atandı.
Dpass =1e-5;  % Geçiş bölgesinin tolerans değeri atandı
Dstop =1e-4;  % Kesilme bölgesinin tolerans değeri atandı.
F      = [0 Fpass Fstop Fs/2]/(Fs/2);
A      = [1 1 0 0];
D      = [Dpass Dstop];
b = firgr('minorder', F, A, D);

% Filtreyi LogDATA programında tekrar çağırmak için handle function atanır.
LP = dsp.FIRFilter('Numerator',b);

%% Yük hücresi ve enkoder verilerini dosyaya yazdırmak için binnary formatlı log.bin
% dosyası yazdırma modunda açılarak, fid1 dosya tanımlayıcısına atanır.

fid1 = fopen('log.bin','w');

%% Listener eklenir.
% Veri toplama işlemi arka planda listener ile yönlendirilirken, while sonsuz döngüsü
% kesintiye uğratılmadan test işlemine devam edilir. Listener içinde LogDATA.m
% dosyası anonymous function olarak atanır.
%
% LogDATA dosyasının giriş parametreleri:
%
% * |src-| Olayın kaynak nesnesi (s)
% * |event-| Olayın adı (DataAvailable)
% * |fid1-| Veri dosya tanımlayıcısı
% * |LP-| Alçak geçirimli filtrenin handel tanımı

```

```

s.IsNotifyWhenDataAvailableExceedsAuto=true;

% Listener tekrar test rutini içinde çağrılabilmesi için handel ataması yapılır.
lh = s.addlistener('DataAvailable',@(src, event)LogDATAk4(src, event, fid1,LP));
s.IsContinuous=true; % Session nesnesi sürekli çalışması istendi.
s.startBackground; % Session nesnesi çalıştırıldı ve veri toplama işlemi başlatıldı.

%% Test rutininin uygulanması

while ~s.IsDone % Veri okuma logDATA içinde kesildi mi?
disp('While döngüsü, çalışıyor);
pause(1); % Test rutinin aniden kesilebilmesi için kullanıcının ctr+c girişine izin verir.
end

% Test rutini tamamlandı.
fprintf('While döngüsü sürerken okunan toplam veri = %d\n', s.ScansAcquired)
pause(5); % Veri kaybı olmaması için bir süre beklendi.
delete(lh); % Listener handel silindi.
fclose(fid1); % log.bin dosyası kapatıldı.

%%Test sonrası yapılan işlemler

fid2 = fopen('log.bin','r'); % log.bin dosyasını okuma modunda açıldı.

% Açılan dosyadan 4 sütunlu 64 bitlik değerinde veri okunur.
[data,count]= fread(fid2,[4,inf],'double');
fclose(fid2); % Dosya kapatıldı.

%% Verilerin grafiği çizdirilir.
%
% Data verilerinin herbir sütunu sırasıyla aşağıdaki değişkenlere atanır.
% * |t-| süre (s)
% * |xpuls-| pozisyon (puls)
% * |Fvolt-| kuvvet (Volt)
% * |filteredFvolt-| filtrelenmiş kuvvet (Volt)

t = data(1,:);
xpuls = data(2,:);
Fvolt=data(3,:);
filteredFvolt=data(4,:);

% * |xpos-| pozisyon (mm)
% * |FkN-| kuvvet (kN)
% * |filteredFkN-| filtrelenmiş kuvvet (kN)

xpos=data(2,:)*5/2500;
FkN=data(3,:)*9.80665*500/10/1000;

```

```

filteredFkN=data(4,:)*9.80665*500/10/1000;

% * |rigidityposition-| hareketli çene pozisyonu çenenin rijitliğine bağlı tekrar
% hesaplanır.

rigidityposition=xpos-8.0*FkN; % 8.0 düzeltme katsayısı
filteredrigidityposition=xpos-8.0*filteredFkN;

% * |elongation-| test numunesinin yüzde uzaması
% * |rigidityelongation-| çenenin rijitliğine bağlı uzama miktarı

elongation=xpos*0.50; % /200*100; numune uzunluğu 200 mm
rigidityelongation=rigidityposition*0.50; % /200*100;
filteredrigidityelongation=filteredrigidityposition*0.50; % /200*100;

%% Grafik çizdirilir.
figure(1);
plot(rigidityelongation, FkN, rigidityelongation,filteredFkN);
title('Kuvvet-Uzama');
xlabel('Uzama (%)');
ylabel('Kuvvet (kN)');

% Başlangıç pozisyonuna hareket için kullanıcıdan izin alınır.
fprintf('Yeni test için bir tuşa basın');
pause();

% Çenenin başlangıç pozisyonuna dönebilmesi için gerekli süre hesaplanır.
finalPositionindex=length(data(2,:));
Second=data(2,finalPositionindex)/2500;

outputSingleScan(s1,[0 1]); % Motor dönüş yönü değiştirildi.
pause(1); % Ayarların sürücüde yapılabilmesi için beklendi.

chpuls.Frequency=2500;
startBackground(s); % Session nesnesi tekrar çalıştırıldı.
pause(Second); % Çenenin başlangıç pozisyonuna dönebilmesi için kod girişi kapatıldı.
stop(s); % Session nesnesi durduruldu.

%% Çene pozisyonunu STARTfile.mat dosyasına kaydedilir.
finalPositionindex=length(data(2,:));
finalPosition=startPosition-data(2,finalPositionindex);
save('STARTfile.mat', 'finalPosition');

displayEndOfDemoMessage(mfilename) %Test rutini tamamlandı.

```


EK 3

Aşağıda verilen Matlab programı gerilme azalması test rutininde kullanılmıştır. Test rutini, ort global değişkeni sınır gerginlik değerini aşana kadar hareketli çeneyi sabit hızda ilerletir. İstenilen gerginlik seviyesine ulaşıldıktan sonra servo motora dijital sinyal gönderilerek kapatılır. Belirlenen süre boyunca while döngüsü çalışır ve veri toplama işleminin devam etmesini sağlar. Bu süre boyunca eğer yük hücresinden okunan en küçük sinyal değeri 0,002 V'un altına düşmesi durumunda while döngüsü sonlandırılır. Sinyalin 0,002 V'un altına düşmesi, test numunesinde koptuğu anlamına gelir. Matlab kodu aşağıda verilmiştir.

```
clear;          % Bir önceki test için oluşturulan veriler silindi.
clc;           % Ekran temizlendi.
close all;     % Grafik pencereleri kapatıldı.

%% Hareketli çenenin pozisyonunu kaydetmek için STARTfile.mat dosyası oluşturulur.
if exist('STARTfile.mat')
    disp('STARTfile.mat exists');
else
    finalPosition=0;
save('STARTfile.mat','finalPosition');
end

load('STARTfile.mat');    % Dosya yüklendi.
startPosition=finalPosition; % Çenenin pozisyonu değişkene atandı.

%% Veri toplama işlemleri için session nesnesi oluşturulur.
%
% Bu uygulamada National Instruments(R) PCIe Series
% NI PCIe-6343 veri toplama kartı ID |Dev1| kullanıldı.
% Puls sinyali için bir counter output channel eklendi.
% Yük hücresinin analog sinyalini okumak için bir analog input channels eklendi
% Enkoder sinyallerini saymak için bir counter input channel ekledi.
%

% Session nesnesi oluşturulur.
s = daq.createSession('ni');
s.Rate=1000; % ASTM D76 göre standart okuma hızı atandı.
Fs=s.Rate; % Alçak geçirimli filtre için örnekleme hızı atandı.

% Enkoder için session nesnesine Counter Input Channel eklenir.
% Birinci sayaç devresinde pozisyon ölçme işlemi gerçekleşir.
chcounter=addCounterInputChannel(s,'Dev1','ctr1','Position');
chcounter.EncoderType='X2'; % Her puls için dört sinyal okuma işlemi gerçekleştirilir.
```

```

Chcounter    % Kanal bilgileri ekranda gösteridi.

% Yük hücresi için session nesnesine Analog Input Channels eklenir.
% Birinci analog giriş kanalından gerilim ölçme işlemi gerçekleşir.
chai0=s.addAnalogInputChannel('Dev1','ai0', 'Voltage');

% Motoru sürmek için session nesnesine Counter Output Channel eklenir.
% Sıfıncı sayaç devresinde sabit frekanslı kare hız sinyali üretilmiştir.

chpuls=addCounterOutputChannel(s,'Dev1','ctr0','PulseGeneration');
chpuls.Frequency=2500;    % Hız sinyalin frekans değeri atandı.
chpuls            % Kanal bilgileri ekranda gösterildi.
s                % Session nesnesinin bilgileri ekranda gösterildi.

%% Motorun kontrol işlemleri için yeni bir session nesnesi oluşturulur.
s1=daq.createSession('ni');

% Sıfıncı portun sıfıncı ve birinci kanallarından çıkış sinyali oluşturulur.
addDigitalChannel(s1,'Dev1','port0/line0:1','OutputOnly');

% Sıfıncı kanal yön sinyali için kullanılır
% Birinci kanal motoru devreye sokmak için kullanılır.
outputSingleScan(s1,[1 1]); % Çıkış sinyal değerleri kanallara gönderildi.

%% Alçak geçirimli filtre tasarlanır.
Fpass = 0;    % Geçirilen sinyalin alt frekans değeri atandı.
Fstop = 58;   % Kesilen sinyalin alt frekans değeri atandı.
Dpass = 1e-5; % Geçiş bölgesinin tolerans değeri atandı
Dstop = 1e-4; % Kesilme bölgesinin tolerans değeri atandı.
F    = [0 Fpass Fstop Fs/2]/(Fs/2);
A    = [1 1 0 0];
D    = [Dpass Dstop];
b = firgr('minorder', F, A, D);

% Filtreyi LogDATA programında tekrar çağırmak için handle function atanır.
LP = dsp.FIRFilter('Numerator',b);

%% Yük hücresi ve enkoder verilerini dosyaya yazdırmak için binnary formatlı log.bin
% dosyası yazdırma modunda açılarak, fid1 dosya tanımlayıcısına atanır.

fid1 = fopen('log.bin','w');

%% Listener eklenir.
% Veri toplama işlemi arka planda listener ile yönlendirilirken, while sonsuz döngüsü
% kesintiye uğratılmadan test işlemine devam edilir. Listener içinde LogDATA.m
% dosyası anonymous function olarak atanır.
%
% LogDATA dosyasının giriş parametreleri:

```

```

%
% * |src-| Olayın kaynak nesnesi (s)
% * |event-| Olayın adı (DataAvailable)
% * |fid1-| Veri dosya tanımlayıcısı
% * |LP-| Alçak geçirimli filtrenin handel tanımı

s.IsNotifyWhenDataAvailableExceedsAuto=true;

% Listener tekrar test rutini içinde çağrılabilmesi için handel ataması yapılır.
lh = s.addlistener('DataAvailable',@(src, event)LogDATAk4(src, event, fid1,LP));
s.IsContinuous=true; % Session nesnesi sürekli çalışması istendi.
s.startBackground; % Session nesnesi çalıştırıldı ve veri toplama işlemi başlatıldı.

%% Test rutininin uygulanması

global ort; % LogDATA ile ortak kullanılan global değişken tanımlandı.
ort=0.0; % ort değişkene ilk değeri atandı.
startTestTime=tic; %Teste başlama anı belirlendi.

while ~s.IsDone % Veri okuma logDATA içinde kesildi mi?
disp('While döngüsü, çalışıyor);

if (ort>0.5) % Sınır gerginlik değerine ort değişkeni ulaştı mı?
outputSingleScan(s1,[1 0]); % Servo motor kapatılır.
end

if (1800<toc(startTestTime)) % Testin süresi aşıldı mı?
stop(s) % Veri okuma nesnesini durduruldu ve while döngüsünden çıkıldı.
stopTestTime=toc(startTestTime); %Testin süresi belirlendi.
disp(['Test süresi ', num2str(stopTestTime)]); %Test süresi ekranda gösterildi.
end

% Test rutini tamamlandı.
fprintf('While döngüsü sürerken okunan toplam veri = %d\n', s.ScansAcquired)
pause(5); % Veri kaybı olmaması için bir süre beklendi.
delete(lh); % Listener handel silindi.
fclose(fid1); % log.bin dosyası kapatıldı.

%% Test sonrası yapılan işlemler

fid2 = fopen('log.bin','r'); % log.bin dosyasını okuma modunda açıldı.

% Açılan dosyadan 4 sütunlu 64 bitlik değerinde veri okunur.
[data,count]= fread(fid2,[4,inf],'double');
fclose(fid2); % Dosya kapatıldı.

%% Verilerin grafiği çizdirilir.
%

```

```

% Data verilerinin herbir sütunu sırasıyla aşağıdaki değişkenlere atanır.
% * |t-| süre (s)
% * |xpuls-| pozisyon (puls)
% * |Fvolt-| kuvvet (Volt)
% * |filteredFvolt-| filtrelenmiş kuvvet (Volt)

t = data(1,:);
xpuls = data(2,:);
Fvolt=data(3,:);
filteredFvolt=data(4,:);

% * |xpos-| pozisyon (mm)
% * |FkN-| kuvvet (kN)
% * |filteredFkN-| filtrelenmiş kuvvet (kN)

xpos=data(2,:)*5/2500;
FkN=data(3,:)*9.80665*500/10/1000;
filteredFkN=data(4,:)*9.80665*500/10/1000;

% * |rigidityposition-| hareketli çene pozisyonu çenenin rijitliğine bağlı tekrar
%hesaplanır.

rigidityposition=xpos-8.0*FkN; % 8.0 düzeltme katsayısı
filteredrigidityposition=xpos-8.0*filteredFkN;

% * |elongation-| test numunesinin yüzde uzaması
% * |rigidityelongation-| çenenin rijitliğine bağlı uzama miktarı

elongation=xpos*0.50; % /200*100; numune uzunluğu 200 mm
rigidityelongation=rigidityposition*0.50; % /200*100;
filteredrigidityelongation=filteredrigidityposition*0.50; % /200*100;

%% Grafik çizdirilir.
figure(1);
plot(t,FkN,t,filteredFkN);
title('Gerginlik azalması');
xlabel('Süre (s)');
ylabel('Kuvvet (kN)');

% Başlangıç pozisyonuna hareket için kullanıcıdan izin alınır.
fprintf('Yeni test için bir tuşa basın');
pause();

% Çenenin başlangıç pozisyonuna dönebilmesi için gerekli süre hesaplanır.
finalPositionindex=length(data(2,:));
Second=data(2,finalPositionindex)/2500;

outputSingleScan(s1,[0 1]); % Motor dönüş yönü değiştirildi.

```

```
pause(1); % Ayarların sürücüde yapılabilmesi için beklendi.
```

```
chpuls.Frequency=2500;
```

```
startBackground(s); % Session nesnesi tekrar çalıştırıldı.
```

```
pause(Second); % Çenenin başlangıç pozisyonuna dönebilmesi için kod girişi kapatıldı.
```

```
stop(s); % Session nesnesi durduruldu.
```

```
%% Çene pozisyonunu STARTfile.mat dosyasına kaydedilir.
```

```
finalPositionindex=length(data(2,:));
```

```
finalPosition=startPosition-data(2,finalPositionindex);
```

```
save('STARTfile.mat',finalPosition');
```

```
displayEndOfDemoMessage(mfilename) %Test rutini tamamlandı.
```



EK 4

Aşağıda verilen Matlab programı sürünme test rutininde kullanılmıştır. Sınır gerginlik sinyal değerinin $\pm 0,02$ V'luk değişim aralığına global değişken ort'u ulaştırana kadar test rutini, hareketli çeneyi 120 mm/dakika'lık sabit hızda ilerletmektedir. İstenilen gerginlik seviyesine ulaşıldıktan sonra, çeneyi 1,2 mm/dak hızda çalıştırmak için hız sinyaline 10 puls/saniye (chpuls.Frequency) değeri atanmaktadır. Test numunesi üzerindeki gerginlik değişiminin ± 1 N aralığında kalması için sınır gerginlik değişim aralığı $\pm 0,002$ V olarak tekrar belirlenmektedir. Yük hücresinden alınan sinyal değerlerinin ± 1 N aralığında tutulabilmesi için servo motor aç-kapa ve yön sinyali ile kontrol edilmektedir. Belirlenen süre veya test kontrol periyodu boyunca while döngüsü çalıştırılır ve veri toplama işleminin devam etmesi sağlanmaktadır. Bu süre içinde eğer yük hücresinden okunan en küçük sinyal değeri, 0,002 V değerinin altına düşmesi durumunda while döngüsü sonlandırılmaktadır. Sinyalin 0,002 V'un altına düşmesi, test numunesinde koptuğu anlamına gelmektedir. Matlab kodu aşağıda verilmiştir.

```
clear;           % Bir önceki test için oluşturulan veriler silindi.
clc;            % Ekran temizlendi.
close all;      % Grafik pencereleri kapatıldı.

%% Hareketli çenenin pozisyonunu kaydetmek için STARTfile.mat dosyası oluşturulur.
if exist('STARTfile.mat')
    disp('STARTfile.mat exists');
else
    finalPosition=0;
    save('STARTfile.mat','finalPosition');
end

load('STARTfile.mat'); % Dosya yüklendi.
startPosition=finalPosition; % Çenenin pozisyonu değişkene atandı.

%% Veri toplama işlemleri için session nesnesi oluşturulur.
%
% Bu uygulamada National Instruments(R) PCIe Series
% NI PCIe-6343 veri toplama kartı ID |Dev1| kullanıldı.
% Puls sinyali için bir counter output channel eklendi.
% Yük hücresinin analog sinyalini okumak için bir analog input channels eklendi
% Enkoder sinyallerini saymak için bir counter input channel ekledi.
%

% Session nesnesi oluşturulur.
```

```

s = daq.createSession('ni');
s.Rate=1000; % ASTM D76 göre standart okuma hızı atandı.
Fs=s.Rate; % Alçak geçirimli filtre için örnekleme hızı atandı.

% Enkoder için session nesnesine Counter Input Channel eklenir.
% Birinci sayaç devresinde pozisyon ölçme işlemi gerçekleşir.
chcounter=addCounterInputChannel(s,'Dev1','ctr1','Position');
chcounter.EncoderType='X2'; % Her puls için dört sinyal okuma işlemi gerçekleştirilir.
Chcounter % Kanal bilgileri ekranda gösteridi.

% Yük hücresi için session nesnesine Analog Input Channels eklenir.
% Birinci analog giriş kanalından gerilim ölçme işlemi gerçekleşir.
chai0=s.addAnalogInputChannel('Dev1','ai0','Voltage');

% Motoru sürmek için session nesnesine Counter Output Channel eklenir.
% Sıfıncı sayaç devresinde sabit frekanslı kare hız sinyali üretilmiştir.

chpuls=addCounterOutputChannel(s,'Dev1','ctr0','PulseGeneration');
chpuls.Frequency=2500; % Hız sinyalin frekans değeri atandı.
chpuls % Kanal bilgileri ekranda gösterildi.
s % Session nesnesinin bilgileri ekranda gösterildi.

%% Motorun kontrol işlemleri için yeni bir session nesnesi oluşturulur.
s1=daq.createSession('ni');

% Sıfıncı portun sıfıncı ve birinci kanallarından çıkış sinyali oluşturulur.
addDigitalChannel(s1,'Dev1','port0/line0:1','OutputOnly');

% Sıfıncı kanal yön sinyali için kullanılır
% Birinci kanal motoru devreye sokmak için kullanılır.
outputSingleScan(s1,[1 1]); % Çıkış sinyal değerleri kanallara gönderidi.

%% Alçak geçirimli filtre tasarlanır.
Fpass = 0; % Geçirilen sinyalin alt frekans değeri atandı.
Fstop = 58; % Kesilen sinyalin alt frekans değeri atandı.
Dpass =1e-5; % Geçiş bölgesinin tolerans değeri atandı
Dstop =1e-4; % Kesilme bölgesinin tolerans değeri atandı.
F = [0 Fpass Fstop Fs/2]/(Fs/2);
A = [1 1 0 0];
D = [Dpass Dstop];
b = firgr('minororder', F, A, D);

% Filtreyi LogDATA programında tekrar çağırmak için handle function atanır.
LP = dsp.FIRFilter('Numerator',b);

%% Yük hücresi ve enkoder verilerini dosyaya yazdırmak için binnary formatlı log.bin
% dosyası yazdırma modunda açılarak, fid1 dosya tanımlayıcısına atanır.

```

```

fid1 = fopen('log.bin','w');

%% Listener eklenir.
% Veri toplama işlemi arka planda listener ile yönlendirilirken, while sonsuz döngüsü
% kesintiye uğratılmadan test işlemine devam edilir. Listener içinde LogDATA.m
% dosyası anonymous function olarak atanır.
%
% LogDATA dosyasının giriş parametreleri:
%
% * |src-| Olayın kaynak nesnesi (s)
% * |event-| Olayın adı (DataAvailable)
% * |fid1-| Veri dosya tanımlayıcısı
% * |LP-| Alçak geçirimli filtrenin handel tanımı

s.IsNotifyWhenDataAvailableExceedsAuto=true;

% Listener tekrar test rutini içinde çağrılabilmesi için handel ataması yapılır.
lh = s.addlistener('DataAvailable',@(src, event)LogDATAk4(src, event, fid1,LP));
s.IsContinuous=true; % Session nesnesi sürekli çalışması istendi.
s.startBackground; % Session nesnesi çalıştırıldı ve veri toplama işlemi başlatıldı.

%% Test rutininin uygulanması

global ort; % LogDATA ile ortak kullanılan global değişken tanımlandı.
ort=0.0; % ort değişkene ilk değeri atandı.
n=0; % Test periyodu için kontrol indisine değer atandı.

changePulsFlag=1; % Puls frekansının değiştirme bayrağı atandı
changePuls=0; % Puls frekansının değiştirmek için izin verilmedi.
es=0.02; % İlk gerginlik sinyali değişim aralığı atandı.
v=0.48; % Gerginlik sinyali sınır değeri atandı.
vmax=v+es % Maksimum gerginlik sinyali atandı.
vmin=v-es % Minumum gerginlik sinyali atandı.

%Test süresi için kontrol parametreleri
tstart=tic; % Teste başlama anı belirlendi.
topint=10.0; % Sabit gerginlik seviyesini kontrol süresi atandı.

while ~s.IsDone % Veri okuma logDATA içinde kesildi mi?

disp('While döngüsü, çalışıyor');

if ort<vmin % Minumum gerginlik sinyali değerine ort değişkeni ulaştı mı?
outputSingleScan(s1,[1 1]); % Çene ileri yönde hareket ettirildi.
n=1; % Motor hareket ettirildi. Kontrol indisine tekrar bir değeri atandı.
fprintf('1 ileri \n'); % Ekranda ileri hareket gösterildi.
elseif ort>vmax % Maksimum gerginlik sinyali değerine ort değişkeni ulaştı mı?
outputSingleScan(s1,[0 1]); % Çene geri yönde hareket ettirildi.

```



```

n=1;      % Motor hareket ettirildi. Kontrol indisine tekrar bir değeri atandı.
fprintf(' 0 geri \n');    % Ekranda geri hareket gösterildi.

else      % Gerginlik sinyali değişim aralığında ort değişkeni kaldı.
outputSingleScan(s1,[0 0]);    % Motor kapatıldı.
fprintf('durdu \n');    % Ekranda motorun durduğunu gösterildi.
change puls=1; %Puls frekansını değiştirmek için izin verildi.

if n==1;    % Kontrol indisi bir mi?
    tintval=[]; % Gerginlik seviyesini kontrol değerleri silindi
    xpos=[];
    xold=[];
end
% Her topint süre aralığında gerginlik seviyesi kontrol parametreleri diziye eklenir
if abs(rem(toc(tstart),topint))<1e-2
    tintval(n)=toc(tstart)
    xpos(n)=r
    xold(n)=ort
    n=n+1;
    tintval;
    xpos;
end

end

% Puls frekans değiştirme bayrağı ve frekans değiştirmek izin koşulları geręekleřti mi?
if change pulsFlag && change puls
    stop(s); % Veri toplama nesnesi durduruldu
    chpuls.Frequency=10; % Motor hızı 1,2 mm/dak dūřürüldü.
    v=v+es; % Gerginlik sinyal sınırı bir üst toleransa çıkarıldı.
    es=0.002; % Gerginlik sinyal tolerans aralığı dūřürüldü.
    vmax=v+es % Gerginlik sinyal tolerans değerleri belirlendi.
    vmin=v-es
    change puls=0;
    % Puls frekans deęiřtirme bayraęı dūřürülür ve rutinde tekrar çalıřmaz.
    change pulsFlag=0;
    startBackground(s); % Veri toplama nesnesi tekrar çalıştırıldı.
End

% Kontrol indisi sınır çevrim sayısını ya da test süresi aşıldı mı?
if n>10 || toc(tstart)>1800.0
stop(s); % Test sonlandırıldı.
End
% Test rutini aniden kesilebilmesi için Kullanıcının ctr+c girişine izin verilir.
pause(1e-3);
r=r+1; % while döngü sayacı
end

```

```

n      % Kontrol indisinin değeri ekranda gösterildi.
toc(tstart) % Test süresi ekranda gsterilidi.

%%Test sonrası yapılan işlemler

fid2 = fopen('log.bin','r'); % log.bin dosyasını okuma modunda aılıdı.

% Açılan dosyadan 4 sütunlu 64 bitlik değerinde veri okunur.
[data,count]= fread(fid2,[4,inf],'double');
fclose(fid2); % Dosya kapatıldı.

%% Verilerin grafiği çizdirilir.
%
% Data verilerinin herbir sütunu sırasıyla aşağıdaki değişkenlere atanır.
% * |t-| süre (s)
% * |xpuls-| pozisyon (puls)
% * |Fvolt-| kuvvet (Volt)
% * |filteredFvolt-| filtrelenmiş kuvvet (Volt)

t = data(1,:);
xpuls = data(2,:);
Fvolt=data(3,:);
filteredFvolt=data(4,:);

% * |xpos-| pozisyon (mm)
% * |FkN-| kuvvet (kN)
% * |filteredFkN-| filtrelenmiş kuvvet (kN)

xpos=data(2,:)*5/2500;
FkN=data(3,:)*9.80665*500/10/1000;
filteredFkN=data(4,:)*9.80665*500/10/1000;

% * |rigidityposition-| hareketli çene pozisyonu çenenin rijitliğine bağlı tekrar
%hesaplanır.
rigidityposition=xpos-8.0*FkN; % 8.0 düzeltme katsayısı
filteredrigidityposition=xpos-8.0*filteredFkN;

% * |elongation-| test numunesinin yüzde uzaması
% * |rigidityelongation-| enenin rijitliğine bağlı uzama miktarı
elongation=xpos*0.50; % /200*100; numune uzunluğu 200 mm
rigidityelongation=rigidityposition*0.50; % /200*100;
filteredrigidityelongation=filteredrigidityposition*0.50; % /200*100;

%% Grafik izdirilir.

% Sürünme testine başlama zamanı belirlenir.
ind=find(data(1,*)<=0)
a=data(1,ind(2)-1)

```

```

b=data(2,ind(2)-1)
indlast=length(data)

data(1,ind(2):indlast)= data(1,ind(2):indlast)+a;
data(2,ind(2):indlast)= data(2,ind(2):indlast)+b;
data(:,ind(2))=[];
ins=find(data(4,:)>0.498);

figure(1)
plot(t(1:ins(1)),filteredrigidityelengation(1:ins(1)), 'k', 'LineWidth', 2)
hold on;
plot(t(ins(1)),filteredrigidityelengation(ins(1)), 'kx', 'MarkerSize', 20, 'LineWidth', 2)
plot(t(ins(1):end),filteredrigidityelengation(ins(1):end), 'b', 'LineWidth', 2)

text(t(end),filteredrigidityelengation(end),...
'Döşemelik1', 'Color', 'b', 'FontSize', 30, 'FontName', 'TimesNewRoman', ...
'VerticalAlignment', 'bottom', 'HorizontalAlignment', 'right');

xlabel('Süre (s)', 'FontSize', 30, 'FontName', 'TimesNewRoman');
ylabel('Uzama (%)', 'FontSize', 30, 'FontName', 'TimesNewRoman');
set(gca, 'FontSize', 30, 'FontName', 'TimesNewRoman');
grid on;

uzama=filteredrigidityelengation(ins(1):end);
tbas=t(ins(1):end);
save('CDB11Coz', 'uzama', 'tbas', '-v7.3'); % Sürünme değerleri dosyaya kaydedildi.

% Başlangıç pozisyonuna hareket için kullanıcıdan izin alınır.
fprintf('Yeni test için bir tuşa basın');
pause();

% Çenenin başlangıç pozisyonuna dönebilmesi için gerekli süre hesaplanır.
finalPositionindex=length(data(2,:));
Second=data(2,finalPositionindex)/2500;

outputSingleScan(s1,[0 1]); % Motor dönüş yönü değiştirildi.
pause(1); % Ayarların sürücüde yapılabilmesi için beklendi.

chpuls.Frequency=2500;
startBackground(s); % Session nesnesi tekrar çalıştırıldı.
pause(Second); % Çenenin başlangıç pozisyonuna dönebilmesi için kod girişi kapatıldı.
stop(s); % Session nesnesi durduruldu.

%% Çene pozisyonunu STARTfile.mat dosyasına kaydedilir.
finalPositionindex=length(data(2,:));
finalPosition=startPosition-data(2,finalPositionindex);
save('STARTfile.mat', 'finalPosition');
displayEndOfDemoMessage(mfilename) %Test rutini tamamlandı.

```

EK 5

Dinamik zorlama test rutininde aşağıda verilen Matlab programı kullanılmıştır. Dinamik tekrarlı zorlama testi çevrim sayısı kadar hareketli çeneye ileri ve geri yönde hareket ettirilerek gerçekleşir. Çenenin yer değiştirme miktarı test numunesinin ulaştığı iki gerginlik sinyali seviyesi arasındaki süre ile belirlenmektedir. Çene hareketi yön sinyalleri ile kontrol edilerek, ikinci while döngüsü içinde istenilen çevrim sayısı kadar sabit uzama miktarında malzeme dinamik zorlamaya maruz bırakılmaktadır. Çevrim sayısı süresince ikinci while döngüsü çalışır ve veri toplama işleminin devam etmesi sağlanmaktadır. Bu süre içinde eğer yük hücresinden okunan en küçük sinyal değeri, 0,002 V değerinin altına düşmesi durumunda döngü sonlandırılmaktadır. Sinyalin 0,002 V'un altına düşmesi, test numunesinde koptuğu anlamına gelmektedir. Matlab kodu aşağıda verilmiştir.

```
clear; %bir önceki test için oluşturulan veriler silinir.
clc; %ekran temizlenir.
close all; %grafik pencereleri kapatılır.
```

```
%% hareketli çenenin pozisyonunu belirlemek için STARTfile.mat dosyası yüklenir.
if exist('STARTfile.mat')
    disp('STARTfile.mat exists');
else
    finalPosition=0;
    save('STARTfile.mat','finalPosition');
end
```

```
load('STARTfile.mat');
startPosition=finalPosition;
```

```
%% Gerçek zamanlı veri işlemler için bir veri toplama Session nesnesi oluşturulur.
%
% Bu uygulamada National Instruments(R) PCIE Series
% NI PCIE-6343 veri toplama kartı ID |Dev1| kullanıldı.
% Puls sinyali için bir counter output channel ekle |PulseGeneration|
% Yük hücresinin analog sinyalini okumak için bir analog input channels ekle |Voltage|
% Enkoder sinyallerini saymak için bir counter input channel ekle |Position|
%
s = daq.createSession('ni');
% okuma hızı ayarlanır.
s.Rate=1000; %standart değer ASTM D76 göre
Fs=s.Rate; %alçak geçirimli filtre için örnekleme hızı atanır.
```

```

% Enkoder için Session nesnesi s'ye Counter Input Channel eklenir.
chcounter=addCounterInputChannel(s,'Dev1','ctr1','Position'); % birinci sayaç devresi
                                                              %pozisyon ölçme
chcounter.EncoderType='X2';                               %her puls için dört
sinyal okuma
chcounter                                                  %bilgiler      ekranda
gösterilir.

% Yük hücresi için Session nesnesi s'ye Analog Input Channels eklenir.
chai0=s.addAnalogInputChannel('Dev1','ai0','Voltage');      %birinci analog giriş
devresi
                                                              %gerilim ölçme

% Motoru sürmek için Session nesnesi s'ye Counter Output Channel eklenir.
chpuls=addCounterOutputChannel(s,'Dev1','ctr0','PulseGeneration'); % sıfırıncı sayaç
devresi
chpuls.Frequency=1000;    %üretilen kare sinyalin frekansı
chpuls                    %bilgiler ekranda gösterilir.
s                          %Session nesnesi ekranda gösterilir.
%% Motoru çalıştırmak ve yön bilgisi için yeni bir Session nesnesi oluşturulur.
s1=daq.createSession('ni');

% sıfırıncı portun sıfırıncı ve birinci kanallarından çıkış sinyali oluşturulur.
addDigitalChannel(s1,'Dev1','port0/line0:1','OutputOnly');

outputSingleScan(s1,[1 1]); %kanallara çıkış sinyal değerleri gönderilir.

%% Alçak geçirimli filtreyi tasarlanır.
Fpass = 0;          %geçirilen sinyalin alt frekans değeri
Fstop = 58;        %kesilen sinyalin alt frekans değeri
Dpass = 1e-5;      %geçiş bölgesinin tolerans değeri
Dstop = 1e-4;     % kesilme bölgesinin tolerans değeri
F      = [0 Fpass Fstop Fs/2]/(Fs/2);
A      = [1 1 0 0];
D      = [Dpass Dstop];
b = firgr('minorder', F, A, D);
LP = dsp.FIRFilter('Numerator',b);
%filtreyi programda tekrar çağırmak için handle funtion atanır.

%% Yük hücresi ve enkoder verilerini dosyaya yazdırma
% Binnary formatlı log.bin dosyasını yazdırma modunda açarak, fid1 dosya
tanımlayıcına atanır.

fid1 = fopen('log.bin','w');

%% Listener eklenir.

```

%Veri toplama işlemi arka planda listener ile yönlendirilirken, while sonsuz döngüsü kesintiye uğratılmadan test işlemine devam edilir. Listener içinde LogDATA.m dosyası anonymous %function olarak atanır.

%

% LogDATA dosyasının giriş parametreleri:

%

% * |src-| Olayın kaynak nesnesi (s)

% * |event-| olayın adı (DataAvailable)

% * |fid1-| Veri dosya tanımlayıcısı

% * |LP-| alçak geçirimli filtrenin handel tanımı

% Listener tekrar test rutini içinde çağrılabilmesi için handel ataması yapılır.

s.IsNotifyWhenDataAvailableExceedsAuto=true;

lh = s.addlistener('DataAvailable',@(src, event)LogDATAk4(src, event, fid1,LP));

s.IsContinuous=true;

s.startBackground;

%% Test rutininin uygulanması

global ort; % LogDATA ile ortak global değişken ort tanımlanır.

ort=0; % ort değişkenine ilk değeri atanır.

Flag=true; %Bayrak

directionFlag=true; %Yön bayrağı

n=0; %Çevrim sayacı

%%Birinci while döngüsü

while ~s.IsDone %Veri okuma logDATA içinde kesildi mi?

disp('While döngüsü, çalışıyor');

if Flag & ort>0.4 %Bayrak ve ort değişkeni, minumum gerginlik sinyali değerine ulaştı mı?

et=tic; %Süreyi başlat

Flag=false; %Bayrak değiştirilir.

end

if ort>0.5 % ort değişkeni, maksimum gerginlik sinyali değerine ulaştı mı?

etime=toc(et); % geçen süreyi belirlenir.

break; %Sonsuz while döngüsü kırılır ve ikinci while döngüsüne geçilir.

end

pause(1e-9); % Test rutini aniden kesilebilmesi için Kullanıcının ctr+c girişine izin verir.

end

%%İkinci while döngüsü

while ~s.IsDone %Veri okuma logDATA içinde kesildi mi?

disp('While döngüsü, çalışıyor');

```

if directionFlag                %Yön bayrağı doğru mu?
    outputSingleScan(s1,[0 1]); %Çene hareket yönünü geriye değişir.
    n=n+1;                       %Yön değiştiği için çevrim sayısı bir değerinde
    artar.
    fprintf('0 geri \n');        %Çene hareket yönü ekrana yazılır.
    directionFlag=false;       %Yön bayrağı değiştirilir.
    pause(etime);

elseif ~directionFlag          %Yön bayrağı yanlış değil mi?
    outputSingleScan(s1,[1 1]); %Çene hareket yönünü ileriye değişir.
    n=n+1;                       %Yön değiştiği için çevrim sayısı bir
    %değerinde artar.
    fprintf('1 ileri \n');      %Çene hareket yönü ekrana yazılır.
    directionFlag=true;        %Yön bayrağı değiştirilir.
    pause(etime);

end

if n>10;                        %Çevrim sayısı aşıldı mı?
    stop(s);                    %Test sonlandırılır.
end
pause(1e-9);                   % Test rutini aniden kesilebilmesi için Kullanıcının ctr+c girişine
                                % izin verir.

end

```

%%Test sonrası yapılan işlemler

```
fid2 = fopen('log.bin','r');    % log.bin dosyasını okuma modunda açıldı.
```

% Açılan dosyadan 4 sütunlu 64 bitlik değerinde veri okunur.

```
[data,count]= fread(fid2,[4,inf],'double');
```

```
fclose(fid2); % Dosya kapatıldı.
```

%% Verilerin grafiği çizdirilir.

% * data verilerinin her bir sütununu aşağıdaki değişkenlere atanır.

% * |t-| süre (s)

% * |xpuls-| pozisyon (puls)

% * |Fvolt-| kuvvet (Volt)

% * |filteredFvolt-| filtrelenmiş kuvvet (Volt)

```
t = data(1,:);
```

```
xpuls = data(2,:);
```

```
Fvolt=data(3,:);
```

```
filteredFvolt=data(4,:);
```

```

% * |xpos-| pozisyon (mm)
% * |FkN-| kuvvet (kN)
% * |filteredFkN-| filtrelenmiş kuvvet (kN)

xpos=data(2, :)*5/2500;
FkN=data(3, :)*9.80665*500/10/1000;
filteredFkN=data(4, :)*9.80665*500/10/1000;

% * |rigidityposition-| hareketli çene pozisyonu çenenin rijitliğine bağlı tekrar
% hesaplandı.

rigidityposition=xpos-8.0*FkN;           %8.0 Düzeltme katsayısı
filteredrigidityposition=xpos-8.0*filteredFkN;

% * |elongation-| test numunesinin yüzde uzaması
% * |rigidityelongation-| uzama miktarı çenenin rijitliğine bağlıdır.

elongation=xpos*0.50; % /200*100;200: numune uzunluğu 200 mm
rigidityelongation=rigidityposition*0.50; % /200*100;
filteredrigidityelongation=filteredrigidityposition*0.50; % /200*100;

%% Grafik çizdirilir.
figure(1);
plot(rigidityelongation, FkN, rigidityelongation, filteredFkN);
title('Kuvvet-Uzama');
xlabel('Uzama (%)');
ylabel('Kuvvet (kN)');

% Başlangıç pozisyonuna hareket için kullanıcıdan izin alınır.
fprintf('Yeni test için bir tuşa basın');
pause();

% Çenenin başlangıç pozisyonuna dönebilmesi için gerekli süre hesaplanır.
finalPositionindex=length(data(2, :));
Second=data(2, finalPositionindex)/2500;

outputSingleScan(s1, [0 1]); % Motor dönüş yönü değiştirildi.
pause(1); % Ayarların sürücüde yapılabilmesi için beklendi.
chpuls.Frequency=2500;
startBackground(s); % Session nesnesi tekrar çalıştırıldı.
pause(Second); % Çenenin başlangıç pozisyonuna dönebilmesi için kod girişi kapatıldı.
stop(s); % Session nesnesi durduruldu.
%% Çene pozisyonunu STARTfile.mat dosyasına kaydedilir.
finalPositionindex=length(data(2, :));
finalPosition=startPosition-data(2, finalPositionindex);
save('STARTfile.mat', 'finalPosition');

displayEndOfDemoMessage(mfilename) %Test rutini tamamlandı.

```


EK 6

Bölüm 2.1.5’de verilen genel diferansiyel modelin Prony serisinin terim sayısı ile çözümü aşağıda verilen Matlab programı ile denenmiştir.

```
function [Aj, lamdaj] = run_prony(nterim,data,deltat)

%% Giriş parametreleri
% nterim: Prony serisinin terim sayısı
% data: Gerginlik ölçümünden elde edilen veriler
% deltat: ölçüm aralıkları arasındaki geçen süre

%% Çıkış parametreleri
% lamdaj: Zaman sabiti
% Aj: Sabit katsayı

% Ölçüm sonuçlarından katsayılar matrisi ve sabitler matrisi oluşturulur.
[D d Acg bcg] = cfun(data);
disp('ccg sonuç!');

% Eşlenik gradyen yöntemi ile polinom katsayılarını belirler.
% [ccg,flag,relres,iter,resvec] =cgs(Acg,bcg,[],100); Acg*ccg; bcg;

% Denklem sisteminin ters matrisle çözümü bulunur.
disp('pinv sonuç!');
c=pinv(D)*d;

% Polinom kökleri hesaplanır.
disp('kökler bulunuyor');
alfai=roots([1;flip(c)]); % Kökler bulundu.

% lamdaj değerleri bulunan polinom kökleri ile hesaplanır.
lamdaj=log(alfai)/deltat;

% Belirlenen alfaj değerleri için Vandermonde matrisi ve sabit sayılar matrisi
% oluşturulur.
[U u]=aifun(data);

% Eşlenik gradyen ile çözüm
% [Ei,flag,relres,iter,resvec] =cgs(U(1:nterim,:),u(1:nterim),[],100);
% Ei=U\u;%soldan bölme ile çözüm

Ei=pinv(U)*u; % Ters matrisle çözüm

% Ölçüm verileri katsayılar matrisi ve sabitler matrisine dönüştürür.
function [A b Acgs bcgs]= cfun(x)
```

```

a=x;
cNaN=NaN([nterim-1,1],'like',a);
a=[a;cNaN];
adizi=[NaN;cNaN;repmat(a,nterim+1,1);NaN];
amatris=reshape(adizi,[],nterim+1);
Aek=amatris(nterim+1:size(amatris)-nterim,:)
A=Aek(:,1:nterim);
A(:,end:-2:1)=-A(:,end:-2:1);
b=-Aek(:,nterim+1);
Acgs=Aek(1:nterim,1:nterim);
bcgs=-Aek(1:nterim,nterim+1);
end

%% Veri sayısı kadar Vandermonde matrisi üretilir.

```

```

function [A b]=aifun(data);

    ndizi=length(data);
    alfa=alfai(:);
    A = ones([ndizi,nterim],class(alfa));

    for j = 2:ndizi
        A(j,:) = alfa'.*A(j-1,:);
    end
    size(A);
    b=data(1:ndizi);
end

end

```

EK 7

Bölüm 4.2’de test problemlerine ait fonksiyonların simülasyonu için aşağıda verilen Matlab programı kullanılmıştır.

```
function [Yi,Ygi, Zij ] = nexpdata(lambdaj,Aj,ti)
%% Giriş parametreleri
% lamdaj: Üstel katsayılar dizisi
% Aj: Sabit katsayılar dizisi
% ti: Ölçüm yapılan süre için zaman serisi

%% Çıkış parametreleri
% Y: Gürültüsüz sinyal
% Yg: Gürültülü sinyal
% Zij: Üstel terimlerin

format long;
m=length(t);
n=length(lambdaj);
X=zeros(m,n);

for j=1:n
    X(:,j)=Aj(j)*exp(lambdaj(j)*t);
end

Yi=sum(X,2);

isaret=rand(1,m)';
Ygi=sum(X,2)+0.007*rand(1,m)'*(-1*(isaret<0.5)+(isaret>0.5));
Zij=X;
plot(t,Yg,'k --')
hold on
plot(t,Y,'k','LineWidth',2.5)

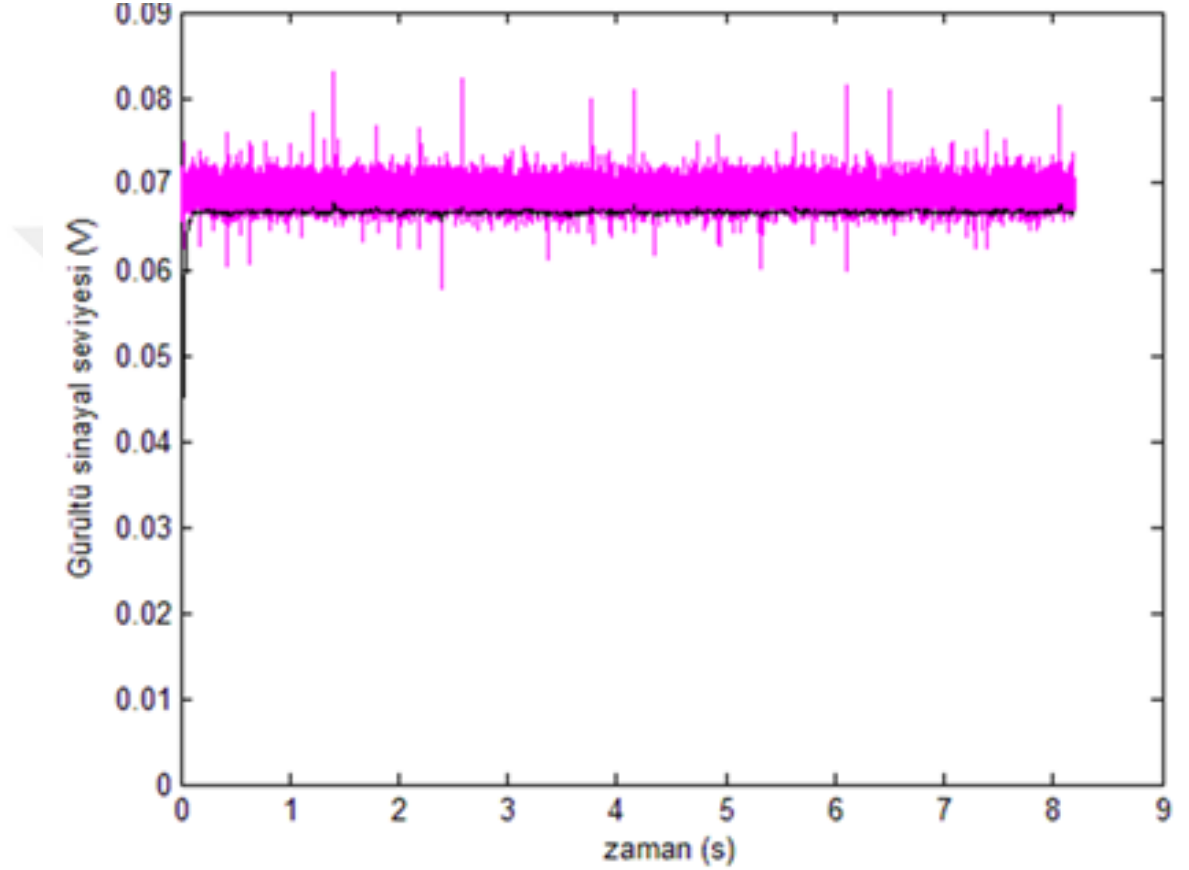
axis([-1 11 0 4])
hold on;

xlabel('Süre (s)','FontSize',30,'FontName','TimesNewRoman');
ylabel('Gerilme (MPa)','FontSize',30,'FontName','TimesNewRoman');

set(gca,'FontSize',30,'FontName','TimesNewRoman');
grid on;
```

EK 8

Aşağıda verilen şekilde yük hücresinden alınan analog sinyalin 20 mV seviyelerinde bir gürültüye sahip olduğu görülmektedir. Yük hücresi sinyali sayısal RC Filtreleme tekniği kullanılarak sabit tutulmuştur. Siyah eğri filtrelenmiş yük hücresi sinyali ile test rutinlerinin kontrol edilebildiği görülmüştür.



Şekil Ek 8.1. RC filtrelemenin etkinliğinin gösterilmesi

RC filtreleme tekniğinin uygulandığı Matlab programı LogData içerisinde ilk sayısal filtreleme çalışmasında denenmiştir.

```
function plotandsave(src,event)
```

```
%y[n] = K1.x[n] + K2.x[n-1] - K3.y[n-1]
```

```
%Burada x[n] ADC nin şuanki değerini, x[n-1] ADC nin bir önceki aldığı değeri, y[n-1] ise filtrenin bir önceki değeri temsil eder.
```

```
%R yi 1K seçersek 60Hz için C 2,65µF dir.
```

```
%Örnek alma zamanını da 1.6ms ( 625Hz) seçersek yukarıdaki denklem
```

```
%y[n] = 0,231884058.x[n] + 0,231884058.x[n-1] +0,536231884.y[n-1];
```

```

X=event.Data;
k=size(event.Data);

persistent XfilterEnd;

if isempty(XfilterEnd)
    XfilterEnd=0;%X(1)=0
end

persistent Xlast;

if isempty(Xlast)
    Xlast=0;
end

X= [Xlast;event.Data];
Xlast=X(end);

for i=1:k
    % Xfilter(i)=0.006*X(i+1)+0.006*X(i)+0.9877*XfilterEnd;
    Xfilter(i)=0.025*X(i+1)+0.025*X(i)+0.948*XfilterEnd;
    % Xfilter(i)=0.018*X(i+1)+0.018*X(i)+0.963*XfilterEnd;
    XfilterEnd= Xfilter(i);
end

save Xfilter;

plot(event.TimeStamps, event.Data,'m')
hold on;
plot(event.TimeStamps, Xfilter,'k-');
xlabel('zaman (s)');
ylabel('Gürültü sinayal seviyesi (V)');
end

```

EK 9

Aşağıdaki verilen Matlab programı, gerilme sinyali üzerinde 0.014 MPa değişim genliğine sahip gürültü sinyalinin uzaklaştırılması için kullanıldı. Analizi yapılacak gerilme azalması test verileri Matlaba load komutu ile yüklenir. Program ölçüm sinyalleri ve filtre edilmiş sinyal grafik ortamında birlikte çizdirerek, filtreleme işleminin uygunluğu kontrol edilir.

```
clc
clear
close all
%Veri dosyası Matlaba yüklenir.
load('GADosemelik11C.mat')
%Ölçüm verilerini grafik üzerinde gösterir.
plot(tbas,gerilme,'r.')
hold on

%Savitzky-Golay smoothing filtresi:
%3001 veriyi kullanarak polinom tipinde sinyal düzeltme işlemi yapılır.

sgfgerilme=sgolayfilt(gerilme,0,3001);

%filtrelemede kesilen ilk veriler tekrar veri dizisine eklenir.
veri=[gerilme(1:1500) sgfgerilme(1501:end)];

%gürültüden arındırılmış sinyali grafiğe aktarır.
plot(tbas,veri,'b.')

clear sgfgerilme;

% Ortalama değer hesabı veri kaybına neden olduğu için kullanılmadı.
% veri sayısı ortalama işlemi ile 10 kat azaltılır.
%for döngüsü için sondaki ortalama alınacak veriden daha az veri varsa atılır.
%n=length(veri);
%c=fix(n/10)*10;
%for k=1:10:c;
%gerilmeort(fix(k/10)+1)=mean(veri(k:k+10));
%tbasort(fix(k/10)+1)=mean(tbas(k:k+10));
%end;
%plot(tbasort,gerilmeort,'g.')

%Moving average filtresi:
%Hareketli ortalama tipinde sinyal düzeltme işlemi yapılır:

gerilmeort=veri;
```

```
for k=1:10
gerilmeort=fastsmooth(gerilmeort,250,3,1); % gerilmeort=sgolayfilt(gerilmeort,0,3);
end

%modellemede kullanılacak gerilme sinyali grafik üzerinde gösterir.
plot(tbas,gerilmeort,'k.');
```

plot(tbas,gerilmeort,'k.');

```
legend('Ölçüm sonuçları','Savitzky-Golay filtresi','Moving average filtresi')

xlabel('Süre (s)','FontSize',30,'FontName','TimesNewRoman');
ylabel('Gerilme (MPa)','FontSize',30,'FontName','TimesNewRoman');
set(gca,'FontSize',30,'FontName','TimesNewRoman');
grid on;
```



EK 10

Oluşturulan viskoelastik modellerin hata oranlarını belirlemek için kullanılan elastik modül ve başlangıç modülünün hesaplanmasında aşağıdaki Matlab kodu kullanılmıştır.

```
clc;
clear;
close all;

%ölçüm verileri dosyasından veri okunması

data11=load('BP7G1.mat')

%gerilme ve uzama değerlerinin hesaplanması

% puls değerinden çenenin yer değiştirme miktarının hesaplanması (mm)
position11=data11.data(2,:)*5/2500;
% gerilme sinyalinde gerilme kuvvetinin hesaplanması (kN)
force11=data11.data(4,:)*9.80665*500/10/1000;
% çene pozisyonunun kuvvet etkisi ile düzeltilmesi
dposition11=position11-8.0*force11;

% uzamanın yüzde değerinin hesaplanması (100 / 200 mm test numunesinin uzunluğu)
uzama11=dposition11*0.5;
% kuvvetin test numunesinin kesit alanına oranı ile gerilme değerinin hesaplanması
gerilmeMPa11=force11*1000/(50*1.52);

%grafığın çizdirilmesi
plot(uzama11,gerilmeMPa11,'r-','LineWidth',2)
text(uzama11(end),gerilmeMPa11(end),'Döşemelik-11','Color','r','FontSize',30,'FontName','TimesNewRoman','VerticalAlignment','bottom','HorizontalAlignment','right');
hold on

xlabel('Uzama (%)','FontSize',30,'FontName','TimesNewRoman');
ylabel('Gerilme (MPa)','FontSize',30,'FontName','TimesNewRoman');
set(gca,'FontSize',30,'FontName','TimesNewRoman');
grid on;

% gerilme azalması testinin başlanma anındaki modül değerinin bulunması
% Solvari ve Malinen (2006)
[makgerilmeMPa11 ins]=max(gerilmeMPa11);
%gerilme azalması için birim uzama değerinin uzama veri dizisinden belirlenmesi
epsilon0=uzama11(ins)/100;
```



```

%birim uzama hızının hesaplanması
epsilonhiz=0.01; % 120.0/200.0/60.0; % 120 (mm/dak)/ 200 (mm)/60 (s)

%sonlu farklarda adım uzunluğunu berileme işlemi
tbassure=data11.data(1,1:ins);
hins=ins:-1:1;
h=tbassure(ins)-tbassure(hins);

%sonlu farkların gerilme değerleri
sigma2=gerilmeMPa11(ins:2*ins-1);
sigma1=flip(gerilmeMPa11(1:ins));

ikinciterim=(sigma2-sigma1)/(4*epsilonhiz.*h);
% t=0 anındaki modül değerini hesaplanması
Et=makgerilmeMPa11/epsilon0+ikinciterim;

% (sigma2-sigma1)/(4*epsilonhiz.*h)=0/0 belirsizliği için
% Et verisinin birinci değerini ikincisine eşitlenerek
% sayısal olmayan değeri diziden atma (NaN)
Et(1)=Et(2);

% elastik modül için gerilme uzama eğrisinde lineer bölgenin belirlenmesi
%B: lineer bölgenin üst uzama sınırı
B=find(uzama11<5);
%A: lineer bölgenin başlangıcı (2 N öngerilme)
%A=find(gerilmeMPa11(1:B(end))<0.202);
%Elastik bölgedeki gerilme ve uzama değerleri

Elastikgerilme=gerilmeMPa11(B(end):ins);
Elastikuzama=uzama11(B(end):ins);

% Enküçük kareler yöntemi ile elastik bölgede lineer doğru denkleminin bulunması
x =Elastikuzama;
y=Elastikgerilme;

[r,m,b] = regression(x,y,'one');
x1=0:fix(uzama11(end));
fx=polyval([m b],x1);
x1o=x1;

% Doğrunun grafikte çizdirilmesi
plot(x1o,fx,'--y','LineWidth',2);hold on;

%hesaplanan değerlerin grafik üzerinde gösterimi
regression=['Regrasyon değeri = ' num2str(r,'%5.10f')];
ElastikModul=['E = ' num2str(m*100,'%5.10f') ' MPa'];
legend(regression,ElastikModul, 'Location','NorthWest');

```

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı :Barış Haşcelik
Doğum Yeri ve Tarihi :Denizli 1978
Yabancı Dili :İngilizce

Eğitim Durumu(Kurum ve Yıl)

Lise :Denizli Lisesi 1995
Lisans :Pamukkale Üniversitesi Tekstil Mühendisliği 1999
Yüksek Lisans :Pamukkale Üniversitesi Tekstil Mühendisliği 2008

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl

Pamukkale Üniversitesi Tekstil Mühendisliği Bölümü 2000-2009
Uludağ Üniversitesi Tekstil Mühendisliği Bölümü 2009-2015
Pamukkale Üniversitesi Tekstil Mühendisliği Bölümü 2015-20..

İletişim(eposta) : bhascelik@uludag.edu.tr

Yayınları

Eren R., Erturk, M. and Hascelik B. 2014. Kinematic Design and Motion Analysis of Spatial Rapier Drive Mechanisms Used in Weaving Machines. *Textile Research Journal*, 84(19) 2065–2073 (DOI: 10.1177/0040517514534754)

Abdulla, G., Haşcelik, B., Palamutçu, S. ve Soydan, A.S. 2010. Yeni Tasarlanmış Bir Rotatif Armür Konstrüksiyonunda Tahrik Mekanizmasının Sentezi , *Tekstil ve Konfeksiyon*, 20(3):218-224

Abdulla G., S. Palamutcu, A. Soydan, B. Haşcelik 2006. Synthesis of a New Dobby Mechanism. *Tekstil*, 55:184–188

Abdullayev, G., Soydan, A.S., Haşcelik, B. 2003. Dokuma marinalarında Ağızlık Açma Mekanizmaları. *PAÜ Mühendislik Bilimleri Dergisi* Denizli 2003(3) 103-115

Abdullayev, G. Çizmeçi, H.,Hascelik, B. 1999 Kancalı Dokuma Makinası Tasarımı. I.Babadağlılar Sempozyumu Denizli

Abdulla, G., Palamutçu, S., Soydan, A.S. ve Haşcelik, B. 2006. Dokuma Makinesi için Rotatif Armür ARGEPP-2006, Selçuk Üniversitesi/ Konya ,

Palamutçu S., Şengül M., Devrent N., Keskin R., Haşcelik B., İkiz Y. 2007, Farklı Antimikrobiyal Bitim Kimyasallarının %100 Pamuklu Kumaşlar Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması. 3. Uluslar arası Teknik Tekstiller Kongresi ,

Abdullayev, G., Palamutçu, S., Soydan, A.S., Haşcelik, B. 2007. Ra-14 Rotatif Armür Makinasının Tasarım Parametrelerinin Belirlenmesi ve Deneysel Araştırması II.Tekstil Teknolojileri ve Tekstil Makinaları Kongresi 19-20 Ekim 125 , 2007

Abdullayev, G., Palamutçu, S., Soydan, A.S., Haşcelik, B. 1999. Hava ve Su Jetli Dokuma Makinaları İçin Armür Dizayını,UÇTEK'99 Adana 6-8 Ekim 1999