

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**ÇEVRESEL KOŞULLARIN KAÇUK MALZEMELERİN YAY
RİJİTLİĞİNE VE YORULMA DAVRANIŞLARINA OLAN
ETKİLERİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ**

BERKAN TAN

KOCAELİ 2020

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

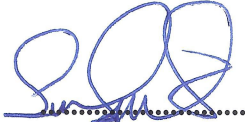
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ÇEVRESEL KOŞULLARIN KAÇUK MALZEMELERİN YAY
RİJİTLİĞİNE VE YORULMA DAVRANIŞLARINA OLAN
ETKİLERİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

BERKAN TAN

Prof. Dr. Erol FEYZULLAHOĞLU
Danışman, Kocaeli Üniversitesi
Prof. Dr. Ali ÇINAR
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi İlknur Koçaş KOZBE
Jüri Üyesi, Gedik Üniversitesi







Tezin Savunulduğu Tarih: 13.01.2020

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Bu çalışmada kauçuk malzemelerin çevresel koşullar altında yorulma dayanımları ve yay rijitlikleri ele alınmıştır. Günümüzde kauçukların çalışma ortamları farklılık göstermektedir. Buna bağlı olarak geliştirilen kauçuk karışımlarının bu zorlu çalışma koşullarına tepkilerini görmek önemlidir. Bu amaç doğrultusunda doğal kauçuk (NR), özel geliştirilen doğal kauçuk (Ö-NR) ve etilen propilen dien monomer (EPDM) kauçukları kullanılarak çeşitli yaşlandırma işlemleri sonucunda yorulma dayanımları ve yay rijitlikleri incelenmiştir. Şartlandırmalar sonucunda özel geliştirilen doğal kauçuğun EPDM kadar sıcaklığa dayanıklı olduğunu ve bununla birlikte NR kadar iyi mekanik özelliklere sahip olduğu görülmüştür. Bu amaç doğrultusunda özel geliştirilen Ö-NR kauçuğunun sıcaklığa daha dayanıklı ve iyi mekanik özellikleri nedeniyle sıcaklık dayanımı istenen çalışma ortamlarında kullanılması hedeflenmektedir.

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesi aşamasında desteğini, tecrübelerini ve zamanını esirgemeyerek bana her fırsatta yardımcı olan, saygı değer hocam Prof. Dr. Erol FEYZULLAHOĞLU'na teşekkürü bir borç bilirim.

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesi için gerekli hammadde, test ve çalışma ortamıyla birlikte verdikleri desteklerden dolayı TEKNO KAUÇUK firmasına teşekkür ederim.

Tez çalışmam boyunca yardım ve destekleri ile her zaman yanımda olan Fatma GÜLER'e, Ferit YILDIZ'a, Mehmet KÖKTÜRK ve eşi Tuğba KÖKTÜRK'e göstermiş oldukları dostluk ve yardımları için çok teşekkür ediyorum. Sevgi ve desteklerini her an hissettiğim, beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan canım aileme sonsuz teşekkürlerimi ve şükranlarımı sunuyorum.

Ocak – 2020

Berkan TAN

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	iv
TABLolar DİZİNİ	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	vii
ÖZET.....	viii
ABSTRACT.....	ix
GİRİŞ	1
1. TEORİK BİLGİLER.....	3
1.1. Kauçuklar	3
1.1.1. Doğal kauçuk (NR)	3
1.1.2. Etilen propilen dien monomer (EPDM).....	4
1.1.3. Akrilonitril bütadien kauçuk (NBR)	5
1.1.4. Polibütadien kauçuk (BR).....	5
1.1.5. Kloropren kauçuk (CR).....	6
1.2. Kauçukların Kullanım Alanları	6
1.3. Vulkanizasyon	7
1.3.1. Vulkanizasyon Sistemleri	8
1.3.2. Vulkanizasyonun ürünler üzerindeki etkileri	11
1.4. Rijitlik.....	12
1.5. Viskoelastisite Kavramları ve Dinamik Özellikler.....	14
1.6. Yorulma.....	15
1.6.1. Yorulma ömrü.....	16
1.6.2. Kauçuklarda yorulma	18
1.7. Çevresel Koşullar	19
1.8. Literatür Taraması	20
1.8.1. Mekanik yükleme koşulları.....	20
1.8.2. Kimyasal bileşikler ve takviye dolgusu	21
1.8.3. Çevresel koşullar	25
1.8.4. Vulkanizasyon sistemi	26
1.8.5. Rijitlik	27
2. MALZEME VE YÖNTEM	28
2.1. Test Malzemeleri	28
2.2. Numune Üretimi.....	28
2.3. Yaşlandırma Koşulları.....	29
2.3.1. Hızlandırılmış yaşlandırma	29
2.3.2. Yağ ortamında yaşlandırma	30
2.4. Statik ve Dinamik Yay Rijitlik Testleri.....	31
2.5. Yorulma Testleri.....	33
3. BULGULAR VE TARTIŞMA	38
3.1. Statik ve Dinamik Yay Rijitliği Test Sonuçları.....	38
3.2. Yorulma Testi Sonuçları	51
4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	57

KAYNAKLAR	60
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER	64
ÖZGEÇMİŞ	65



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil.1.1. Hevea Brasilliensis ağacındaki kanaldan lateks toplanması	3
Şekil 1.2. Doğal kauçuk kimyasal yapısı	3
Şekil 1.3. EPDM kimyasal yapısı	4
Şekil 1.4. Akrilonitril bütadien kauçuğun kimyasal yapısı	5
Şekil 1.5. Polibütadien kauçuk kimyasal yapısı	5
Şekil 1.6. Kloropren kauçuk kimyasal yapısı.....	6
Şekil 1.7. Vulkanizasyonla oluşan ağ yapısı	7
Şekil 1.8. Peroksit ve sülfür vulkanizatlarının reversiyon direnci	11
Şekil 1.9. Vulkanizasyonun ana etkileri.....	12
Şekil 1.10. Wöhler eğrisi.....	16
Şekil 1.11. Yorulma kopmasının oluşum aşamaları	17
Şekil 2.1. Yaşlandırma testi için kullanılan etüv.....	29
Şekil 2.2. Yaşlandırılmış numuneler.....	30
Şekil 2.3. Yağ ortamında yaşlandırılmış numuneler	30
Şekil 2.4. MTS hidrodinamik test makinesi.....	31
Şekil 2.5. Test sırasında numuneler A)Basma durumu B) Çekme durumu	32
Şekil 2.6. Ortalama kuvvet eğrisi.....	33
Şekil 2.7. Sürekli yorulma test makinesi.....	33
Şekil 2.8. Yorulma test numunesi	34
Şekil 2.9. Ana ekran görüntüsü	34
Şekil 2.10. Açılara bağlı şekil değişimi miktarları ve S-N eğrisi	35
Şekil 2.11. 10° için yapılan şekil değişimi miktarı	36
Şekil 2.12. 20° için yapılan şekil değişimi miktarı	36
Şekil 2.13. 30° için yapılan şekil değişimi miktarı	36
Şekil 2.14. Maksimum-minimum şekil değişimleri(%).....	37
Şekil 3.1. NR numunenin statik yay rijitliği histerezis eğrisi (Hızlandırılmış yaşlandırma).....	39
Şekil 3.2. NR numunenin dinamik yay rijitliği (Hızlandırılmış yaşlandırma).....	39
Şekil 3.3. NR numunenin statik yay rijitliği histerezis eğrisi (Yağda yaşlandırma).....	40
Şekil 3.4. NR numunenin dinamik yay rijitliği (Yağda yaşlandırma)	41
Şekil 3.5. NR numunelerinin farklı yaşlandırma koşullarında statik yay rijitlikleri	41
Şekil 3.6. NR numunelerinin farklı yaşlandırma koşullarında dinamik rijitlikleri	42
Şekil 3.7. EPDM numunenin statik yay rijitliği histerezis eğrisi (Hızlandırılmış yaşlandırma)	43
Şekil 3.8. EPDM numunenin dinamik yay rijitliği (Hızlandırılmış yaşlandırma).....	44
Şekil 3.9. EPDM numunenin statik yay rijitliği (Yağda Yaşlandırma)	45

Şekil 3.10. EPDM numunenin dinamik yay rijitliği (Yağda yaşlandırma).....	45
Şekil 3.11. EPDM numunelerinin farklı yaşlandırma koşullarında statik yay rijitlikleri	46
Şekil 3.12. EPDM numunelerinin farklı yaşlandırma koşullarında dinamik yay rijitlikleri.....	46
Şekil 3.13. Ö-NR numunenin statik yay rijitliği histerezis eğrisi (Hızlandırılmış yaşlandırma)	47
Şekil 3.14. Ö-NR numunenin dinamik yay rijitliği (Hızlandırılmış yaşlandırma).....	48
Şekil 3.15. Ö-NR numunenin statik yay rijitliği histerezis eğrisi (Yağda yaşlandırma)	49
Şekil 3.16. Ö-NR numunenin dinamik yay rijitliği (Yağda yaşlandırma)	49
Şekil 3.17. Ö-NR numunelerinin farklı yaşlandırma koşullarında statik yay rijitlikleri	50
Şekil 3.18. Ö-NR numunelerinin farklı yaşlandırma koşullarında dinamik yay rijitlikleri.....	50
Şekil 3.19. NR şekil değişimi-çevrim grafiği	51
Şekil 3.20. EPDM şekil değişimi-çevrim grafiği	52
Şekil 3.21. Ö-NR şekil değişimi-çevrim grafiği	53
Şekil 3.22. Tüm numunelere ait şekil değişimi-çevrim grafiği.....	54
Şekil 3.23. NR test numuneleri A) Teste girmemiş B) İşlem görmemiş C) Hızlandırılmış yaşlandırma D) Yağda yaşlandırma	55
Şekil 3.24. EPDM test numuneleri A) Teste girmemiş B) İşlem görmemiş C) Hızlandırılmış yaşlandırma D) Yağda yaşlandırma	56
Şekil 3.25. Ö-NR test numuneleri A) Teste girmemiş B) İşlem görmemiş C) Hızlandırılmış yaşlandırma D) Yağda yaşlandırma	56

TABLolar DİZİNİ

Tablo 1.1. Geleneksel kür sistemleri.....	8
Tablo 1.2. EV kür sistemleri	10
Tablo 1.3. SEV kütleme sistemleri	10
Tablo 2.1. Çalışmalarda kullanılan malzemeler ve özellikleri.....	28
Tablo 2.2. Etüv teknik özellikleri.....	29
Tablo 2.3. MTS hidrodinamik test makinesinin teknik özellikleri	31
Tablo 2.4. Maksimum-minimum şekil değişimleri(%).....	37
Tablo 3.1. NR yorulma test sonuçları	51
Tablo 3.2. EPDM yorulma test sonuçları.....	52
Tablo 3.3. Ö-NR yorulma test sonuçları	53

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

E*: Elastikiyet modül, (Pa)
E': Depolama modül, (Pa)
E'': Kayıp modül, (Pa)
F: Kuvvet, (N)
k: Yay rijitliği, (N/mm)
k_{dyn}: Dinamik yay rijitliği, (N/mm)
K_{dyn}: Dinamik rijitlik katsayısı,
k_{st}: Statik yay rijitliği, (N/mm)
N: Yük tekrar sayısı,
σ: Gerilme, (N/mm²)
s: Deformasyon, (mm)
tanδ: Faz açısının tanjantı,

Kısaltmalar

BR: Polibütadien kauçuk
CBS: N-Sikloheksil-2-benzotiyazol sülfenamid
CR: Kloropren kauçuk,
CV: Conventional Vulcanization (Geleneksel Sülfür Vulkanizasyonu)
DTDM: Morfolin Disülfid
EPM: Etilen propilen monomer
EPDM : Etilen propilen dien monomer
EV: Efficient Vulcanization (Verimli Sülfür Vulkanizasyonu)
FKM : Floroelastomer
NR: Doğal kauçuk
NBR: Akrilonitril bütadien kauçuk
Ö-NR : Özel geliştirilen doğal kauçuk
SBR: Stiren bütadien kauçuk
SEV: Semi Efficient Vulcanization (Yarı Verimli Sülfür Vulkanizasyonu)
TMTD: Tetrametil Tiuram Disülfid
UV: Ultraviyole
YTS: Yük Tekrar Sayısı

ÇEVRESEL KOŞULLARIN KAÜÇUK MALZEMELERİN YAY RİJİTLİĞİNE VE YORULMA DAVRANIŞLARINA OLAN ETKİLERİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

ÖZET

Bu çalışmada kauçuk malzemelerin çevresel koşullar altında yorulma dayanımları ve yay rijitlikleri ele alınmıştır. Günümüzde kauçukların çalışma ortamları farklılık göstermektedir. Buna bağlı olarak, geliştirilen kauçuk karışımlarının bu zorlu çalışma koşullarına tepkilerini görmek önemlidir. Bu amaç doğrultusunda doğal kauçuk (NR), özel geliştirilen doğal kauçuk (Ö-NR) ve etilen propilen dien monomer (EPDM) kauçukları kullanılarak çeşitli yaşlandırma işlemleri sonucunda yorulma dayanımları ve yay rijitlikleri incelenmiştir. Çalışma sırasında kauçuk malzemelerin statik ve dinamik rijitlik değerleri koşullandırmadan öncesi ve sonrası incelenmiş, ardından yorulma testleri yapılmıştır. Gerçekleştirilen testler sonucunda özel geliştirilen doğal kauçuğun EPDM kadar sıcaklığa dayanıklı olduğunu ve bununla birlikte NR kadar iyi mekanik özelliklere sahip olduğu görülmüştür. Bu amaç doğrultusunda özel geliştirilen Ö-NR kauçuğunun sıcaklığa daha dayanıklı olması ve uzun sürelerde iyi mekanik özellikleri nedeniyle sıcaklık dayanımı istenen çalışma ortamlarında kullanılması hedeflenmektedir.

Anahtar Kelimeler: Çevresel faktörler, Dinamik yay rijitliği, Kauçuk, Statik yay rijitliği, Yorulma.

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF ENVIRONMENTAL CONDITIONS ON FATIGUE BEHAVIOR AND SPRING STIFFNESS OF RUBBER MATERIALS
ABSTRACT

In this study, fatigue life and spring stiffness of rubber materials under environmental conditions is discussed. Today, the working environment of rubbers varies. Accordingly, it has become important to see the responses of developed rubber compounds to these challenging working conditions. For this purpose, fatigue life and spring stiffness of natural rubber (NR), specially developed natural rubber (Ö-NR) and ethylene propylene diene monomer (EPDM) rubber were investigated after various aging processes. During the study, the static and dynamic stiffness values of the rubber materials were examined before and after conditioning. After conditioning, the fatigue tests of the rubber compounds were performed. As a result of the tests, it was found that specially developed natural rubber is as resistant as EPDM to temperature and has good mechanical properties as NR. Specially developed O-NR rubber is more resistant to temperature and it is aimed to be used in working environments where temperature resistance is required due to its good mechanical properties.

Keywords: Environmental conditions, Dynamic spring stiffness, Rubber, Static spring stiffness, Fatigue.

GİRİŞ

Doğal kauçuk (NR), sahip olduğu yüksek mekanik dayanımı sayesinde dinamik uygulamalarda oldukça tercih edilen bir kauçuk türüdür. Yüksek mukavemetleri ve düşük sönümlenme karakterleri nedeniyle pek çok sektörde titreşim ve şok sönümleyici olarak kullanılmaktadırlar. Örneğin; otomotiv sanayisinde, dinamik uygulamalarda sergiledikleri yorulma dayanımlarından dolayı, motor takozlarının üretilmesinde yoğun olarak kullanılmaktadır. Sahip olunan dinamik özelliklerin yanında yüksek sıcaklıklara dayanımları, yağ/yakıt dayanımı ve yaşlanma dayanımlarının yetersiz oluşu doğal kauçukların kullanım alanlarını sınırlamaktadır [1].

Etilen propilen dien monomer (EPDM), ana zincirinin doymuş yapıda olmasından kaynaklı, ozon ve ultraviyole (UV) dayanımı oldukça yüksek bir kauçuk türüdür. Çevresel koşullardan zorlayıcı etkilere sahip, oksijen ve ozona dayanımları sayesinde yaşlanmaya karşı ömürleri uzundur. Isıl kararlılıkları ve yüksek sıcaklıklara dayanımları nedeniyle cam fitili, pencere contası, hortum, kemer gibi örnekleri endüstriyel alanda çok sayıda kullanılmaktadır. EPDM, doğal kauçuk ile karşılaştırıldığında mekanik ve yorulma dayanımları oldukça zayıf kalmaktadır [2, 3].

Otomotiv sektörünün zorlu şartlarının başı çektiği endüstriyel alanlarda kullanılan malzemelerin yüksek sıcaklığa dayanımları ve bu dayanımlara karşı mekanik özelliklerinin kaybedilmemesine yönelik son yıllarda kullanıcı istekleri oluşmaktadır [2]. Otomotiv sanayisinde ortalama performanstaki motor bağlantılarında kullanılan kauçuk bazlı parçaların 130°C'lik bir sıcaklığa maruz kalması gerektiği değerlendirilmiştir. Çalışma sırasında oluşabilecek sıra dışı durumlarda bu sıcaklıklar daha yükseklere çıkabilmekte ve parçaların bu sıcaklıklara dayanması gerektiği istenmektedir [1]. Gelişen ve rekabetin fazla olduğu otomotiv sanayisinde verilen garantilere bağlı oluşan endüstriyel kısıtlamalar ve doğal kauçuğun yüksek sıcaklıklarda hızlı deformasyona uğraması nedeniyle yeni kauçuk türlerinin geliştirilmesine zemin hazırlamıştır [2, 4].

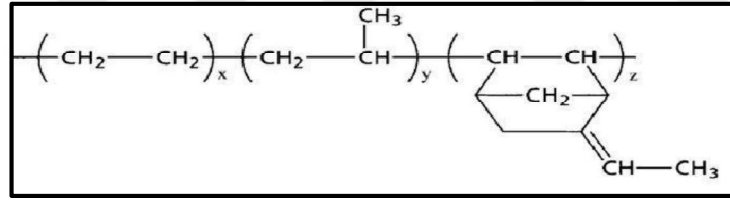
Herhangi bir yapıyı oluşturan parçalar kullanım sırasında tekrarlayan yükler tarafından zorlanırlar. Bu tekrarlı gerilmeler, uygulanan gerilme dayanımlarından küçük olmasına rağmen belirli bir tekrar sayısından sonra parçada çatlaklara ve kopmalara neden olabilmektedir. Mekanik arızaların çoğunluğu yorulma adı verilen bu durumdan kaynaklanmaktadır. Yorulma olayı genellikle içyapıda mevcut kusurlar civarında oluşan yerel gerilme yığılmalarından kaynaklanmaktadır. Yorulma olayında çatlama yüzeydeki bir pürüzde, bir çentikte, bir çizikte, bir kılcal çatlakta veya kesit değişimlerinin olduğu yerde başlar. Yorulma olayında parçaya dışarıdan uygulanan mekanik kuvvetlerin yanında ısıl genleşme ve büzülmelemlerden doğan ısıl gerilmeler de etki eder. Bu ana etkenlerin dışında yüzey kalitesi, korozyon, sıcaklık, aşırı yükleme, kalıcı iç gerilmeler, bileşik gerilmeler, gerilme konsantrasyonu, frekans ve mikroyapı çatlak oluşumu için etkindir. Günümüzde yüksek mukavemete sahip yapısal yorulma direncinin arttığı malzemelerin araştırılması ve geliştirilmesi büyük önem kazanmıştır.

Bu çalışmanın amacı, çevresel koşulların kauçuk malzemelerin yorulma dayanımına ve yay rijitliklerine olan etkilerinin incelenmesidir. Burada doğal kauçuk (NR), özel geliştirilen doğal kauçuk (Ö-NR) ve EPDM kauçuğu deneysel çalışmalarda kullanılmıştır. Bu çalışmada dinamik özelliklerin farklı ortamlardaki ısıl yaşlandırma öncesi ve sonrasındaki değişimleri ve yorulma dayanımları deneysel olarak incelenmiştir.

Yapışma özelliği sayesinde çok katmanlı lastik uygulamalarında katmanların birbirlerine tutunmalarını sağlamaktadır [6]. Doğal kauçuktan üretilen ürünlerin kopma dayanımı, yırtılma ve aşınma dayanımı yüksektir. Elastik özellikleri yüksek olup, dinamik yorulma dayanımı ve malzemenin sönümlenme davranışı iyi seviyelerdedir. Polar sıvılara karşı dayanıklıdırlar. Elektrikli iletmezler. Doğal kauçuk; UV, ozon, oksijen, ışık ve radyasyon ortamlarındaki yaşlanmalara dayanıksızdır. Yüksek sıcaklıklarda özellikleri zayıflayarak dayanımları azaldığından kullanılamamaktadır. Derişik asit ve bazlara, yağlara, organik çözücüler gibi apolar akışkanlara karşı dayanımları oldukça zayıftır [6,7].

1.1.2.Etilen propilen dien monomer (EPDM)

1963 yılında EPDM ticari olarak ilk kez Amerika Birleşik Devletleri'nde üretilmiştir. EPDM, etilen-propilen kauçuğunu (EPM) baz alınarak geliştirilmiştir. Üçüncü bir monomer olarak bir dienin etilen ve propilen ile reaksiyona girmesi sonucunda elde edilir. Oluşturulan termonomer varlığı, kauçuğun sülfür ile vulkanize edilmesini sağlamaktadır. Şekil 1.3'de EPDM'e ait kimyasal yapı gösterilmiştir [5].



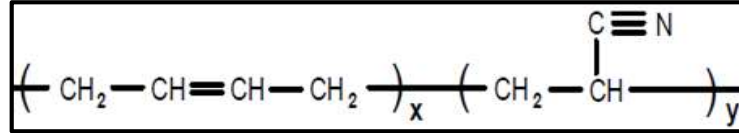
Şekil 1.3. EPDM kimyasal yapısı

Karakter bakımından EPDM'yi, yapısında bulunan etilenin propilene oranı büyük ölçüde şekillendirmektedir. İdeal özelliklere sahip etilen-propilen kopolimerde ağırlıkça %40 oranında etilen ve ağırlıkça %60 oranında propilen bulunmaktadır. Yapısında bulunan polimerler amorfudur. Genellikle ticari polimerlerde etilen ağırlıkça %50 ile %80 civarında değişim göstermektedir. Yapı içerisindeki etilen miktarı %70-80 aralığına denk geldiğinde yarı-kristalin davranışa sahip olurlar [8]. Etilen miktarı EPDM içerisinde artış gösterdiğinde; kristallik, mekanik dayanım ve sertlik artar, kalıcı deformasyon özellikleri gelişir ve düşük sıcaklık özellikleri kötüleşmektedir. Propilen miktarı EPDM içerisinde artış gösterdiğinde; amorflik artmakta, proses edilmesi kolaylaşmakta, esneklik ve düşük sıcaklık özellikleri artmaktadır. Dolgu tipi ve miktarına bağlı olarak EPDM malzemelerin mekanik özelliklerinde değişiklik

gözlemlenebilir. EPDM düşük kopma dayanımı sergiler. Isıl yaşlanma bakımından NBR ve SBR'den daha iyi sonuç vermektedirler. Çevresel koşullardan ozon, UV, oksijen ve radyasyonda yaşlanmalara dayanımları yüksektir. Doğal kauçuklar ile düşük sıcaklık özellikleri bakımından karşılaştırılabilir seviyelerde olmalarının yanında bu özelliklerini yüksek sıcaklıklardaki yaşlandırmalar sonrasında koruyabilmektedirler [9,10].

1.1.3. Akrilonitril bütadien kauçuk (NBR)

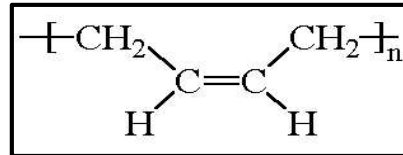
1930' lu yıllarda akrilonitril ve bütadienin kopolimerizasyonu olarak ortaya çıkan NBR, 1934 yılında ilk kez Almanya' da üretilmiştir. Şekil 1.4' te akrilonitril bütadien kauçuğun kimyasal yapısı gösterilmiştir. Yapısındaki akrilonitril miktarı önemli bir parametre olup; akrilonitril oranındaki artış yağ ve yakıt dayanımını, polar olmayan çözücülere karşı ve gaz geçirgenliği direncini, sıcaklık dayanımını, yaşlanma özelliklerini ve aşınma direncini, kopma dayanımı ve sertliği arttırmaktadır [6,10]. Mekanik özelliklerinin yanında NBR, ısıl direnç açısından NR ve SBR ile kıyaslandığında daha iyi sonuç göstermektedir. Pahalı bir kauçuk türü olduğundan dolayı mekanik mukavemet, yağ ve yakıt direnci gerektiren ürünlerde tercih edilmektedirler [6].



Şekil 1.4. Akrilonitril bütadien kauçuğun kimyasal yapısı

1.1.4. Polibütadien kauçuk (BR)

Kütle polimerizasyonu ile alkali metallerin katalizör şeklinde kullanılarak bütadien oluşturulmuştur [5,9]. Şekil 1.5'te polibütadiene ait kimyasal yapı gösterilmiştir.

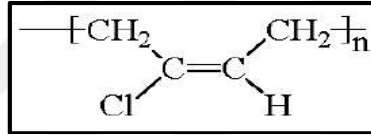


Şekil 1.5. Polibütadien kauçuk kimyasal yapısı

Polibütadien kauçuk günümüzde çözeltili polimerizasyonu ile üretilmekte olup, üretim esnasında kullanılan katalizör tipine göre yapılarında değişim gözlenmektedir [6]. Oluşan yapılara göre çeşitli özellikler kazanmaktadırlar. Ozon, UV, açık hava dayanımı diğer yapılara göre daha iyidir. Polibütadien yapısındaki çift bağdan dolayı UV, ozon, oksijen, radyasyon ve ışık ile yaşlanmaya dayanımları düşük olup, doğal kauçuk ile yapılan karışımlarda doğal kauçuğun yaşlanma özelliklerinde iyileştirme sağlamaktadır [6].

1.1.5.Kloropren kauçuk (CR)

Duprene adı ile yağa dayanıklı kauçuk maksadıyla teknik olarak 1931/1932 yıllarında Amerika’ da üretilmesine rağmen ilk kloropren genel uygulamalar için 1939 yılında “NEOPREN GN” adı ile üretilmiştir [5]. Şekil 1.6’ de kloropren kauçuğa ait kimyasal yapı gösterilmiştir.



Şekil 1.6. Kloropren kauçuk kimyasal yapısı

Kloropren polar yapıda bir kauçuktur ve apolar kauçuklar ile kıyaslandığında yağlara karşı göstermiş oldukları direnç daha fazla olmaktadır. NBR’ e göre kıyaslandığında ise daha az dayanım göstermektedirler. Hava ve ozon dayanımları klor atomları ile iyi seviyelerde olmakla birlikte alev geciktirme özelliklerini geliştirmektedirler [6, 9, 11, 12]. Kloropren kauçukların kristalleşebilme özelliği sayesinde üretilen ürünlerin çekme özellikleri iyi seviyelerdedir. Toklukları ve yırtılma dirençleri açısından da iyidirler.

1.2. Kauçukların Kullanım Alanları

Kauçuk malzemeler sahip oldukları özellikleri sayesinde endüstrinin pek çok alanında kullanılmaktadır. Otomotiv sektöründe kauçuğun %60’tan fazlası otomobil lastiklerinin üretiminde kullanılmaktadır. Kauçuğun sahip olduğu dinamik özellikler sayesinde salınım ve titreşim takozlarında, kimyasallara karşı dayanıklı yapılarından akaryakıt ve fren hortumlarında, radyatör ve hava hortumlarında, çalışacağı ekipmanları çevresel etmenlerden korumak adına aks körüğü olarak bunların dışında

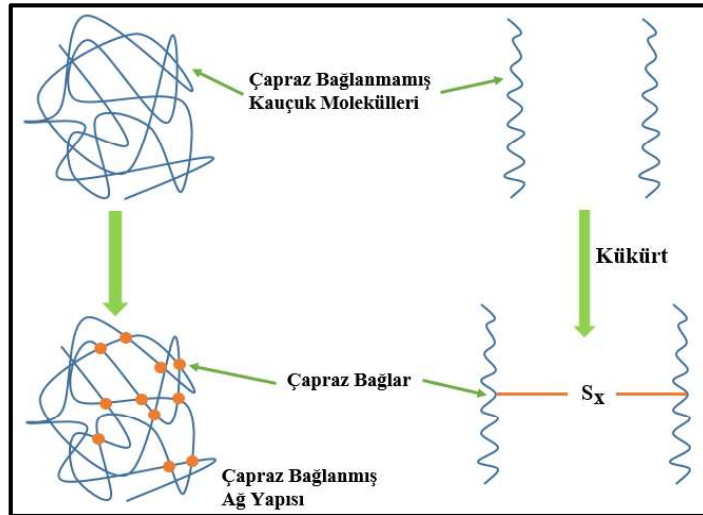
cam silecekleri, transmisyon kayışları, contalar kauçukların otomotiv sektöründeki örnek uygulamalarıdır. Beyaz eşyalarda kazan körükleri, sıcak ve soğuk su hortumlarının üretilmesinde kullanılmaktadır. Bunlara ek olarak otoyol ve viyadüklerde elastomer yatak olarak, otel, havaalanı, terminallerde yer kaplamalarında, kablo yalıtkanlarında, oyuncaklarda kauçuk malzemeler kullanılmaktadır [5].

Kauçuklar, yağ ve greslere dayanıklı olmalarından dolayı sızdırmazlık elemanları uygulamalarının büyük bir kısmı için kullanılırlar. Ek uygulamalar olarak; su geçirmez giyecekler, ayakkabı, eldiven, sıhhi eşyalar, döşeme malzemesi oyuncak ve şişme yatak gibi birçok malzemenin üretiminde kullanılmaktadır.

1.3. Vulkanizasyon

Vulkanizasyon, geri çekilme kuvvetini artıran ve deforme edici kuvvetin uzaklaştırılmasından sonra kalan kalıcı deformasyon miktarını azaltan, plastikliği azaltıp elastikliği arttıran bir işlemdir. Genel olarak lastik veya elastomerik malzemelere uygulanmaktadır [13, 14].

Vulkanizasyon, çapraz bağların polimer zincirleri arasında sokulmasıyla kimyasal olarak ağ bağlantılarının üretilmesi işlemidir. Şekil 1.7' de vulkanizasyon ile oluşan ağ yapısı gösterilmiştir [14].



Şekil 1.7. Vulkanizasyonla oluşan ağ yapısı [14]

Makromoleküllerin kendi reaktif bölgelerinde bağlanmasıyla gerçekleşen işlem, aynı zamanda çapraz bağlama olarak da bilinir. Vulkanize edici ajanlar, gerçek çapraz bağlama işlemini meydana getiren maddelerdir. Vulkanize kauçuğun özellikleri vulkanizasyon sürecinden etkilenir. Özellikle, modül, sertlik, elastik özellikler ve şişmeye karşı direnç, vulkanizasyon sürecinde önemli ölçüde değiştirilmektedir. Bu değişikliklerin kapsamı, vulkanizasyon işlemini gerçekleştirmek için kauçuğa eklenen vulkanizasyon bileşenlerinin ve ayrıca vulkanizasyon koşullarının seçilmesi ile yönetilir. Çekme dayanımı, gaz geçirgenliği, düşük sıcaklık esnekliği ve elektriksel direnç gibi diğer özellikler, vulkanizasyon derecesi ile daha az değişmektedir. Mümkün olan en iyi özelliklere sahip kauçuk ürünleri elde etmek için en uygun vulkanizasyon bileşenlerinin birleşimi ve söz konusu uygulamaya tabi tutulan en uygun vulkanizasyon koşullarını dikkate almak gerekir [13].

1.3.1.Vulkanizasyon Sistemleri

1.3.1.1. Geleneksel sülfür vulkanizasyonu (CV)

Geleneksel sülfür vulkanizasyonu, doğal kauçuk, poliizopren ve bütadien bazlı sentetik kauçuk bileşiklerinde, nispeten daha yüksek miktarda sülfür (1.5phr'nin üstünde) ve daha düşük dozda hızlandırıcılar (0.5-1.0phr) ile kullanılabilir. Kauçuk ile birleşik sülfür, ağırlıklı olarak "Polisülfür çapraz bağlar" formunda bulunur. Serbest sülfür miktarı ve serbest sülfürün hızlandırıcıya oranı, kauçuktan kauçuğa değişir. Vulkanizasyonda makul derecede boşa harcanmış sülfid ve ana zincir modifikasyonları mevcuttur. SBR ve BR vulkanizasyonlarında poli- ve di-sülfidik çapraz bağlar baskındır. CV sistemi zayıf reversiyon (geri dönüş), oksidatif ısı ve uzun süreli esneklik sağlar. Ancak; vulkanizatlar iyi gerilme ve yırtılma mukavemeti, iyi yorulma ve düşük sıcaklık dayanımı sergilerler [15, 16]. Çeşitli elastomerler için tipik geleneksel kür sistemleri aşağıdaki Tablo 1.1.'de verilmiştir [15].

Tablo 1.1. Geleneksel kür sistemleri [15]

İçindekiler	Geleneksel Kür Sistemleri		
Polimer	NR	SBR	NBR
Çinko Asit, phr	5.0	5.0	5.0
Stearik Asit, phr	2.0	2.0	1.0
Sülfür, phr	2.5	2.0	1.5
CBS, phr	0.6	1.2	1.0

Yüksek hızlandırıcı ve düşük sülfür seviyelerine dayanan doğal kauçuk için CV sistemi, yorulma performansı açısından mükemmel başlangıç özelliklerine sahip vulkanizatlar verir, ancak aynı zamanda, özellikle yüksek sıcaklıklarda da kolayca geri dönerler ve oksidatif yaşlanmaya karşı iyi korunamazlar. Bu dezavantajların üstesinden gelmek için kayda değer ölçüde daha fazla reversiyona (geri dönüş) dirençli ve yaşlanmaya karşı iyi korunabilen verimli vulkanizasyon uygulanmıştır. Bununla birlikte, bu vulkanizatlar zayıf başlangıç özellikleri sergiler ve metallere bağlanması zordur. Çevresinde ideal bir vulkanizasyon sisteminin bulunmaması durumunda, sülfür içermeyen vulkanizasyon sistemi, geleneksel bir kütleme sisteminden elde edilen yüksek başlangıç özelliklerini EV sisteminin reversiyon direnci ve oksidatif yaşlanması ile birleştirebilecek kabul edilebilir bir uzlaşma sağlamıştır [13].

Bir vulkanizatın özelliklerinin çapraz bağlama sistemine bağlı olduğu, ancak vulkanizasyon sistemine bakılmaksızın, ağır gerilme mukavemetinin çapraz bağlama yoğunluğu arttıkça maksimumdan geçtiği iyi bilinmektedir. Çok çeşitli çapraz bağ yoğunlukları aralığında, geleneksel vulkanizasyon (CV) ile hazırlanan ve yoğunlukla polisülfidik çapraz bağlar içeren vulkanizatlar, verimli vulkanizasyon (EV) formülasyonları ile hazırlanan ve esas olarak monosülfidik çapraz bağlar içeren vulkanizatlardan daha yüksek çekme dayanımlarına sahiptir [13].

1.3.1.2. Verimli sülfür vulkanizasyonu (EV)

Verimli sülfür vulkanizasyonu, doğal kauçuk, poliizopren ve bütadien bazlı sentetik kauçuk bileşiklerinde, çok düşük miktarda sülfür (0.4-0.5 phr altında) ve daha yüksek dozda hızlandırıcılar (2.5 ile 5.0 phr) varlığında kullanılabilir. EV Sistemleri, temel sülfür yerine bir sülfür vericisinden veya düşük konsantrasyondaki temel sülfür (0.5 phr'den az) ve yüksek konsantrasyondaki hızlandırıcıların bir kombinasyonundan oluşabilir. Bir/iki sülfür atomu bağışlayabilen sülfür donörleri kullanılır [15, 16].

EV sisteminde çapraz bağlama için verimli bir şekilde sülfür kullanır ve çok daha az zincir modifikasyonuna sahip termal olarak kararlı monosülfidik ve disülfidik çapraz bağlantıları içeren bir ağ üretir [15, 16].

Kısa sülfür çapraz bağları zayıf gerilme ve yırtılma mukavemeti, zayıf esnek yorulma ömrü ve aşınma direnci sağlar. Bununla birlikte, EV kütleme sistemleri iyi bir ısı

yaşlanma ve kalıcı deformasyon direnci sunar. Bu kür sistemleri genellikle kalın kesitli kauçuk ürünler ve statik uygulamaları olan ürünler için kullanılır [15, 16]. Çeşitli elastomerler için tipik EV kür sistemleri Tablo 1.2.'de verilmiştir [15].

Tablo 1.2. EV kür sistemleri [15]

İçindekiler	EV Kür Sistemleri					
	NR		SBR		NBR	
CBS, phr	3.0	1.0	1.5	1.2	2.0	1.5
TMTD, phr	-	1.0	3.0	1.2	3.0	1.5
DTDM, phr	-	1.0	-	1.2	-	1.5
Sülfür, phr	0.5	-	0.3	-	0.3	-

1.3.1.3. Yarı-verimli sülfür vulkanizasyonu (SEV)

Yarı-verimli sülfür vulkanizasyonu, doğal kauçuk, poliizopren ve bütadien bazlı sentetik kauçuk bileşiklerinde, sülfür ve hızlandırıcı konsantrasyonları geleneksel vulkanizasyon sistemiyle EV sistemi arasında olduğunda kullanılır. Yarı verimli kütleme (SEV) sistemleri, CV ve EV kürü arasında bir uzlaşma bulma çabasıdır. SEV sistemi, NR'de ısıl yaşlanma ile yorulma ömrü arasındaki uzlaşmanın sıklıkla gerekli olduğu özel bir uygulama bulmuştur [15, 16]. Çeşitli polimerler için tipik SEV kütleme sistemleri Tablo 1.3.'te verilmiştir [15].

Tablo 1.3. SEV kütleme sistemleri [15]

İçindekiler	SEV Kütleme Sistemleri					
	NR		SBR		NBR	
CBS, phr	1.5	0.6	2.5	1.0	1.0	1.2
TMTD, phr	0.5	-	-	-	1.0	-
DTDM, phr	-	0.6	-	1.0	-	1.2
Sülfür, phr	1.5	1.5	1.2	1.2	1.0	1.0

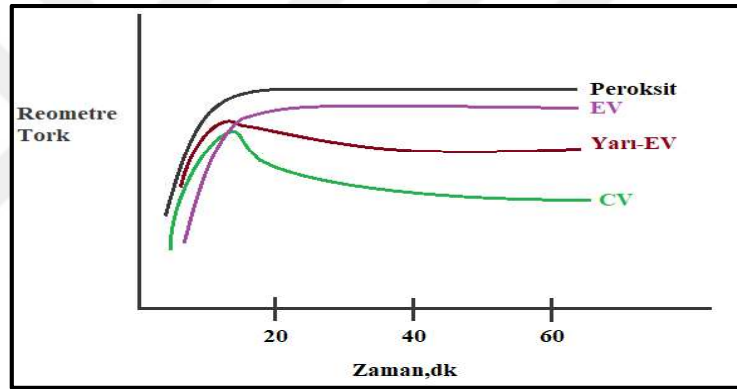
1.3.1.4. Peroksit vulkanizasyonu

Sülfür en iyi bilinen ve en çok kullanılan kürleyici madde olmasına rağmen, peroksit olarak bilinen başka bir çapraz bağlayıcı türü de bulunmaktadır. Kütleme işlemi için reaktif çift bağ grubu ve hızlandırıcı gereksinimi olmamasına rağmen, koajan olarak bilinen kimyasallar genel vulkanizasyonu geliştirmek için kullanılmaktadır. Peroksitler, tipik olarak, polimerin karbon omurgasından hidrojen atomlarını çıkararak zincir üzerinde radikal adı verilen yüksek düzeyde aktif bölgeler yaratırlar ve elastomer zincirleriyle reaksiyona girerler. Başka bir zincirdeki benzer aktif

bölgedeki karbonlar bir araya gelerek, bir sülfür-karbon bağından daha güçlü ve termal olarak kararlı olan çapraz bağlar oluştururlar [10].

Peroksit çapraz bağlaması daha yüksek bir ısıl yaşlanma direnci sağlar. Bu sistemdeki ısıl yaşlanma, belirli bir sıcaklığa ulaşır ulaşmaz olan etkileri değil, zamanla artan sıcaklığın etkilerini ifade eder. Peroksit çapraz bağlaması, yorulma ömrü ve çekme dayanımını azaltmasına karşın, sülfürle sertleştirilmiş çapraz bağlamadan daha iyi kalıcı deformasyonu sağlar [10].

Ayrıca, peroksit sistemleri diğer sülfür vulkanizasyonu sistemlerine göre daha iyi reversiyon direnci, yüksek oksidatif yaşlanma direnci ve gelişmiş yüksek sıcaklık ayar özellikleri göstermektedir. Şekil 1.8.'de peroksit ve sülfür sistemlerinden elde edilen vulkanizatların 180 °C'de reversiyon direnci karşılaştırılmaktadır [13].



Şekil 1.8. Peroksit ve sülfür vulkanizatlarının reversiyon Direnci [13]

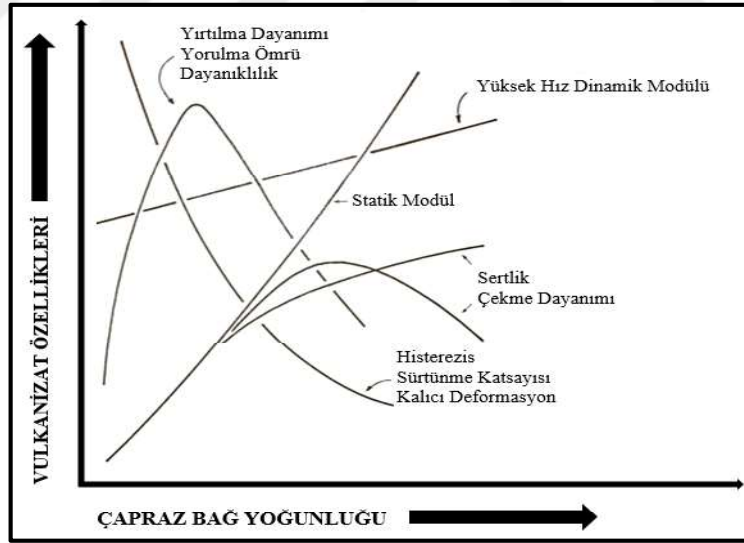
Peroksitle kürlenme, örneğin etilen ve propilen kauçuğunun kopolimeri olmak üzere toplam çift bağ eksikliği nedeniyle sülfürle sertleştirilemeyen bazı elastomerleri vulkanize edebilir. Peroksitlerle kürlenebilen elastomerler EPDM, EP, SBR, NR, BR, CR, bazı FKM'ler ve silikonlardır. Peroksit kauçuğun bozunmasına neden olduğu için bütül kauçuğu bu şekilde kürlenemez. Bunun yanında, bromobütül kauçuk belli uygulamalarda peroksitle vulkanize edilmektedir [10].

1.3.2.Vulkanizasyonun ürünler üzerindeki etkileri

Vulkanizasyonun ana etkileri, Şekil 1.9'da gösterilmektedir. Statik modül, vulkanizasyon ile dinamik modülden daha fazla artış sergilemektedir. Dinamik modül bir viskoz ve elastik bileşenlerin tepkilerinden oluşan bileşiktir, oysa statik modül

yalnızca elastik bileşenin bir ölçüsüdür. Vulkanizasyon böylece viskoz veya plastik davranıştan esnekliğe geçişe neden olmaktadır [14, 16].

Histerezis, artan çapraz bağ oluşumuyla azalır ve ağ zincirleri tarafından depolanmayan veya taşınmayan, ancak bunun yerine ısıya dönüşen deformasyon enerjisinin bir ölçüsüdür. Kopmada enerjiyle ilgili özellikler daha sonra ağ zinciri ve histerezis sayısındaki artışla artar; ancak histerezis daha fazla ağ zinciri oluştuğunda azaldığından, kopma enerjisine bağlı olarak bazı ara çapraz bağ yoğunluğunda tepe noktaya ulaşmaktadır [14, 16]. Şekil 1.9'daki özellikler tek başına çapraz bağ yoğunluğunun etkileri değildir, aynı zamanda çapraz bağın türünden, polimerin yapısından, dolgunun türünden ve miktarından benzeri etmenlerden etkilenir [14, 16]. Reversiyon, oksidatif olmayan termal yaşlanma ile modül kaybına uygulanan bir terimdir. Genellikle kükürt tarafından vulkanize edilmiş izopren kauçuklarıyla ilişkilidir ve uzun vulkanizasyon veya kalın bölümlerin sıcak yaşlanmasının bir sonucu olabilir. Çok sayıda polisülfirik çapraz bağ içeren vulkanizatlarda, 150 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda en şiddetli şekilde görülmektedir [14, 16].



Şekil 1.9. Vulkanizasyonun ana etkileri [14]

1.4. Rijitlik

Rijitlik, mekanik bir sistemin dış yüklerini geometrisinde aşırı bir değişiklik (deformasyonlar) yapmadan sürdürme kapasitesidir. Mekanik bileşenler ve sistemler için en önemli tasarım kriterlerinden biridir. Dayanım, en önemli tasarım kriteri olarak kabul edilirken, bileşenlerde gerilmelerin ve bağlantılarının izin verilen seviyelerin

altında kaldığı birçok durum vardır. Mekanik sistemlerin ve bileşenlerinin performans özelliklerinin yanı sıra boyutlar, rijitlik gereklilikleri tarafından belirlenir.

Rijitlik sadece bileşen geometrisinin (şekil ve boyut) doğru seçilmesiyle ve sistemin bileşenleri arasındaki etkileşimleri optimize ederek değiştirilebilir. Mekanik sistemlerin performansı üzerindeki rijitliğin etkileri, deformasyonların statik ve yorulma dayanımı, aşınma direnci, verimlilik (sürtünme kayıpları), hassasiyet, dinamik / titreşim stabilitesi, üretilebilirlik üzerindeki etkisinden kaynaklanmaktadır.

Özetlemek gerekirse, rijitlik kriterinin önemi aşağıdaki nedenlerden dolayı artmaktadır:

- Deformasyonların azaltılmasını gerektiren doğruluk gereksinimlerinin artırılması,
- Bileşenlerin kesitlerini azaltmaya ve buna bağlı olarak artan yapısal deformasyonlara yol açan yüksek dayanımlı malzemelerin kullanımının artırılması,
- Daha küçük güvenlik faktörleriyle sonuçlanan daha iyi analitik teknikler ile; azaltılmış kesitlere ve artan deformasyonlara ulaşılması,
- Makinelerin dinamik özelliklerinin, hafif yapılarıyla birlikte artan hızları ve güçleri nedeniyle öneminin artması, yoğun rezonanslara veya kendinden uyarımlı titreşimlere veya her ikisini de (tıkkırtı, tutup-bırakma, vb.) oluşturması.

Son üç maddedeki faktörler, malzemelerin güç kaynaklarının ağırlığı azaltmak için maksimumdan kullanıldığı yüzey ve araçlar (otomobiller, uçaklar, roketler, vb.) için özellikle belirgindir.

Genel olarak yay rijitliği için Denklem (1.1)'de gösterilen formül uygulanmaktadır. Bu denklemde rijitlik k , kuvvet F 'nin deformasyon s 'ye oranı olarak tanımlanır. F 'nin uygun kuvvet olması durumunda birim olarak Newton (N) veya pound (lbs), s için ise birim olarak metre (m) veya inç (in.) kullanılır.

$$k = F/s \quad (1.1)$$

Daha hızlı değişen yükler altında ölçülen dinamik rijitliğe (k_{dyn}) karşın statik rijitlik (k_{st}) çok yavaş yükleme işlemi sırasında veya frekansı 0,05 Hz'den 0,5 Hz'ye kadar olan periyodik bir yükleme sırasında ölçülen rijitliktir.

Dinamik rijitlik(K_{dyn}), dinamik rijitlik katsayısı(k_{dyn}) ile Denklem (1.2)'de gösterildiği şekilde tanımlanabilir. Genellikle $K_{dyn}>1$ 'dir ve yükün frekansına ve/veya yük genliğine ve/veya titreşimli yer değiştirmenin genliğine bağlıdır.

$$K_{dyn}=k_{dyn}/k_{st} \quad (1.2)$$

Statik(k_{st}) rijitlik şekil faktörü ve malzemenin özelliklerine(kayma modülüne) bağlı iken, dinamik rijitlik(k_{dyn}) ise statik rijitliğe ek olarak frekans ve genliğe de bağlıdır. Bu sebeple elastomer malzemelerde $K_{dyn}=k_{dyn} /k_{st}$ her zaman için $K_{dyn}>1$ 'dir.

Yukarıdaki dinamik rijitlik(K_{dyn}) ve dinamik rijitlik katsayısı(k_{dyn}) genellikle malzemenin özellikleridir. Bununla birlikte, dinamik rijitlik terimi, deforme olabilen(elastik) bileşenlerin yanı sıra atalet ve sönümleme bileşenlerini içeren dinamik sistemlere uygulamada da kullanılır [17].

1.5. Viskoelastisite Kavramları ve Dinamik Özellikler

Polimerlerin göze çarpan taraflarından birisi de, temel fiziksel ve mekanik özelliklerinin benzersiz bir şekilde ifade edildiği viskoelastik özellikleridir. Polimerler hem elastik katıların hem de sıvıların özelliklerini gösterir. Bu özellikler, viskoelastik cisimler için periyodik bir kanuna göre değişir ve zorlama sırasında belirli bir ilişkiye yol açar. Bu ilişki Denklem (1.3)'de, bu ilişkiye bağlı olarak karmaşık elastisite modülü Denklem (1.4)'de ve $\tan\delta$ ifadesi Denklem (1.5)'te belirtilmektedir.

$$\sigma = E^* \times \varepsilon \quad (1.3)$$

Burada E^* , elastisiteye eşdeğer karmaşık elastikiyet modülüdür.

$$E^* = E' + i E'' \quad (1.4)$$

E' elastikiyet modülünün asıl parçası dinamik elastikiyet modülü veya depolama modülü ve E'' kayıp modülü olarak adlandırılır. Sinüzoidal olarak değişen yük ile yüzde şekil arasındaki faz kayması,

$$\tan\delta = E'' / E' \quad (1.5)$$

$\tan\delta$, mekanik kayıp faktörü veya kayıp tegeti olarak tanımlanır. Kayıp faktör, viskoz özelliklerin elastik özelliklere oranıdır. $\tan\delta$ değeri ısı oluşum (histeresis) ile doğru, geri sekme ile ters orantılıdır.

Depo modülü, elastikiyetin dinamik depolama modülündeki değişimlerinin büyüklüğü ve niteliği, bir polimer sisteminin farklı fiziksel durumları üzerinde önemli etkiye sahip olan moleküller arası ve molekül içi etkileşimler tarafından belirlenir [18].

1.6. Yorulma

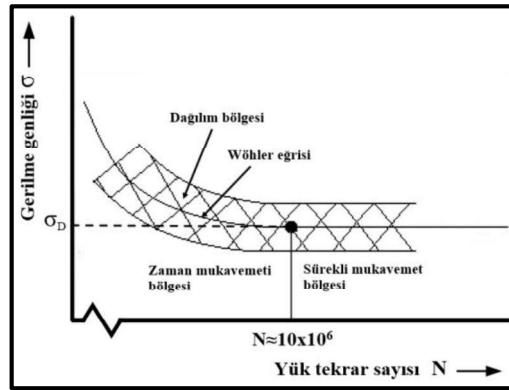
Bir malzeme üzerine periyodik olarak gerilme uygulandığında; gerilmenin büyüklüğüne ve gerilmenin etki ettiği süreye bağlı olarak, uygulanan gerilme maksimum çekme gerilmesinin altında olduğunda dahi malzemede deformasyona neden olacaktır. Meydana gelen bu deformasyon sonucunda ortaya çıkan hasar durumuna yorulma denilmektedir.

Kırılma mekaniğinin temel dayanak noktalarından biri, herhangi bir nesnedeki doğal kusurların varlığıdır. Çatlak çekirdeklerinin bu nedenle herhangi bir malzemede bulunduğu varsayılmaktadır. Bu çekirdeklerin tam yapısı genellikle belirsizdir. Bileşik kauçuklar pişiriciler, işlem yardımcıları ve dolgu maddeleri gibi çeşitli katkı maddeleri içerir. Bu katkı maddelerinin bulunmadığı kauçuk, jel parçacıkları, mikro boşluklar ve kesilmiş veya kalıplanmış kenarlardaki pürüzlülükleri içerebilir ve bunlar çatlak başlangıcı için çekirdek görevi görebilir. Bütün bu homojen olmayanların ortak bir özelliği bulunmaktadır: yorulma ömrünün yetersizliğini başlatan yüksek derecede lokalize gerilme konsantrasyonları oluşturmaktadırlar. Mekanik yorulma çatlaklarının bir başka öncüsü, gerilme gerilmelerinin bulunduğu yüzeylerdeki ozon saldırısı tarafından başlatılan çatlaklardır. Bir kauçuk parça tekrarlanan gerilmelere maruz kaldığında, görünür yorulma çatlakları ortaya çıkmadan önce belli bir süre geçmektedir. Çatlak başlatma ve yayılma arasındaki ayrım açık değildir. Uygulamada önemli olan, belli boyutta bir çatlağın belirli yükleme koşulları altında ne kadar hızlı yayılacağıdır. Laboratuvar test parçalarıyla, doğal bir kusurdan rastgele çatlak başlatma süreci, bir ön çatlak ekleyerek önlenir. Bu, çok daha fazla tekrarlanabilir bir teste yol açar, çünkü doğal malzeme özellikleri olmayan kusurlara duyarlılık ortadan kalkar. Ayrıca, çok sayıda örneğin test edilmesi gerekli değildir. Kırılma mekaniği

yorulma çatlağı yayılması üzerine odaklanmıştır. Malzemenin bilinen kusur boyutunu veya örneğin holografi veya ultrason ile bir ürünün incelenmesiyle tespit edilebilen minimum çatlak boyutunu yansıtan bir başlangıç çatlak boyutu seçilir. Kırılma mekaniği, belirli bir yapıda, kopmanın hızlı bir şekilde yayılacağı kritik boyuta ulaşana kadar belirtilen yüklemeye altında yavaşça ilerleyecek çatlak ebadı aralığını tahmin etmek için de kullanılabilir. Son yıllarda, başlangıç için yorulma analizi yaklaşımları, kauçuktaki çok eksenli yorulma çatlak çekirdeklenmesinin yeni bir öngörülen tanımını da içeren önemli bir gelişme ortaya çıkarmıştır [19].

1.6.1. Yorulma ömrü

Yorulma ömrü, bir numuneyi gerilme kontrollü bir test için (veya yüzde şekil değişim kontrollü bir test için zorlanma) belirli bir gerilme altında iki parçaya bölmek için gereken döngü sayısıdır. Yorulma ömrü normal olarak bir log normal veya Weibull dağılımı varsayılarak deneysel verilerden belirlenir. Geleneksel olarak, kauçuklar dahil malzemelerin yorulma özellikleri, bir S - N eğrisi olarak da bilinen “Wöhler” eğrisi ile belirlenebilmektedir (S, gerilme kontrollü bir test için uygulanan dinamik gerilmeyi veya alternatif olarak yüzde şekil değişim kontrollü bir test için gerilimi belirtir ve N, yorulma ömrü için yük tekrarıdır). Şekil 1.10’da örnek Wöhler eğrisi gösterilmiştir.



Şekil 1.10. Wöhler eğrisi

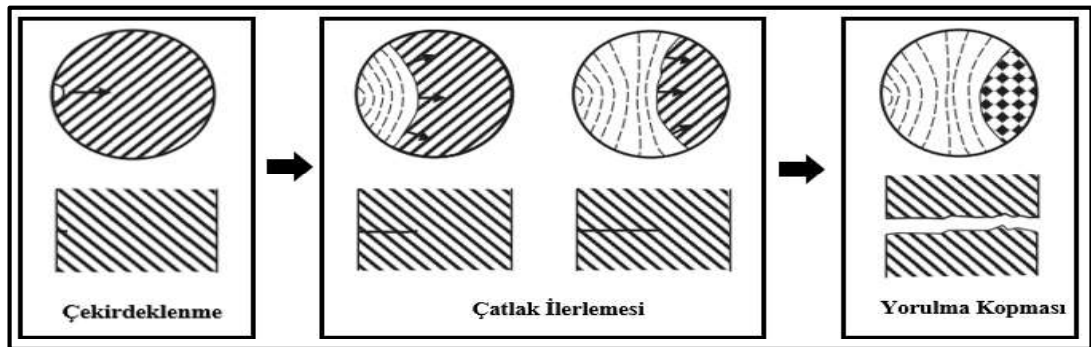
Normal olarak, dinamik gerilme aralığı (veya yüzde şekil değişim aralığı), yorulma ömrü için döngü sayısına karşı (logaritmik bir ölçekte) çizilir. Numunedeki bazı kusurlardan çatlaklar başladığından, numunelerin tanımlanmış bir ön izlemesiz yorulma ömürlerinde büyük yayılma görülür. Bu nedenle, bu tür testler çok sayıda örnek gerektirir. Elde edilen bilgiler yalnızca kullanılan belirli bir örneğe özgüdür ve

hizmet kapsamında tipik bir bileşeni temsil etmeyebilir. Ayrıca, farklı modüllere sahip malzemelerin karşılaştırılması kolay değildir.

Geleneksel yorulma testleri aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir [19]:

1. Gerilme veya kompresyon halinde sabit gerilme sınırları arasında periyodik yükleme (yük kontrolü),
2. Gerilme veya kompresyonda sabit yüzde şekil değişimi sınırları arasında periyodik yükleme (yer değiştirme kontrolü),
3. Burulma deformasyonu ile elde edilen ters kayma gerilmeleri,
4. Ters eğilme gerilmeleri bir boyutta (bir tabakanın esnemesi) veya iki boyutta (silindirin dönme sapması)

Yorulma ömrü optimizasyonuna yönelik malzemelerin seçiminde en bilimsel temel, geniş bir yırtılma enerjileri yelpazesinde deneysel olarak yorulma çatlak büyüme oranının belirlenmesidir. Çatlak büyüme hızı ve yorulma arasında bir ilişki daha sonra kolayca belirlenebilir. Kırılma mekanik analizi, başlangıç çatlak geometrisi ve ilerlemesi hakkında iyi varsayımlar yapmak için yorulma çatlak ve ilerlemesi hakkında yeterince şey bilindiğinde kullanılmalıdır. Çekirdeklenme analizi, potansiyel çatlak bölgelerini araştırmak için kullanılmalı ve başlangıçtaki çatlak büyüklüğünün “yeterince küçük” olması sınırlamasına uygun olmalıdır [19]. Yorulma çatlama, bileşenin kullanım ömrünün oldukça erken bir döneminde, genellikle dış yüzeyde bir noktada küçük bir çatlak oluşması ile ortaya çıkabilir. Şekil 1.11’de yorulma kopmasının oluşum aşamaları gösterilmiştir [20]. Çatlak daha sonra ana gerilme eksenine kabaca dik bir yönde malzemede yavaşça ilerler. Sonuç olarak elemanın kesit alanı artık yükü taşıyamayacağı noktaya ulaştığında elemandaki gerilme nedeniyle kopma meydana gelir.



Şekil 1.11. Yorulma kopmasının oluşum aşamaları [20]

1.6.2. Kauçuklarda yorulma

Mekanik yorulma, kauçuk malzemelerde, dinamik yüklerin veya deformasyonların uygulanması sırasında yavaş çatlak büyümesinin bir sonucu olarak, fiziksel özelliklerin aşamalı olarak zayıflamasıyla görülmektedir. Değişimlerden en belirgin olanı rijitlikte kademeli bir azalmadır. Uzun süreli statik yükleme gerilme gevşemesine neden olur ve ayrıca çoğu sentetik amorf elastomerin zamana bağlı olarak çatlmasına neden olabilir, fakat genellikle doğal kauçuk böyle değildir. Sabit bir yük altında doğal kauçuk kristalleşir ve kristalitler görünüşte çatlak oluşumunu önler [19].

Yorulma sırasında çeşitli atomik ve moleküler işlemler meydana gelir. Her ne kadar bu işlemler metallerde yoğun olarak çalışılmış olsa da, bugüne kadar kauçuk yorulma çalışmaları, kauçuğun yapısının karmaşıklığından dolayı bir süreklilik olarak ele alınmasını sağlamıştır. Böylece, kauçuğun yorulma özellikleri büyük ölçüde deneysel kalmaktadır. Buradaki tek istisna, mekanik yorulma arızasının herhangi bir gerçekçi zaman ölçeğinde oluşmadığı gerilme koşulunu temsil eden mekanik yorulma sınırıdır [19].

Çapraz bağlanmış kauçuklarda çoğunlukla görülen yorulma çatlağı, yorulma çatlamaştır, çünkü neredeyse hiç plastik deformasyon oluşturmamaktadır. Kauçukta yorulma çatlamaştırın ana nedenleri mekanik, termal, çevresel (oksijen, ozon ve ultraviyole ışınımı) ve kimyasaldır (örneğin, yağ, yakıt). Çevresel çatlama normalde küçük yüzey çatlakları olarak görülür. Kauçuk bileşenler çoğunlukla, çevresel çatlama yavaşlatmak ve ultraviyole ışınlarına karşı koruma sağlamak ve mekanik özellikleri geliştirmek için karbon siyahı gibi antioksidantlar ve antiozonantlar gibi koruyucu maddeler içerir. Rastgele olan güneş ışığından kaynaklanan çatlamanın aksine, ozon çatlakları normal olarak gerilme yönüne dik olarak büyür. Ozon çatlaklarının mekanik yorulma çatlakları haline gelip gelmemesi, kauçuk bileşimine, servis sırasındaki yüklere ve kauçuk ürünün geometrisine (tasarımına) bağlıdır. Birçok kauçuk bileşen (örneğin, doğal kauçuk köprü yatakları), yüzeyinde ozon çatlakları geliştirir, ancak büyük boyutlarından dolayı 50 yıldan daha sonra hala kullanılabilir. Ayrıca, bu tür üniteler normal olarak bir sıkıştırma ve kesme kombinasyonu altındadır ve bu nedenle ozon kırılması için gerekli olan zararlı çekme gerilmeleri iç kısımda bulunmaz [19].

1930'ların başına kadar, yorulmaya dayanım tasarımı için standart mühendislik uygulaması, uygulanan gerilmenin bir malzemenin elastik sınırını aşmamasını sağlamaktı. Ancak bu yaklaşımın yetersiz olduğu birkaç köprü ve gemi uygulamasında karşılaşılan başarısızlıklar üzerine malzemelerin elastik sınırının altında kalması ile başarısız bulunmuştur. Böylelikle, yapısal gerilmeler etrafındaki yerel gerilme konsantrasyonlarının büyük önem taşıdığı görülmüştür. Böylece kırılma mekaniği yaklaşımı gelişmiştir [19].

1.7.Çevresel Koşullar

Çevresel faktörler, kauçuğun hem kısa hem de uzun süreli yorulma davranışını etkileyebilir. Kısa vadede, yüksek sıcaklıklar ve oksijen veya ozon varlığı zararlıdır. Çatlak büyüme hızı kısa vadede bu değişkenlerle tersine çevrilebilir. Uzun çalışma sürelerinde, yüksek sıcaklık ve oksidatif yaşlanma nedeniyle elastomerde geri dönüşü olmayan değişiklikler önemli hususlar haline gelir. Bu değişiklikler hem elastik hem de yorulma özelliklerinin gelişimini içermektedir [21].

Yüksek sıcaklık kauçuklar için, hem çatlak çekirdeklenme ömrü hem de yorulma çatlak büyüme hızı üzerinde zararlı bir etkiye sahiptir. Bu durum amorf kauçuklarda en büyük etkiyi oluşturmaktadırlar. Yer değiştirme kontrollü testlerde SBR için sıcaklık 0 °C'den 100 °C'ye yükselirken yorulma ömrü 104 kat azalmaktadır. Yer değiştirme kontrollü testlerde NR için, yorulma ömrü aynı sıcaklık aralığında sadece 4 kat azalmaktadır. Dolguların ilavesi, sıcaklık bağımlılığını biraz azaltabilir[21].

Yorulma çatlak büyümesi testlerinde paralel bir etki gözlenir. Yukarıda belirtilen sıcaklık etkileri yaşlanma veya sürekli vulkanizasyon nedeniyle oluşabilecek kimyasal değişikliklerden bağımsız olarak gerçekleşir. Sıcaklık, yüksek sıcaklıklarda veya uzun sürelerde yorulma ömrünün daha da düşmesine neden olabilecek bu kimyasal işlemlerin oranı üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. Sıcaklığın gerçekte uzun vadeli davranışı ne ölçüde etkilediği, bileşik formülasyonuna bağlıdır: pişiriciler, antioksidanlar, vb. [21].

Uzun süreli yorulma testi sırasında ozona maruz kalınması, çatlak büyümesini önemli ölçüde arttırır ve ömrünü kısaltır. Gerilme yoğunluğundan dolayı, bir çatlak ucundaki elastomer ağ zincirleri, ozonla reaksiyona girmek için enerjisel olarak elverişli

durumdadırlar. Ozon, ana polimer zincirindeki karbon-karbon çift bağları ile reaksiyona girerek zincirin kırılmasına neden olmaktadır [21].

Oksijen, mekanik yorulma davranışını önemli ölçüde etkilemektedir. Oksijene maruz kalınması halinde mekanik yorulma çatlak büyüme eşiğini vakumdaki değerine kıyasla azaltmaktadır. Oksidatif yaşlanma olarak tanımlanan, kauçuğun yapısında çözülmüş veya dağılmış oksijen, zamanla toplu elastomer ağ yapısında kimyasal değişiklikler meydana getirebilmektedir. Oksidatif yaşlanma, kırılabilirliğe ve yorulmada çatlak büyümesine karşı direnci azaltır [21].

1.8.Literatür Taraması

Bir malzemenin hasarını önlemek için, yorulma ömrünü düzenleyen faktörleri anlamak oldukça önemlidir. Kauçuğun ömrünü etkileyen faktörler, 1964'ten beri yıllar boyunca ilgi konusu olmuştur. Bu bölümde kauçuğun yorulma ömrünü ve yay rijitliğini etkileyen faktörler üzerinde yapılan deneysel çalışmalar genel olarak dört alt kategoride özetlenmiştir: mekanik yükleme, kauçuğun kimyasal bileşimi, çevre koşullar ve vulkanizasyondur.

1.8.1. Mekanik yükleme koşulları

Kauçuk bileşenin hasarı, mekanik yükleme koşulu ile yakından ilişkilidir. Kauçuk bileşenler genellikle çekme-çekme, çekme-sıkıştırma, çekme-burulma, sıkıştırma-burulma ve sıkıştırma-sıkıştırma gibi dalgalanma veya kombinasyon yüklemelerine maruz kalırlar. Yorulma testinde, yükün etkisi sabit genlik veya değişken genlik (gerilme veya yüzde şekil değişim) uygulanarak araştırılabilir [22].

Abraham ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmada, kristallenmeyen kauçuk için maksimum ve minimum gerilme genliğinin etkisini araştırmışlardır. Sürekli şekil değişim genliği ile minimum gerilmeyi arttırmanın, dolgu kauçuk malzemelerin ömrünü büyük ölçüde artırdığını bulmuşlardır [23].

Araştırmacılar genellikle sabit genlikli yükleme koşullarına odaklanırken, Harbour ve arkadaşları, servis sırasında gerçek uygulamaları temsil ettiği için değişken genlik ve çok eksenli yükleme koşullarında kauçuğun yorulma davranışlarını araştırmışlardır. NR ve SBR'yi karşılaştırarak, NR'deki çatlak görünümünün SBR'den daha fazla

olduğunu ve yorulma ömrünün artmasının kauçuk dolgulu sistem ile ilgili olduğunu ifade etmişlerdir [24].

Yorulma testinde, kauçuk malzeme düşük ısı iletkenliği nedeniyle kendi kendine ısınma eğilimindedir. Yorulma testlerinde kullanılan frekanslara bağlı olarak elastomer malzemeler, iç sürtünmelere maruz kalmaktadırlar. Yüksek frekanslarda kısa sürede daha fazla çevrim yapacakları için iç sürtünmeler bir o kadar yoğun olup ısı oluşturacaklardır. Sonuç olarak, kauçuğun yüzey sıcaklığını arttırdığında frekansı arttırmaktan kaçınılmalıdır. Candau ve arkadaşlarının yapmış oldukları çalışmada, yüksek sıcaklık nedeniyle kristalleşme engellendiğinde NR'nin ömrünün kısaldığı bildirilmiştir [25]. Kendiliğinden ısınan kauçuk NR'nin üzerine yapılan çalışmada Stadlbauer ve arkadaşları, kendiliğinden ısınmanın sıcaklık sınırını aşmadığı sürece, 1 ile 5 Hz arasındaki frekans aralığının önemli olmadığını ifade etmişlerdir [26]. Major ve arkadaşlarının elastomerlerin yorulma davranışlarının test frekans bağımlılığı üzerine çalışma yapmışlardır. Test frekansı 0,2 ile 50 Hz arasında değişmiştir. Yırtılma enerjisi, yük-yüzde şekil değişim histerik eğrileri kullanılarak belirlenen yüzde şekil değişim enerji yoğunluğu verilerine dayanılarak hesaplama yapmışlardır. Ayrıca döngüsel yükleme sonucunda deneysel örnekler üzerinden sıcaklık ölçümleri yapmışlardır. Çatlak büyüme oranının test frekansına bağlı olduğunu ve test frekansı arttıkça, çatlak büyüme hızının arttığını sunmuşlardır [27]. Bu sonuçlara bakılarak test frekansındaki artış ile malzeme ekstra ısınarak yorulmaya olumsuz etki oluşturacaktır. EPDM ve SBR kullanılan çalışmada, EPDM numunelerin frekanslara bağlı olarak daha fazla ısındığı ve bunun da ömür üzerinde olumsuz etki oluşturacağı görülmüştür.

1.8.2. Kimyasal bileşikler ve takviye dolgusu

Kauçuğun yorulma özelliği araştırmacılar arasında büyük ilgi görmüştür ve çalışmalarda farklı kauçuklar kullanılmıştır. Kauçuğun yorulma ömrü, doğası ve yükleme şekli ile doğrudan ilgilidir. Sonuç olarak Mullins etkisi, yüzde şekil değişim kristalizasyonu, histeresis ve viskoelastisite gibi yapısal davranışlar gösterir. NR, büyük deformasyonlara dayanma kabiliyeti ve çatlak ilerlemesine karşı direnci nedeniyle en popüler seçimdir. NR'nin kristalleşmesinin yorulma ömrü üzerindeki etkisi birçok araştırmacı tarafından araştırılmıştır [22].

Keller ve arkadaşları tarafından, silisyum bazlı kauçuğun kendi kendini iyileştirmesi durumunu (RTV 360, Slygard 184) yorulma burulma yükü altında incelenmiştir. Burulma yorulma testi altında, kauçuğun kendi kendini iyileştirme özelliğini gösterdiğini ve yorulma çatlak büyümesini engellediğini sunmuşlardır [28].

Schubel ve arkadaşları, lastik kauçuğunun yorulma davranışını, doğal kauçuk ve polibütadien karışımı kullanarak incelemiştir. Lastik kauçuğunun yorulma ömrü, çatlak büyüme başlangıcındaki kritik yırtılma enerjisinin değeri ile birlikte yorulma çevrimlerine karşı yırtılma enerjisi eğrisi arasındaki ilişki temel alınarak tahmin edilmiştir. Bu çalışmada çatlak büyüme hızı ile yırtılma enerjisi arasındaki ilişki güç kanunıyla açıklanmıştır. Kauçuğun kristalleşen yapısının, çatlak büyümesini yavaşlattığı ve çatlak yayılmasına neden olduğu anlaşılmıştır. Düzlem dışı çatlak yayılmasından önlemek amacıyla numunenin her iki tarafına çatlak büyüme yönü boyunca çentik atılmıştır. Kritik yırtılma enerjisine dayanılarak yapılan yorulma ömrü tahmininde, numunelerin yorulma ömrü 8,1 milyon çevrim olarak elde edilmiştir [29].

Ghosh ve arkadaşları NR ve BR karışımının karakterizasyonu ve çatlak büyümesi üzerine araştırma yapmışlardır. NR/BR karışımı ve NR/SBR karışımı içeren genişletilmiş bir çalışma sunmuşlardır. NR/BR'nin daha iyi dayanıklılık sağladığından üstün çatlak büyüme direncine sahip olduğunu ifade etmişlerdir [30].

Seichter ve arkadaşları, çekme-basma yükü altındaki endüstriyel kauçuğun (SBR/BR /NR karışımları) yorulma davranışını araştırmışlardır. Bu çalışmada 5 Hz frekanslı sinüs dalgası altındaki yorulma ömrü ve malzeme davranışı belirlenmiş ve endüstriyel kauçuğun doğal frekansı olan 1 Hz'lik sinüs dalgası altındaki sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Numune sıcaklığı, 1 Hz ve 5 Hz frekansları arasında önemli ölçüde değiştiği için, frekansın ve gerilme oranının etkisi incelenmiştir. Test sonuçları, kullanılan malzemeler, seçilen numuneler ve incelenen yük koşulları için, frekansın, gerilme oranının ve yük eğrisinin yorulma ömrü üzerinde belirgin bir etkisi olmadığını göstermiştir. Bununla birlikte aktif karbon siyahı miktarı fazla olan B2 kauçuk karışımında daha fazla ısı birikmesi olmaktadır. Bu nedenle 5 Hz olan sinüs dalgası altında ve maksimum yüzde şekil değişiminin %55'in üzerinde olduğu durumda artan termal yük sebebiyle B2 karışımının yorulma ömrü, B1 karışımından daha kısadır. Maksimum yüzde şekil değişiminin %30'un altında ve frekansın 1 Hz olduğu

durumda ise B1 ve B2 kauçuk örneklerinin sıcaklıkları ve yorulma ömürleri yaklaşık olarak aynıdır [31].

Siyah takviye dolgu maddeleri kauçuklarda ultraviyole bozulmasına karşı koruma sağlar. Ayrıca, önemli ölçüde mekanik yorulma çatlaklarını da etkilerler. Yırtılma direnci genel olarak; bir parçaya gerilme uygulandığında sıyrık veya kesiğin oluşmasına karşı direnç olarak tanımlanabilir. Hem yüksek hem de düşük takviye dolgu maddelerinin, dolgu malzemesi kullanılmamış elastomer ile birçok kauçuk tipinin yorulma çatlak büyümesi üzerindeki etkileri literatürde kıyaslanmıştır. Literatürde, yüksek karbon siyahı içeren polikloropren hariç tüm vulkanizatların yırtılma büyüme direncini belirgin bir şekilde arttırdığı ve düşük karbon siyahı takviyeli SBR, bütül ve polikloropren üzerinde yararlı bir etkisi olduğu gözlemlenmiştir. Karbon siyahı ek bir histerezis kaynağı olmakla birlikte çatlak ucunun düzleştirilmesinde ve yayılma eğilimini arttırmaktadır. Bu iki mekanizma, yırtılmanın büyümesine karşı artan dirençten temel olarak sorumlu bulunmuştur [19].

Düşük yırtılma enerjilerinde, yorulma sınırına yakın, takviye dolgu maddeleri, yırtılma enerjisi değerini yaklaşık % 50 arttırmaktadır. Yırtılma enerjisinin üstünde, histerezis, aksi takdirde çatlak büyümesinde harcanacak enerjiyi dağıtarak malzemelerin çatlak büyüme direncini artırır. Bununla birlikte histerezis, aynı zamanda ısı birikmesine neden olur; bu ısı dağılmadığı sürece, daha fazla yorulma çatlamaına neden olabilir. Bir dolgu malzemesinin dahil edilmesi ayrıca modülü artırır, böylece geleneksel mekanik yorulma sınırının azaltılmasını sağlamaktadır. Bunun nedeni, sabit yüzde şekil değişim test koşullarında, daha sert bir bileşiğin belirli bir zorlamada daha yüksek bir zorlanma enerji yoğunluğu seviyesine sahip olmasıdır. Bu durum yük kontrollü testler için geçerli olmaktadır [19].

Kauçuk bileşikteki dolgunun yorulma ömrü üzerindeki etkisi 1945'ten beri incelenmiştir. En yaygın olarak kullanılan takviye dolgu maddesi karbon siyahı, geçmişte kauçuk mukavemetini önemli ölçüde arttırması ve geleneksel olarak mevcut nedeniyle popülerdi. Ancak, bugüne kadar bile, araştırmacılar hala, kauçuk bileşiginde kullanılan farklı tipte karbonun siyahının optimum miktarını araştırmaktadırlar [22].

Son yıllarda “dolgu” terimi yalnızca karbon siyahıyla sınırlı değildir. Farklı materyallerin kauçuk bileşigine dolgu maddesi olarak eklendiğini bildiren bir dizi

çalışma yapılmıştır. Nanokiller, iyi bariyer özelliği sayesinde yüksek güçlendirme verimliliği sunmaktadırlar [22].

Wu ve arkadaşları, karbon siyahı ve nanokil karışımı ile takviye edilmiş SBR kauçuğu hazırladıkları çalışmalarında, malzemenin histerezis ve yırtılma enerjisinin arttığının tespit edildiği ve yorulma ömrü açısından, SBR'nin nanokompozit nanokil içeriğinin artmasıyla iyileşme gösterdiğini sunmuşlardır [32].

Liu ve arkadaşları, hibrid karbon siyahı ve nanokil içeren doğal kauçuk kompozitlerin mekanik özelliklerini, yorulma ve kesilme direnci incelenmişlerdir. Hibrit dolgulu numunelerin mukavemetinin gözle görülür şekilde iyileştirildiğini, yorulma özelliğinin arttırılmasının, kauçuk matrisinde geliştirilen kuvvet anizotropisinden kaynaklandığını sunmuşlardır. Kil tabakalarının, çift fazlı dolgu ağından veya yüzde şekil değişim altında arttırılmış kristalizasyondan kaynaklanan daha fazla enerji yayma mekanizmasıyla çatlak direncinin geliştirilmesinde önemli bir rol oynadığını ifade etmişlerdir [33].

Tian ve arkadaşları, silikat nano fiberleri ve kısa PA-66 mikro fiberleri ile doldurulmuş etilen-propilen-dien monomerinin (EPDM) mekanik özelliklerini incelemiştir. Aynı dolgu maddesi içeriği ile doldurulmuş nano fiber dolgulu EPDM, PA-66 mikro fiberler dolgulu EPDM'e göre daha iyi dinamik özelliklere sahip olduğunu belirlemiştir. Bunun nedenini, nanofiberlerin mükemmel takviye etkisi göstermesi ile açıklamışlardır [34].

Grafen (GE)'in polimerik malzemede bir dolgu maddesi olarak incelenmesi, malzemeye olağanüstü özellikler sağladığı için çok dikkat çekmiştir. Mükemmel termal, elektriksel, mekanik ve optik özelliklerinin yanı sıra, kauçuk ve grafen arasındaki güçlü etkileşimin malzemenin yorulma direncini arttırdığı da gözlenmektedir [22].

Yan ve arkadaşları, NR ve grafen dolgulu-NR'nin yorulma çatlak büyümesini incelemiştir. Grafenin daha yüksek yüzde şekil değişimlerinde kristalleşme nedeniyle çatlak büyümesini daha da sınırlandırabildiğini bulmuşlardır [35].

Dong ve arkadaşları, grafen oksit doldurulmuş-NR kompozitini imal etmiş ve çok eksenli yorulma yüklemesine maruz bırakmıştır. Kompozitin düşük dolgu maddesi içeriğinde daha iyi performans gösterdiğini ortaya koymuşlardır [36].

Kluppel çalışmasında, yorulma çatlak yayılma davranışını SBR malzemede iki dolgu maddesi türü (silika ve karbon siyahı) kullanarak araştırmıştır. Dolgu-dolgu bağının karbon siyahı içeriği ile arttığı bulunmuştur. Silikanın, karbon siyahı ile karşılaştırıldığında, daha düşük histerezis ve gerilme mukavemeti ile sonuçlanan daha az kararlı bir dolgu kümesi oluşturduğu ifade edilmiştir [37].

Dong ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada, çeşitli silika ve karbon siyahı içeriği ile dolu olan NR'nin yorulma özelliklerini incelemişlerdir. Silika ilavesinin çatlak başlatma ve yayılma direncini arttırdığı ve daha uzun ömürle sonuçlandığı bulunmuştur [38].

1.8.3. Çevresel koşullar

Mekanik yükleme ve kimyasal bileşimlerin yanı sıra, çevresel koşullar da kauçuk bileşenin yorulma ömrünü etkileyen bir başka faktördür. Kauçuğun farklı ortamlara maruz bırakılması, uzun vadede servis ömrünü etkileyen mekanik özelliklerin değişmesine neden olabilmektedir [22].

Le Gorju ve Bathias yapmış oldukları çalışmada, NR'nin havadaki oksijenin varlığından dolayı kimyasal hasar görmesinin yanı sıra, bu durum uzatıldığında yüksek sıcaklık ve oksidasyon reaksiyonu hızlı bir şekilde gerçekleştiğini sunmuşlardır. NR azot ve suya maruz kaldığında bu durum değişmektedir. Kauçuğun yorulma ömrü üzerindeki sıcaklık etkisi, malzeme optimum sıcaklığının üzerinde kullanıldığında bozulma olabileceğinden endişe vericidir. Le Gorju ve Bathias, NR'nin çatlak büyüme oranının, sıcaklık yükseldiğinde arttığını bulmuşlardır. NR'nin kristalleşmesi, sıcaklık arttığında büyük ölçüde etkilenmiştir [39].

Chou ve arkadaşlarının yalnızca EPDM'ye dayanan deneysel çalışmalarında, karbon siyahı dolgululu veya dolgusuz kauçuğun kauçuk ömrünün altı aylık bir termal yaşlanma sonrasında önemli ölçüde azaldığını ifade etmişlerdir. Yaşlanma sıcaklığındaki ve yaşlanma süresindeki artışın, yorulmada belirgin bir düşüşe neden olduğunu belirtmişlerdir [40].

Ngolemasango ve arkadaşları, NR'nin yüzde şekil değişim kristalizasyon karakteristiğinin yüksek sıcaklığa maruz kaldıklarında engellendiğini ve yorulma çatlak büyüme hızındaki artışla sonuçlandığını açıklamışlardır. Ayrıca, yaşlanma işlemi sırasında, kauçuk bileşiğine eklenen antioksidanların tükenerek, oksidatif yaşlanmanın oluşmasına izin vermesi kauçuk yüzeyinde sertleşmeye neden olduğunu ifade etmişlerdir [41].

Neuhaus ve arkadaşlarının, yaşlanma etkisini, yüksek sıcaklık ve oksijen kombinasyonu ile tanımladıkları çalışmada, termo-oksidatif yaşlanmanın kauçuğun sıcaklık hassasiyetini arttırdığını, yaşlanma süresinin sıcaklık hassasiyeti doğrusal olarak arttığını ifade etmişlerdir [42].

Vinod ve arkadaşları, NR'nin ozon direncinin, alüminyum tozu ilavesiyle geliştirildiğini gözlemlemişlerdir. Deneysel örnekte ozonun altında kalan çatlaklar gözlemlense de, alüminyumla doldurulmuş NR numuneleri doldurulmamış NR numunelerine kıyasla daha küçük ve süresiz çatlaklara sahip oldukları raporlanmıştır [43].

Saharako ve arkadaşları, ozonun NR/BR/EPDM karışımı üzerindeki etkisini incelemişlerdir. NR/BR/EPDM harmanlarının ve NR/BR dolgulu harmanların kopma gerilmesi ve çekme uzaması az çok eşdeğer olduğunu gözlemlemişlerdir. NR/BR/EPDM harmanlarının, eşdeğer dolgulu NR/BR harmanına göre üstün yırtılma mukavemeti ve yorulma dayanımı gösterdiğini sunmuşlardır. NR/BR/EPDM karışımının hem statik hem de dinamik koşulları altında ozon direnci, 30 phr EPDM ile vulkanizatları mükemmel hale getirebileceğini ifade etmişlerdir [44].

Sae ve arkadaşları, CR/NR karışımının özelliklerini araştırmışlardır. Karışımdaki yüksek CR içeriğinin hem mekanik özellikleri hem de çevresel direnci arttırdığı bulunmuştur. NR'nin yapısındaki çift bağ, ozon saldırısına karşı kauçuğu duyarlı hale getirmektedir. Bununla birlikte, NR formülasyonuna uygun bileşik eklendiğinde, ozon direnç özelliğini büyük ölçüde geliştirdiğini ifade etmişlerdir [43,45].

1.8.4. Vulkanizasyon sistemi

Farklı kürlenme sistemleri tarafından vulkanize edilmiş dolgu malzemesi kullanılmamış doğal kauçuğun çatlak büyüme özellikleri oldukça farklıdır. Polisülfid

kür sistemi, genel olarak monosülfid veya doğrudan karbon-karbon çapraz bağlarından iki kata kadar daha iyi olmaktadır. Benzer bir iki katlı değişim, çatlak büyüme oranlarında gözlenmektedir. Vulkanizasyon sisteminin, dolgulu NR bileşiklerinin gücü üzerindeki etkisi ile karşılaştırılabilir sonuçlar elde edilen birçok çalışma yapılmıştır [46]. Bu nedenle, en kararsız polisülfidik çapraz bağların, yorulma direnci için daha güçlü monosülfid veya karbon-karbon bağlarından daha iyi olduğu görülmektedir. Bir başka çalışmada, polisülfid çapraz bağlarının, çatlak ucu etrafındaki yüksek gerilmeler altında ana omurga zincirinden önce kırıldığı ifade edilmiştir. Bu nedenle, gerilme daha büyük bir malzeme hacmi üzerinde yeniden dağıtılır. Bu etki muhtemelen nispeten güçlü olan karbon-karbon çapraz bağları durumunda yoktur [47]. Bir diğer çalışmada ise; doğal kauçuktaki farklı güçlerin, farklı çapraz bağlantı yapılarının yüzde şekil değişim kaynaklı kristalizasyon üzerindeki etkisinden kaynaklandığı ileri sürülmüştür [19,48].

1.8.5. Rijitlik

Hamaguchi ve arkadaşları, yaşlanmanın kauçuk yatak rijitliği üzerindeki etkisini çalışmış ve 20 yıl sonra, yatağın dikey rijitliğinin başlangıç değerine % 20'den daha az arttığı sonucuna varmışlardır. Bu durum, yaşlanma ile birlikte kauçuğun yüksekliğinin azalmasından kaynaklandığını sunmuşlardır. Mekanik özellikteki değişikliklerin yaklaşık olarak bazı tahminler ve mevcut araştırma sonuçları ile uyumlu olduğu sonucuna varmışlardır [49].

Xiang ve arkadaşları, butil kauçuğu üzerinde hızlandırılmış bir test gerçekleştirdikleri çalışmada, numune yüksekliğinin, 371 gün içinde oda sıcaklığında 1/16 katı kadar azaldığı sonucuna varmışlardır [50].

2. MALZEME VE YÖNTEM

Bu bölümde, tez çalışması kapsamında kullanılan kauçuk karışımlarının özellikleriyle, kauçuk numunelerin şartlandırma koşullarıyla ve bu numunelere uygulanan testlerle ilgili bilgiler verilmektedir.

2.1. Test Malzemeleri

Bu tez çalışmasında TEKNO KAÜÇUK A.Ş. tarafından reçetelendirilmiş üç farklı kauçuk karışım kullanılmıştır. Ö-NR karışımı doğal kauçuk bazlı yarı etkin pişirme (SEV) sistemiyle üretilirken, NR karışımı konvansiyonel pişirme sistemiyle üretilmiştir. Bir diğer kauçuk karışımı olan EPDM ise yarı etkin pişirme sistemiyle elde edilmiştir. Reçeteler firma tarafından oluşturulduğundan üçüncü şahıslarla paylaşamamaktadır. ISO-37 tip-1 şeklinde hazırlanan test numuneleri ile malzemelere ait özellikler belirlenmiştir. Tip-1 nedeniyle ilk boy 25mm iken 50mm'ye kadar uzama sonucu oluşan gerilme değerinden %100 gerilme, ilk boy 25mm iken 100mm'ye kadar uzama sonucu oluşan gerilme değerinden %300 gerilme sonuçları elde edilmiştir. Malzemelere ait belirli özellikler Tablo 2.1'de gösterilmektedir.

Tablo 2.1. Çalışmalarda kullanılan malzemeler ve özellikleri

MALZEME	SERTLİK (SHORE A)	YOĞUNLUK (kg/m ³)	KOPMA (N/m ²)	UZAMA (%)	GERİLME %100 (N/m ²)	GERİLME %300 (N/m ²)
NR	45	1092	1.89x10 ⁷	611	1.61x10 ⁶	6.02x10 ⁶
EPDM	45	1111	1.07x10 ⁷	652	1.31x10 ⁶	3.75x10 ⁶
Ö-NR	45	1132	2.26x10 ⁷	622	1.07x10 ⁶	3.80x10 ⁶

2.2. Numune Üretimi

Test parçaları, 250 ton üretim kapasiteli, 2600 cm³ enjeksiyon hacmi olan ve enjeksiyon işlemi üstten yapılan Werner marka bir hidrolik pres yardımıyla hazırlanmıştır. Bu parçalar hazırlanırken, sıcaklık 150°C'de sabit tutularak 150 bar hidrolik basınç uygulanmıştır. Bu işlem, test standartlarına uygun boyutlardaki kalıplarda ve reometre eğrilerinden saptanan optimum pişme sürelerine göre gerçek-

leştirilen vulkanizasyon aşamasıyla sonlandırılmıştır. NR bazlı numuneler geleneksel sülfür vulkanizasyonuna uygun olarak 900 sn, özel NR numuneleri ve EPDM bazlı numuneler yarı-verimli sülfür vulkanizasyonu kullanılarak 600 sn vulkanizasyon süresi belirlenmiştir. Vulkanizasyon sonrası test numunelerinin Shore sertliği 45 ShA'dır.

2.3.Yaşlandırma Koşulları

2.3.1. Hızlandırılmış yaşlandırma

Kauçuk karışımlarından hazırlanan numunelere 100°C sıcaklıkta ve 72 saat süreyle hava ortamında hızlandırılmış yaşlandırma yapılmıştır. Bu işlemin ardından statik ve dinamik yay rijitlik testleri tekrar edilmiş ve sonrasında tüm numunelere yorulma testi yapılmıştır. Yaşlandırma, Nuve marka etüv yardımı ile DIN 53508 standardına uygun şekilde gerçeleştirilmiştir. Kullanılan cihaz şekil 2.1'de cihazla ilgili teknik bilgiler Tablo 2.2'de ve yaşlandırılmış numuneler şekil 2.2'de verilmiştir.



şekil 2.1. Yaşlandırma testi için kullanılan etüv

Tablo 2.2. Etüv teknik özellikleri

NUVE FN 400 Kuru Hava Sterilizatörü	
Sıcaklık Ayar Aralığı	+70°C / 250°C
Sıcaklık Ayar ve Okuma Hassasiyeti	1°C
Sıcaklık Dalgalanması	±1°C
Zamanlayıcı	1 dakika - 99,9 saat + Süresiz Pozisyonu
Hücre Hacmi, litre	44
Kurulu Güç	800 W
İç Yüzey Yapısı	Anodik oksidasyonlu alüminyum
Güç Değerleri	230 V - 50 Hz



Şekil 2.2. Yaşlandırılmış numuneler

2.3.2. Yağ ortamında yaşlandırma

Kauçuk karışımlarından hazırlanan numunelere 100°C sıcaklıkta ve 72 saat süreyle yağ ortamında yaşlandırma yapılmıştır. Bu işlemin ardından statik ve dinamik yay rijitlik testleri tekrar edilmiş ve sonrasında tüm numunelere yorulma testi yapılmıştır. Yaşlandırma, Nuve marka etüv yardımı ile DIN 53508 standardına uygun şekilde gerçekleştirilmiştir. Mobil 1 marka 5W-30 incelikteki motor yağı içerisinde yaşlandırılmış numuneler Şekil 2.3'te verilmiştir.



Şekil 2.3. Yağ ortamında yaşlandırılmış numuneler

2.4. Statik ve Dinamik Yay Rijitlik Testleri

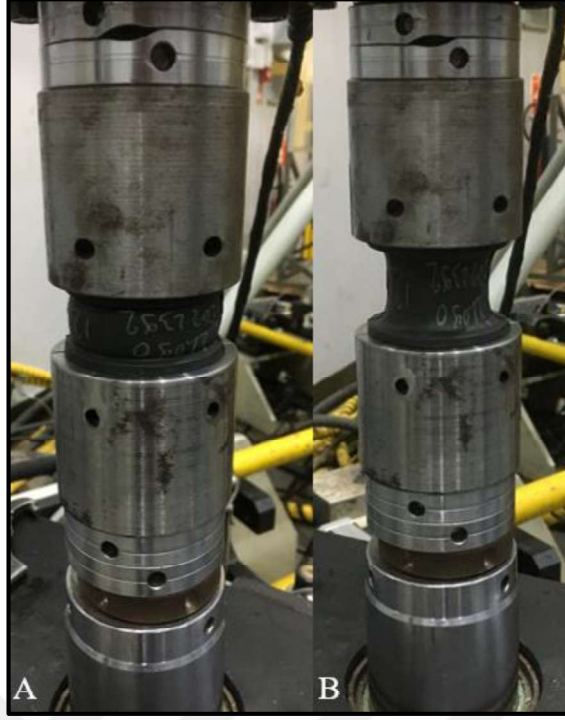
Statik ve dinamik yay rijitlik testleri tek eksenli bir MTS hidrodinamik test makinesi yardımıyla belirlenmiştir. Test cihazı, 0-200 Hz frekans aralığı, ± 50 kN kuvvet ve ± 60 mm deplasman aralığında çalışmaktadır. Test cihazına ait teknik bilgiler Tablo 2.3'te ve test cihazının örnek gösterimi Şekil 2.4'te verilmektedir. Şekil 2.5A'da test sırasındaki numunelerin basma durumu, Şekil 2.5B'de ise çekme durumu gösterilmiştir.

Tablo 2.3. MTS hidrodinamik test makinesinin teknik özellikleri

MTS Hidrolik Güç Ünitesi	
Model Numarası	505.90s
Güç Değerleri	380 V, 3 Ph, 50 Hz
Çalışma Basıncı	3000 psi, 207 bar
Akış	26,5 gpm, 100 L/dk



Şekil 2.4. MTS hidrodinamik test makinesi



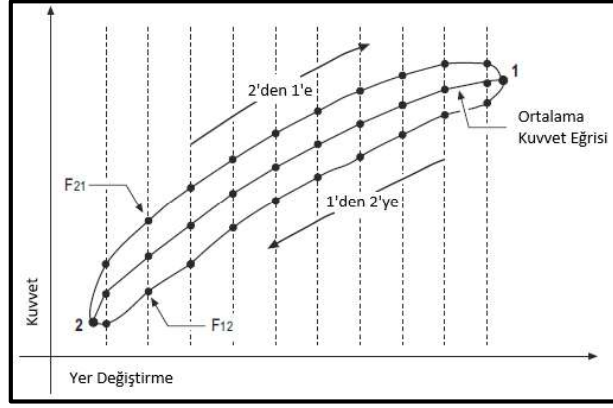
Şekil 2.5. Test sırasında numuneler
A) Basma durumu, B) Çekme durumu

Statik test prosedüründe, test hızı 10 mm/dk, test aralığı olarak 5 mm basma ve 10 mm çekme olmak üzere, 3 adet çevrim yapıldıktan sonra, ölçüm metodu olarak 4. çevrimdeki kuvvet ortalamasından çizilen eğrinin basma tarafında kalan kolundan değerler (-400N ve -600N'deki kuvvet değerleri ve bu kuvvetlere denk gelen uzama değerleri) alınır. Ortalama kuvvet eğrisi Denklem (2.1)'deki şekilde hesaplanır. Şekil 2.6'da kuvvet-yer değiştirme eğrisinde çizdirilen ortalama kuvvet eğrisi gösterilmiştir. Ardından kuvvet-uzama grafiği çizdirilerek ilgili değerlerden Denklem (2.2)'de ortalama uzama(ΔS) ve Denklem (2.3)'de eğim hesabı yapılarak yay rijitliği(K_z) tespit edilir. Şekil 2.6'da gösterilen grafikte F_{12} , grafikteki 1 yönünden 2 yönüne olan basma kolunu ifade etmektedir. Aynı şekilde F_{21} , grafikteki 2 yönünden 1 yönüne olan çekme kolunu ifade etmektedir. S_1 ve S_2 , belirlenen kuvvetlere denk gelen yer değişimleridir.

$$\text{Ortalama kuvvet: } \Delta F = \frac{F_{12} + F_{21}}{2} \quad (2.1)$$

$$\text{Ortalama uzama: } \Delta S = S_1 - S_2 \quad (2.2)$$

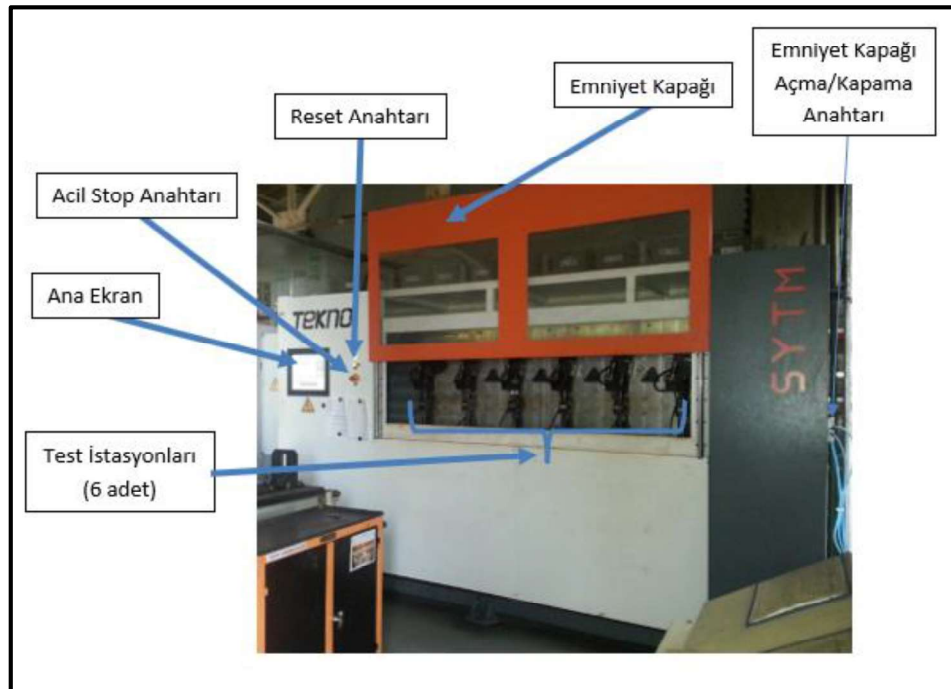
$$\text{Yay rijitliği: } K_z = \frac{\Delta F}{\Delta S} \quad (2.3)$$



Şekil 2.6. Ortalama kuvvet eğrisi

2.5.Yorulma Testleri

Bu bölümde Tekno Kauçuk A.Ş. tarafından üretilen ve/veya geliştirilen kauçuk titreşim sönümleyicilerde kullanılan karışımların yorulma performanslarını tanımlamak için kullanılan test yöntemi ifade edilmektedir. Sürekli yorulma test makinesi, altı istasyonlu bir test makinesidir. Numuneler hidrolik piston yardımı ile daha önceden belirlenmiş bir açıda eğilerek her bir istasyona bağlı elektrik motorları yardımıyla 720 dev/dk ile ilgili istasyonundaki alt mili ekseninde döndürmektedir. Bu esnada tur sayısı ve her bir parçanın eğilme kuvvetine gösterdiği tepki kuvveti kayıt altına alınmaktadır. Kullanılan test makinesi Şekil 2.7'de gösterilmiştir.

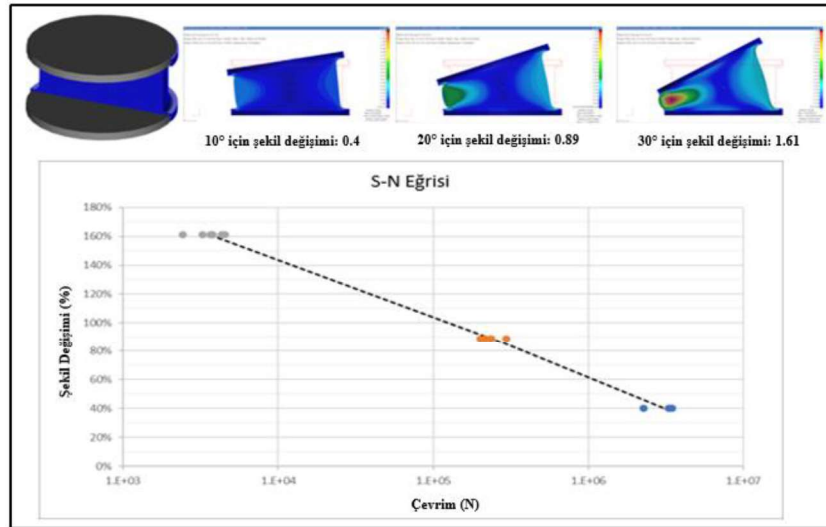


Şekil 2.7. Sürekli yorulma test makinesi

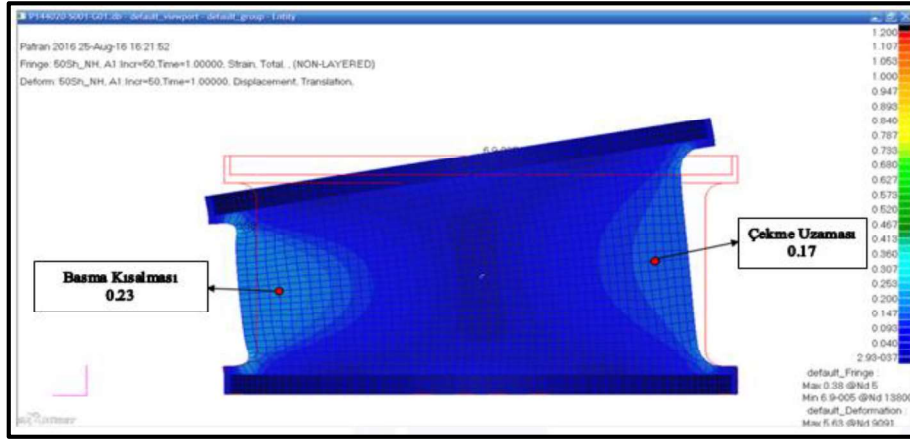
Sürekli yorulma test makinesinde, testi bitirmek gerekli bitirme kuvveti %50 kuvvet kaybının yaşandığı nokta olarak belirlenmiştir. Numune üzerindeki yükün %50'den daha aşağı düşmesi (hasarın oluşması) durumunda ilgili istasyon durmaktadır. Bu durumda test tamamlanmaktadır.

Bu yorulma testi ile alakalı olarak Tekno Kauçuk A.Ş. tarafından yapılmış örnek sonlu elemanlar analizinde (FEA) standart malzeme seviyesi test numunesi geometrisi ile 3 farklı zorlanma seviyesinde (10° , 20° , 30°) şekil değişimi tespit edilmiştir. Numuneler aksel simetrik özelliğe sahip olduğundan ve eğme hareketi merkez eksenini üzerinden verildiğinden dolayı bir taraf basma, diğer taraf ise çekme gerilmesine maruz kalmaktadır. Daha önceden belirlenmiş olan 3 farklı zorlanma modu (10° , 20° , 30°) için sonlu elemanlar analizi metodu ile çekme ve basma yönlerindeki yüzde şekil değişimi oranları hesaplanır. Parça her turda bir kez basma ve çekme verilmesine maruz kaldığından dolayı bu yüzde şekil değişimi seviyeleri birbirine eklenerek S-N eğrisi hesaplanır. Şekil 2.10'de örnek olarak açılara bağlı uzama seviyeleri ve S-N eğrisi gösterilmiştir.

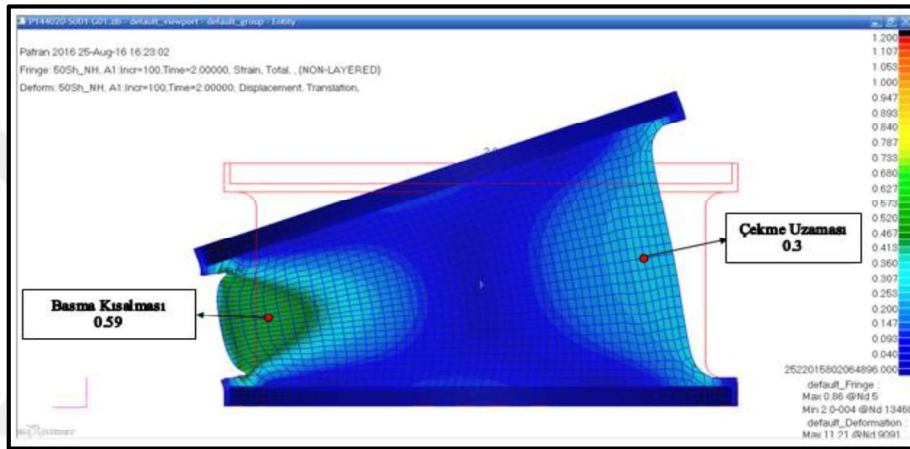
Şekil 2.11'de 10° için yapılan şekil değişimi miktarı, 2.12'de 20° için yapılan şekil değişimi miktarı ve 2.13'de 30° için yapılan şekil değişimi miktarı sunulmuştur. Şekillerde çekme tarafında ve basma tarafında oluşan şekil değişimleri gösterilmiştir. Dinamik ve döngüsel hareketleri nedeniyle iki tarafında uzama değerleri toplanarak maksimum yüzde şekil değişim değeri ele alınmalıdır.



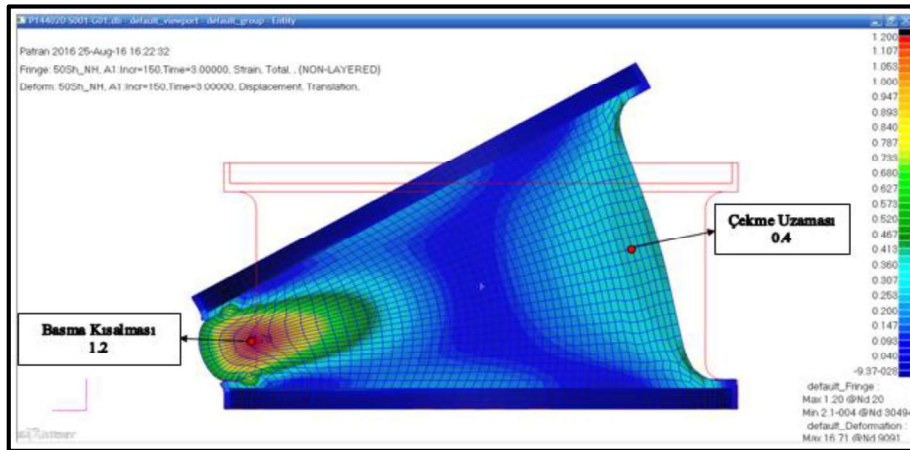
Şekil 2.10. Açılara bağlı şekil değişimi miktarları ve S-N eğrisi



Şekil 2.11. 10° için yapılan şekil değişimi miktarı

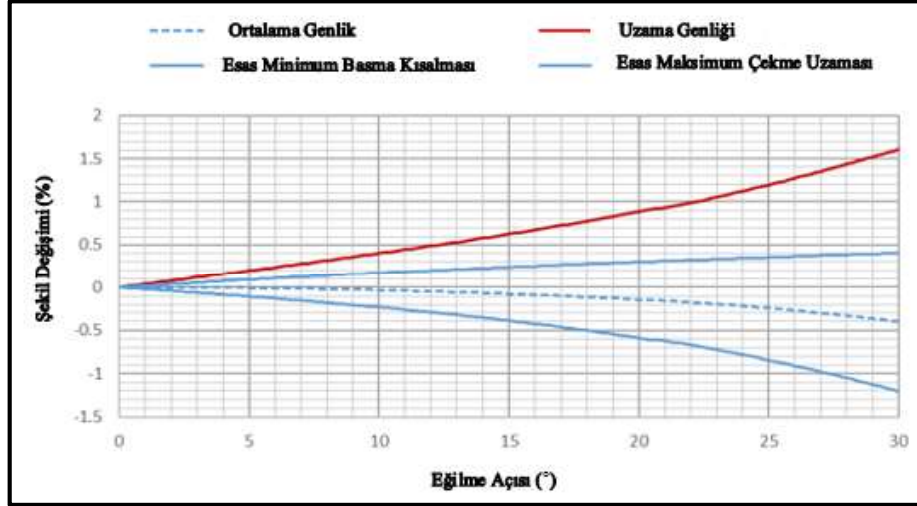


Şekil 2.12. 20° için yapılan şekil değişimi miktarı



Şekil 2.13. 30° için yapılan şekil değişimi miktarı

Şekil 2.14'te sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen çekme ve basma yönlerindeki açılara bağlı olarak oluşan maksimum çekme ve minimum basma uzamaları, ayrıca ortalama genlik ve uzama genlikleri gösterilmiştir. Şekil 2.14'te gösterilen grafiğe ait değerler Tablo 2.4'te sunulmuştur.



Şekil 2.14. Maksimum-minimum şekil değişimleri(%)

Tablo 2.4. Maksimum-minimum şekil değişimleri(%)

Maksimum-Minimum Şekil Değişimleri(%)				
Açılar	Minimum	Maksimum	Ortalama	Genlik
10°	-0.23	0.17	-0.03	0.40
20°	-0.59	0.30	-0.14	0.89
30°	-1.20	0.41	-0.40	1.61

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Statik ve Dinamik Yay Rijitliği Test Sonuçları

Çalışmanın bu bölümünde NR, Ö-NR, EPDM karışımlarından üretilen yorulma test numunelerinin yaşlandırılmadan önceki statik ve dinamik yay rijitlikleri yaşlandırma sonrası yay rijitlikleriyle kıyaslanmıştır.

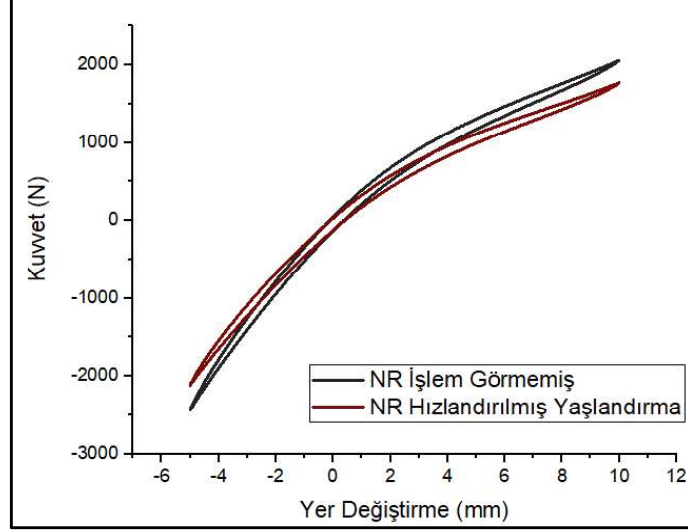
NR'nin genel çalışma sıcaklığı dikkate alınarak yaşlandırma koşulları seçilmiştir. Bu nedenle 100°C'de 72 saat etüv içerisinde hem havada hem de yağda yaşlanmaya maruz bırakılan numunelerin yaşlandırma sonrası statik ve dinamik yay rijitlikleri ölçülmüştür.

Şekil 3.1'de NR test numunelerinin işlem görmemiş ve hızlandırılmış yaşlandırılan statik yay rijitlikleri histerezis eğrisi sunulmuştur. Test deplasman kontrollü olduğundan iki numune de -5mm ve +10mm deplasman yapmış ancak ölçülen maksimum kuvvet değerlerinin hızlandırılmış yaşlandırmaya maruz kalmış numunelerde daha düşük olduğu gözlenmiştir.

-5mm deplasman uygulandığında işlem görmemiş numuneler -2439.55 N iken hızlandırılmış yaşlandırma sonucu aynı deplasman değerinde numuneler -2116.00 N olarak ölçülmüştür. Bu deplasman değerinde kuvvet farkı 323.55 N olarak görülmüştür.

+10mm deplasmanda işlem görmemiş numuneler 2057.61 N iken hızlandırılmış yaşlandırma sonucu aynı deplasman değerinde numuneler 1769.72 N olarak ölçülmüştür. Bu deplasman değerinde kuvvet farkı 287.89 N olarak görülmüştür.

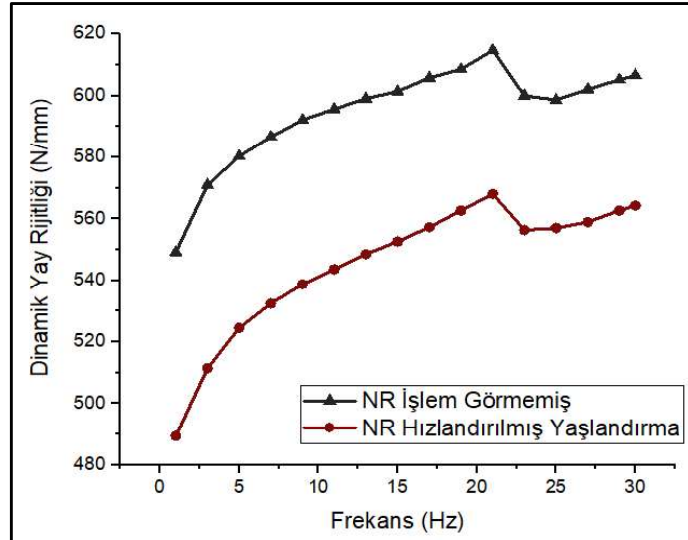
MTS hidrodinamik test makinesinin Denklem (2.3)'ü kullanarak elde edilen statik yay rijitliği işlem görmemiş numuneler için 423.06 N/mm iken hızlandırılmış yaşlandırılan numunelerde 370.64 N/mm olarak ölçülmüştür.



Şekil 3.1. NR numunenin statik yay rijitliği histerezis eğrisi (Hızlandırılmış yaşlandırma)

Şekil 3.2’de NR test numunelerinin işlem görmemiş ve hızlandırılmış yaşlandırılan dinamik yay rijitlikleri sunulmuştur. Test numunelerinde ortak 21 Hz’de bakılan dinamik yay rijitliği değeri hızlandırılmış yaşlandırmaya maruz kalmış numunelerde daha düşük olduğu gözlenmiştir.

İşlem görmemiş numunelerde dinamik yay rijitliği 613.87 N/mm iken hızlandırılmış yaşlandırılan numunelerde dinamik yay rijitliği 556.72 N/mm olarak ölçülmüştür. Yaşlanma nedeni ile 57.15 N/mm dinamik yay rijitliğinde azalma görülmüştür.



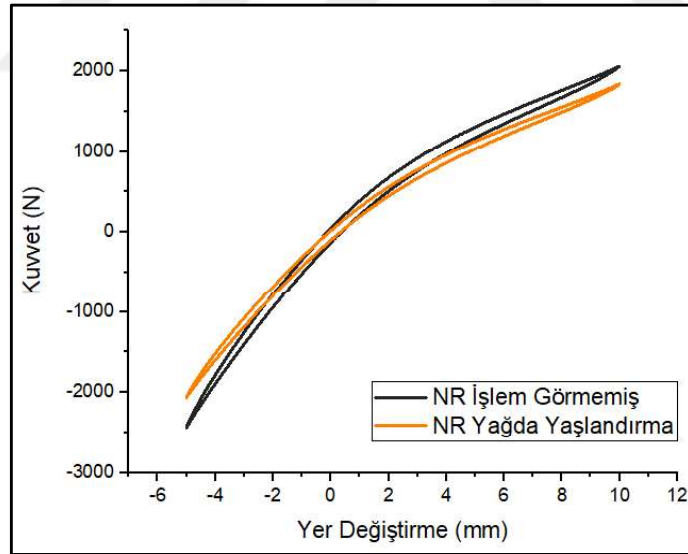
Şekil 3.2. NR numunenin dinamik yay rijitliği (Hızlandırılmış yaşlandırma)

Şekil 3.3'te NR test numunelerinin işlem görmemiş ve yağda yaşlandırılan statik yay rijitlikleri histerezis eğrisi ile sunulmuştur. Test deplasman kontrollü olduğundan iki numune de -5mm ve +10mm deplasman yapmış ancak ölçülen maksimum kuvvet değerlerinin yağda yaşlandırmaya maruz kalmış numunelerde daha düşük olduğu gözlenmiştir.

-5mm deplasman uygulandığında işlem görmemiş numuneler -2439.55 N iken yağda yaşlandırma sonucu aynı deplasman değerinde numuneler -2066.38 N olarak ölçülmüştür. Bu deplasman değerinde kuvvet farkı 373.17 N olarak görülmüştür.

+10mm deplasmanda işlem görmemiş numuneler 2057.61 N iken yağda yaşlandırma sonucu aynı deplasman değerinde numuneler 1836.79 N olarak ölçülmüştür. Bu deplasman değerinde kuvvet farkı 220.82 N olarak görülmüştür.

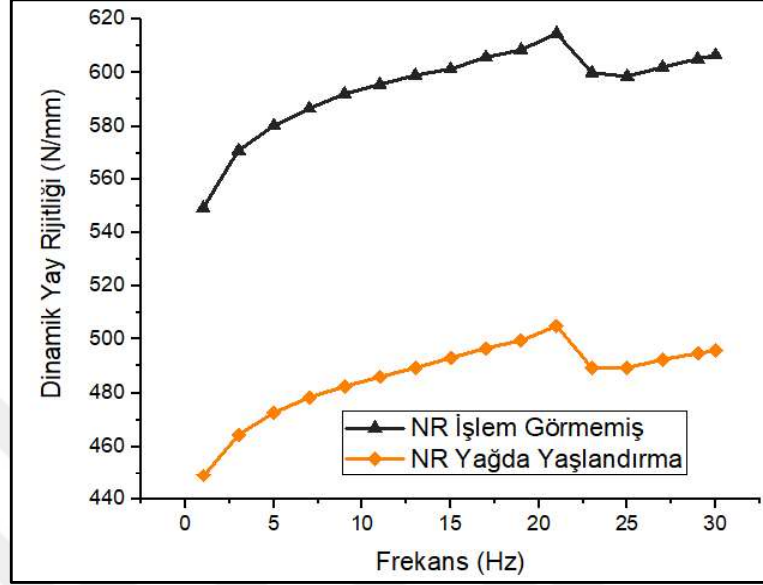
MTS hidrodinamik test makinesinin Denklem (2.3)'ü kullanarak elde edilen statik yay rijitliği işlem görmemiş numuneler için 423.06 N/mm iken yağda yaşlandırılan numunelerde 364.79 N/mm olarak ölçülmüştür.



Şekil 3.3. NR numunenin statik yay rijitliği histerezis eğrisi (Yağda yaşlandırma)

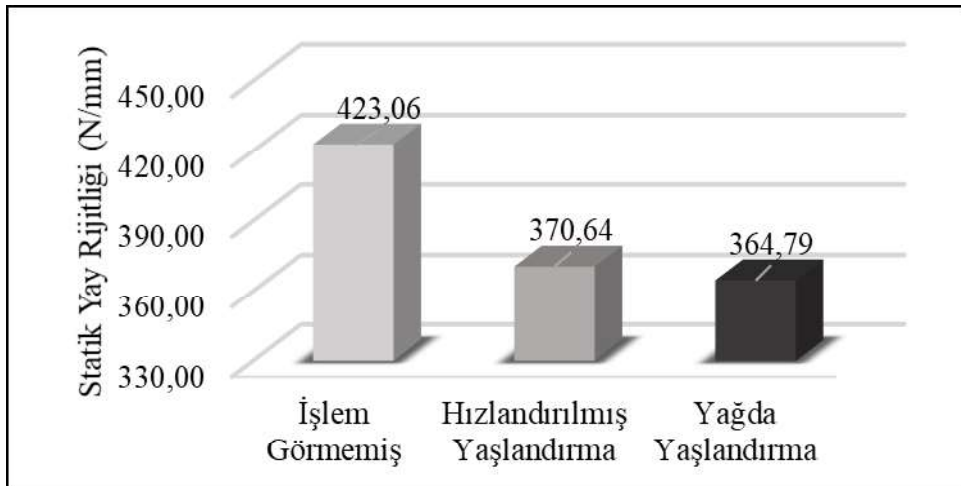
Şekil 3.4'de NR test numunelerinin işlem görmemiş ve yağda yaşlandırılan dinamik yay rijitlikleri sunulmuştur. Test numunelerinde ortak 21 Hz'de bakılan dinamik yay rijitliği değeri yağda yaşlandırmaya maruz kalmış numunelerde daha düşük olduğu gözlenmiştir.

İşlem görmemiş numunelerde dinamik yay rijitliği 613.87 N/mm iken hızlandırılmış yaşlandırılan numunelerde dinamik yay rijitliği 504.38 N/mm olarak ölçülmüştür. Yaşlanma nedeni ile 109.49 N/mm dinamik yay rijitliğinde azalma görülmüştür.



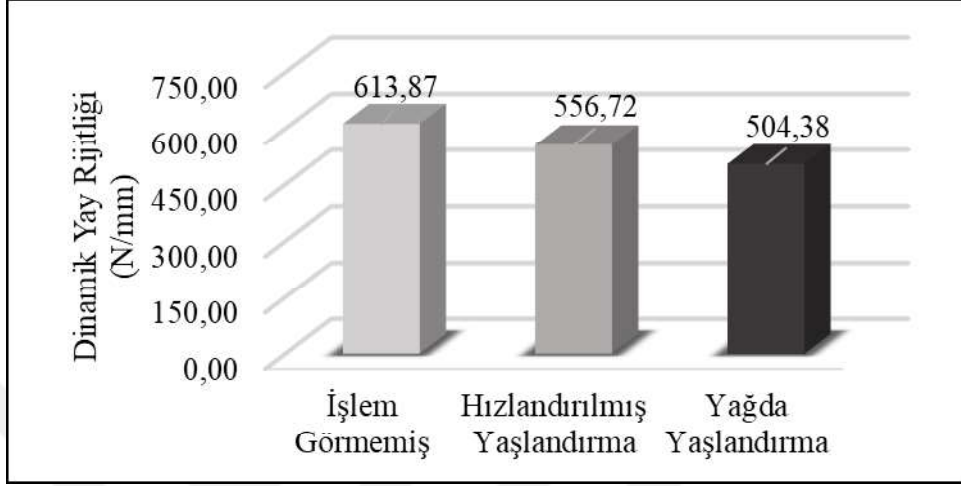
Şekil 3.4. NR numunenin dinamik yay rijitliği (Yağda yaşlandırma)

Şekil 3.5’de NR test numunelerinin havada ve yağda yaşlandırıldıktan sonraki statik yay rijitlikleri sunulmuştur. NR test numunelerinde; hızlandırılmış yaşlandırılan numunelerde %12 oranında statik yay rijitlikleri azalırken, yağda yaşlandırılan numunelerde %14 oranında azalma gözlemlenmiştir.



Şekil 3.5. NR numunelerinin farklı yaşlandırma koşullarında statik yay rijitlikleri

Şekil 3.6’da NR test numunelerinin havada ve yağda yaşlandırıldıktan sonraki dinamik yay rijitlikleri sunulmuştur. 21 Hz’de yapılan dinamik taramadan elde edilen dinamik yay rijitlikler sonucunda; hızlandırılmış yaşlandırılan numunelerde %9 oranında azalma ve yağda yaşlandırılan numunelerde %18 azalma meydana gelmiştir.



Şekil 3.6. NR numunelerinin farklı yaşlandırma koşullarında dinamik yay rijitlikleri

NR kauçuğunun, birinci bölümdeki anlatımlarda da bahsedildiği gibi yüksek sıcaklıklardan ve yağ gibi apolar akışkandan kaynaklı yaşlanmalara dirençleri oldukça zayıftır [1, 6, 7]. Yay rijitlikleri sonuçları da bizlere bunu göstermiştir. Ayrıca statik ve dinamik yay rijitliklerin birbirlerinden farklı orandaki değişimleri malzemelerin statik modülün dinamik modüle oranla daha fazla azalma eğilimi göstermesinden kaynaklanmaktadır. Bu durum birinci bölümde vulkanizasyonun kauçuk ürünler üzerindeki etkileri olarak ifade edilmiştir [14, 16]. Bölümde verilen Şekil 1.9’da statik modül, dinamik modüle oranla eğimleri karşılaştırıldığında vulkanizasyonun etkisi ile daha fazla artış göstermiş olduğu görülmektedir.

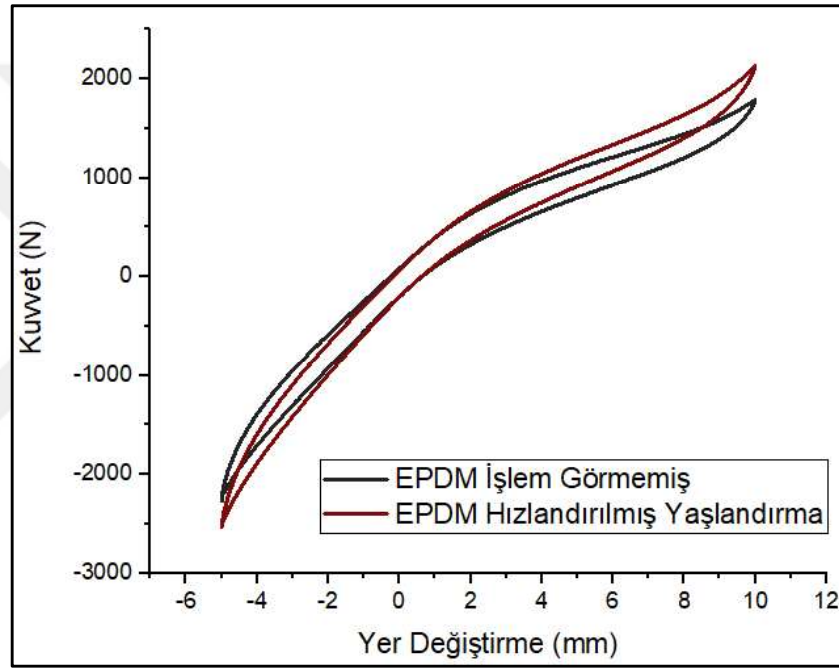
Şekil 3.7’de EPDM test numunelerinin işlem görmemiş ve hızlandırılmış yaşlandırılan statik yay rijitlikleri histerezis eğrisi sunulmuştur. Test deplasman kontrollü olduğundan iki numune de -5mm ve +10mm deplasman yapmış ancak ölçülen maksimum kuvvet değerlerinin hızlandırılmış yaşlandırmaya maruz kalmış numunelerde daha yüksek olduğu gözlenmiştir.

-5mm deplasman uygulandığında işlem görmemiş numuneler -2269.16 N iken hızlandırılmış yaşlandırma sonucu aynı deplasman değerinde numuneler -2530.50 N

olarak ölçülmüştür. Bu deplasman değerinde kuvvet farkı 261.34 N olarak görülmüştür.

+10mm deplasmanda işlem görmemiş numuneler 1782.25 N iken hızlandırılmış yaşlandırma sonucu aynı deplasman değerinde numuneler 2131.49 N olarak ölçülmüştür. Bu deplasman değerinde kuvvet farkı 349.24 N olarak görülmüştür.

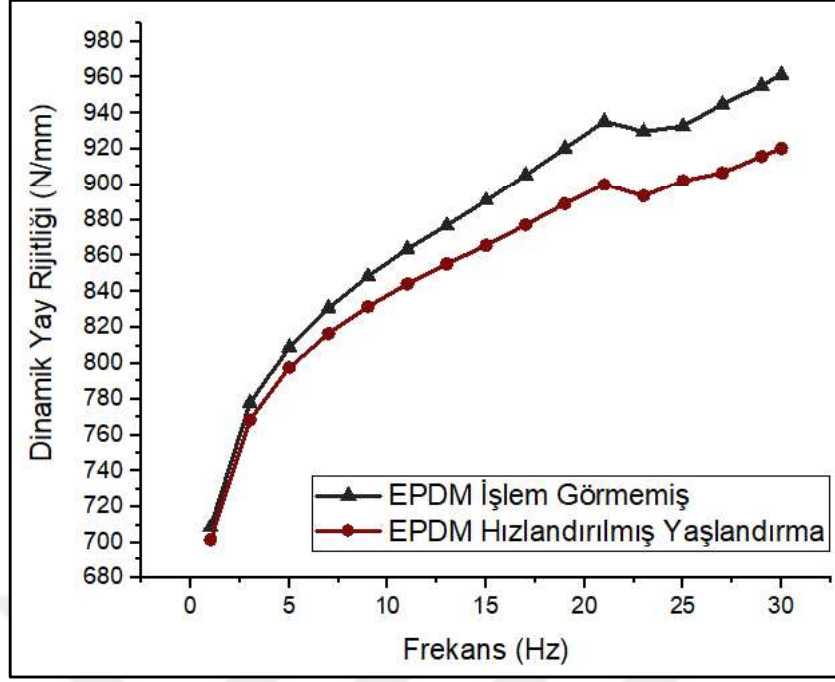
MTS hidrodinamik test makinesinin Denklem (2.3)'ü kullanarak elde edilen statik yay rijitliği işlem görmemiş numuneler için 354.79 N/mm iken hızlandırılmış yaşlandırılan numunelerde 393.19 N/mm olarak ölçülmüştür.



Şekil 3.7. EPDM numunenin statik yay rijitliği histerezis eğrisi (Hızlandırılmış yaşlandırma)

Şekil 3.8'de EPDM test numunelerinin işlem görmemiş ve hızlandırılmış yaşlandırılmış dinamik yay rijitlikleri sunulmuştur. Test numunelerinde ortak 21 Hz'de bakılan dinamik yay rijitliği değeri hızlandırılmış yaşlandırmaya maruz kalmış numunelerde daha düşük olduğu gözlenmiştir.

İşlem görmemiş numunelerde dinamik yay rijitliği 915.79 N/mm iken hızlandırılmış yaşlandırılan numunelerde dinamik yay rijitliği 886.80 N/mm olarak ölçülmüştür. Yaşlanma nedeni ile 28.99 N/mm dinamik yay rijitliğinde azalma görülmüştür.



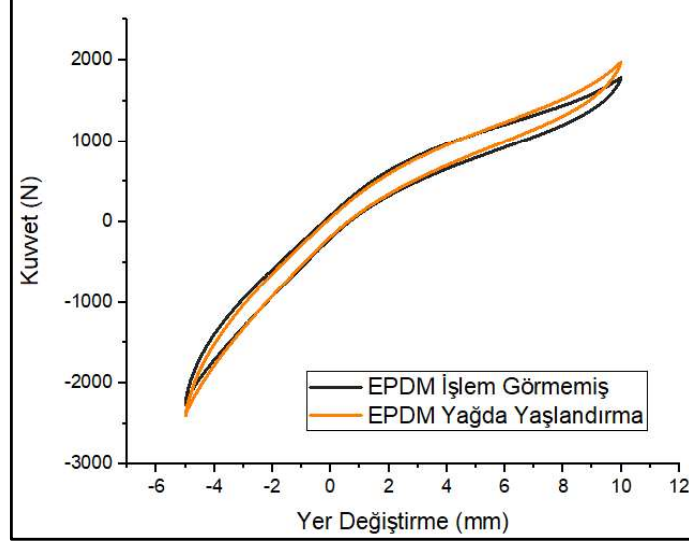
Şekil 3.8. EPDM numunenin dinamik yay rijitliği (Hızlandırılmış yaşlandırma)

Şekil 3.9’da EPDM test numunelerinin işlem görmemiş ve yağda yaşlandırılan statik yay rijitlikleri histerezis eğrisi ile sunulmuştur. Test deplasman kontrollü olduğundan iki numune de -5mm ve +10mm deplasman yapmış ancak ölçülen maksimum kuvvet değerlerinin yağda yaşlandırmaya maruz kalmış numunelerde daha yüksek olduğu gözlenmiştir.

-5mm deplasman uygulandığında işlem görmemiş numuneler -2269.16 N iken yağda yaşlandırma sonucu aynı deplasman değerinde numuneler -2400.76 N olarak ölçülmüştür. Bu deplasman değerinde kuvvet farkı 131.6 N olarak görülmüştür.

+10mm deplasmanda işlem görmemiş numuneler 1782.25 N iken yağda yaşlandırma sonucu aynı deplasman değerinde numuneler 1976.46 N olarak ölçülmüştür. Bu deplasman değerinde kuvvet farkı 194.21 N olarak görülmüştür.

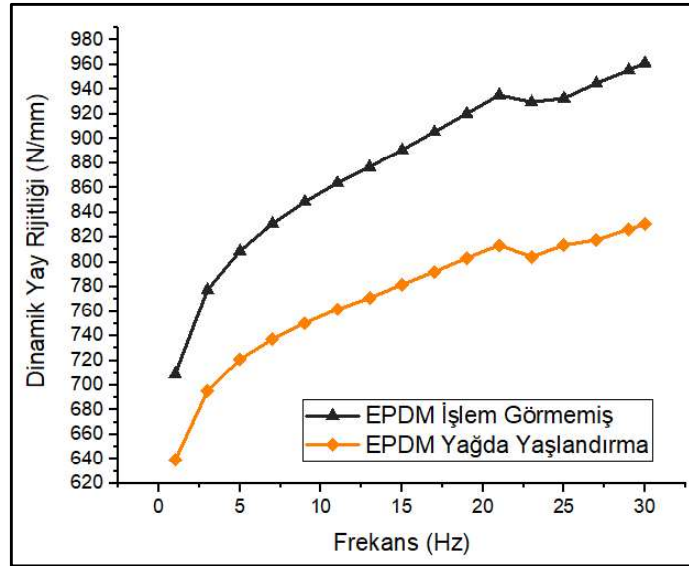
MTS hidrodinamik test makinesinin Denklem (2.3)’ü kullanarak elde edilen statik yay rijitliği işlem görmemiş numuneler için 354.79 N/mm iken yağda yaşlandırılan numunelerde 369.87 N/mm olarak ölçülmüştür.



Şekil 3.9. EPDM numunenin statik yay rijitliği histerezis eğrisi (Yağda yaşlandırma)

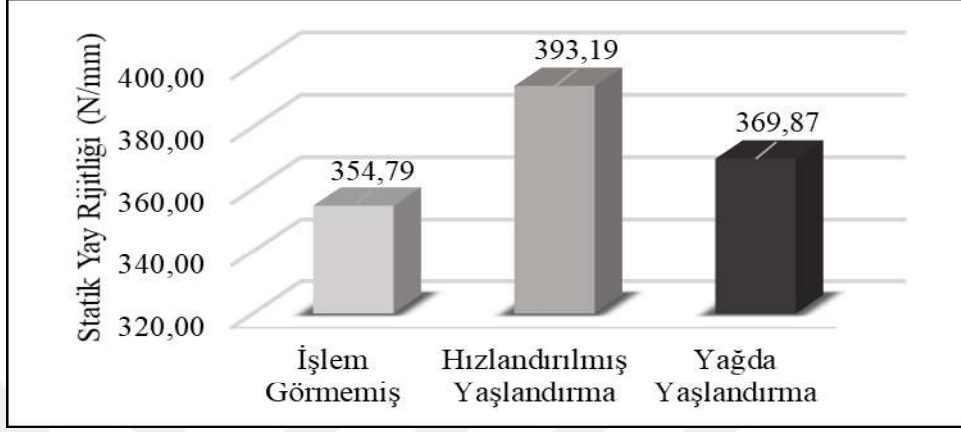
Şekil 3.10'da EPDM test numunelerinin işlem görmemiş ve yağda yaşlandırılan dinamik yay rijitlikleri sunulmuştur. Test numunelerinde ortak 21 Hz'de bakılan dinamik yay rijitliği değeri yağda yaşlandırmaya maruz kalmış numunelerde daha düşük olduğu gözlenmiştir.

İşlem görmemiş numunelerde dinamik yay rijitliği 915.79 N/mm iken hızlandırılmış yaşlandırılan numunelerde dinamik yay rijitliği 802.56 N/mm olarak ölçülmüştür. Yaşlanma nedeni ile 113.23 N/mm dinamik yay rijitliğinde azalma görülmüştür.



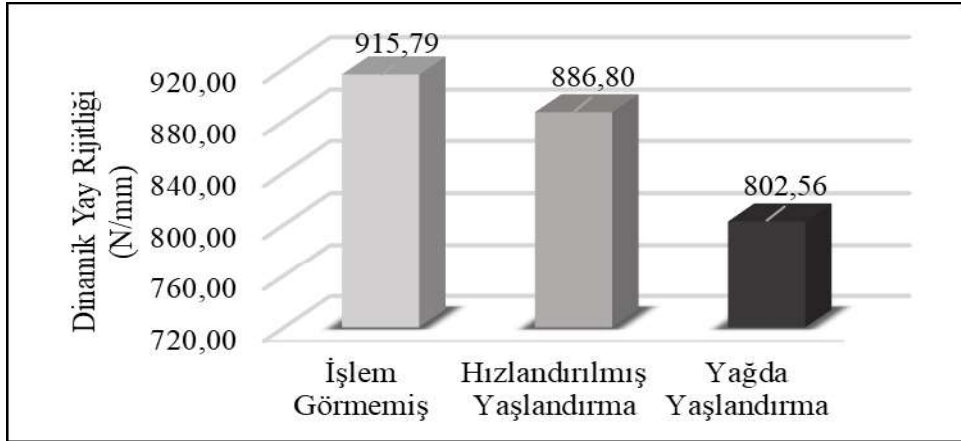
Şekil 3.10. EPDM numunenin dinamik yay rijitliği (Yağda yaşlandırma)

Şekil 3.11’de EPDM test numunelerinin havada ve yağda yaşlandırıldıktan sonraki statik yay rijitlikleri sunulmuştur. EPDM test numunelerinden; hızlandırılmış yaşlandırılan numunelerde %11 oranında statik yay rijitlikleri artarken, yağda yaşlandırılan numunelerde %4 oranında artma gözlemlenmiştir.



Şekil 3.11. EPDM numunelerinin farklı yaşlandırma koşullarında statik yay rijitlikleri

Şekil 3.12’de EPDM test numunelerinin havada ve yağda yaşlandırıldıktan sonraki dinamik yay rijitlikleri sunulmuştur. 21 Hz’de yapılan dinamik taramadan elde edilen dinamik yay rijitlikleri sonucunda; hızlandırılmış yaşlandırılan numunelerde %3 oranında azalma ve yağda yaşlandırılan numunelerde %12 azalma meydana gelmiştir.



Şekil 3.12. EPDM numunelerinin farklı yaşlandırma koşullarında dinamik yay rijitlikleri

EPDM numuneleri literatürde anlatıldığına paralel olarak bozunma reaksiyonunda çapraz bağlanma göstermiştir [51]. Böylece EPDM numunelerin statik yay rijitliklerinde artma eğiliminde olmuşlardır. Ancak dinamik yay rijitlik sonuçlarına bakıldığında dinamik yay rijitliklerinde azalma bulunmaktadır. Major ve diğerlerinin

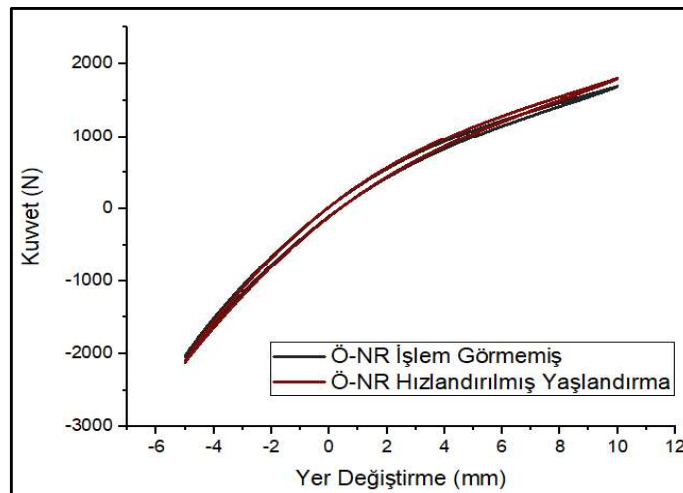
yaptıkları çalışmada dinamik koşullarda EPDM malzemelerin iç sürtünmelerden kaynaklı yüzey sıcaklıklarının diğer kauçuk türlerine oranla fazla arttığını ifade etmiştir [27]. Yüzeyde ve malzemede gerçekleşen bu sıcaklık artışı malzemenin ekstra olarak yaşlanmasına ve bozunmasına neden olmaktadır. Yapmış olduğumuz çalışma da bu anlatılanlara paralellik göstererek dinamik yay rijitliklerinde azalma eğilimini açıklamaktadır.

Şekil 3.13'te Ö-NR test numunelerinin işlem görmemiş ve hızlandırılmış yaşlandırılan statik yay rijitlikleri histerezis eğrisi ile sunulmuştur. Test deplasman kontrollü olduğundan iki numune de -5mm ve +10mm deplasman yapmış ancak ölçülen maksimum kuvvet değerlerinin hızlandırılmış yaşlandırmaya maruz kalmış numunelerde daha yüksek olduğu gözlenmiştir.

-5mm deplasman uygulandığında işlem görmemiş numuneler -2040.30 N iken hızlandırılmış yaşlandırma sonucu aynı deplasman değerinde numuneler -2112.09 N olarak ölçülmüştür. Bu deplasman değerinde kuvvet farkı 71.79 N olarak görülmüştür.

+10mm deplasmanda işlem görmemiş numuneler 1690.29 N iken hızlandırılmış yaşlandırma sonucu aynı deplasman değerinde numuneler 1800.87 N olarak ölçülmüştür. Bu deplasman değerinde kuvvet farkı 110.58 N olarak görülmüştür.

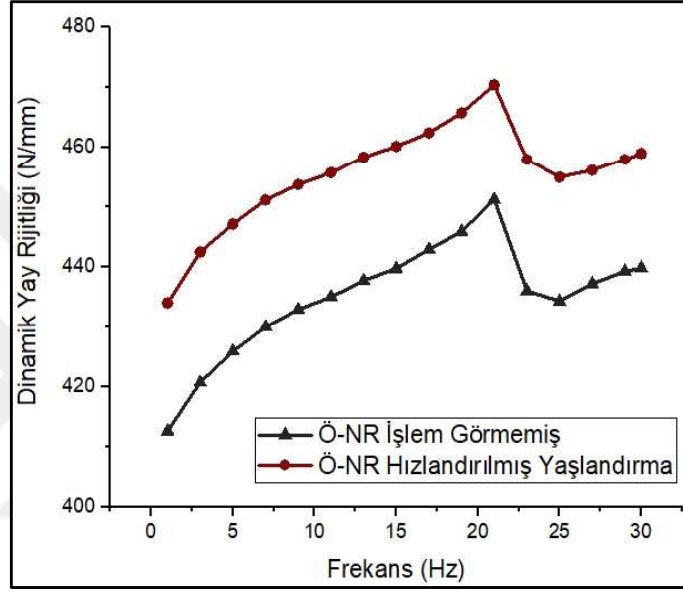
MTS hidrodinamik test makinesinin Denklem (2.3)'ü kullanarak elde edilen statik yay rijitliği işlem görmemiş numuneler için 360.97 N/mm iken hızlandırılmış yaşlandırılan numunelerde 371.75 N/mm olarak ölçülmüştür.



Şekil 3.13. Ö-NR numunenin statik yay rijitliği histerezis eğrisi (Hızlandırılmış yaşlandırma)

Şekil 3.14’de Ö-NR test numunelerinin işlem görmemiş ve hızlandırılmış yaşlandırılan dinamik yay rijitlikleri kıyaslanmıştır. Test numunelerinde ortak 21 Hz’de bakılan dinamik yay rijitliği değeri hızlandırılmış yaşlandırmaya maruz kalmış numunelerde daha düşük olduğu gözlenmiştir.

İşlem görmemiş numunelerde dinamik yay rijitliği 451.02 N/mm iken hızlandırılmış yaşlandırılan numunelerde dinamik yay rijitliği 470.26 N/mm olarak ölçülmüştür. Yaşlanma nedeni ile 19.24 N/mm dinamik yay rijitliğinde artma görülmüştür.



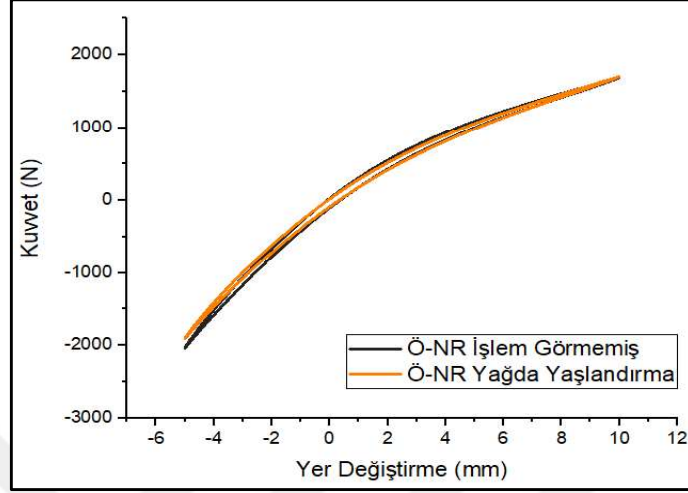
Şekil 3.14. Ö-NR numunenin dinamik yay rijitliği (Hızlandırılmış yaşlandırma)

Şekil 3.15’de Ö-NR test numunelerinin işlem görmemiş ve yağda yaşlandırılan statik yay rijitlikleri histerezis eğrisi ile sunulmuştur. Test deplasman kontrollü olduğundan iki numune de -5mm ve +10mm deplasman yapmış ancak ölçülen maksimum kuvvet değerlerinin yağda yaşlandırmaya maruz kalmış numunelerde daha düşük olduğu gözlenmiştir.

-5mm deplasman uygulandığında işlem görmemiş numuneler -2040.30 N iken yağda yaşlandırma sonucu aynı deplasman değerinde numuneler -1905.57 N olarak ölçülmüştür. Bu deplasman değerinde kuvvet farkı 134.73 N olarak görülmüştür.

+10mm deplasmanda işlem görmemiş numuneler 1690.29 N iken yağda yaşlandırma sonucu aynı deplasman değerinde numuneler 1702.26 N olarak ölçülmüştür. Bu deplasman değerinde kuvvet farkı 11.97 N olarak görülmüştür.

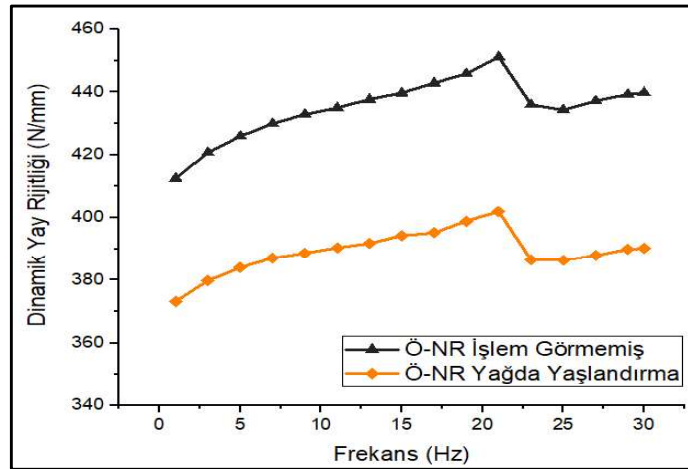
MTS hidrodinamik test makinesinin Denklem (2.3)'ü kullanarak elde edilen statik yay rijitliği işlem görmemiş numuneler için 360.97 N/mm iken yağda yaşlandırılan numunelerde 340.08 N/mm olarak ölçülmüştür.



Şekil 3.15. Ö-NR numunenin statik yay rijitliği histerezis eğrisi (Yağda yaşlandırma)

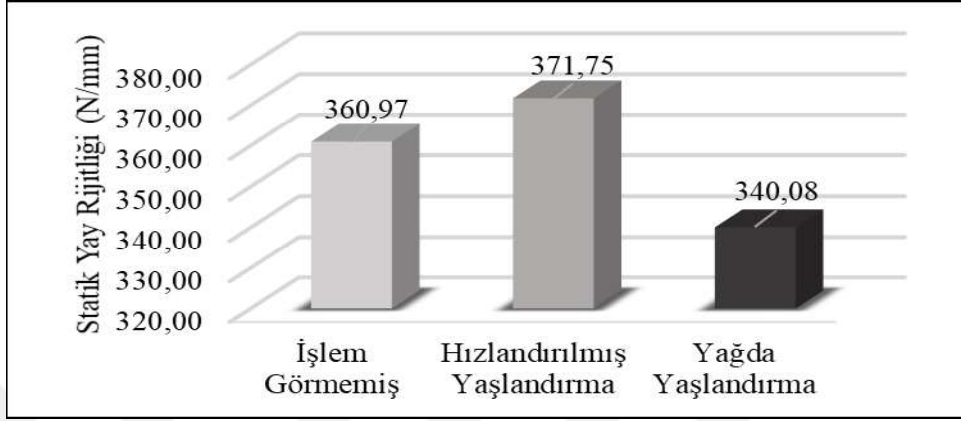
Şekil 3.16'da Ö-NR test numunelerinin işlem görmemiş ve yağda yaşlandırılan dinamik yay rijitlikleri sunulmuştur. Test numunelerinde ortak 21 Hz'de bakılan dinamik yay rijitliği değeri yağda yaşlandırmaya maruz kalmış numunelerde daha düşük olduğu gözlenmiştir.

İşlem görmemiş numunelerde dinamik yay rijitliği 451.02 N/mm iken yağda yaşlandırılan numunelerde dinamik yay rijitliği 401.96 N/mm olarak ölçülmüştür. Yaşlanma nedeni ile 49.06 N/mm dinamik yay rijitliğinde azalma görülmüştür.



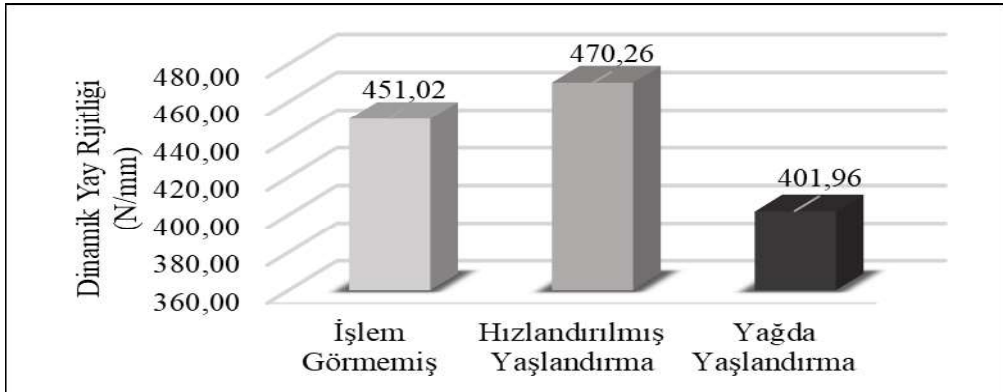
Şekil 3.16. Ö-NR numunenin dinamik yay rijitliği (Yağda yaşlandırma)

Şekil 3.17’de Ö-NR test numunelerinin hızlandırılmış yaşlandırma ve yağda yaşlandırma sonrası statik yay rijitlikleri sunulmuştur. Ö-NR test numunelerinden; hızlandırılmış yaşlandırılan numunelerde %3 oranında statik yay rijitlikleri artarken, yağda yaşlandırılan numunelerde %6 oranında azalma gözlemlenmiştir.



Şekil 3.17. Ö-NR numunelerinin farklı yaşlandırma koşullarında statik yay rijitlikleri

Şekil 3.18’de Ö-NR test numunelerinin hızlandırılmış yaşlandırma ve yağda yaşlandırma sonrası dinamik yay rijitlikleri sunulmuştur. 21 Hz’de yapılan dinamik taramadan elde edilen dinamik yay rijitlikleri sonucunda; hızlandırılmış yaşlandırılan numunelerde %4 oranında artma ve yağda yaşlandırılan numunelerde %11 azalma meydana gelmiştir.



Şekil 3.18. Ö-NR numunelerinin farklı yaşlandırma koşullarında dinamik yay rijitlikleri

Ö-NR numuneler, SEV vulkanizasyondan kaynaklı yapısında EPDM numunelerde de gördüğümüz çapraz bağlanma göstermişlerdir [51]. Böylece hızlandırılmış yaşlandırılan numunelerin yay rijitlikleri işlem görmemişlere göre artmıştır. Ancak apolar akışkanlara karşı dirençleri az olduğundan yağ ortamında yay rijitliklerinin

azalma eğilimde oldukları gözlemlenmiştir. Ancak CV sistemi ile vulkanize edilen numunelere değişim oran ile kıyaslandığında yay rijitliği kaybı daha azdır.

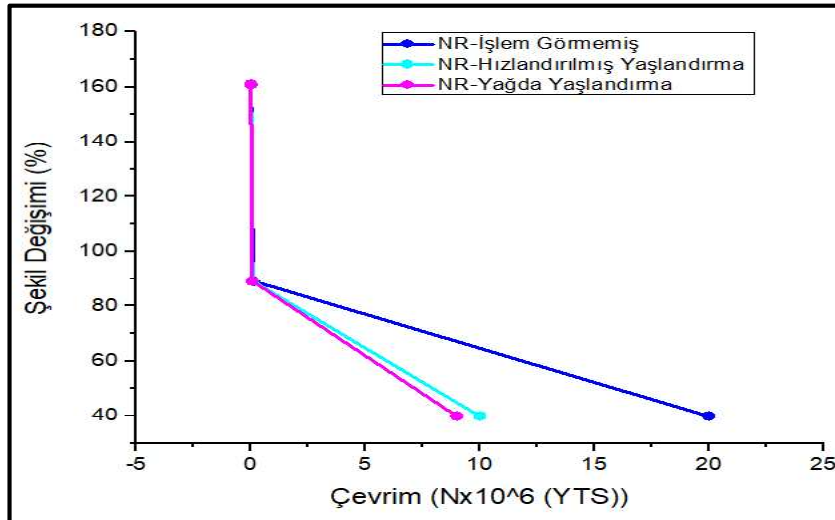
3.2.Yorulma Testi Sonuçları

Bu bölümde farklı koşullarda yaşlandırılmış NR, EPDM ve Ö-NR numunelerine ait yorulma test sonuçları sunulmuştur.

Tablo 3.1’de NR’ye ait yorulma test sonuçları ve bu sonuçlara bağlı olarak Şekil 3.19’da NR numunelerinin şekil değişimi-çevrim grafiği gösterilmiştir. Tablodan detaylı değerler görüleceği üzere NR numunelerde yüzde şekil değişimi artması ile yük tekrar sayısındaki(YTS) azalma yorulma ömrünün düşmesini göstermektedir. Numuneler üzerine etkiyen şekil değişim miktarlarındaki artış yorulma ömrünü etkili bir şekilde azalttığı sayısal olarak gözlemlenmiştir. Aynı şekil değişim miktarlarında yaşlanmalar incelendiğinde hızlandırılmış yaşlandırılan numuneler, yağda yaşlandırılan numunelere oranla daha fazla yük tekrar sayısı oluşturmuşlardır.

Tablo 3.1. NR yorulma test sonuçları

Şekil Değişimi (%)	Eğilme Açısı (°)	İşlem Görmemiş Çevrim (N-YTS)	Hızlandırılmış Yaşlandırma Çevrim (N-YTS)	Yağda Yaşlandırma Çevrim (N-YTS)
40	10	19.989.765	10.124.038	8.875.673
89	20	101.205	80.149	60.284
161	30	8.052	4.967	3.785



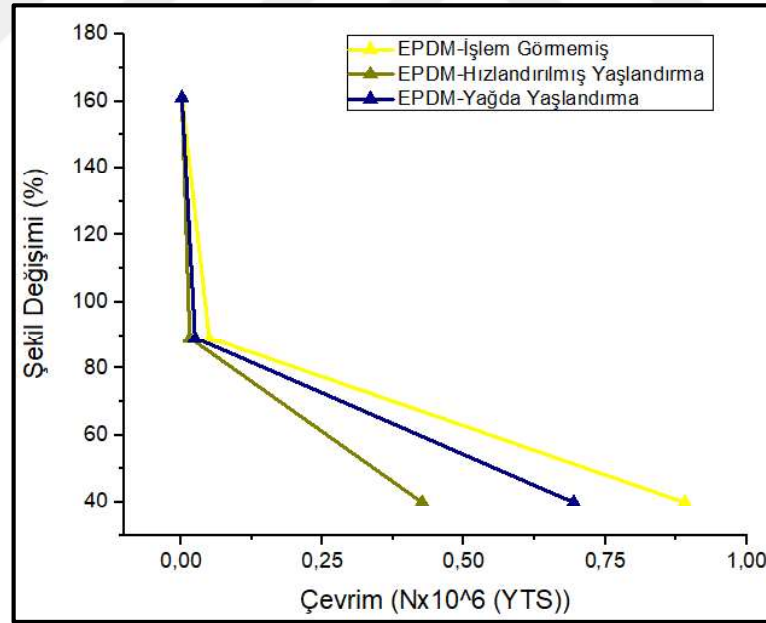
Şekil 3.19. NR şekil değişimi-çevrim grafiği

NR malzemelerin mekanik olarak üstün özellikler sergilemelerinin aksine çevresel koşullardan kaynaklı yaşlanma dirençleri oldukça azdır. CV vulkanizasyon sistemi ile pişirilmiş numunelerin apolar akışkan olan yağa karşı dirençleri oldukça azdır. Bu nedenden ötürü yorulma ömürleri hızlandırılmış yaşlandırılan numunelere kıyasla oldukça azalmıştır.

Tablo 3.2’de EPDM’ye ait yorulma test sonuçları ve bu sonuçlara bağlı olarak Şekil 3.20’de EPDM numunelerinin şekil değişimi-çevrim grafiği gösterilmiştir.

Tablo 3.2. EPDM yorulma test sonuçları

Şekil Değişimi (%)	Eğilme Açısı (°)	İşlem Görmemiş Çevrim (N-YTS)	Hızlandırılmış Yaşlandırma Çevrim (N-YTS)	Yağda Yaşlandırma Çevrim (N-YTS)
40	10	890.510	426.251	693.296
89	20	49.872	15.155	24.857
161	30	1.523	1.147	1.400



Şekil 3.20. EPDM şekil değişimi-çevrim grafiği

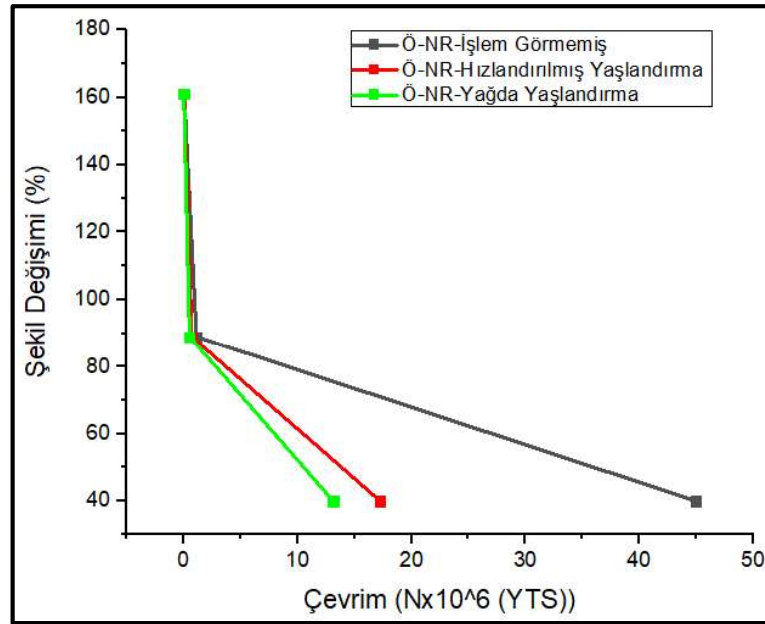
EPDM malzemeler, NR malzemelerle kıyaslandığında mekanik özellikler bakımından üstün özellikler göstermemektedirler. Ancak yaşlandırma ortamında çevresel koşullara karşı dirençleri NR’ye oranla oldukça fazladır. Statik-dinamik yay rijitliği test sonuçlarına bakıldığında hızlandırılmış yaşlandırılan numunelerin statik yay

rijitlik değerleri artmaktadır ve bu duruma yaşlandırma koşullarından kaynaklı ilave çapraz bağ oluşumlarının sebep olduğu yorumlanmıştır. Artan yay rijitliği ile i sürtünmelerin artması sonucunda hızlandırılmış yaşlandırılan EPDM numuneler, yorulma testi sırasında malzeme ekstra sıcaklık kazanarak yorulma ömrünü kısıltmıştır. Yağda yaşlandırılmış numuneler, hızlandırılmış yaşlandırılan numunelerle kıyaslandığında statik yay rijitlikleri azalmıştır. Yağın EPDM içerisinde kayganlaştırıcı etki göstererek çapraz bağlar arasındaki sürtünmeleri azalttığı düşünülmektedir. Bununla birlikte malzemenin rijitliğinin azalması ile esneklik kazanarak yorulma ömrü hızlandırılmış yaşlandırılan numunelere kıyasla uzamıştır.

Tablo 3.3'te -NR'a ait yorulma test sonuçları ve bu sonuçlara bağlı olarak Şekil 3.21'de -NR numunelerinin yüzde Şekil değişim-çevrim grafiği gösterilmiştir.

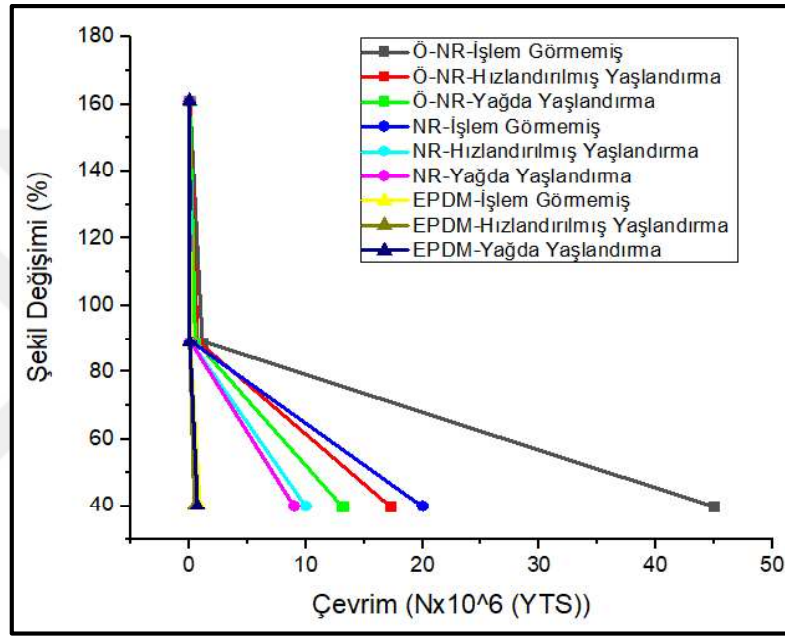
Tablo 3.3. -NR yorulma test sonuçları

Şekil Değişimi (%)	Eğilme Açısı (°)	İşlem Görmemiş evrim (N-YTS)	Hızlandırılmış Yaşlandırma evrim (N-YTS)	Yağda Yaşlandırma evrim (N-YTS)
40	10	44.835.274	17.251.132	13.125.048
89	20	1.101.128	662.052	500.037
161	30	25.648	12.436	7.682



Şekil 3.21. -NR Şekil değişimi-çevrim grafiği

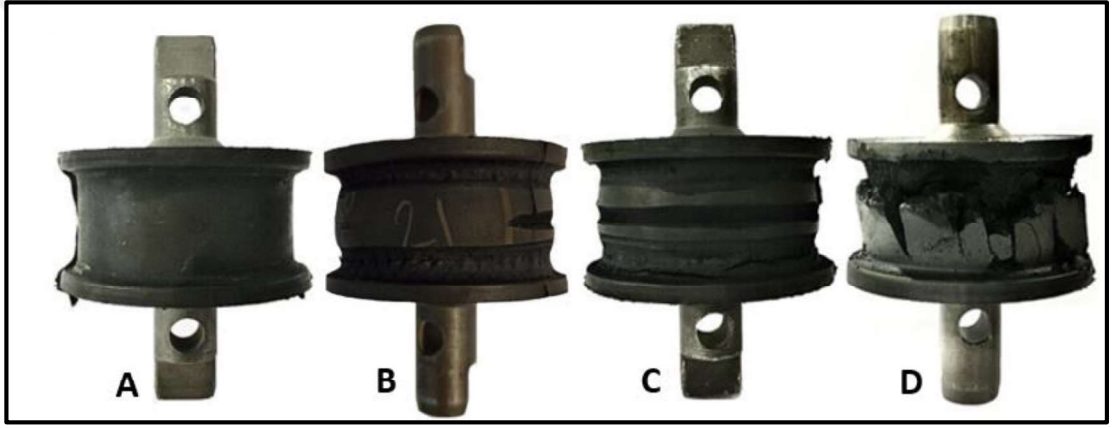
Ö-NR numuneler kimyasal yapıları gereği NR ile özdeş özellikler sergilemektedirler. NR numunelerinden farkları SEV vulkanizasyon sistemi ile pişirilmeleridir. Bu durumdan ötürü mekanik özellikleri NR kadar iyi olup çevresel koşullara karşı dayanımları daha fazladır. Ancak NR malzemelerde olduğu gibi apolar akışkanlara karşı zayıf direnç göstermektedirler. Bu nedenden ötürü hızlandırılmış yaşlandırılan test numuneleri yağda yaşlandırılan numunelere oranla daha fazla yük tekrar sayısı elde etmişlerdir. Ö-NR numunelerinin anlatılan özellikleri yorulma testlerinden elde edilen sonuçlar ile doğrulanmıştır.



Şekil 3.22. Tüm numunelere ait şekil değişimi-çevrim grafiği

Şekil 3.22’de bu çalışmada kullanılan ve koşullandırılan tüm numunelere ait şekil değişimi-çevrim grafiği gösterilmiştir. Yaşlandırma koşulları seçilirken NR numuneleri zorlamak için 100°C’de 72 saat etüv içerisinde hem havada hem de yağda yaşlandırma tercih edilmiştir. Yorulma sonuçlarından da görüleceği üzere yaşanan NR numuneler yorulma ömür dayanımlarını büyük ölçüde kaybetmişlerdir. Ancak SEV vulkanizasyonu ile geliştirilen Ö-NR numuneler, NR numunelere oranla çevresel koşullara dayanım direnci kazanarak yorulma ömür dayanımında NR numunelerin aynı ortamdaki yaşlanmış olanlarına kıyasla daha dirençli oldukları gözlemlenmiştir. EPDM numuneler seçilen koşullandırma parametreleri nedeniyle fazla ön plana çıkamamışlardır. Koşullandırma süresi uzun tutulsaydı NR numunelerin önüne geçebilecekleri düşünülmektedir.

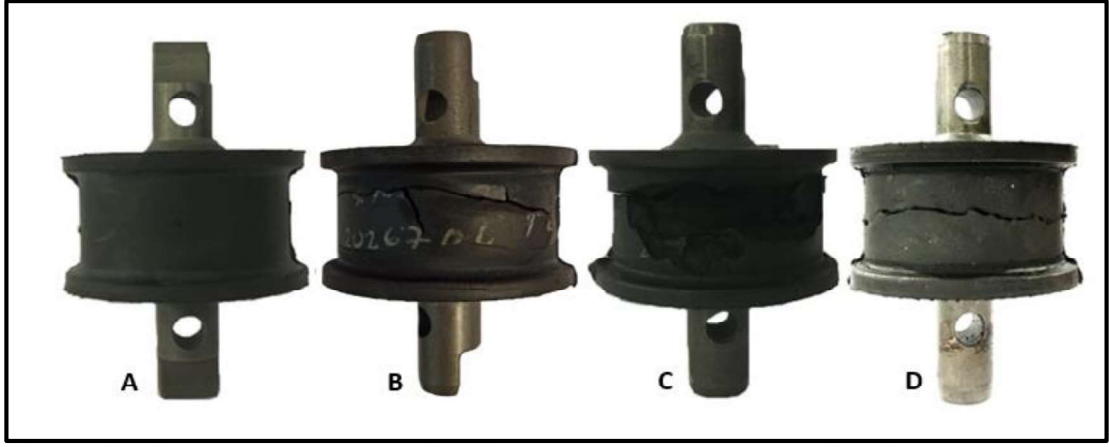
Şekil 3.23'te NR test numunelerine ait görseller sunulmuştur. Şekil 3.23-A'da ömür testine girmeden önceki numunelerin halini göstermektedir. Şekil 3.23-B test numunelerinin işlem görmemiş önceki halini göstermektedir. Şekil 3.23-C'de test numuneleri hızlandırılmış yaşlandırma sonucunda ömür testinden çıkmıştır. Şekil 3.23-D'de test numuneleri yağda yaşlandırma sonucunda ömür testinden çıkmıştır. Şekilde 3.23'de görüldüğü üzere NR numuneler yağ ortamında daha fazla yaşlanarak görsel olarak parçalanma seviyelerine kadar gelmişlerdir. Hızlandırılmış yaşlandırma numuneleri yorulma sonucunda malzeme içerisinde yük taşımamaya başlamıştır. Ancak görsel olarak yağda yaşlandırılan numunelerde olduğu gibi parçalanma durumu ortaya çıkmamaktadır.



Şekil 3.23. NR test numuneleri A) Teste girmemiş B) İşlem görmemiş C) Hızlandırılmış yaşlandırma D) Yağda yaşlandırma

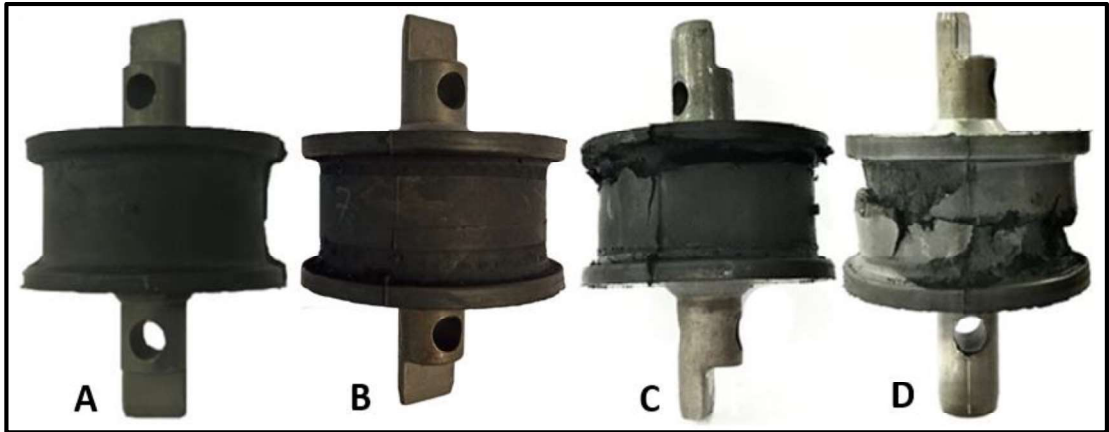
Şekil 3.24'te EPDM test numunelerine ait görseller sunulmuştur. Şekil 3.24-A'da ömür testine girmeden önceki numunelerin halini göstermektedir. Şekil 3.24-B test numunelerinin işlem görmemiş önceki halini göstermektedir. Şekil 3.24-C'de test numuneleri hızlandırılmış yaşlandırma sonucunda ömür testinden çıkmıştır. Şekil 3.24-D'de test numuneleri yağda yaşlandırma sonucunda ömür testinden çıkmıştır. EPDM test numunelerinde hızlandırılmış yaşlandırma sonucu malzemedeki rijitliğin artması ve oluşan çapraz bağlara bağlı sürtünmelerden kaynaklı sıcaklık artışı görsel deformasyonlara yansımıştır. Yağda yaşlandırılan numunelerde sürtünmenin hızlandırılmış yaşlandırmaya kıyasla daha az olması ve yağlayıcı etkiler ile malzeme üzerinde aşırı deformasyon oluşturmamıştır. Yorulma testi sırasında üzerinde yük taşımayı engelleyecek çatlağın oluşması ve ilerlemesi ile test sonuçlanmıştır. Artan rijitliğe bağlı olarak numunelerin dinamik uygulamalarda ekstra ısınması ve

ömürlerindeki kısalma EPDM'in dinamik çalışmalarda değil de çevresel dayanımın ön plana çıktığı çalışmalarda kullanılması gerektiğini göstermektedir.



Şekil 3.24. EPDM test numuneleri A) Teste girmemiş B) İşlem görmemiş C) Hızlandırılmış yaşlandırma D) Yağda yaşlandırma

Şekil 3.25'te Ö-NR test numunelerine ait görseller sunulmuştur. Şekil 3.25-A'da ömür testine girmeden önceki numunelerin halini göstermektedir. Şekil 3.25-B test numunelerinin işlem görmeden önceki halini göstermektedir. Şekil 3.25-C'de test numuneleri hızlandırılmış yaşlandırma sonucunda ömür testinden çıkmıştır. Şekil 3.25-D'de test numuneleri yağda yaşlandırma sonucunda ömür testinden çıkmıştır. Şekil 3.25'den de görüldüğü üzere Ö-NR numuneler, NR numuneler ile aynı özellikler sergilemişlerdir. Yağ ortamında daha fazla yaşlanarak görsel olarak parçalanma durumuna gelmişlerdir. Hızlandırılmış yaşlandırma numunelerinde yorulma sonucunda malzeme içerisinde yük taşımamaya başlamıştır. Ancak görsel olarak yağdaki numuneler gibi parçalanma etkisi olmamıştır.



Şekil 3.25. Ö-NR test numuneleri A) Teste girmemiş B) İşlem görmemiş C) Hızlandırılmış yaşlandırma D) Yağda yaşlandırma

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmanın amacı, vulkanizasyon sistemi değiştirilerek SEV yöntemi ile hazırlanan karışım olan özel NR kauçuğun ve geleneksel olarak dinamik uygulamalarda kullanılan NR ve EPDM kauçukların farklı çevresel koşullar altında yorulma dayanımlarının ve statik-dinamik yay rijitliklerinin kıyaslanarak incelenmesidir.

Bu amaçla, SEV sistemli Ö-NR, CV sistemli NR ve EPDM kauçuk karışımlarından hazırlanan test numuneleri hava ve yağ ortamlarında yaşlandırmaya maruz bırakılmışlardır. İnceleme amacı için yaşlandırma öncesi ve sonrası statik-dinamik testler yapılarak kauçuklardaki yay rijitliği değişimleri gözlemlenmiştir. Tüm numunelerin statik-dinamik yay rijitliği testlerinin yapılmasından sonra yorulma testi ile ömür dayanımları kıyaslanmıştır.

Statik-dinamik yay rijitliği değişimleri incelendiğinde; NR test numuneleri, hem havada hem de yağda yaşlandırılan diğer kauçuk türlerine kıyasla, statik ve dinamik yay rijitlik değerlerinde belirgin bir azalma eğilimi göstermektedir. Bu durum NR kauçuğunun, yüksek sıcaklık ve yağ gibi apolar bir akışkanın sebep olduğu yaşlanmalara karşı direncinin oldukça zayıf olmasıyla açıklanmaktadır. Yağda yaşlandırılan numunelerin statik yay rijitlik değerindeki azalma %14 iken dinamik yay rijitlik değerinin %18'dir ve bu durum dinamik rijitliğin daha fazla azalma eğiliminde olduğunu ifade etmektedir. EPDM test numunelerinde, bozunma reaksiyonu sırasında ek çapraz bağlar oluşturularak statik yay rijitlik değerlerinin hem havada hem de yağda artma durumu ortaya çıkmıştır. EPDM'nin test sırasında iç sürtünmeden kaynaklanan yüzey ve malzeme sıcaklığı artışı diğer kauçuk türlerine göre daha fazladır. Bunun sonucu olarak malzeme daha fazla bozunma ve yaşlanmaya maruz kalarak dinamik yay rijitlik değerlerini %4 ve %11 oranında azaltmaktadır. Ö-NR test numunelerinde ise, hava ortamındaki statik ve dinamik yay rijitlik değerleri SEV vulkanizasyonunun sağladığı çapraz bağlarla artmıştır. Ancak yağ gibi apolar bir akışkan varlığında daha az direnç göstererek statik ve dinamik yay rijitliklerinin azaldığı görülmektedir. Ö-NR numunelerin yağ ortamındaki yay rijitlik kaybı, statik koşullarda %6 ve dinamik

koşullarda %11 azalma değerleriyle diğer CV sistemi ile vulkanize edilen numunelere oranla üstünlük sağlamaktadır.

Aynı geometri, yükleme koşulları ve çevre şartları altında dinamik uygulamalar için Ö-NR kauçuğu sahip olduğu üstün mekanik özellikler nedeniyle kullanılabilir. NR kauçuğu çevresel faktörlerin belirgin derecede zorlamayacağı servis koşullarında kullanılabilir. Ancak EPDM numunelerden görüldüğü üzere dinamik uygulamalar sonucu malzemelerin kendi iç sürtünmelerinden kaynaklı azalan ömürleri kullanım alanlarını daraltmaktadır. Çevresel faktörlerin zorlayıcı olduğu mekanik özelliklerden fedakarlık edilebilecek uygulamalarda ömür dayanımı açısından kullanılması mümkündür.

Kauçuk malzemelerin kullanım alanlarından, titreşim ve şok sönümleyicileri düşünüldüğünde, yaşlanmalara bağlı rijitlik artması veya azalması istenilen durumlar değildir. Yataklama frekanslarının değişmesi çalışma sırasında başka ekipmanlar ile rezonans durumu oluşturabilir. Aşırı rijitlik kaybı ile bağlantı noktasında istenmeyen sallantılar oluşturarak ekipmanların çalışma potansiyellerini ve çevre ekipmanları deforme etme riskleri artmaktadır. Uygulama yapılacak sistemi ve çevre şartlarının iyi tanımlanarak uygun kauçuk malzemesi kullanılması önem arz etmektedir.

Ömür dayanımlarını karşılaştırmak için yapılan yorulma testi sonuçları, elde edilen şekil değişimi-çevrim grafikleri ile yorumlanmıştır. Sonuçlar incelendiğinde; yaşlandırılan NR numunelerinin ömür dayanımlarında belirgin bir azalma görülmüştür. Ancak SEV vulkanizasyonu ile geliştirilen Ö-NR numuneler, çevresel koşullara karşı dayanım direnci kazanarak, aynı ortamda yaşlandırılan NR numunelerine oranla daha fazla yorulma ömür dayanımı göstermişlerdir. EPDM numuneler, seçilen koşullandırma parametreleri nedeniyle ömür dayanımı açısından istenildiği kadar ön plana çıkamamışlardır. Koşullandırma süresi daha uzun tutulursa, NR numunelerin önüne geçebilecekleri olasıdır.

Bu çalışma boyunca kazanılan bilgi ve deneyimler ışığında, ileride yapılabilecek çalışmalara katkı sağlaması amacıyla aşağıda birtakım öneriler sunulmaktadır:

- NR kauçuğunun üstün mekanik özellikleri dinamik uygulamalar için çok değerlidir. Ancak otomotiv sektörü gibi teknolojinin insan hayatını kolaylaştırmak için

kullanıldığı uygulama alanları her geçen gün kauçuk isterlerini ve kauçuk şartlarını zorlamaktadır. NR gerekli olan bu sıcaklık ve çevre şartlarına karşı istenilen özellikleri vermekte zorlanmaktadır. Bu çalışmada, vulkanizasyon sistemindeki değişim ile elde edilen Ö-NR kauçuğunun NR'ye oranla daha dirençli olduğu gözlemlenmiştir. Vulkanizasyon sistemine karışım malzemelerinin etkisini görebilmek amacıyla farklı dolgu maddeleri denenebilir. Kauçuk karışım içerisine eklenen dolgu maddeleri ve çevresel koşullara dayanım için ilave edilen maddelerle oluşturulan yeni karışımlar, müşteri isterlerini karşılayabilir.

- Çalışma için NR kauçuğunu zorlamak adına çevresel parametreler belirlenmiştir. Bu parametreleri belirlenmesinde sıklıkla karşılaşılan müşteri isterleri de etkili olmuştur. Parametreler gereği EPDM kauçuğu diğer numunelere karşı önemli değişim ve direnç gösterememiştir. Sürenin uzatılması ve sıcaklıkların artırılması EPDM'yi ön plana çıkaracaktır. Ayrıca kauçukların kullanım alanlarına yönelik ozon ve UV testleri de gerçekleştirilerek yay rijitliği değişimi ve ömür dayanımı üzerine çalışılabilir. Test sistemlerinin, deney sonuçlarının yorumlanması üzerindeki etkileri kauçuk malzemeler için önemli parametrelerdir. Test cihazlarında kullanılan frekansların değişimi ile malzeme iç sürtünmelerinden kaynaklı ömür dayanımının değişimi literatür kaynaklarında da görülmüştür. Çeşitli kauçuklara farklı frekanslara bağlı yorulma testleri yapılarak yorulma ömür dayanımlarına olan etkileri incelenebilir.

KAYNAKLAR

- [1] Sommer J., *Troubleshooting Rubber Problems*, 1. Edition, Hanser Publishers, Munich, 2013.
- [2] Spanos P., Beelen J., NR Replacement by Ultra High Molecular Weight EPDM in Dynamic Application, *186th Technical Meeting of the Rubber Division ACS*, Nashville, 14-16 October 2014.
- [3] Spanos P., Beelen J., Gögelein C., Duin M., Aar N., Formulating Ultra High Molecular Weight EPDM to Match NR Fatigue and Dynamic Performance, *188th Technical Meeting of the Rubber Division ACS*, Cleveland, 12-15 October 2015.
- [4] Dick J., *How to Improve Rubber Compounds*, 2. Edition, Hanser Publishers, Munich, 2014.
- [5] Savran Ö., *Elastomer Teknolojisi 1*, 1. Basım, Kauçuk Derneği Yayınları, İstanbul, 2001.
- [6] Hoffman W., *Rubber Technology Handbook*, 1. Edition, Hanser Publishers, New York, 1989.
- [7] Simpson B., *Rubber Basics*, 1. Edition, Rapra Technology Limited, United Kingdom, 2002.
- [8] Bhowmick A. K., Stephens H. L., *Handbook of Elastomers*, 2nd ed., Marcel Dekker, New York, 2001.
- [9] Rodgers B., Waddell H., Rubber Compounding, Editors: Cohen P., D'Sidocky M., *Eyclopedia of polymer science and technology*, 3. Edition, Wiley-Blackwell, United Kingdom, 612-699, 2004.
- [10] Ciesielski A., *An Introduction to Rubber Technology*, 1st ed., Rapra Technology Limited, United Kingdom, 1999.
- [11] Dick J., *Rubber Technology Compounding and Testing for Performance*, 1. Edition, Hanser Publishers, Munich, 2001.
- [12] Rodgers B., *Rubber Compounding Chemistry and Applications*, 1. Edition, Marcel Dekker, Newyork, 2004.
- [13] Katun N., Non-Sulphur Vulcanization of Rubber - a Brief Overview, *Jurnal Teknologi*, 1996, **25**, 19-25.
- [14] Coran A.Y., Vulcanization, Editors: Mark J. E., Erman B., Roland C. M., *The Science and Technology of Rubber*, 4th ed., Academic Press, 337-381, 2013.

- [15] <http://www.nocil.com/Downloadfile/DTechnicalNote-Vulcanization-Dec10.pdf>, (Ziyaret tarihi: 03 Şubat 2020).
- [16] Whelan A., Lee K. S., *Developments in Rubber Technology-1*, 1st ed., Applied Science Publishers, London, 1-151, 1979.
- [17] Rivin I.E., *Handbook on stiffness & damping in mechanical design*, ASME Press, New York, 3-8, 2010.
- [18] Harris M., Piersol G., *Mechanical Properties of Rubber, Shock and Vibration Handbook*, 5. Edition, MC-Graw Hill, New York, 1-18, 2002.
- [19] Gent A. N., *Engineering with Rubber: How to Design Rubber Components*, 3rd ed., Hanser Publishers, Munich, 159-200, 2012.
- [20] Higgins R.A., *Engineering Metallurgy-Applied Physical Metallurgy*, 6th ed., Arnold, 111-112, 1993.
- [21] Mars W. V., Fatemi A., Factors That Affect The Fatigue Life of Rubber: A Literature Survey, *Journal of Rubber Chemistry and Technology*, 2004, **77**, 391-412.
- [22] Tee Y. L., Loo M. S., Andriyana A., Recent advances on fatigue of rubber after the literature survey by Mars and Fatemi in 2002 and 2004, *International Journal of Fatigue*, 2018, **110**, 115-129.
- [23] Abraham F., Alshuth T., Jerrams S., The Effect of Minimum Stress and Stress Amplitude on the Fatigue Life of Non Strain Crystallising Elastomers, *Materials & Design*, 2005, **26**(3), 239–245.
- [24] Harbour R.J., Fatemi A., Mars W.V., Fatigue Crack Orientation in NR and SBR Under Variable Amplitude and Multiaxial Loading Conditions, *Journal of Materials Science*, 2008, **43**(6), 1783–1794.
- [25] Candau N., Chazeau L., Chenal J.M., Gauthier C., Ferreira J., Munch E., et al., Strain Induced Crystallization and Melting of Natural Rubber During Dynamic Cycles, *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2015, **17**(23), 15331–15338.
- [26] Stadlbauer F., Koch T., Archodoulaki V.M., Planitzer F., Fidi W., Holzner A., Influence of Experimental Parameters on Fatigue Crack Growth and Heat Build-Up in Rubber, *Materials*, 2013, **6**(12), 5502–5516.
- [27] Major Z., Feichter Ch., Steinberger R., Lang R.W., The Test Frequency Dependence of the Fatigue Behavior of Elastomers, *Fracture of Nano and Engineering Materials and Structures*, 2006.
- [28] Keller M., White S., Sottos N., Torsion Fatigue Response Of Self-Healing Poly (Dimethylsiloxane) Elastomers. *Polymer*, 2008, **49**(13), 3136–3145.
- [29] Schubel P., Gdoutos E., Daniel I., Fatigue Characterization of Tire Rubber, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2004, **42**(2), 149–154.

- [30] Ghosh P., Stoczek R., Gehde M., Mukhopadhyay R., Krishnakumar R., Investigation of Fatigue Crack Growth Characteristics of NR/BR Blend Based Tyre Tread Compounds, *International Journal of Fracture*, 2014, **188**(1), 9–21.
- [31] Seichter S., Archodoulaki V.M., Koch T., Holzner A., Wondracek A., Investigation of Different Influences on the Fatigue Behaviour of Industrial Rubbers. *Polymer Testing*, 2017, **59**, 99–106.
- [32] Wu Y.P., Zhao W., Zhang L.Q., Improvement of Flex-Fatigue Life of Carbon-Blackfilled Styrene-Butadiene Rubber by Addition of Nanodispersed Clay, *Macromolecular Materials and Engineering*, 2006, **291**(8), 944–949.
- [33] Liu Y., Li L., Wang Q., Zhang X., Fracture Properties of Natural Rubber Filled with Hybrid Carbon Black/Nanoclay, *Journal of Polymer Research*, 2011, **18**(5), 859–867.
- [34] Tian M., Yin S., Zou H., Su L., Zhang L., Static and Dynamic Mechanical Properties And Fracture Morphology of EPDM Composites Containing Silicate Nanofibers and Short PA-66 Microfibers, *Composites Part B Engineering*, 2011, **42**(7), 1937–1944.
- [35] Yan N., Xia H., Zhan Y., Fei G., New Insights into Fatigue Crack Growth in Graphene Filled Natural Rubber Composites By Microfocus Hard-X-Ray Beamline Radiation, *Macromolecular Materials and Engineering*, 2013, **298**(1), 38–44.
- [36] Dong B., Liu C., Zhang L., Wu Y., Preparation, Fracture and Fatigue of Exfoliated Graphene Oxide/Natural Rubber Composites, *RSC Advances*, 2015, **5**(22), 17140–17148.
- [37] Klüppel M., The Role of Filler Networking in Fatigue Crack Propagation of Elastomers Under High-Severity Conditions, *Macromolecular Materials and Engineering*, 2009, **294**(2), 130–140.
- [38] Dong B., Liu C., Wu Y.P., Fracture and Fatigue of Silica/Carbon Black/Natural Rubber Composites, *Polymer Testing*, 2014, **38**, 40–45.
- [39] Legorju-Jago K., Bathias C., Fatigue Initiation and Propagation in Natural and Synthetic Rubbers, *International Journal of Fatigue*, 2002, **24**(2), 85–92.
- [40] Chou H.W., Huang J.S., Lin S.T., Effects of Thermal Aging on Fatigue of Carbon Black Reinforced EPDM Rubber, *Journal of Applied Polymer Science*, 2007, **103**(2), 1244–1251.
- [41] Ngolemasango F., Bennett M., Clarke J., Degradation and Life Prediction of A Natural Rubber Engine Mount Compound. *Journal of Applied Polymer Science*, 2008, **110**(1), 348–355.

- [42] Neuhaus C., Lion A., Johlitz M., Heuler P., Barkhoff M., Duisen F., Fatigue Behaviour of an Elastomer Under Consideration of Ageing Effects, *International Journal of Fatigue*, 2017, **104**, 72–80.
- [43] Vinod V., Varghese S., Kuriakose B., Degradation Behaviour of Natural Rubber–Aluminium Powder Composites: Effect of Heat, Ozone and High Energy Radiation, *Polymer Degradation and Stability*, 2002, **75**(3), 405–412.
- [44] Sahakaro K., Talma A.G., Datta R.N., Noordermeer J.W., Blending of NR/BR/EPDM by Reactive Processing for Tire Sidewall Applications. II. Characterization, *Journal of Applied Polymer Science*, 2007, **103**(4), 2547–2554.
- [45] Sae-Oui P., Sirisinha C., Hatthapanit K., Effect of Blend Ratio on Aging, Oil and Ozone Resistance of Silica-Filled Chloroprene Rubber/Natural Rubber (CR/NR) Blends, *Express Polymer Letters*, 2007, **1**(1), 8–14.
- [46] Yanyo L.C., Effect of Crosslink Type on the Fracture of Natural Rubber Vulcanizates, *International Journal of Fracture*, 1989, **39**, 103-110.
- [47] Brown P., Porter M., Thomas A. G., Dependence of Strength Properties on Crosslink Structure in Vulcanized Polyisoprenes, *Kautschuk Gummi Kunststoffe*, 1987, **40**, 17-19.
- [48] J. A. Brydson, *Rubber Chemistry*, Applied Science Publishers, London, 1978.
- [49] Hamaguchi H., Samejima Y., Kani N., A study of aging effect on rubber bearings after about twenty years in use, *AIJ Journal of Technology and Design*, 2012, **15**(30), 393–398.
- [50] Xiang K., Huang G., Zheng J., Wang X., Huang J., Investigation on the Thermal Oxidative Aging Mechanism and Lifetime Prediction of Butyl Rubber, *Macromolecular Research*, 2012, **21**(1), 10–16.
- [51] <http://www.nocil.com/Downloadfile/ETechnicalNote-Antioxidants-Dec2010.pdf>, (Ziyaret tarihi: 03 Şubat 2020).

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

- [1] **Tan B.**, Feyzullahoğlu E., Kauçuk Malzemenin Yorulma Davranışına Etki Eden Faktörler, *3. Uluslararası Mühendislik Mimarlık ve Tasarım Kongresi*, Kocaeli, 4-5 Mayıs 2018.
- [2] **Tan B.**, Feyzullahoğlu E., Çevresel Koşulların Kauçuk Malzemelerin Yorulma Davranışlarına Olan Etkilerinin Deneysel Olarak İncelenmesi, *Uluslararası Marmara Fen Ve Sosyal Bilimler Kongresi (IMASCON 2019 AUTUMN)*, Kocaeli, 1-3 Kasım 2019.



ÖZGEÇMİŞ

1993 yılında İstanbul'da doğdu. Lise öğrenimini Maltepe E.C.A Elginkan Anadolu Lisesi'nde tamamladı. 2011 yılında girdiği Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nden 2015 yılında Makine Mühendisi olarak mezun oldu. 2015 yılında Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda başladığı Yüksek Lisans eğitimine halen devam etmektedir. 2017 yılında Ar-Ge Mühendisi olarak göreve başladığı Tekno Kauçuk firmasında görevine halen devam etmektedir.

