



T.C.
EGE ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü



NANOPARÇACIK KATKISININ KAÜÇUK NANOKOMPOZİTLERDEN İMAL EDİLEN SIZDIRMAZLIK ÜRÜNLERİ ÖZELLİKLERİNE ETKİLERİ

Yüksek Lisans Tezi

Yoncagül ÇELİK EREZ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Adı

İzmir
2021

T.C.
EGE ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü

**NANOPARÇACIK KATKISININ KAUÇUK
NANOKOMPOZİTLERDEN İMAL EDİLEN
SIZDIRMAZLIK ÜRÜNLERİ ÖZELLİKLERİNE
ETKİLERİ**

Yoncagül ÇELİK EREZ

Danışman: Doç. Dr. Seçkin ERDEN

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı
Makina Mühendisliği Yüksek Lisans Programı

İzmir
2021

EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

EÜ Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin ilgili hükümleri uyarınca Yüksek Lisans Tezi / Doktora Tezi olarak sunduğum “Nanoparçacık Katkısının Kauçuk Nanokompozitlerden İmal Edilen Sızdırmazlık Ürünleri Özelliklerine Etkileri” başlıklı bu tezin kendi çalışmam olduğunu, sunduğum tüm sonuç, doküman, bilgi ve belgeleri bizzat ve bu tez çalışması kapsamında elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara atıf yaptığımı ve bunları kaynaklar listesinde usulüne uygun olarak verdiğimi, tez çalışması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını, bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya diğer bir üniversitede başka bir tez çalışması içinde sunmadığımı, bu tezin planlanmasından yazımına kadar bütün safhalarda bilimsel etik kurallarına uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul edeceğimi beyan ederim.

07 / 09 / 2021

İmzası

Adı-Soyadı

Yoncagül ÇELİK EREZ

ÖZET

NANOPARÇACIK KATKISININ KAUÇUK NANOKOMPOZİTLERDEN İMAL EDİLEN SIZDIRMAZLIK ÜRÜNLERİ ÖZELLİKLERİNE ETKİLERİ

ÇELİK EREZ, Yoncagül

Yüksek Lisans Tezi, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Seçkin ERDEN

Haziran 2021, 100 sayfa

Sızdırmazlık elemanları üretiminde en sık kullanılan malzemelerden biri olan kauçuk, malzeme yapısı itibarı ile nonlineer mekanik davranış sergilemektedir. Bu durum, malzeme üzerinde gerçekleştirilen testlerden elde edilen verilerin, sonlu eleman analiz yazılımına aktarılarak sızdırmazlık elemanları üzerindeki dayanım, sürtünme, vb. etkilerin incelenmesini kritik hale getirmektedir. Diğer yandan, nanobilim ve nanoteknolojinin de gelişmesiyle birlikte, malzemelerin üstün niteliklere sahip nanoformları daha fazla talep görür hale gelmiştir. Mekanik, termal, tribolojik, vb. performansları nedeniyle, karbon nanomalzemelerle ilgili çalışmalar da artmıştır. Grafit, karbon nanotüp ve grafenin, mekanik, elektriksel, termal, kimyasal, vb. özellikleri geliştirmek için elastomer bileşiklerinde takviye edici maddeler olarak denendiği bilinmektedir.

Bu çalışmada, sızdırmazlık elemanları ve kauçuk malzemeler araştırılmış, ve 2, 4 ve 6 phr oranlarında grafit, karbon nanotüp ve grafen nanoparçacık katkısının NBR (Nitril Bütadien Kauçuk) malzeme özelliklerine etkisi testler ve sonlu eleman analizleri ile incelenmiştir. Standartlara göre gerçekleştirilen testler, ASTM D471 çekme, ASTM D2240 sertlik, ASTM D5289/ISO 6502 reometre, ASTM D395 sıkıştırılabilirlik, ASTM D573 havada yaşlandırma ve ASTM D471 sıvıda yaşlandırma testleridir. Ayrıca, bu testler sonucunda elde edilen veriler MSC Marc programına aktarılmış ve kauçuk malzemedan yapılan sızdırmazlık elemanları sonlu elemanlar yöntemi ile analiz edilmiştir. Analiz sonuçlarının doğrulanması için de sızdırmazlık elemanının uygulama alanına göre saha testleri gerçekleştirilmiştir. Bu veriler ışığında, üstün performanslı sızdırmazlık elemanları ve kauçuk bazlı ürünlerin elde edilmesine katkı sağlanmış olacaktır.

Anahtar sözcükler: NBR, kauçuk, grafit, grafen, karbon nanotüp, sonlu elemanlar analizi, sızdırmazlık, mekanik test, yaşlandırma.

ABSTRACT

EFFECTS OF NANOPARTICLE INCORPORATION ON THE PROPERTIES OF SEALING PRODUCTS MADE OF RUBBER NANOCOMPOSITES

ÇELİK EREZ, Yoncagül

MSc in Mechanical Eng.

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Seckin ERDEN

Haziran 2021, 97 pages

Rubber, which is one of the most frequently used materials in the production of sealing elements, exhibits nonlinear mechanical behavior due to its material structure. This makes it critical for the data obtained from the tests performed on the material to be transferred to the finite element analysis software and for the effects such as strength, friction, etc. acting on the sealing elements to be analyzed. On the other hand, with the development of nanoscience and nanotechnology, nanoforms of materials with superior qualities have become more demanded. Due to their mechanical, thermal, tribological, etc. performance, studies on carbon nanomaterials have also increased. It is known that graphite, carbon nanotube, and graphene have been tried as reinforcing materials in elastomer compounds to improve their mechanical, electrical, thermal, chemical etc. properties.

In this study, sealing elements and rubber materials, and the effects of graphite, carbon nanotube, and graphene nanoparticle incorporation at 2, 4, and 6 phr ratios on NBR (Nitrile Butadiene Rubber) material properties were investigated by tests and finite element analyses. Performed tests according to standards are: ASTM D471 tensile testing, ASTM D2240 hardness tests, ASTM D5289/ISO 6502 rheometer tests, ASTM D395 compressibility test, ASTM D573 air aging, and ASTM D471 liquid aging. In addition, the data obtained as a result of these tests were transferred to MSC Marc program and the sealing elements made of rubber material were analyzed by the finite element method. In order to verify the analyses results, field tests were carried out according to the application area of the sealing element. In the light of these data, contribution will be provided to obtain high performance sealing elements and rubber-based products.

Keywords: NBR, rubber, graphite, graphene, carbon nanotube, finite element analysis, sealing, mechanical test, aging.

ÖNSÖZ

Tez konusunun belirlenmesinde, danışman hocam Doç. Dr. Seçkin Erden'in polimerik kompozit derslerinde edindiğim bilgilerin, çalıştığım Kastaş Sızdırmazlık Teknolojileri A.Ş. ürünlerinin temel hammaddelelerinden olan kauçuk malzemede kullanımının merakı, önemli bir rol oynamıştır. Yapılan görüşmeler ve literatür taramaları neticesinde, nano parçacıkların kauçuktan yapılan sızdırmazlık elemanlarının mekanik ve termal özelliklerini iyileştirebileceği görüşüne varılmış, tez konusu netleşmiştir.

Kastaş Sızdırmazlık Teknolojileri A.Ş. tarafından sağlanan numune hammadde karışım destekleri sayesinde, üç farklı tipteki nanoparçacık katkısıyla, üç farklı oranda kauçuk karışımı hazırlanmış ve firmanın Ar-Ge Laboratuvarında mekanik ve reolojik incelemeleri gerçekleştirilmiştir.

Test sonuçlarından yola çıkarak hazırlanan malzeme modeli pnömatik sızdırmazlık elemanı üzerinde kullanılmıştır. MSC Marc programı kullanılarak yapılan analiz sonuçları referans hamurdan ve iyileştirilmiş hamurdan üretilen sızdırmazlık eleman tasarımı üzerinden gerçekleştirilmiştir. Bu iki tip hamurdan sızdırmazlık elemanları üretimi gerçekleştirilip saha testleri Ar-Ge Test Merkezi'nde yapılmıştır.

Yapılan literatür taramaları, hamur karışımları, mekanik testler, sonlu eleman analizleri ve tüm bu verilerin raporlanıp uygun şablona uyarlanması ile birlikte yüksek lisans tez sürecim tamamlanmıştır.

İZMİR

30/06/2021

Adı-Soyadı

Yoncagül ÇELİK EREZ

İÇİNDEKİLER

Sayfa

İÇ KAPAK	(ii)
KABUL ONAY SAYFASI	(iii)
ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI.....	(v)
ÖZET	(vii)
ABSTRACT	(ix)
ÖNSÖZ	(xi)
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	(xiii)
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	(xxv)
TABLolar DİZİNİ.....	(xxviii)
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	(xxx)
1.GİRİŞ.....	1
2. GENEL BİLGİLER.....	3
2.1 ELASTOMERLER.....	3
2.1.1 NBR (Akrilonitril Bütadien Kauçuk)	5
2.2 NANO KOMPOZİTLER	6
2.3 SIZDIRMAZLIK ELEMANLARI.....	7

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

2.2.1 Statik Sızdırmazlık Elemanları	8
2.3.2 Dinamik Sızdırmazlık Elemanları	9
2.3.2.1 Radyal Sızdırmazlık Elemanları	9
2.3.2.2 Eksenel Sızdırmazlık Elemanları	9
2.3.3 Sızdırmazlık Elemanı Seçim Kriterleri.....	10
2.3.3.1 Basınç	10
2.3.3.2 Hız	10
2.3.3.3 Sıcaklık	10
2.3.3.4 Akışkan Tipi	11
2..3.5 Strok	11
2.3.3.6 Çalışma Pozisyonu	11
2.3.3.7 Çift Etkili-Tek Etkili.....	12
2.3.3.8 Düşük Sürtünme	12
2.3.3.9 Boru-Mil-Yüzey Kaplamaları-Et Kalınlıkları	12
2.4. KAUÇUK KARIŞIMINDA YER ALAN MADDELER.....	13
2.4.1 Dolgu Maddeleri.....	14
2.4.1.1 Karbon Siyahı	15

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

2.4.1.2 Grafit.....	16
2.4.1.2.1 Doğal Grafit.....	18
2.4.1.2.2 Sentetik Grafit	18
2.4.1.2.3 Grafit Kullanım Alanları	19
2.4.1.3 Grafen	19
2.4.1.4 Karbon Nanotüp (CNT).....	21
2.4.1.5 Diğer	23
2.4.2 Proses Yardımcıları ve Yumuşatıcılar	24
2.4.3 Yaşlanma Önleyicileri	25
2.4.4 Akseleratör Aktivatörleri ve Geciktiriciler	26
2.5.VULKANİZASYON.....	27
2.5.1 Vulkanizasyon Mekanizması.....	28
2.5.2 Vulkanizasyon Teknikleri.....	29
2.5.2.1 Pres Vulkanizasyon	30
2.5.2.1.1 Basınç Kalıplama.....	30
2.5.2.1.2 Transfer Kalıplama	30
2.5.2.1.3 Enjeksiyon Kalıplama.....	31

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

2.5.2.2 Açık Vulkanizasyon	31
2.5.2.3 Sürekli Vulkanizasyon.....	31
2.5.2.4 Soğuk Vulkanizasyon	31
2.5.3 Vulkanizasyon Eğrisi.....	32
2.5.4 Vulkanizasyon Değişkenleri.....	33
3. GEREÇ VE YÖNTEM.....	34
3.1 NBR-Grafit, NBR-Grafen ve NBR-CNT Nanokompozitlerin Hazırlanması.....	34
3.2 Mekanik Testler.....	37
3.2.1 Reometre.....	37
3.2.2 Çekme Deneyi	39
3.2.3 Sertlik	42
3.2.4 Sıkıştırılabilirlik Testi.....	42
3.2.5 Yaşlandırma Testi.....	44
3.2.5.1 Havada Yaşlandırma Testi.....	45
3.2.5.2 Sıvıda Yaşlandırma Testi.....	46
3.3 Sonlu Elemanlar Analizi.....	48
3.3.1 Malzeme Modelleme	49

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

3.3.1.1 Test Sonuçlarının Marc'a Girilmek Üzere Hazırlanması	49
3.3.1.2 Deneysel Sonuç Çıktıları ile Malzeme Modeli Eğrilerinin Oluşturulması.....	51
3.3.2 Analiz Kurgusu.....	52
3.3.2.1 Geometri ve Mesh	52
3.3.2.2 Tablolar ve Koordinat Sistemi.....	54
3.3.2.3 Geometri ve Malzeme Özellikleri	54
3.3.2.4 Kontaklar	55
3.3.2.5 Sınır Şartları.....	57
3.3.2.6 Lokal Meshleme	57
3.3.2.7 Yükleme	58
3.3.2.8 Analiz Özellikleri	59
4. SONUÇLAR VE BULGULAR.....	62
4.1 Reometre Test Sonuçları	62
4.1.1 NB80 Reometre Test Sonuçları - Katkısız	62
4.1.2 NB80 Reometre Test Sonuçları - Grafit	63
4.1.3 NB80 Reometre Test Sonuçları - Grafen	65
4.1.4 NB80 Reometre Test Sonuçları - KNT	67

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

4.2 Çekme Testi Sonuçları.....	70
4.2.1 NB80 Çekme Testi Sonuçları – Katkısız.....	70
4.2.2 NB80 Çekme Testi Sonuçları – Grafit	71
4.2.3 NB80 Çekme Testi Sonuçları – Grafen.....	72
4.2.4 NB80 Çekme Testi Sonuçları – KNT	73
4.3 Sertlik Sonuçları	74
4.4 Sıkıştırılabilirlik Testi Sonuçları	74
4.5 Yaşlandırma Test Sonuçları	75
4.5.1 NB80 Yaşlandırma Testi Sonuçları - Katkısız	75
4.5.2 NB80 Yaşlandırma Testi Sonuçları - Grafit	76
4.5.3 NB80 Yaşlandırma Testi Sonuçları - Grafen	77
4.5.4 NB80 Yaşlandırma Testi Sonuçları - KNT	78
4.6 Sonlu Elemanlar Analiz Sonuçları	79
4.6.1 Eşdeğer Cauchy Gerilim.....	79
4.6.2 Kontak Normal Stress.....	80
4.7 Sonlu Elemanlar Analiz Sonuçlarının Doğrulanması.....	82
5.TARTIŞMA VE SONUÇ.....	84

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

KAYNAKLAR DİZİNİ..... 85

TEŞEKKÜR 92

ÖZGEÇMİŞ..... 94

EKLER



ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 Bazı polimerlerin gerilme-uzama eğrileri.....	4
2.2 Çapraz bağlanmış ve bağlanmamış polimer yapısı	4
2.3 Akrilonitril bütadien kauçuğun kimyasal yapısı.....	5
2.4 Sızdırmazlık ortamı	7
2.5 Sızdırmazlık eleman çeşitlerinin montaj alanları	8
2.6 Dik, açılı ve yatay çalışma pozisyon örnekleri.....	11
2.7 Çift etkili kullanım örneği	12
2.8 Grafit.....	17
2.9 Grafitin Kimyasal Yapısı.....	17
2.10 Grafitin düzlemsel yapısı; Grafen.....	20
2.11. Karbon Dizilimleri; a) Grafit, b) Grafen levha, c) Karbon nanotüp.....	23
2.12 Vulkanizasyon sistemindeki çinko oksit aktifliği.....	26
2.13 Karbon atomu ve polimer dizilimi	27
2.14 Kükürt vulkanizasyon mekanizması.....	28
2.15 Vulkanizasyon mekanizması	29
2.16 Vulkanizasyon eğrisi	32
2.17 Vulkanizasyon değişkenleri.....	33

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
3.1 Ana kademe süreç şeması.....	35
3.2 Plaka şekline getirilen yarı mamül	36
3.3 Elde edilen yarı mamül hamurlar	37
3.4 Alpha MDR 2000 Model.....	38
3.5 Test numune ölçüleri	40
3.6 Test numuneleri	41
3.7 Çekme Test Cihazı.....	41
3.8 Sertlik Ölçüm Cihazı	42
3.9 Sıkıştırılabilirlik Test Kalıbı	43
3.10 Yaşlandırma Test Kabini	46
3.11 Sıvıda Yaşlandırma Test Düzeneği	47
3.12 Farklı pişme yöntemleri ile aynı hamurdan basılmış numunelerin yük altındaki davranışları	48
3.13 Deneysel sonuç ve matematiksel eğri.....	50
3.14 Gerinim farklılıkları ve maksimum gerinimdeki kuvvet düşüşü.....	51
3.15 Ürün, kanal ve milin CAD programındaki görüntüsü	53
3.16 Analizi yapılacak ürün geometrisinin kenarlarının bölünümü	53

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
3.17 Meshlenmiş sızdırmazlık elemanı görüntüsü	54
3.18 Test verilerinin ve montajlama kurgusunun girilmesi	55
3.19 Sızdırmazlık elemanının ve montaj parçalarının tanımlanması	56
3.20 Temas koşulları ve sürtünme kuvvetlerinin girilmesi	56
3.21 Sınır koşulları	57
3.22 Mesh Adaptivity tanımlama	58
3.23 Yükleme Durumu	59
3.24 Analiz Özellikleri	59
3.25 Hesaplanması istenen çıktılar	60
3.26 Eleman tipi.....	61
4.1 NB80 Reometre Testi Sonuçları – Katkısız	63
4.2 NB80 Reometre Testi Sonuçları – Grafit: a) 2 phr, b) 4phr, c) 6phr	65
4.3 NB80 Reometre Testi Sonuçları – Grafen: a) 2 phr, b) 4phr, c) 6phr	67
4.4 NB80 Reometre Testi Sonuçları – KNT: a) 2 phr, b) 4phr, c) 6phr.....	69
4.5 NB80 kopma uzama grafiği.....	71
4.6 NB80-Grafit eklemeli kopma uzama grafiği	71
4.7 NB80-Grafen eklemeli kopma uzama grafiği	72

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
4.8 NB80-KNT eklemeli kopma uzama grafiği	73
4.9 Eşdeğer Cauchy Gerilimi - Montaj; a) NBR- Katkısız, b) NBR - KNT	79
4.10 Eşdeğer Cauchy Gerilimi – 12 bar; a) NBR- Katkısız, b) NBR - KNT	80
4.11 Temas Gerilimleri - Montaj; a) NBR- Katkısız, b) NBR - KNT.....	81
4.12 Temas Gerilimleri – 12 bar; a) NBR- Katkısız, b) NBR - KNT	81

TABLÖLAR DİZİNİ

<u>Tablo</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 Mil Toleransları	13
2.2 Grafitleşme Durumu; Reflektans değeri ve H/C oranı	19
2.3 Grafenin mekanik ve fiziksel özellikleri	20
2.4 Tek ve çok duvarlı KNT'lerin karşılaştırmalı teknik özellikleri	22
3.1 Numune kodlama.....	34
3.2 NBR kauçuk karışım reçetesi	35
4.1 NB80 Reometre Testi Sonuçları – Katkısız	62
4.2 NB80 Reometre Testi Sonuçları – Grafit	63
4.3 NB80 Reometre Testi Sonuçları – Grafen.....	65
4.4 NB80 Reometre Testi Sonuçları – KNT.....	67
4.5 NB80 Çekme Testi Sonuçları – Katkısız.....	70
4.6 NB80 Çekme Testi Sonuçları – Grafit	71
4.7 NB80 Çekme Testi Sonuçları - Grafen.....	72
4.8 NB80 Çekme Testi Sonuçları – KNT.....	73
4.9 NB80 Sertlik Testi Sonuçları.....	74
4.10 NB80 Sıkıştırılabilirlik Testi Sonuçları	75
4.11 NB80 Yaşlandırma Testi Sonuçları - Katkısız	75

TABLÖLAR DİZİNİ (devam)

<u>Tablo</u>	<u>Sayfa</u>
4.12 NB80 Yaşlandırma Testi Sonuçları-Grafit.....	76
4.13 NB80 Yaşlandırma Testi Sonuçları-Grafen	77
4.14 NB80 Yaşlandırma Testi Sonuçları-KNT	78
4.15 NB80 Saha Test Sonuçları.....	82
5.1 Nanoparçacık Katkılı NBR Karışımların Mekanik Özelliğe Olan Etkilerinin Referans ile Kıyaslamalı Değerleri	84

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
-----------------	-----------------

σ_{max}	Çekme dayanımı (kg/cm ²)
F_{max}	Uygulanan en yüksek çekme kuvveti (Kg)
A_o	Çekme numunesi başlangıç kesiti (cm ²)
l_o	Çekme numunesi ilk boyu (mm)
l_r	Çekme numunesi son boyu (mm)
%	Çekme numunesi birim uzama miktarı [-]

<u>Kısaltmalar</u>	
--------------------	--

phr	Yüzde birlik miktar birimi
Grt	Grafit
Grn	Grafen
KNT	Karbon Nanotüp
NBR	Nitrile Butadien Rubber
NR	Natural Rubber

1.GİRİŞ

Hafif ve viskoelastik davranış sergileyen elastomerler, çeşitli bilim ve uygulama alanlarında kompozit üretimi için ilgi çekici hale gelmiştir. Nanobilim ve nanoteknoloji alanlarındaki gelişme ile beraber polimer nanokompozitler doldurulma polimer kompozitlere yeni alternatif olmuş (Liu et al., 2005) ve bu nanokompozit elastomerler, malzemenin mekanik özelliklerine kazandırdığı üstün performans nedeniyle son yıllarda önemli araştırma çalışmalarına konu olmuştur (Paran et al., 2020; Papageorgiou et al., 2015).

Elastomerlerin en sık kullanılan malzeme gruplarından olan kauçuklar çapraz bağlanmamış, ama vulkanizasyon sonucunda çapraz bağlanabilme özelliğine sahip olabilen polimerlerdir. Deforme edici kuvvet ve yüksek sıcaklık etkisi altında akışkan özellik gösterirler. Böylece uygun şartlar altında şekillendirilebilirler (Erkek, 2007).

Bilinen tarihte kauçuğu ilk tanımlayan kişinin Kristof Kolomb olduğu tahmin edilmektedir. Amerika kıtasına yapılan ikinci seyahat sırasında Kolomb, Haiti adasındaki yerli halkın, ‘caa-o-chu’ dedikleri ağaçtan akan elastik reçineden top ve çeşitli giysiler yaptıklarını görmüştür. Amazon nehrinin kenarında yaşayan halk dilinde ‘caa’ odun-tahta, ‘o-chu’ akmak-ağlamak demektir. Yani ‘caa-o-chu’ ağlayan ağaç anlamına gelmektedir. Fakat şu an esas üretimi Havea Brasiliensis olarak tanımlanan ağacın gövdesine açılan bir yarık sayesinde alınan süte benzeyen bir sıvıdan elastik malzemeler üretilmektedir (Erkek, 2007).

Kauçuğun tarihçesinde önemli olan olaylardan bahsetmek gerekirse, kauçuk 1751 yılında ilk kez teknik anlamda kullanılmıştır. Teknik anlamda kullanımından 12 yıl sonra 1803 yılında Paris’te ilk kauçuk fabrikası kurulmuştur. Vulkanizasyonun 1839 yılında Charles Goodyear tarafından keşfedilmesi ile kauçuktan üretilen malzemelerde yeni bir döneme girilmiştir. İlk sentetik kauçuk ise, 1909 yılında Almanya’daki Bayer Laboratuvarları’nda F. Holman tarafından keşfedilmiş ve dünyada ilk patenti alınmıştır. Sentetik kauçuğun otomotiv sektöründe ilk kullanımı, %100 sentetik kauçuktan ilk otomobil lastiği olarak, 1912 yılında Almanya’da gerçekleşmiş ve böylece 1916 yılında ilk sentetik kauçuk tesisi kurularak ayda 150 ton gibi yüksek tonajlarda üretime başlanmıştır. Bu çalışmanın ana hammadesi olan NBR kauçuğu ise 1929 yılında Hermann Staudinger tarafından “bütadien”den elde edilmiş ve bu kauçukların üretimine başlanmıştır (Erkek, 2007).

Grafit, gayet yumuşak, dokunumu yağsı ve ince levhalar halinde bükülme özelliğine sahip, bir karbon mineralidir. Grafit, dünyada teknolojinin gelişmesiyle birlikte, fazlaca kullanılan ve günümüz teknolojisinin vazgeçilemeyen bir endüstri hammaddesi olup, organik maddelerin metamorfizması sonucu oluşmaktadır (Toprak, 2006). Grafitin bu denli stratejik bir hammadde olarak değerlendirilmesinin nedenleri, mükemmel ısı iletkenliği, mükemmel elektrik iletkenliği ve ısıya dayanıklılık gibi çok önemli özellikleridir (Çuhadaroglu vd., 2018).

Nano teknolojinin de gelişmesiyle birlikte malzemelerin nanoformu daha fazla talep görmektedir. Mekanik, termal ve son zamanlarda tribolojik özelliklerindeki üstün performans nedeniyle grafitin nanoformu olan grafenle ilgili çalışmalar da artmıştır (Agrawal et al., 2015). Grafen ve türevlerinin, malzemelerin mekanik, elektriksel, termal ve kimyasal özellikler gibi çeşitli özelliklerini geliştirmek için elastomer bileşiklerinde takviye edici maddeler olarak denendiği bilinmektedir (Kim et al., 2014; Schopp et al., 2014). Örneğin, NR'nin fonksiyonelleştirilmiş grafen tabakaları (FGS) ile takviye edilmesi çalışmasında, nanokompozitlerin genel özellikleri karakterize edilmiştir (Hernández et al., 2012). Bu çalışma neticesinde, 1 phr (yüz kısım kauçuk başına bir kısım) ile takviye edilen NR nanokompozitler, gerilme mukavemetlerinde %6,2 artış, modüllerinde %1,8 artış ve yüzde uzamasında 800'den 630'a önemli bir azalma göstermiştir (Mensaha et al., 2019).

Karbon nanotüpler (KNT'ler) rulo formunda grafen düzlemlerinden türetilen nano yapılarıdır ve çeşitli farklı kimyasal ve fiziksel özelliklere sahiptirler. Bugüne kadar sadece atom ölçeği boyutunda KNT ile ilgili de önemli çalışmalar yürütülmüştür (Agrawal et al., 2015). Yüksek en boy oranları nedeniyle KNT'ler polimer kompozitlerin Young modülü, tokluk, gerilme mukavemeti, basınç mukavemeti, sertlik ve esneklik gibi tribolojik özelliklerinin iyileştirilmesinde önemli rol oynamıştır (Park et al., 2010; Jindal et al., 2013). Yapılan KNT çalışmaları, Young modülünde, gerilme mukavemetinde ve ayrışma sıcaklığında belirgin artışların polimer malzemelerin termal veya tribolojik özelliklerinde önemli bir değişiklik olmadan elde edildiğini gösterdi. Ayrıca sonuçlar, KNT katkısıyla sürtünme katsayısının azaldığını göstermiştir (Lia et al., 2016).

Yapılan literatür çalışmaları ışında gerçekleştirilen bu çalışma, grafit, grafen ve KNT katkılı NBR kompozit malzemesinin mekanik ve termal özelliklerini karşılaştırmalı rolünü vurgulamaktadır. Ayrıca sonlu elemanlar analizi yardımı ile beraber bu alanda yapılan çalışmalarda geliştirilen NBR malzemelerin ürün bazında sağladığı iyileştirmeler gösterilmiştir.

2. GENEL BİLGİLER

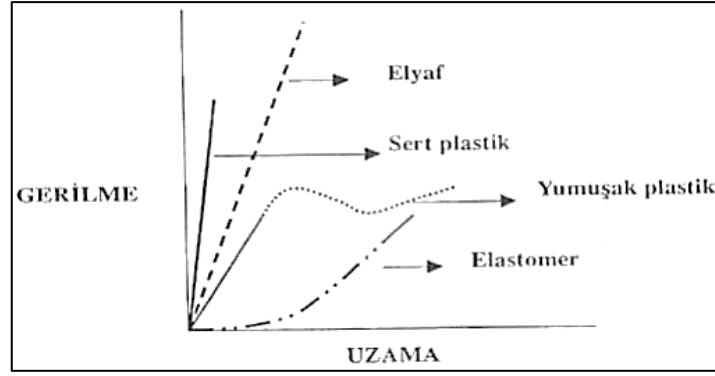
2.1 ELASTOMERLER

Monomer olarak adlandırılan basit moleküllerden, polimerizasyon sayesinde uzun zincirli moleküller oluşturulur. Polimer molekülleri, amorf camsı veya kristalin yapıda olabilir. Polimerin düşük camsı geçiş sıcaklığına ve amorf yapıya sahip olması elastik davranışlar sergilemesine neden olmaktadır. Buna ek olarak, polimerin elastik davranış sergilemesi için çeşitli bağları yapabilme kabiliyetinin yüksek ve moleküllerarası çekim kuvvetlerinin ise küçük olması gerekmektedir. Çapraz bağlar, esnekliğin tersinir olmasını sağlar. Tabii kauçuk (poliisopren) tipik elastomer özellikleri gösterir. Polimer, -73°C camsı geçiş sıcaklığında amorf olup kolayca çapraz bağlanabilir. Kuvvet uygulaması doğrultusunda yönelen zincirlerde bir miktar kristallenir. Bu durum uzamaya karşı gittikçe artan bir direnç oluşturur.

Kısacası, elastomer davranış için polimerin, yüksek molekül ağırlığına, düşük zincirlerarası kuvvete, gelişigüzel zincir yapısına ve çapraz bağlanabilme özelliğine sahip olması gerekmektedir (Erkek, 2007).

Elastomer malzemeler tanım olarak, oda sıcaklığında orijinal boyunun en az iki misline uzatılabilen ve bu uzamayı temin eden kuvvet ortadan kaldırıldığında hemen hemen orijinal haline dönebilen, rastgele hareket halinde moleküllere sahip amorf polimerlerdir (Sevinç, 2019). Elastomer malzemeler temelde viskoz sıvılardır. Uzun molekül zincirlerinin çapraz bağlanması ile esnek bir ağ yapısı oluşturur. Böylece çapraz bağlanma ile birlikte elastomer malzemeler sabit şekil ve boyuta sahip yumuşak ve elastik katılar haline gelmektedir. Camsı malzemeler sert ve kırılgandır. Kristalin malzemelerin ise çekme grafiğinde izlediği adımlar; elastik deformasyon bölgesi, plastik akış bölgesi, boyun verme, pekleşme ve kırılma (Kulaç, 2016).

Elastomerleri, plastik ve elyaflardan ayıran mekanik özellikleri malzemelerin gerilme-uzama eğrisine bakılarak gözlemlenebilir. Bir doğrultuda gerilme uygulanan polimerlerde kopma noktasına kadar uzama meydana gelir. Polimer malzemelerde gerilme, birim alana uygulanan kuvveti belirtirken, gevşeme bu kuvvet etkisi ile meydana gelen uzamayı belirtir.



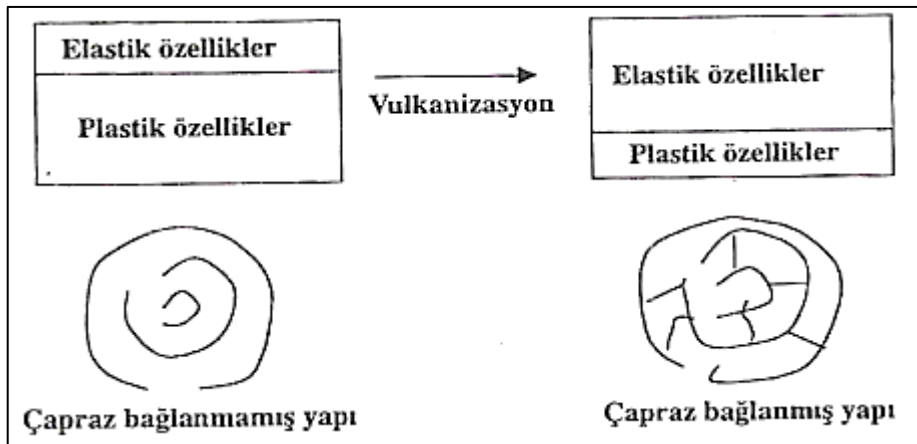
Şekil 2.1 Bazı polimerlerin gerilme-uzama eğrileri (Savran, 2001)

Şekil 2.1'deki eğrilerin başlangıçtaki eğimleri malzemelerin modül değerlerini verirken eğrideki son noktalar kopma kuvveti ve kopma uzaması değerlerini vermektedir (Erkek, 2007).

Çalışma konumuzun temelini oluşturan kauçuk malzeme yumuşaktır, yüksek uzama ve yüksek elastikiyete sahiptir. Kauçuğumsu yapıda elastomer malzemeler; düşük sıcaklıklarda cam gibi sert, yüksek sıcaklıklarda erime göstermeyen, oda sıcaklığı-bozunma sıcaklığı aralığında elastik özellikler gösteren seyrek çapraz bağlanmış polimer malzemelerdir (Gent, 2011).

Çapraz bağlanabilme özelliği, vulkanizasyon işlemi ile artırılarak polimerlerin elastik davranışa sahip olmasını sağlar. Vulkanizasyon, kauçukta çapraz bağlanma reaksiyonları gerçekleştirilerek fiziksel ve kimyasal değişiklik gerçekleştirip malzemenin kalıcı elastik özelliğe sahip olmasını sağlama ve bu özelliğin geliştirilmesi işlemidir.

Vulkanizasyon öncesi plastik özellikler yüksekken, vulkanizasyon sonrası elastik özellikler yüksektir.



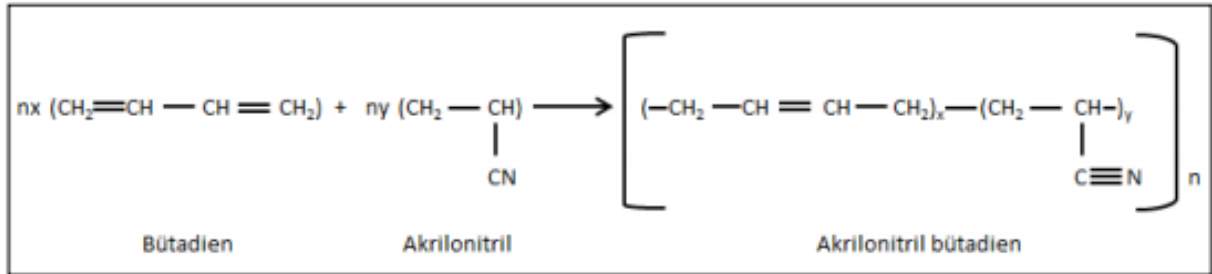
Şekil 2.2 Çapraz bağlanmış ve bağlanmamış polimer yapısı (Savran, 2001)

Bazı kauçuk çeşitleri şunlardır; tabii kauçuk (NR), stirenbütadien kauçuklar (SBR), butadien kauçuklar (BR), isopren kauçuklar (IR), bütıl kauçuk (IIR), epm, epdm kauçuklar, akrilonitrilbütadien kauçuğu (NBR), kloropen kauçuklar (CR), klorosülfon polietile (CSM), polisülfid kauçuklar (T), akrilik kauçuklar (ACM), floro elastomerler (FKM), poliüretan kauçuklar (AU), epikloro hidrin kauçuklar (CO, ECO). Kauçuk çeşitlerden biri olan NBR (akrilonitrilbütadien kauçuğu) özellikle sızdırmazlık elemanları sektöründe sıklıkla kullanılmaktadır (Erkek, 2007).

2.1.1 NBR (AKRİLONİTRİL BÜTADİEN KAÜÇUK)

Nitril kauçuğu, akrilonitril ve bütadienin kopolimeridir. Bu polimer akrilonitril birimlerinde yer alan polar nitril gruplarından dolayı çözücülere ve yağlara karşı direnç göstermektedirler. Her kauçuk karışımı içerisinde yer alan ACN (akrilonitril) oranı düzenlenerek, kauçuğun kullanılacağı alan ve uygulamalarda kullanılmak üzere hazırlanabilir. Bu NBR kauçuk karışımı özellikle otomotiv sektöründe benzin, mazot ve yağ hortumları olmak üzere çeşitli uygulama alanlarındaki sızdırmazlık elemanları yapımında kullanılır.

NBR malzemesinde bulunan nitril gruplarının sayısının artması, bu malzemeden üretilen ürünün aşınmaya, yağa ve çözücülere karşı direncini yükseltir. Bunun yanı sıra, bu sayıların artması, nihai ürünün kopma dayanımı, gaz geçirgenliği, camsı geçiş sıcaklığı (T_g) değeri ve farklı polimerler ile karışma direncini yükseltir (Sevinç, 2019).



Şekil 2.3 Akrilonitril bütadien kauçuğun kimyasal yapısı (Erkek, 2007)

Nitril kauçuk, Şekil 1.1’de de görüldüğü üzere, bütadien ve akrilonitril monomerlerinin emülsiyon polimerizasyonu ile elde edilir. Akrilonitril içeriği, %18-50 arasında değişir. İçerisinde bulunan akrilonitril monomer sayesinde polar yapıda olan nitril kauçuk, bu sayede yüksek yakıt ve yağ dayanımına sahip olmaktadır. İçerisinde yer alan akrilonitril miktarı yükseldikçe, camsı geçiş sıcaklığı yükselir, elastikiyet düşer ve mukavemet artar. Doymamış bütadien içeriğinden dolayı nitril kauçuğun oksijen ve ozon dayanımı düşüktür.

NBR elastomerlerin genel özellikleri şunlardır (Erkek, 2007; Sevinç, 2019);

- Özgül ağırlık (gr/cm^3): 1.00
- Çekme dayanımı (MPa): >25
- Sertlik (Shore A): 30-90
- Elastikiyet: Orta
- Yırtılma direnci: orta
- Aşınma direnci: iyi
- Ozon direnci dayanımı: Orta
- Oksidasyon direnci: orta
- Isı direnci iyi
- Düşük sıcaklıktaki esneklik orta
- Kalıcı biçim değişikliği iyi
- Geçirgenlik direnci iyi
- Alev direnci: Kötü
- Asit direnci iyi
- Seyreltimemiş asitlere karşı direnci orta
- Su direnci iyi
- Hidrokarbonlar direnci orta
- O_2 ve sıvı direnci kötü
- Yağlara ve yakıtlara dayanım iyi
- Dielektrik nitelikleri: Kötü

2.2 NANO KOMPOZİTLER

Fazlardan en az birinin 100 nanometre altında boyuta sahip olduğu kompozitler, nanokompozit olarak adlandırılmaktadır (Dalton et al., 2003).

Roma cam üreticilerinin 4. yüzyılda nano boyuttaki metalleri içine alan cam formülize etmeleri, nanokompozit malzemelerin tarihine dayandırılmaktadır ve geleneksel kompozitlerde bulunmayan tasarım özelliklerine sahip olmaları açısından üstün performansları, 21. yüzyılın

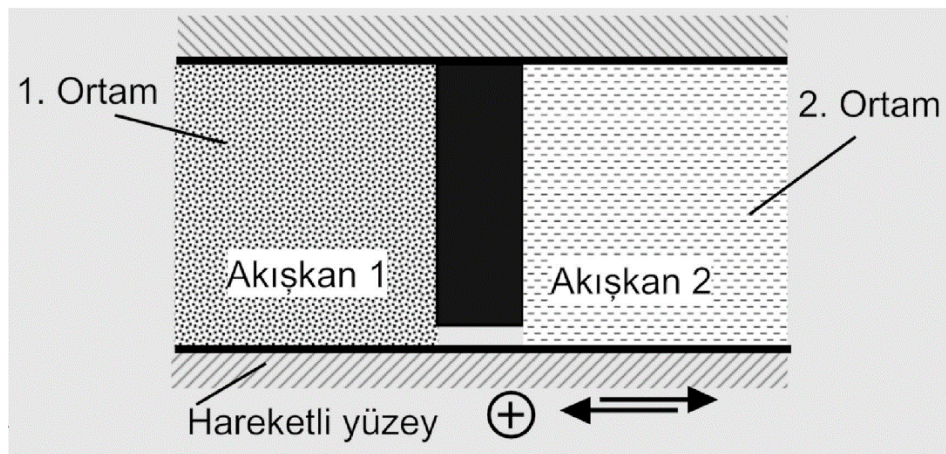
kaynaklarında da doğrulanmıştır (Schmidt et al., 2002; Iijima, 1991). Bununla birlikte, diğer kompozit tiplerine göre hazırlık zorlukları bulunmaktadır.

Nanokompozitler, nadir özellik düzenlemeleri gösteren yüksek performanslı malzemelerdir (Kamigaito, 1991). Nano kompozitler, küçük boyutlarından, geniş yüzey alanlarından ve yüzey alanındaki fazların ilişkilerinden çıkan nadir özellikler içerirler. Karbon nanotüplerin ortaya çıkarılması ve bunların mekanik, termal ve elektriksel özelliklerle ilgili benzersiz karbon nanotüplerin bazılarını içeren kompozitleri formüle etmek için kullanılmaktadır. Şu anda, nano kompozitler çevre dostu olmanın yanı sıra, tüm sanayi bölgeleri için yeni teknoloji ve iş fırsatları sunmaktadır (Giannelis, 1996).

Nadir özellikler gösteren yüksek performanslı malzemeler olan nanokompozitlerin pazarı, yıllık %25 büyüme oranına sahiptir. Ayrıca mühendislik plastikleri ve elastomerlerdeki talepleri hızla artan bu kompozitlerin potansiyelleri o kadar belirgindir ki, ambalajdan biyomedikal uygulamalara kadar çok sayıda alanda kullanılmaktadır. Bu malzemelere olan ihtiyaç, bunların işleme yaklaşımları, yapı, özellikler ve potansiyel uygulama alanları ve bunlar hakkındaki bazı yeni sonuçları vurgulayan çeşitli nanokompozit türleri hakkındaki çalışmalar ve tartışmalar sürmektedir (Park et al., 2010; Din et al., 2019).

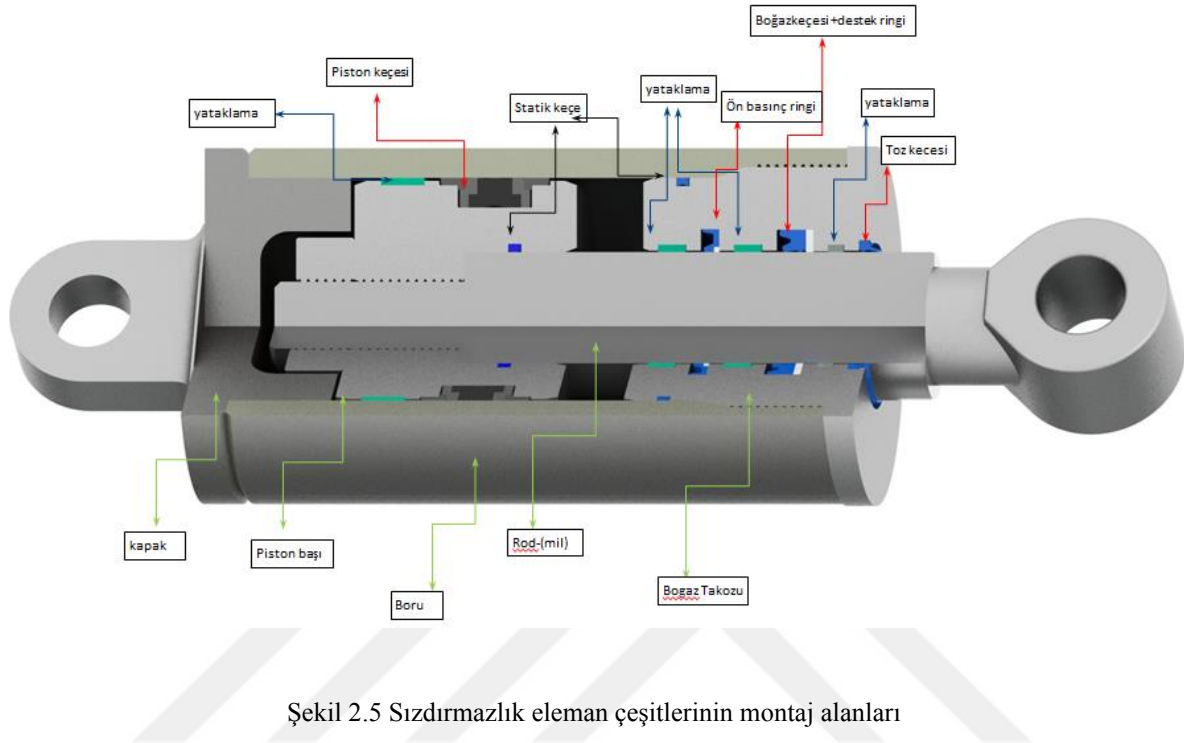
2.3 SIZDIRMAZLIK ELEMANLARI

Ortak sınırı bulunan iki farklı ortamın aralarındaki akışkanın kontrol edilmesine sızdırmazlık problemi denmektedir (Şekil 2.4). Bu problemi gidermek için kullanılan makine elemanlarına sızdırmazlık elemanı denir (Temiz, 2021).



Şekil 2.4 Sızdırmazlık ortamı

Sızdırmazlık elemanları, diğer bir tanımla, makine veya sistemler içerisinde bulunan yağ, su gibi akışkanların dışarı çıkmasını ve dış ortamda bulunan sıvı, toz gibi maddelerin sistem veya makine içerisine girmesini önlemek amacıyla kullanılan endüstriyel ürünler olup makinenin sağlıklı çalışabilmesi için gerekli ve son derece önemlidir (Şekil 2.5).



Şekil 2.5 Sızdırmazlık eleman çeşitlerinin montaj alanları

Dinamik uygulamalarda sistem parçalarının sınır yüzeyi hareketlidir, statik uygulamalarda ise bu tarz bir hareket yoktur. Bu iki farklı uygulama, alanlarının gerekliliği farklı olduğu için sızdırmazlık elemanları, statik sızdırmazlık elemanları ve dinamik sızdırmazlık elemanları olarak iki ana sınıfa ayrılır.

- Statik sızdırmazlık elemanları, hareketsiz olan parçalar arasında sızdırmayı önlemek amacıyla kullanılır.
- Dinamik sızdırmazlık elemanları ise, sistemde birbirine göre hareketli olan parçaların arasında sızdırmayı önlemek için kullanılır.

2.3.1 Statik Sızdırmazlık Elemanları

Statik sızdırmazlık elemanları, statik uygulamalardaki çalışma prensibine göre, basınç ve sıkıştırma oranına bağlı olarak değişen davranış sergileyen elemanlardır. Basınç arttıkça sızdırmazlık elemanlarının yüzeyine olan baskı da artar.

Statik sızdırmazlık elemanlarının üzerine etki eden kuvvetler şunlardır;

- Sıkıştırma kuvveti: Montaj esnasında sızdırmazlık elemanını sıkıştırmak için uygulanan kuvvet,
- Hidrostatik kuvvet: Sistem veya makinenin çalışması esnasında sıkıştırma kuvvetine ters yönde etki eden kuvvet,
- Akışkan kuvveti: Hidrostatik kuvvet de denilen iç basınç nedeniyle meydana gelen ve sızdırmazlık elemanını akmaya zorlayan kuvvet.

2.3.2. Dinamik Sızdırmazlık Elemanları

Keçenin yağ dudağı ile mil arasında görev alan dinamik sızdırmazlık elemanları, birbirine göre hareket eden ve aralarında bir yağ filmi bulunan elemanlardır. Dinamik uygulamalarda çalışan sızdırmazlık elemanları üretilirken keçe dudak çapının, mil çapından bir miktar küçük işlenerek mili sıkması istenir. Oluşan bu sıkılık sayesinde sızdırmazlığı sağlayan çapsal kuvvet oluşmaktadır. Sızıntı yolunun durumu ve konstrüksiyonları gereği radyal ve eksenel kaymalı olarak ikiye ayrılan bu elemanlar, birbirine göre hareket eden iki yüzey arasında sızdırmazlığın sağlanmasında kullanılırlar.

2.3.2.1 Radyal Sızdırmazlık Elemanları

Dönen bir mil ile sabit gövde arasında sızdırmazlığı sağlamak için kullanılan sızdırmazlık elemanları genel olarak yağ keçesi veya radyal dudaklı keçe olarak tanımlanır. Bu elemanlar mil çevresel hızının 8 m/s değerine kadar olan hızlarda kullanılır. Dinamik tipte sızdırmazlık elemanı olarak değerlendirilen bu keçelerin genel olarak çalıştığı iç basınç 0,5 bar civarındadır. Radyal sızdırmazlık elemanları, mil çapı, dönme hızı, keçe malzemesi ve çalışma ortamı gibi çeşitli etkenlere maruz kalır. Bu nedenle bu elemanların seçiminde sızdırmazlığı sağlıklı bir şekilde sağlaması için çalışma basıncı, sıcaklığı, milin çevresel hızı ve temas halinde olabileceği yabancı maddeler gibi etkenler dikkate alınır.

2.3.2.2. Eksenel Sızdırmazlık Elemanları

Mil ve yatak sızdırmazlığında uygulanan sızdırmazlık dudağı eksenel yönde olduğu için dinamik sızdırmazlık eksenel doğrultuda sağlanmaktadır. Aşınmaya dirençli malzemeler kullanılarak üretilen eksenel sızdırmazlık elemanları, kullanılacağı sistemde mile sıkı geçirilerek montajlanır ve bu sayede mil üzerinde kaymadan mille beraber döner. Keçenin dudağının maruz kaldığı basınç çok az olduğu için sürtünme kuvveti ve güç kaybı çok az olur. Bu elemanlar metal parça olmadığından basit, ucuz ve montajları kolaydır. Milde aşınma yaratmazlar. Çalıştıkları yüzeylerin çok düzgün olması zorunlu değildir. Mildeki salgı ve eksen kaçıklığına duyarlı değildir.

2.3.3. Sızdırmazlık Elemanı Seçimi Kriterleri

Sızdırmazlık elemanlarının seçimi, çalışma sistemindeki basınç (yüksek ve düşük basınçlar, basınç dalgalanmaları), sıcaklık (maksimum-minimum sıcaklık), hız (maksimum-minimum hız, frekans, değişken hız, basınçsız veya basınç altında hız), akışkan (sıvı-gaz, asit, baz), akma dayanımı (yüksek basınç, büyük boşluklar), düşük sürtünme (tek etkili sistemler, enerji verimliliği, sıcaklık), montaj şekli (küçük çaplı ürünlerde et kalınlığı yüksek ürünlerin seçimi montajı zorlaştırabilir), strok (yataklama seçimine dikkat edilmelidir) gibi etkenlere bağlıdır (Kastaş Sızdırmazlık Teknolojileri, 2021).

2.3.3.1 Basınç

Sızdırmazlık elemanı seçiminde sisteme etkiyen basınç büyük önem taşımaktadır. Titreşimli sistemler, yüksek basınç ve düşük basınç dalgalanmaları oluşabilen, pik basınçlara maruz kalan sistemler bulunmaktadır.

- Yüksek basınçların olduğu sistemlerde elastomer bir energizer ile oluşturulan ürünler kullanılabilir.
- Şok basınçların fazla olduğu sistemlerde ön basınç ringi kullanılması ana sızdırmazlık elemanın ömrünün uzatılması için faydalı olacaktır.

Çalışma basıncına göre uygun ürünler seçilmelidir.

2.3.3.2 Hız

Yüksek hızlar, sistemde hızlı sıcaklık artışına ve yağ filminin kopmasına neden olabilir. Özellikle basınç altında ve hızlı sistemlerde keçe sıyrıcı dudağının sıcaklığı sistem sıcaklığının üzerine çıkacak ve malzemede hızlı yaşlanmalar olacaktır. Düşük hızlarda ise yüzeye yapışma (stick-slip) olasılığı artar. Bu nedenle ürün seçimi yapılırken maksimum-minimum hız değerleri, ivmelenme ve sabit hızın olup olmadığı sorgulanmalıdır.

2.3.3.3 Sıcaklık

Sıcaklık sızdırmazlık elemanlarının çalışmasında önemli etkiye sahiptir. Özellikle, sızdırmazlık elemanı dayanım sıcaklığına yakın değerlerde uzun süreli sıcaklığa maruz kalması, ürün iç yapısının bozulmasına, malzeme yaşlanmasına, malzemenin sertleşmesine (kemikleşmesine), yüzeylerinde çatlak ve kırıkların oluşmasına neden olabilir. Soğuk ortamlarda (-30 °C ve altı) ise, sızdırmazlık elemanları sertlik (camsı ve kırılabilir yapı oluşabilir) ve elastiklik özelliklerini kaybedebilir. Uygun malzeme seçimi önemlidir. Aksi takdirde kaçaklar yaşanabilir.

2.3.3.4 Akışkan Tipi

Sızdırmazlık elemanlarının çalışma performansını akışkan tipi direkt olarak etkilemektedir. Sızdırmazlık elemanı ve sistem akışkanı arasındaki ilişki ile ilgili olarak; sistemde kullanılan akışkanın türü ne olursa olsun (sıvı ya da gaz) mutlak suretle sızdırmazlık elemanında aşınma, şişme, vb. kimyasal ya da mekanik etkiler bırakmaktadır. Bu sebeple, akışkanın sızdırmazlık elemanı üzerinde neden olduğu etkiler kabul edilebilir sınırlar içinde olmalıdır.

2.3.3.5. Strok

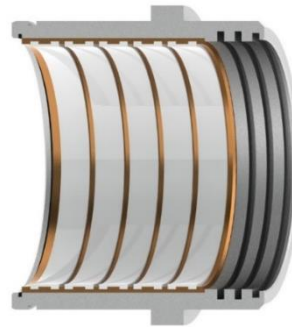
Stroğun uzun olması, mil eğilmesi moment oluşumunun artmasını ve yataklama elemanlarının daha yüksek kuvvetlere maruz kalmasına neden olacaktır. Kısa strok ve yüksek frekans yağ filmi oluşumunda problem olabilir. Yağ filmi oluşmaması, hem sızdırmazlık elemanı hem de çalışma yüzeyinde tahribata neden olabilir. Üzerinde yağ kanalları bulunan ve teflon malzemeye sahip tasarımlar kullanılmalıdır. Tasarımcı, piston ve boğaz takozu boyutlarını belirlerken sistemdeki aksenel yükler (yataklama sayısı ve genişlikleri), basınç değişimleri (ön basınç ringi ihtiyacı), montaj yapılabilecek ergonomi, strok değerlerini göz önünde bulundurmalıdır.

2.3.3.6. Çalışma Pozisyonu (Dik-Açılı-Yatay)

Çalışma pozisyonu ve silindire gelen yükler (kaldırma, itme, presleme gibi), silindirdeki yataklama elemanlarının malzeme, büyüklük ve adet seçiminde etkilidir (Şekil 2.6). Metal yataklamalara göre esneme kabiliyetleri olduğu için, sistem güvenilirlikleri yüksektir. Uzun süre ölçü değerleri bozulmadan çalışabilirler.



(a)

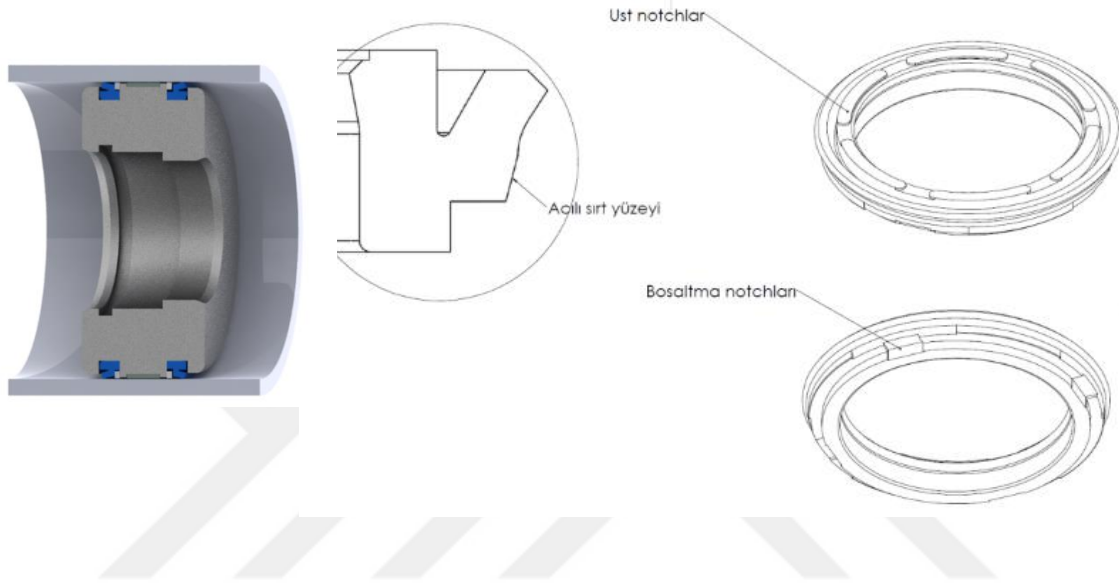


(b)

Şekil 2.6 Dik, açılı ve yatay çalışma pozisyon örnekleri a)Makaslı Lift b) Boru İç Kesit

2.3.3.7. Çift Etkili – Tek Etkili

Sistemin tek etkili veya çift etkili olması, kullanılacak sızdırmazlık elemanlarının da çift veya tek etkili seçimini gerektirmektedir. Aksi takdirde çift etkili bir keçe, tek etkili bir sistemde kullanıldığında, yağ görmeyen ve kuru kuruya çalışan keçenin diğer tarafı aşınmaya ve deformasyona uğrayacaktır. Ayrıca, piston başında çift nutring kullanılacak ise, boşaltmalı tip ürünler kullanılarak oluşabilecek hidrodinamik basınçlar engellenmelidir.



Şekil 2.7 Çift etkili kullanım örneği.

2.3.3.8. Düşük Sürtünme

Özellikle, nutring dudaklı toz keçesi kullanılan sistemlerde ana sızdırmazlık elemanı arkasında hidrodinamik basınç oluşumunu engellemek için relief özelliğine sahip sızdırmazlık elemanı ve boğaz takozu üzerinde boşaltma deliği (relief bore) kullanılmalıdır. Düşük sürtünme istenen sistemlerde (özellikle tek etkili kendi ağırlığıyla kapanabilen silindirler, forklift, lift teleskobik, vb.) sızdırmazlık elemanları seçimi buna göre yapılmalıdır.

2.3.3.9. Boru-Mil-Yüzey Kaplamaları-Et Kalınlıkları

Sistemlerde basınç değerlerine göre boru et kalınlıkları seçilmeli, genleşme değerleri göz önünde bulundurulmalıdır. Mil yüzeylerinin krom kaplı (25-40 mikron) ve sertlik değerlerinin 45-60 HRC arası olması önemlidir. Özellikle kullanılan sızdırmazlık elemanları, katkılı teflon malzemeler ise (cam elyafı, bronz) bu değerler daha da önem kazanmaktadır.

Korozyon görülen sistemlerde gerekli görüldüğünde boru yüzeyleri de krom kaplanabilir.

Tablo 2.1 Mil yüzey toleransları

Silindir	St52 veya daha iyi	H8 - H11
Rod	Ck45 veya daha iyi	f8
Yuva	St veya Gs	Boğaz Keçesi : H10 Piston Keçesi : h10 / h9 Yataklama: H8/h8

2.4 KAÜÇUK KARIŞIMINDA YER ALAN MADDELER

Bir kauçuk karışımından, bitmiş mamülün çalışma ortamına uygun özellikleri barındırması, karışımın uygulanacağı üretim metodu ve makinelere uygun olması ve maliyetinin düşük olması beklenmektedir. Kauçuk karışımı, bitmiş üründen istenilen özelliklerin sağlanabilmesi için, uygun kauçuk (polimer) ve hammaddeler ile katkı maddelerinin seçilebilmesi ve birbirleriyle karıştırılması işlemidir. Bu amaca yönelik olarak, kauçukta istenilen mekanik özellikleri elde edebilmek için, dolgu maddesi, aktivatör, proses yardımcıları, yağlar, yaşlanma önleyiciler ve akseleratör sisteminin belirli oran kullanarak oluşturulmasına reçete veya formül denir (Semaan et al., 2002).

Kauçuk karışımlarında kullanılan maddeler, genel olarak (Annicelli et al., 1990);

1. Elastomerler (doğal ya da sentetik kauçuklar)
2. Dolgu maddeleri (karbon siyahı ve beyaz dolgular)
3. Proses yardımcıları, plastikleştiriciler, yumuşatıcılar ve yapıştırıcılar
4. Yaşlanmaya karşı koruyucular (antioksidant ve antiozonatlar)
5. Güçlendirici pigmentler ve reçineler
6. Akseleratör aktivatörleri ve geciktiriciler
7. Diğer katkılar (şişirici ajanlar, aşındırıcı, kokular ve renklendiriciler) (Annicelli , 1990)

Yukarıda yer alan maddeler, kauçuk karışımında proses özellikleri, son üründen istenen özellikleri ve maliyet kontrolü gibi özellikleri kontrol etmede kullanılırlar.

Bu çalışmada, bu maddelere ek olarak geliştirme işleminin yapılacağı kauçuk karışım formülünde mekanik ve termal özellikleri iyileştirmek için grafit, grafen ve CNT malzemeleri belli bir oranda eklenerek, malzeme oran ve malzeme tipi parametreleri değerlendirilmektedir.

2.4.1. Dolgu Maddeleri

Kauçuk karışımlarına toz halinde katılan çok küçük tane boyutlu kuru maddeler dolgu maddeleri (filler) olarak tanımlanmaktadır. Kauçuk karışımında çok fazla dolgu malzemesi bulunmaktadır. Malzemelerin mekanik dayanımının arttırılması, üretilebilirlik kabiliyetinin arttırılması, reçetelerinin ucuzlatılması ve istenilen durumlarda kauçuk numunelere renk verilmesi amacıyla kullanılmaktadır. Karışım içerisine katılan dolgu maddelerinden güçlendirici türde olanlar, kauçuğun fiziksel ve mekaniksel özelliklerini kuvvetlendirici etkiler yaparken, sadece dolgu maddesi olarak görev yapanlar genellikle formülasyonu ucuzlatmakta ve bazı proses işlemlerinde üretilebilirliği iyileştirici özellikler sağlamaktadır (Erkek, 2007). Bu özellikleri sağlayan dolgu maddeleri renklerine göre beyaz ve siyah dolgu maddeleri olarak ikiye ayrılır (Waddell, and Evans, 1996). Beyaz dolgu maddelerine silika, kalsiyum karbonat, talk, kil gibi dolgular örnek olarak verilebilirken (Kauçuk Derneği Yayınları, 2001), siyah dolgu maddesi ise karbon siyahıdır.

Dolgu maddeleri yapmış olduğu etkiye göre ise üçe ayrılır;

- Aktif dolgu maddeleri
- Yarı aktif dolgu maddeleri
- İnaktif dolgu maddeleri

Aktif dolgu maddeleri: Güçlendirici etkisi olan bu maddelere örnek olarak karbon siyahı ve çöktürülmüş silikalar verilebilir.

Yarı aktif dolgu maddeleri: Kısmen güçlendirici etkisi olan bu maddelere sodyum alüminyum silikat, kalsiyum silikat, talk, kaolin örnek olarak verilebilir.

İnaktif dolgu maddeleri: Güçlendirici etkisi olmayan maddelere örnek olarak kalsiyum karbonat (tebeşir) verilebilir.

Dolgu maddeleri, kopma mukavemetinin, modül değerlerinin, yırtılma ve aşınma direncinin artması için de kullanılır. Kauçuk karışımlarında dolgu maddesi bulunmayan bir NBR reçetesinde kopma mukavemeti 30 kg/cm² civarında iken, karbon siyahı takviyesi ile mukavemet 200 kg/cm²'ye kadar çıkabilmektedir (Kulaç, 2016).

Dolgu maddelerinin karakteristik özellikleri şunlardır;

- Yoğunluk
- Tanecik büyüklüğü

- Yüzey alanı
- Yapı
- Nem
- Kül

Yoğunluk: Kauçuk karışımlarında bulunan katkılara kıyasla, dolgu maddelerinin yoğunluğu daha yüksektir. Bu nedenle, yüksek miktarda dolgu maddesi, bitmiş ürünün yoğunluğunu arttırmaktadır (Kulaç, 2016).

Tane büyüklüğü ve dağılımı: Dolgu maddesinin güçlendirici karakteri üzerinde büyük etkisi olan özellik tane boyutudur. Dolgu maddelerinin tane büyüklüğü 1 ila 5000 nanometre arasındayken malzeme tane boyutu küçüldükçe bitmiş ürünün direnci artmaktadır (Kulaç, 2016).

Yapı: Dolgu malzemelerinde yapı, taneciklerin küresel şekillerinin deformasyonu ile kümeleşmesi şeklinde oluşur. Deformasyon ve kümeleşme ne kadar fazla olursa, yapı da o kadar artar (Kulaç, 2016).

2.4.1.1. Karbon siyahı

Kuvvetlendirici pigment olarak 1904 yılında Mote, Mathews ve diğer bilim insanları tarafından İngiltere’de keşfedilen karbon siyahı (karbon karası), yağ veya gaz gibi bir hidrokarbon yakıtın, sınırlı miktarda yanma havası ile 1320 ila 1540 °C arasındaki sıcaklıklarda reaksiyona sokulmasıyla oluşan bir pigmenttir. Geniş yüzey alanına sahip ve esas olarak karbondan oluşan çok kabarık ince bir tozdur. Kauçuğu güçlendirmek için kullanılmaktadır (Haliç Çevre Laboratuvarı, 2021).

Karbon siyahının en çok tüketildiği sektör %95 oranı ile kauçuk sanayiidir. Bunun dışında geri kalan %5’lik dilimde karbon siyahı plastik, boya maddesi, mürekkep ve adsorban madde olarak kullanılmaktadır. Karbon siyahı, metan gazı, ağır-hafif petrol yağları ve bazı hidrokarbonların az ve kontrollü oksijen ortamında kısmi yanması veya ısıl bozunması sonucu elde edilmektedir. 100-800 AO büyüklüğünde küre şekline benzer parçacıkların birbirine yapışması sonucu elde edilen kümelerdir. Elektron mikroskobu ile ölçümü yapılan tanecik boyutunun 1200-1500 arası olan partikülün 50000-75000 arası ölçekte büyütülmesiyle sağlanmaktadır (Kauçuk Derneği Yayınları, 2001).

Karbon siyahlarında, taneciklerin birbirine eklenerek oluşturduğu uzun zincirler veya üzüm salkımı şekli yapıyı ifade eder. Karbon karalarında bu yapı gaz fazda oluşur (Erkek, 2007). Karbon siyahları; fırın siyahları, kanal siyahları ve termal siyahlar olarak adlandırılan üretim

sisteminin ürünleridir. Orta büyüklükte, tanecik büyüklüğü 18–85 nanometre arasında olan karbon siyahlarının elde edilmesinde kullanılanlar fırın siyahlarıdır. Fırın siyahları, kısıtlı oksijen içeren fırınlarda 1200-1600 °C sıcaklıkta ön ısıtmadan geçen hidrokarbonların yakılması ile elde edilmektedir. pH değerleri 6,5 –10 arasında değişen fırın siyahları, kauçuk sanayiinde kullanılan temel karbon siyahıdır ve karbon siyahı üretiminin % 95’ini oluşturmaktadır (Kauçuk Derneği Yayınları, 2001). Diğer bir adıyla baca siyahı olan kanal siyahları, doğal gazın demir plakalar üzerinde kısıtlı oksijen ile yakılması yöntemi ile elde edilmektedir. Çevreye verdiği kirlilik ve düşük verimli olması nedeniyle sınırlı miktarlarda üretilmektedir. pH değeri yaklaşık 5 civarında olan kanal siyahının tane büyüklükleri 15-40 nanometre arasındadır. Bu tür karbon siyahları suda daha iyi dağıldığından, matbaa mürekkeplerinde ve suda çözünen boya yapımında kullanılmaktadır. Hidrokarbonların ısı tesiri ile bozunması sonucu elde edilen karbon siyahlarına termal siyahlar denmektedir. Orta tane büyüklüğüne sahip karbon siyahı elde edilmesinde kullanılan termal siyahlar, 800-1000 °C’de gerçekleştirilen ekzotermik bozunma sonucu elde edilmektedir. Kanal siyahı yüzeyinde fazla oksijen bulunduğundan yüksek yüzey aktivitesine sahipken, fırın ve termal siyahlarında ise oksijen miktarı düşük olduğu için normal yüzey aktivitelerine sahiptir (Kauçuk Derneği Yayınları, 2001).

Karbon siyahı eklenen ve vulkanize olmuş kauçuğun özellikleri; karbon siyahının tane büyüklüğüne, yapısına, katkı oranına ve elastomer tipine bağlıdır. Tane büyüklüğü küçüldükçe yüzey alanı artar; bu durumda karbon siyahının ilave edildiği kauçuğun kopma dayanımı, aşınma ve yorulma dayanımı artmaktadır. Karbon siyahının tane büyüklüğünün artması, karışımın işlenebilirliğini kolaylaştırırken, fiziksel özelliklerini olumsuz etkilemektedir.

Dolgu malzemeleri içerisinde en önemlisi olan karbon siyahı, kauçuğun hem mekanik özelliklerini artırır, hem de renk verme işlemini gerçekleştirir. Vulkanizasyon işlemi sırasında kauçuk ile karıştırıldığı zaman, kauçuk zincirlerinin bir kısmı kırılır ve kırılan uçlarda radikaller oluşur. Oluşan radikallerin karbon siyahı ile birleşerek karbon-polimer bağı oluşturmaları ile karbon siyahı kauçuğun sertliğini azaltır, vulkanizasyon işleminin hızını artırır, kauçuğun vulkanizasyon öncesi haline dönmesini engeller ve kopma gerçekleşmeden şekil değişikliğinin gerçekleşmesini sağlar (Subramaniam et al., 2011).

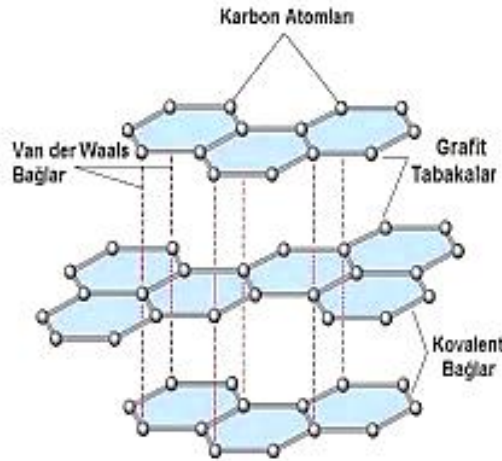
2.4.1.2 Grafit

1742-1786 yılları arasında Scheel tarafından “Karbon Modifikasyonu” olarak tanımlanan grafit, 1789 yılında Werner tarafından verilmiştir. 2 g/cm³ civarı yoğunluklu, yağsı dokulu, yumuşak ve de ince levhalar halinde bükülme gibi özelliklere sahip olan grafit, kül rengindedir (Şekil 2). Grafitin erime derecesi 3927 °C olup oksijenli ortamlarda 600-670 °C’ye, normal hava ortamlarında ise 3500 °C’ye kadar yanmaz. Erime ısısına erişen grafit, katı halden direkt gaz haline geçer ve normal sıcaklıklarda kimyasal bozulmalara karşı dayanım göstermektedir.



Şekil 2.8. Grafit.

Grafit, periyodik tablonun 4A grubunda yer alan bir ametal element olan karbonun (C) allotropudur. Bir karbon minerali olan ve kömür, elmas gibi diğer karbon minerallerinden farklı birçok özelliğe sahip olan grafitin hekzagonal kristal yapısı Şekil 2.9’de gösterilmiştir. Bu yapı, karbon atomlarının üst üste yığılarak geniş ve yassı levhalar oluşturması için iki boyutlu düzlemde birbirine bağlanması ile oluşur. Yapı içerisindeki levhaların birbiri üzerinde kolayca kayması grafitin yağlayıcı özelliğini oluşturmaktadır. Ayrıca, düzlem içerisindeki bağların kuvvetli olup düzlemler arasındaki bağların zayıf olması da grafitin kaygan ve pulsu bir davranış sergilemesine neden olmaktadır.



Şekil 2.9 Grafitin kimyasal yapısı (Çuhadaroğlu, 2018).

Gelişen teknoloji ve giderek artan talepler karşısında önemi artan bazı hammaddeler için yapılan çalışmalardan bazıları, Avrupa Birliği tarafından yapılan “AB için Kritik Hammaddeler” ve Britanya Jeolojik Araştırmalar Konseyi tarafından hazırlanan “Risk Listeleri”dir. Bu çalışmada önemli hammaddeler içerisinde yer alan grafitin kritik olarak değerlendirilmesinin nedenleri şunlardır:

- Mükemmel bir ısı iletkeni olması,
- Bakırdan 20 kat daha iyi elektrik iletkenliğine sahip olması,
- Isıya karşı iyi dayanım göstermesi.

Grafit, doğal ve sentetik olmak üzere iki sınıfa ayrılmaktadır.

2.4.1.2.1 Doğal Grafit

Doğal grafitler kendi içerisinde amorf, pulsu ve kristal grafit olmak üzere de üçe ayrılmaktadırlar. Kömür yataklarındaki yüksek basınç ve sıcaklık altında oluşan amorf grafit, mikrokristalin taneleri içermektedir. Toprağımsı görünümüne sahip olan bu tip grafit, en fazla Meksika, Çin ve Güney Kore’de üretilmektedir. Diğer doğal grafitlerden olan pulsu ve kristal grafit; bulunma yer ve miktarına göre adlandırılmaktadır. Tabakalar halinde metamorfik kayalar içerisinde yığılan organik maddelerin yüksek sıcaklık ve basınç altında değişikliğe uğramasıyla, pulsu grafit oluşmaktadır. Damar tipi grafit ise, genellikle metamorfik kayalardaki çatlak ve boşluklarda organik maddelerin birikmesi ile meydana gelmektedir.

2.4.1.2.2 Sentetik Grafit

Sentetik grafit, petrol, kok ve antrasitin elektrik ocaklarında 4000 °C’ye ısıtılmasıyla elde edilir ve genelde doğal grafitten farklı özelliklere sahiptir. Sentetik grafitlerin Na_2SO_4 ile reaksiyona girmesi, doğal grafitten farklı olmasına neden olmaktadır.

Gelişen teknoloji ile artan bir endüstriyel hammadde haline gelen grafit, organik maddelerin metamorfizması ile oluşmaktadır. Organik maddelerin farklı basınç ve sıcaklıklarda değişime uğraması sonucunda, farklı özelliklere sahip grafitleşmeler meydana gelmektedir. (Chelgani, 2016).

Reflektans ölçümü ve H/C oranları gibi mikroskobik çalışmalarla, üretim yapılan cevherlerin grafitleşme durumları saptanabilmektedir. Günümüzde kullanılan grafitin reflektans değerleri; % 6,5’den büyük, H/C oranı; 0,15’ten küçüktür. Reflektans değeri ve H/C oranına göre yapılan sınıflandırma, Tablo 2.2’de gösterilmektedir (Kwiecińska ve Petersen, 2004).

Tablo 2.2 Grafitleşme Durumu; Reflektans ve H/C değeri (Kwiecińska ve Petersen, 2004)

Fazlar	d002 (Å)	% R _{max}	H/C
Grafit (G)	3,354 – 3,37	> 9,0	0,005-
SemiGrafit (SG)	3,37 – 3,38	9,0 - 6,5	0,1

4.1.2.3 Grafit Kullanım Alanları

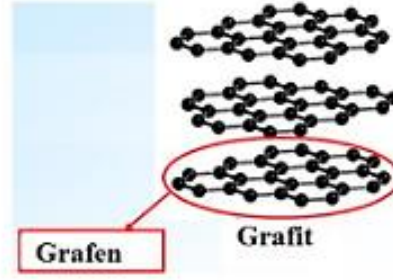
Sahip olduğu özellikler nedeniyle grafitin kullanım alanları oldukça geniştir. Grafitin en saf hali, elektrik bataryalarından kuru pillere, elektrik cihazlarındaki elektrotlardan atomik grafit olarak reaktörlere kadar çeşitli alanlarda kullanılmaktadır. Daha az saflıkta (daha düşük karbon içerikli olan grafitler ise refrakter kaplama ve macun yapımı, gres yağları gibi birçok alanda kullanılabilmektedir (Graphite One Resource, 2015; Urcun, 2008).

Ateşe ve asitlere karşı gösterdiği üstün dayanım nedeniyle grafit, döküm ve refrakter sanayiinde, laboratuvar malzemeleri imalinde ve ateşe dayanıklı boyalarda kullanılmaktadır. Grafitin yumuşak yapıya sahip olma özelliği kurşun kalem yapımı ve hareketli metal aksamaların yağlanması işlerinde kullanımını sağlamaktadır (Toprak, 2006; Ergin, 2014; Karabacak Maden).

Grafit iyi bir elektrik iletkeni olduğu için, elektrod, elektronik aletlerin motor fırçaları ve pil çubukları imalinde kullanılmaktadır. Tüm bunlara ek olarak grafit, araba balata ve lastiklerinde, motor yağlarında katkı malzemesi olarak kullanılmaktadır. Pota gibi şekillendirilmiş refrakterlerin yapımında sağladığı daha üstün özellikleri nedeni ile tercih edilen pul şeklindeki grafit türü hariç, kullanım alanına göre grafitin şekli belirtilmez (Uysal, 2012).

2.4.1.3 Grafen

Ana kaynaklarından biri olan grafitin düzlemsel yapısına grafen denmektedir (Tufan ve Batar, 2015). Karbon esaslı bir malzeme olup bir atom kalınlığında, bal peteği şeklinde örgülü yapıya sahip olan grafenin bu düzlemsel yapısı, Şekil 4'te gösterilmiştir. Grafen, kovalent bağa sahip olup bu bağ ile birbirlerine bağlı olan atomların mükemmel diziliminin sağladığı üstün özelliklere sahip nanomalzeme olarak da tanımlanmaktadır (Bedeloğlu ve Taş, 2016). Yapısında bulunan karbonlar arasında bağın uzunluğu 0,142 nm'dir (Bedeloğlu ve Taş, 2016).



Şekil 2.10. Grafitin düzlemsel yapısı; Grafen (Yılmaz, 2014)

Grafen yapısındaki atomlar, aralarından en küçük atom olan helyumun bile geçemediği sıkı bir dizilime sahiptir (Çuhadaroğlu ve Kara, 2018). En hafif maddelerden biri olan grafen, çelikten 300 kat sağlam ve en iyi ısı iletkenidir. Süper ince, hafif ve sağlam olan grafen bu üstün özelliklerin yanı sıra süper esnekliğe sahip olup değişik formlara sahip maddelerin yüzeyine kolay bir şekilde kaplanabilmektedir. Tüm bu özelliklerinden dolayı, bilim dünyasında heyecan verici bulunmuş ve 2010 yılında Hollandalı Andre Geim ve Rus kökenli İngiliz vatandaşı Konstantin Novoselov'a nobel fizik ödülünü kazandırmıştır (Bedeloğlu ve Taş, 2016). Mucize malzeme olarak da bilinen ve Nobel ödülüyle tüm dikkatleri üzerine çeken grafen, tamamen altıgen hücre yapılarından oluşur (Çuhadaroğlu ve Kara, 2018). Grafenin bazı üstün fiziksel ve mekanik özellikleri Tablo 2.3'de verilmiştir.

Tablo 2.3. Grafenin mekanik ve fiziksel özellikleri (Pul, 2019)

Özellikler	Değerler
Çekme Dayanımı	130 GPa
Elastisite Modülü	~1100 GPa
Termal İletkenlik	$5.3 \times 10^3 \text{ Wm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
Erime Noktası	3000°C
Isıl Genleşme Katsayısı	$-6 \times 10^{-4} / \text{K}$
Özgül Yüzey Alanı	$2630 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$
Elektron Mobilitesi	$200000 \text{ cm}^2 / (\text{V s})$
İletkenlik	>95% 2nm film kalınlığında >70% 10 nm film kalınlığında

Grafenin sahip olduğu üstün mekanik, elektriksel ve termal özellikler nedeniyle birçok uygulama alanı bulmaktadır. Başlıca kullanım alanları; elektrikli araç teknolojileri, transparan elektrotlar, alan etkili transistörler, sensörler, temiz enerji cihazları, kurşun geçirmez çelik yelek üretimi, nanokompozitler ve organik fotovoltaiik cihazlar olarak sayılabilir (Bedeloğlu ve Taş, 2016). Ayrıca grafenin takviye olarak kullanıldığı metal kompozitlerde meydana gelen olağanüstü mekanik özellikler nedeniyle elektrikli araç teknolojileri, uçak ve otomobil sanayiinde kullanılması planlanmaktadır (Çuhadaroğlu ve Kara, 2018).

2.4.1.4 Karbon Nanotüp (KNT)

Richard Smalley tarafından 1985 yılında bulunan nanotüp, altmışlı gruplar halinde birbirlerine bağlanan karbon atomlarının oluşturduğu küresel moleküllere kobalt veya nikel atomu eklenerek şekil değiştirilmesi, kimyasal olarak kararlı ve duvar kalınlığı bir nanometre boyutlu yapıya dönüşmesidir.

1990'lı yılların başında üstün özelliklere sahip olduğunun farkedilmesi ile birlikte çok fazla araştırmalara konu olan karbon nanotüp, grafen düzlemi olarak adlandırılan örülü yapının bir silindir gibi sarılması ve uçlarının küresel bir silindir kapağı şeklinde kapatılmasıyla oluşturulmaktadır.

Nanotüp, koltuk tipi, zikzak tipi ve chiral tipi nanotüp olmak üzere üç şekilde oluşum göstermektedir. Birden fazla üst üste sarım yapılarak oluşturulan çok katmanlı nanotüp yapılar mukavemet artışı sağlamaktadır.

Karbon nanotüplerin (KNT) en önemli özellikleri, çok hafif olması, yüksek elastiklik modülüne sahip olması ve bilinen en dayanıklı fiber olması ihtimalleridir. Yapılan bazı çalışmalar, çok cidarlı KNT'lerin 1 - 1,8 TPa arasında elastiklik modülüne ve TEM-esaslı çekme ve eğme testleriyle de 0,8 - 150 GPa arasında çekme dayanımına sahip olduğunu göstermektedir (Pul,2019). Buna ek olarak, çok duvarlı KNT'lerin çekme dayanımlarının tek duvarlılardan daha düşük olduğu ve bunun temel sebebi, her bir nanotüp katmanı sürtünmesize yakın kinetik özelliğe sahip olduğu için, katmanların birbiri üzerinden kayarak sıyrılması olarak bilinmektedir.

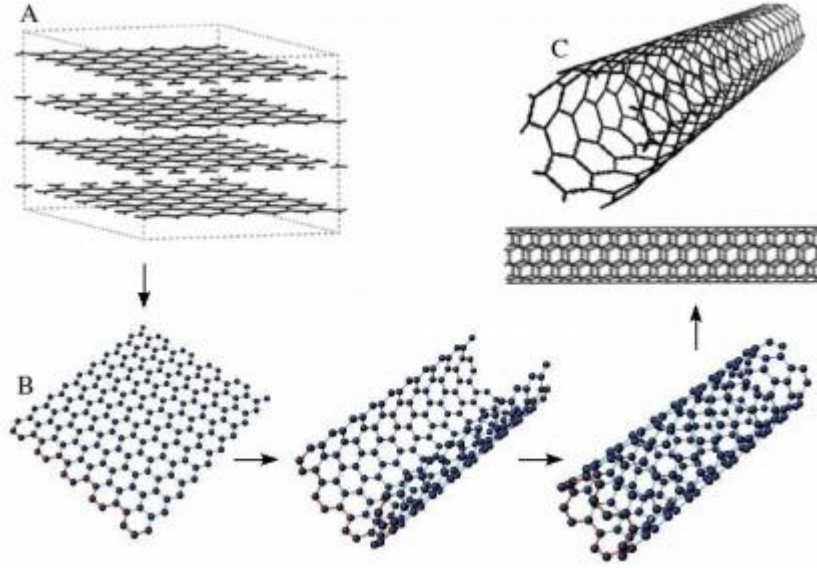
Yapılan bir başka çalışmada, tek duvarlı karbon nanotüplerin dış yüzeylerinde taşıdığı yüklerin oluşturduğu gerilme-gerinim eğrilerinden kırılma dayanımının 13-52 GPa arasında olduğu belirlenmiştir (Yu et al., 2000). Aynı yöntemle gerçekleştirilen çalışmada ise çok duvarlı KNT'lerin 11-63 GPa arasında çekme dayanımına ve 0,27 - 0,95 TPa mertebesinde elastiklik modülüne sahip olduğu belirlenmiştir. Bu özelliklerle beraber yoğunluk da göz önünde bulundurulduğunda, KNT'lerin çelikten çok daha yüksek dayanıma sahip olduğu, yani bilinen en dayanıklı malzemelerden biri olduğu söylenmektedir. Tek duvarlı ve çok duvarlı karbon nanotüplerin bazı teknik özellikleri, Tablo 2.4'te verilmiştir.

Tablo 2.4. Tek ve çok duvarlı KNT'lerin karşılaştırmalı teknik özellikleri (Pul,2019)

Özellikler	Tek Duvarlı Karbon Nano Tüp	Çok Duvarlı Karbon Nano Tüp
Özgül Ağırlık	0,8 g/cm ³	1.8 g/cm ³
Elastik Modülü	~ 1 TPa	~ 0,3 - 1 TPa
Mukavemet	50 – 500 GPa	10 – 60 GPa
Direnç	5 – 50 $\mu\Omega\text{cm}$	5 – 50 $\mu\Omega\text{cm}$
Termal İletkenlik	3000 Wm ⁻¹ K ⁻¹	3000 Wm ⁻¹ K ⁻¹
Termal kararlılık	>700 °C (hava) 2800 °C (vakum)	>700oC (hava) 2800oC (vakum)
Özgül Yüzey Alanı	~ 400 – 900 m ² /g	~ 200 – 400 m ² /g

Karbon nanotüplerin elektriksel özelliklerini etkileyen ve değiştiren unsurlar, barındırdığı grafen ve nanotüplerin çeşitleri yani atomların diziliş şekilleridir. Örnek olarak, tüm koltuk tipi nanotüpler iletkenlerdir. Konu ile ilgili hem deneysel, hem de teorik birçok nanoteknolojik çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Yapılan teorik çalışmalar, iletken nanotüplerin elektrik gerilim yoğunluklarının, gümüş ya da bakır gibi metallere kıyasla, 1000 kat daha fazla olduğunu öne sürmektedir (Seunghun and Myung, 2007). Bu teoriden yola çıkarak NASA, Rice Üniversitesi'ne KNT'lerden oluşan bir enerji iletim kablosu yaptırmakta ve bu kablunun bakır kablodan 10 kat daha iyi iletim sağlamasını beklemektedir (Pul,2019). Bu kabloların üretimi, özel olarak tasarlanacak bir reaktöre nanotüp kaynağı yerleştirildikten sonra, karbon monoksit kullanımı ile birlikte CNT'lerin meydana gelmesinin veya büyümesinin sağlanması ve böylece uzayan CNT'lerin sarılarak kuantum kablo haline getirilmesi şeklinde planlanmaktadır. Bu çalışmadaki amaç, uzay mekiğinin kablolardan kaynaklı ağırlığını ortadan kaldırmaktır.

Günümüzde, daha ekonomik, hafif ve gelişmiş mekanik özelliklere sahip olduğu için araştırmaları hız kazanan KNTler, savunma sanayi, tıp, otomotiv, enerji, altyapı, denizcilik, havacılık, ulaştırma gibi çeşitli sektörlerde giderek artan uygulama alanlarında kullanılmaktadır.



Şekil 2.11 Karbon Dizimleri; A) grafit, B) grafen levha ve C) karbon nanotüp (Pul,2019)

2.4.1.5 Diğer

Güçlendirici pigmentler ve reçineler, kauçuk karışımı içerisinde karbon siyahı dışında kullanılan dolgu maddeleri olup, farklı renk isteği ve maliyeti düşürücü özellikleri nedenleri ile kullanılmaktadır. Mineral dolgu maddeleri olarak da adlandırılan bu maddeler, güçlendirici etkisi olanlar, kısmen güçlendirici etkisi olanlar ve güçlendirici etkisi olmayanlar olarak üçe ayrılırlar.

Çöktürülmüş silikaların örnek olarak verilebileceği güçlendirici etkili pigmentler, karbon siyahı kadar küçük tanecik boyutuna ve yüksek yüzey aktivitesine sahiptir. Küçük tanecik boyutu toplam yüzey alanının artmasına ve böylece kopma, aşınma ve yırtılma dayanımının artmasına neden olan güçlendirici etki yapmaktadır. Yüksek yüzey aktivitesine sahip olması, polar özelliğe neden olup vulkanizasyon esnasında diğer bileşiklerin yüzeyleri absorbe etmesini ve bu sayede vulkanizasyon reaksiyonunun yavaşlatılmasını sağlamaktadır (Ergüler, 2011).

Kısmen güçlendirici etkili dolgu malzemesine örnek olarak verilen sodyum alüminyum silikat ve kaolin, kaolinden türetilmiş dolgu maddeleri olup kaoline göre daha ince tanelidir. İnce taneli yapısı, kauçukta daha fazla güçlendirme etkisi yapmasının yanı sıra, kolay karışabilme özelliği, iyi yırtılma mukavemeti ve elastikiyet özelliklerini sağlamaktadır. Kaolin, karbon siyahı dışında en çok kullanılan kısmen güçlendirici dolgu maddesidir (Ergüler, 2011).

2.4.2 Proses Yardımcıları ve Yumuşatıcılar

Kauçuk karışım üretimi, hammaddenin depolanmasından nihai ürün oluşumuna kadar bir dizi işlemi gerektirmektedir. Her bir üretim kapasitesinde yaşanan zorlukları gidermek amacıyla, genellikle düşük ve yüksek viskoziteli sıvılar ve nadiren katı formda bulunan proses yardımcıları kullanılmaktadır. Bu maddelerin işlevleri, yumuşatıcılara benzemesine karşın düşük oranda katılmaları ve fiziksel özellikleri çok etkilememeleri sebebiyle, farklılık göstermektedir. Proses yardımcıları olarak kullanılan maddelerden bazıları şunlardır:

- Dağıtıcılar (dispersantlar),
- Akışkanlık artırıcı maddeler,
- Mastikasyon yardımcı maddeler (peptizerler),
- Yapışkanlık artırıcılar,
- Homojene edici maddeler,
- Kauçuk bağlı kimyasallar,
- Kalıp ayırıcılar,
- Özel amaçlı sentetik yumuşatıcılar (Erkek, 2007).

%90'ı petrolden elde edilen proses yardımcıları, polimer çeşidi, dolgu maddesi çeşidi ve miktarlarına bağlı olarak karışımlarda 1 – 100 phr arasında kullanılabilir.

Yumuşatıcılar, kauçuk karışımlarında dolgu maddelerinden sonra en çok kullanılan malzeme olduğu için, karışımın önemli bir kısmını oluşturmaktadır. Kauçuk karışımına işlem kolaylaştırma göreviyle dâhil olan yumuşatıcılar, prosesin çeşitli kademelerinde yer almaktadır. Yumuşatıcı maddeler, dolgu maddelerini ıslatarak karıştırma işlemi esnasında oluşan sürtünmeleri azaltması sebebiyle, mekanik aşınmaları önemli ölçüde azaltmış olur. Diğer bir kullanım nedeni ise, karıştırma esnasında karışımın viskozitesini düşürüp enerji tasarrufu sağlamış olur. Öte yandan, karışım içerisinde dolgu maddeleri ve diğer kimyasalların kolay dağılımını sağlayarak homojen bir biçimde karışmış olmasını sağlamaktadır. Prosesin kolaylaştırıcılığını sağlayan diğer önemli bir özelliği ise karışım akışkanlığını arttırmasıdır. Karışımın yapışkanlığını azaltması, karıştırma ısının düşük olmasını sağlaması ve böylece ön vulkanizasyon tehlikesini azaltması, bu maddelerin sağladığı diğer faydalardır. Bunların dışında bu maddeler, karışım maliyetini düşürmek ve sertlik, uzama, elastikiyet ve düşük sıcaklık gibi fiziksel özellikleri değiştirmek için de yaygın olarak kullanılmaktadır (Erkek, 2007).

2.4.3 Yaşlanma Önleyiciler

Elastomer malzemeler, tasarım özelliklerine bağlı olarak, kullanım ömürleri boyunca kalıcı değişikliklere maruz kalarak bozulmaya uğrarlar. Yaşlanma olarak adlandırılan bu bozulmanın sebebi, çapraz bağlanma ya da oksijen içeren fonksiyonel grup oluşumudur (Ergüler, 2011). Elastomer malzemelerde, ozon, oksijen, sıcaklık, güneş ışını, yüksek enerjili radyasyon, yüksek nem veya mekanik gerilimin yol açtığı serbest radikal zincir reaksiyonu olan yaşlanma, mekanik özelliklerde ve yüzey görünümünde bazı kalıcı hasarlara neden olmaktadır (Fredric, 1978).

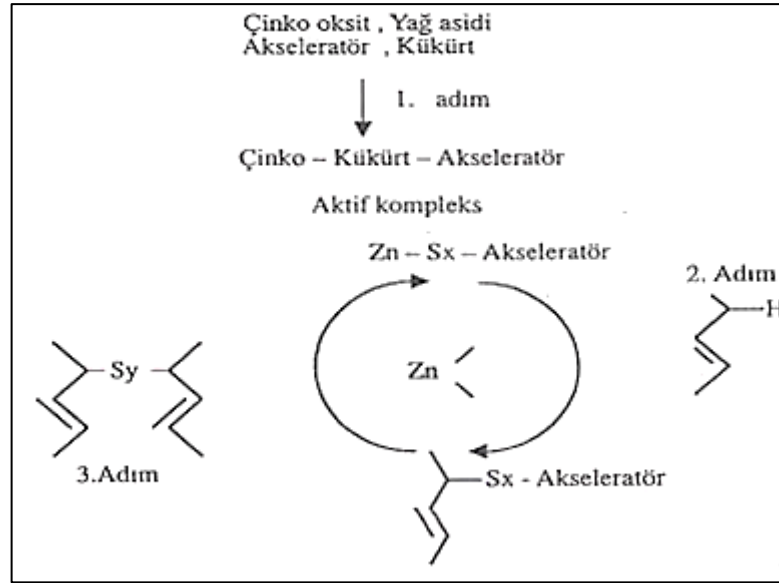
Polimer malzemelerdeki doymamışlık oranındaki artış, yaşlanmaya karşı hassasiyeti de artırır. Çünkü polimerlerdeki çift bağların, oksijen, ozon ve diğer reaktif maddelere karşı hassas olması, özellikle oksijenin bu bağları parçalamasına neden olmaktadır. Buna ek olarak, bu bağların kükürt ile reaksiyonu ise sertleşmeye neden olmaktadır. Sentetik kauçuklarda meydana gelen polimerizasyon veya moleküller arası çapraz bağlanma, kauçuğun sertleşmesine ve kırılmasına neden olabilir. Oksijenin olmadığı ortamlarda bile yüksek sıcaklık, çapraz bağların termal olarak parçalanması, moleküller arası ve moleküllerin kendi içinde çapraz bağlanması veya çapraz bağların yer değiştirmesine neden olarak, çeşitli bozulmalara yol açabilmektedir. Sentetik kauçukta bozulmaya neden olan diğer bir faktör olan güneş ışığı ise, oksijenin etkisini artırarak kauçuk üzerinde bir film oluşumuna ve düzensiz bir şekilde birbiriyle birleşen olukların oluşmasına neden olmaktadır (Savran, 2001).

Kauçuk karışımında meydana gelecek yaşlanmaları, bozulmaları önlemek amacıyla yaşlanma önleyici olan antioksidanlar kullanılmaktadır. Karışımında yaşlanma önleyiciler, genellikle 1 – 4 phr arasında kullanılır. Ayrıca, antioksidan ve antiozonantlar, ozon ve oksijen kaynaklı çatlak oluşumunu engellemek için elastomerlere ilave edilmektedir (Kulaç, 2016).

2.4.4 Akseleratör aktivatörleri ve geciktiriciler

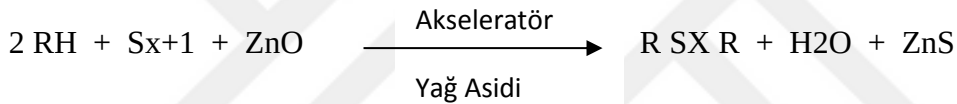
Elastomer malzemeler, vulkanizasyon işlemi için hızlandırıcı (akseleratör) olarak adlandırılan organik maddelere ihtiyaç duymaktadır. Akseleratör, vulkanizasyon işlemini hızlandıran ve mamülün fiziksel özelliklerini olumlu ölçüde etkileyen maddelerdir. Bu maddelerin işlevlerini tam olarak yerine getirebilmeleri için gerek duyulan, yani hızlandırıcı aktivasyonunu sağlayan maddelere, aktivatör denir.

Çinko oksit en sık kullanılan aktivatördür. Kauçuk karışımına genellikle 2-10 phr arasındaki oranla katılır. Genellikle 5 phr oranında kullanılan ve yüksek derecede aktive etme özelliğine sahip bir aktivatör olan çinko oksit, kauçuk karışımında ilk zamanlarda dolgu maddesi olarak kullanılmıştır. Fakat daha sonra karışımındaki etkisi keşfedilince aktivatör olarak önem kazanmış ve kullanılmıştır. Aktivasyonun önemli bir parçasını oluşturan stearik asit, çinko oksitin kauçuk karışımı içerisinde çözünürlüğünü arttırmak amacıyla kullanılmaktadır. Çinko oksitin vulkanizasyon sistemi içerisindeki akışı, Şekil..’deki şemada gösterilmektedir.



Şekil 2.12 Vulkanizasyon sistemindeki çinko oksit aktifliği (Savran 2001).

Şemada gösterilen aktifliğin reaksiyon denklemi:



RH : Kauçuk hidrokarbon

R SX R : Kükürt ile çapraz bağlanmış kauçuk hidrokarbon

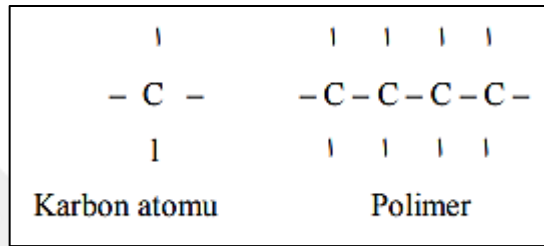
Reaksiyon, sülfürleşme olarak adlandırılmış olup akseleratör, kükürt ve çinko oksit tarafından sağlanmaktadır.

Akseleratörler ile beraber kullanılan kükürtün kauçuk üzerindeki temel etkileri aşağıdaki gibi sıralanmaktadır:

- Aktivatör madde olan kükürtle birlikte kullanıldığında, çapraz bağlanma reaksiyonunu hızlandırarak kısa pişme zamanları oluşmasını sağlamaktadır.
- Karışım içerisinde birden fazla hızlandırıcı kullanıldığında, birbirlerini kuvvetlendiren bir etki oluşturur. Bu durum, farklı hızlandırıcı konfigürasyon ve oranlarının ayarlanması ile vulkanizasyon başlangıcı ve devamı için iyileştirme yapabilmeye sevk eder.
- Kükürt oranının düşük kullanımı vulkanizasyon işlemlerinde kauçuk mamülün ısı dayanımı, dinamik özellikleri ve yaşlanma özelliklerinde iyileşmeler sağlanmasına olanaklar sunmaktadır.

2.5 VULKANİZASYON

Kauçuk bir dizi katkı maddeleri ile karıştırıldığında, plastik özelliklere sahip olmaktadır. Herhangi bir dış kuvvete maruz kaldığı zaman deforme olur ve bulunduğu kabın şeklini alarak eski şekline doğru bir toparlanma davranışı göstermez. Bu durumu daha derinlemesine incelemek için Şekil 2.13’de oluşturulan ip modeline bakıldığında, kauçuk bu ip modelinin binlercesinin, milyonlarcasının bir arada bulunduğu bir yapıya sahiptir. Bu yapıya dolgu maddeleri eklendiğinde, bu dolgu tanecikler kauçuk molekülleri içerisine homojen biçimde dağılıp yapıya düğümlenerek ve böylece kauçuk yapısı daha dirençli bir hale gelerek çiğ hamur mukavemeti, green strength, olarak adlandırılan bir çiğlik kuvveti oluşmasına sebep olur. Bu durum, hamurun çiğ ve plastik olduğu durumda bile mukavemeti arttırmıştır (Erkek, 2007).

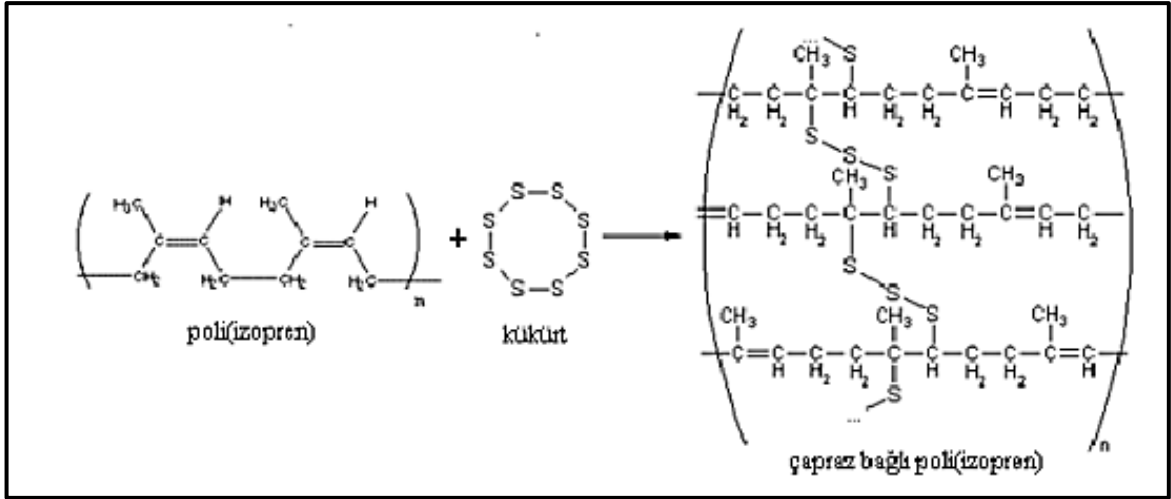


Şekil 2.13 Karbon atomu ve polimer dizilimi (Erkek, 2007).

Kauçuk hamuru plastik halden elastik hale dönüştürmek için, hamurun ısıtılarak bir enerji yüküne maruz bırakılması ve bu çok yönlü yükler sonucunda polimerin birbirine bağlanması gerekmektedir. Elastik hale getirilen yapı, üzerine uygulanan yük ortadan kalktığı zaman, eski haline dönmeye çalışır. Biçim alması ve geniş bir sıcaklık aralığında dayanıklılık göstermesi ve elastik hale dönüşmesi için ham kauçuğun kükürtle birleştirilmesi işlemi, vulkanizasyon olarak adlandırılır. Vulkanizasyon, uzun yer değiştirme enerjisine sahip moleküllerin, çapraz bağlar ile birbirine bağlanması sonucunda meydana gelen ağ örgüsü sayesinde, yer değiştirmeyen bir yapının elde edilmesidir (Erkek, 2007).

1839’da Charles Goodyear tarafından keşfedilen bir kimyasal-teknik yöntem olan vulkanizasyon, kauçuğun ya da kauçuk benzeri polimerlerin, kükürt veya diğer eşdeğer kükürtleyicilerin ilavesi sayesinde, daha dayanıklı malzemelere dönüştürülmesi işlemidir (Wikipedia, 2021).

Kükürt, en yaygın vulkanizasyon ajanlarından biri olup doymamış karbon bağları ($=C=$) ve alilik hidrojen bağları içeren elastomerler ile çapraz bağ yapar. BR, SBR, NR ve IR (Poliizopren kauçuk), genel amaçlı kullanılan dien elastomerleridir (Gent, 2011). Kükürt vulkanizasyon mekanizması, Şekil 2.14’te verilmiştir.



Şekil 2.14 Kükürt vulkanizasyon mekanizması (Yavuz Erkek, 2018).

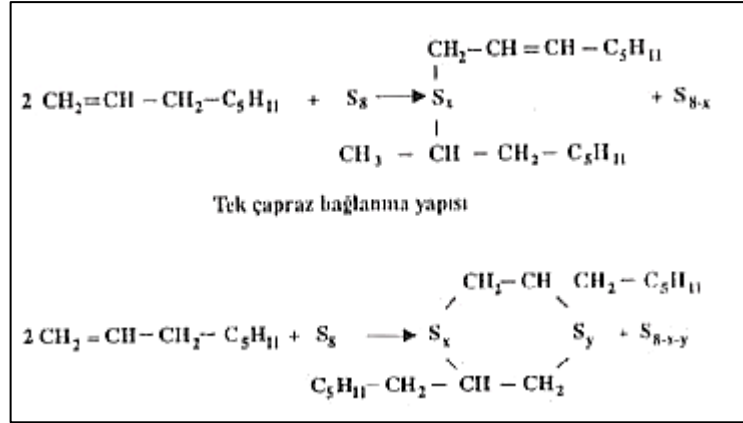
Her kauçuk karışımında bütün katkı maddelerinin kullanımı zorunlu olmamasına karşın, kauçuk ile vulkanizasyon sistemini oluşturan katkı maddelerinin karışıma eklenmesi gerekmektedir. Vulkanizasyonun kauçuk karışımına olan katkısı şu şekildedir (Erkek, 2007):

- Yumuşak bir yapıya sahipken sert yapıya dönmesi,
- Yapışkan olmayan yapıya dönüşmesi,
- Yüksek mukavemet,
- Vulkanizasyon işleminden önce yüksek olan kalıcı deformasyonu düşürmesi,
- Çözünür bir yapıya sahipken çözünmez ya da az çözünür yapıya dönüşmesi,
- Isıya olan direnci arttırması,
- Termoplastik özellikten elastik özelliklere büründürmesi.

2.5.1. Vulkanizasyon Mekanizması

Vulkanizasyonu sağlayan maddenin miktarı, aktivitesi ve reaksiyon zamanı, polimerlerin çapraz bağlanma özelliğini etkilemektedir. Diğer bir deyişle çapraz bağlanma özelliği, vulkanizasyon derecesi ve çapraz bağlanma yoğunluğu olarak ifade edilmektedir.

Kükürt vulkanizasyonunda, özellikle kullanılan hızlandırıcı olmak üzere diğer katkı maddelerinin cins ve miktarına bağlı olarak çapraz bağlanma şekilleri meydana gelmektedir. Kauçuğun özelliklerini, çapraz bağlanma şekli ve yoğunluğu en çok etkilemektedir.



Şekil 2.15 Vulkanizasyon mekanizması (Savran, 2001).

Kükürt ile polimer zincirleri arasında meydana gelen çapraz bağlanma reaksiyonu vulkanizasyon olarak adlandırmakta ve R-SX-R tipinde bir bağ yapısı oluşturmaktadır.

R= Kauçuk hidrokarbon,

x= Pozitif tam sayı olan bu ifade çapraz bağdaki kükürt atomu sayısını belirtmektedir.

Ortalama x değeri, kullanılan hızlandırıcı tipi ve miktarına bağlı olarak değişmektedir.

Kauçuğun kalıcı deformasyona direnci, baskı altında kalıcı deformasyona karşı direnci, iyi ısı stabilitesi ve reversiyon dayanımı gibi özellikleri bağlamında en iyi sonuç çapraz bağlanmalar (C-C) veya (C-S-C) şeklinde, kısa çapraz bağlanmalar neticesinde elde edilmektedir. Bu bağlanmalar tanım olarak:

- C-C; peroksitle yapılan vulkanizasyon sistemidir. C-C çapraz bağlanma şeklidir.
- C-S-C; etkili vulkanizasyon sistemi (EV), düşük kükürt ile veya kükürt olmaksızın kükürt vericilerle sağlanan, mono sülfür veya disülfür çapraz bağlanma şeklidir.

Kauçuk karışımında kopma mukavemeti, aşınma dayanımı ve yorulma dayanımını arttıran en iyi sonuçlar (C – SX- C) şeklinde uzun çapraz bağlanmalar ile elde edilmektedir. C-SX-C konvansiyonel sistem veya polisülfür vulkanizasyon sistemidir (Erkek, 2007).

2.5.2. Vulkanizasyon Teknikleri

Yüksek sıcaklık ve basınç altında değişik teknikler kullanılarak gerçekleştirilen vulkanizasyon işlemi için uygulanan en önemli metotlar şunlardır (Erkek, 2007):

1. Pres vulkanizasyon
2. Açık vulkanizasyon
3. Sürekli vulkanizasyon
4. Soğuk vulkanizasyon

2.5.2.1. Pres Vulkanizasyon

Pres vulkanizasyon metodu, ısı ve basınç destekli kalıplar aracılığıyla gerçekleştirilmektedir. Bu sistemdeki hidrolik basınç ile ayrılabilen iki veya daha fazla sayıda olan plakalar, buhar ya da elektrikle ısıtılır. Isıtılmış plakalar arasında kalan kauçuk parçası basınç altında ve değişik kalıplarda vulkanize edilmektedir. Bu kalıplama prosesini basınç-sıkıştırma kalıplama, transfer kalıplama ve enjeksiyon kalıplama olarak sınıflandırabiliriz:

2.5.2.1.1 Basınç Kalıplama

Basınç kalıplama tipinde kalıp boşluğu vulkanize olmamış parçalarla doldurulur, kalıp kapatılır ve yerleştirilir. Ardından belirlenen sıcaklık ve basınç, kalıp içerisindeki kauçuk parçayı akışkan hale getirir ve kalıbı doldurur. Daha sonra, bu şekilde belirli bir süre kapalı olan kalıp açılır ve parça çıkarılır. Bu metot, vulkanizasyon avantajının yanı sıra, içerisinde fazla parça konulması veya yanlış yerleştirilmesi nedeniyle çizgi oluşumu, kabarcık ya da dolmayan kısımlar gibi dezavantajı da beraberinde getirebilir. Diğer bir yandan, fazla parça konulması yalnızca atık oluşturmakla kalmayarak vulkanize edilen kauçuk parçanın kalıptan zor çıkarılmasına neden olmaktadır. Basınçlı kalıplama metodu pişme süresinin uzun olması ve kalıbın doldurulma-boşaltılması süreçlerinde, ek zaman gerektirmesi gibi dezavantajı da içerisinde barındırmaktadır.

2.5.2.1.2 Transfer Kalıplama

Transfer kalıplama, basınçlı kalıplamadan farklı olarak, hamurun kalıp boşluğuna bir delikten geçerek transfer edilmesi yöntemi ile gerçekleştirilmektedir. Piston, silindir ve kalıp boşluğu olmak üzere üç parçadan oluşan bu kalıplama biçiminde, vulkanize edilecek hamur parçası silindirin içine yerleştirilir ve pistonla basınç uygulanması ile hamur kalıp boşluğuna itilir. Bu işlem sayesinde hamur kalıp boşluğuna transferi sırasında kuvvete maruz kaldığı için akışkan hale gelir ve pişme süresi kısalmır. Pişen hamur kalıptan çıkartılarak arta kalan pişmiş hamur silindirden alınır. Bu kalıplama biçimi basınçlı kalıplamaya nazaran daha kısa pişme süresi ve azaltılmış parça hazırlama maliyeti sağlamaktadır.

2.5.2.1.3 Enjeksiyon Kalıplama

Enjeksiyon kalıplama, bir boyundan kapalı olan kalıp boşluğuna doğru kauçuk parçanın kuvvet aracılığıyla transfer edilmesidir (Erkek, 2007). Isıtılmış silindir içine doğru beslenen hamur şeridi bir vida ile mastike edilir. Kalıp boşluğuna giden hamur, uygulanan kuvvetler nedeniyle ön ısınmadan geçer ve böylece vulkanizasyon işlemi 30-60 sn gibi kısa bir sürede tamamlanmış olur. Bu kalıplamanın diğer kalıplamalara göre avantajları, düşük pişmiş hamur atığı ve parça hazırlama maliyetinin az olmasıdır.

2.5.2.2 Açık Vulkanizasyon

Sıcak hava ya da buhar içinde gerçekleştirilebilen açık vulkanizasyon, sıcak hava fırınlarında yapıldığında sıcak havanın ısı transferinin düşük olması nedeniyle, çok verimli olmamakla beraber, oksijen yaşlanmasını önlemek için daha düşük sıcaklıklarda uzun vulkanizasyon süresi gerektirir. Isıtma ceketli otoklav olarak bilinen geniş konteynır içerisine parçanın yerleştirilip buhar verilerek gerçekleştirilen açık buhar vulkanizasyonunda, doygun buhar sıcak havanın düşük ısı transfer özelliğinden farklı olarak daha iyi ısı transferi sağlar ve inert gaz gibi davranır. Böylece yüksek sıcaklıklarda daha kısa pişme sürelerini mümkün kılar. Bu vulkanizasyon tipi genellikle hortum, kablo ve şerit gibi ürünlerde kullanılmaktadır.

2.5.2.3 Sürekli Vulkanizasyon

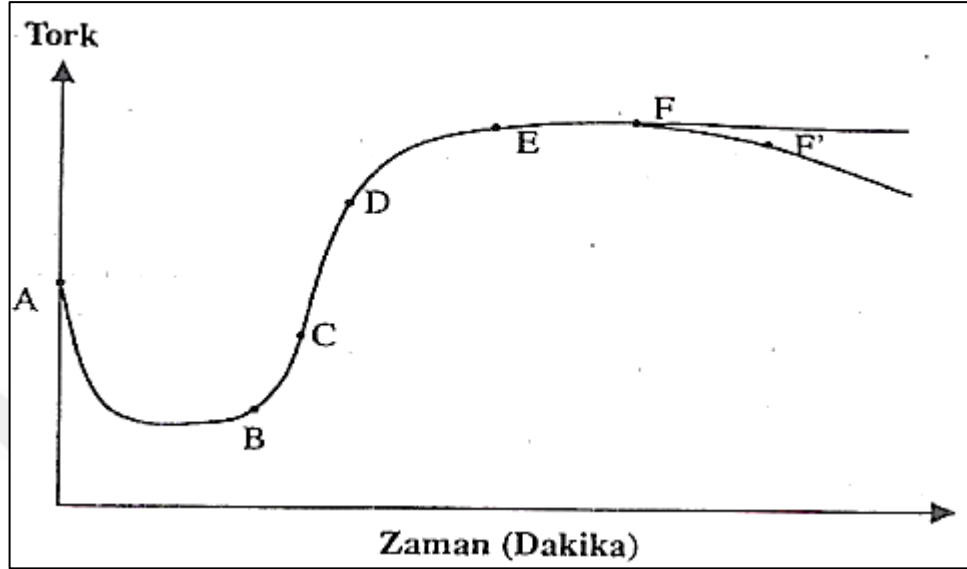
Sürekli vulkanizasyon, kauçuk parçanın şekillendirilerek tek-hat operasyonu ile pişirilmesi işlemidir. Bu vulkanizasyonun birçok metodu olmasına rağmen, hepsinin ortak noktası şekillendirilmiş pişmemiş hamurun pişme ortamı boyunca transferini içermesidir. Sıvı, sıcak hava, buhar, mikrodalga ve yüksek enerjili radyasyon içeren ortamlar pişirme ortamı olabilir. Elektrik tesisatı kaplaması, konveyör kayışı ve döşemelerde bu tip vulkanizasyon yapılır.

2.5.2.4 Soğuk Vulkanizasyon

Soğuk vulkanizasyon, ince materyallerin oda sıcaklığındaki sülfür monoklorit (S_2Cl_2) buharına maruz bırakılarak pişirilmesidir. Sülfür monoklorit buharına ek olarak, oda sıcaklığında vulkanizasyonu sağlayan ultra akseleratör gibi pişirme ajanları da sıklıkla kullanılmaktadır.

2.5.3 Vulkanizasyon Eğrisi

Kauçuk parçaların Şekil 2.16'da gösterilen vulkanizasyon eğrisinin yorumlanması şu şekildedir:



Şekil 2.16 Vulkanizasyon eğrisi (Savran, 2001).

AB: Akma zamanı (hamur plastiktir, yumuşar ve kalıba akar).

BC: Yanma zamanı (kükürt halkası açılarak polimeri etkilemeye başlamıştır).

CD: Yetersiz vulkanizasyon (çapraz bağlanmaların başladığı zaman. Kükürt halkası açılıp yeni bağlar kuruyor).

DE: Optimum vulkanizasyon (vulkanizasyon için en uygun zaman).

EF: NBR'de sertleşme, kükürt bağlarının kısalması ve esnekliğin azalması.

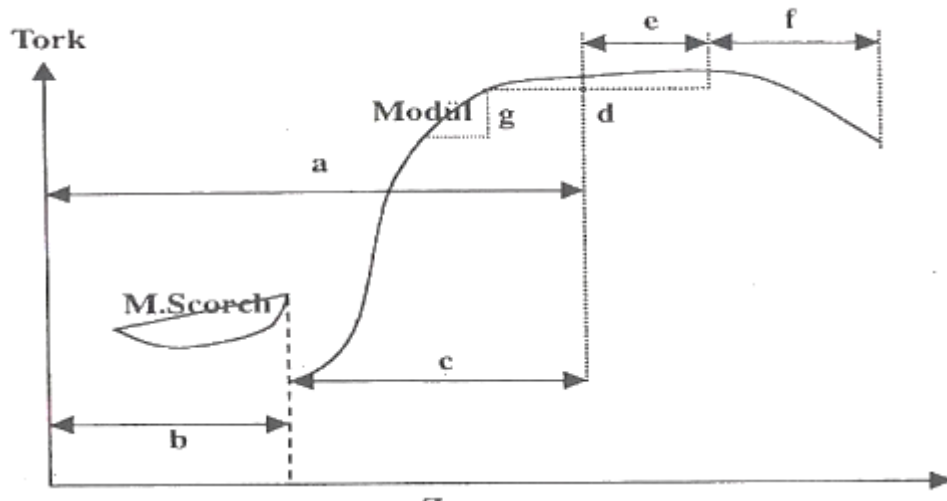
EF: NR'de karbon-karbon bağlarının açıldığı durum ve fiziksel özelliklerde düşme.

Bu eğrinin en önemli parçası olan CD'nin eğimi, vulkanizasyon hızını vermektedir. Eğim ne kadar dikse, vulkanizasyon o kadar hızlı olur.

AB'nin uzunluğu ise çalışma emniyetini ifade etmektedir.

Vulkanizasyon eğrisinde tercih edilen durum, uzun akma zamanı ve dik CD eğrisidir.

2.5.4 Vulkanizasyon Değişkenleri



Şekil 2.17 Vulkanizasyon değişkenleri (Savran, 2001).

- a: Pişme zamanı, optimum pişmeye ulaşmak için gereken zamandır.
- b: Scorch olarak da adlandırılan pişmeye başlama zamanı, ısıtma zamanı başlangıcı ile pişme başlangıcı arasındaki zamandır.
- c: Vulkanizasyon zamanı, pişme başlangıcı ile optimum pişme arasındaki zamandır.
- d: Optimum pişme, genellikle maksimum kopma mukavemetinin %90'ına ulaşmak için geçen zamandır.
- e: Plato etkisi, pek çok gerilme-esneme eğri seviyesinin maksimuma yaklaşması ve gerilmenin (veya esnemenin) bir zaman aralığında sabit kalmasıdır.
- f: Geri dönüş, özellikle kükürtle pişirilen yüksek doymamış elastomerleri ısıtma ve vulkanizasyonun, optimum pişmeye ulaşmak için gerekenden daha fazla yapılmasıdır. Bu durum gerilim değerinin düşmesine sebep olur.
- g: Pişme hızı, hızlı bir reaksiyon periyodu anındaki vulkanizasyon eğrisinin eğimi olarak kabul edilmektedir.

3. GEREÇ VE YÖNTEM

3.1. Malzemeler

Çalışmada kullanılan kauçuk hamuru, NB80 koduyla Kastaş Kauçuk A.Ş tarafından tedarik edilmiştir. Kauçuk nanokompozitlerin hazırlanmasında karbon nanoparçacık katkı olarak grafit, grafen ve KNT kullanılmıştır. Grafit tozu, Toho Tanso'dan satın alınmıştır. Grafen, Nanografi Nano Teknoloji AS firmasından toz formunda tedarik edilmiştir. KNT, OCSiAl Europe firmasından hazır karışım şeklinde tedarik edilmiştir.

3.2 NBR-Grt, NBR-Grn ve NBR-KNT Nanokompozitlerin Hazırlanması

Kauçuk karışım reçeteleri, ana hammadde olan polimerin (kauçuk) ağırlıkça 100 birim kabul edildiği bir esasa dayanır ve diğer katkıları da bu orana göre ilave edilir. NBR ile hazırlanan reçetelerde grafit ve grafen ilave edilerek hazırlanan karışım, her bir güçlendirici madde için aynı yöntemle oluşturulmuştur. KNT katkılı hamur, grafit ve grafen katkılı hamurdan farklı adımda hamura ilave edilmesiyle hazırlanmıştır. Üretilen nanoparçacık katkılı NBR numuneler, Tablo 3.1'deki gibi kodlanmıştır.

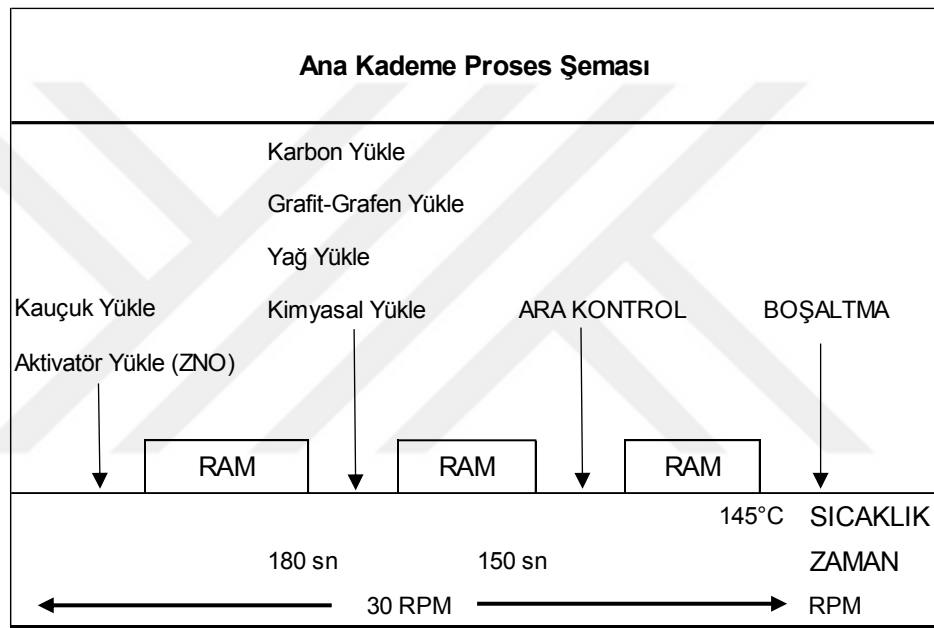
Tablo 3.1 Numune kodlama

Nanoparçacık türü	Nanoparçacık Miktarı [phr]	Numune Kodu
-	-	NBR
Grt	2	Grt2
	4	Grt4
	6	Grt6
KNT	2	KNT2
	4	KNT4
	6	KNT6
Grn	2	Grn2
	4	Grn4
	6	Grn6

Çalışmada üretilen nanoparçacık katkılı NBR numune karışım reçeteleri, Tablo 3.2'de verilmiştir.

Tablo 3.2: NBR kauçuk karışım reçetesi

HAMMADDE	Numune 1	Numune 2	Numune 3	Numune 4	Numune 5	Numune 6	Numune 7	Numune 8	Numune 9
NBR Kauçuk	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Grafit	2	4	6						
Grafen				2	4	6			
KNT							2	4	6
Aktivatör+Proses Yardımcısı	20	20	20	20	20	20	20	20	20
Dolgu Malzemesi	40	40	40	40	40	40	40	40	40



Şekil 3.1 Ana kademe süreç şeması.

Grafit ve grafen malzemelerinin ana kademe karıştırma adımına ait proses şeması Şekil 3.1’de verilmektedir. Proses şeması ilk adımında çinko oksit malzemesinin dispersiyonu ve kauçuk malzemesinin mekanik olarak mastikasyonu amacı ile 3 dakika süresince 30 RPM rotor devrinde karıştırılır. Sonraki adımda dolgu, yağ ve pişirici kimyasalları hariç diğer kimyasalların yer aldığı kimyasal torbası yükleme yapılarak 150 sn aynı rotor devrinde karıştırılır. Ara kontrol adımı yapıldıktan sonra 145°C sıcaklığa kadar karıştırılarak hamur homojenizasyon işlemi için açık mile alınır. Açık milde 5 dakika boyunca homojenizasyon prosesi gerçekleştirilir.

Şekil 3.2’teki gibi plaka şekline getirilen yarı mamül 24 saat boyunca dinlendirilmek üzere dinlenme alanına alınmıştır.



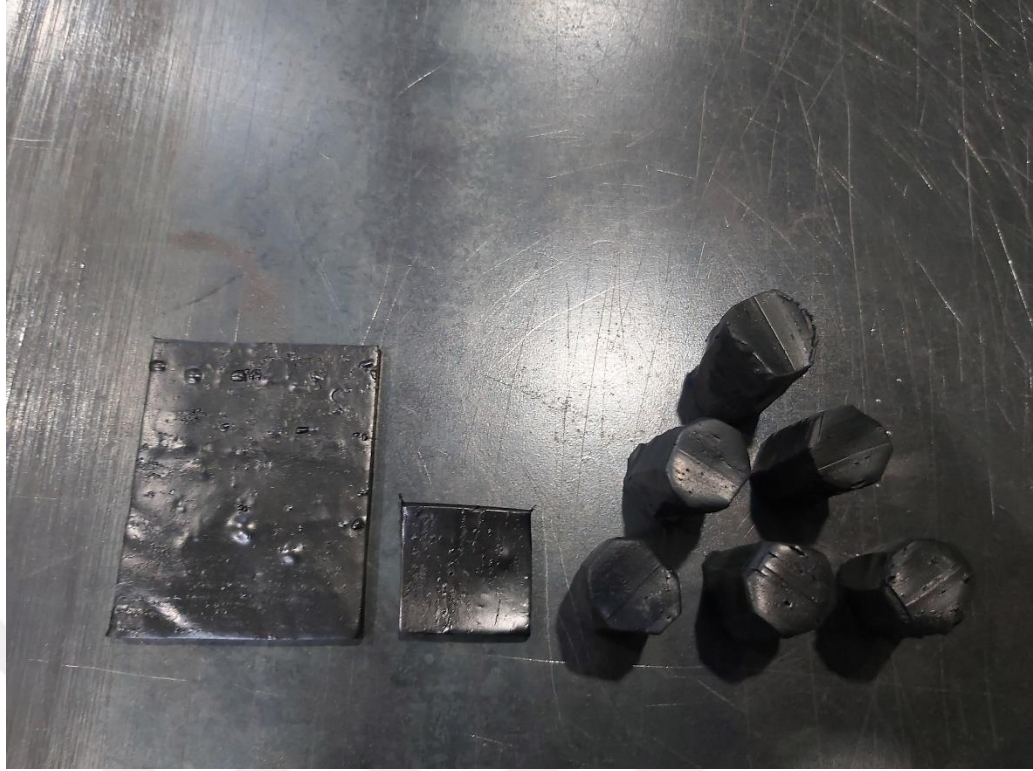
Şekil 3.2 Plaka şekline getirilen yarı mamül

24 saat dinlendirilen yarı mamül 3 mm mil aralığında pişirici kimyasallar eklenerek açık mil üzerinde karıştırılır ve laboratuvar kontrol testleri için numuneler hazırlanır.

CNT malzemesi için ana proses akış şeması grafit ve grafen ile aynı olmakla beraber CNT ilavesi pişirici kimyasalların eklenmesi adımıyla açık mil üzerinde ilave edilir.

CNT katkılı kauçuk hamuru yapmak için ise ana kademe proses adımları nanokompozit katkısız şekilde gerçekleştirilir. 24 saat dinlendirilen yarı mamülle CNT malzemesi açık milde pişirici kimyasalları ile beraber ilave edilir ve hamur hazırlama işlemi tamamlanır.

Hazırlanan yarı mamülün kürlleme öncesi ve sonrasındaki viskoelastik özelliklerinin tespiti ve 180°C sıcaklıkta kürlleme sürecinin zamansal ölçümü için Reometre testi gerçekleştirilir. Bu test sonrası edinilen optimum vulkanizasyon süresi doğrultusunda çekme-kopma dayanımı, kalıcı deformasyon testi ve yaşlandırma test numunelerinin pişirilmesi gerçekleştirilir. Hazırlanan hamurdan numuneler elde etmek için ayrılan hamur grupları Şekil 3.3'deki gibidir.



Şekil 3.3 Elde edilen yarı mamül hamurlar

3.2 Mekanik Testler

3.2.1 Reometre

Reometre, düşük şekil değiştirme hızlarında polimerlerin reolojik karakterizasyonlarını belirlemek için kullanılan bir cihazdır. Rotasyonel reometreler de eş eksenli, konik-plaka ve paralel plaka geometrileriyle malzemelerin reolojik karakterizasyonları yapılabilmektedir. Bu çalışma kapsamında rotasyonel reometre ile yapılan ölçümler, yarı mamul hamurdan et kalınlığının 1.5 mm ve 25x25 mm kare plaka numune ile gerçekleştirilmiştir.

Ölçüm elemanı ile yapılan ölçümlerde, alt plaka sabit olup üst plaka test tipine bağlı olarak değişken devir sayısı, sabit devir sayısı veya salınımlı testler için belirli sapma açısı genliğinde sabit veya değişken frekans değerlerinde dönebilmektedir (Baş, 2012).

Bu çalışmada, Şekil 5.2’de görülen Alpha MDR 2000 Model reometre kullanılmış ASTM D5289 / ISO 6502 standardına uygun olarak yapılmıştır. Bu test, 200°C ortam sıcaklığı, 1.667 Hz frekans ile 0.2° gerinim ve 8 MPa’lık basınç uygulanarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.4 Alpha MDR 2000 Model

Bir malzemeye belirli bir frekans aralığında sürekli artan ve azalan gerilim uygulanması ile en yüksek gerilim değeri ve gerinim-gerilim arasındaki faz farklılığı dinamik reoloji ölçümüyle ölçülür. Eğer malzeme ideal bir elastik malzeme davranışı gösterirse, aynı fazda olan gerilim ve gerinim sinyalleri doğru orantılıdır. İdeal bir elastik malzemenin davranışı Hooke Kanunu ile temsil edilirken gerilim ve gerinim arasında 90 derecelik faz farkı olan ideal viskoz malzeme Newton Kanunu ile temsil edilir. İdeal viskoz bir malzemede gerilim ile gerinim hızları birbirleri ile doğru orantılıdır. 0° (elastik) ve 90° (viskoz) gerilim-gerinim faz farklılığı arasında bir değere sahip olan viskoelastik malzemelerde gerilim sinyali iki ana parçaya ayrılır:

- Elastik gerilim, gerinim ile arasında 0° faz farkı olan.
- Viskoz gerilim ise gerinim ile arasında 90° faz farkı olan.

Elastik gerilimin gerinime oranı olarak hesaplanan Depolama Modülü (E'), bir malzemenin elastik enerjisini koruma özelliğini belirtir. Viskoz gerilimin gerinime oranı olarak hesaplanan Kayıp Modülü (E'') ise bir malzemenin enerjiyi dağıtabilme özelliğini belirtir. Bir malzemenin deformasyona olan toplam dayanıklılığını ise Kompleks modül (E^*)'ü ile temsil edilir (Ortağığu Teknik Üniversitesi, 2021).

Vulkanizasyon değişkenlerinin kaydedildiği reometre testinin parametreleri aşağıdaki gibidir:

ML: Bu değer testin yapıldığı sıcaklıktaki minimum viskoziteyi göstermektedir. Henüz çapraz bağlamanın olmayıp başladığı noktadır. Bir bağlanma olmadığından dolayı bu noktadaki tork değeri hamurun yoğunluğu ve sertliği hakkında bilgi verir.

MH: %100 pişmenin gerçekleştiği andaki tork değeridir. Vulkanizasyon işlemi tamamlanmış olduğu bu değer dolgu maddesi artışıyla doğru orantılı olup bağ sayısı ve türünden etkilenir.

ts2: Scorch süresi olarak adlandırılan bu nokta pişmenin ilk safhası anlamına gelir. Bu süre kauçuk sektöründe en çok kullanılan parametre olup hamurun pişmeye başlama süresi hakkında bilgi verir. Scorch süresinin kullanılacağı alan ve işlenme şartlarına göre belirli bir aralıkta olması istenmektedir. Bu süresinin kısa olması erken pişmesine ve haliyle şekil stabilitesinin bozulması, yüzey pürüzlülüğü gibi problemlere neden olur. Süresinin uzun olması ise, yetersiz pişme, ürününün piştikten sonra şeklinin koruyamamasına ve fiziksel özelliklerinin düşmesine neden olur. Hamurların pişmesinde optimum durum emniyetli ve hızlı pişmesidir. Genel olarak ts2 MH'a ulaşmak geçen sürenin %10-15 ' dir.

t5: MH' a ulaşmak için geçen sürenin %5 ' idir.

t35: MH'a ulaşmak için geçen sürenin %35 'idir.

t50: MH'a ulaşmak için geçen sürenin %50 ' sidir.

t90: MH' a ulaşmak için geçen sürenin %90' ıdır. Bu süre optimum pişme süresi olup hamurun pişme hattında kalma süresinin belirlenmesi açısından oldukça önemlidir. Pişme hattında t90'dan daha kısa çıkan hamurun pişme sürecini tamamlamamış olur ve bu durum üründe şekil bozukluklarına ve düşük fiziksel özelliklere sahip olmasına neden olur. t90'dan daha fazla kalması durumunda ise fazla pişmeden kaynaklı sert, kırılgan ve düşük fiziksel özelliklere sahip ürün çıkmasına neden olur. Ürün fiziksel özelliklerini koruduğu için %90'lık pişme optimum pişme süresi olarak adlandırılır. Geriye kalan %10 'luk pişme zamana yayılır (Erkek, 2007).

3.2.2 Çekme deneyi

Çekme deneyi, malzemelerin mekanik özellikleri olarak bilinen akma, çekme ve kopma mukavemeti gibi birçok parametre elde edilmesini sağlayan bir deneydir. Sonuçlar ulusal ve uluslararası standartlarla tanımlanmıştır (Aydemir, 2015). Bu çalışmada ASTM D412 standardına uygun olarak çekme deneyi yapılmış ve sonuçları değerlendirilmiştir. Bu standart elastomer malzemelerin statik yük altındaki mekanik özelliklerini tespit etmek için uygulanan bir standarttır (Aydemir, 2015).

Çekme dayanımının hesaplandığı aşağıda verilen formüldeki gibi kopma kuvvetinin test öncesindeki kesit ölçüsüne oranıdır. Çekme dayanımı MPa ve kg/cm² cinsinde ölçülür ve kauçuk sektöründe 7,5 MPa'ın altında olmaması istenir (Karabörk, 2012).

$$\sigma_{\max} = F_{\max} / A_0$$

Burada;

$\sigma_{\max}$: Çekme dayanımı (kg/cm²)

$F_{\max}$: Uygulanan en yüksek kuvvet (Kg)

A_0 : Başlangıç kesitidir (cm²).

Kopma uzaması aşağıda verilen formüldeki gibi kopma anında malzemenin boyunun testin başlangıcındaki boyuna oranı ile hesaplanır. %uzama cinsinden ifade edilen kopma uzamasının kauçuk sektöründe minimum %200 olması istenir.

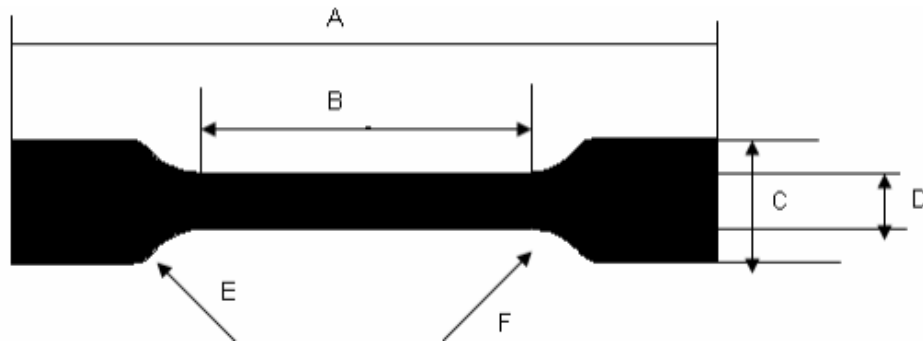
$$\% \text{ uzama} = ((l_r - l_0) / l_0) \times 100$$

Burada;

l_0 : İlk boy (mm)

l_r : Son boy (mm)

Bu çalışmada Şekil 5.2'deki ölçülere göre hazırlanan test numuneleri Şekil 5.3'teki Zwick/Roell Z010 çekme test cihazı kullanarak çekme testi yapılmıştır.



Şekil 3.5 Test numune ölçüleri

A: Toplam uzunluk; 60mm

B: Dar kısmın uzunluğu; 30mm

C: Uçların geniřlięi: 15mm

D: Dar kısmın genişliği; 4mm

E: Kavis yarıçapı(dış); 8mm

F: Kavis yarıçapı (i); 12.5 mm



şekil 3.6 Test numuneleri

2 mm kalınlığına sahip olarak hazırlanan test numuneleri 20 mm'lik ölçüm boyu için test cihazında 0,1 MPa n yükleme yapılarak 200 mm/min hızla çekilmektedir. Ölçümler en az 3 test numunesi için gerçekleştirilmiş olup sonuçların ortalaması alınmaktadır.



şekil 3.7 ekme Test Cihazı

3.2.3 Sertlik

Mukavemetin değerlendirilmesinde en önemli kavramlardan biri olan malzemelerin sertliklerinin ölçümü, aşınma dayanımı, işlenebilirlik gibi önemli kavramların belirlenmesini sağlamaktadır (Bulut, 2021).

Bu çalışmada sertlik ölçümleri ASTM D2240 standardına uygun olarak yapılmıştır. Sertlikler elastomer malzeme tipinden dolayı Shore A tipi Bareiss Digitest model dijital sertlik cihazı ile ölçülmüştür. Sertlik minimum 6 mm kalınlığında (3 tane 2 mm kalınlığındaki test numuneleri) kauçuk numunelerden ölçülmüştür. Shore A tipi sertlik cihazının ucunda bulunan iğnenin küçük bir temas kuvveti ile kauçuk numunenin yüzeyine batırılması sonucu oluşan direnç ile sertlik ölçümü gerçekleştirilir (Babapour, 2013).



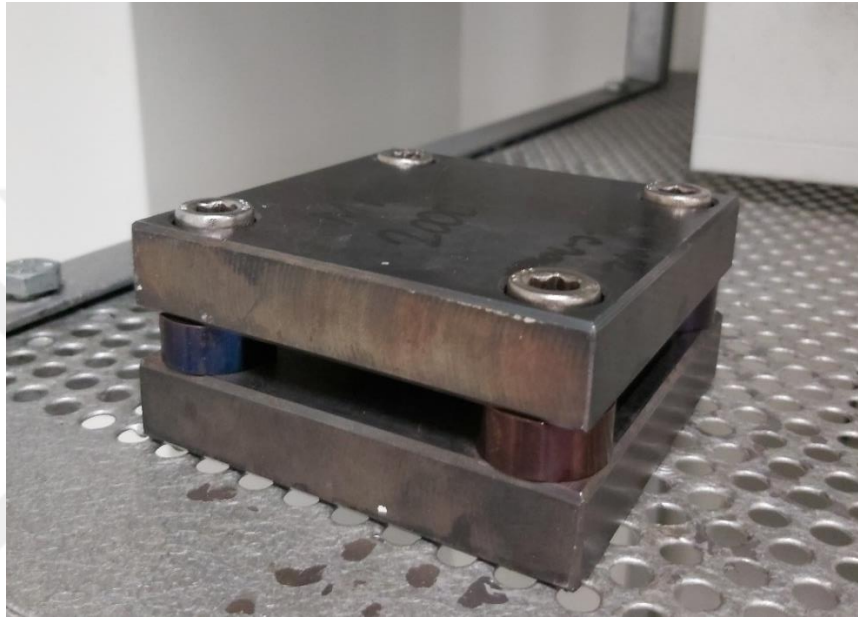
Şekil 3.8 Sertlik Ölçüm Cihazı

3.2.4 Sıkıştırılabilirlik Testi

ASTM D-395 standardına göre gerçekleştirilen sıkıştırma seti testi, belirli bir sıcaklık ve sapmada uzun süreli sıkıştırma gerilimlerinden sonra kauçuğun orijinal kalınlığına dönme yeteneğini ölçer. Bu test elastomer malzemelerin sızdırmazlık özelliğini belirleme açısından çok önemlidir. Kauçuk malzeme zamanla sıkıştırıldığı için eski kalınlığına dönme özelliğini kaybeder. Bu esneklik kaybı, bir elastomer malzemeden üretilen sızdırmazlık elemanının ömrünü azaltabilir. Bir sızdırmazlık elemanın zamanla alabileceği kalıcı set sistemin sızdırmazlık özelliğinin yitirmesine neden olabilir veya aniden izolasyon özelliğini yitirmesi durumunda sistemi koruma yeteneği tehlikeye girebilir.

Bir malzeme için sıkıştırma seti sonuçları yüzde olarak ifade edilir. Değer ne kadar düşükse, malzeme belirli bir sapma ve sıcaklık aralığında kalıcı deformasyona o kadar iyi direndiği anlamına gelir (Stockwell Elastomerics, 2021).

Bu tez çalışmasında üniform bir gerilme durumu elde etmek için sıkıştırma seti testi yapılırken kullanılan Şekil 3.9’da gösterilen kalıp içerisine yerleştirilen silindirik numuneler, vulkanizasyondan en az 16 saat geçmiş ve 12,5 +/- 0,5 mm kalınlığında ve 29,0 +/- 0,5 mm çapında diskler olarak alınmıştır.



Şekil 3.9 Sıkıştırılabilirlik Test Kalıbı

Test numunelerinde yükseklik/çap oranının çok büyük olması, deney sırasında numunenin bükülmesine ve gerilmenin homojen olarak dağılmasına engel olarak yanlış sonuçlar elde edilmesine neden olmaktadır. Bu nedenle, genel olarak, basma numunelerinde yükseklik/çap oranı en fazla 2 olacak şekilde kullanılmaktadır (Yavuz Erkek, 2018).

Belirtilen ölçü ve özelliklere göre hazırlanan numuneler sıkıştırılabilirlik aparatına yerleştirilir ve vidalar sıkılarak numuneler %25 oranında sıkıştırılır. Bu şekilde 100° C’deki laboratuvar fırınına yerleştirilen numuneler 22 saat sonra çıkarılarak vidaları açılır. Aparattan çıkarılan numuneler 30 dk bekletildikten sonra tekrar kalınlıkları ölçülerek sıkıştırılabilirliği ölçülür. Ölçüm için kullanılan formül şu şekildedir (Yavuz Erkek, 2018):

$$C = \frac{L_0 - L}{L_0 - L_s}$$

Burada;

C = Kalıcı deformasyon miktarı (%)

L_0 = Diskin başlangıç kalınlığı (mm)

L = Diskin son kalınlığı (mm)

L_s = Ara plaka uzunluğu (9,38 mm) (Ara plaka: Aparatın alt ve üst çelik diskleri arasındaki yüksekliği belirleyen metal parça)

Bu ölçümler her bir numune için yapıldıktan sonra ortalaması alınarak ortalama sıkıştırılabilirlik hesaplanır.

3.2.5 Yaşlandırma Testi

Malzemelerin belirli sıcaklık, ısı, yağ ve benzeri dış etkiler altında belirli bir süre maruz bırakılması sonucu hamurlarda meydana gelen mekanik ve fiziksel özelliklerindeki değişimi, bozulmayı belirlemek amacıyla yapılan testlere yaşlandırma testi denmektedir. Bahsi geçen malzeme elastomerler ise "yaşlanma" terimi, vulkanize edilen test numunelerinin veya nihai parçaların kimyasal ve fiziksel değişime, bozulmaya neden olan çok sayıda işlemi olarak tarif edilebiliriz.

Bu değişim ve bozulmaların günlük kullanımdan önce laboratuvar ortamında gözlemlenmesi için çeşitli hasar mekanizmaları ve yaşlandırma test yöntemleri geliştirilmiştir. Yaşlanma testi malzemenin yapısında kalıcı bir deformasyon ve bozulmaya sebep olmaktadır. Bu testin yapılması ve sonuçlarının kaydedilmesi malzemenin uygulama alanlarındaki çalışma zaman ve sıcaklık sınırlarının çizilmesini sağlamaktadır.

Kauçuk malzemelerin uygulama alanlarının gelişen teknoloji ve artan talepler doğrultusunda sürekli gelişim ve değişim içerisinde olması, tüm standartlaştırmaya ve onlarca yıllık test deneyimine rağmen hala gelişim ihtiyacı doğurmaktadır. Yaşlanma süreçleri uygulama alan ve sınır değerlerine göre şu aşağıdaki alanlara ayrılabilir (Blobner and Richter, 2014; Ehrhardt, 1999):

- Radyasyonla yaşlanma: UV radyasyonu, ışık (örn. ksenon ışığı) ve radyoaktif radyasyon
- Mekanik stres nedeniyle yaşlanma: Statik yük (örn. basınç, gerilim) ve dinamik yükler (örn. sürekli salınımlar)
- Temas ortamları ile yaşlanma: Bu tip yaşlanma kendi içinde de ikiye ayrılmaktadır. Elastomer üzerinde dış etki: Ağır metaller ("kauçuk zehirler") ve sıvı ortamlar (örn. Yağlar, yakıtlar, asitler, su vb.)

Elastomer malzeme yapısının etkisi: Madde yapısının homojen olmaması, Temel malzemelerin aksesuar safsızlıkları, İlgili safsızlıkların işlenmesi

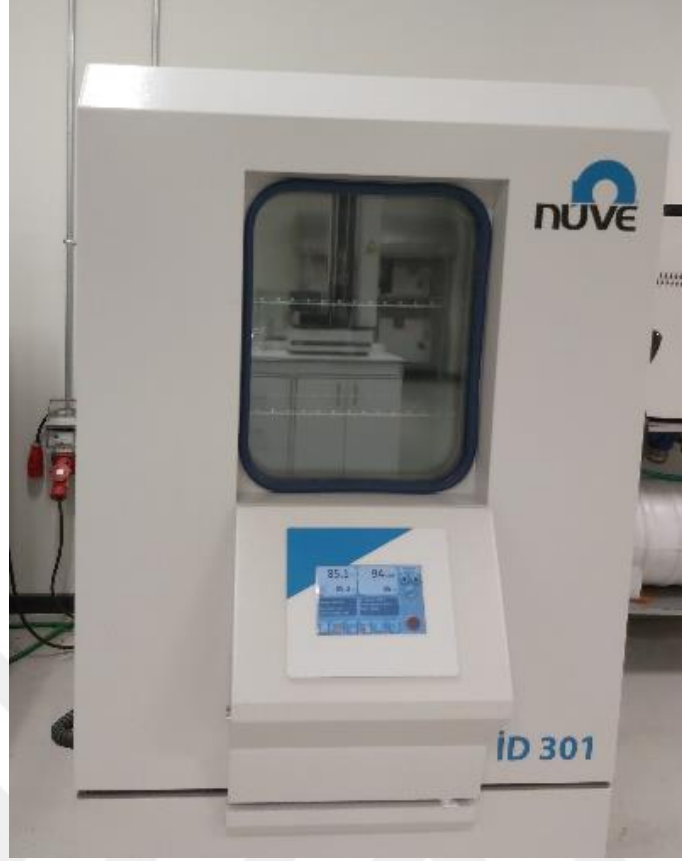
- Biyolojik süreçlerle yaşlanma
- Gazların neden olduğu yaşlanma: Ortam havası (esas olarak oksijen), ozon (uzama sırasında dien kauçuklarının çatlamasına yol açar) ve diğer gazlar, (bir motorun karterinde oluşan ve yanmadan kaynaklanan agresif kirleticilerle zenginleştirilmiş gaz)
- Sıcaklığa göre yaşlanma: Gaz veya hava beslemesi olmadan, yani inert veya kapalı atmosfer (örn. otoklavlarda) ve taze hava beslemeli (aslında gazlar (oksijen) ve sıcaklıkla yaşlanmanın bir kombinasyonu)

Yaşlandırma testi gerçekleştirilmeden önce ve sonra her bir numunenin kopma mukavemeti ve çekme uzama değerleri kıyaslama yapmak için hem sayısal veri hem de grafiksel gösterim olarak alınır. Yaşlandırma testi sonrasında numunenin kopma mukavemetinde en fazla %25 azalma, kopma uzamasında ise en fazla %50 azalma kritik değer olarak kabul edilir (Yavuz Erkek, 2018).

Tez kapsamında geliştirilen malzeme ile üretilecek olan sızdırmazlık elemanlarının yaşlandırılmasında sıklıkla ısıtılmış ortam havasının kullanıldığı havada yaşlanma ve yağ, yaşlandırma sıvısının kullanıldığı sıvıda yaşlanma test yöntemleri kullanıldığı için bu iki test detaylandırılmaktadır.

3.2.5.1 Havada Yaşlanma Testi

Belirli süre boyunca -70 / 300°C sıcaklıkta termal yaşlandırılmaya maruz bırakılan elastomerlerin fiziksel ve mekanik bozulmalarının belirlenmesi ve ilk halleri ile son hallerinde meydana gelen değişikliklerin karşılaştırılması için yapılan teste havada yaşlandırma testi denmektedir (Polikan, 2021). Bu test ASTM D 573 Standard Test Method for Rubber - Deterioration in an Air Oven standardına göre Nüve ID301 yaşlandırma cihazında gerçekleştirilmektedir.



Şekil 3.10 Yaşlandırma Test Kabini

Havada yaşlandırma testi, fırın yaşlandırma veya hızlandırılmış yaşlandırma olarak da adlandırılmakta ve yaşlanma sürecini laboratuvar şartlarında hızlandırarak malzeme ve dolayısıyla malzemeden imal edilecek son ürünün çalışma sıcaklıklarını belirlemektedir. Bu test diğer testlerle birlikte yürütülerek sahadaki hizmet ömrünün tahmin edilmesi için başka unsurları birleştirir.

NBR numuneleri üzerinde yapılan yaşlandırma işleminin malzemenin fiziksel ve mekanik özelliklerini önemli ölçüde etkilediği ve 0°-100° C aralığındaki sıcaklık artışının yorulma ömrünü azalttığı gözlemlenmiştir (Güneş ve Feyzullahoğlu, 2019).

3.2.5.2 Sıvıda Yaşlandırma Testleri

Vulkanize olmuş elastomerlerin belirli ısıda yağ ve su gibi sıvılar içinde belirli bir süre yaşlandırmaya maruz bırakılarak elastomerlerde meydana gelen fiziksel ve mekanik değişiklik ve bozulmaları belirleme için yapılan testler sıvıda yaşlandırma testi denir. Bu test sayesinde sıvı ve elastomer arasındaki etkileşimi tanımlanır ve test sonrası yapılan ağırlık, hacim, çekme dayanımı ve kopma-uzama değerlerinin ölçümü ile meydana genel değişiklikleri hesaplanır

(Polikan, 2021). Bu tanımlama ve hesaplama işlemleri ASTM D 471 Rubber Property- Effects of Liquids Standardına göre gerçekleştirilir.



Şekil 3.11 Sıvıda Yaşlandırma Test Düzeneği

Kauçuk malzemelerde yapılan sıvı yaşlandırma testi, bir malzemenin ve istenilen durumlarda son ürünün çalışma ortamında maruz kalacağı sıvıya göre performansının nasıl ve ne zamana kadar sağlıklı performans göstereceğini tespit etmek için kullanılır. Hızlandırılmış sıvı yaşlandırma testi, maruz kalacağı sıvının yanı sıra bir de ısı işlemi uygulanarak gerçekleştirilir.

Yağ, soğutma sıvısı, benzin, ATF, dizel yakıt gibi sıvılar otomotiv sektöründe kullanılan elastomerler için yaygın olarak kullanılan test sıvılardan olup endüstriyel alanda temizleyiciler ve yangın söndürücüler örnek olarak verilebilir. Yakıtlar, hidrolik yağlar, antifriz, buz çözücü, yüzey temizleyici gibi sıvılar havacılık; süt yağları gibi sıvılar ise gıda sektöründe yaygın olarak kullanılan sıvılardır. (Smithers, 2021). Bu sıvılar müşteri arz ve talepleri doğrultusunda kullanılan sıvılar olup sızdırmazlık elemanlarında ASTM D471 ve ISO 1817 gibi standartlar da belirtilen referans ölçümler için IRM 901, IRM 902 ve IRM 903, farklı aromatik konsantrasyonlara sahip mineral yağlar gibi test sıvıları kullanılmaktadır (FUCHS Group, 2021).

NBR malzeme numunelerinin ester bazlı sıvılar ile yaşlandırmaya maruz bırakılması durumunda kauçuğun aşınma, mekanik ve fiziksel özellikleri incelemek için çalışmalar yapılmıştır. [7,8]. Yapılan çalışmalar neticesinde NBR kauçuğunun aseton ve keton gibi kimyasal maddelere karşı dayanımının düşük olmasına rağmen bitkisel ve mineral yağlara karşı dayanıklı olduğu tespit edilmiştir. Bunun yanı sıra NBR kauçuğun aşınma, yorulma ve yaşlanma dayanımı doğal kauçuk olan NR'den daha iyi olmasına karşın yırtılma direnci NR'den daha düşüktür. İçerisinde bulunan akrilonitril oranı arttıkça NBR yağ ve yakıtlara olan dayanımı da artmaktadır. NBR'nin yağ ve yakıtlara karşı olan yüksek dayanımı bu malzemenin hortum, bağlantı elemanları ve sızdırmazlık elemanı gibi ürünlerin üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır (Güneş ve Feyzullahoğlu, 2019).

3.3 Sonlu Elemanlar Analizi

Kauçuk sızdırmazlık parçalarının sızdırmazlık hesabı, kauçuk malzeme ve metal malzeme temaslarını içerir (Zhou et al., 2018). Kauçuk malzemenin doğrusal olmayan ve sıkıştırılmaz olması gibi karmaşık özellikleri nedeniyle, kauçuk malzemenin sonlu eleman analizi doğrusal olmayan sonlu eleman kategorisine aittir. Kauçuk malzemeyi tanımlayan gerinim enerji fonksiyonu üzerinde çalışmalar yapılmış ve aşağıda yer alan Mooney-Revlin fonksiyonu büyük gerinim koşullarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Wang et al., 2004).

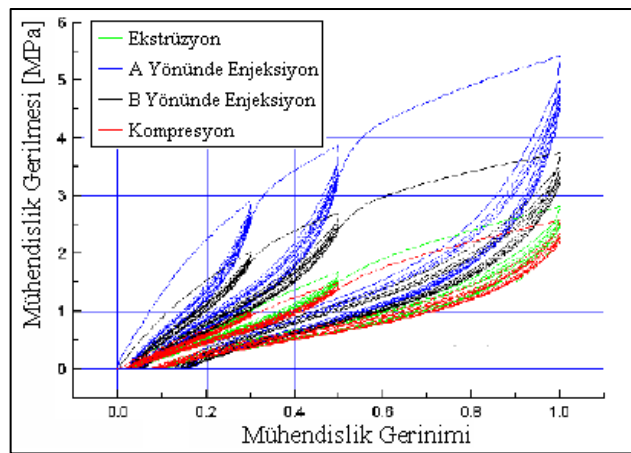
$$W = C1(I1-3) + C2(I2-3). \quad (1)$$

Yukarıdaki formülde:

W birimi joule olan gerinim enerjisi, C1 ve C2 malzeme sabitleridir.

$I1 = \sigma_{12} + \sigma_{22} + \sigma_{32}$ ve $I2 = \sigma_{12} \sigma_{22} + \sigma_{22} \sigma_{32} + \sigma_{32} \sigma_{12}$ ki burada σ_i ($i = 1,2,3$) üç yöndeki ana gerinimlerdir (Fired and Johonson, 1998).

Sonlu elemanlar yöntemi ile doğrusal olmayan davranışa özgü bir ürün geliştirmek için öncelikle hazırlanan hamurdan test plakaları basılarak üç temel şekil değiştirme davranışını belirleyen tek eksenli, iki eksenli ve düzlemsel kayma çekme testleri yapılır. Yapılan testlerin sonuçları sonlu elemanlar çözümleme yazılımına aktarılır ve malzeme modeli oluşturulur. Testleri gerçekleştirilen hamurdan üretilen hamurun tasarımları modellenir, modellenen malzeme ürüne tanımlanarak sınır şartlarına veya test koşullarına göre analiz kurgusu yapılır. Ürün üzerinde ihtiyaç duyulan iyileştirmeler, sonlu elemanlar modeline uygulanır ve tanımlanan malzeme modeliyle yapılan en iyi ürün imalatı için prototip kalıp yaptırılır. Yaptırılan prototip kalıpta, test plakaları yapımında kullanılmış olan karışım, aynı pişirme yöntemi pişirme sıcaklığı ve süresine göre kalıplanır.



Şekil 3.12 Farklı pişirme yöntemleri ile aynı hamurdan basılmış numunelerin yük altındaki davranışları (MSC Software, 2003)

Nihai ürün üzerinde laboratuvar ortamında çalışma şartlarına göre gerçekleştirilen test sonuçları ile sonlu elemanlar modeliyle analizi gerçekleştirilen test sonuçlarıyla kıyaslanır.

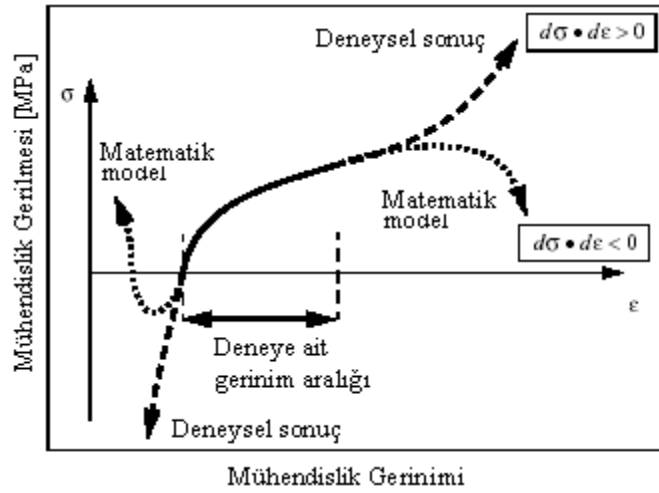
3.3.1 Malzeme Modelleme

Doğrusal olmayan malzemelerin sonlu elemanlar analiz yönteminde kullanılmak üzere modellenmesi kalıp imalatına gerek kalmadan sonucun doğruluğu açısından büyük bir öneme sahiptir. Modelleme işlemi için nihai parçanın imal edileceği hamurdan standart ölçülerde test plakaları kesilerek tek eksenli, iki eksenli çekme ve düzlemsel kaymalı çekme testlerinin yapılması gerekmektedir. Böylece testler sonucunda kauçuğun sönümlene özelliği, mekanik özelliklerinin zamana bağlı oluşu (viskoelastisite), çevrim tekrarına bağlı peklilik kaybı, sıfır yükten geçerken bir önceki çevrime kıyasla üzerinde daha fazla bir yer değiştirmeye maruz kalması (biçim değiştirme), süreksiz hasar davranışı gibi doğrusal olmayan davranışları belirlemektedir. Kauçuk hamur numunesinin düzlemsel kayma test sonuçlarının, çift eksenli çekme test sonuçlarına göre daha düşük, tek eksenli çekme test sonuçlarına göre ise daha yüksek gerilme değerleri vermesi gibi mekanik özellikleri sergileyen plaka testlerine ait deneysel sonuçlar, MSC MARC sonlu elemanlar çözümleme yazılımına girilir. Numunelerin tek elemanlı ve gerçek ürüne ait çok elemanlı modelleri oluşturulur. Bu yöntemle modellenen malzeme, örnek ürüne tanımlanarak sonlu elemanlar yöntemi ile çözündürülür. Daha sonra analiz programı desteğiyle simule edilmesiyle elde edilen sonlu elemanlar çözümleme sonuçları, gerçek parça üzerinde yapılan test sonuçlarıyla kıyaslanmıştır.

Genel olarak bahsedilen aşamalar aşağıda yer alan başlıklar altında adım adım açıklanmıştır.

3.3.1.1 Test Sonuçlarının Marc'a Girilmek Üzere Hazırlanması

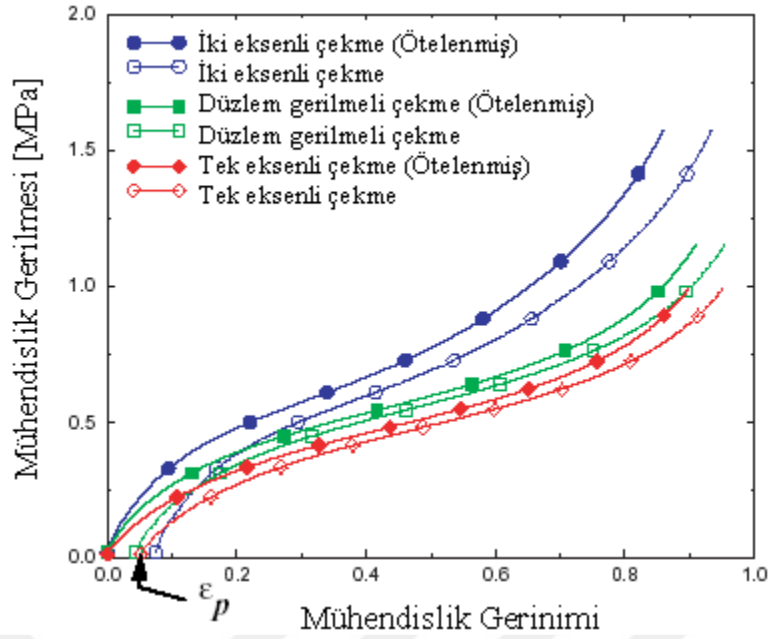
Eksenel çekme testleri sonucunda elde edilen uniaxial, biaxial ve planar shear sonuçları MSC programına aktarılır. Doğrusal olmayan malzemeleri modellemek için bu test sonuçları yazılımlarda karşılaştırıldığında Hook eğrisi gibi yalnızca malzeme kanunu ile değil matematiksel yaklaşımlar ile gerçekleştirilmektedir. Bu matematiksel yaklaşım modellerinde sıfırdan büyük çakışma sağlandığında malzeme, belli bir değerden sonra çok farklı davranışlar gösterir. Bu nedenle nihai ürün üzerinde oluşan gerilimler belirli bir emniyet katsayısıyla çarpmak ve malzeme modellenirken matematiksel yaklaşımı bu yüksek gerilimlerle gerçekleştirmek gerekmektedir. Şekil 2'de örnek bir numuneye ait gerinim aralığının dışında kalan matematiksel eğri ile deneysel sonuçların birbirinden ayrıldığı bu durumu göstermektedir. Bu durum bize Druckers kararlılık ölçütüne göre deneysel sonuç eğrisinin yanında yer alan $d\sigma.de > 0$ ifadesinin kararlı, matematik modelin yanındaki $d\sigma.de < 0$ ise kararsız olduğunu ifade etmektedir. MSC Marc yazılımında, matematiksel eğriyi oluşturulurken en baştan kararlı bir eğri elde etmek için $d\sigma.de > 0$ sorgulamasını otomatik olarak yapılarak 'sıfırdan büyük katsayılar' kutucuğu etkin hale getirilir.



Şekil 3.13 Deneysel sonuç ve matematiksel eğri (MSC Software, 2003)

Artı katsayılar yöntemiyle istenilen kararlılık sağlanmış olursa bile, kararlı kılınmış olan bu matematiksel eğri, gözlemlenen gerinim aralığı dışında kauçuğun olası davranışına aykırı bir davranış sergileyebilir. Bu durumu denetlemek ve ortadan kaldırmak adına ilgilenilen gerinim aralığının artı ve eksi kısımlarındaki ekstrapolasyon belirlenerek matematik eğrinin devamlılığı kullanıcı tarafından belirlenmelidir. Oluşturulan matematiksel eğrinin, belirlenen gerinim aralığının dışında bir davranış sergileme durumu, deneysel sonuçlarına ve genel kauçuk davranışına uygunluğu gözden geçirilmelidir. Tez kapsamında geliştirilecek ve karşılaştırılacak malzeme modeli eşitliklerinde, son ürünün sonlu elemanlar analizinde, model içerisinde yer alan elemanların %50'den daha büyük birim yer değiştirmelere maruz kalmayacağı ve ürünün maruz kaldığı yüklerin neden olduğu yer değiştirmeler ayrı değerlendirileceği için ekstrapolasyon devre dışı bırakılmıştır.

Kauçuğun doğası gereği farklı gerinimlerdeki deneysel sonuçların yükleme eğrileri çakışsa bile boşaltma eğrilerinin çakışmaması “sürekli hasar davranışı”na neden olmaktadır. Test sonuçlarının MSC Marc programına aktarılmadan önce dikkat edilmesi gereken diğer önemli bir nokta da Şekil 7.2’de görüldüğü üzere 1. çevrimin yükleme eğrisi sıfır yükte sıfır yer değiştiriyorken, 3. çevrimin yükleme eğrisi sıfır yükte iken eğri üzerindeki belirli bir yer değiştirme kaydediyor olmasıdır.



Şekil 3.14 Gerinim farklılıkları ve maksimum gerinimdeki kuvvet düşüşü (MSC Software, 2003).

Bahsedilen ileri çevrimlere ait bu sıfır yükteki yer değiştirme Şekil 3.13'te öngörüldüğü gibi orijine ötelenmelidir. Şekil 3.13'te görüldüğü üzere Düzlemsel Kayma test sonuçlarının, çift eksenli çekme test sonuçlarına göre daha düşük iken tek eksenli çekme test sonuçlarına göre ise daha yüksek gerilme değerleri vermesi gerekmektedir (MSC Software, 2003).

3.3.1.2 Deneysel Sonuç Çıktıları ile Malzeme Modeli Eğrilerinin Oluşturulması

MSC Marc programında malzeme modellemesinde, Neo Hookean, Sabit Mooney Biçim Değiştirmesi, Özgün Mooney Denklemi, Mooney-Rivlin Denklemi, Signiorini Enerji Fonksiyonu, Yeoh Eneji Fonksiyonu, James-Green-Simpson Biçim Değiştirme Eşitliği (MSC Software, 2003) ile hacimdeki olası değişiklikleri hesaba katan Ogden Model'i (Boast and Coveney, 1999) gibi matematiksel modeller kullanılmaktadır. Bu matematiksel yaklaşımları gerçekleştirmek için tek eksenli çekme, düzlemsel kayma ve iki eksenli çekmeye ait gerilme değerleri için deneysel sonuçlar MSC Marc programına aktararak üst üste çakıştırılır. Son olarak da malzeme modelini yaratmak için optimum malzeme modeli kullanılarak ürüne malzeme ataması yapılır.

Katkılı ve katkısız NBR karışımı hiperelastik davranış sergilemektedir. Kuvvet uygulandığı zaman yüksek şekil değiştirme sergileyen ve kuvvet ortadan kalktığı zaman tekrar eski şekline dönebilen hiperelastik malzemelerin modellenmesinde Ogden, Mooney-Rivlin, Neo-Hookean, Polynomial Form, Arruda-Boyce, Yeoh gibi birçok malzeme modeli kullanılmaktadır (Karen vd., 2008). Mooney-Rivlin malzeme modelinde çoğunlukla tek eksenli çekme deneyi ile sınırlı olduğu için doğrusal olmayan malzemelerde görülen diğer deformasyon çeşitleriyle

deneysel veriler kıyaslandığında uyumsuzluklar görülmektedir (Soyel, 2008). Neo – Hooken Modelinin ise Mooney Rivlin modelinin tek terimli hali olup büyük şekil değiştirme bölgelerindeki davranışları modellemekte yetersiz olduğu görülmüştür (Soyel, 2008; Garcia et al., 2005). Yeoh Modelinde ise deneysel çalışmalar daha kolay ve standartlaştırılmış olan tek eksenli çekme deneyi üzerinde gerçekleştirmiştir. Tüm bunların aksine deneysel veriler ile eğri oluşturma yaklaşımının kullanıldığı Ogden modeli, tek eksenli, eş-iki eksenli ve basit kayma deney sonuçlarını yeterli oranda temsil edilebildiği için bu tez çalışması kapsamında gerçekleştirilecek malzeme modeli için Oden teoremi kullanılmıştır (Soyel, 2008).

Ogden modeli için enerji, (3.10) numaralı denklemde de gösterildiği gibi temel uzamaların fonksiyonudur (Garcia et al., 2005).

Ogden:

$$W(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) = \sum_{r=1}^{\infty} \mu_r (\lambda_1^{\alpha_r} + \lambda_2^{\alpha_r} + \lambda_3^{\alpha_r} - 3) \quad (2.16.)$$

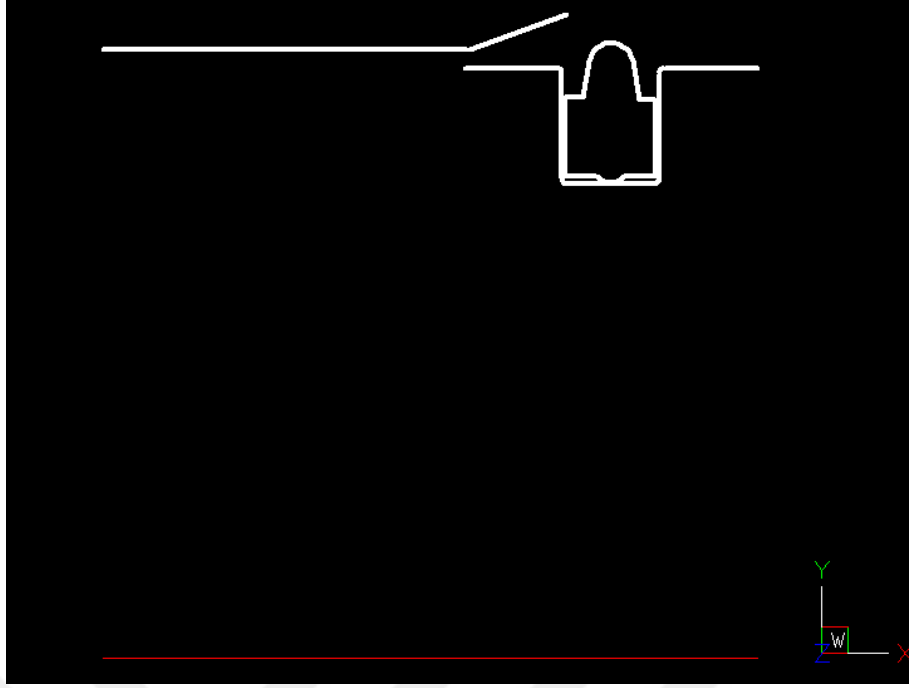
Buradaki μ_r ve α_r katsayılarıdır. Malzeme testlerinden elde edilen sonuçların kullanıldığı Ogden modeli %700'e kadar olan gerinmelerde iyi sonuç sağlamaktadır (Garcia et al., 2005).

3.3.2 Analiz Kurgusu

Grafit, Grafen ve KNT katkılı ve katkısız NBR karışımının ürün üzerindeki etkisini görebilmek ve karşılaştırmak için örnek ürün olarak pnömatik sızdırmazlık elemanı tasarımı üzerinde iki boyutlu analizler gerçekleştirilmiştir. Analizin kurgu süreç adımları;

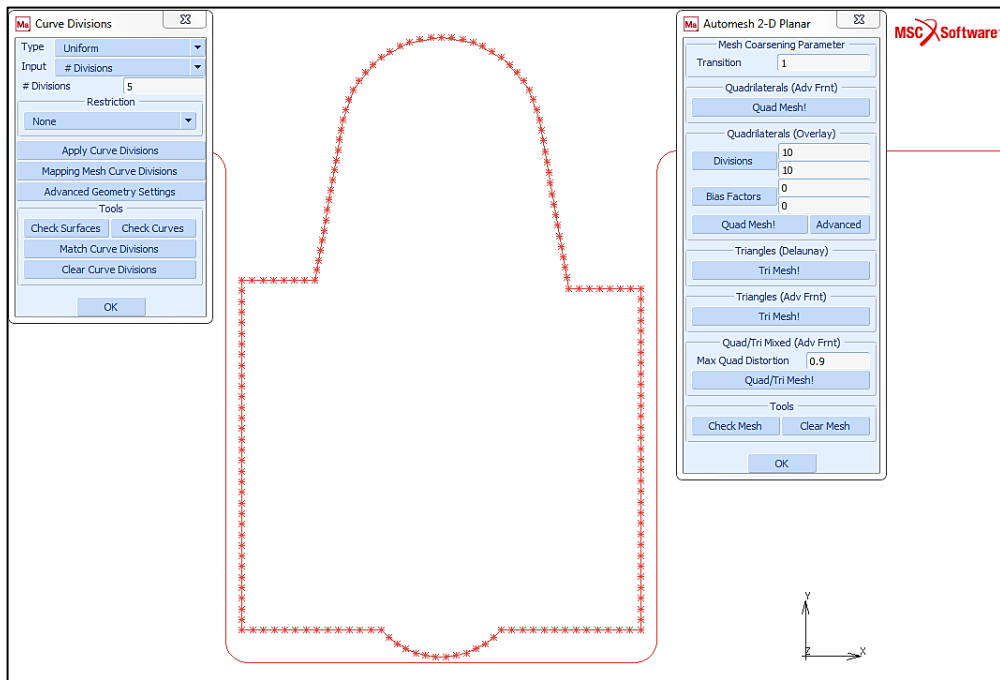
3.3.2.1. Geometri & Mesh

SEA yapılacak olan ürünün 2D kesit resmi DWGeditor veya Draftsight programları yardımıyla açılır. CAD programı aracılığıyla ürünün kesiti mm cinsinden birebir ölçüye getirilir (scale kontrol edilir) ve analizin yapılacağı kanal, mil veya boru CAD programında çizilir ve y eksen merkezine daha sonra kullanmak üzere line çizilir. Sızdırmazlık elemanının kanala ve boru/mil'e ön gerilim nedeniyle normal koşullarda çizimler iç içe geçmektedir. İç içe geçme durumu SEA yazılımı için sorun teşkil etmekte olup; kanal (y yönünde) ve mil/boru (x yönünde) sızdırmazlık elemanına temas etmeyecek şekilde ötelenir.



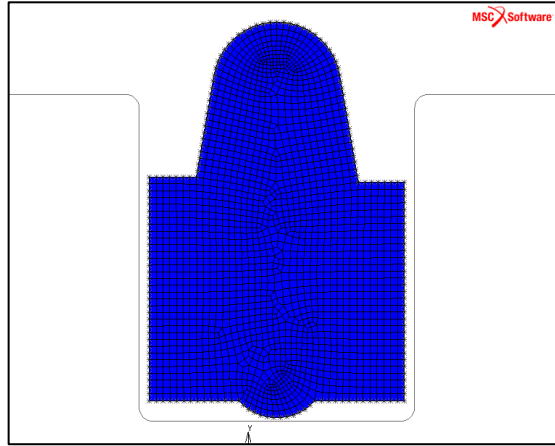
Şekil 3.15 Ürün, kanal ve milin CAD programındaki görüntüsü

Hazırlanan Msc Marc programına .dwg formatı ile aktarılır. Aktarım sırasında ürün ve kanal tasarım ile beraberinde gelen fazla nokta ve çizgiler temizlenir. Ardından tasarım merkez noktası taşınır. Daha sonra Curve Divisions tıklanarak sızdırmazlık elemanlarının sınır çizgileri seçilerek istenilen ölçüde bölünür.



Şekil 3.16 Analizi yapılacak ürün geometrisinin kenarlarının bölünmesi

Planar sekmesinin tıklanması ile açılan pencereden Quad Mesh seçeneği ile sızdırmazlık elemanı meshlenmiş olur.



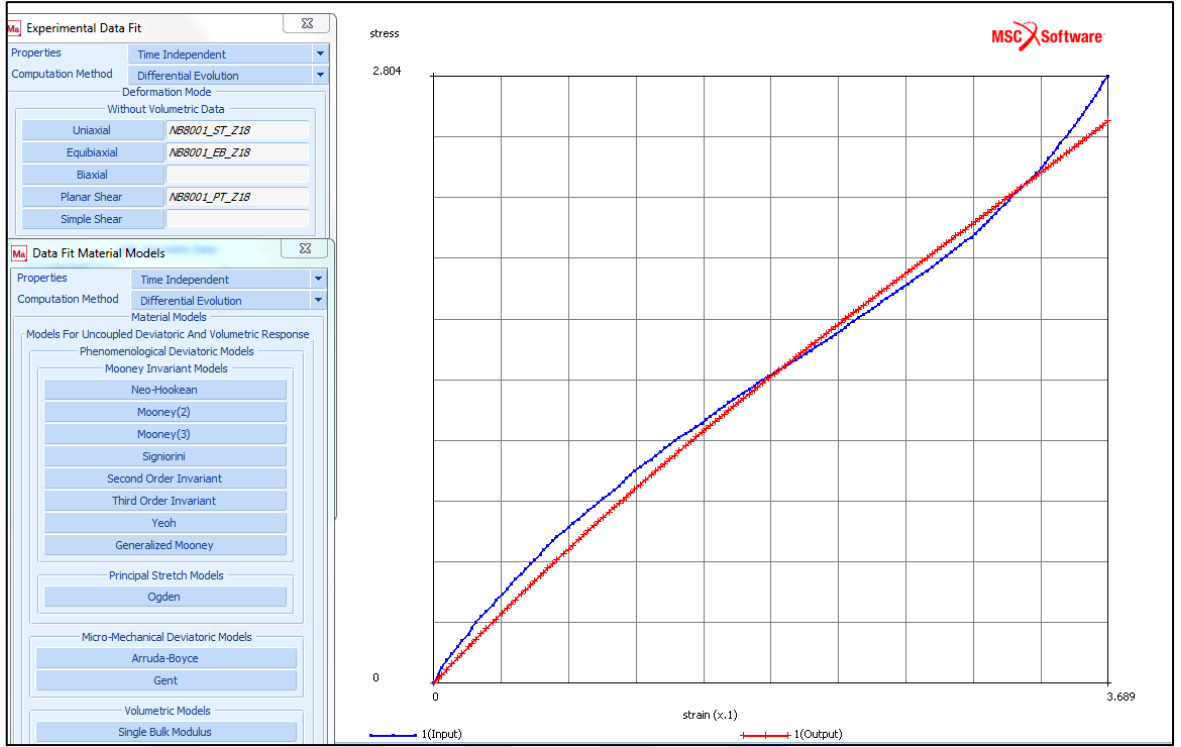
Şekil 3.17 Meshlenmiş sızdırmazlık elemanı görüntüsü

3.3.2.2. Tablolar ve Koordinat Sistemi

Testi gerçekleştirilen malzemenin verileri programa aktarılır. Bu bölümde analiz kurgusunda büyük önem taşıyan diğer bir işlemde sızdırmazlık elemanının çalışma koşulları olan hareket ve basıncı zaman koşuluna bağlanılır. Zamana bağlı tablo seçilerek basınç veya kanal, rod, mil hareketlerinin saniyelere göre değişimi tanımlanır. Örnek olarak Add 0 0 yazılırsa 0. Saniyede tanımlanan değer deaktif olacağı, ardından Add 1 1 yazılırsa 1. Saniyeye kadar değer lineer olarak artacağı anlamına gelir.

3.3.2.3 Geometri ve Malzeme Özellikleri

2 boyutlu olarak gerçekleştirilen bu analizlerde geometri asimetric olarak tanımlanır. Testi yapılacak olan malzemenin test verileri açılan pencereden uniaxial, biaxial, planar shear karşılığı olacak şekilde programa yüklenen malzeme test verilerinin tabloları seçilir. Aynı pencereden Oden Malzeme Modeli seçiminin ardından tüm dataların ve pozitif katsayıların kullanımı seçilerek malzeme modeli oluşturulur. Daha sonra oluşturulan malzeme modelinin uygulanacağı elemanlar seçilir.

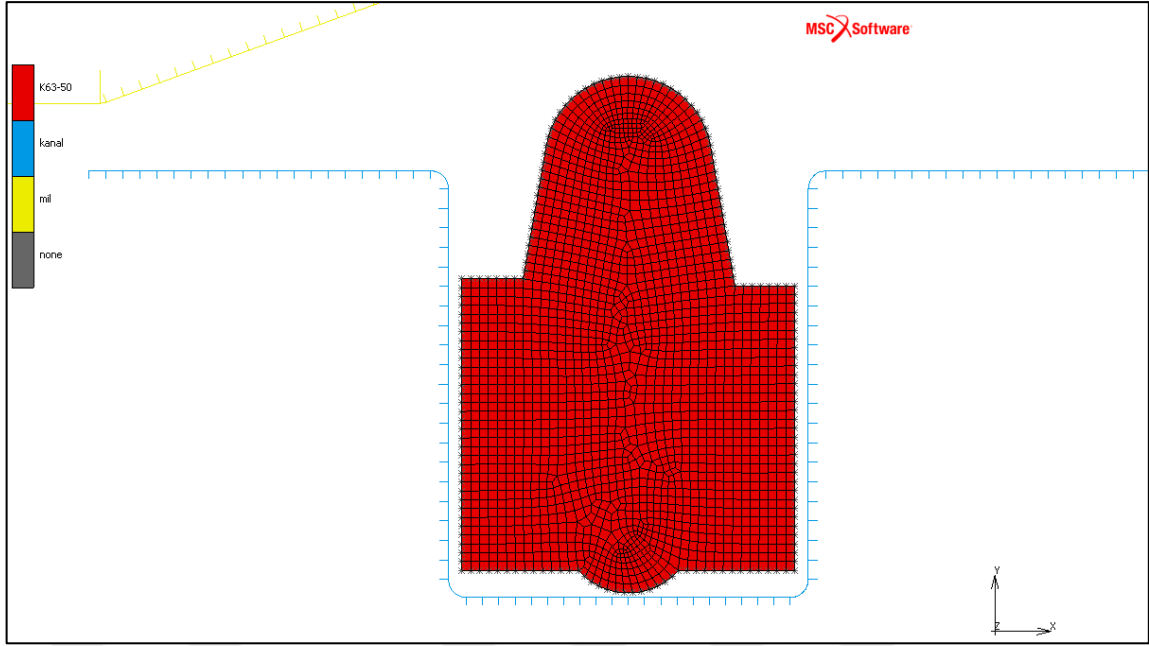


Şekil 3.18 Test verilerinin ve montajlama kurgusunun girilmesi

3.3.2.4. Kontaklar

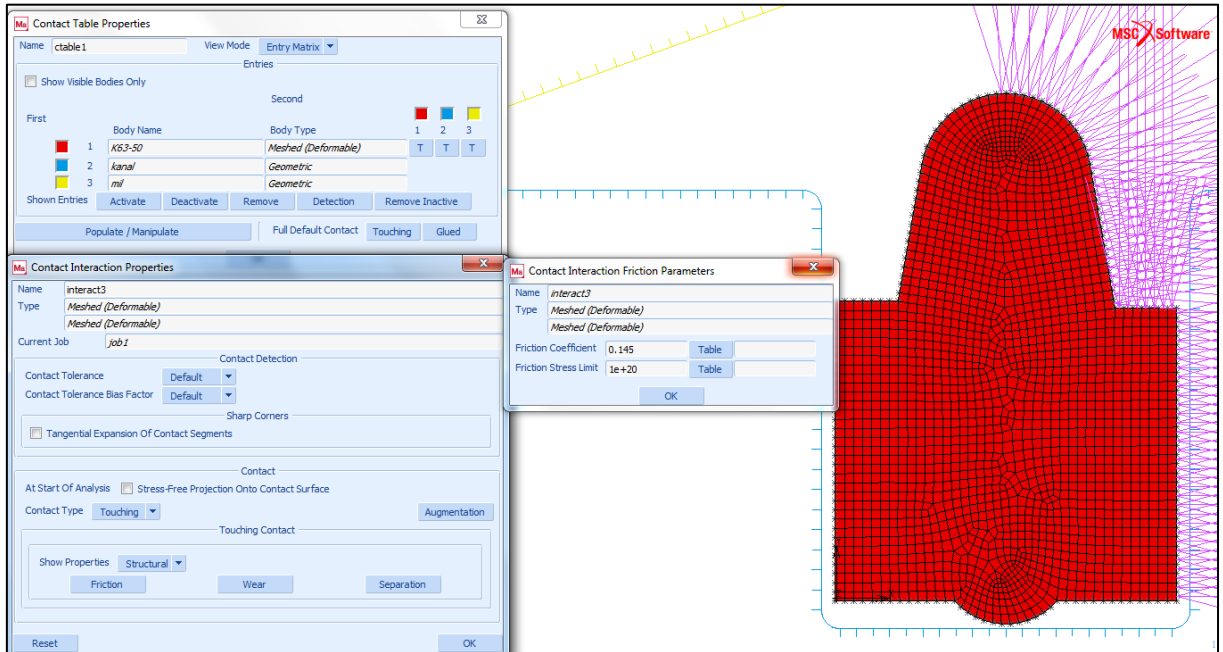
Ürün ve ürünün temas halinde olduğu kanal, boru ve mil gibi yapılar tanımlanır. Bu yapılar tanımlanırken ürün deforme edilebilinen seçilirken diğer yapılar rijit kabul edilmektedir. Tanımlama yapıldıktan sonra rijit parçaların temas yüzeylerinin düz, iç yüzeyler çizgili olacak şekilde ayarlanmalıdır.

Rijit elemanların sızdırmazlık elemanı temassız analiz başlangıcı gerçekleştirebilmek için x ve y yönünde kaydırmıştık. Tanımlanan rijit temas elemanının özelliklerine girilerek x ve y yönünde daha önce yapılan kaydırma işleminin tersi değer girilir (x için -x; y için -y gibi); ve bu konum değişimi zaman tablosu oluşturularak bu tablolara bağlanır.



Şekil 3.19 Sızdırmazlık elemanının ve montaj parçalarının tanımlanması

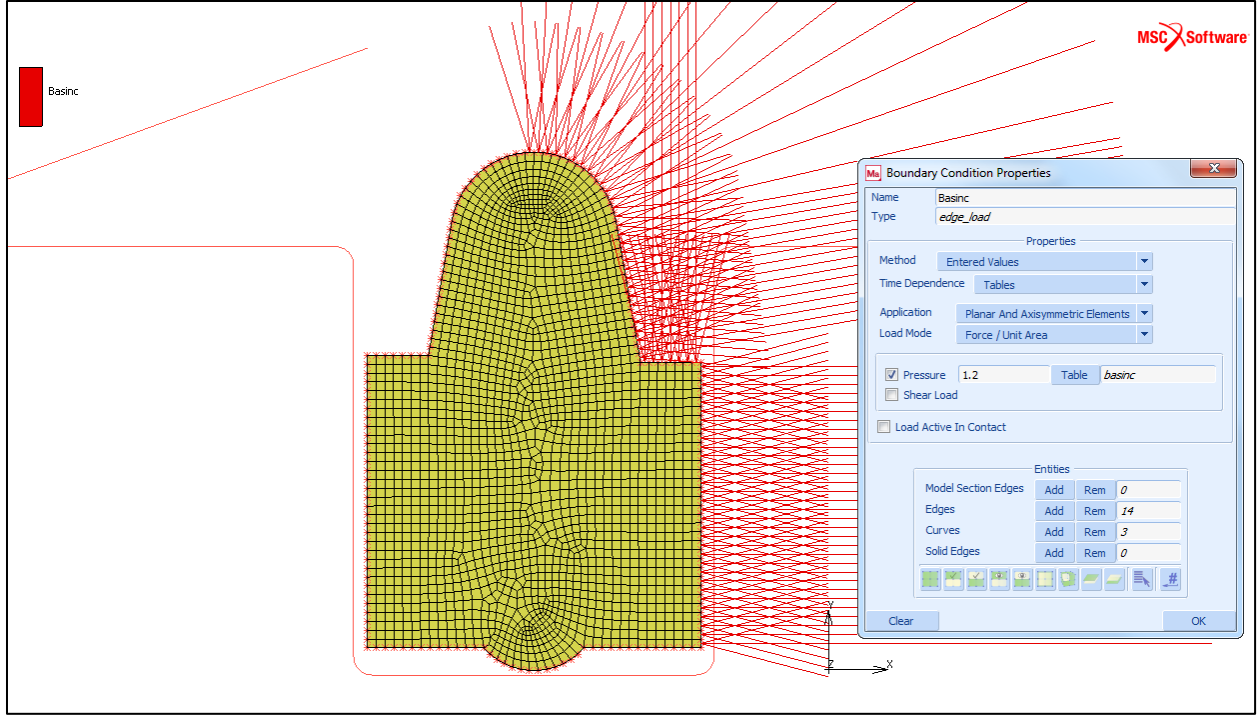
Tanımlanan temas elemanlarının temas koşulları ve sürtünme kuvvetlerini belirlemek için Contact Body ilişkileri girilir ve yeni bir temas koşulu gerekiyorsa yaratılır. Bu ilişkileri girerken ürünün çalışacağı koşullara ve ürün tipine göre temas tipi belirlenir ve sürtünme katsayısı girilir.



Şekil 3.20 Temas koşulları ve sürtünme kuvvetlerinin girilmesi

3.3.2.5. Sınır Şartları

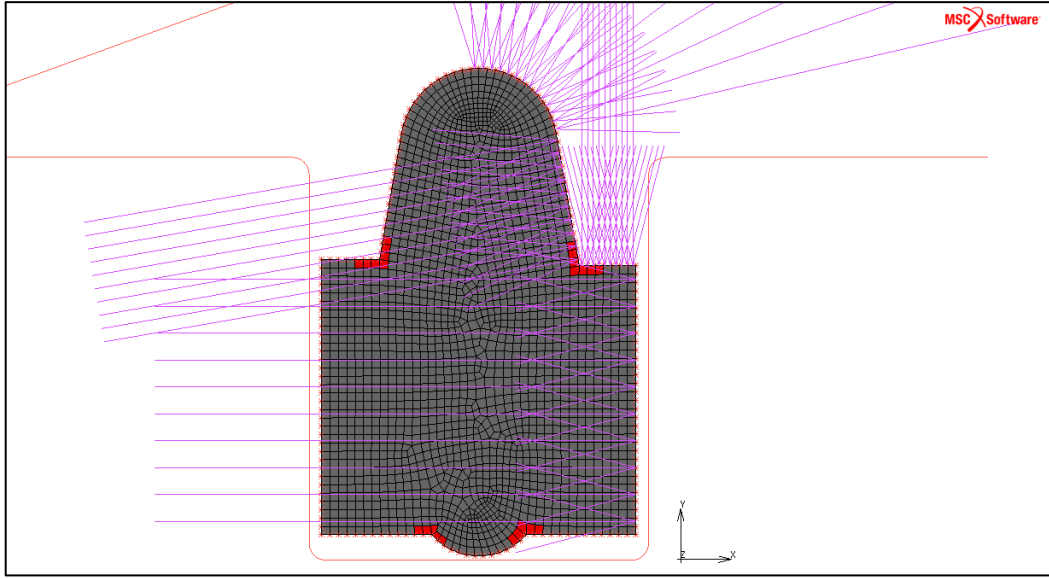
Pnömatik sızdırmazlık elemanı üzerinde uygulanacak basınç kuvveti 1.2 MPa (12 bar) olarak girilip, basınç-zaman tablosuna bağlanır. Ardından basınç kuvvetinin uygulanacağı yüzeyler, eleman sınırları veya çizgiler seçilerek belirlenir.



Şekil 3.21 Sınır koşulları

3.3.2.6. Mesh Adaptivity

Analiz sonucu için kritik olan bölgelerde meshlerin yoğunluğunun artırılması isteniyorsa veya sızdırmazlık elemanın analiz sırasında aşırı deformasyona uğraması öngörülüyorsa Mesh Adaptivity kullanılır. Mesh Adaptivity sızdırmazlık elemanının bir kısmına veya tamamına uygulanabilmektedir.

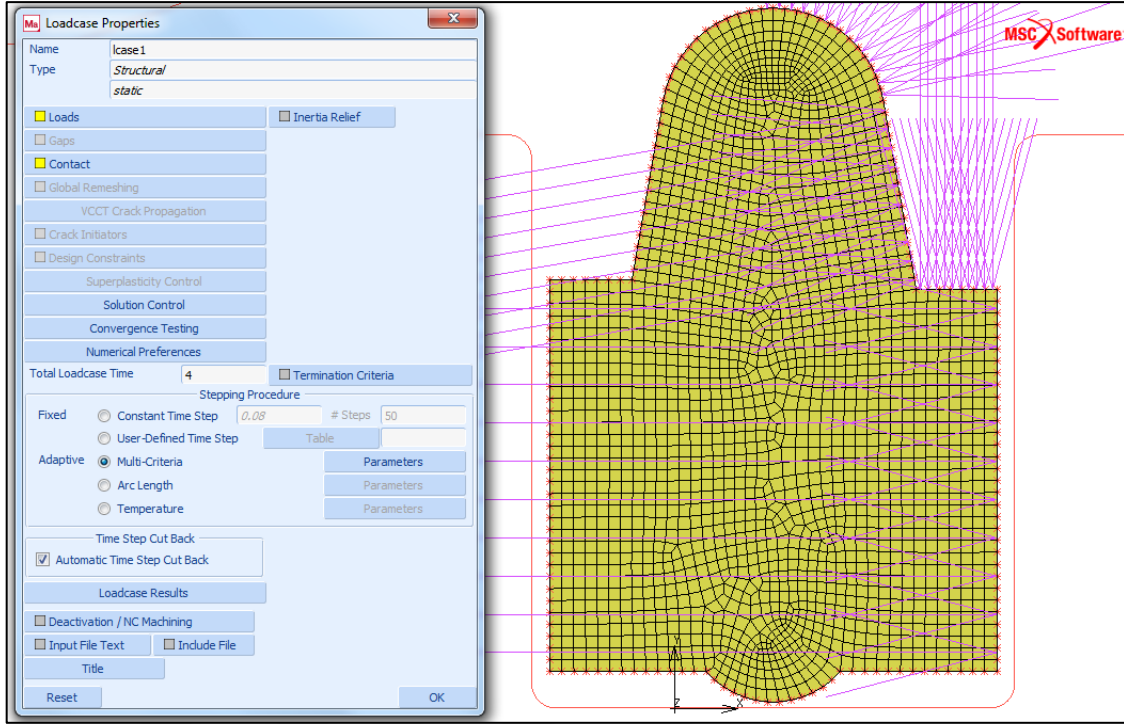


Şekil 3.22 Mesh Adaptivity tanımlama

3.3.2.7. Yükleme Durumu

Yükleme durumu kısmında tanımlanan boundary conditionlardan ve kontak tabolarından hangilerinin aktif olacağı belirlenir. Global Remeshing kısmından eğer var ise tanımlanan Global Remeshing Criteria aktif edilebilir.

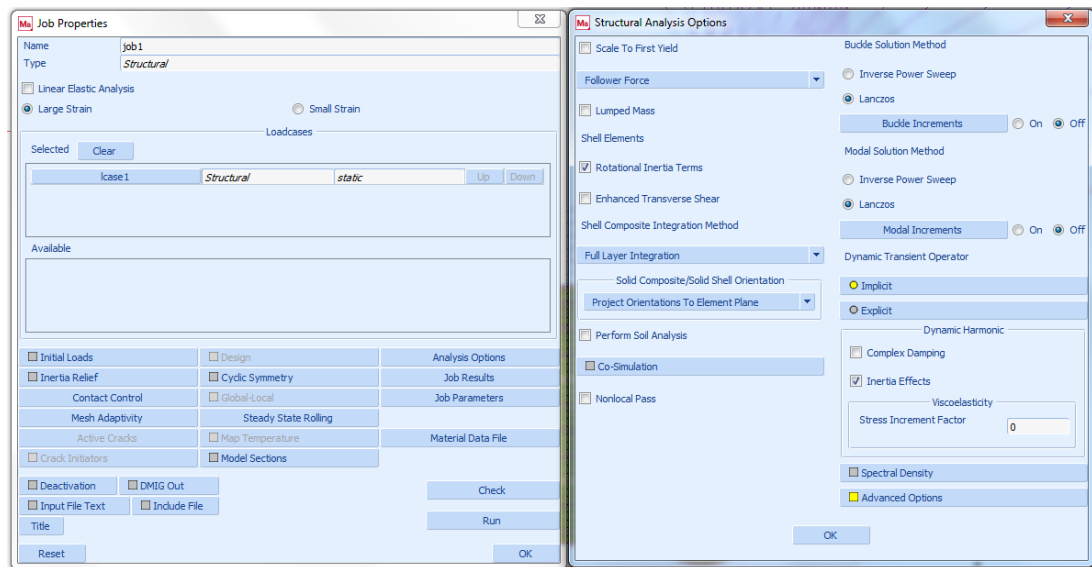
Çözümdeki maks. Increment sayısı, bir incrementtaki maks iterasyon sayısı ve bir iterasyondaki min iterasyon sayısı gibi çözüm kontrolleri bu bölümde belirlenir. Buna ek olarak analizin kaç saniye süreceği ve incrementların zaman aralıkları da yine bu kısımda belirlenmektedir.



Şekil 3.23 Yükleme durumu

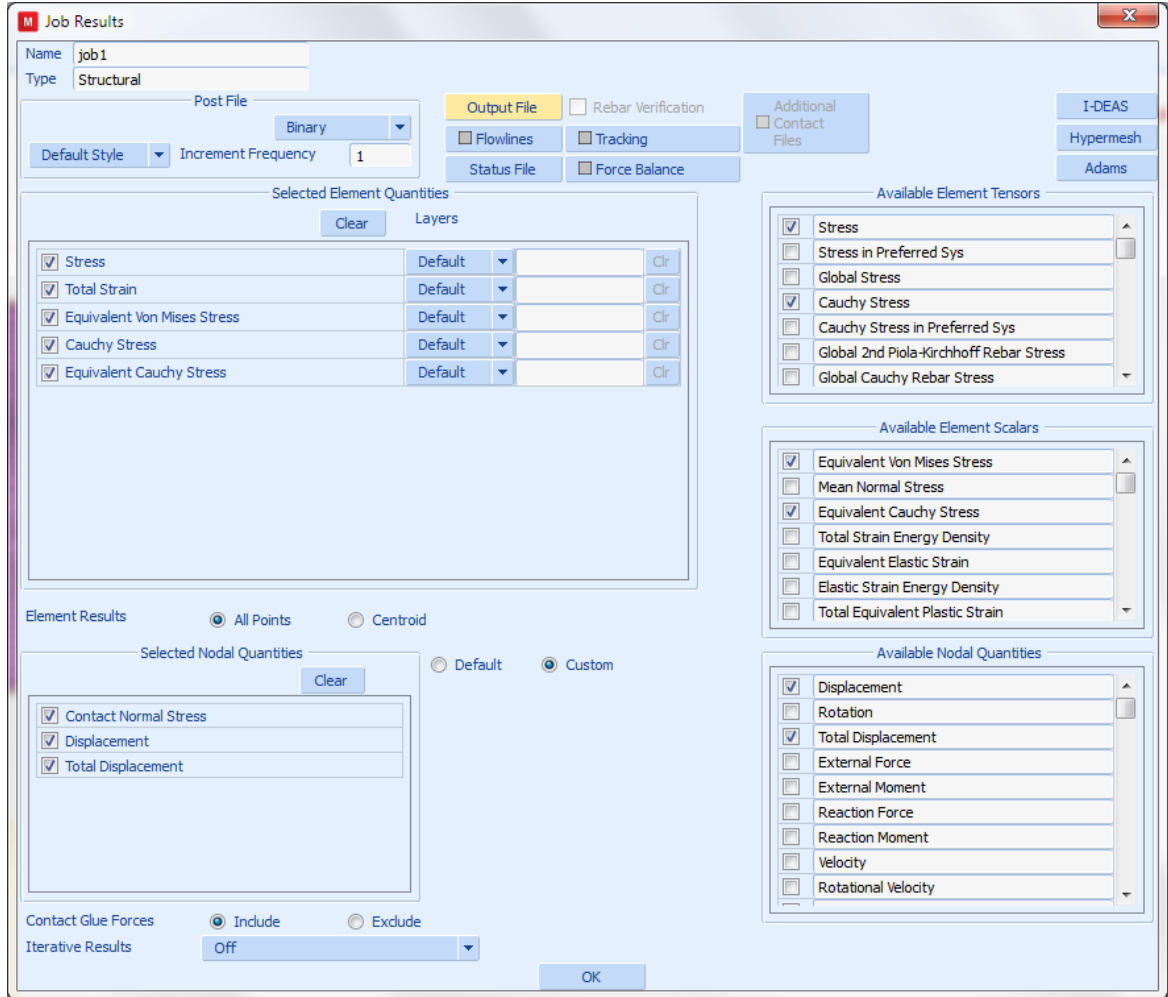
3.3.2.8. Analiz Özellikleri

Analizin temel kurgusu ve hangi sonuçların hesaplanması gerektiği bu bölümde yapılmaktadır. Elastomerlerin doğrusal olmayan davranışı sebebiyle “Linear Elastic Analysis” seçeneği kapatılır ve çalışması istenilen Loadcaseler bu bölümde aktif edilir.



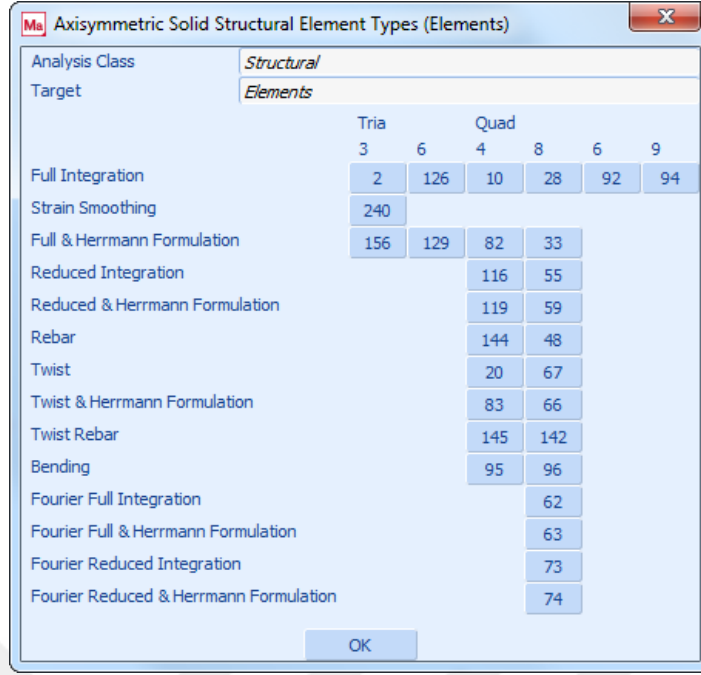
Şekil 3.24 Analiz özellikleri.

Analizde kullanılan malzeme özelliği bakımından non-linear olduğu için Large Strain ve Follower Force'un aktif edilmesi önemlidir. Analiz sırasında çözülmesi hesaplanılması istenilen değerler seçilir. Sık olarak bulunması istenilen değerler Şekil 3.25'te gösterilmiştir.



Şekil 3.25 Hesaplanması istenen çıktılar.

NRB karışımı sıkıştırılmayan yapı olduğu için tüm elemanlar Full & Herrmann Formulation olarak tanımlanır.



Şekil 3.26 Eleman tipi.

Tüm ayarlamalar tamamlandıktan sonra Jobs penceresinden Run sekmesine tıklanır ve analiz çözümü başlatılır.

4. SONUÇLAR VE BULGULAR

Bu çalışmada, yüksek aşınma direnci ve kimyasal dayanımından dolayı birçok alanda kullanılan NBR kauçuk, bütadien kauçuk karışımı kullanılmıştır. Hazırlanan NBR kauçuk karışımları 2, 4 ve 6 phr grafit, grafen ve KNT içermektedir. NBR karışımlarında güçlendirici katkı maddelerinin çeşit ve oranlarının etkisi incelenmesi amaçlandığı için dolgu maddesi, aktivatör, antioksidant, proses yardımcısı ve vulkanizasyon sistemleri sabit tutulmuştur.

Çalışmada grafit, grafen ve KNT ilavesi olmayan NBR kauçuk hamur karışımının test cihazından alınan mekanik özellikleri üzerine etkisi incelenmiştir. Ayrıca NBR kauçuk içerisinde grafit, grafen ve KNT ilavesinin mukavemet dayanımı, sertlik reolojik, kopma dayanımı ve kopma uzaması üzerine etkisi incelenmiştir. Ayrıca farklı grafit, grafen ve KNT oranlarının etkisi tez sonucunda ortaya konulacaktır. Grafit, grafen ve KNT içeren ve içermeyen NBR kauçuk karışımlarına ait test sonuçları ayrıntılı olarak aşağıda verilmiştir.

4.1 Reometre Test Sonuçları

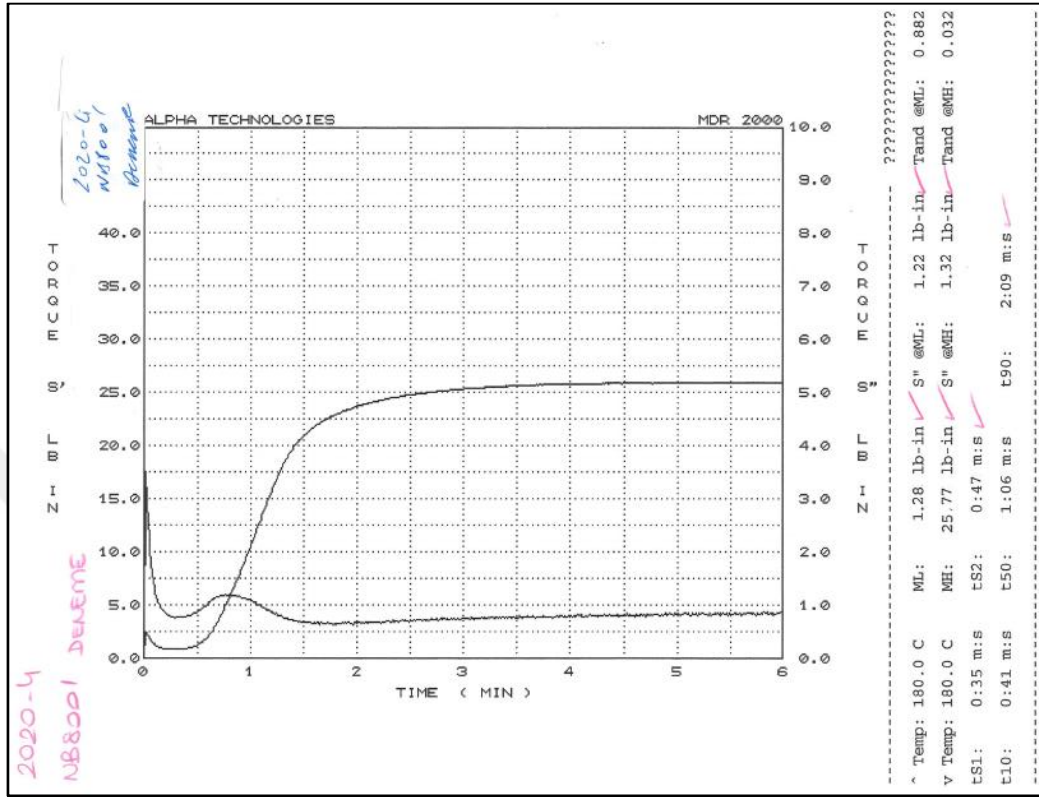
NBR kauçuk karışımlarının vulkanizasyon sırasında değişen reolojik özelliklerini incelemek için yaklaşık 3 gr test numuneleri, Alpha MDR 2000 Model test cihazında test edilmiştir. Bu test, kauçuk hamurun vulkanizasyon değişkenlerini kontrol etme, hazırlanan karışıma özgü olarak vulkanizasyon ve işlenebilirlik şartlarını belirleme açısından çok önemlidir. Grafit, grafen ve KNT katkılı NBR ile katkısız NBR kauçuklarının rheometre test sonuçları Tablo 6.1, 6.2, 6.3 ve 6.4’de verilmiştir.

4.1.1 NB80 Reometre Testi Sonuçları – Katkısız

Tablo 4.1: NB80 Reometre Testi Sonuçları – Katkısız

Test Parametreleri	Birimi	NB8001
s'@MH	lb-in	25,77
s'@ML	lb-in	1,28
s"@MH	lb-in	1,32
s"@ML	lb-in	1,22
ts2	sn	00:47
t90	sn	02:09

Test sonuçlarına göre referans olarak kullanılacak katkı ilavesi yapılmadan hazırlanan NB80 kauçuk karışımın maksimum torku (MH) 25.77 lb-in iken optimum pişme süresi olan t90 değeri 02:09 sn'dir. Zamana bağlı olarak tork değerlerindeki değişimin kaydedildiği vulkanizasyon eğrisi Şekil 4.1'de verilmiştir.



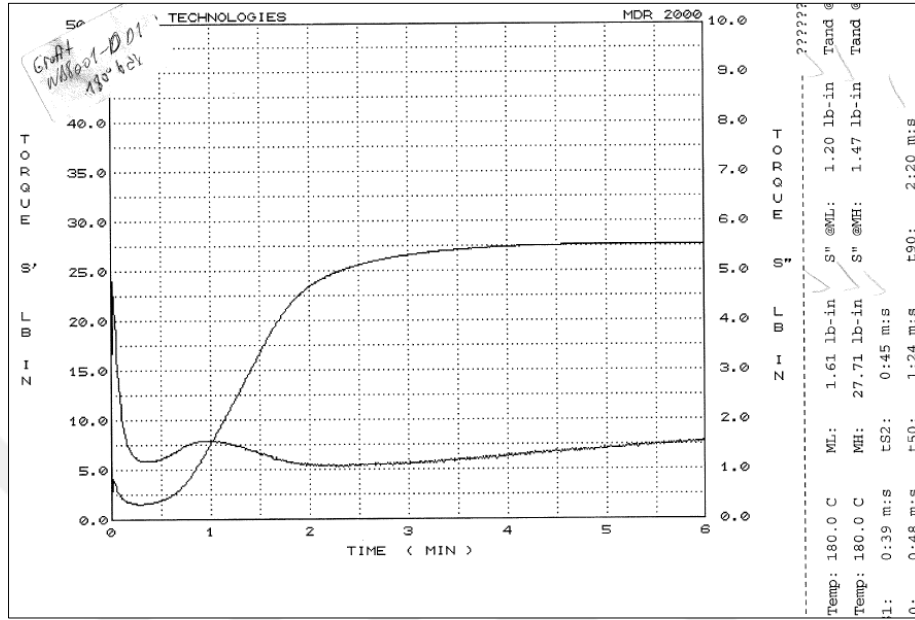
Şekil 4.1 NB80 Reometre Testi Sonuçları – Katkısız.

4.1.2 NB80 Reometre Testi Sonuçları – Grafit

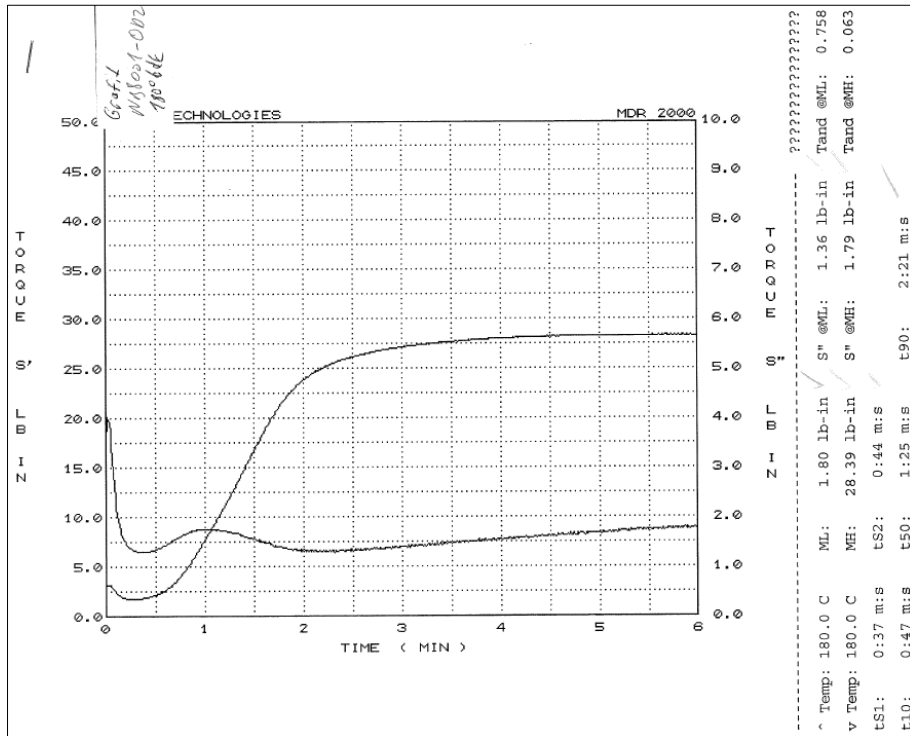
Tablo 4.2: NB80 Reometre Testi Sonuçları – Grafit

Test Parametreleri	Birimi	2 phr	4 phr	6 phr
s'@MH	lb-in	27,71	28,39	28,17
s'@ML	lb-in	1,61	1,8	1,7
s''@MH	lb-in	1,47	1,79	1,7
s''@ML	lb-in	1,20	1,36	1,46
ts2	sn	00:45	00:44	00:45
t90	sn	02:20	02:21	02:19

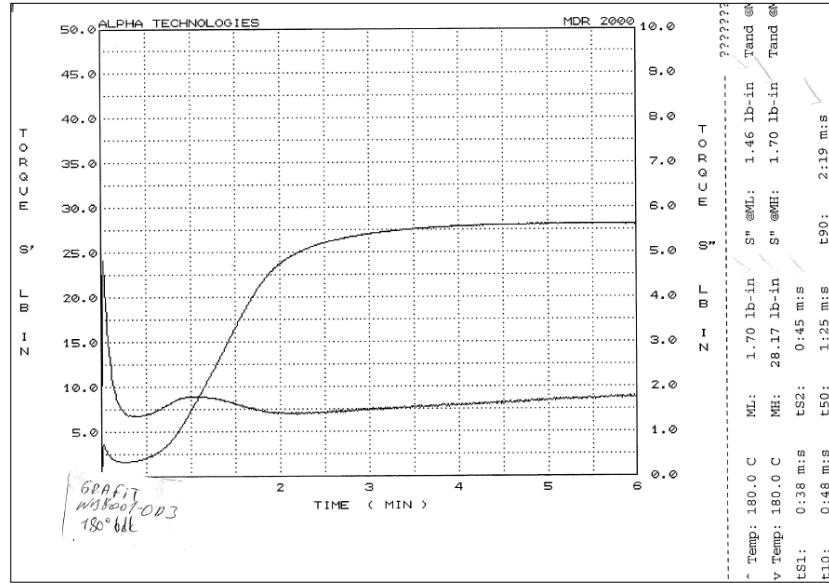
2, 4 ve 6 phr grafit eklenerek hazırlanan NB80 kauçuk karışım üzerinde yapılan test sonuçlarına göre maksimum torku (MH) sırasıyla 27.71, 28.39 ve 28.17 lb-in iken optimum pişme süresi olan t90 değeri ise sırasıyla 02:20, 02:21 ve 02:19 sn'dir. Zamana bağlı olarak tork değerlerindeki değişimin kaydedildiği vulkanizasyon eğrisi Şekil 4.2'de aşağıda verilmiştir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 4.2 NB80 Reometre Testi Sonuçları – Grafit: a) 2 phr, b) 4phr, c) 6phr.

Grafit ilaveli karışımın test sonuçları referans olarak belirlenen ilave edilmeyen karışım ile kıyaslandığında grafit ilavesi ile kauçuk malzemenin termal iletkenliği arttığı için vulkanizasyon süresi grafit ilavesi ile azalmıştır. Kauçuk numunede vulkanizasyonun başladığı zaman olan ts2 (scorch) süresi grafit içermeyen kontrol numunesinde 0.47 iken 2,4 ve 6phr grafit içeren numunelerde ısırasıyla 0.45, 0.44 ve 0.45 dakikadır. Benzer şekilde pişmenin % 90'ının tamamlandığı ts90 süresi de grafit ilavesi ile azalmıştır.

Grafit katkısının oransal olarak değerlendirilmesi yapıldığında ise sonuçlar 4phr'da artan MH ve t90 değerinde artış olmasına karşın bu değerler 2 phr ve 6phr ilaveler yapılan karışımda bu değerlerde düşüş gözlemlenmiştir.

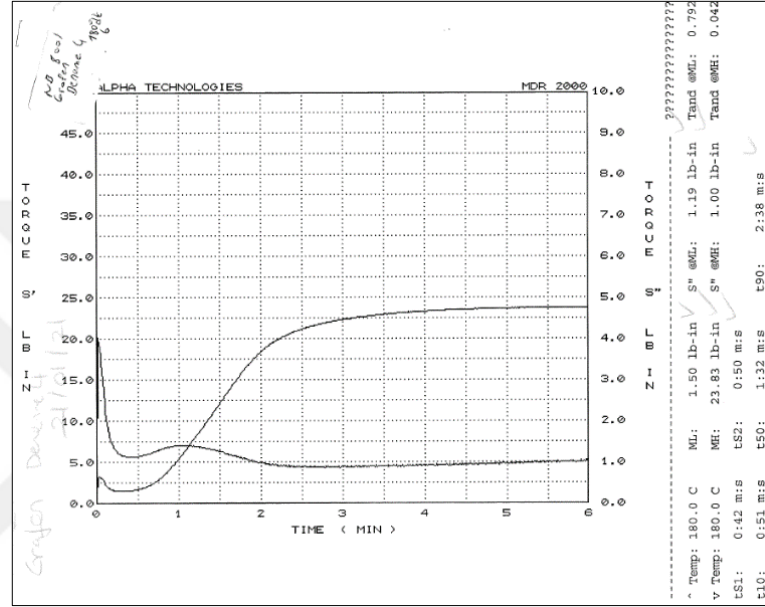
4.1.3 NB80 Reometre Testi Sonuçları – Grafen

Tablo 4.3: NB80 Reometre Testi Sonuçları – Grafen

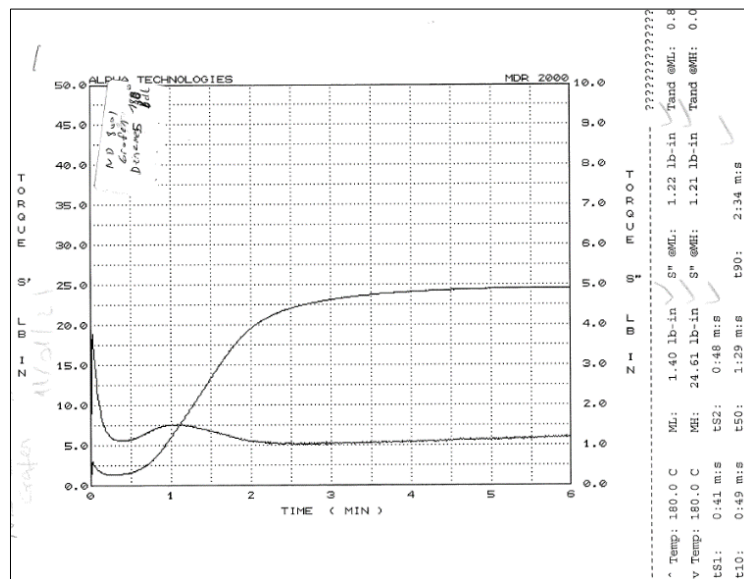
Test Parametreleri	Birimi	2 phr	4 phr	6 phr
s'@MH	lb-in	23,83	24,61	24,06
s'@ML	lb-in	1,5	1,4	1,45
s''@MH	lb-in	1	1,21	1,17
s''@ML	lb-in	1,19	1,22	1,24

ts2	sn	00:50	00:48	00:49
t90	sn	02:18	02:34	02:36

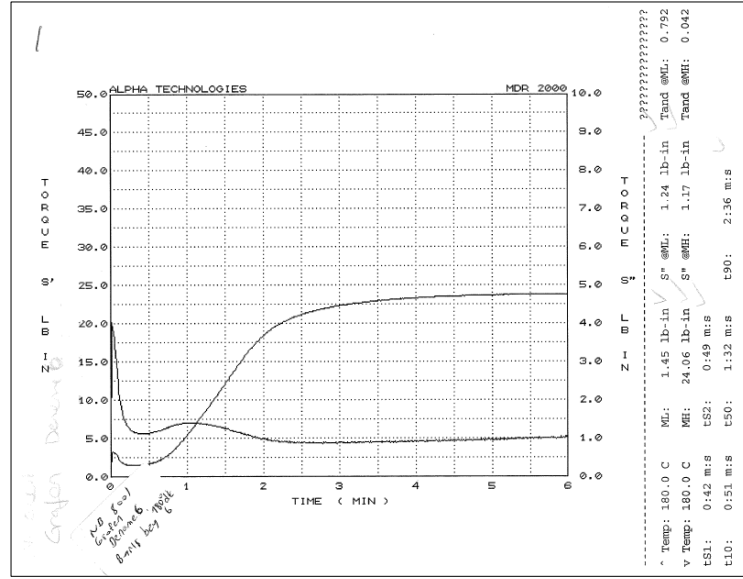
2, 4 ve 6 phr grafen eklenerek hazırlanan NB80 kauçuk karışım üzerinde yapılan test sonuçlarına göre maksimum torku (MH) sırasıyla 23.83, 24.61 ve 24.06 lb-in iken optimum pişme süresi olan t90 değeri ise sırasıyla 02:38, 02:34 ve 02:36 sn'dir. Zamana bağlı olarak tork değerlerindeki değişimin kaydedildiği vulkanizasyon eğrisi Şekil 6.3'de aşağıda verilmiştir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 4.3 NB80 Reometre Testi Sonuçları – Grafen: a) 2 phr, b) 4phr, c) 6phr.

Grafen ilaveli karışımın test sonuçları referans olarak belirlenen ilave edilmeyen karışım ve grafit ilaveli karışım ile kıyaslandığında grafen ilavesi kauçuk malzemenin termal iletkenliğini grafitten daha çok arttığı için vulkanizasyon süresi azalmıştır. Kauçuk numunede vulkanizasyonun başladığı zaman olan ts2 (scorch) süresi grafit içermeyen kontrol numunesinde 0.47 iken 2,4 ve 6phr grafit içeren numunelerde ısrasıyla 0.45, 0.44 ve 0.45 dakikadır. Benzer şekilde pişmenin % 90'ının tamamlandığı ts90 süresi de grafit ilavesi ile azalmıştır.

Grafen katkısının oransal olarak değerlendirilmesi yapıldığında ise sonuçlar 4phr'da artan MH ve t90 değerinde artış olmasına karşın bu değerler 2 phr ve 6phr ilaveler yapılan karışımda bu değerlerde düşüş gözlemlenmiştir.

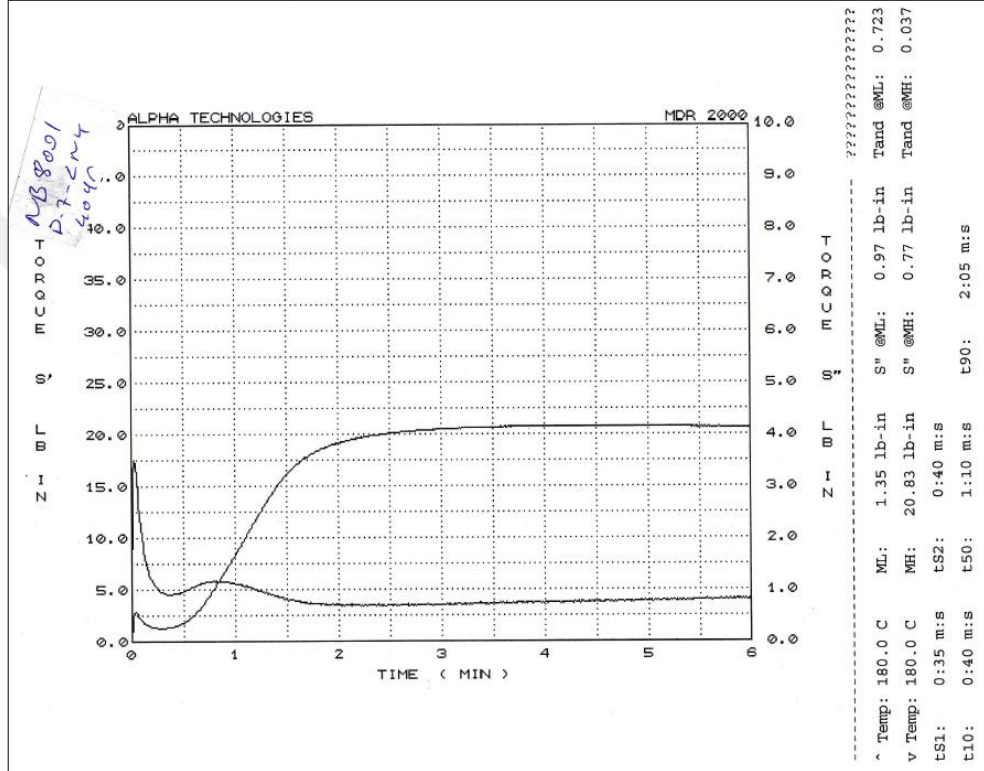
4.1.4 NB80 Reometre Testi Sonuçları – KNT

Tablo 4.4: NB80 Reometre Testi Sonuçları – KNT

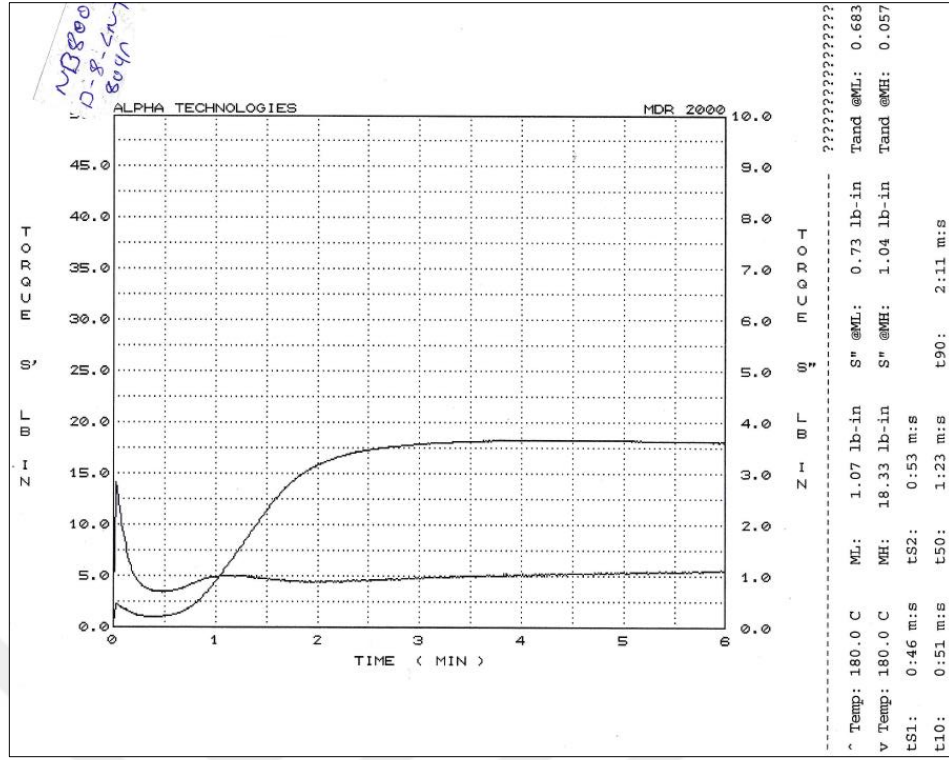
Test Parametreleri	Birimi	2 phr	4 phr	6 phr
s'@MH	lb-in	20,83	18,33	18,96
s'@ML	lb-in	1,35	1,07	1,16
s"@MH	lb-in	0,77	1,04	0,87
s"@ML	lb-in	0,97	0,73	0,8

ts2	sn	00:40	0.53	00:48
t90	sn	02:05	02:11	02:04

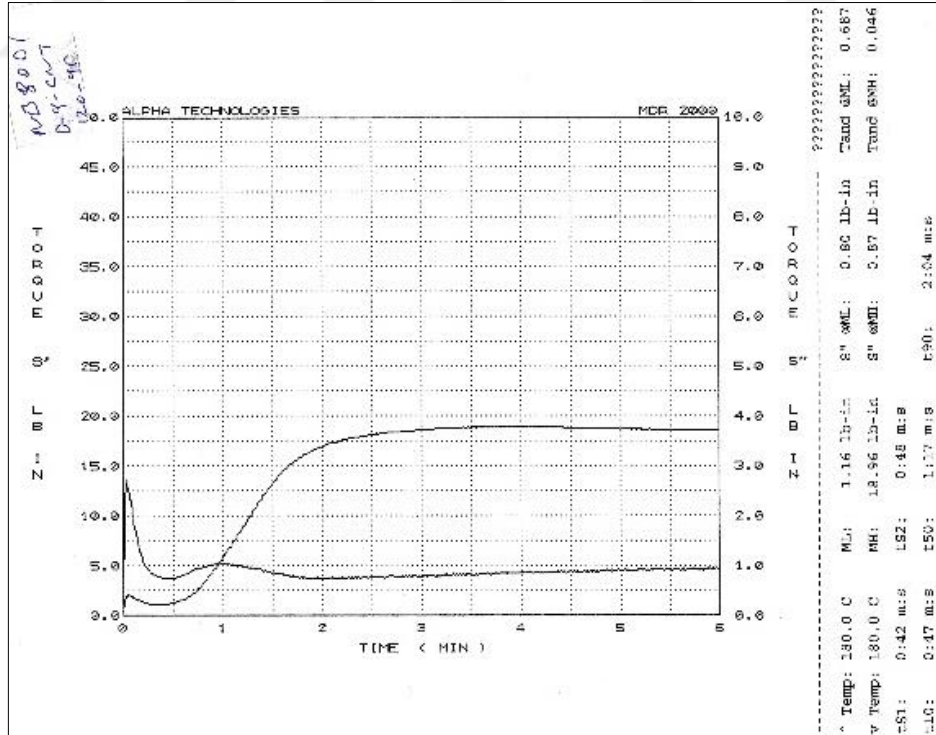
2, 4 ve 6 phr KNT eklenerek hazırlanan NB80 kauçuk karışım üzerinde yapılan test sonuçlarına göre maksimum torku (MH) sırasıyla 23.83, 24.61 ve 24.06 lb-in iken optimum pişme süresi olan t90 değeri ise sırasıyla 02:38, 02:34 ve 02:36 sn'dir. Zamana bağlı olarak tork değerlerindeki değişimin kaydedildiği vulkanizasyon eğrisi Şekil 6.3'de aşağıda verilmiştir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 4.4 NB80 Reometre Testi Sonuçları – KNT: a) 2 phr, b) 4phr, c) 6phr.

KNT ilaveli karışımın test sonuçları referans olarak belirlenen ilave edilmeyen karışım ve grafit ilaveli karışım ile kıyaslandığında KNT ilavesi kauçuk malzemenin termal iletkenliğini grafitten daha çok arttığı için vulkanizasyon süresi azalmıştır. Kauçuk numunede vulkanizasyonun başladığı zaman olan ts2 (scorch) süresi grafit içermeyen kontrol numunesinde 0.47 iken 2,4 ve 6phr grafit içeren numunelerde sırasıyla 0.45, 0.44 ve 0.45 dakikadır. Benzer şekilde pişmenin % 90'ının tamamlandığı ts90 süresi de grafit ilavesi ile azalmıştır.

CNT katkısının oransal olarak değerlendirilmesi yapıldığında ise sonuçlar 4phr'da artan MH ve t90 değerinde artış olmasına karşın bu değerler 2 phr ve 6phr ilaveler yapılan karışımda bu değerlerde düşüş gözlemlenmiştir.

4.2 Çekme Testi Sonuçları

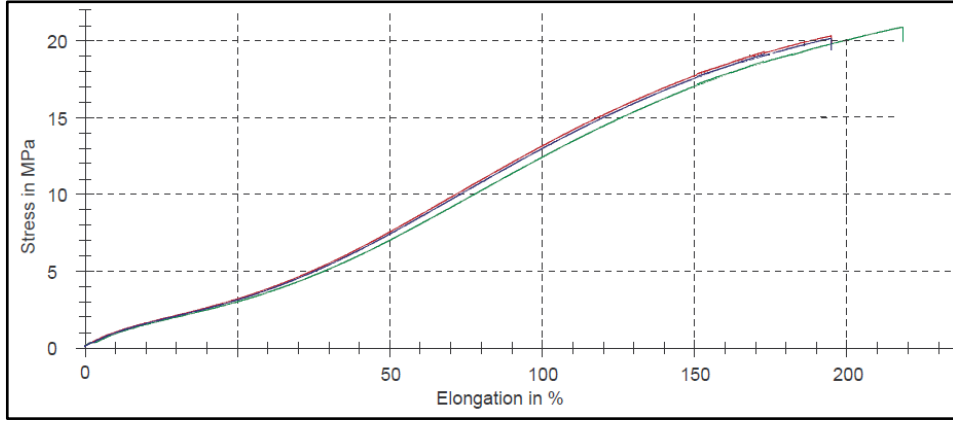
NBR kauçuk matrisinde, grafit, grafen ve KNT katkılılarının 2, 4 ve 6 phr oranında ilave edilmesiyle hazırlanan hamur ve ilavesiz hazırlanan kauçuk karışımlarının kopma testleri yapılmıştır. 3 farklı numune ile gerçekleştirilen test sonuçları Tablo 6.4, Tablo 6.5, Tablo 6.6 ve Tablo 6.7'de verilmiştir.

4.2.1 NB80 Çekme Testi Sonuçları – Katkısız

Tablo 4.5: NB80 Çekme Testi Sonuçları – Katkısız

Test Parametreleri	Birimi	NB8001
Kopma Dayanımı	MPa	20,33
Kopma Uzaması	MPa	220,00

İyileştirmenin veya değişimin gözlemleneceği referans olarak katkı ilavesi yapılmadan hazırlanan NB80 kauçuk karışım üzerinde yapılan testin sonuçlarına göre çekme dayanımı 20.33 MPa iken çekme uzaması %220,0'dır. Şekil 6.3 de çekme-uzama grafiğini görmektedir.



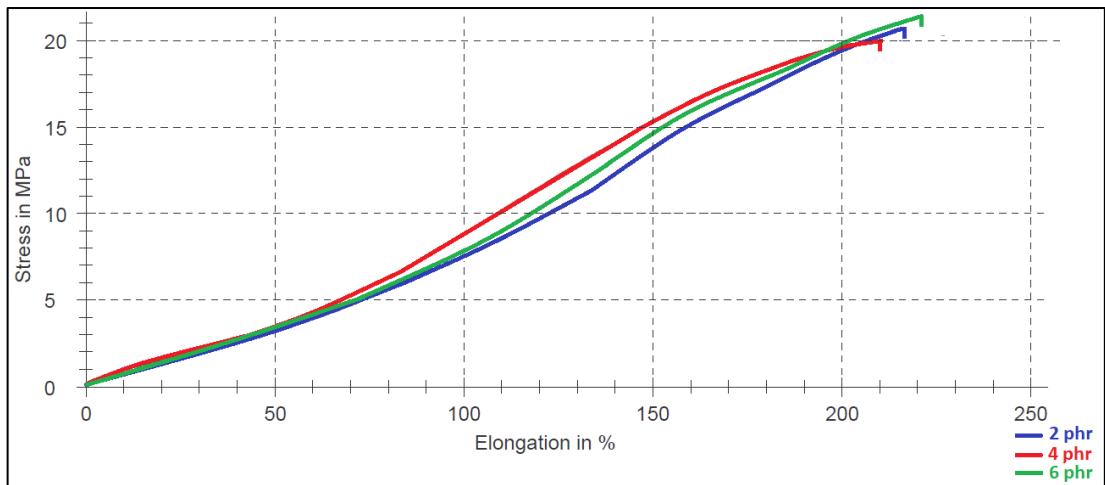
Şekil 4.5 NB80 kopma uzama grafiği.

4.2.2 NB80 Çekme Testi Sonuçları – Grafit

Tablo 4.6: NB80 Çekme Testi Sonuçları – Grafit

Test Parametreleri	Birimi	2 phr	4 phr	6 phr
Kopma Dayanımı	MPa	21,43	20,90	23,53
Kopma Uzaması	MPa	216,33	210,33	218,67

Test sonuçlarına göre 2, 4 ve 6 phr grafit ilavesi yapılarak hazırlanan NB80 kauçuk karışımın çekme dayanımı sırasıyla 21.43, 20.90 ve 23.53 MPa iken çekme uzaması ise sırasıyla %216.33, %210.33 ve %218.67'dir. Grafit katkılı kontrol numunesinin çekme-uzama grafiği Şekil 6.4 de verilmiştir.



Şekil 4.6 NB80-Grafit eklemeli kopma uzama grafiği

Grafit ilaveli karışımın test sonuçları referans karışım ile kıyaslandığında grafit ilavesi ile kauçuk malzemenin kopma dayanımında artış gözlemlenirken kopma uzamasında bir düşüş gözlemlenmektedir.

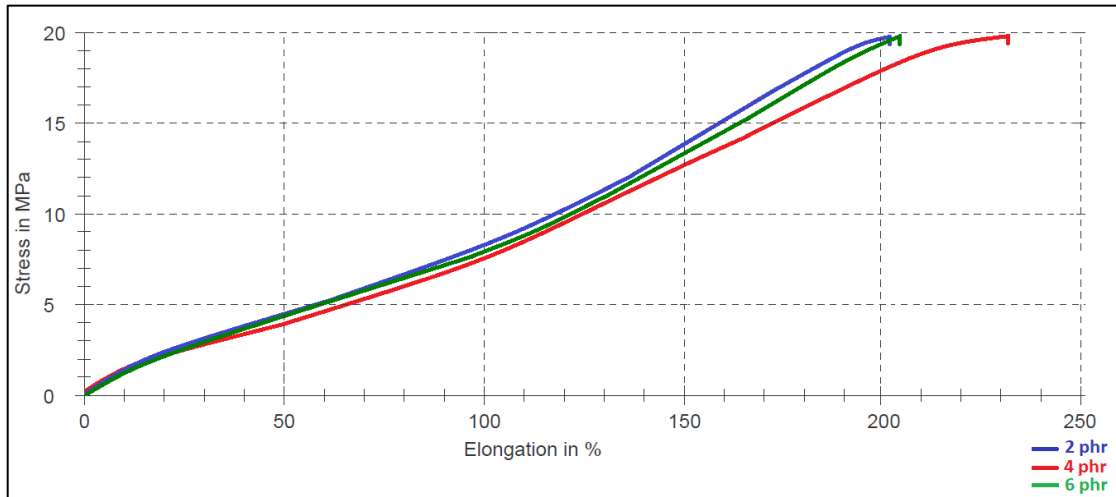
Grafit katkısının oransal olarak değerlendirilmesi yapıldığında ise sonuçlar 4phr'da kopma dayanımı ve kopma uzması değerinde düşüş olmasına karşın bu değerler 2 phr ve 6phr ilaveler yapılan karışımda bu değerlerde artış gözlemlenmiştir. Sonuçlar genel olarak incelendiğinde 6phr grafit katkısı mekanik özelliklerde referans karışıma göre iyileştirme göstermiştir.

4.2.3 NB80 Çekme Testi Sonuçları – Grafen

Tablo 4.7: NB80 Çekme Testi Sonuçları – Grafen

Test Parametreleri	Birimi	2 phr	4 phr	6 phr
Kopma Dayanımı	MPa	19,90	19,90	19,90
Kopma Uzaması	MPa	201,67	229,00	203,84

Test sonuçlarına göre 2, 4 ve 6 phr grafen ilavesi yapılarak hazırlanan NB80 kauçuk karışımın çekme dayanımı 19.90 MPa iken çekme uzaması ise sırasıyla %201.67, %229.00 ve %203.84'dır. Grafen katkılı kontrol numunesinin çekme-uzama grafiği Şekil 4.7 de verilmiştir.



Şekil 4.7 NB80-Grafen eklemeli kopma uzama grafiği.

Grafen ilaveli karışımın test sonuçları referans karışım ve grafit ilaveli karışım ile kıyaslandığında grafen ilavesi kauçuk malzemenin kopma dayanımında ve kopma uzamasında bir düşüş gözlemlenmektedir.

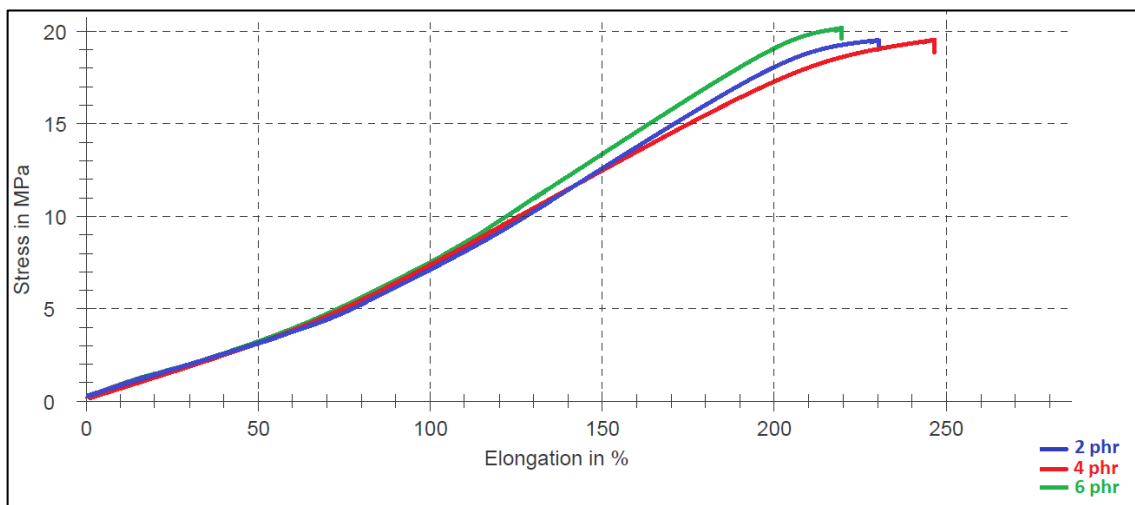
Grafen katkısının oransal olarak değerlendirilmesi yapıldığında ise sonuçlar 4phr'da kopma uzaması değerinde artış olmasına karşın bu değerler 2 phr ve 6phr ilaveler yapılan karışımda bu değerlerde düşüş gözlemlenmiştir. Grafen mekanik özelliklerde bir iyileştirme sağlamamıştır

4.2.4 NB80 Çekme Testi Sonuçları – KNT

Tablo 4.8: NB80 Çekme Testi Sonuçları – KNT

Test Parametreleri	Birimi	2 phr	4 phr	6 phr
Kopma Dayanımı	MPa	19,60	19,60	20,07
Kopma Uzaması	MPa	230,67	247,43	219,33

Test sonuçlarına göre 2, 4 ve 6 phr KNT ilavesi yapılarak hazırlanan NB80 kauçuk karışımın çekme dayanımı 19,60 ve 20,07 MPa iken çekme uzaması ise sırasıyla %201.67, %229.00 ve %203.84'dır. KNT katkılı kontrol numunesinin çekme-uzama grafiği Şekil 4.8 de verilmiştir.



Şekil 4.8 NB80-KNT eklemeli kopma uzama grafiği.

KNT ilaveli karışımın test sonuçları referans karışım, grafit ve grafen ilaveli karışım ile kıyaslandığında KNT ilavesi kauçuk malzemenin kopma dayanımında bir düşüş gözlemlenirken kopma uzamasında artış söz konusudur.

KNT katkısının oransal olarak değerlendirilmesi yapıldığında ise sonuçlar phr arttıkça kopma uzaması değerinde azalma olmasına karşın kopma uzama değeri 2 phr ve 4 phr ilaveli karışımda artarken 6 phr ile ilave yapılan karışımda bu değerde düşüş gözlemlenmiştir. KNT mekanik özelliklerde bir iyileştirme sağlamamıştır.

4.3 Sertlik Sonuçları

Çalışmada katkı ilavesi içermeyen ve grafit, grafen ve KNT içeren NBR kauçuk hamur karışımlarının sertlik değerleri aşağıda verilmiştir.

Tablo 4.9: NB80 Sertlik Testi Sonuçları

Karışım Adı	Test Parametreleri	Birimi	2 phr	4 phr	6 phr
NB80 – Katkısız	Sertlik	Shore A	78,40		
NB80 – Grafit	Sertlik	Shore A	78,67	79,60	80,20
NB80 – Grafen	Sertlik	Shore A	78,27	79,57	79,79
NB80 – KNT	Sertlik	Shore A	78,93	79,80	80,40

Tablo 4.9’da verilen sonuçlar katkı bazında değerlendirildiğinde katkı malzemeleri karışımın sertliğini arttırmıştır. Karışım sertliğini en çok arttıran katkı maddesi KNT olduğu gözlemlenmiştir. Katkı maddelerinin oransal değerlendirilmesi yapıldığında ise oran arttıkça karışımın da sertliği artmaktadır.

4.4 Sıkıştırılabilirlik Testi Sonuçları

Çalışmada katkı ilavesi içermeyen ve grafit, grafen ve KNT içeren NBR kauçuk numunelerin sıkıştırılabilirlik değerleri verilmiştir. Bu değerler aynı test koşullarına maruz kalan hamurların kendilerini toparlayabilme yeteneklerini kıyaslamak için kullanılmaktadır.

Tablo 4.10: NB80 Sıkıştırılabilirlik Testi Sonuçları

Karışım Adı	Test Parametreleri	Birimi	2 phr	4 phr	6 phr
NB80 – Katkısız	Sıkıştırılabilirlik	%	8,62		
NB80 – Grafit	Sıkıştırılabilirlik	%	10,15	11,77	9,24
NB80 – Grafen	Sıkıştırılabilirlik	%	7,20	7,38	6,56
NB80 – KNT	Sıkıştırılabilirlik	%	10,50	11,95	11,57

Tablo 4.10’da verilen sonuçlar katkı bazında değerlendirildiğinde grafit ve KNT katkı malzemeleri karışımın sıkıştırılabilirlik değerini arttırırken grafen bu özelliği olumsuz yönde etkilemiştir. Karışımın sıkıştırılabilirlik özelliğini en çok arttıran katkı maddesi KNT olduğu gözlemlenmiştir. Katkı maddelerinin oransal değerlendirilmesi yapıldığında ise oran arttıkça karışımın sıkıştırılabilirliği de artmaktadır.

4.5 Yaşlandırma Test Sonuçları

Havada ve sıvıda yaşlandırma testleri gerçekleştirilen katkı ilavesi içermeyen ve grafit, grafen ve KNT içeren NBR kauçuk numunelerin testten sonraki değişimleri yüzdelik olarak Tablo 4.11, Tablo 4.12, Tablo 4.13 ve Tablo 4.14’de verilmiştir.

4.5.1 NB80 Yaşlandırma Testi Sonuçları - Katkısız

Katkı ilavesi içermeyen NBR kauçuk numunelerin havada ve sıvıda yapılan yaşlandırma testlerinin sonuçları Tablo 4.11’de paylaşılmıştır. Bu değerler aynı test koşullarına maruz kalan hamurların uygulama alanlarındaki çalışma şartlarına olan davranışlarını kıyaslamak için kullanılmaktadır.

Tablo 4.11: NB80 Yaşlandırma Testi Sonuçları - Katkısız

Test Açıklaması	Test Parametreleri	Birimi	NB8001
Kuru Hava Yaşlandırması 70 saat 125°C	Sertlik	Shore A	4,83
	Kopma Dayanımı	%	-6,90
	Kopma Uzaması	%	-23,64

IRM 901 yağ yaşlandırması 70 saat 125°C	Sertlik	Shore A	1,83
	Kopma Dayanımı	%	-8,11
	Kopma Uzaması	%	-23,94
	Hacim	%	-5,10
IRM 903 yağ yaşlandırması 70 saat 125°C	Sertlik	Shore A	-5,77
	Kopma Dayanımı	%	-9,38
	Kopma Uzaması	%	-27,27
	Hacim	%	9,48

Tablo 4.11’de verilen sonuçlar grafit, grafen ve KNT katkı malzemeleri ilaveli karışımın değerlerini kıyaslamak için referans olarak kullanılacaktır.

4.5.2 NB80 Yaşlandırma Testi Sonuçları – Grafit

Grafit katkı ilavesi içeren NBR kauçuk numunelerin havada ve sıvıda yapılan yaşlandırma testlerinin sonuçları Tablo 4.12’de paylaşılmıştır.

Tablo 4.12: NB80 Yaşlandırma Testi Sonuçları-Grafit

Test Açıklaması	Test Parametreleri	Birimi	2 phr	4 phr	6 phr
Kuru Hava Yaşlandırması 70 saat 125°C	Sertlik Değişimi	Shore A	4,60	4,62	4,46
	Kopma Dayanımı Değişimi	%	-3,25	-3,18	-3,45
	Kopma Uzaması Değişimi	%	-21,68	-25,16	-22,91
IRM 901 yağ yaşlandırması 70 saat 125°C	Sertlik Değişimi	Shore A	1,73	2,06	1,67
	Kopma Dayanımı Değişimi	%	-8,44	-7,34	-13,31
	Kopma Uzaması Değişimi	%	-23,81	-25,67	-23,99
	Hacim Değişimi	%	-4,71	-4,85	-4,09
IRM 903 yağ yaşlandırması 70 saat 125°C	Sertlik Değişimi	Shore A	-4,43	-4,97	-4,40
	Kopma Dayanımı Değişimi	%	-12,77	-14,51	-15,50
	Kopma Uzaması Değişimi	%	-25,15	-18,70	-29,42
	Hacim Değişimi	%	8,62	7,70	8,09

Grafit ilaveli karışımın test sonuçları referans karışım ile kıyaslandığında grafit ilavesinin yaşlandırma testleri sonucundaki değişimlerde düşüşlere sebep olduğu görülmektedir. Bu durum grafitin yaşlandırmaya karşı dirençli bir yapıya sahip karışım sağladığını göstermektedir.

Grafit katkısının oransal olarak değerlendirilmesi yapıldığında ise genel olarak sonuçlar phr arttıkça yüzdesel değişimlerde azalma olduğu gözlemlenmiştir. Grafitin yaşlandırmaya bağlı mekanik özelliklerde bir iyileştirme sağlamıştır.

4.5.2 NB80 Yaşlandırma Testi Sonuçları – Grafen

Grafen katkı ilavesi içeren NBR kauçuk numunelerin havada ve sıvıda yapılan yaşlandırma testlerinin sonuçları Tablo 4.13’de paylaşılmıştır.

Tablo 4.13: NB80 Yaşlandırma Testi Sonuçları-Grafen

Test Açıklaması	Test Parametreleri	Birimi	2 phr	4 phr	6 phr
Kuru Hava Yaşlandırması 70 saat 125°C	Sertlik Değişimi	Shore A	4,67	4,35	4,36
	Kopma Dayanımı Değişimi	%	-3,31	-1,80	-3,42
	Kopma Uzaması Değişimi	%	-19,67	-14,75	-24,75
IRM 901 yağ yaşlandırması 70 saat 125°C	Sertlik Değişimi	Shore A	1,63	0,97	1,33
	Kopma Dayanımı Değişimi	%	-5,53	-3,84	-4,92
	Kopma Uzaması Değişimi	%	-23,14	-21,69	-23,71
	Hacim Değişimi	%	-4,67	-4,40	-4,06
IRM 903 yağ yaşlandırması 70 saat 125°C	Sertlik Değişimi	Shore A	-5,40	-5,77	-5,36
	Kopma Dayanımı Değişimi	%	-8,71	-6,84	-5,19
	Kopma Uzaması Değişimi	%	-20,81	-15,14	-1,83
	Hacim Değişimi	%	7,90	7,89	7,42

Grafen ilaveli karışımın test sonuçları referans karışım ve grafit ile kıyaslandığında grafen ilavesinin IRM 901 yağ yaşlandırması ve kuru yaşlandırmasında referans ve grafit ilaveli karışıma daha dayanımlı olduğu, fakat IRM 903 yaşlandırmasına karşı grafite nazaran daha az dayanımlı olduğu görülmektedir.

Grafen katkısının oransal olarak değerlendirilmesi yapıldığında ise 4 phr oranındaki karışımın değerlerinde lokal artışlar yaşansa da genel olarak sonuçlar phr arttıkça yüzdesel değişimlerde azalma olduğu gözlemlenmiştir. Grafen, yaşlandırmaya bağlı mekanik özelliklerde referans ve grafitine nazaran daha fazla iyileştirme sağlamıştır.

4.5.2 NB80 Yaşlandırma Testi Sonuçları – KNT

KNT katkı ilavesi içeren NBR kauçuk numunelerin havada ve sıvıda yapılan yaşlandırma testlerinin sonuçları Tablo 4.14’de paylaşılmıştır.

Tablo 4.14: NB80 Yaşlandırma Testi Sonuçları-KNT

Test Açıklaması	Test Parametreleri	Birimi	2 phr	4 phr	6 phr
Kuru Hava Yaşlandırması 70 saat 125°C	Sertlik Değişimi	Shore A	4,50	4,37	3,70
	Kopma Dayanımı Değişimi	%	-3,01	-4,00	-4,02
	Kopma Uzaması Değişimi	%	-20,31	-15,40	-13,98
IRM 901 yağ yaşlandırması 70 saat 125°C	Sertlik	Shore A	1,83	1,73	2,37
	Kopma Dayanımı Değişimi	%	5,05	6,19	5,14
	Kopma Uzaması Değişimi	%	-23,90	-15,26	-15,62
	Hacim Değişimi	%	-4,62	-4,21	-4,17
IRM 903 yağ yaşlandırması 70 saat 125°C	Sertlik Değişimi	Shore A	-3,80	-3,03	-2,73
	Kopma Dayanımı Değişimi	%	3,23	5,63	3,51
	Kopma Uzaması Değişimi	%	-13,87	-15,53	-15,93
	Hacim Değişimi	%	8,47	5,71	4,59

KNT ilaveli karışımın test sonuçları referans karışım, grafit ve grafen katkıları ile kıyaslandığında KNT ilavesinin hava ve sıvı yaşlandırmasında referans, grafit ve grafen ilaveli karışıma daha dayanımlı olduğu görülmektedir.

KNT katkısının oransal olarak değerlendirilmesi yapıldığında ise 6 phr oranındaki karışımın değerlerinde lokal artışlar yaşansa da genel olarak sonuçlar phr arttıkça yüzdesel değişimlerde azalma olduğu gözlemlenmiştir. KNT, yaşlandırmaya bağlı mekanik özelliklerde referans, grafit ve grafene nazaran daha fazla iyileştirme sağlamıştır.

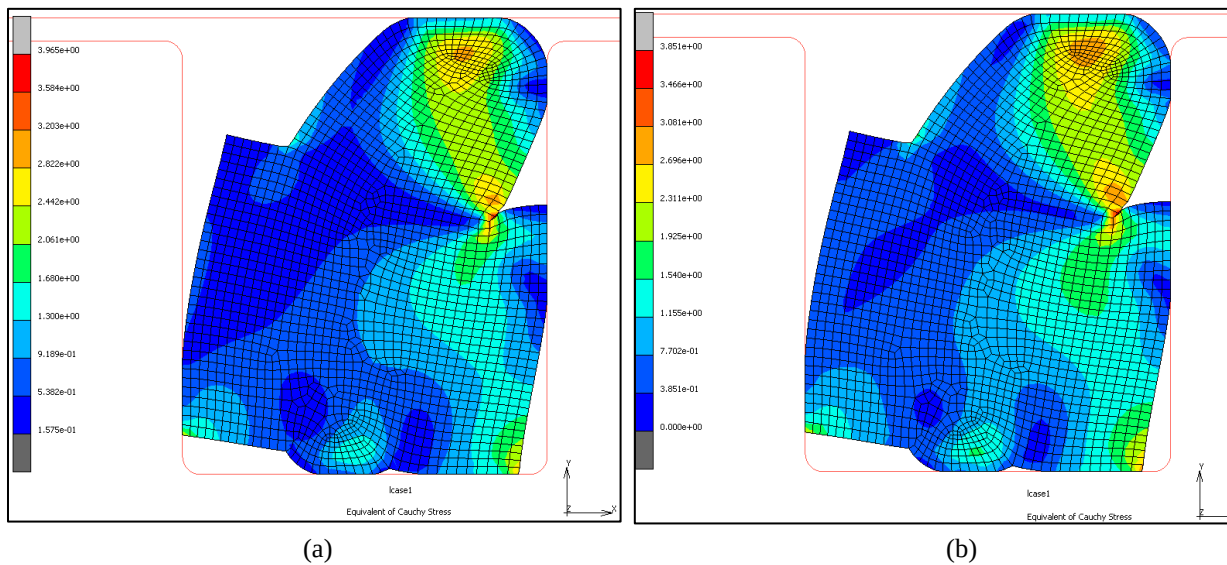
Tüm bu test sonuçları değerlendirildiğinde ve sızdırmazlık elemanlarının çalışma ortamı göz önünde bulundurulduğunda yaşlandırma öncesinde yapılan reometre, çekme testleri gibi testlerde grafit, grafen ve KNT ilaveli karışımların sonuçları referans karışımın sonuçlarından iyi ve birbirleri arasında yakın iyileştirme davranışları sağlanmıştır. Fakat yaşlandırma testi sonrasında incelenen değişimlerde KNT'ün sızdırmazlık elemanları bazında üstün özellikler sağlayabileceği sonucuna varılmıştır. Bu nedenle bir sonraki aşama olan sonlu elemanlar analizi uygulamasında referans karışım ve 4 phr KNT ilaveli karışımın test verileri ile malzeme modellenmesi gerçekleştirilip analizler gerçekleştirilmiştir.

4.6 Sonlu Elemanlar Analiz Sonuçları

Testleri gerçekleştirilen grafit, grafen ve KNT'ün sonuçları karşılaştırılmıştır. Yapılan karşılaştırmaya göre KNT katkılı NBR daha iyi mekanik ve termal iyileştirmeler sağlamıştır. Bu nedenle sızdırmazlık elemanları üzerindeki iyileştirmeyi görmek için KNT katkılı NBR ve katkısız NBR malzeme modellenerek sonlu elemanlar analizi yapılmıştır. Bu analizlerin karşılaştırmalı sonuçları ve değerlendirmeleri aşağıdaki gibidir:

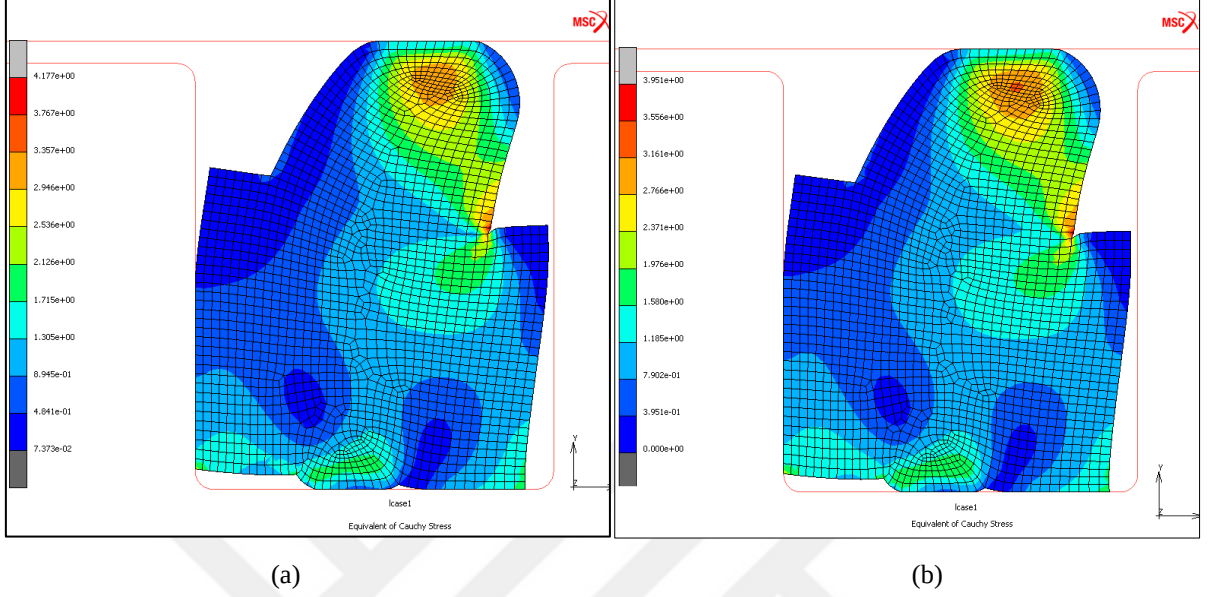
4.6.1 Eşdeğer Cauchy Gerilim

Çok eksenli yükleme durumlarında kullanılan bir akma kriteri olan Eşdeğer Cauchy Gerilim, doğrusal olmayan davranışa sahip polimer malzemelerin iç gerilimlerinin tespiti için incelenmektedir. Bu gerilimin malzemenin akma dayanım değerinden küçük olması gerekmektedir. Sızdırmazlık elemanlarında güven payı da göz önünde bulundurularak Eşdeğer Cauchy Gerilmesi için belirlenen kritik değer 10 MPa'dır.



Şekil 4.9 Eşdeğer Cauchy Gerilimi - Montaj; a) NBR- Katkısız, b) NBR - KNT

Analiz sonuçlarında, montaj esnasında meydana gelen Eşdeğer Cauchy Gerilme, standart NBR karışımında 3.96 MPa iken KNT ilaveli karışım ile üretimi gerçekleştirilen sızdırmazlık elemanında bu değer 3.85 MPa'dır.



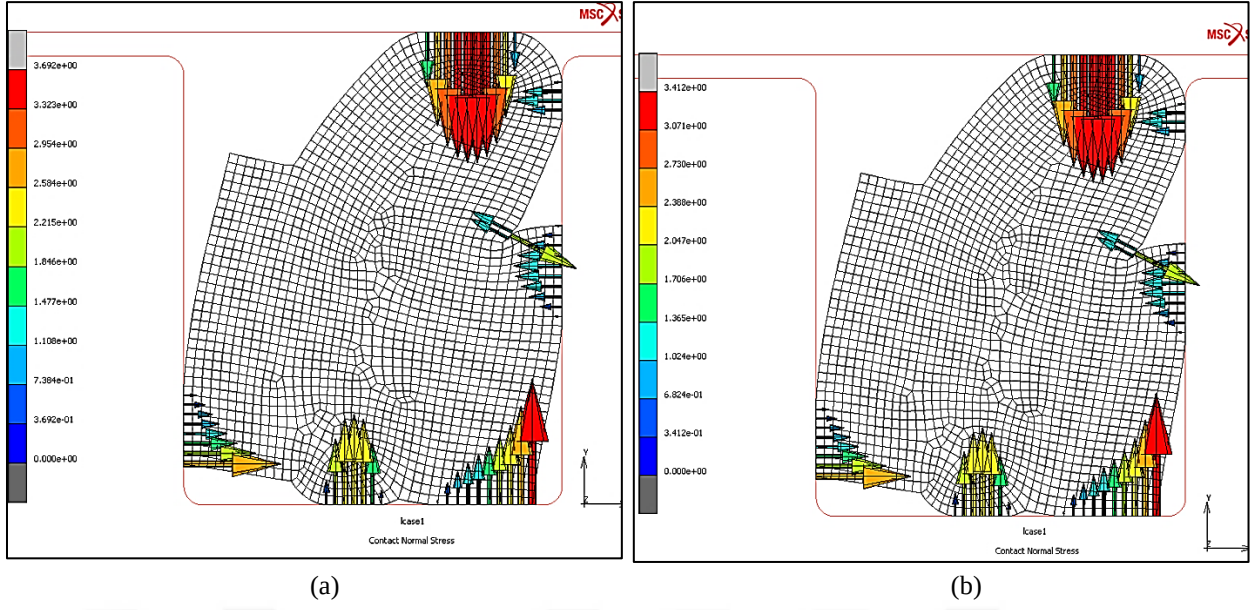
Şekil 4.10 Eşdeğer Cauchy Gerilimi – 12 bar; a) NBR- Katkısız, b) NBR - KNT

12 bar basınç altında yapılan analiz sonuçlarına göre katkısız NBR karışımında Eşdeğer Cauchy Gerilme 4.17 MPa iken, bu değer KNT katkılı NBR karışımında 3.95 MPa'dır

Analiz sonuçları karşılaştırmalı olarak değerlendirildiğinde, KNT ilaveli karışım ile üretimi gerçekleştirilen sızdırmazlık elemanının iç gerilmesinin referans hamur ile üretilenden daha düşük olduğu yani aynı çalışma şartlarına karşı daha fazla dayanım göstereceği anlamına gelmektedir.

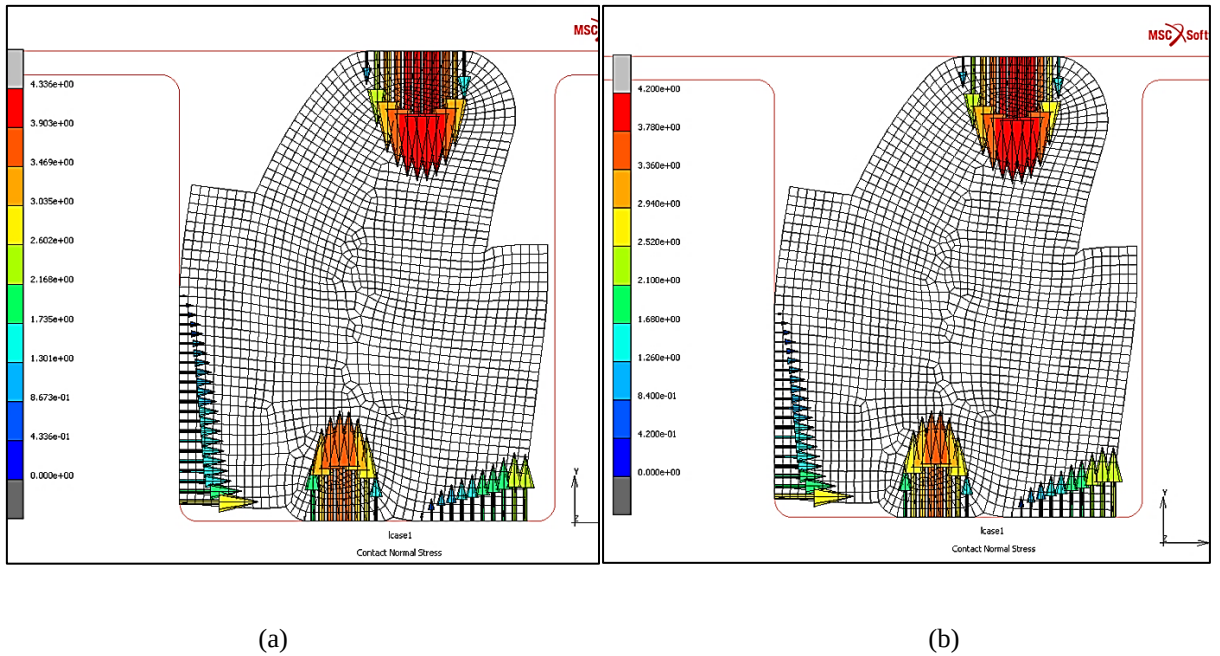
4.6.2. Kontak Normal Stress

Sızdırmazlık elemanı kanal ve mil parçaları ile temas halindedir. Temas halinde bulunduğu bu parçalar, montajlama ve basınçlanma etkisiyle sızdırmazlık elemanı üzerinde temas gerilimlerine yol açmaktadır. Temas gerilimlerinin minimize edilmesi sistemin sağlıklı ve uzun süre çalışması ve ürün ömrünün arttırılması için kritik seviyede önemlidir.



Şekil 4.11 Temas Gerilimleri - Montaj; a) NBR- Katkısız, b) NBR - KNT

Analiz sonuçlarında, montaj esnasında meydana gelen Eşdeğer Cauchy Gerilme, standart NBR karışımında 3.69 MPa iken KNT ilaveli karışım ile üretimi gerçekleştirilen sızdırmazlık elemanında bu değer 3.41 MPa'dır.



Şekil 4.12 12 bar Basınç Uygulandığındaki Temas Gerilimleri; a) NBR- Katkısız, b) NBR - KNT

12 bar basınç altında yapılan analiz sonuçlarına göre katkısız NBR karışımında Temas Gerilmesi 4.33 MPa iken, bu değer KNT katkılı NBR karışımında 4.20 MPa'dır. Bu durumda KNT katkısının temas geriliminin %3'lük iyileşme sağlanmıştır.

Yapılan sonlu elemanlar analiz sonuçlarına göre KNT ilaveli karışım ile üretimi gerçekleştirilen sızdırmazlık elemanının temas gerilmesi referans hamur ile üretilenden daha düşük olduğu yani daha az aşınma meydana geleceğini göstermektedir. Düşük aşınma sistem ve ürünün ömrünü arttıracaktır.

4.7 Sonlu Elemanlar Analiz Sonuçlarının Doğrulanması

Sonlu elemanlar modeli ile gerçekleştirilen analizlerin doğrulanması için gerçekleştirilen saha testlerinin sonuçları Tablo 4.15'te verilmiştir. Bu testler sızdırmazlık elemanlarının çalışma alanlarındaki gibi kanala yerleştirilen keçelerin mil veya borunun da pnömatik sisteme montajlandıktan sonra basınç verilmesi ile gerçekleştirilmiştir. Saha testleri Kastaş Sızdırmazlık Teknolojileri Ar-Ge Test Merkezinde gerçekleştirilmiş ve raporlanmıştır. Testler sonucunda ürünün sistemde kaçak meydana getirmemesi ve düşük basınçta ilk hareket basıncına sahip olması beklenmektedir. İlk hareket basıncının düşük olması sızdırmazlık elemanının temas geriliminin düşük olması dolayısıyla da düşük aşınma meydana geleceği anlamına gelmektedir.

Tablo 4.15: NB80 Saha Testi Sonuçları

Test Ürün	Malzeme	Ağırlık (kg)	İç Kaçak Test (6bar/1dk)		İlk Hareket Basıncı (bar)	
			Boğaz Tarafı	Piston Tarafı	Boğaz Tarafı	Piston Tarafı
K63-050	NB80	0	0	0	0,39	0,36
K63-050	NB80	4	0	0	0,46	0,42
K63-050	D7 (2phr KNT)	0	0	0	0,40	0,32
K63-050	D7 (2phr KNT)	4	0	0	0,47	0,36
K63-050	D8 (4 phr KNT)	0	0	0	0,40	0,34
K63-050	D8 (4 phr KNT)	4	0	0	0,50	0,38
K63-050	D9 (6 phr KNT)	0	0	0	0,41	0,37
K63-050	D9 (6 phr KNT)	4	0	0	0,49	0,40

Yapılan saha testleri analiz sonuçları ile kıyaslandığında 4phr KNT katkısının ilk hareket basıncını %2.9 düşürdüğü gözlemlenmiştir.

Saha testleri ve sonlu elemanlar analizindeki iyileşme yüzdesinde %95 oranında bir eşleşme söz konusudur. Bu durum KNT ilaveli karışım ile üretimi gerçekleştirilen sızdırmazlık

elemanının piston tarafında konumlandırıldığında ilk hareketinin daha düşük olduğu yani daha az aşınma meydana geleceğini göstermektedir.



5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Yapılan literatür taramalarına göre grafit, grafen ve KNT'nin NBR karışımlarında mekanik özellikleri artırması ön görülürken yapılan testlerin sonuçlarına göre çekme dayanımı, kopma uzaması ve sertliğindeki iyileşme bu öngörüyü kanıtlar nitelikte veriler sunmuştur. 2, 4 ve 6 phr oranlarında grafit, grafen ve KNT parçacıkları NBR karışımına ilave edilmiştir. Katkılı karışımlardan oluşturulan numuneler ile mekanik testler gerçekleştirilmiş ve nano parçacığın farklı tip ve oranının etkileri tez boyunca incelenip karşılaştırmalı sonuçları tezde sunulmuştur. Sızdırmazlık elemanlarının tanımının da yapıldığı tez çalışmasında mekanik testler sonucunda elde edilen veriler değerlendirilerek KNT'nin diğer nano parçacıklardan daha fazla iyileştirme sağladığına karar verilmiştir. Bu karar doğrultusunda standart NBR ile KNT ilaveli NBR karışımlarının malzeme modellenmesi gerçekleştirilmiştir. Bu malzeme modeli ile MSC Marc programında sonlu elemanlar analizi yapılarak nihai ürün üzerindeki iyileşme de gözlemlenmiş olundu. Tüm işbu test ve analiz sonuçlarını tek bir tabloda EK 1'de gösterilmiştir.

Sonlu elemanlar analiz çıktısının doğrulanması için yapılan saha testlerinde de sağlanan korelasyon tez çalışmasının bilimsel yetkinliğini arttırmış olup teori ve deneysel olarak birbirlerini doğrulaması sağlanmıştır.

Bu çalışmada bulunan, nanoparçacık dağılımından bağımsız olarak nanoparçacık katkısına göre değişimlerine referans olan çalışmalarda elde edilen değerleri aşağıda tablo olarak verilmiştir.

Tablo 5.1: Nanoparçacık Katkılı NBR Karışımların Mekanik Özelliğe Olan Etkilerinin Referans ile Kıyaslamalı Değerleri

Nano parçacık tipi	Nano parçacık yüzdesi (phr)	Gerilme Mukavemeti (MPa)	Gerilme Uzaması (%)	Sertlik (Shore A)	Sürtünme Katsayısı	Referans
Grafit	0	11,4 MPa	-	50,00	0,457	Agrawal et al., 2015
Grafit	4	16,9 MPa	-	55,00	0,422	Agrawal et al., 2015
Grafen	4	10,5 MPa	-	55,00	0,373	Agrawal et al., 2015
Genleşmiş Grafit	0	15,8 MPa	1725%	-	-	Liu et al., 2005
Genleşmiş Grafit	2	19,2 MPa	1720%	-	-	Liu et al., 2005
Genleşmiş Grafit	5	28,5 MPa	1650%	-	-	Liu et al., 2005
Genleşmiş Grafit	8	25,0 MPa	1600%	-	-	Liu et al., 2005
Genleşmiş Grafit	10	17,7 MPa	1565%	-	-	Liu et al., 2005

Grafen Oksit (GOnPs)	0	3,00 MPa	400%	51,00	-	Paran et al., 2020
Grafen Oksit (GOnPs)	1,5	3,50 MPa	360%	54,00	-	Paran et al., 2020
Grafen Oksit (GOnPs)	3	5,00 MPa	340%	56,00	-	Paran et al., 2020
Grafen (GnPs)	0	3,00 MPa	400%	51,00	-	Paran et al., 2020
Grafen (GnPs)	1,5	3,20 MPa	350%	53,00	-	Paran et al., 2020
Grafen (GnPs)	3	4,50 MPa	320%	55,00	-	Paran et al., 2020
Grafen+ Grafen Oksit	1,5+1,5	6,30 MPa	310%	57,00	-	Paran et al., 2020
SBR + 0 phr CNT	0	5,10 MPa	324%	53,30	-	Schopp et al., 2014
SBR + 25 phr CNT	25	9,20 MPa	260%	69,70	-	Schopp et al., 2014
KNT	0	129,6 MPa	-	-	0,55	Li et al., 2016
KNT	-	155,3 MPa	-	-	0,34	Li et al., 2016
KNT	0	18,9 MPa	321%	64,00	1,80	Kulaç, 2016
KNT	1	18,1 MPa	286%	67,00	1,23	Kulaç, 2016
KNT	3	17,4 MPa	272%	72,00	0,95	Kulaç, 2016
KNT	4,5	20,4 MPa	333%	72,00	0,85	Kulaç, 2016
KNT	6	16,2 MPa	221%	74,00	1,01	Kulaç, 2016
Grafit	0	20,33 MPa	220%	78,40	-	
Grafit	2	21,43 MPa	216%	78,67	-	
Grafit	4	20,9 MPa	210%	79,60	-	
Grafit	6	23,53 MPa	219%	80,20	-	
Grafen	2	19,9 MPa	202%	78,27	-	
Grafen	4	19,9 MPa	229%	79,57	-	
Grafen	6	19,9 MPa	204%	79,79	-	
KNT	2	19,6 MPa	231%	78,93	-	
KNT	4	19,6 MPa	247%	79,80	-	
KNT	6	20,07 MPa	219%	80,40	-	

Grafit ile ilgili yapılan çalışmalarda, kauçuk karışımlarına 2, 4 ve 6 phr ilave edildiğinde 2 ve 4 phr ilaveli hamurların mekanik özelliklerinde iyileşme görülürken 6 phr ilaveli hamurda mekanik özellikleri kötüleştirdiği belirtilmiştir. Bu durumun sebebi hamur karışımının 4 phr oranından sonra doygunluğa erişip daha yüksek nanopartikül ilavelerinde yabancı madde gibi davrandığı düşünülmektedir. Tez çalışması sonucunda, grafit katkısının oransal değişiminin

NBR üzerinde yaratmış olduğu mekanik davranış değişikliği D.W. Liu ve arkadaşları tarafından yapılan 2005 yılında yapılan çalışmayı doğrular nitelikte çıkmıştır. D.W. Liu ve arkadaşları tarafından yapılan bu çalışmada 5 phr'dan sonra mekanik dayanımlarda düşüş olduğu belirtilmiştir. Bu çalışmadan farklı olarak tez çalışmasında optimum oranın 4 phr çıkmış olması grafitte herhangi bir ek işlem uygulamadan NBR karışıma dahil edilmesi olduğu düşünülmektedir. Nanoparçacık ilavesinin mekanik davranışlara olan iyileştirmesinin parabolik etki göstermesi grafitin nanoformu olan grafen ve KNT'te de beklenmekteydi. Buna ek olarak literatür taramalarında grafitin mükemmel bir ısı iletkeni ve ısıya dayanıklılığı olduğu belirtilmiştir (Agrawal et al., 2015; Baş, 2012; Çuhadaroglu ve Kara, 2018), bu bağlamda tez çalışmasında hazırlanan hamurlardan elde edilen numuneler üzerinde yapılan yaşlandırma testlerinde test yağlarına ve ısıya olan dayanımının standart hamurdan elde edilen numunelerden daha dayanıklı olduğu görülmüştür.

Grafen, grafitin düzlemsel nanoformu olması ve sıkı bir bağ yapısına sahip olması nedeniyle mekanik, elektriksel, termal ve kimyasal özelliklerde üstün performans sağladığı Agrawal ve arkadaşları tarafından 2015 yılında yapılan çalışmalarda ortaya çıkmıştır. Yapılan tez çalışmasında literatürle paralel olarak grafen katkısının standart hamura yakın mekanik özelliklere sahip olmasına karşın çekme dayanımı ve sürtünme katsayısı gibi mekanik test sonuçlarının grafit ilaveli hamurdan daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Buna ek olarak Paran ve arkadaşları tarafından 2020 yılında yapılan çalışmada grafen ve grafen oksit NBR karışımı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu çalışmada nanoparçacık oranının artması mekanik özellikleri iyileştirirken işleme tabi tutulmuş olan grafen oksit NBR ile homojen bir karışım yaparak daha iyi bağlanmış olmasından dolayı grafene nazaran mekanik özellikleri daha fazla iyileştirmiştir (Paran et al., 2020). Sızdırmazlık elemanları çalışma alanları göz önünde bulundurulduğunda yüksek basınçta akışkana maruz kaldığı ve dinamik bir çalışma prensibine sahip olduğu için sıkıştırmaya ve kopmaya karşı yüksek dayanım göstermesi beklenmektedir. Grafenin grafitten daha üstün özellikler sağlayacağı düşünülürken tersine bir durumun gözlemlenmesinin sebebi, elastomerler üzerinde yapılan çalışmaların yeni olmasından kaynaklandığı söylenebilir. Grafenin elastomer malzeme içerisindeki homojen dağılması ve bağ yapması ile ilgili yeterli çalışma yapılmamış olması karışım metodunun, parametrelerinin değiştirilme ihtiyacının olduğunu gözler önüne sermiştir.

Grafenin rulo formu olan KNT'ler de grafit ve grafen gibi mekanik, termal ve triblojik özellikleri olumlu yönde değiştirmekte geliştirmekte olduğu yapılan literatür çalışmalarında gözlemlenmiştir (Schopp et al., 2014; Li et al., 2016; Kulaç, 2016). Özellikle Li ve arkadaşlarının KNT'ün sürtünme katsayısını azalttığı sonucuna vardıkları çalışma sızdırmazlık elemanları için önemli bir kriter olup ürün ömrünü arttıracak varsayılmaktadır. Buna ek olarak Kulaç tarafından 2016 yılında yapılan çalışmada KNT'ün oransal değişiminin NBR karışımı üzerindeki etkisi incelenmiş ve çalışma sonucunda ortaya çıkan değerler tez çalışması sonucunda elde edilen sonuca yakın olarak optimum nanoparçacık karışımının 4-4,5 phr olduğunu ortaya koymuştur. Optimum ilave oranının bu kadar yakın çıkmasının sebebi, OSCIAL firmasından temin edilen KNT'e elastomerler içerisinde sağlıklı karışması ve bağ kurması için ön işlem uygulanarak özel bir karışım olarak NBR karışımına ilave edilmesidir. KNT ilavesinin mekanik özellikleri grafit ve grafen nanokatılarından daha fazla iyileştirmiş olması yapılan literatür

sonuçlarına göre beklendik bir durumdu. KNT'ü diğer nanopartiküllerden daha fazla öne geçiren sonuçlar yaşlandırma testleri sonucunda elde edilmiştir. Özellikle tez çalışması kapsamında yapılan bu yaşlandırma test sonuç çıktılarından biri olan sıkıştırabilirlikteki düşük değişiklik, KNT'ün rulo form yapısından kaynaklı yüksek elastikiyete sahip olduğunu kanıtlar nitelikte olmuştur.

Bu çalışma ve veriler ışığında gelecek çalışmalarda grafit, grafen ve KNT'ün NBR karışımı içerisinde homojen dağılımının sağlanıp sağlanmadığını görmek adına çeşitli analizler yapılması ve yeni karıştırma tekniklerinin denenmesi söz konusu olabilir. Bunlara ek olarak malzeme modellenmesi için iki eksenli çekme/kopma testleri gerçekleştirilebilir.



KAYNAKLAR DİZİNİ

- Agrawal, N., Parihar, A.S., Singh, J.P., Goswami, T.H. and Tripathi, D.N.**, 2015, Efficient Nanocomposite formation of Acyrlo Nitrile Rubber by incorporation of Graphite and Graphene layers: Reduction in Friction and Wear Rate, *Procedia Materials Science* 10: 139 – 148.
- Annicelli, R., Balodis, R., Boyce, W., Coreau, A., Davis, C., Dvornek, J., Dvornek, L., Gibbs, I., Gorman, D., Hogan, J., Price, R., Supp, G., Taylor, W., Waters, G., Wilson, W.**, 1990, Vanderbilt Associates, Vanderbilt World Trade Corporation, Canada, 832.
- Aydemir, B.**, 2015, Çekme Deneyi Standartlarındaki Çekme Hızı Farkları ve Etkileri, *Metal Dünyası*. 52-56.
- Babapour A.**, 2013, Doğal Kauçuk/Bütadien Kauçuk Esaslı Silecek Lastiği Malzemelerinin Hazırlanması ve Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Baş, A.B.**, 2012, Grafit Katkılı Polipropilen Kompozitlerin Reolojik Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Bedeloğlu A.ve Taş, M.**, 2016, Research Article Grafen ve Grafen Üretim Yöntemleri, *AKU J. Sci. Eng.* 16 (2016) 031203 (544-554) DOI: 10.5578/fmbd.32173 Araştırma Makalesi.
- Blobner, U. and Richter, B.**, 2014, Heat Aging of Elastomers – Test Engineering Basics and Interesting Specifics,
- Boast D. and Coveney, V. A.**, 1999, Finite Element Analysis of Elastomers, Professional Engineering Publishing. NY
- Bulut, M.**, Sertlik Ölçme Metotları,
http://www.bulutmak.com/uploads/2/0/0/3/20037867/sertlik_olcme_metodlari.pdf
 (Erişim Tarihi: 3 Haziran 2021).
- Çuhadaroğlu, A. D. ve Kara, E.**,2018, Grafit: Bir Genel Değerlendirme, *SDU Teknik Bilimler Dergisi* 8 (1): 15-33.
- Dalton AB, Coolins S, Munoz E, et al.**, 2003, Super-tough carbon-nanotube fibres: these extraordinary composite fibres can be woven into electronic textiles. *Nature* 2003; 423 (6941): 703-703.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Din, S. H., Shah, M. A., Sheikh, N. A. and Butt, M. M.**, 2019, Nano-Composites and their Applications: A review, 14701 Myford Road, Suite B-1, Tustin, CA 92780, United States .
- Dong C.L., Yuan C.Q., Bai X.Q., Yan X.P., Peng Z.**, 2015, Tribological properties of aged nitrile butadiene rubber under dry sliding conditions, *Wear*, 322-323: 226–237.
- Ehrhardt, D.**, 1999, Wärmealterungsbeständigkeit von Gummi in GAK, 09/1999, S.683
- Ergin, Y.**, 2014. Kayaçlar Endüstriyel Hammaddeler, www.betonvecimento.com (Erişim Tarihi: 3 Haziran 2021).
- Ergüler, N.**, 2011, Kauçuk Karışımlarında Bitkisel Yağların Plastikleştirici Etkisinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- Erkek, S.**, 2007, Karbon Siyahı/Ya Ve Karbon Siyahı/Dolgu Maddesi Oranının Farklı Vulkanizasyon Sistemlerinde EPDM, NBR ve SBR Elastomerlerinin Fiziko-Mekaniksel Özellikler Üzerine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimler Enstitüsü, Sayfa: 141
- Erkek, S.**, 2016, Kauçuk Kapı Stoperinin Hiperelastik Ve Viskoelastik Modellenmesi Ve Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Analizi, Yüksek Lisans Tezi Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Bursa.
- Fredric, R.**, 1978, Science and technology of rubber. New York: Academic Press, s. 292
- FUCHS Group**, Reference Oils, <https://www.fuchs.com/tr/tr/ueruen/product/47992-irm-reference-oils/> (Erişim Tarihi: 3 Haziran 2021).
- Garcia, R.M.J., Ruiz, S.O.E., Lopez, C., Gonzalez, L.Y.S., Botero, M.G., Betancur, M.**, 2005. Hyperelastic Material Modeling-Technical Report. Laboratorio CAD/CAM/CAE Departamento De Ingenieria Macanica Universidad EIFAT. Medellin.
- Gent, A. N.**, 2011, Materials and Compounds, Editors: GENT, A. N., Engineering with rubber how to design rubber components, 3 rd ed. Hanser Publications, Cincinnati, 13-18.
- Gent, A. N.**, 2011, Elastomers, Editors: GENT, A. N., Engineering with rubber how to design rubber components, 3 rd ed. Hanser Publications, Cincinnati, 2-3.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Giannelis EP.**, 1996, Polymer layered silicate nanocomposites. *Advanced Materials* 1996; 8 (1): 29-35.
- Graphite One Resources**, 2015, Graphite, 101. <http://graphiteoneresources.com>.
(Erişim Tarihi: 3 Haziran 2021).
- Güneş, İ.V. ve Feyzullahoğlu, E.**, 2019, Farklı Çalışma Ortamlarına Maruz Kalan Kauçuk Esaslı Konveyör Bant Malzemelerinin Adheziv Aşınma Özellikleri, *ElCezerî Fen ve Mühendislik Dergisi* 2019, 6(1); 131-139.
- Haliç Çevre Laboratuvarı**, Karbon Siyahi Ve Karbon Siyahi Maruziyeti, <https://haliccevre.com/karbon-siyahi-ve-karbon-siyahi-maruziyeti/>
(Erişim Tarihi: 3 Haziran 2021).
- Hernández, M., Bernal, M.d.M., Verdejo, R., Ezquerro, T.A. and López-Manchado, M.A.**, 2012, Overall Performance Of Natural Rubber/Graphene Nanocomposites, *Compos. Sci. Technol.* 73: 40–46.
- Iijima S.**, 1991, Helical microtubes of graphitic carbon, *Nature* 1991; 354 (6348): 56-58.
- Jindal P, Pande S and Sharma P.**, 2013, High strain rate behavior of multi-walled carbon nanotubes–polycarbonate composites. *Composites Part B: Engineering*, 45(1): 417-422.
- Kamigaito O.**, 1991, What can be improved by nanometer composites?, *Journal of Japan Society of Powder Metalurgy* 1991; 38: 315-321.
- Karabörk F.**, 2012, Atık Araç Tekerlek Lastiklerinde Mikrodalga Devulkanizasyon Parametrelerinin Lastiğin Mekanik Özelliklerine Etkileri, *Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya*.
- Karen, İ, Kaya, N., Öztürk, F.ve Korkmaz, İ.**, 2008, “Motor titreşim takozlarının istenen özelliklerde tasarımı ve doğrulaması”, 4. Otomotiv Teknolojileri Kongresi – OTEKON’ 08, 1-4 Haziran 2008, Bursa.
- Kauçuk Derneği Yayınları**, 2001, *Elastomer Teknolojisi 1*, İstanbul.
- Kim, J.T., Kim, B.K., Kim, E.Y., Park, H.C. and Jeong, H.M.**, 2014, Synthesis and shape memory performance of polyurethane/graphene nanocomposites *React. Funct. Polym.* 74: 16–21.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Kulaç, Z.E.**, 2016, Çok Duvarlı Karbon Nanotüpün Nbr Ve Nr-Br Kauçuk Kompozitlerinin Reolojik Ve Mekanik Özelliklerine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
- Lia, Y., Wang, S., Wang, Q., Xingd, M.**, 2016, Molecular dynamics simulations of tribology properties of NBR (Nitrile-Butadiene Rubber) /carbon nanotubes composites, Composites Part B, doi: 10.1016/j.compositesb.2016.04.053.
- Liu, W., Dul, X.S. and Meng, Y.Z.**, 2005, Preparation of NBR/Expanded Graphite Nanocomposites by Simple Mixing, Polymers & Polymer Composites, Vol. 13, No. 8.
- Mensaha, B. K., Guptab, C., Kanga, G., Leea, H. and Naha, C.**, 2019, A comparative study on vulcanization behavior of acrylonitrile-butadiene rubber reinforced with graphene oxide and reduced graphene oxide as fillers, Polymer Testing 76: 127–137.
- MSC Software**, 2003 MARC Experimental Elastomer Analysis, 2003.
- MSC Software**, 2003 MARC Advanced Course User Manual.
- ODTÜ Merkezi Laboratuvar**, Reometre, <https://merlab.metu.edu.tr/tr/reometre> (Erişim Tarihi: 3 Haziran 2021).
- Papageorgiou, D. G., Kinloch, I. A. and Young, R. J.**, 2015, Graphene/elastomer Nanocomposites," Carbon, Vol. 95, PP. 460-484.
- Paran, S. M.R., Naderi, G., Javadi, F., Shemshadi, R., Saeb, M. R.**, 2020, Experimental and Theoretical Analyses on Mechanical Properties and Stiffness of Hybrid Graphene/Graphene Oxide reinforced EPDM/NBR Nanocomposites, Materials Today Communications, Volume 22, 100763.
- Park S.H., Bandaru P.R.**, 2010, Improved mechanical properties of carbon nanotube/polymer composites through the use of carboxyl–epoxide functional group linkages. Polymer 2010, 51: 5071–5077.
- Polikan**, Yaşlanma ve Bozulma Testleri, http://www.polikan.com.tr/yaslanma_ve_bozulma_testleri.html (Erişim Tarihi: 3 Haziran 2021).

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Pul, M.**, 2019, Investigation Of Abrasion And Machining Properties Of Carbon Nanotube (CNT) And Nano Grafen (G) Reinforced AI 2024 Composites By Vortex Method, International Journal of Engineering Research and Development UMAGD, 11(1), 370-382.
- Savran, H.**, 2001, Elastomer Teknolojisi-1. Acar Matbaacılık, İstanbul, s.136.
- Savran, H.**, 2001, Elastomer Teknolojisi 1, Kauçuk Derneği Yayınları, İstanbul, 2001., s. 19-73
- Savran, H.**, 2002. Elastomer Teknolojisi-2. Acar Matbaacılık, İstanbul, 234 s
- Schmidt D, Shah D, Giannelis EP.**, 2002, New advances in polymer/layered silicate nanocomposites. Current Opinion in Solid State & Materials Science 2002; 6 (3): 205-212.
- Schopp, S., Thomann, V., Ratzsch, K.-F., Kerling, S., Altstädt, V. and Mülhaupt, R.**, 2014, Functionalized Graphene and Carbon Materials as Components of Styrene-Butadiene Rubber Nanocomposites Prepared by Aqueous Dispersion Blending, Macromol. Mater. Eng. 299: 319–329.
- Semaan, M.E., Quarles, C.A., Nikiel, L.**, 2002, Carbon black and silica as reinforcers of rubber polymers: Doppler broadening spectroscopy results, Polymer Degradation and Stability, Volume 75, Issue 2, Pages 259-266.
- Smithers**, Fluid Aging, <https://www.smithers.com/industries/materials/polymer/physical-testing/environmental-resistance-testing/fluid-aging> (Erişim Tarihi: 3 Haziran 2021).
- Sevinç, Ü.**, 2019, Akrilonitril Bütadien (NBR) Kauçuğunun Ve Yapıştırıcısının Sentezi, Karakterizasyonu Ve Demir Metaline Yapıştırılması, Yüksek Lisans Tezi Fizikokimya Anabilim Dalı Bursa.
- Seunghun, H., Myung, S.**, 2007. “Nanotube Electronics: A Flexible Approach to Mobility,” Nature Nanotechnology, Vol. 2, p.207 - 208.
- Soyel, D.**, 2008. Sonlu Elemanlar Metodu ile NR/SBR Tipi Elastomer Esaslı Malzemelerin Davranış Modellerinin Belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üni., Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Eğitimi Anabilim Dalı, Sakarya.
- Stockwell Elastomerics**, Compression Set Testing, <https://www.stockwell.com/compression-set-testing/> (Erişim Tarihi: 3 Haziran 2021).

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Subramaniam K., Das A., Steinhäuser D., Klüppel M., Heinrich G.**, 2011, Effect of ionic liquid on dielectric, mechanical and dynamic mechanical properties of multi-walled carbon nanotubes/polychloroprene rubber composites, *European Polymer Journal* 47, 2234–2243.
- Temiz, V.**, Sızdırmazlık, <https://www.coursehero.com/file/42769685/Sizdirmazlikpdf/>
(Erişim Tarihi: 3 Haziran 2021).
- Toprak, S.**, 2006, Grafit, Ülkemizdeki Grafit Oluşumları Ve Sorunları, MTA Genel Müdürlüğü, MAT Dairesi, Mineraloji Petrografi Koordinatörlüğü.
- Urcun, U.**, 2008. Türkiye’de Grafit Madenciliği, Madencilik Bülteni.
- Yavuz Erkek, M.**, 2018, Kauçuk Ürünlerin Gerilme - Gevşeme Davranışının Modellenmesi, Analizi Ve Optimizasyonu, Doktora Tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- Yu, M.F., Files, B.S., Arepalli, S., Ruoff, R.S.**, 2000, Tensile Loading of Ropes of Single Wall Carbon Nanotubes and their Mechanical Properties, *Physical Review Letters*, vol. 84, no.24, p.5552-5555.
- Waddell, W.H. and Evans, L.R.**, 1996, Use of Nonblack Fillers in Tire Compounds, *Rubber Chem. Technol.* 69 (1996), p. 377
- Wikipedia**, Vulkanizasyon, <https://tr.wikipedia.org/wiki/Vulkanizasyon>
(Erişim Tarihi: 3 Haziran 2021).
- Yılmaz, M.**, 2014, Elektro Döndürme Yöntemi İle Elde Edilen Karbon Nanolif Ve Karbon Nanotüplerin Karakterizasyonu ve İşlevselleştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü



TEŞEKKÜR

Bu çalışma süresince gerekli verilerin sağlanmasında kolaylık gösteren ve desteklerini esirgenmeyen başta Kastaş Ar-Ge Direktörü Yük. Müh. Ozan Devlen olmak üzere tüm Kastaş Ar-Ge Merkezi çalışanlarına, özellikle kıymetli görüşlerinden yararlandığım ve yakın ilgisini esirgemeyen Malzeme Teknolojileri Kıdemli Mühendisi Barış ÇAYLAK'a ve hamurhane ekibine, mekanik testlerin gerçekleştirilmesi için gerekli zaman ve emeği sağlayan başta Zeynep ÖZİL ve tüm laboratuvar ekibine, saha testlerinin gerçekleştirilmesi için gerekli ortam ve emeği sağlayan Sercan KARAKOÇ ve Recai BIÇAKÇI'ya, tez konumun belirlenmesi ve biçimlenmesinde değerli katkılarını aldığım danışman hocam değerli Doc. Dr. Üyesi Seçkin ERDEN'e teşekkürü bir borç bilirim.

Tüm bu süreçlerde bir an olsun desteğini ve ilgisini esirgemeyen biricik eşim Yük. Müh. Arif Sercan EREZ'e ve tüm zor şartlara rağmen eğitim hayatımın birinci destekçisi ve her zaman yanımda olan annem Serfinaz ÇELİK ve aileme minnettarlıkla teşekkür ederim.

30 / 06 / 2021

İmzası

Adı-Soyadı



ÖZGEÇMİŞ

Eğitim hayatım İzmir’de başladı ve devam etmektedir. 2017 yılında İzmir Katip Çelebi Üniversitesi Makine Mühendisliğinden mezun oldum. 2019 yılında ise Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde Makine Mühendisliği Anabilim dalında yüksek lisans programına başladım.

Lisans eğitimim devam ederken Çınarlı And. Tek. Ve Mes. Lisesinde mesleki eğitim stajı, FIGES Engineering A.Ş. ve HAUS A.Ş. firmasında yaz stajlarımı tamamladım. Lisans mezuniyetimin ardından Dikkan Group Ar-Ge Merkezinde Ar-Ge Mühendisi olarak çalışmaya başladım. 9 aylık bir deneyimden sonra Obel Cıvata’da Ar-Ge Mühendisi olarak çalıştım. Her iki firmada da çalıştığım süre boyunca sonlu elemanlar analiz süreçlerini ve Ar-Ge projelerinin sürdürülmesi takiplerini yürüttüm. Ocak 2019 yılından itibaren Kastaş Sızdırmazlık Teknolojilerinde Ar-Ge Kıdemli Mühendisi olarak çalışmaktayım. Firmamızda sonlu elemanlar analiz süreci, Ar-Ge Merkezi raporlama ve takip süreci gibi süreçlerde görev almaktayım.

Çalıştığım firmalarda çalışma alanlarına göre farklı analiz programlarını kullandım. Lisans hayatımda gerek staj gerekse akademik yayınlar için ANSYS programını öğrenip kullandım. Dikkan Group’ta ANSYS ve Solidworks Simulation, Obel Cıvata’da Deform 3D, Kastaş Sızdırmazlık Elemanları firmasında ise nonlinear analiz programı olan MSC Marc programı, plastik enjeksiyon analiz programı olan Moldex3D ve kompozit malzeme modelleme programı olan Digimat programlarını aktif olarak kullanmaktayım.

Özel sökterdeki deneyimlerimin yanı sıra, lisans eğitimim devam ederken aşağıdaki yayınların çalışmalarını gerçekleştirdim.

- National Proceedings: Isler, Y., Usta, Y. H., Celık, Y., Ghosheh, M. Asyu2017, 2017. - The Control Of 3D Printed 3 Hooked Myoelectric Hand Prosthesis with SEMg Signals
- National Proceedings: Onak, G., Usta, Y. H., Celık, Y., Namlı, I., Ercan, U. K., Karaman, O. Tıp Teknoloj Ler Ulusal Kongres (Tiptekno2017), 12-14 Oct, 2017. - Development Of Plasma Device Integrated Electrospinning System For Biofabrication
- National Proceedings: Çelik, Y., Usta Y. H., Ghosheh, M. • EBBT’2017 (Elektrik-Elektronik, Bilgisayar, Biyomedikal Mühendislikleri Bilimsel

Toplantısı), April 2017. - Preparation and Comparison Of Static Analysis of Cervical Implants with Different Thicknesses by using FEA

- Robotic Arm Control On Web Server with Raspberry PI Project– 2017. Yusuf Hakan Usta, Mohammad Ghosheh And Yoncagül Çelik

- National Proceedings: Çelik, Y., Oflaz, H., • Biyomedikal Mühendisliği Ulusal Toplantısı (Biyomut2016), İzmir / Turkey, 3-5 November 2016. - Custom 3d Modelling Of Wrist And Finite Element Analysis

- ULAKBİLM: Çelik, Y., Oflaz, H., ULAKBİLM -Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi (Accepted) – Modelling Of Three-Dimensional Wrist Over CT Images And Biomechanical Evaluation with FEA

- 1. Dönem Lisans Bitirme Tezi - Modeling Of A Three-Dimensional Wrist Over CT Images, Finite Element Analysis And Optimization Of Stress Distribution By Using A Regression Model., Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Levent Aydın, İzmir Katip Çelebi Üni., Makine Mühendisliği Bölümü

- 2. Dönem Lisans Bitirme Tezi • Design And Analysis Of Composite Leaf Spring, Tez Danışmanı: Prof. Dr. Buket Okutan Baba, İzmir Katip Çelebi Üni., Makine Mühendisliği Bölümü

Bunlara ek olarak özel sektörde çalışırken de aşağıdaki ulusal ve uluslararası konferans yayınlarının çalışmalarını yürüttüm.

- Yoncagül Celik, Tuncer Yıldız , Sultan Altın, Tamer Gundogan, Arif Sercan Erez, Cfd Analysis and Validation Of Unleaded New Design Storm Valve, Valve World Conference 2018, November 27–29, 2018, Düsseldorf, Germany.

- Yoncagül Çelik Erez, Pnömatik Sızdırmazlık Elemanlarının Sonlu Elemanlar Analizi İle Sürtünme Kuvvetlerinin Optimize Edilmesi, Bias Kullanıcı Konferansı 2019, 3-4 Ekim 2019

- Yoncagül Celik Erez, Baris Caylak, Ozan Devlen, Seckin Erden, Investigation On Nbr Sealing Products with Nanoparticle Addition: An FEA Study, 28 June 2021, Nuremberg, Germany. Conference Paper

EKLER

EK 1: NB80 KARIŞIMI TEST SONUÇLARI KARŞILAŞTIRMA TABLOSU

NB80 KARIŞIMI TEST SONUÇLARI KARŞILAŞTIRMA TABLOSU			NB80	2 phr			4 phr			6 phr		
Test Açıklaması	Test Parametreleri	Birimi		Grafit-D1	Grafen-D4	CNT-D7	Grafit-D2	Grafen-D5	CNT-D8	Grafit-D3	Grafen-D6	CNT-D9
MDR @ 180°C 6'	s'@MH	lb-in	25,77	27,71	23,83	20,83	28,39	24,61	18,33	28,17	24,06	18,96
	s'@ML	lb-in	1,28	1,61	1,50	1,35	1,80	1,40	1,07	1,70	1,45	1,16
	s"@MH	lb-in	1,32	1,47	1,00	0,77	1,79	1,21	1,04	1,70	1,17	0,87
	s"@ML	lb-in	1,22	1,20	1,19	0,97	1,36	1,22	0,73	1,46	1,24	0,8
	ts2	sn	00:47	00:45	00:50	00:40	00:44	00:48	0,53	00:45	00:49	00:48
	t90	sn	02:09	02:20	02:18	02:05	02:21	02:34	02:11	02:19	02:36	02:04
Fiziksel Özellikler	Kopma Dayanımı	MPa	20,33	21,43	19,90	19,60	20,90	19,90	19,60	23,53	19,90	20,07
	Kopma Uzaması	MPa	220,00	216,33	201,67	230,67	210,33	229,00	247,43	218,67	203,84	219,33
	Sertlik	Shore A	78,40	78,67	78,27	78,93	79,60	79,57	79,80	80,20	79,79	80,40
	Sıkıştırılabilirlik	%	8,62	10,15	7,20	10,50	11,77	7,38	11,95	9,24	6,56	11,57
Kuru Hava Yaşlandırması 70 saat 125°C	Sertlik	Shore A	4,83	4,60	4,67	4,50	4,62	4,35	4,37	4,46	4,36	3,70
	Kopma Dayanımı	%	-6,90	-3,25	-3,31	-3,01	-3,18	-1,80	-4,00	-3,45	-3,42	-4,02
	Kopma Uzaması	%	-23,64	-21,68	-19,67	-20,31	-25,16	-14,32	-15,40	-22,91	-24,75	-13,98

IRM 901 yağ yaşlandırması 70 saat 125°C	Sertlik	Shore A	1,83	1,73	1,63	1,83	2,06	0,97	1,73	1,67	1,33	1,37
	Kopma Dayanımı	%	-8,11	-8,44	-5,53	5,05	-7,34	-3,84	6,19	-13,31	-4,92	5,14
	Kopma Uzaması	%	-23,94	-23,81	-23,14	-23,90	-25,67	-21,69	-15,26	-23,99	-23,71	-15,62
	Hacim	%	-5,10	-4,71	-4,67	-4,62	-4,85	-4,40	-4,21	-4,09	-4,06	-4,17
IRM 903 yağ yaşlandırması 70 saat 125°C	Sertlik	Shore A	-5,77	-4,43	-5,40	-3,80	-4,97	-5,77	-3,03	-4,40	-5,36	-2,73
	Kopma Dayanımı	%	-9,38	-12,77	-8,71	3,23	-14,51	-6,84	5,63	-15,50	-5,19	3,51
	Kopma Uzaması	%	-27,27	-25,15	-20,81	-13,87	-18,70	-15,14	-15,53	-29,42	-1,83	-15,93
	Hacim	%	9,48	8,62	7,90	8,47	7,70	7,89	5,71	8,09	7,42	4,59
Sonlu Elemanlar Analizi	Eşdeğer Cauchy Gerilmesi Montaj	MPa	3,96						3,81			
	Eşdeğer Cauchy Gerilmesi 12bar	MPa	4,17						3,95			
	Temas Gerilmesi Montaj	MPa	3,69						3,41			
	Temas Gerilmesi 12 bar	MPa	4,33						4,20			