



**KAUÇUK MALZEMELERDE KÜRLENME KİNEMATİĞİNİN YORULMA
ETKİSİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ**

Sinan DALKILIÇ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

NİSAN 2021

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Sinan DALKILIÇ

28/04/2021

KAUÇUK MALZEMELERDE KÜRLENME KİNEMATİĞİNİN YORULMA ETKİSİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Sinan DALKILIÇ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Nisan 2021

ÖZET

Havacılık ve otomotiv endüstrisinde sıklıkla kullanılan elastomerik malzemelerden birisi olan doğal kauçuk türevi malzemeler 140 °C ve 180 °C sıcaklık değerleri arasında farklı kullanım ve amaçlara yönelik tercihler doğrultusunda kürlenme ile üretim aşamasından geçmektedir. Üretim aşamasında kürlenme sıcaklık değeri ve termal sıcaklık dağılımı, elde edilecek nihai ürünün kürlenme statüsünü doğrudan etkilemektedir. Kürlenme aşamasında sıcaklık dağılımının nihai ürünün tüm bölgelerinde aynı değere ulaşamaması durumu üretim aşamasında sıklıkla karşılaşılan problemlerdendir. Parça boyutu değiştikçe, iç ve dış bölgeler arasındaki kürlenme sıcaklığı ve kürlenme statüsü farkı nihai ürünün mekanik özelliklerinin homojen dağılım gösterememesine neden olmaktadır. Bu tez çalışmasında, farklı sıcaklık değerleri ve kürlenme sürelerinde üretilen doğal kauçuk tabanlı test parçalarının ömür süreleri çekme yorulma deneysel testleri ile incelenmiştir. Bu amaçla, MSC Patran ve MSC Nastran bilgisayar destekli yapısal ve termal analiz programı yardımıyla üretim ve test aşamasına ait ön parametreler belirlenmiştir. Sıcaklık ve stress dağılımı analizleri ile uygun malzeme boyutu, şekli ve değişken pişirme sürelerine karar verilmesinin ardından, bu parametreler ile doğal kauçuktan üretilen numuneler tek ekseninde çekme ömür testlerine tabi tutulmuştur. Böylece, üretim aşamasındaki önemli parametrelerden olan kürlenme sıcaklık değeri ve kürlenme süresi parametrelerinin malzemenin ömür süresi üzerindeki etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Üç farklı sıcaklık ve üretim sürelerinde üretilen nihai ürünler tek ekseninde yorulma deneylerine tabi tutulmuş ve kürlenme statüsü iyileştirme çalışmasının yorulma ömrü üzerindeki etkisinin incelenmesi ve elde edilen sonuçların karşılaştırılması sağlanmıştır.

Bilim Kodu : 91421

Anahtar Kelimeler : Doğal kauçuk, yorulma ömrü, yorulma ömür testi, yarı statik test, sonlu elemanlar analizi, kürlenme sıcaklığı, kürlenme statüsü, kürlenme kinematığı

Sayfa Adedi : 134

Danışman : Doç. Dr. Tuncay KARAÇAY

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE FATIGUE EFFECT OF CURING
KINEMATICS ON RUBBER MATERIALS

(M.Sc. Thesis)

Sinan DALKILIÇ

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

April 2021

ABSTRACT

Natural rubber derivative materials, which are one of the elastomeric materials frequently used in the aviation and automotive industry, pass through the production phase with curing in line with preferences for different uses and purposes between 140 °C and 180 °C temperature values. During the production phase, the curing temperature and thermal temperature distribution directly affect the curing status of the final product to be obtained. Failure of the temperature distribution to reach the same value in all parts of the final product during the curing phase is one of the problems frequently encountered during the production phase. As the part size changes, the difference in curing temperature and curing status between the inner and outer zones causes the mechanical properties of the final product not to be homogeneously distributed. In this thesis, the lifetime of natural rubber-based test pieces produced at different temperature values and curing times were examined by full relaxing tensile fatigue experimental tests. For this purpose, the preliminary parameters of the production and testing phase were determined with the help of MSC Patran and MSC Nastran computer aided structural and thermal analysis software. After determining the appropriate material size, shape and variable cooking times with temperature and stress distribution analysis, samples produced from natural rubber with these parameters were subjected to uniaxial tensile life tests. Thus, the effect of curing temperature value and curing time parameters, which are important parameters in the production phase, on the life span of the material was experimentally investigated. The final products produced at three different temperatures and production times were subjected to uniaxial fatigue tests and the effect of curing status improvement study on fatigue life was examined and the results obtained were compared.

Science Code : 91421

Key Words : Natural rubber, fatigue life, fatigue life test, quasi static test, finite element analysis, curing temperature, curing status, curing kinematics

Page Number : 134

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Tuncay KARAÇAY

TEŞEKKÜR

Sayın danışman hocam Doç. Dr. Tuncay KARAÇAY'a her soruma ve sorunuma en olumlu yaklaşımı gösterdiği, eşsiz bilgisi ve hoşgörüsü ile beni yönlendirdiği ve mesleki gelişimime bulunduğu çok önemli katkılar ve yanımda olduğu için,

Arkadaşlarım Afif Umur LİMON, Salim ÇALIŞKAN ve Çağrı İLHAN yardıma ihtiyaç duyduğum her an yanımda olduğu, bu tez için koşulsuz emek verdikleri ve insana kendini harika hissettiren destekleri için,

Tez çalışması süresi boyunca her zaman destek olan, yardımcı olan ve fikir veren çalışma arkadaşlarıma emekleri için,

Eşime, bu süreçte girmem için sonsuz şekilde gösterdiği inancı ve bu süreç boyunca gösterdiği sevgisi, desteği ve her şey için,

Aileme eşsiz destekleri ve her zaman yanımda olduklarını ve olacaklarını hissettirdikleri için,

Son olarak hayatım boyunca desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen ve isimlerini sayamadığım tüm arkadaşlarıma sonsuz teşekkürü bir borç bilirim.

Teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xi
RESİMLERİN LİSTESİ	xx
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xxi
1. GİRİŞ.....	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	5
3. SAYISAL ANALİZLER	23
3.1. Termal Analiz Çalışması.....	23
3.1.1. Termal analiz malzeme özellikleri.....	24
3.1.2. Model tanımı ve sınır koşulları	25
3.1.3. Termal analiz yük değerleri.....	26
3.2. Yapısal Analiz Çalışması	26
3.2.1. Yapısal analiz malzeme özellikleri	27
3.2.2. Model tanımı ve sınır koşulları	28
3.2.3. Yapısal analiz yük değerleri	28
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	31
4.1. Numune Şekli	31
4.2. Test Numunesi ve Test Cihazı Arayüz Bağlantısının Modellenmesi	33
4.3. Numune Setleri	35

Sayfa

4.3.1. Rheology çalışmalarına göre numune seçimi.....	36
4.3.2. Numune kürlenme sıcaklıkları ve kürlenme süreleri seçimi	38
4.4 Yorulma mr Yapısal Test Parametrelerinin Belirlenmesi.....	40
4.4.1. Test türünün belirlenmesi	40
4.4.2. Test yükünün belirlenmesi	41
4.4.3. Test yük oranı bölgesinin belirlenmesi.....	41
4.4.4. Test hızının belirlenmesi.....	41
4.4.5. Yorulma mr çevrim sayısı karar verme kriteri.....	42
4.4.6. Yorulma mr deneyi tüm parametreler.....	42
5. BULGULAR, YORUMLAR VE TARTIşMA.....	45
5.1. Sayısal Analiz Sonuçları	45
5.1.1. Yapısal analiz sonuçlarının incelenmesi.....	45
5.1.2. Termal analiz sonuçlarının incelenmesi	58
5.2. Deneysel Sonuçlar.....	79
5.2.1. Yorulma mr testi sonuçlarının incelenmesi.....	80
5.2.2. Hızlandırılmış yorulma ömür testi sonuçlarının incelenmesi	94
5.2.3. Yarı statik çekme testi sonuçlarının incelenmesi	108
5.2.4. Test numunesi yüzey sıcaklığı ölçüm sonuçlarının incelenmesi	111
5.3. Yorumlar ve Tartışma	113
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	121
KAYNAKLAR	125
EKLER.....	129
EK-1. Instron servohidrolik eksenel test cihazı performans grafiği	130
EK-2. Diabolo test numunesi	131

Sayfa

EK-3. Termal kamera ölçüm kurulumu.....	133
ÖZGEÇMİŞ	134



ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. Doğal kauçuk test numunesine ait malzeme özellikleri	24
Çizelge 3.2. Termal analiz çalışması sırasında uygulanan termal yük parametreleri	26
Çizelge 3.3. Doğal kauçuk test numunesine ait malzeme özellikleri	27
Çizelge 3.4. Yapısal analiz çalışması sırasında uygulanan tek eksendeki çekme yük değerleri	29
Çizelge 4.1. Katkı malzemesiz doğal kauçuk hamuru formülasyonu.....	36
Çizelge 4.2. Doğal kauçuk formülasyonunun vulkanizasyon karakterizasyonu reometre ölçüm sonuçları	38
Çizelge 4.3. Test numuneleri kürlenme sıcaklığı ve kürlenme süresi parametreleri	40
Çizelge 4.4. Yorulma ömür testleri özet tablosu	43
Çizelge 5.1. Test numunesinin çeşitli yükler altındaki uzama ve katılık değerleri sonlu elemanlar analizi sonuçları	57
Çizelge 5.2. Numune içi termal analiz ölçüm noktalarının merkez konumuna uzaklıkları	59
Çizelge 5.3. Numune içi termal analiz noktalarının 360-660 sn aralığındaki sıcaklık değişim değerleri	61
Çizelge 5.4. Numune içi termal analiz noktalarının 720-1080 sn aralığındaki sıcaklık değişimi	62
Çizelge 5.5. Numune içi termal analiz noktalarının 1140-1440 sn aralığındaki sıcaklık değişimi	62
Çizelge 5.6. Numune içi termal analiz ölçüm noktalarının 360-660 sn aralığındaki sıcaklık değişimi	68
Çizelge 5.7. Numune içi termal analiz ölçüm noktalarının 720-1080 sn aralığındaki sıcaklık değişimi	68
Çizelge 5.8. Numune içi termal analiz ölçüm noktalarının 204-612 sn aralığındaki sıcaklık değişimi	74
Çizelge 5.9. Numune içi termal analiz ölçüm noktalarının 720-1080 sn aralığındaki sıcaklık değişimi	74
Çizelge 5.10. 350 N yük altında gerçekleştirilen yorulma ömür testleri sonuçları.....	93
Çizelge 5.11. 400 N yük altında gerçekleştirilen yorulma ömür testleri sonuçları.....	107

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Akış bilimi (reoloji) ölçüm grafiği (kürlenme eğrisi).....	15
Şekil 3.1. Analiz çalışmalarında kullanılan Diabolo test numunesi modeli	23
Şekil 3.2. Test numunesi iç bölgeleri ve yüzey bölgesi sıcaklık sınır koşulları	25
Şekil 3.3. Diabolo test numunesi sonlu elemanlar analizi modeli	28
Şekil 4.1. Diabolo test numunesi izometrik görünüm.....	32
Şekil 4.2. Diabolo test numunesi boyutsal ölçüleri.....	33
Şekil 4.3. Test numunesinin üst ve alt bölgesine yapıştırılan metal plaka	33
Şekil 4.4. Test numunesini çekme cihazına bağlamak amaçlı tasarlanan ara yüz	34
Şekil 4.5. Ara yüz aparatı ve metal plakayı birbirine bağlayan metrik 12 saplama	34
Şekil 4.6. Diabolo test numunesi, metalik plakalar, ara yüzler ve saplamalar	35
Şekil 4.7. Reometre kürlenme grafiği ve olası vulkanizasyon süreci davranışlar	37
Şekil 4.8. Doğal kauçuk karışımı için kürlenme grafiği, 140 °C (1), 150 °C (2), 160 °C (3), 170 °C (4), 180 oC (5)	38
Şekil 5.1. Doğal kauçuk test numunesi 100 N yük altındaki deformasyon dağılımı.....	46
Şekil 5.2. Doğal kauçuk test numunesi 100 N yük altındaki gerilim dağılımı	46
Şekil 5.3. Doğal kauçuk test numunesi 200 N yük altındaki deformasyon dağılımı.....	47
Şekil 5.4. Doğal kauçuk test numunesi 200 N yük altındaki gerilim dağılımı	47
Şekil 5.5. Doğal kauçuk test numunesi 300 N yük altındaki deformasyon dağılımı.....	48
Şekil 5.6. Doğal kauçuk test numunesi 300 N yük altındaki gerilim dağılımı	48
Şekil 5.7. Doğal kauçuk test numunesi 350 N yük altındaki deformasyon dağılımı.....	49
Şekil 5.8. Doğal kauçuk test numunesi 350 N yük altındaki gerilim dağılımı	49
Şekil 5.9. Doğal kauçuk test numunesi 400 N yük altındaki deformasyon dağılımı.....	50
Şekil 5.10. Doğal kauçuk test numunesi 400 N yük altındaki gerilim dağılımı	50
Şekil 5.11. Doğal kauçuk test numunesi 500 N yük altındaki deformasyon dağılımı....	51
Şekil 5.12. Doğal kauçuk test numunesi 500 N yük altındaki gerilim dağılımı	51

Şekil	Sayfa
Şekil 5.13. Doğal kauçuk test numunesi 700 N yük altındaki deformasyon dağılımı....	52
Şekil 5.14. Doğal kauçuk test numunesi 700 N yük altındaki gerilim dağılımı	52
Şekil 5.15. Doğal kauçuk test numunesi 900 N yük altındaki deformasyon dağılımı....	53
Şekil 5.16. Doğal kauçuk test numunesi 900 N yük altındaki gerilim dağılımı	53
Şekil 5.17. Doğal kauçuk test numunesi 1000 N yük altındaki deformasyon dağılımı..	54
Şekil 5.18. Doğal kauçuk test numunesi 1000 N yük altındaki gerilim dağılımı	54
Şekil 5.19. Doğal kauçuk test numunesi 1250 N yük altındaki deformasyon dağılımı..	55
Şekil 5.20. Doğal kauçuk test numunesi 1250 N yük altındaki gerilim dağılımı	55
Şekil 5.21. Doğal kauçuk test numunesi 1500 N yük altındaki deformasyon dağılımı..	56
Şekil 5.22. Doğal kauçuk test numunesi 1500 N yük altındaki gerilim dağılımı	56
Şekil 5.23. Test numunesi sonlu elemanlar analizi yük – uzama miktarı grafiği	58
Şekil 5.24. Numune içi termal analiz sıcaklık ölçüm noktaları izometrik görünüm	59
Şekil 5.25. Numune içi termal analiz sıcaklık ölçüm noktaları üstten görünüm	59
Şekil 5.26. Numune içi termal analiz 720 sn boyunca sıcaklık değişimleri (sn vs °C) ..	60
Şekil 5.27. Numune içi termal analiz 1440 sn boyunca sıcaklık değişimleri (sn vs °C)	61
Şekil 5.28. 150 °C kürlenme 360. saniye numune içi dinamik sıcaklık dağılımı	63
Şekil 5.29. 150 °C kürlenme 720. saniye numune içi dinamik sıcaklık dağılımı	63
Şekil 5.30. 150 °C kürlenme 1080. saniye numune içi dinamik sıcaklık dağılımı	64
Şekil 5.31. 150 °C kürlenme 1440. saniye numune içi dinamik sıcaklık dağılımı	64
Şekil 5.32. Numune içi termal analiz 405 sn boyunca sıcaklık değişimleri (sn vs °C) ..	67
Şekil 5.33. Numune içi termal analiz 810 sn boyunca sıcaklık değişimleri (sn vs °C) ..	67
Şekil 5.34. 160 °C kürlenme 405. saniye numune içi dinamik sıcaklık dağılımı	69
Şekil 5.35. 160 °C kürlenme 550. saniye numune içi dinamik sıcaklık dağılımı	69
Şekil 5.36. 160 °C kürlenme 700. saniye numune içi dinamik sıcaklık dağılımı	70
Şekil 5.37. 160 °C kürlenme 810. saniye numune içi dinamik sıcaklık dağılımı	70
Şekil 5.38. Numune içi termal analiz 204 sn boyunca sıcaklık değişimleri (sn vs °C) ..	73

Şekil	Sayfa
Şekil 5.39. Numune içi termal analiz 612 sn boyunca sıcaklık değişimleri (sn vs °C) ..	73
Şekil 5.40. 170 °C kürlenme 204. saniye numune içi dinamik sıcaklık dağılımı	75
Şekil 5.41. 170 °C kürlenme 304. saniye numune içi dinamik sıcaklık dağılımı	75
Şekil 5.42. 170 °C kürlenme 404. saniye numune içi dinamik sıcaklık dağılımı	76
Şekil 5.43. 170 °C kürlenme 504. saniye numune içi dinamik sıcaklık dağılımı	76
Şekil 5.44. 170 °C kürlenme 612. saniye numune içi dinamik sıcaklık dağılımı	77
Şekil 5.45. 150 °C 720 sn kürlenmiş numune yorulma testi çekme kuvveti grafiği.....	80
Şekil 5.46. 150 °C 720 sn kürlenmiş numune yorulma testi uzama miktarı grafiği	81
Şekil 5.47. 150 °C 720 sn kürlenmiş numune yorulma testi katılık değeri grafiği.....	81
Şekil 5.48. 150 °C 1440 sn kürlenmiş numune yorulma testi çekme kuvveti grafiği.....	82
Şekil 5.49. 150 °C 1440 sn kürlenmiş numune yorulma testi uzama miktarı grafiği	83
Şekil 5.50. 150 °C 1440 sn kürlenmiş numune yorulma testi katılık değeri grafiği	83
Şekil 5.51. 160 °C 405 sn kürlenmiş numune yorulma testi çekme kuvveti grafiği.....	84
Şekil 5.52. 160 °C 405 sn kürlenmiş numune yorulma testi uzama miktarı grafiği	85
Şekil 5.53. 160 °C 405 sn kürlenmiş numune yorulma testi katılık değeri grafiği	85
Şekil 5.54. 160 °C 810 sn kürlenmiş numune yorulma testi çekme kuvveti grafiği.....	86
Şekil 5.55. 160 °C 810 sn kürlenmiş numune yorulma testi uzama miktarı grafiği	87
Şekil 5.56. 160 °C 810 sn kürlenmiş numune yorulma testi katılık değeri grafiği	87
Şekil 5.57. 170 °C 204 sn kürlenmiş numune yorulma testi çekme kuvveti grafiği.....	88
Şekil 5.58. 170 °C 204 sn kürlenmiş numune yorulma testi uzama miktarı grafiği	89
Şekil 5.59. 170 °C 204 sn kürlenmiş numune yorulma testi katılık değeri grafiği.....	89
Şekil 5.60. 170 °C 612 sn kürlenmiş numune yorulma testi çekme kuvveti grafiği.....	90
Şekil 5.61. 170 °C 612 sn kürlenmiş numune yorulma testi uzama miktarı grafiği	91
Şekil 5.62. 170 °C 612 sn kürlenmiş numune yorulma testi katılık değeri grafiği.....	91
Şekil 5.63. 350 N yorulma ömür testleri 6 numuneye ait uzama miktarı değerleri.....	92
Şekil 5.64. 350 N yorulma ömür testleri 6 numuneye ait katılık değerleri.....	92

Şekil	Sayfa
Şekil 5.65. 350 N yorulma testleri ömür süreleri karşılaştırması	93
Şekil 5.66. 350 N yorulma testleri katılık değerleri karşılaştırması	94
Şekil 5.67. 150 °C 720 sn kürlenmiş numune yorulma testi çekme kuvveti grafiği.....	95
Şekil 5.68. 150 °C 720 sn kürlenmiş numune yorulma testi uzama miktarı grafiği	95
Şekil 5.69. 150 °C 720 sn kürlenmiş numune yorulma testi katılık değeri grafiği	96
Şekil 5.70. 150 °C 1440 sn kürlenmiş numune yorulma testi çekme kuvveti grafiği.....	97
Şekil 5.71. 150 °C 1440 sn kürlenmiş numune yorulma testi uzama miktarı grafiği	97
Şekil 5.72. 150 °C 1440 sn kürlenmiş numune yorulma testi katılık değeri grafiği	98
Şekil 5.73. 160 °C 405 sn kürlenmiş numune yorulma testi çekme kuvveti grafiği.....	99
Şekil 5.74. 160 °C 405 sn kürlenmiş numune yorulma testi uzama miktarı grafiği	99
Şekil 5.75. 160 °C 405 sn kürlenmiş numune yorulma testi katılık değeri grafiği	100
Şekil 5.76. 160 °C 810 sn kürlenmiş numune yorulma testi çekme kuvveti grafiği.....	101
Şekil 5.77. 160 °C 810 sn kürlenmiş numune yorulma testi uzama miktarı grafiği	101
Şekil 5.78. 160 °C 810 sn kürlenmiş numune yorulma testi katılık değeri grafiği	102
Şekil 5.79. 170 °C 204 sn kürlenmiş numune yorulma testi çekme kuvveti grafiği.....	103
Şekil 5.80. 170 °C 204 sn kürlenmiş numune yorulma testi uzama miktarı grafiği	103
Şekil 5.81. 170 °C 204 sn kürlenmiş numune yorulma testi katılık değeri grafiği	104
Şekil 5.82. 170 °C 612 sn kürlenmiş numune yorulma testi çekme kuvveti grafiği.....	105
Şekil 5.83. 170 °C 612 sn kürlenmiş numune yorulma testi uzama miktarı grafiği	105
Şekil 5.84. 170 °C 612 sn kürlenmiş numune yorulma testi katılık değeri grafiği.....	106
Şekil 5.85. 400 N yorulma ömür testleri 6 numuneye ait katılık değerleri.....	106
Şekil 5.86. 400 N yorulma ömür testleri 6 numuneye ait uzama miktarı değerleri.....	107
Şekil 5.87. 400 N yorulma testleri ömür süreleri karşılaştırması	108
Şekil 5.88. 400 N yorulma testleri katılık değerleri karşılaştırması	108
Şekil 5.89. Yarı statik test öncesi 1000 çevrim yorulma testi katılık değerleri sonuçları	109

Şekil	Sayfa
Şekil 5.90. Yarı statik testler kopma noktasına kadar kuvvet uzama miktarı sonuçları .	109
Şekil 5.91. Yarı statik testler çekme kuvvetine karşılık katılık değeri değişim sonuçları	110
Şekil 5.92. Yapısal sonlu elemanlar analizi ile yarı statik test kuvvet uzama miktarı karşılaştırması	110
Şekil 5.93 Yorulma testleri yüzey sıcaklığı ölçüm sonuçları	111



RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 4.1. Instron 8801 servo hidrolik eksenel test cihazı.....	31
Resim 4.2. Diabolo test numunesi, metalik plakalar, ara yüzler ve saplama montajı	35
Resim 5.1. Test numunesi yorulma ömür testi 200. çevrim yüzey sıcaklığı dağılımı....	112
Resim 5.2. Test numunesi yorulma ömür testi 1000. çevrim yüzey sıcaklığı dağılımı ..	112
Resim 5.3. Test numunesi yorulma ömür testi 2000. çevrim yüzey sıcaklığı dağılımı ..	113



SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklamalar
c	Spesifik ısı katsayısı
C_{ij}	Malzemenin kesme davranışını tanımlayan sabitler
D_{ij}	Sıkıştırılabilirlik hacim modülü
Hz	Hertz
I	Gerinim varyantları
J	Joule
J_{el}	Elastik hacim oranı sabiti
K	Kelvin
MPa	Megapaskal
M_L	Reometik ölçümde görülen en düşük tork değeri
M_H	Reometik ölçümde görülen en yüksek tork değeri
r	Merkez bölgesine olan uzaklık/yarıçap
R	Yük oranı
t_{90}	Optimum vulkanizasyon süresi
t_{10}	Minimum ve maksimum tork arası sürenin onda biri
t_{sc}	Kürlenme başlangıcına kadar geçen süre
W	Gerinim enerjisi fonksiyonu
W	Watt
dQ/dt	Birim zamanda aktarılan ısı enerjisi miktarı
λ	Termal iletim katsayısı
σ_{min}	En düşük gerinim değeri
σ_{max}	En yüksek gerinim değeri
ρ	Yoğunluk

Kısaltmalar**Açıklamalar****ASTM**

Uluslararası Amerikan Test ve Materyalleri Topluluğu

ISO

Uluslararası Standartlar Teşkilatı

Max

Maksimum

Min

Minimum

R

Yükleme oranı

SBR

Stiren bütadien kauçuk



1. GİRİŞ

Her gün birçok farklı sentetik kauçuk çeşitleri üretilmesine rağmen, doğal kauçuk tek başına dünyadaki toplam kauçuk tüketiminin yarısında kullanılmaktadır [25]. Doğal kauçuk ve türevleri kendilerine özgü mekanik özelliklerinden dolayı birçok alanda geniş bir kullanım oranına sahiptir. Bu kullanım alanlarından bazıları lastik üretimi, kemer, sağlık cihazları, yapısal rulmanlar, conta, hortum ve vibrasyon izolatörlerinin üretimi, burç üretimi, tampon ve motor bağlantılarının üretimi şeklinde örneklendirilebilir. Bu uygulamalarda kauçuk malzemeler reolojik çalışmalar, literatür çalışmaları ve deneysel çalışmalar ışığında kararlaştırılmış çeşitli üretim parametreleri baz alınarak üretilmektedir. Bu parametrelerden bir tanesi olan malzeme içi homojen olmayan kürlenme statüsü dağılımı kauçuk malzemenin statik ve/veya çevrimsel yükler altındaki ömür süresinde değişikliklere sebep olabilmektedir.

Kauçuk malzemelerde ömür süresinin tayini ve önceden bilinmesi ise endüstriyel anlamda büyük önem arz etmekte, ömür sürelerini arttırmaya yönelik çalışmalar sürekli olarak devam etmektedir.

Kauçuk malzemelerde mekanik ve fiziksel özelliklere etki eden temel etmenler kürlenme sıcaklığı, kürlenme süresi, kauçuk karışımındaki bileşiklerin dağılımı, katkı malzemesi miktarı ve türü, üretim sonrası yaşlandırma süresi, üretim aşamasındaki kalıplama koşulları olarak sıralanabilir.

Kauçuk malzemer vulkanizasyon ile kürlenme üretim prosesi aşamasından sonra nihai formlarına ve bağ yapılarına ulaştığından, bu malzemelerde üretim kalitesi kürlenme kinematiği parametrelerine bağlı olarak değişiklik göstermektedir.

Endüstride kullanılan birçok kauçuk malzeme temelinde doğal kauçuk içermekte ve formülasyonlarında değişik miktarlarda katkı malzemesi içerebilmektedir. Kürlenme kinematiği parametrelerini tüm modellere uygulayabilmek amaçlı gerçekleştirilen çalışmalar genelde doğal kauçuk numuneler ile gerçekleştirilmektedir. Bunun dışında özel olarak amaca yönelik yapılan çalışmalar ise daha önceden belirlenmiş katkı malzemeli formülasyonlar üzerinden gerçekleştirilmektedir.

Reoloji çalışmaları kauçuk malzemelerin değişik sıcaklıklar altında mekanik özelliklerini üretim aşaması öncesi tahmin etmek için gerçekleştirilmektedir. Bu çalışmalarda kauçuk karışımına ait mekanik özellikler reometre cihazlarında sabit sıcaklık altında indirekt ölçüm methodları ile elde edilmektedir. Süreye bağlı olarak maksimum tork ve minimum tork değerleri ölçülen kauçuk karışımlarının mekanik özellikleri bu reoloji grafiği üzerindeki değişim ve yönelim davranışları ile ölçülmektedir.

Reoloji çalışmalarında elde edilen sonuçlar değişik kalınlıklarda üretilmiş malzemelerde beklenen değerleri gösterememekte ve bu durumun temel sebebinin nihai ürüne ait iç yapı eşit olmayan kürlenme statüsü dağılımı olduğu tahmin edilmektedir. Nihai ürünün kalınlığı artmasına rağmen ısı kaynağının gücü, sıcaklık değeri ve kürlenme süresi parametresi değişmediğinden reoloji grafikleri doğrultusunda beklenen sonuçlardan sapmalar olabilmektedir. Kauçuk endüstrisinde içyapı kürlenme statüsünü iyileştirme ve kürlenme statü durumunu tahmin etmeye yönelik çalışmalar önemli bir rol oynamaktadır.

Kürlenme kinematığı parametrelerinin yanı sıra yorulma ömür deneyleri aşamasını etkileyen parametreler de vardır. Test yükü, deney ortamının sıcaklığı, test hızı ve test türü bu parametrelerden bazılarıdır.

Bu tez çalışmasında üç farklı kürlenme sıcaklığında optimum kürlenme süreleri ile üretilen doğal kauçuk karışımlarının kürlenme statüsü dağılımlarının iyileştirilmesi ve dolaylı olarak yorulma ömür sürelerinin iyileştirilmesi hedeflenmiştir. Bu hedef doğrultusunda nihai ürünlerin içyapı kürlenme statülerini arttırmak amaçlı kürlenme süresi parametresi değiştirilmiş ve daha yüksek sürelerde kürlenme durumunda yorulma ömür süresi değerinde meydana gelen değişimin incelenmesi amaçlanmıştır.

Test numunesi geometrisi literatürde sıkça kullanılan ve Şekil 3.1’de boyutları verilen 3 boyutlu diablo türü numune olarak seçilmiştir.

Üretim aşaması için kullanılan doğal kauçuk karışımı literatür çalışmalarında kullanılan formülasyonlardan deney aşamasına uygun olan ve %100 doğal kauçuk içeren bir formülasyon seçilerek kararlaştırılmıştır [35]. Bu formülasyonun seçilmesinin sebebi doğal kauçuk formülasyonun katkı malzemeli formülasyonlara kolayca adapte edilebilir olmasıdır. Kürlenme statüsünde iyileştirme amacına yönelik olarak karar verilen doğal

kauçuk karışımına ait kürlenme sıcaklığı ve optimum kürlenme süresi parametreleri bu literatür çalışmasından alınmıştır ve birinci set numunelere ait parametrelere bu şekilde karar verilmiştir. İkinci set numunelerin kürlenme sürelerine karar vermek amaçlı termal sonlu elemanlar analiz çalışması gerçekleştirilmiş ve analiz sonuçları doğrultusunda reoloji grafiklerinde t_{90} olarak tanımlanan optimum kürlenme süresi parametresinin iki katı veya üç katı sürelerde üretilecek ikinci set numunelere karar verilmiştir. Böylece numune içi kürlenme statülerinin arttırılması amaçlanmıştır.

150 °C sıcaklıkta t_{90} ve $2x t_{90}$ süre ile kürlenen, 160 °C sıcaklıkta t_{90} ve $2x t_{90}$ süre ile kürlenen ve 170 °C sıcaklıkta t_{90} ve $3x t_{90}$ süre ile kürlenen test numuneleri kalıplama yöntemi ile üretilmiştir.

Yorulma testi deney aşamasındaki yük miktarına karar vermek amaçlı yapısal sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilmiştir ve test numunesinin en ince kesitinin toplam boyunda meydana gelen uzama miktarı baz alınarak 350 N yük değeri kuvvet değeri olarak kararlaştırılmıştır. Kuvvet miktarında meydana gelen değişim ile elde edilecek sonuçlar arasındaki ilişkinin incelenmesi ve hızlandırılmış test senaryosunun benzer sonuçlar verip vermeyeceğini gözlemlemek amaçlı 6 adet yorulma testi de 400 N yük altında gerçekleştirilmiştir.

Testler Instron servohidrolik eksenel yorulma test cihazında, laboratuvar ortam koşulları altında gerçekleştirilmiştir. Elde edilen deneysel veriler ışığında iki ayrı set ile üretilen numunelere ait katılık değerleri, uzama değerleri ve yorulma ömür süresi değerleri karşılaştırılmıştır. Ayrıca yorulma testi esnasında test numunesi yüzey bölgesinde meydana gelen sıcaklık değişim değerinin ölçülmesi amacı ile bazı test adımlarında termal kamera ile yüzey sıcaklığı ölçümü alınmış ve ayrıca test numunelerinin katılık değerlerini karşılaştırmak amacı ile quasi statik çekme testleri de gerçekleştirilmiştir. Tüm sonuçlar detaylı olarak incelenmiş ve analizler bu tez çalışmasında sunulmuştur.



2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Bu literatür çalışmasının amacı; doğal kauçuk malzemesinden üretilen numunelerin farklı kürlenme sıcaklığı ve üretim süresi etkileri altında yorulma davranışlarının incelenmesine yönelik gerçekleştirilen benzer çalışmaların incelenmesidir.

Tez çalışmasına ait üretim süreçleri, numune şekli, test aşamaları ve yöntemleri, ömür süresi karar verme kriterleri, gerinim ve gerilim analiz türleri, ölçüm yöntemleri, test koşulları, test standartlarının kullanımı, termal yorulma etkisinin incelenmesi, doğal kauçuk malzemelerde akış bilimi, yapısal ve termal analiz aşamaları, üretim parametreleri, yorulma karakteristikleri, kürlenme sıcaklığı ve etkileri, kürlenme statüsü modellemeleri ile ilgili izlenen varsayımlar ve yöntemler, test aşamasına etki eden etmenler ve parametreler önceki çalışmalarda kullanılan methodlar ve sonuçlar ışığında şekillenmiştir.

Kauçuktan üretilen malzemelerin güvenliğinden ve güvenilirliğinden emin olmak amaçlı, tasarım aşamasında yorulma analizi ve yorulma ömrü değerlendirmesi çok önemlidir. Kauçuğun operasyonel ömrü süresince yorulma arızasına karşı tasarımı, güvenlik açısından dikkate alınması gereken önemli bir konudur. Elastomerlerin mekanik yorgunluğu, sürekli dinamik etkiler altında süregelen çatlak büyümesinin bir sonucu olan fiziksel özelliklerin kademeli olarak azalması durumudur [7].

Kauçuk parçaların mekanik yorulma ömrünü etkileyen birçok faktör olduğu bilinmektedir. Bu faktörler, mekanik yükleme geçmişi, çevresel koşullar, kauçuk bileşiğinin formülasyonu ve enerji tüketen yük koşulları olarak kategorize edilebilir [7, 13].

Yorulma ömrünün ölçümüne deneysel açıdan yaklaşıldığında, yorulma test işlemleri ve basit geometriler ASTM D4482 ve ISO standartlarında işlenmiştir fakat bu standartlar kauçuk malzemeden üretilen parçaların gerçek servis koşullarına ve yükleme koşullarına adapte olmakta başarılı olamamaktadır. Bu sebeple, birçok yorulma ömür tayini deneysel çalışmasına ait numune ve test yükü şartları, mevcut standartlara uyum sağlama amacı gütmemekte, hedeflenen değişik ömür koşullarının karmaşıklığı ve şartlarına bağlı olarak kullanım alanına ve teste özgü olarak test koşullarına karar verilmektedir [1, 9].

Test numunesi geometrisi önemlidir ve tutarlı yorumlamalara açık olacak şekilde karar verilmelidir. Yorulma analizine ait yaklaşımlar doğrultusunda çatlak oluşumu çalışmalarında genellikle diablo, dambıl, dairesel silindir, delikli silindir ve disk specimenler kullanılmaktadır. Bu numune çeşitlerinden en yaygın kullanılanlardan bir tanesi olan 3 boyutlu dambıl ve diablo test numunesi şekli kısaca iki ucu geniş yarıçapa sahip, merkez bölgesi ise daha küçük bir yarıçap değerinde olan silindirik numunelerdir [8, 11, 12]. Bu geometrinin avantajı çatlak oluşumunun test numunesinin merkezinde görülmesine ve çatlak oluşumu bölgesinin kontrol edilebilir olmasına olanak sağlamasıdır [1, 11, 12]. Diablo test numunesinde merkez bölgede yarıçapı küçük bir bölüm kullanılmasının bir başka avantajı ise kopmanın beklendiği bu bölgedeki yüzey ve merkez noktası arasında test esnasında oluşan termal sıcak farkının az olmasıdır [21].

Diablo test numunesi tek eksenli çekme testlerinde kullanılmaktadır. Bu tip testlere özgü olan bu numune tipi Santier, Cailletaud ve Piques (2005) tarafından doğal kauçuklara ait ömür testleri deneysel çalışmalarına ait tek eksen testlerinde de kullanılmıştır [6]. Shangguan, Wang, Deng, Rakheja, Pan ve Yu (2014) dambıl basit çekme test numunesi, dambıl silindirik test numunesi ve delikli silindirik test numunesi geometrilerini tek eksenli çekme testlerinde kullanmışlardır [9].

Shangguan ve diğerleri (2014) yaptıkları deneysel tek eksen çekme testi çalışmalarında katkı malzemeli doğal kauçuktan üretilmiş numunelerin yorulma performanslarının numune geometrisi ve yorulma parametresine bağlı değişimlerini incelemişlerdir. Yaptıkları bu çalışmalarda yorulma ömrü ve yorulma parametresi arasındaki bağımlı ilişkinin, test numunesi geometrisinden bağımsız olduğu sonucuna varmışlardır [9].

Birçok çalışmada test numuneleri baskı veya enjeksiyonlu (akıtma) kalıplama üretim metodu ile üretilmektedir [9, 11, 12].

Laboratuvar testlerinde genellikle doğal kauçuk ve SBR (Stiren Bütadien Kauçuk) tip bileşen içeren kauçuk numuneler tercih edilmektedir [13, 17, 31, 35]. Test çalışmalarında kullanılan numunelerin formülasyonları %100 doğal kauçuk içerebilmektedir [3, 9, 11]. Doğal kauçuğun en popüler tercihlerden bir tanesi olmasının sebebi ise yüksek deformasyonlara dayanabilmesi ve çatlak oluşumuna karşı gösterdiği dirençtir [1]. Ayrıca

çoğu deney karşılaştırması %100 doğal kauçuktan üretilmiş numune tipi ile karşılaştırmak amaçlı yapılmaktadır [26, 28, 30, 33].

Karbon vb. katkı malzemeli numuneler de üretilmekte ve deneysel çalışmalarda kullanılmaktadır [11, 12, 17, 28, 30, 39, 40, 48].

Testler genelde oda sıcaklığındaki ortamlarda gerçekleştirilmektedir [3, 6, 11, 13, 17].

Çevrimsel yüklemelerde, histerezis sebebi ile test numunesi sıcaklığı artış gösterebilmektedir ve bu artış belirli bir değere kadar çıktıktan bir süre sonra bir noktada dengeye ulaşmaktadır. Bu denge noktası ise elastomerin tipine, eğri parametrelerine, doğal kauçuk içerisindeki katkı malzemesi miktarına ve numunenin geometrisine bağlı olarak değişkenlik gösterebilmektedir [13]. Ayoub, Nait-Abdelaziz, Zairi, Gloaguen ve Charrier (2011) yaptıkları çalışmalarda elde ettikleri sonuçlardaki dağılımın sebeplerinden bir tanesinin de numunenin test esnasında termal ısınması ve bu durumun göz ardı edilmesi olabileceğini belirtmişlerdir [5].

2 Hz ve altı test hızı değerlerinde tamamen gevşemeli çekme testi sırasında sıcaklık yükselmesinin 20 °C'yi geçmediği gözlemlenirken, yorulmanın tamamen mekanik etkenlerden olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, mekanik yorulma araştırmaları için numune özelinde toplam sıcaklık artışının 20 °C'yi geçmemesi tavsiye edilmiştir. 10 Hz ve üzeri test hızı değerlerinde ise yüzey sıcaklığı artışının 85°C'yi geçtiği ve ilk çatlağın toplam ömrün %1'inde termal etkiden dolayı meydana geldiği gözlemlenmiştir [12].

Birçok bilimsel çalışmada 1-2 Hz. gibi düşük frekanslarda gerçekleştirilen testlerde ömür süresi üzerinde frekans parametresinin negatif etkisi gözlemlenmemiştir [6, 13]. Shangguan ve diğerleri (2014) 5 Hz hızında yaptıkları testlerde termal ısınma ile yükleme etkisini ortadan kaldırmak amaçlı test numunesini fan ile test boyunca soğutmuşlardır [9]. Le Cam, , Huneau ve Verron (2008) ise yaptıkları çalışmada test numunelerinin yüzey sıcaklığını tüm test sürecinde ölçmüşler ve termal etkinin mekanik etkinin önüne geçmemesi için yüzey sıcaklığı artışının 20 °C ve altında tutulabildiği frekanslarda testlerini gerçekleştirmişlerdir [11].

Woo, Kim, Lee, Choi ve Park (2009) oda sıcaklığında depolanan numunelerin, yüksek sıcaklıklarda yaşlandırılmaya uğratılmış numunelerden daha uzun yorulma ömrüne sahip olduklarını deneysel çalışmalarında göstermişlerdir [4]. Zhang, Li, Shou, Zhao ve Liu (2016) bu durumu optimum kurlenme ile zincir yapısı oluşan nihai kauçuk ürününün bu sıcaklık etkisinde fazladan bağ yapısı oluşturması ve bu durumun kurlenme sonrası efektine örnek olduğunu belirtmişlerdir [27].

Ayoub G. ve diğerleri (2011) yorulma testlerini 3-5 Hz arasında bir hızda ve oda sıcaklığı ortamında gerçekleştirmişlerdir [5]. Bazı test düzenekleri de sıcaklık etkisini tamamen elemine etmek amaçlı iklimatik kontrüllü ortamlarda koşturulmuştur [12].

Birçok deney çalışmasında test numunesinin iki ucuna deneysel montajı ve çeşitli yükler altında test edilebilirliği kolaylaştırmak amaçlı metalik plakalar vulkanizasyon aşamasında yapıştırılmaktadır [8,10,11]. Bazı durumlarda, test numunesinin hedeflenen merkez bölgesi yerine yapıştırma bölgelerinden kopması durumu da olası bir senaryodur [1, 3, 6, 11, 12].

Deneysel çalışmalarda toplam ömür süresinin belirlenmesi için kullanılan kıstas önem teşkil etmektedir. Bu kıstaslardan ilki numunenin tamamen kopmasıdır ve bu durum ilk çatlağın oluşumundan sonra toplam sürenin %5 ve %10 kadarı sonrası sürede gerçekleştiğinden test çalışmalarında kullanılabilmektedir [8]. Bunun yanı sıra belirli bir boyut değerinde çatlak oluşumunun ilk görüldüğü an yorulma ömrü olarak kabul edilebilmektedir. Belirli ölçüde ilk çatlağın görüldüğü anın yorulma ömür çevrimi kabul edilmesi yaklaşımına ait ilk bilinen çalışma 1840'lı yıllarda August Wöhler tarafından gerçekleştirilen demir yolu vagon aksları üzerindeki çalışmalarda geçmektedir. Kauçuklar için benzer yaklaşım çalışmaları da 1940'lı yıllarda Cadwell SM ve diğerleri tarafından gerçekleştirilmiştir [2]. Bir diğer kıstas ise efektif sertlik değerinin takibi ve ömür olarak belirli bir değişim yüzdesine ulaştığı değer olarak tanımlanabilmektedir [1, 11-13, 17].

Shangguan ve diğerleri (2014) dambıl silindirik test numunesi testlerinde eksenel katılık değerinin başlangıçta bir süre düştüğünü, test süresince bu düşmenin kopma aşamasına kadar daha hafif bir şekilde devam ettiğini ve kopma sırasında sert bir düşüş meydana geldiğini ve bu etkenin Mullins etkisinden kaynaklandığını gözlemlemişlerdir [9, 17].

Efektif sertlik değerin takibi hem yük hem de deplasman kontrollü testlerde başarı ile kullanılabilmektedir [12]. Santier ve diğerleri (2005) tarafından gerçekleştirilen bazı ömür tahmini deneysel çalışmalarında en az ilk çatlağın oluşumu ve en çok tamamen kopma durumu arasındaki çevrimlerin hepsi yorulma ömrü olarak kabul edilmiştir [3]. Bazı deneysel çalışmalar maksimum yük seviyesinin belirli bir yüzdesel değer kadar düştüğü andaki çevrim sayısını yorulma ömrü olarak kabul etmişlerdir [4, 20]. Seichter, Archodoulaki, Koch, Holzner ve Wondracek (2017) ise katılık düşme oranının takibi kriterinin en güvenilir metodlardan birisi olduğunu belirtmişlerdir [13]. Birçok deneysel çalışmada ise test numunesinin tamamen kopması durumu yorulma ömrü çevrim sayısı olarak kabul edilmiştir [7, 9, 10, 17].

Ostoja-Kuczynski ve Charrier (2016) numunenin tamamen kopması durumunun yorulma ömrü kabul edilmesi kistasının yapısal bütünlüğü çok önemli olan otomobil parçaları gibi çeşitli ürünlerde kullanılamayacağını belirtmişlerdir [12].

Shangguan ve diğerleri (2014) yorulma ömür sayımı için kullanılan çatlak boyutunun belirli değere gelmesinin çok sübjektif olabileceğini ve bu sebeple numunenin katılık değerinde meydana gelen belirli bir değişim oranı çevrim değerinin kullanılmasının daha doğru bir ilişki vereceğini belirtmişlerdir [9].

Sertlik değerindeki düşme takibi sırasında numune 6 adımda yorulma ömrünü tamamlamaktadır. Birinci adım numunenin tam orta bölgesinde gözle görülebilir minik çatlakların oluşması, ikinci ve üçüncü adım bu çatlakların yüzeyin değişik bölgelerinde de meydana gelmesi ve ilerlemesi, dördüncü adım çatlak büyüklüğünün 2 mm civarı belirli bir değere ulaşması (yorulma kriteri), beşinci adım çatlakların birleşerek numune merkez bölgesinin dörtte biri kadar büyüklükte bir çatlak oluşumu ve son adım ise numunenin tamamen kopmasıdır. İlgili çalışmalara ait grafikler incelendiğinde, katılık değerinin çok hızlı şekilde düşmeye başladığı bölgenin dördüncü adım sonrasına denk geldiği gözlemlenmiş ve bu adım ve çevresi çevrim değerinin yorulma ömrü alınabileceği savunulmuştur [12].

Bazı çalışmalar ise elastomerik malzemelerde yorulma testlerinde toplam ömür için çevrim sayısına karar verme mekanizmasının zor olduğunu belirtmişler ve kendi çalışmalarında 1

mm çatlak oluşumunun görüldüğü çevrim sayısını toplam ömür olarak kabul etmişlerdir [5].

Kauçuk malzemelerde en çok kullanılan yorulma ömrü tayin etme parametreleri maksimum temel gerilme ve gerilme enerjisi yoğunluğudur [2, 8].

Shangguan ve diğerleri (2014) yorulma parametresi olarak Green–Lagrange gerinimi,

Almansi–Euler gerinimi, mühendislik gerinimi, logaritmik gerinim, oktahedral gerilme enerjisi ve gerilme oranı katsayısının kullanıldığını belirtmekle beraber, Green-Lagrange gerinim ölçümünün daha tutarlı ($r^2=0.9966$) sonuçlar veren bir parametre olduğunu belirtmişlerdir [9].

Gerilme enerjisi yoğunluğundan ziyade Green-Lagrange gerinim (ϵ_{G-L}) değeri doğal kauçuklarda ömür tahmini çalışmalarında daha tutarlı sonuçlar veren bir parametre olarak görülmektedir [1, 9, 17]. Green-Lagrange gerinim değeri yüksek deplasmanlı testlerde de kullanılabilir [2,18, 19].

Woo ve diğerleri (2004) yorulma ömür tahmini çalışmalarında Green-Lagrange Gerinim değerini yorulma ömür ölçümü parametresi olarak kullanmışlardır ve bu parametrenin başarılı bir yorulma hasar parametresi olduğunu çalışmalarında göstermişlerdir. Bu parametreyi kullanma sebebi olarak kauçuk malzemelerin çok yüksek deformasyon sergilemesidir. Kullandıkları 3-D dambıl test numunesinin analizlerinde de en yüksek gerinim bölgesinin numunenin tam orta bölgesi olduğunu belirtmişlerdir [4].

Kauçuk malzemelerin gerinim yumuşaması, histerezis ve doğrusal olmayan şekil değiştirme etkisi gibi çeşitli karmaşık davranış özelliklere sahip olduğu bilinmekle beraber; doğal kauçuklarda histerezis probleminin %200-250 gerilme miktarı bölgelerinde gerçekleştiği ve bu durumun faz dönüşümü (kristalleşme) ile ilişkili olduğu bilinmektedir. %100 gerilme altındaki testlerde bu tip bir davranış etkisinin görülmediği deneylerde gözlemlenmiştir [3, 6, 11, 12] . Histerezis ölçümlerinin Mullins etkisinden etkilenmemesi amacı ile yorulma ömrünün %25 değeri bölgesindeki veriler ile değerlendirilmesi gerektiği belirtilmiştir [13]. Kristalleşme özelliğinin ayrıca pozitif yük oranı bölgesinde de gözlemlendiği ve bu durumun yorulma ömrünü arttırıcı bir etkiye sahip olduğu

gözlemlenmiştir [11, 13]. Gerinim yumuşaması etkisinin 0.001 ve 50 Hz test hızı aralığında doğal kauçuklar için ömür süresi parametresinde hiçbir etkisi olmadığı da gözlemlenmiştir [14-16].

Kauçuklarda sabit gerilme altında yapılan testlerde, minimum gerilme değerinin %200'e kadar artırılmasının ömür üzerinde artırıcı etkisi olduğu görülmüştür, bu değerden sonra ise ömür üzerinde negatif etkisi olduğu görülmüştür [2, 5].

Gerilim yumuşaması davranışının başlangıçtaki çevrimlerde görüldüğü ve bu durumun yeni üretilmiş malzeme içerisindeki zincir ağlarının kırılma ve yeni düzenine geçme aşaması ile ilişkilendirilebileceği belirtilmiştir [5, 17].

Kauçuk malzemelerde sonlu elemanlar analizi çalışmaları için metallerdeki gibi elastik modülüs değeri girdisi tek başına yeterli bir sabit olarak kullanılamamaktadır [45].

Analiz çalışmalarında kullanılan modeller Mooney-Rivlin modeli, Neo-Hookean modeli, Tam polynomial model, Reduced Polynomial model, Yeoh model, Ogden model, Arruda-Boyce model olarak sıralanabilir.

Sonlu elemanlar analiz modeli geliştirmek için tek eksende çekme testi sonuçları, kesme testi, iki eksenli çekme testi ve hacim testi sonuçlarına ihtiyaç vardır. Bu test çeşitlerine ait sonuçlar ile hem tek eksende hem de çok eksenlerdeki test türleri sonlu elemanlar analizi ile simüle edilebilmektedir [45].

Hiperelastik malzemelerde sonlu elemanlar analizi için geliştirilen modellerden Mooney-Rivlin, Yeoh ve Neo-Hookean modelleri gerinim potansiyel enerjisi polinom serisinden türetilmiştir [46, 47].

Mooney-Rivlin ve Ogden gerinim potansiyel enerjisi modelleri birçok çalışmada sonlu elemanlar analizlerinde kullanılmıştır [4, 8, 9, 17, 21].

Mooney-Rivlin modeli geniş gerilme değerlerini kapsamakla beraber, gerilme-gerinim ilişkilerinde doğrusal olmayan tanımlamaları yansıtmakta da başarılıdır [3, 45]. Bazı çalışmalar ise Mooney-Rivlin modelinin kauçuk malzemelerin uzama aşamasında S-eğrisi davranışını ve kuvvet – kesme yer değiştirmesi ilişkisini doğru yansıtamadığını belirtmiştir

[45]. Mooney-Rivlin modeli katsayılarından C_{10} ve C_{01} , %20 miktarında sapma ile belirlense bile düşük yük değerlerinde deneysel sonuçlar ile analiz sonuçları arasında çok fazla farklılık görülmemektedir. C_{10} için bu sapma değeri %20 civarlarında iken, C_{01} için ise %4 civarındadır [46].

Ogden modelini oluşturmak için tek tür test datası yeterli olmamaktadır. Bu model S-eğrisi davranışını doğru şekilde yansıtabilmektedir [45].

Yeoh Modeli gerilim-gerinim grafiğinde S-eğrisi davranışını ve yüksek gerilme değerlerindeki deformasyon davranışını limitli data seti ile yansıtabilmesi ile bilinmektedir. Bu model malzeme aşaması test sonuçlarına daha az ihtiyaç duyan bir modeldir [45-46]. Kauçuk malzemelerin davranışını en uygun şekilde yansıtabilen modellerden bir tanesinin Yeoh modeli olduğu belirtilmektedir [45].

Shangguan ve diğerleri (2014) yaptıkları sonlu elemanlar analizinde test numunesini bir ucundan sabitleyip, diğer ucundan test yüklemesini simüle etmişler ve diğer yönlerdeki yer değiştirmeleri sıfır olarak tanımlamışlardır. Sonlu eleman modellerinde Mooney-Rivlin modelini baz almışlardır [9].

Shahzad, Kamran, Siddiqui ve Farhan (2015) ise hiperelastik malzemeler için yaptıkları sonlu eleman analizi karşılaştırmalarında Yeoh modelini kullanmanın doğru bir seçim olabileceğini belirtmişlerdir. Bu modeli seçmelerinin sebebi olarak ise deney sonuçlarından elde edilen gerilim ve gerinim değerleri ile analiz sonuçlarının birbiri içerisindeki tutarlılığını göstermişlerdir [45].

Le Cam ve diğerleri (2008) tek eksenli çekme testlerine ait pozitif ve negatif yükleme oranlarını ve sınırlarını tanımlamışlardır [11]. Eksi yükleme oranı değerlerinde ($R = (\sigma_{\min} / \sigma_{\max}) < 0$), gerilim genliği arttıkça yorulma ömür değeri düşmekte, tam tersi durumda ise belirli bir değere kadar artış göstermektedir [3, 11, 13]. Bu artış özellikle doğal kauçuk malzemesinde gözlemlenmiştir. Bu özelliğinden dolayı, kauçuk malzemeler için basit bir Wöhler yaklaşımı sunmak pek mümkün değildir [12]. Sadece bir mekanik özellik kullanarak bu tip bir güçlenme mekanizmasını modellemek de aynı şekilde mümkün değildir [3]. Ortalama yer değiştirme miktarının artması durumunda ise yorulma ömrünü

azaldığı gözlemlenmiştir [4, 10]. Kauçuk malzemeler yorulma ömrünü arttırdığından ve kolay test edilebilir bir bölge olduğundan genelde $R>0$ bölgesinde test edilmektedir [13].

Ayoub ve diğerleri (2011) çalışmalarında belirttiği gibi orta bölgesinin yarıçapı daha küçük olan simetrik numunelerde baskın yorulma çatlağı başlangıcı lokal deformasyon durumunun en yüksek olduğu orta bölgede görülür [5].

Doğal kauçuktan üretilmiş numunelere tek ekseninde 5 Hz ve altı hızında gerçekleştirilen testlerde yorulma ömrünün toplam deplasman değerine bağlı olarak 25 000 ile 1 000 000 çevrim arasında değiştiği gözlemlenmiştir [3, 9]. Ayoub ve diğerleri (2011) dambıl specimen şekline benzer numunelere yaptıkları tek eksen çekme yorulma testlerinde 560 ve 3 000 000 çevrim arasında ömür süreleri kayıt etmişlerdir. 560 çevrim için toplam uzama miktarı 26 mm iken, 3 000 000 çevrimde ise bu değer 5,6 mm'ye kadar inmiştir [5].

Shangguan ve diğerleri (2014) kauçuk malzemelerin servis ömürleri sırasında çok eksenli yüklere maruz kalmalarına rağmen, tek ekseninde çekme testlerinin kauçuk malzemelerde optimum yorulma süresi seçimi çalışmalarında önemli rol oynadığını belirtmişler ve tek eksenli çekme testlerinden elde edilen sonuçların yorulma ömür modeli çalışmalarında güvenilir sonuçlar verdiğini gözlemlemişlerdir [9].

Sinüs dalgası şeklinde yüklemeler ile gerçekleştirilen tek ekseninde çekme testlerinin avantajları, kolay uygulanması, histerezis eğrilerinin incelenmesinin kolaylığı ve depolanan/kaybedilen enerji hesabının kolayca yapılabilirdiği testler olmasıdır. Test yükleri ise bazı çalışmalarda kauçuk malzemenin bulunduğu ekipman içerisindeki normal hayat döngüsünde maruz kalacağı yük seviyelerinden seçilebilmektedir [13].

Cadwell, Merrill, Sloman ve Yost (1940) yaptıkları deneylerde hem çekme hem de sıkıştırma testleri ile ömür testi çalışmaları gerçekleştirmişlerdir [10].

Le Cam ve diğerleri (2008) birçok farklı yükleme oranı seviyesinde tek ekseninde çekme testleri gerçekleştirmiş ve bu testler sonucunda çeşitli kopma bölgesi analizleri sunmuşlardır. Bu analizleri Haigh-like diyagramı formatında çalışmalarında sergilemişlerdir [11]. Diabolo ve dambıl türü numunelerde yaptıkları çalışmalarda üç çeşit çatlak oluşum bölgesi gözlemlemişlerdir. Bu bölgeler sırası ile numunenin tam orta

bölgesinde çatlak oluşumu ve kopma, numunenin yarıçapının azalmaya başladığı eğrisel bölge etrafında çatlak oluşumu ve kopma ve metalik plakaların tam altındaki bölgede çatlak oluşumu ve kopma durumudur. Yükleme oranı -1 ve 0 arasındaki bölgede çatlak oluşumu ve kopma genellikle numunenin orta bölgesinde veya metalik plaka altı bölgede gözlemlenmektedir. Ayrıca %200 üzeri yüklemelerde çatlak başlangıcı farklı bölgede görüle bile ilk kopma genellikle metalik plakalar altında gerçekleşmektedir. Tam gevşemeye yakın ve çekme testi şeklinde gerçekleşen testlerde (yani yükleme oranı 0 ve 1 arasındaki bölge) ise çatlak oluşumu orta bölge ile çap değişiminin başladığı bölge arasında gözlemlenmektedir. Tam gevşeme durumu veya başka bir deyiş ile yük oranının sıfır olduğu durumda ise kopmalar büyük oranda numunenin merkez bölgesinde gözlemlenmiştir [11].

Yaşlanma problemini ortadan kaldırmak amaçlı bazı çalışmalarda test numuneleri kalıplama ile üretimin hemen ardından eksi derecelerde belirli süreler muhafaza edilmiş ve ardından 24 saat doğal ortamda denge sıcaklığına ulaştırılıp test aşamasına alınmışlardır [11, 12].

Deneysel çalışmalarda tüm test numuneleri aynı partiden üretilerek, üretim aşamasındaki karıştırma vb. etkenlerinin farklı numunelere olan etkisinin ortadan kaldırılması hedeflenmektedir [12].

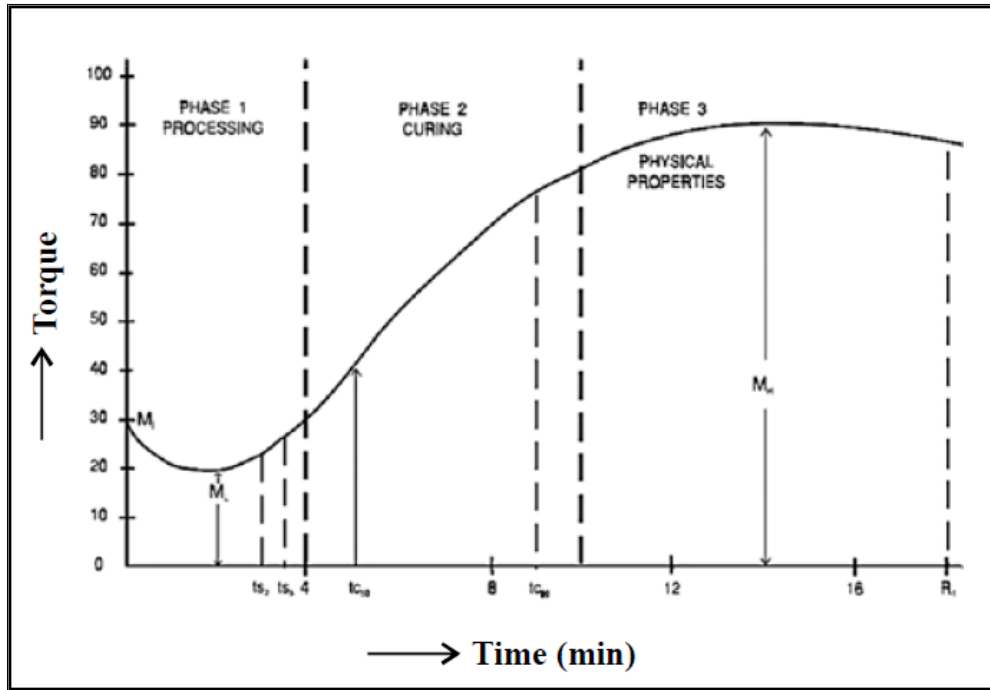
Kauçuk bazlı malzemeler genelde 140 - 180 °C sıcaklık değerleri arasında üretime tabi tutulmaktadır [35]. Kauçukların kürlenmesinde 160 °C ve 170 °C kürlenme sıcaklıkları teknolojik uygulamalarda sıklıkla tercih edilmektedir [26]. Kaçuk karışımlarına ait üretim formülasyonları genelde 10 veya daha fazla içerikten oluşabilmektedir [22].

Elastomerlerde kürlenme prosesine ait önemli parametrelerden ilki, kürlenme sıcaklığıdır. Kürlenme sıcaklığının yapısal özellikler, mekanik özellikler, kimyasal çapraz bağ yoğunluğu ve çapraz bağ tipi üzerinde yüksek etkisi vardır [26, 28, 30].

Reoloji, kütlenin akışkan hareketi ve deformasyonunu inceleyen bilim dalı olarak tanımlanmaktadır. Reoloji bilimi ölçümleri akışkanın tipi ve belirli şartlar altındaki akış davranışını incelemekle beraber, sıcaklık, akış oranı ve moleküler yapı gibi değişkenlere bağlıdır. Reoloji, kauçuk malzemelerde maddenin katı ve sıvı hali ile ilgilenmektedir.

Ergimiş akışkanlığı etkileyen temel faktörler ise sıcaklık, basınç, moleküler karakteristik, katkı malzemesi yüzdesi, polimerik zincir yapısı ve üretim aşaması kullanılan katkı malzemeleridir. Akma gerilimi ve akma hızı direk ölçülebilen reolojik değerler olmadığından, reolojik özellikler kuvvet, tork gibi ölçülebilen değerlerden türetilmektedirler. Bu amaca yönelik olarak da birçok çeşit reometre ölçüm ekipmanı kullanılmaktadır [22].

Şekil 2.1’de görülen doğal kauçuk malzemesine ait akış bilimi ölçüm sonuç grafiği 3 fazdan oluşmaktadır. Birinci faz reometre cihazının dönmek için karşılaştığı karşı kuvvet olan tork değerinin düştüğü ve işlenme olarak tanımlanan fazdır. Bu faz kauçuk karışımının işlenme davranışını göstermektedir ve en düşük tork değeri (M_L), bu fazda elde edilir. İkinci faz, kauçuk karışımının kurlenme karakteristiğinin belirlendiği, t_{10} ve t_{90} sürelerinin gözlemlendiği fazdır. Üçüncü faz ise kauçuk karışımının fiziksel özelliklerinin meydana geldiği ve en yüksek tork değerinin (M_H) gözlemlendiği fazdır [23]. Üçüncü faz aynı zamanda aşırı kurlenme fazı olarak da anılmaktadır. Bu fazda kurlenme grafiği 3 olası davranışı sergileyebilir. Kurlenme eğrisi dengeye ulaşabilir (plato), aşağı yöne hareket ile bozulmaya başlayabilir veya yükselme davranışına devam edebilir [36, 37]. Bu fazlar tamamlandığında kauçuk malzeme viskoelastik akışkan formundan, vulkanize olmuş ve madde içi bağları oluşturulmuş katı bir forma ulaşmaktadır [24, 36].



Şekil 2.1. Akış bilimi (reoloji) ölçüm grafiği (kurlenme eğrisi) [23]

Minimum tork, maksimum tork ve viskozite değeri kauçuk malzemenin maksimum kûrlenme sıcaklığı parametresi arttıkça düşme özelliğı göstermektedir [23, 27, 28, 30, 35]. Optimum kûrlenme süresi, kûrlenme sıcaklık parametresi artış gösterdiğinde kısalma özelliğı göstermektedir [23, 27, 28, 30, 35]. Numune içerisine katılan katkı malzemesinin artırılması ile minimum tork, maksimum tork ve viskozite değerlerinde yükseliş görûlmektedir [23, 28, 37].

Katkı malzemelerinin kendi aralarında ve polimer malzemeler ile yaptıkları ağıların oluşumu kauçuğun akış özelliğini ve dolayısıyla reolojik özelliklerini etkilemektedir ve bu durum reolojik ölçûmleri karmaşık hale getirebilmektedir. Viskozite ve modûlûs değeri artış gösterdiğinden katkı malzemeleri aynı zamanda minimum ve maksimum tork değerlerini arttırmaktadır [24].

t_{90} değeri numune kalınlığı ve katkı malzemesi içeriğıne bağılı olarak değışmekle beraber; katkı malzemesi oranı arttığında azalış göstermektedir [25]. Bazı katkı malzemeleri ise minimum torku azaltma, maksimum torku ise arttırma şeklinde etkiye sahip olabilmektedir [25].

Vulkanizasyon ile üretilen kauçuk karışımlarında, nihai ürünün son yapısı, mekanik performansı ve termal dengesi karışımda oluşan çapraz kimyasal bağların kalitesine bağılıdır. Çapraz kimyasal bağ yoğunluğunun kûrlenme sonucu elde edilecek nihai ürünün fiziksel özellikleri üzerinde de önemli bir etkisi vardır [26].

Kauçuk malzemelerde vulkanizasyon sırasında meydana gelen çapraz bağ yapısı direk olarak mekanik özellikleri etkilemektedir [31]. Yapılan çalışmalarda doğıal kauçuktan üretilen malzemeler için en verimli kûrlenme sıcaklığı 150 °C olarak belirtilmektedir [27, 30, 35]. Bu durumun başlıca sebepleri ise yüksek çapraz kimyasal bağ yoğunluğu, iyi derecede mekanik ve dinamik özellikler ve iyi dağılılabirlik özelliğı olarak gösterilmiştir [27]. Çapraz bağ yoğunluğu 140 °C sıcaklıktan 150 °C sıcaklığa kadar artış gösterirken, daha yüksek sıcaklıklarda düşme özelliğı göstermektedir [27, 28, 30, 35]. 160 °C ve üzeri kûrlenme sıcaklıklarında termal kırılmalar ve çapraz bağ yapısı bozulmaları göz ardı edilmemelidir çünkü yüksek sıcaklık etkisi çapraz bağ yoğunluğunda azalmaya sebebiyet vermektedir [27, 30, 33, 38]. En düşük çapraz bağ yoğunluğu ise 180 °C sıcaklıkta kûrlenme sonrası gözlemlenmiştir [27].

Geleneksel yöntemlerle üretilmiş doğal kauçuklarda 150 °C ve 180 °C sıcaklıklardaki aşırı kürlenme süresinden ($t_{90} \times 10$) kaynaklı olarak çekme gücü, %300 modülüs değeri ve sertlik özelliği değerlerinin verildiği tablolar ve değişim oranları incelendiğinde, 180 °C sıcaklıkta optimum kürlenme süresinin uzatılmasının neden olduğu bozulma eğrisi bölgesi hem daha kısa sürede oluşmuş hem de daha yüksek negatif değişimler yaratmıştır [30].

Doğal kauçuklarda kürlenme sıcaklığı 150 °C sıcaklıktan 180 °C sıcaklığa doğru yükseldiğinde, güç, modülüs ve sertlik değerlerinde azalma; kopma sırasındaki uzama miktarı, baskı seti ve ısı oluşum hızında ise artış görülmüştür [27, 28, 30, 32, 35].

Kauçuk malzelerde, numune içi ısı oluşum hızında artışın sebebi düşük çapraz kimyasal bağ yoğunluğundaki malzemenin moleküler yapısındaki mobilitenin fazla olması (çoklu zincir bağlarının tekli zincirler haline dönüşmesi) ve sonucunda ısı enerjisi açığa çıkarması olarak belirtilmiştir [27].

Doğal kauçuktan üretilmiş numunelerde, 140 °C sıcaklıkta kürlenen numune ile yapılan testlerde ısı artışı ortalama 8,4 °C, 150 °C sıcaklıkta üretilen numunelerde ortalama ısı artışı ortalama 9,8 °C, 160 °C sıcaklıkta üretilen numunelerde ısı artışı ortalama 10,2 °C , 170 °C sıcaklıkta üretilen numunelerde ortalama ısı artışı ortalama 13,7 °C ve 180 °C sıcaklıkta kürlenen numunede bu değer ortalama 17,4 °C olarak ölçülmüştür [27].

Kürlenme sıcaklığı arttırıldığında, optimum kürlenme süresi ters orantıda azalmaktadır [28, 35]. Üretim sırasında meydana gelen bozulma ve reformasyon olaylarının çapraz kimyasal bağlar üzerinde etkisi yüksektir. Aynı zamanda, maksimum tork ve minimum tork arasındaki farkın değişimi çapraz bağ yoğunluğunun değişimine işaret etmektedir [27, 35].

Aşırı kürlenme, kullanılan kauçuk için karar verilen optimum kürlenme süresinden daha fazla bir sürede pişirme durumudur. Aşırı kürlenmeye maruz kalan numunenin bağ yapısı bozulmaya uğrar [26, 28, 33, 36-38]. Nihai ürünün yapısının optimum kürlenme süresi sonrasında aşırı kürlenme ile bozulma etkisi %100 doğal kauçuk üretimi olan karışımlarda daha yüksek etki ile görülmektedir [26, 28]. Beklenenin aksine, yüksek sıcaklıkta kürlenme daha stabil bir nihai ürün vermemekte, hatta kimyasal bağ yoğunluk değerinde azalmaya sebebiyet vermektedir [27].

Kürlenme sıcaklığı ve kürlenme süresi miktarı beraber arttırıldığında maksimum tork değeri sadece azalmakla kalmayıp, tepe noktası bölgesinde yaptığı plato davranışının süresi de kısaltmakta ve daha hızlı bir şekilde bozulma eğrisi sürecine girmektedir [30].

Bazı çalışmalarda kürlenme süresi 160 °C sıcaklıktan 170 °C sıcaklığa çıkarıldığında, doğal kauçuk için optimum kürlenme süresi değeri %40 civarında kısaltılmıştır ve bu durum vulkanizasyon reaksiyonunun reaktifliğinin sıcaklığa yüksek derecede bağımlı olduğunu göstermektedir [26]. Bazı çalışmalarda ise her 10 °C sıcaklık artışında optimum kürlenme süresinin yaklaşık %50 civarı kısaltıldığı belirtilmiştir [27].

Az miktarda kürlenme ise optimum kürlenme süresi altında pişirme durumudur. Az kürlenme durumunda ise kimyasal çapraz bağ oluşumları tam olarak gerçekleşmez ve fiziksel / mekanik özellikler beklenen değerlerin altında oluşur [26].

Doğal kauçuklarda kürlenme sıcaklığı ve yorulma ömrü arasındaki ilişkiye bakıldığında 140 °C sıcaklıktan 150 °C sıcaklığa yükseldiğinde, yorulma ömrü ve statik güç kapasitesinde az da olsa bir artış görülse de, 150 °C üzeri sıcaklıkta gerçekleşen kürlenmelerde yorulma ömrü sürelerinde düşme gözlemlenmiştir [28, 29].

Yorulma ömründeki azalmanın temel sebebi ise çapraz kimyasal bağ yoğunluğudur. Çoklu yapıdaki çapraz bağ yapıları kırılarak tekli yapı zincirine dönüşmektedir. Kürlenme sıcaklığı arttırıldığında zincir yapısı bozulma eğrisi bölgesine girmektedir [28, 30, 33, 38].

Üretilecek kauçuk malzemede yeterli derecede vulkanizasyon durumu ve uzun ömür elde etmek için yüksek sıcaklıkta yeterli miktarda vulkanizasyon geçirmiş olması gereklidir. Vulkanizasyon döngü süresini kısaltmanın etken yollarından bir tanesi ise kürleme sıcaklığını arttırmaktır, çünkü reaksiyon sıcaklığı yükseldikçe sülfür vulkanizasyon hızı artar. Kürlenme statüsü ise sıcaklık artışından olumsuz etkilenmektedir. Bu durum daha düşük fiziksel özelliklere ve performansa sahip bir ürün olarak kendini gösterebilir [30].

Kürlenme sıcaklığını arttırdıktan sonra toplam çapraz bağ yoğunluğundaki değişim ile dinamik mekanik özelliklerin değişimi arasında basitçe bir bağlantı kurmak mantıksızdır. Yüksek sertleştirme sıcaklıklarında bile kauçuk ana zincir kesikleri görülmeyebilirken, vulkanizasyon fazında çapraz bağ yoğunluğu ve tipine ait değişimler görülebilmektedir.

Kürlenme sıcaklığı parametresi ve kürlenme süresi parametreleri çapraz bağ yoğunluğu ve çapraz bağ tiplerinde birbirlerinden farklı etkiler yarattığından; kürlenme platosundaki değişim grafikleri ve malzeme özelliği sonuçları da farklı oluşabilmektedir. Bu durumda yüksek sıcaklıkta kürlenme parametresinden ziyade, vulkanizasyon sıcaklığı ve süresi önemli bir parametre olarak ele alınabilir [30].

R.L. Fan ve diğerleri 150-180 °C sıcaklık bölgesinde optimum kürlenme süresinin on katı sürede kürlenme işlemine tabi tuttıkları doğal kauçuk ve katkı malzemeli kauçuk numuneleriyle elde ettikleri sonuçlarda, fiziksel ve dinamik özelliklerde gözlemlenen değişimlerin temel sebebin bağ yapısı ve bağ yoğunluğunun değişimi olduğunu belirtmişlerdir [30].

Doğal kauçuk 140 °C sıcaklıkta 16 dakikaya kadar bozulma eğrisi bölgesine girmemektedir fakat katkı malzesi katıldığında bozulma eğrisine girme süresi değişkenlik göstermektedir [33] .

Kapucu, Kasım, Can ve Yazıcı (2018) yaptıkları çalışmada doğal kauçuk içeren kompozit katmanlı numune testlerine ait üretim ve test aşamasında elde ettikleri sonuçlar ışığında, 140 °C altındaki sıcaklıkların vulkanizasyon için uygun bir ortam oluşturamadığını belirtmişlerdir [34].

Kauçuk malzemelerin termal iletim katsayı değeri küçük olduğundan, çeliğin termal iletim katsayısından 200 kat daha küçük [43], yüksek boyutlu malzemelerde sıcaklık dağılımı iç ve dış bölgeler arasında farklılık oluşturmakta ve dolayısıyla düzensiz bir ısı dağılımı ve kürlenme statüsü dağılımı sonucu vermektedir [40, 42-43].

Kauçuk malzemelerde optimum kürlenme sıcaklığı ve süresi geliştirmek amaçlı bir çok kürlenme kinematiği modeli, metodu ve analizleri geliştirilmiştir [36-42] . Kinetik modellerin içerdiği bileşikler de kendi içlerinde karmaşık modeller içerdiğinden, hesaplanan ve ölçülen optimum kürlenme süreleri ve sıcaklık sonuçları aralarında farklılıklar oluşabilmektedir [36, 38, 40].

Kauçuklarda optimum kürlenme çalışmalarındaki önemli parametrelerden bir tanesi de kürlenme ekipmanındaki ısı transfer mekanizmasıdır [38, 39].

Kürlenme aşamasında elde edilecek sıcaklık dağılımına etki eden parametreler numunenin boyutu, şekli ve termofiziksel özellikleridir. Ayrıca başlangıç sıcaklığı ve sınır sıcaklık koşulları da önemli faktörlerdendir [40].

Kürlenme reaksiyonu için gerekli ısı enerjisi dışardan verildiğinden, ısı kaynağı ve ısının numune içi iletimi de bu noktada önem teşkil etmektedir ve bu değişkenler önemli parametreler olarak karşımıza çıkmaktadır. Isı transferinin eşit olmayan dağılımı ise ticari boyutlardaki kauçuk malzemelerde eşit kürlenme dağılımına sahip olmayan bir içyapı meydana getirir. Ayrıca, kürlenme aşamasında belirli sıcaklığa ulaşamayan bölgelerde indüksiyon fazı tetiklenemediği için vulkanizasyon reaksiyonları da oluşamaz [38]. Bu sebeple iç bölgeleri kürlendirmenin tek yolu numunenin yüzey bölgesini aşırı kürlenmeye maruz bırakmaktır [38].

Kürlenme statüsü optimizasyon çalışmalarında kullanılan modellerde, yüzey bölgeleri optimizasyon sınırlarına dahil edilmeyebilir çünkü aşırı sıcaklığa maruz kalan ve bozulma eğrisi bölgesine çok hızlı bir giriş yapan bu sınır bölgeleri optimize edilemeyecek düzeyde ısı transferine maruz kalırlar [38]. Marzocca (1991) yaptığı analiz ve deney çalışmasında uzun süre kürlenme sıcaklığına maruz kalan numunelerin büyük bir bölümünün aşırı kürlenmeye maruz kaldığını elde etmiştir [39].

Tipik bir tork zaman grafiğine bakıldığında en verimli ürünün düşük sıcaklıkta uzun süre kürlenme altında elde edilebileceği ön yargısı oluşabilmektedir fakat pratikte uzun kürlenme sürelerinin düşük üretilebilirlik özelliği dezavantajına sebep olduğu bilinmektedir. Ayrıca, izotermal olmayan sıcaklık dağılımları bu varsayımları daha karmaşık bir duruma sokmaktadır [38].

Optimizasyon çalışmalarında numune içerisinde ne kadar çok deney noktası dikkate alınırsa, kürlenme statüsü çalışmasının verimliliği de o derecede artış göstermektedir. Başka bir deyiş ile, üç nokta ile yapılan optimizasyon çalışması ile 45 nokta ile yapılan optimizasyon çalışması arasında gözle görülür bir sapma farkı vardır [38].

Normal şartlar altında, kauçuğun yoğunluk değerinin sıcaklık artışına bağlı olarak azaldığı bilirse de, kalıpla üretimde hacim değeri neredeyse sabit olduğundan yoğunluk değeri de sabit olarak alınmaktadır [44]. Bu sebeple kürlenme optimizasyonu için gerçekleştirilen ısı

transferi analiz çalışmalarında yoğunluk ve/veya ısı kapasitesi sabiti bazı çalışmalarda sıcaklık değişiminden bağımsız olarak sabit kabul edilerek analizler gerçekleştirilmiştir [39, 40, 43, 44].

Kürlenme optimizasyonu için gerçekleştirilen ısı transferi analiz çalışmalarında termal ısı iletim katsayısı ve reaksiyon ısı oluşumu, bazı çalışmalarda sıcaklık değişimine bağımlı [39, 40]; bazı çalışmalarda ise iletim katsayısı sıcaklık değişiminden bağımsız olarak sabit kabul edilmiştir [41, 43]. Bazı çalışmalarda ise reaksiyon ısı oluşumu sıfır olarak kabul edilmiştir [43].

Reaksiyon içi ısı enerjisi oluşumu sıfır kabul edilerek yapılan katkı malzemeli kauçuğa ait analiz ve deney sonuçları karşılaştırıldığında termal analizlerde numunenin kalınlık değerine bağlı olarak belirli bir süreye kadar sıcaklık oluşumlarında kayda değer bir fark görülmemiştir. Aynı çalışmada ($t_{90} = 17,5$ dk) , ısı enerjisi oluşumu sıfırdan farklı kabul edilip, hesaplamalara katıldığında ise otuzuncu dakikadan itibaren varsayımlar arası sıcaklık farkı gözlemlenmeye başlanmıştır [39].

Nozu, Tsuji ve Onishi (2011) 150 °C kürlenme sıcaklığında 35 mm çaptaki numune ile yaptıkları katkı malzemeli doğal kauçuk karışımı kürlenme statüsü çalışmalarına bakıldığında en iç ve en dış bölgelerin aynı kürlenme seviyesine gelmeleri arasında yaklaşık 3 kat zaman farkı olduğu gözlemlenmiştir . Katkı malzemesi miktarına bağlı olarak bu fark 5 kata kadar çıkmıştır [40].

Kürlenme kinematığının incelendiği bazı çalışmalarda kürlenme çevrimi tamamlanıp üretilen numuneler soğuk su banyosunda bekletilerek vulkanizasyon reaksiyonu sona erdirilebilmektedir [31]. Aynı şekilde üretilen numuneler basınçlı veya normal hava akımı ile soğutma yöntemi ile soğutularak vulkanizasyon reaksiyonları kontrol altına alınan çalışmalar da mevcuttur [41, 43]. Bu çalışmalarda amaç vulkanizasyon reaksiyonlarını durdurarak veya yavaşlatarak kürlenme statüsü dağılımında iç ve dış noktalar arasında kontrollü ve iyi bir dağılım elde etmektir [31, 41, 43].

Pornpeerakeat, Chantrasmi, Chaikittiratana ve Limrungruengrat (2017) yaptıkları 145 °C kürlenme ve ardından serbest hava akımında soğutma adımlarını içeren kürlenme sayısal analizlerinde, kürlenme süresinin yarısına gelindiğinde numune orta noktası henüz

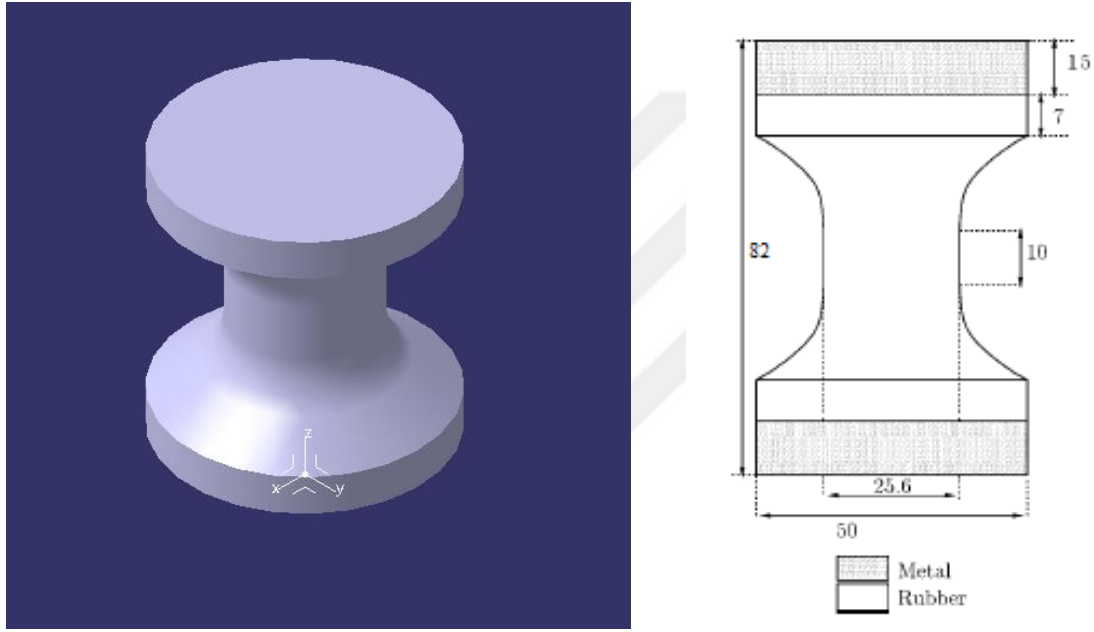
kürlenme indüksiyon sıcaklığına ulaşamamıştır. Soğutma evresinin yarısında ise orta nokta ulaştığı yüksek sıcaklıkta kürlenmeye devam ederken, en dış noktalar çevre ile denge sıcaklığına ulaşmıştır. Bu durumun sonucu olarak ise, kürlenme statüsü en dış noktadan en iç noktaya doğru yüzdesel olarak azalma göstermektedir. İndüksiyon sıcaklığına geç ulaşan iç noktalar, maksimum sıcaklık noktasında daha az kürlenme zamanı geçirdiğinden soğutma evresinde daha yüksek sıcaklıklara sahip olsalar da yüzey noktalarından daha iyi bir kürlenme statüsüne sahip olamamışlardır [42].



3. SAYISAL ANALİZLER

İlgili tez çalışması için karar verilen numune şeklinin 150 °C, 160 °C ve 170 °C kurlenme sıcaklıkları altındaki termal davranışı ve tek eksen yük altındaki deformasyon davranışını modellemek amaçlı termal ve yapısal sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilmiştir.

Analiz çalışmalarında kullanılan diabolo test numunesinin 3 boyutlu görünümü bilgisayar destekli çizim programında oluşturulmuştur.



Şekil 3.1. Analiz çalışmalarında kullanılan Diabolo test numunesi modeli

3.1. Termal Analiz Çalışması

Kauçuk malzemelerin üretimine ait iki önemli parametre pişirme süresi ve pişirme sıcaklığıdır. Farklı pişirme sıcaklıklarının yanı sıra, nihai ürünün içerisindeki homojen olmayan sıcaklık dağılımı da aynı malzemedan üretilmiş farklı boyutlardaki malzemelerin farklı değerlerde mekanik özelliklere sahip olabileceği görüşünü ortaya çıkarmaktadır [27, 28, 30, 35].

Bu görüşten yola çıkarak, 3 farklı sıcaklıkta ve 6 farklı sürede kürlendirilen kauçuk malzemelerin belirlenen sıcaklık ve süre kurlenme kinematikği parametreleri sonucunda

içyapılarındaki sıcaklık dağılımlarını elde etmek amaçlı MSC Patran ve MSC Nastran yazılımları aracılığı ile sonlu elemanlar termal analiz çalışması gerçekleştirilmiştir.

Sıcaklık dağılımını elde etmek için bir ya da iki boyutlu sonlu elemanlar modelleri kullanılmaktadır [39].

3.1.1. Termal analiz malzeme özellikleri

Vulkanizasyon süresi boyunca sıcaklık değişimlerini elde etmek için aşağıdaki eşitlikte görülen aşağıda belirtilen iletim ile ısı transferi diferansiyel formülü analiz programı aracılığı ile çözülmüştür.

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \frac{dQ}{dt} \quad (3.1)$$

Termal analiz çalışmasını gerçekleştirmek amaçlı kullanılan iletim ile ısı transferi formülasyonundaki malzeme fiziksel özellikleri, literatür çalışmalarındaki doğal kauçuk malzemesine ait benzer karışımlara ait değerler arasından alınmıştır [39-42].

Bu formülasyonda malzeme özellikleri sırasıyla malzeme yoğunluğu, özgül ısı katsayısı, termal iletim katsayısı ve kurlenme reaksiyonu esnasında birim zamanda aktarılan ısı enerjisi miktarı değeridir. Malzeme yoğunluğu, spesifik ısı katsayısı ve termal iletim katsayı değerleri sıcaklık değişiminden bağımsız olarak sabit kabul edilmiş; kurlenme aşamasında oluşacak tepkime enerjisi oluşumu değeri ise sıfır olarak kabul edilmiştir.

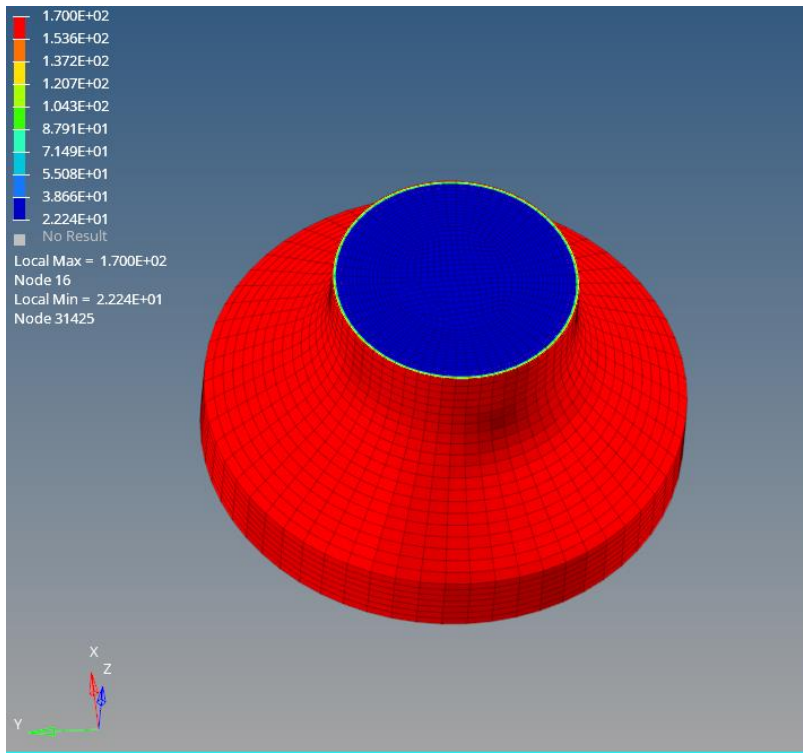
Çizelge 3.1. Doğal kauçuk test numunesine ait malzeme özellikleri

Malzeme Özelliği	Değeri
Yoğunluk (ρ)	1080 kg/ m ³
Spesifik Isı Katsayısı (c)	1930 J/kg.K
Termal İletim Katsayısı (λ)	0,263 W/m.K
Dış ortama aktarılan tepkime enerjisi miktarı (dQ/dt)	0 W/m ³

3.1.2. Model tanımı ve sınır koşulları

Vulkanizasyon ile kürlenme aşaması ile üretilcek numunenin yüzey bölgesi üzerinde bulunan analiz düğümleri hariç iç bölgelerde kalan tüm analiz düğümleri başlangıçta normal ortam sıcaklığı olan 23 °C sıcaklık değerine getirilmiştir.

Numune yüzeyinde bulunan analiz düğümleri ise ilgili kürlenme sıcaklığı değişkenine bağlı olarak 150 °C, 160 °C veya 170 °C sıcaklığa kürlenme süresi parametresi boyunca sabitlenmişlerdir (Şekil 3.2).



Şekil 3.2. Test numunesi iç bölgeleri ve yüzey bölgesi sıcaklık sınır koşulları

Test numunesinin simetrik özelliğinden dolayı termal analiz çalışması numunenin tamamı için gerçekleştirilse de sonuç bölümü için çıkarılan grafikler numunenin yarı modelinden elde edilmiştir.

Test numunesi termal analizi sırasında herhangi bir sınır koşulunda içeriden dışarıya ısı enerjisi akışı olmadığı veya başka bir deyiş ile dış ortama enerji kaybı olmadığı varsayılmıştır ($dQ/dt=0$).

3.1.3. Termal analiz yük değerleri

150 °C için 720 sn ve 1440 sn, 160 °C için 405 sn ve 810 sn ve 170 °C için 204 sn ve 612 sn boyunca iletim ile ısı akışı test numunesine termal yük olarak uygulanmıştır (Çizelge 3.2). Toplam 6 adet termal analiz çalışması gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 3.2. Termal analiz çalışması sırasında uygulanan termal yük parametreleri

Termal Analiz Kodu	Yüzey Bölgesi Sıcaklık Koşulu	Diğer Bölgeler Başlangıç Sıcaklık Koşulu	Toplam Süre
Termal-1	150 °C	23 °C	720 sn.
Termal-2	150 °C	23 °C	1440 sn.
Termal-3	160 °C	23 °C	405 sn.
Termal-4	160 °C	23 °C	810 sn.
Termal-5	170 °C	23 °C	204 sn
Termal-6	170 °C	23 °C	612 sn.

3.2. Yapısal Analiz Çalışması

Kauçuk malzemeler endüstriyel ömür döngüleri boyunca birçok çeşit doğrusal veya doğrusal olmayan karmaşık yüklere maruz kalmaktadırlar ve bu yüklerin ölçümü ve simülasyonu bazı durumlarda mümkün olamamaktadır [45]. Bu sebeple sonlu elemanlar analizi yardımıyla çeşitli yükler altındaki davranışları simüle edilerek malzemenin yapısal deformasyon, gerilim ve gerinim vb. yapısal davranış sonuçları elde edilebilmektedir.

Kauçuk ve türevleri hiperelastik malzeme özelliği taşımaktadırlar. En ilgi çekici özellikleri düşük yükler altında gösterdikleri yüksek uzama davranışı ve yükleme sonrası orijinal şekillerine kalıcı hasar almadan geri dönebilmeleridir.

Kauçuk tipi hiperelastik malzemelerin gerilim-gerinim davranışları doğrusal olmayan bir karaktere sahiptir ve metallerdeki gibi elastisite modülü değeri model çalışmalarında tek başına yeterli olamamaktadır. Bu sebeple, önceki çalışmalar bölümünde anlatılan gerinim enerjisi fonksiyonlarından türetilen çeşitli analiz modelleri yapısal analiz çalışmalarında kullanılmaktadır.

Doğal kauçuktan üretilen test numunelerinin tek ekseninde çekme yükü altındaki yapısal davranışını incelemek amaçlı MSC Patran ve MSC Nastran yazılımları aracılığı ile sonlu elemanlar yapısal analiz çalışması gerçekleştirilmiştir. Bu analiz çalışması için Mooney-Rivlin modeli seçilmiş ve doğrusal olmayan analiz simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Mooney-Rivlin hiperelastik modeli yüksek gerinim değerlerinde tutarlı sonuçlar vermekte ve özellikle tek ekseninde uzama ve kesme deformasyonlarını başarılı bir şekilde yansıtmaktadır. Yorulma ömür testlerinde test numunesine uygulanacak yük ve bu yük altındaki gerilim, gerinim, uzama değerleri analiz çalışmasından elde edilip incelendikten sonra test yükü parametresine karar verilmiştir.

3.2.1. Yapısal analiz malzeme özellikleri

Yapısal analiz çalışmasını gerçekleştirmek amaçlı kullanılan Mooney Rivlin modeli formülasyonundaki malzeme özellikleri, literatür çalışmalarındaki doğal kauçuk malzemesine ait değerlerden alınmıştır.

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) + \frac{1}{D_1}(J_{el} - 1)^2 \quad (\text{Eş. 3.2})$$

Gerinim enerjisi fonksiyonu (W) eşitliği, sırasıyla kesme sabitleri (C_{ij}), gerinim varyantları (I_{ij}), sıkıştırılabilirlik hacim modülü (D_{ij}) ve elastik hacim oranı sabitinden (J_{el}) oluşmaktadır.

Kesme sabitleri malzemenin kesme davranışını kontrol eden malzeme sabitidir ve literatür çalışmalarında doğal kauçuk malzemesi için kullanılan önceki ölçüm değerleri analiz çalışmasında kullanılmıştır. Sıkıştırılabilirlik hacim modülü malzemenin sıkıştırılabilme özelliğini kontrol etmektedir ve doğal kauçuk malzemesine ait bu katsayı literatür çalışmalarındaki örnek değerlerden alınarak analiz modeline uygulanmıştır (Çizelge 3.3).

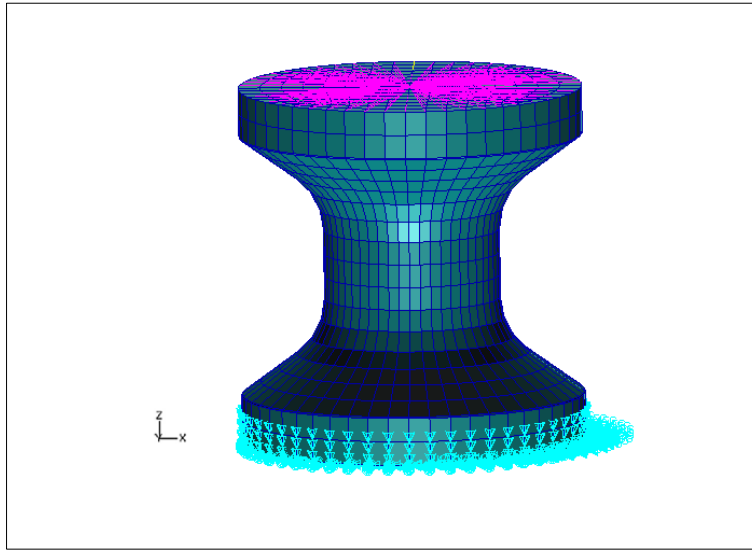
Çizelge 3.3. Doğal kauçuk test numunesine ait malzeme özellikleri

Malzeme Özelliği	Değeri
Kesme Sabiti (C_{10})	0,29
Kesme Sabiti (C_{01})	0,105
Hacim Modülü (D_1)	1,582e-3
Elastik Hacim Oranı (J_{el})	0

3.2.2. Model tanımı ve sınır koşulları

Sonlu elemanlar analizi çalışması gerçekleştirilen numunenin bir ucuna 6 serbestlik derecesinde hareketi kısıtlayacak şekilde sınır koşulu verilmiştir. Tek ekseninde çekme yükü diğer ucundan +Z eksenine boyunca uygulanmıştır.

Test numunesi için birçok farklı yük altında gerinim, gerilim ve yer değiştirme değerleri sonlu elemanlar programı aracılığı ile elde edilmiştir. Ağ yapısı ve sınır koşulları Şekil 3.3’de görülmektedir.



Şekil 3.3. Diabolo test numunesi sonlu elemanlar analizi modeli

Test numunesinin serbest ucunda gerçekleşen uzama miktarı değişiminin tüm bölgelerde aynı değerde olduğu varsayılmış ve ömür testi esnasında alınan uzama değeri bu varsayımı doğrulamak amaçlı kullanılmıştır.

3.2.3. Yapısal analiz yük değerleri

Test numunesinin en yüksek gerilim alan bölgesi en küçük yarıçap değerine sahip orta bölgesidir ve bu bölgenin yarıçapı 12,3 mm ve boyu 10 mm’dir. Bu sebeple, test numunesi analizlerinde 10 mm uzama ve çevresine denk gelecek yük değerleri çeşitli analiz iterasyonları ile tespit edilmiştir. Daha sonra bu yük değeri dışındaki yüklerde analiz sonuçlarını elde etmek ve deney verileri ile karşılaştırmak amaçlı Çizelge 3.4’deki yüklerde yapısal analizler gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 3.4. Yapısal analiz çalışması sırasında uygulanan tek eksenlerdeki çekme yük değerleri

Yapısal Analiz Kodu	Test Yüğü (N)	Yüklenme Yönü
Yapısal-1	100	+Z eksenı
Yapısal-2	200	+Z eksenı
Yapısal-3	300	+Z eksenı
Yapısal-4	350	+Z eksenı
Yapısal-5	400	+Z eksenı
Yapısal-6	500	+Z eksenı
Yapısal-7	700	+Z eksenı
Yapısal-8	900	+Z eksenı
Yapısal-9	1000	+Z eksenı
Yapısal-10	1250	+Z eksenı
Yapısal-11	1500	+Z eksenı



4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Kürlenme sıcaklığı ve kürlenme süresinin yorulma ömrü üzerindeki etkisini incelemek amaçlı test numunelerine tek eksenle çevrimsel, sinüs dalgası formunda tam gevşemeli çekme yükü ile ömür testleri uygulanmıştır. Yorulma ömür testleri tek tip numune geometrisi ile tek yönde çekme-itme kuvveti uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Deneyler, Resim 4.1'de sunulan Instron 8801 servo hidrolik test cihazında oda sıcaklığı ortamında gerçekleştirilmiştir.



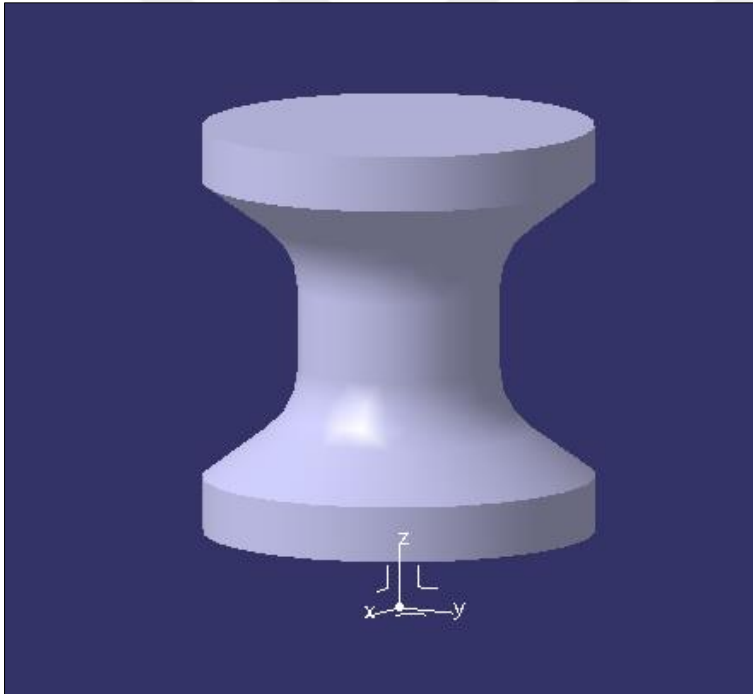
Resim 4.1. Instron 8801 servo hidrolik eksenel test cihazı

4.1. Numune Şekli

Kauçuk malzemesi ile gerçekleştirilen testlerde numune geometrisi çok önemlidir. Çalışmaya özgü ihtiyaçlar ve araştırma parametrelerine göre numune geometrisine karar verilmektedir. Çatlak oluşumu ve ardından kopma olayının meydana gelmesini tek eksenle

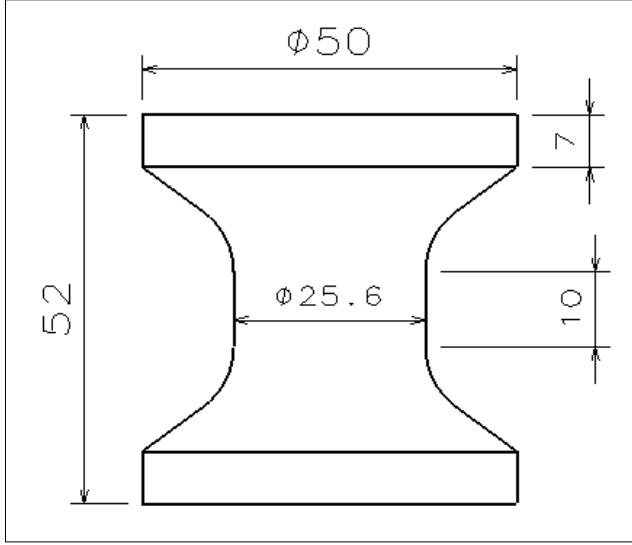
çekme ömür testi ile ölçmek amacıyla literatür çalışmalarında en çok tercih edilen numune geometrilerinden Şekil 4.1'de görülen 3 boyutlu diablo geometrisi türü bu tez çalışmasında kullanılmak üzere seçilmiştir [1].

Diablo numune tipinin seçilmesinin birkaç temel sebebi vardır. Çatlak oluşumu numunenin orta noktasında gözlemlenecek şekilde kontrol edilebilmektedir. Çatlak oluşumunun görüldüğü orta bölgenin çapının diğer bölgelere göre küçük olması, test esnasında yüzey bölgesi ve merkez noktası arasındaki termal sıcaklık farkının daha az olmasını sağlamaktadır. Ayrıca, endüstriyel kauçuk ürünleri ile benzer üretim aşamaları doğrultusunda üretime tabi tutularak ömür testi adımı öncesi benzer üretim döngüsü şartları kolayca sağlanabilmektedir [1].



Şekil 4.1. Diablo test numunesi izometrik görünüm

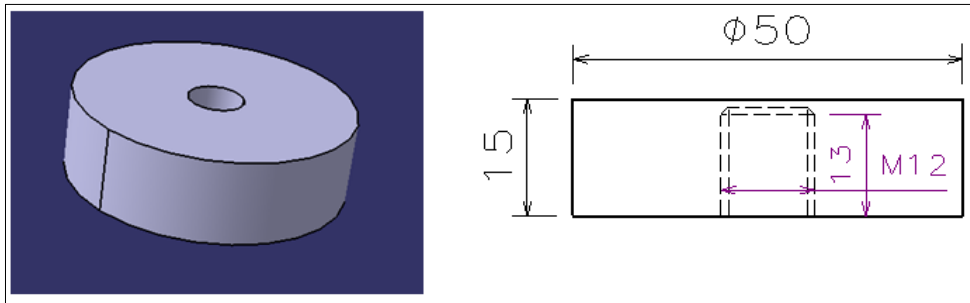
Saintier ve diğerlerinin (2005) gerçekleştirdikleri doğal kauçuk yorulma ömür deneylerinde kullanılan Şekil 4.2'deki boyutlara sahip diablo geometrisi tez çalışması için aynı boyutsal ölçülerle kullanılmıştır [3].



Şekil 4.2. Diabolo test numunesi boyutsal ölçüleri

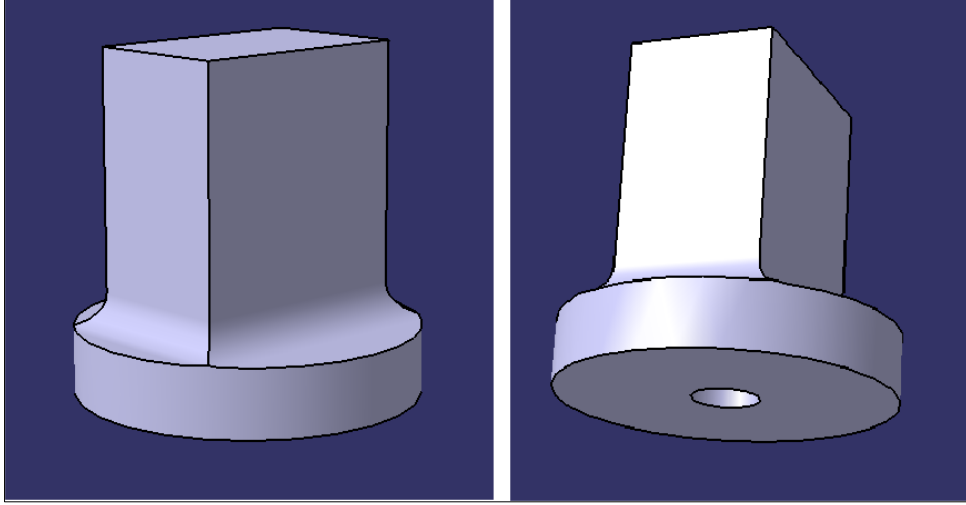
4.2. Test Numunesi ve Test Cihazı Arayüz Bağlantısının Modellenmesi

Test numunesinin servo hidrolik test cihazına sağlıklı bir şekilde monte edilebilmesi ve çevrimsel yükleme esnasında çekme yüzeyine eşit yük dağılımı sağlamak amaçlı önceki çalışmalar bölümünde bahsedilen metal plaka uygulaması deney çalışmalarında kullanılan test numunelerine de uygulanmıştır. Test numunesi ile aynı dış çap ölçüsü değerine sahip Şekil 4.3'deki boyutlara sahip metal plakalar vulkanizasyon aşamasında kalıp içerisinde numuneye yapıştırılmıştır. Bu plakalar kurlenme aşaması öncesi kalıp içerisine sabitlenip, doğal kauçuğa pişme süresi boyunca yapışarak tek bir parça ürün kalıptan çıkarılmıştır.



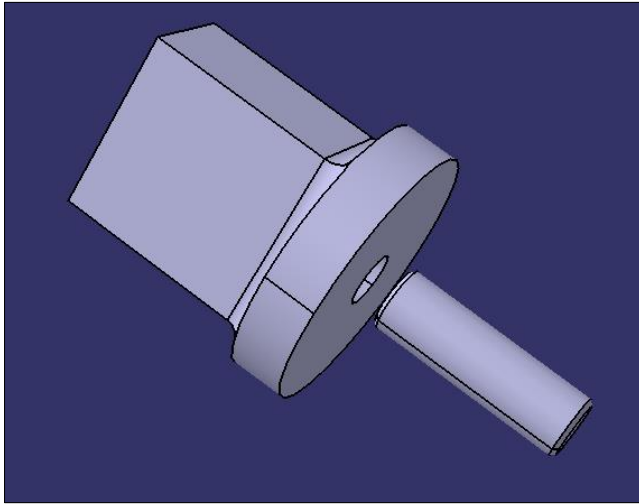
Şekil 4.3. Test numunesinin üst ve alt bölgesine yapıştırılan metal plaka

Ömür testleri için kullanılan Instron test cihazı tutamaçları ile test numunesi arasında sağlıklı bir bağlantı elde etmek amaçlı Şekil 4.4'deki geometriye ait özel bir ara yüz aparat tasarlanmıştır.

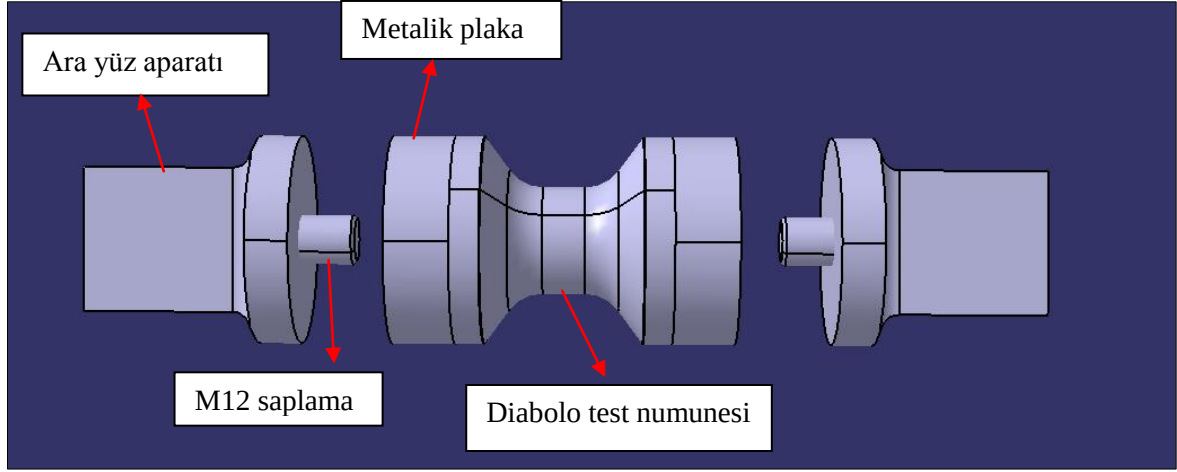


Şekil 4.4. Test numunesini çekme cihazına bağlamak amaçlı tasarlanan ara yüz

Özel üretim ara yüz aparatı ve test numunesi birbirine metrik 12 saplama ile bağlanmıştır (Şekil 4.5). Böylece, sonlu elemanlar analiz çalışmasında modellenen ve çözümlenen test yükü ve sınır koşulları şartları test numunesine en sağlıklı şekilde uygulanabilmektedir. Bağlantı detayları Şekil 4.6'da görülmekte ve üretim sonrası montajlı hali ise Resim 4.2'de görülmektedir.



Şekil 4.5. Ara yüz aparatı ve metal plakayı birbirine bağlayan metrik 12 saplama



Şekil 4.6. Diabolo test numunesi, metalik plakalar, ara yüzler ve saplamalar



Resim 4.2. Diabolo test numunesi, metalik plakalar, ara yüzler ve saplama montajı

4.3. Numune Setleri

Tez çalışması katkı malzemesiz doğal kauçuk ürünü kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Endüstride ve birçok akademik çalışmada kullanılan kauçuk türevleri çeşitli yüzdelerde doğal kauçuk içermektedir. Tek tip katkı malzemesi ile sınırlı bir çalışma alanı için bilimsel katkı sağlamak yerine hiçbir katkı malzemesi olmayan test numunesine karar verilerek, ileride gerçekleştirilecek tüm çalışmalar için kullanıma sunabilecek temel sonuçlar elde etmek amaçlanmıştır.

Bu amaçla test numunelerinin kalıpla üretim aşaması için özel olarak hazırlanan doğal kauçuk hamurunun bileşen içerikleri Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Katkı malzemesiz doğal kauçuk hamuru formülasyonu

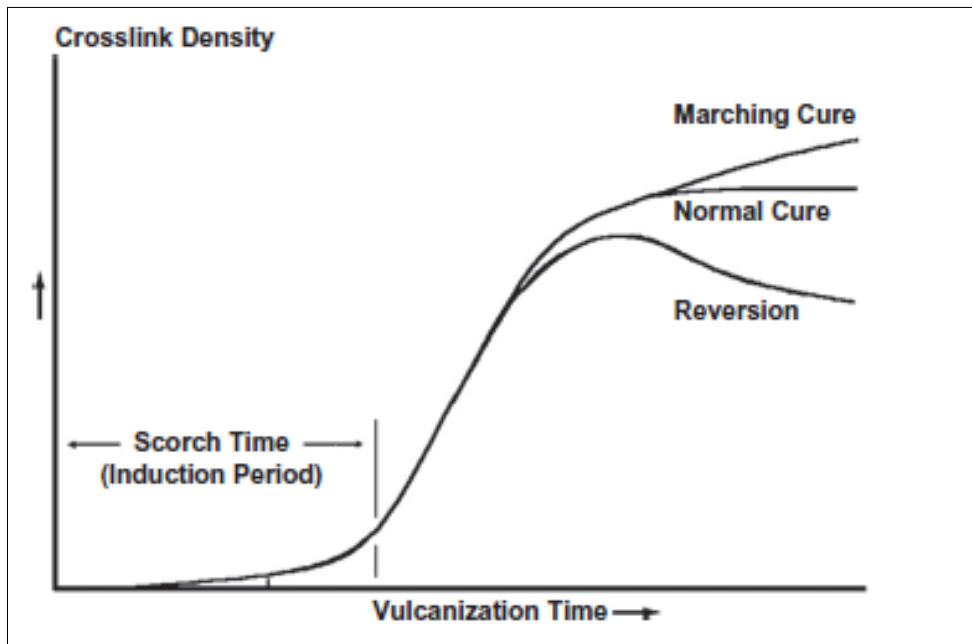
İçindekiler	Miktar (*phr)
Doğal Kauçuk	100
Proses yağı	2
Stearik Asit	2
Çinko Oksit	5
Antioksidan	1
Sülfür	2,5
Kürlenme Hızlandırıcıları	1,1

*phr: Ağırlıkça 100 parça kauçuk başına ağırlıkça pay

4.3.1. Reoloji çalışmalarına göre numune seçimi

Havacılık ve otomotiv endüstrilerinde kullanılan kauçuk malzemeler 140 °C ve 180 °C arasındaki sıcaklıklarda kürlenme ile nihai ürün formlarına ulaşmaktadırlar. Doğal kauçuk karışımına ait akış bilimi kürlenme eğrisi grafiği Şekil 4.7’de görülmektedir. Literatürdeki önceki çalışmalardan bilindiği üzere minimum tork (M_L) ve maksimum tork değerleri (M_H) arasındaki farkın fazla olması daha yüksek ağ yapısı yoğunluğu ve daha iyi mekanik özellikler anlamına gelmektedir [27]. Doğal kauçuk malzemesi için ise en yüksek $M_L - M_H$ farkı 150 °C sıcaklıkta kürlenme aşamasında gözlenmektedir. 140 °C sıcaklıktan 150 °C sıcaklığa kürlenme sıcaklığı yükselmeye başladığında mekanik özelliklerde iyileşme gözlemlenirken, 150 °C üzeri sıcaklıklarda gerçekleşen kürlenmelerde optimum kürlenme süresi (t_{90}) kısaltmakta ve aşırı kürlenme eğrisine girme eğilimi de artmaktadır. Dolayısı ile mekanik özelliklerde düşme eğilimi de artış göstermektedir. En düşük bağ yoğunluğu 180 °C sıcaklıkta gerçekleştirilen kürlenme proseslerinde görülmektedir [27]. Yine de bazı endüstriyel çalışmalarda 170 ve 180 C’de kürlenme ile ürün üretimi devam etmektedir. Bunun sebeplerinden bazıları ise bu sıcaklıkta kürlenen malzemenin kopma sırasındaki uzama miktarında iyileşme özelliği göstermesi, baskı seti ve ısı oluşum hızı özelliklerinde iyileşmelerin görülmesidir. Akış bilim reometre ölçümlerinden elde edilen bilgiler ışığında kauçuk karışımının optimum kürlenme aşamasına ulaştığı zaman değeri (t_{90}) üretim aşaması için önemli bir parametredir. Optimum kürlenme süresi olarak kullanılan t_{90} süre değeri ile endüstriyel ürünlerin kürlenme ile üretim sürelerine karar verilebilmektedir.

Akış bilimi reometre ölçümlerine ait kürlenme grafiğine ait önemli bir diğer parametre ise Şekil 4.7’de görülen t_{sc} , kürlenme başlangıcına kadar geçen süre (scorch time veya indüksiyon periyodu) süresidir. Bu süre vulkanizasyon aşamasının ilk olarak görüldüğü süre veya indüksiyon süresi anlamına gelmektedir. Bu süreden sonra kürlenme aşamasına ait ağ yapısı ve mekanik özellik iyileşmeleri net şekilde oluşmaya başlamaktadır. Kürlenme başlangıcına kadar geçen süre, reometri ölçümünün gerçekleştirildiği sıcaklıkta elde edilen minimum tork değerinden 5 birim yüksek değerin görüldüğü ilk süre olarak tanımlanmaktadır (Şekil 4.7).

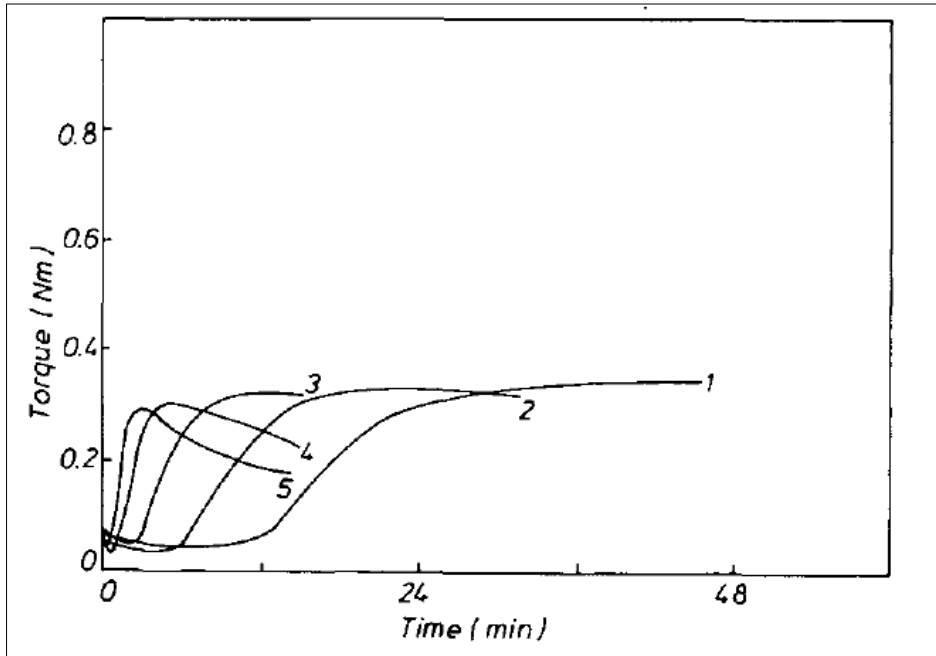


Şekil 4.7. Reometre kürlenme grafiği ve olası vulkanizasyon süreci davranışları [32]

Akış bilimi çalışmalarında yapılan deneylerde kullanılan örnek kauçuk karışımı miktarı ile endüstriyel üretim aşamasında nihai ürüne ait gerçek karışım miktarı çoğu zaman birbirinden farklıdır ve bu durum akış bilimi sonuçlarının yansıttığı sürelerde kürlenen farklı boyutlardaki nihai ürünlere ait bazı ölçümlerde beklenen mekanik özelliklerin elde edilememesine neden olmaktadır. Bu durumun temel sebebi ise nihai ürünün kalınlık değeri ve/veya şekil karmaşıklığı arttıkça kürlenme sıcaklığının tüm bölgelere eşit miktarda ulaşamaması ve hatta kalıptan çıktığı anda bazı noktaların hedeflenen kürlenme sıcaklığı ile etkileşiminin tamamlanmamış olmasıdır.

4.3.2. Numune kürlenme sıcaklıkları ve kürlenme sürelerinin belirlenmesi

Reometre cihazı ölçüm sonuçları ışığında numune setlerinin kürlenme sıcaklığı ve kürlenme süresi parametrelerine karar vermek amaçlı, özel olarak hazırlanan doğal kauçuk karışımına ait şekil 4.8 kürlenme eğrisi grafiği ve izelge 4.2 vulkanizasyon karakterizasyonu tablosu incelenmiş ve deney numunelerine ait ön tasarım parametreleri kararlaştırılmıştır.



şekil 4.8. Doğal kauçuk karışımı için kürlenme grafiği, 140 °C (1), 150 °C (2), 160 °C (3), 170 °C (4), 180 °C (5) [35]

Çizelge 4.2. Doğal kauçuk formülasyonunun vulkanizasyon karakterizasyonu reometre ölçüm sonuçları [35]

Kürlenme Sıcaklığı (°C)	Maksimum Tork (Nm)	Optimum Kürlenme Süresi (sn)	Kürlenme başlangıcına kadar geçen süre (sn)
140 °C	0,345	1656	768
150 °C	0,334	720	378
160 °C	0,329	405	189
170 °C	0,310	204	96
180 °C	0,297	114	45

Reoloji ölçümlerinde belirlenen optimum kürlenme sürelerinin ağ yapısı oluşumu açısından en verimli süreler olduğu bilinmekle beraber, numune kalınlığı etkisi ile bu sürelerin tüm geometrilerde aynı derecede verimlilik veremeyeceği öngörülmüştür. Bu öngörüye ait kontrollü deney çalışması yapılması amacıyla 1.set numuneler reoloji ölçümlerinden elde edilen süreler ile kürlenme aşamasına tabi tutularak ürettirilmiştir.

2. set numuneler ise optimum kürlenme süresi içerisinde hedeflenen sıcaklığa ulaşamayan iç noktalara ait sıcaklık dağılımını iyileştirmek ve dolayısı ile kürlenme seviyesini arttırmak amaçlı optimum kürlenme sürelerinin iki katı ve/veya üç katı sürelerde kürlenmeye tabi tutularak ürettirilmiştir. Optimum kürlenme süresinin hangi katında kürlenmeye tabi tutulacağı kararı ise sonlu elemanlar termal analiz çalışmasından elde edilen sıcaklık dağılımı sonuçları incelenerek netleştirilmiştir.

Önceki çalışmalardan elde edilen bilgiler ışığında optimum kürlenme süresi (t_{90}) üzerindeki sürelerde gerçekleştirilen kürlenmelerde iç yapı Şekil 4.7.'de görülen bozulma eğrisi davranışı sergilemekte ve mekanik özelliklerinde düşme gözlemlenmektedir. 2.set numunelerde aşırı kürlenme süresinden dolayı dış yüzeylerinde meydana gelen bozulma davranışını önlemek amaçlı bu sete ait numuneler üretim aşamasından çıktıkları an buzlu su ortamına daldırılmıştır. Buzlu su ortamında yüzey sıcaklığı hızla düşen numunenin dış noktalarında kürlenme durdurulmuş, iç noktalarda ise kürlenme prosesinin dış ortam ile denge sıcaklığına gelene kadar devam etmesi amaçlanmıştır.

Doğal kauçuk malzemesinin 140 °C sıcaklıktaki optimum kürlenme süresi diğer sıcaklıklara ait süreler ile karşılaştırıldığında iki, dört ve sekiz kat fazladır. 140 °C sıcaklıktaki optimum kürlenme süresini deneysel çalışmalarda arttırmanın hızlı bir üretim ve deney aşaması oluşturamayacağı öngörülmüş ve bu sebeple deney setlerinde 140 °C sıcaklıkta kürlenme parametresi kullanılmamıştır. Aynı zamanda, 180 °C sıcaklıkta gerçekleştirilecek kürlenme sürecinin ise optimum kürlenme süresinin 120 saniyenin altında olması, vulkanizasyon aşamasındaki sıcaklık dağılımını değiştirmek için verimli bir parametre değeri olmadığı öngörülmüştür. Bu sebeple 180 °C kürlenme parametresi de tez çalışmasında incelenmemiştir.

Tez çalışmasında önceki çalışmalar bölümünde belirtilen ve en uzun yorulma ömür süresi özelliği sonucu verdiği öngörülen 150 °C sıcaklık değeri ve yorulma ömür karşılaştırması

ve optimum sürelerde yapılacak değişiklikler ile karşılaştırma yapılabilecek 160 °C ve 170 °C sıcaklık değerleri kürlenme sıcaklık parametreleri olarak seçilmiştir.

İlgili kürlenme sıcaklığı parametresinin ardından bir diğer parametre olan kürlenme süresi parametresine karar verilmiştir. 1. set numuneler için optimum kürlenme süreleri, 2. set numuneler için ise termal analiz sonuçları incelenerek optimum kürlenme sürelerinin iki katı ve/veya üç katı süreler seçilmiştir. İlgili numune setleri Çizelge 4.3’de listelenmiştir.

Çizelge 4.3. Test numuneleri kürlenme sıcaklığı ve kürlenme süresi parametreleri

Kürlenme Sıcaklığı (°C)	1. Set Kürlenme Süresi (sn)	2. Set Kürlenme Süresi (sn)
150 °C	720	1440
160 °C	405	810
170 °C	204	612

4.4. Yorulma Ömrü Yapısal Test Parametrelerinin Belirlenmesi

Yorulma ömür testleri Instron servo hidrolik eksenel test cihazında tek eksenle gerçekleştirilmiştir. Bu testlere ait test türü, test yükü, test yük oranı bölgesi ve test hızı parametreleri deneysel sürecin sağlıklı şekilde ilerlemesi hedef alınarak önceki çalışmalar ışığında karar verilip, deneylere uygulanmıştır.

4.4.1. Test türünün belirlenmesi

Kauçuk malzemeler ömür döngüleri boyunca birçok çeşit doğrusal veya doğrusal olmayan yüklere maruz kalabilmektedirler. Bu yüklerden bazıları periyodik olarak etki ederken, bazıları ise sabit olmayan periyotlarda ve öngörülemeyen yük modlarında etki edebilmektedir. Kauçuk malzemelere ait yorulma ömür çalışmalarını basitleştirmek ve en hızlı şekilde simüle edebilmek adına ilgili yük değerleri optimizasyon çalışmaları sonucunda test numunelerine genellikle bir ya da iki eksenle sinüs dalgası modunda uygulanmaktadır. Tek eksenle sinüs mod yükleme modeli hem uygulanması hem de test takibi kolay olduğundan deney çalışmasında tercih edilmiştir.

4.4.2. Test yükünün belirlenmesi

Yorulma testi çalışmaları için test yüklerine yapısal analiz sonuçları ışığında karar verilmiştir. Test numunesinin en küçük çap değerine sahip orta bölgesinin toplam uzunluğu 10 mm'dir ve yorulma ömür testleri birinci aşaması ortalama 10 mm ve çevresinde uzama miktarına denk gelecek 350 N yük altında gerçekleştirilmiştir.

Aynı zamanda test sonuçlarının farklı bir yük değeri altında hızlandırılmış deney çalışması modeli ile tutarlı sonuçlar verip vermeyeceği de araştırılmak üzere tüm numune setleri 400 N yük altında da yorulma testlerine tabi tutulmuştur.

4.4.3. Test yük oranı bölgesinin belirlenmesi

Test numunelerine birçok yük oranı değerinde deneysel testler yapılabilmektedir. Bu tip testler arasında uygulanması ve test hızını arttırmaya en müsait olanlarından bir tanesi de pozitif yük oranı bölgesinde gerçekleştirilen test yükü modelidir. Bu modelde minimum yük oranı sıfır iken maksimum yük oranı deney çalışmasının amacına yönelik olarak pozitif bir değerde olmak kaydı ile değişebilmektedir. Tez çalışması deney numuneleri için tam orta bölge civarında kopma durumu hedeflendiğinden sıfır yük oranı ile deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu tip yükleme modelinin adı tam gevşemeli çekme yük koşuludur [11].

4.4.4. Test hızının belirlenmesi

Kauçuk malzemelere uygulanan ömür testlerine ait deneysel çalışmalarda test hızı gerçekleştirilen deney amaçlarına paralel olarak değişiklik gösterebilmektedir. Test numunesine ait sıcaklık artışı etkisi ile meydana gelen termal yorulma etkisinin mekanik yorulma ömür tespiti çalışmalarına olumsuz etki etmemesi için testler genellikle düşük frekanslarda uygulanmaktadır.

Tez çalışmasına ait yorulma ömür testleri yüksek deplasmanlarda gerçekleştirildiğinden ve bu sebeple termal yorulma durumunun etki etmemesi hedeflendiğinden ve EK-1'deki Instron test cihazı grafiğinde 10 mm deplasman değerine denk gelen optimum hız değerini aşmamak amacıyla yorulma ömür testleri 3,5 Hz hızında gerçekleştirilmiştir. Önceki çalışmalar bölümünde de belirtildiği üzere test numunesi toplam sıcaklık artışının 20 °C

civarında tutulabildiği bölgede yorulmanın tamamen mekanik etkenlerden gerçekleşeceği görülmektedir.

Deneyle esnasında bazı test numunelerinin yüzey sıcaklıkları termal kamera ile izlenerek hedeflenen sıcaklık üst limiti kontrol edilmiş ve sıcaklık değerinin stabil kaldığı değerin uygun aralıkta olduğu gözlemlenmiştir.

4.4.5. Yorulma ömür çevrim sayısı karar verme kriteri

Kauçuk malzemeler için yorulma ömür çevrim sayısı karar verme kriter seçenekleri önceki çalışmalar bölümünde belirtildiği üzere belirli boyutta ilk çatlak oluşumunun gözlemlendiği çevrim sayısı, uygulanan yük ve/veya deplasman değerinde meydana gelen belirli yüzdesel değişiklik, katılık değerinde meydana gelen belirli yüzdesel değişiklik veya tamamen kopma durumudur.

Önceki deneysel çalışmalarda da gözlemlendiği üzere belirli bir ölçüde ilk çatlak ölçümü ve takibi kriteri ekstra ölçüm, gözlem ve iş gücü gerektirdiğinden, deplasman ve/veya yük değeri değişiminin verdiği sonuçlar ile tamamen kopma durumu çevrim sayısı arasında yüzdesel olarak önemli farklar gözlemlenmediğinden ve 24 saat boyunca devam eden test aşamasının sürekliliğini kolayca sağlamak açısından tez çalışması boyunca ömür süresi çevrimleri test numunesinin tamamen kopma olayı gösterdiği çevrim olarak kabul edilmiştir.

4.4.6. Yorulma ömür deneyi tüm parametreler

Doğal kauçuktan üretilen 12 adet numune ve bu numunelere uygulanan yorulma ömür testlerine ait özet bilgiler Çizelge 4.4’de listelenmiştir.

Çizelge 4.4. Yorulma ömür testleri özet tablosu

Numune numarası	Kürlenme Sıcaklığı (°C)	Kürlenme Süresi (sn)	Kürlenme Sonrası Soğutma Yöntemi	Test Türü	Test Yüğü (N)	Test Hızı (Hz)	Termal Sıcaklık Ölçümü
1	150	720	Doğal Ortam	Sinüs Dalgası Yük Modu	350	3,5	Yok
2	150	720	Doğal Ortam	Sinüs Dalgası Yük Modu	400	3,5	Yok
3	150	1440	Buzlu Su Ortamı	Sinüs Dalgası Yük Modu	350	3,5	Yok
4	150	1440	Buzlu Su Ortamı	Sinüs Dalgası Yük Modu	400	3,5	Var
5	160	405	Doğal Ortam	Sinüs Dalgası Yük Modu	350	3,5	Yok
6	160	405	Doğal Ortam	Sinüs Dalgası Yük Modu	400	3,5	Yok
7	160	810	Buzlu Su Ortamı	Sinüs Dalgası Yük Modu	350	3,5	Yok
8	160	810	Buzlu Su Ortamı	Sinüs Dalgası Yük Modu	400	3,5	Var
9	170	204	Doğal Ortam	Sinüs Dalgası Yük Modu	350	3,5	Yok
10	170	204	Doğal Ortam	Sinüs Dalgası Yük Modu	400	3,5	Yok
11	170	612	Buzlu Su Ortamı	Sinüs Dalgası Yük Modu	350	3,5	Yok
12	170	612	Buzlu Su Ortamı	Sinüs Dalgası Yük Modu	400	3,5	Var



5. BULGULAR, YORUMLAR VE TARTIŞMA

Yapılan sonlu elemanlar analizi ve deneysel çalışmalara ait sonuç ve ölçümler, doğal kauçuktan üretilen malzemelerde kürlenme süresi ve kürlenme sıcaklığı değişkenlerine bağlı olarak, belirlenmiş geometri ve test yükleri altındaki test numunesinin;

- Deformasyon değişimi yapısal sonlu elemanlar analizi,
- Test yükleri altında gerinim dağılımları yapısal sonlu elemanlar analizi ,
- Kürlenme süresine bağlı test numunesi sıcaklık dağılımı termal sonlu elemanlar analizi,
- Tek ekseninde yorulma ömür süreleri ölçüm deneyleri sonuçları,
- Quasi statik çekme testi ölçüm deneyleri sonuçları,
- Ömür testi esnasında yüzey sıcaklığı artışı ölçüm sonuçlarını içermektedir.

Tek ekseninde çekme testi olarak gerçekleştirilen ömür testlerine ait verilerin yük, deplasman, katılık değerlerinin çevrim sayısına bağlı değişimleri MATLAB yazılımında incelenmiş ve elde edilen verilerin çıktıları, grafik ve yorumlarla desteklenerek ayrıntılı olarak analiz edilmiştir.

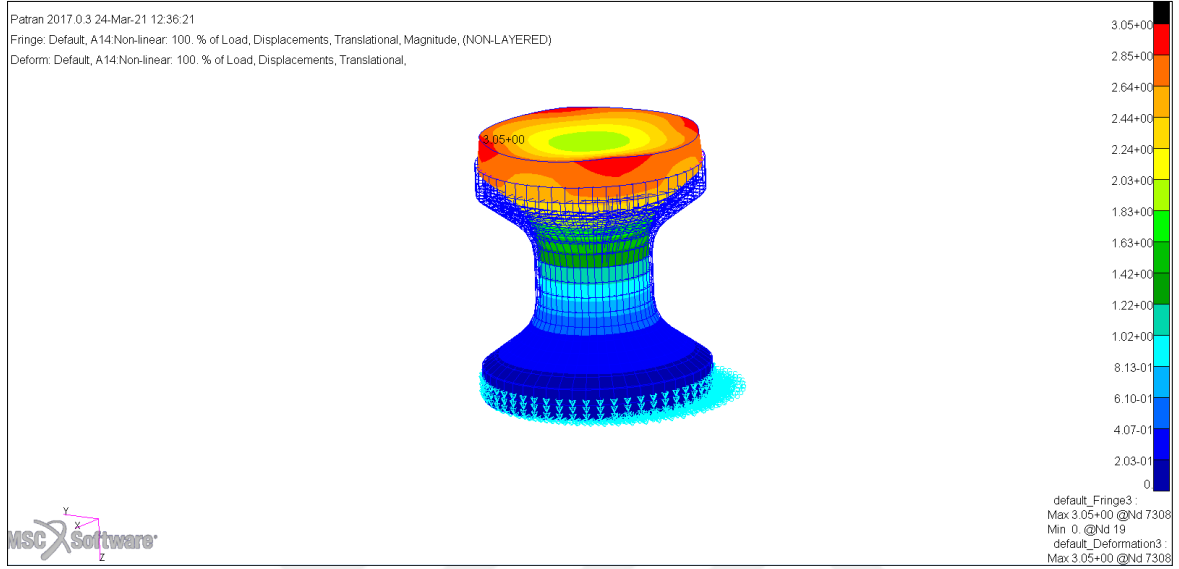
5.1. Sayısal Analiz Sonuçları

Diabolo test numunesinin kürlenme aşamasındaki sıcaklık dağılımı ve çeşitli yükler altındaki uzama ve gerinim değer sonuçları sonlu elemanlar analizleri ile elde edilmiştir ve ilgili sonuçlar bu bölümde sunulmaktadır.

5.1.1. Yapısal analiz sonuçlarının incelenmesi

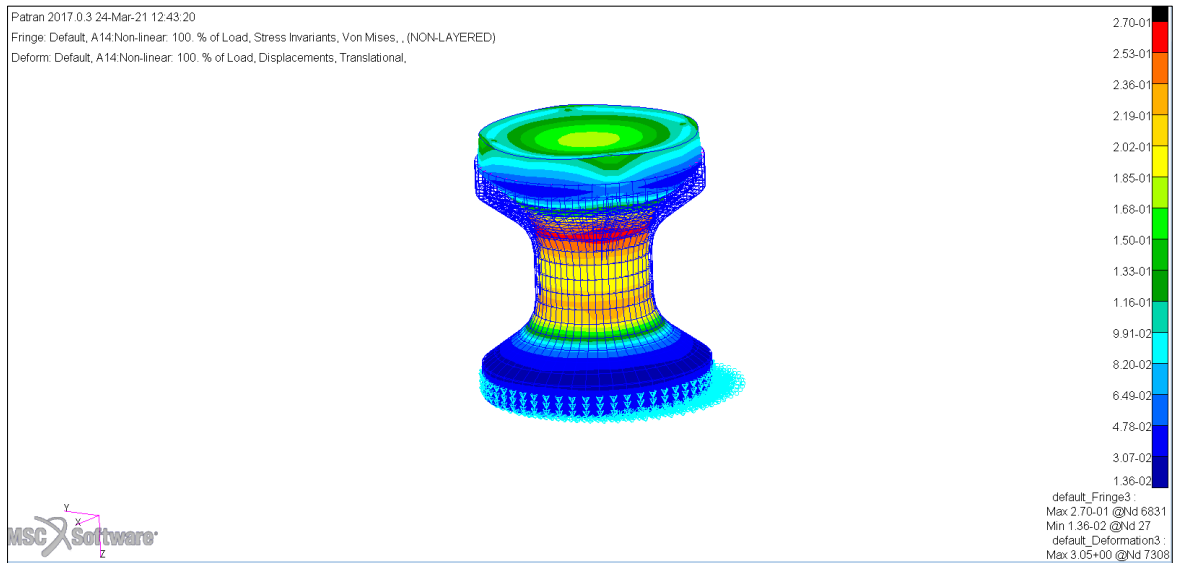
Sonlu elemanlar yapısal analiz modeli ile gerçekleştirilen analiz sonuçları yardımı ile yorulma ömür testi esnasında uygulanacak yük değerlerine karar verilmiştir. Ayrıca, farklı sürelerde kürlenmiş numunelere ait kopma durumuna kadar olan tek ekseninde yarı statik (quasi static) çekme testine ait beklenen uzama değerleri de yapısal analiz çalışması ile elde edilmiştir ve karşılaştırması yapılmıştır.

Diabolo test numunesinin 100 N yük altında 3,05 mm uzama davranışı gösterdiği analiz edilmiştir. Kopma beklenen orta bölgesinin ise Şekil 5.1’de görüldüğü üzere 0,61 mm ile 2,44 mm arasında bir değerde uzama davranışı gösterdiği analiz edilmiştir.



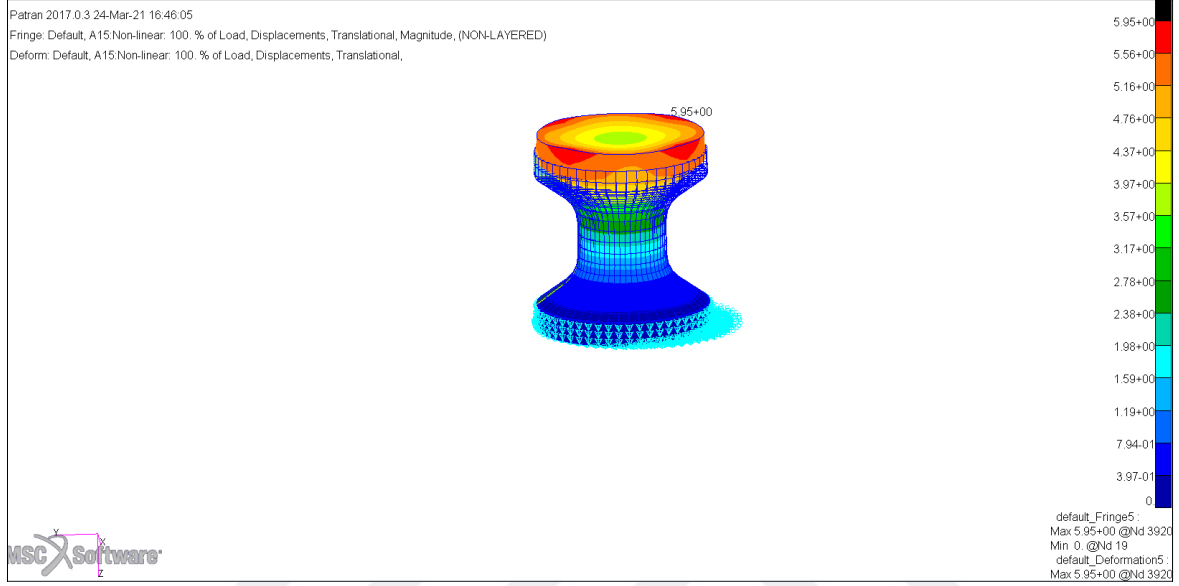
Şekil 5.1. Doğal kauçuk test numunesi 100 N yük altındaki deformasyon dağılımı

Şekil 5.2’de test numunesinin 100 N yük altında gerilim dağılımına bakıldığında ise en yüksek gerilim bölgesinin orta bölgenin bitişi ile yarıçap değerinin artmaya başladığı bölge arasında ve 0,270 MPa civarında olduğu analiz edilmiştir.



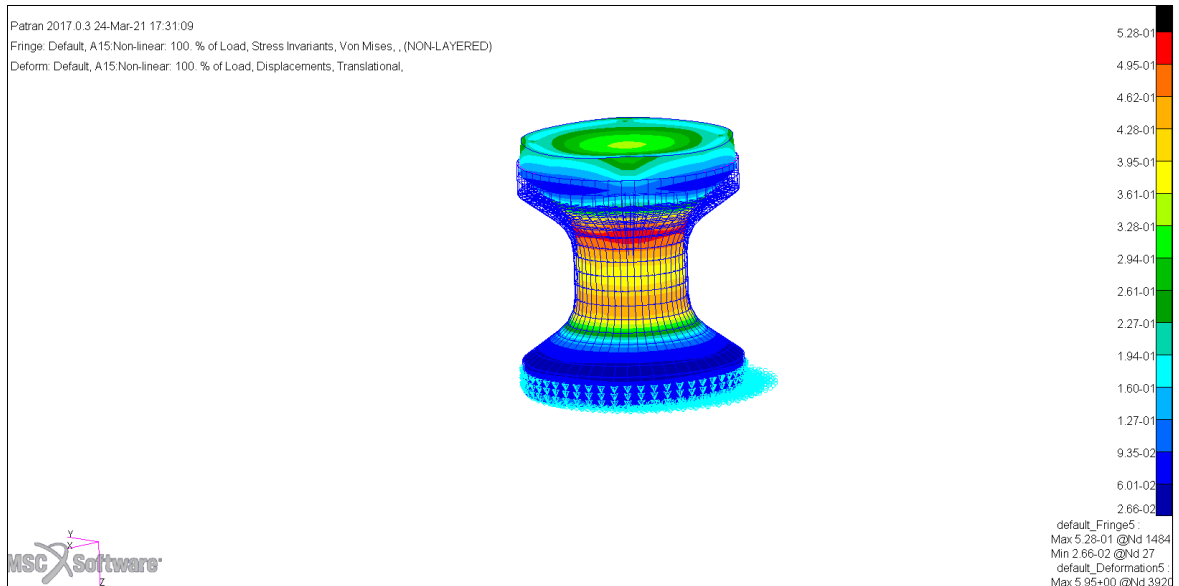
Şekil 5.2. Doğal kauçuk test numunesi 100 N yük altındaki gerilim dağılımı

Test numunesinin 200 N yük altındaki deformasyon dağılımı Şekil 5.3’de sunulmuştur. En yüksek deforme olduğu bölge yükün uygulandığı hareket eden uç bölgedir ve 5,95 mm uzama davranışı gösterdiği analiz edilmiştir. Kopma beklenen orta bölgesinin ise 0,79 mm ile 4,76 mm aralığında uzama davranışı gösterdiği analiz edilmiştir.



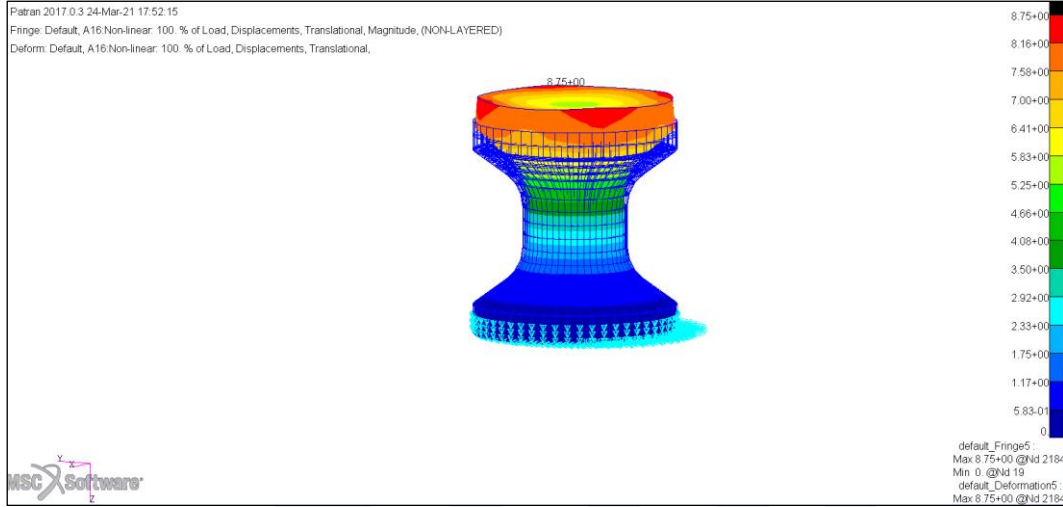
Şekil 5.3. Doğal kauçuk test numunesi 200 N yük altındaki deformasyon dağılımı

Test numunesinin 200 N yük altında sergilediği Şekil 5.4’te görülen gerilim dağılımına bakıldığında ise en yüksek gerilim bölgesinin orta bölgenin bitişi ile yarıçap değerinin artmaya başladığı bölge arasında ve 0,528 MPa civarında olduğu analiz edilmiştir.



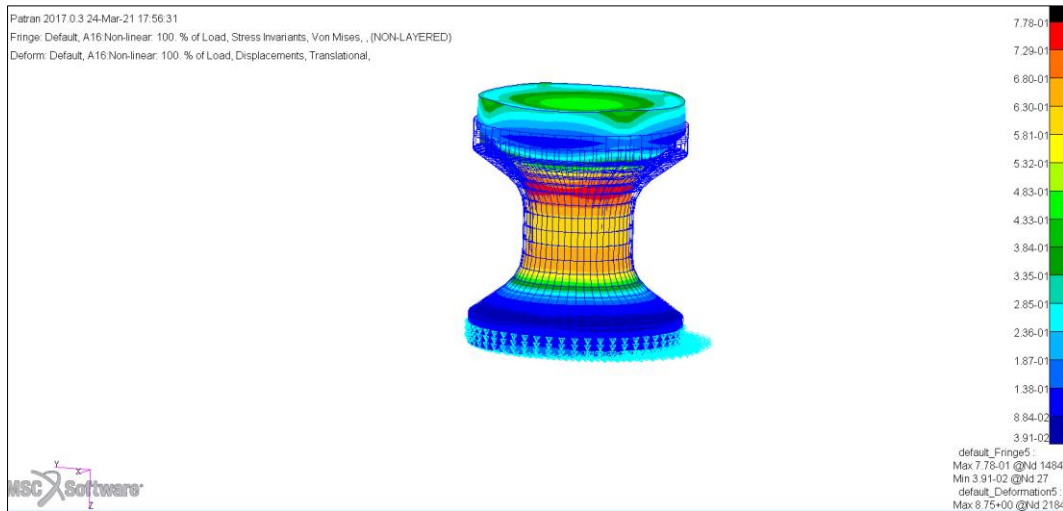
Şekil 5.4. Doğal kauçuk test numunesi 200 N yük altındaki gerilim dağılımı

Test numunesinin 300 N yük altındaki deformasyon dağılımı Şekil 5.5’de sunulmuştur. En yüksek deforme olduğu bölge yükün uygulandığı hareket eden uç bölgedir ve 8,75 mm uzama davranışı gösterdiği analiz edilmiştir. Kopma beklenen orta bölgesinin ise 1,17 mm ile 7,01 mm aralığında deforme olduğu analiz edilmiştir.



Şekil 5.5. Doğal kauçuk test numunesi 300 N yük altındaki deformasyon dağılımı

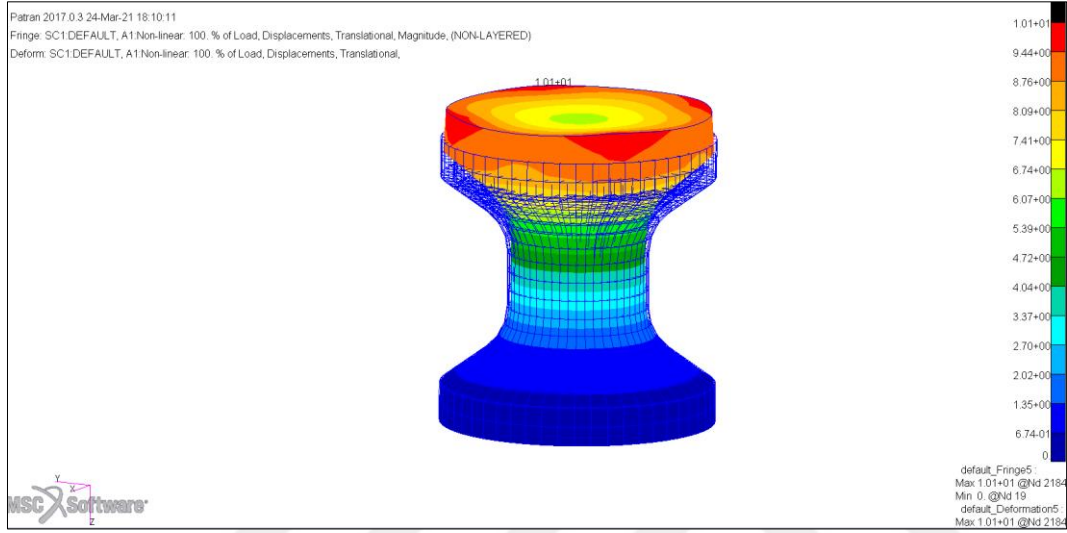
Test numunesinin 300 N yük altında sergilediği Şekil 5.6’da görülen gerilim dağılımına bakıldığında ise en yüksek gerilim bölgesinin orta bölgenin bitişi ile yarıçap değerinin artmaya başladığı bölge arasında ve 0,778 MPa civarında olduğu analiz edilmiştir.



Şekil 5.6. Doğal kauçuk test numunesi 300 N yük altındaki gerilim dağılımı

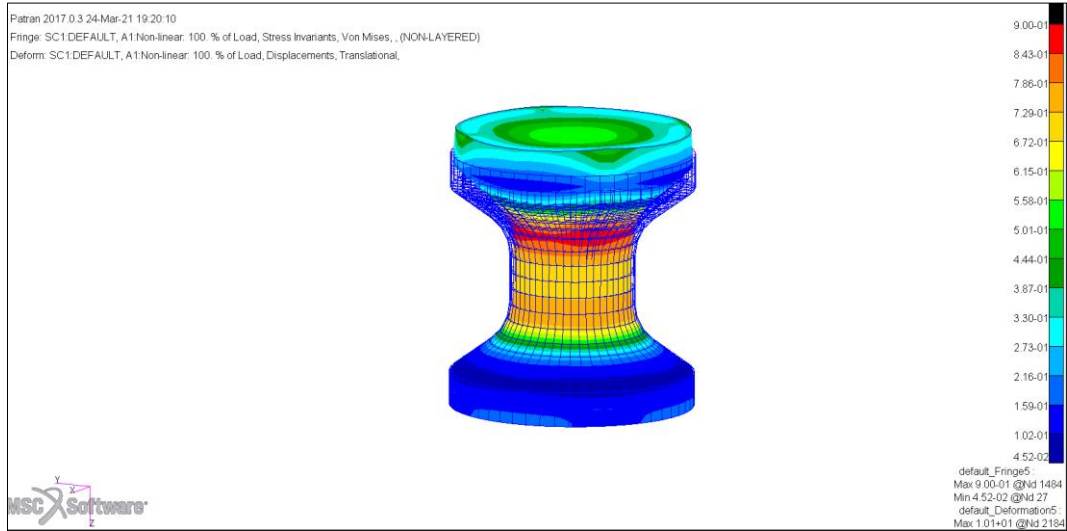
Test numunesinin 350 N yük altındaki deformasyon dağılımı Şekil 5.7’de sunulmuştur. En yüksek deforme olduğu bölge yükün uygulandığı hareket eden uç bölgesidir ve 10,01 mm

uzama davranışı gösterdiği analiz edilmiştir. Bu uzama değeri diablo test geometrisindeki en küçük yarıçapa sahip bölgenin toplam boyu kadardır ve yorulma ömür testi için seçilen birinci set periyodik yükleme değeri 350 N olarak karar verilmiştir. Kopma beklenen orta bölgesinin ise 1,35 mm ile 8,09 mm aralığında uzama davranışı gösterdiği analiz edilmiştir.



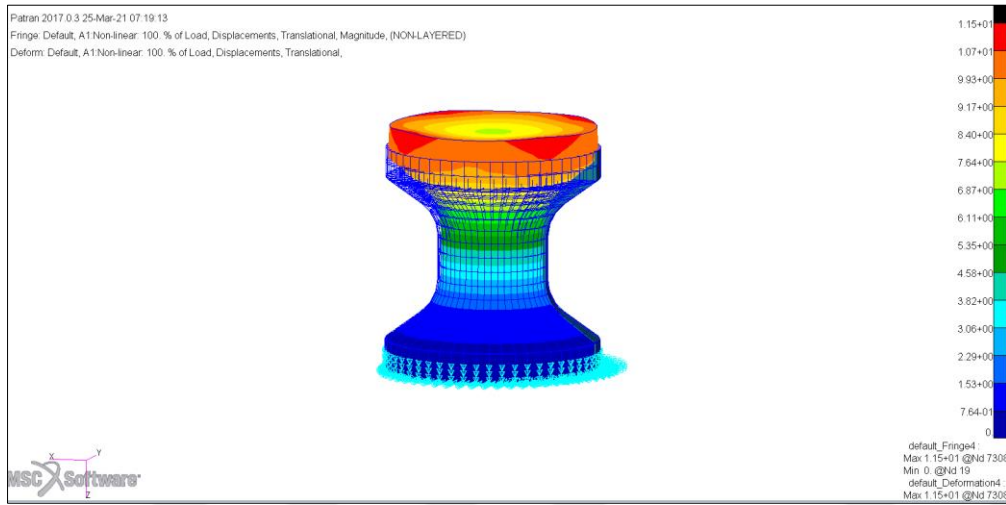
Şekil 5.7. Doğal kauçuk test numunesi 350 N yük altındaki deformasyon dağılımı

Test numunesinin 350 N yük altında sergilediği Şekil 5.8’de görülen gerilim dağılımına bakıldığında ise en yüksek gerilim bölgesinin orta bölgenin bitişi ile yarıçap değerinin artmaya başladığı bölge arasında ve 0,9 MPa civarında olduğu analiz edilmiştir.



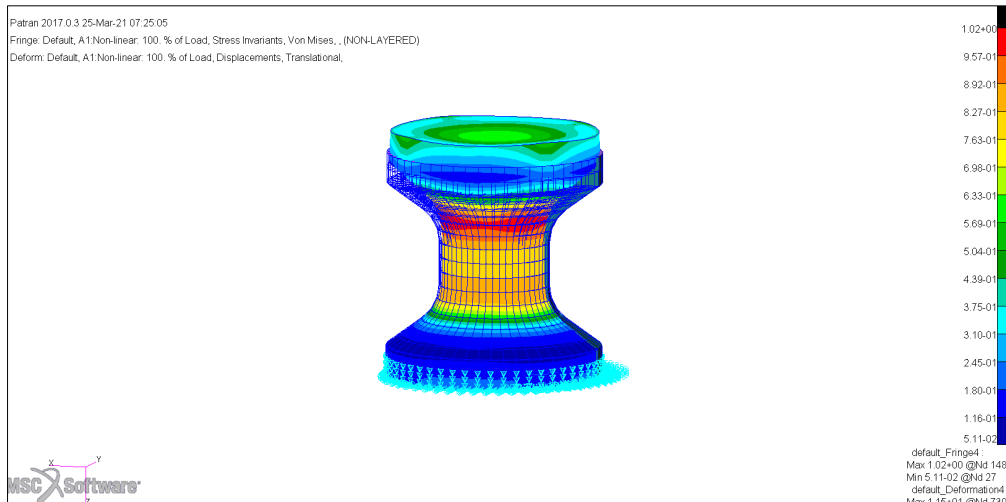
Şekil 5.8. Doğal kauçuk test numunesi 350 N yük altındaki gerilim dağılımı

Test numunesinin 400 N yük altındaki deformasyon dağılımı Şekil 5.9’da sunulmuştur. En yüksek deforme olduğu bölge yükün uygulandığı hareket eden uç bölgedir ve 11,5 mm uzama davranışı gösterdiği analiz edilmiştir. Bu uzama değeri diablo test geometrisindeki en küçük yarıçapa sahip bölgenin toplam boyu olan 10 mm’ye en yakın ikinci yük değeridir ve yorulma ömür testi için seçilen ikinci set periyodik yükleme değeri 400 N olarak karar verilmiştir. Kopma beklenen orta bölgesinin ise 1,53 mm ile 9,17 mm aralığında uzama davranışı gösterdiği analiz edilmiştir.



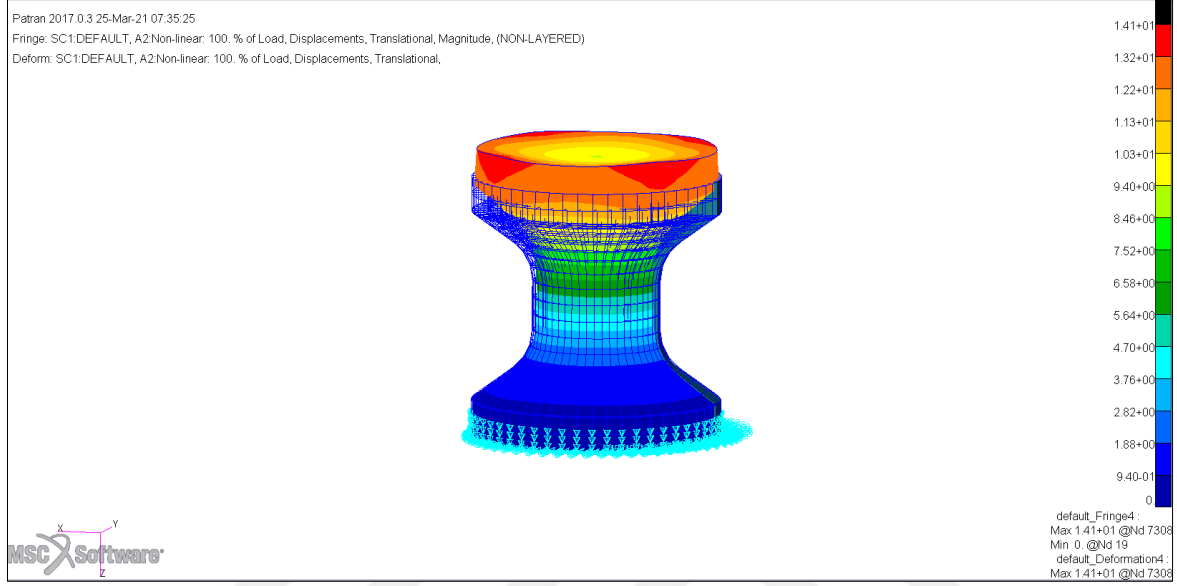
Şekil 5.9. Doğal kauçuk test numunesi 400 N yük altındaki deformasyon dağılımı

Test numunesinin 400 N yük altında sergilediği Şekil 5.10’da görülen gerilim dağılımına bakıldığında ise en yüksek gerilim bölgesinin orta bölgenin bitişi ile yarıçap değerinin artmaya başladığı bölge arasında ve 1,020 MPa civarında olduğu analiz edilmiştir.



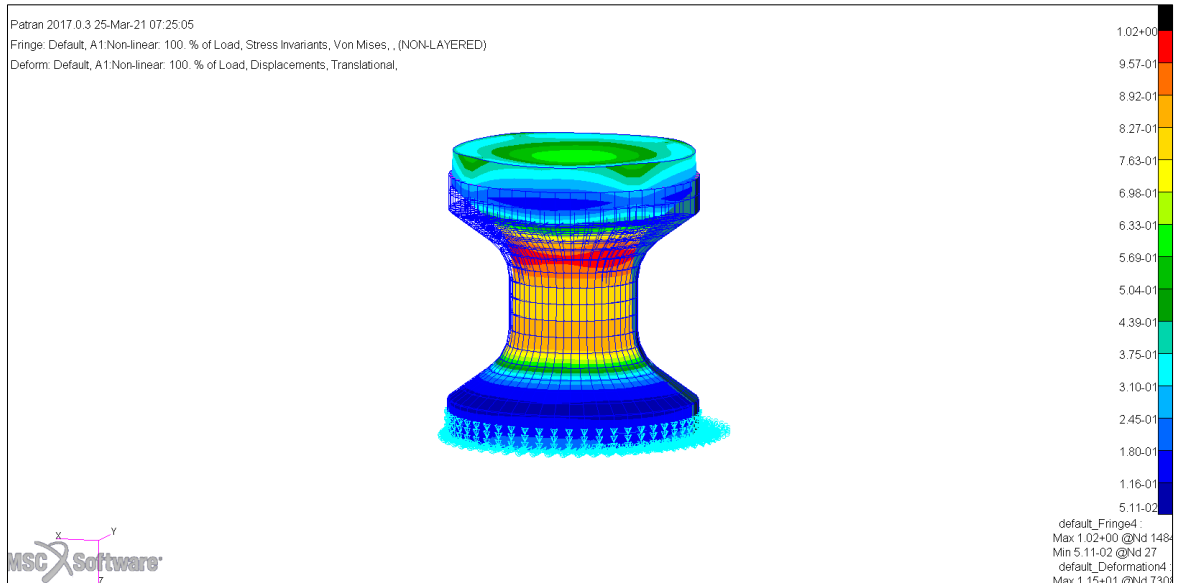
Şekil 5.10. Doğal kauçuk test numunesi 400 N yük altındaki gerilim dağılımı

Test numunesinin 500 N yük altındaki deformasyon dağılımı Şekil 5.11’de sunulmuştur. En yüksek deforme olduğu bölge yükün uygulandığı hareket eden uç bölgedir ve 14,1 mm uzama davranışı gösterdiği analiz edilmiştir. Kopma beklenen orta bölgesinin ise 1,88 mm ile 11,3 mm aralığında uzama davranışı gösterdiği analiz edilmiştir.



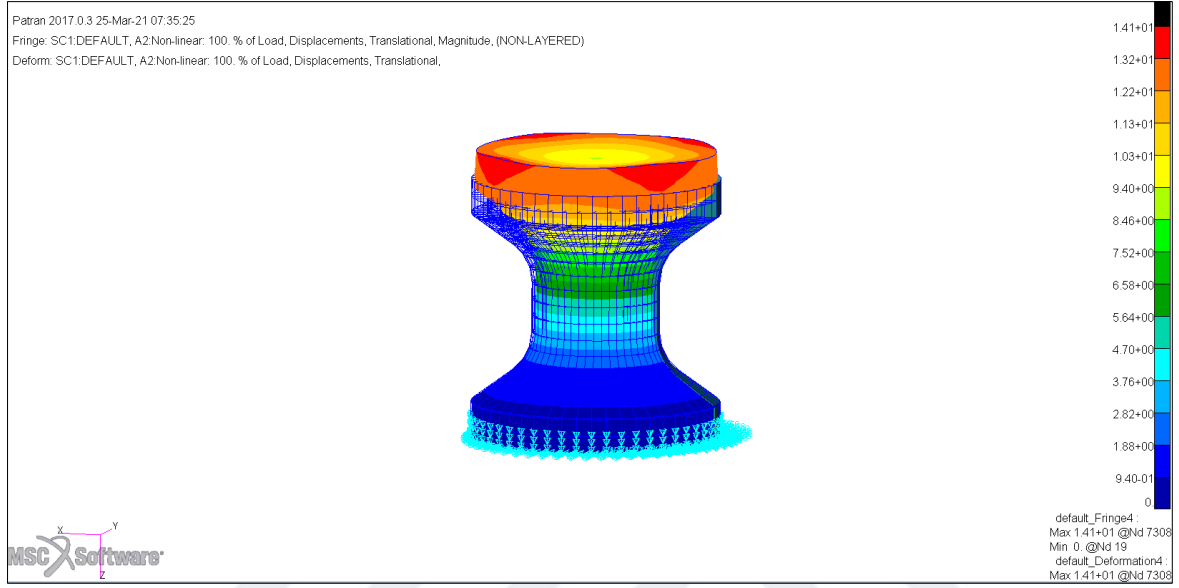
Şekil 5.11. Doğal kauçuk test numunesi 500 N yük altındaki deformasyon dağılımı

Test numunesinin 500 N yük altında sergilediği Şekil 5.12’de görülen gerilim dağılımına bakıldığında ise en yüksek gerilim bölgesinin orta bölgenin bitişi ile yarıçap değerinin artmaya başladığı bölge arasında ve 1,26 MPa civarında olduğu analiz edilmiştir.



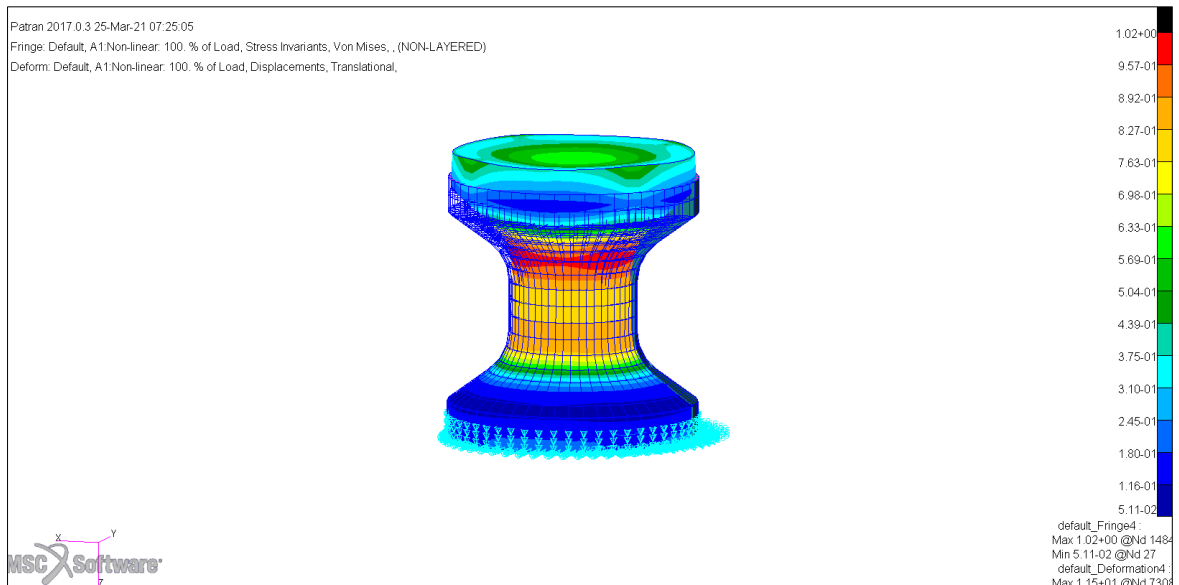
Şekil 5.12. Doğal kauçuk test numunesi 500 N yük altındaki gerilim dağılımı

Test numunesinin 700 N yük altındaki deformasyon dağılımı Şekil 5.13’de sunulmuştur. En yüksek deforme olduğu bölge yükün uygulandığı hareket eden uç bölgedir ve 19,3 mm uzama davranışı gösterdiği analiz edilmiştir. Kopma beklenen orta bölgesinin ise 2,57 mm ile 15,4 mm aralığında uzama davranışı gösterdiği analiz edilmiştir.



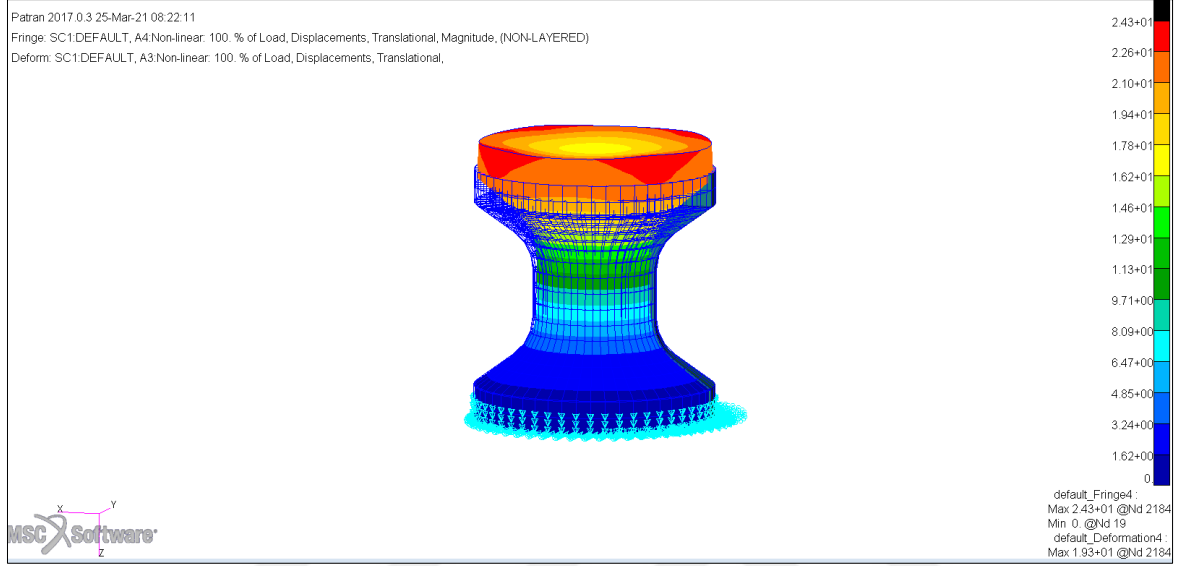
Şekil 5.13. Doğal kauçuk test numunesi 700 N yük altındaki deformasyon dağılımı

Test numunesinin 700 N yük altında sergilediği Şekil 5.14’te görülen gerilim dağılımına bakıldığında ise en yüksek gerilim bölgesinin orta bölgenin bitişi ile yarıçap değerinin artmaya başladığı bölge arasında ve 1,72 MPa civarında olduğu analiz edilmiştir.



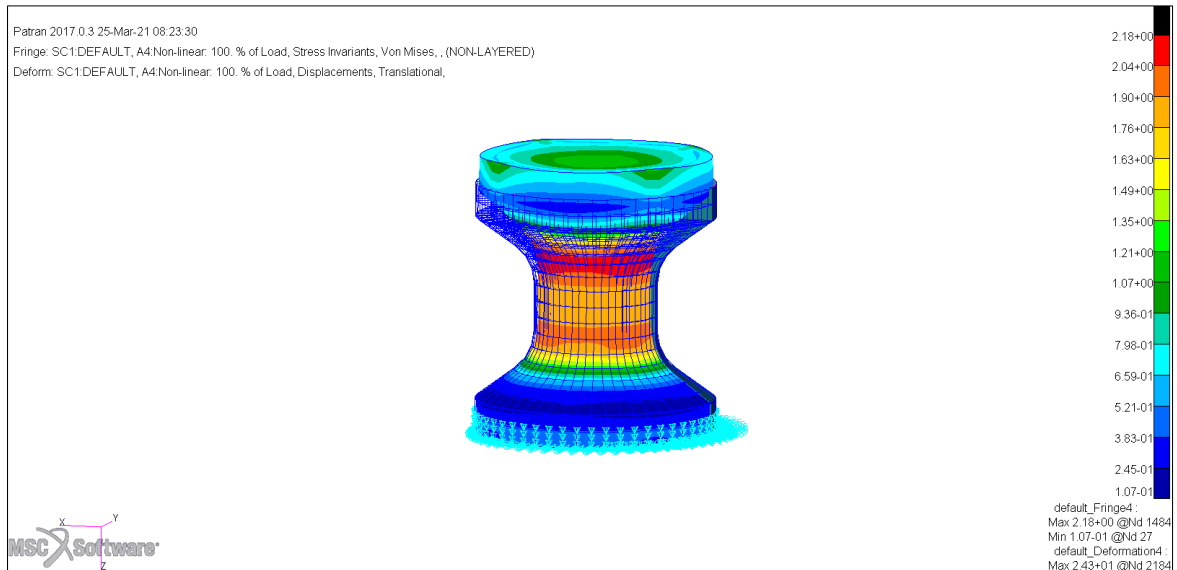
Şekil 5.14. Doğal kauçuk test numunesi 700 N yük altındaki gerilim dağılımı

Test numunesinin 900 N yük altındaki deformasyon dağılımı Şekil 5.15’de sunulmuştur. En yüksek deforme olduğu bölge yükün uygulandığı hareket eden uç bölgedir ve 24,3 mm uzama davranışı gösterdiği analiz edilmiştir. Kopma beklenen orta bölgesinin ise 3,24 mm ile 19,4 mm aralığında uzama davranışı gösterdiği analiz edilmiştir.



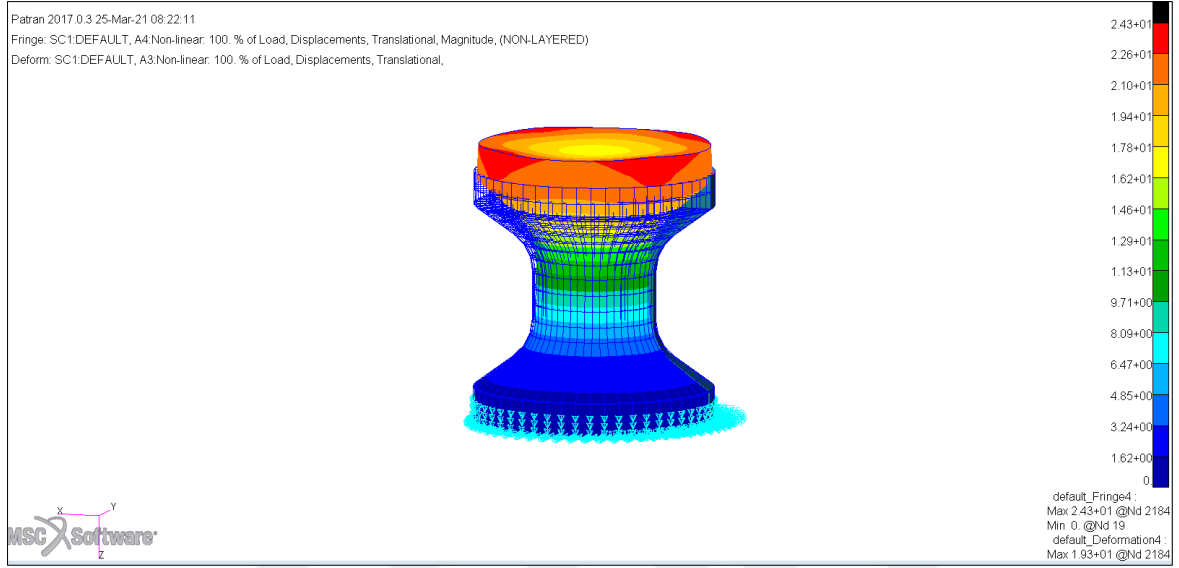
Şekil 5.15. Doğal kauçuk test numunesi 900 N yük altındaki deformasyon dağılımı

Test numunesinin 900 N yük altında sergilediği Şekil 5.16’da görülen gerilim dağılımına bakıldığında ise en yüksek gerilim bölgesinin orta bölgenin bitişi ile yarıçap değerinin artmaya başladığı bölge arasında ve 2,18 MPa civarında olduğu analiz edilmiştir.



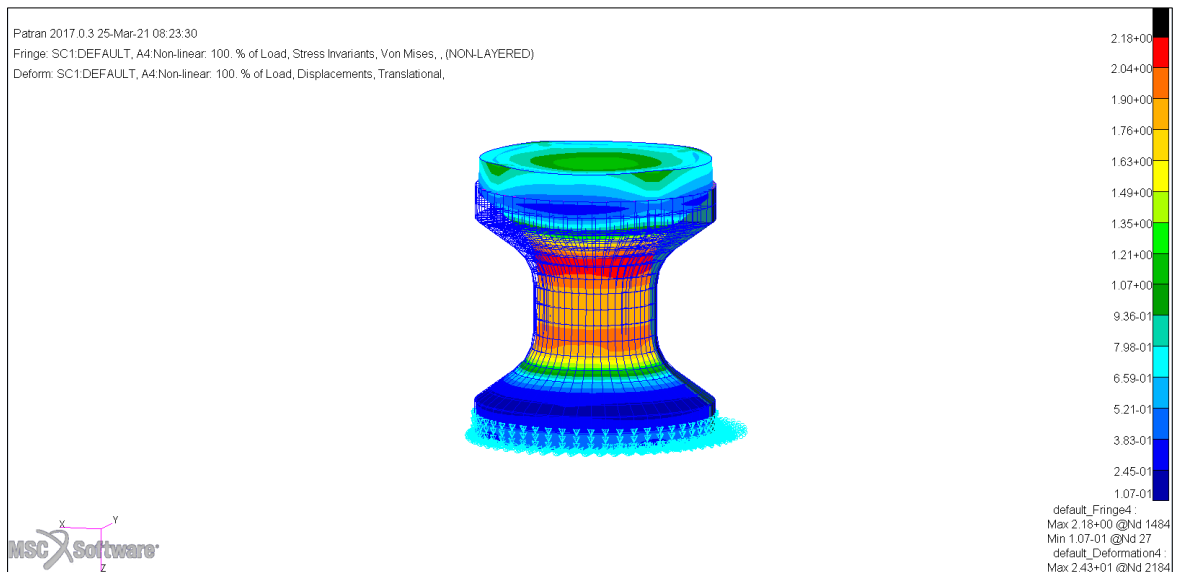
Şekil 5.16. Doğal kauçuk test numunesi 900 N yük altındaki gerilim dağılımı

Test numunesinin 1000 N yük altındaki deformasyon dağılımı Şekil 5.17’de sunulmuştur. En yüksek deforme olduğu bölge yükün uygulandığı hareket eden uç bölgedir ve 26,7 mm uzama davranışı gösterdiği analiz edilmiştir. Kopma beklenen orta bölgesinin ise 3,56 mm ile 21,4 mm aralığında uzama davranışı gösterdiği analiz edilmiştir.



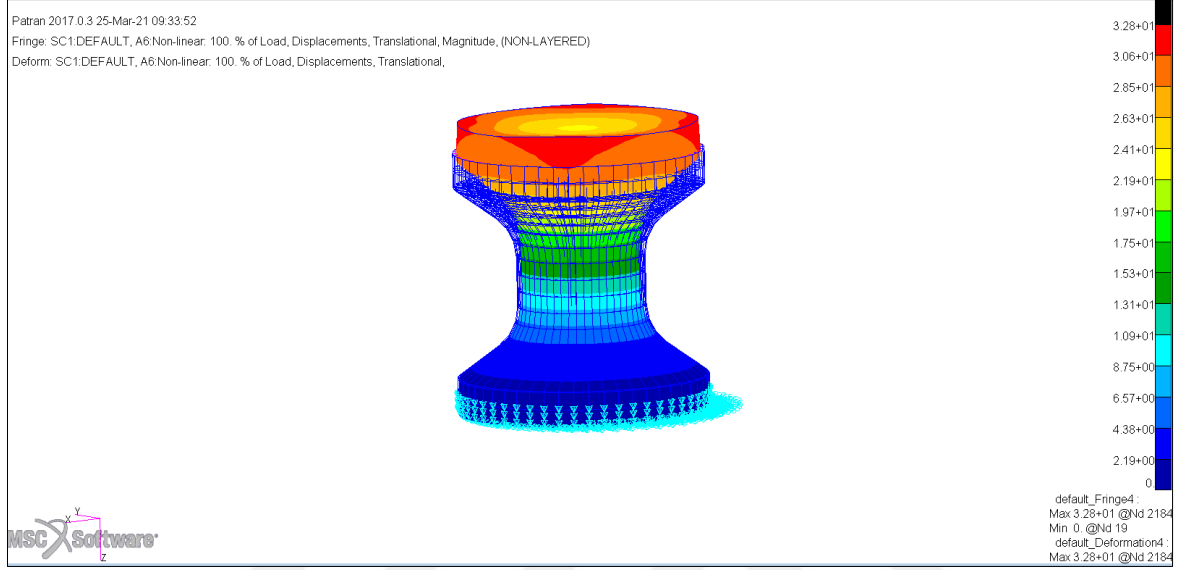
Şekil 5.17. Doğal kauçuk test numunesi 1000 N yük altındaki deformasyon dağılımı

Test numunesinin 1000 N yük altında sergilediği Şekil 5.18’de görülen gerilim dağılımına bakıldığında ise en yüksek gerilim bölgesinin orta bölgenin bitişi ile yarıçap değerinin artmaya başladığı bölge arasında ve 2,40 MPa civarında olduğu analiz edilmiştir.



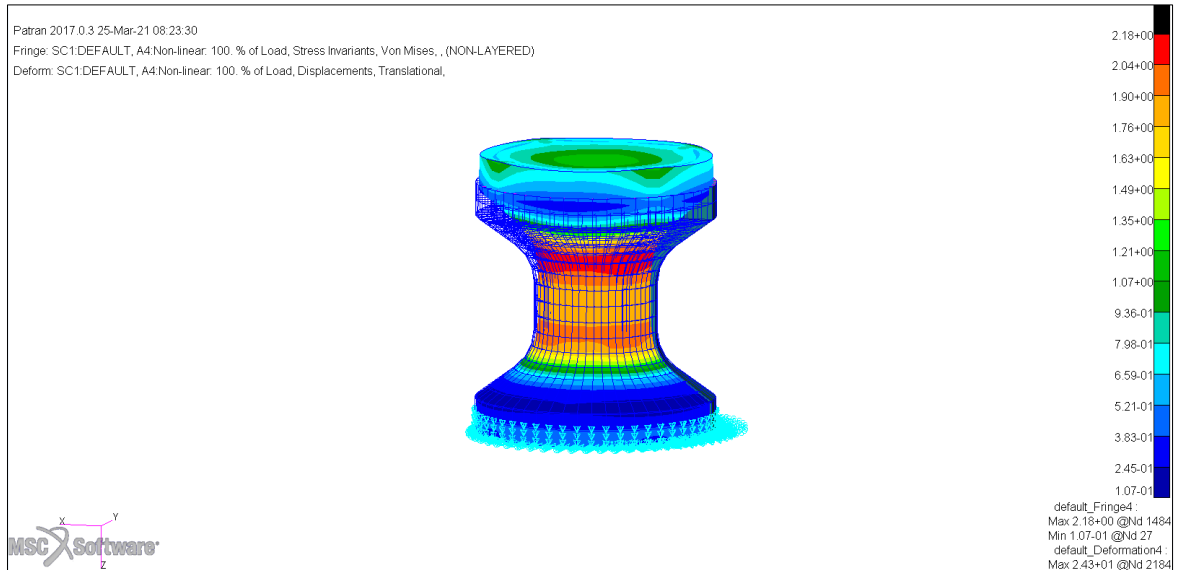
Şekil 5.18. Doğal kauçuk test numunesi 1000 N yük altındaki gerilim dağılımı

Test numunesinin 1250 N yük altındaki deformasyon dağılımı Şekil 5.19’da sunulmuştur. En yüksek deforme olduğu bölge yükün uygulandığı hareket eden uç bölgedir ve 32,8 mm uzama davranışı gösterdiği analiz edilmiştir. Kopma beklenen orta bölgesinin ise 4,38 mm ile 26,3 mm aralığında uzama davranışı gösterdiği analiz edilmiştir.



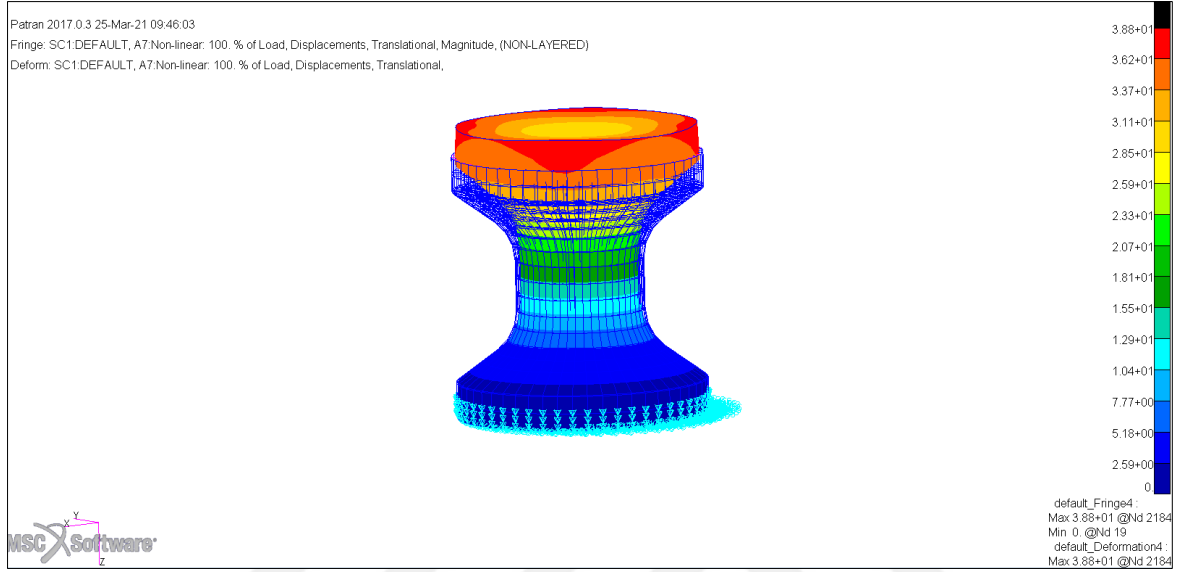
Şekil 5.19. Doğal kauçuk test numunesi 1250 N yük altındaki deformasyon dağılımı

Test numunesinin 1250 N yük altında sergilediği Şekil 5.20’de görülen gerilim dağılımına bakıldığında ise en yüksek gerilim bölgesinin orta bölgenin bitişi ile yarıçap değerinin artmaya başladığı bölge arasında ve 2,96 MPa civarında olduğu analiz edilmiştir.



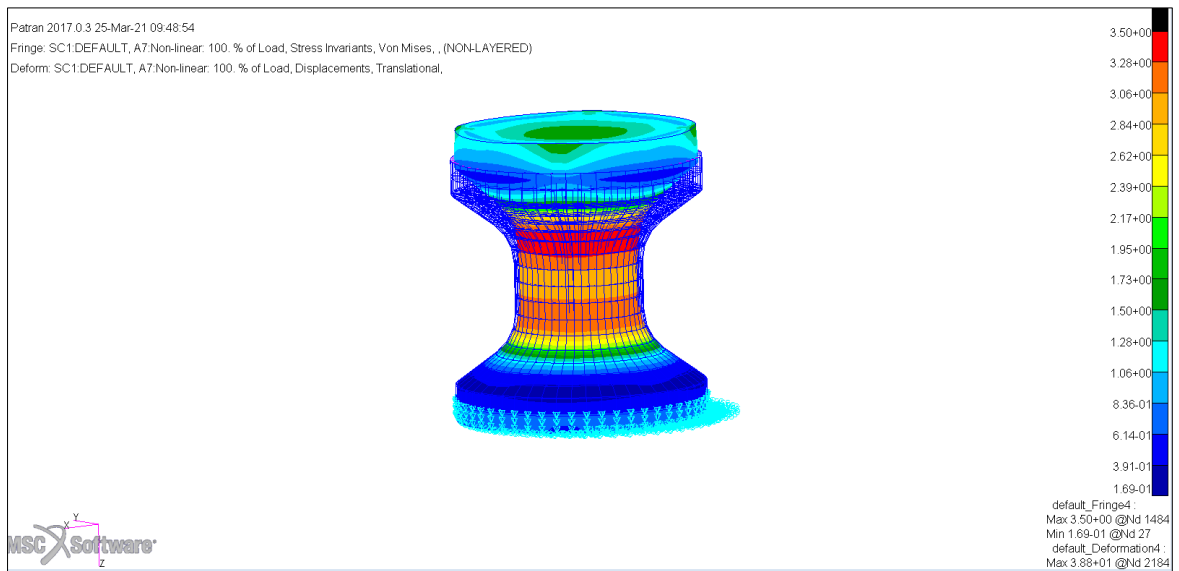
Şekil 5.20. Doğal kauçuk test numunesi 1250 N yük altındaki gerilim dağılımı

Test numunesinin 1500 N yük altındaki deformasyon dağılımı Şekil 5.21’de sunulmuştur. En yüksek deforme olduğu bölge yükün uygulandığı hareket eden uç bölgedir ve 38,8 mm uzama davranışı gösterdiği analiz edilmiştir. Kopma beklenen orta bölgesinin ise 5,18 mm ile 31,1 mm aralığında uzama davranışı gösterdiği analiz edilmiştir.



Şekil 5.21. Doğal kauçuk test numunesi 1500 N yük altındaki deformasyon dağılımı

Test numunesinin 1500 N yük altında sergilediği Şekil 5.22’de görülen gerilim dağılımına bakıldığında ise en yüksek gerilim bölgesinin orta bölgenin bitişi ile yarıçap değerinin artmaya başladığı bölge arasında ve 3,50 MPa civarında olduğu analiz edilmiştir.



Şekil 5.22. Doğal kauçuk test numunesi 1500 N yük altındaki gerilim dağılımı

Yapısal sonu elemanlar analizleri sonucunda çeşitli yük değerlerine karşılık gelen maksimum uzama değerleri toplu olarak Çizelge 5.1’de ve Şekil 5.23’de sunulmuştur.

Elde edilen veriler ışığında test numunesinin 1500 N yüke kadar doğrusal olmayan bir davranış biçimi gösterdiği analiz edilmiştir. İlk yükleme noktası ve son yükleme noktası arasındaki katılık değeri farkı doğrusal olmayan davranış biçimine kanıt olarak sunulabilir. Analiz sonuçları ışığında test yükü arttıkça test numunesine ait katılık değerinde artma olduğu gözlemlenmiştir.

Test numunesinin 10 mm yüksekliğe sahip en ince kesiti kadar bir yüklemenin yorulma ömür deneylerinde kullanılmasına ve bu sebeple 1. set yorulma ömür testlerinin 350 N yük altında gerçekleştirilmesine karar verilmiştir.

Hızlandırılmış ömür senaryosu altında 2.set deneyler yapılması amaçlı ise 10 mm uzama miktarı bölgesindeki bir başka yük olan 400 N, 2.set deney yükü olarak seçilmiştir.

Çizelge 5.1. Test numunesinin çeşitli yükler altındaki uzama ve katılık değerleri sonlu elemanlar analizi sonuçları

Analiz Yük Değeri (N)	Toplam Uzama (mm)	Maksimum Gerilim Değeri (MPa)	Katılık (N/mm)
100	3,05	0,270	32,79
200	5,95	0,528	33,61
300	8,75	0,778	34,29
350	10,01	0,900	34,97
400	11,50	1,020	34,78
500	14,10	1,260	35,46
700	19,30	1,720	36,27
900	24,30	2,180	37,04
1000	26,70	2,400	37,45
1250	32,80	2,960	38,11
1500	38,80	3,500	38,66



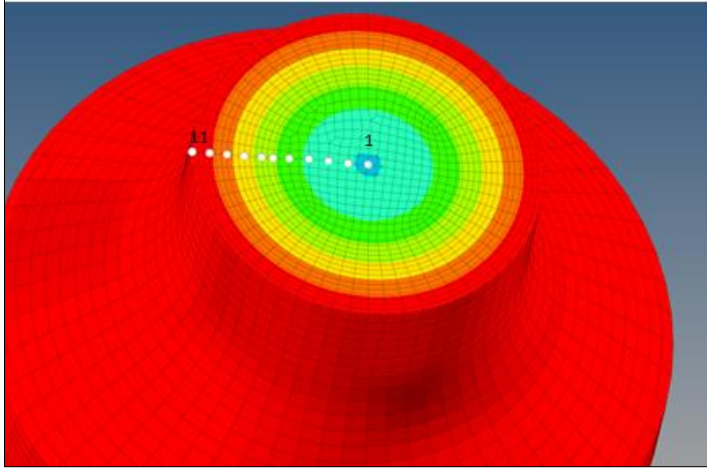
Şekil 5.23. Test numunesi sonlu elemanlar analizi yük – uzama miktarı grafiği

5.1.2. Termal analiz sonuçlarının incelenmesi

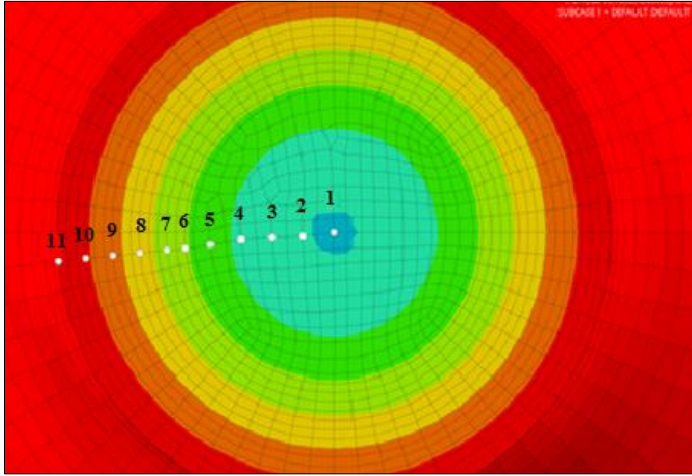
Sonlu elemanlar termal analiz modeli ile gerçekleştirilen analiz sonuçları yardımı ile kürlenme ile üretim esnasında kürlenme süresine bağlı numune içi sıcaklık dağılımı elde edilmiştir.

Numune içi sıcaklık dağılımını ayrıntılı olarak gözlemleyebilmek amacıyla numune orta kesitine kalınlık boyunca 11 adet ölçüm noktası analiz modelinde eklenmiştir (Şekil 5.24 ve Şekil 5.25).

1 numaralı ölçüm noktası $r = 0$ mm noktasındaki, 11 numaralı ölçüm noktası ise $r = 12,8$ mm noktasındaki sıcaklık değerini yansıtmaktadır.



Şekil 5.24. Numune içi termal analiz sıcaklık ölçüm noktaları izometrik görünüm



Şekil 5.25. Numune içi termal analiz sıcaklık ölçüm noktaları üstten görünüm

Kürlenme süresi boyunca gerçekleştirilen termal analiz çalışmasına ait ölçüm noktalarının numunenin merkez noktasına uzaklığı ise Çizelge 5.2’de sunulmuştur.

Çizelge 5.2. Numune içi termal analiz ölçüm noktalarının merkez konumuna uzaklıkları

Sıcaklık Ölçüm Noktası	Merkez Noktasından Uzaklığı (mm)
1	0
2	1,16
3	2,32
4	3,48
5	4,64

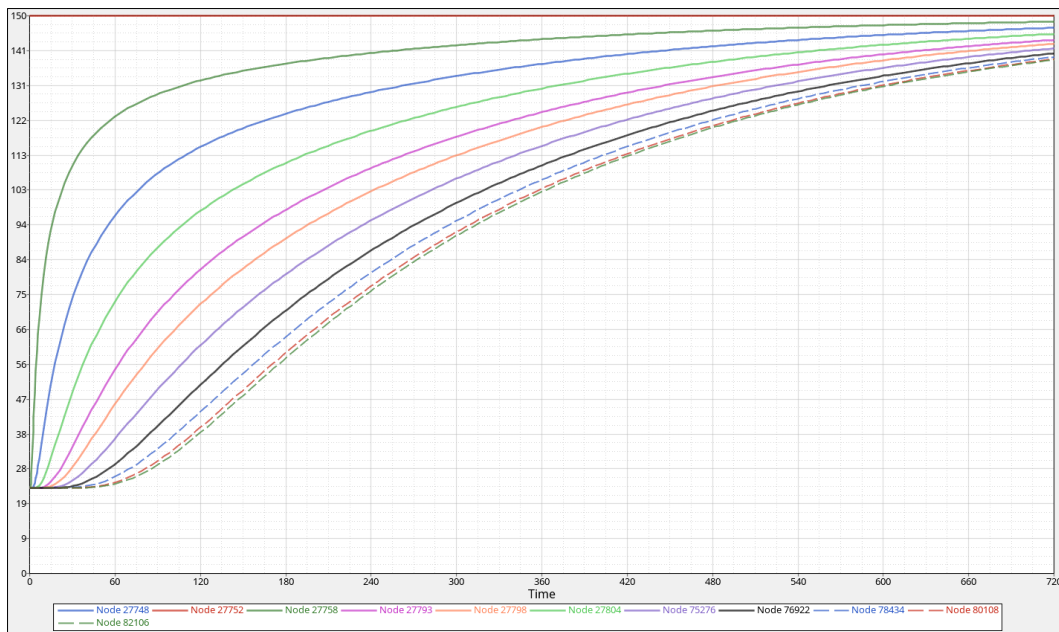
Çizelge 5.2. (devam) Numune içi termal analiz ölçüm noktalarının merkez konumuna uzaklıkları

Sıcaklık Ölçüm Noktası	Merkez Noktasından Uzaklığı (mm)
6	5,80
7	6,96
8	8,12
9	9,28
10	10,44
11	12,60

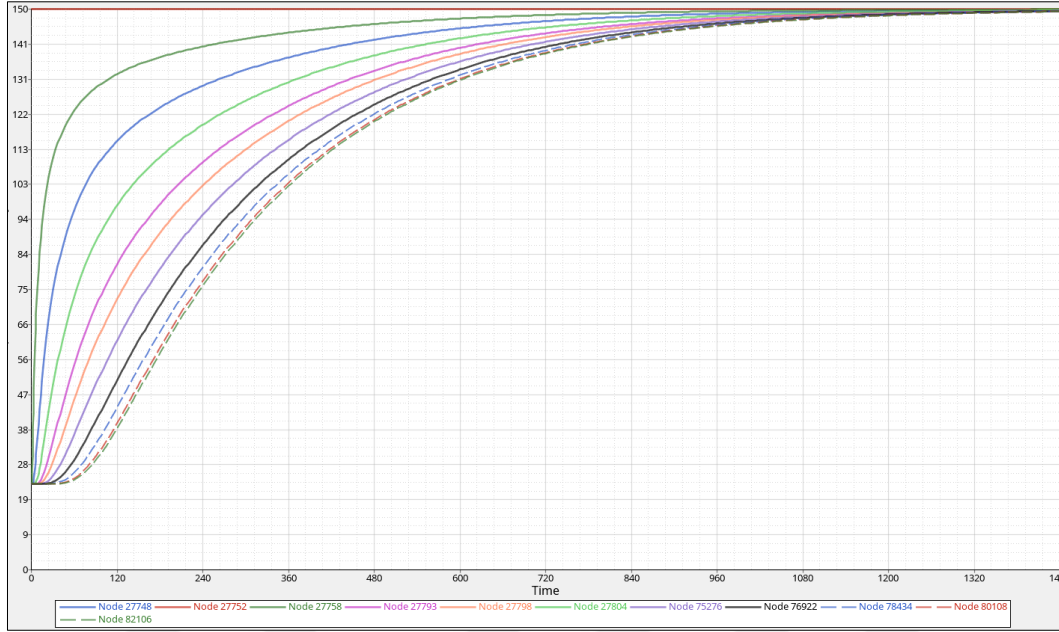
150 °C Sıcaklıkta Kürlenme Termal Analiz Sonuçları

Test numunesi ilk olarak 150 °C sıcaklık değeri için optimum kürlenme süresi olan 720 saniye zaman dilimini kapsayan ve optimum kürlenme süresinin iki katı olan 1440 sn süre parametreleri ile analiz edilmiştir.

720 sn boyunca numune içerisindeki 11 noktaya ait sıcaklık dağılımı Şekil 5.26’da ve 1440 sn boyunca numune içerisindeki 11 noktaya ait sıcaklık dağılımı ise Şekil 5.27’de sunulmuştur.



Şekil 5.26. Numune içi termal analiz 720 sn boyunca sıcaklık değişimleri (sn vs °C)



Şekil 5.27. Numune içi termal analiz 1440 sn boyunca sıcaklık değişimleri (sn vs °C)

11 adet ölçüm noktasının 360ncı saniyeden itibaren 1440ncı saniyeye kadar olan kurlenme esnasındaki sıcaklık değişimleri sayısal değerleri Çizelge 5.3, Çizelge 5.4 ve Çizelge 5.5'te verilmiştir.

Çizelge 5.3. Numune içi termal analiz noktalarının 360-660 sn aralığındaki sıcaklık değişim değerleri

Zaman (sn.) vs Sıcaklık (°C)						
NOKTA	360. sn	420. sn	480. sn	540. sn	600. sn	660.sn
Ölçüm Noktası-1	102,73	112,37	120,01	126,01	131,03	131,03
Ölçüm Noktası-2	103,56	113,03	120,63	126,43	131,36	131,36
Ölçüm Noktası-3	105,97	114,95	122,16	127,66	132,34	132,34
Ölçüm Noktası-4	109,83	118,04	124,62	129,64	133,90	133,90
Ölçüm Noktası-5	115,07	122,23	127,94	132,31	136,01	136,01
Ölçüm Noktası-6	120,11	126,23	131,13	134,87	138,04	138,04
Ölçüm Noktası-7	124,10	129,41	133,66	136,89	139,64	139,64
Ölçüm Noktası-8	130,48	134,49	137,69	140,13	142,20	142,20
Ölçüm Noktası-9	137,08	139,74	141,86	143,47	144,84	144,84
Ölçüm Noktası-10	143,70	144,99	146,03	146,81	147,48	147,48
Ölçüm Noktası-11	150,00	150,00	150,00	150,00	150,00	150,00

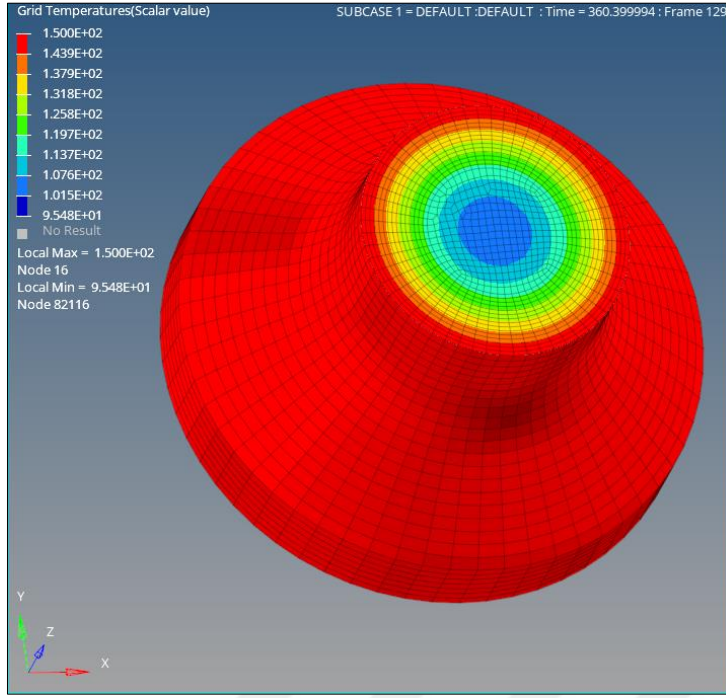
Çizelge 5.4. Numune içi termal analiz noktalarının 720-1080 sn aralığındaki sıcaklık değişimi

Zaman (sn.) vs Sıcaklık (°C)							
NOKTA	720.sn	780. sn	840. sn	900. sn	960. sn	1020. sn	1080.sn
Ölçüm Noktası-1	138,15	140,57	142,63	144,23	145,48	146,46	147,20
Ölçüm Noktası-2	138,36	140,73	142,93	144,45	145,66	146,53	147,25
Ölçüm Noktası-3	138,96	141,22	143,42	144,85	145,97	146,71	147,40
Ölçüm Noktası-4	139,93	141,99	144,14	145,41	146,41	147,00	147,62
Ölçüm Noktası-5	141,25	143,03	144,58	145,75	146,67	147,39	147,94
Ölçüm Noktası-6	142,50	144,04	145,36	146,37	147,16	147,77	148,24
Ölçüm Noktası-7	143,50	144,83	145,96	146,85	147,53	148,07	148,48
Ölçüm Noktası-8	145,10	146,10	146,98	147,63	148,15	148,55	148,85
Ölçüm Noktası-9	146,75	147,41	148,00	148,43	148,77	149,04	149,24
Ölçüm Noktası-10	148,41	148,74	149,00	149,23	149,40	149,53	149,63
Ölçüm Noktası-11	150,00	150,00	150,00	150,00	150,00	150,00	150,00

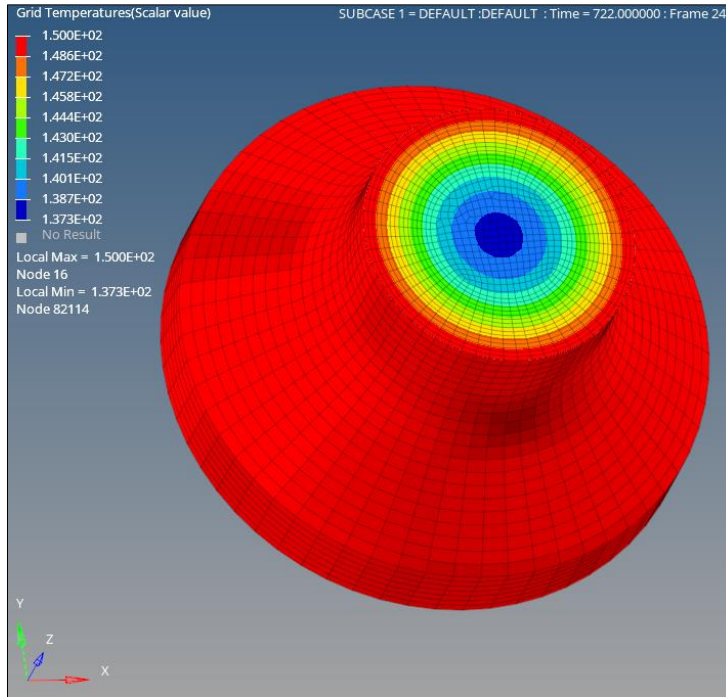
Çizelge 5.5. Numune içi termal analiz noktalarının 1140-1440 sn aralığındaki sıcaklık değişimi

Zaman (sn.) vs Sıcaklık (°C)						
NOKTA	1140.sn	1200. sn	1260. sn	1320. sn	1380. sn	1440.sn
Ölçüm Noktası-1	147,81	148,29	148,65	148,94	149,18	149,36
Ölçüm Noktası-2	147,86	148,32	148,68	148,96	149,20	149,37
Ölçüm Noktası-3	147,96	148,41	148,75	149,02	149,24	149,40
Ölçüm Noktası-4	148,15	148,55	148,86	149,11	149,31	149,45
Ölçüm Noktası-5	148,39	148,75	149,01	149,23	149,39	149,53
Ölçüm Noktası-6	148,63	148,93	149,15	149,34	149,49	149,59
Ölçüm Noktası-7	148,81	149,07	149,27	149,43	149,56	149,65
Ölçüm Noktası-8	149,10	149,31	149,44	149,57	149,67	149,73
Ölçüm Noktası-9	149,41	149,53	149,63	149,71	149,78	149,82
Ölçüm Noktası-10	149,71	149,77	149,82	149,86	149,89	149,91
Ölçüm Noktası-11	150,00	150,00	150,00	150,00	150,00	150,00

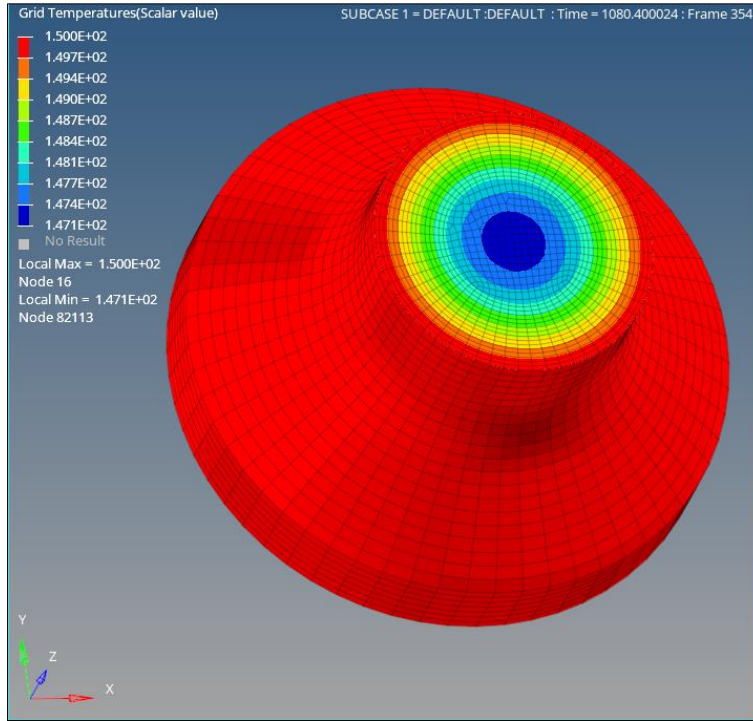
İlgili ölçüm noktalarının bazı kürlenme sürelerinde anlık numune içi dinamik sıcaklık dağılımları ise Şekil 5.28, Şekil 5.29, Şekil 5.30 ve Şekil 5.31'de sunulmuştur.



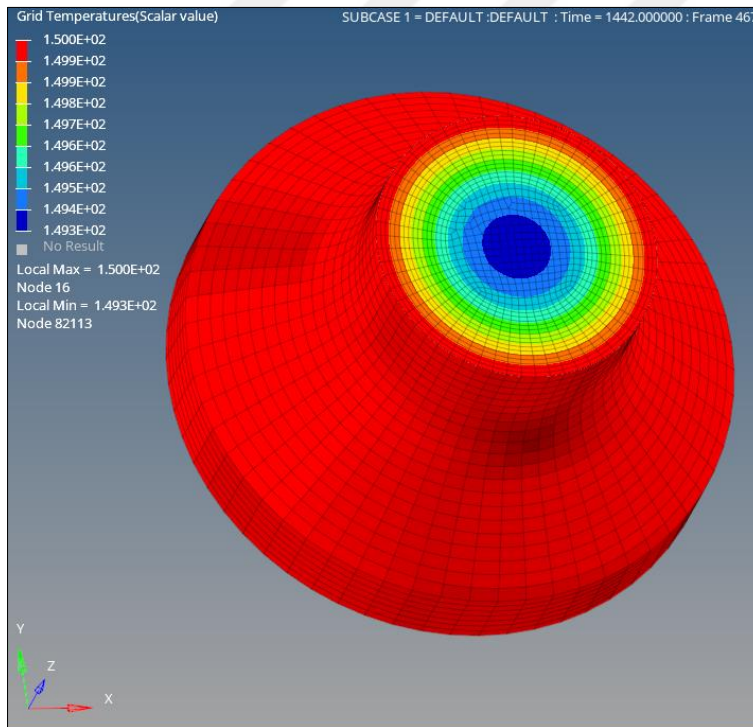
Şekil 5.28.150 °C kürlenme 360. saniye numune içi dinamik sıcaklık dağılımı



Şekil 5.29. 150 °C kürlenme 720. saniye numune içi dinamik sıcaklık dağılımı



Şekil 5.30. 150 °C kürlenme 1080. saniye numune içi dinamik sıcaklık dağılımı



Şekil 5.31. 150 °C kürlenme 1440. saniye numune içi dinamik sıcaklık dağılımı

150 °C sıcaklıkta kürlenme süresinin artışına bağlı olarak ölçüm noktalarındaki sıcaklıklar yükselme davranışı göstermişlerdir.

Grafikler incelendiğinde test numunesinin merkez noktasının sıcaklığının ilk 34 saniye boyunca hiç değişmediği ve başlangıç koşulu dış ortam sıcaklığı olan 23 °C sıcaklıkta sabit kaldığı analiz edilmiştir. Merkez ölçüm noktasının doğal kauçuk üretim aşamalarında kullanılan en düşük sıcaklık değeri olan 140 °C sıcaklığa ise 783 saniyede ulaştığı görülmektedir.

Kürlenme başlangıcına kadar geçen süre olan 383ncü saniyede en iç noktanın sıcaklığı 106 °C sıcaklıkta iken, en dış noktaya en yakın 10 numaralı ölçüm noktasının ise 144 °C sıcaklıkta olduğu analiz edilmiştir.

Optimum kürlenme süresi olan 720nci saniyede en iç nokta 138 °C sıcaklıkta iken, en dış noktaya en yakın 10 numaralı ölçüm noktasının 148 °C sıcaklıkta olduğu analiz edilmiştir. Bu süre zarfında test numunesinin en iç noktasının 150 °C vulkanizasyon ile kürlenme hedef sıcaklığına ulaşamadığı görülmektedir. Bu durumda ilk kürlenme süresi olan 720 saniye kürlenme parametresinde merkez bölgesinde 150 °C kürlenme sıcaklığına ulaşamamış ve tam olarak kürlenememiş bir yapı beklenmektedir. Test numunesi dış yüzeyi ise 720 sn optimum kürlenme süresince 150 °C sıcaklıkta kürlenecek ve yüzey bölgesinde iyi bir kürlenme statüsü elde edilecektir.

Şekil 3.39’da görülen 5 numaralı ölçüm noktası ile 10 numaralı ölçüm noktası arasındaki bölge 720nci saniyede 140 °C ve üzeri bir sıcaklıkta olduğundan kısmen de olsa kürlenmeye başlamışlardır fakat bu sıcaklıkta kürlenme için geçirdikleri zaman kısa süreli kaldığından az kürlenmiş bir içyapıya sahip olacakları öngörülmektedir.

780nci saniyede test numunesinin tüm ölçüm noktaları 140 °C ve 150 °C arasında bir sıcaklık seviyesine ulaşmışlardır.

1000nci saniyede ölçüm noktası 9 ve ölçüm noktası 10 ise 149 °C sıcaklığa ulaşmışlardır. Bu durumda kalan 440 sn kürlenme süresinde bu bölgelerin kürlenme statüleri iyileşecektir. Aynı zaman dilimi içerisinde test numunesinin merkez noktası 146 °C sıcaklıktan 149 °C sıcaklığa yükselecek ve kürlenme statüsü artacaktır.

Optimum kürlenme süresi ve kürlenme başlangıcına kadar geçen sürenin toplamı olarak yaklaşık 1080nci saniyede ise en iç nokta 147 °C sıcaklıkta ve en dış noktaya en yakın 10 numaralı ölçüm noktasının ise 149 °C civarında olduğu analiz edilmiştir.

Optimum kürlenme süresinin iki katı süre olan 1440nci saniyede tüm noktaların 149 °C sıcaklık değeri civarında dengeye ulaştığı analiz edilmiştir.

Analiz modelinde en dış bölgede 11 numaralı ölçüm noktasının tüm kürlenme süreçlerinde sabit 150 °C sıcaklık değerinde sınır koşulu oluşturduğu analiz edilmiştir.

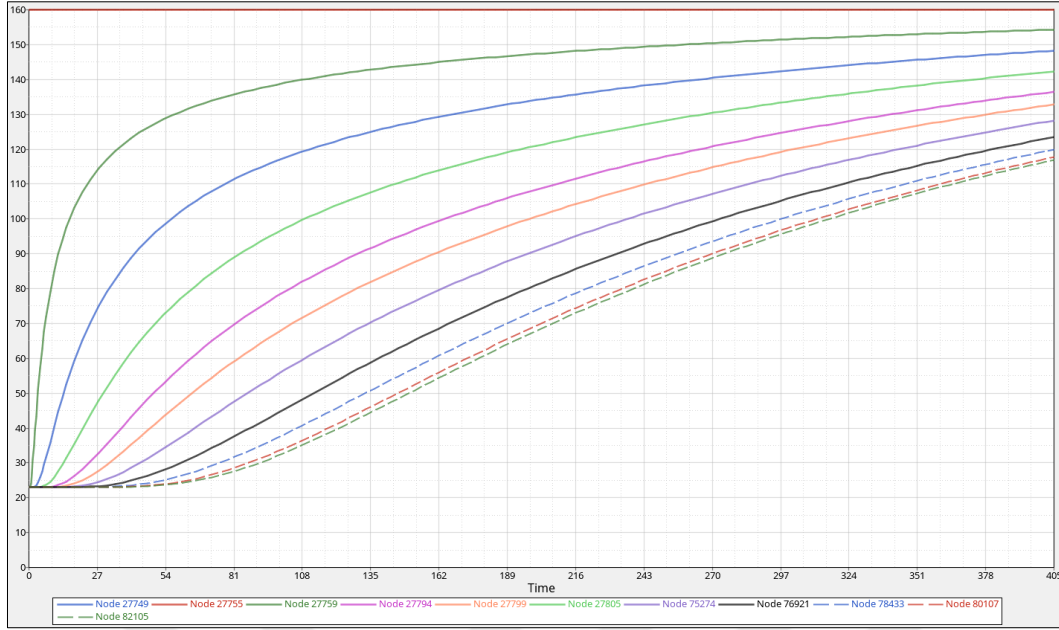
İkinci set kürlenme süresi olan 1440 sn kürlenme parametresi ile yüzey bölgesine yakın iki ölçüm noktası bölümü (lm noktası 9 ve ölçüm noktası 10) orta derece ile iyi derece arasında kürlenmiş, kalan 8 ölçüm noktası bölümü ise orta seviye kürlenme ile iyi seviyede kürlenme statüsü arasında kürlenmiş olacaktır.

1440 saniye kürlenme süresinin dezavantajı ise test numunesi dış yüzeyinin uzun süre kürlenme bozulma eğrisi bölgesinde kürlenmeye maruz kalması olacaktır.

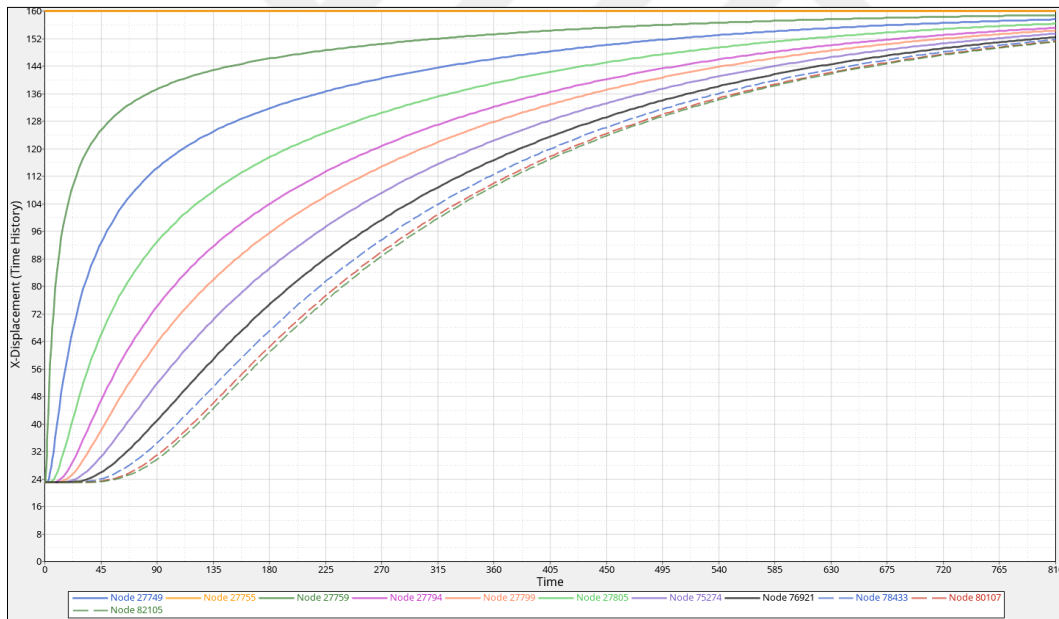
zet ile 720 saniye krlenlen numune iyi bir dış yüzey kürlenme statüsü ve az ile orta derecede kürlenmiş iç yapı statüsüne sahip olacak; 1440 saniye krlenlen numune ise yüzey bölgesinde aşırı bozulma eğrisine girecek, kalan tüm bölgelerde 720 saniye numunesinden daha iyi bir kürlenme statüsüne sahip olacaktır.

160 °C Sıcaklıkta Kürlenme Termal Analiz Sonuçları

Test numunesi 160 °C sıcaklık değeri için, optimum kürlenme süresi olan 405 saniye zaman dilimini kapsayan ve optimum kürlenme süresinin iki katı süreyi de içeren 810 sn süre parametresi ile analiz edilmiştir. 405 sn boyunca numune içerisindeki 11 noktaya ait sıcaklık dağılımı şekil 5.32’de ve 810 sn boyunca numune içerisindeki 11 noktaya ait sıcaklık dağılımı şekil 5.33’te sunulmuştur.



Şekil 5.32. Numune içi termal analiz 405 sn boyunca sıcaklık değişimleri (sn vs °C)



Şekil 5.33. Numune içi termal analiz 810 sn boyunca sıcaklık değişimleri (sn vs °C)

11 adet ölçüm noktasının 405nci saniyeden itibaren 810ncu saniyeye kadar olan kürleme esnasındaki sıcaklık değişimleri sayısal değerleri

Çizelge 5.6 ve Çizelge 5.7'de listelenmiştir.

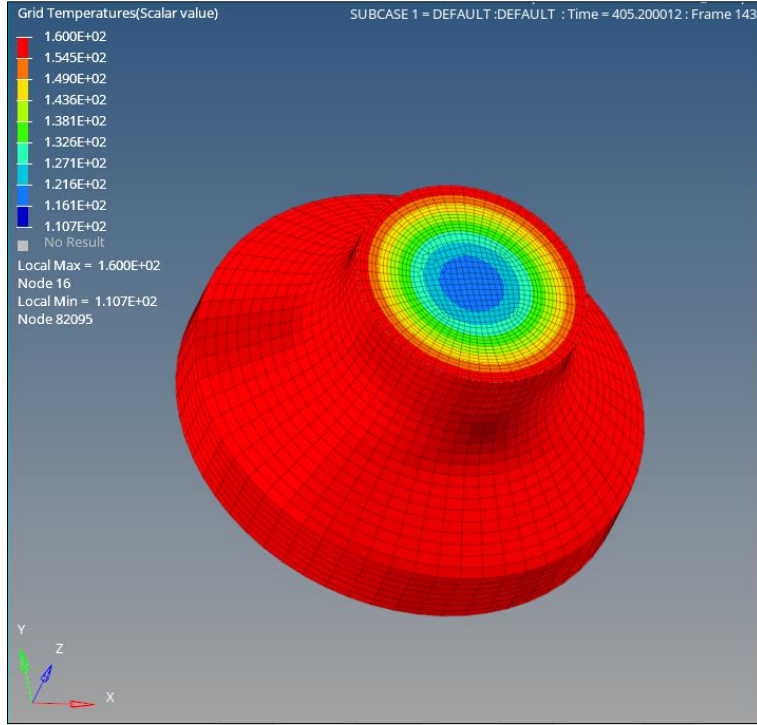
Çizelge 5.6. Numune içi termal analiz ölçüm noktalarının 360-660 sn aralığındaki sıcaklık değişimi

NOKTA	405. sn	450. sn	500. sn	550. sn	600. sn
Ölçüm Noktası-1	116,89	123,59	130,02	135,06	139,53
Ölçüm Noktası-2	117,65	124,23	130,55	135,50	139,89
Ölçüm Noktası-3	119,85	126,09	132,09	136,78	140,94
Ölçüm Noktası-4	123,38	129,08	134,55	138,83	142,63
Ölçüm Noktası-5	128,17	133,13	137,89	141,61	144,91
Ölçüm Noktası-6	132,76	137,01	141,08	144,27	147,09
Ölçüm Noktası-7	136,41	140,09	143,62	146,38	148,83
Ölçüm Noktası-8	144,22	145,01	147,66	149,74	151,58
Ölçüm Noktası-9	148,24	150,08	151,84	153,21	154,44
Ölçüm Noktası-10	154,26	155,16	156,02	156,69	157,29
Ölçüm Noktası-11	160,00	160,00	160,00	160,00	160,00

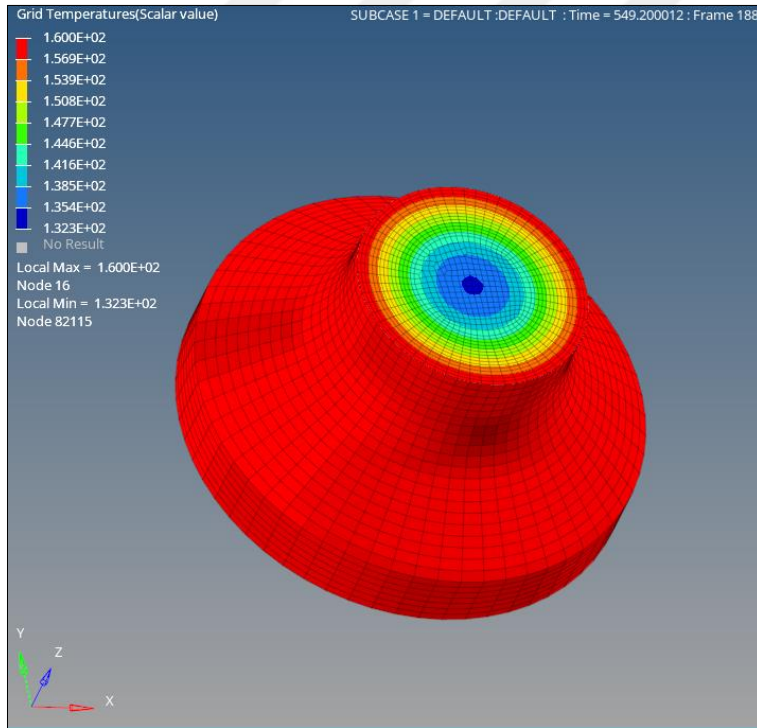
Çizelge 5.7. Numune içi termal analiz ölçüm noktalarının 720-1080 sn aralığındaki sıcaklık değişimi

NOKTA	650.sn	700. sn	750. sn	800. sn	810. sn
Ölçüm Noktası-1	143,23	146,11	148,67	150,75	151,10
Ölçüm Noktası-2	143,53	146,36	148,87	150,92	151,26
Ölçüm Noktası-3	144,39	147,07	149,45	151,39	151,72
Ölçüm Noktası-4	145,77	148,21	150,39	152,16	152,45
Ölçüm Noktası-5	147,64	149,77	151,66	153,19	153,45
Ölçüm Noktası-6	149,43	151,25	152,87	154,18	154,40
Ölçüm Noktası-7	150,85	152,42	153,83	154,96	155,15
Ölçüm Noktası-8	153,11	154,29	155,36	156,21	156,35
Ölçüm Noktası-9	155,44	156,23	156,93	157,49	157,59
Ölçüm Noktası-10	157,78	158,16	158,50	158,78	158,82
Ölçüm Noktası-11	160,00	160,00	160,00	160,00	160,00

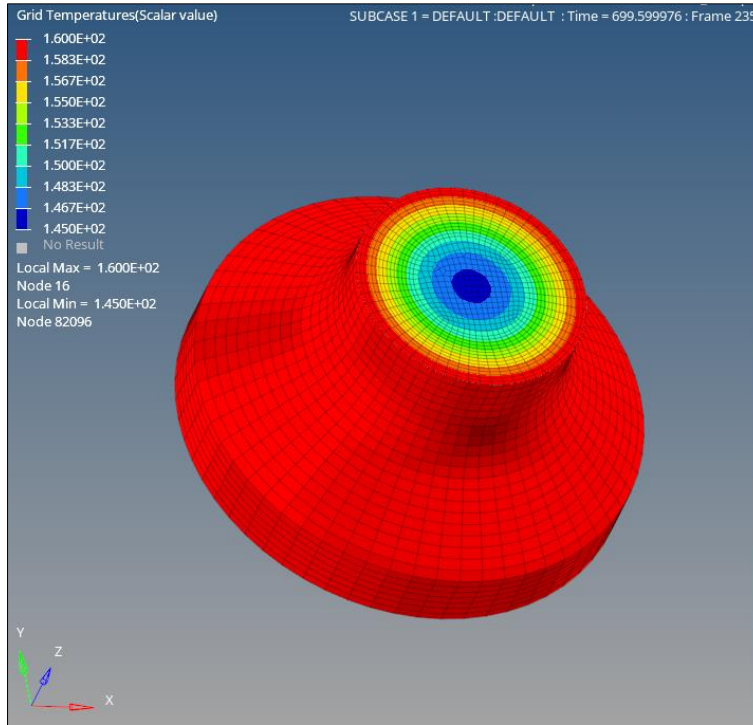
İlgili ölçüm noktalarının bazı kurlenme sürelerinde anlık numune içi dinamik sıcaklık dağılımları ise Şekil 5.34, Şekil 5.35, Şekil 5.36 ve Şekil 5.37'de sunulmuştur.



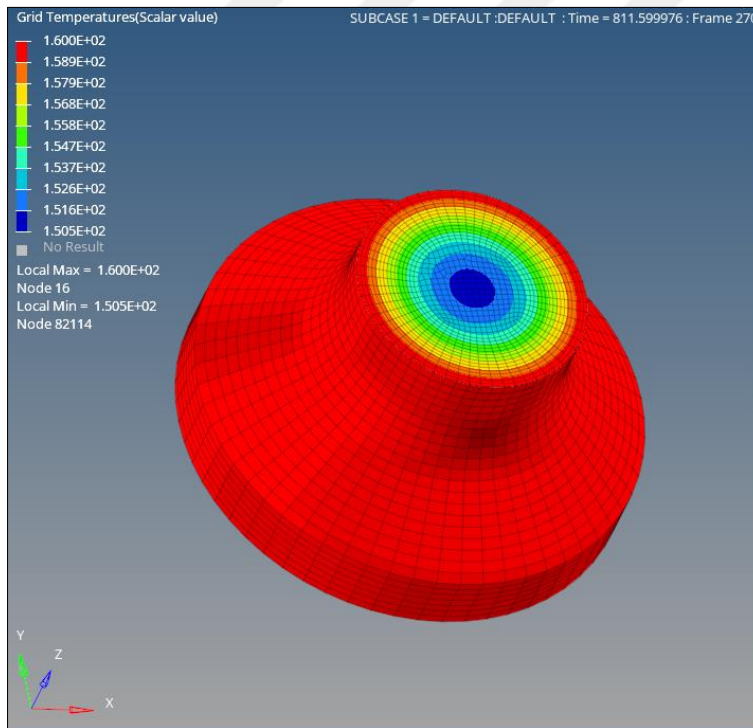
Şekil 5.34. 160 °C kirlenme 405. saniye numune içi dinamik sıcaklık dağılımı



Şekil 5.35. 160 °C kirlenme 550. saniye numune içi dinamik sıcaklık dağılımı



Şekil 5.36. 160 °C kürlenme 700. saniye numune içi dinamik sıcaklık dağılımı



Şekil 5.37. 160 °C kürlenme 810. saniye numune içi dinamik sıcaklık dağılımı

160 °C sıcaklıkta kürlenme süresinin artışına bağlı olarak ölçüm noktalarındaki sıcaklıklar yükselme davranışı göstermişlerdir.

Grafikler incelendiğinde test numunesinin en iç ölçüm noktasının sıcaklığının ilk 30 saniye boyunca hiç değişmediği ve başlangıçta set edilen dış ortam sıcaklığı olan 23 °C sıcaklıkta sabit kaldığı analiz edilmiştir. En iç ölçüm noktasının doğal kauçuk vulkanizasyon ile üretim aşamalarında kullanılan en düşük sıcaklık değeri olan 140 °C sıcaklığa ise 606 saniyede ulaştığı görülmektedir.

Kürlenme başlangıcına kadar geçen süre olan 189ncu saniyede en iç ölçüm noktasının sıcaklığı 64 °C sıcaklıkta iken, en dış ölçüm noktasına en yakın bölge olan 10 numaralı ölçüm noktası sıcaklığının ise 146 °C sıcaklıkta olduğu analiz edilmiştir.

Optimum kürlenme süresi olan 405nci saniyede en iç nokta 116 °C sıcaklıkta iken, en dış noktaya en yakın bölge olan 10 numaralı ölçüm noktasının 154 °C sıcaklıkta olduğu analiz edilmiştir.

Optimum kürlenme süresi ve kürlenme başlangıcına kadar geçen sürenin toplamı olarak yaklaşık 600ncü saniyede ise en iç nokta 139 °C sıcaklıkta ve en dış noktaya en yakın bölge olan 10 numaralı ölçüm noktasının ise 157 °C civarında olduğu analiz edilmiştir.

Optimum kürlenme süresinin iki katı süre olan 810ncu saniyede en iç ölçüm noktası 151 °C sıcaklıkta ve en dış ölçüm noktası ise 160 °C sıcaklıkta olduğu ve henüz denge sıcaklığına ulaşamadıkları analiz edilmiştir.

Analiz modelinde en dış bölgede 11 numaralı ölçüm noktasının sabit 160 °C sıcaklık değerinde sınır koşulu oluşturduğu analiz edilmiştir.

160 °C sıcaklıkta 405 sn kürlenme süresinde sıcaklık dağılımı incelendiğinde test numunesinin en iç noktasının 160 °C vulkanizasyon ile kürlenme hedef sıcaklığına ulaşamadığı görülmektedir.

8 numaralı ölçüm noktası ile 10 numaralı ölçüm noktası arasındaki bölge 405nci saniyede 140 °C ve üzeri bir sıcaklıkta olduğundan kısmen de olsa kürlenmeye başlamışlardır fakat bu sıcaklıkta kürlenme için geçirdikleri zaman kısa süreli kaldığından az kürlenmiş bir yapıya sahip olacakları öngörülmektedir.

600ncü saniyede test numunesinin tüm ölçüm noktaları 140 °C ve 160 °C arasında bir sıcaklık seviyesine ulaşmışlardır.

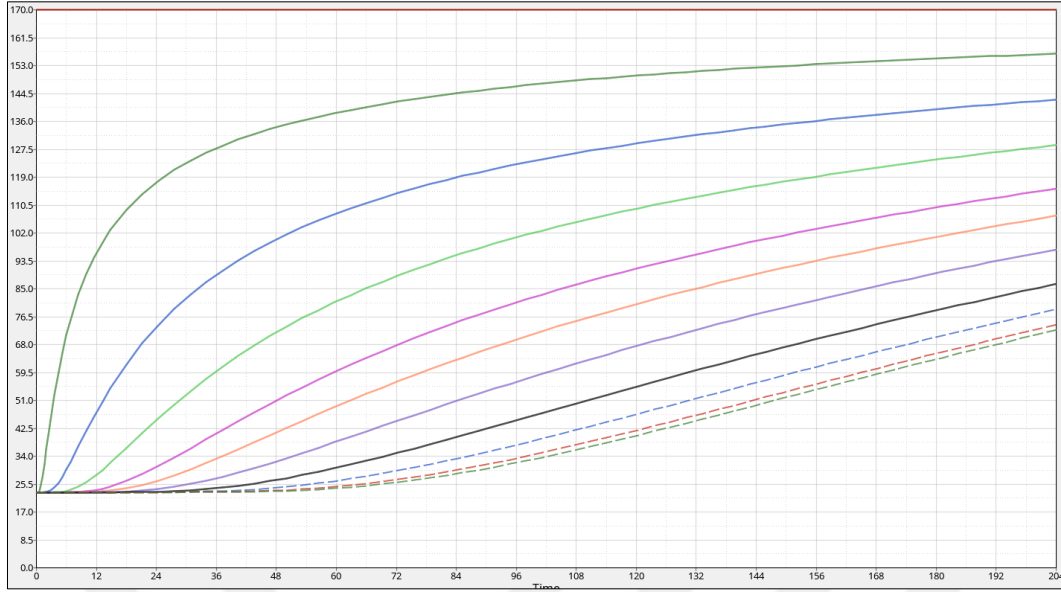
700ncü saniyede ölçüm noktası 6 ve ölçüm noktası 10 ise 149 °C sıcaklığa ulaşmışlardır. Bu durumda kalan 110 sn kürlenme süresinde bu bölgelerin kürlenme statüleri iyileşecektir. Aynı zaman dilimi içerisinde test numunesinin merkez noktası 139 °C sıcaklıktan 151 °C sıcaklığa yükselecek ve kürlenme statüsü artacaktır.

Böylece ikinci set kürlenme süresi olan 810 sn kürlenme parametresi ile yüzey bölgesine yakın 5 adet ölçüm noktası (ölçüm noktası 6 ve ölçüm noktası 10) orta derece ile iyi derece arasında kürlenmiş, kalan 5 ölçüm noktası bölümünün ise az seviyede kürlenme ile orta seviye kürlenme statüsü arasında kürlenmiş olacaktır. 810 saniye kürlenme süresinin dezavantajı ise test numunesi dış yüzeyinin uzun süre kürlenme bozulma eğrisi bölgesinde kürlenmeye maruz kalması olacaktır.

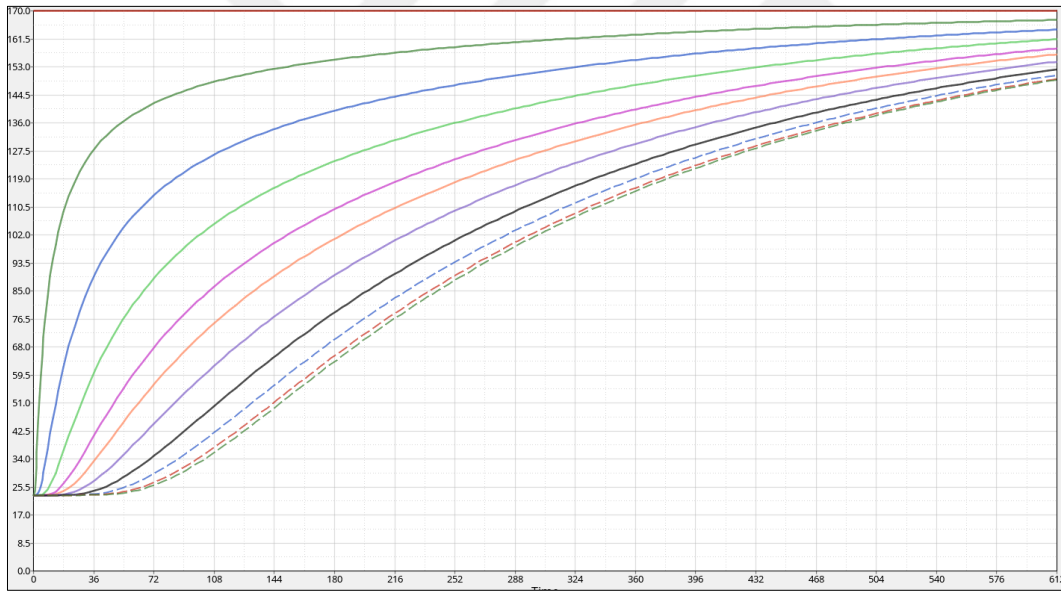
Özet ile 410 saniye kürlenen numune iyi bir dış yüzey kürlenme statüsü ve az ile orta derecede kürlenmiş iç yapı statüsüne sahip olacak; 810 saniye kürlenen numune ise yüzey bölgesinde aşırı bozulma eğrisine girer iken, kalan tüm bölgelerde 810 saniye numunesinden daha iyi bir kürlenme statüsüne sahip olacaktır.

170 °C Sıcaklıkta Kürlenme Termal Analiz Sonuçları

Test numunesi, 170 °C sıcaklık değeri için optimum kürlenme süresi olan 204 saniye zaman dilimini kapsayan ve optimum kürlenme süresinin üç katı olan 612 sn süre parametreleri ile analiz edilmiştir. 204 sn boyunca numune içerisindeki 11 noktaya ait sıcaklık dağılımı Şekil 5.38’de ve 612 sn boyunca numune içerisindeki 11 noktaya ait sıcaklık dağılımı Şekil 5.39’da sunulmuştur.



Şekil 5.38. Numune içi termal analiz 204 sn boyunca sıcaklık değişimleri (sn vs °C)



Şekil 5.39. Numune içi termal analiz 612 sn boyunca sıcaklık değişimleri (sn vs °C)

11 adet ölçüm noktasının 204ncü saniyeden itibaren 612nci saniyeye kadar olan kurlenme esnasındaki sıcaklık değişimleri sayısal değerleri Çizelge 5.8 ve Çizelge 5.9'da sunulmuştur.

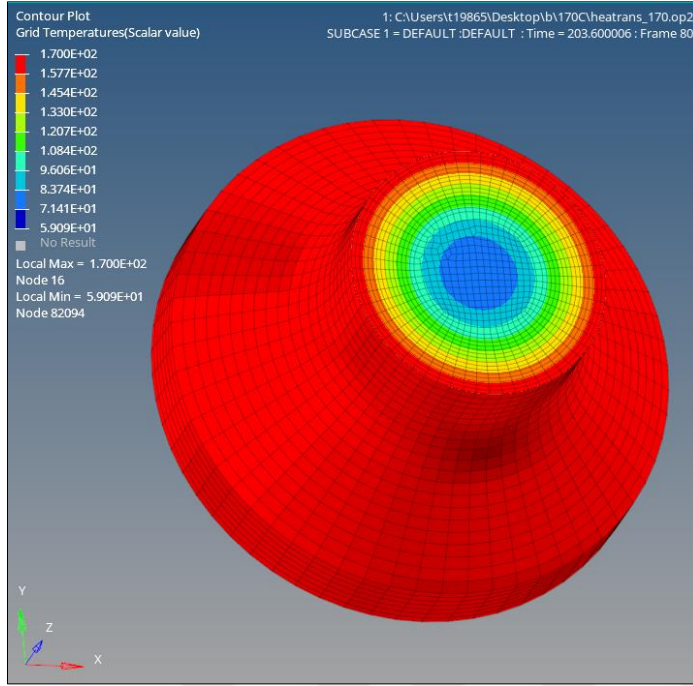
Çizelge 5.8. Numune içi termal analiz ölçüm noktalarının 204-612 sn aralığındaki sıcaklık değişimi

NOKTA	204. sn	304. sn	404. sn	454. sn
Ölçüm Noktası-1	72,11	102,98	123,75	131,41
Ölçüm Noktası-2	73,72	104,15	124,56	132,08
Ölçüm Noktası-3	78,44	107,54	126,92	134,05
Ölçüm Noktası-4	86,11	112,99	130,71	137,22
Ölçüm Noktası-5	96,67	120,39	135,85	141,51
Ölçüm Noktası-6	106,95	127,52	140,78	145,63
Ölçüm Noktası-7	115,19	133,18	144,69	148,89
Ölçüm Noktası-8	128,51	142,24	150,92	154,10
Ölçüm Noktası-9	142,46	151,63	157,38	159,48
Ölçüm Noktası-10	156,54	161,04	163,84	164,87
Ölçüm Noktası-11	170,00	170,00	170,00	170,00

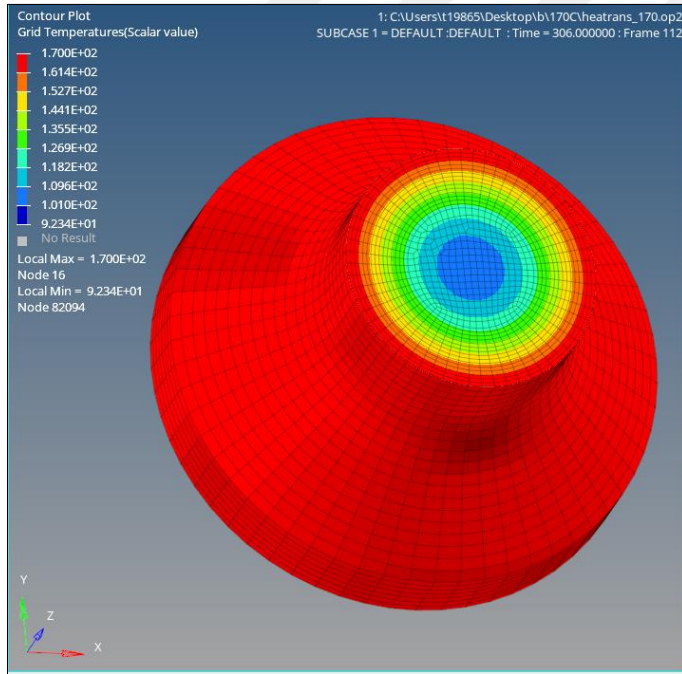
Çizelge 5.9. Numune içi termal analiz ölçüm noktalarının 720-1080 sn aralığındaki sıcaklık değişimi

NOKTA	504. sn	540. sn	600. sn	612. sn
Ölçüm Noktası-1	138,23	142,23	148,08	149,14
Ölçüm Noktası-2	138,79	142,72	148,47	149,51
Ölçüm Noktası-3	140,41	144,14	149,59	150,58
Ölçüm Noktası-4	143,02	146,43	151,41	152,31
Ölçüm Noktası-5	146,56	149,52	153,85	154,63
Ölçüm Noktası-6	149,95	152,49	156,19	156,86
Ölçüm Noktası-7	152,64	154,83	158,05	158,63
Ölçüm Noktası-8	156,92	158,58	161,00	161,44
Ölçüm Noktası-9	161,35	162,44	164,06	164,35
Ölçüm Noktası-10	165,78	166,31	167,10	167,24
Ölçüm Noktası-11	170,00	170,00	170,00	170,00

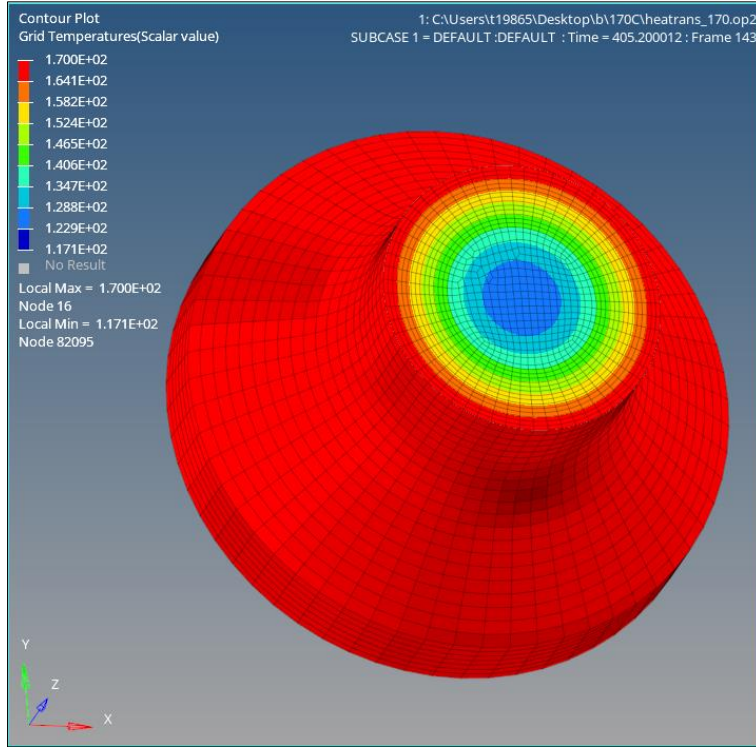
İlgili ölçüm noktalarının bazı kurlenme sürelerinde anlık numune içi dinamik sıcaklık dağılımları ise Şekil 5.40, Şekil 5.41, Şekil 5.42, Şekil 5.43 ve Şekil 5.44'te sunulmuştur.



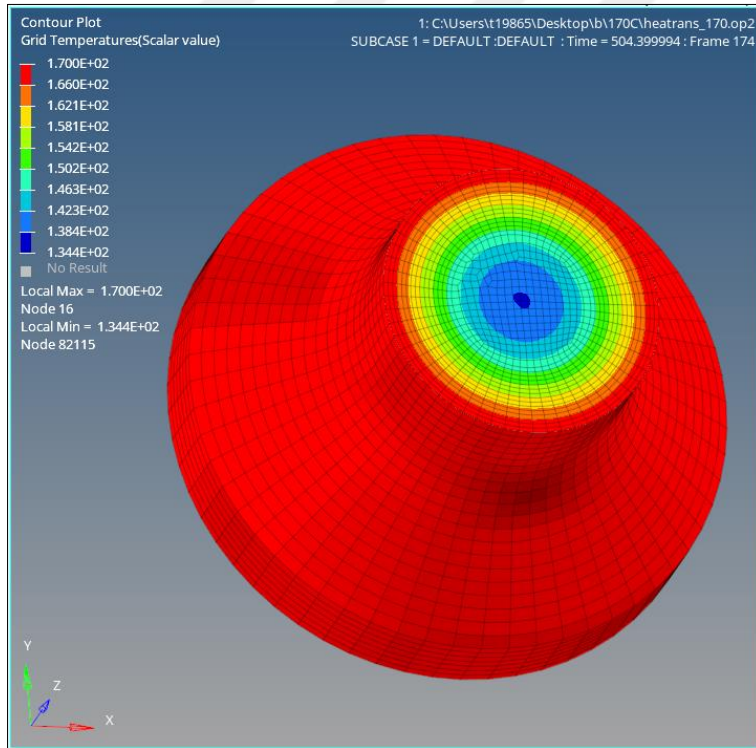
Şekil 5.40. 170 °C kürlenme 204. saniye numune içi dinamik sıcaklık dağılımı



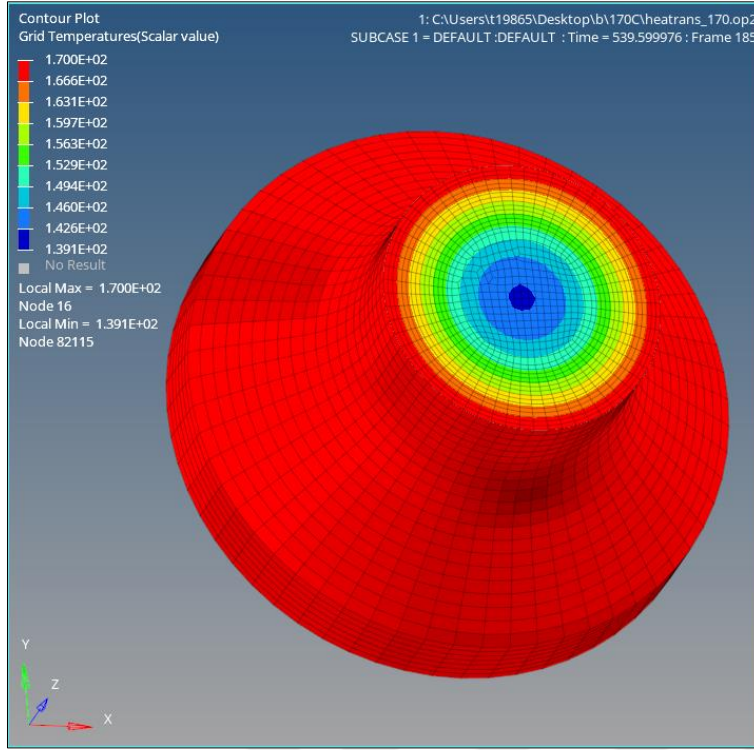
Şekil 5.41. 170 °C kürlenme 304. saniye numune içi dinamik sıcaklık dağılımı



Şekil 5.42. 170 °C kürlenme 404. saniye numune içi dinamik sıcaklık dağılımı



Şekil 5.43. 170 °C kürlenme 504. saniye numune içi dinamik sıcaklık dağılımı



Şekil 5.44. 170 °C kürlenme 612. saniye numune içi dinamik sıcaklık dağılımı

170 °C sıcaklıkta kürlenme süresinin artışına bağlı olarak ölçüm noktalarındaki sıcaklıklar yükselme davranışı göstermişlerdir.

Grafikler incelendiğinde test numunesinin en iç noktasının sıcaklığının ilk 27 saniye boyunca hiç değişmediği ve başlangıçta set edilen dış ortam sıcaklığı olan 23 °C sıcaklıkta sabit kaldığı analiz edilmiştir. En iç ölçüm noktasının doğal kauçuk üretim aşamalarında kullanılan en düşük sıcaklık değeri olan 140 °C sıcaklığa ise 520 saniyede ulaştığı görülmektedir.

Kürlenme başlangıcına kadar geçen süre olan 96ncı saniyede en iç noktanın sıcaklığı 32 °C sıcaklıkta iken, en dış noktaya en yakın bölge olan 10 numaralı ölçüm noktası sıcaklığının ise 146 °C sıcaklıkta olduğu analiz edilmiştir.

Optimum kürlenme süresi olan 204nci saniyede en iç nokta 72 °C sıcaklıkta iken, en dış noktaya en yakın bölge olan 10 numaralı ölçüm noktasının 156 °C sıcaklıkta olduğu analiz edilmiştir. Merkez bölgesi ölçüm noktası ve yüzey ölçüm noktası arasında ise 98 °C sıcaklık farkı olduğu analiz edilmiştir.

Optimum kürlenme süresi ve kürlenme başlangıcına kadar geçen sürenin toplamı olarak yaklaşık 300nc saniyede ise en iç nokta 102 °C sıcaklıkta ve en dış noktaya en yakın bölge olan 10 numaralı ölçüm noktasının ise 161 °C civarında olduğu analiz edilmiştir.

Optimum kürlenme süresinin üç katı süre olan 612nci saniyede en iç ölçüm noktası 149 °C sıcaklıkta ve en dış noktaya en yakın bölge olan 10 numalı ölçüm noktası ise 167 °C sıcaklıkta olduğu ve henüz denge sıcaklığına ulaşamadıkları analiz edilmiştir.

Analiz modelinde en dış bölgede 11 numaralı ölçüm noktasının sabit 170 °C sıcaklık değerinde sınır koşulu oluşturduğu analiz edilmiştir.

170 °C sıcaklıkta 204 sn kürlenme süresinde sıcaklık dağılımı incelendiğinde test numunesinin en iç noktasının 170 °C vulkanizasyon ile kürlenme hedef sıcaklığına ulaşamadığı görülmektedir.

10 numaralı ölçüm noktası 204nci saniyede 140 °C ve üzeri bir sıcaklıkta olduğundan kısmen de olsa kürlenmeye başlamıştır fakat merkez noktası ile 10 numaralı ölçüm noktası arasındaki bölge düşük sıcaklıklarda kaldığından hiç kürlenmemiş ile az kürlenmiş arası bir kürlenme statüsüne sahip olacaklardır.

Numunenin en iç ölçüm noktasında sıcaklık değeri 72 °C ve 10 numaralı ölçüm ölçüm noktasının sıcaklık değerinin 156 °C sıcaklığa ulaştığı görülmektedir. Bu durumda test numunesinin hiçbir ölçüm bölgesinin 170 °C kürlenme sıcaklığı hedefine ulaşamadığı ve hatta ölçüm noktası 10 ve ölçüm noktası 11 hariç hiçbir bölgenin 140 °C vulkanizasyon ile kürlenme sıcaklığı alt limitine bile ulaşamadığı görülmektedir. Bu sebeble, 204 saniyede kürlenme döngüsüne alınan bu numunenin tüm üretimler arasında en kötü kürlenme statüsüne sahip olması beklenmektedir.

520nci saniyede test numunesinin tüm ölçüm noktaları 140 °C ve 160 °C arasında bir sıcaklık seviyesine ulaşmışlardır. Bu durumda kalan 92 sn kürlenme süresinde bu bölgelerin kürlenme statüleri iyileşecektir. Aynı zaman dilimi içerisinde test numunesinin merkez noktası 140 °C sıcaklıktan 149 °C sıcaklığa yükselecek ve kürlenme statüsü artacaktır.

Böylece ikinci set kürlenme süresi olan 612 sn kürlenme parametresi ile yüzey bölgesine yakın 5 adet ölçüm noktası (ölçüm noktası 6 ve ölçüm noktası 10) orta derece ile iyi derece arasında kürlenmiş, kalan 5 ölçüm noktası bölümünün ise az seviyede kürlenme ile orta seviye kürlenme statüsü arasında kürlenmiş olacaktır. 612 saniye kürlenme süresinin dezavantajı ise test numunesi dış yüzeyinin uzun süre kürlenme bozulma eğrisi bölgesinde kürlenmeye maruz kalması olacaktır.

Özet ile 204 saniye kürlenen numune iyi bir dış yüzey kürlenme statüsü ve büyük bölümü hiç kürlenmiş iç yapı statüsüne sahip olacak; 612 saniye kürlenen numune ise yüzey bölgesinde bozulma eğrisine girer iken, kalan tüm bölgelerde 204 saniye numunesinden daha iyi bir kürlenme statüsüne sahip olacaktır.

5.2. Deneysel Sonuçlar

Termal ve yapısal sonlu elemanlar analizi sonuçlarını doğrulamak ve kürlenme statüsü dağılımının yorulma ömür süresine etkisini gözlemlemek amaçlı diablo deneyisel test numuneleri oluşturulmuştur.

Yapısal analiz sonuçları ile merkez bölgesinde 10 mm civarı uzama elde edilebilecek 350 N ve 400 N yük parametresi ile tek eksende yorulma ömür deneyleri gerçekleştirilmiştir.

150 °C sıcaklıkta 2 adet 720 sn kürlenmiş ve 2 adet 1440 sn kürlenmiş olmak üzere 4 adet, 160 °C sıcaklıkta 2 adet 405 sn kürlenmiş ve 2 adet 810 sn kürlenmiş olmak üzere 4 adet ve 170 °C sıcaklıkta 2 adet 204 sn kürlenmiş ve 2 adet 612 sn kürlenmiş olmak üzere 4 adet olmak üzere toplam 12 adet numune üzerinde yorulma testi gerçekleştirilmiştir.

12 adet yorulma ömür testinin 6 adeti 350 N yük seviyesinde ve kalan 6 adeti ise hızlandırılmış modda 400 N yük seviyesinde gerçekleştirilmiştir.

Yorulma testleri esnasında test numunelerinin termal yorulma bölgesine girme olasılığını incelemek amaçlı 3 adet yorulma testinde test numunesi yüzeyi termal sıcaklık ölçümü gerçekleştirilmiştir.

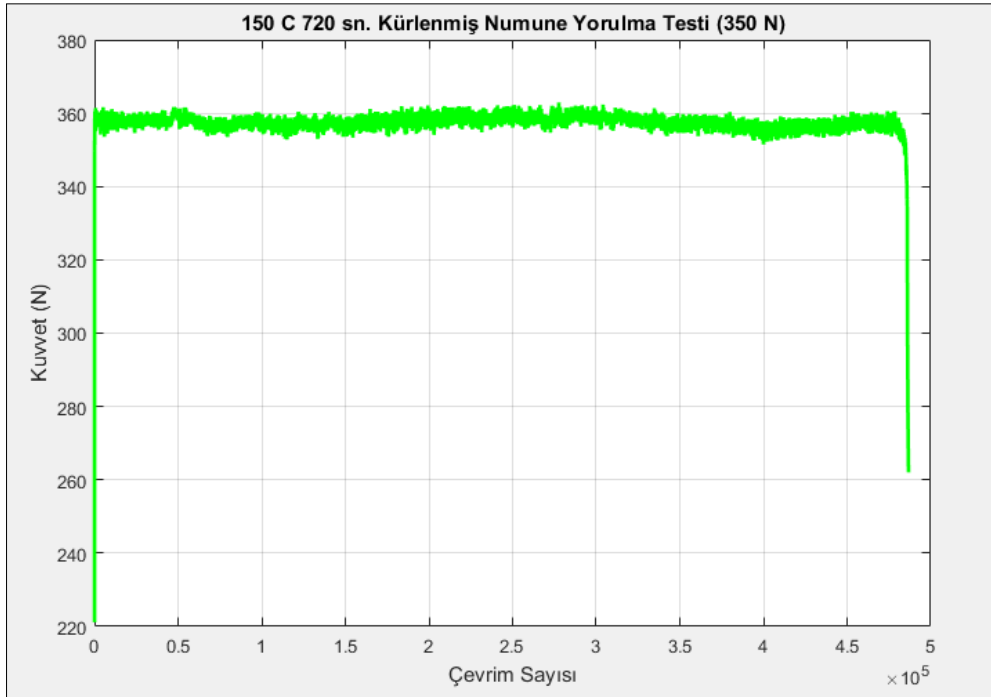
Ayrıca, 6 adet test numunesinin tek eksende 100 mm/dk hız ile yarı statik çekme testleri gerçekleştirilmiştir. **Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.**

5.2.1. Yorulma ömür testi sonuçlarının incelenmesi

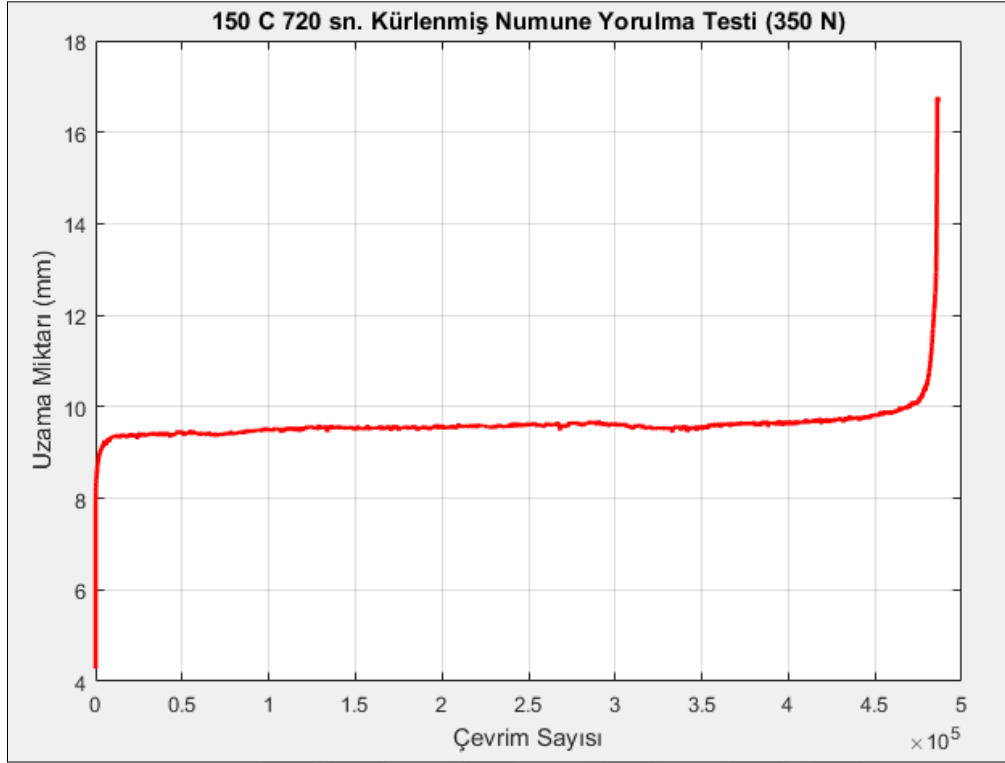
150 °C sıcaklıkta 720 saniye kürlenen numuneye ait ilk yorulma testi 350 N sinüs mod yük altında gerçekleştirilmiştir. Test numunesine yorulma ömür testi boyunca uygulanan kuvvet 355-360 N aralığında ölçülmüştür (Şekil 5.45).

Test numunesi yorulma testi başlangıcında 9,5 mm civarında uzama miktarı gösterirken, uzama miktarı test boyunca 10 mm'ye doğru çok yavaş bir hızda artış gösterirken, ömür döngüsünün son 6,000 çevriminde 16,7 mm uzama miktarına kadar uzama davranışı gösterip kopma olayı meydana gelmiştir (Şekil 5.46).

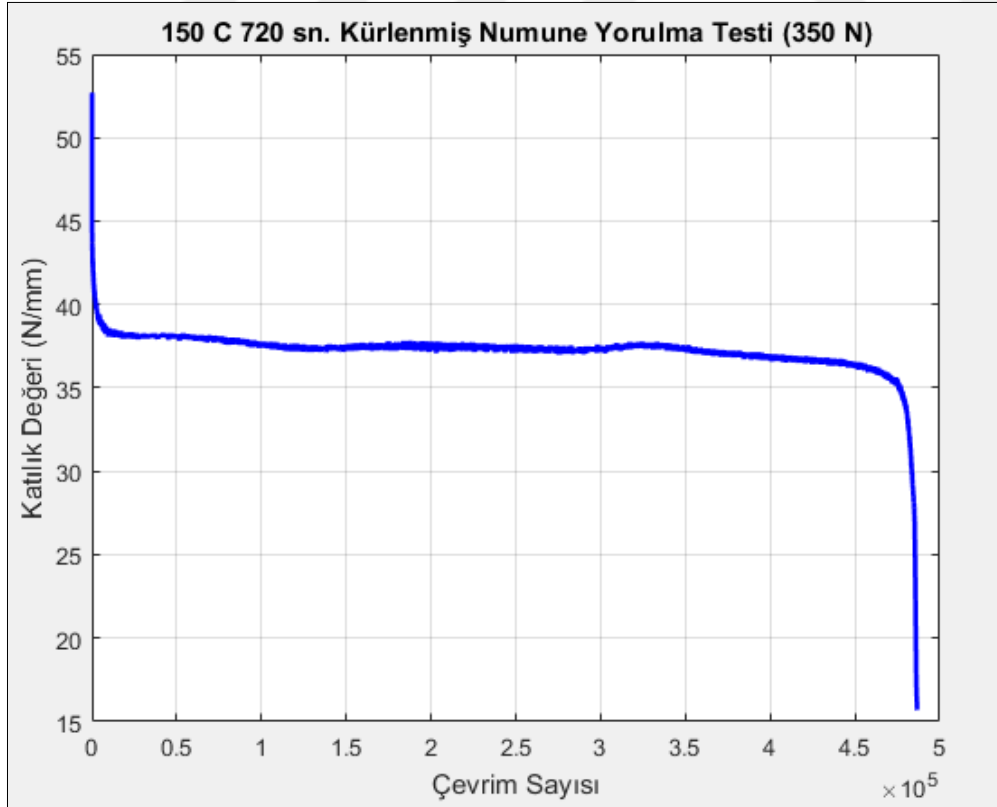
Test numunesine ait katılık değeri başlangıçta ilk 6000 çevrimde hızlı bir düşme trendi göstererek 52,7 N/mm'den 38,5 N/mm'ye düşmekte ve ardından kopma olayı başlangıcına kadar 38,5 N/mm değeri ile 35,5 N/mm değeri arasında yavaş bir hızda azalma göstermiştir. Kopma noktasında ise son katılık değeri 16 N/mm değerine kadar düşmüştür (Şekil 5.47). Katılık değerinin çok hızlı düştüğü ve kopma olayının meydana geldiği bu bölüm ise toplam ömür olan 486 768 çevrimin %2'lik bölümüne denk gelmektedir. Test numunesinin toplam yorulma ömür süresi 486 768 çevrim olarak kayıt altına alınmıştır.



Şekil 5.45. 150 °C 720 sn kürlenmiş numune yorulma testi çekme kuvveti grafiği



şekil 5.46. 150 °C 720 sn kürlenmiş numune yorulma testi uzama miktarı grafiği

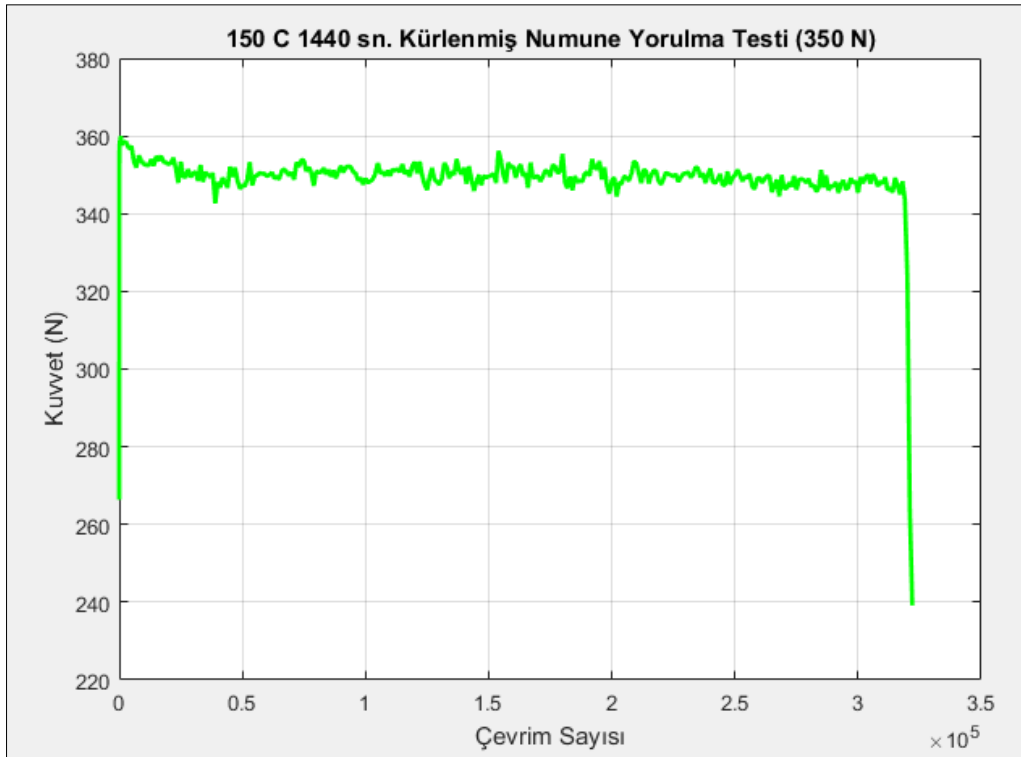


şekil 5.47. 150 °C 720 sn kürlenmiş numune yorulma testi katılık değeri grafiği

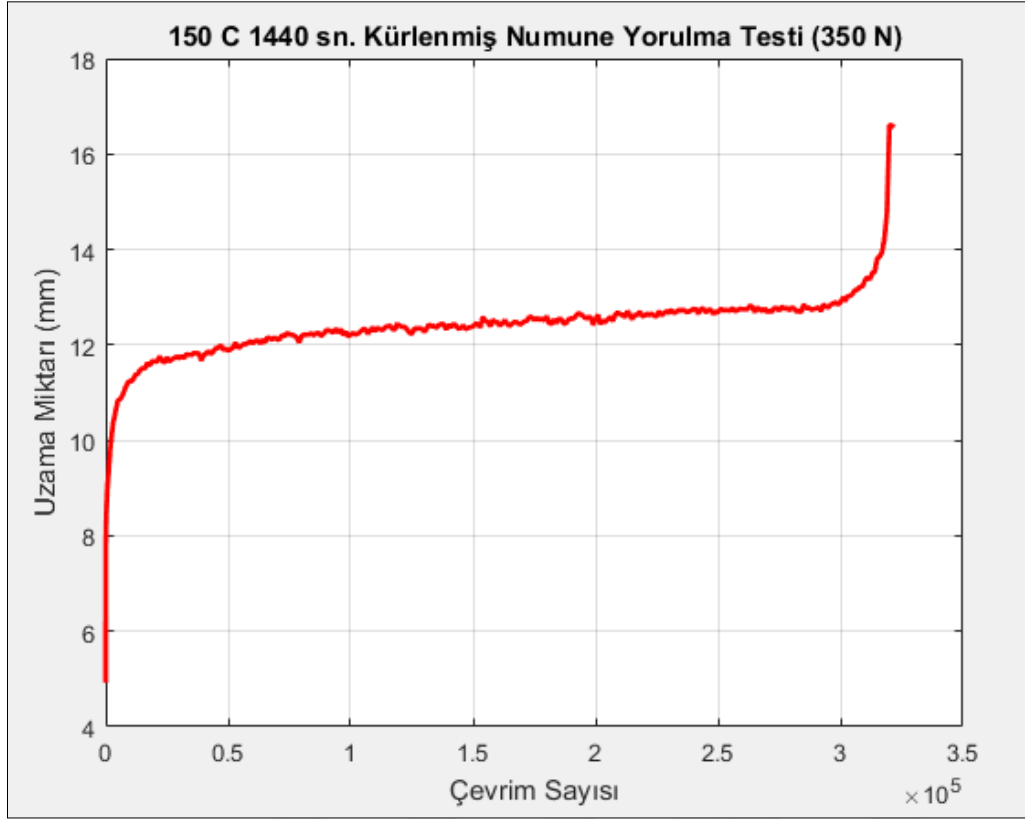
150 °C sıcaklıkta 1440 saniye kürlenmiş numuneye ait ilk yorulma testi 350 N sinüs mod yük altında gerçekleştirilmiştir. Test numunesine yorulma ömür testi boyunca uygulanan kuvvet 340-355 N aralığında ölçülmüştür (Şekil 5.48).

Test numunesi yorulma testi başlangıcında 11,5 mm civarında uzama miktarı gösterirken, uzama miktarı test boyunca 13,5 mm'ye doğru yavaş bir hızla artış göstermiştir. Ömür döngüsünün son 20 000 çevriminde 16,61 mm uzama miktarına kadar uzama davranışı gösterip kopma olayı meydana gelmiştir (Şekil 5.49).

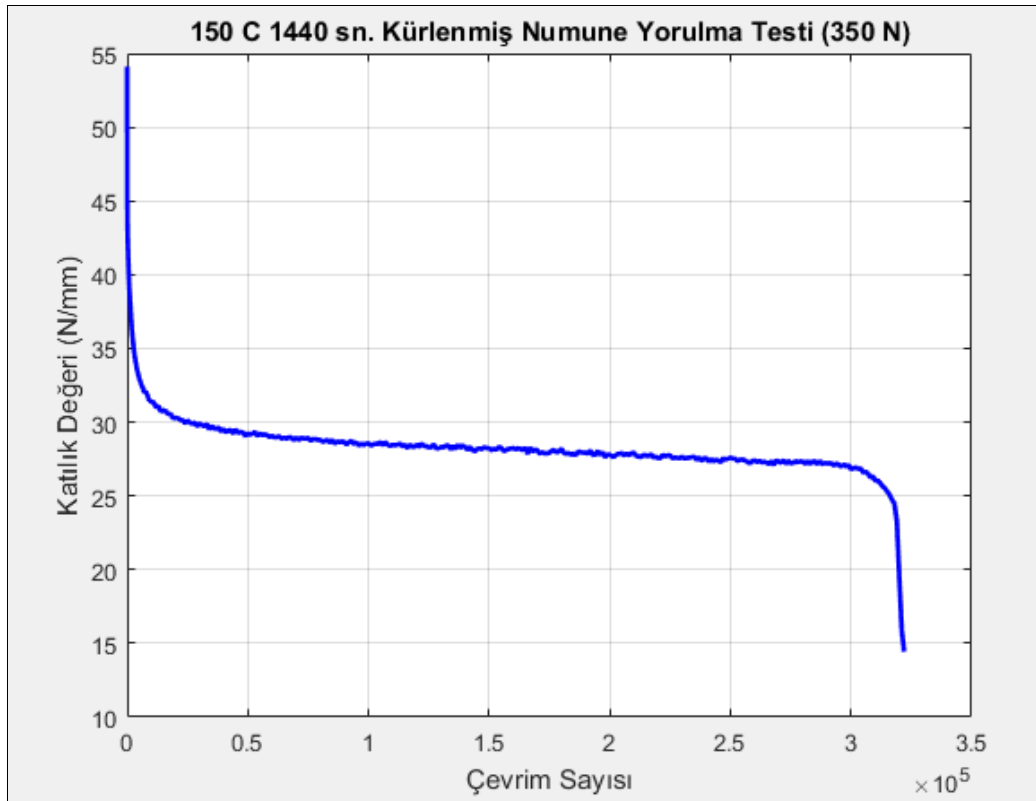
Test numunesine ait katılık değeri başlangıçta ilk 2000 çevrimde hızlı bir düşme trendi göstererek 54,11 N/mm'den 30 N/mm'ye düşmekte ve ardından kopma olayı başlangıcına kadar 30 N/mm değeri ile 27 N/mm değeri arasında yavaş bir hızla azalma göstermiştir. Kopma noktasında ise son katılık değeri hızlı bir şekilde 14,5 N/mm değerine kadar düşmüştür (Şekil 5.50). Katılık değerinin çok hızlı düştüğü ve kopma olayının meydana geldiği bu bölüm ise toplam ömür olan 322 437 çevrimin %7'lik bölümüne denk gelmektedir. Test numunesinin toplam yorulma ömür süresi 322 437 çevrim olarak kayıt altına alınmıştır.



Şekil 5.48. 150 °C 1440 sn kürlenmiş numune yorulma testi çekme kuvveti grafiği



Şekil 5.49. 150 °C 1440 sn kürlenmiş numune yorulma testi uzama miktarı grafiği

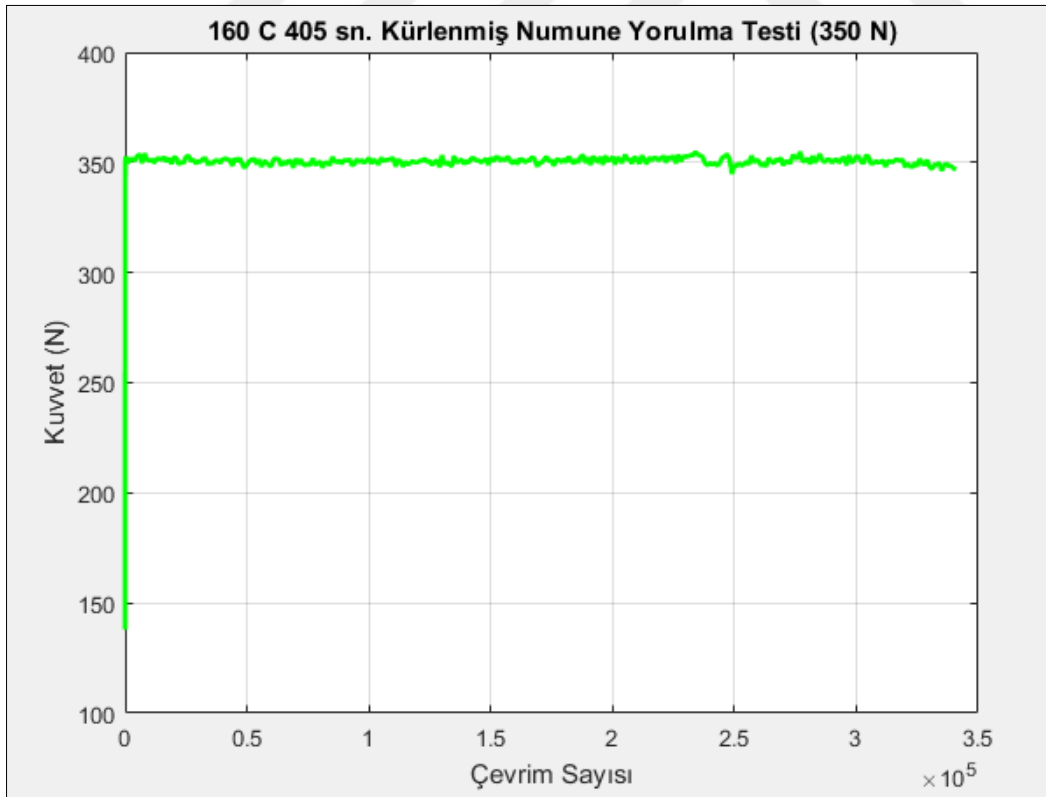


Şekil 5.50. 150 °C 1440 sn kürlenmiş numune yorulma testi katılık değeri grafiği

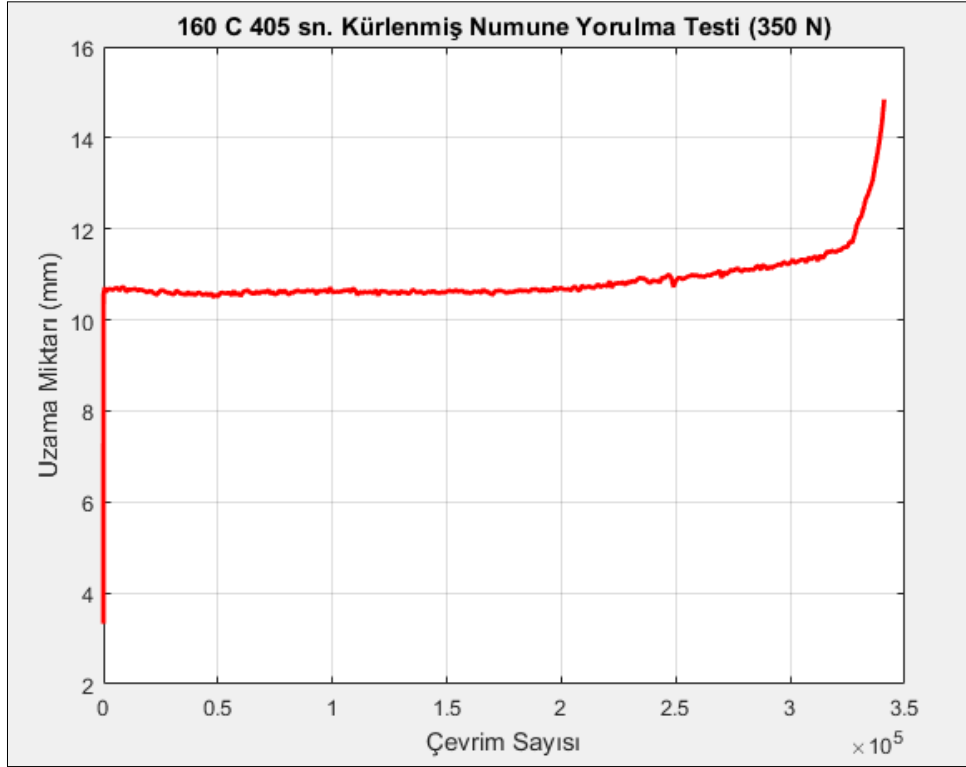
160 °C sıcaklıkta 405 saniye kürlenen numuneye ait ilk yorulma testi 350 N sinüs mod yük altında gerçekleştirilmiştir. Test numunesine yorulma ömür testi boyunca uygulanan kuvvet 345-355 N aralığında ölçülmüştür (Şekil 5.51).

Test numunesi yorulma testi başlangıcında 9,5 mm civarında uzama miktarı gösterirken, uzun bir süre 10,6 mm civarında uzama ile teste devam etmiş ve 15 mm'ye kadar uzama gösterip kopma olayı meydana gelmiştir (Şekil 5.52).

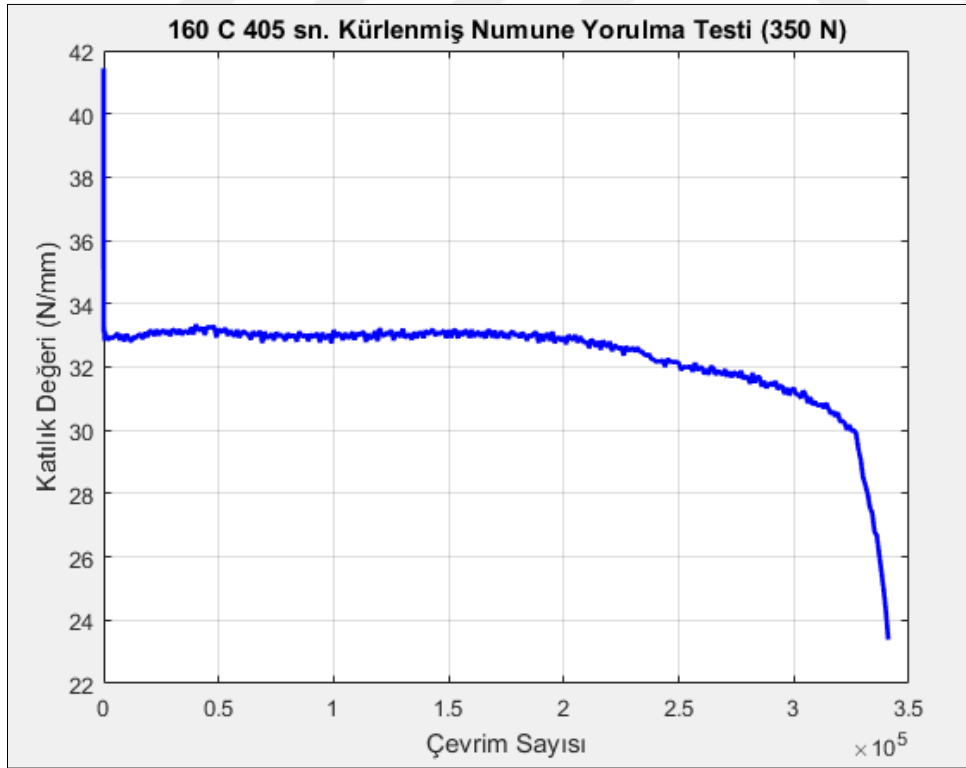
Test numunesine ait katılık değeri başlangıçta hızlı bir düşme trendi göstermekte ve ardından kopma olayı meydana gelene kadar 33 N/mm değerinden 30 N/mm değerine kadar yavaş bir hızda düşme trendi göstermektedir. Kopma noktasında ise son katılık değeri 22 N/mm değerine kadar düşmektedir (Şekil 5.53). Katılık değerinin çok hızlı düştüğü ve kopma olayının meydana geldiği bu bölüm ise toplam ömür olan 341 022 çevrimin yaklaşık %10'luk bölümüne denk gelmektedir. Test numunesinin toplam ömrü 341 022 çevrim olarak kayıt altına alınmıştır.



Şekil 5.51. 160 °C 405 sn kürlenmiş numune yorulma testi çekme kuvveti grafiği



şekil 5.52. 160 °C 405 sn kürlenmiş numune yorulma testi uzama miktarı grafiği

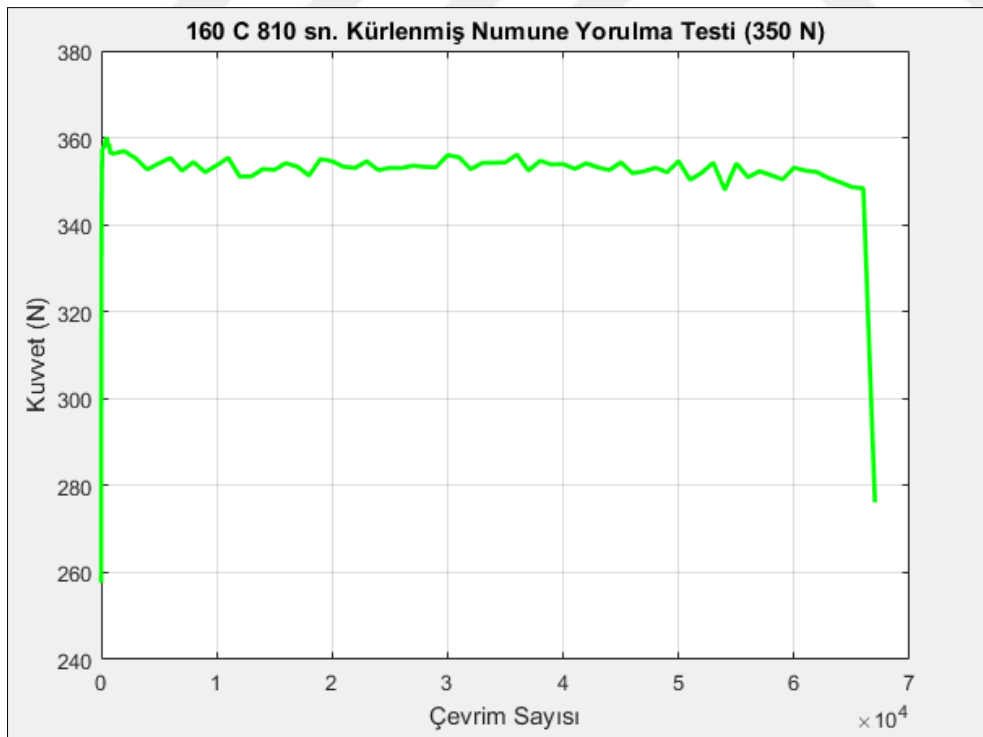


şekil 5.53. 160 °C 405 sn kürlenmiş numune yorulma testi katılık değeri grafiği

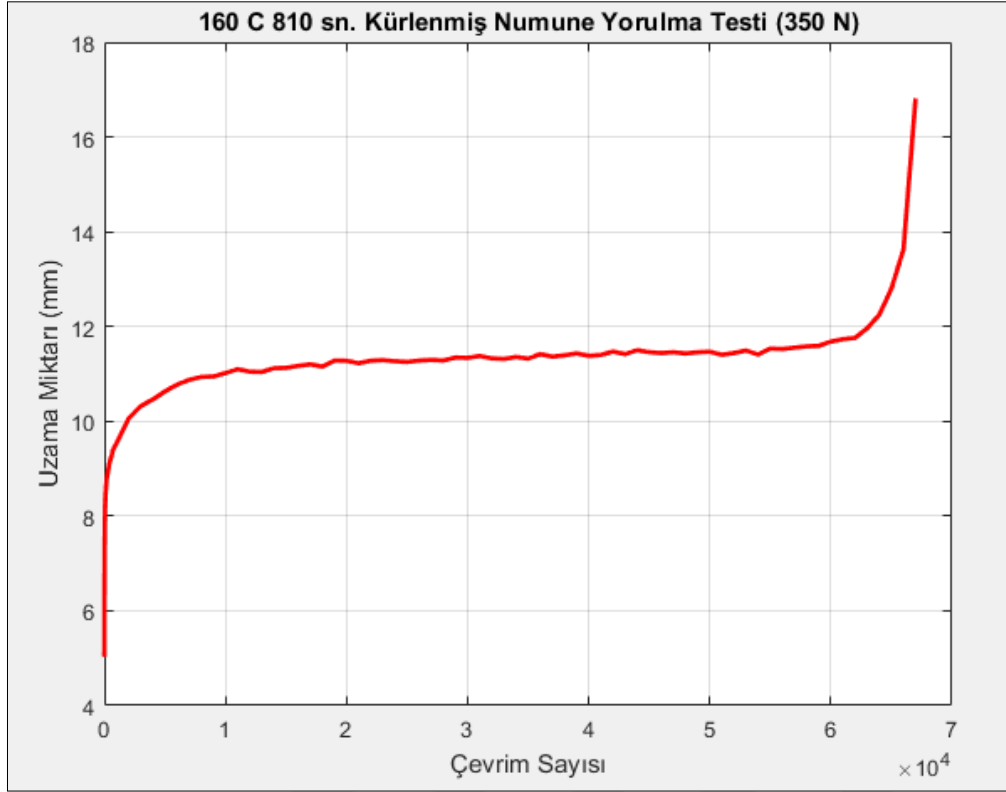
160 °C sıcaklıkta 810 saniye kürlenen numuneye ait ilk yorulma testi 350 N sinüs mod yük altında gerçekleştirilmiştir. Test numunesine yorulma ömür testi boyunca uygulanan kuvvet 350-355 N aralığında ölçülmüştür (Şekil 5.54).

Test numunesi yorulma testi başlangıcında 10,5 mm civarında uzama miktarı gösterirken, uzama miktarı test boyunca 10,5 mm'den 11,5 mm'ye doğru yavaş bir hızla artış gösterirken, ömür döngüsünün son 6 000 çevriminde 17 mm uzama miktarına kadar uzama davranışı gösterip kopma olayı meydana gelmiştir (Şekil 5.55).

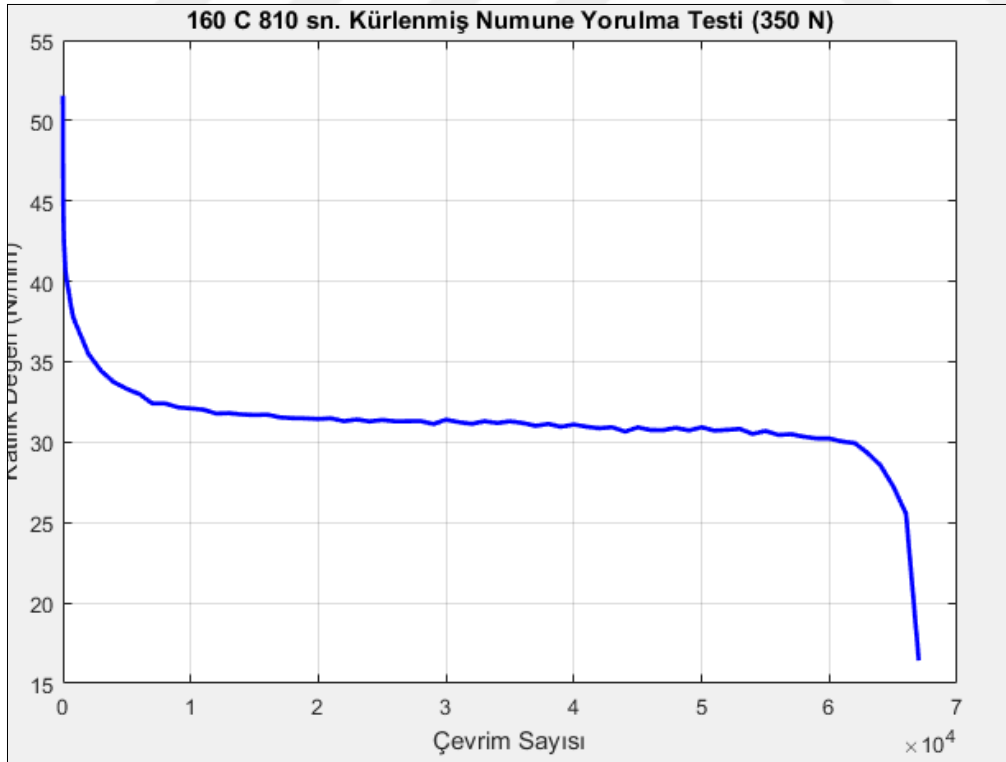
Test numunesine ait katılık değeri başlangıçta ilk 2000 çevrimde hızlı bir düşme trendi göstererek 51,5 N/mm'den 35 N/mm'ye düşmekte ve ardından kopma olayı başlangıcına kadar 32 N/mm değeri ile 30 N/mm değeri arasında yavaş bir hızla azalma göstermiştir. Kopma noktasında ise son katılık değeri 16,5 N/mm değerine kadar düşmüştür (Şekil 5.56). Katılık değerinin çok hızlı düştüğü ve kopma olayının meydana geldiği bu bölüm ise toplam ömür olan 67 038 çevrimin yaklaşık %10'luk bölümüne denk gelmektedir. Test numunesinin toplam ömrü 67 038 çevrim olarak kayıt altına alınmıştır.



Şekil 5.54. 160 °C 810 sn kürlenmiş numune yorulma testi çekme kuvveti grafiği



Şekil 5.55. 160 °C 810 sn kurlenmiş numune yorulma testi uzama miktarı grafiği

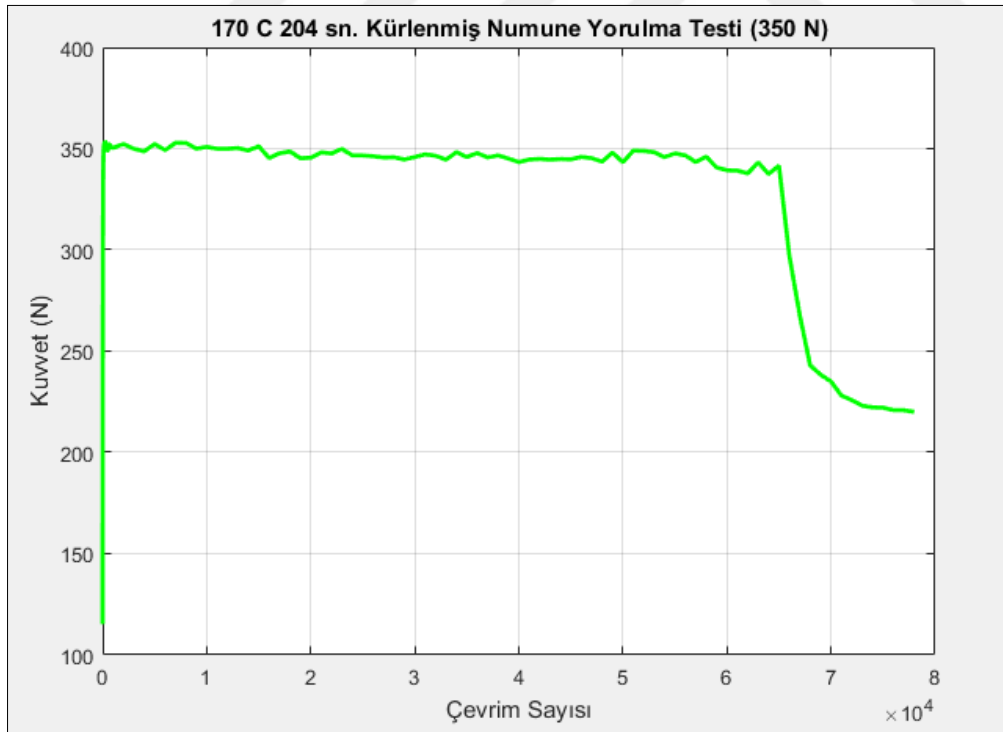


Şekil 5.56. 160 °C 810 sn kurlenmiş numune yorulma testi katılık değeri grafiği

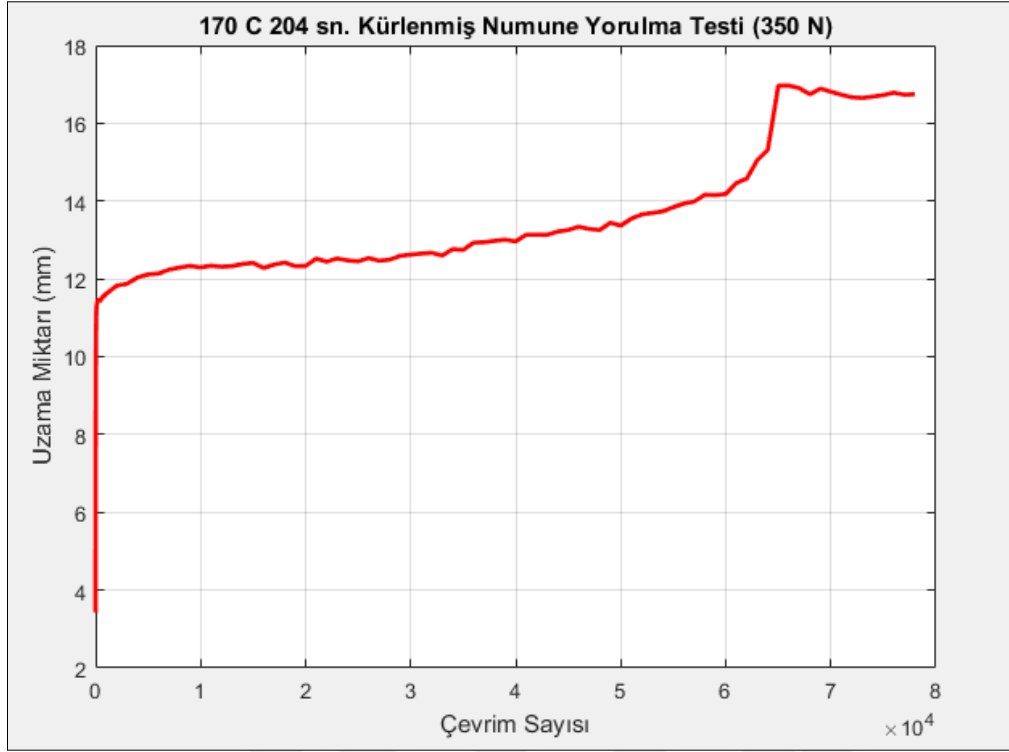
170 °C sıcaklıkta 204 saniye kürlenmiş numuneye ait ilk yorulma testi 350 N sinüs mod yük altında gerçekleştirilmiştir. Test numunesine yorulma ömür testi boyunca uygulanan kuvvet 340-350 N aralığında ölçülmüştür (Şekil 5.57).

Test numunesi yorulma testi başlangıcında 11,4 mm civarında uzama miktarı gösterirken, uzama miktarı test boyunca stabilize olamamış ve 17 mm'ye kadar artarak uzama gösterip kısa süre içerisinde kopma olayı meydana gelmiştir (Şekil 5.58).

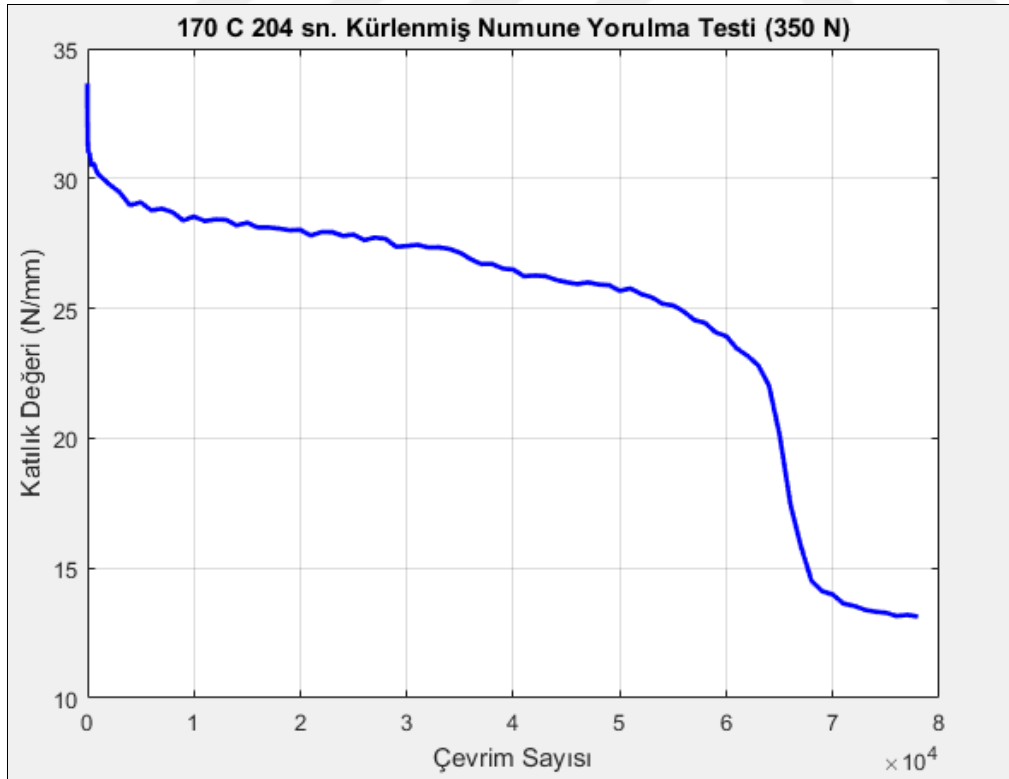
Test numunesine ait katılık değeri başlangıçta ilk 100 çevrimde hızlı bir düşme trendi göstererek 33,5 N/mm'den 31 N/mm'ye düşmekte ve ardından kopma olayı meydana gelene kadar 31 N/mm değerinden 22 N/mm değerine kadar sürekli düşme özelliği göstermektedir. Kopma noktasında ise son katılık değeri 13 N/mm değerine kadar düşmüştür (Şekil 5.59). Katılık değerinin çok hızlı düştüğü ve kopma olayının meydana geldiği kabul edilen bölüm ise 350 N kuvvet uygulanabilen son çevrim sayısı olan 65 000 çevrim olarak kayıt altına alınmıştır.



Şekil 5.57. 170 °C 204 sn kürlenmiş numune yorulma testi çekme kuvveti grafiği



şekil 5.58. 170 °C 204 sn kürlenmiş numune yorulma testi uzama miktarı grafiği

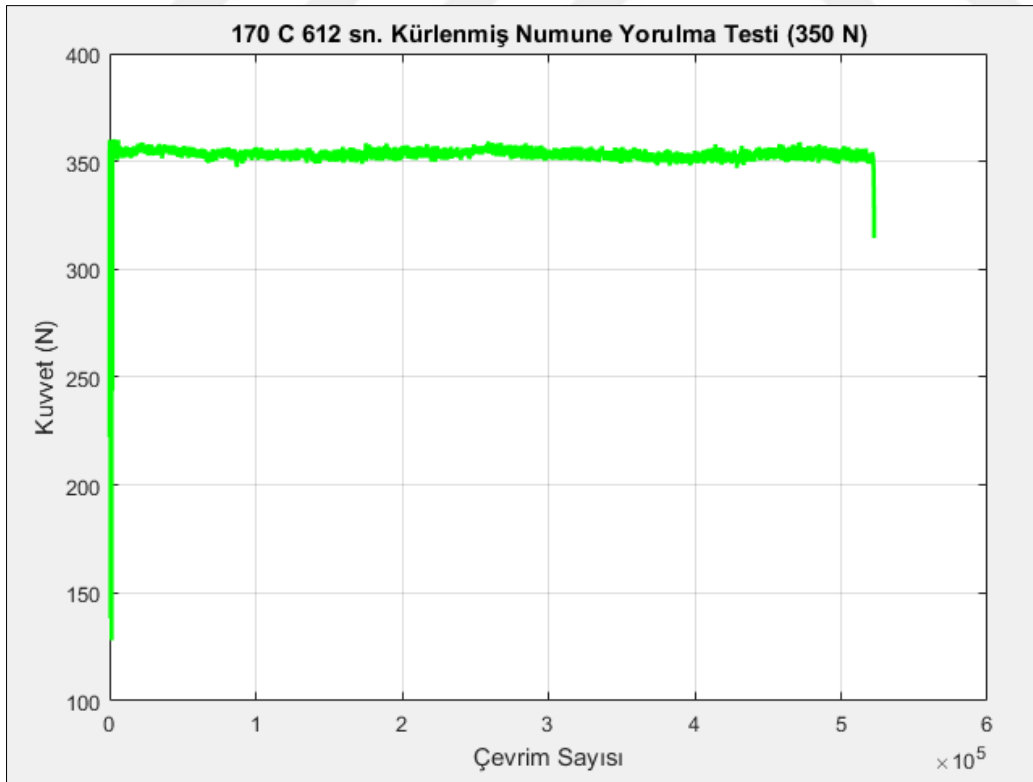


şekil 5.59. 170 °C 204 sn kürlenmiş numune yorulma testi katılık değeri grafiği

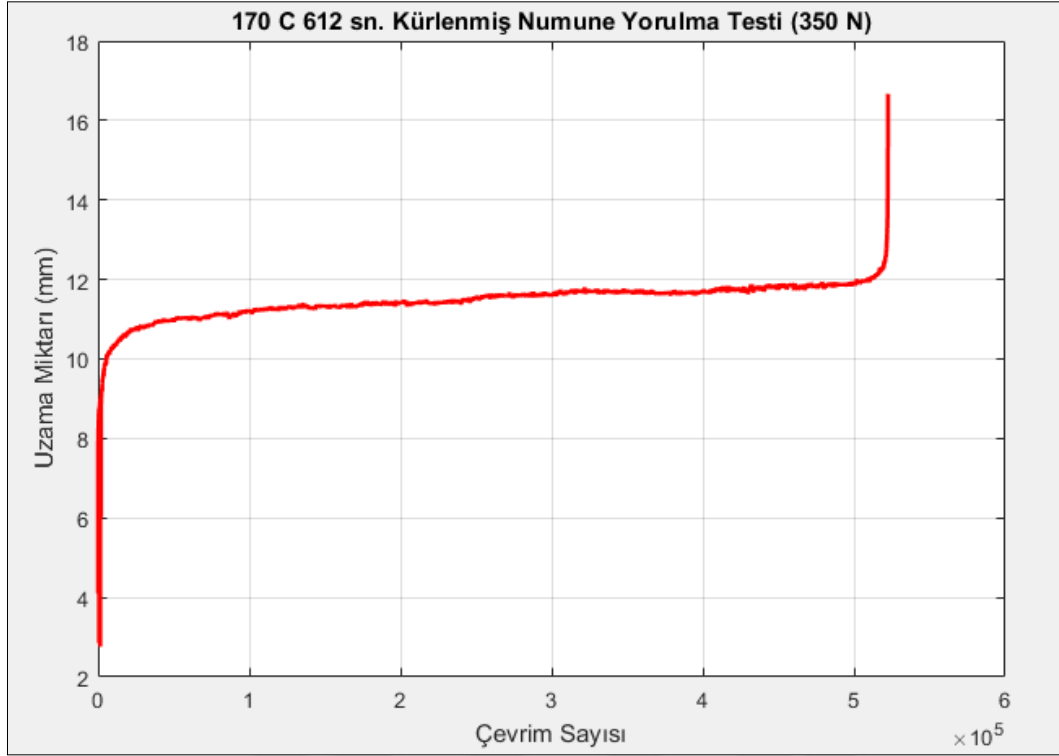
170 °C sıcaklıkta 612 saniye kürlenmiş numuneye ait ilk yorulma testi 350 N sinüs mod yük altında gerçekleştirilmiştir. Test numunesine yorulma ömür testi boyunca uygulanan kuvvet 350-36 N aralığında ölçülmüştür (Şekil 5.60).

Test numunesi yorulma testi başlangıcında 11 mm civarında uzama miktarı gösterirken, uzama miktarı test boyunca 12 mm'ye doğru yavaş bir hızla artış gösterirken, ömür döngüsünün son 2000 çevriminde 16,65 mm uzama miktarına kadar uzama davranışı gösterip kopma olayı meydana gelmiştir (Şekil 5.61).

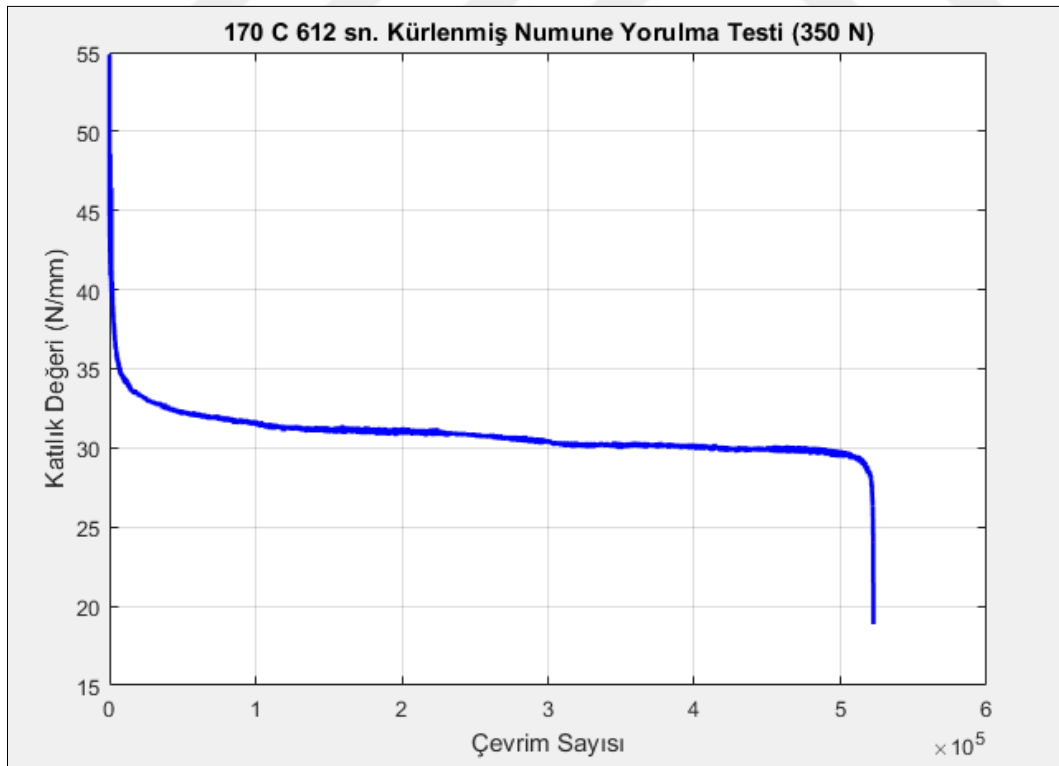
Test numunesine ait katılık değeri başlangıçta ilk 10 000 çevrimde hızlı bir düşme trendi göstererek 54 N/mm'den 34 N/mm'ye düşmekte ve ardından kopma olayı başlangıcına kadar 34 N/mm değeri ile 29,5 N/mm değeri arasında yavaş bir hızla azalma göstermiştir. Kopma noktasında ise son katılık değeri sert bir düşüşle 19 N/mm değerine kadar düşmüştür (Şekil 5.62). Katılık değerinin çok hızlı düştüğü ve kopma olayının meydana geldiği bu bölüm ise toplam ömür olan 521 241 çevrimin %1'lik bölümüne denk gelmektedir. Test numunesinin toplam ömrü 521 241 çevrim olarak kayıt altına alınmıştır.



Şekil 5.60. 170 °C 612 sn kürlenmiş numune yorulma testi çekme kuvveti grafiği

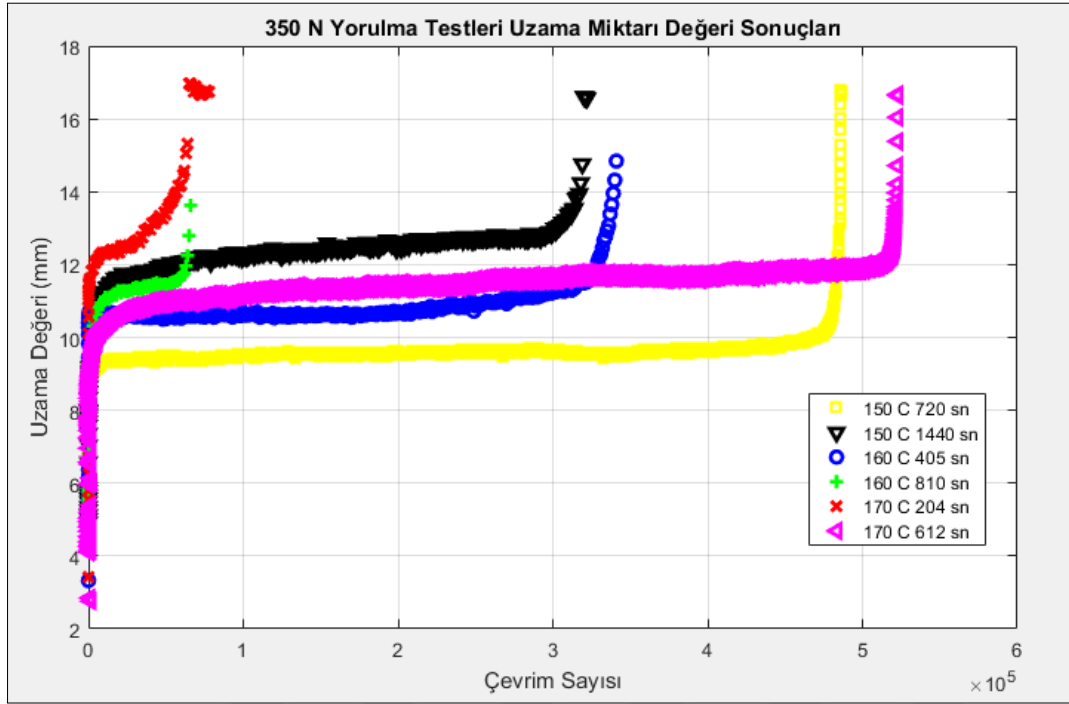


Şekil 5.61. 170 °C 612 sn kürlenmiş numune yorulma testi uzama miktarı grafiği

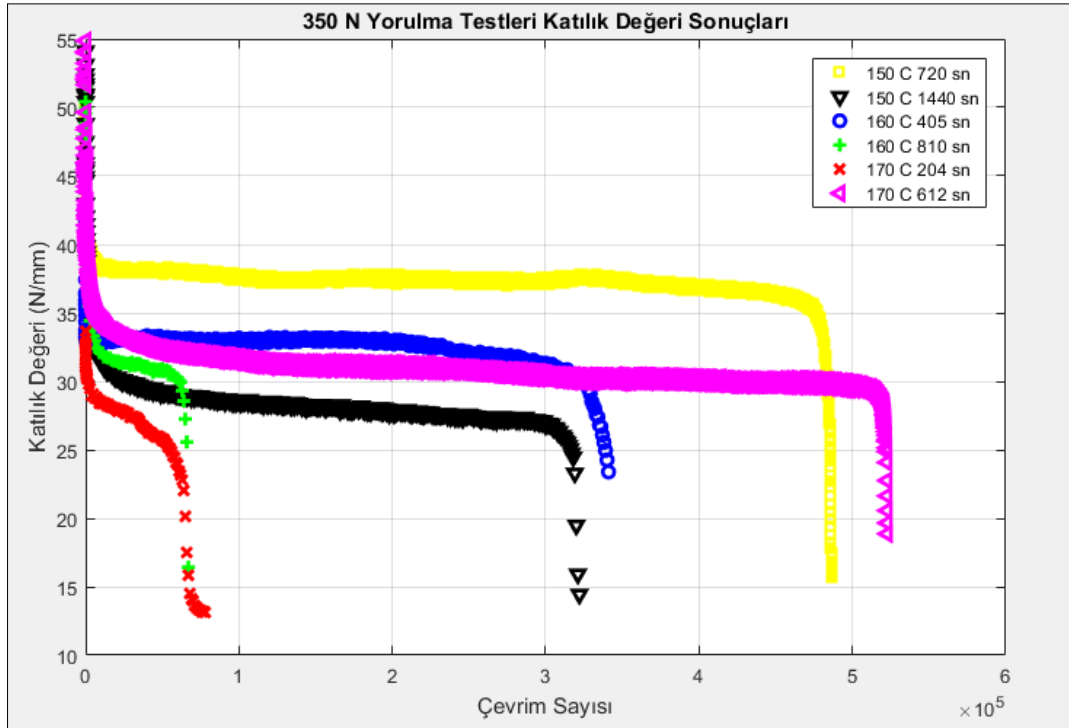


Şekil 5.62. 170 °C 612 sn kürlenmiş numune yorulma testi katılık değeri grafiği

350 N yük altında gerçekleştirilen ilk 6 yorulma testine ait uzama miktarı ve katılık değerlerine ait karşılaştırma sonuçları ise sırasıyla Şekil 5.63 ve Şekil 5.64’de sunulmuştur.



Şekil 5.63. 350 N yorulma ömür testleri 6 numuneye ait uzama miktarı değerleri



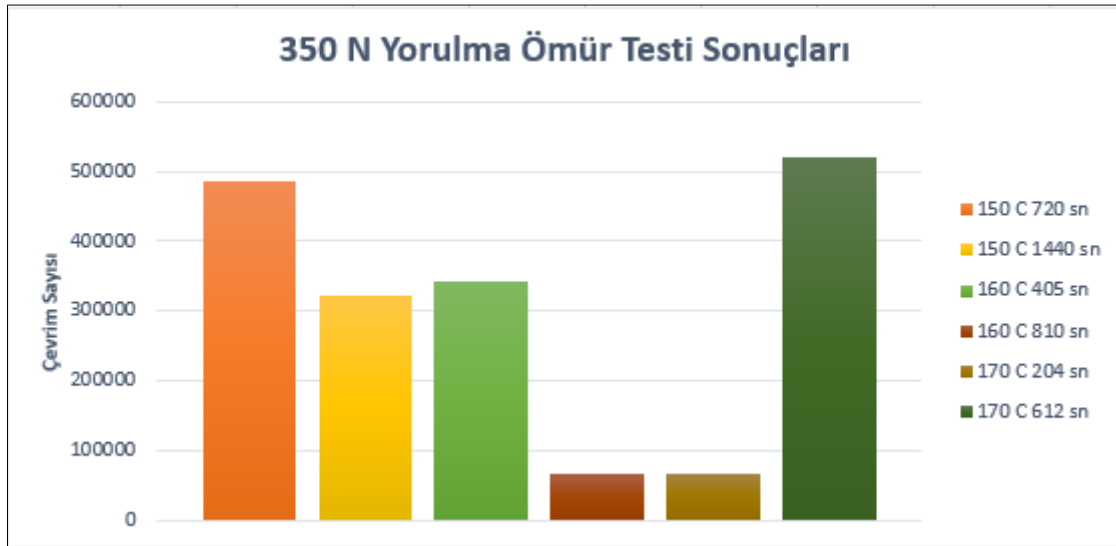
Şekil 5.64. 350 N yorulma ömür testleri 6 numuneye ait katılık değerleri

350 N yük altında gerçekleştirilen ilk 6 yorulma testine ait yorulma ömür süreleri Çizelge 5.10'da özetlenmiştir.

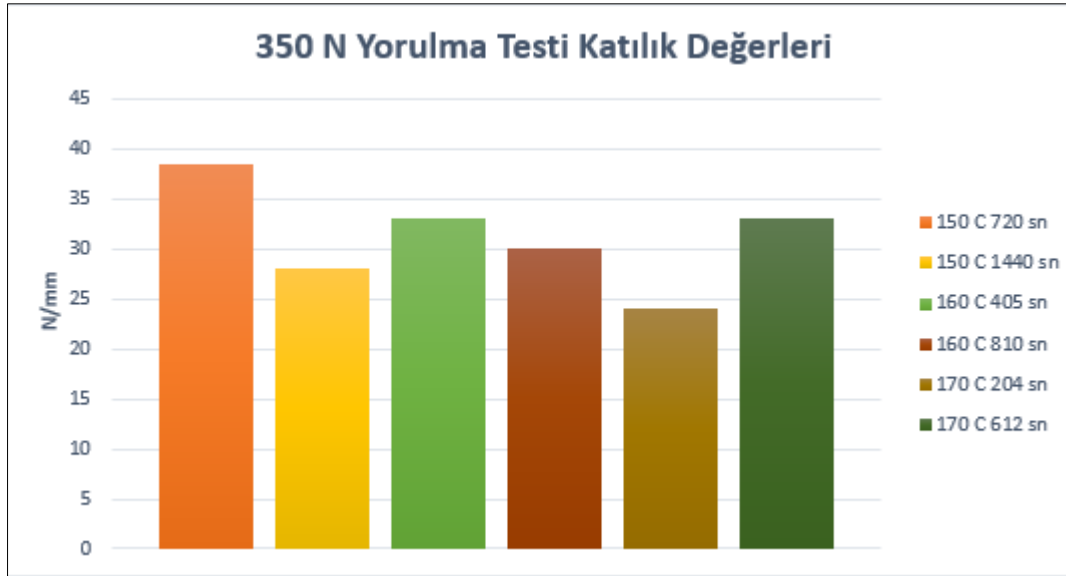
Çizelge 5.10. 350 N yük altında gerçekleştirilen yorulma ömür testleri sonuçları

Numune numarası	Kürlenme Sıcaklığı (°C)	Kürlenme Süresi (sn)	Yorulma Ömür süresi (Çevrim)
1	150	720	486 768
2	150	1440	322 437
3	160	405	341 022
4	160	810	67 038
5	170	204	65 000
6	170	612	521241

350 N yorulma testlerine ait yorulma ömür süresi karşılaştırmaları Şekil 5.65 ve katılık değerleri karşılaştırmaları ise Şekil 5.66'da sergilenmiştir.



Şekil 5.65. 350 N yorulma testleri ömür süreleri karşılaştırması



Şekil 5.66. 350 N yorulma testleri katılık değerleri karşılaştırması

5.2.2. Hızlandırılmış yorulma ömür testi sonuçlarının incelenmesi

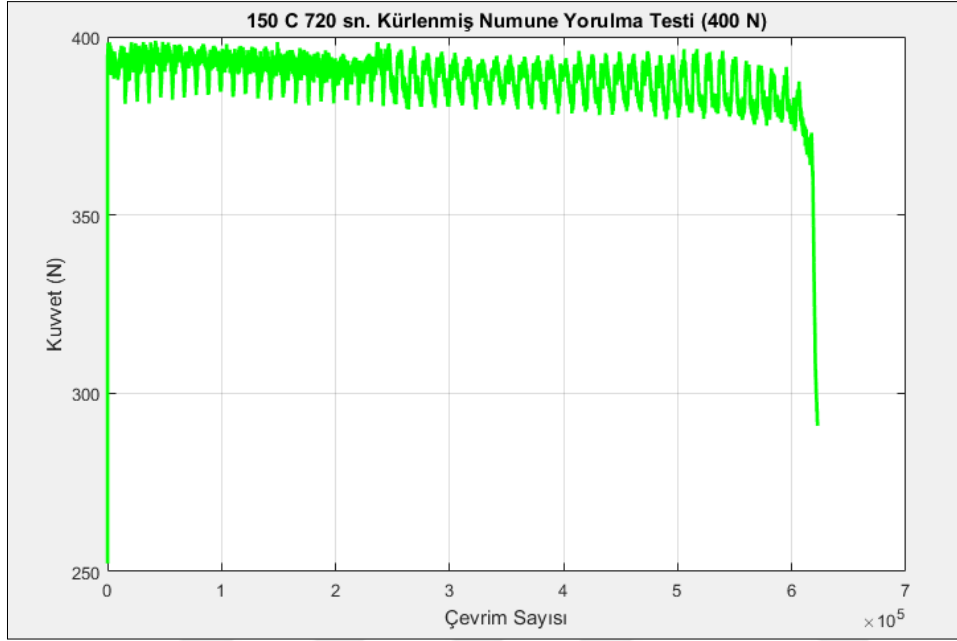
Yorulma testlerinde en önemli maliyet parametrelerinden bir tanesi deney aşaması için harcanan toplam enerji miktarı ve doğrudan ilişkili olarak harcanan toplam zaman kriteridir. 350 N altında gerçekleştirilen ömür deneylerinin daha yüksek bir yük miktarı olan 400 N altında da benzer sonuçları gösterip göstermediğini sorgulamak amacıyla aynı şartlarda üretilmiş 6 adet numune setine 400 N sinüs yük altında hızlandırılmış yorulma testi uygulanmıştır.

150 °C sıcaklıkta 720 saniye kürlenmiş numuneye ait hızlandırılmış yorulma testi 400 N sinüs mod yük altında gerçekleştirilmiştir. Test numunesine yorulma ömür testi boyunca uygulanan kuvvet 380-400 N aralığında ölçülmüştür (Şekil 5.67).

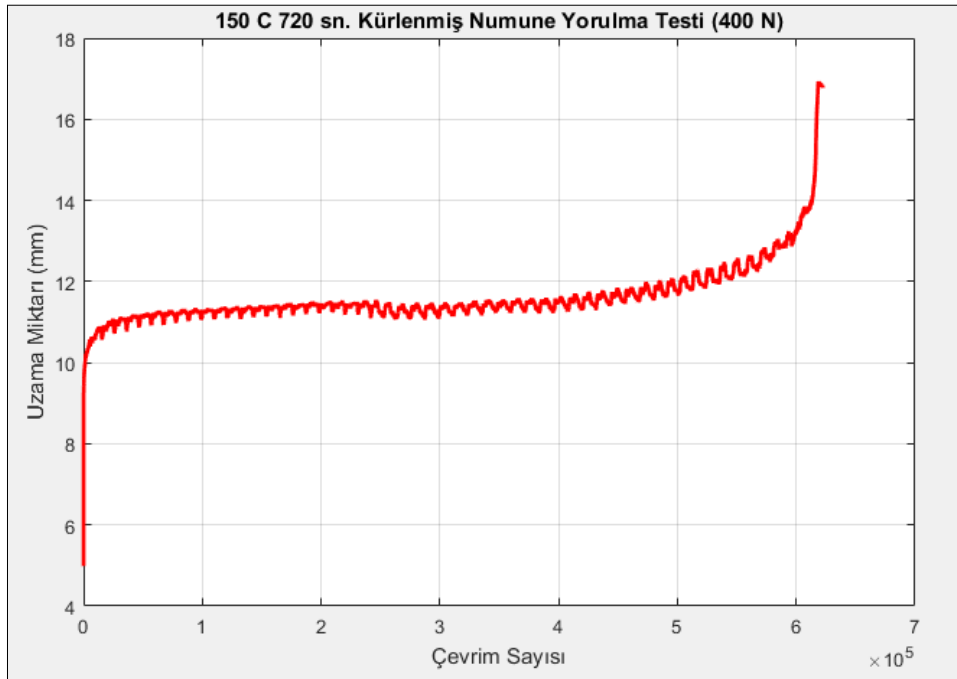
Test numunesi yorulma testi başlangıcında 11 mm civarında uzama miktarı gösterirken, uzama miktarı test boyunca 12 mm'ye doğru yavaş bir hızla artış gösterirken, ömür döngüsünün son 10 000 çevriminde 16,9 mm uzama miktarına kadar uzama davranışı gösterip kopma olayı meydana gelmiştir (Şekil 5.68).

Test numunesine ait katılık değeri başlangıçta ilk 10 000 çevrimde hızlı bir düşme trendi göstererek 51 N/mm'den 36 N/mm'ye düşmekte ve ardından kopma olayı başlangıcına kadar 28 N/mm değerine kadar yavaş bir hızla azalma göstermiştir. Kopma noktasında ise

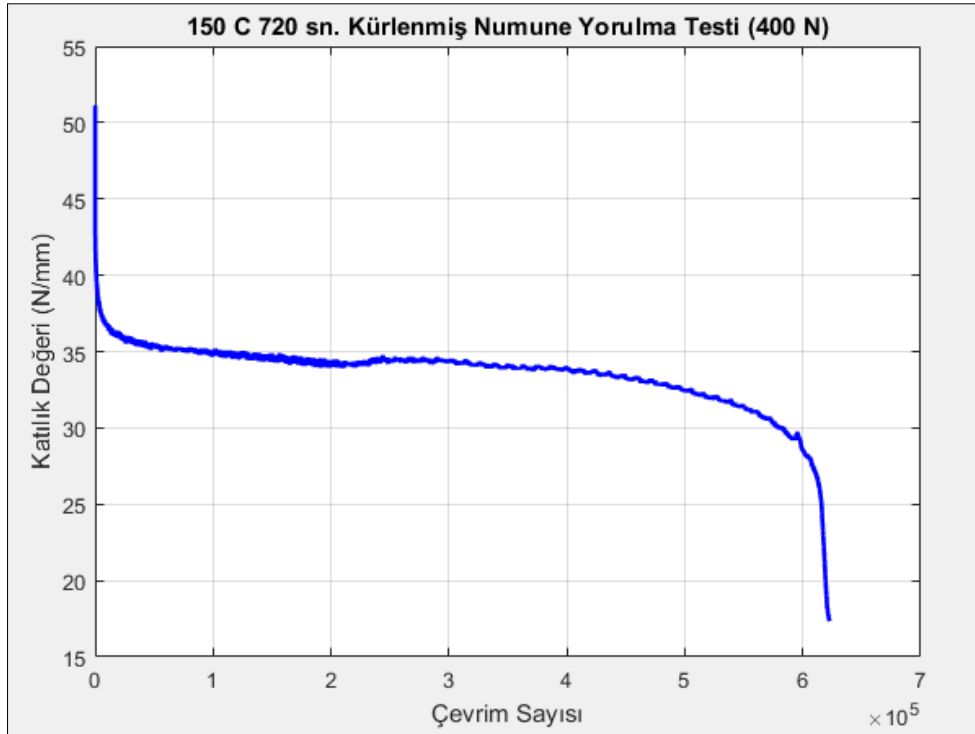
son katılık değeri 17,4 N/mm değerine kadar düşmüştür (Şekil 5.69). Katılık değerinin çok hızlı düştüğü ve kopma olayının meydana geldiği bu bölüm ise toplam ömür olan 622 601 çevrimin %3'lük bölümüne denk gelmektedir. Test numunesinin toplam yorulma ömür değeri 622 601 çevrim olarak kayıt altına alınmıştır.



Şekil 5.67. 150 °C 720 sn kürlenmiş numune yorulma testi çekme kuvveti grafiği



Şekil 5.68. 150 °C 720 sn kürlenmiş numune yorulma testi uzama miktarı grafiği

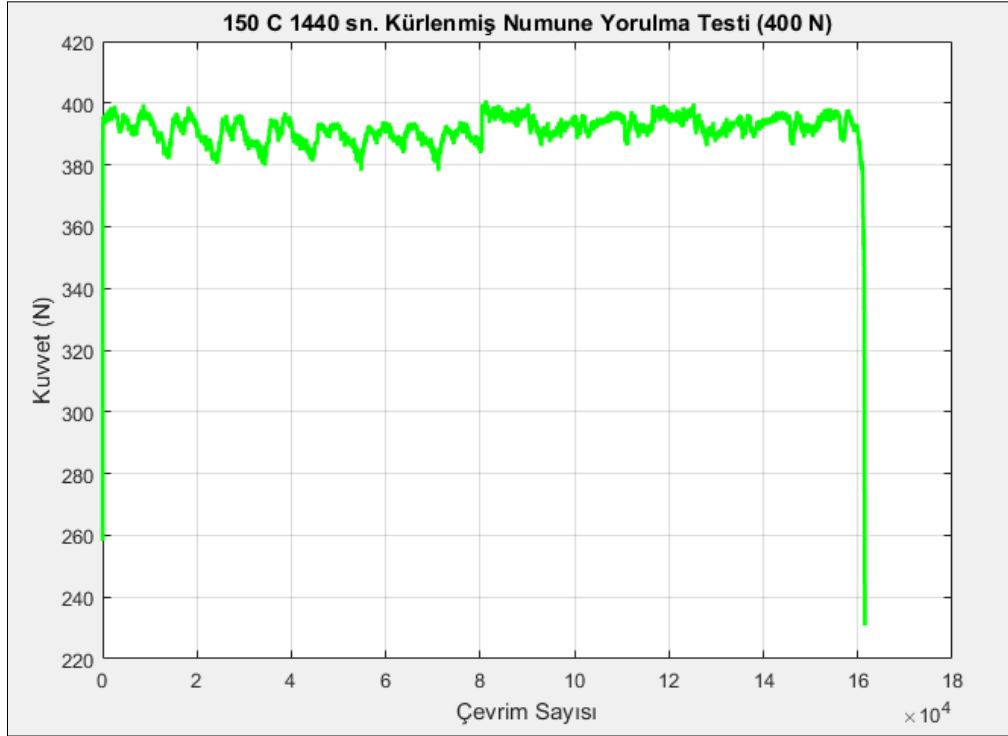


şekil 5.69. 150 °C 720 sn kürlenmiş numune yorulma testi katılık değeri grafiği

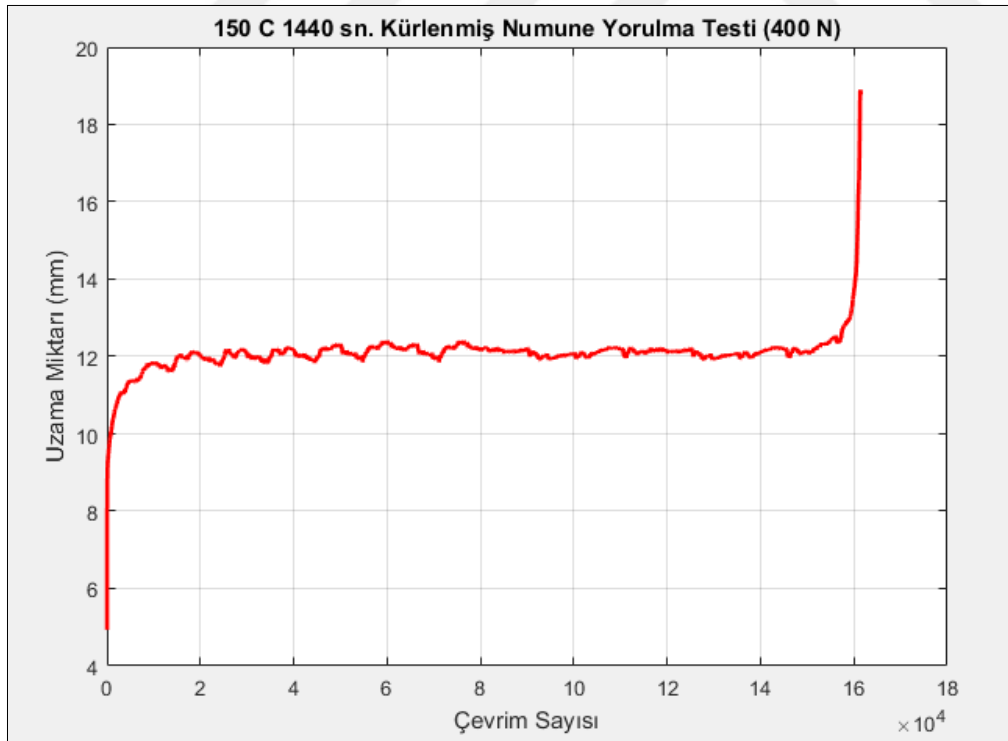
150 °C sıcaklıkta 1440 saniye kürlenen numuneye ait hızlandırılmış yorulma testi 400 N sinüs mod yük altında gerçekleştirilmiştir. Test numunesine yorulma ömür testi boyunca uygulanan kuvvet 380-400 N aralığında  l  lm ştir (şekil 5.70).

Test numunesi yorulma testi başlangıcında 12 mm civarında uzama miktarı gösterirken, uzama miktarı test boyunca 12,5 mm'ye doğru yavaş bir şekilde yükselme gösterirken, ömür döngüsünün son 6000 çevriminde 18,9 mm uzama miktarına kadar uzama davranışı gösterip kopma olayı meydana gelmiştir (şekil 5.71).

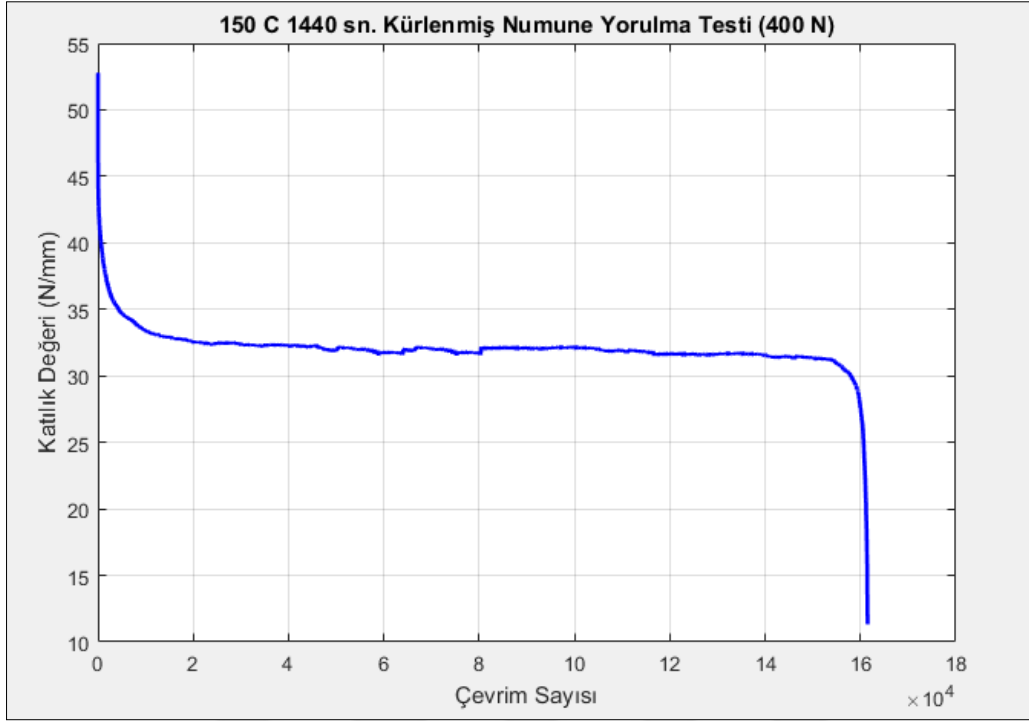
Test numunesine ait katılık değeri başlangıçta ilk 2000 çevrimde hızlı bir düşme trendi göstererek 52 N/mm'den 33 N/mm'ye düşmekte ve ardından kopma olayı başlangıcına kadar 31 N/mm değerine doğru yavaş bir hızda azalma göstermiştir. Katılık değerinin çok hızlı düştüğü ve kopma olayının meydana geldiği bölüm toplam ömür olan 65 851 çevrimin %5'lik bölümüne denk gelmektedir. Test numunesinin toplam ömrü 160 501 çevrim olarak kayıt altına alınmıştır. Kopma noktasında son katılık değeri 11,32 N/mm değerine kadar d şm ştir (şekil 5.72).



şekil 5.70. 150 °C 1440 sn kürlenmiş numune yorulma testi çekme kuvveti grafiği



şekil 5.71. 150 °C 1440 sn kürlenmiş numune yorulma testi uzama miktarı grafiği

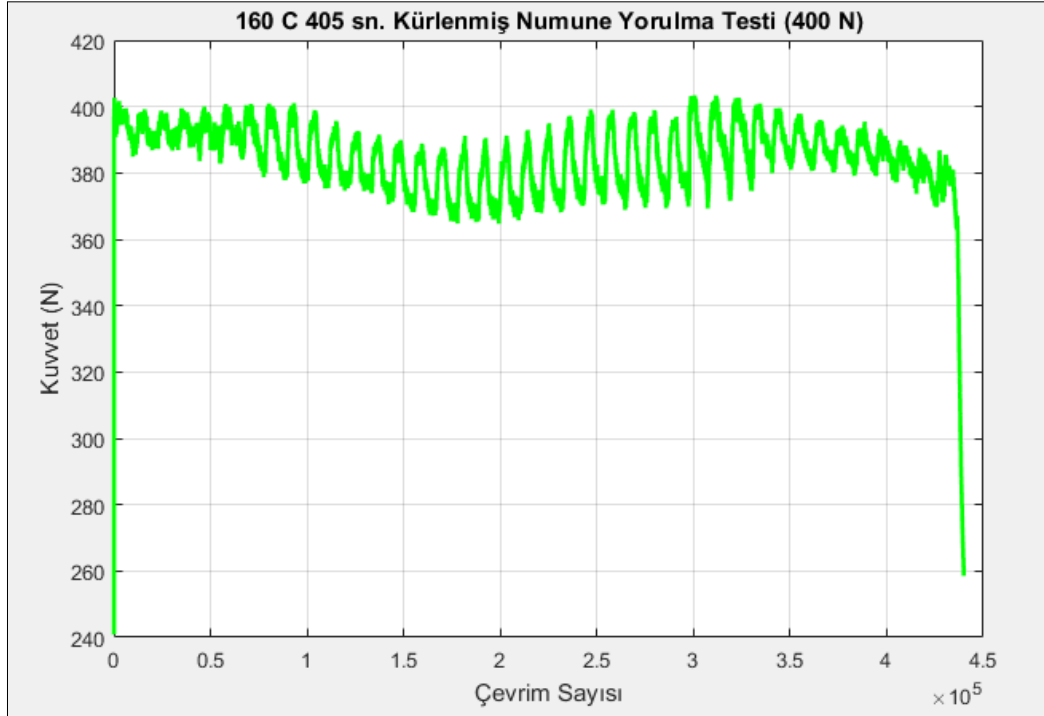


şekil 5.72. 150 °C 1440 sn kürlenmiş numune yorulma testi katılık değeri grafiği

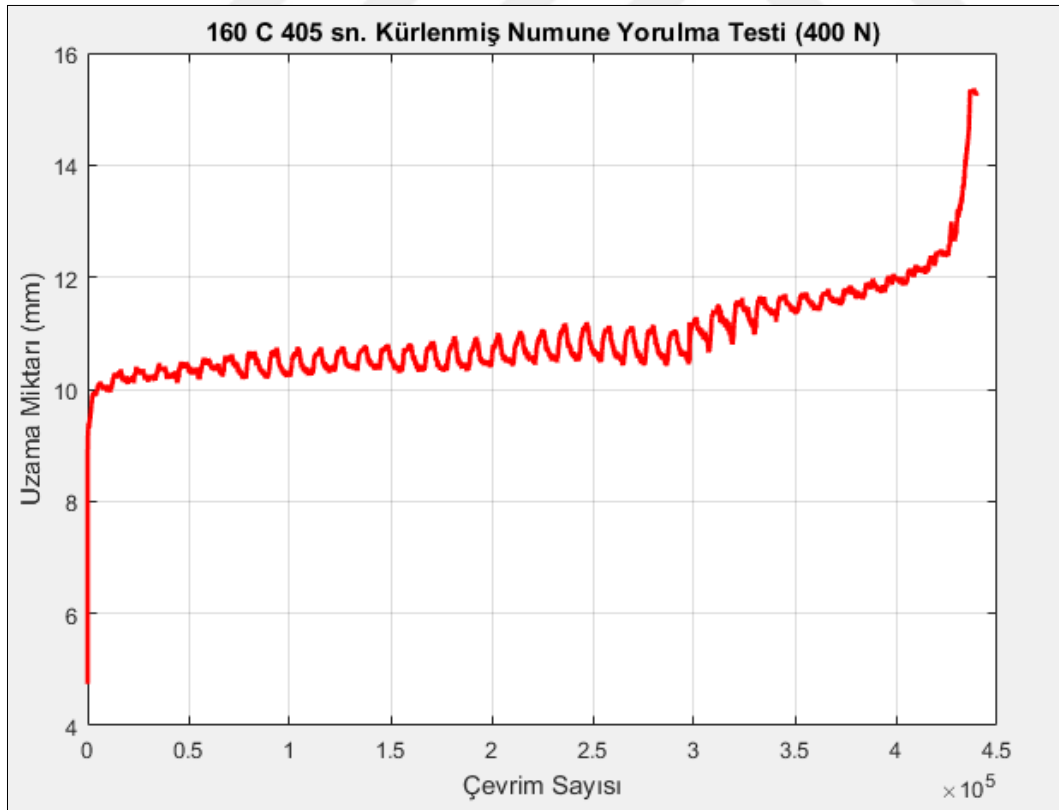
160 °C sıcaklıkta 405 saniye kürlenen numuneye ait hızlandırılmış yorulma testi 400 N sinüs mod yük altında gerçekleştirilmiştir. Test numunesine yorulma ömür testi boyunca uygulanan kuvvet 370-405 N aralığında ölçülmüştür (şekil 5.73).

Test numunesi yorulma testi başlangıcında 10 mm civarında uzama miktarı gösterirken, uzama miktarı test boyunca 13 mm'ye doğru yavaş bir hızda artış gösterirken, ömür döngüsünün son 6000 çevriminde 15,3 mm uzama miktarına kadar uzama davranışı gösterip kopma olayı meydana gelmiştir (şekil 5.74).

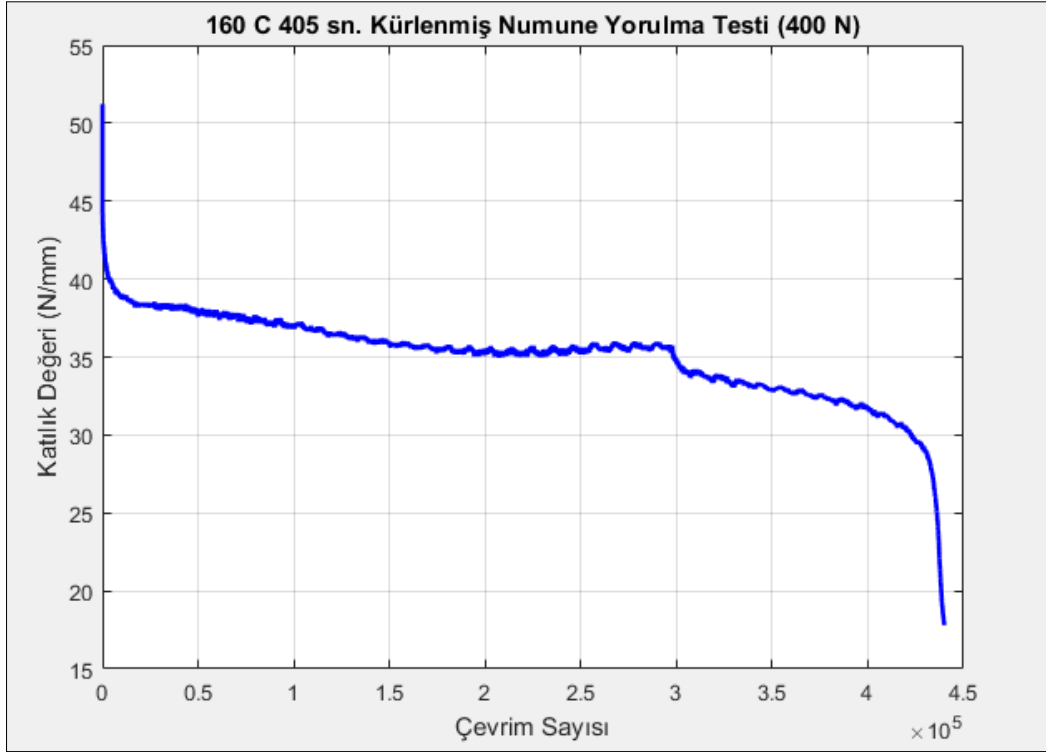
Test numunesine ait katılık değeri başlangıçta ilk 10 000 çevrimde hızlı bir düşme trendi göstererek 51 N/mm'den 38 N/mm'ye düşmekte ve ardından kopma olayı başlangıcına kadar 30 N/mm değerine kadar yavaş bir hızda azalma göstermiştir. Kopma noktasında ise son katılık değeri 17,8 N/mm değerine kadar düşmüştür (şekil 5.75). Katılık değerinin çok hızlı düştüğü ve kopma olayının meydana geldiği bu bölüm ise toplam ömür olan 439 901 çevrimin %2'lik bölümüne denk gelmektedir. Test numunesinin toplam  m r  439 901 çevrim olarak kayıt altına alınmıştır.



şekil 5.73. 160 °C 405 sn kürlenmiş numune yorulma testi çekme kuvveti grafiği



şekil 5.74. 160 °C 405 sn kürlenmiş numune yorulma testi uzama miktarı grafiği

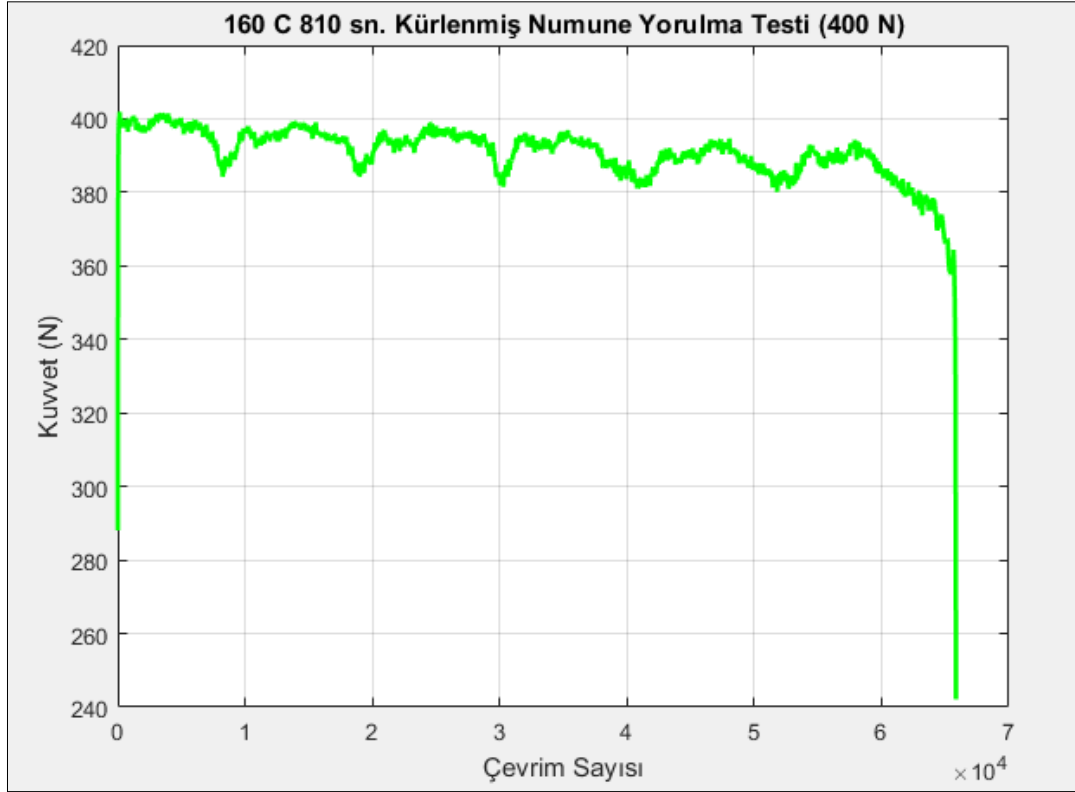


şekil 5.75. 160 °C 405 sn kürlenmiş numune yorulma testi katılık değeri grafiği

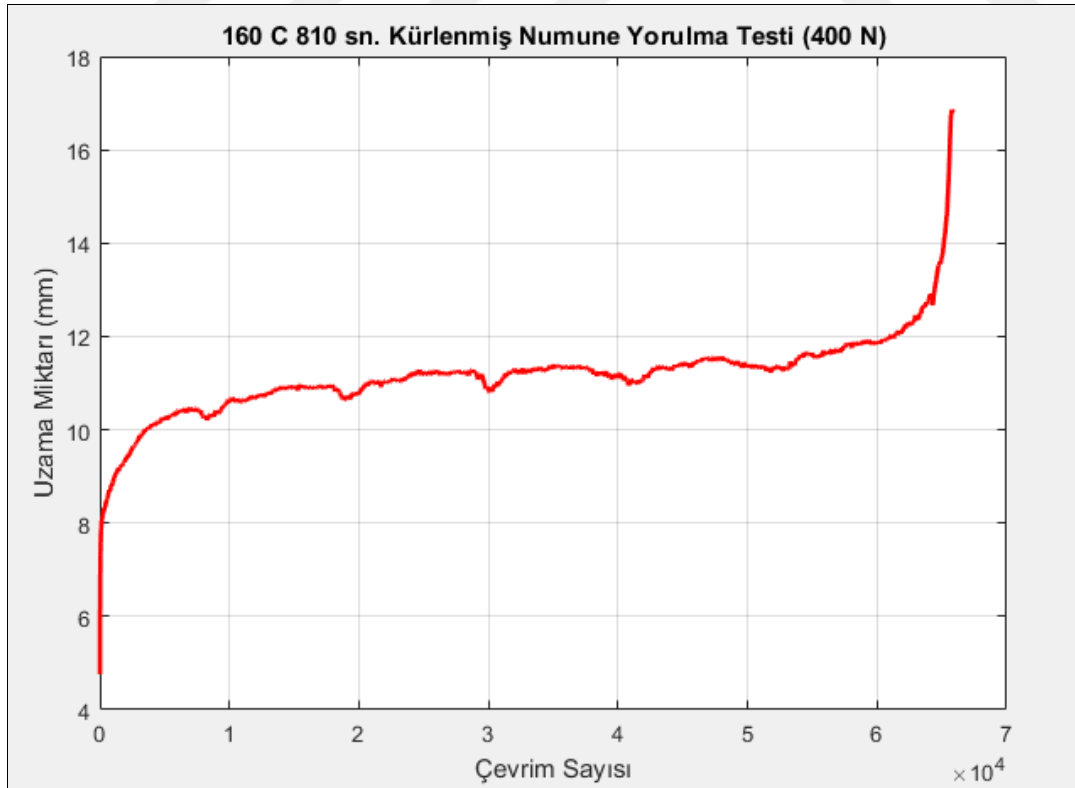
160 °C sıcaklıkta 810 saniye kürlenen numuneye ait hızlandırılmış yorulma testi 400 N sinüs mod yük altında gerçekleştirilmiştir. Test numunesine yorulma ömür testi boyunca uygulanan kuvvet 380-400 N aralığında  l  lm ştir (şekil 5.76).

Test numunesi yorulma testi başlangıcında 8 mm civarında uzama miktarı gösterirken, uzama miktarı test boyunca 12 mm'ye doğru artış gösterirken, ömür döngüsünün son 5000 çevriminde 16,85 mm uzama miktarına kadar uzama davranışı gösterip kopma olayı meydana gelmiştir (şekil 5.77).

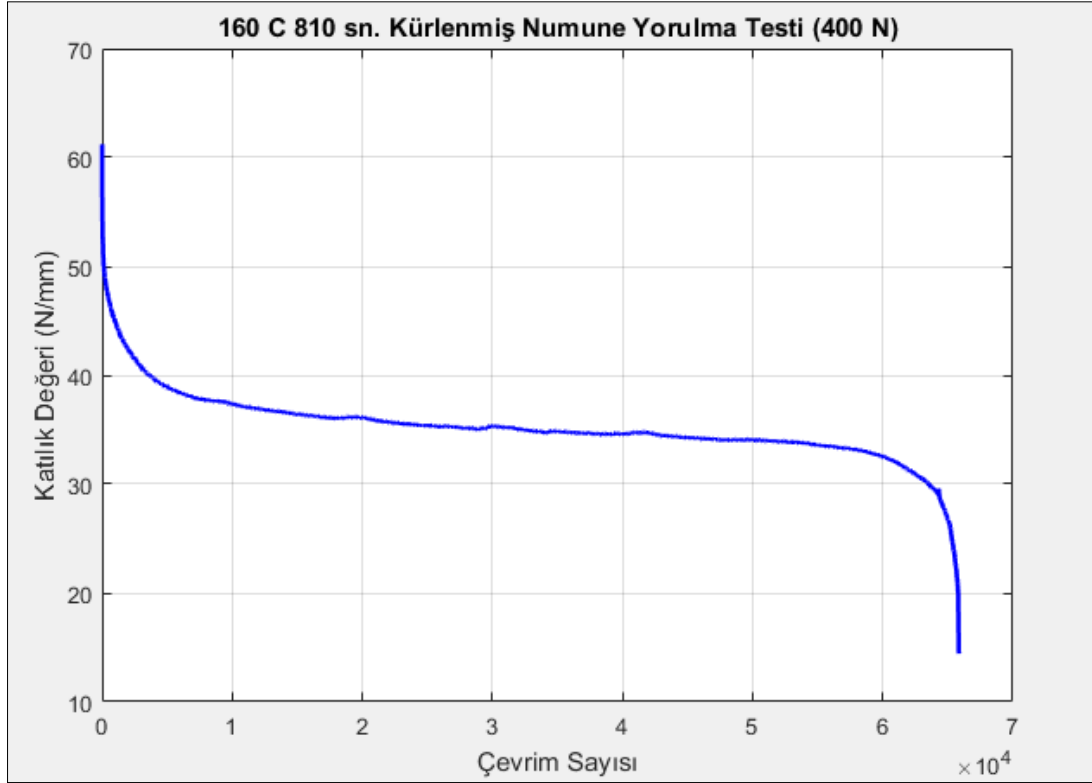
Test numunesine ait katılık değeri başlangıçta ilk 3500 çevrimde hızlı bir düşme trendi göstererek 61 N/mm'den 40 N/mm'ye düşmekte ve ardından kopma olayı başlangıcına kadar 30 N/mm değerine kadar yavaş bir hızda azalma göstermiştir. Kopma noktasında ise son katılık değeri 14 N/mm değerine kadar d şm ştir (şekil 5.78). Katılık değerinin çok hızlı düştüğü ve kopma olayının meydana geldiği bu bölüm ise toplam ömür olan 65 851 çevrimin %3'l k bölümüne denk gelmektedir. Test numunesinin toplam ömrü 65 851 çevrim olarak kayıt altına alınmıştır.



şekil 5.76. 160 °C 810 sn kürlenmiş numune yorulma testi çekme kuvveti grafiği



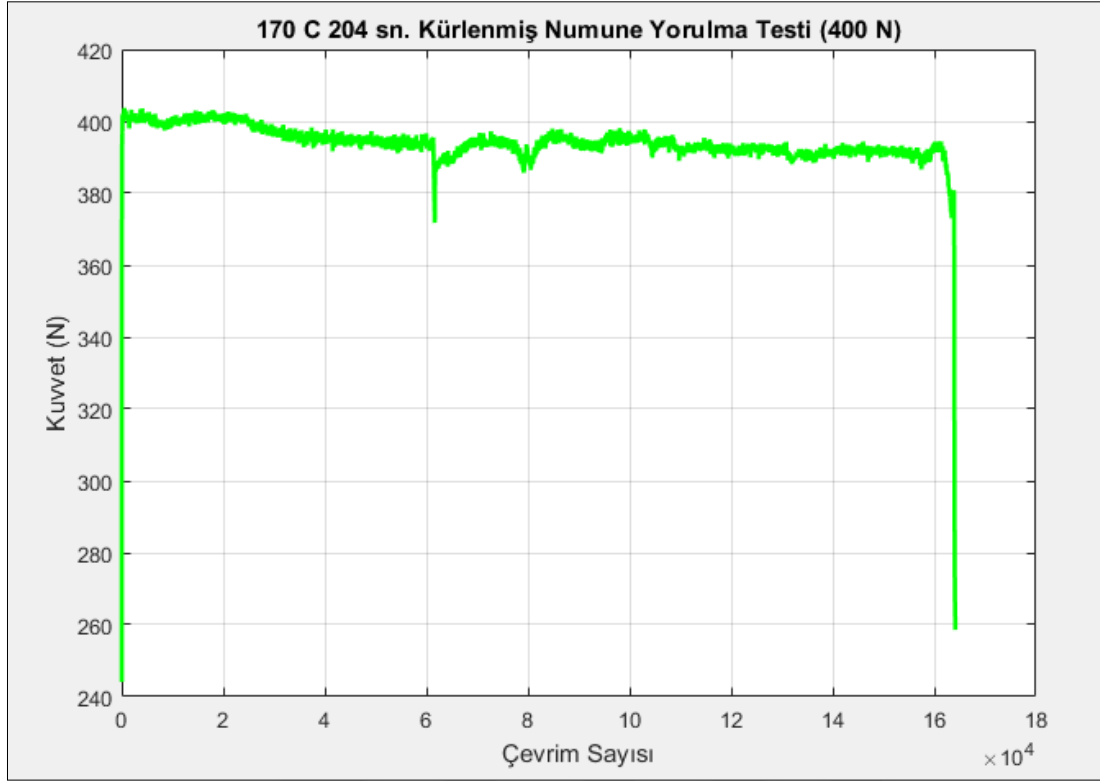
şekil 5.77. 160 °C 810 sn kürlenmiş numune yorulma testi uzama miktarı grafiği



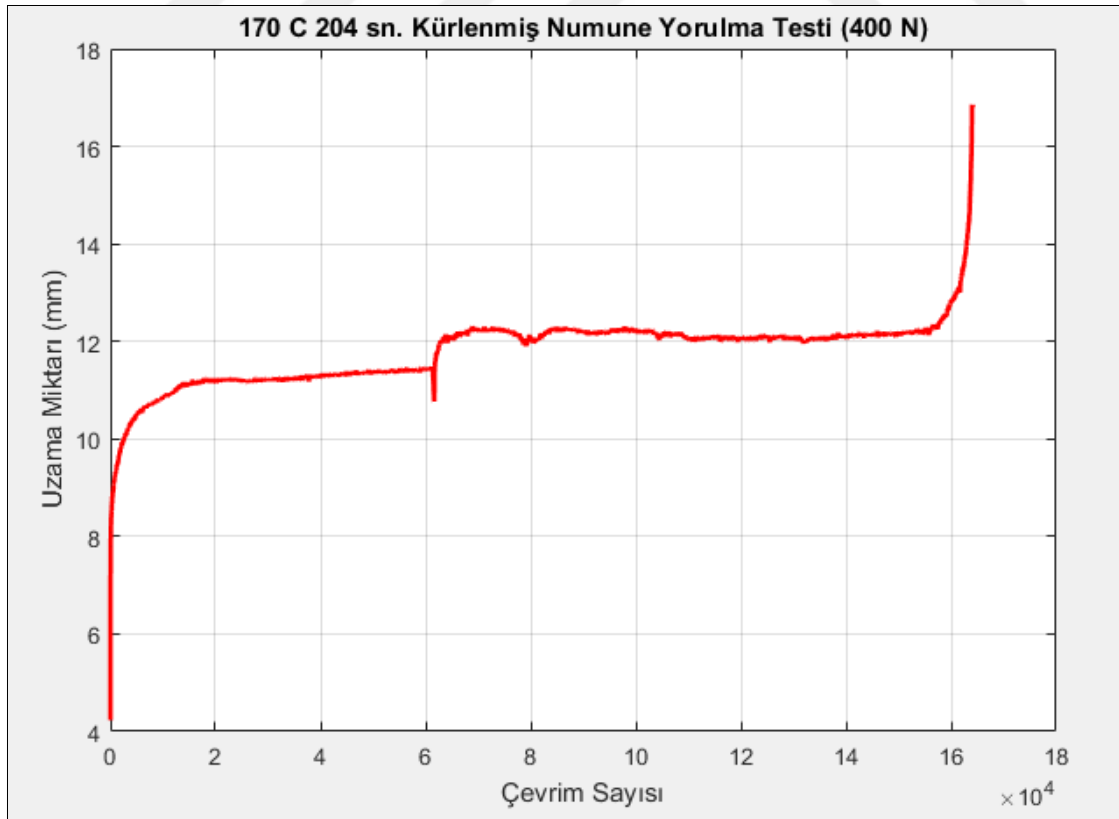
şekil 5.78. 160 °C 810 sn kürlenmiş numune yorulma testi katılık değeri grafiği

170 °C sıcaklıkta 204 saniye kürlenen numuneye ait hızlandırılmış yorulma testi 400 N sinüs mod yük altında gerçekleştirilmiştir. Test numunesine yorulma ömür testi boyunca uygulanan kuvvet 390-405 N aralığında  l  lm ştir (şekil 5.79). Test numunesi yorulma testi başlangıcında 11 mm civarında uzama miktarı gösterirken, 60 000 çevrim 11,5 mm civarında stabilize olmuş ve daha sonra ise 90 000 çevrim 12,4 mm civarında  l  lm ştir. (şekil 5.80.). Kopma bölgesinde uzama miktarı ise son 8000 çevrim içerisinde 12,4 mm'den 16,85 mm'ye kadar artmış ve ardından kopma gerçekleşmiştir.

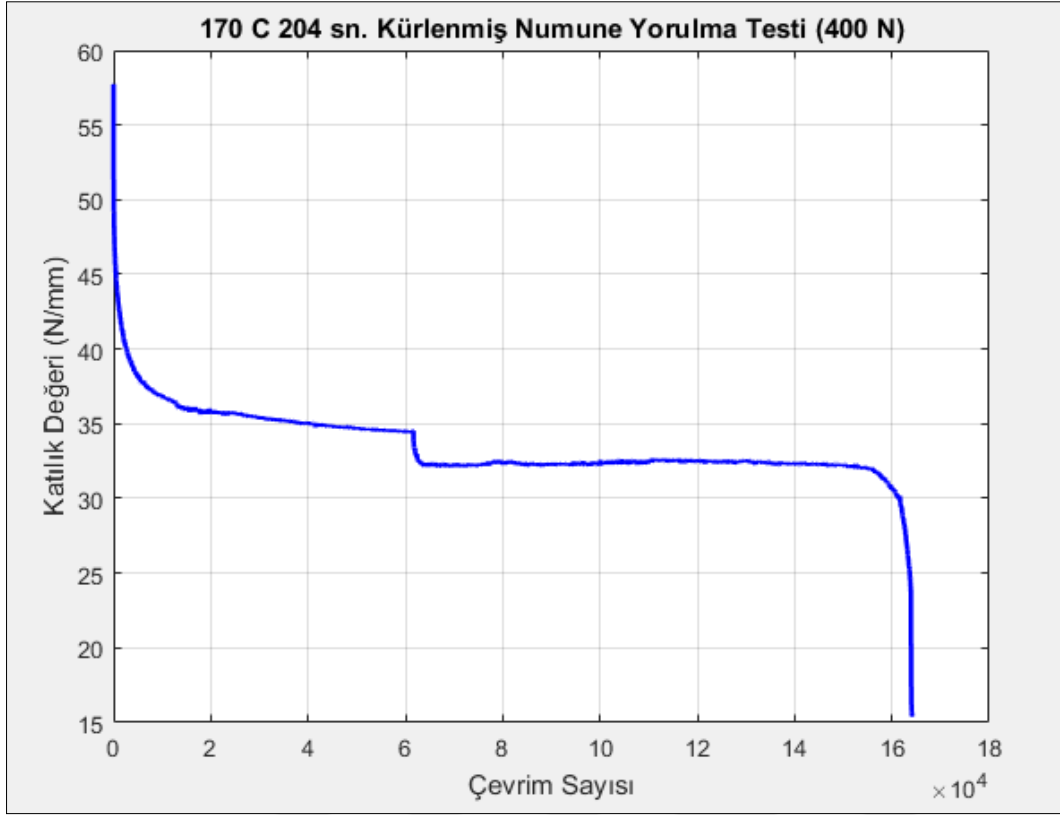
Test numunesine ait katılık değeri başlangıçta ilk 8000 çevrimde hızlı bir düşme trendi göstererek 57,5 N/mm'den 37,5 N/mm'ye düşmekte ve ardından stabil bir yapıda 32 N/mm civarında  l  lm ştir. Kopma noktasında ise son katılık değeri 15,5 N/mm değerine kadar d şm ştir (şekil 5.81). Katılık değerinin çok hızlı düştüğü ve kopma olayının meydana geldiği bu bölüm ise toplam ömür olan 164 151 çevrimin %5'lik bölümüne denk gelmektedir. Test numunesinin toplam  m r  164 151 çevrim olarak kayıt altına alınmıştır.



şekil 5.79. 170  C 204 sn kürlenmiş numune yorulma testi çekme kuvveti grafiği



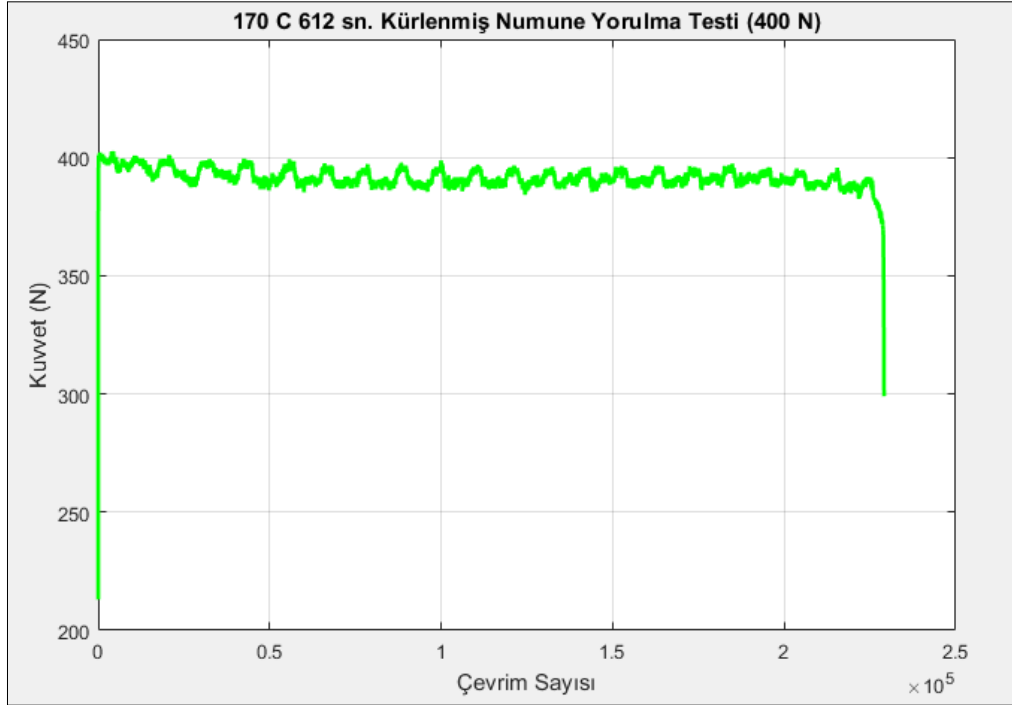
şekil 5.80. 170  C 204 sn kürlenmiş numune yorulma testi uzama miktarı grafiği



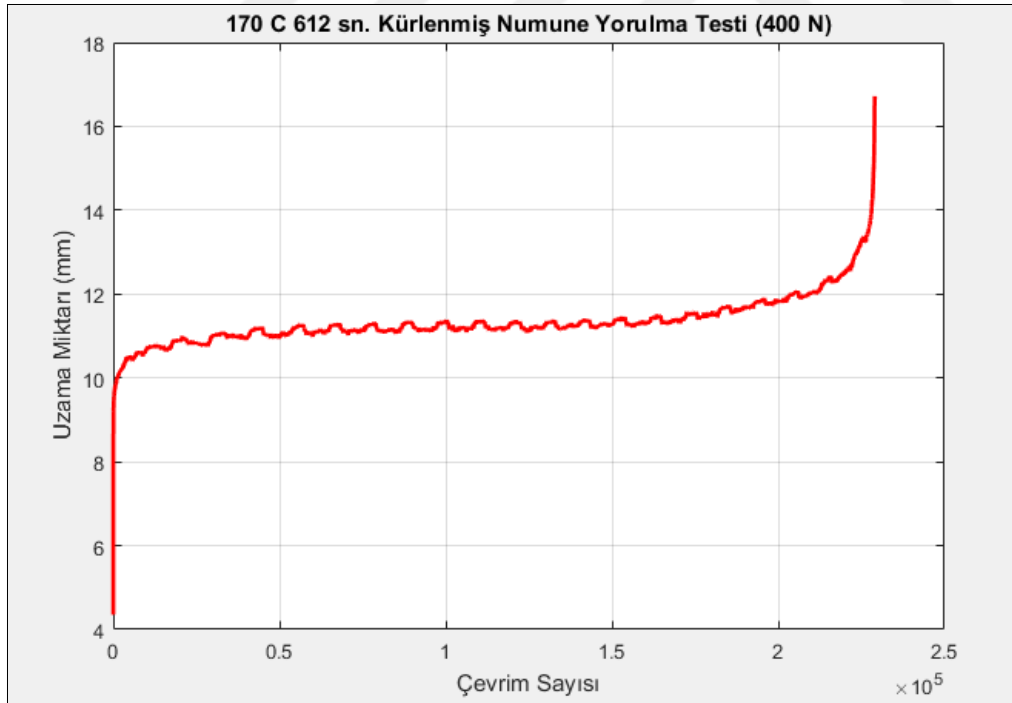
şekil 5.81. 170 °C 204 sn kürlenmiş numune yorulma testi katılık değeri grafiği

170 °C sıcaklıkta 612 saniye kürlenen numuneye ait hızlandırılmış yorulma testi 400 N sinüs mod yük altında gerçekleştirilmiştir. Test numunesine yorulma ömür testi boyunca uygulanan kuvvet 390-400 N aralığında  l  lm ştir (şekil 5.82). Test numunesi yorulma testi başlangıcında 10,5 mm civarında uzama miktarı gösterirken, uzama miktarı test boyunca 12,5 mm'ye doğru yavaş bir hızda artış gösterirken, ömür döngüsünün son 7000 çevriminde 16,5 mm uzama miktarına kadar uzama davranışı gösterip kopma olayı meydana gelmiştir (şekil 5.83).

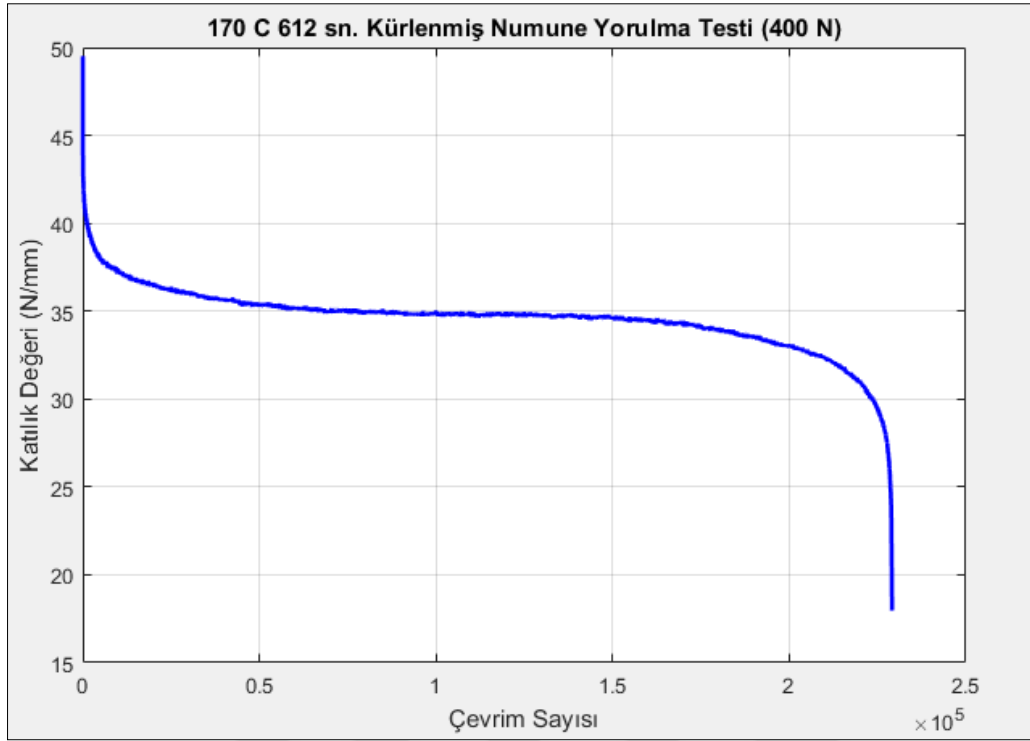
Test numunesine ait katılık değeri başlangıçta ilk 8000 çevrimde hızlı bir düşme trendi göstererek 49,5 N/mm'den 37,5 N/mm'ye düşmekte ve ardından kopma olayı başlangıcına kadar 33 N/mm değerine doğru yavaş bir hızda azalma göstermiştir. Kopma noktasında ise son katılık değeri 18 N/mm değerine kadar d şm ştir (şekil 5.84). Katılık değerinin çok hızlı düştüğü ve kopma olayının meydana geldiği bu bölüm ise toplam ömür olan 229 101 çevrimin %7'lik bölümüne denk gelmektedir. Test numunesinin toplam  m r  229 101 çevrim olarak kayıt altına alınmıştır.



şekil 5.82. 170 °C 612 sn kürlenmiş numune yorulma testi çekme kuvveti grafiği

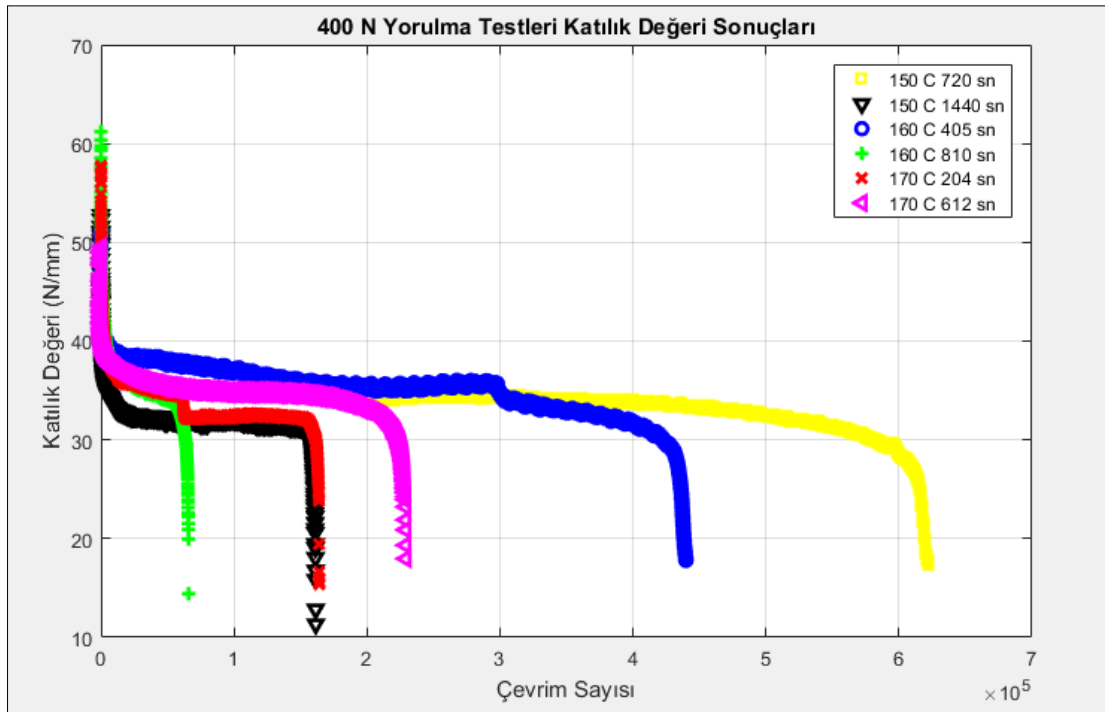


şekil 5.83. 170 °C 612 sn kürlenmiş numune yorulma testi uzama miktarı grafiği

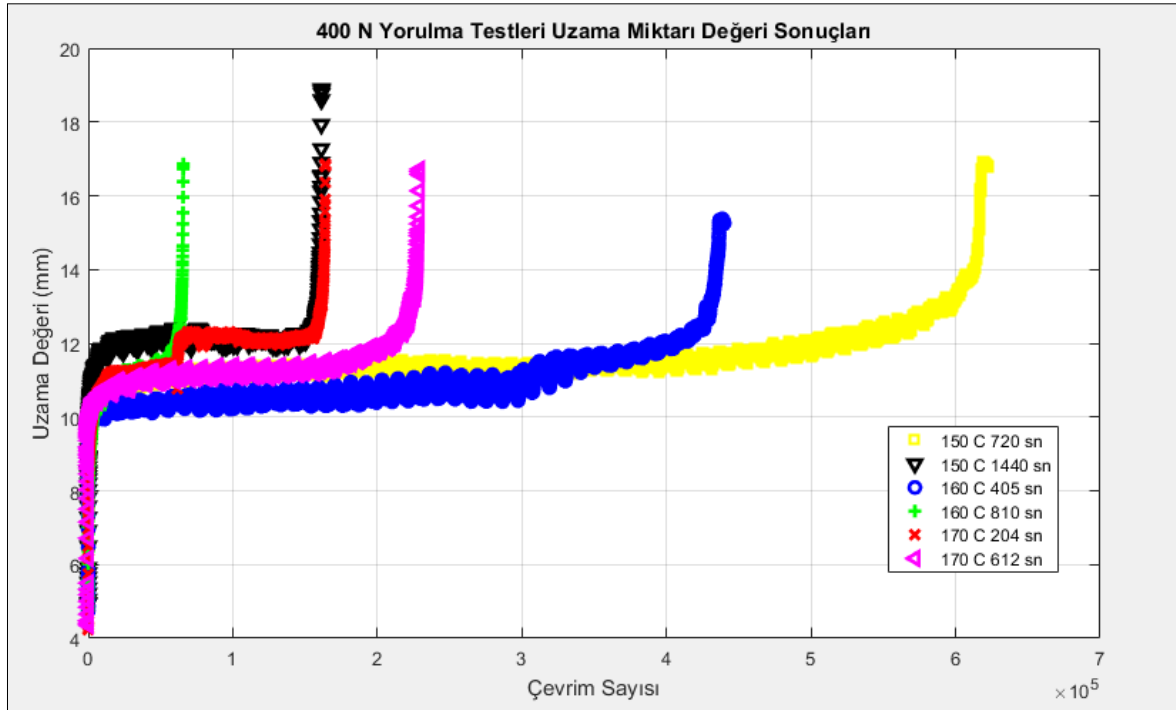


şekil 5.84. 170  C 612 sn kürlenmiş numune yorulma testi katılık değeri grafiği

400 N yük altında gerçekleştirilen 6 adet yorulma testine ait uzama miktarı ve katılık değerlerine ait karşılaştırma sonuçları ise sırasıyla şekil 5.85 ve şekil 5.86’da sunulmuştur.



şekil 5.85. 400 N yorulma ömür testleri 6 numuneye ait katılık değerleri



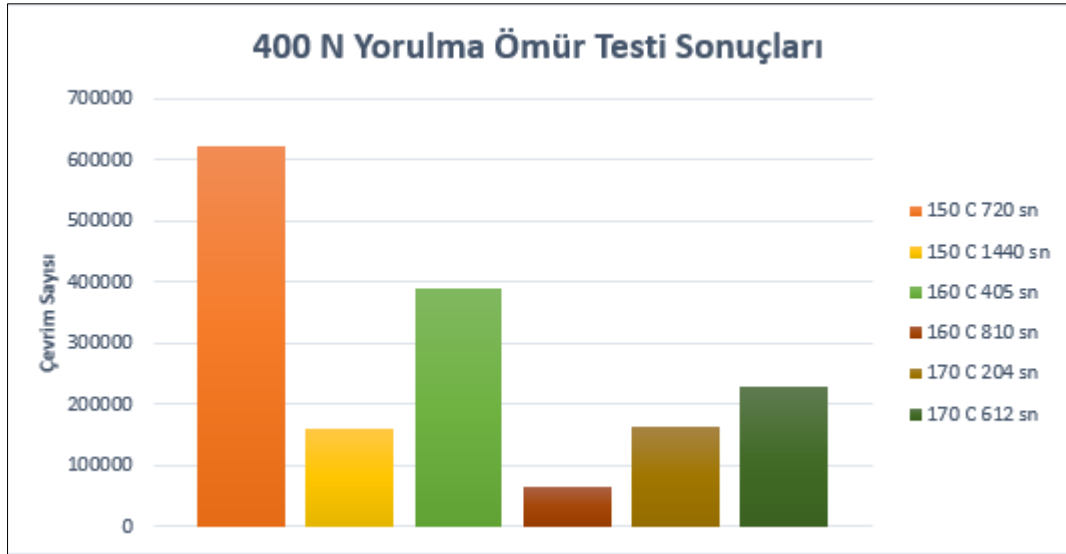
Şekil 5.86. 400 N yorulma ömür testleri 6 numuneye ait uzama miktarı değerleri

400 N yük altında gerçekleştirilen 6 adet yorulma testine ait yorulma ömür süreleri Çizelge 5.11’de özetlenmiştir.

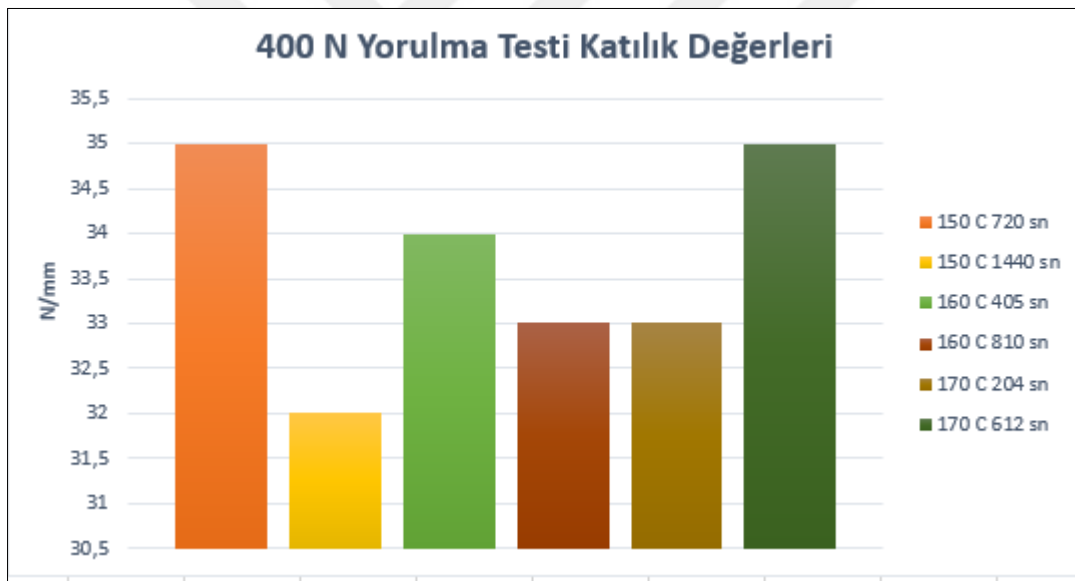
Çizelge 5.11. 400 N yük altında gerçekleştirilen yorulma ömür testleri sonuçları

Numune numarası	Kürlenme Sıcaklığı (°C)	Kürlenme Süresi (sn)	Yorulma Ömür süresi (Çevrim)
1	150	720	622 601
2	150	1440	160 501
3	160	405	439 901
4	160	810	65 851
5	170	204	164 151
6	170	612	229 101

350 N yorulma testlerine ait yorulma ömür süresi karşılaştırmaları Şekil 5.87 ve katılık değerleri karşılaştırmaları ise Şekil 5.90’da sergilenmiştir.



Şekil 5.87. 400 N yorulma testleri ömür süreleri karşılaştırması



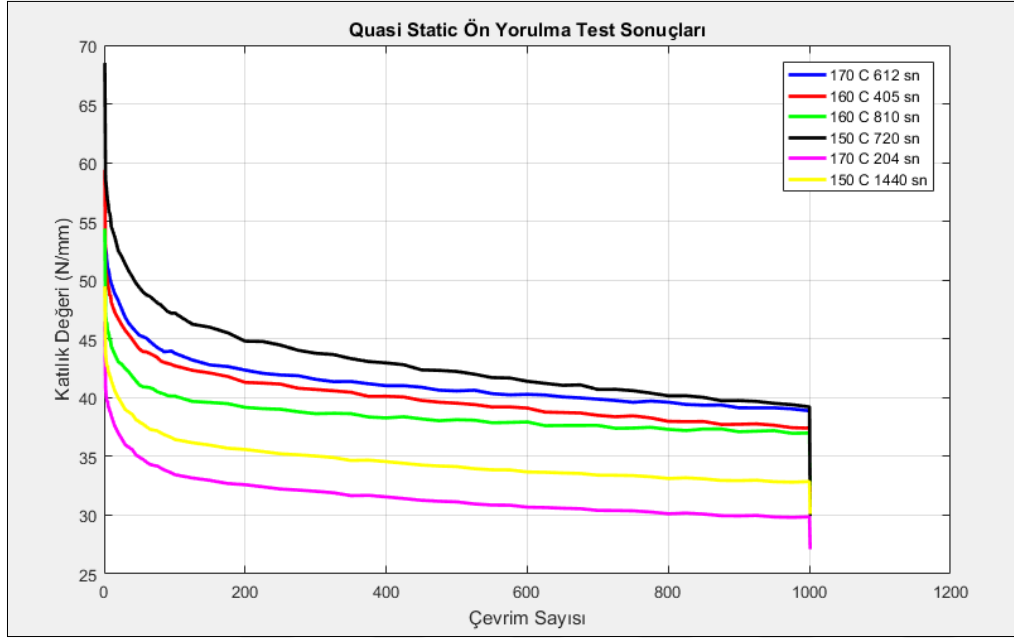
Şekil 5.88. 400 N yorulma testleri katılık değerleri karşılaştırması

5.2.3. Yarı statik çekme testi sonuçlarının incelenmesi

Yapısal analiz sonucu elde edilen uzama miktarlarına karşılık gelen yük miktarları ve test numunelerinin katılık değerlerinin karşılaştırılması amaçlı 6 adet test numunesine quasi statik çekme testi uygulanmıştır.

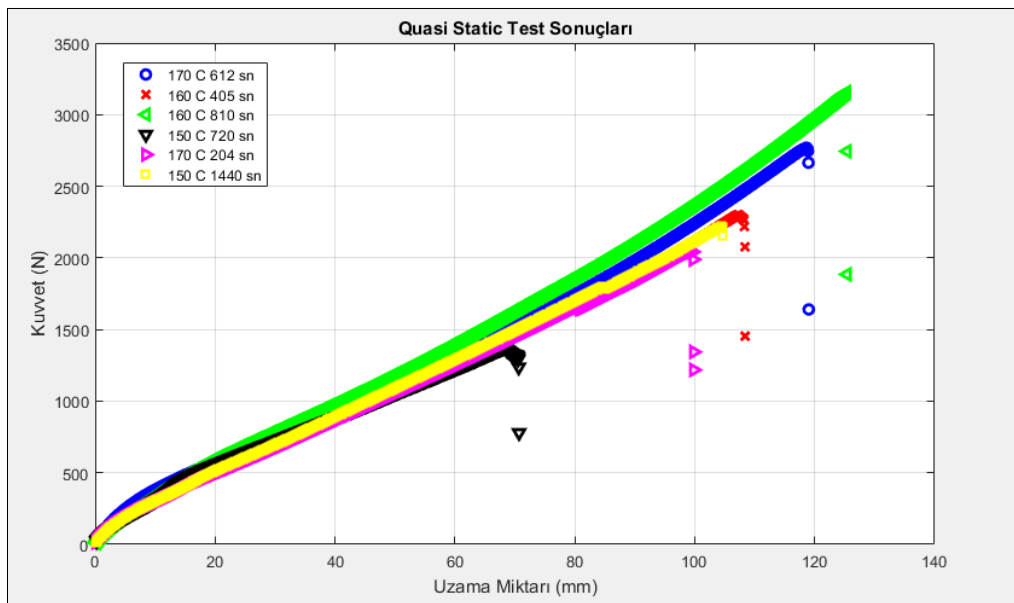
Literatür çalışmalarında belirtildiği üzere test numunelerinin iç yapı bağ dizilimlerinin oturması ve Mullins etkisinden en az şekilde etkilenmeleri amacı ile yarı statik test öncesi

test numuneleri 1000 çevrim yorulma testine tabi tutularak, katılık değerlerinin denge bölgesine çekilmesi hedeflenmiştir. Test numunelerine ait 1000 çevrim katılık değeri değişimleri Şekil 5.89’de görülmektedir.



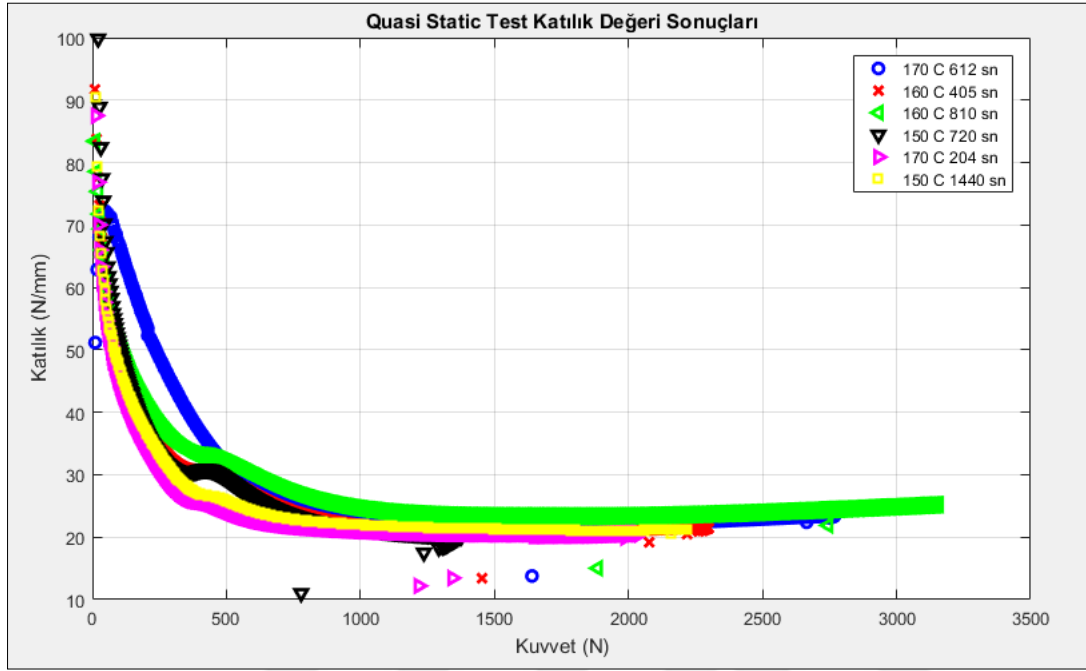
Şekil 5.89. Yarı statik test öncesi 1000 çevrim yorulma testi katılık değerleri sonuçları

Yarı statik çekme testlerinde kopma noktasına kadar olan kuvvet uzama miktarı sonuçları Şekil 5.90’da sunulmuştur.



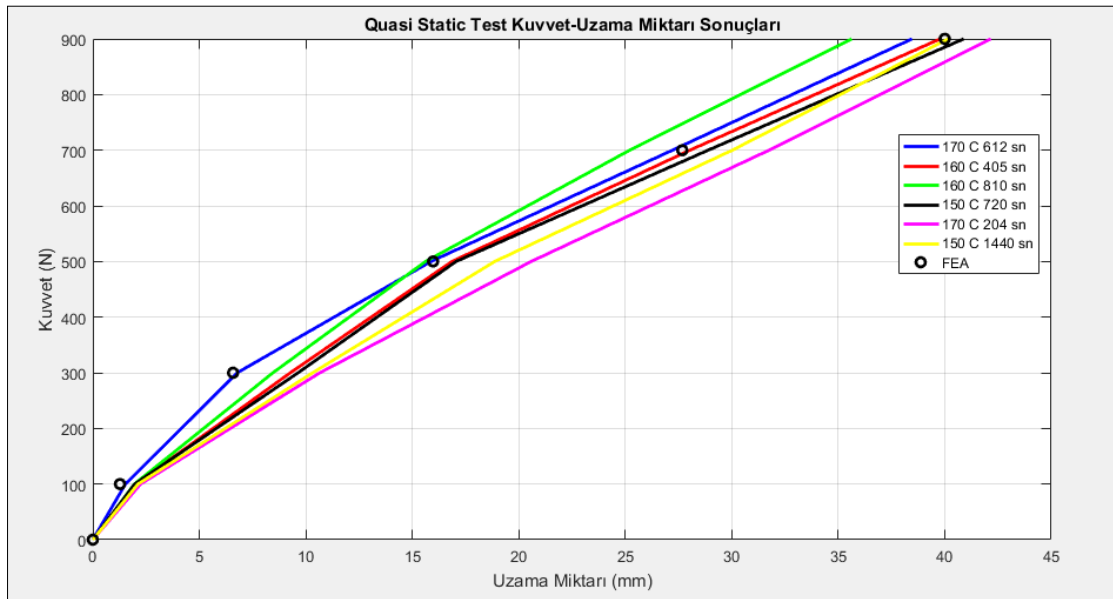
Şekil 5.90. Yarı statik testler kopma noktasına kadar kuvvet uzama miktarı sonuçları

Quasi statik test esnasında kopma noktasına kadar ölçülen katılık değerleri Şekil 5.91’de sunulmuştur.



Şekil 5.91. Yarı statik testler çekme kuvvetine karşılık katılık değeri değişim sonuçları

Yapısal sonlu elemanlar analizi sonuçları ile quasi statik çekme testinde elde edilen kuvvete karşılık uzama miktarı sonuçlarının karşılaştırılması Şekil 5.92’de sunulmuştur.

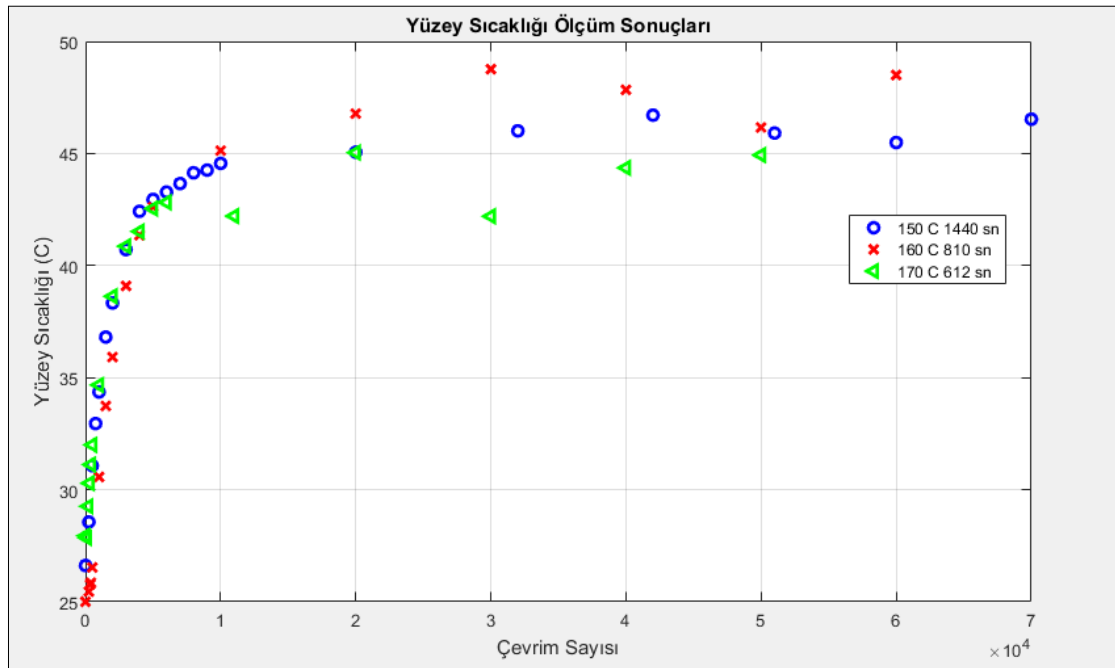


Şekil 5.92. Yapısal sonlu elemanlar analizi ile yarı statik test kuvvet uzama miktarı karşılaştırması

5.2.4. Test numunesi yüzey sıcaklığı ölçüm sonuçlarının incelenmesi

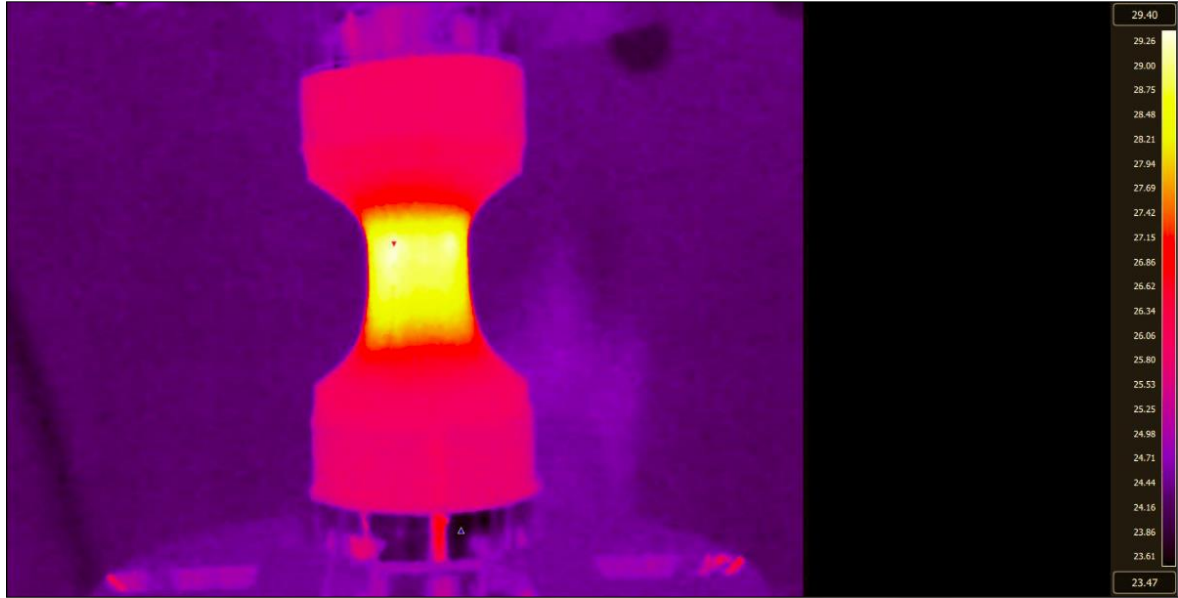
Termal yorulma etkisini incelemek amaçlı ikinci set parametrelerle kürlenmiş numulere ait 3 adet yorulma ömür testi esnasında ilk 5 saatlik zaman diliminde belirli aralıklarda termal kamera ile yüzey sıcaklığı ölçümü yapılmıştır. İlgili sonuçları Şekil 5.93’da sunulmuştur.

Ölçülen toplam sıcaklık değişim değeri 150 °C 1440 sn 400 N yük koşulu yorulma testi için 17,19 derece, 160 °C 810 sn 400 N yük koşulu yorulma testi için 23,76 derece, 170 °C 612 sn 400 N yük koşulu yorulma testi için 20,09 derece olarak ölçülmüştür.

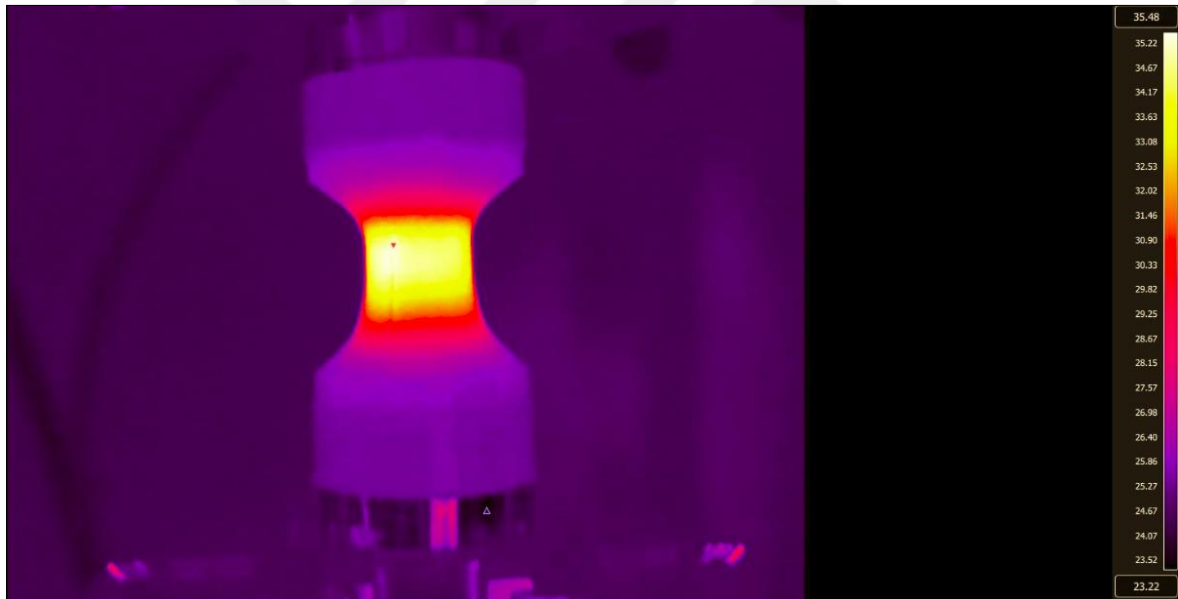


Şekil 5.93 Yorulma testleri yüzey sıcaklığı ölçüm sonuçları

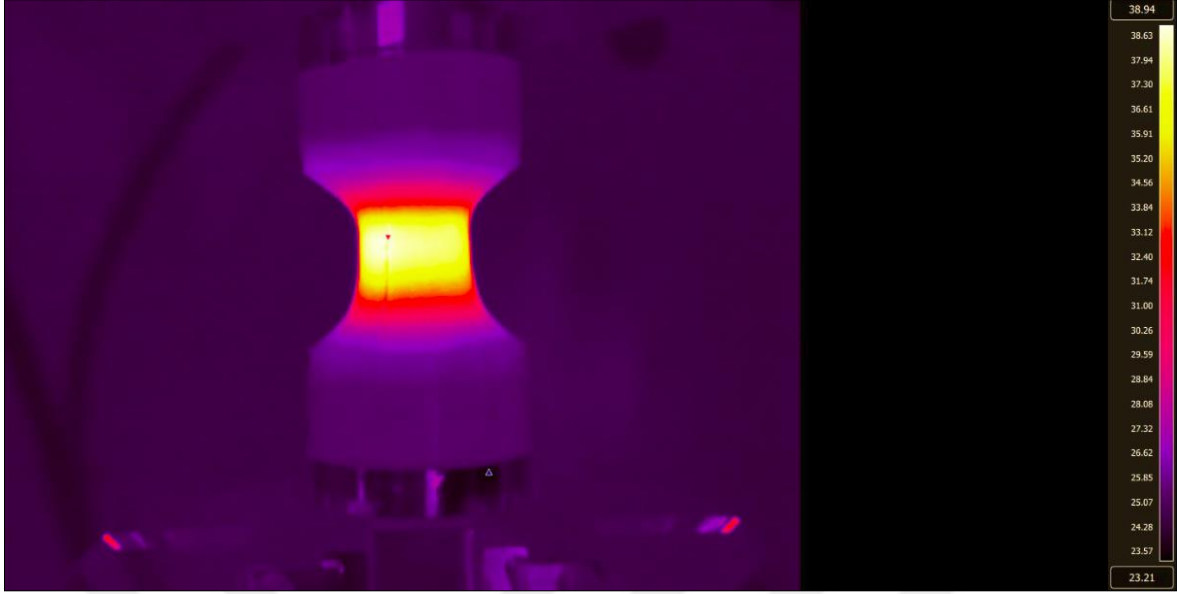
Termal yüzey sıcaklığı ölçümlerinden örnek bir sıcaklık dağılımı Resim 5.2’de görüldüğü üzere, en yüksek sıcaklık merkezi diablo numunesinin merkez bölgesidir. Resim 5.2 ve Resim 5.3’de 1000 ve 2000nci çevrimlere ait yüzey sıcaklıkları görülmektedir.



Resim 5.1. Test numunesi yorulma ömür testi 200. çevrim yüzey sıcaklığı dağılımı



Resim 5.2. Test numunesi yorulma ömür testi 1000. çevrim yüzey sıcaklığı dağılımı



Resim 5.3. Test numunesi yorulma ömür testi 2000. çevrim yüzey sıcaklığı dağılımı

5.3. Yorumlar ve Tartışma

Önceki çalışmalar bölümünde doğal kauçuk malzemesinin en yüksek mekanik özelliklere ve kürlenme statüsüne 150 °C sıcaklıkta kürlenme aşamasında ulaşacağı belirtilmektedir. Bu sebeple en yüksek yorulma ömrü değerinin literatüre göre 150 °C ile üretilen numune türüne ait olması beklenmekteydi.

Literatür çalışmalarında doğal kauçuğa ait üretim aşamasında, optimum kürlenme süresi üzerinde gerçekleşen kürlenme sürelerinde iç bağ yapısının hızlı bir şekilde bozulma davranışı gösterdiği ve doğal kauçuğa ait mekanik özelliklerin hızlı bir şekilde olumsuz etkilendiği dikkat çekmektedir.

Tez çalışması için seçilen sıcaklıklara ait reoloji grafikleri incelendiğinde en yüksek M_H değerinin 150 °C sıcaklıkta kürlenmiş numunede olacağı ve en düşük M_H değerinin ise 170 °C sıcaklıkta kürlenmiş numunede olacağı öngörülmekteydi.

Reoloji çalışmalarında tüm kürlenme sıcaklıklarında optimum kürlenme süresi üzerinde gerçekleşecek kürlenme eğrileri incelendiğinde ise bağ yapısı bozulmakta, bağ yoğunluğu değeri düşmekte ve dolayısı ile yorulma ömrü değerinde düşme beklenmekteydi. Tez çalışması için incelediğimiz yorulma ömür değerinin ise benzer şekilde 150 °C üzeri sıcaklıklarda düşme davranışı göstereceği literatür çalışmalarında belirtilmekteydi.

Tez çalışması için gerçekleştirilen termal analiz sonuçları incelendiğinde ise literatür ve reoloji çalışmalarında belirtilen optimum kurlenme sürelerinde 150 °C 720 sn, 160 °C 405 sn ve 170 °C 204 sn test numunelerinin merkez bölgelerinin reoloji grafiklerinde varsayılan sıcaklık değerlerine ulaşamadıkları analiz edilmiştir. Başka bir deyiş ile tez çalışması için seçilen numunelere ait iç yapı sıcaklık değeri dağılımı tüm bölgelerde eşit olmadığından test numunelerinin her bölgesinin aynı kurlenme davranışına sahip olmadığı ve beklenen optimum mekanik ve fiziksel özellikler gösteremediği gözlemlenmiştir.

150 °C 720 sn numunesinin merkez ve dış yüzey bölgesi arasında 12 derece sıcaklık farkı, 160 °C 405 sn numunesinin merkez ve dış yüzey bölgesi arasında 54 derece sıcaklık farkı ve 170 °C 204 sn numunesinin merkez ve dış yüzey bölgesi arasında 98 derece sıcaklık farkı olduğu analiz edilmiştir.

Termal analiz sonuçları ışığında 170 °C 204 sn sürede üretilen test numunesinin en kötü kurlenme statüsü dağılımına sahip olacağı hatta bazı bölgelerinin hiç kurlenemeyeceği analiz edilmiştir. Bu sebeple 170 °C kurlenme parametresinde ikinci set termal analiz çalışması optimum kurlenme süresinin üç katı süre ile gerçekleştirilmiş ve 98 derece olarak analiz edilen sıcaklık farkının 21 dereceye kadar düşeceği öngörülmüştür. Kurlenme süresi parametresini artırmanın dezavantajı olarak ise reoloji grafiğindeki bilgiler ışığında test numunesi dış yüzeyinin uzun bir süre bozulma eğrisine gireceği öngörülmüştür. İç yapıya ait kurlenme statüsünde elde edilecek iyileşmeye karşılık, dış yüzeyde aşırı kurlenmiş ve bozulmuş bir yapı oluşacağı öngörülmüştür. Numune yüzeylerindeki bozulma davranışını devam ettirecek vulkanizasyon prosesinin nihai ürün kalıptan çıktıktan sonra engellenmesi amacı ile uzun kurlenme süreleri ile üretilen ikinci sete ait numuneler kalıptan çıktıktan hemen sonra buzlu su ortamına alınmışlardır. Böylece dış yüzey bölgelerinde kurlenme hızı yavaşlatılırken, iç bölgelerde ise kurlenme prosesinin aynı şekilde devam ettirilmesi amaçlanmıştır.

Reoloji çalışmaları ve önceki çalışmalar incelendiğinde optimum kurlenme süresi parametresi ile üretilecek 150 °C 720 sn ve 160 °C 405 sn numune türlerinin 170 °C 204 sn numunesinden daha iyi bir yorulma ömrüne sahip olacağı öngörülmekteydi. 150 °C 720 sn ve 160 °C 405 numuneleri kendi aralarında karşılaştırıldıklarında ise 150 °C 720 sn numunesinin 160 °C 405 sn numunesinden daha büyük bir yorulma ömür değerine sahip olduğu literatür çalışmalarında da belirtilmekle beraber termal analiz sonuçları da yine aynı

şekilde 150 °C 720 sn numunesinin daha iyi bir kürlenme statüsü dağılımına ve dolayısı ile daha iyi bir yorulma ömür değerine sahip olacağını öngörmekteydi.

Birinci set kürlenme süresi ile kürlenmiş numunelerin dış yüzeyleri reoloji çalışmalarında sunulan sıcaklık eğrisine en yakın davranışı göstereceklerinden iç ölçüm noktaları ile karşılaştırıldıklarında daha iyi bir kürlenme statüsüne sahip oldukları analiz edilmiştir. Aynı şekilde merkez noktasındaki bir numaralı ölçüm noktasından 10 numaralı ölçüm noktasına doğru kürlenme statüsünün artacağı öngörülmüştür.

İkinci set kürlenme süreleri ile gerçekleştirilen termal analiz sonuçları incelendiğinde 3 sıcaklık parametresinde de üretilen test numunelerinin optimum kürlenme süresinde üretilen test numunelerinden daha iyi bir iç yapı kürlenme statüsüne sahip olacağı öngörülmekteydi.

Reoloji çalışmaları ve literatür araştırmaları incelendiğinde ise optimum kürlenme süresi üzerinde üretilen ikinci set numunelerin birinci set numunelerden daha düşük yorulma ömrüne sahip olacağı belirtilmekteydi. Bu numuneler kendi aralarında karşılaştırıldığında 170 °C sıcaklıkta bağ yapısı bozulma hızı değişimi maksimum olduğundan, 170 °C 612 sn numunesinin en kötü bağ yapısı ve en düşük yorulma ömrüne sahip olacağı öngörülmekteydi. Benzer bilgiler ışığında 160 °C 810 sn numunesi 170 °C 612 sn numunesinden sonra ikinci en kötü ve 150 °C 1440 sn numunesinin ise üçüncü en kötü yorulma ömrü süresine sahip olacağı öngörülmekteydi.

İkinci set termal analiz sonuçları incelendiğinde ise birinci set üretilen test numunelerinin tüm bölgelerindeki nihai sıcaklık değerlerinde iyileşme ve dolayısı ile kürlenme statülerinde iyileşme olması öngörülmüştür.

İkinci set numuneler için gerçekleştirilen termal analiz çalışmasında, 150 °C 1440 sn numunesinin merkez ve dış yüzey bölgesi arasında 1 derece sıcaklık farkı, 160 °C 810 sn numunesinin merkez ve dış yüzey bölgesi arasında 9 derece sıcaklık farkı ve 170 °C 612 sn numunesinin merkez ve dış yüzey bölgesi arasında 11 derece sıcaklık farkı olduğu analiz edilmiştir.

170 °C 612 sn sürede üretilen test numunesi en yüksek iç sıcaklık dağılımına sahip numune olarak analiz edilmiştir. Yüksek sıcaklıklarda bağ oluşum hızının yüksek olması, ölçüm bölgelerinin bozulma eğrisi bölgesine girecek kadar sıcaklıklarının yükselmemesi avantajı ile birleştiğinde 170 °C 612 sn numunesinin en iyi kürlenme statüsü dağılımı ve en yüksek yorulma ömür süresine sahip olacağı termal analiz sonuçları ışığında öngörülmektedir. Kürlenme süresi parametresini arttırmanın dezavantajı olarak ise reoloji grafiğindeki bilgiler ışığında test numunesi dış yüzeyinin çok uzun bir süre bozulma eğrisine gireceği bilinmekteydi. İçyapıya ait kürlenme statüsündeki iyileşme karşılığında dış yüzeyde aşırı kürlenmiş ve bozulmuş bir yapı sonucu beklenmekteydi.

150 °C 1440 sn numunesi ise en uzun kürlenme süresi parametresine sahip olduğundan 400 saniye civarında tüm bölgelerinde birbirine çok yakın sıcaklıklarda kürlenme sıcaklığı dağılımına sahip olacağı öngörülmüştür. Bu durum ise bu numune setinin 170 °C 612 sn numunesinden sonra en iyi kürlenmiş ikinci numune türü olacağını işaret etmekteydi. Bu numune setine ait dezavantaj ise dış yüzeyinin en uzun süre bozulma eğrisi bölgesinde kalan numune olacağının analizler ile elde edilmiş olmasıdır.

160 °C 810 sn numunesi ise optimum kürlenme ile üretilen numunelerden daha iyi bir iç sıcaklık yapısına sahip olduğundan birinci set numunelerden daha iyi yorulma ömür süresine sahip olacağı öngörülmektedir. Yine numune yüzeyinin uzun süre bozulma eğrisi bölgesinde olması bu numune çeşidi için tespit edilen tek dezavantaj olarak dikkat çekmektedir.

Reoloji ve literatür araştırması sonuçları incelendiğinde en yüksek yorulma ömür sürelerinin optimum kürlenme süresinde üretilen birinci set numunelerde olacağı öngörülmektedir. Bu numuneler kendi aralarında incelendiğinde ise en yüksek $M_L - M_H$ farkına ve en yüksek bağ yapısı yoğunluğuna sahip olacağı öngörülen 150 °C 720 sn numunesinin en yüksek yorulma ömrüne sahip olacağı; ardından ise sırasıyla 160 °C 405 sn ve 170 °C 204 sn numunelerinin geleceği öngörülmüştür. Reolojik çalışmalar ikinci set üretilen test numunelerinin daha düşük yorulma ömür sürelerine sahip olacağını belirtmekte, özellikle 170 °C 612 sn numunesinin çok hızlı bir şekilde bozulma eğrisi bölgesine gireceğinden en düşük yorulma ömür süresine sahip olacağı öngörülmektedir.

Gerçekleştirdiğimiz termal analiz sonuçları ışığında ise test numunelerinin iç yapılarındaki sıcaklık değişimleri elde edilip, bu sıcaklık değerleri ve maruz kalınan süre bilgileri incelendiğinde en iyi kürlenme statüsü dağılımına reoloji grafiklerinde öngörülen aksine optimum kürlenme sürelerinin üzerinde üretilen ikinci set numunelerin sahip olacağı hipotezi oluşturulmuştur.

Ayrıca her sıcaklık değerine ait numuneler kendi içlerinde değerlendirildiğinde uzun kürlenme süreleri ile kürlenme statüsü arttırılan ikinci set numunelerin birinci set numunelerden daha yüksek bir yorulma ömür değerine sahip olacağı hipotezi oluşturulmuştur.

Termal analiz sonuçlarının öngürdüğü bir başka sonuç ise 170 °C 204 sn numunesinin en kötü kürlenme statüsü dağılımına sahip olacağı, literatürdeki bağ yapısı ve reoloji grafiklerinin desteklediği üzere en düşük yorulma ömrüne sahip olacağı ve bu sebeble kürlenme süresindeki artışın yorulma ömrünü arttırıcı bir etki göstereceği öngörülmüştür.

160 °C 405 sn numunesi ve 150 °C 720 sn numunelerinde de iç bölge ve yüzey bölgesi arasındaki yüksek sıcaklık farkından dolayı uzun kürlenme süresi parametre değişimi ile daha iyi bir yorulma ömür değeri beklenmekteydi.

Deney sonuçları incelendiğinde ise en yüksek yorulma ömür süresi değerlerine birinci set numunelerinden 150 °C 720 sn ve 160 °C 405 sn numuneleri ve ikinci set numunelerinden ise 170 °C 612 sn numunesinin sahip olduğu sonucu elde edilmiştir.

Deney sonuçları incelendiğinde 150 °C ve 160 °C sıcaklıkta optimum kürlenme sürelerinin uzatılmasının yorulma ömür süresi değerinde beklentin aksine azalmaya sebep olduğu gözlemlenmiştir. 170 °C sıcaklıkta kürlenmiş numune testleri karşılaştırıldığında ise optimum kürlenme süresinin uzatılmasının beklendiği üzere yorulma ömür süresi değerinde iyileşme özelliği gösterdiği gözlemlenmiştir. (Bkz: Şekil 5.65, Şekil 5.87)

Reoloji çalışmalarında belirtilen optimum kürlenme süreleri ile elde edilen 150 °C 720 sn, 160 °C 405 sn ve 170 °C 204 sn numunelerine ait yorulma ömür süreleri karşılaştırıldığında literatür ve termal analiz sonuçlarında beklendiği üzere kürlenme sıcaklığı değeri arttıkça yorulma ömür süresi değerinde azalma gözlemlenmiştir.

İki kat veya üç kat optimum kürlenme süresi parametresi numunelerinde ise bu durum gözlenmemiştir. Bu sonucun temel sebebi ise 170 °C 612 sn numunesinin ikinci set kürlenen numune çeşitlerinden daha iyi bir kürlenme statüsüne sahip olması gösterilebilir.

150 °C 1440 sn numunesinin en iyi kürlenme statüsüne sahip numunelerden biri olduğu termal analiz ile desteklenmesine rağmen yorulma ömür süresi ölçümlerinde ve katılık değeri sonuçlarında bu sonuca ulaşılammıştır. Bu durumun sebebi ise optimum kürlenme süresi üzerindeki uzun süre kürlenme prosesinin yüzey bölgesindeki bağ yapısını aşırı olumsuz etkileyerek bozulma eğrisi bölgesine sokmuş olması olabilir. 150 °C 1440 sn numunesi en uzun süre bozulma eğrisi bölgesinde kalan numunelerden bir tanesiydi.

Yorulma ömür testleri esnasında test numunelerinin katılık değerleri incelendiğinde 150 °C ve 160 °C sıcaklıklarda kürlenme süresi parametresini uzatmanın katılık değerinde azalmaya, 170 °C sıcaklıkta ise katılık değerinde artışa sebep olduğu ölçülmüştür. Bu sonuç 150 °C ve 160 °C için amaçlanan iyileşmenin elde edilemediği ve literatür çalışmaları ile paralellik gösterdiğini kanıtlamakla beraber; 170 °C değerinde kürlenmeler ise tez çalışmasında amaçlanan iyileştirme parametre değişimi ile uyum göstermiştir (Bkz: Şekil 5.66, Şekil 5.88).

Birinci set optimum sürelerde kürlenen numunelerde en yüksek katılık değeri 150 °C 720 sn numunesinde ve en düşük katılık değeri ise 170 °C 204 sn numunesinde ölçülmüştür. Bu sonuçlar literatür ve reoloji çalışmaları ile paralellik göstermektedir. Kürlenme süreleri arttırıldığında ise 150 °C ve 160 °C sıcaklıklarda tez çalışması beklentisinin aksine katılık değerinde düşme görülürken, 170 °C sıcaklıkta ise beklendiği üzere katılık değerinde artış gözlemlenmiştir. Bu davranış yorulma ömür süreleri sonuçlarında da benzer şekilde gözlemlenmiştir.

Literatür çalışmalarında sıklıkla bahsedilen katılık değerinin test başlangıcında hızlıca düşmesi ve test sonuna kadar düşük bir hız değerinde düşmeye devam etmesi ve kopma esnasında ise hızlı bir düşme trendine girmesi davranışı (Mullins etkisi) tüm yorulma testlerinde gözlemlenmiştir.

150 °C ve 160 °C sıcaklık değerlerinde test numunelerinin iç bölgelerindeki kürlenme statülerinin artmasına rağmen yorulma ömür sürelerinde görülen düşmenin aşırı kürlenme

sebebi ile yüzey bölgesinde meydana gelen bağ yapısı bozulma durumu olabileceği düşünülmektedir.

Yorulma testleri esnasında çatlak oluşumunun numune yüzeyinde başlayıp daha sonra test merkezine doğru büyüme davranışı gösterdiği gözlemlenmiştir. İçyapıya ait kürlenme statüsü arttırılsa bile dış yüzeyin tavsiye edilen optimum kürlenme süresinin üzerinde kürlenme sıcaklığına maruz kalması, düşük bağ kalitesindeki dış yüzeyde öngörülemeyen şekilde erken çatlak oluşumuna sebebiyet vermiş olabilir.

170 °C sıcaklık değerinde ise 204 sn kürlenmeye alınan numune termal analiz bölümünde görüldüğü üzere reoloji çalışmalarında belirtilen iç sıcaklığa ulaşamadığı ve dolayısıyla yeterli katılık değerine ulaşamadığı için beklendiği üzere en düşük yorulma ömür süresine sahip olmuş ve kürlenme süresi parametresinin arttırılması yorulma ömür süresi üzerinde pozitif bir etki yaratmıştır. Bu sıcaklık değerinde tüm bölgelerdeki kürlenme statüsünü arttırmak amaçlı kürlenme süresini artırma hipotezi doğru tahminler oluşturmuştur. 170 °C sıcaklıkta uzun süre kürlenmiş numuneler aynı sıcaklıkta kısa sürede kürlenmiş numunelerden daha yüksek ömür süresine sahip olmuşlardır. Dış yüzeyi diğer numune setlerinden daha kısa süre bozulma eğrisi etkisine maruz kaldığı ve iyileştirilmiş kürlenme statüsü dağılımına sahip olduğu bilinen bu numune tipine ait yorulma ömründe iyileşme durumu da beklendiği üzere gerçekleşmiştir.

Termal analiz aşamasında kullanılan doğal kauçuk değerlerinin örnek karışımlara ait değerler olması, kullanılan karışım miktarına ait ölçümlerin de literatür çalışmalarından alınmış olması durumu, kürlenme statüsü davranışı ve mekanik özelliklere ait tahminlerin beklendiği ölçüde tutarlı sonuçlar vermemesine sebep olmuş olabilir.

Test numunesine uygulanan yapısal analiz sonuçları ve quasi statik çekme sonlu elemanlar analiz sonuçları karşılaştırıldığında 10 mm uzama elde etmek için belirlenen yük seviyesinin deney aşaması kuvvet uzama grafiği sonuçlarına yakın sonuçlar verdiği görülmektedir. Literatürde aynı kimyasal bileşiğe sahip doğal kauçuk için verilen Mooney Rivlin sabitlerinin tek ekseninde 1000 N yük seviyesine kadar tutarlı analiz sonuçları sunduğu gözlemlenmiştir. Mooney Rivlin hiperlastik analiz modelinin S-eğrisi davranışı bölgesini iyi bir şekilde tahmin edemediği de uzama değeri analiz sonuçlarından görülmüştür. Tez çalışmasında S-eğrisi bölgesindeki yüksek yükler ile ilgilenilmediğinden

kullanılan modelin tez çalışmasına ait yük analizi modeli tahminlerini karşıladığı görülmüştür.

Test numuneleri yüzeylerinde çatlak başlangıcı bölgesi yapısal analiz sonuçlarında beklenen bölge etrafında görülmüştür. Bu bölge en yüksek gerinim bölgesi olarak tespit edilen orta 10 mm uzunluğa sahip bölge ve orta bölgenin bitimi ile yarıçap değerinde artış görülen bölgenin başlangıcı olarak analiz edilmişti.

Yorulma ömür testleri esnasında gerçekleştirilen termal yüzey sıcaklığı ölçümlerinden elde edilen sonuçlar ışığında sıcaklık artış miktarının 20-23 derece civarında kaldığı ve bu durumun termal yorulma etkisi oluşturmadığı gözlemlenmiştir. Yüzey sıcaklığı artış hızları incelendiğinde ise en düşük artış hızı 170 °C 612 sn numunesinde görülmektedir. Daha sonra ise 150 °C 1440 sn ve 160 °C 810 sn numunesi gelmektedir. Bu üç numune çeşidi kendi aralarında karşılaştırıldığında en iyi kürlenmiş ve en az mobiliteye sahip olan numunenin 170 °C 612 sn numunesi olduğu sonucunu desteklemektedir. Yorulma ömür süresinde iyileşme ve yüksek bir ömür değerine sahip olması da bu durumu destekleyici niteliktedir (Bkz: Çizelge 5.10, Çizelge 5.11)

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında doğal kauçuktan üretilen malzemelerde kürlenme aşamasında görülen izotermal olmayan ve hedef kürlenme sıcaklığına ulaşamamış sıcaklık dağılımının kürlenme statüsüne olumsuz etkisini azaltmak amacıyla optimum kürlenme süresi üzerinde kürlenen doğal kauçuk malzemeler ürettirilmiş ve kürlenme kinematiğinin yorulma özelliği üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu incelemede 150 °C ve 160 °C sıcaklıklarda beklenti karşılanmaz iken, 170 °C sıcaklık değerinde beklentiler karşılanmıştır.

Tüm üretim aşamalarını simüle edecek termal sonlu elemanlar analizi uygulanmış ve beklendiği üzere 150 °C, 160 °C ve 170 °C sıcaklıklarda optimum kürlenme süresi olarak verilen reoloji/literatür çalışması değerlerinde merkez bölgesi ve yüzey bölgesi arasında kayda değer sıcaklık farkları olduğu elde edilmiştir.

Merkez bölgesi ve yüzey bölgesi arasında en yüksek sıcaklık farkının 170 °C 204 sn parametresi ile üretilen numunede olduğu ve en düşük sıcaklık farkının ise 150 °C 720 sn numunesinde olduğu analiz edilmiştir.

İkinci set numuneler için gerçekleştirilen termal analiz sonuçları birinci set numunelerle karşılaştırıldığında sıcaklık dağılımlarının homojenleşmeye yaklaştığı ve sıcaklık değerlerinin yükseldiği analiz edilmiştir.

Yapısal analiz çalışmalarında kullanılan Money Rivlin modelinin 1000 N yük değerine kadar elde edilen deney sonuçları ile yüksek oranda benzerlik gösterdiği gözlemlenmiştir.

Yorulma ömür değerinde iyileşme beklentisi 150 °C ve 160 °C sıcaklıklarda gerçekleşmemiş ve aksine katılık değeri ve yorulma süresi değerinde azalma gözlemlenmiştir. 170 °C sıcaklıkta ise beklentiler gerçekleşerek katılık değeri ve yorulma süresi değerinde iyileşme olduğu gözlemlenmiştir.

150 °C ve 160 °C sıcaklıklarda test numunelerinin dış yüzeyinin uzun süre maksimum kürlenme sıcaklığına maruz kalmasının yüzey kalitesini bozduğu tahmin edilmektedir. Bu bozulma davranışının yorulma ömür değeri üzerindeki negatif etkisinin, iç bölgelerdeki kürlenme statüsü iyileştirme amacı ile uzatılmış kürlenme süresi parametresi pozitif

etkisini elemine ettiği gözlemlenmiştir. Testler sırasında meydana gelen yorulma başlangıcı tüm numunelerde öncelikle yüzey bölgesinden başladığından, bu bölgede feragat edilen bağ kalitesi kaybı durumunun yorulma ömür süresi üzerinde önemli bir parametre olduğu deney sonuçlarına yansımıştır.

170 °C sıcaklıkta ise yüzey bölgesi 150 °C ve 160 °C sıcaklıktaki kûrlenmeler kadar uzun süre bozulma eğrisi bölgesinde kalmadığından ve 170 °C 204 sn numunesinin 100 derece üzerinde iç ve dış nokta arası sıcaklık farkı ile kalıptan çıktığından, bu sıcaklık derecesinde kûrlenme süresini uzatmanın yorulma ömrünü arttırmış olduğu gözlemlenmiştir.

Hızlandırılmış yorulma ömür testlerine ait sonuçların daha düşük yük seviyesindeki yorulma ömür testlerine ait sonuçlarla benzer çıkması ise, testler için harcanan toplam sürenin azaltılması amacı ile test yükünün artırılabilceği hipotezini doğrular niteliktedir.

İki adet yük seviyesinde yorulma testleri gerçekleştirilmesine rağmen elde ettiğimiz sonuçlarda çözünürlüğün ve kuvvet dengesinin artırılması için hem numune sayısı artırılmalı hem de yük kuvveti değeri çeşitlendirilmelidir.

Yorulma testleri birçok değışkene bağlı olduğundan ve geniş bir dağılım gösterebileceğinden tez çalışması daha fazla deneysel numune ile tekrarlanarak sonuçların birbirini içerisindeki tutarlılığı karşılaştırılmalıdır.

Yorulma testlerine test hızı parametresinin etkisinin incelenmesi amacı ile farklı hızlarda yorulma testleri gerçekleştirilmelidir.

Sadece tek eksenle yükleme türü yerine iki eksenle veya tork yükü altında gibi farklı yükleme türleri etkisi altında kûrlenme statüsü durumu ve yorulma davranışı ilişkisinin testleri yapılmalı ve sonuçlar arasındaki tutarlılıklar incelenmelidir.

Kûrlenme süresi parametresinin tez çalışmasında gerçekleştirilen sıcaklık değeri bandı dışındaki kûrlenme sıcaklıklarında da benzer davranışlar gösterip göstermediğini incelemek amaçlı değışik sıcaklık değeriinde benzer analiz ve deney çalışmaları gerçekleştirilmelidir.

Deney aşaması için üretilen numunelerin daha geniş bir spektrumda yorulma davranışlarını gözlemleyebilmek amaçlı, kurlenme süresi parametresi kısa aralıklarla taranarak çözünürlük arttırılabilir ve bu numunelerin yorulma ömür davranışları deneysel olarak incelenebilir.

İleride yapılacak çalışmalarda kopma yüzeyleri elektron mikroskopu ile incelenerek, kopma yüzeyindeki kurlenme dereceleri incelenebilir ve yeni teoremler geliştirilebilir.

Uzun süre kurlenmenin ardından kalıptan çıkarılan numunelerin soğutma ortamında maruz kalacağı sıcaklık ve süre termal analiz ile modellenerek daha iyi bir yüzey kalitesi bağ oluşumu tahmini gerçekleştirilebilir.

Kurlenme dağılımının daha iyi kontrol edilmesi gerektiğinden ileri çalışmalarda kurlenme aşamasında numune iç noktalarından anlık sıcaklık ölçümü yapılabilecek kalıpla üretim yöntemi geliştirilebilir. Böylece termal analiz çalışmalarında kullanılan termal analiz sabitleri ve deney sonuçları arasındaki tutarlılıklar incelenebilir.

Kalıplama ile üretim aşamasında sadece ısıtma kontrollü değil, aynı zamanda soğutma kontrollü üretim prosesleri de geliştirilebilir.

Yüksek sıcaklıkta kurlenme ile üretilen doğal kauçuk malzemelerde optimum kurlenme süresi parametresinde merkez noktası ve yüzey noktası arasındaki sıcaklık farkının düşük sıcaklıktaki kurlenmelere göre daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Bu durumda yorulma ömrü süresini arttırmaya yönelik kurlenme süresi çalışmaları 170 °C ve 180 °C gibi yüksek sıcaklıktaki kurlenme üretim proseslerinde devam ettirilerek geliştirilebilir. Bu sıcaklıklarda devam ettirilen çalışmalarda iyileştirme aşamaları daha kısa sürede üretim ve test adımları ile geliştirilebilir.

Düşük sıcaklıklarda kurlenme ile üretim aşamalarında ise merkez noktası ve yüzey bölgesi arasında daha küçük sıcaklık farkları olduğundan, kurlenme statüsü dağılımındaki bu avantajı tamamen kaybettirmeyecek değişik kurlenme süreleri seçimi yapılabilir. Böylece dış yüzeyde meydana gelen bağ yapısı bozulması olumsuz etkisi de azaltılarak yorulma ömür süresinde artış gözlemlenebilir. Bu durumları gözlemleyebilecek yeni deneyler gerçekleştirilebilir.

Tez çalışmasına dahil edilmeyen 150 °C altındaki sıcaklıklarda da benzer yaklaşımlar oluşturulup yeni üretim paketleri ve deney setleri oluşturularak sonuçlar karşılaştırılabilir ve yeni modeller geliştirilebilir.

Kauçuk malzemelerin yorulma ömür tahmini aşamasında kullanılan dayanıklılık ve analitik formülleri geliştirmek için, numune içi kürlenme kinematiği etkisi ve statüsü dağılımının çevrimsel yükleme altındaki kauçuk malzemelerin yorulma davranışına etkisi daha çok araştırılmalı ve anlaşılmalıdır.

Yorulma testinin gerçekleştirildiği ortamın sıcaklık kontrolü de yorulma deney aşaması değişken parametresi olarak ileri çalışmalara eklenebilir.

Bu tez çalışmasında gerçekleştirilen çalışmalar farklı katkı malzemeleri ile değişik karışımlardaki kauçuk malzeme türlerinde tekrarlanarak sonuçlar karşılaştırılabilir. Katkı malzemesi ile yapılan test çalışmaları özgün sonuçlar çıkarabilmekle birlikte yeni yaklaşımlar da oluşturulabilir. Sadece katkı malzemesi çeşidi değiştirilerek bu katkı malzemelerinin kürlenmeye ve kürlenme kinematiğine ve dolayısı ile yorulma ömrü üzerindeki etkisine araştırmalar yönlendirilebilir.

Numune, test imkanı ve yeterli zaman olmadığından bu çeşitlendirme ve iyileştirme çalışmaları gerçekleştirilememiştir.

Havacılık ve otomotiv endüstrilerinde farklı şekiller ve kürlenme parametrelerine sahip parçaların kürlenme statüsü dağılımlarını ve yorulma davranışlarını incelemek amaçlı kupon seviyesi testlerin yapılması gereklidir. Böylece daha çok numune sayısı ve yüksek çözünürlükte parametre değişkenleri ile yeni araştırmalar gerçekleştirilebilir ve en az maliyet ile üretim aşaması öncesi mekanik özelliklerin geliştirilebileceği çalışma ortamları oluşturulabilir.

KAYNAKLAR

1. Lu, T.Y., and Andriyana, A. (2018). Recent advances on fatigue of rubber after the literature survey by Mars and Fatemi in 2002 and 2004. *International Journal of Fatigue*, 3(2), 142-148.
2. Mars, W.V., and Fatemi, A. (2001). A literature survey on fatigue analysis approaches for rubber. *International Journal of Fatigue*, 24, 949-961.
3. Saintier, N., Cailleaud G., and Piques R. (2005). Multiaxial Fatigue life prediction for a natural rubber. *International Journal of Fatigue*, 28, 530-539.
4. Woo, C-S., Kim, W-D., Lee, S-H., Choi, B-I., and Park, H.-S. (2011). Fatigue life prediction of vulcanized natural rubber subjected to heat-aging. *Procedia Engineering*, 1, 9-12.
5. Ayoub G., Nait-Abdelaziz N., Zairi F., Gloaguen J. M., and Charrier P. (2009). A continuum damage model for the high-cycle fatigue life prediction of styrene-butadiene rubber under multiaxial loading. *International Journal of Solids and Structures*, 48, 2458-2466.
6. Saintier, N., Cailleaud G., and Piques R. (2005). Crack Initiation and propagation under multiaxial fatigue in a natural rubber. *International Journal of Fatigue*, 28, 61-72.
7. Aidy, N., Maryam H., and Barkawi S. (2010). Continuum damage mechanics modeling for fatigue life of elastomeric materials. *International Journal of Structural Integrity*, 1, 63-72.
8. Zine A, Benseddiq N, and Abdelaziz MN. (2011). Rubber fatigue life under multiaxial loading: Numerical and experimental investigations. *International Journal of Fatigue*, 33(10), 1360.
9. Shangguan, W-B., Wang, X-L., Deng, J-X., Rakheja, S., Pan, X-Y, and Yu, B. (2014). Experiment and modeling of uniaxial tension fatigue performances for filled natural rubbers. *Material and Design*, 58, 65–73.
10. Cadwell, S., Merrill, R., Sloman, C. and Yost, F. (1940). Dynamic fatigue life of rubber. *Industrial and Engineering Chemistry Analytical Edition*, 12(1), 19–23.
11. Le Cam, J-B., Huneau, B. and Verron, E. (2008). Description of fatigue damage in carbon blackfilled natural rubber. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 31(12), 1031–8.
12. Ostoja-Kuczynski E, Charrier P. (2003). Crack initiation in filled natural rubber: experimental database and macroscopic observations. *Constitutive models for rubber III: proceedings of the third European conference on constitutive models for rubber*. London, UK: CRC Press;41, 15-17.

13. Seichter, S., Archodoulaki, V-M., Koch, T., Holzner, A., Wondracek, A. (2017). Investigation of different influences on the fatigue behaviour of industrial rubbers. *Polymer Testing*, 59:99, 106.
14. W. Mars, and A. Fatemi. (2004). Factors that affect the fatigue life of rubber: a literature survey. *Rubber Chemistry Technology*, 77 (3), 391.
15. G.J. Lake. (1995). Fatigue and fracture of elastomers, *Rubber Chemistry Technology*, 68 (3), 435.
16. A.N. Gent. (2012). Engineering with Rubber: How to Design Rubber Components, third ed., Carl Hanser Verlag.
17. Kim, W., Lee, H., Kim, J. and Koh, S-K. (2004). Fatigue life estimation of an engine rubber mount. *International Journal of Fatigue*, 26(5), 553–60.
18. Hirakawa H, Urano F, Kida M. (1978). Analysis of fatigue process of rubber vulcanizates. *Rubber Chemistry Technology*, 51(2), 201–14.
19. Kim WD. (1998). Application of FEA to design of rubber component. *Trans Korean Soc Mech Eng*, 38(12), 42–7.
20. Li, Q., Zhao, J-C. and Zhao, B. (2009). Fatigue life prediction of a rubber mount based on test of material properties and finite element analysis. *Engineering Failure Analysis*, 6(7), 2304–10.
21. Suryatal, B., Phakatkar, H., Rajkumar, K. and Thavamani, P. (2015). Fatigue life estimation of an elastomeric pad by ϵ -n curve and fea. *Journal of Surface Engineered Materials Advanced Technology*, 5(02), 85.
22. Matador Rubber S.R.O. (2007). Test methods of rubber materials and products, 76-81.
23. Al-nesrawy,, S.H., Almaamori, and M., Jappor H.R. (2016). Effect of temperature on rheological properties of SBR compounds reinforced by some industrial scraps as a filler. *International Journal of Chemical Sciences*, 14(3), 1285-1295.
24. Wiessner, S. (2014). Rheological behaviour and rubber processing. *Encyclopedia of Polymeric Nanomaterials*.
25. Ngamsurat, S., Boonkerd, K., Leela-adisorn, U., and Potiyaraj, P. (2011). Curing Characteristics of Natural Rubber filled with Gypsum. *Energy Procedia*, 9, 452-458.
26. Mansilla, M.A., Marzocca A.J., Macchi, C., Somoza, A. (2015). Influence of vulcanization temperature on the cure kinetics and on the microstructural properties in natural rubber/styrene-butadiene rubber blends prepared by solution mixing. *European Polymer Journal*, 69, 50–61.
27. Zhang H., Li, Y., Shou, J-Q., Zhang, Z-Y., Zhao, G-Z. and Liu, Y-Q. (2016). Effect of curing temperature on properties of semi-efficient vulcanized natural rubber. *Journal of Elastomers & Plastics*, 48(4), 331-339.

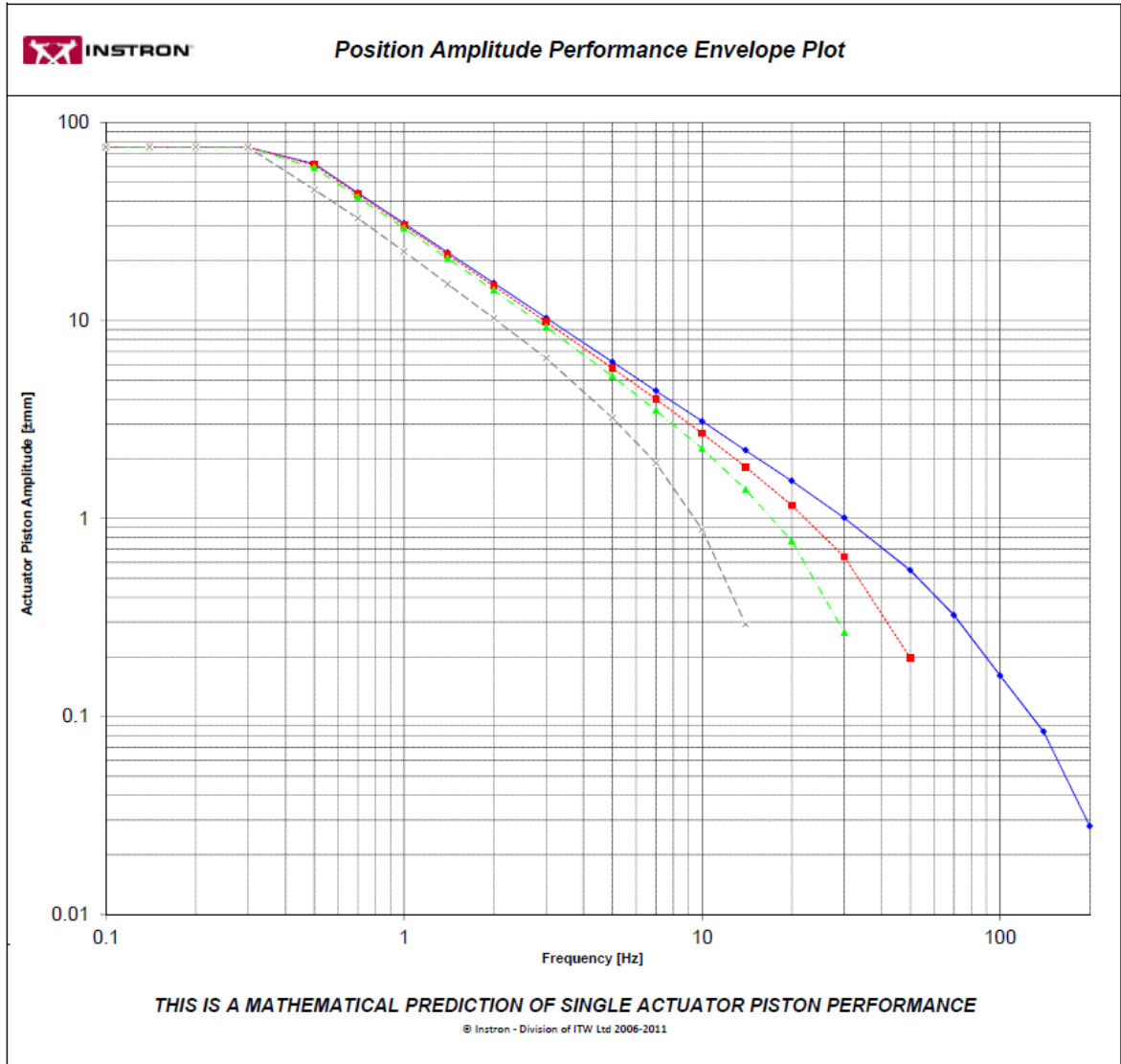
28. Lee, K.C., Md Yusoff, N. A., Othman, N., and Mohamad Aini, N.A. (2017). Effect of vulcanization temperature on curing characteristics, physical and mechanical properties of natural rubber/palygorskite composites. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 223.
29. Gupta, M. (2004). Processing and fabrication of advanced materials XIII. *Stallion Press (S), Pte Ltd*, 872.
30. Fan, R.L., Zhang, G., Li, F., Zhang, Y. X., Sun, K. And Fan, Y. Z. (2001). Effect of high-temperature curing on the crosslink structures and dynamic mechanical properties of gum and N330-filled natural rubber vulcanizates. *Polymer Testing*, 20, 925–936.
31. Mansilla, M.A., and Marzocca, A.J. (2012). About the cure kinetics in natural rubber/styrene Butadiene rubber blends at 433 K. *Physica B*, 407, 3271–3273.
32. Coran, A.Y. (2013). Chapter 7 Vulcanization. *The Science and Technology of Rubber*, 339-340.
33. Ravichandran, K.and Natchimuthui N. (2005). Vulcanization characteristics and mechanical properties of natural rubber–scrap rubber compositions filled with leather particles. *Polymer International*, 54, 553–559.
34. Kapucu, O.A., Kasım, H., Can, Y. and Yazıcı, M. (2018). Experimental Investigation on Fatigue Life of Cord-Rubber Composites. *European Journal of Science and Technology Special Issue*, 16-21.
35. Kurian, T., George, K.E. and Francis, D.J. (1988). Effect of vulcanization temperature on the cure characteristics and vulcanizate properties of natural rubber and styrene-butadiene rubber. *Die Angewandte Makromolekulare Chemie*, 123 - 134.
36. Karaağaç, B., İnal, M., and Deniz, V. (2012). Predicting optimum cure time of rubber compounds by means of ANFIS. *Materials & Design*, 35, 833–838.
37. Khimi Raa, S., and Pickering, K. L. (2000). A new method to predict optimum cure time of rubber compound using dynamic mechanical analysis. *Journal of Applied Polymer Science*, 131(6).
38. Han, I., Chung, C., and Lee, J. (2000). Optimal curing of rubber compounds with reversion type curve behaviour. *Rubber Chemistry and Technology*, DOI: 10.5254/1.3547572.
39. Marzocca, A.J. (1991). Finite element analysis of cure in a rubber cylinder. *Polymer*, Volume 32, Number 8.
40. Nozu, S., Tsuji, H., and Onishi, K. (2011). A Prediction Model for Rubber Curing Process. Heat Transfer - Engineering Applications, Prof. Vyacheslav Vikhrenko (Ed.), ISBN: 978-953-307-361-3, InTech.
41. El Labban, A., Bailleul, J-L., Mousseau, P. and Deterre, R. (2007). Numerical natural rubber curing simulation, obtaining a controlled gradient of the state of cure in a thick-section part. *AIP Conference Proceedings*, 907, 921.

42. Pornpeerakeat, S., Chantrasmi, T., Chaikittiratana, A. and Limrungruengrat, S. (2017). Three Dimensional Finite Element Program for Determination of Cure Level in Thick Rubber Part. *Key Engineering Materials*, 318-324.
43. Pongdhorn, S-O., and Thepsuwan, U. (2002) Prediction of Cure Level in Thick Rubber Cylinder Using Finite Element Analysis. *Science Asia*, 28, 385-391.
44. Ghoreishy, M. H. R. A. (2016). State-of-the-art review on the mathematical modeling and computer simulation of rubber vulcanization process. *Iran Polym J.*, 25:89–109.
45. Shahzad, M., Kamran, A., Siddiqui, M. Z., and Farhan, M. (2015). Mechanical characterization and FE modeling of a hyperelastic material. *Materials Research*, 18(5): 918-924.
46. R. K. Luo, P. G. Gahagan, W. X. Wu, and W. J. Mortel. (2001). Determination of rubber material properties for finite element analysis from actual products. *Constitutive Models for Rubber II*, Swets & Zeitlinger Publishers, The Netherlands, 257-260.



EKLER

EK-1. Instron servohidrolik eksenel test cihazı performans grafiği

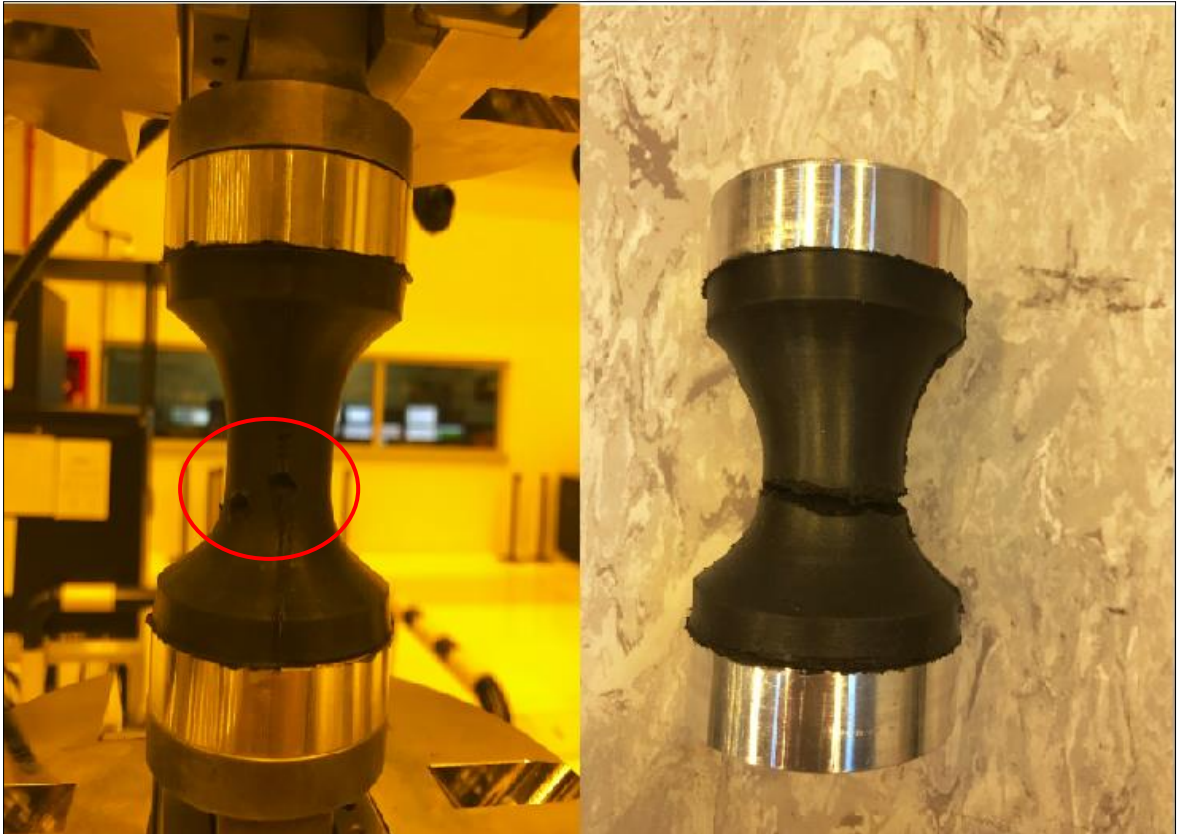


Şekil E1.1. Instron servohidrolik eksenel test cihazı frekans yer değiştirme değerleri

EK-2. Diabolo test numunesi



Resim E2.1. Üretim aşaması sonrası diabolo test numunesi



Resim E2.2.. İlk Çatlak oluşumu ve kopma bölgesi

EK-2. (devam) Diabolo test numunesi



Resim E2.3. Test numunesi yarıçap değişim bölgesinde kopma oluşumu

EK-3. Termal kamera ölçüm kurulumu



Resim E3.1. Termal kamera ile yüzey sıcaklığı ölçümü düzeneği



GAZİ GELECEKTİR..