

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ  
ANABİLİM DALI**

**DOKTORA TEZİ**

**ÇEVRE DOSTU KOMPOZİT ÇİNKO OKSİT MALZEMELERİN  
KAUÇUK KARIŞIMLARINDA KULLANIMININ ARAŞTIRILMASI**

**CANSU BÖRÜBAN BİNGÖL**

**KOCAELİ 2025**

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ**  
**ANABİLİM DALI**

**DOKTORA TEZİ**

**ÇEVRE DOSTU KOMPOZİT ÇİNKO OKSİT**  
**MALZEMELERİN KAUÇUK KARIŞIMLARINDA**  
**KULLANIMININ ARAŞTIRILMASI**

**CANSU BÖRÜBAN BİNGÖL**

**Prof. Dr. Hakan ATAPEK**  
Danışman, Kocaeli Üniversitesi

.....

**Prof. Dr. Murat ŞEN**  
Jüri Üyesi, Yıldız Teknik Üniversitesi.

.....

**Prof. Dr. Ayşe AYTAÇ**  
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi

.....

**Prof. Dr. Enbiya TÜREDİ**  
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi

.....

**Dr. Öğr. Üyesi Burçin ÖZBAY KISASÖZ**  
Jüri Üyesi, Fatih Sultan Mehmet Vakıf Üni.

.....

**Doç. Dr. Şeyda POLAT**  
Eş danışman, Kocaeli Üniversitesi

Enstitü Yönetim Kurulunun  
12/10/2022 tarih ve 2022/37 nolu  
toplantısında II. Tez danışmanı  
olarak atanmıştır.

**Tezin Savunulduğu Tarih: 07.02.2025**

## ETİK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ

Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez/proje çalışmada,

- Bu tezin/projenin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu,
- Çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı,
- Bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi,
- Bu çalışmanın Kocaeli Üniversitesi'nin abone olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Fen Bilimleri Enstitüsü'nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun olduğunu,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Tezin/Projenin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez/proje çalışması olarak sunmadığımı,

beyan ederim.

Bu tez/proje çalışmasının herhangi bir aşaması hiçbir kurum/kuruluş tarafından maddi/alt yapı desteği ile desteklenmemiştir.

Bu tez/proje çalışması kapsamında üretilen veri ve bilgiler ..... tarafından ..... no'lu proje kapsamında maddi/alt yapı desteği alınarak gerçekleştirilmiştir.

Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

Cansu BÖRÜBAN BİNGÖL

## YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI

Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin/projemin tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda belirtilen koşullarla kullanıma açma izninin Kocaeli Üniversitesi'ne verdiğimi beyan ederim. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet hakları bende kalacak, tezimin/projemin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki makale, kitap, tebliğ, lisans, patent gibi çalışmalarda kullanımı, danışmanımın isim hakkı saklı kalmak koşuluyla ve her iki tarafın bilgisi dâhilinde bana ait olacaktır.

Tezin/projenin kendi özgün çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin/projenin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanılması zorunlu metinlerin yazılı izin alarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

Yükseköğretim kurulu tarafından yayınlanan "***Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge***" kapsamında tezim aşağıda belirtilen koşullar haricinde YÖK Ulusal Tez Merkezi/ Kocaeli Üniversitesi Kütüphaneleri Açık Erişim Sisteminde erişime açılır.

- Enstitü yönetim kurulu kararı ile tezimin/projemin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren 2 yıl ertelenmiştir.
- Enstitü yönetim kurulu gerekçeli kararı ile tezimin/projemin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren 6 ay ertelenmiştir.
- Tezim/projem ile ilgili gizlilik kararı verilmemiştir.

Cansu BÖRÜBAN BİNGÖL

## ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Çinko oksit, vulkanizasyon reaksiyonu kinetiğini etkileyen ve daha yüksek çapraz bağ yoğunluğu elde etmek için kauçuk karışımlarında kısa kükürt çapraz bağların oluşumunu teşvik eden ve en yaygın kullanılan aktivatör olarak kabul edilmektedir. Kürlenme sürecindeki etkisinin yanı sıra, kauçuğun fiziksel ve mekanik özellikleri üzerinde de faydalı etkileri vardır. Çinko kompleksleri, özellikle sucul yaban hayatı, insan sağlığı ve çevre üzerinde olumsuz etkilere sahiptir. Çinkonun çevreye salınmasının başlıca kaynaklarından biri, lastiklerden gelen aşınmış kauçuk parçacıklarıdır. Çinko oksidin çevresel etkileri, ekolojik ve ekonomik endişeler, araştırmacıları kauçuk reçetelerinde kullanımını azaltmaya teşvik etmiştir.

Bu doktora tezi, uzun süren bir araştırma süreci ve yoğun bir çabanın sonucudur. Tez çalışmam, malzeme alanındaki bilgi birikimine küçük de olsa bir katkı sağlamayı amaçlamaktadır. Bu zorlu fakat bir o kadar da keyifli süreçte bana destek olan, fikirleriyle yol gösteren ve rehberlik eden sevgili tez eş danışmanım Doç. Dr. Şeyda POLAT'a içten teşekkürlerimi sunarım. Kendisi, çalışmanın her aşamasında değerli görüşleriyle bana rehberlik etmiş, sabırla yönlendirmiş ve akademik gelişimime önemli katkılarda bulunmuştur.

Bu çalışmanın her aşamasında derinlemesine yorumları ve farklı bakış açılarıyla önemli katkılar sağlayan, özellikle tez sürecinde zaman ve süreç yönetimiyle bizleri başarıyla yönlendiren tez danışmanım sevgili Prof. Dr. Ş. Hakan ATAPEK'e içten teşekkürlerimi sunarım.

Tez dönemi boyunca desteği ve değerli yönlendirmeleriyle bana önemli katkılarda bulunan sevgili hocam Prof. Dr. Murat ŞEN'e teşekkürlerimi sunarım.

2016 yılından beri bir parçası olduğum, doktora başlanamama ve başarıyla tamamlamama büyük katkı sağlayan ve benim için bir iş yerinin ötesinde bir anlam taşıyan BRİSA Ar-Ge Merkezi doktora sürecimin tamamlanmasında önemli destekler sunmuştur. Başta değerli yöneticilerim olmak üzere, deney çalışmalarına katkı sağlayan Bilal GÜRLÜK, Levent KAYA, Ferdi YENİ, Yasin AYTEKİN, Evran KARAMAN ve Murat KARAASLAN'a, ayrıca tüm BRİSA ailesine teşekkürlerimi sunarım.

SEM-EDS çalışmalarında teknik desteğini sağlayan, her aşamada ve ihtiyacım olduğunda değerli tavsiyelerini benden esirgemeyen sevgili Dr. Atilla ALKAN'a, bu çalışmalarını gerçekleştirmeme olanak tanıyan ve cihaz ile laboratuvar desteğini sunan ONAT Alüminyum San. Tic. A.Ş.'ye teşekkür ederim.

Tezimin ana hammaddesi olan kompozit ZnO malzemelerini bedelsiz temin eden ve bu süreç boyunca teknik destek sağlayan Global Chemical Co. Ltd.'ye, Egebond 1895 malzemesini temin ettiğim Ege Kimya'ya ve COFILL 11 malzemesini tedarik ettiğim Evonik'e teşekkürlerimi sunarım.

Bu uzun yolculukta, her zaman yanımda olan, zorlandığımda hiç düşünmeden yardımına koşan, kişisel ve akademik hayatımın her aşamasında desteğini esirgemeyen sevgili annem Ganime BÖRÜBAN, babam Ali İhsan BÖRÜBAN ve kız kardeşim Özge

BÖRÜBAN'a sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum. Değerli desteklerini ve motivasyonlarını benden hiçbir zaman esirgemeyen sevgili Sema-Fikri BİNGÖL'e de ayrıca teşekkürlerimi sunmak istiyorum.

Doktora eğitimime başlamam için beni teşvik eden, hayatımın her aşamasında olduğu gibi bu süreçte de yanımda olan, sevgisiyle ve sabırla desteğini ilk günkü gibi devam ettiren sevgili eşim Tunç BİNGÖL'e minnettarım. En önemli ve son teşekkürüm ise bana sonsuz sevgisiyle güç veren biricik oğlum Sarp BİNGÖL'e. Umarım hayatın boyunca gurur duyabileceğin bir anne olabilirim. İyi ki varsınız.

Bu tez sevgili eşim Tunç ve canım oğlum Sarp'a ithaf edilmiştir.

Şubat – 2025

Cansu BÖRÜBAN BİNGÖL



## İÇİNDEKİLER

ETİK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ.....	i
YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI .....	ii
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	v
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	vii
TABLOLAR DİZİNİ.....	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	xiv
ÖZET .....	xviii
ABSTRACT .....	xix
1. GİRİŞ.....	1
2. ARAÇ LASTİĞİ BİLEŞENLERİ .....	3
3. LASTİK TEKNOLOJİSİNDE KULLANILAN HAMMADDELER.....	7
3.1. Kauçuklar.....	10
3.2. Dolgu Maddeleri .....	16
3.3. Proses Kolaylaştırıcılar .....	20
3.4. Yumuşatıcılar.....	21
3.5. Koruyucu Kimyasallar .....	21
3.6. Vulkanizasyon Sistemi Bileşenleri .....	22
3.7. Kordlar .....	28
4. KAUCUK KARIŞIMLARINDA ZnO KULLANIMI .....	31
4.1. ZnO Malzeme Özellikleri ve Üretim Yöntemleri.....	31
4.2. ZnO Malzemelerinin Çevreye Etkileri ve Regülasyonlar.....	38
4.3. Kauçuk Karışımlarında ZnO Miktarının Azaltılması ile İlgili Çalışmalar .....	40
5. MALZEME VE YÖNTEM .....	45
5.1. Malzeme.....	45
5.2. Kompozit ZnO Malzeme Tanıtımı ve Yapısal Karakterizasyonu .....	45
5.3. Diğer Hammaddeler ve Özellikleri.....	48
5.4. Kauçuk Karışım Reçeteleri ve Karışımların Hazırlanması.....	50
5.5. Kauçuk Karışımlarına Uygulanan Fiziksel ve Mekanik Testler.....	57
5.5.1. Pişirme Testleri .....	57
5.5.2. Çekme ve Isıl Yaşlandırma Testleri.....	60
5.5.3. Sertlik Ölçümü.....	61
5.5.4. Yırtılma Mukavemetinin Belirlenmesi .....	62
5.5.5. Çapraz Bağ Yoğunluğunun Belirlenmesi .....	63
5.5.6. Özgül Ağırlık Ölçümü .....	65
5.5.7. Sekme Esnekliğinin Belirlenmesi .....	65
5.5.8. Fleksometre Testleri .....	66
5.5.9. Yorulma Testi .....	66
5.5.10. Aşınma Testi .....	67
5.5.11. Kauçuk Karışımı-Metal Yapışma Testi .....	69
5.5.12. Ozon Yaşlandırma Testleri .....	71
5.5.13. ZnO Malzemelerinin Karbon Ayak İzi ve Maliyet Etkisi .....	73
6. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	74
6.1. ZnO Malzemelerinin Karakterizasyonu.....	74

6.2. Kauçuk Karışımlarının Hazırlanmasında Pişirme Parametrelerinin Belirlenmesi .....	80
6.3. Fiziksel ve Mekanik Testlerin Değerlendirilmesi.....	85
6.3.1. Karışımların Pişme Özellikleri .....	85
6.3.2. Karışımların Çekme Ve Isıl Yaşlandırma Testleri .....	94
6.3.3. Sertlik Testleri .....	115
6.3.4. Yırtılma Mukavemeti Testleri .....	119
6.3.5. Çapraz Bağ Yoğunluğu Test Sonuçları .....	120
6.3.6. Özgül ağırlık test sonuçları .....	122
6.3.7. Sekme esnekliği test sonuçları.....	122
6.3.8. Fleksometre Test Sonuçları .....	123
6.3.9. Yorulma Test Sonuçları .....	124
6.3.10. Aşınma Test Sonuçları.....	125
6.3.11. Kauçuk Karışımı-Metal Yapışma Testi Sonuçları.....	129
6.3.12. Ozon Yaşlandırma Testi Sonuçları .....	131
6.4. ZnO Malzemelerinin Karbon Ayak İzi ve Maliyet Etkisi .....	150
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	153
KAYNAKLAR.....	159
KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER.....	175
ÖZGEÇMİŞ.....	176

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Örnek bir lastik kesitinde bileşenlerin gösterimi.....	6
Şekil 3.1. Bir lastiğin ağırlık bileşimi.....	7
Şekil 3.2. Lastik hammaddeleri .....	9
Şekil 3.3. Doğal kauçuk yapısı .....	11
Şekil 3.4. Stiren bütadien kauçuk yapısı .....	14
Şekil 3.5. Bütadien kauçuk yapısı .....	15
Şekil 3.6. Karbon karası (a) yüzeydeki fonksiyonel gruplar, (b) yapısı.....	17
Şekil 3.7. Karbon karası üretim metotları.....	17
Şekil 3.8. Kükürt vulkanizasyonunun şematik gösterimi.....	24
Şekil 3.9. Kükürt vulkanizasyonunda değişik bağlanma şekilleri.....	25
Şekil 3.10. Çapraz bağ yoğunluğunun vulkanizat özelliklerine etkisi .....	25
Şekil 3.11. Çelik kord bileşenleri (1) filament, (2) iplik, (3) kord ve (4) sarım.....	30
Şekil 4.1. ZnO kristal yapıları: (a) kübik kaya tuzu, (b) kübik zinc-blende ve (c) altıgen Wurtzite. Gölgeleştirilmiş gri küreler çinko atomlarını ve siyah küreler oksijen atomlarını temsil etmektedir .....	31
Şekil 4.2. Kükürt vulkanizasyon aşamaları genel gösterimi. ....	36
Şekil 4.3. Pirinç kaplı çelik kordun yapışma mekanizması.....	38
Şekil 5.1. Tescan VEGA3 Taramalı Elektron Mikroskobu.....	47
Şekil 5.2. (a) Bio-Rad E5150 Sputter Cihazı, (b) Emitec K950X Karbon Kaplama Cihazı .....	47
Şekil 5.3. Farrell BR1600 Banbury mikser .....	53
Şekil 5.4. WS-ZnO kontrol malzemesi içeren sırt karışımı için örnek mikser karıştırma koşulları (a) Ana karışım, (b) Son karışım .....	54
Şekil 5.5. WS-ZnO kontrol malzemesi içeren kuşak kaplama karışımı için örnek mikser karıştırma koşulları (a) Ana karışım, (b) Son karışım .....	55
Şekil 5.6. WS-ZnO kontrol malzemesi içeren yanak karışımı için örnek mikser karıştırma koşulları (a) Ana karışım, (b) Son karışım .....	55
Şekil 5.7. Farrell laboratuvar mili ile milledme işlemi.....	56
Şekil 5.8 (a) Alpha Technologies MV 2000E Mooney viskozimetre ve (b) rotor haznesi.....	57
Şekil 5.9. Tipik bir Mooney cihaz çıktısı .....	58
Şekil 5.10. Mooney eğrisi.....	58
Şekil 5.11 (a) Alpha Technologies MDR 2000 Hareketli Kalıp Reometresi, (b) titreşen alt kalıp .....	59
Şekil 5.12. Tipik bir MDR cihaz çıktısı .....	59
Şekil 5.13. Kritik değerleri gösteren MDR eğrisi.....	60
Şekil 5.14. (a) Dumbbell kesici #3 bıçağı (JIS K6251), (b) Test örnekleri (uzunluk: 100 mm, orta genişlik: 5 mm, kalınlık: ~2 mm) .....	60
Şekil 5.15. Alpha Technologies T2000 Çekme Cihazı .....	61
Şekil 5.16. Heraeus etüv .....	61
Şekil 5.17. Sertlik ölçüm cihazı Zwick/Roell (Shore A).....	62
Şekil 5.18. Yırtılma mukavemeti test örnekleri (a) Yırtılma B (b) Yırtılma C .....	62
Şekil 5.19. Alpha Technologies D2020 Densimetre Cihazı.....	65
Şekil 5.20. Zwick 5109 Sekme Esnekliği Test Cihazı .....	65
Şekil 5.21. (a) BF Goodrich Model II fleksometre test cihazı, (b) Test haznesi.....	66

Şekil 5.22. (a) Gibitre Instruments Flexon Check De Mattia test cihazı, (b) Test haznesi.....	67
Şekil 5.23. (a) Aşınma test cihazı (Ueshima Lambourn AB-2010), (b) Silindirik test örneği.....	69
Şekil 5.24. Test örneğinin hazırlanma aşamaları.....	70
Şekil 5.25. Yapışma testinin gösterimi.....	70
Şekil 5.26. Yapışma test sonuçlarının görsel değerlendirilmesi (a) %100, (b) %76-99, (c) %51-75, (d) %26-50 ve (e) %0-25.....	71
Şekil 5.27. (a) Gibitre Ozon Test Cihazı, (b) Statik test numuneleri, (c) Dinamik test numuneleri .....	72
Şekil 5.28. (a) Olympos SZH Işık Mikroskobu, (b) Örnek tutma aparatı .....	72
Şekil 6.1. Kontrol ZnO malzemelerinin morfolojilerini gösteren SEM görüntüleri (a) WS-ZnO, (b) Ac-ZnO .....	77
Şekil 6.2. Kompozit ZnO malzemelerinin morfolojilerini gösteren SEM görüntüleri; (a) C-ZnO <sub>40:60</sub> , (b) C-ZnO <sub>60:40</sub> ve (c) C-ZnO <sub>90:10</sub> .....	79
Şekil 6.3. Kompozit ZnO malzemelerinin element dağılımını gösteren EDS haritalaması; (a) C-ZnO <sub>40:60</sub> , (b) C-ZnO <sub>60:40</sub> ve (c) C-ZnO <sub>90:10</sub> .....	79
Şekil 6.4. SK1 karışımı için farklı pişirme koşullarında alınan MDR eğrileri (a) 177 °C x 10 dk, (b) 160 °C x 15 dk ve (c) 160 °C x 22 dk .....	81
Şekil 6.5. KK1 karışımı için farklı pişirme koşullarında alınan MDR eğrileri (a) 160 °C x 16 dk, (b) 160 °C x 20 dk ve (c) 145 °C x 15 dk .....	82
Şekil 6.6. YK1 karışımı için farklı pişirme koşullarında alınan MDR eğrileri (a) 145 °C x 33 dk, (b) 145 °C x 50 dk ve (c) 160 °C x 10 dk .....	82
Şekil 6.7. Deneme sırt karışımlarının Mooney test cihaz çıktıları (a) Kontrol WS-ZnO'ya kıyasla, (b) Kontrol Ac-ZnO'ya kıyasla .....	86
Şekil 6.8. Deneme sırt karışımlarının MDR test cihaz çıktıları (a) Kontrol WS-ZnO'ya kıyasla, (b) Kontrol Ac-ZnO'ya kıyasla .....	89
Şekil 6.9. Deneme kuşak kaplama karışımlarının Mooney test cihaz çıktıları (a) Kontrol WS-ZnO'ya kıyasla, (b) Kontrol Ac-ZnO'ya kıyasla .....	89
Şekil 6.10. Kuşak kaplama karışımlarının MDR eğrileri (a) WS-ZnO'ya kıyasla, (b) Ac-ZnO'ya kıyasla.....	91
Şekil 6.11. Yanak karışımlarının Mooney eğrileri (a) WS-ZnO'ya kıyasla, (b) Ac-ZnO'ya kıyasla.....	93
Şekil 6.12. Yanak karışımlarının MDR eğrileri (a) WS-ZnO'ya kıyasla, (b) Ac-ZnO'ya .....	94
Şekil 6.13. Sırt karışımlarının kopma dayanım değerlerinin ısıl yaşlandırma ile değişimi .....	96
Şekil 6.14. Sırt karışımlarının kopmada uzama (%) değerlerinin ısıl yaşlandırma ile değişimi .....	97
Şekil 6.15. Sırt karışımlarının M100 değerlerinin ısıl yaşlandırma ile değişimi.....	99
Şekil 6.16. Sırt karışımlarının M200 değerlerinin ısıl yaşlandırma ile değişimi.....	100
Şekil 6.17. Sırt karışımlarının M300 değerlerinin ısıl yaşlandırma ile değişimi.....	101
Şekil 6.18. Kuşak kaplama karışımlarının kopma dayanımı (MPa) değerlerinin ısıl yaşlandırma ile değişimi.....	103

Şekil 6.19. Kuşak kaplama karışımlarının kopmada uzama (%) değerlerinin ısı yaşlandırma ile değişimi .....	104
Şekil 6.20. Kuşak kaplama karışımlarının M100 (MPa) değerlerinin ısı yaşlandırma ile değişim .....	106
Şekil 6.21. Kuşak kaplama karışımlarının M200 (MPa) değerlerinin ısı yaşlandırma ile değişimi .....	107
Şekil 6.22. Yanak karışımlarının kopma dayanımı (MPa) değerlerinin yaşlandırma süresi ile değişimi.....	109
Şekil 6.23. Yanak karışımlarının kopmada uzama (%) değerlerinin yaşlandırma süresi ile değişimi.....	110
Şekil 6.24. Yanak karışımlarının M100 (MPa) değerlerinin ısı yaşlandırma ile değişimi.....	112
Şekil 6.25. Yanak karışımlarının M200 (MPa) değerlerinin ısı yaşlandırma ile değişimi.....	113
Şekil 6.26. Yanak karışımlarının M200 (MPa) değerlerinin ısı yaşlandırma ile değişimi.....	115
Şekil 6.27. Sırt karışımlarının sertlik (Shore A) değerlerinin yaşlandırma süresi ile değişimi .....	116
Şekil 6.28. Kuşak kaplama karışımlarının sertlik (Shore A) değerlerinin yaşlandırma süresi ile değişimi.....	117
Şekil 6.29. Yanak karışımlarının sertlik (Shore A) değerlerinin yaşlandırma süresi ile değişimi .....	119
Şekil 6.30. Sırt karışımlarının kayma hızına bağlı doğrusal aşınma hızı değişimi.....	128
Şekil 6.31. Sırt karışımlarının kayma hızına bağlı doğrusal aşınma enerjisi değişimi.....	129
Şekil 6.32. Deneme karışımlarının 160 °C x 300 dk pişirme koşulunda alınan MDR eğrileri (a) Kontrol WS-ZnO'ya kıyasla, (b) Kontrol Ac-ZnO'ya kıyasla .....	130
Şekil 6.33. Yanak karışımı örneklerinin statik koşullar altında 72 saat yaşlandırma sonrasındaki üst yüzeylerinin ışık mikraskobu görüntüleri (a) YK1, (b) YK2, (c) YD4, (d) YD6 ve (e) YD9 .....	132
Şekil 6.34. Yanak karışımı örneklerinin statik koşullar altında 72 saat yaşlandırma sonrasındaki yan yüzeylerinin ışık mikraskobu görüntüleri (a) YK1, (b) YK2, (c) YD4, (d) YD6 ve (e) YD9 .....	133
Şekil 6.35. Yanak karışımı örneklerinin statik koşullar altında 72 saat yaşlandırma sonrasındaki bükülmüş yan yüzeylerinin ışık mikraskobu görüntüleri (a) YK1 (b) YK2, (c) YD4, (d) YD6 ve (e) YD9 .....	134
Şekil 6.36. Yanak karışımı örneklerinin dinamik koşullar altında 72 saat yaşlandırma sonrasındaki üst yüzeylerinin ışık mikraskobu görüntüleri (a) YK1, (b) YK2, (c) YD4, (d) YD6 ve (e) YD9 .....	135
Şekil 6.37. Yanak karışımı örneklerinin dinamik koşullar altında 72 saat yaşlandırma sonrasındaki yan yüzeylerinin ışık mikraskobu görüntüleri (a) YK1, (b) YK2, (c) YD4, (d) YD6 ve (e) YD9 .....	136
Şekil 6.38. Yanak karışımı örneklerinin dinamik koşullar altında 72 saat yaşlandırma sonrasındaki bükülmüş yan yüzeylerinin ışık	

	mikraskobu görüntüleri (a) YK1 (b) YK2, (c) YD4, (d) YD6 ve (e) YD9 .....	137
Şekil 6.39.	Yanak karışımı örneklerinin dinamik koşullar altında 72 saat yaşlandırma sonrasındaki bükülmüş yan yüzeylerinin ışık mikraskobu ölçümleri (a) YK1 (b) YK2, (c) YD4, (d) YD6 ve (e) YD9 .....	138
Şekil 6.40.	Yanak karışım örneklerinin dinamik koşullar altında 24 saat yaşlandırma sonrasındaki görüntüleri (a,b) YK1, (c,d) YK2, (e,f) YD4, (g,h) YD6 ve (i,j) YD9 .....	141
Şekil 6.41.	Yanak karışım örneklerinin dinamik koşullar altında 48 saat yaşlandırma sonrasındaki görüntüleri (a,b) YK1, (c,d) YK2, (e,f) YD4, (g,h) YD6 ve (i,j) YD9 .....	142
Şekil 6.42.	Yanak karışım örneklerinin dinamik koşullar altında 72 saat yaşlandırma sonrasındaki görüntüleri (a,b) YK1, (c,d) YK2, (e,f) YD4, (g,h) YD6 ve (i,j) YD9 .....	144
Şekil 6.43.	Yanak karışım örneklerinin dinamik koşullar altında 96 saat yaşlandırma sonrasındaki görüntüleri (a,b) YK1, (c,d) YK2, (e,f) YD4, (g,h) YD6 ve (i,j) YD9 .....	145
Şekil 6.44.	Yanak karışım örneklerinin dinamik koşullar altında 120 saat yaşlandırma sonrasındaki görüntüleri (a,b) YK1, (c,d) YK2, (e,f) YD4, (g,h) YD6 ve (i,j) YD9 .....	147
Şekil 6.45.	Yanak karışım örneklerinin dinamik koşullar altında 144 saat yaşlandırma sonrasındaki görüntüleri (a,b) YK1, (c,d) YK2, (e,f) YD4, (g,h) YD6 ve (i,j) YD9 .....	149

## TABLolar DİZİNİ

Tablo 3.1. Binek lastik bileşenleri (ağırlık oranları) .....	8
Tablo 3.2. Kauçukların isimlendirilmesi .....	10
Tablo 3.3. Lastik endüstrisinde kullanılan karbon siyahlarının ASTM sınıflandırması .....	18
Tablo 3.4. Hızlandırıcıların sınıflandırılması .....	27
Tablo 5.1. Kullanılan ZnO malzemelerin kodlanması ve yapıları .....	46
Tablo 5.2. Karışım reçetelerinde ZnO dışında kullanılan diğer hammaddeler ve özellikleri .....	49
Tablo 5.4. Sırt karışım reçetesi (ana karışım).....	51
Tablo 5.5. Sırt karışım reçetesi (son karışım).....	51
Tablo 5.6. Kuşak kaplama karışım reçetesi (ana karışım).....	52
Tablo 5.7. Kuşak kaplama karışım reçetesi (son karışım).....	52
Tablo 5.8. Yanak karışım reçetesi (ana karışım) .....	53
Tablo 5.9. Yanak karışım reçetesi (son karışım) .....	53
Tablo 5.10. Pişirme koşulları.....	56
Tablo 5.11. Kullanılan kauçukların çözünürlük parametreleri.....	64
Tablo 5.12. Ozon test koşulları.....	72
Tablo 5.13. Isıl yaşlandırma sonrası ozon test koşulları .....	72
Tablo 6.1. Kullanılan ZnO malzemelerinin özellikleri.....	75
Tablo 6.2. Kullanılan ZnO malzemelerinin kimyasal özellikleri .....	75
Tablo 6.3. WDXRF elementel analiz sonuçları.....	76
Tablo 6.4. ICP-OES elementel analiz sonuçları .....	76
Tablo 6.5. SK1 karışımı için MDR deneme sonuçları .....	80
Tablo 6.6. KK1 karışımı için MDR deneme sonuçları.....	83
Tablo 6.6. YK1 karışımı için MDR deneme sonuçları.....	83
Tablo 6.8. Sırt karışımlarının Mooney test sonuçları .....	87
Tablo 6.9. Sırt karışımlarının MDR test sonuçları .....	89
Tablo 6.10. Kuşak kaplama karışımlarının Mooney test sonuçları .....	89
Tablo 6.11. Kuşak kaplama karışımlarının MDR test sonuçları .....	89
Tablo 6.12. Yanak karışımlarının Mooney test sonuçları .....	92
Tablo 6.13. Yanak karışımlarının MDR test sonuçları.....	93
Tablo 6.14. Sırt karışımlarının kopma dayanımı sonuçları (MPa).....	95
Tablo 6.15. Sırt karışımlarının ısıtıl yaşlandırma sonrası kalan kopma dayanımı değerleri (%) .....	96
Tablo 6.16. Sırt karışımlarının kopmada uzama sonuçları (%).....	97
Tablo 6.17. Sırt karışımlarının ısıtıl yaşlandırma sonrası kalan kopmada uzama değerleri (%) .....	97
Tablo 6.18. Sırt karışımlarının M100 modül değerleri (MPa) .....	98
Tablo 6.19. Sırt karışımlarının ısıtıl yaşlandırma sonrası gelişen M100 değerleri (%).....	99
Tablo 6.20. Sırt karışımlarının M200 modül değerleri (MPa) .....	100
Tablo 6.21. Sırt karışımlarının ısıtıl yaşlandırma sonrası gelişen M200 değerleri (%).....	100
Tablo 6.22. Sırt karışımlarının M300 modül değerleri (MPa) .....	101
Tablo 6.23. Sırt karışımlarının ısıtıl yaşlandırma sonrası gelişen M300 değerleri (%).....	102

Tablo 6.24. Kuşak kaplama karışımlarının kopma dayanımı sonuçları (MPa).....	102
Tablo 6.25. Kuşak kaplama karışımlarının ısı yaşlandırma sonrası kalan kopma dayanımı değerleri (%) .....	103
Tablo 6.26. Kuşak kaplama karışımlarının kopmada uzama sonuçları (%).....	104
Tablo 6.27. Kuşak kaplama karışımlarının ısı yaşlandırma sonrası kalan kopmada uzama değerleri (%) .....	105
Tablo 6.28. Kuşak kaplama karışımlarının M100 modül değerleri (MPa) .....	105
Tablo 6.29. Kuşak kaplama karışımlarının ısı yaşlandırma sonrası gelişen M100 değerleri (%) .....	106
Tablo 6.30. Kuşak kaplama karışımlarının M200 modül değerleri (MPa) .....	107
Tablo 6.31. Kuşak kaplama karışımlarının ısı yaşlandırma sonrası gelişen M200 değerleri (%).....	107
Tablo 6.32. Kuşak kaplama karışımlarının M300 modül değerleri (MPa) .....	108
Tablo 6.33. Yanak karışımlarının kopma dayanımı sonuçları (MPa) .....	109
Tablo 6.34. Yanak karışımlarının ısı yaşlandırma sonrası kalan kopma dayanımı değerleri (%) .....	109
Tablo 6.35. Yanak karışımlarının kopmada uzama sonuçları (%) .....	110
Tablo 6.36. Yanak karışımlarının ısı yaşlandırma sonrası kalan kopmada uzama değerleri (%).....	111
Tablo 6.37. Yanak karışımlarının M100 modül değerleri (MPa).....	111
Tablo 6.38. Yanak karışımlarının ısı yaşlandırma sonrası gelişen M100 değerleri (%) .....	112
Tablo 6.39. Yanak karışımlarının M200 modül değerleri (MPa).....	113
Tablo 6.40. Yanak karışımlarının ısı yaşlandırma sonrası gelişen M200 değerleri (%) .....	113
Tablo 6.41. Yanak karışımlarının M300 modül değerleri (MPa).....	114
Tablo 6.42. Yanak karışımlarının ısı yaşlandırma sonrası gelişen M300 değerleri (%).....	114
Tablo 6.43. Sırt karışımlarının ısı yaşlanmaya bağlı sertlik testi sonuçları (Shore A).....	116
Tablo 6.44. Sırt karışımlarının ısı yaşlandırma sonrası artan sertlik değerleri (Shore A) .....	116
Tablo 6.45. Kuşak kaplama karışımlarının ısı yaşlanmaya bağlı sertlik testi sonuçları (Shore A) .....	117
Tablo 6.46. Kuşak kaplama karışımlarının ısı yaşlandırma sonrası artan sertlik değerleri (Shore A) .....	118
Tablo 6.47. Yanak karışımlarının ısı yaşlanmaya bağlı sertlik testi sonuçları (Shore A).....	118
Tablo 6.48. Yanak karışımlarının ısı yaşlandırma sonrası artan sertlik değerleri (Shore A) .....	119
Tablo 6.49. Sırt karışımlarının yırtılma mukavemeti sonuçları (N/mm).....	120
Tablo 6.50. Kuşak kaplama karışımlarının yırtılma mukavemeti sonuçları (N/mm).....	120
Tablo 6.51. Yanak karışımlarının yırtılma mukavemeti test sonuçları (N/mm) .....	120
Tablo 6.52. Sırt karışımlarının çapraz bağ yoğunluğu test sonuçları .....	121
Tablo 6.53. Kuşak kaplama karışımlarının çapraz bağ yoğunluğu test sonuçları .....	121
Tablo 6.54. Yanak karışımlarının çapraz bağ yoğunluğu test sonuçları .....	121
Tablo 6.55. Sırt karışımlarının özgül ağırlık test sonuçları (g/cm <sup>3</sup> ) .....	122

Tablo 6.56. Kuşak kaplama karışımlarının özgül ağırlık test sonuçları (g/cm <sup>3</sup> ).....	122
Tablo 6.57. Yanak karışımlarının özgül ağırlık test sonuçları (g/cm <sup>3</sup> ) .....	122
Tablo 6.58. Sırt karışımlarının sekme esnekliği test sonuçları (%).....	123
Tablo 6.59. Kuşak kaplama karışımlarının sekme esnekliği test sonuçları (%).....	123
Tablo 6.60. Yanak karışımlarının sekme esnekliği test sonuçları (%) .....	123
Tablo 6.61. Sırt karışımlarının fleksometre test sonuçları .....	124
Tablo 6.62. Kuşak kaplama karışımlarının fleksometre test sonuçları.....	124
Tablo 6.63. Yanak karışımlarının fleksometre test sonuçları .....	124
Tablo 6.65. Kuşak kaplama karışımlarının yorulma test sonuçları (Kontür) .....	125
Tablo 6.66. Yanak karışımlarının yorulma test sonuçları (Kontür) .....	125
Tablo 6.67. Sırt karışımlarının aşındırma test sonuçları (% 1 kayma hızı).....	126
Tablo 6.68. Sırt karışımlarının aşındırma test sonuçları (% 3 kayma hızı).....	126
Tablo 6.69. Sırt karışımlarının aşındırma test sonuçları (% 5 kayma hızı).....	127
Tablo 6.70. Sırt karışımlarının aşındırma test sonuçları (% 7 kayma hızı).....	127
Tablo 6.71. Sırt karışımlarının aşındırma test sonuçları (% 10 kayma hızı).....	127
Tablo 6.72. Sırt karışımlarının aşındırma test sonuçları (% 12 kayma hızı).....	127
Tablo 6.73. Sırt karışımlarının aşındırma test sonuçları (% 15 kayma hızı).....	128
Tablo 6.74. Sırt karışımlarının aşındırma test sonuçları (% 20 kayma hızı).....	128
Tablo 6.75. Kuşak kaplama karışımlarının kauçuk karışım-metal yapışma kuvveti (N) test sonuçları.....	131
Tablo 6.76. Kuşak kaplama karışımlarının kauçuk karışım-metal yapışma görünüm (%) test sonuçları.....	131
Tablo 6.77. Yanak karışımı örneklerinin dinamik koşullar altında 72 saat yaşlandırma sonrasındaki çatlak derinlik ölçümleri (mm) .....	140
Tablo 6.78. ZnO malzemelerin kauçuk karışımlarının karbon ayak izine etkileri .....	151
Tablo 6.79. Geleneksel ZnO malzemesine kıyasla deneme malzemeleri için hesaplanan malzeme ve karışım maliyet avantajları (%) .....	152
Tablo 6.80. Aktif ZnO malzemesine kıyasla deneme malzemeleri için hesaplanan malzeme ve karışım maliyet avantajları (%) .....	152
Tablo 6.81. Aktif ZnO malzemesine kıyasla deneme malzemeleri için hesaplanan malzeme ve karışım maliyet avantajları (%) .....	152

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

C	: Kalıcı deformasyon değeri, (%)
D	: Kauçuk karışımının özgül ağırlığı, (g/cm <sup>3</sup> )
D <sub>d</sub>	: Aşındırıcı tekerlek çapı, (mm)
dk	: Dakika
D <sub>r</sub>	: Aşındırıcı tekerlek hızı, (rpm)
E'	: Depolama modülü, (MPa)
F <sub>0</sub>	: Numuneye uygulanan yatay yöndeki ortalama kuvvet, (N)
F <sub>y</sub>	: Numuneye uygulanan dikey yöndeki ortalama kuvvet, (N)
g	: Gram
IV	: Başlangıç Viskozitesi, (MU)
m <sub>0</sub>	: İlk tartım ağırlığı (kuru tartım ağırlığı), (g)
m <sub>1</sub>	: Şişme sonrası ilk tartım ağırlığı, (g)
m <sub>2</sub>	: Sabit ağırlık, (g)
m <sub>f</sub>	: Dolgu malzemesinin ağırlığı, (g)
M100	: %100 Uzamadaki modül değeri, (MPa)
M200	: %200 Uzamadaki modül değeri, (MPa)
M300	: %300 Uzamadaki modül değeri, (MPa)
M <sub>c</sub>	: Çapraz bağlar arasındaki ortalama moleküler ağırlığı, (g/mol)
MH	: Maximum tork, (dNm)
MH-ML	: Tork farkı, (dNm)
ML	: Minimum tork, (dNm)
ML (1+4)	: 5. Dakikadaki viskozite, (MU)
MV	: Minimum viskozite, (MU)
R	: İdeal gaz sabiti, (J/molK)
s	: Saat
S <sub>d</sub>	: Örnek çapı, (mm)
sn	: Saniye
S <sub>w</sub>	: Örnek genişliği, (mm)
S'	: Elastik tork, (dNm)
S'@t10	: t10'daki tork değeri, (dNm)
S'@t50	: t50'deki tork değeri, (dNm)
S'@t90	: t90'daki tork değeri, (dNm)
S'@ts2	: ts2'deki tork değeri, (dNm)
T	: Mutlak sıcaklık, (K)
t	: Test süresi, (sn)
t5	: Minimum viskoziteden 5 mooney birimi sonraki pişme başlangıcı, (dak)
t10	: %10 Net pişmeye ulaşmak için gerekli süre, (dak)
t35	: Minimum viskoziteden 35 mooney birimi sonraki pişme zamanı, (dak)
t50	: %50 Net pişmeye ulaşmak için gerekli süre, (dak)
t90	: %90 Net pişmeye ulaşmak için gerekli süre, (dak)
tan δ	: Tanjant delta
t <sub>0</sub>	: Orijinal numune yüksekliği, (mm)
t <sub>f</sub>	: Test sonrası numune yüksekliği, (mm)
T <sub>g</sub>	: Camsı geçiş sıcaklığı, (°C)
ts1	: Minimum tork'tan bir birim artışa ulaştığı süre, yanık zamanı, (dak)
ts2	: Scorch süresi, (dak)

V	: Doğrusal aşınma hızı, (mm/1000 km)
V <sub>c</sub>	: Çapraz bağ yoğunluğu, (mol/g)
V <sub>r</sub>	: Şişmiş kauçuğun molar fraksiyonu
V <sub>s</sub>	: Toluenin molar fraksiyonu, (cm <sup>3</sup> /mol)
Q	: Şişme oranı, (%)
p <sub>p</sub>	: Çözücünün yoğunluğu, (g/cm <sup>3</sup> )
p <sub>s</sub>	: Kauçuk karışımının yoğunluğu, (g/cm <sup>3</sup> )
χ	: Flory-Huggins polimer-çözücü etkileşim parametresi
χ <sub>β</sub>	: Entropi katkısı
δ <sub>s</sub>	: Çözücünün çözünürlük parametresi, (J/cm <sup>3</sup> ) <sup>1/2</sup>
δ <sub>r</sub>	: Kauçuk karışımının çözünürlük parametresi, (J/cm <sup>3</sup> ) <sup>1/2</sup>
δ <sub>1</sub>	: Kauçuk 1'in çözünürlük parametresi, (J/cm <sup>3</sup> ) <sup>1/2</sup>
δ <sub>2</sub>	: Kauçuk 2'in çözünürlük parametresi, (J/cm <sup>3</sup> ) <sup>1/2</sup>
ø <sub>1</sub>	: Kauçuk 1'in hacimsel fraksiyonu
ø <sub>2</sub>	: Kauçuk 2'nin hacimsel fraksiyonu
εW	: Doğrusal aşınma enerjisi, (kgf/cm <sup>2</sup> )
ΔW	: Ağırlık kaybı, (g)

### Kısaltmalar

ADH	: Adipic Acid Dihydrzide (Adipik Asit Dihidrazid)
ADS	: Air Dried Sheets (Havada Kurutulmuş Tabakalar)
ASTM	: American Society for Testing and Materials (Amerikan Test ve Malzemeler Derneği)
BET	: Brunauer, Emmett, Teller (Spesifik Yüzey Alanı)
BIIR	: Brominated Isobutylene-Isoprene Rubber (Bromobütül Kauçuk)
BR	: Butadiene Rubber (Bütadien Kauçuk)
CBS	: N-sikloheksilbenzotiyazol-2-sülfenamid
CIIR	: Chlorinated Isobutylene-Isoprene Rubber (Klorobütül Kauçuk)
CR	: Chloroprene Rubber (Kloropren Kauçuk)
CRA	: Cord Rubber Adhesion (Kord Kauçuk Yapışması)
CRI	: Cure Rate Index (Pişme Hızı İndeksi)
CSR	: Corporate Sustainability and Responsibility (Kurumsal Sürdürülebilirlik ve Sorumluluk)
C/B	: Carbon Black (Karbon Karası)
DCBS	: Dicyclohexylbenzothiazole Sulfenamide (N,N-disikloheksil-2-benzotiyazol sülfendamid)
DPG	: 1,3-Diphenylguanidine (1,3-Difenilguanidin)
EDS	: Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (Enerji Dağılım X-ışını Spektrometresi)
EPM	: Ethylene Propylene Monomer (Etilen Propilen Monomer)
EPDM	: Ethylene Propylene Diene Monomer (Etilen Propilen Dien Monomer)
eSBR	: Emulsion Styrene Butadiene Rubber (Emülsiyon Stiren-Butadien Kauçuk)
ETRMA	: European Tyre & Rubber Manufacturers Association (Avrupa Lastik ve Kauçuk Üreticileri Derneği)
FEF	: Fast Extrusion Furnace (Hızlı Ekstrüzyon Fırın)
FT	: Fine Thermal (İnce Termal)

GHG EF	: Greenhouse Emission Factor (Sera Gazı Emisyon Faktörü)
GPF	: General Purpose Furnace (Genel Amaçlı Fırın)
HAF	: High Abrasion Furnace (Yüksek Aşınma Fırın)
HMT	: Hexamethylenetetramine (Hexamethilentetramin)
HVBR	: High Vinyl Butadiene Rubber (Yüksek Vinil Bütadien Kauçuğu)
ICP-OES	: Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectroscopy (İndüktif Eşleşmiş Plazma-Optik Emisyon Spektrometresi)
IIR	: Isobutylene Isoprene Rubber (İzobütülen İsopren Kauçuk)
IR	: Polyisoprene Rubber (Poliizopren Kauçuk)
ISAF	: Intermediate Super Abrasion Furnace (Orta Üstün Aşınma Fırın)
ISO	: International Standart of Organization (Uluslararası Standartlar Örgütü)
ISNR	: India Standard Natural Rubber (Hindistan Standart Doğal Kauçuk)
IZA	: International Zinc Association (Uluslararası Çinko Derneği)
JATMA	: Japan Automobile Tyre Manufacturers Association (Japon Otomotiv Lastik Üreticileri Birliği)
MCC	: Microcrystalline Cellulose (Mikrokristalin Selüloz)
MT	: Medium Thermal (Orta Termal)
MU	: Mooney Unit
N	: Normal Vulcanization (Normal Vulkanizasyon)
NBR	: Nitrile Butadiene Rubber (Nitril Bütadien Kauçuk)
NR	: Normal Cure (Natural Rubber)
OE-SBR	: Oil Extended Styrene-Butadiene Rubber (Yağ ile Çoğalmış Stiren-Butadien Kauçuk)
PBD	: Polybutadiene Rubber (Polibütadien Kauçuk)
phr	: Parts Per Hundred Rubber
PRI	: Plasticity Retention Index
PVBC	: Polyvinylbenzyl Chloride (Polivinilbenzenil Klorür)
RSS	: Ribbed Smoked Sheets (Kabartılmış Füme Kauçuk Levhalar)
S	: Slow Cure (Yavaş Vulkanizasyon)
SAF	: Super Abrasion Furnace (Üstün Aşınma Fırın)
SBR	: Styrene-Butadiene Rubber (Stiren-Bütadien Kauçuk)
SEM	: Scanning Electron Microscope (Taramalı Elektron Mikroskobu)
SIR	: Standard Indonesian Rubber (Standart Endonezya Kauçuğu)
SMR	: Standard Malaysian Rubber (Standart Malezya Kauçuğu)
SSBR	: Solution Styrene-Butadiene Rubber (Çözelti Stiren-Butadien Kauçuk)
SRF	: Semi Reinforcing Furnace (Yarı Güçlendirici Fırın)
SSR	: Standard Sri Lanka Rubber (Standart Sri Lanka Kauçuğu)
STR	: Standard Thailand Rubber (Standart Tayland Kauçuğu)
SVR	: Standard Vietnam Rubber (Standart Vietnam Kauçuğu)
TBBS	: N-Tertiary Butyl-2-Benzothiazole Sulfenamide (N-Tersiyerbutil-2-benzotiyazol-sülfenamid)
TDS	: Technical Data Sheet (Teknik Veri Sayfası)
TGD	: Technical Guide Document (Teknik Rehber Dokümanı)
TRWP	: Tire and Road Wear Particles (Lastik ve Yol Aşınma Parçacıkları)
TSR	: Technically Specified Rubber (Teknik Olarak Belirlenmiş Kauçuk)
US EPA	: United States Environmental Protection Agency (Amerika Birleşik Devletleri Çevre Koruma Ajansı)

ZBDP : Zinc O,O-di-N-phosphorodithioate (Çinko-O,O-di-N-fosforoditiyoat)



# ÇEVRE DOSTU KOMPOZİT ÇİNKO OKSİT MALZEMELERİN KAUÇUK KARIŞIMLARINDA KULLANIMININ ARAŞTIRILMASI

## ÖZET

Çinko oksit, kauçuk karışımlarında daha yüksek çapraz bağ yoğunluğu elde etmek amacıyla kullanılan, pişme reaksiyon kinetiğini etkileyen ve kısa sülfür çapraz bağların oluşumunu teşvik eden en etkin aktivatörlerden biri olarak kabul edilmektedir. Pişme süreci üzerindeki etkisinin yanı sıra, kauçuğun fiziksel ve mekanik özellikleri üzerinde de faydalı etkileri vardır. Ancak, çinko komplekslerinin insan sağlığı ve çevre, özellikle sucul yaşam, üzerinde önemli etkileri bulunmakta olup, ekolojik kaygılar sebebiyle kauçuk reçetelerinde kullanımının azaltılması teşvik edilmektedir.

Bu çalışmanın kapsamında, kompozit çinko oksit malzemeleri, ticari olmayan üç farklı reçete (araç lastiği için sırt, kuşak kaplama ve yanak reçeteleri) ile oluşturulan karışımlarda aktivatör olarak kullanılmış ve performansları geleneksel çinko oksit ve aktif çinko oksit içeren kontrol karışımları ile karşılaştırılmış, tüm karışımların pişme ve fiziksel-mekanik özellikleri değerlendirilmiştir. Amaç, ekolojik ve ekonomik kaygılar nedeniyle kauçuk reçetelerinde çinko içeriğini azaltmaktır.

Yapılan çalışmalar sonucunda kompozit çinko oksit malzemelerin karışımların pişme ve fiziksel-mekanik özelliklerini olumsuz etkilemediği, geleneksel çinko oksit malzemelerine alternatif olabileceği ve kauçuk karışımlarında daha az çinko oksit kullanımı sağladıkları için hem çevresel hem de ekonomik kaygılar nedeniyle tercih edilebileceği sonucuna varılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Çinko Oksit, Kauçuk, Kompozit Çinko Oksit, Mekanik Özellikler, Pişme Davranışı.

# INVESTIGATION OF THE USE OF ENVIRONMENTALLY FRIENDLY COMPOSITE ZINC OXIDE MATERIALS IN RUBBER COMPOUNDS

## ABSTRACT

Zinc oxide is considered as one of the most effective activators used to achieve higher crosslink density in rubber compounds, as it influences curing reaction kinetics and promotes the formation of short sulfur crosslinks. In addition to its impact on the curing process, it also has beneficial effects on the physical and mechanical properties of rubber. However, zinc complexes have significant effects on human health and the environment, particularly on aquatic life, and due to ecological concerns, there is a push to reduce their usage in rubber formulations.

Within the scope of this study, composite zinc oxide materials were used as activators in rubber compounds (tread, skim, and sidewall formulations for vehicle tires), and their performance was compared with control compounds containing conventional zinc oxide and active zinc oxide. The curing and physico-mechanical properties of all compounds were evaluated. The aim was to reduce the zinc content in rubber formulations due to ecological and economic concerns.

The results of the study indicated that composite zinc oxide materials did not negatively affect the curing and physico-mechanical properties of the compounds, and thus they could serve as alternatives to conventional and active zinc oxide materials. Furthermore, since they facilitate the use of less zinc oxide in rubber compounds, they can be preferred due to both environmental and economic reasons.

**Keywords:** Zinc Oxide, Rubber, Composite Zinc Oxide, Mechanical Properties, Curing Behavior.

## 1. GİRİŞ

Çinko oksit (ZnO), en önemli metal oksitlerden biri olup, son 100 yılda plastikler, seramikler, cam, çimento, boyalar, yangın geciktiriciler gibi çeşitli alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır (Sahoo ve diğ., 2007; Ma ve Williams, 2013). ZnO, mükemmel UV engelleme özelliği sayesinde güneş kremlerinde ve kozmetik ürünler gibi kişisel bakım ürünlerinde UV stabilizatörü olarak kullanılır (Jiang ve diğ., 2018). Özgün optik ve elektriksel özellikleri nedeniyle optoelektronik alanlardaki uygulamalar için yüksek potansiyele sahiptir (Kumar ve diğ., 2014). Ayrıca, antibakteriyel ve antifungal özellikleri nedeniyle doku mühendisliğinde kullanımı vardır (Rai ve Bajpai, 2020; Rai ve Bajpai, 2021; Patra ve diğ., 2020). Çinko oksidin bir diğer önemli kullanım alanı ise lastik sektöründe kükürt vulkanizasyonunda kimyasal aktivatör olarak kullanılmasıdır (Mostoni ve diğ., 2019) ve tüketimi yıllık 105 tona kadar ulaşmaktadır (Das ve diğ., 2011). Kükürt pişme sistemleri içeren kauçuk karışım reçetelerinde, etkin bir dağılım (dispersiyon) elde etmek için 3 ila 5 phr (parts per hundred rubber) aralığında kullanılır (Mostoni ve diğ., 2019; Sreethu ve Naskar, 2021; Chukwu ve diğ., 2019). Lastik teknolojisinde, ZnO malzemesi, stearik asit, laurik asit ve bunların tuzları gibi uygun yağ asidi kombinasyonları ile birlikte aktivatör olarak kullanılır (Susanna ve diğ., 2017; Lee ve diğ., 2018). Böylece, kauçuk karışımlarında kükürdü aktive etmede daha etkili olan bir ara tuz kompleksi oluşturulur ve hızlandırıcılarla birlikte daha yüksek vulkanizasyon hızlarına ulaşılır (Kruzelak ve diğ., 2016). Kısa sülfür çapraz bağlarının oluşumunu teşvik ederek daha yüksek çapraz bağ yoğunluğu elde edilir ve pişme süresi kısaltılır (Song ve diğ., 2022). ZnO kullanımı hem enerji tasarrufu sağlar hem de işlem maliyetlerini düşürür (Mostoni ve diğ., 2021). Araç lastiği, gelişimi disiplinler arası Ar-Ge faaliyeti gerektiren bir yüksek mühendislik ürünüdür. Makroskopik performansı, santimetre ile nanometre boyut aralığındaki hammaddelerden hazırlanan kauçuk karışımlarının özelliklerine bağlıdır. Kauçuk karışımları, ana hammaddeleri polimer, mikro/nano dolgular ve kordlar olan mikro/nano kompozitlerdir. Araç lastiği teknolojisi, sihirli üçgen diye adlandırılan ve üçgenin köşelerinde yer alan “yuvarlanma direnci”, “aşınma direnci” ve “ıslak yol tutuş” özelliklerinin optimizasyonu üzerine kurulmuştur. Bu optimizasyon, yeni malzemelere olan ihtiyacı ortaya koymaktadır (URL-1).

Çinko oksidin birçok endüstride kullanımının olumlu etkilerine rağmen, çinko (Zn) çevresel sorunlara yol açmaktadır (Thaptong ve diğ., 2019). Avrupa Konseyi Direktifi 2004/73/EC’de, çinko komplekslerinin sucul yaşam üzerindeki toksik etkileri nedeniyle çevreye salınan Zn miktarının belirli bir seviyede tutulmasının önemli olduğu vurgulanmaktadır (Boonmahitthisud ve Boonkerd, 2021; Alam ve diğ., 2022). Çinko, çevreye birçok şekilde salınır (Heideman ve diğ., 2004). İlk salınımda, endüstriyel süreçlerde çinko üretimi sırasında atık su ve diğer salınımlar yoluyla çevreye salınabilir (Kadlcak ve diğ., 2011). Sonraki salınımlar ise atık lastik ürünlerinin ve çinko içeren diğer ürünlerin çöp sahalarında biriktirilmesiyle veya yakılmasıyla sızıntı yaparak toprağa ve yeraltı sularına karışabilir (Pysklo ve diğ., 2008; Roy ve diğ., 2014). Ancak, yeraltı sularına karışmasının en büyük nedeni, lastiklerin aşınmasıyla çıkan parçacıklardır (Maiti ve diğ., 2016). Bu nedenle, çinkonun doğaya salınımı kontrol edilmelidir ve lastik karışımlarında çinko miktarının düşük seviyelerde tutulması önemli bir konudur. Hem çevresel kısıtlamalar hem de ekonomik etkiler göz önüne alındığında, lastik ürünlerinde çinko miktarını azaltmaya yönelik çalışmalar son yıllarda büyük ilgi görmüştür. Genel olarak, bunu sağlamak için iki yol vardır; (i) pişme aşamasında lastik matrisinde çinko aktivitesini artırmak ve dolayısıyla çinko iyonlarının reaksiyon için kullanılabilirliğini artırmak, (ii) çevreye daha az zarar veren diğer aktivatörleri çinko oksit yerine kullanmaktır. Çinko oksidin reaktivitesi, fiziksel ve kimyasal özellikleri, üretim sürecinden (Shree ve diğ., 2020; Manikandan ve diğ., 2018; Ghorbani ve diğ., 2015), yüzey alanından (Sahoo ve diğ., 2007), partikül boyutundan (Das ve diğ., 2011) ve çapraz bağlayıcı ajan ile kauçuk zinciri arasındaki arayüzeyin boyutunu etkileyen morfolojiden (Jin ve diğ., 2013; Sofianos ve diğ., 2021) etkilenir.

Bu tez kapsamında, geleneksel aktivatörler yerine kompozit ZnO malzemeleri kullanılarak kauçuk karışımlarında ZnO miktarının azaltılma olasılığı araştırılmıştır. Böylece, ZnO kullanımı %10-60 oranında azaltılabilmektedir. Bu malzemeler kullanılarak deneme karışımları hazırlanmış, pişme özellikleri ve fiziksel-mekanik performansları incelenmiştir. Sonuçlar, çevresel ve ekonomik kazançlar sağlamak amacıyla kompozit ZnO malzemelerinin iyi bir alternatif olup olmadığını belirlemek için geleneksel aktivatörlerle hazırlanan kontrol karışımları ile karşılaştırılmıştır.

## 2. ARAÇ LASTİĞİ BİLEŞENLERİ

Lastik, aracın yola temas eden tek parçası olup, aracın güvenliği, performansı ve konforu açısından temel rol oynayan önemli bir bileşendir. Araç ile yol yüzeyi arasında kritik bir bağlantı sağlar, aracın ağırlığını taşır, bir yastık gibi darbeleri emerek aracı korur ve aracın yön değiştirmesini ve dönmesini sağlar. Lastikler, yol tutuşu, konfor, dayanıklılık, enerji verimliliği ve toplam maliyet arasında bir denge kurmalıdır. Bu rekabet eden ihtiyaçlar sonucunda, lastikler düşünüldüğünden daha karmaşık bir şekilde tasarlanıp üretilmektedir (URL-2). Basit bir halka gibi görünseler de lastik üretim süreci, bir dizi önemli malzemenin dahil olduğu karmaşık bir süreçtir. Farklı lastik türleri, belirli sürüş koşulları ve araç gereksinimlerine hitap etmek için tasarlanmıştır. Her mevsim lastikleri, farklı hava koşullarında çok yönlülük sunarken; off-road maceraları ya da yüksek performanslı yarışlar için özel olarak tasarlanmış lastikler, aracın yol tutuşu, sürüş dinamikleri ve genel sürüş deneyimi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Kullanım alanlarına göre araç lastikleri aşağıdaki şekilde sınıflandırılır (URL-3);

- Binek otomobil lastikleri
- Otobüs / kamyon lastikleri
- Hafif ticari araç lastikleri
- 4×4 / SUV lastikleri
- Motosiklet lastikleri
- Minibüs lastikleri
- Scooter lastikleri
- Bisiklet lastikleri

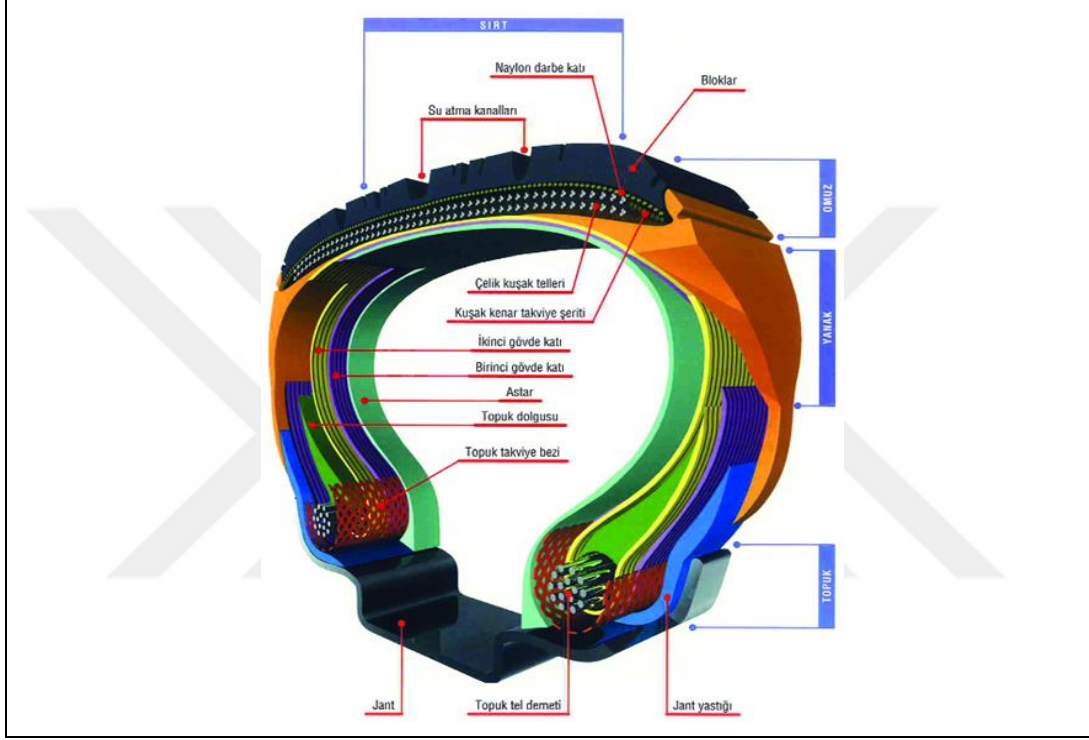
Bunların yanı sıra, iş makineleri ve traktörler gibi ağır vasıtalar için üretilen lastikler de farklılık arz eder. Binek otomobil lastikleri, daha sessiz, daha düzgün ve daha konforlu bir sürüş sunar. Bu lastikler, ıslak ve kuru koşullarda iyi performans gösterir, ancak zorlu veya agresif arazilerde off-road kullanımı için uygun değildir. Binek otomobil lastiklerinin üç ana türü vardır: Düşük Yuvarlanma Direnci lastikleri, Touring lastikleri ve Performans lastikleri. Düşük yuvarlanma direnci lastikleri, touring lastikleri ve performans lastikleri. Düşük yuvarlanma direnci, lastiklerin aynı miktarda enerji ve yakıt kullanarak geleneksel lastiklerden daha uzun mesafeler gitmesini sağlayan teknolojik ilerlemeleri ifade eder (URL-4). Touring lastikler, daha geniş ve kalın sırt desenlerine

sahip olup, yol ile orta seviyede temas sağlar. Bu sayede, tümseklerin yarattığı sarsıntıları azaltarak konforu artırmakla kalmaz, aynı zamanda çeşitli zeminlerde dengeli ve çok yönlü bir performans sunar (URL-5). Çoğu performans lastiğinden daha uzun bir dış ömrü, geliştirilmiş yanıt verme, yol konforu ve gürültü kontrolü sağlamaları ile bilinirler. Performans lastikleri, düşük yanak yüksekliğiyle tasarlanmıştır, bu da viraj alma kabiliyetini geliştirir. Özel yapıları sayesinde üstün yol tutuşu, manevra kabiliyeti ve viraj performansı sunar. Kullanılan özel malzemeler, bu lastiklerin normal lastiklere göre daha yüksek hızlara ulaşabilmesini sağlar (URL-6). Hafif ticari araç lastikleri, otoyol zemini lastiklerine göre daha agresif bir desene, daha güçlü yan duvarlara ve yan duvar hasarına karşı daha iyi korumaya sahiptir. İlginç bir şekilde, kesilme ve çiplenmeye karşı dirençlidirler ve ıslak, kaygan yüzeylerde önemli ölçüde daha iyi tutuş sağlarlar. Bu da, toprak yolda ilerlerken, mevcut tutuşunuz konusunda güven duymanızı sağlar (URL-7). 4×4 / SUV lastikleri, 4x4 araçlar için tasarlanmıştır ve hem asfalt yollarda hem de arazi koşullarında yüksek performans sunar. Sırt desenleri, her iki koşulda da optimum performansı sağlamak için özel olarak tasarlanmıştır. Ayrıca, konforlu bir sürüş deneyimi sunarken, güçlendirilmiş yapısı ve esnek yanakları ile de dikkat çeker (URL-8).

Lastiğin yapısı, sırt, omuz, yanak, topuk, karkas, kuşak, astar ve diğer bileşenlerden oluşur (Şekil 1.1) (URL-9). Lastik sırtı, sentetik ve doğal kauçuktan yapılmış olup lastiğin yol yüzeyi ile temas eden kısmıdır. Sahip olduğu dokulu yüzey sayesinde yolu kavrayarak yön kararlılığı ve suyun atılmasına olanak sağlar. Bu, her koşulda güvenli sürüş anlamına gelmektedir. Lastik sırtı, yol ile ve yanak ile bağlantı kurar ve üç bölgeden oluşur: (i) dış sırt, lastiğin yol ile en yoğun temas ettiği bölümdür, farklı yol yüzeylerinde iyi tutuş, aşınmaya karşı direnç ve yönsel denge sağlar, (ii) iç sırt, dış sırtın hemen altında yer alır, yuvarlanma direncini düşürür ve lastiğin iç yapısına (gövde) zarar gelmesini engeller ve (iii) omuz, sırtın dış kenarlarında bulunur, sırt ile yanak arasındaki ideal geçişi sağlar (URL-10). Lastik sırt kısmı lastik performansı üzerinde doğrudan etkili olan ilk kısımdır. Bunlardan ilki yol tutuştur (İng. traction). Yol tutuş, aracın sürüş sırasındaki yol üzerinde sağladığı kavrama ve kontrolü ifade eder. Lastik sırtı, aracın bu tutuşu korumasına yardımcı olur, böylece güvenli ve düzgün bir sürüş deneyimi yaşanır. Aracın lastikleri ne kadar düz ise, özellikle lastikler ıslak veya buzlu yolla temas ettiğinde, yol tutuşu o kadar az olur. Aynı zamanda sırt bölgesi, aracın yönlendirme (İng. handling) ve direksiyon kontrolü üzerinde de büyük bir etkiye sahiptir. Sırtın sahip olduğu farklı desenler, sürüş

deneyimi üzerinde farklı işlevler ve sonuçlar doğurur. Örneğin simetrik bir desen, yüksek stabilite ve düşük yuvarlanma direnci sağladığı için otoyol sürüşleri için daha uygundur. Daha asimetrik olan sırt desenleri ise, ıslak ve kaygan yollarda mükemmel yönlendirme yaparken, yüksek viraj stabilitesi ve güçlü bir yol tutuş sağlar. Lastik sırtı, aracın düzgün ve güvenli bir şekilde hızlanmasını (İng. accelerating); aracın mümkün olan en hızlı şekilde ve en kısa mesafede durmasını yani frenlemeyi (İng. braking) sağlar (URL-11). Özellikle yağışlı mevsimlerde hızlanma ve frenleme çok önemlidir, sırtın sahip olduğu oluklar suyun boşalmasına yardımcı olurken lastik ve yol arasındaki tehlikeli bariyerin kırılmasını sağlar. Sırt bölgesi aynı zamanda yakıt verimliliği üzerinde etkilidir. Daha simetrik bir desene sahip olan sırtlar, daha az çekiş sağladığı için yakıt verimliliğini arttırabilir. Bu da hem parasal tasarruf sağlar hem de çevre açısından iyidir, çünkü yakıt tüketimi azalır ve karbon ayak izi düşer (URL-12). Eksiz üst sırt katları, lastiğin dış katmanı olan sırtın hemen altında bulunur ve yüksek hızda seyahat ederken kritik bir rol oynar. Kauçuk içine yerleştirilmiş güçlü tekstil kordlar, lastiğin çevresini sarar ve böylece lastiğin şeklini koruyarak yüksek hızda dengeli bir sürüş sağlar. Kuşak katları için çelik kord, formun korunmasını ve yön kararlılığını arttıran yüksek mukavemetli kordlardır. Bu yapı radyal gövdeye sahip lastiklere özgüdür. Topuktan topuğa doğru 90° açıyla uzanan gövde katmanlarının üzerinde yer alan ve yalnızca sırt bölgesinde bulunan 20° açıyla yerleştirilmiş çelik veya tekstil kord yapısı, lastiğin hız performansını arttırmaya yardımcı olur. Lastiğin yuvarlanma direncini arttırırken yakıt verimliliği sağlar. Aynı zamanda sahip oldukları çelik kordlar sayesinde lastiğin şeklini koruyan kuşak katları, lastiğin performansını arttırarak daha uzun bir ömür sunar. Çelik kordlar, bazen lastik kordları olarak da adlandırılır, birden fazla telin bir araya getirilip bükülerek, çelik kuşaklar olarak adlandırılan katmanlı yapılara uyum sağlayacak şekilde oluşturulmuş malzemelerdir. Çelik kuşaklar, lastiğin yolun etkilerinden gelen şokları emmesini engeller, lastik basıncının korunmasına yardımcı olur ve aracın ağırlığını destekler (Mohanty, 2016). Bütil kauçuktan yapılan iç astar, hava ile doldurulan iç bölmeyi kapatarak iç lastiksiz (İng. tubeless) lastiklerde iç lastik görevi görür. Çoğunlukla doğal kauçuk içeren yanak bölgesinin amaçlarından biri, ürün hakkında gerekli tüm bilgileri içeren bir işlev görmesidir. Marka adı, lastik tipi, boyut, derecelendirme, hatta ürünün nasıl üretildiği gibi bilgiler bu bölgede yer alır. Sadece birkaç harf ve rakam kombinasyonu ile tüm bir üretim geçmişini aktarabilir (URL-13). Aynı zamanda yanak,

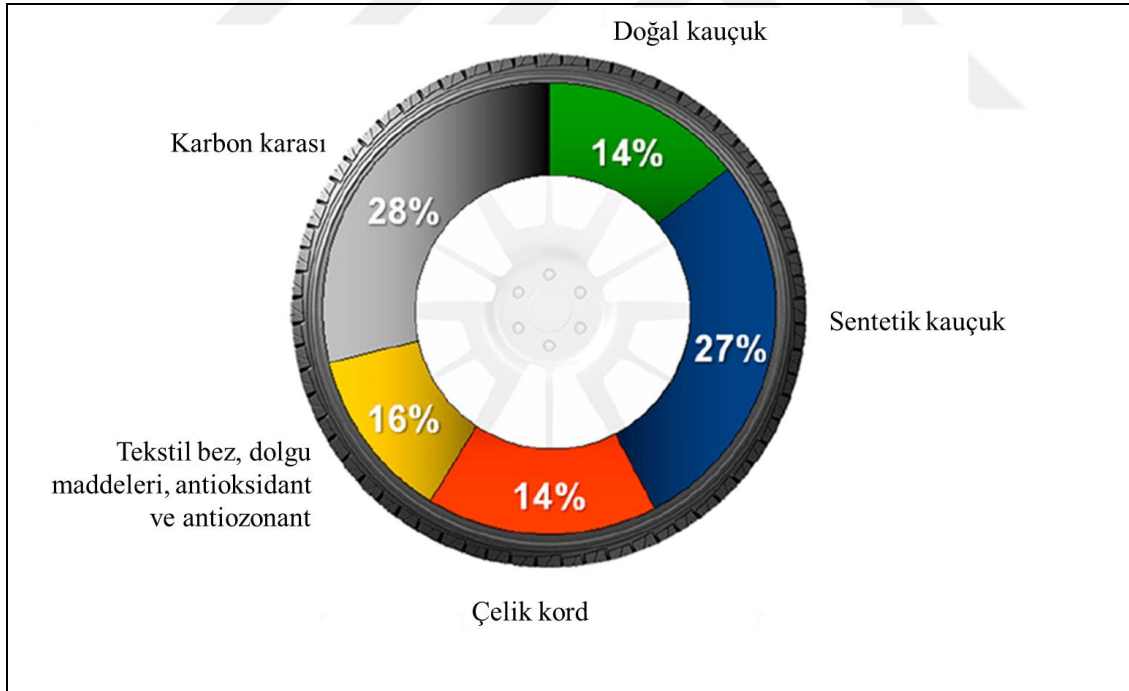
lastiğe ek bir koruma sağlayarak, genel stabilitesini ve dayanıklılığını artırmaya yardımcı olur. Bir diğer fonksiyonu ise yabancı cisimlerin kord katmanlarına zarar vermesini engelleyerek lastiğin daha güvenli bir şekilde kullanılmasını sağlamaktır. Topuk profili, konforla birlikte yön dengesini ve direksiyon hakimiyetini iyileştirir. Topuk teli demeti, kauçuğun içine yerleştirilerek lastiğin janta sağlam bir şekilde oturmasını sağlar (URL-14-17)



Şekil 2.1. Örnek bir lastik kesitinde bileşenlerin gösterimi (URL-9).

### 3. LASTİK TEKNOLOJİSİNDE KULLANILAN HAMMADDELER

Bir lastiğin tipik ağırlık bileşimi Şekil 3.1’de verilmiştir (URL-16). Kauçuk karışımlarında kullanılan malzemeler, örneğin doğal kauçuk (NR), sentetik kauçuk, dolgu maddeleri ve kauçuk kimyasalları, bir lastiğin yaklaşık %80’nin oluşturur (Hoven ve diğ., 2003). Lastik üretiminde kullanılan birincil malzeme kauçuktur (doğal kauçuk ve sentetik kauçuk). Tipik sentetik kauçuk türleri arasında stiren-butadien kauçuğu (SBR), butadien kauçuğu (BR), izobütülen isopren kauçuğu (IIR) ve poliizopren kauçuk (IR) yer alır. Dolgu maddesi genellikle karbon karası (C/B) olmakla birlikte, silika da önemli kullanım miktarına sahiptir (Hirata ve diğ., 2014). Bu malzemelerin yanı sıra, kükürt gibi pişirme ajanları, hızlandırıcılar, çinko oksitler, stearik asit, oksijen ve ozon nedeniyle kauçuğun bozulmasını önleyen antioksidanlar, kauçuk işlenebilirliğini ve sertliğini ayarlayan peptizerler ve silika dispersiyonu ve silika-kauçuk bağlanmasını sağlayan silan bağlayıcı ajanlar kullanılmaktadır (Hirata ve diğ., 2014; Ahagon ve diğ., 1990). Lastiklerde ayrıca çelik kord ve sentetik fiberler gibi çeşitli takviye malzemeleri de kullanılır (URL-18).



Şekil 3.1. Bir lastiğin ağırlık bileşimi (URL-16).

Tipik bir binek lastik bileşenleri Tablo 3.1’de (URL-19), hammaddeler ise Şekil 3.2’de verilmiştir (URL-18). Lastik üretiminde kullanılan hammaddeler, dayanıklılığı, esnekliği ve yol tutuşunu sağlayacak şekilde özenle seçilir. En temel bileşen doğal ve sentetik

kauçuktur; doğal kauçuk, genellikle kauçuk ağacının (*Hevea brasiliensis*) sütünden elde edilirken, sentetik kauçuk petrol türevlerinden üretilir. Bunların yanı sıra karbon siyahı veya silika gibi dolgu maddeleri, lastiğe sertlik ve aşınma direnci kazandırır. Ayrıca, kükürt ve diğer kimyasal katkı maddeleri vulkanizasyon sürecinde kullanılarak kauçuğun dayanıklılığı artırılır. Çelik ve tekstil lifleri ise lastiğe yapısal destek sağlayarak yüksek hızlarda dahi formunu korumasına yardımcı olur. Tüm bu bileşenler, farklı türde lastiklerin performans ihtiyaçlarına göre dikkatlice formüle edilir. Kauçuk karışımının hazırlanabilmesi için öncelikle uygun özelliklere sahip kauçuk ve diğer hammaddeler seçilir ve belirli oranlarla karıştırılır. Bu süreç, her bir bileşenin doğru miktarlarda ve uyumlu bir şekilde bir araya getirilmesini gerektirir. Seçilen bu hammaddeler, birbirleriyle doğru oransal dengeyi sağladıktan sonra bir arada işlenerek karışım haline getirilir ve bu karışım, genellikle "reçete" ya da "formül" olarak adlandırılır. Kauçuk üretiminde ve teknolojisinde, karışımın bileşenleri genellikle ağırlıkça 100 birim kabul edilen ana hammadde olan polimer (kauçuk) üzerinden oranlarla ifade edilir. Bu ifade şekli, "phr" (İng. parts per hundred rubber), kauçuk başına her 100 birimdeki kısım, birimiyle yapılır. Yani, tüm diğer bileşenlerin miktarı, kauçuğun toplam ağırlığına göre hesaplanarak belirlenir ve bu da karışımın istenen özelliklere sahip olmasını sağlar (URL-19).

Tablo 3.1. Binek lastik bileşenleri (ağırlık oranları) (URL-19)

Hammadde	Binek lastik (kg)
NR	77,0
SBR	23,0
C/B	52,0
Yağ	2,0
Organik kimyasallar	10,0
ZnO	5,0
Kükürt	3,0
Silika	1,0
Toplam fiber	0,0
Çelik kord	33,0
Topuk teli	11,0
<b>Toplam</b>	<b>217,0</b>

Lastik hammaddelerinin doğru kullanımı ve reçete dizaynı, performans, dayanıklılık, güvenlik ve maliyet açısından büyük önem taşır. Her hammadde lastiğe farklı bir özellik kazandırır. Reçete dizaynı, bu maddelerin oranlarını belirleyerek istenilen teknik

özelliklerin elde edilmesini sağlar. Farklı kullanım alanlarına göre özel formüller geliştirilir.



Şekil 3.2. Lastik hammaddeleri (URL-18).

### 3.1. Kauçuklar

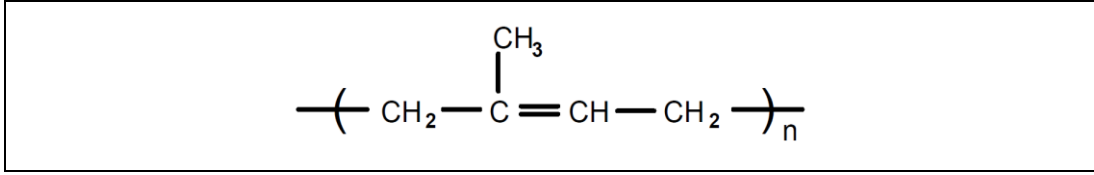
Kauçuklar, çapraz bağlanmamış ancak çapraz bağlanma yeteneğine sahip, yani vulkanize olabilen polimerlerdir. Yüksek sıcaklık ve deformasyon kuvvetlerinin etkisiyle akışkanlık gösterirler, bu sayede uygun koşullarda şekil alabilirler. Çapraz bağlanma reaksiyonu (vulkanizasyon, pişme) ile kauçuk, geri dönüşümsüz şekilde elastik özellikler kazanır. Vulkanizasyon öncesindeki yüksek plastik özellikler, sonrasında yerini elastik özelliklere bırakır (URL-20). Polimer olarak da bilinen doğal ve sentetik kauçuk, bir lastiğin %41-45'ini oluşturan en önemli bileşenlerindedir (Kauhi ve diğ., 2023). Kauçuk, dış sırtın gerilme ve yırtılma dayanımını, elastikiyetini ve uzama özelliğini belirler (Bijarimi, 2010). Kauçuk sektöründe yaygın bir şekilde kullanılan kauçukların ASTM (American Society for Testing and Materials) standardına göre isimlendirilmesi ve işaretleri Tablo 3.2'de verilmiştir (Nakajima,1999).

Tablo 3.2. Kauçukların isimlendirilmesi (Nakajima,1999)

İsim	ASTM işareti
Doğal Kauçuk	NR
Stiren-Bütadien Kauçuk	SBR
Bütadien Kauçuk	BR
İsobütülen-İsopren Kauçuk	IIR
Bromobütül Kauçuk	BIIR
Klorobütül Kauçuk	CIIR
Etilen-Propilen Kopolimer Kauçuk	EPM
Etilen-Propilen Terpolimer Kauçuk	EPD
İsopren Kauçuk	IR

Doğal kauçuğun birincil kaynağı, lateksi yaklaşık %40 kauçuk içeren Hevea ağaçları (veya kauçuk ağaçları)dır (Osayi ve diğ., 2018). Kauçuk, lateksin formik asit ile koagüle edilmesi ile çıkartılır (Baker ve diğ., 1985). Yapı %99,9 *cis* 1,4 poliisoprendir (Şekil 3.3) (URL-21). Doğal kauçuk, kendiliğinden güçlendirici özellik gösterir, yüksek mekanik dayanıklılığa ve orta elastikiyete sahipken, düşük viskoziteye ve diğer dezavantajlara sahiptir (Rattanasom ve diğ., 2005; Mangili ve diğ., 2015). Doğal kauçuk, lastik üretiminde kullanılmadan önce, mastikasyon, karbon karası dolgu maddeleri ile

karıştırılması, peptizer ile karıştırılması ve diğer işlemler gibi ek işlemler gerektirir (Görbe ve diğ., 2024).



Şekil 3.3. Doğal kauçuk yapısı (URL-21).

Doğal kauçuk yaprak, blok, krep, lateks ve skim kauçuk olarak 5 formda işlenir. Yaprak halinde kauçuk, en eski ve en popüler tür olmakla birlikte üretimi ve satışı kolaydır. Lateks, dış maddelerden temizlenerek tabaka haline getirilir. Bu tabakaların duman ile kurutulması sonrasında elde edilen kauçuk türü RSS'tir (İng. Ribbed Smoked Sheets). Üretim şekli RSS ile benzer olmakla birlikte duman yerine, tabakaların hava şartları ile kurutulmasıyla ADS (İng. Air Dried Sheets) kauçuğu elde edilir. RSS'e göre daha kuru, sağlam ve lekesez olan bu kauçuk türü daha şeffaf renge sahiptir. Blok halinde bir kauçuk olan TSR'ın (İng. Technically Specified Rubber) spesifikasyonları ISO (Uluslararası Standartlar Örgütü) tarafından ilk olarak 1964 yılında Doğal Kauçuk Teknik Spesifikasyonları şartnamesi ile yayınlanmıştır. Kauçuğun, kir, kül, uçucu maddeler ve plastiklik gibi özellikleri ISO tarafından belirlenen kalite standartlarına göre ayarlanmaktadır ve bu şartlara uygun üretilen kauçuklar TSR adı altında pazarlanmaktadır. Ükelere göre TSR türleri aşağıda paylaşılmıştır (Ansari ve diğ., 2021; Hurley, 1981; Tekasakul, 2006):

- SMR: Standart Malezya Kauçuğu (İng. Standard Malaysian Rubber)
- SIR: Standart Endonezya Kauçuğu (İng. Standard Indonesian Rubber)
- SSR: Standart Sri Lanka Kauçuğu (İng. Standard Sri Lanka Rubber)
- SVR: Standart Vietnam Kauçuğu (İng. Standard Vietnam Rubber)
- STR: Standart Tayland Kauçuğu (İng. Standard Thailand Rubber)
- ISNR: Hindistan Standart Doğal Kauçuk (İng. India Standard Natural Rubber)

Krep formundaki doğal kauçuk, toplanan latex (İng. field latex) veya koagüle edilmiş latex (İng. field coagulum) malzemelerinin ağır merdanelerden geçirilip, ortam sıcaklığında kurutulmasıyla elde edilir ve kauçuk tipleri arasında en az üretilen kauçuk türüdür. Lateks, olduğu gibi üretimde kullanılabilen veya toplanıp işlenerek kauçuk

haline getirilebilen süt beyaz bir maddeyi ifade eder. Lateks svs herhangi bir işlemden geçirilmeden amonyak eklenerek korunabilir ve lateks konsantresi Şeklinde sv olarak işlenmek üzere başka ülkelere taŐınabilir. Skim kauçuk ise lateks eldesi sırasında uygulanan sentrifüj işlemi sonrası %4-8 oranında kuru kauçuk içeren kısımdır (Mooibroek ve Cornish, 2000; Venkatachalam ve diŐ., 2013).

DoŐal kauçukların kalitesini ve performansını belirlemek amacıyla yapılan çeşitli analizler, hammaddelerin özelliklerini ve ilenebilirliŐini deŐerlendirmede önemli rol oynar. Bu testler, kauuŐun dayanıklılıŐını, saflıŐını ve işlem süreçlerine karşı gsterdiŐi direncini ölçmeye yönelik farklı parametreler üzerinden gerçekleştirilir. AŐaŐıda, doŐal kauçuk üzerinde yapılan temel testler ve bu testlerin saŐladıŐı bilgiler açıklanmıŐtır (URL-22).

**PRI (Plasticity Retention Index):** PRI, doŐal kauuŐun pişirme ve işleme süreçlerinde yüksek sıcaklık ve oksidasyon gibi çevresel faktörlere karşı gsterdiŐi direnç seviyesini belirleyen bir göstergedir. Bu indeks, kauuŐun kalitesinin deŐerlendirilmesinde oldukça önemli bir parametre olarak kabul edilir. PRI, kauuŐun 140 °C sıcaklıkta 30 dakika süreyle ısıya maruz bırakıldıktan sonra elde edilen plastikliŐinin, baŐlangıçtaki orijinal plastikliŐine oranı olarak hesaplanır. Bu oran, kauuŐun ısıl işlemler ve oksidasyon nedeniyle ne kadar bozulduŐunu gösterir. Yüksek bir PRI deŐeri, kauuŐun daha düşük bozulma eŐilimine sahip olduŐunu ve daha uzun ömürlü olduŐunu belirtir.

**Azot İeriŐi:** Azot ieriŐi, doŐal kauuŐun içinde bulunan protein ve diŐer organik olmayan maddelerin lsdr. Bu bileşenlerin miktarı, kauuŐun saflıŐını ve ilenebilirliŐini etkileyebilir. Azot ieriŐinin analizi, kauuŐun kalite kontrolünde önemli bir parametre olup, ham kauuŐun kimyasal bileŐenlerini daha iyi anlamaya yardımcı olur.

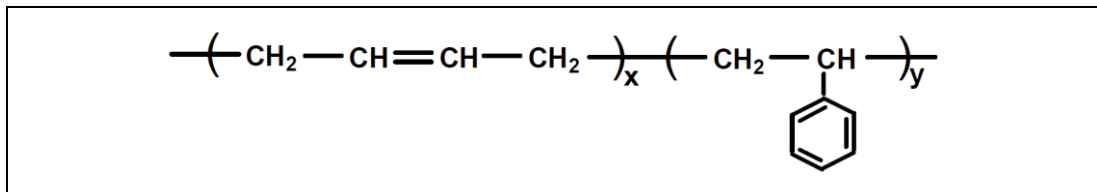
**Kül Miktarı:** Kül miktarı, kauçukta bulunan inorganik maddelerin, özellikle dolgu maddelerinin ve katkıların oranını ifade eder. Kauçuk retiminde kullanılan bu inorganik bileşenlerin miktarı, kauuŐun özelliklerini ve dayanıklılıŐını doŐrudan etkileyebilir. Kl ieriŐi, kauuŐun genellikle yüksek sıcaklıklara dayanıklılıŐı ve mekanik özellikleri hakkında bilgi verir.

Kir Miktarı: Kir miktarı, kauçuktaki yabancı maddelerin toplamını ölçen bir parametredir. Kauçuğun içinde bulunan bu kirleticiler, işlenebilirlik ve ürünün son kalitesi üzerinde olumsuz etkiler yaratabilir. Kir miktarının belirlenmesi, kauçuğun saf olup olmadığını ve üretim sürecindeki hijyen koşullarının uygunluğunu değerlendirmeye yardımcı olur.

Bu testler, doğal kauçuğun kalitesini ve performansını doğru bir şekilde değerlendirmek için kritik öneme sahiptir. Elde edilen veriler, üretim sürecinin iyileştirilmesi, ürün kalitesinin artırılması ve kauçuğun kullanım ömrünün uzatılması gibi alanlarda önemli yol gösterici olmaktadır (URL-23-25; Subramaniam, 1999). Doğal kauçuğun yüksek maliyeti ve tedarik zorluğu sebebiyle, fosil kaynaklı hidrokarbonlardan üretilen sentetik kauçuk polimerleri de kauçuk karışımlarında sıkça kullanılmaktadır. Tüm sentetik kauçuklar yüksek elastikiyetle birlikte iyi aşınma direncine sahiptir; ancak ısı üretimi ve histeretik (İng. hysteresis) kayıplarda farklılıklar vardır (Taghvaei, 2011; Wood, 1940; Kawahara ve diğ., 2022; Huang ve diğ., 2023). Lastik teknolojisinde kullanılan sentetik kauçuklar, poliisopren kauçuk (IR), stiren bütadien kauçuk (SBR), polibütadien kauçuk (BR), akrilonitril bütadien kauçuk (NBR), kloropren kauçuk (CR), bütül kauçuklar (IIR, CIIR, BIIR) ile etilen propilen kauçuk (EPM) ve etilen propilen dien kauçuğudur (EPDM). (Bueche, 1957; Wood, 1940).

SBR (Stiren-bütadien kauçuğu), stiren ve bütadien monomerlerinin polimerizasyonu ile üretilen sentetik bir kauçuktur. Polimer zinciri bu iki monomerden oluşan merlerin gelişigüzel dizilmesinden oluşur (Şekil 3.4) (URL-26). Oluşan kopolimerde, bütadien molekülü, stiren bileşeniyle nasıl bağlandığına bağlı olarak üç farklı form alabilir: (1) *cis* 1,4-Bütadien; (2) *trans* 1,4-Bütadien; ve (3) Vinil Bütadien. Bu kauçuk, dünya çapında üretilen sentetik kauçuklar arasında açık ara en büyük pazar payına sahiptir. Bu kauçuk, mükemmel aşındırma direnci, mükemmel suya dayanıklılık, iyi fiziksel özellikler ve kolay işlenebilirlik sunar. Bu özellikler, moleküler ağırlık ve stiren/bütadien oranına bağlı olarak değişir. SBR üretimi, farklı polimerizasyon yöntemlerine dayanmaktadır ve bu yöntemler, kauçuğun özelliklerini belirlemede önemli rol oynar (Lovell ve Schork, 2020). Başlangıçta, SBR üretimi emülsiyon polimerizasyonu ile yapılmakta olup, bu süreç genellikle yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirilmiştir. Ancak zamanla, daha düşük sıcaklıklarda gerçekleştirilen soğuk polimerizasyon ve farklı modifikasyon teknikleriyle SBR'nın özellikleri geliştirilmiştir. SBR üretimi, genellikle üç farklı prosesle

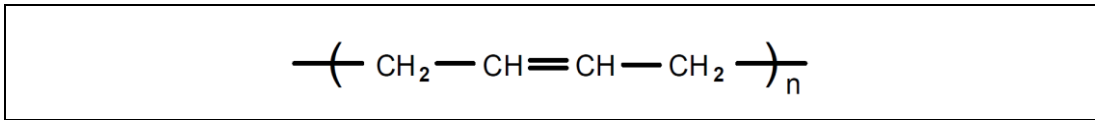
gerçekleştirilir: (1) sıcak emülsiyon polimerizasyonu, (2) soğuk emülsiyon polimerizasyonu ve (3) çözelti polimerizasyonu. Her bir proses, farklı özelliklere sahip polimerlerle sonuçlanır. Emülsiyon polimerizasyonu ile üretilen SBR türleri genellikle emülsiyon SBR (eSBR) olarak adlandırılırken, çözelti prosesleri ile üretilen türler genellikle çözelti SBR (SSBR) olarak adlandırılır. Sıcak emülsiyon polimerizasyonu tipik olarak, daha iyi boyutsal stabilite ve ekstrüzyon özelliklerine sahip SBR'ler üretir. Ancak, bu proses neredeyse tamamen, mekanik özellikleri (örneğin, gerilme mukavemeti ve aşındırma direnci) geliştirilmiş SBR türleri üreten soğuk emülsiyon polimerizasyonu ile yer değiştirmiştir (Berber, 2013). Emülsiyon SBR, dünya çapında en yaygın kullanılan kauçuktur ve sentetik kauçuk pazarının %40'ını temsil etmektedir. Özellikle binek otomobil ve hafif kamyon lastiklerinin üretiminde, ayrıca kamyon lastiklerinin yeniden kaplanmasında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu kauçuğun diğer kullanım alanları arasında ayakkabı tabanları, zemin kaplamaları, taşıma bantları, endüstriyel hortumlar, yapıştırıcılar ve diğer birçok kauçuk ürünü yer almaktadır. Çözelti SBR prosesleri, son polimer özelliklerinin daha iyi kontrol edilmesini sağlar çünkü bu süreçler, üretilen polimer yapısının daha iyi bir şekilde manipüle edilmesine olanak tanır. Bu nedenle, sSBR türleri hem sıcak hem de soğuk eSBR türlerine kıyasla daha iyi mekanik özelliklere sahip olup (özellikle düşük yuvarlanma direnci) daha üstün performans sergiler. Ancak, dar moleküler ağırlık dağılımı, polimerin işlenebilirliğini daha karmaşık hale getirmektedir. SBR'nin gelişiminde bir diğer önemli aşama, yüksek molekül ağırlığına sahip, yağla çoğalmış tiplerin (İng. Oil Extended SBR, OE-SBR) üretimi olmuştur. Bu tür kauçuklar, daha iyi elastikiyet ve dayanıklılık gibi özellikler sunarak, daha çeşitli endüstriyel uygulamalarda kullanılabilir hale gelmiştir (Youssef, 2018; URL-27; URL-28; Ansari, 2024).



Şekil 3.4. Stiren bütadien kauçuk yapısı (URL-26).

Polibütadien kauçuğu (PBD), doğal kauçuğa benzer alternatif malzemeler arayışı sırasında 1926 yılında bütadien monomerinin kütle polimerizasyonu ile üretilmiştir (Şekil

3.5) (URL-29). Sodyum katalizörü kullanılarak gerçekleştirilen polimerizasyon sonucunda elde edilen polimere ise "BUNA" adı verilmiştir. Bütadien kauçuğu, ilerleyen yıllarda Zeigler-Natta ve alkil lityum katalizörlerinin kullanılmasıyla çözelti polimerizasyonu yöntemiyle üretilmeye başlanmış ve bu yeni üretim yöntemi sayesinde NR ve SBR ile birlikte otomobil lastiği üretiminde önemli bir kullanım alanı kazanmıştır. Bütadien kauçuğu için genel polimerizasyon süreci, emülsiyon polimerizasyonu ve çözelti polimerizasyonunu içerir; her iki yöntemde de hidrokarbon çözücüler kullanılabilir. Emülsiyon polimerizasyonunda, su, emülgatörler ve hidrokarbon çözücüler kullanılır. Emülgatörler, suyun hidrokarbon çözücülerle ısıtılması sırasında reaksiyonun stabil kalmasını sağlar. Bu yöntem, kauçuğun sertlik ve elastikiyet değerlerinin özelleştirilmesini kolaylaştırdığı için yaygın olarak kullanılır. Çözelti polimerizasyonunda ise, butadien kauçuğu sentezlemek için ajan ve katalizörler kullanılır. Avantajı, materyalin moleküler yapısının belirli kullanımlar için performansını artıracak şekilde değiştirilmesine olanak tanınmasıdır. Bu iki yöntem, aynı kimyasal yapıya sahip sentetik kauçuk olan butadien kauçuğunu üretmek için kullanılır. Bu sentetik kauçuklar, kolay şekillendirilebilirlik, esneme, dayanıklılık ve aşınma direnci özellikleri ile tanınır, bu yüzden otomotiv ve üretim endüstrilerinde gereklidir (Yoshioka, 1986). Cis polibütadien kauçuğunun başlıca kullanımı lastiklerdeki yanak ve sırt kısımlarındadır. Performansı optimize etmek, çekiş, yuvarlanma ve aşınma direnci gibi özellikleri iyileştirmek amacıyla genellikle doğal kauçuk ve SBR gibi diğer kauçuklarla karıştırılır. Yüksek vinil ve yüksek trans polibütadien ise çok daha küçük bir ölçekte üretilir ve kullanılır. Örneğin, yüksek vinil PBD bazen sekme esnekliğini artırmak için yüksek kaliteli lastiklerde kullanılırken, yüksek trans PBD golf toplarının dış katmanında kullanılır (URL-30; URL-31).



Şekil 3.5. Bütadien kauçuk yapısı (URL-29).

Kauçuklar, reçetedeki diğer bileşenlerle belirli oranlarda karıştırılır ve çeşitli araçlara uygun, kendine özgü lastik üretimi yapılır. Örneğin kamyon lastikleri daha fazla doğal kauçuk içerirken, araba (binek) lastikleri daha fazla sentetik kauçuk içerir. Kamyonlar ağır yükler taşır ve yoğun şekilde sefer yapar, bu nedenle lastikler aşınma ve yıpranmaya

araba lastiklerine göre daha fazla maruz kalırlar. Doğal kauçuğun aşınma özellikleri, sentetik kauçuğa göre daha üstün olduğundan, kamyon lastik reçetelerinde daha fazla kullanılırlar. Araba lastiklerinde ise daha düşük yük ve kilometre nedeniyle daha fazla sentetik kauçuk gereklidir, bu da daha az aşınma ve yıpranma sağlar (Cunneen ve Russell, 1970).

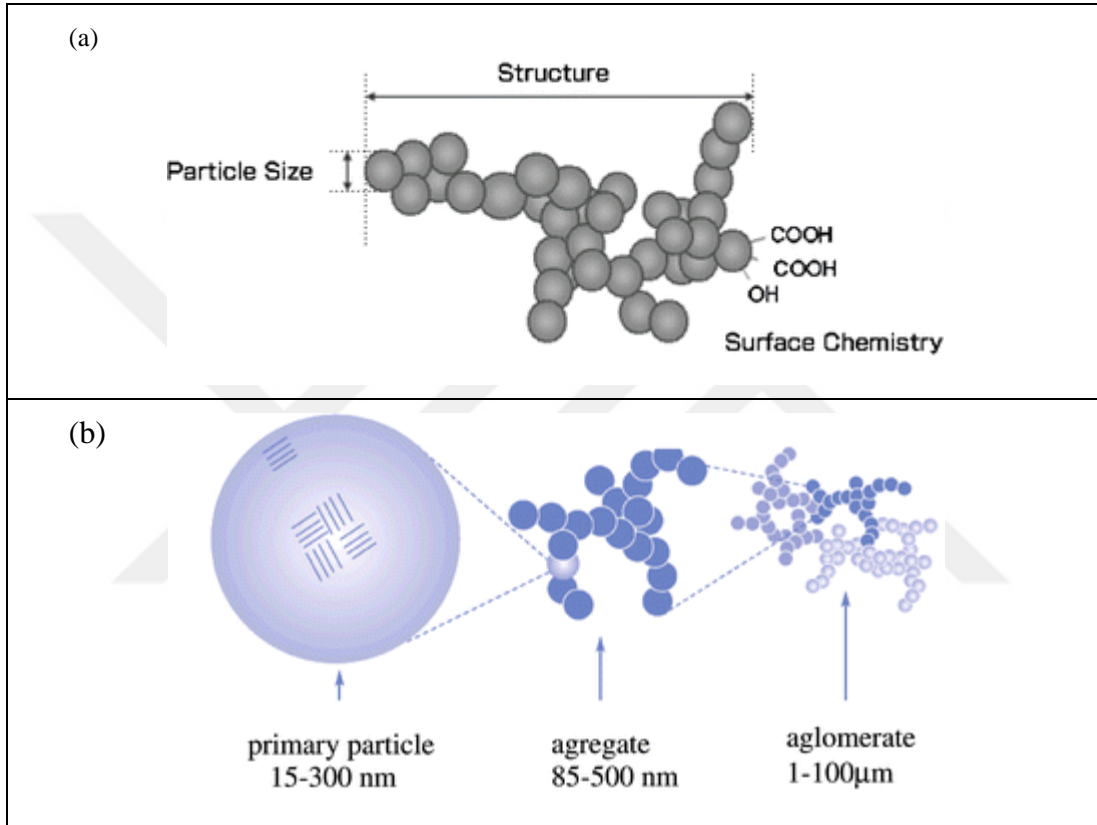
### **3.2. Dolgu Maddeleri**

Dolgu maddeleri, lastik endüstrisi tarafından dayanıklılık, sürüş verimliliği ve güvenlik gibi performans özelliklerini iyileştirmek için 100 yıldan fazla bir süredir kullanılmaktadır. Farklı dolgu maddeleri tipik bir lastiğin yaklaşık % 30'unu oluşturmaktadır (Medalia, 1978). Kauçuk karışımlarındaki dolgu maddeleri, nihai ürünün özelliklerini geliştirmek veya değiştirmek için kauçuk formülasyonlarına eklenen malzemelerdir. Temel amaçları, dayanıklılık, elastikiyet ve güç gibi performans özelliklerini iyileştirmek ve üretim maliyetlerini yönetmeye yardımcı olmaktır (Arduini ve diğ., 2020; Martinez ve diğ., 2019; Szadkowski ve diğ., 2019).

İki ana dolgu maddesi türü vardır, kauçuğun mekanik özelliklerini önemli ölçüde iyileştiren güçlendirici dolgu maddeleri ve performansı büyük ölçüde etkilemeden maliyeti düşürmeye yönelik kullanılan güçlendirmeyen dolgu maddeleri (Byers, 2002; URL-32; Stickney ve Falb, 1964). Bir müşteri ek güç, geliştirilmiş aşınma direnci veya maliyet etkin çözümler arayacaksa, dolgu içeriği her uygulamanın özel taleplerine göre uyarlanabilir. Güçlendirici dolgu maddeleri, karbon karası (C/B) ve silika gibi malzemelerdir ve kauçuğun gücünün arttırmak, gerilme dayanımını, dayanıklılığını ve aşınmaya karşı direncini iyileştirmek için kritik öneme sahiptir (Robertson ve Hardman, 2021; Fan ve diğ., 2020; Zhao ve diğ., 2021; Lolage ve diğ., 2020; Rajaei ve diğ., 2019).

Karbon karası ileri seviye kontrol edilen proseslerle üretilen katı karbon formlarına verilen addır. Karbon karası, içerik olarak %95 karbon elementine sahip olmakla beraber, az miktarlarda oksijen, hidrojen ve nitrojen de içermektedir (Şekil 3.6a) (Samaržija-Jovanović ve diğ., 2009). Karbon karası farklı üretim metodlarıyla üretilmektedir. Üretim metodları sonucu farklı yapılarda karbon karası çeşitleri ortaya çıkmaktadır. Karbon karası, üretim metoduna bağlı olarak, farklı karbon partikül boyutlarına, agrega boyutunu ve aglomere boyutuna sahip olabilmektedir. Bu 3 boyut karbon karasının ana özellik

karakteristiklerini belirlemektedir. Karbon partikül boyutları 10 nm' den 500 nm' ye kadar olabilmektedir. Karbon nodüllerinden (15-300 nanometre) meydana gelen agrega (85-500 nanometre) yapıları bir araya gelerek aglomera (1-100+ micrometre) yapısını oluşturmaktadır. Karbon nodülü (partikülü), partiküllerden meydana gelen agrega yapısı ve agregaların da birbirine bağlanmasıyla oluşan aglomera yapısı ve boyut aralıkları Şekil 3.6b 'de verilmiştir (Samaržija-Jovanović ve diğ., 2009).



Şekil 3.6. Karbon karası (a) yüzeydeki fonksiyonel gruplar, (b) yapısı (Samaržija-Jovanović, 2009).

Kimyasal Proses	Üretim Metodu	Kullanılan Hammadde
Termal Oksidasyon Ayrıştırma	<ul style="list-style-type: none"> <li>Furnace Black Process</li> <li>Degussa Gas Black Process</li> <li>Lamp Black Process</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Doğalgaz, Yağlar</li> <li>Kömür</li> <li>Aromatik, Mineral Yağlar</li> </ul>
Termal Ayrıştırma	<ul style="list-style-type: none"> <li>Thermal Black Process</li> <li>Acetylene Black Process</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Doğalgaz</li> <li>Asitilen ( Acetylene )</li> </ul>

Şekil 3.7. Karbon karası üretim metotları (URL-33).

Temel olarak karbon karası, hidrokarbonların termal veya termal oksidasyon ayrıştırma

metotlarıyla karbon ve hidrojen bileşenlerine parçalanmasıyla elde edilir. Karbon karası üretim metotları ve kullanılan malzemeler Şekil 3.7’de verilmiştir (URL-33).

Tablo 3.3. Lastik endüstrisinde kullanılan karbon siyahlarının ASTM sınıflandırması (Bera ve diğ., 2018)

ASTM Sınıf	İsim	Açıklama	Partikül boyut aralığı (nm)	Yüzey alanı aralığı (m <sup>2</sup> /g)
N110	SAF	Üstün Aşınma Fırın (Super Abrasion Furnace)	15-18	124-130
N220	ISAF	Orta Üstün Aşınma Fırın (Intermediate Super Abrasion Furnace)	20-25	112-115
N234	ISAF	Orta Üstün Aşınma Fırın (Intermediate Super Abrasion Furnace)	20-25	112-115
N330	HAF	Yüksek Aşınma Fırın (High Abrasion Furnace)	28-36	76-80
N550	FEF	Hızlı Ekstrüzyon Fırın (Fast Extrusion Furnace)	39-55	39-41
N660	GPF	Genel Amaçlı Fırın (General Purpose Furnace)	56-70	34-36
N770	SRF	Yarı Güçlendirici Fırın (Semi Reinforcing Furnace)	71-96	31-32
N880	FT	İnce Termal (Fine Thermal)	180-200	17-20
N990	MT	Orta Termal (Medium Thermal)	250-350	7-9

Karbon karaları üretildikleri yöntemine göre adlandırılmaktadır. Her üretim metodu ve kullanılan malzeme ortaya çıkan karbon siyahı yapısına (parçacık boyutu, agrega ve aglomere uzunlukları) etki etmektedir. Karbon karası türünü belirlemek için verilen kodlama, Amerikan Test ve Malzemeler Derneği (ASTM) tarafından daha ayrıntılı bilgi sağlamak amacıyla yeniden tanımlanmıştır. ASTM kodu, ilk olarak N veya S harfi ile başlar.

N: Normal Vulkanizasyon (İng. Normal Cure)

S: Yavaş Vulkanizasyon (İng. Slow Cure) Bu kodlar, karbon karalarının kauçuğun vulkanizasyon (sertleştirme) süreçlerine uygunluğunu belirtmek için verilmiştir. Kauçuk uygulamalarında kullanılan karbon karaları genellikle N100 – N900 serisi siyahlar olarak

sınıflandırılır (Tablo 3.3) (Bera, 2019). Burada artan N numaraları, azalan yüzey alanını ve artan tanecik boyutunu ifade eder. Tanecik boyutu arttıkça, karbon siyahının karıştırma süresi, viskozitesi, aşınma direnci ve sertliği azalır (Bera ve diğ., 2018).

Üretilen karbon parçacıkları çok çeşitli yapılara, şekillere, parçacık boyutlarına ve yüzey etkinliğine sahiptir. Sunulan özelliklerin türü ve aralığı, birçok lastik karışımında onu çokça tercih edilen bir dolgu maddesi yapar. Polimer-karbon karası ağının viskoelastik özellikleri, karbon karası partiküllerin tanecik büyüklüğüne ve dağılımına, yüzey alanına ve yapısına bağlıdır.

- Tanecik büyüklüğü ve dağılımı;

Dolgu maddelerinin kauçuğu güçlendirmesi için kullanılacak karbon karasının tanecik büyüklüğü ve dağılımının bilinmesi gerekmektedir. Genel olarak dolgu maddelerinin büyüklükleri 1 – 5000 nanometre arasında değişmektedir. Kauçuğu güçlendirme özelliğini taşıyan dolgu maddeleri ise 1 – 100 nanometre arasında tane büyüklüğüne sahip olmalıdır. Karbon karalarının tane büyüklüğü arttıkça karışımın işlenmesi kolaylaşır. Kauçuk hamurunun fiziksel özelliklerini artırmak için tane büyüklüğü küçük olan karbon karası kullanılır.

- Yüzey Alanı;

Bir dolgu maddesinin yüzey alanı, kauçuğu güçlendirici özellik taşıdığı için önemlidir. Yüzey alanı, tanecik büyüklüğü ve gözeneklilikle de yakın ilişkilidir. Yüzey aktiviteleri, karbon karası yüzeyinde bulunan oksijen içeren gruplarla alakalıdır. Karbon karasının yapısında fazla oksijen bulunduğu için yüzey aktiviteleri de fazladır. Fırın ve termal siyahlarında ise oksijen miktarı az olduğu için yüzey aktiviteleri normaldir.

- Yapı Özelliği;

Dolgu maddelerini oluşturan taneciklerin birbirine eklenerek uzun zincirler hâlinde üç boyutlu kümeler oluşturması sonucunda bir yapı meydana gelmektedir. Karbon karası için bu yapı, üretim esnasında gaz fazda oluşmakta ve üretim şartlarına göre değişmektedir. Karbon karalarının taneleri birbirlerine zincir şeklinde bağlanarak

kümeler oluşturur. Bunlar üzüm salkımı gibidir. Kümeleşme ne kadar fazla ise yapı o kadar yüksektir.

Büyük parçacık boyutlu ve düşük yapılı karbon karası, genel olarak iç astarda takviye malzemesi olarak kullanılmaktadır ve geçirmezlik performansını etkilemektedir. Orta yapı ve orta yüzey alanına sahip karbon karasının işlenmesi kolaydır ve ayrıca daha soğuk çalışma için düşük histerezis kaybı sağlar. Bunlar, yuvarlanma direncini iyileştirmek için sırt karışımlarında kullanılmaktadır. Yanak ve sırtlarda yüksek aşınmaya dayanıklı dolgu maddeleri kullanılır. Bu çok ince parçacıklar, kauçuk yapılara iyi kavrama ve aşınma sağlar. Daha yakın zamanlarda, silika, lastik karışımı konusunda önemli bir rol oynamış olduğundan, karbon karası üreticileri, silikanın faydalarıyla rekabet etmek için birçok yeni ürün üretmektedir. Yüzey aktivitesi ile birlikte karbon karası yüzeylerinin nano yapısı, dolgu maddesinin polimer zinciri ile etkileşime girme kabiliyetini geliştirmek için değiştirilmiştir (URL-34; Wang, 2003; Studebaker, 1957; Manu,2025). Karbon karası hala kauçuk karışımlarında kullanılan en yaygın dolgu malzemesi olsa da lastik endüstrisinde "daha yeşil lastikler" geliştikçe, karbon siyahı yavaşça silika ile yer değiştirmektedir. Silika kullanımı ile lastikler, daha düşük yuvarlanma direnci (daha iyi yakıt ekonomisi), daha iyi aşınma direnci (dayanıklılık) ve daha iyi ıslak zemin tutuşu (güvenlik) sunmaktadır (Lolage, 2020). Güçlendirmeyen dolgu maddelerine kalsiyum karbonat ( $\text{CaCO}_3$ ) gibi kauçuğun işlenebilirliğini iyileştiren, üretim esnasında daha kolay işlenmesini sağlayan ve genel malzeme maliyetlerini düşürmeye yardımcı olan malzemeler örnek verilebilir (Spanheimer, 2023; Phuhangpa, 2020).

### **3.3. Proses Kolaylaştırıcılar**

Proses kolaylaştırıcılar, prosesin çeşitli aşamalarında oluşabilecek problemleri gidermek amacıyla kauçuk karışımlarına ilave edilirler. Kauçuk karışımlarının işlenebilirliğini ve özelliklerini iyileştirir, yüksek kaliteli lastiklerin üretimini sağlar (Rodgers, 2005). Dispersiyon ajanları, homojenizatörler, yağlayıcılar ve yapıştırıcılar gibi bir dizi hammadde proses kolaylaştırıcı olarak lastik kauçuk karışımlarında kullanılmaktadır. Dispersiyon ajanları, kauçuk karışımlarındaki dolgu maddeleri ve diğer bileşenlerin matris içerisindeki dağılımını iyileştirir (Le ve diğ., 2013; Rodgers, 2005). Homojenizatörler, farklı polaritelerde ve farklı viskozitelerdeki polimer karışımlarının homojenliğini iyileştiren işlem katkı maddeleridir (Bandyopadhyay, 2024). Yağlayıcılar,

kariştırma ve işleme sırasında kauçuk ile işleme ekipmanları arasındakiki sirtünmeyi azaltır (Rohayzi ve diğ., 2023). Yapıştırıcılar, bir ürün pişene kadar yapıştırıcı özelliklerini iyileştirmek ve işleme aşamasında kauçuk karişım katmanları arasında yapışkanlık sağlamak için kauçuk karişımlarına eklenir (Anggraini ve diğ., 2023; Hidayat, 2023).

### **3.4. Yumuşaticılar**

Yumuşaticılar, proses kolaylaştırcılara benzer olarak prosesin çeşitli basamaklarında ortaya çıkan sorunları gidermek için kullanılmasının yanı sıra karişımın fiziksel özellikleri üzerinde etkilidir. Karişımın sertliğinde, uzamasında, kopma dayanımında, esnekliğinde vb. değişiklikler meydana getirir (Gent, 2001). Yumuşaticılar proses aşamasında dolgu maddelerinin ıslanmasını sağlayarak tozumayı azaltır, ayrıca matris içerisindeki vizkoziteyi düşürerek kariştırma enerjisini azaltır (Ciesielski, 1999).

Yumuşaticılar fiziksel ve kimyasal olmak üzere ikiye ayrılabilir. Fiziksel yumuşaticıların başında yağlar gelmektedir. İşleme sırasında kariştırma sıcaklıklarını düşürmek ve kauçuk karişımlarınının toz haline getirilmesi sırasında yanma veya kavrulmayı önlemek, kauçuğun viskozitesini düşürerek öğütme, ekstrüzyon ve kauçuk karişımının genel işlenebilirliğini kolaylaştırmak, milleme ve kalendar büzülmesini azaltmak, dolgu maddelerinin dağılımına yardımcı olmak ve pişmiş kauçuk karişımının fiziksel özelliklerini değiştirmek gibi bir dizi nedenle kauçuk işleme yağları eklenir (Rodgers, 2004; Simpson, 2001; Savran, 2001). Peptizerler, işlenebilirliği iyileştirmek için sert polimerleri "yumuşatmak" için gereklidir. İki mekanizma vardır: Kimyasal peptizerler, mastikasyon için katalizör görevi görür ve kopmuş zincirlerin yeniden birleşmesini engellerken, fiziksel peptizerler, polimer zincirleri arasında yağlama yaparak polimerleri yumuşatır (Ikeda ve diğ., 2024; Savran, 2001).

### **3.5. Koruyucu Kimyasallar**

Lastikler yaşlandıkça, kauçuk karişımı kimyasal değişikliklere uğrar, bu da esnekliğin azalmasına ve sertliğin artmasına yol açar. Bu durum, çekiişin düşmesi, fren mesafelerinin uzaması ve patlama riskinin artması gibi çeşitli güvenlik problemlerine yol açabilir. Lastik koruyucu kimyasalların başında stabilizatör, antioksidan ve antiozonantlar gelmektedir. Stabilizatörler, bir malzemenin bozulmasını engeller ve stabilitesini,

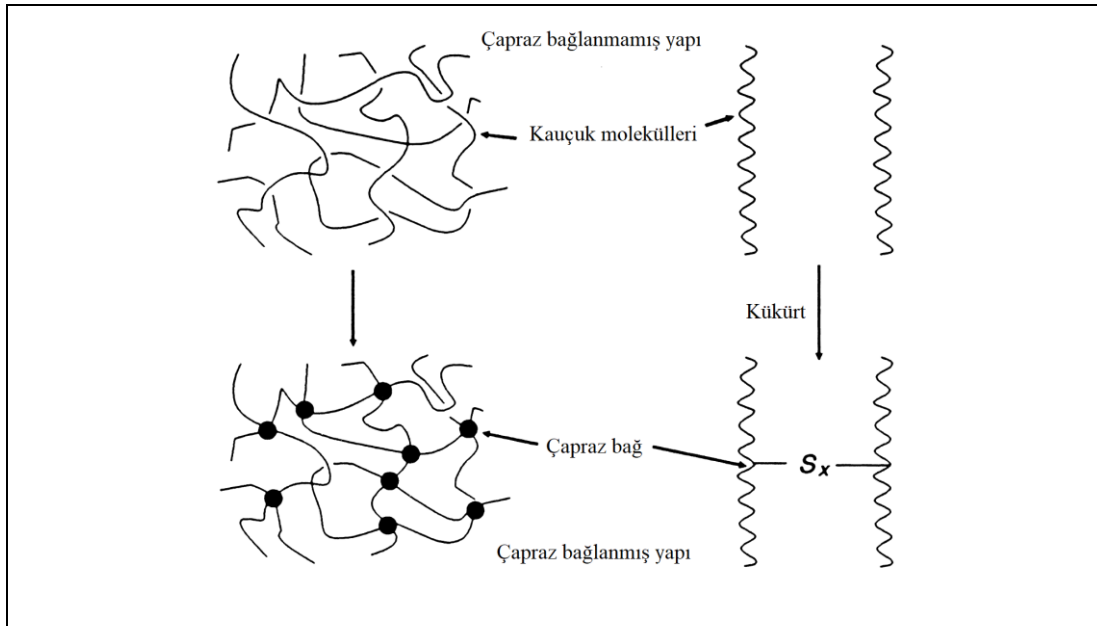
performansını ve dayanıklılığını iyileştirir (Rossomme ve diğ., 2023). Bu katkı maddeleri, istenmeyen kimyasal reaksiyonları bir karışıma engelleyerek birçok endüstri sektörüne yardımcı olabilir. Antioksidanlar (örneğin fenoller, aminler), kauçuğu oksidasyon ajanlarından (oksijen gibi), ağır metallere, UV ışınlarından, ozondan, mekanik stresten, sıcaktan ve agresif kimyasallardan korumak için eklenir (Demir ve diğ., 2024; Zhao ve diğ., 2023). Bu faktörler kauçuğun yaşlanmasını hızlandırabilir. Yaygın olarak kullanılan kauçuk antioksidanları, yaşlanmayı önleme mekanizmasına göre birincil antioksidanlar ve ikincil antioksidanlar olarak ikiye ayrılabilir (Kane ve diğ., 2024; Ambelang ve diğ., 1963). Genel olarak, birincil ve ikincil antioksidanlar, sinerjik bir antioksidan etkisi gösterebileceğinden kauçuğu korumak için birlikte kullanılabilirler (Ihenetu ve diğ., 2024). Yani, birincil antioksidan, oksidasyon yaşlanma süresi boyunca serbest radikali yakalamak için zincir kırıcı bir donör tipi olarak kullanılabilirken, ikincil antioksidan hidroperoksit yan ürünleriyle reaksiyona girebilir ve bu ikisinin kombinasyonu, kauçuk endüstrisinde en etkili ve popüler antioksidan kombinasyonlarından biri olarak kabul edilmektedir (Salkhi ve diğ., 2023). Antiozonantlar, kauçuğu ozon bozulmasından korur; ozon, yüzeyde çatlamalara neden olabilir. Antiozonanlar ozon ile reaksiyona girer, onun kauçuktaki polimer zincirlerini saldırarak parçalamamasını sağlar. Deformasyon altında, ozon saldırısına duyarlı vulkanizatlar, çatlakların oluşmayacağı bir kritik uzama değerinin altındadır. Ancak, antiozonanların karışıma dahil edilmesi, ozon saldırısına karşı dirençte önemli bir iyileşme sağlar. Antiozonanlar, vulkanizatın ana kısmından yüzeye göç ederek ozonla öncelikli olarak reaksiyona girer ve böylece bileşenin bütünlüğünü korur. Lastik endüstrisinde en yaygın kullanılan kimyasallar N-(1,3-dimetilbutil)-N'-fenil-p-fenilendiamin (6PPD), N-tert-butil-2-benzotiazol Sülfenamid (TBBS) ve vakslardır. Bu kimyasallar, ozonun etkilerine karşı koruma sağlamanın yanı sıra, aynı zamanda antioksidan olarak görev yapar ve mükemmel birer yaşlanma karşıtı maddesidirler (Paschall ve diğ., 2024; Thornley, 1964).

### **3.6. Vulkanizasyon Sistemi Bileşenleri**

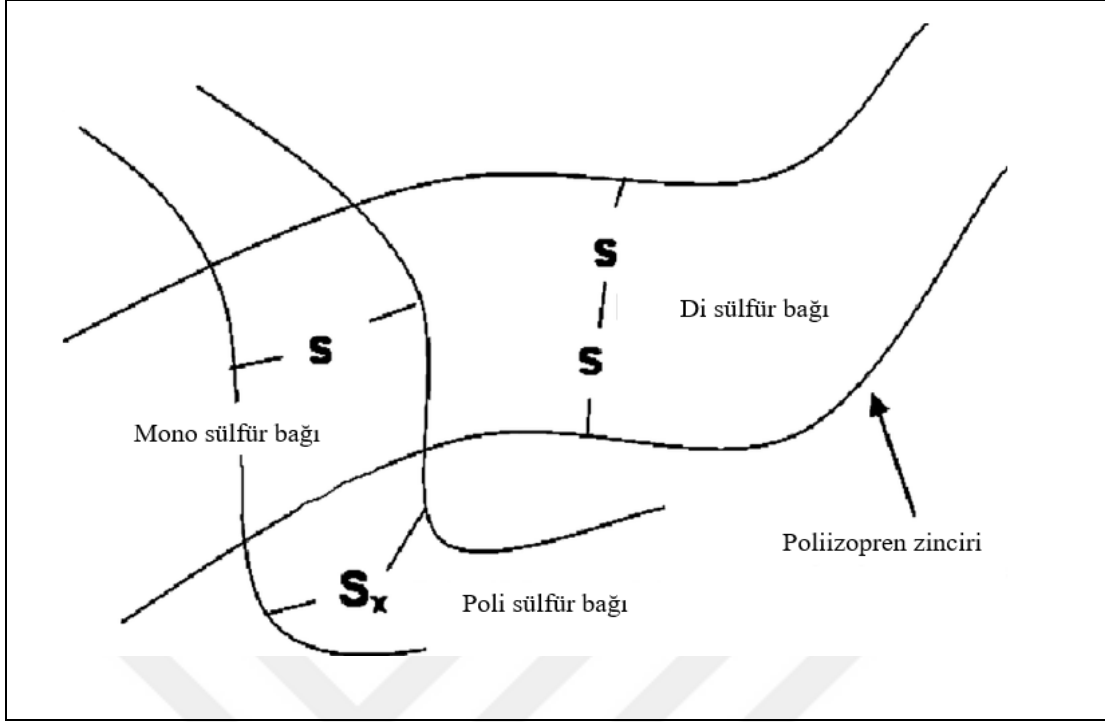
Vulkanizasyon, Roma'nın ateş tanrısı Vulcan'dan (İng. Vulcan-Roman god of fire) adını almış olup, kauçuk moleküllerinin kimyasal olarak birbirine bağlanarak, kauçuğun çoğunlukla plastik/akışkan özelliklerini elastik özelliklere dönüştürme işlemidir (Kruzalak ve diğ., 2017; Akiba ve Hahim, 1997). Kauçuk, yumuşak, yapışkan ve

termoplastik yapıdadır. Düşük gerilme dayanımına ve düşük elastikiyete sahiptir. Kauçuk, farklı uzunluktaki polimer zincirlerinin karışımından oluşur ve hiçbir şekilde ağ yapısı (İng. Crosslinking) yoktur (Coran, 1995). Bu malzeme, birkaç yüzyıldır biliniyor olmasına rağmen kendine bu haliyle bir uygulama alanı bulamamıştır. Kauçuğun özellikleri, polimer zincirlerinin ağ yapısı (crosslinking) ile dramatik şekilde değiştirilebilir. Bu işlem, kükürt ile gerçekleştirilen ve vulkanizasyon olarak bilinen bir süreçtir. Charles Goodyear, 1839 yılında bu vulkanizasyon sürecini kazara keşfetmiştir (Coran, 1994; Wu ve diğ., 2013). Vulkanizasyon, polimer zincirlerinin, çapraz bağlarla birbirine bağlanarak daha sağlam ve dayanıklı bir ağ yapısı oluşturduğu bir işlemdir. Bu işlem, başlangıçta uzun ve esnek moleküllerin, yüksek sıcaklık ve basınç altında birbirlerine bağlanarak, yer değiştirme enerjisinin azalmasını ve sonunda daha stabil bir yapının ortaya çıkmasını sağlar. Vulkanizasyon, aslında polimer zincirleri arasında kimyasal bağların kurulmasını içeren bir çapraz bağlanma işlemidir ve bu bağları oluşturabilen maddelere ihtiyaç duyulur. Bu maddeler, çapraz bağları kurarak moleküllerin birbirine tutunmasını sağlar ve en yaygın olarak kullanılan ana vulkanizasyon maddesi kükürttür. Kükürt, polimer zincirleri arasında köprüler oluşturarak kauçuğun esnekliğini ve dayanıklılığını artırır, aynı zamanda kauçuğun özelliklerini istenilen şekilde düzenlemeye yardımcı olur. Bu sayede, daha dayanıklı, uzun ömürlü ve yüksek performanslı malzemeler elde edilir. Kükürt, sarı renkte, tatsız ve kokusuz bir element olup, doğada genellikle bu özelliklerle bulunan bir maddedir. Kükürt, ısıtıldığında belirli bir sıcaklık olan 119°C'nin üzerinde monoklinik kükürte dönüşür. Monoklinik kükürt, molekülleri arasında bağlar kurarak S8 adlı halkalardan oluşan bir yapıyı meydana getirir. Bu yapının bir özelliği, kükürt atomlarının sekizli halkalar şeklinde dizilmesidir. Ancak, sıvı hale getirilmiş kükürt 150°C'nin üzerine ısıtıldığında, S8 halkaları kırılmaya başlar ve bu, kükürtün moleküler yapısında önemli değişikliklere yol açar (Ding ve diğ., 1996). Bu süreç, kükürtün kimyasal özelliklerini ve davranışını etkileyerek, onu farklı sıcaklık ve koşullarda çeşitli kimyasal reaksiyonlar için kullanılabilir hale getirir. Kükürt vulkanizasyonu ile çapraz bağ oluşumunun şematik gösterimi Şekil 3.8'de verilmiştir (Coran, 2005). Çapraz bağlanma özelliği, vulkanizasyon sürecini gerçekleştiren maddenin miktarı, etkinliği ve reaksiyon süresine bağlı olarak değişir. Kükürt vulkanizasyonunda, en yaygın kullanılan yöntem olan bu süreçte, kullanılan diğer katkı maddeleri, özellikle hızlandırıcıların türü ve miktarı, çapraz

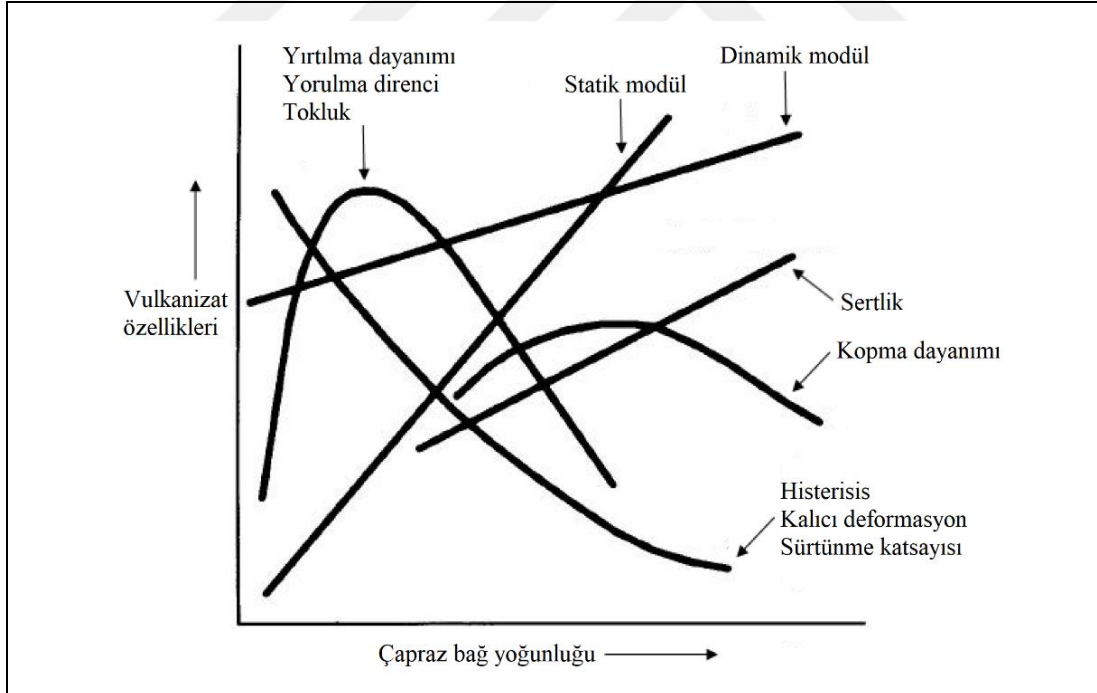
bağlanma şekillerini farklılaştırabilir. Vulkanize kauçuğun fiziksel ve mekanik özellikleri, büyük oranda çapraz bağlanma şekli ve yoğunluğuna bağlı olarak değişir ve bu parametreler, kauçuğun son kullanım özelliklerini belirler. Çapraz bağlanma şekli (Şekil 3.9) (URL-35) ve yoğunluğu (Şekil 3.10) (Coran, 2005), bir karışımın fiziksel özelliklerinin belirlenmesinde kritik rol oynayan iki temel parametreyi oluşturur. Bu çapraz bağlar, kükürt atomlarından oluşabileceği gibi, başka çapraz bağlayıcı maddeler kullanıldığında farklı kimyasal bileşimlere sahip olabilir. Kauçuğun plastik halden elastik hale dönüşmesi, organik çözücülerde çözünürlük eksikliği, sınırlı şişme yeteneği ve gerilme dayanıklılığı, elastikiyet, elastikiyet modülü, relatif ve plastik uzama, plastik sıkışma, ısı oluşumu, şişme stabilitesi, gazlara geçirgenlik, düşük sıcaklıklara direnç gibi bazı önemli fiziksel ve mekanik özelliklerin değişimi, bu çapraz bağların varlığıyla açıklanabilir. Doğal kauçukta hem gerilme dayanıklılığı hem de modül, bir zirveye ulaşır ve ardından değerlerinde bir azalma gözlemlenir (Lopes ve diğ., 2022). Bu olgu reversiyon olarak adlandırılır. Stiren-bütadien kauçuğu (SBR) durumunda ise gerilme dayanıklılığı yaklaşık olarak sabit kalırken, modül artar (ilerleyen kürleşme) ve vulkanizasyon süresi çok uzun sürdüğünde aşırı kürleşme sonucu, kopma uzamasında ani bir azalma gözlemlenir, bu durum doğal kauçukta görülmez. Mekanik özelliklerin (gerilme dayanıklılığı, elastikiyet modülü) değişimi, kullanılan polimerin doğasına bağlıdır (Khimi ve Pickering, 2013).



Şekil 3.8. Kükürt vulkanizasyonunun şematik gösterimi (Coran, 2005).



Şekil 3.9. Kükürt vulkanizasyonunda değişik bağlanma şekilleri (URL-35).



Şekil 3.10. Çapraz bağ yoğunluğunun vulkanizat özelliklerine etkisi (Coran, 2005).

Kauçuğun yalnızca kükürt ile vulkanizasyonu, son derece yavaş ve verimsiz bir süreçtir. Kükürt ile Kauçuk Hidrokarbonu arasındaki kimyasal reaksiyon, esas olarak C = C (çift bağlar) üzerinde gerçekleşir ve her çapraz bağ için 40 ile 55 kükürt atomuna ihtiyaç

duyulur (hızlandırıcı maddeler olmadan). Bu işlem, 140°C'de yaklaşık 6 saat süren bir süre alır ve herhangi bir üretim standardına göre ekonomik değildir. Bu şekilde üretilen vulkanizatlar, oksidatif bozulmaya son derece duyarlıdır ve pratik kauçuk uygulamaları için yeterli mekanik özelliklere sahip değildir. Bu sınırlamalar, kauçuk karışımlarına hızlandırıcı maddeler eklenmesiyle aşılmıştır ve bu maddeler, kauçuk formülasyonlarının bir parçası haline gelmiş ve daha fazla Ar-Ge çalışmasının konusu olmuştur (Krejsa ve Koenig, 1993). Hızlandırıcı, kauçuk karışımına eklenen ve vulkanizasyon sürecinin hızını artırarak, bu sürecin daha düşük sıcaklıklarda ve daha yüksek verimlilikle gerçekleşmesini sağlayan kimyasal bir bileşiktir. Bu kimyasal madde, aynı zamanda vulkanizasyon için gereken kükürt miktarını azaltarak, kauçuk malzemenin zamanla yaşlanmış özelliklerini iyileştirir ve böylece daha dayanıklı ve uzun ömürlü kauçuk vulkanizatlarının elde edilmesine yardımcı olur. Bu, kauçuğun hem performansını hem de dayanıklılığını artırarak, çeşitli endüstriyel uygulamalarda daha verimli kullanımını sağlar. Hızlandırıcılar, bir karışımda oynadıkları role bağlı olarak birincil ve/veya ikincil hızlandırıcılar olarak sınıflandırılır. Genellikle, thiazoles ve sulfenamide hızlandırıcıları, iyi işlenebilirlik güvenliği, geniş bir vulkanizasyon platosu, optimum çapraz bağ yoğunluğu ve istenilen geri dönüşüm gecikmesi gibi özellikleri nedeniyle birincil hızlandırıcılar olarak görev yapar. Birincil hızlandırıcılar, çoğu kauçuk karışımında 0.5 ila 1.5 phr dozajlarında kullanılır. Guanidinler, tiyuramlar ve ditiokarbamatlar gibi temel hızlandırıcılar ise birincil hızlandırıcıları aktive etmek için ikincil hızlandırıcılar olarak kullanılır. İkincil hızlandırıcıların kullanımı, vulkanizasyon hızını önemli ölçüde artırırken, bununla birlikte yanma güvenliğini de tehlikeye atar. İkincil hızlandırıcıların dozajları genellikle birincil hızlandırıcının %10-40'ı arasında değişir (Krejsa ve Koenig, 1993). Kauçuk sektöründe sıklıkla kullanılan hızlandırıcıların, sahip oldukları kimyasal grup ve vulkanizasyon hızına etkileri açısından sınıflandırılması Tablo 3.4'te paylaşılmıştır (URL-36).

Aktivatörler, kauçuk vulkanizasyon sistemlerinde kritik bir rol oynar ve vulkanizasyon sürecinin verimli şekilde gerçekleştirilmesini sağlar. Bu maddeler, süreci hızlandırarak daha kısa sürelerde daha iyi fiziksel sonuçlar elde edilmesine olanak tanır. Özellikle, kükürt gibi vulkanizasyon maddelerinin etkinliğini artırarak, daha düşük sıcaklıklarda ve daha kısa sürelerde kürleşme sağlanmasına yardımcı olur. Aktivatörler aynı zamanda, vulkanizasyon sırasında reaksiyonların doğru şekilde yönlendirilmesini sağlar

Tablo 3.4. Hızlandırıcıların sınıflandırılması (URL-36)

Hızlandırıcılar	Kimyasal Grup	Vulkanizasyon Hızı
Hexamethilentetramin (HMT)	Aldehit Amin	Yavaş
1,3-Difenilguanidin (DPG)	Guanidin	Yavaş
Benzotiyazol Disülfid (MBTS)	Tiyazol	Yarı ultra hızlı
Çinko-O,O-di-N-fosforoditiyoat (ZBDP)	Tiyofosfat	Ultra hızlı
N-sikloheksilbenzotiyazol-2-sülfenamid (CBS), N-Tersiyerbutil-2-benzotiyazol-sülfenamid (TBBS), N,N-disikloheksil-2-benzotiyazol sülfendamid (DCBS)	Sülfenamid	Hızlı gecikmeli etki

Belirli sıcaklık ve zaman koşullarında istenen çapraz bağ yapısının elde edilmesine yardımcı olur. Ayrıca, hızlandırıcıların olumsuz etkilerini kontrol altına alarak, reaksiyonun aşırı hızlanmasını engeller ve kauçuğun işleme sırasında zarar görmesini önler (Patsalidis ve diğ., 2024). Bu maddeler, kauçuğun elastikiyetini, gerilme dayanıklılığını ve aşınma direncini artırarak mekanik ve fiziksel özelliklerin stabilitesini geliştirir. Aktivatörler, süreçlerin ve maliyetlerin azaltılmasında da önemli bir rol oynar. Vulkanizasyon işlemi hızla tamamlayarak enerji ve zaman tasarrufu sağlar, bu da endüstriyel ölçekte üretim süreçlerinin ekonomik verimliliğini artırır. Vulkanizasyon sürecinde yaygın olarak kullanılan aktivatörler arasında, kükürtün etkisini artırmak için kullanılan tiazoller ve alkilfenoller gibi aminler, çinko oksit gibi metal oksitler ve istenmeyen yan reaksiyonları engelleyen klorlu ve fosforlu bileşikler bulunmaktadır (Luu ve Kawahara, 2024).

Geciktiriciler, kauçuğun güvenli bir zaman aralığında işlenmesi ile pişme oranlarının doğru bir şekilde dengelenmesi, yüksek değerli kauçuk işleme ekipmanlarının verimli kullanımı ve ekonomik üretimi için önemlidir. Genellikle, pişme süresini kısaltmak amacıyla daha yüksek işleme sıcaklıkları ile birlikte hızlandırıcı kombinasyonları ve daha yüksek vulkanizasyon sıcaklıkları kullanılır. Bazen kauçuk işleme sıcaklıkları, gerçek vulkanizasyon sıcaklığından yalnızca 10°C daha düşük bir sıcaklığa ulaşır ve bu durum erken pişmeyi ve yanmayı (İng. scorch) tetikler. Böylece, kauçuk karışımı daha fazla

işleme veya vulkanizasyon için kullanılamaz hale gelir. Sadece birkaç "yanmış" parça, vulkanizatın fiziksel özelliklerini önemli ölçüde azaltabilir. Daha hızlı pişme sistemleri ve/veya daha yüksek işleme sıcaklıkları ve uzun süreli depolama ile oluşacak yanmayı önlemek için, karışım sırasında geciktiriciler eklenir (URL-37).

### 3.7. Kordlar

Lastik kordları, lastiklerin şeklinin korunmasına ve dayanıklılığının artırılmasına yardımcı olan güçlendirici malzemelerdir. Başlangıçta bu amaçla pamuk gibi doğal fiberler kullanılırken, günümüzde lastiklerin daha sağlam, dayanıklı ve uzun ömürlü olabilmesi için çelik, naylon, rayon ve polyester gibi sentetik malzemeler tercih edilmektedir. Bu malzemeler, lastiklerin performansını iyileştirirken aynı zamanda güvenlik ve verimlilik gibi önemli özellikleri de artırır (Rodgers ve Waddell,2005).

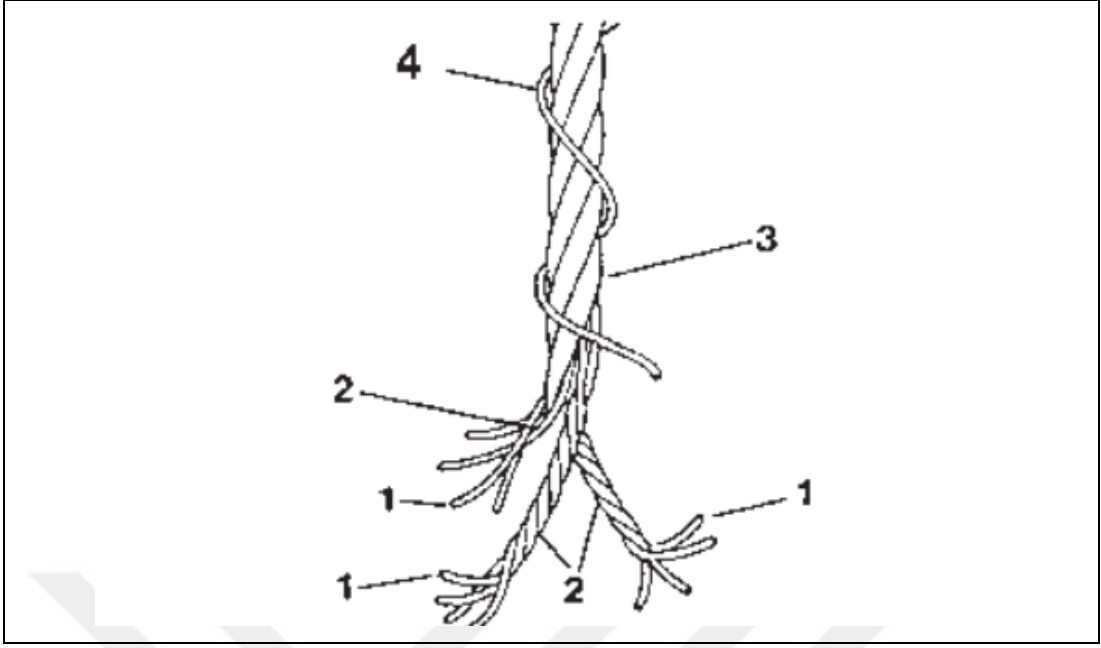
Naylon tip 6 ve 6,6 lastik kordları, sürekli polimerizasyon veya eriyik iplik eğirme yöntemleriyle üretilen sentetik uzun zincirli polimerlerdir. Bu kordlar, özellikle radyal binek lastiklerinde, kaplama katmanı veya kuşak kenar şeridi olarak kullanılır. Naylon kordlarının avantajları arasında iyi ısıya dayanıklılık, yüksek mukavemet ve nemden az etkilenme yer alır. Ancak, soğurken düzleşme (İng. flatspotting) ve uzun süreli kullanımlarda boyut artışı gibi dezavantajları vardır (Tian ve diğ., 2024).

Polyester lastik kordları da sentetik uzun zincirli polimerlerdir ve aynı üretim yöntemleriyle yapılır. Bu kordlar en çok radyal lastiklerin gövde katlarında kullanılır. Ayrıca bazı sınırlı durumlarda kuşaklarda da kullanılabilir. Polyester kordlarının avantajları arasında yüksek mukavemet, düşük büzülme ve düşük ısı etkisi bulunur. Ancak, polyester kordlar naylon veya rayon kadar ısıya dayanıklı değildir, bu da bazı durumlarda dezavantaj oluşturabilir. Rayon, ıslak eğirme yöntemiyle üretilen ve selülozdan yapılan bir gövde katı olarak kullanılan bir malzemedir. Avrupa'da ve bazı "run-flat" lastiklerinde sıklıkla gövde katı malzemesi olarak tercih edilen rayon, stabil boyutlar, ısıya dayanıklılık ve iyi işleme özellikleri sunar. Ancak, pahalı olması, neme karşı daha duyarlı olması ve çevresel üretim sorunları gibi dezavantajları bulunmaktadır (Takeyama ve Matsui, 1969). Aramid, yüksek dayanımlı organik bir sentetik elyaf olup çözücü eğirme yöntemiyle üretilir ve polyester ile naylondan 2-3 kat daha güçlüdür. Hafifliği ve yüksek mukavemeti nedeniyle çelik kord yerine alternatif olarak bant veya

stabilizatör katmanlarında kullanılabilir. Aramid, çok yüksek mukavemet ve sertlik sağlarken ısıya dayanıklıdır, ancak işleme kısıtlamaları ve yüksek maliyeti gibi dezavantajlara sahiptir (URL-38).

Çelik kord ise pirinçle kaplanmış karbon çeliği telden yapılmış, çekilerek kaplanmış, burulmuş ve çok telli demetler halinde sarılmış bir malzemedir. Çelik kordun genel yapısı Şekil 3.11’de verildiği gibi filament, iplik, kord ve sarımdan oluşur (URL-39). Filament, çelik kordonun temel elemanıdır ve genellikle 0.15 ila 0.38 mm çapında tek bir ince metal telden oluşur. İplik, iki veya daha fazla filamentin bir araya getirilmesidir. Kord, bir iplik olarak kullanıldığında veya daha yaygın olarak, ipliklerin ya da iplik ve filamentlerin kablolama işlemiyle elde edilen son üründür. Sarım ise genellikle 0.15 mm çapında tek bir filamentin, kord paketinin etrafına sarılarak sıkılığını korumasını sağlamak için kullanılır. Radyal binek lastiklerinde yaygın olarak kullanılan çelik kord, yüksek bant mukavemeti ve sertliği sayesinde aşınma ve yol tutuşunu iyileştirir. Ancak, özel işleme gereksinimleri ve neme karşı daha hassas olması gibi zorlukları bulunmaktadır. Lastiklerde çelik kord ile kauçuk karışımının yapışması, lastiğin performansı, dayanıklılığı ve güvenliği açısından kritik bir öneme sahiptir. Çelik kord, lastiğin ana taşıyıcı yapısını oluşturan, yüksek mukavemete sahip bir malzeme olarak görev yapar (Ooij, 1984). Ancak, bu güçlü yapının kauçukla etkili bir şekilde birleşmesi, lastiğin düzgün çalışması ve uzun ömürlü olması için gereklidir. İyi bir yapışma, çelik kordun kauçuk matrisine doğru şekilde entegre olmasını sağlar ve lastiğin yol tutuşu, aşınma direnci, ısıya dayanıklılığı gibi fiziksel özelliklerinin iyileşmesine yardımcı olur. Ayrıca, lastiğin iç ve dış kuvvetlere karşı direnç göstermesi, çelik kordun kauçuktan ayrılmaması ve deformasyonların önlenmesi için de gereklidir. Bu bağlamda, çelik kord ile kauçuk arasındaki güçlü yapışma, lastiğin güvenli kullanımını ve performansını sürdürebilmesi için hayati bir faktördür (Patterson, 1969).

Son olarak, lastiklerin topuk kısmında kullanılan topuk teli ana takviye elemanı olup kauçukla kimyasal bağ kurabilen bronz kaplı çelik teldir. Topuk teli, lastiğin her iki tarafına yerleştirilen halkalarla jantla sabitlenir, yüksek mukavemet ve esneklik sağlayarak lastiklerin montajını kolaylaştırır. Karkas katmanları topuk telinin etrafına sarılarak lastiği janta tutar ve yol performansını artırır. Bu yapı, lastiğin yerinde güvenli bir şekilde kalmasını sağlar (Nideröst ve Walters, 2000).

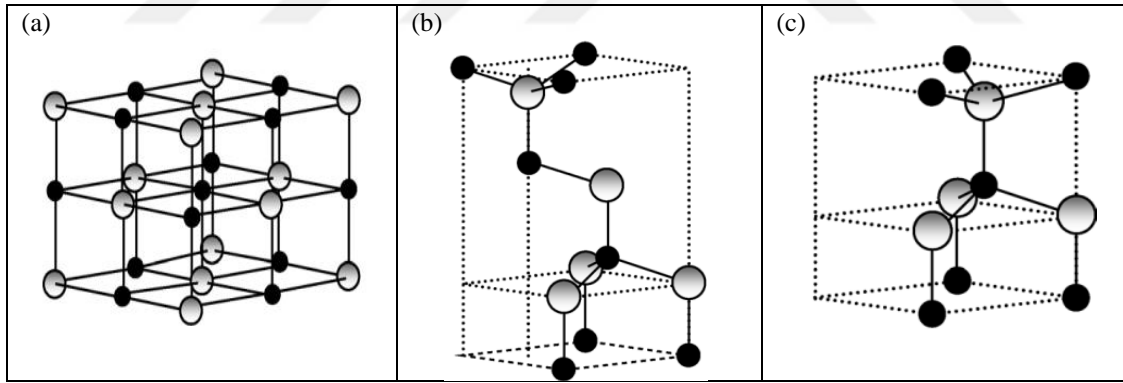


Şekil 3.11. Çelik kord bileşenleri (1) filament, (2) iplik, (3 ) kord ve (4) sarım (URL-39).

## 4. KAUCUK KARIŞIMLARINDA ZnO KULLANIMI

### 4.1. ZnO Malzeme Özellikleri ve Üretim Yöntemleri

Çinko oksit, pek çok farklı alanda kullanılan yaygın bir inorganik bileşiktir ve aynı zamanda Kalamın veya Çinko Beyazı olarak da bilinir. Beyaz renkteki bu toz, suda çözünmez ancak seyreltik asitler ve bazlarda çözünür. Çinko oksit, Dünya'nın kabuğunda çinko minerali olan zincit olarak bulunur. Ancak ticari olarak kullanılan çinko oksidin çoğu sentetiktir. Erime noktası oldukça yüksektir ve 1975 °C civarındadır; bu sıcaklıkta, aynı zamanda yapısal olarak ayrışarak bozulma eğilimindedir. Kimyasal olarak oldukça kararlı olsa da, yüksek sıcaklıklarda bozulabilir ve bu yüzden endüstriyel işlemlerde dikkatli bir şekilde kullanılmalıdır (Moezzi ve diğ., 2012). ZnO, üç kristal yapıda bulunabilir: Wurtzite, zinc-blende ve kaya tuzu (Şekil 4.1) (Özgür ve diğ., 2005). Ortam koşullarında, termodinamik olarak kararlı faz Wurtzite yapısıdır, burada her çinko atomu dört oksijen atomu ile tetrahedral şekilde koordinasyona girer (Kulkarni ve diğ., 2011). ZnO, bulunduğu her yapıda yarı iletken bir malzemedir ve yaklaşık 3,3 eV'lik geniş bir bant aralığına sahiptir (Schmidt-Mende ve MacManus-Driscoll, 2007).



Şekil 4.1. ZnO kristal yapıları: (a) kübik kaya tuzu, (b) kübik zinc-blende ve (c) altıgen Wurtzite. Gölgeleştirilmiş gri küreler çinko atomlarını ve siyah küreler oksijen atomlarını temsil etmektedir (Özgür ve diğ., 2005).

Çinko oksit, Çinko oksit, en önemli metal oksitlerden biri olup, son 100 yıl boyunca plastikler, seramikler, cam, çimento, boyalar ve alev geciktiriciler gibi çeşitli alanlarda yaygın olarak kullanılmıştır (Sahoo ve diğ., 2007; Ma ve diğ., 2013). Çinko oksit kullanım alanlarının başında gıda endüstrisi gelmektedir. Çinko oksit, gıda endüstrisinde, özellikle besin katkı maddesi olarak kullanılarak hem besleyici değerini artırmak hem de ürünlerin kalite ve raf ömrünü iyileştirmek amacıyla önemli bir rol oynamaktadır. Çinko

oksit açısından zengin mineraller, ürün verimliliğini ve yaşam süresini artırır. Çinkonun zengin besinleri, vücuttaki enzim sisteminin ayrılmaz bir parçası oldukları için hayvan yemlerinde kullanılır. Günlük diyetinde çinko eksikliğinin sağlık üzerinde değişikliklere yol açabileceği unutulmamalıdır. Bunun bazı örnekleri, beyin işlev bozukluğu ve gelişimsel aksaklıklar, bağışıklık sisteminde zayıflama ve fiziksel gelişim problemleri olabilir (Youn ve Choi, 2022). Uluslararası Çinko Derneği (İng. International Zinc Association, IZA), gübreler hakkında bir araştırma yapmıştır. Bu belgede, yüksek çözünürlük, düşük maliyet ve pazarda kolay erişilebilirlikleri nedeniyle gübre endüstrisinde genellikle Çinko Oksit ve Çinko Sülfatının bulunduğu belirtilmektedir (URL-40). Çinko oksit, cilt tahrişlerini tedavi etmek için tıbbi merhemlerde de sıklıkla kullanılır. Antibakteriyel ve koku giderici özellikleri sayesinde tıbbi uygulamalarda ideal bir bileşendir (Rai ve Bajpai, 2020; Rai ve Bajpai, 2021; Patra ve diğ., 2020). Ayrıca bebek pudrası, pişik kremi ve hatta kepek tedavi ürünlerinde de bulunabilir. Mükemmel UV engelleme özelliği nedeniyle, çinko oksit güneş kremi gibi ürünlerde güneş yanığı ve erken yaşlanmaya karşı koruma sağlamada kullanılır. Çoğu reçetesiz ilaç ürününde, güneş kremleri dahil olmak üzere, dolgu maddesi ve renklendirici olarak görev yapar. Çinko oksidin kullanıldığı diğer alanlar arasında mineral makyaj, tırnak bakım ürünleri, bebek losyonları, banyo sabunları ve ayak pudraları gibi geniş bir kozmetik ve kişisel bakım ürünleri yelpazesi de bulunmaktadır (Jiang ve diğ., 2018). Çinko oksidin bir diğer kullanım alanı ise kaplama endüstrisidir. Emaye, pigment ve boyaların üretiminde temel bir bileşen olarak yer alır. Bu, özellikle antifungal ve antibakteriyel özelliklere sahip olması sayesinde mümkündür. Bu özellikler, boyaların renk ve dayanıklılığını iyileştirerek farklı çevresel koşullarda uzun süre korunmasına olanak tanır (URL-41). Çinko oksit, seramik endüstrisinde de sıklıkla farklı biçim ve işlevlerde kullanılan önemli bir malzemedir. Bu malzeme, seramik karışımına eklenerek, ısıya karşı direnci arttırmaya yardımcı olur. Seramiklere belirli bir elektriksel iletkenlik kazandırabilir, viskoziteyi kontrol etme yeteneği sağlar ve yüksek sıcaklık koşullarında yapılan fırınlamalarda çatlakların oluşumunu engeller. Bunun yanı sıra, kimyasal dayanıklılığı artırarak ürünlerin ömrünü uzatır ve farklı üretim süreçlerinde performansı iyileştirir (URL-42). Ayrıca, çinko oksit içeren boyalar, demir gibi koruması zor metallere bile esnekliğini ve yapışma kabiliyetini koruyarak üstün performans sergiler. Bu, organik kaplamalarla reaksiyona girme yeteneği sayesinde, bu tür metallere kırılabilirlik ve düşük yapışma problemlerinin önüne geçilmesine yardımcı olur (Kumar ve

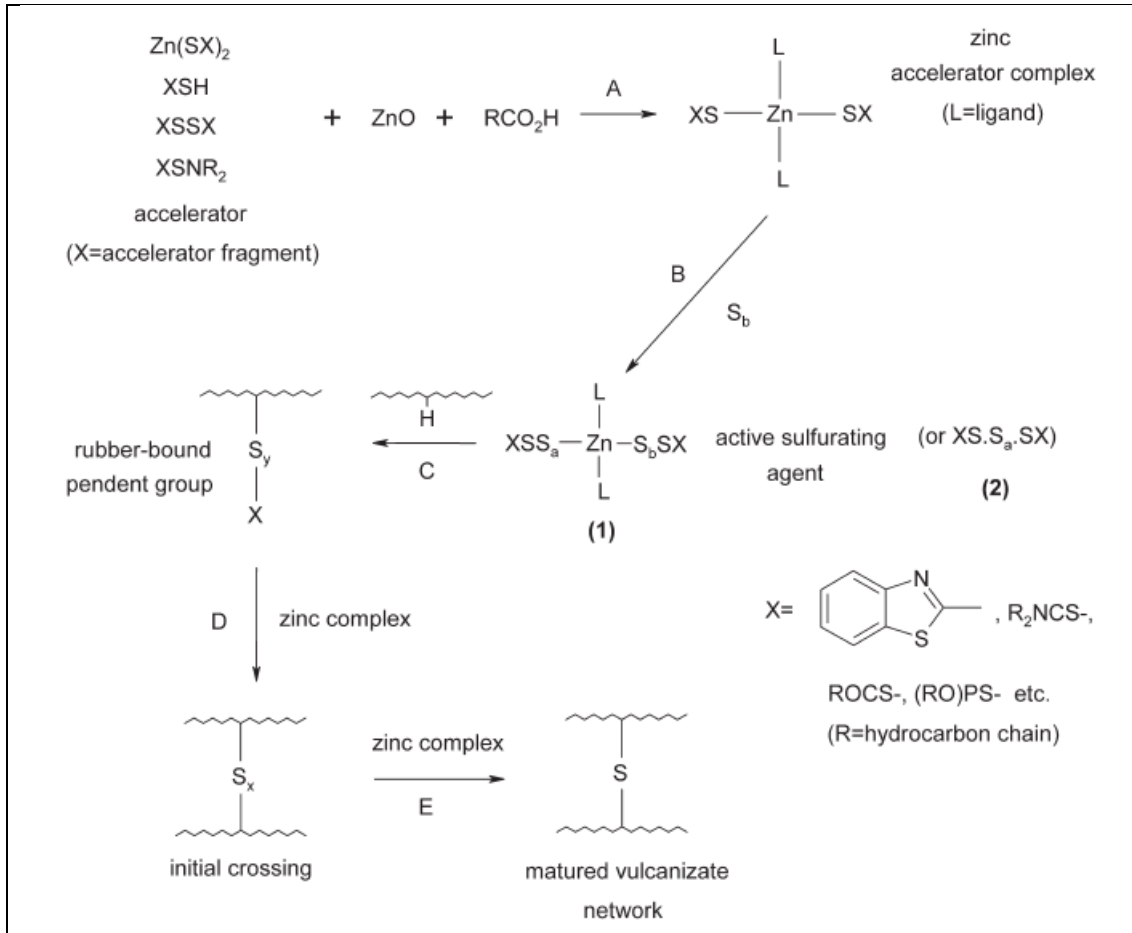
diğ., 2014). Çinko oksit, benzersiz optik ve elektriksel özellikleri sayesinde optoelektronik uygulamalarında büyük bir potansiyele sahiptir. Yüksek ışık geçirgenliği, geniş bant aralığı ve düşük enerji kayıpları ile çinko oksit, ışık Emilimi ve yayılımı açısından etkili bir malzeme olarak öne çıkar. Ayrıca, elektriksel iletkenliği, özellikle ince film devrelerinde ve yarı iletken cihazlarda kullanılmasını mümkün kılar. Çinko oksit, aynı zamanda düşük sıcaklıklarda işlenebilmesi sayesinde esnek elektronik cihazların üretiminde de ideal bir bileşendir. Bu özellikleri, çinko oksiti LED'ler, güneş pilleri, ekranlar ve sensörler gibi birçok optoelektronik uygulamada potansiyel bir malzeme olarak ön plana çıkarmaktadır (Zahoor ve diğ., 2021; Shahzad ve diğ., 2021). Plastik sektöründe ise çinko oksit, özellikle film, ambalaj, gıda sektörü içerisinde katkı maddeleri ve tekstil gibi çeşitli plastik ürünlerde, renk değişimini engellemek, ısı dayanımını artırmak ve şeffaflık sağlamak için sıklıkla kullanılır. Gıda ambalajlarında ek olarak içeriğin tazeliğini korumaya yardımcı olan ek bir koruma sağlar. Ayrıca, çinko oksit ile stabilize edilmiş polipropilen ve yüksek yoğunluklu polietilen, güvenlik miğferleri, stadyum oturma alanları ve tarımsal ekipmanlar gibi farklı ürünlerde kullanılır (Moezzi ve diğ., 2012). Çinko oksidin en önemli kullanım alanlarından biri kauçuk endüstrisidir. Çinko oksit, kauçuk endüstrisinde önemli bir rol oynamaktadır ve bu alanda kullanılan çinko oksit miktarı dünya genelindeki toplam tüketiminin yarısından fazlasını oluşturur (Mostoni ve diğ., 2019). Kauçuk formülasyonlarında etkili bir dispersiyon sağlanabilmesi için çinko oksit genellikle kükürt kürleme sistemlerine entegre edilir ve bu sistemlerde kauçuğun her 100 birimi için 2 ila 5 phr çinko oksit eklenir (Das ve diğ., 2011). Çinko oksitin, kauçuk sektöründeki kullanım hacmi ve kritik rolü bu endüstri alanındaki önemini gözler önüne sermektedir. Çinko oksit, kauçuğun elastikiyetini, dayanıklılığını ve diğer mekanik özelliklerini iyileştirmekteki başarısıyla, kauçuk ürünlerinin kalitesini artırmada vazgeçilmez bir bileşik haline gelmiştir (Sreethu ve Naskar, 2021; Chukwu ve diğ., 2019).

Çinko oksit üretimi, genellikle doğrudan (Amerikan) proses, dolaylı (Fransız) proses ve ıslak kimyasal işlem gibi farklı yöntemlerle gerçekleştirilir. Kullanılan yöntemlere göre çinko oksidin kalite, verimlilik ve maliyet açısından farklı avantajlar sunması sağlanır. Doğrudan (Amerikan) proses, çinko cevherinin kömürle (örneğin, antrasit) ısıtılarak indirgenmesi ve bu çinko buharının aynı reaktörde oksitlenmesiyle çinko oksit üretimi gerçekleştiren bir yöntemdir. Samuel Wetherill tarafından geliştirilen bu yöntem, çinko

oksidin tek bir döngüde üretilmesini sağlar. Süreç, fırın içinde, alt katmanı önceki yüklemekten kalan ısıyla ısınan bir kömür yatağından oluşur. Bu yatak üzerine, çinko cevheri ile karıştırılmış kömür yerleştirilir. Alt taraftan üflenen hava, her iki katmana ısı iletimini sağlarken, çinko indirgeme işlemi için gerekli olan karbon monoksiti taşır. Sonuç olarak elde edilen çinko oksit (tip A), çinko cevherinden kaynaklanan metal bileşenleri içerir. Bu partiküller genellikle iğne şekilli olup, bazen küresel de olabilir. Kalıcı beyaz bir ürün elde edebilmek için, çinko oksit içinde bulunan kurşun, demir ve kadmiyum oksitleri sülfatlara dönüştürülür. Rengin kalıcılığı, suyla çözünebilen maddelerin oranını artırarak ve ürünün asiditesini yükselterek sağlanır. Asidite, kauçuk işleme teknolojisi açısından önemli bir özelliktir çünkü bu, prevulkanizasyon süresinin uzamasını sağlar ve karışımların daha güvenli bir şekilde işlenmesini temin eder (Pyskło ve diğ., 2007). Dolaylı (Fransız) proseste, metalik çinko bir fırında eritilerek yaklaşık 910 °C sıcaklıkta buharlaştırılır. Çinko buharının, havadaki oksijenle hemen reaksiyona girerek çinko oksit oluşturması sağlanır. Oluşan çinko oksit partikülleri, soğutma kanalları aracılığıyla taşınır ve bir torba filtre istasyonunda toplanır. Bu yöntem, 1844 yılında LeClaire tarafından yaygınlaştırılmış olup, o zamandan beri Fransız süreci olarak bilinmektedir. Elde edilen çinko oksit, ortalama partikül boyutları 0.1 mikrometreden birkaç mikrometreye kadar değişen aglomeratlardan oluşur ve partiküller genellikle küresel şekildedir. Fransız süreci, dikey fırınlar kullanılarak gerçekleştirilir; bu fırınlar, dikey yük, dikey rafine kolon, elektrik arkı ile çalışan buharlaştırıcı ve döner yanma odası gibi ekipmanlara sahiptir. B tipi çinko oksit, A tipine kıyasla daha yüksek saflığa sahiptir (Mahmud ve diğ., 2003). Islak kimyasal proses, aynı zamanda ıslak çökelti yöntemi olarak bilinir ve çinko oksidin bir çinko tuzu çözeltisinden çökeltilmesini içerir. Bu yöntemde, çinko klorür veya çinko sülfat gibi çözünebilen bir çinko tuzu suya çözülür. Ardından, sodyum hidroksit veya başka bir alkali çözeltisi çinko tuzu çözeltisine eklenir ve bu işlem çinko hidroksit oluşumuna yol açar. Çinko hidroksit daha sonra ısıtılır veya kalsinasyona tabi tutulur ve çinko okside dönüşür. Islak kimyasal proses, partikül boyutu kontrolü ve farklı çinko oksit çeşitlerinin üretimi konusunda esneklik sunar. Bu yöntem, özellikle kauçuk üretimi ve kaplamalar gibi, belirli partikül boyutları veya yüzey işlemleri gerektiren uygulamalarda sıklıkla kullanılır (Tsuzuki ve diğ., 2004; Kołodziejczak-Radzimska ve diğ., 2014).

Modern vulkanizasyon sistemlerinde, kauçuğun verimli bir şekilde pişmesinin gerçekleşmesi için birçok farklı bileşen kullanılmaktadır. Bunlar arasında, kükürt, hızlandırıcı ve aktivatörler bu sistemin temel bileşenleridir. Bu vulkanizasyon bileşenleri ile pişme aktivatörleri, kauçuğun etkin bir şekilde çapraz bağlanabilmesinde önemli rol oynar. Kauçuk teknolojisinde, çinko oksit, laurik asit ve bunların çinko tuzları gibi uygun asit kombinasyonlarıyla birlikte kullanılır. Bu kombinasyonlar, kauçuk karışımındaki kükürtün daha etkili bir şekilde aktive edilmesini sağlayarak, vulkanizasyon işlemini hızlandırır. Aktivasyon sonucu, daha etkili bir tuz kompleksi oluşur ve bu, kükürtün kauçukla daha hızlı ve verimli bir şekilde reaksiyona girmesine olanak tanır. Ayrıca, hızlandırıcılarla birlikte bu sistem, vulkanizasyon hızlarını artırarak daha hızlı çapraz bağlanma sağlar. Kükürt vulkanizasyonunun doğal kauçuk için önerilen tüm süreci Şekil 4.2'de basitleştirilmiş reaksiyon sırasıyla verilmiştir (Chapman ve Johnson, 2005; Chapman ve Porter, 1988]. Kükürt vulkanizasyonu süreci genel olarak kabul görmüş olsa da, aktif sülfürleme ajanının ne olduğu ve bu ajanın kauçuk molekülleriyle nasıl reaksiyona girdiği konusunda, özellikle de çinkonun bu süreçte yer alıp almadığı konusunda net bir görüş birliği yoktur. Yapılan bir çalışmada, Şekil 4.2'de verilen çinko kompleksi (1) yerine aktif sülfürleme ajanının bir hızlandırıcı polisülfür (2) olduğunu ve çinko bulursa bile bunun geçerli olduğunu öne sürülmüştür (Coleman ve diğ., 1974; Coran, 1989; Coran, 1994]. Başka bir çalışmada da her iki ajan olan çinko kompleksi (1) ve polisülfür (2)'nin de aktif sülfürleme ajanı olarak rol oynayabileceğini, bunun vulkanizasyon koşullarına ve sürecin yoğunluğuna bağlı olarak değişebileceğini belirtmiştir (Chapman ve Porter, 1988). Yine de doğal kauçuk için yapılan çalışmalara göre, çinkonun mevcut olduğu durumlarda, Şekil 4.2'deki D ve E aşamalarında aktif bir rol oynadığına dair güçlü kanıtlar da mevcuttur. Çinko oksit içeren hızlandırılmış vulkanizasyon, reaksiyon hızını çok etkilemese de çapraz bağlanma verimliliğini artırır. Bu süreçte kimyasal yollar üzerinde önemli bir etkisi vardır; özellikle, sülfürleme işlemi, çinkonun bulunmadığı durumlarda C=C çift bağlarına hem yer değiştirme hem de ekleme şeklinde gerçekleşen reaksiyonlardan ziyade, çoğunlukla alilik hidrojen atomlarının yer değiştirmesiyle yapılır (Susanna ve diğ., 2017; Lee ve diğ., 2018). Ayrıca, çinko oksit kullanımı, kauçuğun moleküler yapısında daha fazla mono- ve disülfür çapraz bağlarının oluşmasına yol açarak, tersine dönüşümün azalmasına ve daha stabil bir ağ yapısının oluşmasına neden olur. Bu durum, doğal kauçuğun daha dayanıklı ve uzun ömürlü

olmasına katkı sağlar. Çinko oksit, aynı zamanda vulkanizasyonun indüksiyon süresini ve toplam süresini hafifçe uzatarak, sürecin kontrolünü sağlar (Kruželák ve diğ., 2016; Song ve diğ., 2022). Bu avantajlar, enerji tasarrufu ve işlem maliyetlerinde belirgin bir azalma sağlar, böylece hem ekonomik hem de çevresel açıdan verimli bir üretim süreci ortaya çıkar (Mostoni ve diğ., 2021).



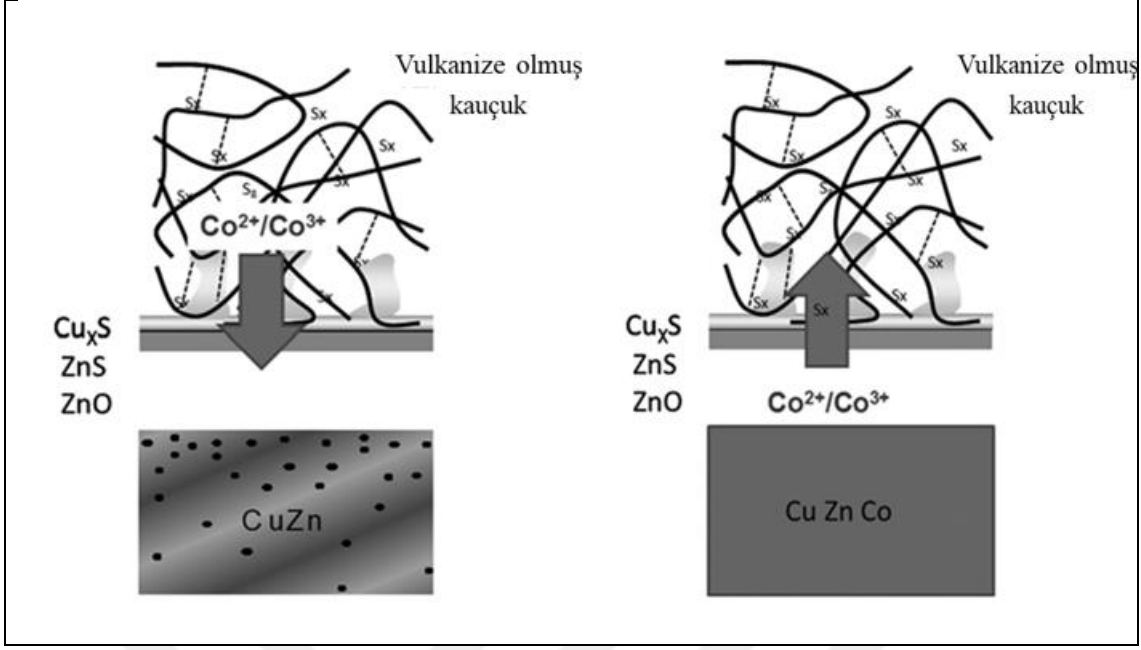
Şekil 4.2. Kükürt vulkanizasyon aşamaları genel gösterimi (Chapman ve Johnson, 2005).

Çinko oksit, kükürt vulkanizasyonunda aktivatör olarak işlev görmekle birlikte, aynı zamanda kauçuk karışımlarında ısı birikimini (İng. Heat build-up) azaltma ve lastiklerin aşınma direncini artırma gibi faydalar sağlar. Çinko oksit, sürtünme enerjisini yüksek iç sıcaklık artışları olmaksızın absorbe edebilen bir "ısı emici" olarak hareket eder. Ayrıca, çinko oksidin vulkanizatların ısıya karşı direncini ve dinamik yükleme koşullarına karşı dayanımını artırdığı da gözlemlenmiştir. Çinko oksidin yüksek termal iletkenliği, kauçuk yüzeylerinde meydana gelen lokal ısı yoğunlaşmalarını dağıtarak, kauçuğun mekanik

özelliklerini korur ve bu sayede malzemenin performansını iyileştirir (Mostoni ve diğ., 2019).

Çinko oksit ayrıca, lastiklerin çelik kordlarına ve teknik ürünlerde metal ile kauçuk arasındaki bağları güçlendirmek için de kullanılan kritik bir bileşendir. Pirinç kaplı çelik teller, radyal lastiklerin yapısal bütünlüğünü sağlamak için sıklıkla kullanılan ve lastiklerin dayanıklılığını ve performansını arttıran malzemelerdir. Lastik teknolojisinde geleneksel olarak, çelik tellere kullanım alanına göre belirli bir kalınlıkta (~200 nm) uygulanan pirinç kaplama, lastik ve çelik kord arasındaki bağı kuvvetli bir şekilde iyileştiren ve yüksek sıcaklık ile dinamik yüklemelere karşı dayanıklı bir bağlayıcı arayüz oluşturur. Bu bağlayıcı arayüz, pirinç yüzeyinin aktif kükürt içeren moleküllerle etkileşime girmesiyle oluşur; ardından, stokiometrik olmayan bakır sülfür ( $Cu_xS$ ) tabakasının oluşumu sonucunda kauçuk tamamen çapraz bağlanır (Şekil 4.3) (Buytaert ve Luo, 2014). Organik kobalt tuzlarının kauçuk karışımına eklenmesi, kauçuk ve metal arasındaki bağı güçlenmesine ve yapışma performansının iyileşmesine önemli ölçüde katkı sağlar. Bu ekleme, yalnızca ilk yapışma sürecini iyileştirmekle kalmaz, aynı zamanda bağı dayanıklılığını da artırır. Özellikle kobalt kompleksleri, kauçuk ve metal yüzey arasındaki kimyasal etkileşimleri güçlendirerek, yapışma seviyesini belirgin şekilde yükseltir ve böylece son ürünün mekanik performansını iyileştirir (Sun ve diğ., 2024). Lastik üretimindeki karmaşık süreçlerde yer alan birçok malzeme arasında, vulkanizasyon aktivatörü olarak çinko oksit ( $ZnO$ ), pirinç ile kauçuk arasındaki yapışmanın sağlanmasında önemli bir rol oynamaktadır. Yapılan çalışmalar, çinko oksitin, kauçuk karışımından, yani kauçuklar, dolgu maddeleri, vulkanizasyon aktivatörleri, hızlandırıcılar, promoterler vb. içeren karışımdan ve çelik kord yüzeyindeki pirinç kaplamadan gelen her iki kaynağının da bağlayıcı arayüz oluşumunu etkilediğini ortaya koymuştur (Jeon ve diğ., 1999; Kannan ve diğ., 2020; Ozawa ve diğ., 2017).

Vulkanize kauçukların özelliklerini iyileştirmenin yanı sıra, çinko oksit, kürlenmemiş kauçukların işlenmesine de yardımcı olur. Kauçuk formülasyonlarına eklenen  $ZnO$ , pişirme sırasında kauçuk ürünlerinin büzülmesini engellemeye yardımcı olur ve kalıpların temizliğini sağlar (Alam ve diğ., 2022). Bu da pişirme işlemleri arasındaki temizlik sürecinin sayısını artırarak üretkenliği destekler. Geçmişte, çinko bileşenleri dolgu maddesi olarak kullanılır ve zararlı reaksiyon ürünlerini temizlemek için eklenirdi.



Şekil 4.3. Pirinç kaplı çelik kordun yapışma mekanizması (Buytaert ve Luo, 2014).

Ancak, ZnO'nun dolgu maddesi olarak kullanımı maliyetli olduğundan, genellikle daha ucuz ve etkili dolgu maddeleri (karbon siyahı veya silikatlar) ile yer değiştirilmektedir. Diğer vulkanizasyon yöntemlerinde, örneğin peroksit kürlemesi için de ZnO sıkça kullanılır, ancak peroksitleri aktive etmez. Bu durumda ZnO'nun rolü, asidik dolgu maddeleri veya halojen içeren polimerler içeren bileşenlerde asit alıcı olarak işlev görmesidir. Ayrıca, ZnO yaşlanma direncini artırmada da önemli bir katkı sağlar; bunun nedeni, ZnO'nun çapraz bağlama reaksiyonlarının asidik yan ürünleriyle reaksiyona girerek kauçuğun yaşlanmasını geciktirmesidir. Çinko oksit aynı zamanda, halojen içeren polimerler ve karboksil grubu taşıyan polimerler için de etkili bir çapraz bağlama ajanı olarak kullanılmaktadır (Shi ve diğ., 2021).

#### 4.2. ZnO Malzemelerinin Çevreye Etkileri ve Regülasyonlar

Çinko, doğal süreçler nedeniyle çevrede bulunmaktadır ve bu da organizmalar dahil olmak üzere tüm çevresel bileşenlerde çinkonun doğal bir arka plan konsantrasyonuna yol açmaktadır. Çinko aynı zamanda hayati bir elementtir. Kimyasal ve biyolojik süreçler, çinkonun çevredeki ve insanlardaki türleşmesini etkileyecektir. Bu unsurlar, çinkonun maruziyet ve etki değerlendirmesi, dolayısıyla risk karakterizasyonu üzerinde temel etkiler yaratmaktadır (Yung ve diğ., 2014). Çinko metali ve beş çinko bileşiği, yani çinko oksit, çinko klorür ( $ZnCl_2$ ), çinko sülfat ( $ZnSO_4$ ), çinko fosfat ( $Zn_3(PO_4)_2$ ) ve çinko

distearat ( $(C_{18}H_{35}O_2)_2Zn$ ), EEC/793/93 sayılı AB Regülasyonu kapsamında Eylül 1995'te öncelikli olarak belirlenmiştir. Bu, çinko için tam bir risk değerlendirmesinin yapılması gerektiğini, Yeni ve mevcut maddeler için risk değerlendirmesi Teknik Rehber Dokümanı'nda (TGD) detaylandırılan yönergeler doğrultusunda gerçekleştirilmesi gerektiğini ifade etmektedir (URL-43). Avrupa Konseyi Direktifi 2004/73/EC'ye göre, çinkonun çeşitli yollarla çevreye salınan seviyesinin belirli bir düzeyde tutulmasının, sucul yaşam üzerindeki toksik etkileri nedeniyle önemli bir görev olduğu vurgulanmaktadır (Boonmahithisud ve Boonkerd, 2021; Alam ve diğ., 2022). Çinkonun çevreye salınımı birkaç farklı yolla gerçekleşebilir. İlk olarak çinkonun üretimi sırasında, atık su ve emisyonlar yoluyla çeşitli miktarlarda çinko salınır (Councell ve diğ., 2004). Sonraki aşamada, çinko özellikle lastik gibi kauçuk ürünlerinin üretimi, kullanımı ve geri dönüşümü sırasında salınır. Yer altı sularına ise, lastiklerin aşınmasıyla ortaya çıkan kauçuk tozlarının ve yapay spor alanları için alt zemin olarak kullanılan geri dönüştürülmüş kauçuk granüllerinden salınımla karışır (Byerley ve Scharer, 1992; Sprang ve diğ., 2009; Bodar ve diğ., 2005). Lastiklerin aşınması ve yıpranması, lastiklerin yol yüzeyiyle yuvarlanma ve kayma teması sırasında kauçuk malzemenin kaçınılmaz kaybıdır. Bu durum, çoğunlukla yorgunluk kesiklerinin büyümesi ve kauçuk partiküllerinin soyulması nedeniyle meydana gelir (Blok, 2005). Kopan kauçuk parçaları, lastik ve yol aşınma parçacıkları (İng. Tire and Road Wear Particles, TRWP) olarak adlandırılır. Bu parçacıklar, lastik ile yol arasındaki sürtünme nedeniyle, yeterli yol tutuşu ve güvenliği sağlamak amacıyla normal sürüş koşullarında oluşan küçük kırıntılardır (Wagner ve diğ., 2024). Boyutları ve bileşimleri nedeniyle bu parçacıklar genellikle mikroplastiklerle ilişkilendirilir. Lastik ile yol arasındaki sürtünme, sürücülerin güvenliğini sağlamak için önemlidir ve kolayca azaltılamaz. Ayrıca, çevredeki TRWP seviyeleri yalnızca lastik tasarımına bağlı değildir; sürüş davranışı, yol ve araç özellikleri, atıksu arıtma tesisleri gibi çeşitli dışsal faktörlerden de etkilenir. Tüm bu faktörleri göz önünde bulundurmak için, TRWP sorunlarına yönelik çözümler çok paydaşlı bir yaklaşım gerektirir. Avrupa Lastik ve Kauçuk Üreticileri Derneği (İng. European Tyre & Rubber Manufacturers Association, ETRMA), bu zorluğu ele almak için proaktif bir yaklaşım benimsemiş ve CSR Europe (The European Business Network for Corporate Sustainability and Responsibility) tarafından kolaylaştırılan Avrupa TRWP Platformu'nu başlatmıştır (Kovochich ve diğ., 2021; Youn ve Choi, 2021). Birçok çalışma, çinko

salınımının lastiğin ömrü boyunca devam ettiğini ve bu durumun sucul organizmalar için toksisite ve sitotoksisite ile çevresel etkiler oluşturduğunu ortaya koymaktadır (Das ve diğ., 2011; Zhao ve diğ., 2021). Yüksek çinko konsantrasyonu, çeşitli sucul organizmaları etkileyerek zehirli reaksiyonlara yol açmakta ve bu da üreme, gelişim ve davranış bozukluklarına neden olmaktadır (Sreethu ve Naskar, 2021; Chukwu ve diğ., 2019). Amerika Birleşik Devletleri Çevre Koruma Ajansı (İng. United States Environmental Protection Agency, US EPA), sucul yaşam üzerindeki toksik etkilerine dayanarak suda çözülmüş çinkonun maksimum izin verilen konsantrasyonu için bir sınır belirlemiştir (Susanna ve diğ., 2017). Bu nedenle, çinkonun doğaya salınımı kontrol altına alınmalı ve kauçuk bileşiklerindeki çinko miktarının düşük seviyelerde tutulması önemli bir konu olmalıdır.

#### **4.3. Kauçuk Karışımlarında ZnO Miktarının Azaltılması ile İlgili Çalışmalar**

Çinkonun doğaya salınımı kontrol altına alınmalıdır ve kauçuk karışımlarındaki çinko miktarının düşük seviyelerde tutulması önemli bir konudur. Hem çevresel kısıtlamalar hem de ekonomik etkiler göz önünde bulundurulduğunda, kauçuk ürünlerinde çinko miktarını azaltmaya yönelik çalışmalar son yıllarda büyük ilgi görmüştür. Genel olarak, bunu sağlamak için iki yol vardır; (i) pişme aşamasında kauçuk matrisindeki çinko aktivitesini artırmak ve böylece çinko iyonlarının reaksiyon için kullanılabilirliğini artırmak, (ii) ZnO'yu çevreye daha az zararlı diğer aktivatörlerle değiştirmek. ZnO'nun reaktivitesi, fiziksel ve kimyasal özellikleri, üretim süreci (Shree ve diğ., 2020; Manikandan ve diğ., 2017; Ghorbani ve diğ., 2015), yüzey alanı (Sahoo ve diğ., 2007), partikül boyutu (Sreethu ve Naskar, 2021) ve çapraz bağlama ajanı ile kauçuk zinciri arasındaki ara yüzeyin boyutunu etkileyen morfoloji (Jin ve diğ., 2013; Sofianos ve diğ., 2021) tarafından etkilenir. Akhlaghi ve ark., çinko oksit nanoparçacıklarını kullanarak, bunların izotermal pişme kinetiği, morfolojisi ve Etilen Propilen Dien Monomer kauçuğunun mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Yapılan gözlemler, reçetede kullanılan geleneksel ZnO'nun, daha düşük kullanım oranına izin veren ZnO nanoparçacıklarıyla değiştirilmesinin daha kısa pişme süresi ve daha yüksek çapraz bağlanma yoğunluğu sağladığını göstermektedir. Aynı zamanda, pişme kinetiği analizi, pişme reaksiyonunun aktivasyon enerjisinin, ZnO partikül boyutunun küçülmesiyle önemli ölçüde azaldığını ortaya koymuştur. Bu nedenle, ZnO nanoparçacıklarıyla aktive

edilen EPDM sistemlerinin pişme ve mekanik özellikleri iyileştirdiği bildirilmiştir (Akhlaghi ve diğ., 2012). Taghvaei-Ganjali ve diğ., kauçuk reçetelerinde yüzeyi modifiye edilmiş çinko oksit kullanarak malzemenin etki alanının arttığını bildirmişlerdir. Yüzeyi modifiye edilmiş geleneksel ZnO ve ZnO nanoparçacıkları, polietilen glikol ve polipropilen glikol ile modifiye edilerek, doğal kauçuk/stiren-butadien kauçuğu (NR/SBR) karışımında, parçacıkların daha iyi hidrofobik özellikler kazanmasını sağlayarak kauçuk özelliklerini iyileştirmek amacıyla kullanılmıştır ve bu sayede daha iyi bir dispersiyon sağlanmıştır. Modifiye edilmiş ZnO malzemelerinin, daha iyi fiziksel-mekanik özellikler sağladığı ve karışım tarifindeki ZnO içeriğini azaltmada etkili olduğu bildirilmiştir (Taghvaei-Ganjali ve diğ., 2011). Sahoo ve diğ., ZnO nanoparçacıklarını 30-70 nm boyut aralığında, homojen çökeltme ve kalsinasyon yöntemiyle sentezlemiş ve bunları doğal kauçuk ve nitril-butadien kauçuğu bazlı reçetelerde ZnO miktarını azaltmak için kullanmışlardır. Yapılan çalışmada, çapraz bağ yoğunluğundaki artış nedeniyle, geleneksel ZnO'ya kıyasla daha iyi mekanik özellikler sağlayarak tork değerlerinde önemli bir artış gözlemlenmiştir (Sahoo ve diğ., 2007). Przybyszewska ve diğ., ZnO nanoparçacıklarının morfolojisinin, karboksilatlı nitril kauçuğu bazlı karışımda çapraz bağ aktivitesi üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Yapılan gözlemlere göre, kar taneleri morfolojisine sahip ZnO nanoparçacıkları, pişme sistemini olumlu yönde etkilemektedir. Bu şekilde, mikro boyutlu ticari ZnO aktivatörü içeren karışımlara kıyasla kauçuk matrisindeki ZnO miktarının %40'a kadar azaltılması mümkündür (Przybyszewska ve diğ., 2009). Bieliński ve diğ., SBR bazlı karışımlarda farklı morfolojilere sahip toz formdaki ZnO nanoparçacıkları kullanmışlardır. Sonuçlar, nano ZnO aktivatör parçacıklarının morfolojisinin, pişme için aktivasyon enerjisini, çapraz bağ yoğunluğunu ve kauçuk vulkanizatlarının mekanik özelliklerini etkilediğini ortaya koymuştur. "Karnabahar" şeklindeki taban üzerinde düz uçlu ve çubuk benzeri parçacıklardan oluşan hibrit morfolojiye sahip olan ZnO, pişme sırasında polimer matrisindeki çinko ile daha iyi etkileşim sağlar ve geleneksel ZnO ile değiştirildiğinde etkili bir pişme sistemi sunar (Bieliński ve diğ., 2021). Heideman ve diğ., stiren-butadien kauçuğu (SSBR) bazlı karışımların vulkanizasyon sistemlerinde geleneksel ZnO'yu yerine koymak amacıyla alternatif metal oksitler, çeşitli çinko kompleksleri ve yeni bir aktivatörü incelemişlerdir. Kalsiyum oksit (CaO) ve magnezyum oksit (MgO) kullanımını, vulkanizasyon sisteminde pişme hızına olan olumlu etkileri nedeniyle ZnO'ya iyi alternatifler olabileceğini

göstermiştir. Öte yandan, çinko-m gliserolatının ZnO'ya alternatif olarak kullanılması da mümkündür, çünkü pişme özellikleri üzerinde olumsuz bir etkisi yoktur. Çeşitli metal oksitler ve çinko komplekslerinin yanı sıra, yüzeyine  $Zn^{+2}$  iyonları yüklenmiş kil malzemesi de çalışmada incelenmiş ve sonuçlara dayanarak, bu yeni aktivatörün çinko seviyelerini azaltmak için yeni bir yol sunduğu ve çevresel etkilerini en aza indirmeye yardımcı olduğu sonucuna varılmıştır (Heideman ve diğ., 2006). Alam ve diğ., doğal kauçuğun vulkanizasyonunda çinko oksit yerine çevresel tehlikesini azaltacak bir alternatif pişme aktivatörü belirlemek amacıyla, magnezyum oksit varlığında çinko bazlı olmayan çapraz bağa hızlandırıcıları arasındaki etkileşimleri tanımlamışlardır. Deneyle bulguları, mekanik özelliklerde önemli bir bozulma olmadan tamamen çinko oksit içermeyen kauçuk vulkanizasyonunun mümkün olduğunu göstermiştir. Ayrıca, magnezyum oksit varlığında yapılan pişme, çinko oksit bazlı aktivatör içeren vulkanizasyonla kıyaslandığında, yaklaşık beş kat daha hızlı gerçekleşmektedir (Alam ve diğ., 2022). Bunsanong ve diğ., adipik asit dihidrazid (ADH) varlığında prevulkanize edilmiş modifiye NR lateksi (NR-g-PVBC) kullanarak, hızlandırıcı içermeyen ve çinkosuz bir sistemle NR'nin pişmesi için alternatif bir yöntem araştırmışlardır. Sonuçlar, ADH içeren NR-g-PVBC filmlerinin, ADH içermeyenlere kıyasla önemli ölçüde daha yüksek gerilme dayanımına sahip olduğunu göstermiştir. Ayrıca, ADH içeren filmler, ADH içermeyen filmlere göre kauçuk plateau bölgesinde daha yüksek depolama modülü ( $E'$ ) göstermiştir. Bu bulgular, filmlere ADH eklenmesinin bir çapraz bağ reaksiyonuna yol açtığını desteklemektedir. Sonuç olarak, bu çalışma, NR partiküllerine polivinilbenzenil klorür (PVBC) graflanarak yeni bir tür prevulkanize lateksin hazırlanabileceğini ve bu yeni sistemin geleneksel sisteme göre daha çevre dostu bir sistem olarak kabul edildiğini göstermektedir (Bunsanong ve diğ., 2024). Çevresel endişeler nedeniyle kauçuk karışımlarında ZnO kullanımını azaltmanın bir diğer yaklaşımı, ZnO'yu monolitik bir malzeme olarak kullanmak yerine bir destek malzemesi kullanmaktır. Bu amaçla literatürde kullanılan destek malzemeleri arasında  $CaCO_3$  (Kalsiyum Karbonat) (Thaptong ve diğ., 2019; Vatansever ve Polat, 2010), silika (Kumbalaparambil ve diğ., 2023) ve selüloz (Boopasiri ve diğ. 2021) yer almaktadır. Thaptong ve ark., SBR bazlı lastik sırt karışımında, ZnO'nun  $CaCO_3$  çekirdeği üzerine kaplandığı bir kompozit ZnO malzemesi kullanmışlardır (Thaptong ve diğ., 2019). Deneme karışımlarının pişme ve mekanik özellikleri incelenmiş ve aktif ZnO kullanılarak

hazırlanan kontrol karışımı ile karşılaştırılmıştır. Karışımların pişme özelliklerinde önemli bir değişiklik gözlemlenmemiştir, ancak kompozit malzemeler, optimum pişme süresini biraz kısaltmış ve pişme hızı indeksini artırmıştır.  $\text{CaCO}_3$  çekirdek malzemesi, Vatansver ve Polat tarafından da SBR bazlı bir kauçuk karışımında kullanılmıştır (Vatansver ve Polat, 2010). Deneme karışımlarının yaşlanma özellikleri incelenmiş ve aktif ZnO kullanılarak hazırlanan kontrol karışımı ile karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, daha düşük ZnO tüketimi ile benzer pişme, mekanik ve yaşlanma özelliklerinin elde edilebileceği sonucuna varılmıştır. Kumbalaparambil ve ark. tarafından yapılan bir çalışmada ise ana odak, NR/SBR bazlı karışımda ZnO ile bağlanmış silika kullanımı olmuştur. ZnO ile bağlanmış silika parçacıklarının in-situ oluşumu karıştırma sırasında sağlanmıştır. Kovalent bağlar (Si-O-Zn) sağlamak için aktif, nano, oktilamin modifiye ve geleneksel ZnO çeşitleri kullanılmıştır. Modifiye ZnO içeren karışımlar dışında, bu karışımların diğerleri, konvansiyonel ZnO içeren kontrol karışımı ile benzer kütleme özellikleri göstermiştir. En iyi mekanik özellikler, aktif ZnO içeren deneme karışımında elde edilmiştir (Kumbalaparambil ve diğ., 2023). Boopasiri ve diğ. ise, ZnO'yu mikrokristalin selüloz (MCC) yüzeyine ultrason destekli hidrotermal bir işleme yerleştirerek üretilen yeni bir ZnO türünü kullanmışlardır. Deneme karışımları, NR bazlı bir reçete kullanılarak hazırlanmış ve pişme ile mekanik özellikler, geleneksel ZnO kullanılan kontrol karışımları ile karşılaştırılmıştır. Deneme karışımları, kontrol karışımlarına kıyasla daha yüksek t90 değerleri göstermiştir. Mekanik özelliklerde (gerilme dayanımı, kopmada uzama, modül, sertlik) önemli bir fark gözlemlenmemekle birlikte, deneme malzemesi daha düşük sıkıştırma geri dönüşümü (compression set) sağlamıştır. Deneme ZnO malzemesi kullanılarak daha yüksek çapraz bağ yoğunluğu elde edilmiştir. (Boopasiri ve diğ., 2021).

Bu tez çalışmasında, daha önce kompozit ZnO aktivatörleri ile incelenmemiş olan SSBR/HVBR (İng. High Vinyl Butadiene Rubber) bazlı sırt karışımlarının, NR bazlı kuşak kaplama karışımlarının ve NR/BR bazlı yanak karışımlarının pişme fiziksel ve mekanik özellikleri, ticari aktivatörler (geleneksel ZnO ve aktif ZnO) içeren kontrol karışımları ile karşılaştırılmak üzere incelenmiştir. Kompozit ZnO malzemeleri, bir  $\text{CaCO}_3$  çekirdek malzemenin yüzeyine farklı miktarlarda ZnO'nun kaplanmasıyla hazırlanmıştır. Çalışmanın ana amacı, geleneksel malzemeler yerine kompozit ZnO kullanarak, kauçuk matrisindeki ZnO miktarını düşürme olasılığını araştırmak, bunun

yanında karışımın performansından herhangi bir ödün vermeden çevresel ve ekonomik kazanımlar sağlamaktır.



## 5. MALZEME VE YÖNTEM

Bu tez çalışması Brisa Bridgestone Sabancı Lastik San. Tic. A.Ş. tarafından desteklenmiş olup, yapılan testler Ar-Ge laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın amacı, geleneksel aktivatörler yerine kompozit ZnO malzemeleri kullanarak kauçuk karışımlarında kullanılan ZnO miktarının azaltılma olasılığını araştırmaktır.

### 5.1. Malzeme

Çalışmalarda Tez çalışmasında kullanılan kauçuk karışımları, üç farklı reçete için, Brisa Ar-Ge laboratuvarlarında hazırlanmış ve test edilmiştir. Çevreci kompozit ZnO aktivatörler kullanılarak hazırlanan deneme karışımları, ticari aktivatörlerle hazırlanan kontrol karışımları ile pişme (İng. cure, vulcanization), mekanik ve fiziksel özellikler açısından karşılaştırılmıştır. Çalışmanın temel amacı, çevresel ve ekonomik kazanımlar elde etmek için, araç lastiğinde kullanılan karışımlarda ticari malzemelerin yerine, performans kaybı olmadan, kompozit malzemelerin kullanım olasılığının araştırılmasıdır.

### 5.2. Kompozit ZnO Malzeme Tanıtımı ve Yapısal Karakterizasyonu

Tez çalışmasında ticari (geleneksel ve aktif ZnO) ve kompozit ZnO olmak üzere iki farklı tipte aktivatör kullanılmıştır. Kullanılan malzemelerin tezdeki kodlaması ve yapıları Tablo 5.1’de verilmiştir.





Geleneksel ZnO (WS-ZnO), ZnO üretiminde yaygın olarak kullanılan ve temelde iki aşamadan oluşan Fransız prosesi ile üretilmiştir. İlk aşamada, çinko sülfür (ZnS) cevheri sülfürik asit ( $H_2SO_4$ ) ile işlenerek çinko sülfat ( $ZnSO_4$ ) çözeltisi elde edilir. İkinci aşamada, bu çözelti yüksek sıcaklıklara (800-1000 °C) ısıtılır ve bu işlem sonucu ZnO açığa çıkar. Fransız prosesi ile elde edilen ZnO, yüksek saflığa (> %99) ancak 3 m<sup>2</sup>/g ile 5 m<sup>2</sup>/g aralığında düşük spesifik yüzey alanına (BET, Brunauer, Emmett, Teller) sahiptir. Tipik partikül boyutu işlem koşullarına bağlı olarak 30-2000 nm arasındadır (Kumar ve diğ., 2014, Rai ve Bajpai, 2020).

Aktif ZnO (Ac-ZnO) üretiminde kullanılan Amerikan prosesi, Fransız prosesine benzemekle birlikte, bazı önemli farklılıklar içerir. Proses üç aşamada gerçekleştirilir ve ilk aşaması Fransız prosesi ile aynıdır. İkinci aşamada elde edilen  $ZnSO_4$  çözeltisi

elektrolitik olarak ayrıştırılır ve çinko metali elde edilir. Üçüncü ve son aşamada ise metalin 700-1000 °C arası sıcaklıklarda oksitlenmesi ile ZnO üretimi gerçekleştirilir. Amerika prosesi, Fransız prosesine göre daha düşük saflıkta (< %99) ZnO eldesi sağlar. Ancak üretilen ZnO, daha yüksek spesifik yüzey alanına (>40 m<sup>2</sup>/g) ve daha küçük partikül boyutuna (1-100 nm) sahiptir (Patra ve diğ., 2020).

Global Chemical firmasından tedarik edilen kompozit ZnO malzemeler, yaş metot kullanılarak, çekirdek CaCO<sub>3</sub> partikülleri (50-200 nm) üzerine ZnO partiküllerinin (20-40 nm) kaplanmasıyla üretilmiştir. Malzemelerin ZnO:CaCO<sub>3</sub> oranları 40:60 (C-ZnO<sub>40:60</sub>), 60:40 (C-ZnO<sub>60:40</sub>) ve 90:10 (C-ZnO<sub>90:10</sub>) olarak seçilmiştir. ZnO malzemesinin aktivasyon kabiliyetini etkileyen spesifik yüzey alanı (BET, Brunauer, Emmett, Teller), ISO 18852 metodu kullanılarak, Micromeritics Gemini VII model yüzey alanı analizörü ile belirlenmiştir. Ayrıca malzemelerin ZnO içeriği ISO 9298:2017 metodu kullanılarak yaş kimya ile bulunmuştur.

Tablo 5.1. Kullanılan ZnO malzemelerin kodlanması ve yapıları

Kod	Malzeme	Yapı
WS-ZnO	Geleneksel ZnO	
Ac-ZnO	Aktif ZnO	
C-ZnO <sub>40:60</sub>	Kompozit ZnO	
C-ZnO <sub>60:40</sub>	Kompozit ZnO	
C-ZnO <sub>90:10</sub>	Kompozit ZnO	

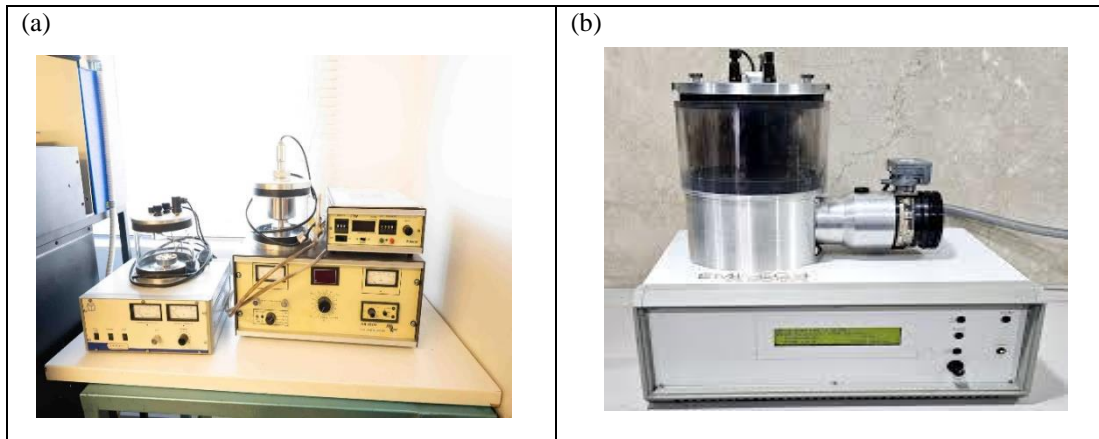
ZnO malzemelerin, suda çözünen madde miktarı (ISO 787-8), uçucu madde miktarı (ISO 787-2), elek kalıntı yüzdesi (ISO 787-7) ve asidite (ISO 787-4) gibi karışımın işlenebilirliğine ve performansına etki eden diğer özellikleri de belirlenmiştir. Kauçuk karışımlarında oksidasyon reaksiyonları metal iyonları nedeniyle hızlandığı için, elementel analizler yapılarak ZnO içerisindeki safsızlıklar ölçülmüştür. Bu amaçla Dalga Boyu Dağılım X-ışını Floresan Spektrometresi (WDXRF, Bruker S8 Tiger) kullanılmış

ve Bruker eğitim notları esas alınarak yarı nicel analiz yapılmıştır. Araç lastiği regülasyonlarına göre lastik hammaddelerinde CdO miktarının 20 ppm ve PbO miktarının 300 ppm altında olması gerektiği için, ZnO malzemelerinde İndüktif Eşleşmiş Plazma-Optik Emisyon Spektrometresi (ICP-OES, 3.1 Perkin Elmer) kullanılarak nicel analiz ASTM-D8371-20 yöntemiyle yapılmıştır.

Çalışmada kullanılan ZnO malzemelerinin morfolojileri ve elementel dağılımları Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM, Tescan VEGA3) ve Enerji Dağılım X-ışını Spektrometresi (EDS, EDAX Element) kullanılarak incelenmiştir (Şekil 5.1). Numuneler karbon tırnaklara (İng. carbon tab) yayılarak, yüzeyleri morfoloji çalışmaları için altın (Bio-Rad E5150) ile, EDS analizi için karbon (Emitec K950X) ile kaplanmıştır (Şekil 5.2).



Şekil 5.1. Tescan VEGA3 Taramalı Elektron Mikroskobu



Şekil 5.2. (a) Bio-Rad E5150 Sputter Cihazı, (b) Emitec K950X Karbon Kaplama Cihazı

### 5.3. Diğer Hammaddeler ve Özellikleri

Karışım reçetelerinde kullanılan hammadde bilgileri Tablo 5.2’de verilmiştir. Kauçuk-metal yapışma sağlayıcı olarak kullanılan, ağırlık % 9,5 oranında kobalt içeren kobalt stearat malzemesi ( $C_{36}H_{70}CoO_4$ ) EGEBond 1893 ticari adı ile Ege Kimya firmasından ve resorsinol formaldehit silika malzemesi COFILL 11 ticari ismi ile Evonik firmasından tedarik edilmiştir.

Kauçuğun camsı özelliğini kaybedip viskoz özellikler kazanmaya başladığı camsı geçiş sıcaklığı (Tg), karışımların karda çekiş (İng. snow traction), ıslak tutuş (İng. wet traction), aşınma direnci (İng. rolling resistance), histerezis kaybı (İng. hysteresis loss) gibi birçok önemli fiziksel özelliğini etkiler. Kauçuğun mikroyapısı camsı geçiş sıcaklığını etkilediği için bir kopolimer olan SSBR hammaddesinde mikroyapı analizi (ISO 21561-2) analizi yapılmış olup stiren ve vinil oranları tespit edilmiştir. Üretim verimliliği ve enerji maliyetini etkileyen kauçuk viskozite değerleri ise ASTM D1646 standartına uygun olarak belirlenmiştir. Doğal kauçuğun pişme ve proses sırasındaki davranışını etkileyen kir yüzdesi ve ısıl oksidasyon direncini tanımlayan plastisite endeksi (PRI, Plasticity Retention Index) sırasıyla ISO 249:2016 ve ISO 2930:2017 standartlarına uygun olarak tespit edilmiştir.

Karbon karası, elastomer esaslı kompozit sistemlerde yaygın olarak kullanılan ve kauçuk matris ile olan etkileşimi sayesinde mekanik özellikleri önemli ölçüde iyileştiren bir takviye malzemesidir. Karbon karasının yüzey alanı, kauçuk içerisindeki dispersiyonu, matrisle olan bağlanma derecesi ve genel takviye verimliliği üzerinde doğrudan etkili olup, özellikle çekme dayanımı, sertlik, aşınma direnci ve dinamik mekanik özellikler gibi performans parametrelerini belirleyen temel bir özelliktir. Bu bağlamda, karbon karasının özgül yüzey alanının doğru bir şekilde ölçülmesi, karışım tasarımının optimizasyonu ve istenilen nihai ürün özelliklerinin elde edilmesi açısından kritik öneme sahiptir. Bu çalışmada, karbon karasının yüzey alanı tayini, Amerikan Test ve Malzeme Derneği (ASTM) tarafından belirlenen D6556-21 standardına uygun olarak, Brunauer–Emmett–Teller (BET) yüzey alanı analiz yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. BET yöntemi, gaz adsorpsiyonuna dayalı olarak çalışmakta olup, özellikle gözenekli ve yüksek yüzey alanına sahip malzemelerin karakterizasyonunda yaygın şekilde kullanılmaktadır. Ölçüm sonuçları, karbon karasının morfolojik yapısı ile kauçuk matris arasındaki etkileşimi

anlamlandırmak ve reçete dizaynına yön vermek amacıyla değerlendirilmiştir. Yağ ve vaks hammaddeleri için viskozite testleri ASTM D445-21 kullanılarak, kimyasallar için erime noktası değerleri, kül içerikleri ve nem içerikleri sırasıyla ASTM D1519-88, ASTM D1506-85 ve ASTM D6980-17 kullanılarak belirlenmiştir. Vakslar için donma noktası tayini ASTM D938-92 kullanılarak raporlanmıştır.

Tablo 5.2. Karışım reçetelerinde ZnO dışında kullanılan diğer hammaddeler ve özellikleri

Hammadde	Fonksiyonu	Özellik*
SSBR	Polimer	Molekül ağırlığı (100 °C'de): 188 kg/mol ML (1+4) Mooney viskozite: 75 MU Mikroyapı analizi: % 35 bağlı stiren, % 26,4 vinil
HVBR	Polimer	ML (1+4) Mooney viskozite (100 °C'de): 62 MU
NR (SIR 10)	Polimer	Kir yüzdesi: Maksimum % 0,10 PRI: Minimum 50
NR (SIR 20)	Polimer	Kir yüzdesi: Maksimum % 0,20 PRI: Minimum 40
C/B (N234)	Takviye dolgusu	BET yüzey alanı: 112 m <sup>2</sup> /g
C/B (N330)	Takviye dolgusu	BET yüzey alanı: 75 m <sup>2</sup> /g
C/B (N660)	Takviye dolgusu	BET yüzey alanı: 34 m <sup>2</sup> /g
Aromatik yağ	Yumuşatıcı	Viskozite (20 °C'de): 12,9 MPa·s
Naftanik yağ	Yumuşatıcı	Viskozite (40 °C'de): 700 MPa·s
Stearik asit	Aktivatör	Erime noktası: 54 °C
Mikrokristalin vaks	Antiozonant	Donma noktası: 66 °C Viskozite (100 °C'de): 6,84 mm <sup>2</sup> /s
6PPD	Antioksidan & Antiozonant	Erime noktası: 46,0 °C
TBBS	Antioksidan ve Antiozonant	Erime noktası: 109,5 °C
DPG	Hızlandırıcı	Erime noktası: 146,1 °C
DCBS	Hızlandırıcı	Erime noktası: 101,0 °C
Kükürt	Pişirici	Nem içeriği: % 0,077
Çözünmez kükürt	Pişirici	% 20 yağlı, % 80 çözünmez kükürt
Kobalt stearat	Yapışma takviyesi	Kobalt içeriği: % 9,5
Cofill 11	Yapışma takviyesi	% 50 resorsinol ve % 50 silika karışımı
HMT80	Reçine	Kül içeriği: % 26 Nem oranı: Maksimum % 4,0

\* Malzemelere uygulanan test sonuçları

#### 5.4. Kauçuk Karışım Reçeteleri ve Karışımların Hazırlanması

Çalışmada kullanılan üç farklı reçete (araç lastiği için sırt, kuşak kaplama ve yanak karışımları) literatür bilgileri referans alınarak oluşturulmuştur (Ciullo, 2019). Reçetelerde kullanılan kodlama sistematığı Tablo 5.3'te verilmiştir.

Tablo 5.3. Karışım reçetelerinin kodlama sistematığı

Karışım Kodu	Açıklama
SK1	WS-ZnO ile hazırlanan kontrol sırt karışımı
SK2	Ac-ZnO ile hazırlanan kontrol sırt karışımı
SD4	C-ZnO <sub>40:60</sub> ile hazırlanan deneme sırt karışımı
SD6	C-ZnO <sub>60:40</sub> ile hazırlanan deneme sırt karışımı
SD9	C-ZnO <sub>90:10</sub> ile hazırlanan deneme sırt karışımı
KK1	WS-ZnO ile hazırlanan kontrol kuşak kaplama karışımı
KK2	Ac-ZnO ile hazırlanan kontrol kuşak kaplama karışımı
KD4	C-ZnO <sub>40:60</sub> ile hazırlanan deneme kuşak kaplama karışımı
KD6	C-ZnO <sub>60:40</sub> ile hazırlanan deneme kuşak kaplama karışımı
KD9	C-ZnO <sub>90:10</sub> ile hazırlanan deneme kuşak kaplama karışımı
YK1	WS-ZnO ile hazırlanan kontrol yanak karışımı
YK2	Ac-ZnO ile hazırlanan kontrol yanak karışımı
YD4	C-ZnO <sub>40:60</sub> ile hazırlanan deneme yanak karışımı
YD6	C-ZnO <sub>60:40</sub> ile hazırlanan deneme yanak karışımı
YD9	C-ZnO <sub>90:10</sub> ile hazırlanan deneme yanak karışımı

Tablo 5.4–5.9'da sunulan formülasyonlara göre hazırlanan kauçuk karışımları, üretim sürecine uygun şekilde iki aşamalı olarak tasarlanmıştır: ana karışım (İng. master batch) ve son karışım (İng. final batch). Her bir reçetede yer alan bileşenlerin miktarları, kauçuk endüstrisinde yaygın olarak kullanılan ve birim kauçuk başına ifade edilen "parts per hundred rubber" (phr) birimiyle verilmiştir. Tüm karışımlar, laboratuvar ölçeğinde üretim koşullarına uygun olarak, 1,2 L kapasiteli laboratuvar tipi Banbury mikser (Farrell BR1600) kullanılarak ve mikserin hacimsel kapasitesi dikkate alınarak toplam 1200 gram olacak şekilde hazırlanmıştır (Şekil 5.3) (URL-44).

Karıştırma işlemi, kauçuk karışımlarının homojenliği ve istenen fiziksel-mekanik özellikleri kazanması açısından kritik bir adımdır. Bu doğrultuda, ana ve son karışım adımlarında uygulanacak karıştırma süreleri, rotor hızı, sıcaklık profili ve bileşenlerin mikser içerisine katılım sıraları gibi parametreler; ön denemeler ve literatürdeki

uygulamalar doğrultusunda optimize edilmiştir. Karıştırma işlemini takiben, ham karışımlar iki merdaneli vals (mil) sistemi kullanılarak milleden işleme tabi tutulmuş, böylece malzemenin soğuması ve şekillendirmeye uygun hale gelmesi sağlanmıştır. Bu işlem sırasında da mikser çıkış sıcaklığı, malzeme plastisitesi ve viskozite değerleri göz önünde bulundurularak en uygun proses parametreleri belirlenmiştir.

Tablo 5.4. Sırt karışım reçetesi (ana karışım)

Hammadde	Karışım kodları				
	SK1	SK2	SD4	SD6	SD9
SSBR	70,0	70,0	70,0	70,0	70,0
HVBR	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0
N234	55,0	55,0	55,0	55,0	55,0
Aromatik yağ	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0
WS-ZnO	2,5	-	-	-	-
Ac-ZnO	-	2,5	-	-	-
C-ZnO <sub>40:60</sub>	-	-	2,5	-	-
C-ZnO <sub>60:40</sub>	-	-	-	2,5	-
C-ZnO <sub>90:10</sub>	-	-	-	-	2,5
Stearik asit	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
Mikrokristalin vaks	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Kısım toplam	179,5	179,5	179,5	179,5	179,5
Ağırlık toplam	1200	1200	1200	1200	1200

Tablo 5.5. Sırt karışım reçetesi (son karışım)

Hammadde	Karışım kodları				
	SK1	SK2	SD4	SD6	SD9
Ana karışım	179,5	179,5	179,5	179,5	179,5
6PPD	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
DPG	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
TBBS	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
WS-ZnO	0,5	-	-	-	-
Ac-ZnO	-	0,5	-	-	-
C-ZnO <sub>40:60</sub>	-	-	0,5	-	-
C-ZnO <sub>60:40</sub>	-	-	-	0,5	-
C-ZnO <sub>90:10</sub>	-	-	-	-	0,5
Kükürt	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8
Kısım toplam	184,2	184,2	184,2	184,2	184,2
Ağırlık toplam	1200	1200	1200	1200	1200

Tablo 5.6. Kuşak kaplama karışım reçetesi (ana karışım)

Hammadde	Karışım kodları				
	KK1	KK2	KD4	KD6	KD9
SIR10	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
N330	55,0	55,0	55,0	55,0	55,0
WS-ZnO	6,0	-	-	-	-
Ac-ZnO	-	6,0	-	-	-
C-ZnO <sub>40:60</sub>	-	-	6,0	-	-
C-ZnO <sub>60:40</sub>	-	-	-	6,0	-
C-ZnO <sub>90:10</sub>	-	-	-	-	6,0
Stearik asit	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Naftanik yağ	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
Cofill 11	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Kobalt stearat	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Kısım toplam	179,5	179,5	179,5	179,5	179,5
Ağırlık toplam	1200	1200	1200	1200	1200

Tablo 5.7. Kuşak kaplama karışım reçetesi (son karışım)

Hammadde	Karışım kodları				
	KK1	KK2	KD4	KD6	KD9
Ana karışım	172,0	172,0	172,0	172,0	172,0
6PPD	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
DCBS	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
WS-ZnO	1,0	-	-	-	-
Ac-ZnO	-	1,0	-	-	-
C-ZnO <sub>40:60</sub>	-	-	1,0	-	-
C-ZnO <sub>60:40</sub>	-	-	-	1,0	-
C-ZnO <sub>90:10</sub>	-	-	-	-	1,0
HMT 80	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Çözünmez kükürt	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
Kısım toplam	182,7	182,7	182,7	182,7	182,7
Ağırlık toplam	1200	1200	1200	1200	1200

Tablo 5.8. Yanak karışım reçetesi (ana karışım)

Hammadde	Karışım kodları				
	YK1	YK 2	YD4	YD6	YD9
SIR20	55,0	55,0	55,0	55,0	55,0
CBR	45,0	45,0	45,0	45,0	45,0
N660	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0
N339	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0
Naftanik yağ	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0
WS-ZnO	2,5	-	-	-	-
Ac-ZnO	-	2,5	-	-	-

Tablo 5.8. (Devam) Yanak karışım reçetesi (ana karışım)

Hammadde	Karışım kodları				
	YK1	YK 2	YD4	YD6	YD9
C-ZnO <sub>40:60</sub>	-	-	2,5	-	-
C-ZnO <sub>60:40</sub>	-	-	-	2,5	-
C-ZnO <sub>90:10</sub>	-	-	-	-	2,5
Stearik asit	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
Mikrokristalin vaks	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0
Kısım toplam	165,0	165,0	165,0	165,0	165,0
Ağırlık toplam	1200	1200	1200	1200	1200

Tablo 5.9. Yanak karışım reçetesi (son karışım)

Hammadde	Karışım kodları				
	YK1	YK 2	YD4	YD6	YD9
Ana karışım	165,0	165,0	165,0	165,0	165,0
6PPD	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
TBBS	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Çözünmez kükürt	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
WS-ZnO	0,5	-	-	-	-
Ac-ZnO	-	0,5	-	-	-
C-ZnO <sub>40:60</sub>	-	-	0,5	-	-
C-ZnO <sub>60:40</sub>	-	-	-	0,5	-
C-ZnO <sub>90:10</sub>	-	-	-	-	0,5
Kısım toplam	170,5	170,5	170,5	170,5	170,5
Ağırlık toplam	1200	1200	1200	1200	1200



Şekil 5.3. Farrell BR1600 Banbury mikser (URL-44)

Şekil 5.4-5.6'da geleneksel ZnO katkılı karışımların mikser karıştırma aşamaları cihaz çıktısı olarak verilmiştir. Diğer kontrol ve deneme karışımları, her bir reçete için aynı şekilde hazırlanmıştır. Örnek olarak Şekil 5.4a'da verilen sırt karışımı (SK1) için ana karışım, (i) kauçukların yüklenmesi, (ii) mastikasyon, (iii) dolgu malzemesi ve diğer kimyasalların yüklenmesi, (iv) karıştırma, (v) temizlik, (vi) tekrar karıştırma ve (vii) boşaltma olmak üzere 7 aşamada hazırlanmıştır. Birinci adımda yüklenen SSBR/HVBR kauçukların mastikasyonu 100,4 rpm rotor hızı kullanılarak 30 sn boyunca gerçekleştirilmiştir. Daha sonra karbon karası, stearik asit, ZnO malzemesinin bir kısmı (2,5 phr) ve vaks eklenerek, karıştırma işlemine 57 °C'de, 30 sn boyunca devam edilmiştir. Karışım boşaltılarak mikser haznesi görsel olarak kontrol edilmiştir (temizlik aşaması). Karışım tekrar yüklenerek karıştırma işlemine 110,1 rpm'de, 150 °C'de, 153 sn daha devam edilmiştir. Ana karışım 143 °C'de, toplam 370 sn karıştırma süresine ulaşıldığında boşaltılmıştır. Şekil 5.4b'de verilen SK1 son karışımı ise (i) ana karışımın ve kalan kimyasalların yüklenmesi, (ii) karıştırma ve (iii) boşaltma olmak üzere 3 aşamada hazırlanmıştır. Yükleme aşamasından sonra karıştırma işlemi 71,7 rpm'de, 105 °C'de, 142 sn'de yapılmıştır. Bu koşullarda 4 sn daha karıştırma işlemine devam edilerek 107 °C'de karışım boşaltılmıştır.

(a)

Step	Operator Instruction	Mode #	Step Time Sec	Mix Time Sec	Total Time Sec	Temp	Energy KWH	RPM	Ram Eff BAR	IRM %
1	KAUÇUKLARI YUKLE	1	11	0	11	59	0.01	100.9	0.00	0
2	MASTİKASYON	2	30	30	41	66	0.04	100.5	3.82	20
3	KARBON KARASI VE KİMYASAL YUKLE	1	28	30	69	57	0.05	101.3	0.00	20
4	RAM ASAGI KARİSTİRMAYA DEVAM	2	110	140	179	131	0.27	100.9	3.82	101
5	TEMİZLİK	1	12	140	151	118	0.26	110.1	0.00	101
6	KARİSTİRMAYA DEVAM	2	153	293	344	150	0.58	110.1	3.83	209
7	BOSALTMA	7	26	319	370	143	0.60	23.2	0.00	209

(b)

Step	Operator Instruction	Mode #	Step Time Sec	Mix Time Sec	Total Time Sec	Temp	Energy KWH	RPM	Ram Eff BAR	IRM %
1	ANAKARISIM VE KİMYASALLARI YUKLE	1	21	0	21	59	0.01	72.8	0.00	0
2	KARİSTİRMA	2	142	142	163	105	0.18	71.7	3.85	109
3	BOSALTMA	7	4	146	167	107	0.19	71.6	0.00	109

Şekil 5.4. WS-ZnO kontrol malzemesi içeren sırt karışımı için örnek mikser karıştırma koşulları (a) Ana karışım, (b) Son karışım

(a)

**FARRELL** TCU SP °C Brisa  
Sides 55 55  
Rotors 55 55  
Door 55 55

Batch 1 of 2  
Step Advance On **STEP**

Peak kw 10

Step 1	Operator Instruction	Mode #	Step Time Sec	Mix Time Sec	Total Time Sec	Temp	Energy KWH	RPM	Ram Eff BAR	IRM %
1	KAUCUKLARI YUKLE	1	13	0	13	54	0.01	80.2	0.00	0
2	MASTIKASYON	2	30	30	43	68	0.04	82.0	3.82	34
3	KARBON KARASI VE KIMYASAL YUKLE	1	13	30	56	55	0.05	81.8	0.00	34
4	RAM ASAGI KARISTIRMAYA DEVAM	2	110	140	166	121	0.24	81.8	3.84	132
5	TEMIZLIK	1	20	140	186	122	0.26	82.2	0.00	132
6	KARISTIRMAYA DEVAM	2	201	341	387	132	0.55	91.8	3.86	289
7	BOSALTMA	7	0	0	0	0	0.00	100.0	3.80	0

(b)

**FARRELL** TCU SP °C Brisa  
Sides 60 61  
Rotors 60 61  
Door 60 60

Batch 1 of 1  
Step Advance On **STEP**

Peak kw 6

Step 1	Operator Instruction	Mode #	Step Time Sec	Mix Time Sec	Total Time Sec	Temp	Energy KWH	RPM	Ram Eff BAR	IRM %
1	ANAKARISIM VE KIMYASALLARI YUKLE	1	29	0	29	50	0.02	70.5	0.00	0
2	KARISTIRMA	2	144	144	173	105	0.18	72.1	3.85	118
3	BOSALTMA	7	3	147	176	106	0.18	72.3	0.00	118

Şekil 5.5. WS-ZnO kontrol malzemesi içeren kuşak kaplama karışımı için örnek mikser karıştırma koşulları (a) Ana karışım, (b) Son karışım

(a)

**FARRELL** TCU SP °C Brisa  
Sides 55 56  
Rotors 55 55  
Door 55 55

Batch 1 of 1  
Step Advance On **STEP**

Peak kw 9

Step 1	Operator Instruction	Mode #	Step Time Sec	Mix Time Sec	Total Time Sec	Temp	Energy KWH	RPM	Ram Eff BAR	IRM %
1	KAUCUKLARI YUKLE	1	16	0	16	46	0.01	81.9	0.00	0
2	MASTIKASYON	2	30	30	46	63	0.04	81.6	3.57	23
3	KARBON KARASI VE KIMYASAL YUKLE	1	18	30	64	53	0.05	82.2	0.00	23
4	RAM ASAGI KARISTIRMAYA DEVAM	2	110	140	174	121	0.24	90.4	3.58	118
5	TEMIZLIK	1	9	140	183	122	0.25	90.4	0.00	118
6	KARISTIRMA	2	141	281	324	140	0.46	91.6	3.54	228
7	BOSALTMA	7	4	285	328	141	0.47	91.6	0.00	228

(b)

**FARRELL** Recipe YANAK SON TCU SP °C Brisa  
Product ID T405 Sides 60 61  
Batch 1 of 1 Rotors 60 61  
Door 60 60

12: 54: 40 09/08/2021

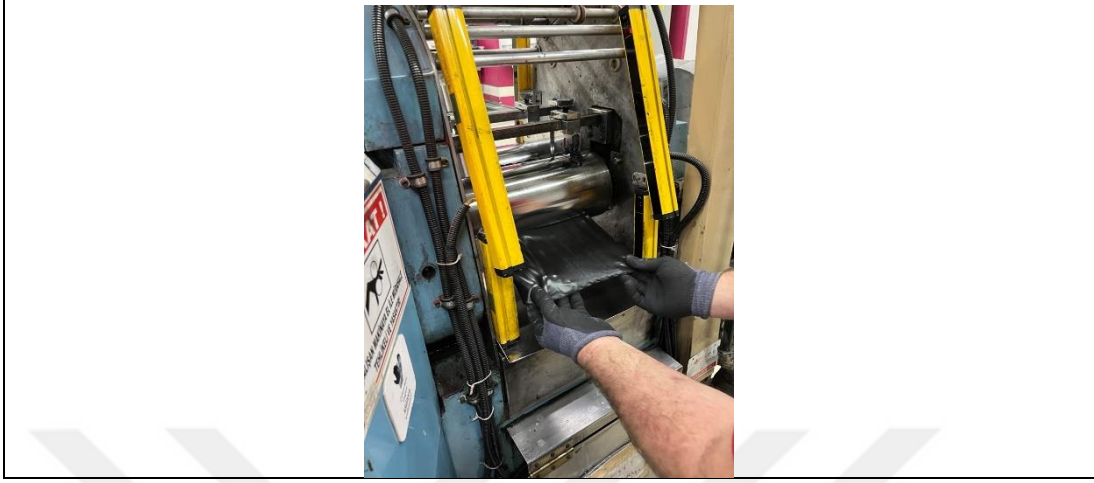
Peak kw 6

Step 1	Operator Instruction	Mode #	Step Time Sec	Mix Time Sec	Total Time Sec	Temp	Energy KWH	RPM	Ram Eff BAR	IRM %
1	ANAKARISIM VE KIMYASALLARI YUKLE	1	29	0	29	50	0.02	70.5	0.00	0
2	KARISTIRMA	2	144	144	173	105	0.18	72.1	3.85	118
3	BOSALTMA	7	3	147	176	106	0.18	72.3	0.00	118

Şekil 5.6. WS-ZnO kontrol malzemesi içeren yanak karışımı için örnek mikser karıştırma koşulları (a) Ana karışım, (b) Son karışım

Hazırlanan karışım, Farrell laboratuvar mili kullanılarak 70 °C'de 2,2 mm kalınlığa ulaşılan kadar millenir (Şekil 5.7). Millenmiş karışım oda sıcaklığında soğumaya

bırakılır. Karışım reçetelerinin her biri 1200 g olmak üzere üç parti (İng. batch) halinde hazırlanır ve tüm test verileri bu üç partinin ortalaması olarak raporlanır.



Şekil 5.7. Farrell laboratuvar mili ile milleme işlemi

Karıştırma ve milleme işlemlerinden sonra, Tablo 5.10'da yer alan farklı pişirme koşulları denenmiştir. Alpha Technologies marka MDR 2000 model hareketli kalıp reometresi (MDR, Moving Die Rheometer) kullanılarak pişirme testi uygulanmıştır. Bölüm 6.2'de tanımlanacak olan pişme eğrisi parametrelerine göre [ML, MH, (MH-ML), ts1, t90] uygun sıcaklık ve pişme süresi saptanmıştır. Bölüm 5.2'de paylaşılan çalışmalar sonucunda pişirme koşulları (sıcaklık x süre), sırt karışımları için 160 °C x 15 dk, kuşak kaplama karışımları için 160 °C x 16 dk ve yanak karışımları için 145 °C x 33 dk olarak seçilmiştir. Çekme testi numunelerinin hazırlanması aşamasında, numuneler 345 kN kuvvet altında (12,32 MPa basınca karşılık gelir) ve seçilen pişirme koşullarında Fontijne LPC029 laboratuvar presinde pişirilmiştir.

Tablo 5.10. Pişirme koşulları

Karışım Kodu	Pişirme koşulu 1*	Pişirme koşulu 2**	Pişirme koşulu 3**
SK1	177 °C x 10 dk	160 °C x 15 dk	160 °C x 22 dk
KK1	160 °C x 16 dk	160 °C x 20 dk	145 °C x 15 dk
YK1	145 °C x 33 dk	145 °C x 50 dk	160 °C x 10 dk

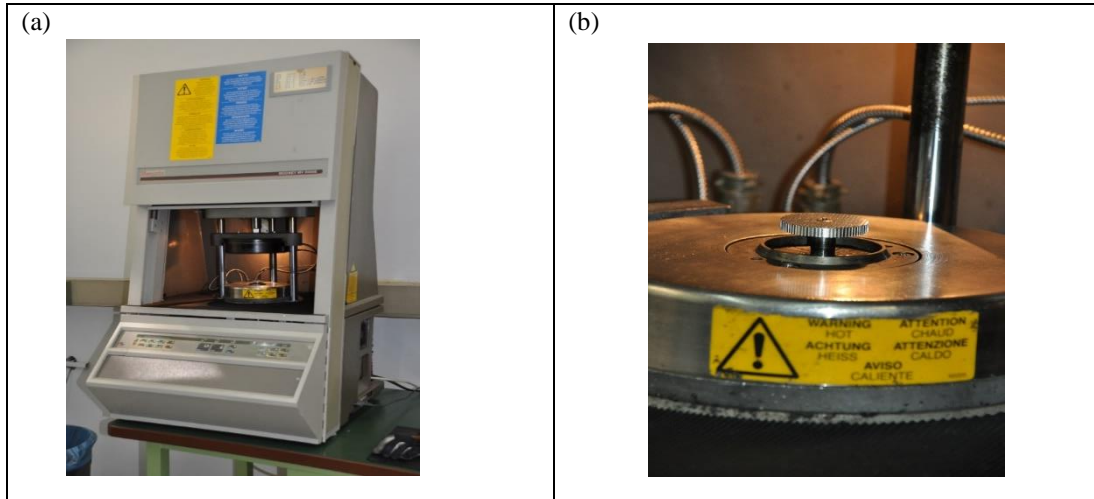
\* Pişirme koşulu 1: Literatürden alınan reçetede uygulanan koşul

\*\* Pişirme koşulu 2: Araç lastiği sektöründe ilgili karışımlar için kullanılan benzer koşullar

## 5.5. Kauçuk Karışımlarına Uygulanan Fiziksel ve Mekanik Testler

### 5.5.1. Pişirme Testleri

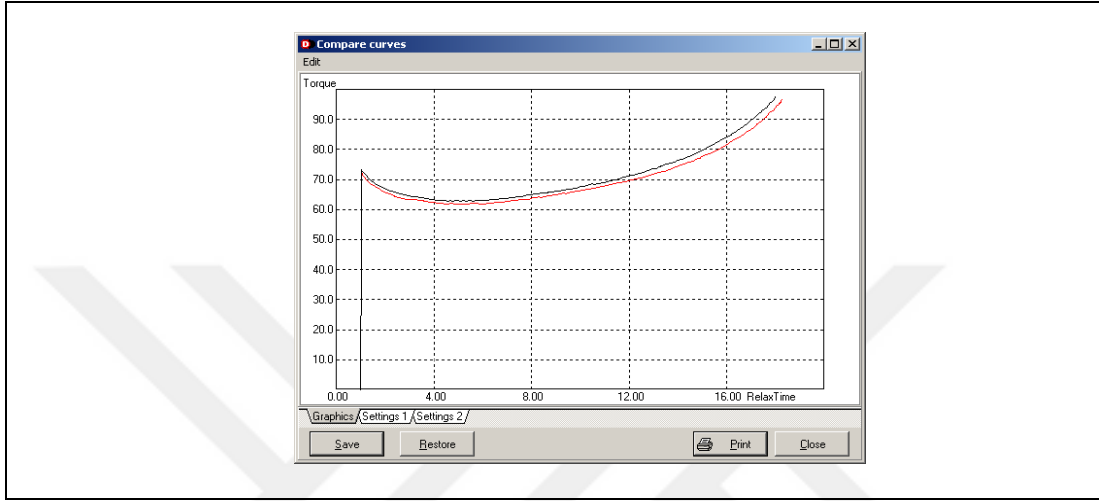
Mooney viskozimetre testleri, kauçuk karışımlarının viskozite özelliklerini belirlemek ve işlenebilirliği hakkında bilgi edinmek için, 25-200 °C sıcaklık değerleri aralığında ve 0,1-20 rpm rotor hızı aralığında test yapabilen Alpha Technologies MV 2000E Mooney viskozimetresi ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.8) (URL-45). Testler ASTM D1646 standardına uygun olarak 130 °C'de yürütülmüştür. Başlangıç viskozitesi (IV), minimum viskozite (MV) ve 1 dakikalık ön ısıtma süresinden sonra 4 dakikalık test süresindeki viskozite (ML (1+4)) değerleri Mooney birimi (MU) cinsinden raporlanmıştır, burada 1 MU 0,083 Nm'ye eşittir. Kritik süreler olarak kabul edilen t5 ve t35 değerleri ise MV'ye göre 5 MU ve 35 MU viskozite artışındaki sürelerle karşılık gelir. ML (1+4) değeri kauçuk karışımlarında proses edilebilirlik ile ilgili bilgi verirken t5 değeri kauçuk karışımlarında pişme başlangıcını verir ve bu sayede, ekstrüder ve kalender proseslerinin ne kadar süre içerisinde tamamlanması gerektiği bilgisi elde edilir. Şekil 5.9'da tipik bir Mooney cihaz çıktısı ve Şekil 5.10'da ise kritik viskozite ve süre değerlerini gösteren Mooney eğrisi verilmiştir.



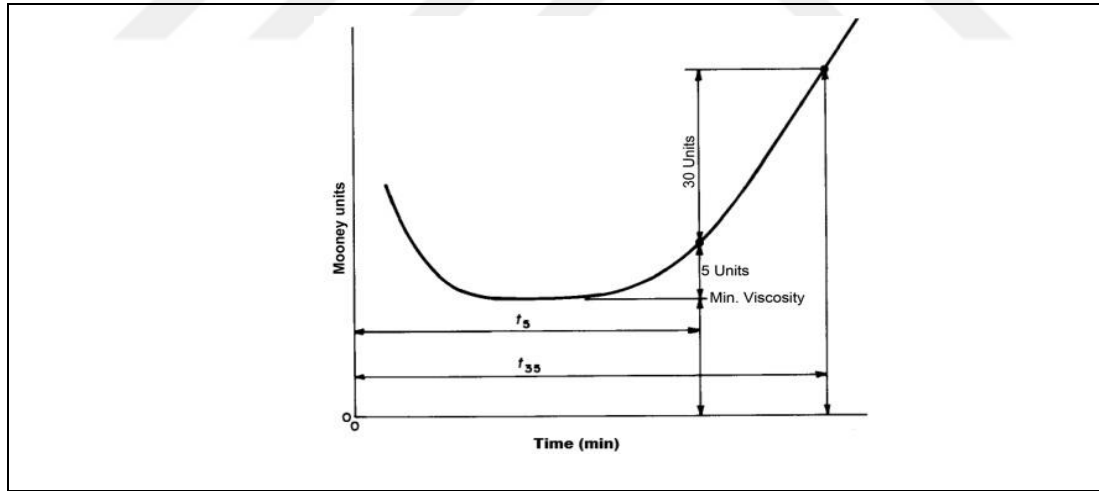
Şekil 5.8 (a) Alpha Technologies MV 2000E Mooney viskozimetre ve (b) rotor haznesi (URL-45)

Reometre testleri karışımın viskozitesi, pişme özellikleri ve saha performansı ile ilgili bilgi edinmek için uygulanmaktadır. Sabit gerinim ve frekansta, eş ısıt (İng. isothermal) koşullarda, karışımın pişme özelliklerini ölçer. Aynı zamanda pişme esnasında karışımın

faz dışı gerilme ile ölçülen elastik modül ( $S''$ ) ve kayıp tanjant ( $\tan \delta$ ) gibi dinamik özelliklerini de verir. Pişme özellikleri, ASTM D5289-19a standartına göre sabit gerilme ve frekansta eş ısı koşullarda, 25-200 °C ve 1.667 Hz'de çalışan Alpha Technologies MDR 2000 Hareketli Kalıp Reometresi kullanılarak test edilmiştir (Şekil 5.11) (URL-46). MDR testleri Bölüm 6.3'te belirlenen sıcaklık ve sürelerde yapılmıştır.



Şekil 5.9. Tipik bir Mooney cihaz çıktısı



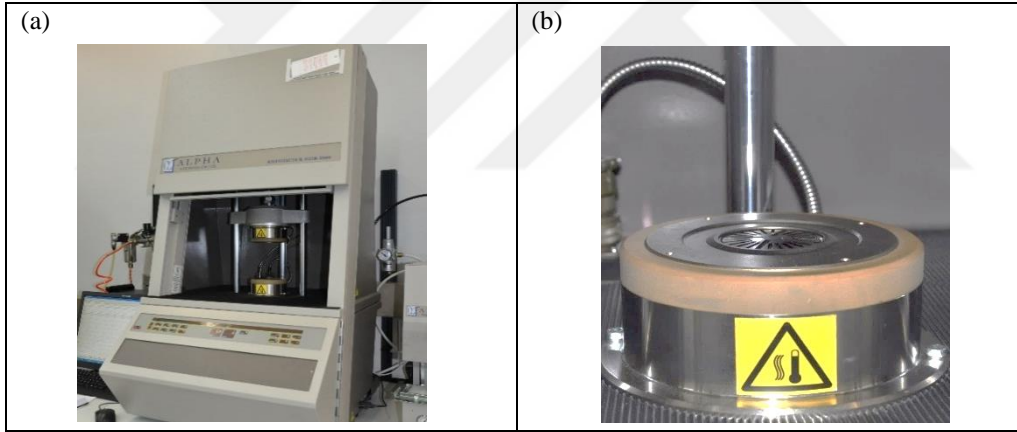
Şekil 5.10. Mooney eğrisi

Tipik bir cihaz çıktısı Şekil 5.12'de verilmiştir. Test sırasında örnek, basınç altında ısınırken, viskozitedeki azalmaya bağlı olarak tork azalır ve kaydedilen en düşük tork değeri minimum tork (ML) olarak belirlenir. Bu değer ham karışımın sertliğinin ve viskozitesinin bir ölçüsüdür. Pişme başladığında tork ( $S'$ ) süreyle orantılı olarak artar. Ulaşılan en yüksek tork değeri maksimum tork (MH) olarak kaydedilir ve karışımın

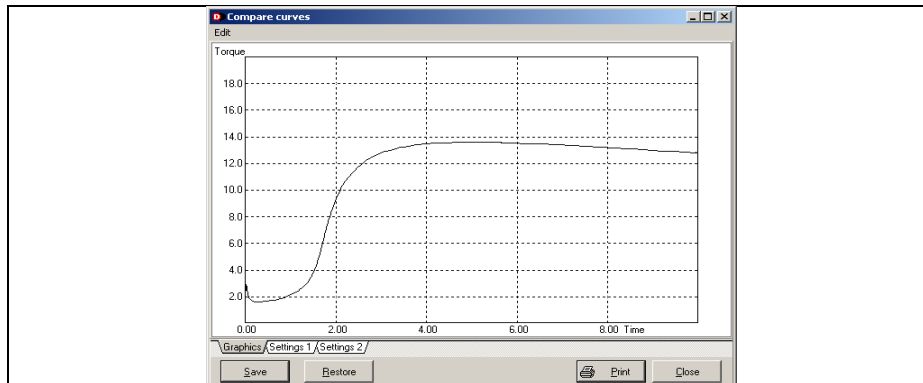
mekanik özellikleri ile ilgili bilgi verir. Pişme süreleri olan  $t_{10}$ ,  $t_{50}$  ve  $t_{90}$  sırasıyla, pişmenin %10, %50 ve %90'ının gerçekleştiği zamanları ifade eder,  $t_{90}$  aynı zamanda optimum pişme süresi olarak tanımlanır. Tork farkı (MH-ML), çapraz bağ yoğunluğunun derecesini temsil eder. Pişme hızı indeksi (CRI, Cure Rate Index),  $t_{90}$  ile yanma (İng. (ts2)) arasındaki farklılara dayanan pişme reaksiyon hızıdır ve Denklem (5.1)'de verilmiştir (Nor ve Othman, 2016).

$$CRI = \frac{100}{t_{90} - t_{s2}} \quad (5.1)$$

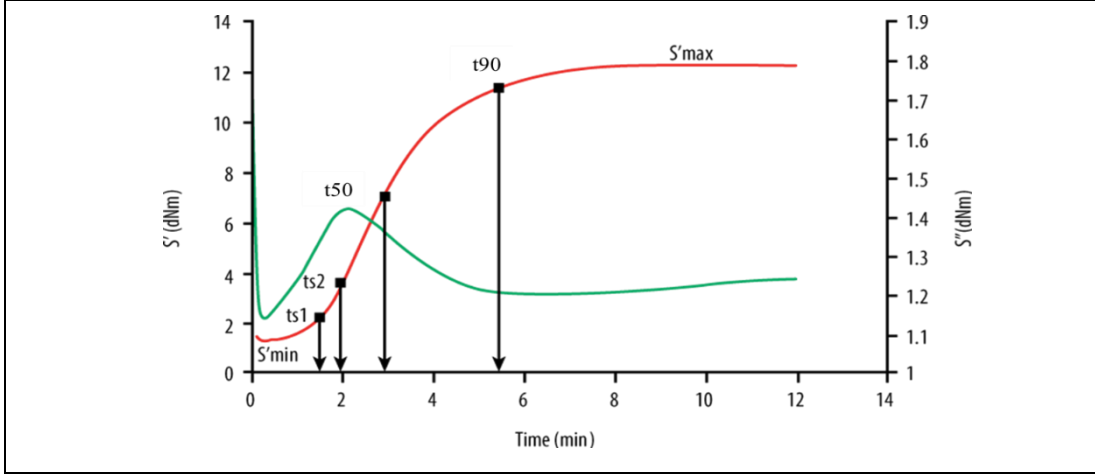
Pişme eğrisi, test edilen bir karışım için çapraz bağ oluşumunun genel kinetiği hakkında bilgi vermektedir. Tork değerlerinde düşüşün olması, geri dönüşe (İng. reversion) işaret etmektedir. Bazı durumlarda ise, uzun bir plato veya devam eden (İng. marching) pişme ortaya çıkabilir. Kritik değerleri gösteren pişirme eğrisi Şekil 5.13'te verilmektedir (URL-46).



Şekil 5.11 (a) Alpha Technologies MDR 2000 Hareketli Kalıp Reometresi, (b) titreşen alt kalıp (URL-46)



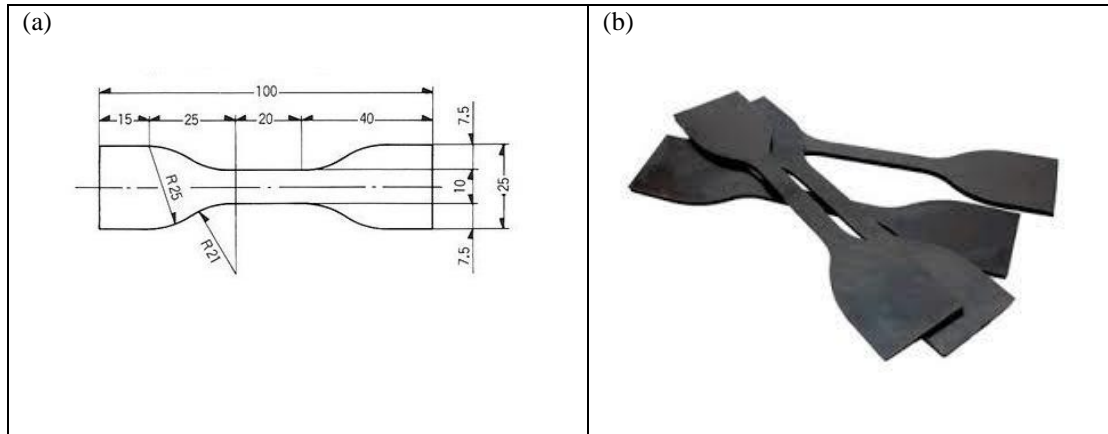
Şekil 5.12. Tipik bir MDR cihaz çıktısı



Şekil 5.13. Kritik değerleri gösteren MDR eğrisi (URL-46)]

### 5.5.2. Çekme Ve Isıl Yaşlandırma Testleri

Kauçuk karışımlarında çekme testi, malzemenin dayanıklılığını ve gerilme özelliklerini değerlendirmek için yaygın olarak kullanılır. Karışım örnekleri Fontijne LPC029 sıcak preste örnek türüne bağlı olarak belirlenen pişme koşullarında pişirilir. Numune, dumbbell bıçağı kullanılarak “köpek kemiği” (İng. dog-bone) şeklinde kesilir (Şekil 5.14) (URL-47). Çekme testi, ASTM D412-16 standartına göre oda sıcaklığında ( $23 \pm 2$  °C), 300 mm /dk kafa hızında ve ekstansometre aralığı 20 mm olacak şekilde Alpha Technologies T2000 Çekme Test Cihazında gerçekleştirilir (Şekil 5.15) (URL-48). Kopma dayanımı, kopmada uzama ve çeşitli uzamalarda modül değerleri ölçülür. Her test en az beş kez tekrarlanır ve ortalama değerler raporlanır.



Şekil 5.14. (a) Dumbbell kesici #3 bıçağı (JIS K6251), (b) Test örnekleri (uzunluk: 100 mm, orta genişlik: 5 mm, kalınlık: ~2 mm) (URL-47)



Şekil 5.15. Alpha Technologies T2000 Çekme Cihazı (URL-48)

ASTM D412-16 standardına göre hazırlanan test numuneleri, Heraeus marka etüvde 100°C’de 24, 48, 72 ve 96 saat süreyle yaşlandırılır ve oda sıcaklığında test edilir (Şekil 5.16) (URL-49). Pişmiş karışımlar için sertlik, çekme mukavemeti (TS), kopmada uzama (EB) ve % 100 (M100), % 200 (M200) ve % 300 (M300) uzamadaki modül değerleri raporlanır.



Şekil 5.16. Heraeus etüv (URL-49)

### 5.5.3. Sertlik Ölçümü

Kauçuk karışımlarında sertlik ölçüm testi, malzemenin mekanik özelliklerini değerlendirmek için kritik bir öneme sahiptir; bu testler, kauçuk karışımlarının dayanıklılığı ve elastikiyetinin yanı sıra, farklı uygulama alanlarına uygunluğunu da belirlemede yardımcı olur. Sertlik ölçümleri, ASTM D2240 (Shore A) standardına göre Zwick/Roell 5109 sertlik ölçüm cihazında gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.17) (URL-50).

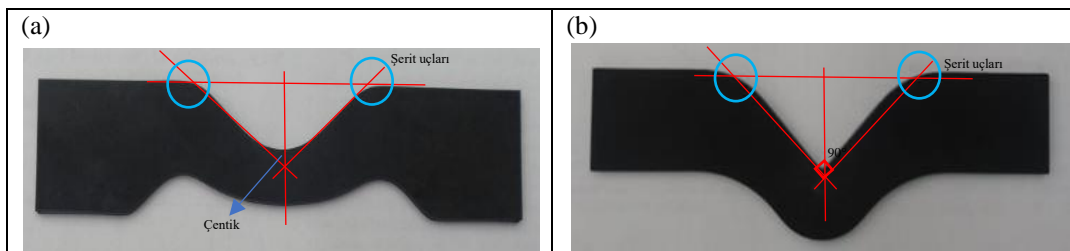
Aynı harmandan alınan 3 adet köpek kemiği şeklindeki çekme test örnekleri üst üste konularak en az 6 mm kalınlıkta sertlik örneği hazırlanmıştır. Böylece 3 harmandan ölçüm yapılarak ortalama sertlik değerleri ve standart sapmaları raporlanmıştır.



Şekil 5.17. Sertlik ölçüm cihazı Zwick/Roell (Shore A) (URL-50)

#### 5.5.4. Yırtılma Mukavemetinin Belirlenmesi

Pişmiş kauçuk karışımlarının yırtılma mukavemeti ASTM D624-00 standartına göre Alpha Technologies T2000 Çekme Test Cihazı kullanılarak belirlenmiştir (Şekil 5.15) (URL-48). Kauçuk karışımlarının yırtılma mukavemeti, bir kesik, kusur veya deformasyonun neden olduğu yüksek gerilime maruz kalan bir bölgede başlayan ve yırtılarak yayılan deformasyona dirençtir. Yırtılma mukavemeti testleri iki farklı yöntem kullanılarak uygulanır. Yırtılma B testinde, dumbbell tipi bir kesici ile, ortasında çentik bulunan hilal şeklinde bir şerit hazırlanır (Şekil 5.18a). Böylece, kuvvet esas olarak ana eksen boyunca ve çentiğe dik olarak hareket eder ve yırtığın yayılma/ilerleme davranışı izlenir. Yırtılma C testinde ise, dumbbell tipi bir kesici kullanılarak, şerit uçları  $90^\circ$  açılı olacak şekilde ve ortasında çentik içermeyen şerit numune hazırlanır. Kuvvet, numuneye şerit uçlarına paralel olarak etki eder ve yırtılmayı başlatacak kuvvet, gerilme konsantrasyonunun en yüksek olduğu  $90^\circ$ 'lik açının bulunduğu yerde ölçülür (Şekil 5.18b).



Şekil 5.18. Yırtılma mukavemeti test örnekleri (a) Yırtılma B (b) Yırtılma C

### 5.5.5. Çapraz Bağ Yoğunluğunun Belirlenmesi

Çapraz bağlanma, pişme işlemi sırasında polimer moleküllerinin kükürt zincirleri ile birbirine bağlanarak üç boyutlu bir ağ yapısının oluşmasıdır. Çapraz bağ yoğunluğu, kauçuk ürünlerinin nihai performansını belirleyen önemli bir özelliktir. Çapraz bağ yoğunluğu ölçümü farklı yöntemlerle belirlenebilir, bu çalışmada ISO 1817 standartına göre şişme testi uygulanmıştır. Numuneler 30×5×2 mm boyutlarında hazırlanır ve ilk tartım yapılır ( $m_0$ ). Sonrasında numuneler oda sıcaklığında 72 saat boyunca toulende bekletilerek şişme sağlanır. Ardından numune çıkartılarak, yüzeyindeki fazla toluen filtre kâğıdı yardımıyla uzaklaştırılır ve tartım alınır ( $m_1$ ). Numuneler, sabit bir ağırlık ( $m_2$ ) elde edilene kadar fırında 70 °C'de kurutulur. Şişme oranı (Q) Denklem (5.2) kullanılarak hesaplanır:

$$Q (\%) = \frac{m_1 - m_0}{m_0} \times 100 \quad (5.2)$$

Çapraz bağ yoğunluğu ( $V_c$ ), Flory–Rehner denkleminde uygun olarak Denklem (5.3-5.7) yardımı ile hesaplanır (Flory and Rehner, 1943):

$$V_c = \frac{1}{2M_c} \quad (5.3)$$

Çapraz bağlar arasındaki ortalama moleküler ağırlığı ( $M_c$ ) Denklem (5.4) kullanılarak hesaplanır.

$$M_c = \frac{-p_p V_s V_r^{\frac{1}{3}}}{\ln(1 - V_r) + V_r + \chi V_r^2} \quad (5.4)$$

$p_p$  = Çözücünün yoğunluğu ( $\text{g/cm}^3$ )

$V_s$  = Toluenin molar fraksiyonu ( $106,4 \text{ cm}^3/\text{mol}$ )

$V_r$  = Şişmiş kauçuğun molar fraksiyonu, Denklem (5.5) ile hesaplanır

$\chi$  = Flory-Huggins polimer-çözücü etkileşim parametresi, Denklem (5.6) ile hesaplanır (Marzocca ve Mansilla, 2006; Xu ve diğ., 2018; Marzocca ve diğ., 2010).

$$V_r = \frac{(m_2 - m_i)/p_p}{(m_2 - m_i)/p_p + (m_1 - m_2)/p_s} \quad (5.5)$$

$m_f$  = Dolgu malzemesinin ağırlığı (g, karbon karası)

$p_s$  = Kauçuk karışımının yoğunluğu ((g/cm<sup>3</sup>), Bölüm 5.3.6'da verilen ölçüm değerleri kullanılmıştır)

$$\chi = \chi_\beta + \frac{V_s(\delta_s - \delta_r)^2}{RT} \quad (5.6)$$

$\chi_\beta$  = Entropi katkısı (0,34 olarak alınır) (Marzocca ve Mansilla, 2006)

$\delta_s$  = Çözücünün çözünürlük parametresi (18.35 (J/cm<sup>3</sup>)<sup>1/2</sup>) (Khasraghi ve diğ., 2022)

$\delta_r$  = Kauçuk karışımının çözünürlük parametresi, Denklem (5.7) ile hesaplanır (Xu ve diğ., 2018)

R = İdeal gaz sabiti (8.314 J/molK)

T = Mutlak sıcaklık (293.15 K)

$$\delta_r = \delta_1\phi_1 + \delta_2\phi_2 \quad (5.7)$$

$\delta_1$  = Kauçuk 1'in çözünürlük parametresi

$\delta_2$  = Kauçuk 2'nin çözünürlük parametresi

$\phi_1$  = Kauçuk 1'in hacimsel fraksiyonu

$\phi_2$  = Kauçuk 2'nin hacimsel fraksiyonu

Çalışmada kullanılan kauçuklar için Denklem (5.7)'deki değerler aşağıdaki gibi alınmıştır. Tek bir tip kauçuk içeren karışımlarda Denklem (5.7)'deki  $\delta_r$  değeri o kauçuk için verilen çözünürlük parametresidir.

Tablo 5.11. Kullanılan kauçukların çözünürlük parametreleri

Kauçuk	Çözünürlük parametresi, $\delta$ (J/cm <sup>3</sup> ) <sup>1/2</sup>
SBR	17,04 (Marzocca ve Mansilla, 2006)
BR	17,15 (Marzocca ve diğ., 2010)
NR	16,70 (Thomas ve diğ., 2013)

### 5.5.6. Özgül Ağırlık Ölçümü

Yoğunluk, bir maddenin belirtilen bir sıcaklık ve basınçta tanımlanmış hacimde ne kadar yer tuttuğunu belirtir. Özgül ağırlık ise maddenin yoğunluğunun suyun yoğunluğuna oranı olup birimsizdir. Kauçuk karışımlarının özgül ağırlık ölçümleri Alpha Technologies D2020 Densimetre Cihazı ile ASTM D297-93 metodu kullanılarak Arşimet prensibi doğrultusunda yapılmıştır (Şekil 5.19) (URL-51).



Şekil 5.19. Alpha Technologies D2020 Densimetre Cihazı (URL-51)

### 5.5.7. Sekme esnekliğinin belirlenmesi

Sekme esnekliği (İng. rebound resilience), kauçuk karışımının darbe ile deforme olduktan sonra şeklini ve enerjisini geri kazanma kabiliyetini gösteren kritik bir özelliktir. Kauçuk karışımının esnekliğini ve enerji verimliliğini yansıtarak orijinal formuna ne kadar iyi dönebileceğini ölçer. Ölçüm sonucu, malzemenin şeklinin geri kazanım miktarını yüzde olarak gösterir ve tekrarlanan darbelerin meydana geldiği dinamik uygulamalar için malzemenin ne kadar dayanıklı olduğunu belirtir. Sekme esnekliği testi ASTM D2632-15(2019) standartına göre Zwick 5109 Sekme Esnekliği Test Cihazında yapılmıştır (Şekil 5.20) (URL-52).

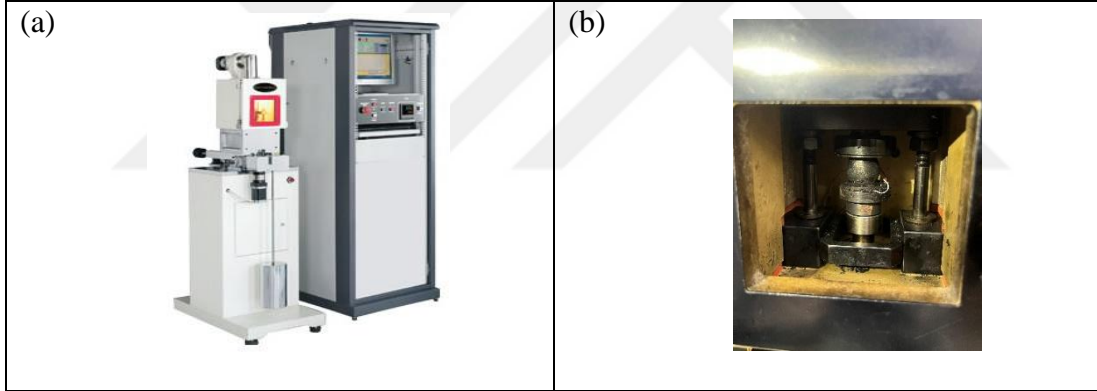


Şekil 5.20. Zwick 5109 Sekme Esnekliği Test Cihazı (URL-52)

### 5.5.8. Fleksometre Testleri

Fleksometre testleri, kauçuk karışımının kalıcı deformasyon değerini (İng. compression set) belirlemenin yanı sıra kullanım sırasında bükülmeden kaynaklanan ve malzemenin ömrünü belirleyen ısı üretimini de (İng. heat build-up) ölçer. Testler, ASTM D3182-21a standardına göre hazırlanan silindirik numuneler kullanılarak, BF Goodrich Model II cihazı ile ASTM D623-07 standardına uygun olarak yapılır (Şekil 5.21) (URL-53). Sabit yük altında gerçekleştirilen standart deney modunda, numune uzunluğundaki değişimin yanı sıra numunenin tabanındaki sıcaklık artışı, belirli bir döngüsel sıkıştırma seti kullanılarak kaydedilir. Numune boyu (silindirin yüksekliği) ölçülerek elde edilen kalıcı deformasyon değeri (C) Denklem (5.8) ile hesaplanır, burada  $t_0$  orijinal numune yüksekliği ve  $t_f$  ise test sonrası numune yüksekliğidir (URL-54).

$$C = \frac{(t_0 - t_f)}{t_f} \times 100 \quad (5.8)$$

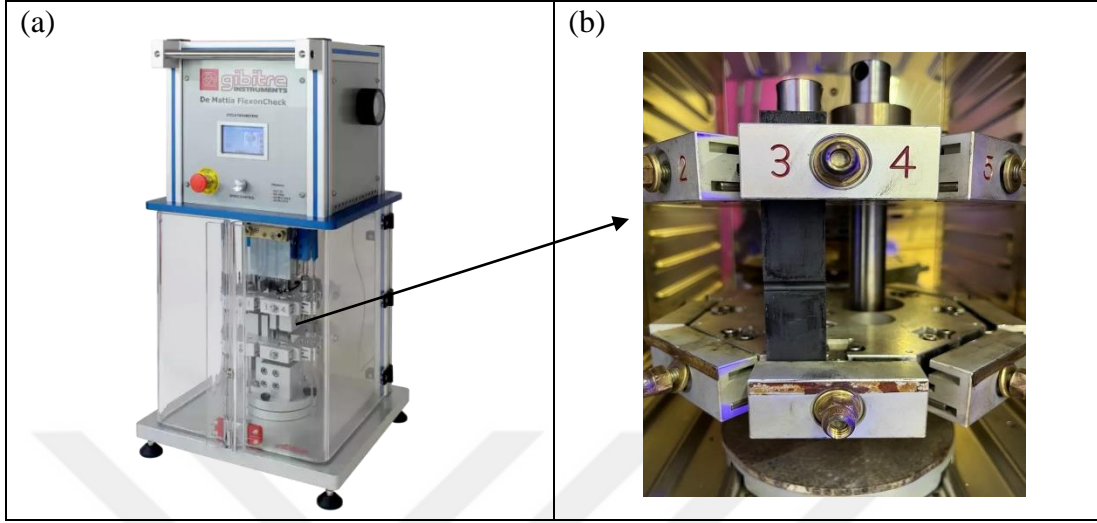


Şekil 5.21. (a) BF Goodrich Model II fleksometre test cihazı, (b) Test haznesi (URL-54)

### 5.5.9. Yorulma Testi

Yorulma testi (İng. de mattia fatigue test), pişmiş kauçuk karışımlarının yorulma ömrünü belirler. Test, malzemenin hem başlangıç çatlak oluşurma eğilimini hem de mevcut bir çatlak ilerleme hızını değerlendirmeye olanak tanır. Yorulma verileri öncelikle bir karışımın çatlak/yırtık başlangıcının tahminini ve çatlak/yırtık ilerleme hızının gerçeğe olabildiğince yakın bir ölçüsünü verir. Bu yönüyle, kauçuk karışımının yorulma ömrünün tahmin edilmesi ve hizmet süresi boyunca maruz kalacağı tekrarlı yüklemelere karşı performansının analiz edilmesi açısından önemli bilgiler sağlar. Test, ASTM D813-07

standardına göre Gibritre Instruments Flexon Check De Mattia test cihazında yapılmıştır (Şekil 5.22) (URL-55).



Şekil 5.22. (a) Gibritre Instruments Flexon Check De Mattia test cihazı, (b) Test haznesi (URL-55)

#### 5.5.10. Aşınma Testi

Lambourn aşınma testi, kauçuk sırt karışımlarının aşınma performansını değerlendirmek amacıyla uygulanan bir testtir. Bu test, lastiklerin aşınma direncini belirleyerek, farklı karışım reçetelerinin karşılaştırılmasına olanak tanır. Karışımın aşınmaya karşı direnci, araç lastiklerinin servis ömrünü, sürüş güvenliğini ve yakıt verimliliğini doğrudan etkiler; bu nedenle, daha iyi aşınma direncine sahip lastikler, daha uzun süre dayanarak daha az sık değiştirilme ihtiyacı doğurur. Aşınmış lastikler yol tutuşu ve frenleme performansını olumsuz etkileyerek kaza riskini artırır. Ayrıca, erken aşınan lastikler ciddi bir atık problemine de yol açar. Lambourn aşınma testi, yeni kauçuk karışım reçetelerinin geliştirilmesi ve mevcut reçetelerin optimize edilmesi sürecinde önemli bir rol oynamaktadır. Bu nedenle, araç lastiği üreticileri için bu test, ürün geliştirme süreçlerinin ayrılmaz bir parçasıdır ve lastiklerin performans özelliklerini uzun süre korumalarına yardımcı olur. Bu süreçte aşınma testinin sonuçları, deneme lastiklerinin saha testleri öncesinde ön bilgi sağlayarak Ar-Ge maliyetlerini azaltır.

Test, Ueshima Lambourn AB-2010 Aşınma Test Cihazı kullanılarak ISO23337:2007 standardına uygun olarak yapılır (Şekil 5.23a) (URL-56). Test, sabit normal yük (30 N) ve belirlenen kayma oranı (%1-20) kullanılarak tekerlek şeklindeki bir numunenin dönen

aşındırıcı bir tekerleğe temas ettirilerek 5 dakika sürede gerçekleştirilir ve test sırasında numune sıcaklığı izlenir (Şekil 5.23b). Her bir numunenin test öncesi ve test sonrası ağırlığı ölçülerek ağırlık kaybı hesaplanır. Bu veri kullanılarak oda sıcaklığında doğrusal aşınma hızı (V) ve doğrusal aşınma enerjisi ( $\epsilon W$ ) hesaplanır. Doğrusal aşınma hızı, numune yüzeyinin 1000 km mesafe için, belirli bir süre (5 dk) içinde kaybettiği/aşınan malzeme miktarının milimetre veya gram cinsinden ölçümüdür ve Denklem (5.9) kullanılarak hesaplanır (Holwell ve diğ., 2012). Bu değer, kauçuk karışımının aşınma direncini doğrudan etkileyen önemli bir performans göstergesi olarak kabul edilir; düşük bir aşınma hızı, malzemenin aşınma direncinin yüksek olduğunu ve uzun ömürlü performans sergileyebileceğini ifade eder. Doğrusal aşınma enerjisi ise kauçuk karışımının aşınma sürecinde harcanan enerji miktarını ifade eder. Bu enerji, araç lastiğinin yol ile temas eden yüzeyinin belli bir sürtünme sırasında aşınmanın meydana gelebilmesi için gereken enerjidir. Denklem (5.10) kullanılarak genellikle joule cinsinden raporlanır (Holwell ve diğ., 2012). Doğrusal aşınma enerjisi, malzemenin aşınma direncini belirlemede önemli bir gösterge olup, daha yüksek enerji değerleri, malzemenin daha fazla aşınma yaşadığını ve dolayısıyla daha düşük bir aşınma direncine sahip olduğunu gösterir.

$$V \left( \frac{\text{mm}}{1000 \text{ km}} \right) = \frac{\Delta W (\text{g}) \times (1000^4 \times 60)}{D_r (\text{rpm}) \times D_d (\text{mm}) \times t (\text{sn}) \times D \left( \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right) \times S_w (\text{mm}) \times S_d (\text{mm}) \times \Pi^2} \quad (5.9)$$

Denklemden;

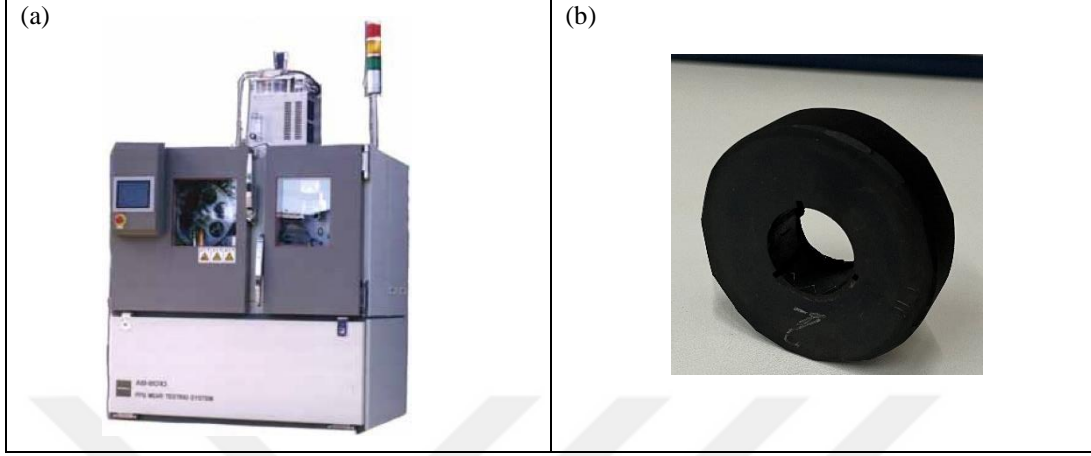
- $\Delta W (\text{g})$  = Ağırlık kaybı
- $D_r (\text{rpm})$  = Aşındırıcı tekerlek hızı (67 rpm)
- $D_d (\text{mm})$  = Aşındırıcı tekerlek çapı (250 mm)
- $t (\text{sn})$  = Test süresi
- $D (\text{g/cm}^3)$  = Kauçuk karışımının özgül ağırlığı
- $S_w (\text{mm})$  = Örnek genişliği (25 mm)
- $S_d (\text{mm})$  = Örnek çapı (70 mm)

$$\epsilon W = \frac{(F_y - F_0) (N) \times \text{Slip ratio} (\%)}{S_w (\text{mm}) \times S_d (\text{mm}) \times \Pi} \quad (5.10)$$

Denklemden;

$F_y$  (N): Test sırasında numuneye uygulanan dikey yöndeki ortalama kuvvet (30 N)

$F_0$  (N): Test sırasında numuneye uygulanan yatay yöndeki kuvvet (0 N)

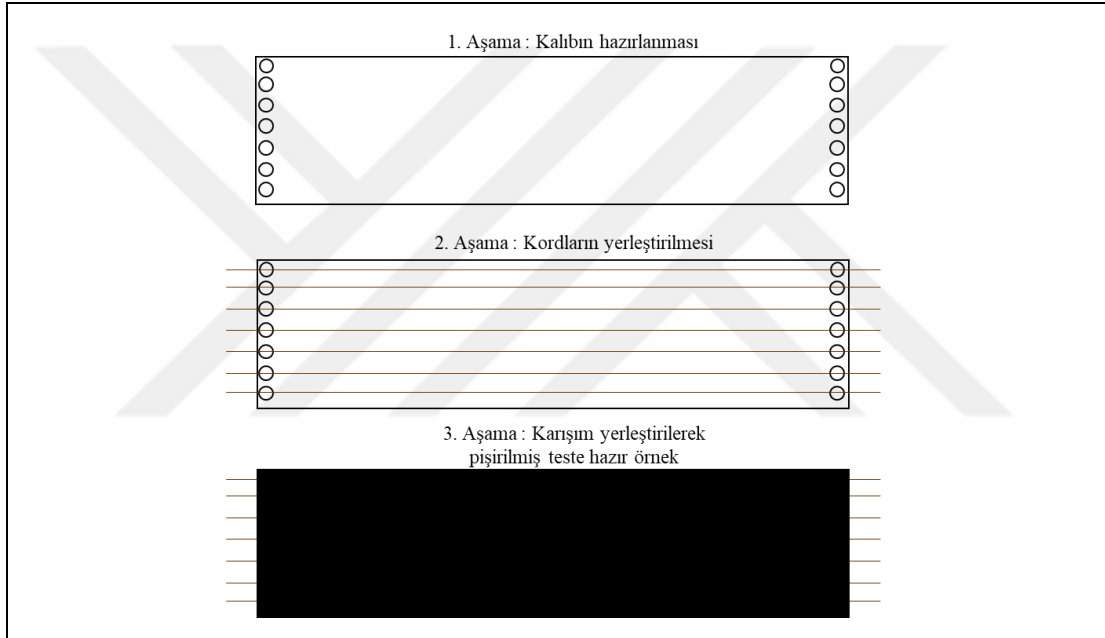


Şekil 5.23. (a) Aşınma test cihazı (Ueshima Lambourn AB-2010), (b) Silindirik test örneği (URL-56)

#### 5.5.11. Kauçuk Karışımı-Metal Yapışma Testi

Araç lastiklerinde çelik kord ile kaplama karışımı arasındaki yapışmanın önemi, lastiklerin performansı ve güvenliği açısından kritik bir rol oynamaktadır. Çelik kord, lastiğin dayanıklılığını ve yapısal bütünlüğünü sağlarken, kauçuk karışımı lastiğin esnekliğini ve yol tutuşunu artırır. Bu iki malzemenin etkili bir şekilde yapışması, lastiğin aşınma direncini, yırtılma dayanımını ve genel sürüş güvenliğini önemli ölçüde etkiler. Yapışmanın zayıf olduğu durumlarda, lastiklerin performansı düşer ve sürücü ile yolcu güvenliği riske girer. Bu nedenle, lastik üretiminde çelik kord ve kauçuk karışımı arasındaki yapışmanın sağlanması, yüksek kaliteli ve güvenilir lastikler üretmenin temel taşlarından biridir. Kauçuk karışımı-metal yapışma testi (İng. Cord-Rubber Adhesion, CRA) ASTM D2229-02 test metodu kullanılarak Alpha Technologies T2000 Çekme Test Cihazında gerçekleştirilir (Şekil 5.15) (URL-48). Test örneğinin hazırlanma aşamaları Şekil 5.24'te, testin yapılışı ise Şekil 5.25'te gösterilmiştir. Yaklaşık 200 g kauçuk karışımı oda sıcaklığında kalınlığı 4,3 mm olacak şekilde millenir ve 10-15 dk kadar dinlendirilerek 220 x 39 mm boyutlarında kesilir. Pişirme kalıbı herhangi bir ön ısıtma işlemine tabi tutulmadan temiz bir bezle silinir, çelik kord örnekleri kalıbın çentiklerine yerleştirilerek boşluk bırakılmadan yanyana dizilir. Kalıbın boyutlarına göre kesilmiş karışım örneği çelik kordların üzerini kaplayacak şekilde kalıba yerleştirilir ve Fontijne

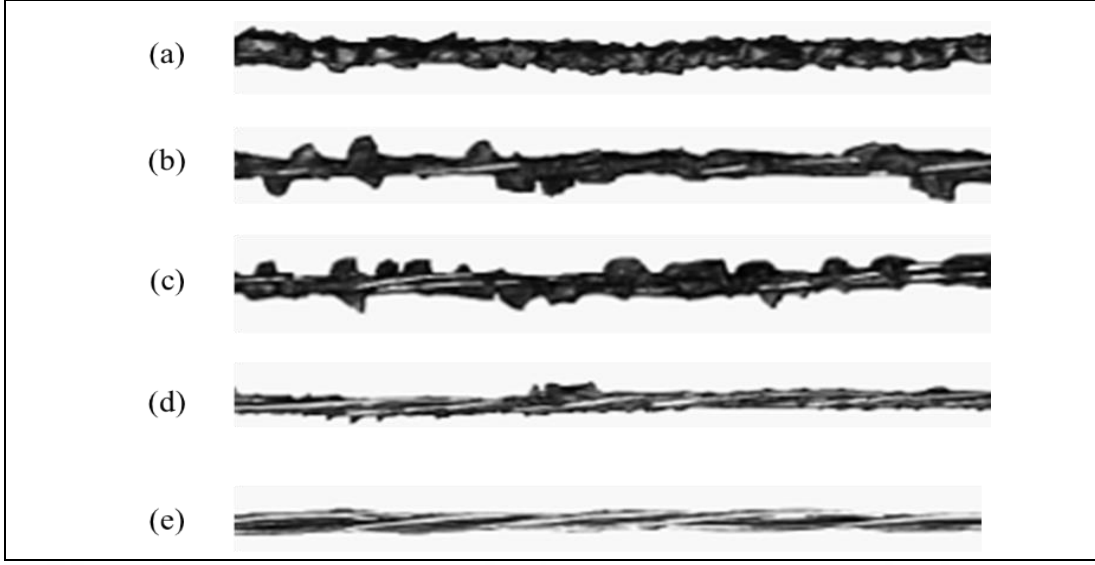
LPC029 laboratuvar presinde 1,47-2,45 MPa basınçta pişirilir. Test örneklerinin pişirme sıcaklığı, Bölüm 6.2’de anlatılacak olan MDR sonuçları kullanılarak, 160 °C optimum değer olarak belirlenmiştir. Pişirme süresinin belirlenmesinde ise doğal kauçuk karışımlarının bir özelliği olan çapraz bağların aşırı pişme ile bozulması (geri dönüş) aşaması görülene kadar MDR ile belirlenen 300 dakika maksimum süre olmak üzere yapışma testleri tekrarlanmıştır. Sırasıyla 7,5 dk, 18 dk, 40 dk, 60 dk ve 300 dk’da yapışma testleri yapılmıştır. Testte, çelik kordun karışım içerisinde sıyrılma kuvvetinin ölçülmesinin yanı sıra sıyrılmış kordların karışım tarafından kaplanma oranları da görsel olarak değerlendirilmiştir (Şekil 5.26).



Şekil 5.24. Test örneğinin hazırlanma aşamaları



Şekil 5.25. Yapışma testinin gösterimi



Şekil 5.26. Yapışma test sonuçlarının görsel değerlendirilmesi (a) %100, (b) %76-99, (c) %51-75, (d) %26-50 ve (e) %0-25

#### 5.5.12. Ozon Yaşlandırma Testleri

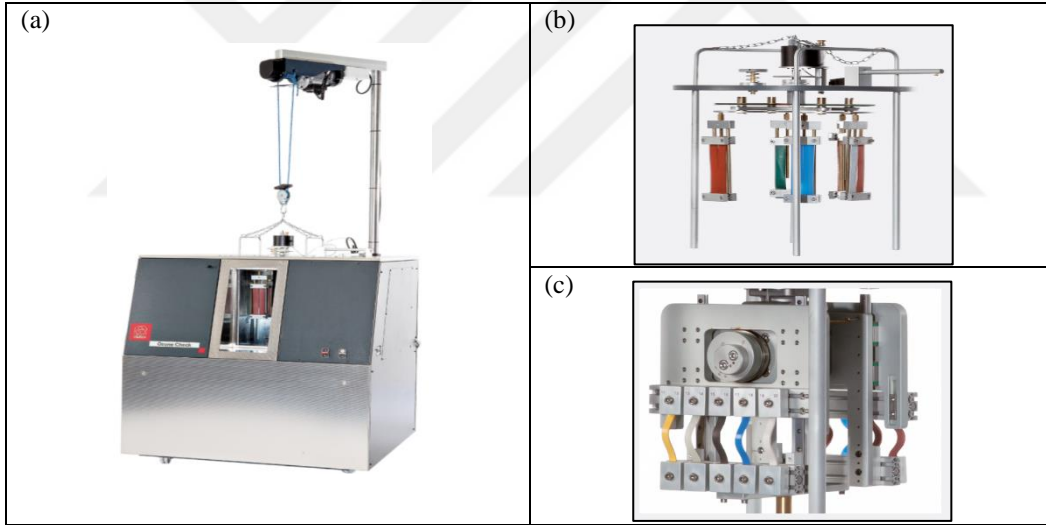
Ozon yaşlandırma testi, pişmiş yanak karışımının statik veya dinamik çekme gerilimi altında çatlama karşı direncini tespit etmeyi sağlayan bir yöntemdir. Ozon testinde, test edilen numune araç lastiğinin ortam koşullarında ozona maruz kalmasını simüle eder; lastiğin depolama ve kullanım ömrü boyunca performansı ve görünümü ile ilgili bilgi verir. Test süresince, cihazdaki ozon konsantrasyonu, sıcaklık ve bağıl nem oranı ASTM standartlarına uygun olarak ayarlanır. Test, ISO 1431-1 ve ASTM D1149-18 metodları ile Gibitre Ozon Test Cihazında yürütülür (Şekil 5.27a) (URL-57). Ozon yaşlandırma testleri statik (Şekil 5.27b) ve dinamik (Şekil 5.27c) test olmak üzere iki ayrı koşulda, sırasıyla 1,5 x 2,5 x 2 mm ve 10 x 1 x 2 mm boyutlarında numuneler kullanılarak yapılmıştır. Standartlara uygun olarak 72 saat süre ile statik ve dinamik testler uygulanmış ve koşulları Tablo 5.12’de verilmiştir. Ozon testleri sonrasında statik ve dinamik koşullarda yaşlandırılan numunelerin görüntülenmesi Olympos SZH marka ışık mikroskobu ile (Şekil 5.28a) ve örnek tutma aparatı (Şekil 5.28b) ile test edilen uzama değerinde yapılmıştır (URL-58). Ozon testleri, Heraeus etüvde, 100 °C sıcaklıkta ve 24 saat sürede ön yaşlandırma işlemi uygulanmış örneklerle dinamik koşullarda tekrarlanmıştır (Şekil 5.16) (URL-49). Test koşulları Tablo 5.13’te verilmiş olup, test edilen örnekler çıplak gözle incelenmiştir.

Tablo 5.12. Ozon test koşulları

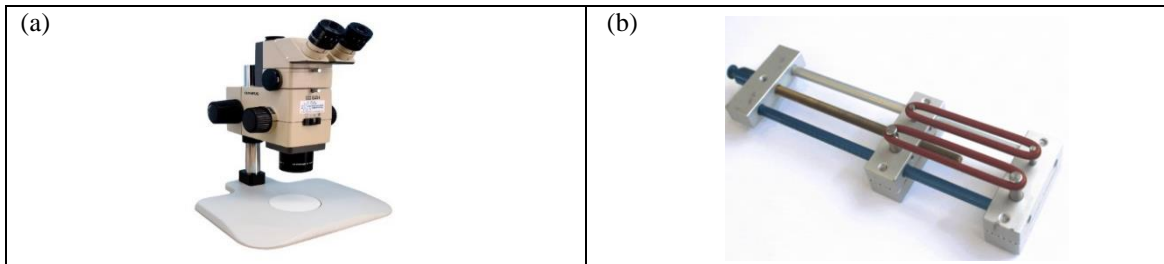
Parametre	Statik Test	Dinamik Test
Ozon konsantrasyonu (pphm)	50	50
Sıcaklık (°C)	40	Oda sıcaklığı
Bağıl nem (%)	50	50
Uzama (%)	100	0-30
Süre (saat)	72	72

Tablo 5.13. Isıl yaşlandırma sonrası ozon test koşulları

Parametre	Dinamik Test
Ozon konsantrasyonu (pphm)	50
Sıcaklık (°C)	Oda sıcaklığı
Bağıl nem (%)	50
Uzama (%)	0-30
Süre (saat)	24, 48,72, 96, 120 ve 144



Şekil 5.27. (a) Gibitre Ozon Test Cihazı, (b) Statik test numuneleri, (c) Dinamik test numuneleri (URL-57)



Şekil 5.28. (a) Olympos SZH Işık Mikroskobu, (b) Örnek tutma aparatı (URL-58)

### 5.5.13. ZnO Malzemelerinin Karbon Ayak İzi ve Maliyet Etkisi

Kompozit ZnO malzemesinin, geleneksel ZnO (WS-ZnO) malzemesi yerine kullanımının karbon ayak izi üzerine etkisi Japon Otomotiv Lastik Üreticileri Birliği (İng. Japan Automobile Tyre Manufacturers Association, JATMA) standartına göre 195/65R15 ebatlı bir PSR lastiği için verilen reçete üzerinden karşılaştırmalı olarak hesaplanmıştır (URL-19). Bir hammaddenin üretimi kaynaklı karbon ayak izi, o hammaddenin üretim sürecinde doğrudan ve dolaylı olarak atmosfere salınan sera gazlarının (özellikle CO<sub>2</sub>) toplam miktarını ifade eder. Bu, hammaddenin çıkarılmasından, işlenmesine, taşınmasına ve nihai ürüne dönüştürülmesine kadar olan tüm süreçleri kapsar. Karbon ayak izi, üretilen malzemenin ağırlığı (kg veya ton) başına açığa çıkan CO<sub>2</sub> eşdeğeri ağırlığıdır (kg veya ton), kgCO<sub>2</sub>e / kg şeklinde ifade edilir. Karbondioksit eşdeğeri, çeşitli sera gazlarının emisyonlarını küresel ısınma potansiyellerine göre karşılaştırmak için kullanılan bir metrik ölçüdür. Reçetede kullanılan her bir hammadde için verilen sera gazı emisyon faktörü (İng. Greenhouse Emission Factor, GHG EF) esas alınarak ortalama 8,2 kg olan bir lastik için karbon ayak izi değerleri (CO<sub>2</sub>ekg / lastik) hesaplanmıştır. Tedarikçiden, ortalama bir ZnO değerine (C-ZnO<sub>60:40</sub>) sahip malzeme için elde edilen sera gazı emisyon faktörü kullanılarak; kompozit malzeme ve WS-ZnO malzemesinin lastik başına karbon ayak izine etkisi bulunmuştur. Ek olarak, Kompozit ZnO malzemelerinin, her üç karışım (sırt, kuşak kaplama ve yanak) için 2024 yılı hammadde fiyatları referans alınarak karışım maliyetleri (\$/ton) hesaplanmış, hammadde ve karışımlar için maliyet avantajları % olarak kıyaslanmıştır.

## 6. BULGULAR VE TARTIŞMA

### 6.1. ZnO Malzemelerinin Karakterizasyonu

Bu bölümde çalışmada kullanılan ZnO malzemelerinin karakterizasyon sonuçları verilmiştir. Kontrol malzemeleri olan WS-ZnO ve Ac-ZnO ile deneme malzemeleri olan C-ZnO<sub>40:60</sub>, C-ZnO<sub>60:40</sub> ve C-ZnO<sub>90:10</sub> kompozit malzemelerinin ZnO ve CaCO<sub>3</sub> içerikleri ile BET yüzey alanları Tablo 6.1’de verilmiştir. Testler, Bölüm 5.1’de verilen yöntemlerle yapılmış olup ZnO içerikleri üreticinin analiz sertifikasında yer alan tanım değer aralıklarına uygundur. Kompozit malzemelerin ölçülen ZnO içerikleri ise üretici tarafından belirtilen nominal değerler (ağ. %40, %60 ve %90) ile uyumludur. Kompozit malzemelerin CaCO<sub>3</sub> içeriği, ağırlıkça ZnO yüzdesinin 100’den çıkarılmasıyla hesaplanmıştır. Kontrol malzemeleri olan WS-ZnO ve Ac-ZnO için saflık ve BET yüzey alanı değerleri Bölüm 4.1’de anlatılan üretim yöntemleri ile uyumludur. Fransız yöntemi ile üretilen WS-ZnO, daha yüksek saflıkta olup, daha düşük yüzey alanı, dolayısıyla daha büyük partikül boyutuna sahiptir. Diğer taraftan, Amerikan yöntemi ile üretilen Ac-ZnO, daha düşük saflıkta olup, daha yüksek yüzey alanı, dolayısıyla daha küçük partikül boyutuna sahiptir. Kompozit ZnO malzemelerinin BET yüzey alanı değerleri, özellikle ZnO içeriğinin artmasıyla Ac-ZnO kontrol malzemesine benzerlik göstermektedir. Bu durumda, kompozit ZnO malzemelerinin partikül boyutlarının WS-ZnO kontrol malzemesinden daha küçük olduğu görülmektedir. Bölüm 4.1’de verildiği gibi, tedarikçi tarafından bildirilen ZnO partikül boyutu deneme malzemelerinde 20-40 nm aralığındadır. Bu değerler, Amerikan prosesi ile üretilen ZnO malzemesinin literatürde maksimum 50 nm olarak verilen partikül boyutu ile benzerdir.

Kauçuk karışımı içerisinde ZnO malzemenin dağılımını ve dolayısıyla karışımın işlenebilirliği ve performansını etkileyen özellikler Bölüm 5.1’de anlatılan yöntemler kullanılarak belirlenmiş ve sonuçlar Tablo 6.2’de verilmiştir. Suda çözünen madde miktarı, uçucu madde miktarı ve elek kalıntı miktarı tüm kontrol ve deneme malzemeleri için araç lastiği sektöründe kabul gören tanım değerlerinin çok altında olduğu için, aralarındaki farklılıklar önem arz etmemektedir. Güvenli pişme açısından hammaddelerin pH değerlerinin düşük olması erken pişmeye neden olacağı için dezavantaj oluşturmaktadır. Bu durumda deneme malzemelerinin, kontrol malzemelerinden daha yüksek pH değerlerine sahip olmaları olumlu bir sonuçtur.

Tablo 6.1. Kullanılan ZnO malzemelerinin özellikleri

Kod	Malzeme	ZnO (ağ. %) Ölçüm	ZnO* (ağ. %) Tanım	CaCO <sub>3</sub> (ağ. %) Hesap	BET** (m <sup>2</sup> /g) Ölçüm	BET*** (m <sup>2</sup> /g) Tanım
WS-ZnO	Geleneksel ZnO	99,7	Min 95	-	4,22	4-8
Ac-ZnO	Aktif ZnO	96,1	Min 90	-	34,7	25-35
C-ZnO <sub>40:60</sub>	Kompozit ZnO	41,2	37-43	58,8	15,8	-
C-ZnO <sub>60:40</sub>	Kompozit ZnO	63,6	60-65	36,4	27,5	-
C-ZnO <sub>90:10</sub>	Kompozit ZnO	91,5	88-93	8,5	39,5	-

(\*) Tedarikçinin analiz sertifikasında raporladığı tanım değerleridir.

(\*\*) Kompozit ZnO malzemeleri için hem kaplama hem de çekirdek malzemenin toplam yüzey alanıdır.

(\*\*\*) Tedarikçi tarafından raporlanan TDS Teknik Bilgi Formunda yer alan değerlerdir.

Tablo 6.2. Kullanılan ZnO malzemelerinin kimyasal özellikleri

Testler	Birim	WS-ZnO	Ac-ZnO	C-ZnO <sub>40:60</sub>	C-ZnO <sub>60:40</sub>	C-ZnO <sub>90:10</sub>
Suda çözünen madde miktarı	%	0,08	0,03	0,57	0,75	0,85
Uçucu madde miktarı	%	0,11	0,91	0,95	0,70	0,71
Elek kalıntı miktarı	%	0,003	0,016	0,001	0,003	0,007
Asidite (pH)		7,44	9,11	9,50	10,76	11,37

Kauçuk karışımının pişme özelliklerini etkilemesi nedeniyle ZnO malzemenin saflık derecesi önemlidir. Bu amaçla, elementel analiz Bölüm 5.1’de anlatılan yöntemler kullanılarak WDXRF ve ICP-OES cihazları ile yapılmış ve sonuçlar Tablo 6.3-6.4’de raporlanmıştır. Tablo 6.3’te verilen Zn değerleri oksit formuna dönüştürüldüğünde WS-ZnO, Ac-ZnO, C-ZnO<sub>40:60</sub>, C-ZnO<sub>60:40</sub> ve C-ZnO<sub>90:10</sub> malzemeleri için sırasıyla %95,7, %94,2, %49,0, %69,7 ve %92,3 olarak hesaplanmaktadır. Her ne kadar bu değerler Tablo 6.1’de verilen yaş metot ölçüm değerleri ile aynı doğrultuda olsa da hata içermektedir. Bunun nedeni, WDXRF cihazının Na-U aralığındaki elementleri teşhis edilebilmesi ve yarı nicel (standartsız) method kullanılmasıdır. Bölüm 5.1’de anlatıldığı gibi kauçuk

sektöründe PbO ve CdO miktarlarının sınırlanması söz konusu olduğu için ICP-OES cihazı ile nicel analiz yapılması gerekli bulunmuştur. Tablo 6.4'te verilen elementel değerler oksit formlarına dönüştürüldüğünde PbO ve CdO miktarlarının kabul edilen limitlerin (CdO maks. 20 ppm ve PbO maks. 300 ppm) altında olduğu tüm malzemeler için görülmüştür.

Tablo 6.3. WDXRF elementel analiz sonuçları

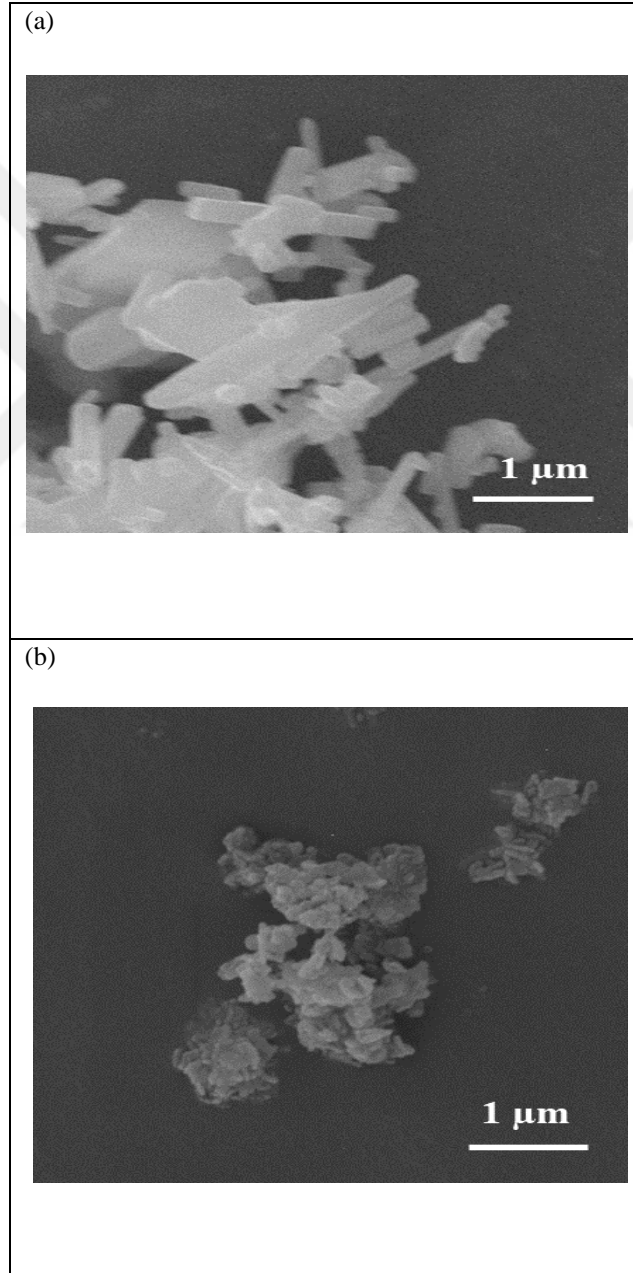
Element	Birim	WS-ZnO	Ac-ZnO	C-ZnO <sub>40:60</sub>	C-ZnO <sub>60:40</sub>	C-ZnO <sub>90:10</sub>
Zn	%	95,7	94,4	48,9	68,8	89,3
P	%	0,26	0,27	0,19	0,23	0,26
Ca	%	0,14	0,14	28,70	15,9	3,28
S	ppm	0,00282	0,00486	0,00199	0,00116	0,00957
Cu	ppm	265	262	-	179	240
Ni	ppm	70,4	59,3	47,2	45,7	47,8
Fe	ppm	52,9	52,6	161	160	103
Hf	ppm	-	347	-	-	-
Na	ppm	-	12,2	-	8,16	-
Cl	ppm	-	-	0,00101	0,00148	0,00205
Mg	%	-	-	651	438	-
K	ppm	-	-	457	0,00116	0,00114
Si	ppm	-	-	207	444	220
Sr	ppm	-	-	160	43,7	-
Zr	ppm	-	-	15,3	22,8	-
Ta	ppm	-	-	-	912	958
Br	ppm	-	-	-	87,5	118

Tablo 6.4. ICP-OES elementel analiz sonuçları

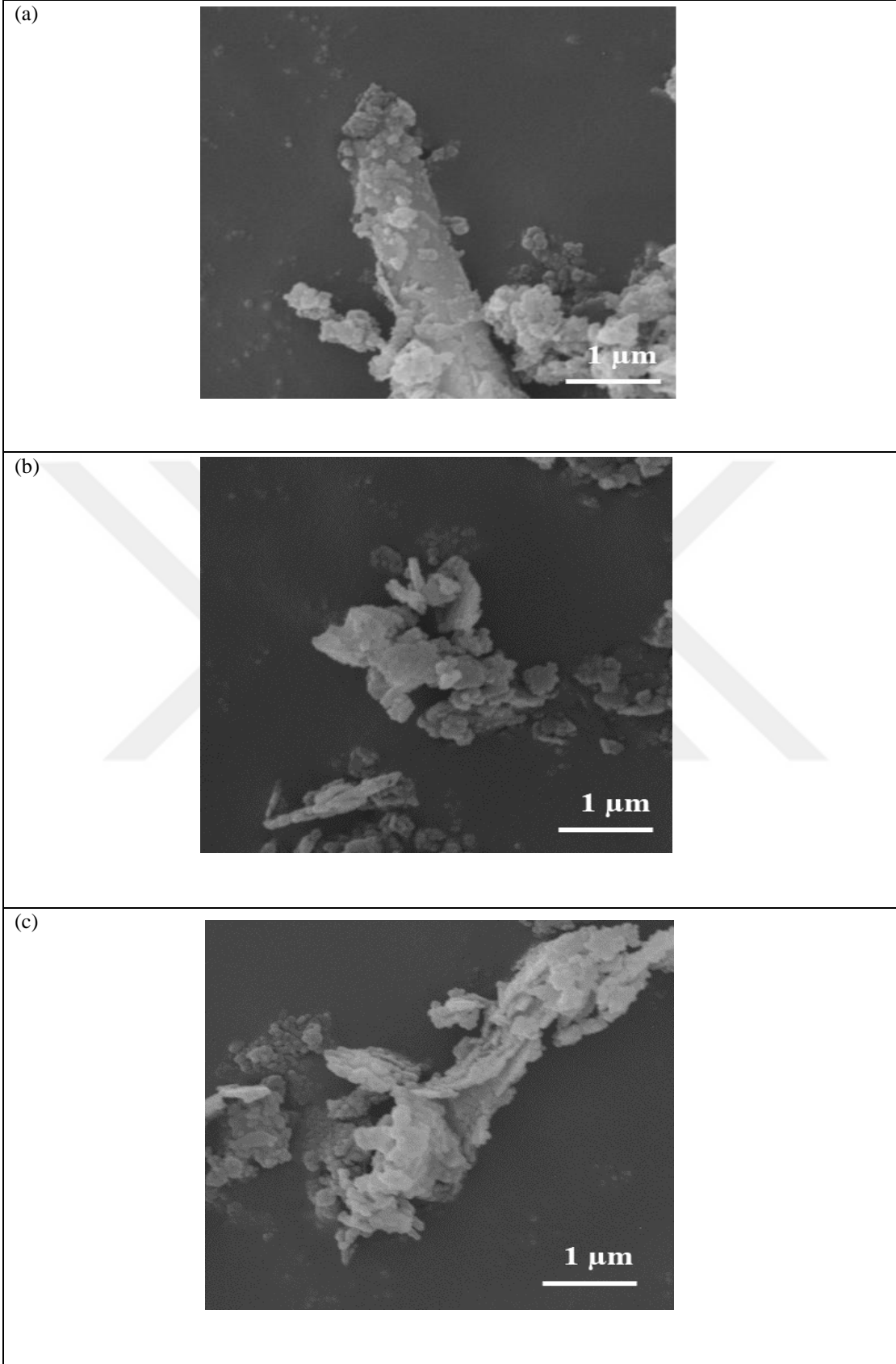
	Birim	WS-ZnO	Ac-ZnO	C-ZnO <sub>40:60</sub>	C-ZnO <sub>60:40</sub>	C-ZnO <sub>90:10</sub>
Pb	ppm	0,28105	0,06320	0,00825	0,00453	0,01943
Cd	ppm	0,02014	0,00209	0,00167	0,00542	0,00258
PbO	ppm	62,1	13,3	1,7	4,0	1,0
CdO	ppm	4,7	0,5	0,4	1,2	0,6

ZnO malzemelerinin morfolojilerinin ve elementel dağılımlarının incelendiği SEM/EDS sonuçları kontrol malzemeleri için Şekil 6.1'de, deneme malzemeleri için 6.2'de verilmiştir. Her iki kontrol malzemesinin de tabakalı morfolojileri dolayısıyla tipik wurtzit (İng. wurtzite) kristal yapısına sahip olduğu gözlenmektedir. WS-ZnO malzemesi daha düşük yüzey alanı nedeniyle Ac-ZnO malzemesine göre daha büyük partikül boyutuna

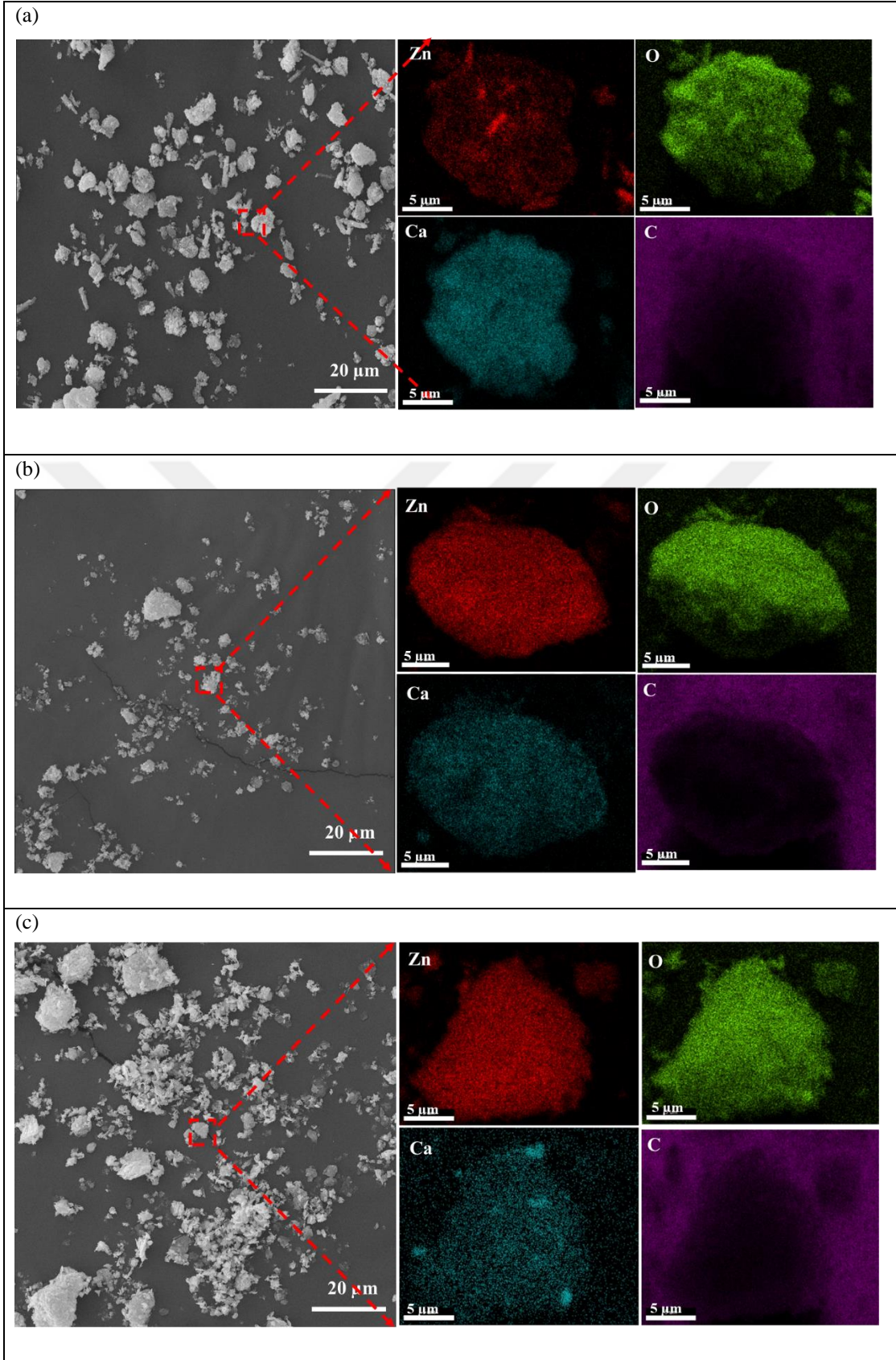
sahiptir. Kompozit ZnO malzemelerinde, çinko oksit  $\text{CaCO}_3$  üzerine kaplandığı için morfolojilerinde kontrol malzemelerine kıyasla farklılık görülmektedir. Şekil 6.3'te verilen EDS haritalaması dikkate alındığında, tedarikçinin kompozit tasarımını başarılı bir şekilde gerçekleştirdiği ve çekirdek malzemenin yüzeyinin tamamen yoğun ZnO ile kaplandığı anlaşılmaktadır. Kompozit malzemenin ZnO miktarı arttıkça, EDS haritaları yüzeydeki Zn miktarının daha fazla, çekirdekteki Ca miktarının ise daha düşük olduğunu göstermektedir.



Şekil 6.1. Kontrol ZnO malzemelerinin morfolojilerini gösteren SEM görüntüleri (a) WS-ZnO, (b) Ac-ZnO



Şekil 6.2. Kompozit ZnO malzemelerinin morfolojilerini gösteren SEM görüntüleri; (a) C-ZnO<sub>40:60</sub>, (b) C-ZnO<sub>60:40</sub> ve (c) C-ZnO<sub>90:10</sub>



Şekil 6.3. Kompozit ZnO malzemelerinin element dağılımını gösteren EDS haritalaması; (a) C-ZnO<sub>40:60</sub>, (b) C-ZnO<sub>60:40</sub> ve (c) C-ZnO<sub>90:10</sub>

## 6.2. Kauçuk Karışımlarının Hazırlanmasında Pişirme Parametrelerinin Belirlenmesi

Pişirme koşullarının belirlenmesi için literatür bilgisi ve lastik teknolojisi pratiği esas alınarak Tablo 4.10’da verilen ilgili sıcaklık ve sürelerde denemeler yapılmış olup uygun pişirme koşulları belirlenmiştir. Denemeler WS-ZnO kullanılarak her üç karışım için (SK1, KK1 ve YK1) yapılmış olup, belirlenen optimum koşullar diğer kontrol ve deneme malzemelerini kullanan karışımlara da aynı şekilde uygulanmıştır. Uygun koşulun belirlenmesinde MDR eğrilerinde yüksek maksimum tork değeri (MH), optimum pişme süresi (t90) ve emniyetli pişme süresi (ts1) esas alınmış olup, aynı zamanda pişme eğrisinde geri dönüş veya devam eden pişme olmamasına dikkat edilmiştir.

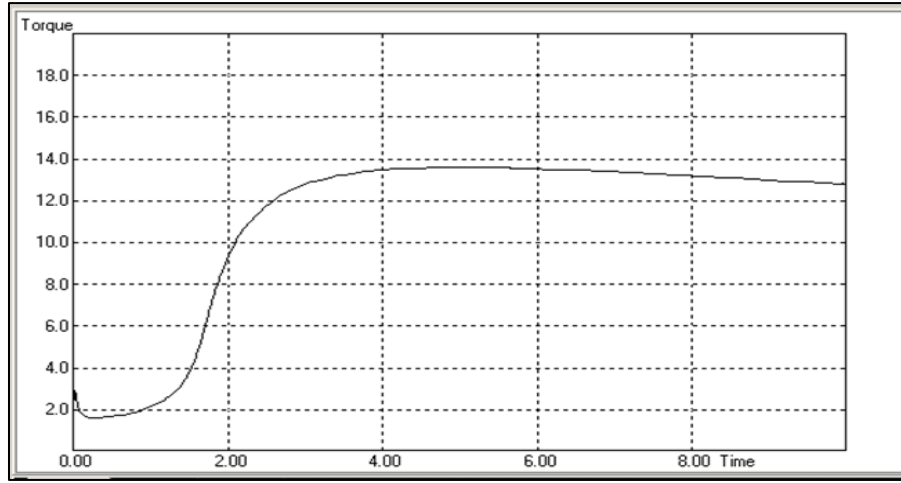
Sırt karışımı (SK1) için MDR denemeleri ile ilgili sonuçlar Tablo 6.5’te ve ilgili cihaz çıktıları Şekil 6.4’te verilmiştir. Geri dönüşün belirgin olarak görüldüğü (Şekil 6.4a) ve emniyetli pişme süresinin en kısa olduğu (Tablo 6.5) pişirme koşulu 1 kullanıldığında örnekte hava boşlukları gözlemlenmiş ve tam pişme sağlanamadığı anlaşılmıştır. Pişirme koşulu 2 ve 3 için Tablo 6.5’te verilen pişme özellikleri benzer olmakla beraber Şekil 6.4c’de pişirme koşulu 3 için bir miktar geri dönüş gözlenmiştir. Bu nedenele sırt karışımlarında optimum koşul olarak pişirme koşulu 2 (160 °C x 15 dk) seçilmiştir.

Tablo 6.5. SK1 karışımı için MDR deneme sonuçları

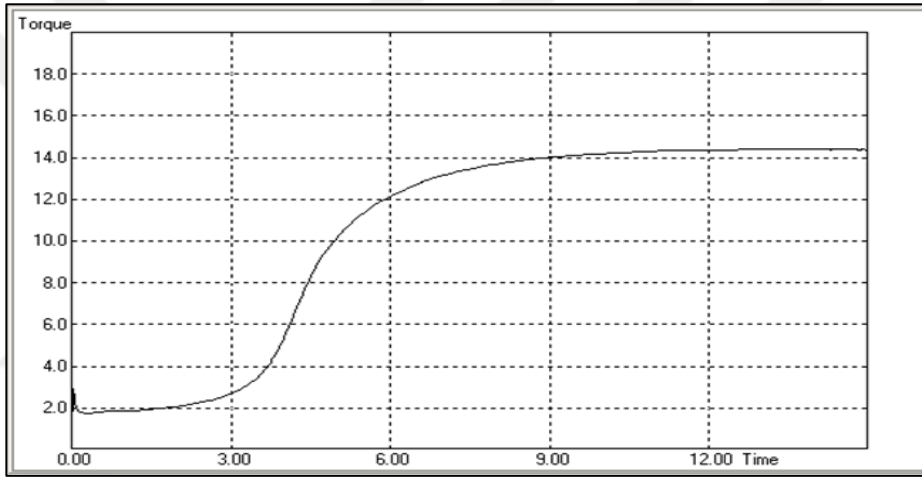
Özellik	Birim	Pişirme koşulu 1	Pişirme koşulu 2	Pişirme koşulu 3
		177 °C x 10 dk	160 °C X 15 dk	160 °C X 22 dk
MH	dNm	13,61	14,40	14,36
ts1	dk	1,22	3,02	3,02
t90	dk	2,76	7,00	6,88

Kuşak kaplama karışımı (KK1) için MDR denemeleri ile ilgili sonuçlar Tablo 6.6’da ve ilgili cihaz çıktıları Şekil 6.5’te verilmiştir. Pişmenin gerçekleşmediğinin görüldüğü pişirme koşulu 3 elenmiştir (Şekil 6.5c). Her ne kadar pişirme koşulu 1 ve 2 kritik parametreler açısından benzerlik gösterse de, aynı sonuçların daha kısa sürede elde edildiği pişirme koşulu 1 (160 °C x 16 dk) optimum koşul olarak seçilmiştir (Tablo 6.6).

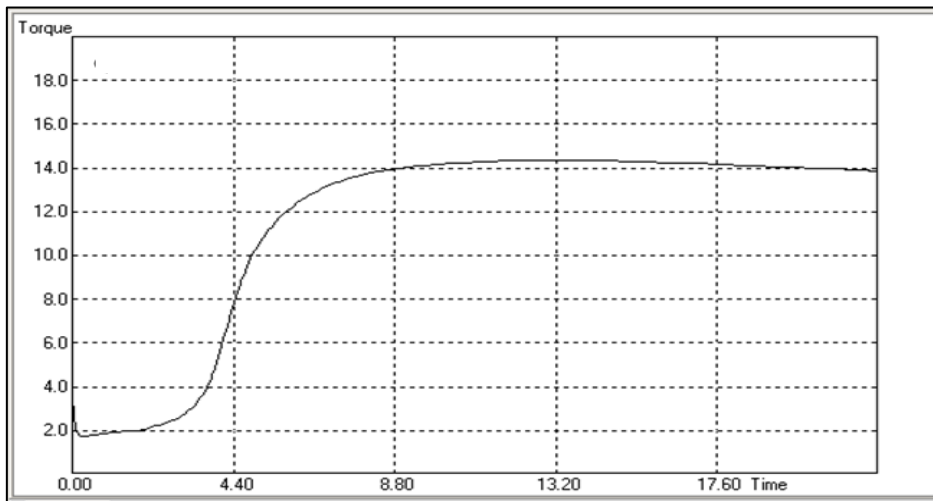
(a)



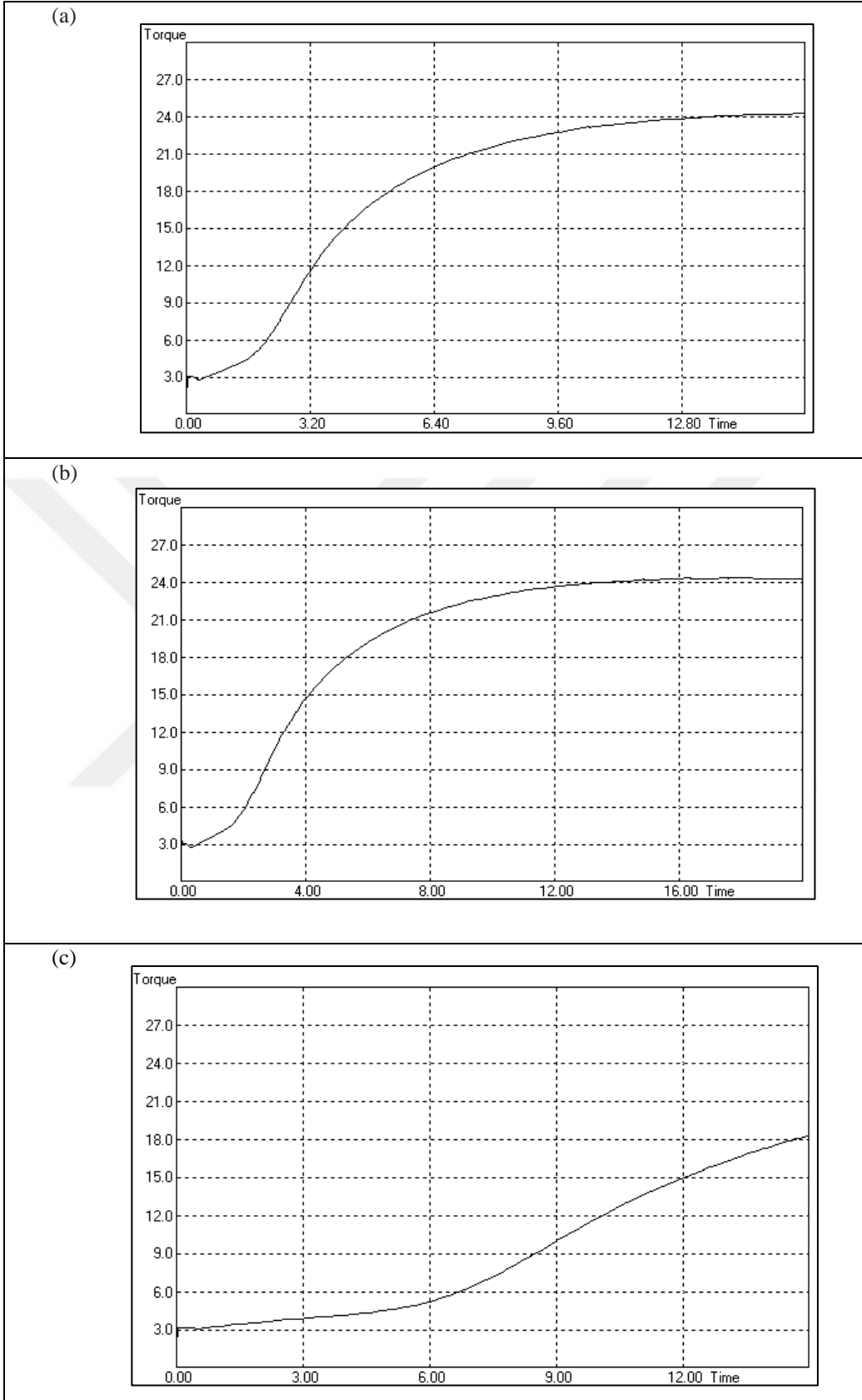
(b)



(c)



Şekil 6.4. SK1 karışımı için farklı pişirme koşullarında alınan MDR eğrileri (a) 177 °C x 10 dk, (b) 160 °C x 15 dk ve (c) 160 °C x 22 dk



Şekil 6.5. KK1 karışımı için farklı pişirme koşullarında alınan MDR eğrileri (a) 160 °C x 16 dk, (b) 160 °C x 20 dk ve (c) 145 °C x 15 dk

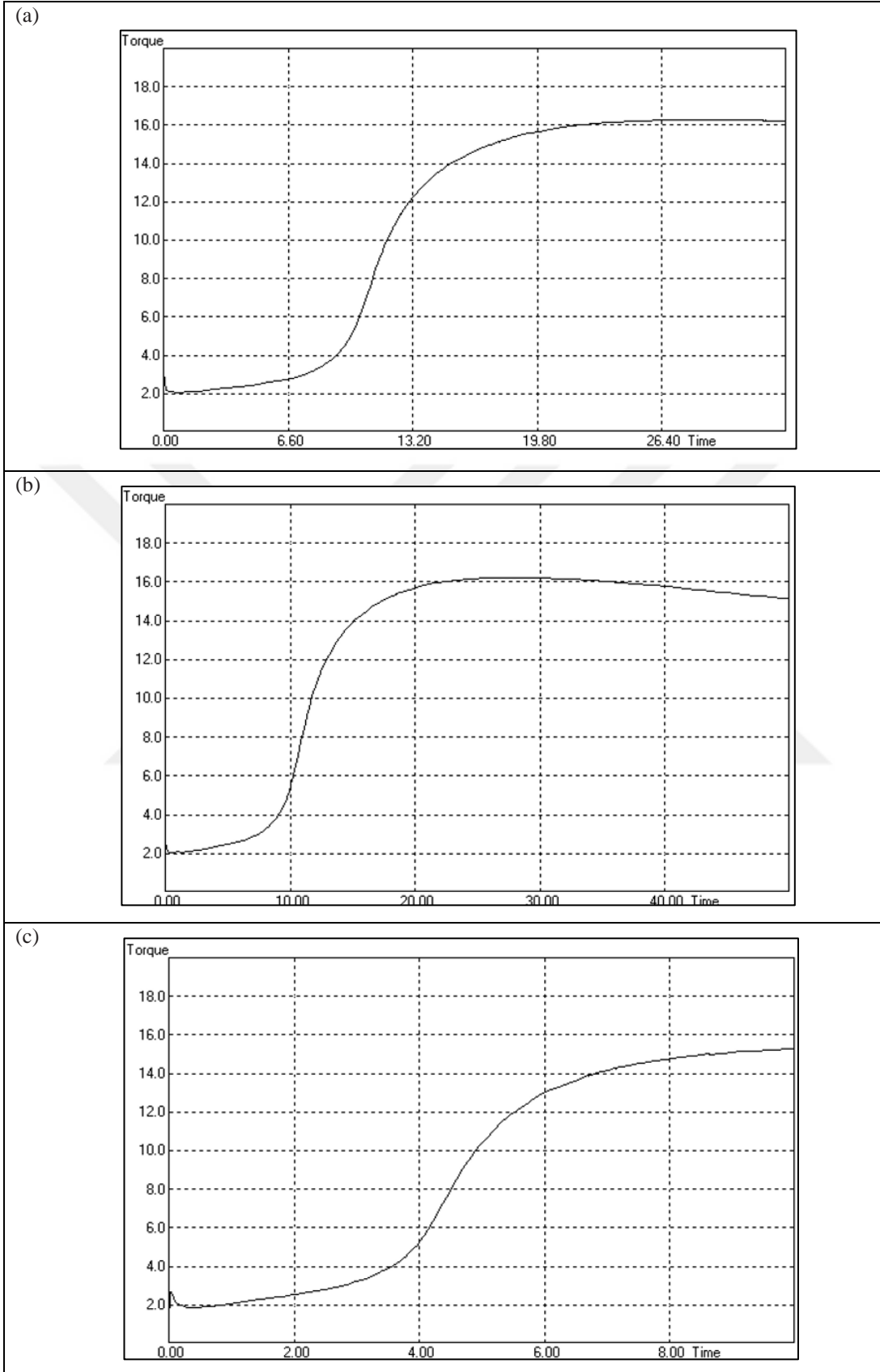
Tablo 6.6. KK1 karışımı için MDR deneme sonuçları

Özellik	Birim	Piştirme koşulu 1	Piştirme koşulu 2	Piştirme koşulu 3
		160 °C x 16 dk	160 °C x 20 dk	145 °C x 15 dk
MH	dNm	24,27	24,35	18,37
ts1	dk	1,14	1,15	3,74
t90	dk	8,59	8,81	13,49

Yanak karışımı YK1'e ait piştirme özelliklerinin değerlendirilmesi amacıyla gerçekleştirilen MDR (Moving Die Rheometer) denemelerine ait sonuçlar Tablo 6.7'de sunulmuş, bu sonuçlara ait cihaz çıktıları ise Şekil 6.6'da görsel olarak verilmiştir. Çalışmada üç farklı piştirme koşulu altında elde edilen veriler karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Piştirme koşulu 3 (örneğin en yüksek sıcaklık ve/veya en kısa süreyi içeren koşul) altında elde edilen eğriler incelendiğinde, Şekil 6.6c'de devam eden pişmenin oldukça belirgin olduğu gözlemlenmiştir. Her ne kadar Tablo 6.7'de bu koşul için emniyetli piştirme süresi diğer koşullara göre daha kısa görünse de, nihai ürün özellikleri açısından bu sürenin yeterli olmadığı anlaşılmaktadır. Bu koşulda hazırlanan numunelerde gözle görülür hava boşluklarının bulunması ve yapı bütünlüğünün tam olarak sağlanamaması, piştirme işleminin tamamlanmadığını ortaya koymaktadır. Diğer yandan, piştirme koşulu 1 ve 2 için elde edilen MDR sonuçlarının birbirine oldukça yakın olduğu ve benzer piştirme özellikleri sergilediği Tablo 6.7'deki verilerden anlaşılmaktadır. Ancak Şekil 6.6b'de yer alan piştirme koşulu 2'ye ait cihaz çıktılarında, piştirme eğrisi üzerinde bir miktar geri dönüş gözlemlenmiştir. Bu durum, malzemede yeniden akışkanlaşma eğiliminin başladığını ve çapraz bağ yapısının yeterince kararlı olmadığını düşündürmektedir. Geri dönüş, özellikle yüksek performans ve uzun ömür beklenen uygulamalar açısından istenmeyen bir özelliktir. Tüm bu değerlendirmeler doğrultusunda, yanak karışımı YK1 için en uygun piştirme parametrelerinin 145 °C sıcaklıkta ve 33 dakika süreyle gerçekleştirilen piştirme koşulu 1 olduğu belirlenmiştir.

Tablo 6.7. YK1 karışımı için MDR deneme sonuçları

Özellik	Birim	Piştirme koşulu 1	Piştirme koşulu 2	Piştirme koşulu 3
		145 °C x 33dk	145 °C x 50 dk	160 °C x 10 dk
MH	dNm	16,30	16,23	15,26
ts1	dk	7,65	7,53	2,56
t90	dk	17,03	16,79	6,73



Şekil 6.6. YK1 karışımı için farklı pişirme koşullarında alınan MDR eğrileri (a) 145 °C x 33 dk, (b) 145 °C x 50 dk ve (c) 160 °C x 10 dk

### 6.3. Fiziksel ve Mekanik Testlerin Değerlendirilmesi

Bu bölümde üç farklı reçete kullanılarak hazırlanmış olan kauçuk karışımlarının fiziksel ve mekanik test sonuçları verilmiştir.

#### 6.3.1. Karışımların Pişme Özellikleri

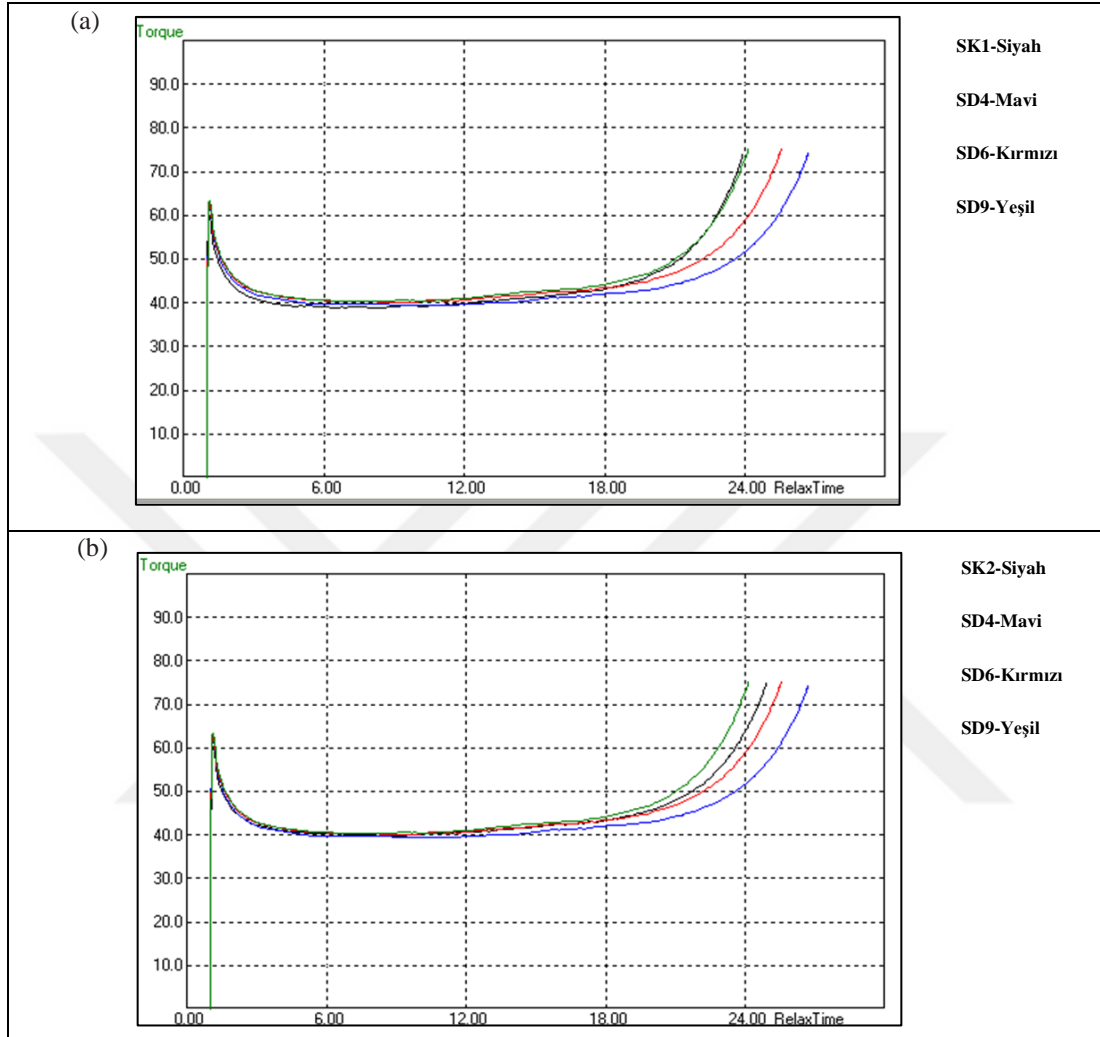
Pişme özelliklerinin belirlenmesinde, WS-ZnO ve Ac-ZnO kullanılarak hazırlanan kontrol karışımları ile C-ZnO<sub>40:60</sub>, C-ZnO<sub>60:40</sub> ve C-ZnO<sub>90:10</sub> kompozit ZnO malzemeleri kullanılarak hazırlanan deneme karışımları için Bölüm 5.4.1’de verilen pişirme testleri uygulanmıştır. Mooney testleri 130 °C’de ilgili standarda göre yapılmış olup, MDR testleri Bölüm 6.2’de belirlenen koşullarda (sırt karışımları için 160 °C x 15 dk, çelik kord kaplama karışımları için 160 °C x 16 dk ve yanak karışımları için 145 °C x 33 dk) yapılmıştır.

Tablo 6.8. Sırt karışımlarının Mooney test sonuçları

Özellik	Birim	Karışım kodları				
		SK1	SK2	SD4	SD6	SD9
IV	MU	60,50±1,21	60,40±0,46	61,50±0,42	61,65±0,92	63,15±0,21
MV	MU	39,20±0,61	39,63±0,46	39,75±0,49	40,15±0,07	40,30±0,01
ML (1+4)	MU	39,60±0,61	40,17±0,49	40,40±0,42	40,80±0,14	40,95±0,07
t5	dk	18,24±0,58	19,44±0,24	19,95±1,58	19,35±0,75	18,98±0,08
t35	dk	23,65±0,59	24,90±0,22	25,38±1,85	24,75±1,12	24,16±0,04

Sırt karışımları (SK1, SK2, SD4, SD6 ve SD9) için Mooney viskozimetre ile ilgili sonuçlar Tablo 6.8 ve ilgili cihaz çıktıları WS-ZnO ve Ac-ZnO’ya göre kıyasla Şekil 6.7’de verilmiştir. Lastik teknolojisinde kabul gören esaslara göre, değerler % 5 - % 10 içerisinde kaldığında aralarında fark olmadığı kabul edilmektedir. Tablo 6.8’de görüldüğü üzere Mooney testi ile belirlenen IV, MV, ML (1+4), t5 ve t35 değerleri kontrol ve deneme karışımları için %5 civarında farklılık göstermektedir, bu durumda standart sapmalar da göz önüne alınarak, pişme başlangıcında tüm karışımların benzer davranış gösterdiği sonucuna varılmıştır. Böylece, deneme karışımlarının ekstruder aşamasında kontrol karışımları ile benzer parametreler kullanılarak işlenebileceği ortaya çıkmaktadır. Herhangi bir kalıp revizyonu ya da proses parametresi (hat hızı, kafa çıkış sıcaklığı vb.) değişikliği yapma gereği olmayacaktır. Sonuç olarak, sırt karışımları için Mooney test sonuçları, kompozit ZnO malzemelerinin viskoziteyi etkilemediğini

göstermektedir ve bu sonuçlar (Vatansever ve Polat, 2010) çalışmasıyla paralellik göstermektedir.



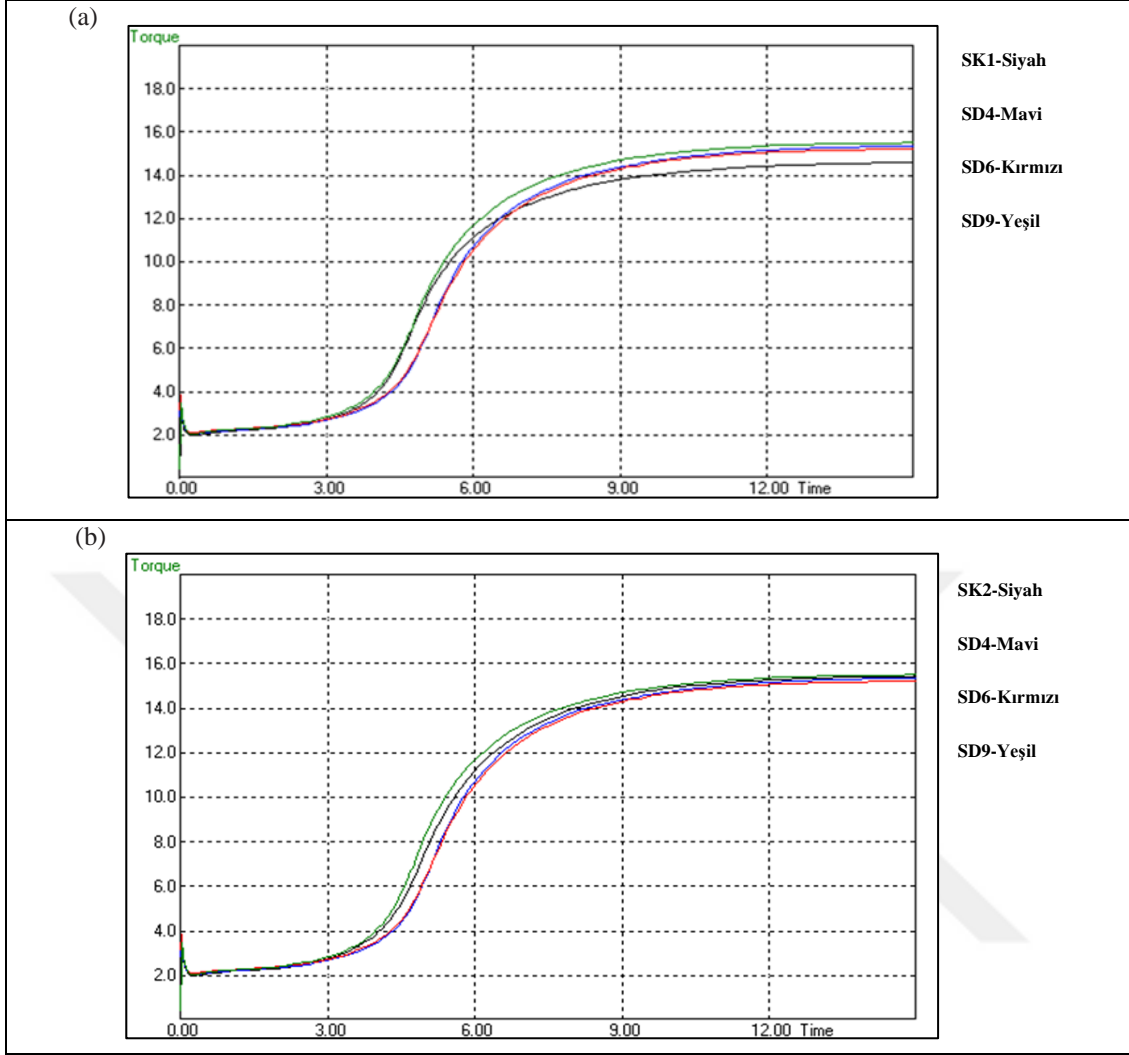
Şekil 6.7. Deneme sırt karışımlarının Mooney test cihaz çıktıları (a) Kontrol WS-ZnO'ya kıyasla, (b) Kontrol Ac-ZnO'ya kıyasla

Sırt karışımları için MDR test sonuçları Tablo 6.9'da ve cihaz çıktıları, kontrol malzemelerine kıyasla, Şekil 6.8'de verilmiştir. Testler, bu karışımlar için daha önce de belirtildiği gibi 160 °C x 15 dk koşulunda yapılmıştır. Tablo 6.9'dan anlaşıldığı üzere, tüm kontrol ve deneme karışımlarının kritik tork (ML, MH, S' @ ts2, S' @ t10 ve S' @ t50) ve kritik süre (t10, t50 ve t90) değerleri yaklaşık % 5 civarında farklılık göstermekte olup, standart sapmalar da dikkate alındığında, pişme özelliklerinin aynı olduğu kabul edilmektedir. Hesaplanan CRI değerleri, Şekil 6.8'de verilen grafik eğrilerinin eğimlerinden de anlaşılacağı gibi, tüm karışımların aynı hızda piştiğini göstermektedir.

Tüm karışımların aynı işlenebilirliğe sahip olduğu, Mooney testinde elde edilen MV (Tablo 6.8) değerlerine benzer şekilde, MDR testinin ML değerleri açısından da görülmektedir. Emniyetli pişme süresini gösteren Mooney t5 değerleri (Tablo 6.8) ile MDR ts2 değerleri tüm karışımlar için benzerdir. Bu sonuç, deneme karışımlarının kontrol karışımlarına benzer şekilde erken yanma problemi göstermeyeceğini belirtmektedir. Mekanik özelliklerle ilişkilendirilecek olan MH değeri, WS-ZnO kontrol malzemesini kullanan SK1 karışımı için diğer karışımlara göre, kabul edilebilir limitler arasında olsa bile, bir miktar düşüktür. Böylece, bu karışımın mekanik özelliklerinin diğerlerine göre daha düşük olacağı beklenmektedir. Tüm ZnO malzemeleri arasında WS-ZnO en düşük BET yüzey alanı değerine (Tablo 6.1), dolayısıyla en büyük partikül boyutuna sahiptir. Bu durumda, bu malzeme ile hazırlanan SK1 kontrol karışımının diğerlerine göre daha yavaş pişme özelliğine sahip olması öngörülebilir. Ancak, Tablo 6.2'de verilen asidite değerleri en düşük pH değerinin de bu malzemeye ait olduğunu göstermektedir. Bu durumda, pişmenin daha hızlanması beklenir. Bu iki etken (partikül boyutu ve pH değeri) pişmeyi birbirlerini ters yönde etkiledikleri için, WS-ZnO kullanan SK1 kontrol karışımı da diğer kontrol ve deneme karışımları ile benzer pişme durumu göstermiştir (Thaptong ve diğ., 2019).

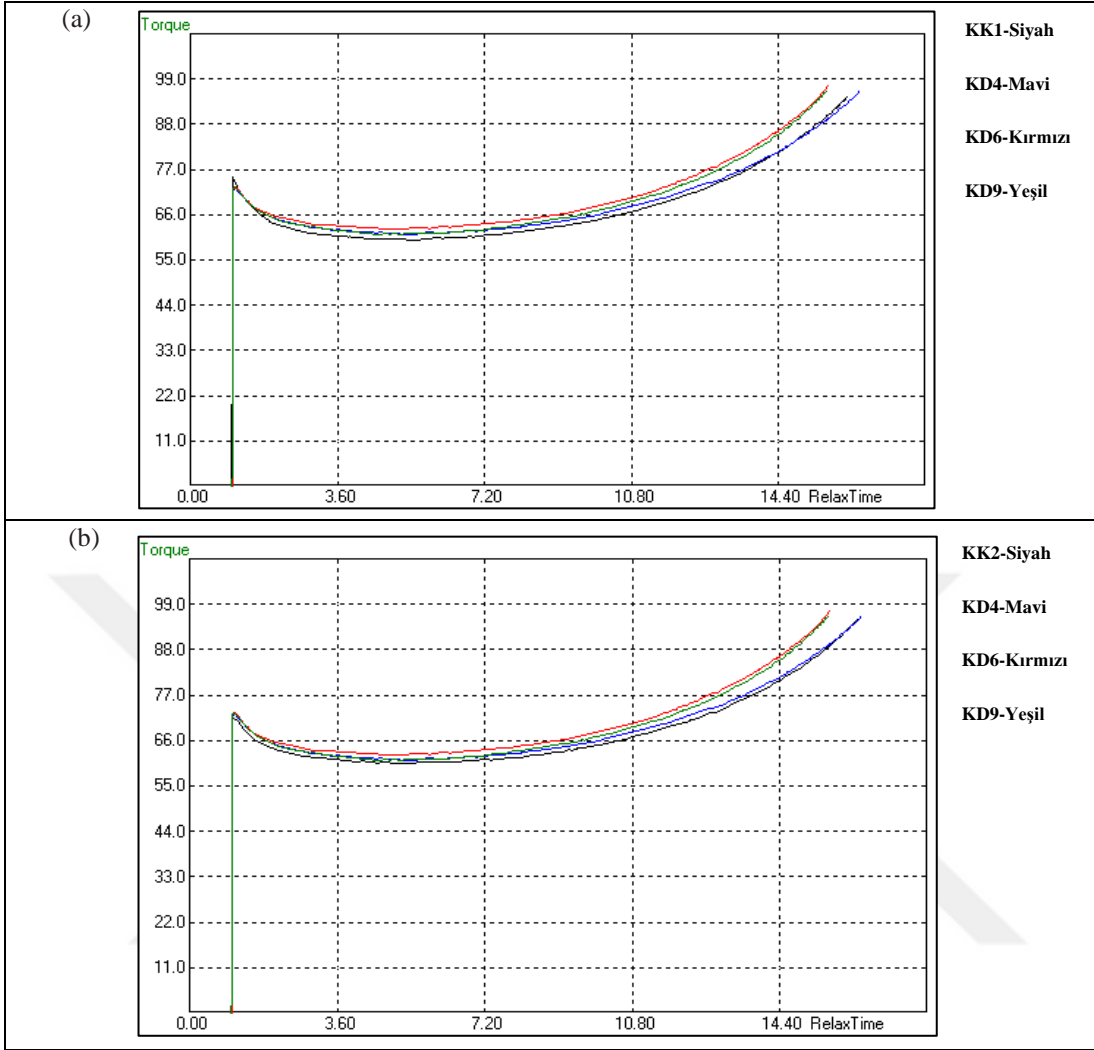
Tablo 6.9. Sırt karışımlarının MDR test sonuçları

Özellik	Birim	Karışım kodları				
		SK1	SK2	SD4	SD6	SD9
ML	dNm	2,01±0,05	1,99±0,02	2,03±0,01	2,05±0,05	2,03±0,04
MH	dNm	14,74±0,29	15,33±0,22	15,31±0,05	15,30±0,08	15,23±0,26
MH-ML	dNm	12,73±0,24	13,33±0,25	13,28±0,05	13,25±0,16	13,20±0,23
CRI	-	24,53±1,58	24,55±0,78	25,09±1,58	25,23±1,33	25,28±0,49
ts2	dk	3,97±0,12	4,14±0,08	4,28±0,17	4,22±0,16	4,02±0,02
t10	dk	3,54±0,09	3,70±0,07	3,85±0,15	3,80±0,14	3,61±0,02
t50	dk	4,94±0,11	5,34±0,09	5,38±0,24	5,35±0,22	5,06±0,02
t90	dk	8,15±0,24	8,22±0,12	8,27±0,42	8,19±0,36	7,97±0,17
S' @ ts2	dNm	4,02±0,06	4,00±0,03	4,04±0,01	4,05±0,05	4,04±0,05
S' @ t10	dNm	3,28±0,08	3,33±0,01	3,35±0,02	3,37±0,05	3,35±0,07
S' @ t50	dNm	8,37±0,17	8,67±0,10	8,67±0,02	8,67±0,02	8,64±0,15
S' @ t90	dNm	13,47±0,26	14,00±0,20	13,98±0,05	13,97±0,07	13,90±0,23



Şekil 6.8. Deneme sırt karışımlarının MDR test cihaz çıktıları (a) Kontrol WS-ZnO'ya kıyasla, (b) Kontrol Ac-ZnO'ya kıyasla

Kuşak kaplama karışımları (KK1, KK2, KD4, KD6 ve KD9) için Mooney viskozimetre ile ilgili sonuçlar Tablo 6.9 ve ilgili cihaz çıktıları WS-ZnO ve Ac-ZnO'ya göre kıyasla Şekil 6.9'de verilmiştir. Tablo 6.9'da görüldüğü gibi karışımların işlenebilirliğinin hakkında bilgi veren ML (1+4) Mooney viskozite değerleri standart sapmalar göz önünde bulundurulduğunda tüm karışımlar için benzerlik göstermektedir. Karışımların pişme öncesinde ilgili sıcaklıkta işlenebileceği süreyi ifade eden  $t_5$  değerleri tüm karışımlar için aynıdır. Bir diğer kritik süre olan  $t_{35}$ , tüm karışımlar için benzer olup, pişme özelliklerinin deneme malzemelerinden etkilenmediğini göstermektedir. Şekil 5.8'de verilen Mooney viskozite cihaz çıktılarından da anlaşıldığı üzere, kuşak kaplama karışımları için kompozit ZnO malzemelerinin viskoziteyi etkilemediği ve kontrol malzemeleri ile benzer işlenebilirliğe sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 6.9. Deneme kuşak kaplama karışımlarının Mooney test cihaz çıktıları (a) Kontrol WS-ZnO'ya kıyasla, (b) Kontrol Ac-ZnO'ya kıyasla

Tablo 6.10. Kuşak kaplama karışımlarının Mooney test sonuçları

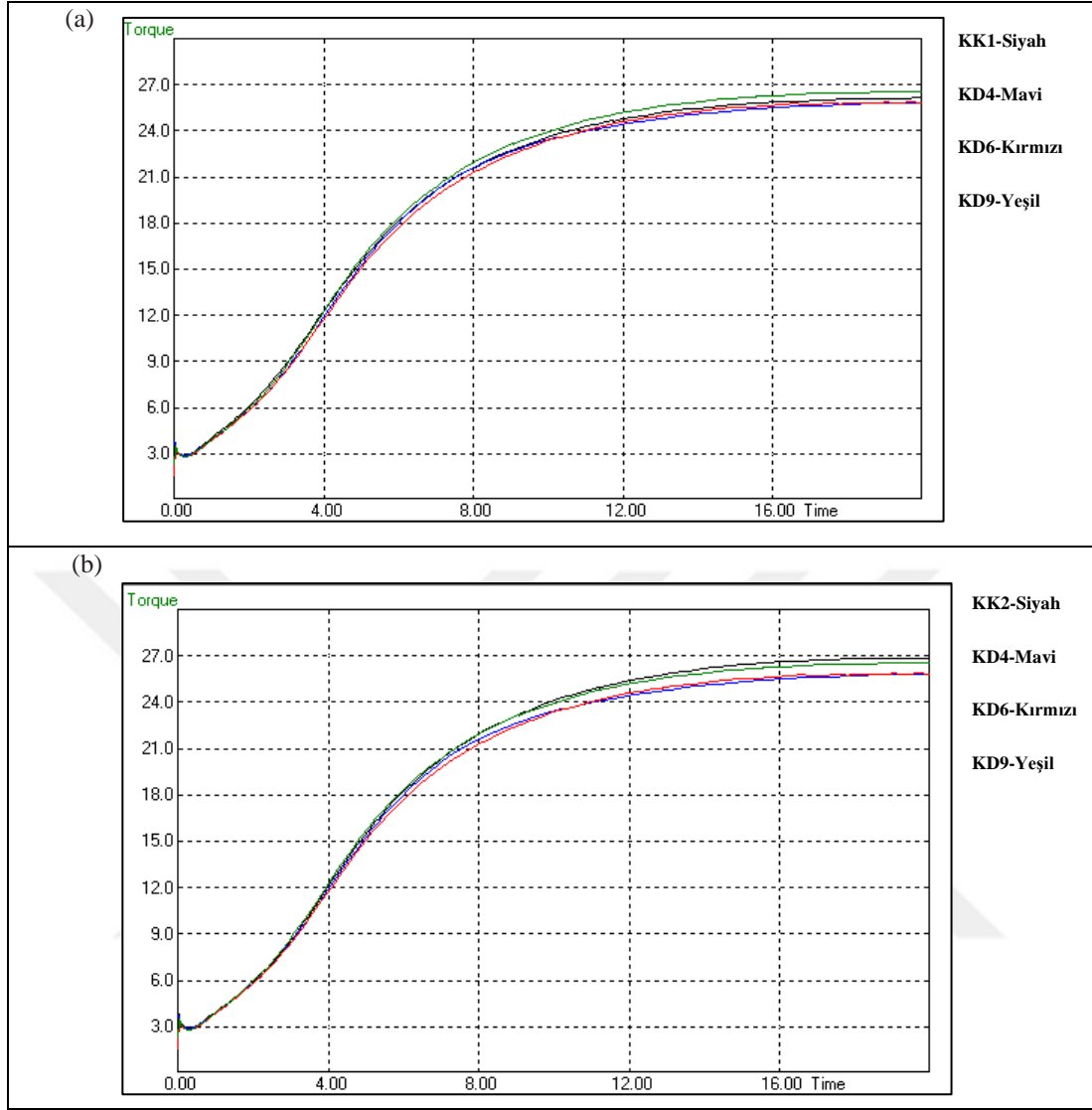
Özellik	Birim	Karışım kodları				
		KK1	KK2	KD4	KD6	KD9
IV	MU	70,53±1,60	69,93±1,86	69,37±0,51	70,20±0,87	70,57±0,50
MV	MU	59,13±1,00	58,13±1,64	57,73±0,90	58,53±0,61	58,93±0,38
ML (1+4)	MU	59,13±1,00	58,13±1,64	57,80±0,87	58,57±0,57	58,93±0,38
t5	dk	9,76±0,16	9,94±0,26	9,87±0,13	9,83±0,05	9,78±0,13
t35	dk	16,65±0,22	17,42±0,54	17,26±0,25	17,20±0,14	16,85±0,16

Kuşak kaplama karışımları için MDR test sonuçları Tablo 6.11'de ve kontrol malzemelerine kıyasla cihaz çıktıları Şekil 6.10'de verilmiştir. Test sırasında, numunenin basınç altında ısınmasıyla birlikte görülen ve en düşük tork değeri olan ML değerleri,

Tablo 6.10’da verilen MV verileriyle paraleldir ve kontrol ve deneme karışımları benzer işlenebilirliğe sahiptir. Karışımların sahip olduğu en yüksek tork değerini ifade eden MH değerinin, karışımda kompozit ZnO malzemelerinin kullanımı ile değişmediği görülmüştür. MDR test sonuçlarından elde edilen ts2 değeri, Mooney vizkozimetre testinin bir çıktısı olan t5 yanma süresi ile ilişkilidir ve Tablo 6.10’da verilen değerlerle benzer eğilim göstermektedir. Maksimum tork ve minimum tork farkını ifade eden ve aynı zamanda Şekil 6.10’daki grafiklerin eğimlerinden de görülebilen CRI değerleri kontrol ve denem karışımları için ihmal edilebilir farklılıklar olmakla birlikte benzerdir. Tüm karışımların pişme ve tork değerlerinin ortalamaları, verilen standart sapma değerleri göz önünde bulundurulduğunda oldukça yakındır. Dolayısıyla kompozit ZnO malzemelerinin, kontrol malzemeleri olan WS-ZnO ve Ac-ZnO ile karşılaştırıldığında benzer pişme özellikleri sağladığı sonucuna varılabilir.

Tablo 6.11. Kuşak kaplama karışımlarının MDR test sonuçları

Özellik	Birim	Karışım kodları				
		KK1	KK2	KD4	KD6	KD9
ML	dNm	2,82±0,03	2,81±0,07	2,75±0,04	2,80±0,05	2,79±0,00
MH	dNm	27,24±0,19	28,16±0,61	27,06±0,59	28,40±0,67	28,67±0,10
MH-ML	dNm	24,42±0,16	25,35±0,59	24,31±0,55	25,60±0,71	25,88±0,10
CRI	%/dk	11,67±0,06	11,41±0,07	12,10±0,37	11,91±0,79	11,37±0,21
ts2	dk	1,59±1,59	1,66±0,03	1,59±0,03	1,59±0,02	1,58±0,01
t10	dk	1,82±0,02	1,93±0,01	1,82±0,01	1,87±0,03	1,88±0,01
t50	dk	4,76±0,01	4,94±0,03	4,71±0,02	4,84±0,06	4,83±0,04



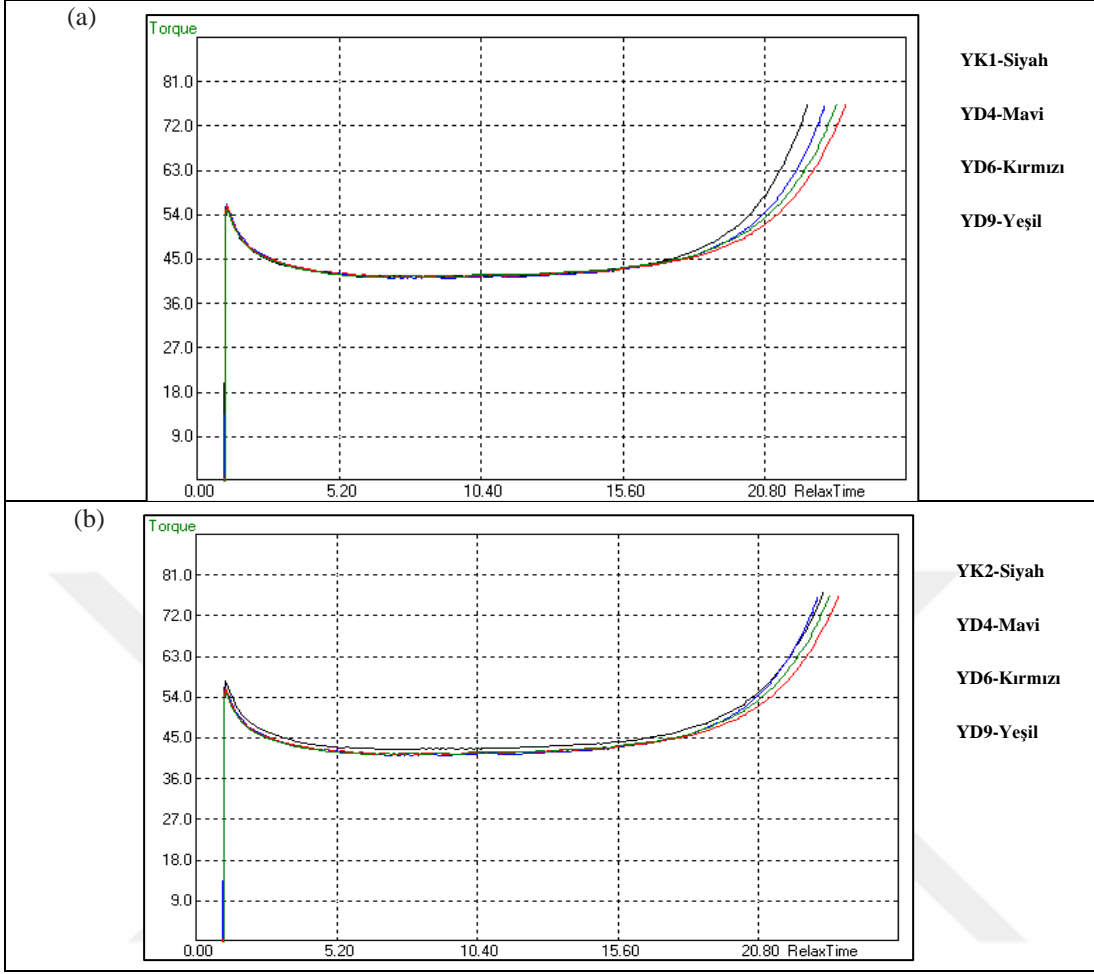
Şekil 6.10. Kuşak kaplama karışımlarının MDR eğrileri (a) WS-ZnO'ya kıyasla, (b) Ac-ZnO'ya kıyasla

Yanak karışımları (YK1, YK2, YD4, YD6 ve YD9) için Mooney viskozimetre ile ilgili sonuçlar Tablo 6.12 ve ilgili cihaz çıktıları WS-ZnO ve Ac-ZnO'ya göre kıyasla Şekil 6.11'de verilmiştir. Tablo 6.12'de verilen ML (1+4) Mooney viskozite değerleri kontrol ve deneme karışımları için benzer olup, proses edilebilirlikleri oldukça yakındır. Karışımların pişme özelliklerini değerlendirirken iki kritik süre olan  $t_5$  ve  $t_{35}$  değerleri, tüm karışımlar için benzer olup, pişme özelliklerinin deneme malzemelerinden etkilenmediğini göstermektedir. Şekil 6.11'de verilen Mooney viskozite cihaz çıktılarından da anlaşıldığı üzere, kuşak kaplama karışımları için kompozit ZnO malzemelerinin viskoziteyi etkilemediği ve kontrol malzemeleri ile benzer işlenebilirliğe sahip olduğu görülmektedir.

Tablo 6.12. Yanak karışımlarının Mooney test sonuçları

Özellik	Birim	Karışım kodları				
		YK1	YK2	YD4	YD6	YD9
IV	MU	54,4±1,70	55,65±0,64	55,53±0,61	54,60±1,62	54,55±0,64
MV	MU	41,05±0,35	41,23±1,07	40,97±0,21	40,63±0,71	40,45±1,34
ML (1+4)	MU	41,70±0,42	42,13±0,95	41,73±0,25	41,43±0,71	41,10±1,27
t5	dk	18,35±0,35	18,76±0,51	18,60±0,22	18,28±0,45	18,13±0,53
t35	dk	22,75±0,57	23,67±0,63	23,23±0,28	23,01±0,67	22,80±0,88

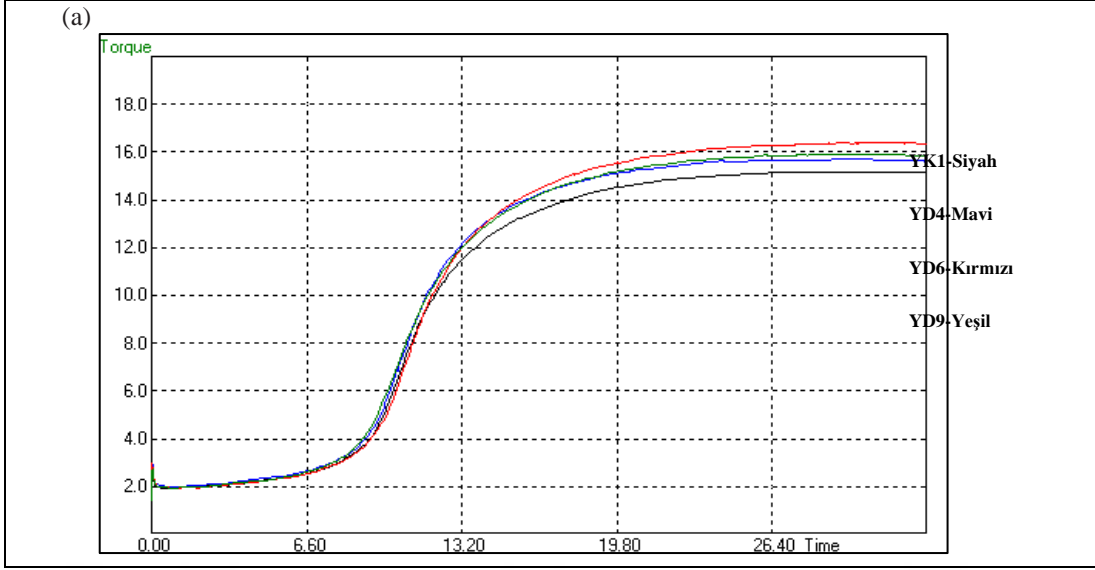
Yanak karışımlarının MDR test sonuçları Tablo 6.13’de ve kontrol malzemelerine kıyasla cihaz çıktıkları Şekil 6.12’de verilmiştir. Tabloda verilen ML ve MH değerleri göz önünde bulundurulduğunda, YK1 ve YK2 karışımlarına kıyasla, YD4, YD6 ve YD9 karışımlarında herhangi bir değişiklik görülmemiştir. MDR testi ile elde edilen tork değerleri Tablo 6.10’da verilen Mooney viskozimetre değerleri ile paralellik göstermektedir. Sonuçlar, kompozit ZnO malzeme kullanımının karışımın işlenebilirlik performansına olumsuz bir etkisi olmadığını ispatıdır. En düşük tork değeri olan ML değerleri, Tablo 6.9’da verilen MV verileriyle paraleldir ve kontrol ve deneme karışımları benzer işlenebilirliğe sahiptir. Karışımların sahip olduğu en yüksek tork değerini ifade eden MH değerinin, karışımda kompozit ZnO malzemelerinin kullanımı ile değişmediği görülmüştür. MDR test sonuçlarından elde edilen ts2 değeri, Tablo 6.10’da yer alan t5 değerleri ile benzerlik göstermekte olup, kompozit ZnO malzeme kullanımıyla birlikte güvenli pişme gerçekleşmiştir. CRI değerlerine bakıldığı zaman kontrol ve deneme karışımları arasında farklılık görülmemektedir. Şekil 6.12’de verilen grafiklerin eğimlerinden de aynı çıkarımlar yapılmaktadır. Kompozit ZnO malzemelerinin kontrol malzemeleri yerine yanak karışımlarında kullanımı, elde edilen pişme özellikleri açısından uygundur.



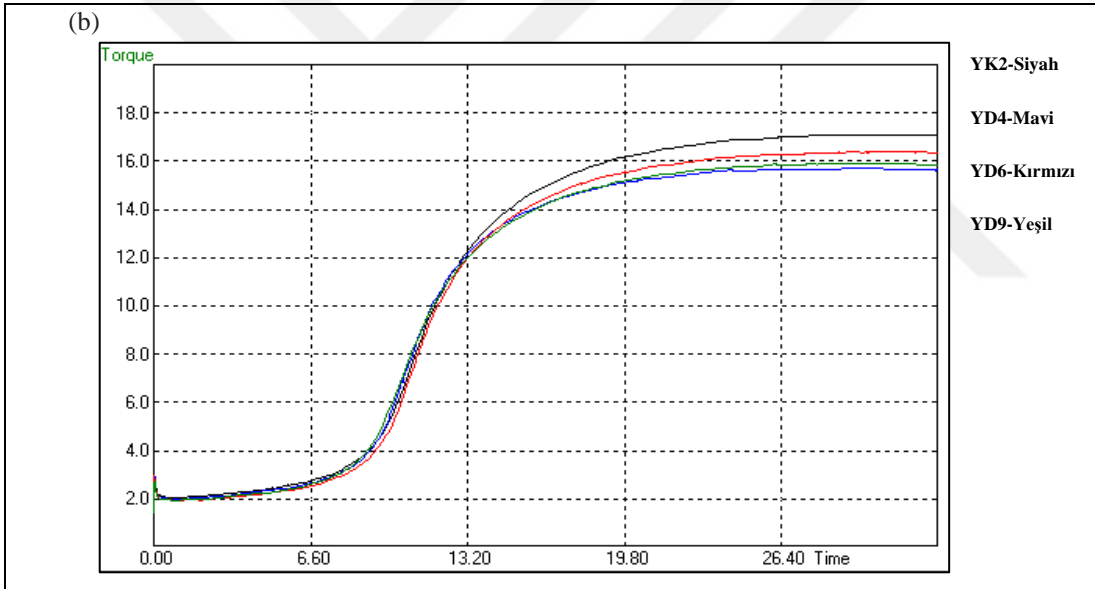
Şekil 6.11. Yanak karışımlarının Mooney eğrileri (a) WS-ZnO'ya kıyasla, (b) Ac-ZnO'ya kıyasla

Tablo 6.13. Yanak karışımlarının MDR test sonuçları

Özellik	Birim	Karışım kodları				
		YK1	YK2	YD4	YD6	YD9
ML	dNm	1,96±0,03	1,97±0,04	2,03±0,04	1,97±0,06	2,01±0,04
MH	dNm	16,01±0,33	16,35±0,49	15,98±0,16	16,27±0,35	16,56±0,39
MH-ML	dNm	14,05±0,33	14,37±0,51	13,95±0,14	14,31±0,39	14,55±0,36
CRI	%/dk	11,59±0,79	11,58±0,71	11,74±0,14	11,62±0,37	11,73±0,45
ts2	dk	8,89±0,36	9,14±0,38	9,06±0,07	9,17±0,44	8,91±0,37
t10	dk	8,19±0,26	8,43±0,39	8,35±0,03	8,33±0,41	8,28±0,29
t50	dk	10,95±0,38	11,53±0,50	11,13±0,07	11,20±0,69	11,18±0,46
TC90	dk	17,55±0,39	17,91±0,86	17,58±0,16	17,78±0,22	17,44±0,21
S' @ ts2	dNm	3,97±0,03	3,98±0,03	4,01±0,01	3,97±0,06	3,98±0,03
S' @ t10	dNm	3,34±0,08	3,45±0,02	3,39±0,03	3,40±0,04	3,40±0,04
S' @ t50	dNm	8,82±0,28	9,32±0,10	8,94±0,11	9,12±0,15	9,08±0,13
S' @ t90	dNm	14,30±0,48	15,20±0,21	14,48±0,18	14,84±0,31	14,77±0,24



Şekil 6.12. Yanak karışımlarının MDR eğrileri (a) WS-ZnO'ya kıyasla, (b) Ac-ZnO'ya



Şekil 6.12. (Devam) Yanak karışımlarının MDR eğrileri (a) WS-ZnO'ya kıyasla, (b) Ac-ZnO'ya kıyasla

### 6.3.2. Karışımların Çekme ve Isıl Yaşlandırma Testleri

Kontrol ve deneme karışımlarının mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla çekme ve ısıl yaşlandırma testleri yapılmış olup, hazırlanan 3 harmanın her birinden 5'er ölçüm yapılarak toplam 15 değerın ortalama ve standart sapma değerleri raporlanmıştır. Karışımların, ısıl yaşlandırma öncesi (0 saat) ve 70 °C'de ısıl yaşlandırma sonrası (24,

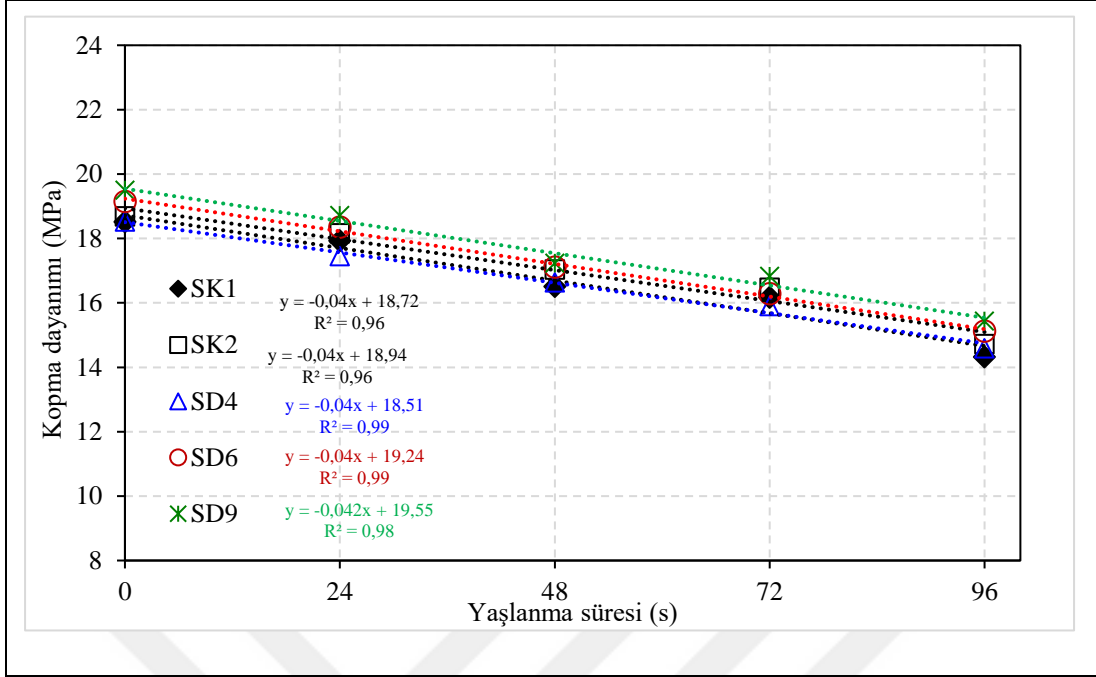
48, 72 ve 96 saat) kopma dayanımı, kopmada uzama, M100, M200 ve M300 değerleri ölçülmüştür.

Sırt karışımlarının kopma dayanımı test sonuçları Tablo 6.14'te ve Şekil 6.13'te verilmiştir. Kontrol ve deneme karışımları için tüm sonuçlar lastik teknolojisinin bu test için kabul ettiği  $\pm$  % 10 değişim aralığı içerisinde olup, standart sapmalar da dikkate alındığında yaşlandırma öncesi ve sonrası sonuçların benzer olduğu görülmüş, kompozit ZnO malzemelerinin karışımın kopma dayanımını değiştirmedeği belirlenmiştir. Şekil 6.13'ten de görüldüğü gibi deneme ve kontrol karışımlarının ısıtılma hızı aynıdır, verilen doğrusal grafiklerin aynı eğime (-0,04 MPa/s) sahip olması bunu göstermektedir. Benzer sonuçlar, Thaptong ve diğ. tarafından SBR/BR karışımları üzerinde yapılan çalışmada da ortaya konulmuştur. Tablo 6.9'da verilen MH değerleri, Tablo 6.14'te verilen kopma dayanımı sonuçları ile karşılaştırıldığında, beklendiği gibi, SK1 karışımının diğer karışımlara göre bir miktar daha düşük mekanik özelliklere sahip olduğu görülmüştür. Sırt karışımlarının ısıtılma sonrası kalan kopma dayanımı değerleri yüzdesel olarak Denklem (6.1) ile hesaplanmış ve sonuçlar Tablo 6.15'te verilmiştir (Börüban Bingöl ve diğ., 2024). Tabloda verilen değerler dikkate alındığında 24 saatlik yaşlandırma süresinde karışımların kopma dayanımında sadece  $\pm$  %3 kadar bir kayıp gözlenirken, en uzun yaşlandırma süresi olan 96 saatte kayıp  $\pm$  %20 olarak gerçekleşmiştir.

$$\text{Kalan/gelişen/artan değer} = \frac{\text{Isıl yaşlandırma sonrası değer}}{\text{Isıl yaşlandırma öncesi değer}} \times 100 \quad (6.1)$$

Tablo 6.14. Sırt karışımlarının kopma dayanımı sonuçları (MPa)

Yaşlandırma süresi (s)	Karışım				
	SK1	SK2	SD4	SD6	SD9
0	18,52 $\pm$ 1,26	18,69 $\pm$ 2,88	18,53 $\pm$ 1,13	19,16 $\pm$ 3,47	19,50 $\pm$ 3,51
24	17,93 $\pm$ 1,01	18,16 $\pm$ 0,14	17,46 $\pm$ 2,63	18,36 $\pm$ 2,78	18,71 $\pm$ 1,42
48	16,51 $\pm$ 3,55	17,04 $\pm$ 5,91	16,64 $\pm$ 4,40	17,12 $\pm$ 2,32	17,24 $\pm$ 3,90
72	16,17 $\pm$ 0,88	16,48 $\pm$ 3,78	15,90 $\pm$ 1,46	16,29 $\pm$ 4,40	16,83 $\pm$ 2,27
96	14,33 $\pm$ 4,63	14,73 $\pm$ 2,74	14,60 $\pm$ 3,33	15,13 $\pm$ 4,51	15,44 $\pm$ 1,66



Şekil 6.13. Sırt karışımlarının kopma dayanım değerlerinin ısı yaşlandırma ile değişimi

Tablo 6.15. Sırt karışımlarının ısı yaşlandırma sonrası kalan kopma dayanımı değerleri (%)

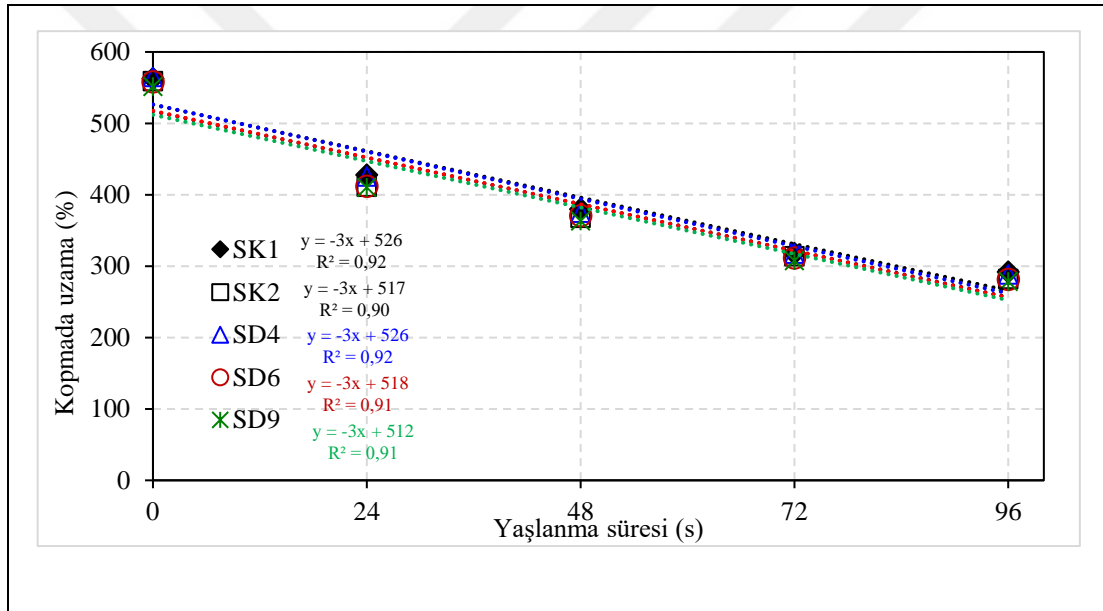
Yaşlandırma süresi (s)	Karışım				
	SK1	SK2	SD4	SD6	SD9
0	100	100	100	100	100
24	97	97	93	98	100
48	89	91	89	92	92
72	87	88	85	87	90
96	77	79	78	81	83

Sırt karışımlarının kopmada uzama test sonuçları Tablo 6.16'da ve Şekil 6.14'te verilmiştir. Kontrol ve deneme karışımları için tüm sonuçlar lastik teknolojisinin bu test için kabul ettiği  $\pm$  %10 değişim aralığının çok altında olup, yaşlandırma öncesi ve sonrası sonuçların benzer olduğu görülmüş, kompozit ZnO malzemelerinin karışımın kopmada uzama özelliğini değiştirmediği belirlenmiştir. Şekil 6.14'ten de görüldüğü gibi deneme ve kontrol karışımlarının ısı yaşlanma hızı aynıdır, verilen doğrusal grafiklerin aynı eğime (-3 %/s) sahip olması bunu göstermektedir. Sırt karışımlarının ısı yaşlandırma sonrası kalan kopmada uzama değerleri yüzdesel olarak Denklem (6.1) ile hesaplanmış ve sonuçlar Tablo 6.17'de verilmiştir. Tabloda verilen değerler dikkate alındığında 24

saatlik yaşlandırma süresinde karışımların kopmada uzama değerleri %  $26 \pm 1$  kadar düşüş gösterirken, en uzun yaşlandırma süresi olan 96 saatte değerler yarıya düşmüş, kayıp %  $49 \pm 1$  olarak gerçekleşmiştir.

Tablo 6.16. Sırt karışımlarının kopmada uzama sonuçları (%)

Yaşlandırma süresi (s)	Karışım				
	SK1	SK2	SD4	SD6	SD9
0	563±8	559±5	565±6	558±5	552±7
24	428±2	411±5	426±6	412±4	410±8
48	380±5	368±1	375±2	371±5	363±6
72	318±6	314±5	317±5	311±3	307±4
96	292±5	282±5	288±2	281±3	278±4



Şekil 6.14. Sırt karışımlarının kopmada uzama (%) değerlerinin ısı yaşlandırma ile değişimi

Tablo 6.17. Sırt karışımlarının ısı yaşlandırma sonrası kalan kopmada uzama değerleri (%)

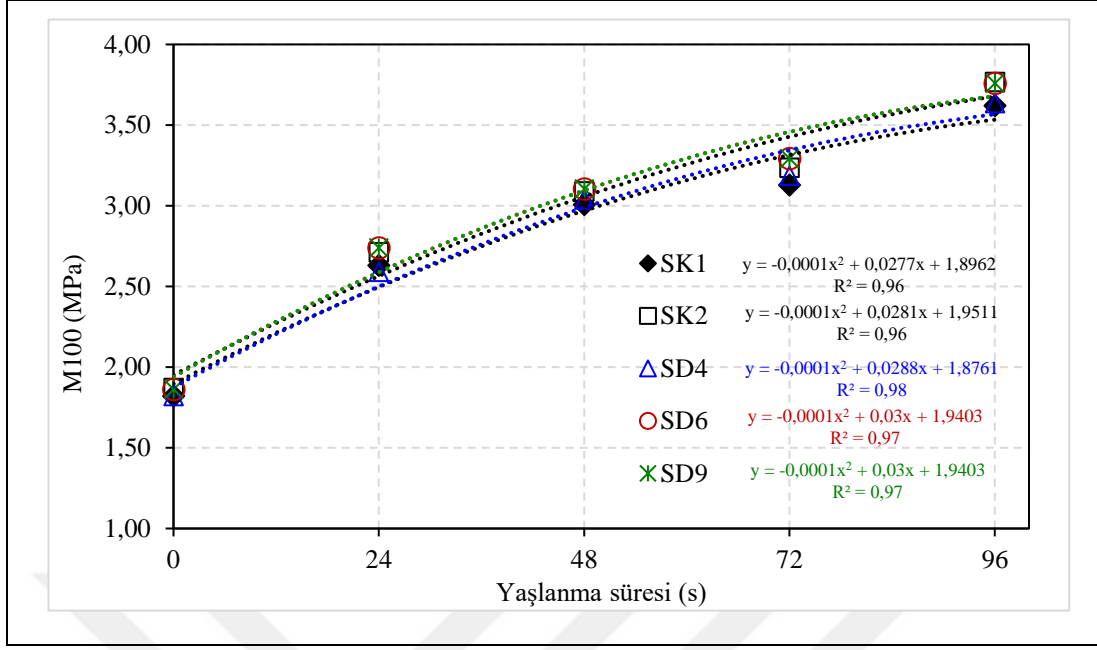
Yaşlandırma süresi (s)	Karışım				
	SK1	SK2	SD4	SD6	SD9
0	100	100	100	100	100
24	76	73	75	74	74
48	68	66	66	66	66
72	57	56	56	56	56
96	52	50	51	50	50

Sırt karışımlarının % 100, % 200 ve % 300 uzamadaki gerilim değerleri (modül), M100, M200 ve M300 olarak ölçülmüştür. Yaşlandırma sırasında, tüm karışımların modül değerlerinde bir artış gözlenmektedir. Bu durum, Bölüm 6.3.1’de anlatılan çapraz bağlanmanın devam etmesiyle açıklanabilir. Artan çapraz bağ yoğunluğu, polimer zincirlerinin hareketliliğini kısıtlar ve dolayısıyla modül değerlerinin artmasına neden olur. Isıl yaşlandırmanın başında modül değerlerindeki artış daha hızlı olup, uzun sürelerde bu artışta yavaşlama gözlenmektedir. Bu durum, daha fazla çapraz bağ oluşumunun karışımın mekanik özelliklerine daha fazla katkı vermediğini ve kopmada uzama değerine ulaşıldığında karışımın hasara uğradığını göstermektedir.

M100 değerleri için sonuçlar Tablo 6.18 ve Şekil 6.15’te verilmiştir. Kontrol ve deneme karışımları için tüm sonuçlar lastik teknolojisinin bu test için kabul ettiği  $\pm$  % 10 değişim aralığının çok altında olup, yaşlandırma öncesi ve sonrası sonuçların benzer olduğu görülmüş, kompozit ZnO malzemelerinin karışımın M100 değerini değiştirmedeği belirlenmiştir. Şekil 6.15’ten de görüldüğü gibi deneme ve kontrol karışımlarının M100 değerlerinin ısıl yaşlandırma hızı benzerdir. Değişkenler arasında eğri uydurma sonucu elde edilen belirleme katsayısı ( $R^2$ ) değerleri doğrusal bir ilişkiden çok ikinci dereceden bir polinoma uygunluk göstermektedir. Bu da yaşlandırma süresinin artması ile çapraz bağlanmanın mekanik özelliklere katkısının azaldığını belirtmektedir. Karışımlarının ısıl yaşlandırma sonrası gelişen M100 değerleri yüzdesel olarak Denklem (6.1) ile hesaplanmış ve sonuçlar Tablo 6.19’da verilmiştir. Tabloda verilen değerler dikkate alındığında 24 saatlik yaşlandırma süresinde karışımların M100 değerleri  $\% 45 \pm 2$  kadar artarken, en uzun yaşlandırma süresi olan 96 saatte M100 değerleri 2 katına ulaşmıştır ( $\% 100 \pm 3$ ).

Tablo 6.18. Sırt karışımlarının M100 modül değerleri (MPa)

Yaşlandırma süresi (s)	Karışım				
	SK1	SK2	SD4	SD6	SD9
0	1,82±0,14	1,87±0,14	1,82±0,14	1,86±0,38	1,86±0,25
24	2,63±0,63	2,71±0,76	2,59±0,72	2,72±1,00	2,74±1,30
48	3,01±0,58	3,09±0,90	3,04±0,43	3,07±0,38	3,11±1,44
72	3,13±0,38	3,24±1,80	3,19±1,00	3,24±0,88	3,29±1,63
96	3,62±0,14	3,77±0,76	3,64±0,29	3,82±0,75	3,76±0,52



Şekil 6.15. Sırt karışımlarının M100 değerlerinin ısıtma süresiyle değişimi

Tablo 6.19. Sırt karışımlarının ısıtma sonrası gelişen M100 değerleri (%)

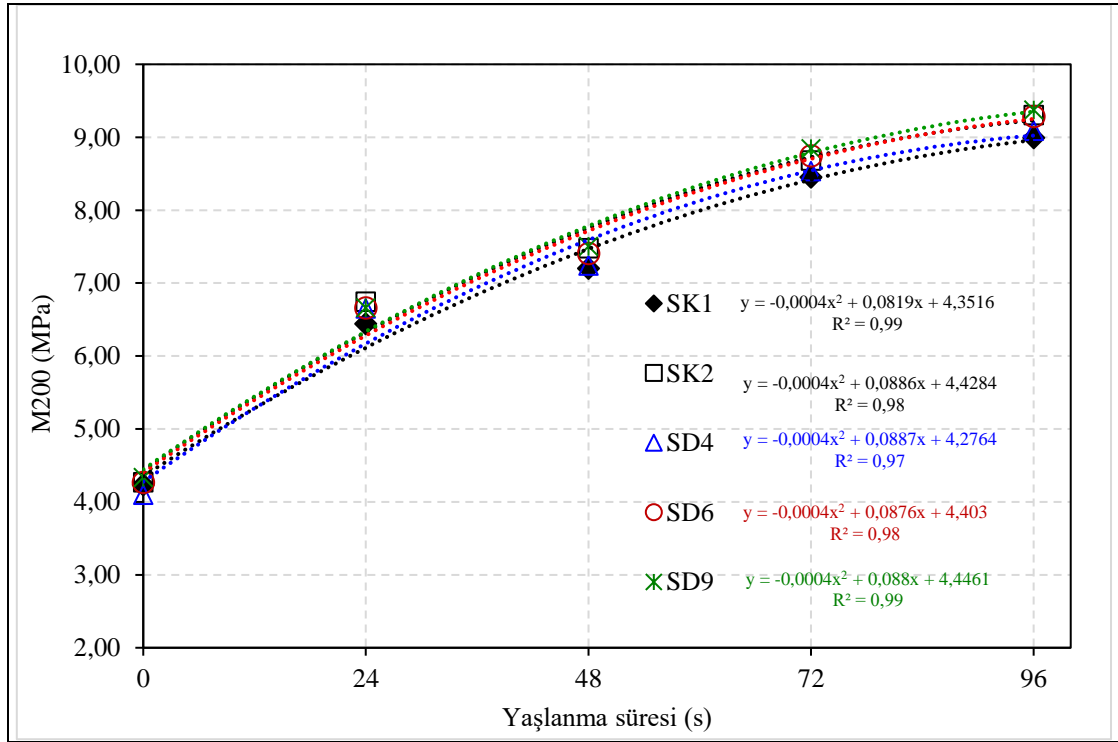
Yaşlandırma süresi (s)	Karışım				
	SK1	SK2	SD4	SD6	SD9
0	100	100	100	100	100
24	144	145	142	147	147
48	165	165	167	166	167
72	172	173	175	175	177
96	199	201	200	206	202

M200 değerleri için sonuçlar Tablo 6.20 ve Şekil 6.16'da verilmiştir. Kontrol ve deneme karışımları için tüm sonuçlar lastik teknolojisinin bu test için kabul ettiği  $\pm$  % 10 değişim aralığının çok altında olup, yaşlandırma öncesi ve sonrası sonuçların benzer olduğu görülmüş, kompozit ZnO malzemelerinin karışımın M200 değerini değiştirmedeği belirlenmiştir. Şekil 6.16'nın gösterdiği gibi tüm karışımların M200 değerlerinin ısıtma hızı benzerdir ve  $R^2$  değerlerine göre değişkenler arasındaki ilişki ikinci dereceden bir polinoma daha uygundur. Karışımlarının ısıtma sonrası gelişen M200 değerleri yüzdesel olarak Denklem (6.1) ile hesaplanmış ve sonuçlar Tablo 6.21'de verilmiştir. Tabloda verilen değerler dikkate alındığında 24 saatlik yaşlandırma süresinde

karişimların M200 değerleri % 56 ± 4 kadar artarken, en uzun yaşlandırma süresi olan 96 saatte M200 değerlerindeki artış 2 katın üzerindedir (% 117 ± 4).

Tablo 6.20. Sırt karişimlarının M200 modül değerleri (MPa)

Yaşlandırma süresi (s)	Karişim				
	SK1	SK2	SD4	SD6	SD9
0	4,23±0,76	4,27±0,66	4,09±0,87	4,27±0,25	4,33±0,95
24	6,44±1,51	6,74±5,43	6,65±1,38	6,66±4,58	6,66±4,40
48	7,20±1,26	7,48±4,88	7,24±2,93	7,40±3,73	7,50±1,00
72	8,45±5,35	8,68±5,85	8,53±2,38	8,74±2,32	8,84±2,90
96	8,99±0,52	9,30±1,63	9,09±1,70	9,28±2,52	9,37±0,38



şekil 6.16. Sırt karişimlarının M200 değerlerinin ısıll yaşlandırma ile değişimi

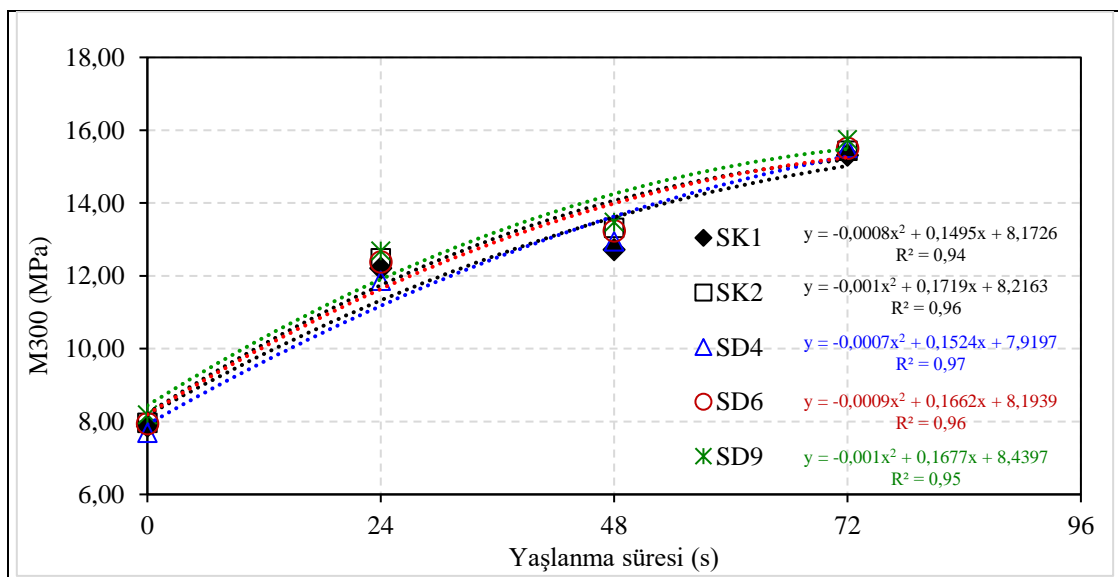
Tablo 6.21. Sırt karişimlarının ısıll yaşlandırma sonrası gelişen M200 değerleri (%)

Yaşlandırma süresi (s)	Karişim				
	SK1	SK2	SD4	SD6	SD9
0	100	100	100	100	100
24	152	158	162	156	154
48	170	175	177	174	173
72	200	203	208	205	204
96	212	218	222	218	216

M300 değerleri için sonuçlar Tablo 6.22 ve Şekil 6.17’de verilmiştir. Tablo 6.16’da görüldüğü gibi en uzun yaşlandırma süresi olan 96 saatte kopmada uzama değerleri % 300’ün altındadır. Bu nedenle, bu yaşlandırma süresi için M300 değeri mevcut değildir. Kontrol ve deneme karışımları için tüm sonuçlar lastik teknolojisinin bu test için kabul ettiği  $\pm$  % 10 değişim aralığının altında olup, yaşlandırma öncesi ve sonrası sonuçların benzer olduğu görülmüş, kompozit ZnO malzemelerinin karışımın M300 değerini değiştirmediği belirlenmiştir. Şekil 6.17’de görüldüğü gibi tüm karışımların M300 değerlerinin ısı yaşlandırma hızları, M100 ve M200’de olduğu gibi, benzerdir ve değişkenler arasındaki ilişki ikinci dereceden bir polinoma uygundur. Karışımlarının ısı yaşlandırma sonrası gelişen M300 değerleri yüzdesel olarak Denklem (5.1) ile hesaplanmış ve sonuçlar Tablo 6.23’te verilmiştir. Tabloda verilen değerler dikkate alındığında 24 saatlik yaşlandırma süresinde karışımların M300 değerleri  $\pm$  55 kadar artarken, en uzun yaşlandırma süresi olan 72 saatte M300 değerlerinde 2 kat artış vardır ( $\pm$  95).

Tablo 6.22. Sırt karışımlarının M300 modül değerleri (MPa)

Yaşlandırma süresi (s)	Karışım				
	SK1	SK2	SD4	SD6	SD9
0	7,88 $\pm$ 1,88	7,97 $\pm$ 1,09	7,69 $\pm$ 1,28	7,94 $\pm$ 1,00	8,18 $\pm$ 3,11
24	12,21 $\pm$ 4,09	12,49 $\pm$ 0,95	11,87 $\pm$ 1,32	12,39 $\pm$ 3,15	12,68 $\pm$ 2,53
48	12,72 $\pm$ 1,73	13,32 $\pm$ 4,73	12,94 $\pm$ 4,92	13,24 $\pm$ 1,00	13,48 $\pm$ 4,77
72	15,31 $\pm$ 3,99	15,44 $\pm$ 4,78	15,52 $\pm$ 6,11	15,50 $\pm$ 1,91	15,74 $\pm$ 3,62



Şekil 6.17. Sırt karışımlarının M300 değerlerinin ısı yaşlandırma ile değişimi

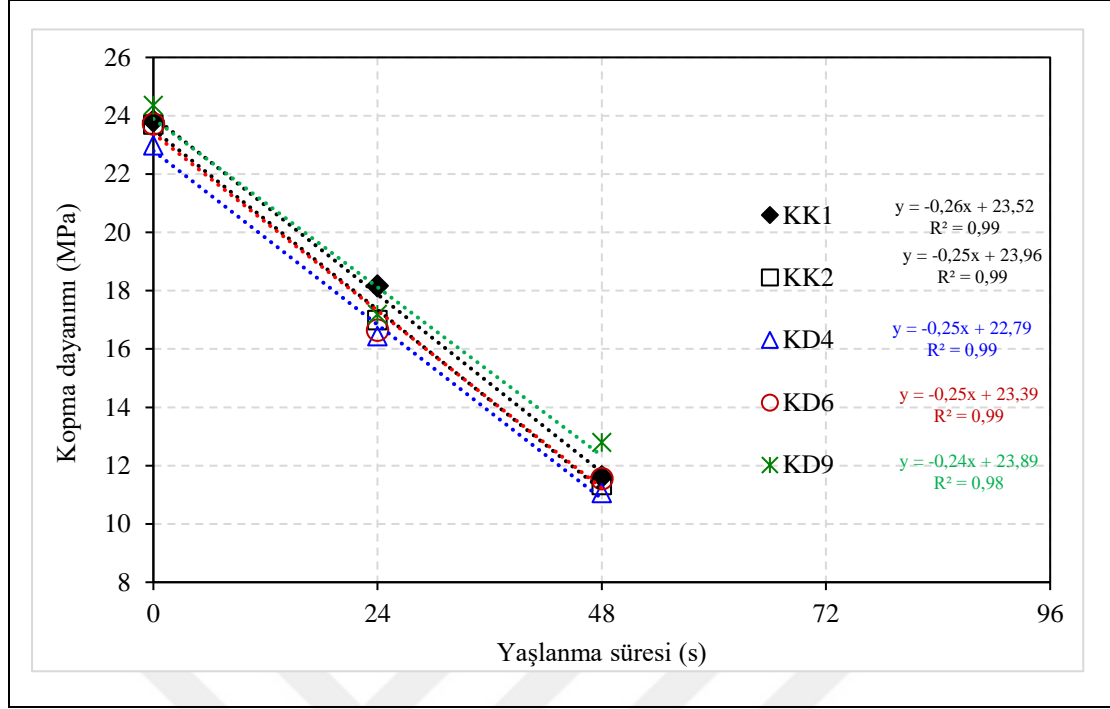
Tablo 6.23. Sırt karışımlarının ısı yaşlandırma sonrası gelişen M300 değerleri (%)

Yaşlandırma süresi (s)	Karışım				
	SK1	SK2	SD4	SD6	SD9
0	100	100	100	100	100
24	155	157	154	156	155
48	162	167	168	167	165
72	194	194	202	195	192

Kuşak kaplama karışımlarının kopma dayanımı test sonuçları Tablo 6.24'te ve Şekil 6.18'de verilmiştir. Kontrol ve deneme karışımları için tüm sonuçlar lastik teknolojisinin bu test için kabul ettiği  $\pm$  % 10 değişim aralığı içerisinde olup, tüm sonuçların benzer olduğu görülmüş, kompozit ZnO malzemelerinin karışımın kopma dayanımını değiştirmediği belirlenmiştir. Tablo 6.14'te verilen sırt karışımının kopma dayanımı değerleri ile karşılaştırıldığında NR içeren kuşak kaplama karışımının, SBR/BR içeren sırt karışımına göre, yaşlandırma öncesi daha yüksek değerlere sahip olduğu görülmektedir. Bu sonuç doğal kauçuğun daha yüksek mekanik özellikler sergilemesi ile ilgilidir (Savran, 2001). Ayrıca, doğal kauçuğun SBR ve BR ile karşılaştırıldığında daha düşük ısı dayanımı olması nedeniyle, kuşak kaplama karışımı en fazla 48 saat yaşlanmada sonuç vermiştir (Savran, 2001). Şekil 6.18'den görüldüğü gibi deneme ve kontrol karışımlarının ısı yaşlanma hızı aynıdır, verilen doğrusal grafiklerin aynı eğime (-0,25 MPa/s) sahip olması bunu göstermektedir. Kuşak kaplama karışımlarının ısı yaşlandırma sonrası kalan kopma dayanımı değerleri yüzdesel olarak Denklem (6.1) ile hesaplanmış ve sonuçlar Tablo 6.25'te verilmiştir. Tabloda verilen değerler dikkate alındığında 24 saatlik yaşlandırma süresinde karışımların kopma dayanımında  $\%28 \pm 3$  kadar bir kayıp gözlenirken, en uzun yaşlandırma süresi olan 48 saatte kayıp  $\%51 \pm 3$  olarak gerçekleşmiştir. Bu sonuçlar da bu karışımın sırt karışımına göre ısı dayanımının daha kötü olduğunu göstermektedir.

Tablo 6.24. Kuşak kaplama karışımlarının kopma dayanımı sonuçları (MPa)

Yaşlandırma süresi (s)	Karışım				
	KK1	KK2	KD4	KD6	KD9
0	23,70 $\pm$ 0,85	22,99 $\pm$ 0,62	23,72 $\pm$ 0,72	24,36 $\pm$ 1,38	23,70 $\pm$ 0,85
24	17,00 $\pm$ 0,77	16,45 $\pm$ 1,12	16,65 $\pm$ 0,63	17,19 $\pm$ 0,91	17,00 $\pm$ 0,77
48	11,34 $\pm$ 0,21	11,06 $\pm$ 0,17	11,56 $\pm$ 0,31	12,80 $\pm$ 0,85	11,34 $\pm$ 0,21



Şekil 6.18. Kuşak kaplama karışımlarının kopma dayanımı (MPa) değerlerinin ısıtılma ile değişimi

Tablo 6.25. Kuşak kaplama karışımlarının ısıtılma sonrası kalan kopma dayanımı değerleri (%)

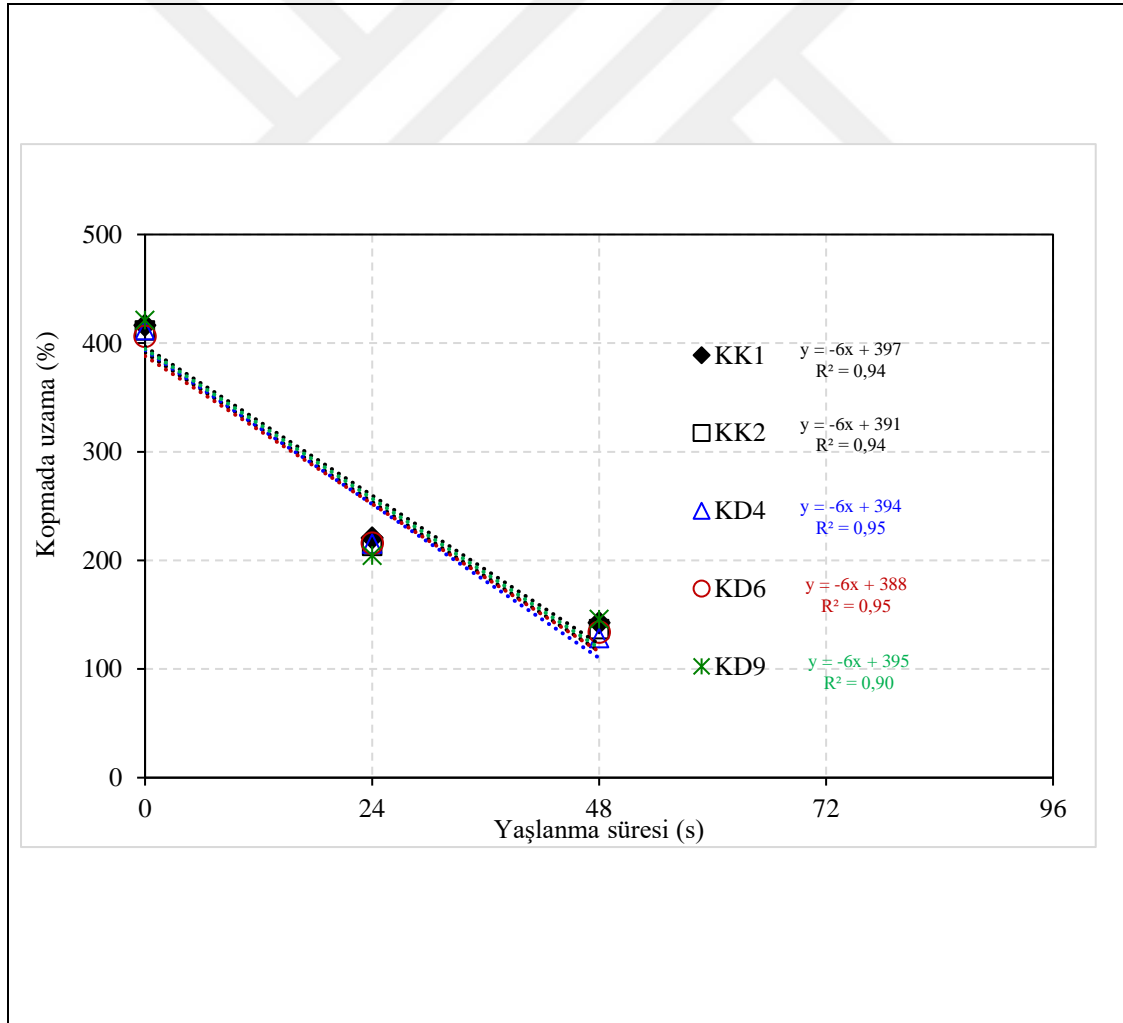
Yaşlandırma süresi (s)	Karışım				
	KK1	KK2	KD4	KD6	KD9
0	100	100	100	100	100
24	76	72	69	70	73
48	49	48	47	49	54

Kuşak kaplama karışımlarının kopmada uzama test sonuçları Tablo 6.26'da ve Şekil 6.19'da verilmiştir. Kontrol ve deneme karışımları için tüm sonuçlar lastik teknolojisinin bu test için kabul ettiği  $\pm$  %10 değişim aralığında olup, standart sapmalar da dikkate alındığında yaşlandırma öncesi ve sonrası sonuçların benzer olduğu görülmüş, kompozit ZnO malzemelerinin karışımın kopmada uzama özelliğini değiştirmedeği belirlenmiştir. Şekil 6.19'dan da görüldüğü gibi deneme ve kontrol karışımlarının ısıtılma hızı aynıdır, verilen doğrusal grafiklerin aynı eğime (-6 %/s) sahip olması bunu göstermektedir. Sırt karışımlarının ısıtılma sonrası kalan kopmada uzama değerleri yüzdesel olarak Denklem (6.1) ile hesaplanmış ve sonuçlar Tablo 6.27'de

verilmiştir. Tabloda verilen değerler dikkate alındığında 24 saatlik yaşlandırma süresinde karışımların kopmada uzama değerleri yarıya yakın ( $48 \pm 2$ ) düşüş gösterirken, en uzun yaşlandırma süresi olan 48 saatte değerler yarıdan fazla ( $67 \pm 1$ ) düşmüştür.

Tablo 6.26. Kuşak kaplama karışımlarının kopmada uzama sonuçları (%)

Yaşlandırma süresi (sa)	Karışım				
	KK1	KK2	KD4	KD6	KD9
0	416±3	411±6	412±4	406±6	421±8
24	221±5	213±7	215±8	216±5	204±7
48	143±3	137±5	128±8	134±6	146±4



Şekil 6.19. Kuşak kaplama karışımlarının kopmada uzama (%) değerlerinin ısı yaşlandırma ile değişimi

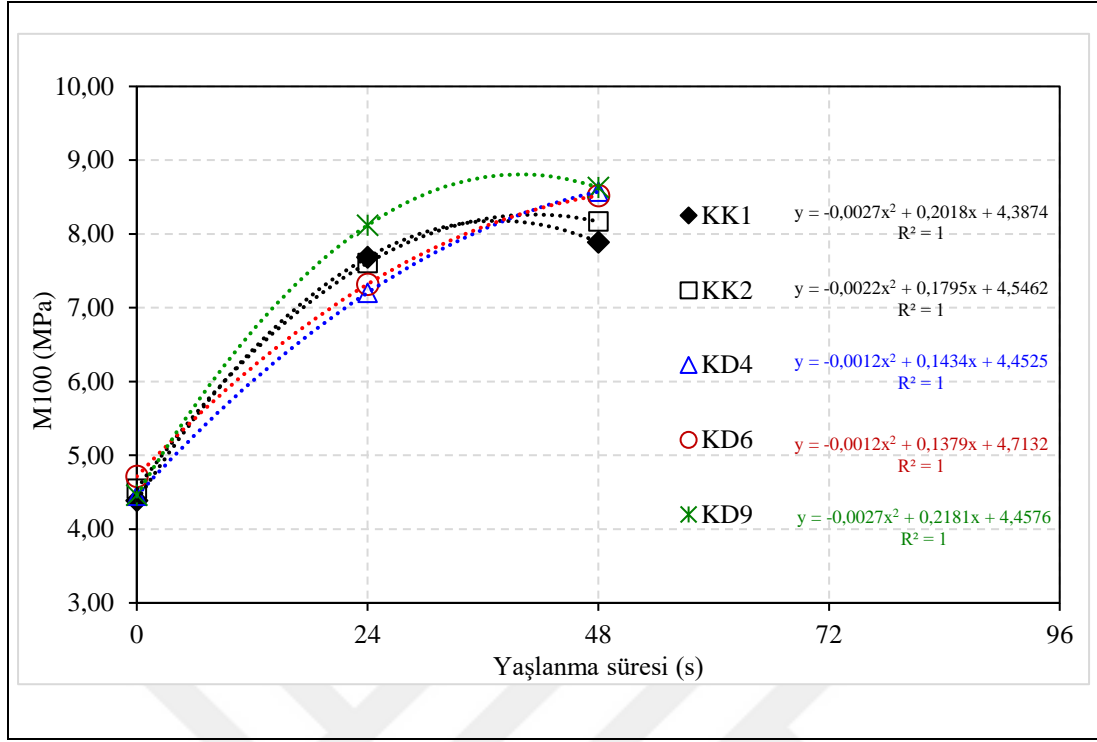
Tablo 6.27. Kuşak kaplama karışımlarının ısıtma yaşlandırma sonrası kalan kopmada uzama değerleri (%)

Yaşlandırma süresi (s)	Karışım				
	SK1	SK2	SD4	SD6	SD9
0	100	100	100	100	100
24	53	52	52	53	49
48	34	33	31	33	35

Kuşak kaplama karışımlarının % 100, % 200 ve % 300 uzamadaki gerilim değerleri (modül), M100, M200 ve M300 olarak ölçülmüştür. M100 değerleri için sonuçlar Tablo 6.28 ve Şekil 6.20’de verilmiştir. Kontrol ve deneme karışımları için tüm sonuçlar lastik teknolojisinin bu test için kabul ettiği  $\pm$  %10 değişim aralığında olup, yaşlandırma öncesi ve sonrası sonuçların benzer olduğu görülmüş, kompozit ZnO malzemelerinin karışımın M100 değerini değiştirmedeği belirlenmiştir. Şekil 6.20’den de görüldüğü gibi deneme ve kontrol karışımlarının M100 değerlerinin ısıtma yaşlandırma hızı benzerdir. Değişkenler arasında eğri uydurma sonucu elde edilen belirleme katsayısı ( $R^2$ ) değerleri ikinci dereceden bir polinoma tam uygunluk göstermektedir. Bu da yaşlandırma süresinin artması ile çapraz bağlanmanın mekanik özelliklere katkısının azaldığını belirtmektedir. Karışımlarının ısıtma yaşlandırma sonrası gelişen M100 değerleri yüzdesel olarak Denklem (6.1) ile hesaplanmış ve sonuçlar Tablo 6.29’da verilmiştir. Tabloda verilen değerler dikkate alındığında 24 saatlik yaşlandırma süresinde karışımların M100 değerleri  $\%68 \pm 11$  kadar artarken, en uzun yaşlandırma süresi olan 48 saatte M100 değerleri 2 katına yakın değerlere ulaşmıştır ( $\%86 \pm 7$ ).

Tablo 6.28. Kuşak kaplama karışımlarının M100 modül değerleri (MPa)

Yaşlandırma süresi (s)	Karışım				
	KK1	KK2	KD4	KD6	KD9
0	4,39 $\pm$ 0,02	4,55 $\pm$ 0,04	4,45 $\pm$ 0,16	4,71 $\pm$ 0,24	4,46 $\pm$ 0,07
24	7,68 $\pm$ 0,39	7,61 $\pm$ 0,32	7,20 $\pm$ 0,18	7,32 $\pm$ 0,12	8,12 $\pm$ 0,76
48	7,89 $\pm$ 0,25	8,17 $\pm$ 0,17	8,57 $\pm$ 0,64	8,52 $\pm$ 0,34	8,63 $\pm$ 0,13



Şekil 6.20. Kuşak kaplama karışımlarının M100 (MPa) değerlerinin ısıtılma süresi ile değişim

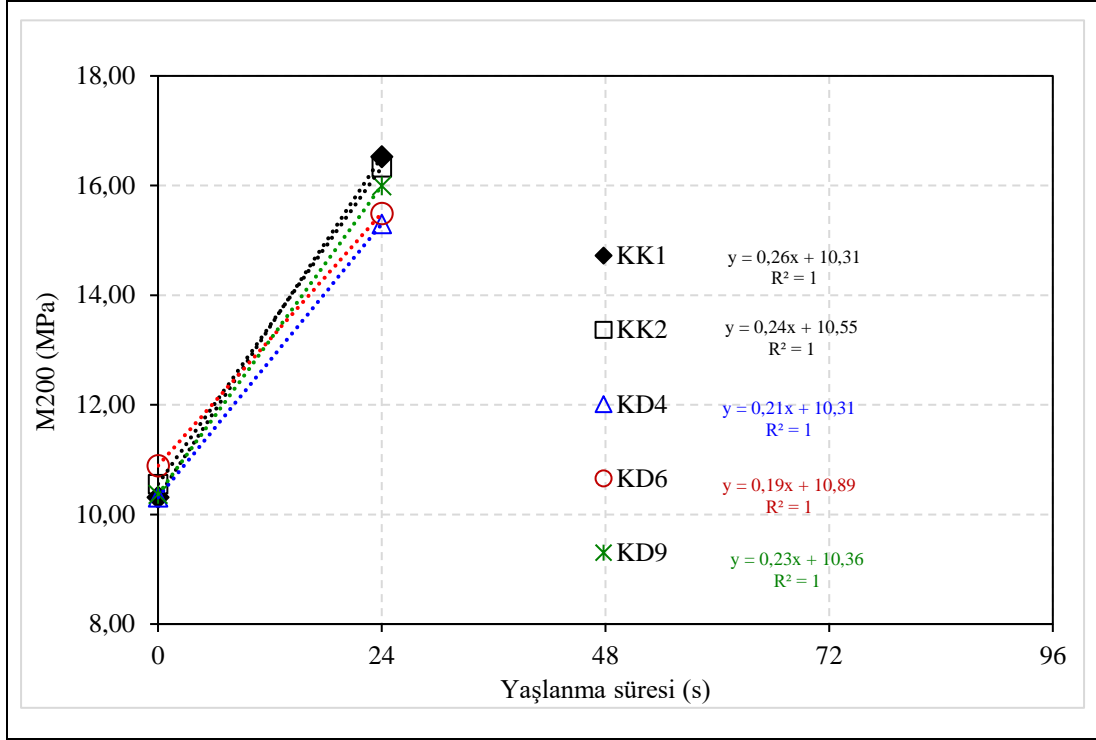
Tablo 6.29. Kuşak kaplama karışımlarının ısıtılma sonrası gelişen M100 değerleri (%)

Yaşlandırma süresi (s)	Karışım				
	KK1	KK2	KD4	KD6	KD9
0	100	100	100	100	100
24	175	167	162	155	182
48	180	180	193	181	194

M200 değerleri için sonuçlar Tablo 6.30 ve Şekil 6.21’de verilmiştir. Kontrol ve deneme karışımları için tüm sonuçlar yaşlandırma öncesi ve sonrası neredeyse aynı olup, kompozit ZnO malzemelerinin karışımın M200 değerini değiştirmedeği belirlenmiştir. Şekil 6.21’in gösterdiği gibi tüm karışımların M200 değerlerinin ısıtılma hızı aynıdır ( $0,23 \pm 0,03$  MPa/s). Karışımlarının ısıtılma sonrası gelişen M200 değerleri yüzdesel olarak Denklem (6.1) ile hesaplanmış ve sonuçlar Tablo 6.31’de verilmiştir. Tabloda verilen değerler dikkate alındığında en uzun yaşlandırma süresi olan 24 saatte M200 değerleri  $\%52 \pm 7$  kadar artmıştır.

Tablo 6.30. Kuşak kaplama karışımlarının M200 modül değerleri (MPa)

Yaşlandırma süresi (s)	Karışım				
	KK1	KK2	KD4	KD6	KD9
0	10,31±0,02	10,55±0,09	10,31±0,27	10,89±0,38	10,36±0,08
24	16,52±0,39	16,33±0,26	15,30±0,49	15,50±0,23	16,00±0,62



Şekil 6.21. Kuşak kaplama karışımlarının M200 (MPa) değerlerinin ısıtılma süresi ile değişimi

Tablo 6.31. Kuşak kaplama karışımlarının ısıtılma sonrası gelişen M200 değerleri (%)

Yaşlandırma süresi (s)	Karışım				
	KK1	KK2	KD4	KD6	KD9
0	100	100	100	100	100
24	160	155	148	142	154

M300 değerleri için sonuçlar Tablo 6.32’de verilmiştir. Bu karışım için kopmada uzama değeri en kısa ısıtılma süresi olan 24 saat ısıtımda %300’e ulaşamadığı için sadece ısıtılma öncesi değeri verilebilmiştir.

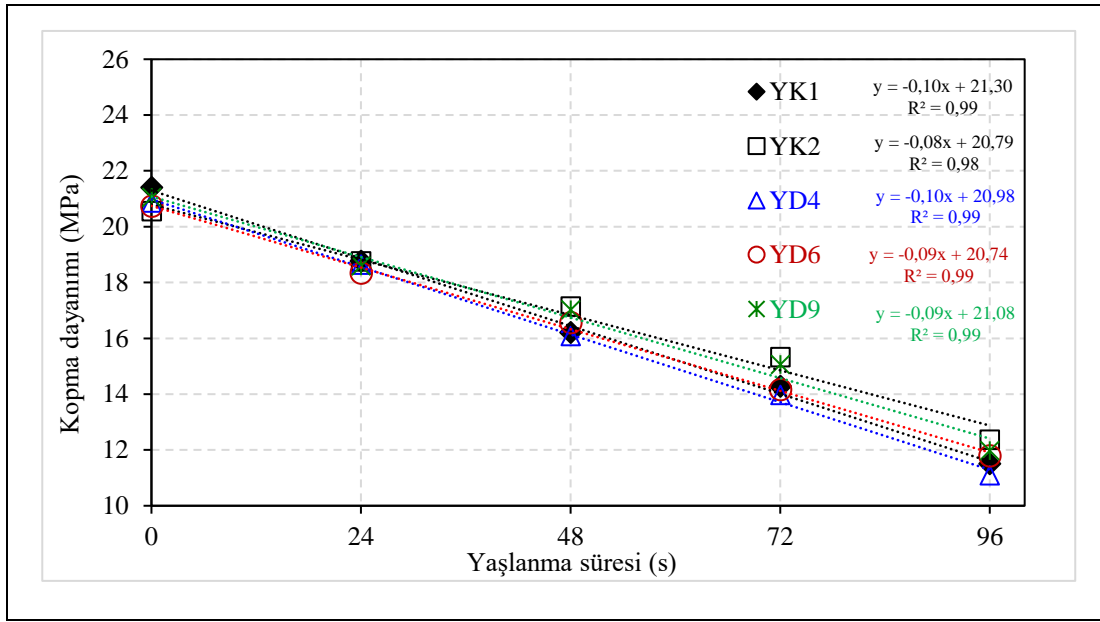
Tablo 6.32. Kuşak kaplama karışımlarının M300 modül değerleri (MPa)

Yaşlandırma süresi (s)	Karışım				
	KK1	KK2	KD4	KD6	KD9
0	16,84±0,02	17,06±0,09	16,60±0,30	17,45±0,42	16,97±0,10

Yanak karışımlarının kopma dayanımı test sonuçları Tablo 6.33'te ve Şekil 6.22'de verilmiştir. Kontrol ve deneme karışımları için tüm sonuçlar lastik teknolojisinin bu test için kabul ettiği  $\pm \%10$  değişim aralığı içerisinde olup, yaşlandırma öncesi ve sonrası sonuçların benzer olduğu görülmüş, kompozit ZnO malzemelerinin karışımın kopma dayanımını değiştirmedeği belirlenmiştir. Şekil 6.22'den de görüldüğü gibi deneme ve kontrol karışımlarının ısı yaşlanma hızı aynıdır, verilen doğrusal grafiklerin aynı eğime ( $-0,09 \pm 0,01$  MPa/s) sahip olması bunu göstermektedir. Yaşlandırma öncesi kopma dayanımı sonuçları NR/BR içeren yanak karışımında, sadece NR içeren kuşak kaplama karışımına göre daha düşük olup, SBR/BR içeren sırt karışımına göre daha yüksektir. Bu durum doğal kauçuğun, sentetik kauçuklardan daha yüksek kopma dayanımına sahip olması nedeniyle beklenen bir sonuçtur. Yanak karışımlarının ısı yaşlandırma sonrası kalan kopma dayanımı değerleri yüzdesel olarak Denklem (6.1) ile hesaplanmış ve sonuçlar Tablo 6.34'te verilmiştir. Tabloda verilen değerler dikkate alındığında 24 saatlik yaşlandırma süresinde karışımların kopma dayanımında  $\%10 \pm 1$  kadar bir kayıp gözlenirken, en uzun yaşlandırma süresi olan 96 saatte kayıp  $\%43 \pm 3$ 'e kadar yükselmiştir. Sırt karışımı ve kuşak kaplama karışımı ile karşılaştırıldığında, yanak karışımının ısı dayanımının doğal kauçuk içeren kuşak kaplama karışımından daha iyi olduğu ve doğal kauçuk içermeyen sırt karışımına göre daha kötü olduğu görülmektedir. Doğal kauçuğun ısı yaşlanma özelliklerinin sentetik kauçuklardan daha kötü olması bu sonucu getirmektedir. Sadece 48 saate kadar ısı yaşlandırılabilen kuşak kaplama karışımı bu sürede kopma dayanımını yarı yarıya ( $\%51 \pm 3$ ) kaybederken, aynı sürede sırt karışımında bu kayıp sadece  $\%9 \pm 2$  olarak gerçekleşmiştir. Yanak karışımı ise 48 saatte  $\%20 \pm 3$  kayıp göstermiştir. Sırt ve yanak karışımlarında en uzun yaşlandırma süresi olan 96 saatte ise kopma dayanımındaki kayıp yanak karışımında sırt karışımının 2 katı kadardır.

Tablo 6.33. Yanak karışımlarının kopma dayanımı sonuçları (MPa)

Yaşlandırma süresi (s)	Karışım				
	YK1	YK2	YD4	YD6	YD9
0	21,41±4,26	20,56±2,25	20,87±3,00	20,75±1,53	21,05±6,71
24	18,77±3,76	18,76±4,12	18,64±5,01	18,35±5,03	18,60±1,15
48	16,21±2,36	17,15±2,74	16,09±5,63	16,57±0,90	17,02±1,63
72	14,29±4,05	15,33±5,28	13,97±1,30	14,17±0,25	15,06±3,79
96	11,51±5,39	12,37±0,58	11,10±2,38	11,79±7,63	11,98±2,24



Şekil 6.22. Yanak karışımlarının kopma dayanımı (MPa) değerlerinin yaşlandırma süresi ile değişimi

Tablo 6.34. Yanak karışımlarının ısı yaşlandırma sonrası kalan kopma dayanımı değerleri (%)

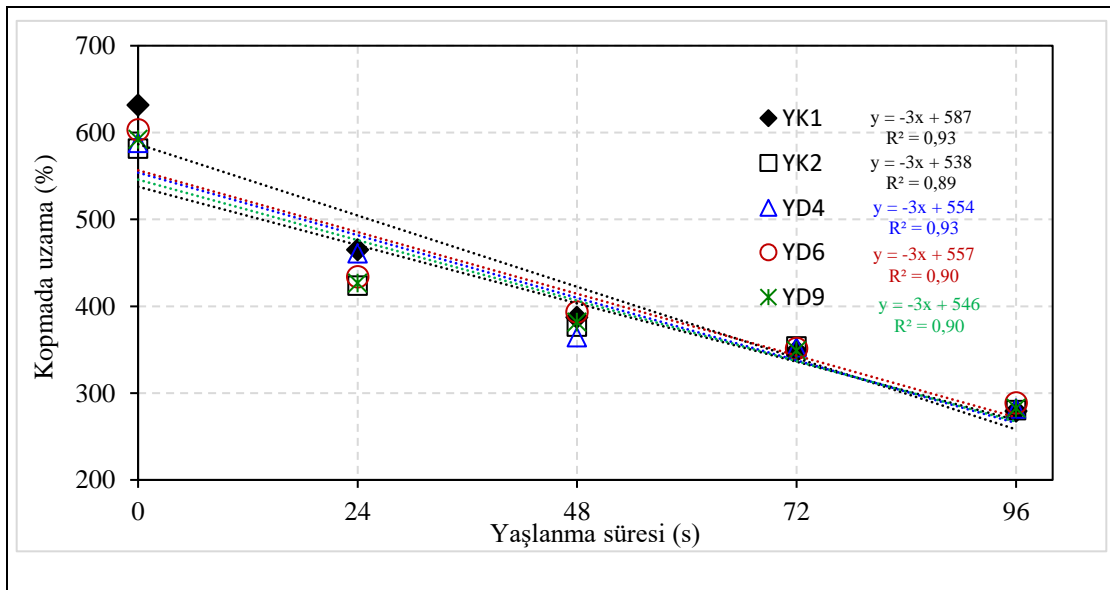
Yaşlandırma süresi (s)	Karışım				
	YK1	YK2	YD4	YD6	YD9
0	100	100	100	100	100
24	88	91	91	89	90
48	76	83	78	81	83
72	67	75	68	69	73
96	54	60	54	57	58

Yanak karışımlarının kopmada uzama test sonuçları Tablo 6.35'te ve Şekil 6.23'te verilmiştir. Kontrol ve deneme karışımları için tüm sonuçlar lastik teknolojisinin bu test

için kabul ettiği  $\pm$  %10 değişim aralığının altında olup, yaşlandırma öncesi ve sonrası sonuçların benzer olduğu görülmüş, kompozit ZnO malzemelerinin karışımın kopmada uzama özelliğini değiştirmediği belirlenmiştir. Şekil 6.23'ten de görüldüğü gibi deneme ve kontrol karışımlarının ısıl yaşlanma hızı aynıdır, verilen doğrusal grafiklerin aynı eğime ( $-3$  %/s) sahip olması bunu göstermektedir. Yanak karışımlarının ısıl yaşlandırma sonrası kalan kopmada uzama değerleri yüzdesel olarak Denklem (6.1) ile hesaplanmış ve sonuçlar Tablo 6.36'da verilmiştir. Tabloda verilen değerler dikkate alındığında 24 saatlik yaşlandırma süresinde karışımların kopmada uzama değerleri  $\%26 \pm 2$  kadar düşüş gösterirken, en uzun yaşlandırma süresi olan 96 saatte değerler yarıya düşmüş, kayıp  $\%53 \pm 2$  olarak gerçekleşmiştir. Bu sonuçlar sırt karışımında gözlenen kopmada uzama kayıplarına benzerdir.

Tablo 6.35. Yanak karışımlarının kopmada uzama sonuçları (%)

Yaşlandırma süresi (s)	Karışım				
	YK1	YK2	YD4	YD6	YD9
0	632 $\pm$ 10	582 $\pm$ 16	588 $\pm$ 18	603 $\pm$ 8	592 $\pm$ 23
24	465 $\pm$ 8	424 $\pm$ 12	461 $\pm$ 14	434 $\pm$ 9	427 $\pm$ 16
48	387 $\pm$ 6	377 $\pm$ 7	364 $\pm$ 9	394 $\pm$ 3	382 $\pm$ 10
72	349 $\pm$ 7	354 $\pm$ 4	353 $\pm$ 6	352 $\pm$ 2	349 $\pm$ 7
96	279 $\pm$ 16	281 $\pm$ 4	282 $\pm$ 12	289 $\pm$ 14	283 $\pm$ 5



Şekil 6.23. Yanak karışımlarının kopmada uzama (%) değerlerinin yaşlandırma süresi ile değişimi

Yanak karışımlarının %100, %200 ve %300 uzamadaki gerilim değerleri (modül), M100, M200 ve M300 olarak ölçülmüştür. M100 değerleri için sonuçlar Tablo 6.37 ve Şekil 6.24'te verilmiştir. Kontrol ve deneme karışımları için tüm sonuçlar lastik teknolojisinin bu test için kabul ettiği  $\pm$  %10 değişim aralığının içinde olup, yaşlandırma öncesi ve sonrası sonuçların benzer olduğu görülmüş, kompozit ZnO malzemelerinin karışımın M100 değerini değiştirmedeği belirlenmiştir. Şekil 6.24'ten de görüldüğü gibi deneme ve kontrol karışımlarının M100 değerlerinin ısı yaşlandırma hızı benzerdir. Değişkenler arasında eğri uydurma sonucu elde edilen belirleme katsayısı ( $R^2$ ) değerleri doğrusal bir ilişkiden çok ikinci dereceden bir polinoma uygunluk göstermektedir.

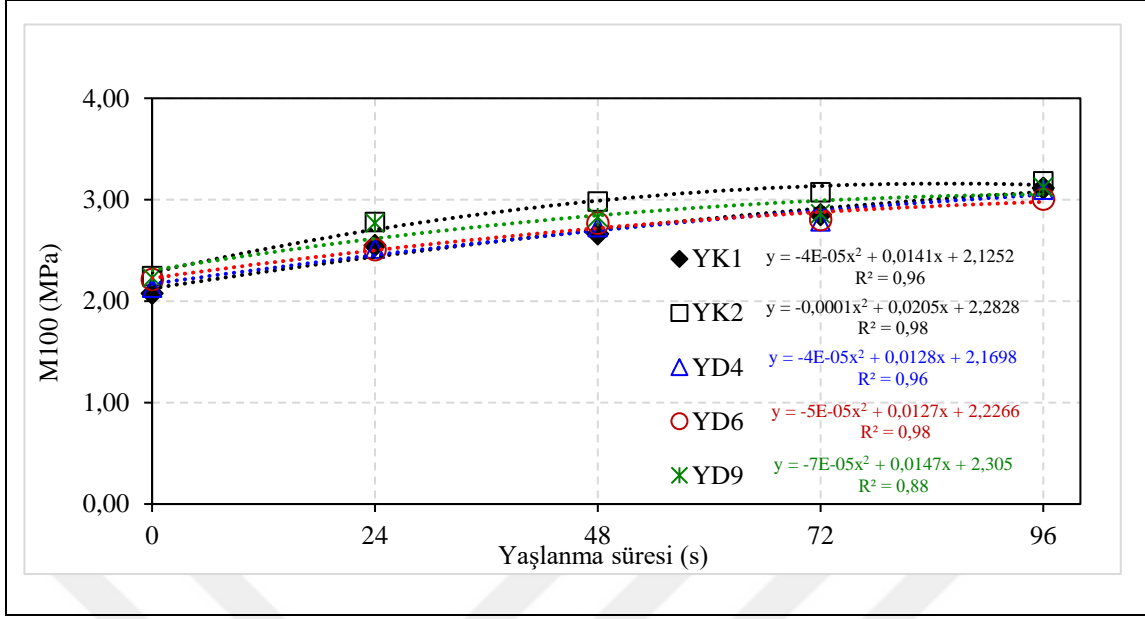
Tablo 6.36. Yanak karışımlarının ısı yaşlandırma sonrası kalan kopmada uzama değerleri (%)

Yaşlandırma süresi (s)	Karışım				
	YK1	YK2	YD4	YD6	YD9
0	100	100	100	100	100
24	74	73	78	72	72
48	61	65	62	65	64
72	55	61	60	58	59
96	44	48	48	48	48

Karışımlarının ısı yaşlandırma sonrası gelişen M100 değerleri yüzdesel olarak Denklem (6.1) ile hesaplanmış ve sonuçlar Tablo 6.38'de verilmiştir. Tabloda verilen değerler dikkate alındığında 24 saatlik yaşlandırma süresinde karışımların M100 değerleri  $\pm$  %20  $\pm$  5 kadar artarken, en uzun yaşlandırma süresi olan 96 saatte M100 değerleri  $\pm$  %42  $\pm$  3 olmuştur. Bu sonuçlar kopma dayanımına benzer şekilde, bu karışımın ısı yaşlandırma sonucu M100 değerlerinin sırt karışımından yarı yarıya daha düşük olduğunu göstermektedir. Doğal kauçuğun ısı dayanımının düşük olması bu sonucu getirmektedir.

Tablo 6.37. Yanak karışımlarının M100 modül değerleri (MPa)

	Yaşlandırma süresi (s)	Karışım				
		YK1	YK2	YD4	YD6	YD9
M100	0	2,08 $\pm$ 0,52	2,25 $\pm$ 0,76	2,13 $\pm$ 0,43	2,21 $\pm$ 0,80	2,23 $\pm$ 0,75
	24	2,55 $\pm$ 0,50	2,78 $\pm$ 0,72	2,52 $\pm$ 0,88	2,51 $\pm$ 0,14	2,77 $\pm$ 1,15
	48	2,66 $\pm$ 0,58	2,98 $\pm$ 0,76	2,73 $\pm$ 2,04	2,77 $\pm$ 0,66	2,83 $\pm$ 1,18
	72	2,85 $\pm$ 0,76	3,07 $\pm$ 0,80	2,79 $\pm$ 1,42	2,80 $\pm$ 0,76	2,86 $\pm$ 0,52
	96	3,11 $\pm$ 1,52	3,18 $\pm$ 0,38	3,10 $\pm$ 1,66	3,01 $\pm$ 0,95	3,12 $\pm$ 0,76



Şekil 6.24. Yanak karışımlarının M100 (MPa) değerlerinin ısı yaşlandırma ile değişimi

Tablo 6.38. Yanak karışımlarının ısı yaşlandırma sonrası gelişen M100 değerleri (%)

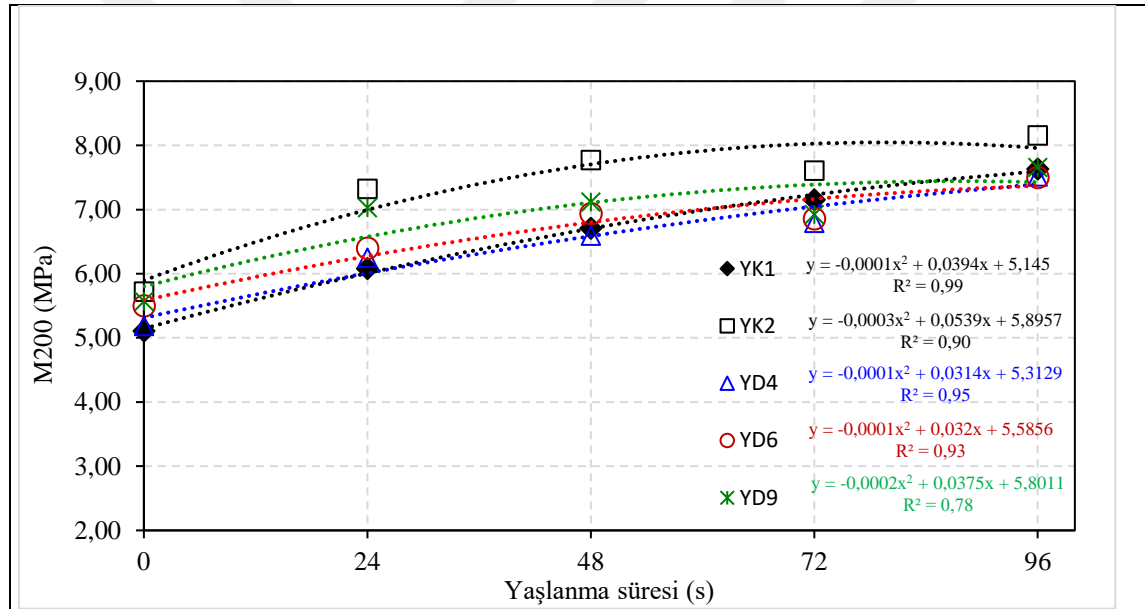
Yaşlandırma süresi (s)	Karışım				
	YK1	YK2	YD4	YD6	YD9
0	100	100	100	100	100
24	123	124	118	113	124
48	128	133	128	125	127
72	137	137	131	127	128
96	150	141	145	136	140

M200 değerleri için sonuçlar Tablo 6.39 ve Şekil 6.25'te verilmiştir. Kontrol ve deneme karışımları için tüm sonuçlar lastik teknolojisinin bu test için kabul ettiği  $\pm \%10$  değişim aralığının içinde olup, standart sapmalar dikkate alındığında, yaşlandırma öncesi ve sonrası sonuçların benzer olduğu görülmüş ve kompozit ZnO malzemelerinin karışımın M200 değerini değiştirmedeği belirlenmiştir. Şekil 6.25'in gösterdiği gibi tüm karışımların M200 değerlerinin ısı yaşlandırma hızı benzerdir ve R2 değerlerine göre değişkenler arasındaki ilişki ikinci dereceden bir polinoma daha uygundur. Karışımlarının ısı yaşlandırma sonrası gelişen M200 değerleri yüzdesel olarak Denklem (6.1) ile hesaplanmış ve sonuçlar Tablo 6.40'ta verilmiştir. Tabloda verilen değerler dikkate alındığında 24 saatlik yaşlandırma süresinde karışımların M200 değerleri  $\%22 \pm 5$  kadar artarken, en uzun yaşlandırma süresi olan 96 saatte M200 değerlerindeki artış  $\%42 \pm 5$

olmuştur. Isıl yaşlandırma sonucu, kopma dayanımı ve M100 değerlerine benzer olarak M200 değerlerindeki gelişimin de bu karışım için sırt karışımına göre yarı yarıya düşük olduğu görülmektedir.

Tablo 6.39. Yanak karışımlarının M200 modül değerleri (MPa)

Yaşlandırma süresi (s)	Karışım kodları				
	YK1	YK2	YD4	YD6	YD9
0	5,11±0,38	5,72±2,13	5,19±2,08	5,50±2,52	5,57±2,52
24	6,08±1,09	7,32±0,38	6,25±1,15	6,40±0,43	7,03±5,14
48	6,71±1,28	7,77±2,05	6,59±3,93	6,94±1,09	7,12±3,64
72	7,15±2,31	7,61±1,38	6,79±2,65	6,86±0,76	6,92±1,51
96	7,63±3,45	8,16±0,88	7,52±3,50	7,50±1,64	7,66±163



Şekil 6.25. Yanak karışımlarının M200 (MPa) değerlerinin ısıl yaşlandırma ile değişimi

Tablo 6.40. Yanak karışımlarının ısıl yaşlandırma sonrası gelişen M200 değerleri (%)

Yaşlandırma süresi (s)	Karışım				
	YK1	YK2	YD4	YD6	YD9
0	100	100	100	100	100
24	119	128	120	116	126
48	131	136	127	126	128
72	140	133	131	125	124
96	149	143	145	136	137

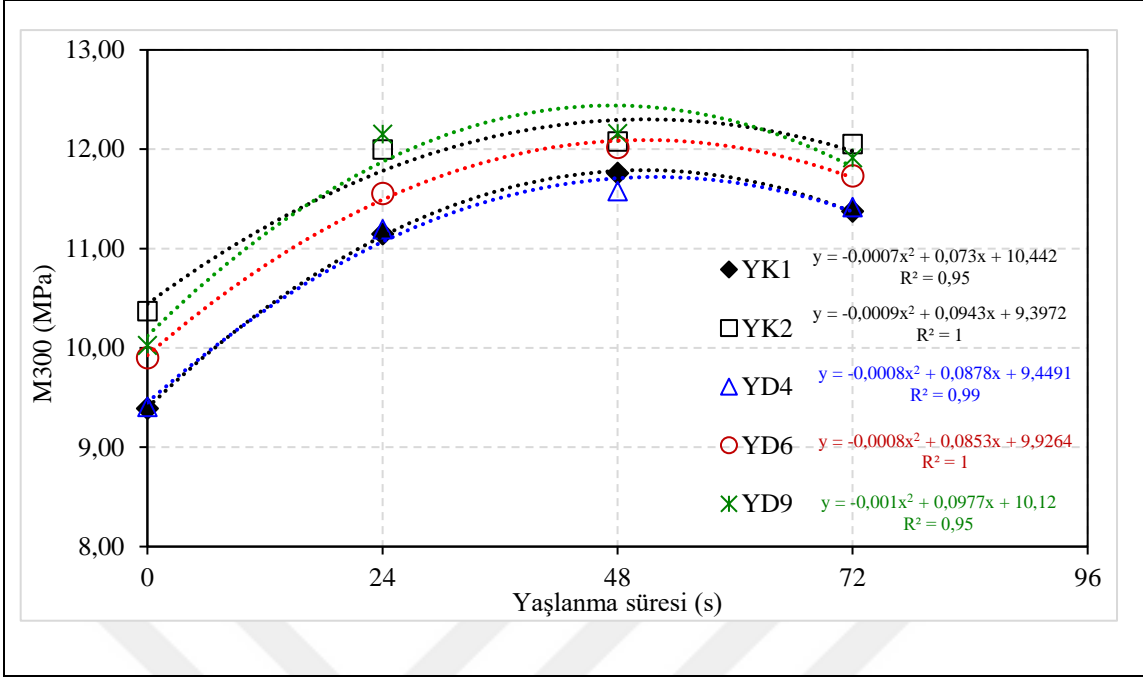
M300 değerleri için sonuçlar Tablo 6.41 ve Şekil 6.26'da verilmiştir. Tablo 6.41'de görüldüğü gibi en uzun yaşlandırma süresi olan 96 saatte kopmada uzama değerleri, bu karışımda da sırt karışımına benzer şekilde %300'ün altındadır. Bu nedenle, bu yaşlandırma süresi için M300 değeri mevcut değildir. Kontrol ve deneme karışımları için tüm sonuçlar lastik teknolojisinin bu test için kabul ettiği  $\pm$  %10 değişim aralığının altında olup, yaşlandırma öncesi ve sonrası sonuçların benzer olduğu görülmüş, kompozit ZnO malzemelerinin karışımın M300 değerini değiştirmedeği belirlenmiştir. Şekil 6.26'da görüldüğü gibi tüm karışımların M300 değerlerinin ısı yaşlandırma hızları, M100 ve M200'de olduğu gibi, benzerdir ve değişkenler arasındaki ilişki ikinci dereceden bir polinoma uygundur. Karışımlarının ısı yaşlandırma sonrası gelişen M300 değerleri yüzdesel olarak Denklem (6.1) ile hesaplanmış ve sonuçlar Tablo 6.42'de verilmiştir. Tabloda verilen değerler dikkate alındığında 24 saatlik yaşlandırma süresinde karışımların M300 değerleri  $\%18 \pm 2$  kadar artarken, en uzun yaşlandırma süresi olan 72 saatte M300 değerlerinde  $\%19 \pm 2$  azalma görülmüştür. Sırt karışımı ile karşılaştırıldığında M300 değerlerindeki gelişme, 48 saat yaşlandırma sonucu yanak karışımında 1/3 oranındadır. Yaşlandırmanın yapılabildiği en uzun süre olan 72 saatte ise yanak karışımında M300 değerinin kayba uğradığı ortaya çıkmaktadır.

Tablo 6.41. Yanak karışımlarının M300 modül değerleri (MPa)

	Yaşlandırma süresi (s)	Karışım				
		YK1	YK2	YD4	YD6	YD9
M300	0	9,39 $\pm$ 0,75	10,37 $\pm$ 2,84	9,41 $\pm$ 2,90	9,90 $\pm$ 3,68	10,03 $\pm$ 3,13
	24	11,15 $\pm$ 3,02	12,00 $\pm$ 1,51	11,20 $\pm$ 1,66	11,56 $\pm$ 1,01	12,15 $\pm$ 6,45
	48	11,76 $\pm$ 3,33	12,08 $\pm$ 1,66	11,58 $\pm$ 4,63	12,02 $\pm$ 2,02	12,16 $\pm$ 4,16
	72	11,38 $\pm$ 7,75	12,05 $\pm$ 0,80	11,42 $\pm$ 2,02	11,74 $\pm$ 1,26	11,92 $\pm$ 2,41

Tablo 6.42. Yanak karışımlarının ısı yaşlandırma sonrası gelişen M300 değerleri (%)

	Yaşlandırma süresi (s)	Karışım				
		YK1	YK2	YD4	YD6	YD9
	0	100	100	100	100	100
	24	119	116	119	117	121
	48	125	116	123	121	121
	72	121	116	121	118	119



Şekil 6.26. Yanak karışımlarının M200 (MPa) değerlerinin ısıtma yaşlandırma ile değişimi

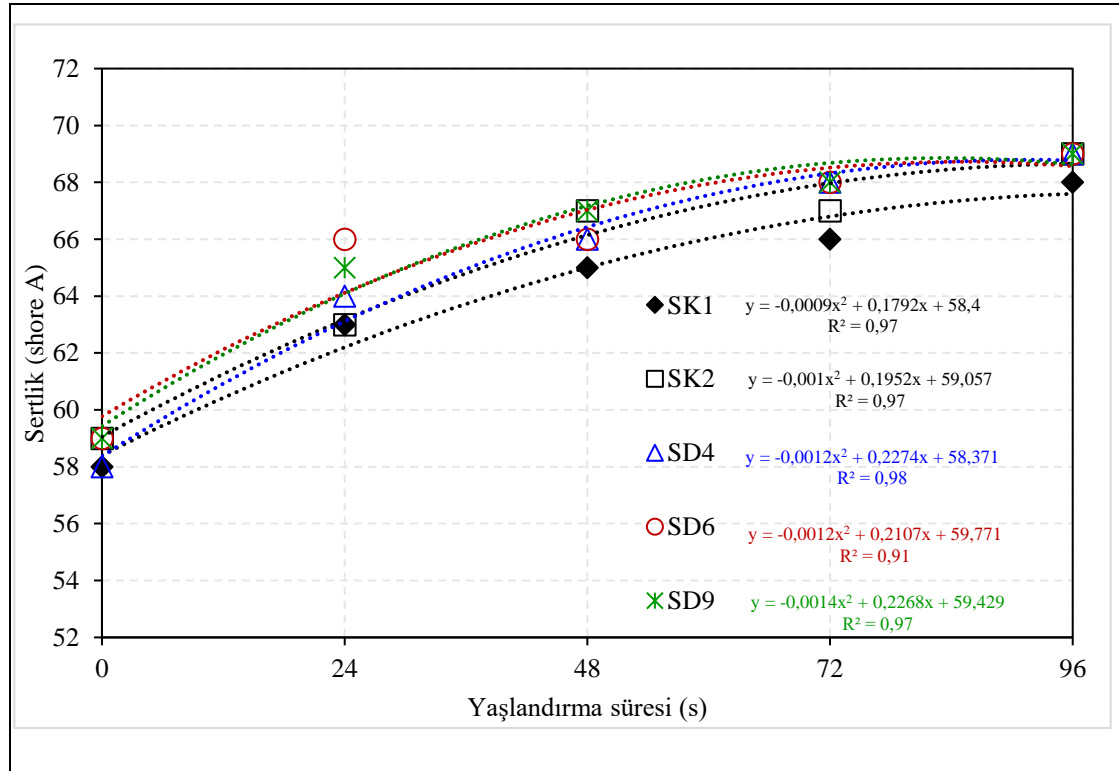
### 6.3.3. Sertlik Testleri

Sertlik testleri Bölüm 5.4.3'te anlatılan yöntemle yapılmış ve karışımların ısıtma yaşlandırma öncesi (0 saat) ve 70 °C'de ısıtma yaşlandırma sonrası (24, 48, 72 ve 96 saat) sertlik değerleri ölçülmüştür.

Sırt karışımları için sertlik test sonuçları Tablo 6.43'te ve Şekil 6.27'de verilmiştir. Kontrol ve deneme karışımları için tüm sertlik değerleri, bu test için lastik teknolojisi tarafından kabul edilen  $\pm$  %10 aralığının çok altında olup kompozit ZnO malzemelerinin karışımın sertlik özelliğini yaşlandırma öncesinde ve sonrasında değiştirmediyi göstermiştir. Şekil 6.27'den de görüldüğü üzere tüm karışımların sertlik değerleri ısıtma yaşlandırma ile çapraz bağların artması nedeniyle, başlangıçta daha hızlı sonrasında yavaşlayan bir artış sergilemiştir. Deneme karışımlarının ısıtma yaşlanma özelliği kontrol karışımları ile benzer olup, değişkenler arasındaki ilişki ikinci dereceden bir polinoma uygundur. Karışımlarının ısıtma yaşlandırma sonrası artan sertlik değerleri yüzdesel olarak Denklem (6.1) ile hesaplanmış ve sonuçlar Tablo 6.44'te verilmiştir. Tabloda verilen değerler dikkate alındığında 24 saatlik yaşlandırma süresinde karışımların sertlik değerleri  $\pm$  %10 kadar artarken, en uzun yaşlandırma süresi olan 96 saatte sertlik değerlerinde  $\pm$  %17 artış görülmüştür.

Tablo 6.43. Sırt karışımlarının ısı yaşlanmaya bağlı sertlik testi sonuçları (Shore A)

Yaşlandırma süresi (s)	Karışım				
	SK1	SK2	SD4	SD6	SD9
0	58±0	59±1	58±1	59±1	59±1
24	63±1	63±1	64±1	66±1	65±1
48	65±1	67±1	66±1	66±1	67±1
72	66±1	67±1	68±1	68±0	68±1
96	68±0	69±0	69±0	69±1	69±1



Şekil 6.27. Sırt karışımlarının sertlik (Shore A) değerlerinin yaşlandırma süresi ile değişimi

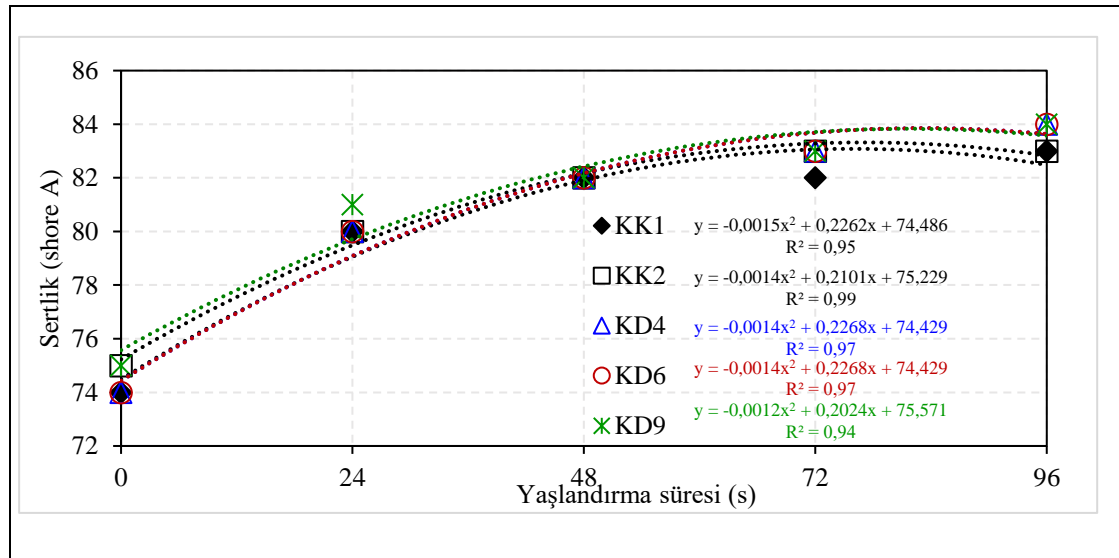
Tablo 6.44. Sırt karışımlarının ısı yaşlandırma sonrası artan sertlik değerleri (Shore A)

Yaşlandırma süresi (s)	Karışım				
	SK1	SK2	SD4	SD6	SD9
0	100	100	100	100	100
24	109	107	110	112	110
48	112	114	114	112	114
72	114	114	117	115	115
96	117	117	119	117	117

Kuşak kaplama karışımları için sertlik test sonuçları Tablo 6.45'te ve Şekil 6.28'de verilmiştir. Kontrol ve deneme karışımları için tüm sertlik değerleri, bu test için lastik teknolojisi tarafından kabul edilen  $\pm \%10$  aralığının çok altında olup kompozit ZnO malzemelerinin karışımın sertlik özelliğini yaşlandırma öncesinde ve sonrasında değiştirmediyi göstermiştir. Şekil 6.28'den de görüldüğü üzere, deneme karışımlarının ısı yaşlanma özelliği kontrol karışımları ile benzer olup, değişkenler arasındaki ilişki ikinci dereceden bir polinoma uygundur. Karışımlarının ısı yaşlandırma sonrası artan sertlik değerleri yüzdesel olarak Denklem (6.1) ile hesaplanmış ve sonuçlar Tablo 6.46'da verilmiştir. Tabloda verilen değerler dikkate alındığında 24 saatlik yaşlandırma süresinde karışımların sertlik değerleri  $\%8 \pm 0$  kadar artarken, en uzun yaşlandırma süresi olan 96 saatte sertlik değerlerinde  $\%13 \pm 1$  artış görülmüştür.

Tablo 6.45. Kuşak kaplama karışımlarının ısı yaşlanmaya bağlı sertlik testi sonuçları (Shore A)

Yaşlandırma süresi (s)	Karışım				
	KK1	KK2	KD4	KD6	KD9
0	74±0	75±0	74±0	74±0	75±0
24	80±0	80±0	80±0	80±0	81±0
48	82±0	82±0	82±0	82±0	82±0
72	82±0	83±0	83±0	83±0	83±0
96	83±0	83±0	84±0	84±0	84±0



Şekil 6.28. Kuşak kaplama karışımlarının sertlik (Shore A) değerlerinin yaşlandırma süresi ile değişimi

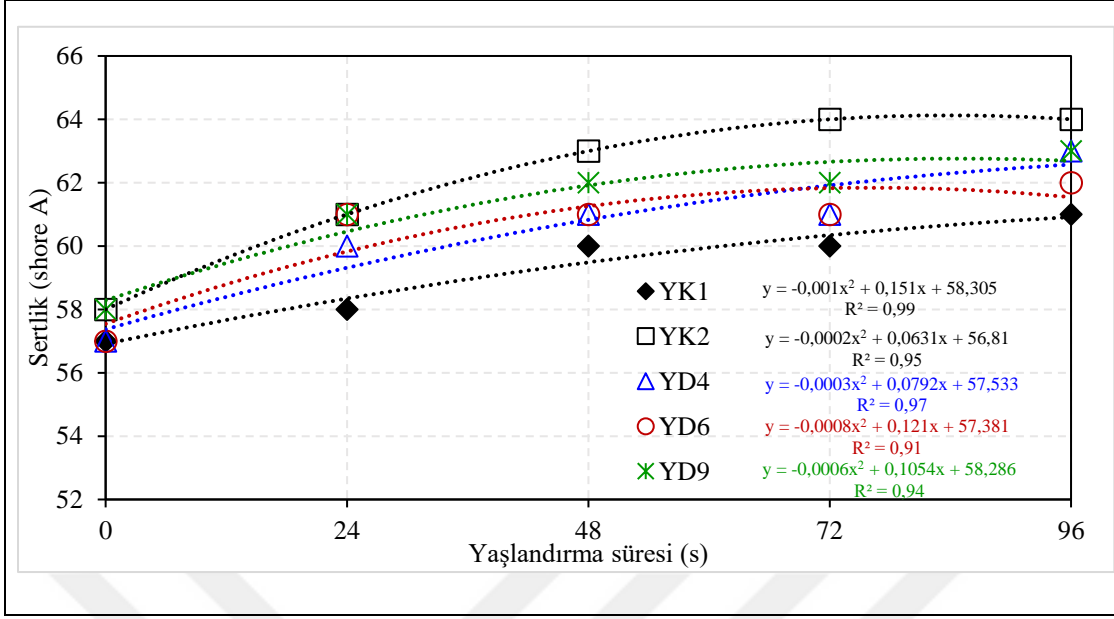
Tablo 6.46. Kuşak kaplama karışımlarının ısıl yaşlandırma sonrası artan sertlik değerleri (Shore A)

Yaşlandırma süresi (s)	Karışım				
	KK1	KK2	KD4	KD6	KD9
0	100	100	100	100	100
24	108	107	108	108	108
48	111	109	111	111	109
72	111	111	112	112	111
96	112	111	114	114	112

Yanak karışımları için sertlik test sonuçları Tablo 6.47’te ve Şekil 6.29’de verilmiştir. Kontrol ve deneme karışımları için tüm sertlik değerleri, bu test için lastik teknolojisi tarafından kabul edilen  $\pm 10$  aralığının çok altında olup kompozit ZnO malzemelerinin karışımın sertlik özelliğini yaşlandırma öncesinde ve sonrasında değiştirmedini göstermiştir. Şekil 6.29’dan de görüldüğü üzere deneme karışımlarının ısıl yaşlanma özelliği kontrol karışımları ile benzer olup, değişkenler arasındaki ilişki ikinci dereceden bir polinoma uygundur. Karışımlarının ısıl yaşlandırma sonrası artan sertlik değerleri yüzdesel olarak Denklem (6.1) ile hesaplanmış ve sonuçlar Tablo 6.48’de verilmiştir. Tabloda verilen değerler dikkate alındığında 24 saatlik yaşlandırma süresinde karışımların sertlik değerleri  $5 \pm 2$  kadar artarken, en uzun yaşlandırma süresi olan 96 saatte sertlik değerlerinde  $9 \pm 1$  artış görülmüştür.

Tablo 6.47. Yanak karışımlarının ısıl yaşlanmaya bağlı sertlik testi sonuçları (Shore A)

Yaşlandırma süresi (s)	Karışım				
	YK1	YK2	YD4	YD6	YD9
0	57±0	58±1	57±1	57±0	58±1
24	58±1	61±1	60±1	61±1	61±1
48	60±0	63±1	61±1	61±0	62±1
72	60±1	64±1	61±1	61±1	62±0
96	61±1	64±0	63±1	62±1	63±1



Şekil 6.29. Yanak karışımlarının sertlik (Shore A) değerlerinin yaşlandırma süresi ile değişimi

Tablo 6.48. Yanak karışımlarının ısı yaşlandırma sonrası artan sertlik değerleri (Shore A)

Yaşlandırma süresi (s)	Karışım				
	YK1	YK2	YD4	YD6	YD9
0	100	100	100	100	100
24	102	105	105	107	105
48	105	109	107	107	107
72	105	110	107	107	107
96	107	110	111	109	109

Sırt, kuşak kaplama ve yanak karışımlarının yaşlandırma öncesi sertlik değerleri lastik teknolojisinde bu kullanım yerleri için beklenen performans kriterlerine uygun olarak, sırt karışımları için  $59 \pm 1$ , kuşak kaplama karışımları için  $74 \pm 1$  ve yanak karışımları için  $57 \pm 1$  aralığında bulunmuştur.

### 6.3.4. Yırtılma Mukavemeti Testleri

Karışımların yırtılma mukavemeti özelliklerinin belirlenmesinde Bölüm 5.4.4'te verilen test metotları uygulanmıştır. Yırtılma testi B, karışımın çatlak yayılmasına, yırtılma testi C ise çatlak başlangıcına karşı mukavemeti ölçmektedir. Sırt, kuşak kaplama ve yanak

karışımları için hazırlanan her 3 harmanın her birinden 4'er test yapılarak toplam 12 testin ortalama ve standart sapması raporlanmıştır. Sonuçlar sırt karışımları için Tablo 6.49, kuşak kaplama karışımları için 6.50 ve yanak karışımları için 6.51'de verilmiştir. Yırtılma testi B verilerinde standart sapmaların yüksek olduğu görülmektedir. Bu durum çentik açma sırasında oluşan varyasyonla ilişkilendirilebilir. Standart sapmalar da dikkate alındığında karışımların her reçete için çatlak yayılma mukavemetlerinin benzer olduğu ve sonuçların lastik teknolojisinde kabul edilen  $\pm \%10$  aralığında kaldığı görülmektedir. Yırtılma C testi ise daha düşük varyasyona sahip olup, tüm karışımların her reçete için yırtılma mukavemetlerinin benzer olduğu belirlenmektedir. Doğal kauçuğun, sentetik kauçuklara göre saha yüksek yırtılma mukavemetine sahip olması nedeniyle en düşük yırtılma testi C sonuçları doğal kauçuk içermeyen sırt karışımında görülmüştür (Savran, 2001).

Tablo 6.49. Sırt karışımlarının yırtılma mukavemeti sonuçları (N/mm)

Özellik	Karışım				
	SK1	SK2	SD4	SD6	SD9
Yırtılma B	82,33±2,52	90,63±1,94	82,78±1,50	89,67±1,15	92,50±2,12
Yırtılma C	112,00±1,00	112,5±0,35	111,67±1,04	113,67±0,58	113,50±0,71

Tablo 6.50. Kuşak kaplama karışımlarının yırtılma mukavemeti sonuçları (N/mm)

Özellik	Karışım				
	KK1	KK2	KD4	KD6	KD9
Yırtılma B	165,17±0,88	173,67±1,73	165,50±2,56	170,50±1,92	172,78±2,08
Yırtılma C	132,92±0,88	133,25±1,92	128,92±0,76	134,17±2,10	135,08±0,63

Tablo 6.51. Yanak karışımlarının yırtılma mukavemeti test sonuçları (N/mm)

Özellik	Karışım				
	YK1	YK2	YD4	YD6	YD9
Yırtılma B	200,42±3,25	200,58±3,45	196,67±3,76	198,17±3,89	207,42±3,39
Yırtılma C	136,50±1,64	138,67±1,88	129,67±1,38	136,83±3,39	138,17±3,39

### 6.3.5. Çapraz Bağ Yoğunluğu Test Sonuçları

Çapraz bağ yoğunluğu özelliklerinin belirlenmesinde, Bölüm 5.4.5'te belirtilen test metotları uygulanmış, şişme oranı ( $Q$ ) Denklem (5.2)'ye, çapraz bağ yoğunluğu ( $V_c$ ) Denklem (5.3)'e ve çapraz bağlar arasındaki ortalama moleküler ağırlığı ( $M_c$ ) Denklem

(5.4)'e göre hesaplanmıştır. Sırt, kuşak kaplama ve yanak karışımları için hazırlanan her 3 harmanın her birinden 1'er test yapılarak toplam 3 testin ortalama ve standart sapması raporlanmıştır. Sonuçlar sırt karışımları için Tablo 6.52, kuşak kaplama karışımları için 6.53 ve yanak karışımları için 6.54'te verilmiştir. Her reçete için kontrol ve deneme karışımları, şişme testinde benzer performans sergileyerek, toluen alımına karşı benzer direnç göstermiş, bu da tablolarda verilen benzer çapraz bağ yoğunluklarıyla sonuçlanmıştır. Veriler karışımların benzer pişme özellikleri ile de uyumludur. Denklem (5.3)'ten de anlaşıldığı gibi çapraz bağ yoğunluğu ile çapraz bağlar arasındaki ortalama moleküler ağırlık arasında ters bir ilişki bulunmaktadır. Aynı zamanda daha fazla şişme gösteren karışımlar daha düşük toluen alınımına, dolayısıyla ağda daha esnek zincir yapısına sahiptir. Tablolarda düşük Q değerine sahip olan karışımlarda yüksek  $V_c$  değerleri bunu göstermektedir.

Tablo 6.52. Sırt karışımlarının çapraz bağ yoğunluğu test sonuçları

Özellik	Birim	Karışım				
		SK1	SK2	SD4	SD6	SD9
Q	%	210±4	205±1	211±2	207±3	196±6
$V_c$ ( $\times 10^{-5}$ )	mol/g	7,16±0,03	7,23±0,02	7,13±0,02	7,31±0,01	7,38±0,01
$M_c$ ( $10^3$ )	g/mol	6,98±0,03	6,92±0,02	7,01±0,03	6,84±0,02	6,77±0,02

Tablo 6.53. Kuşak kaplama karışımlarının çapraz bağ yoğunluğu test sonuçları

Özellik	Birim	Karışım				
		KK1	KK2	KD4	KD6	KD9
Q	%	215±4	209±1	215±1	211±1	209±2
$V_c$ ( $\times 10^{-4}$ )	mol/g	1,14±0,48	1,17±0,24	1,13±0,08	1,15±0,07	1,19±0,29
$M_c$ ( $\times 10^3$ )	g/mol	4,38±0,25	4,26±0,12	4,43±0,04	4,34±0,02	4,19±0,14

Tablo 6.54. Yanak karışımlarının çapraz bağ yoğunluğu test sonuçları

Özellik	Birim	Karışım				
		YK1	YK2	YD4	YD6	YD9
Q	%	177±8	165±2	175±2	173±3	172±3
$V_c$ ( $\times 10^{-5}$ )	mol/g	1,87±0,13	2,06±0,34	1,88±0,44	1,94±0,66	1,96±0,58
$M_c$ ( $\times 10^3$ )	g/mol	2,75±0,23	2,43±0,55	2,68±0,76	2,60±0,11	2,51±0,87

### 6.3.6. Özgül Ağırlık Test Sonuçları

Sekme esnekliği testleri Bölüm 5.4.7’de verilen test yöntemine göre yapılmış, sırt, kuşak kaplama ve yanak karışımları için hazırlanan her 3 harmanın her birinden 1’er test Özgül ağırlık testleri Bölüm 5.4.6’da verilen test yöntemine göre yapılmış, sırt, kuşak kaplama ve yanak karışımları için hazırlanan her 3 harmanın her birinden 1’er test yapılarak toplam 3 testin ortalama ve standart sapması raporlanmıştır. Sonuçlar sırt karışımları için Tablo 6.55, kuşak kaplama karışımları için 6.56 ve yanak karışımları için 6.57’de verilmiştir. Her reçete için deneme ve kontrol karışımları arasında özgül ağırlık farkı bulunmamaktadır.

Tablo 6.55. Sırt karışımlarının özgül ağırlık test sonuçları (g/cm<sup>3</sup>)

	Karışım				
	SK1	SK2	SD4	SD6	SD9
Özgül ağırlık	1,12±0,01	1,11±0,01	1,11±0,01	1,11±0,01	1,11±0,01

Tablo 6.56. Kuşak kaplama karışımlarının özgül ağırlık test sonuçları (g/cm<sup>3</sup>)

	Karışım				
	KK1	KK2	KD4	KD6	KD9
Özgül ağırlık	1,16±0,01	1,16±0,01	1,15±0,01	1,15±0,01	1,16±0,01

Tablo 6.57. Yanak karışımlarının özgül ağırlık test sonuçları (g/cm<sup>3</sup>)

	Karışım				
	YK1	YK2	YD4	YD6	YD9
Özgül ağırlık	1,10±0,01	1,10±0,01	1,10±0,01	1,10±0,01	1,10±0,01

### 6.3.7. Sekme Esnekliği Test Sonuçları

Sekme esnekliği testleri Bölüm 5.4.7’de verilen test yöntemine göre yapılmış, sırt, kuşak kaplama ve yanak karışımları için hazırlanan her 3 harmanın her birinden 1’er test yapılarak toplam 3 testin ortalama ve standart sapması raporlanmıştır. Sonuçlar sırt karışımları için Tablo 6.58, kuşak kaplama karışımları için 6.59 ve yanak karışımları için 6.60’da verilmiştir. Test sonuçları her reçetenin kontrol ve deneme karışımları arasında benzerlik göstermektedir. Bu sonuçlar, karışımların tekrarlanan darbelerin meydana getirdiği dinamik uygulamalar için benzer dayanıma sahip olduğunu belirtmektedir.

Tablo 6.58. Sırt karışımlarının sekme esnekliği test sonuçları (%)

	Karışım				
	SK1	SK2	SD4	SD6	SD9
Sekme esnekliği	54,26±1,05	57,14±1,11	51,24±1,24	56,28±1,09	57,64±1,07

Tablo 6.59. Kuşak kaplama karışımlarının sekme esnekliği test sonuçları (%)

	Karışım				
	KK1	KK2	KD4	KD6	KD9
Sekme esnekliği	51,26±1,91	51,51±0,42	50,12±0,40	51,24±0,78	51,95±0,29

Tablo 6.60. Yanak karışımlarının sekme esnekliği test sonuçları (%)

	Karışım				
	YK1	YK2	YD4	YD6	YD9
Sekme esnekliği	65,62±1,11	66,65±0,12	63,83±0,28	66,52±1,29	66,46±0,44

### 6.3.8. Fleksometre Test Sonuçları

Sabit basınç altında çalışan karışımların ısı üretim özellikleri ve kalıcı deformasyon değerleri, Bölüm 5.4.8'de verilen metotlar ile ölçülmüştür. Sırt, kuşak kaplama ve yanak karışımları için hazırlanan her 3 harmanın her birinden 1'er test yapılarak toplam 3 testin ortalama ve standart sapması raporlanmıştır. Sonuçlar sırt karışımları için Tablo 6.61, kuşak kaplama karışımları için 6.62 ve yanak karışımları için 6.63'te verilmiştir. Karışımın ısıl stres altında nasıl davrandığını ve aşırı ısınmanın performans üzerinde etkisini gösteren ısı birikimi sonuçları ise, tüm karışımlar için benzerdir. Kalıcı deformasyon değeri, karışımların ısıl işlem veya deformasyon sonrası kalıcı şekil değişikliğine karşı gösterdiği direnç hakkında bilgi vermektedir. Bu değerler, lastik teknolojisinde sırt, kuşak kaplama ve yanak karışımları için öngörülen performans değerleri aralığında olup, her reçetede kontrol ve deneme karışımları benzer sonuçlara sahiptir. Sonuçlar, tüm kontrol ve deneme karışımlarının performanslarının, yüksek sıcaklık altında stabil kalma yeteneklerinin, endüstriyel uygulamalar açısından önemli olan performans parametreleri ile uyumlu olduğunu göstermektedir.

Tablo 6.61. Sırt karışımlarının fleksometre test sonuçları

Özellik	Birim	Karışım				
		SK1	SK2	SD4	SD6	SD9
Isı Birikimi	°C	149,28±2,27	149,30±4,82	146,68±1,75	146,09±2,28	145,68±1,61
Kalıcı Deformasyon	%	7,37±1,42	8,00±0,85	7,04±0,14	6,82±0,59	6,56±0,05

Tablo 6.62. Kuşak kaplama karışımlarının fleksometre test sonuçları

Özellik	Birim	Karışım				
		KK1	KK2	KD4	KD6	KD9
Isı Birikimi	°C	119,32±2,27	111,59±0,74	122,82±3,28	116,85±0,80	110,31±0,70
Kalıcı Deformasyon	%	8,07±0,32	7,70±0,40	7,93±0,15	7,77±0,35	7,57±0,15

Tablo 6.63. Yanak karışımlarının fleksometre test sonuçları

Özellik	Birim	Karışım				
		YK1	YK2	YD4	YD6	YD9
Isı Birikimi	°C	100,28±3,50	100,79±2,62	103,47±1,34	99,25±2,66	101,16±2,75
Kalıcı Deformasyon	%	2,27±0,06	1,97±0,64	2,30±0,71	1,85±0,64	1,65±0,21

### 6.3.9. Yorulma Test Sonuçları

Karışımların yorulma testleri Bölüm 5.4.9’da verilen metot ile ölçülmüştür. Sırt, kuşak kaplama ve yanak karışımları için hazırlanan her 3 harmanın her birinden 8’er test yapılarak toplam 24 testin ortalama ve standart sapması raporlanmıştır. Sonuçlar sırt karışımları için Tablo 6.64, kuşak kaplama karışımları için 6.65 ve yanak karışımları için 6.66’da verilmiştir. Yorulma testleri doğası gereği yüksek standart sapma sergilemektedir. Bu nedenle lastik karışımlarında her bir kullanım yeri için yorulma test sonucunun belli bir limit değerinin üstünde olması istenir. Tablolarda verilen değerler her reçete için beklenen limit değerlerin üzerinde bulunmuştur. Bu nedenle deneme kompozit ZnO malzemelerinin ilgili karışımların yorulma dayanımını olumsuz etkilemediği görülmüştür. Çalışılan karışımlar arasında en düşük sertliğe ve en yüksek sekme esnekliğine sahip olan yanak karışımı, sırt ve kuşak kaplama karışımlarına göre daha yüksek yorulma dayanımına sahiptir. Bunun yanı sıra en yüksek sertliğe ve en düşük sekme esnekliğine sahip olan kuşak kaplama karışımı, karışımlar arasında en düşük

yorulma dayanımı göstermektedir. Servis koşullarında yorulmaya en fazla maruz kalan yanak bölgesinin yüksek yorulma dayanımı göstermesi tasarım gerekliliğidir.

Tablo 6.64. Sırt karışımlarının yorulma test sonuçları (Kontür)

	Karışım				
	SK1	SK2	SD4	SD6	SD9
Yorulma	3305±623	3593±306	3381±187	3152±36	3763±291

Tablo 6.65. Kuşak kaplama karışımlarının yorulma test sonuçları (Kontür)

	Karışım				
	KK1	KK2	KD4	KD6	KD9
Yorulma	642±18	703±148	750±86	732±95	662±50

Tablo 6.66. Yanak karışımlarının yorulma test sonuçları (Kontür)

	Karışım				
	YK1	YK2	YD4	YD6	YD9
Yorulma	3122±542	4089±886	3614±424	3104±86	4295±944

### 6.3.10. Aşınma Test Sonuçları

Lastik ömrünü belirleyen en önemli özelliklerden biri aşınma direncidir. Bu özelliği test etmek için birçok test düzeneği geliştirilmiştir ve bu çalışmada, Bölüm 5.4.10'da tanımlanan Lambourn aşınma testi kullanılmıştır. Lastik aşınması, hem aşındırılabilirlik hem de aşınma enerjisinin bir fonksiyonu olarak kabul edilir. Kauçuk karışımının aşınması, bir malzeme özelliği değil, bir sistem özelliğidir, bu nedenle aşınma koşulları sonuçları etkiler.

Sırt karışımlarının aşınma özelliklerini belirlemek amacıyla farklı kayma hızlarında aşınma testleri yapılmıştır. Test sırasında sabit bir nominal yük (30 N) uygulanmış ve kayma hızları, yumuşak koşullardan sert koşullara kadar sürüş ve frenleme koşullarını simüle etmek için sırasıyla %1, %3, %5, %7, %10, %12, %15 ve %20 olarak seçilmiştir. Araç lastiği endüstrisindeki uygulamalar, 30 N nominal kuvvet ve %15 kayma hızının, binek lastikleri için, yol testlerine paralel veriler ürettiğini göstermektedir. Lambourn aşınma testleri, oda sıcaklığında 5 dk süreyle yürütülmüş olup, elde edilen verilerden doğrusal aşınma hızı (V) Denklem (5.9) ve doğrusal aşınma enerjisi ( $\epsilon W$ ) Denklem (5.10) kullanılarak hesaplanmıştır. Denklem (5.9)'da yer alan sırt karışımlarının özgül ağırlıkları

Tablo 6.55'ten alınmıştır. Tüm testlerde, aşınma nedeniyle örnek yüzeyinden kopan parçacıklar, aşındırıcı yüzey ile örnek yüzeyi arasına beslenen talk sayesinde uzaklaştırılmaktadır, talk besleme hızı tüm testlerde 0,15 g/dk olarak ayarlanmıştır. Sırt karışımları için hazırlanan 3 harmanın her birinden 1'er test yapılarak toplam 3 testin ortalama ağırlık kaybı ve standart sapması raporlanmıştır. Her bir kayma hızında sırt karışımlarında gözlenen ağırlık kayıpları ve ölçülen ortalama örnek sıcaklıkları (T) ve dikey yönde uygulanan kuvvet ( $F_y$ ) birlikte ortalama kayıplardan hesaplanan doğrusal aşınma hızı ve enerjisi değerleri Tablo 6.67-6.74'te verilmiştir. Tablolarda görüldüğü gibi tüm kayma hızlarında SK1 kontrol karışımı en yüksek partikül boyutuna sahip olması dolayısıyla en fazla ağırlık kaybına uğramış ve en düşük aşınma direncine sahip olduğu görülmüştür. Partikül boyutu küçük olan SK2 kontrol karışımı ve ona en yakın ZnO oranına sahip olan SD9 deneme karışımı en düşük ağırlık kayıpları gösterirken, en yüksek aşınma direncini sergilemişlerdir. Tüm deneme karışımları, düşük partikül boyutları nedeniyle, SK1 kontrol karışımına göre daha iyi aşınma direncine sahiptir.

Tablo 6.67. Sırt karışımlarının aşındırma test sonuçları (% 1 kayma hızı)

Karışım	$\Delta W$ (g)	T (°C)	V (mm/1000km)	$F_y$ (N)	$\epsilon W$ (kgf/cm <sup>2</sup> )
SK1	0,024±0,001	28,07	14,77	29,99	0,03
SK2	0,018±0,001	27,11	10,94	29,99	0,03
SD4	0,019±0,057	27,45	13,75	29,98	0,03
SD6	0,020±0,006	27,99	12,24	29,98	0,03
SD9	0,017±0,002	27,87	10,28	29,99	0,03

Tablo 6.68. Sırt karışımlarının aşındırma test sonuçları (% 3 kayma hızı)

Karışım	$\Delta W$ (g)	T (°C)	V (mm/1000km)	$F_y$ (N)	$\epsilon W$ (kgf/cm <sup>2</sup> )
SK1	0,028±0,001	28,02	17,30	29,99	0,04
SK2	0,021±0,000	28,22	12,88	30,00	0,04
SD4	0,026±0,007	28,37	16,43	29,99	0,04
SD6	0,022±0,001	27,74	13,76	29,99	0,04
SD9	0,019±0,002	28,29	11,73	30,00	0,04

Tablo 6.69. Sırt karışımlarının aşındırma test sonuçları (% 5 kayma hızı)

Karışım	$\Delta W$ (g)	T (°C)	V (mm/1000km)	F <sub>y</sub> (N)	$\epsilon W$ (kgf/cm <sup>2</sup> )
SK1	0,021±0,014	28,17	12,85	30,00	0,11
SK2	0,019±0,002	28,42	11,54	30,00	0,10
SD4	0,017±0,006	29,16	10,86	29,99	0,11
SD6	0,018±0,005	28,66	11,02	29,99	0,10
SD9	0,017±0,002	28,92	10,30	29,99	0,10

Tablo 6.70. Sırt karışımlarının aşındırma test sonuçları (% 7 kayma hızı)

Karışım	$\Delta W$ (g)	T (°C)	V (mm/1000km)	F <sub>y</sub> (N)	$\epsilon W$ (kgf/cm <sup>2</sup> )
SK1	0,026±0,007	29,58	15,93	30,00	0,19
SK2	0,022±0,001	29,82	13,82	29,99	0,18
SD4	0,024±0,001	29,86	15,10	29,99	0,19
SD6	0,023±0,004	29,6	14,07	30,00	0,18
SD9	0,020±0,000	29,56	12,33	30,00	0,18

Tablo 6.71. Sırt karışımlarının aşındırma test sonuçları (% 10 kayma hızı)

Karışım	$\Delta W$ (g)	T (°C)	V (mm/1000km)	F <sub>y</sub> (N)	$\epsilon W$ (kgf/cm <sup>2</sup> )
SK1	0,047±0,008	29,24	29,00	29,99	0,33
SK2	0,043±0,020	29,63	26,66	29,99	0,31
SD4	0,047±0,004	29,38	29,53	29,99	0,33
SD6	0,043±0,002	29,34	26,75	29,99	0,30
SD9	0,037±0,028	29,16	22,89	29,99	0,31

Tablo 6.72. Sırt karışımlarının aşındırma test sonuçları (% 12 kayma hızı)

Karışım	$\Delta W$ (g)	T (°C)	V (mm/1000km)	F <sub>y</sub> (N)	$\epsilon W$ (kgf/cm <sup>2</sup> )
SK1	0,146±0,003	28,14	59,74	29,99	0,40
SK2	0,080±0,003	28,21	52,91	29,99	0,39
SD4	0,147±0,040	28,36	57,74	30,00	0,41
SD6	0,087±0,005	28,71	54,31	29,99	0,39
SD9	0,076±0,001	28,36	49,47	29,99	0,38

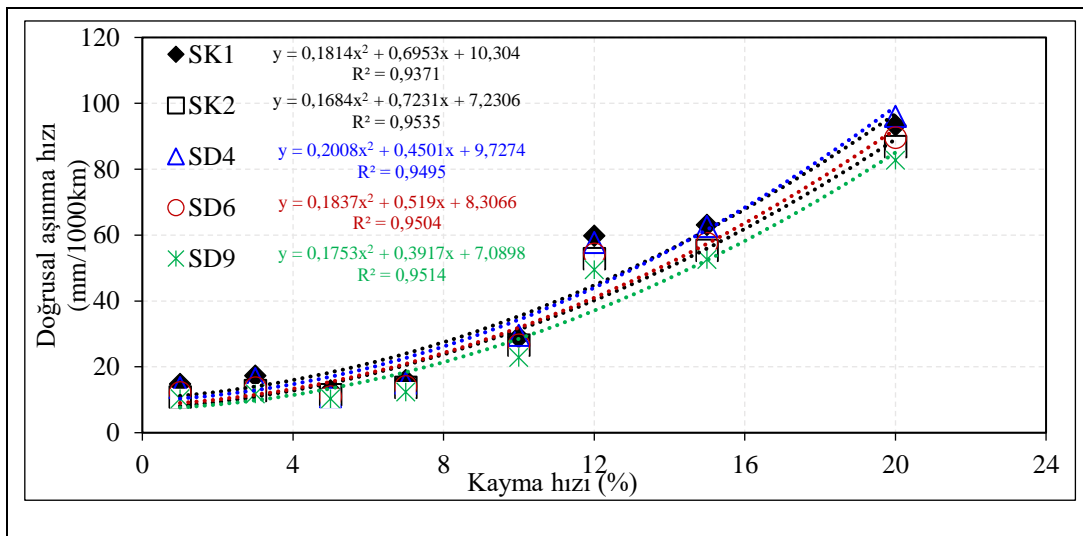
Tablo 6.73. Sırt karışımlarının aşındırma test sonuçları (% 15 kayma hızı)

	$\Delta W$ (g)	T (°C)	V (mm/1000km)	$F_y$ (N)	$\epsilon W$ (kgf/cm <sup>2</sup> )
SK1	0,146±0,003	28,14	59,74	29,99	0,54
SK2	0,080±0,003	28,21	52,91	29,99	0,51
SD4	0,147±0,040	28,36	57,74	29,99	0,52
SD6	0,087±0,005	28,71	54,31	29,99	0,51
SD9	0,076±0,001	28,36	49,47	29,99	0,51

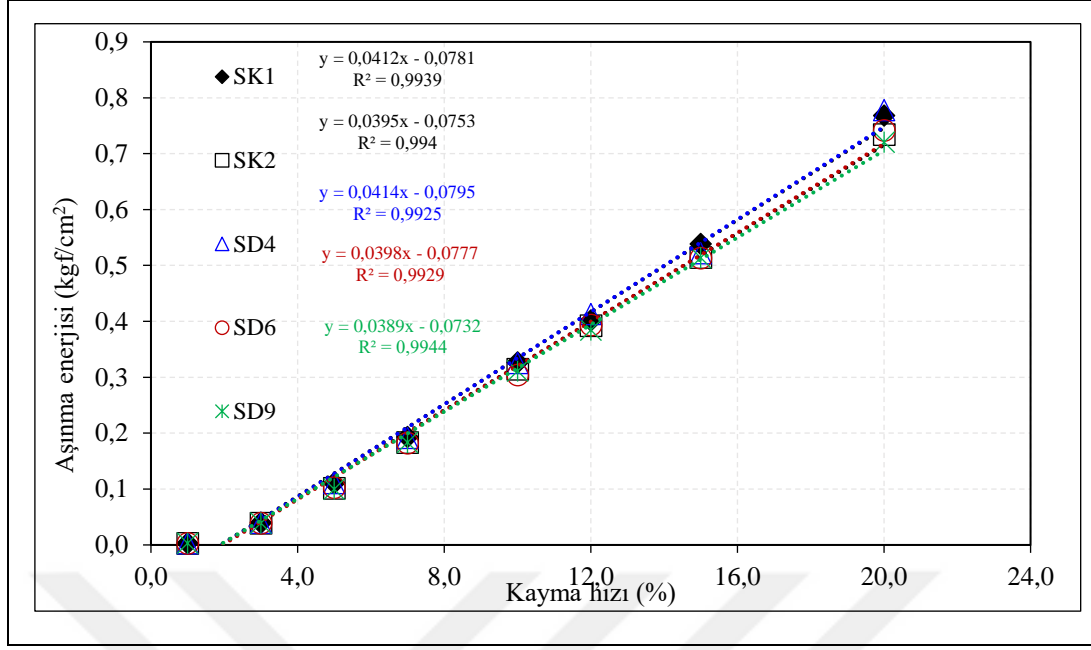
Tablo 6.74. Sırt karışımlarının aşındırma test sonuçları (% 20 kayma hızı)

Karışım	$\Delta W$ (g)	T (°C)	V (mm/1000km)	$F_y$ (N)	$\epsilon W$ (kgf/cm <sup>2</sup> )
SK1	0,161±0,011	27,57	93,35	29,99	0,77
SK2	0,140±0,014	28,29	86,90	29,99	0,73
SD4	0,159±0,004	28,61	95,99	29,99	0,78
SD6	0,144±0,007	28,28	89,57	29,99	0,74
SD9	0,133±0,003	28,19	82,76	29,99	0,72

Doğrusal aşınma hızının kayma hızına göre değişimi Şekil 6.30’da gösterilmiştir. Tüm karışımlarda doğrusal aşınma hızı, daha yumuşak sürüş koşullarında (% 1-7 kayma hızları) sabit kalırken, daha sert sürüş koşullarında (% 10-20 kayma hızları), doğrusal olarak hızlı bir artış göstermektedir. Tablo 6.67-6.74’te verilen  $F_y$  ölçüm değerleri kullanılarak her kayma hızı için hesaplanan doğrusal aşınma enerjisi hesaplanmış ve kayma hızına göre değişimi Şekil 6.31’de verilmiştir. Denklem (5.10)’dan da anlaşıldığı üzere ilişki doğrusaldır.



Şekil 6.30. Sırt karışımlarının kayma hızına bağlı doğrusal aşınma hızı değişimi

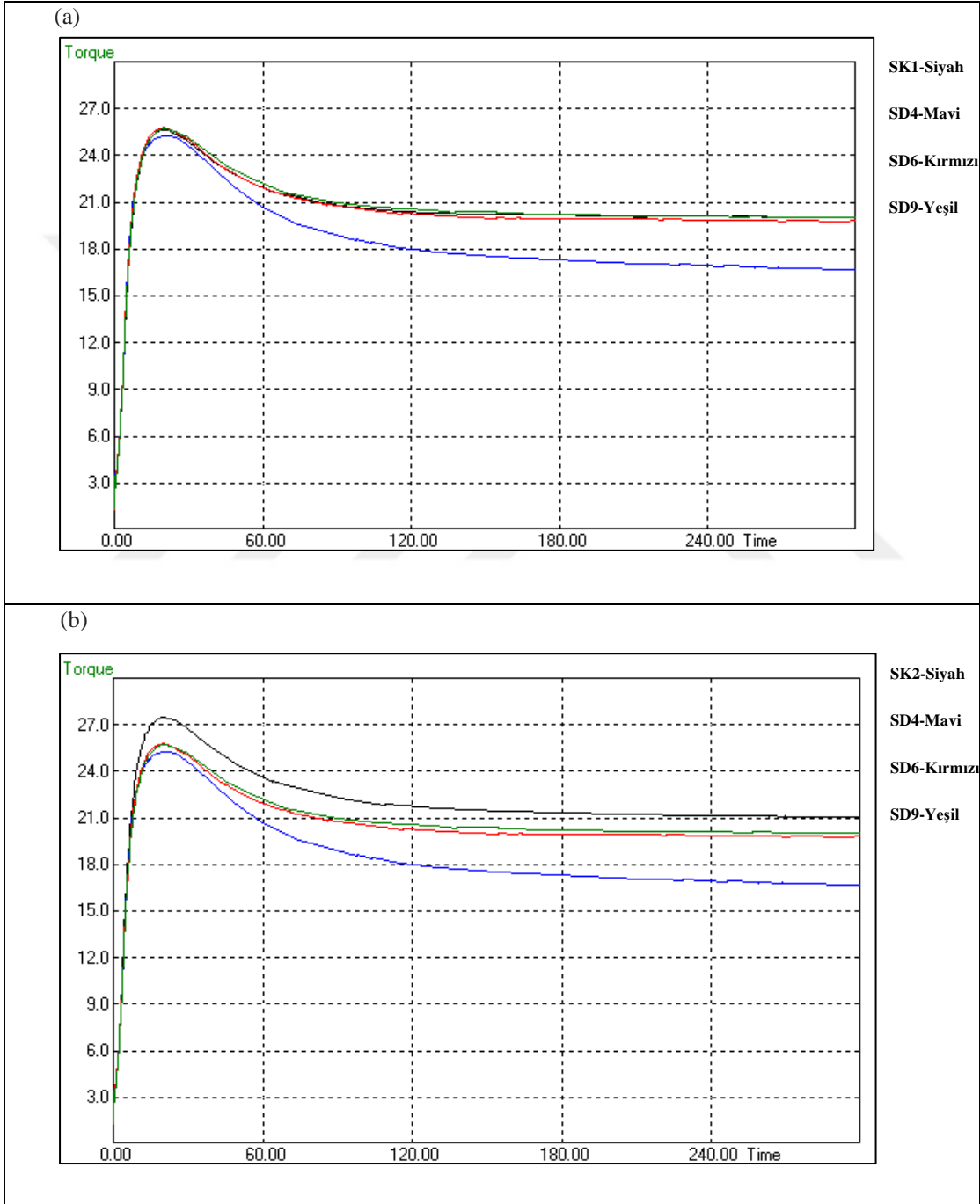


Şekil 6.31. Sırt karışımlarının kayma hızına bağlı doğrusal aşınma enerjisi değişimi

### 6.3.11. Kauçuk Karışımı-Metal Yapışma Testi Sonuçları

Kuşak kaplama karışımlarının karışım-metal yapışma testleri Bölüm 5.4.11’de anlatılan test metoduna uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Kuşak kaplama karışımı için MDR ile belirlenen optimum pişirme koşulu Bölüm 6.2’de verildiği gibi 160 °C x 16 dk’dır. Pişme öncesi ve sonrası kauçuk karışımı-metal yapışma sonuçlarını görmek amacıyla CRA testleri 7,5 dk, 16 dk, 40 dk, 60 dk ve 300 dk pişirilen örneklerle yapılmıştır. En uzun süre olan 300 dk örneğine ait MDR sonucu Şekil 6.32’de verilmiştir. Eğrilerden de anlaşıldığı gibi tüm karışımlar için seçilen en uzun sürede devam eden bir pişme ya da çapraz bağların bozulması ile ortaya çıkan geri dönüş aşaması bulunmamaktadır. Karışımların farklı pişirme koşullarında yapılan CRA testlerinin sonuçları Tablo 6.75 ve 6.76’da verilmiştir. Yapışma kuvveti test sonuçlarından (Tablo 6.75) görüldüğü üzere 7,5 dk örneği, tam pişme sağlanamadığı için, karışımlar arasında farklılık ve yüksek standart sapma göstermiştir. Ayrıca bu süre için Tablo 6.76’da görüldüğü gibi çelik kord yüzeylerini kaplayan karışım oranı yarı yarıyadır ve yapışmanın tam sağlanamadığını belirtmektedir. Pişme süresi 16, 40 ve 60 dk olduğunda kord yüzeyleri tamamen karışımla kaplı olup (%100) yapışma kuvveti benzer değerler vermektedir. En uzun pişme süresi olarak seçilen 300 dk örneğinde ise yapışma kuvvetinin belirgin bir şekilde düştüğü (Tablo 6.75) ve bazı karışımlar için görünümde düşüş (%90) olduğu (Tablo 6.76)

belirlenmiştir. Lastik teknolojisinde CRA testleri için  $\pm$  %10 değişkenlik benzer kabul edilmekte olup, bu durumda optimum pişirme süresinde tüm karışımların benzer yapışma kuvveti sergilediği görülmektedir. Ayrıca bu koşulda tüm karışımlar için çelik kord yüzeylerinin %100 kaplanmış olması yapışmanın tam olarak sağlanmış olduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 6.32. Deneme karışımlarının 160 °C x 300 dk pişirme koşulunda alınan MDR eğrileri (a) Kontrol WS-ZnO'ya kıyasla, (b) Kontrol Ac-ZnO'ya kıyasla

Tablo 6.75. Kuşak kaplama karışımlarının kauçuk karışım-metal yapışma kuvveti (N) test sonuçları

Süre (dk)	Karışım				
	KK1	KK2	KD4	KD6	KD9
7,5	40±1	37±2	26±8	26±8	46±1
16	48±1	49±1	48±2	49±2	52±2
40	50±5	46±4	48±2	55±5	52±4
60	46±5	54±1	41±5	61±4	50±9
300	13±2	13±2	14±2	13±2	14±2

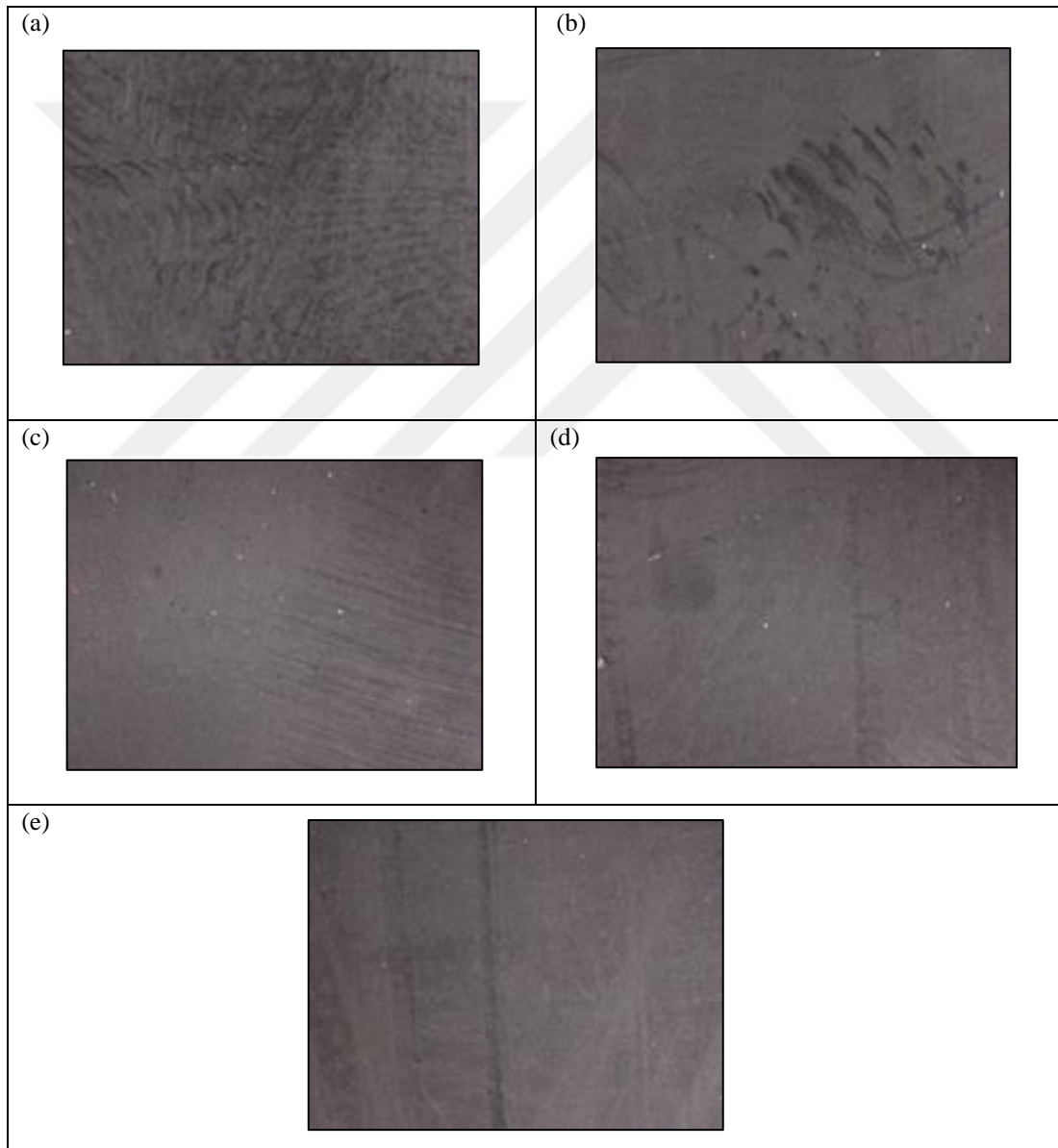
Tablo 6.76. Kuşak kaplama karışımlarının kauçuk karışım-metal yapışma görünüm (%) test sonuçları

Süre (dk)	Karışım				
	KK1	KK2	KD4	KD6	KD9
7,5	50	50	50	50	50
16	100	100	100	100	100
40	100	100	100	100	100
60	100	100	100	100	100
300	100	100	100	90	90

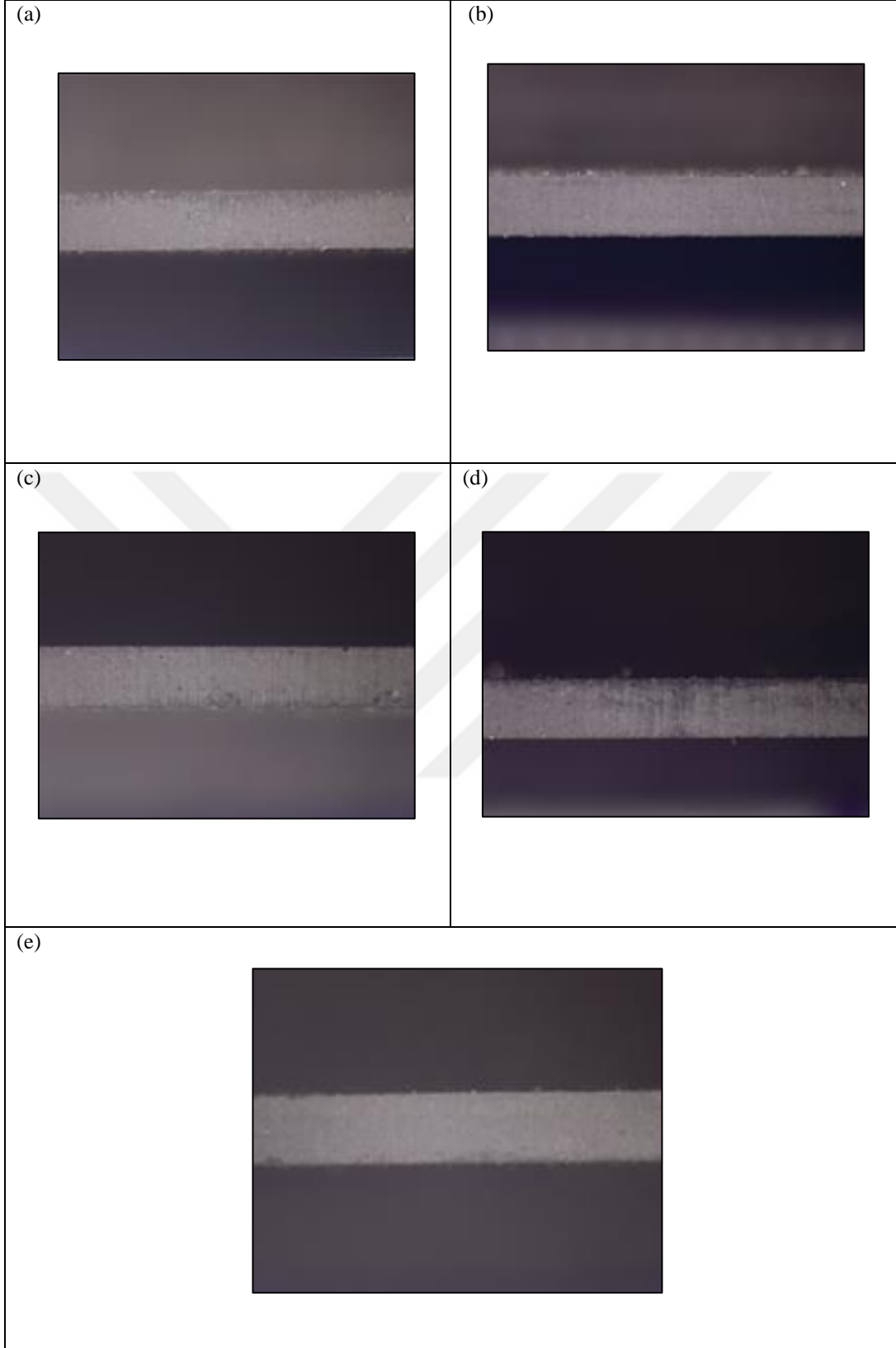
### 6.3.12. Ozon Yaşlandırma Testi Sonuçları

Yanak karışımlarının ozon yaşlandırma testleri Bölüm 5.4.12’de verilen test metoduna uygun olarak statik ve dinamik koşullarda yapılmıştır. Statik test koşullarında 72 saat süre ile yapılan ozon testi sonrası, örneklerin üst, yan ve bükülmüş yan yüzeylerinin ışık mikroskop görüntüleri Şekil 6.33-35’te verilmiştir. Tüm örneklerde herhangi bir ozon çatlağı gözlenmemiştir. Ozon testleri, 72 saat süre ile dinamik koşullarda tekrarlanmış ve sonuçlar Şekil 6.36-38’de verilmiştir. Şekillerden de görüldüğü üzere tüm örnekler ozona karşı benzer hasara uğramıştır. Özellikle Şekil 6.39’da verilen bükülmüş yan yüzey görüntüleri ozon çatlak derinliklerinin tüm örneklerde benzer olduğunu ortaya koymuştur. Standart testlere ek olarak ısı yaşlanmanın ozon direncine etkisini görmek amacı ile örnekler 100 °C’de 24 saat yaşlandırma sonrası dinamik koşullarda, 24, 48, 72, 96, 120 ve 144 saat süre ile ozon testine tabi tutulmuştur. Testler sonrası çıplak gözle incelenen örneklerin görüntüleri Şekil 6.40-45’te verilmiştir. Şekillerde hem cihaz içindeki örneklerin görüntüleri hem de kırmızı dikdörtgen ile işaretlenen bölgelerin

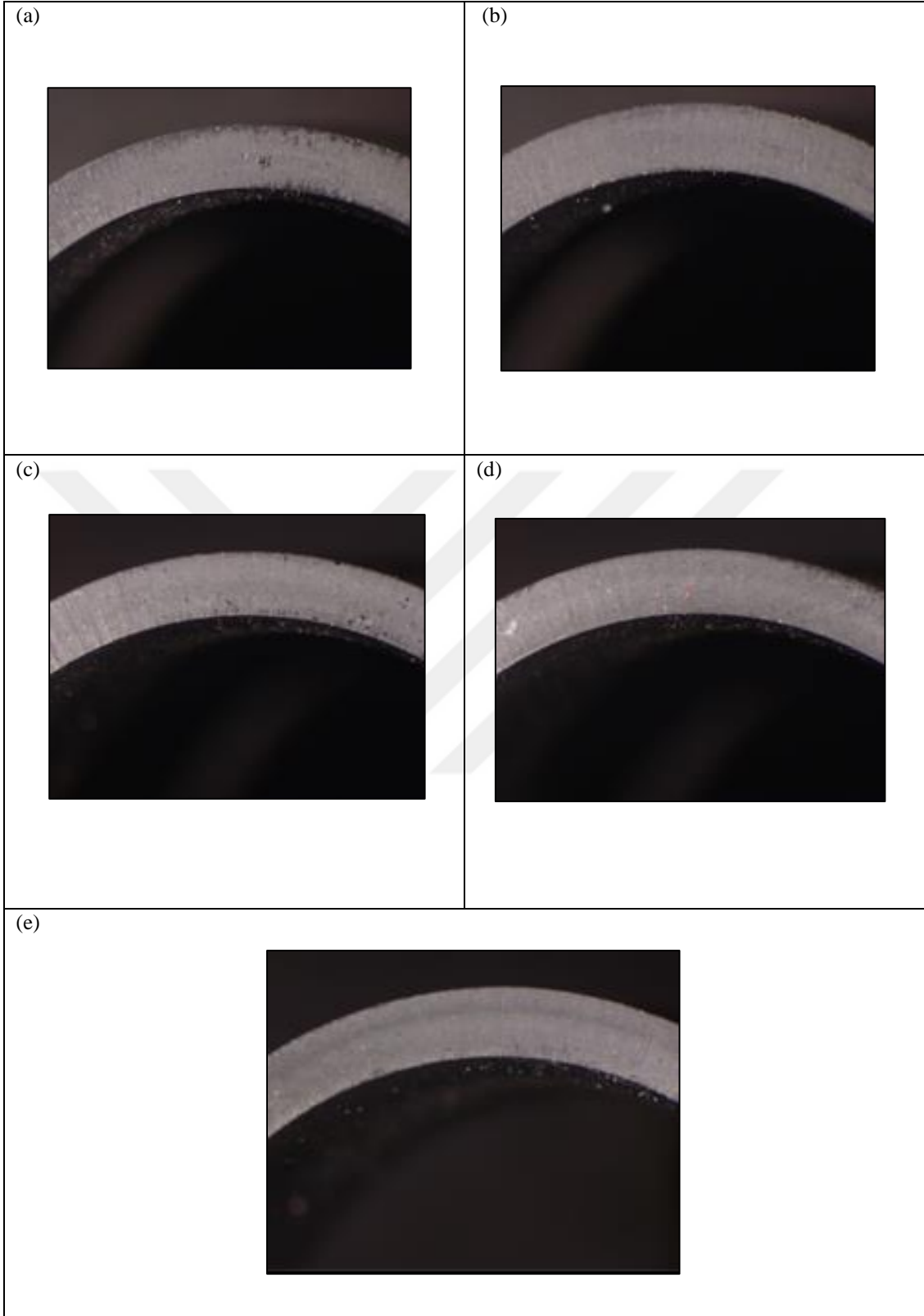
büyütülmüş görüntüleri paylaşılmıştır. Tüm şekillerden de görüldüğü 24.saatte örneklerin kenar kısımlarından başlayan ince ozon çatlakları, ilerleyen sürelerde büyüyerek 72 saat sonrasında tüm örnek yüzeylerini belirgin şekilde kaplamış ve en uzun süre olan 144 saatte kopmalar başlamıştır. Şekiller tüm örneklerde benzer hasarlar göstermiştir. Yanak karışımı örneklerinin dinamik koşullar altında 72 saat yaşlandırma sonrasındaki çatlak derinlik ölçüleri Tablo 6.77’de verilmiştir. Her bir karışım için 10’ar ölçüm alınmış olup, standart sapmalar dikkate alındığında ortalama çatlak derinliklerinin benzer olduğu gözlemlenmiştir.



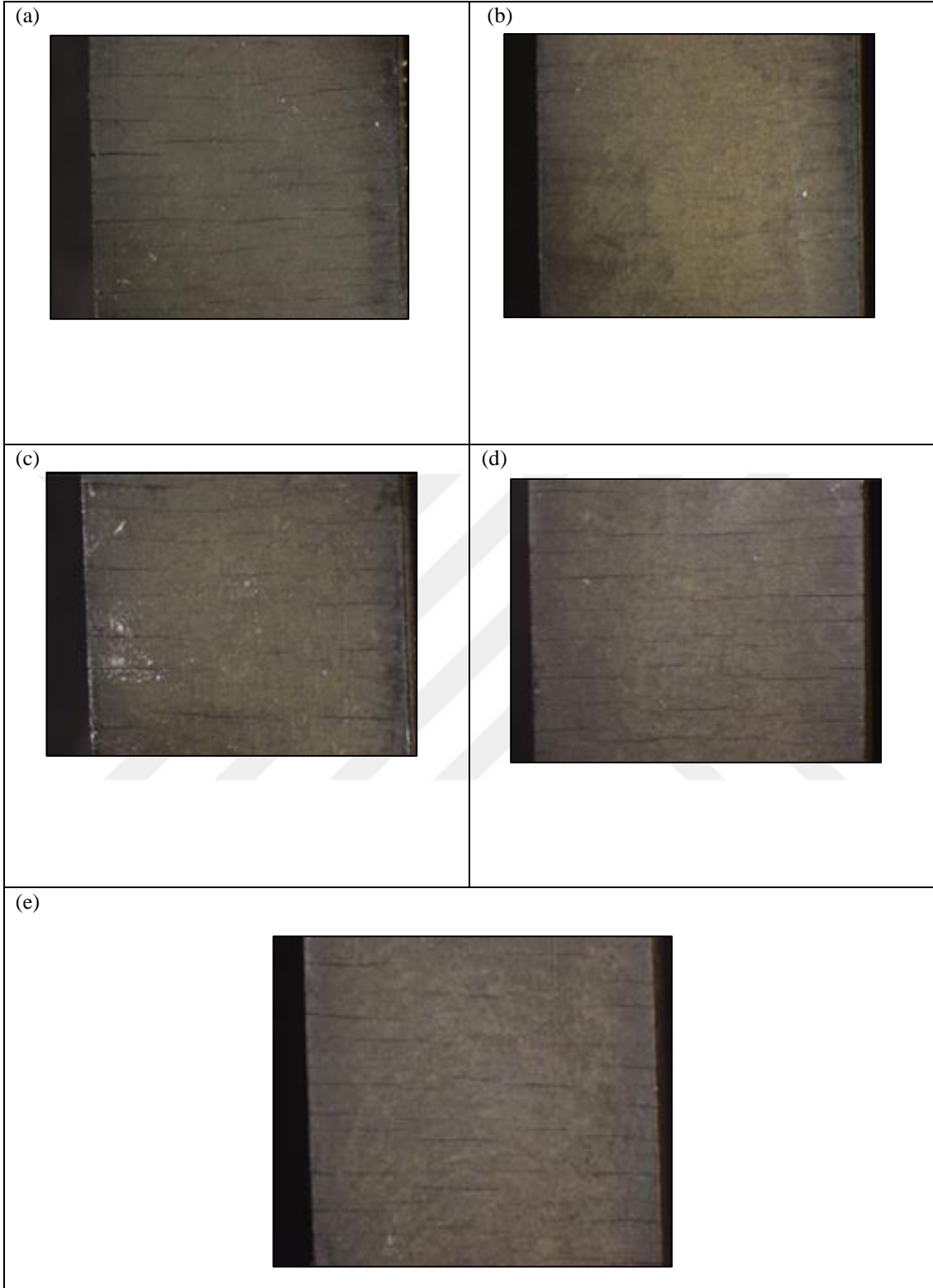
Şekil 6.33. Yanak karışımı örneklerinin statik koşullar altında 72 saat yaşlandırma sonrasındaki üst yüzeylerinin ışık mikraskobu görüntüleri (a) YK1 (b) YK2, (c) YD4, (d) YD6 ve (e) YD9



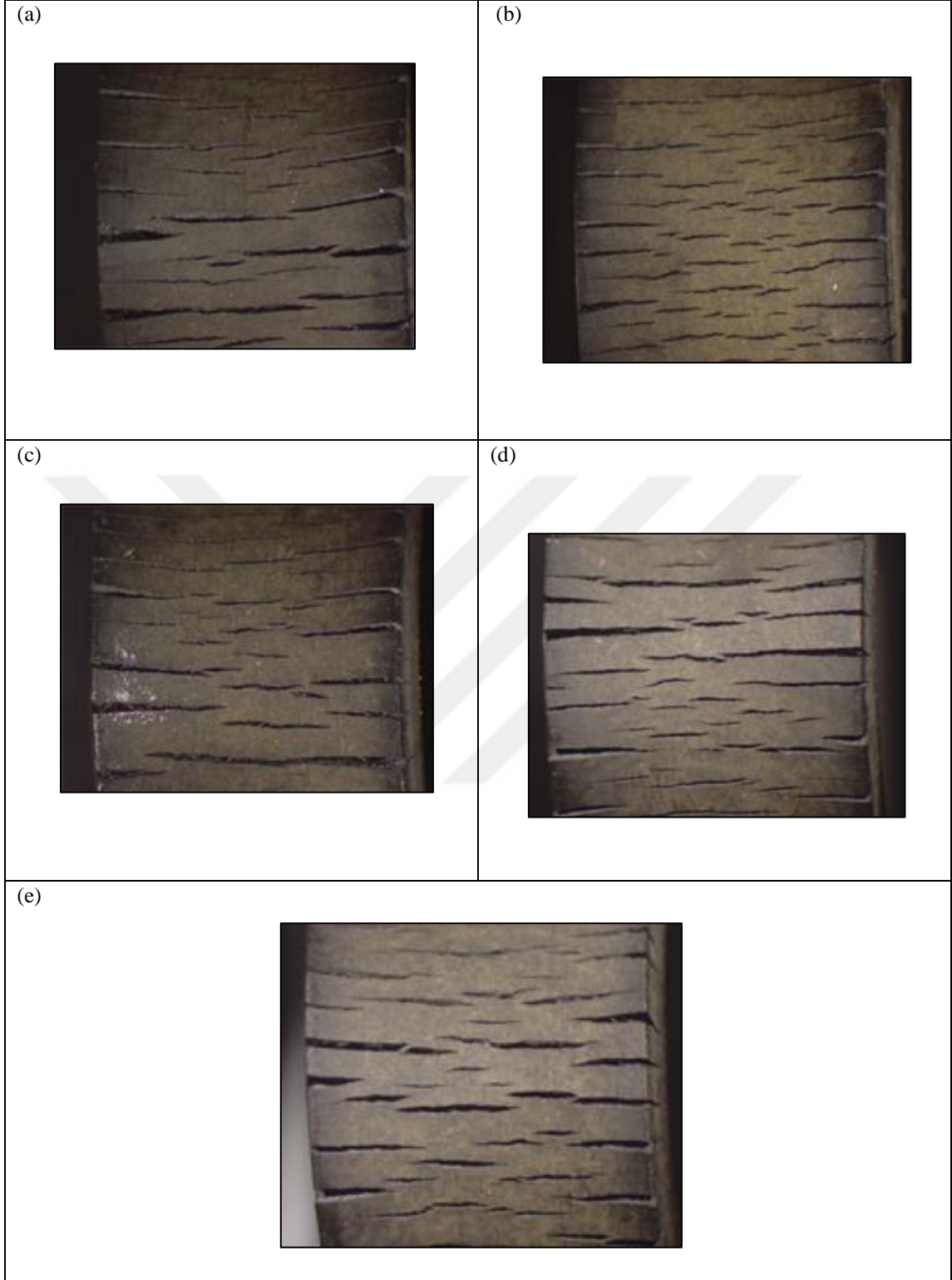
Şekil 6.34. Yanak karışımı örneklerinin statik koşullar altında 72 saat yaşlandırma sonrasındaki yan yüzeylerinin ışık mikraskopu görüntüleri (a) YK1 (b) YK2, (c) YD4, (d) YD6 ve (e) YD9



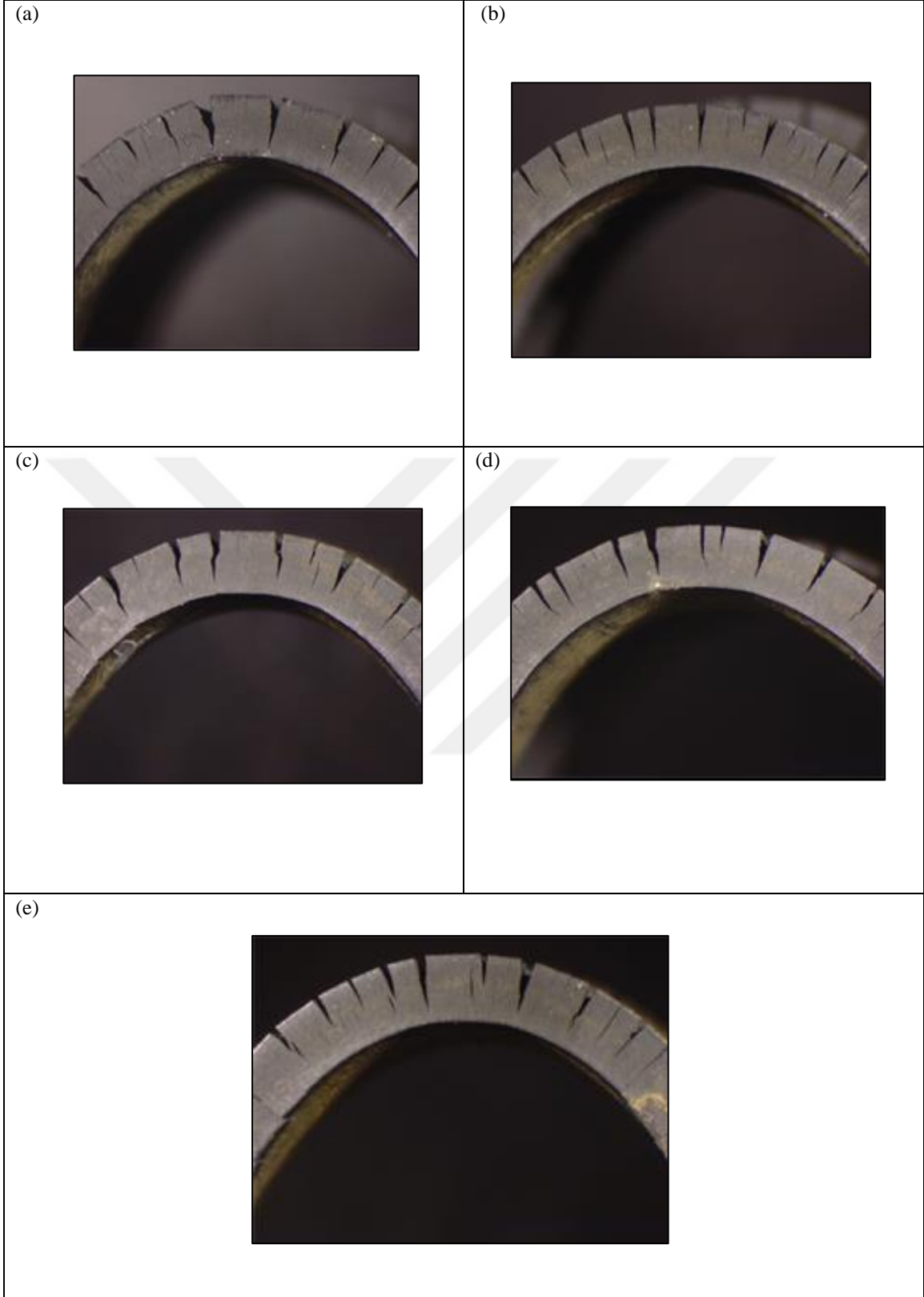
Şekil 6.35. Yanak karışımı örneklerinin statik koşullar altında 72 saat yaşlandırma sonrasındaki bükülmüş yan yüzeylerinin ışık mikraskobu görüntüleri (a) YK1 (b) YK2, (c) YD4, (d) YD6 ve (e) YD9



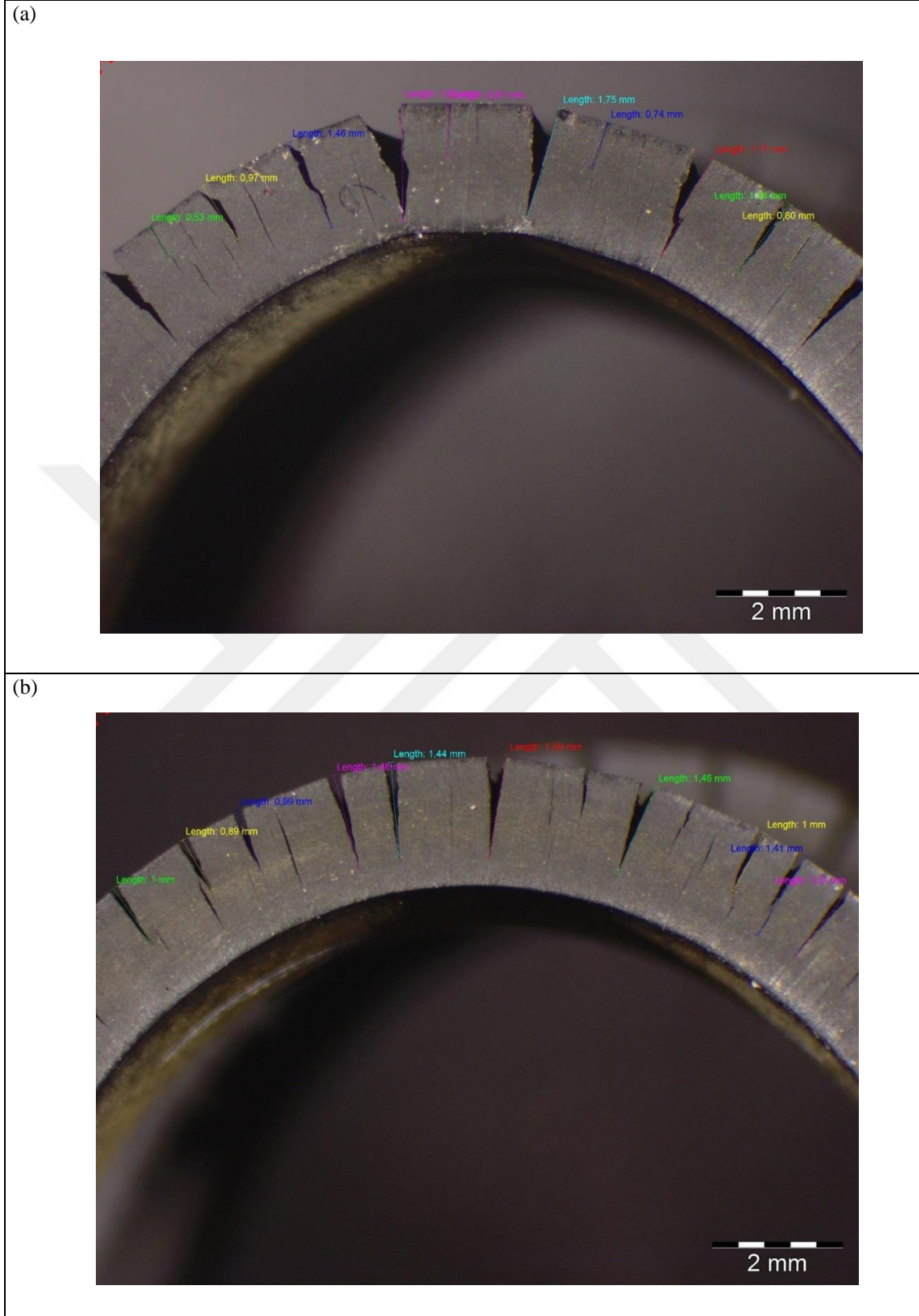
Şekil 6.36. Yanak karışımı örneklerinin dinamik koşullar altında 72 saat yaşlandırma sonrasındaki üst yüzeylerinin ışık mikraskobu görüntüleri (a) YK1 (b) YK2, (c) YD4, (d) YD6 ve (e) YD9



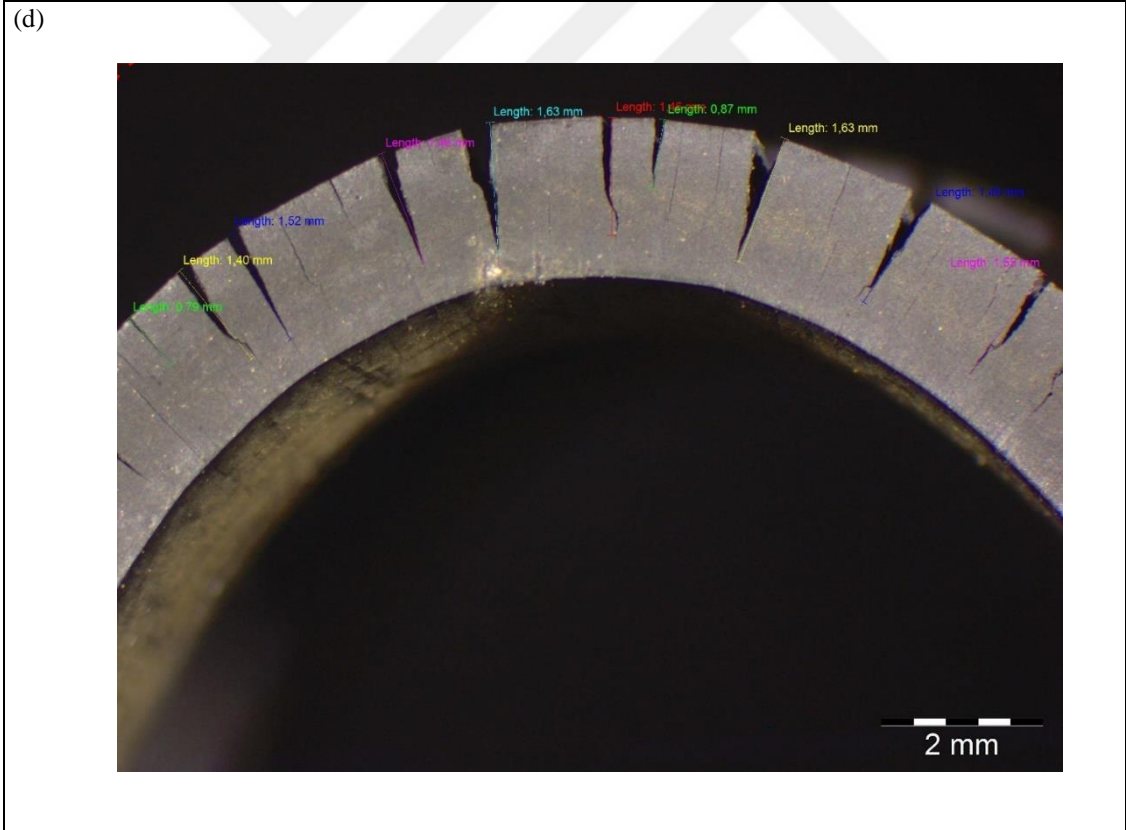
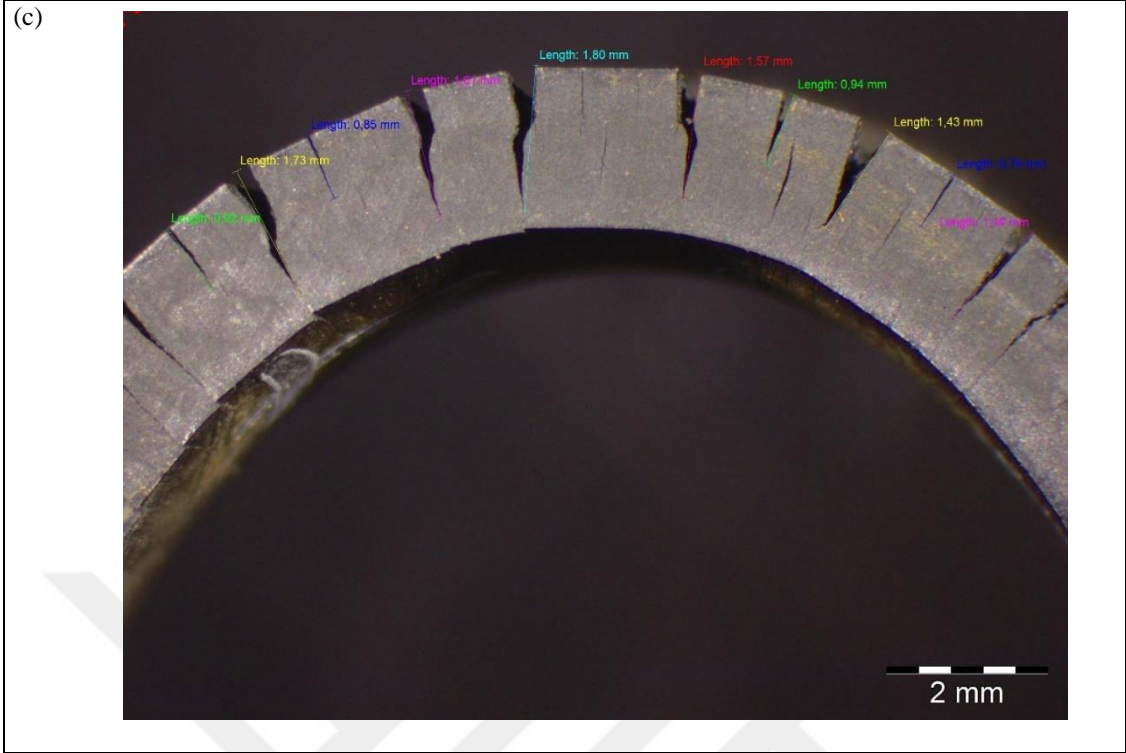
Şekil 6.37. Yanak karışımı örneklerinin dinamik koşullar altında 72 saat yaşlandırma sonrasındaki yan yüzeylerinin ışık mikraskobu görüntüleri (a) YK1 (b) YK2, (c) YD4, (d) YD6 ve (e) YD9



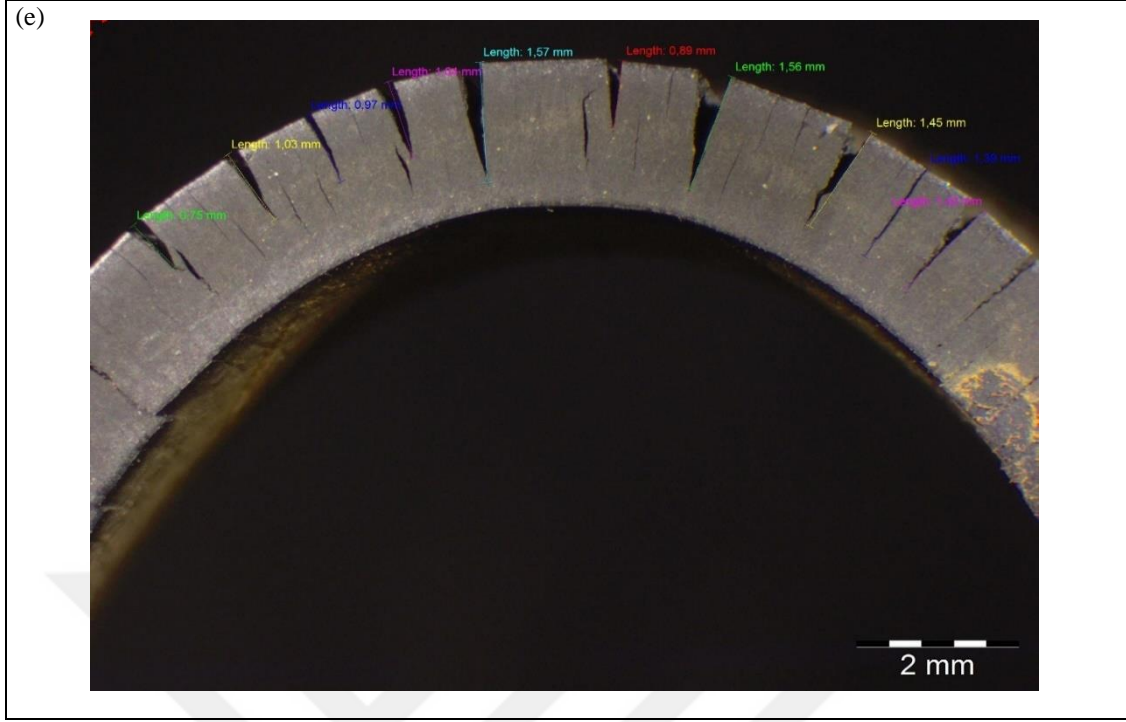
Şekil 6.38. Yanak karışımı örneklerinin dinamik koşullar altında 72 saat yaşlandırma sonrasındaki bükülmüş yan yüzeylerinin ışık mikraskobu görüntüleri (a) YK1 (b) YK2, (c) YD4, (d) YD6 ve (e) YD9



Şekil 6.39. Yanak karışımı örneklerinin dinamik koşullar altında 72 saat yaşlandırma sonrasında bükülmüş yan yüzeylerinin ışık mikraskobu ölçümleri (a) YK1 (b) YK2, (c) YD4, (d) YD6 ve (e) YD9



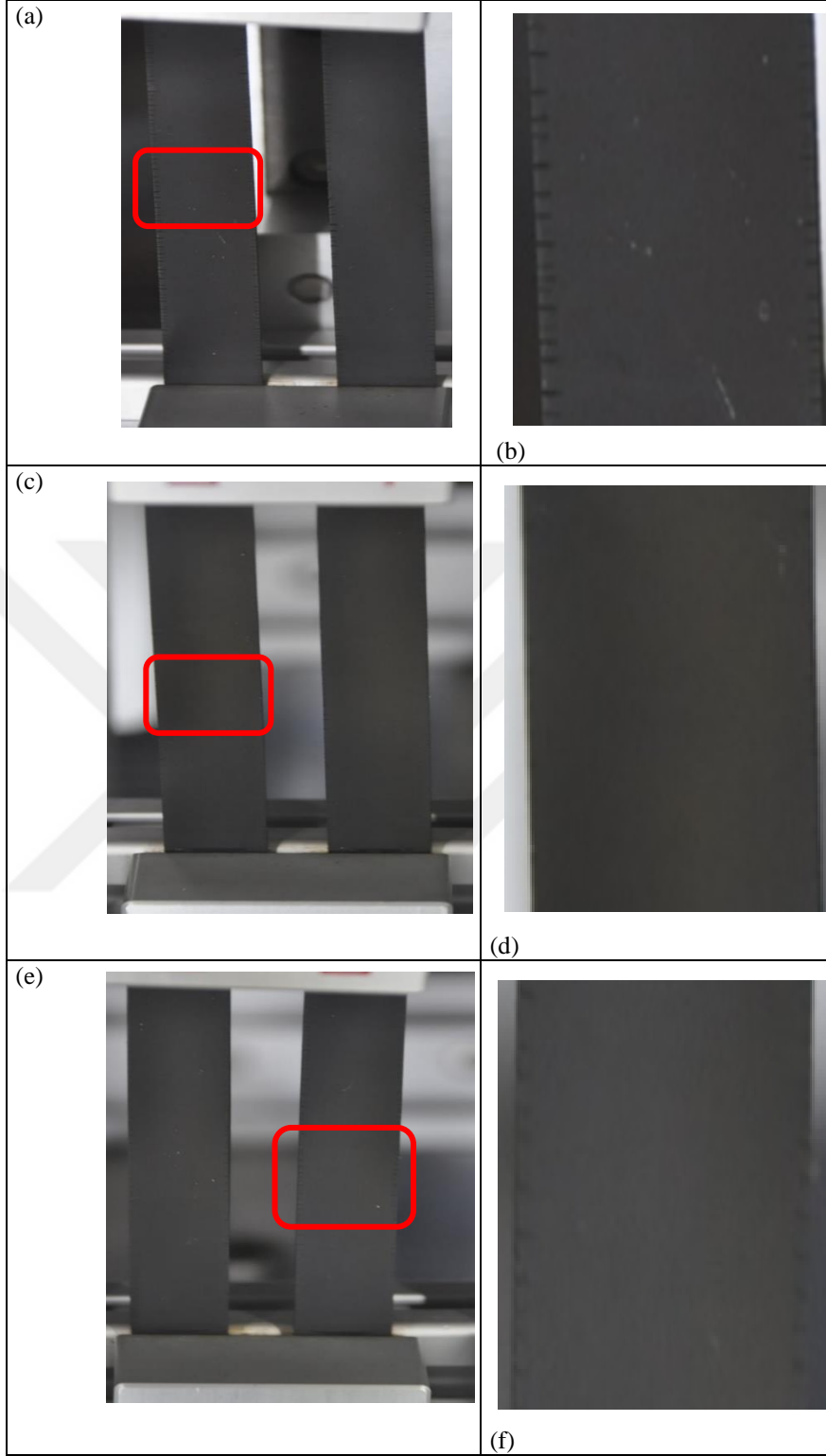
Şekil 6.39. (Devam) Yanak karışımı örneklerinin dinamik koşullar altında 72 saat yaşlandırma sonrasındaki bükülmüş yan yüzeylerinin ışık mikraskobu ölçümleri (a) YK1 (b) YK2, (c) YD4, (d) YD6 ve (e) YD9



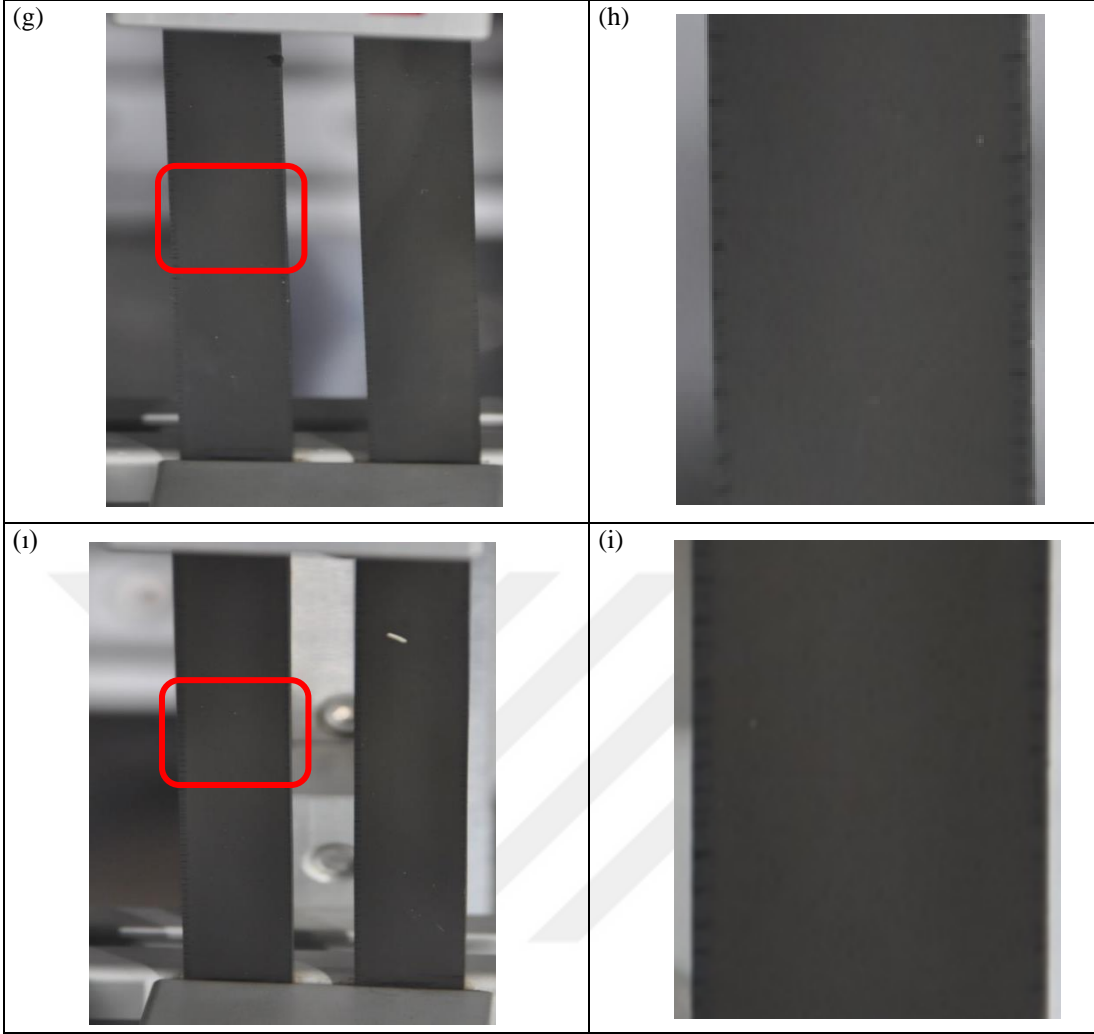
Şekil 6.39. (Devam) Yanak karışımı örneklerinin dinamik koşullar altında 72 saat yaşlandırma sonrasındaki bükülmüş yan yüzeylerinin ışık mikraskobu ölçümleri (a) YK1 (b) YK2, (c) YD4, (d) YD6 ve (e) YD9

Tablo 6.77. Yanak karışımı örneklerinin dinamik koşullar altında 72 saat yaşlandırma sonrasındaki çatlak derinlik ölçümleri (mm)

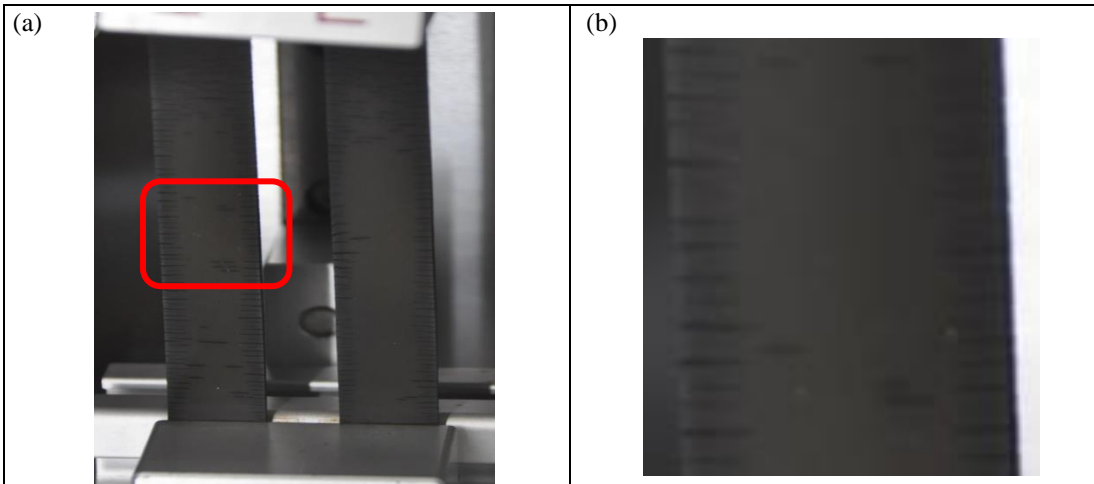
Açı	YK1	YK2	YD4	YD6	YD9
Ölçüm 1	0,53	1,00	0,92	0,79	0,75
Ölçüm 2	0,97	0,89	1,73	1,40	1,03
Ölçüm 3	1,46	0,99	0,85	1,52	0,97
Ölçüm 4	1,82	1,48	1,61	1,46	1,04
Ölçüm 5	0,81	1,44	1,80	1,63	1,57
Ölçüm 6	1,75	1,59	1,57	1,46	0,89
Ölçüm 7	0,74	1,46	0,94	0,87	1,56
Ölçüm 8	1,71	1,00	1,43	1,63	1,45
Ölçüm 9	1,34	1,41	0,76	1,49	1,39
Ölçüm 10	0,80	1,31	1,44	1,55	1,42
Minimum	0,43	0,89	0,76	0,79	0,75
Maksimum	1,82	1,59	1,80	1,63	1,57
Ortalama	1,19	1,26	1,31	1,38	1,21
Standart Sapma	0,48	0,26	0,40	0,30	0,30



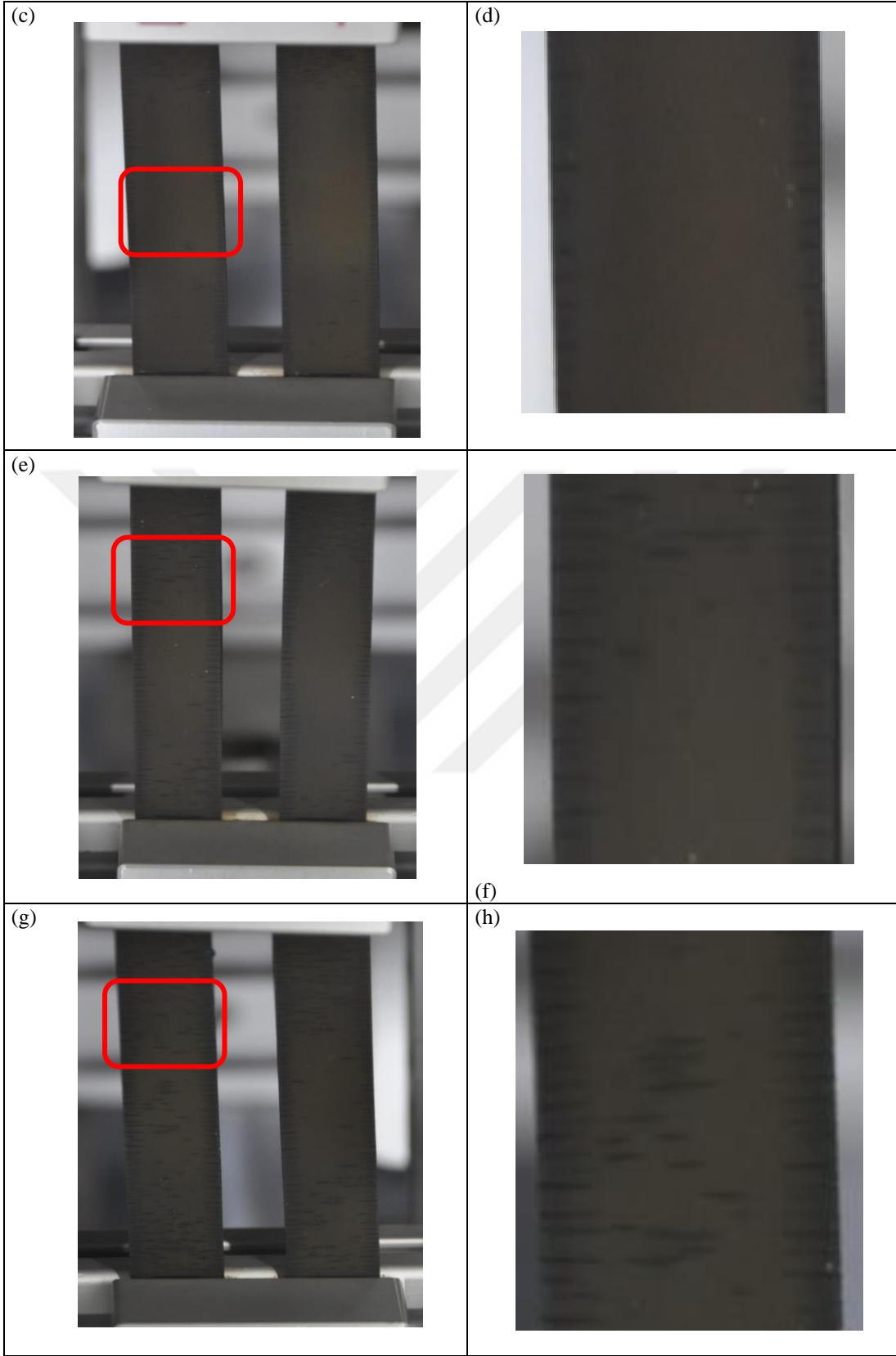
Şekil 6.40. Yanak karışım örneklerinin dinamik koşullar altında 24 saat yaşlandırma sonrasındaki görüntüleri (a,b) YK1, (c,d) YK2, (e,f) YD4, (g,h) YD6 ve (i,j) YD9



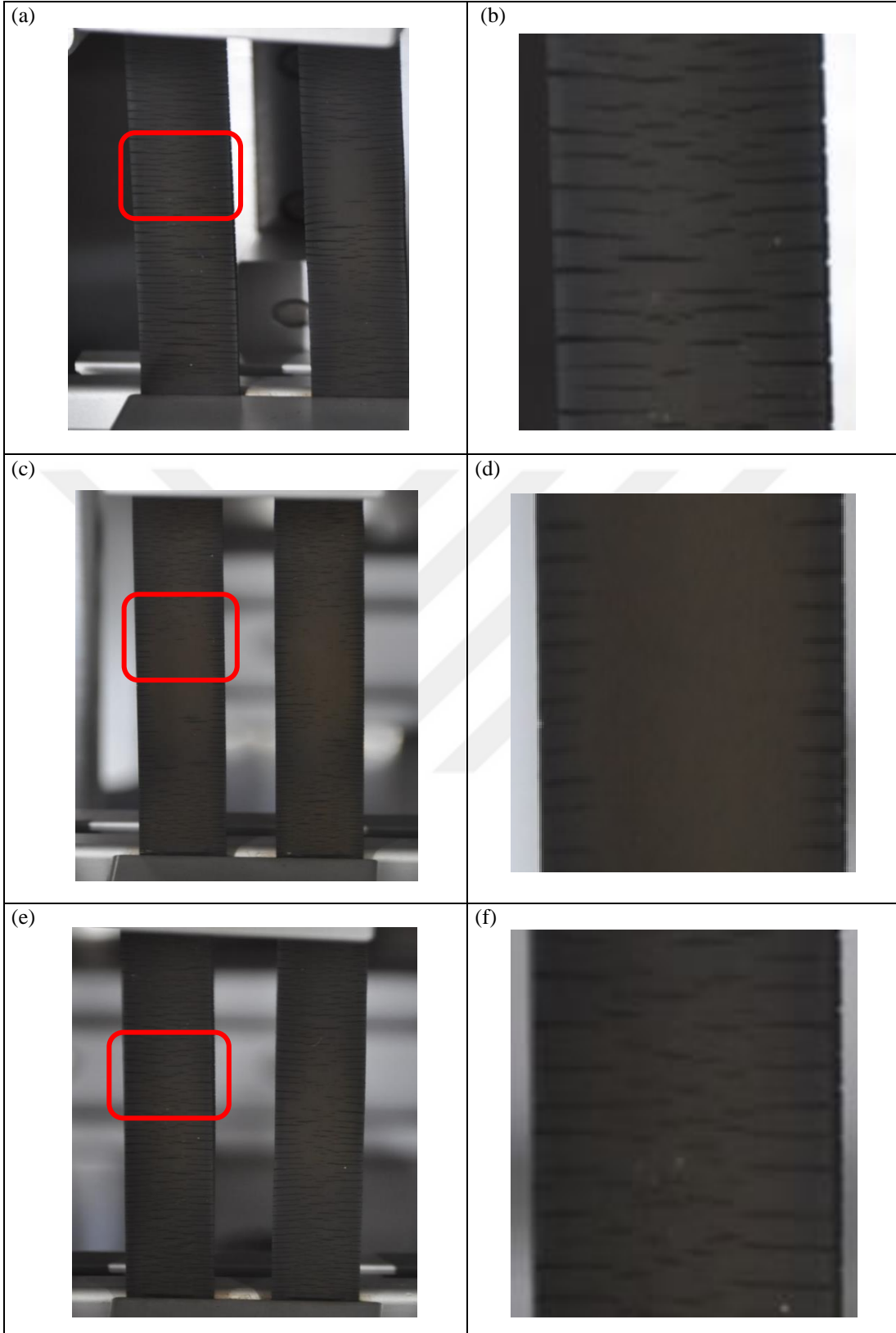
Şekil 6.40. (Devam) Yanak karışım örneklerinin dinamik koşullar altında 24 saat yaşlandırma sonrasındaki görüntüleri (a,b) YK1, (c,d) YK2, (e,f) YD4, (g,h) YD6 ve (i,j) YD9



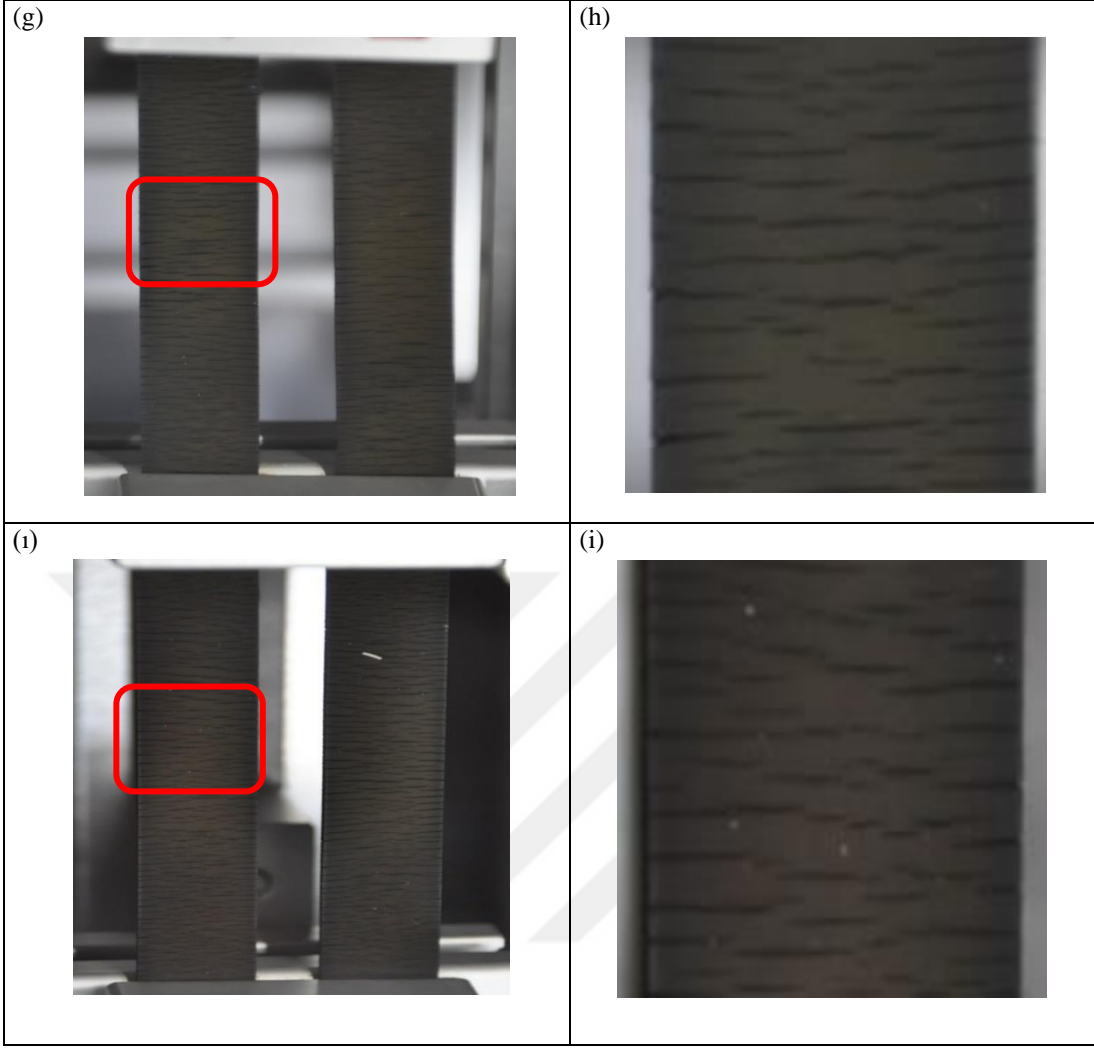
Şekil 6.41. Yanak karışım örneklerinin dinamik koşullar altında 48 saat yaşlandırma sonrasındaki görüntüleri (a,b) YK1, (c,d) YK2, (e,f) YD4, (g,h) YD6 ve (i,j) YD9



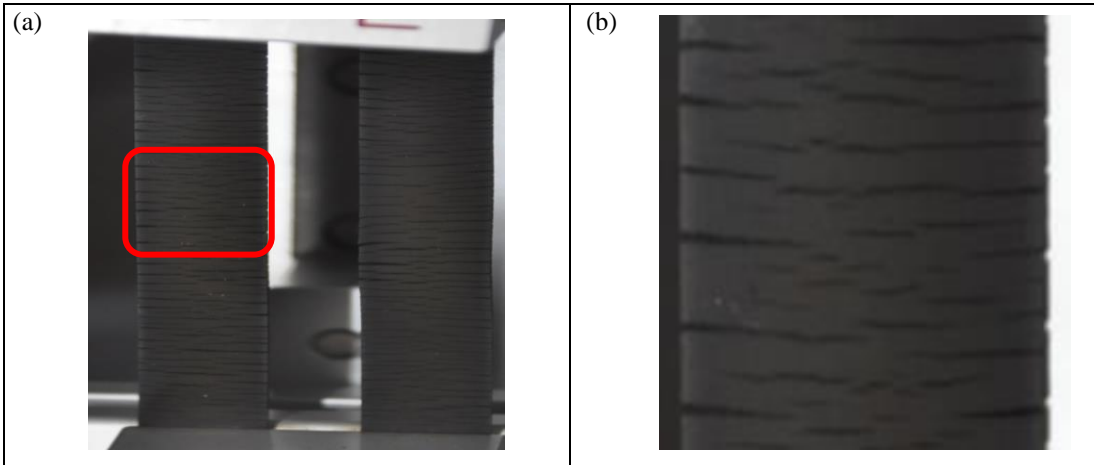
Şekil 6.41. (Devam) Yanak karışım örneklerinin dinamik koşullar altında 48 saat yaşlandırma sonrasındaki görüntüleri (a,b) YK1, (c,d) YK2, (e,f) YD4, (g,h) YD6 ve (i,j) YD9



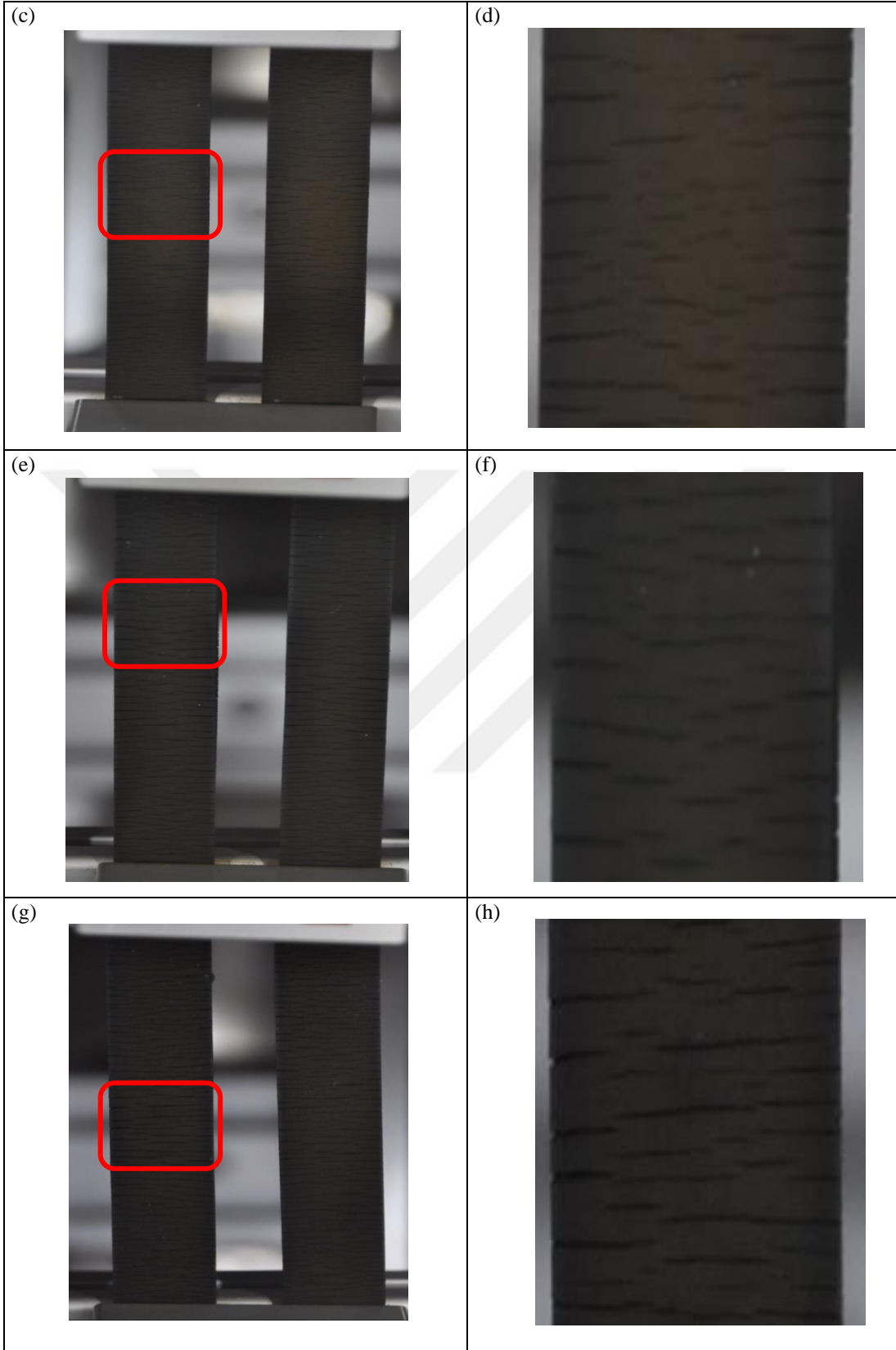
Şekil 6.42. Yanak karışım örneklerinin dinamik koşullar altında 72 saat yaşlandırma sonrasındaki görüntüleri (a,b) YK1, (c,d) YK2, (e,f) YD4, (g,h) YD6 ve (i,j) YD9



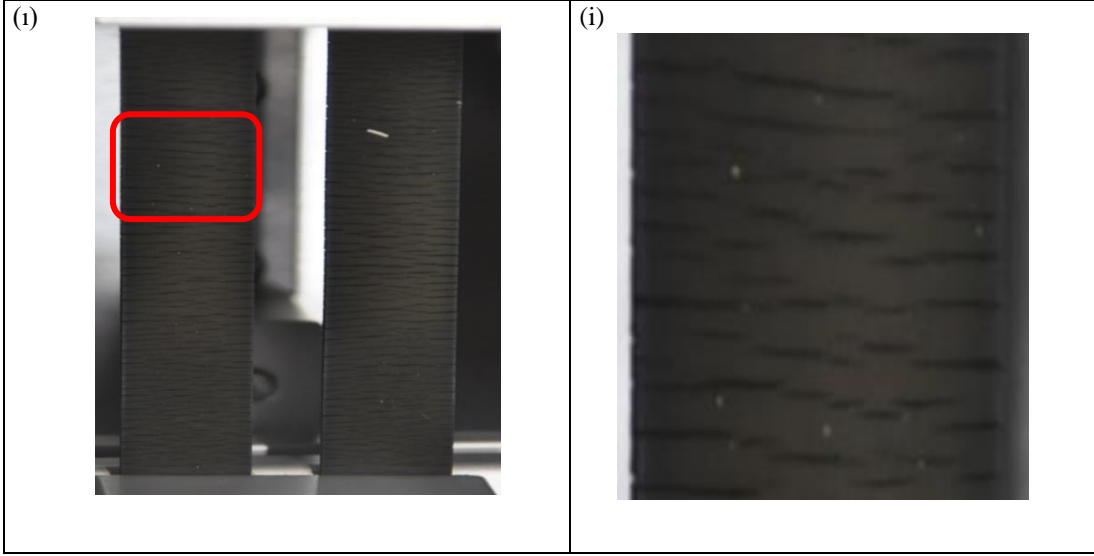
Şekil 6.42. (Devam) Yanak karışım örneklerinin dinamik koşullar altında 72 saat yaşlandırma sonrasındaki görüntüleri (a,b) YK1, (c,d) YK2, (e,f) YD4, (g,h) YD6 ve (i,j) YD9



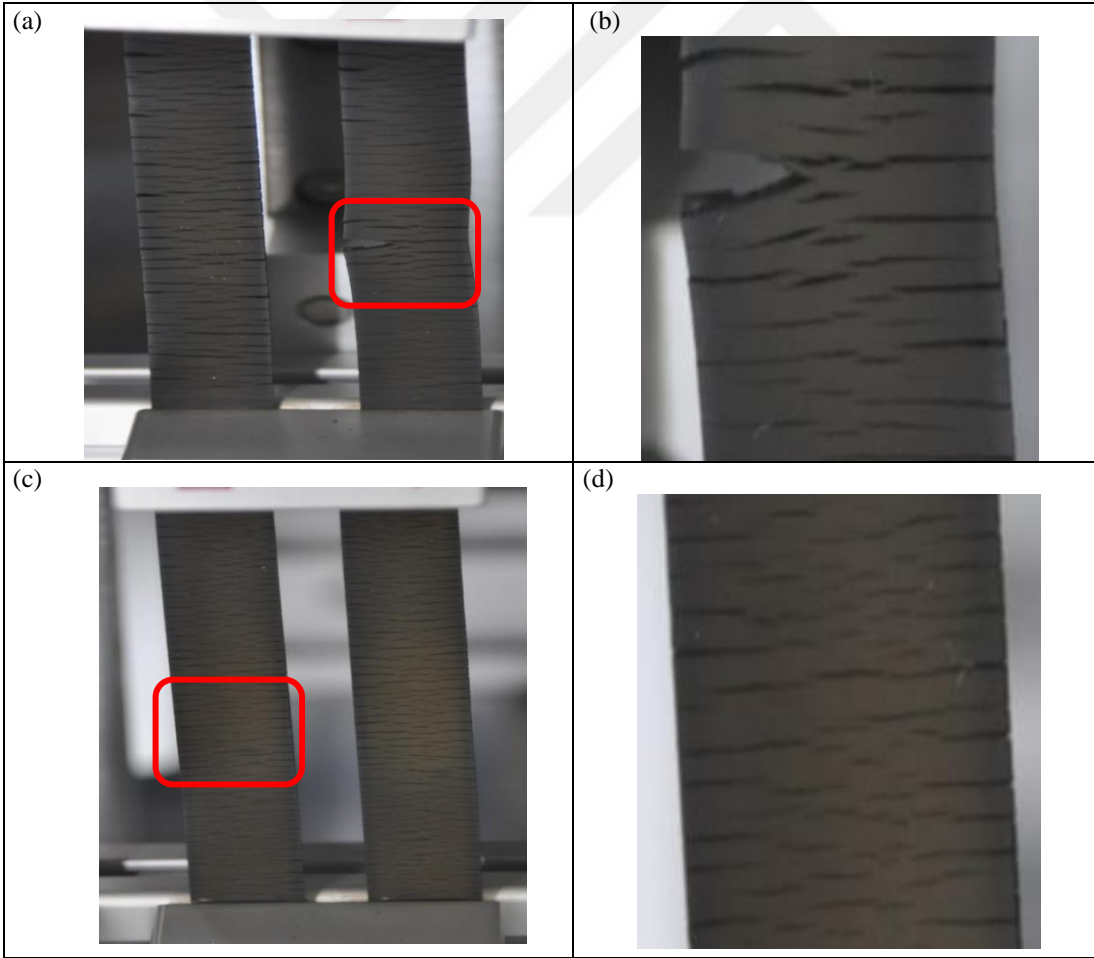
Şekil 6.43. Yanak karışım örneklerinin dinamik koşullar altında 96 saat yaşlandırma sonrasındaki görüntüleri (a,b) YK1, (c,d) YK2, (e,f) YD4, (g,h) YD6 ve (i,j) YD9



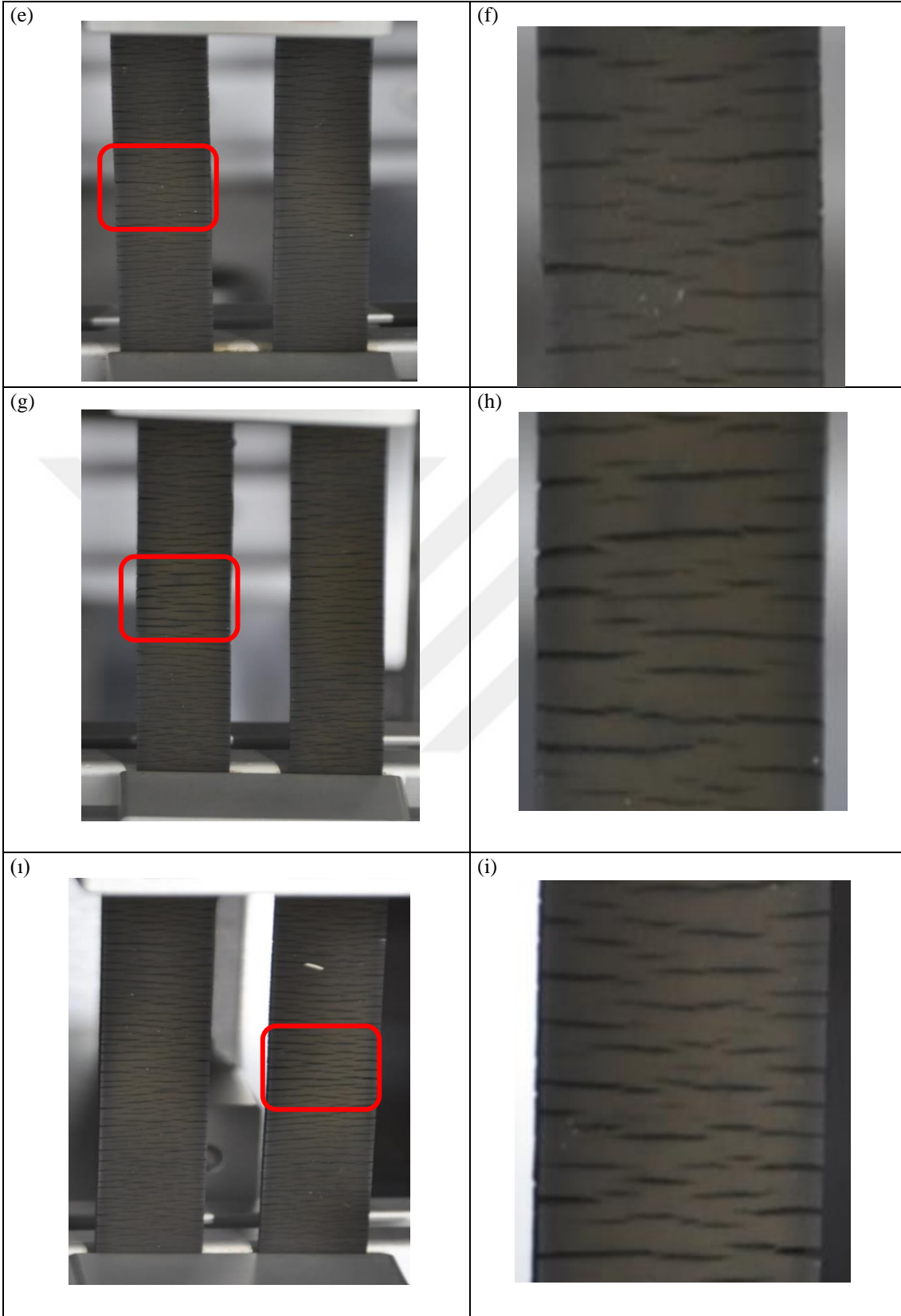
Şekil 6.43. (Devam) Yanak karışım örneklerinin dinamik koşullar altında 96 saat yaşlandırma sonrasındaki görüntüleri (a,b) YK1, (c,d) YK2, (e,f) YD4, (g,h) YD6 ve (i,j) YD9



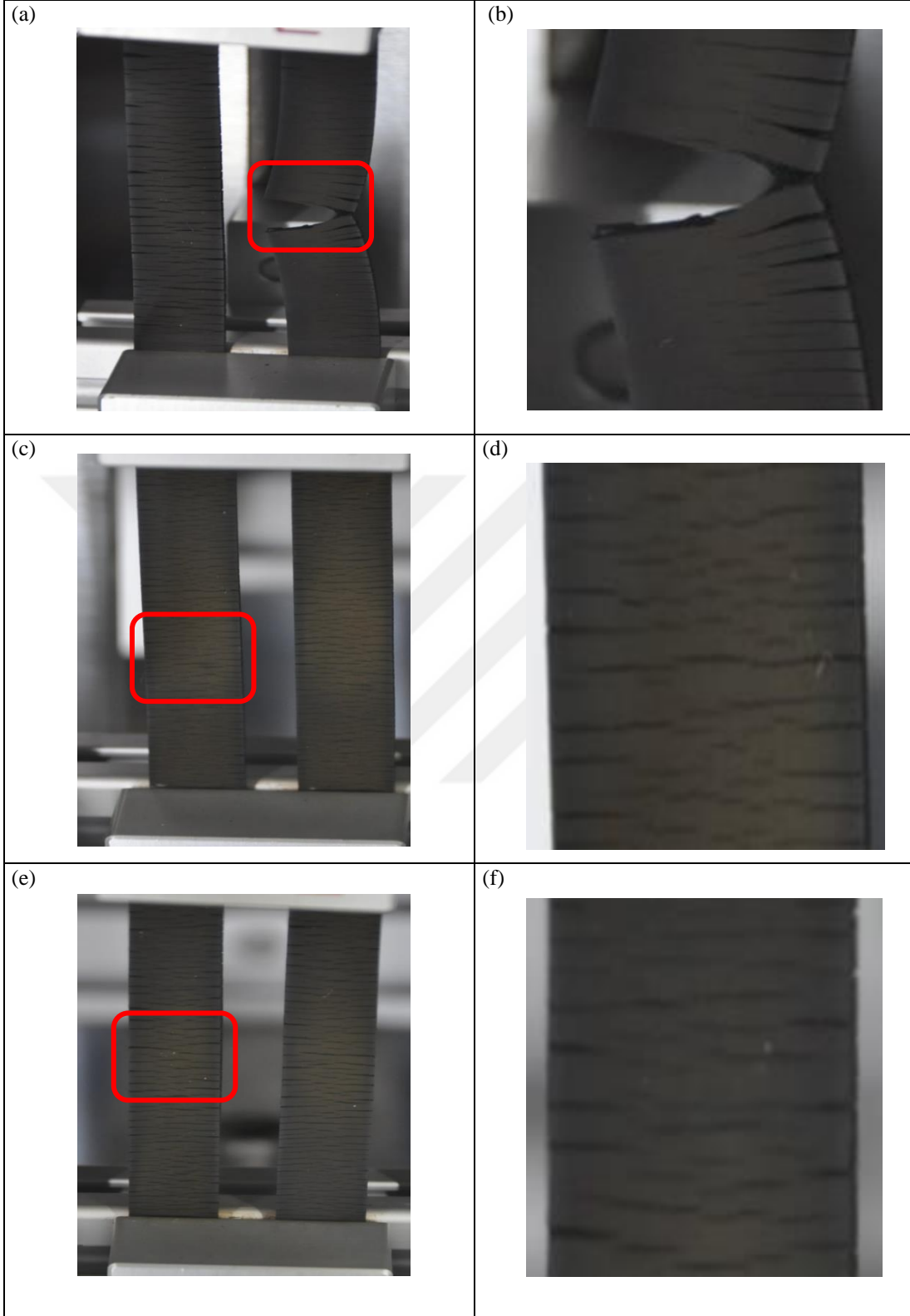
Şekil 6.43. (Devam) Yanak karışım örneklerinin dinamik koşullar altında 96 saat yaşlandırma sonrasındaki görüntüleri (a,b) YK1, (c,d) YK2, (e,f) YD4, (g,h) YD6 ve (i,j) YD9



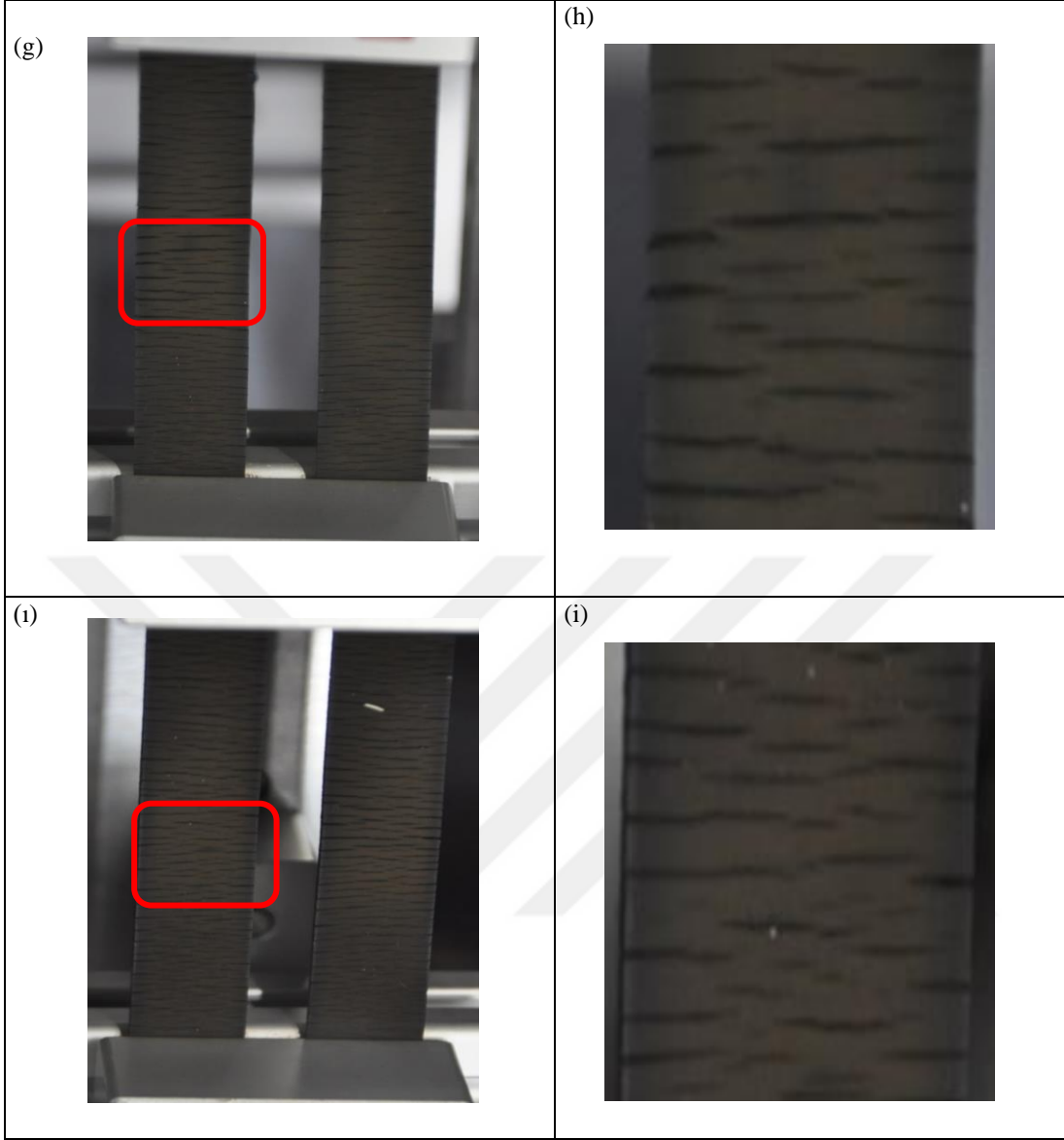
Şekil 6.44. Yanak karışım örneklerinin dinamik koşullar altında 120 saat yaşlandırma sonrasındaki görüntüleri (a,b) YK1, (c,d) YK2, (e,f) YD4, (g,h) YD6 ve (i,j) YD9



Şekil 6.44. (Devam) Yanak karışım örneklerinin dinamik koşullar altında 120 saat yaşlandırma sonrasındaki görüntüleri (a,b) YK1, (c,d) YK2, (e,f) YD4, (g,h) YD6 ve (i,j) YD9



Şekil 6.45. Yanak karışım örneklerinin dinamik koşullar altında 144 saat yaşlandırma sonrasındaki görüntüleri (a,b) YK1, (c,d) YK2, (e,f) YD4, (g,h) YD6 ve (i,j) YD9



Şekil 6.45. (Devam) Yanak karışım örneklerinin dinamik koşullar altında 144 saat yaşlandırma sonrasındaki görüntüleri (a,b) YK1, (c,d) YK2, (e,f) YD4, (g,h) YD6 ve (i,j) YD9

#### 6.4. ZnO Malzemelerinin Karbon Ayak İzi ve Maliyet Etkisi

ZnO malzemelerin, kauçuk karışımlarının karbon ayak izi ve lastik maliyetine etkileri 5.4.13'te anlatıldığı şekilde hesaplanmıştır. 95/65R15 ebatındaki bir binek lastik reçetesi Tablo 6.78'de verilmiştir (URL-19). Bu reçete referans alınarak WS-ZnO ve C-ZnO<sub>60:40</sub> malzemeleri için ilgili referans ve üretici tarafından verilen sera gazı emisyon faktörü bilgileri kullanılmış, lastik başına karbon ayak izi etkisi hesaplanmış ve sonuçlar Tablo

6.79’da paylaşılmıştır. Deneme malzemelerinin kullanımı ile emisyon faktörü açısından %33,3 azalma ve lastik başına karbon ayak izinde %0,4 azalma görülmüştür.

Tablo 6.78. 95/65R15 ebatındaki binek lastik reçetesi (URL-19)

	Binek lastik (phr)	Binek lastik (kg)
NR	39,0	1,63
SBR	61,0	2,55
C/B	50,0	2,09
Yağ	8,0	0,33
Organik kimyasallar	8,0	0,33
ZnO*	3,0	0,13
Kükürt	3,0	0,13
Silika	1,0	0,04
Toplam fiber	10,0	0,42
Çelik kord	15,0	0,63
Topuk teli	8,0	0,33
Toplam	206,0	8,60

Tablo 6.79. ZnO malzemelerin kauçuk karışımlarının karbon ayak izine etkileri

	Birim	WS-ZnO	C-ZnO <sub>60:40</sub>	Avantaj (%)
Sera gazı emisyon faktörü	-	2,58	1,72	-33,3
Lastik başına karbon aya izi	CO <sub>2</sub> ekg/lastik	26,28	26,17	-0,4

2024 yılı hammadde fiyatları referans alınarak karışım maliyetleri (\$/ton) hesaplanmış, hammadde ve karışımlar için maliyet avantajları % olarak Tablo 80-81’de verilmiştir. Tablolardan anlaşıldığı gibi kompozit ZnO malzemeleri, ticari malzemelere göre hammadde bazında %4-35 ve karışım bazında %0,1-1,8 maliyet avantajı sağlamaktadır. Sonuç olarak, kompozit ZnO malzemelerinin hem WS-ZnO hem de Ac-ZnO malzemelerine alternatif olarak kullanıldığında maliyet avantajı sağladığı ve ekonomik açıdan kullanılabilirliğinin uygun olduğu görülmüştür.

Tablo 6.80. Geleneksel ZnO malzemesine kıyasla deneme malzemeleri için hesaplanan malzeme ve karışım maliyet avantajları (%)

	Malzeme maliyet avantajları	Karışım maliyet avantajları		
		Sırt	Kuşak Kaplama	Yanak
NC234	-35,0	-0,9	-1,8	-1,2
NC236	-20,3	-0,5	-1,1	-0,7
TR839	-3,9	-0,1	-0,3	-0,2

Tablo 6.81. Aktif ZnO malzemesine kıyasla deneme malzemeleri için hesaplanan malzeme ve karışım maliyet avantajları (%)

	Malzeme maliyet avantajları	Karışım maliyet avantajları		
		Sırt	Kuşak Kaplama	Yanak
NC234	-35,8	-0,8	-1,8	-1,2
NC236	-21,3	-0,5	-1,0	-0,7
TR839	-5,2	-0,1	-0,2	-0,1

Sonuç olarak, araç lastiği üretiminde kullanılan ticari ZnO malzemeler yerine kompozit ZnO malzemelerin kullanımı ile karbon ayak izi ve karışım maliyeti açısından avantaj elde edilebildiği gibi, kullanılan ZnO miktarlarında C-ZnO<sub>40:60</sub>, C-ZnO<sub>60:40</sub> ve C-ZnO<sub>90:10</sub> için sırası ile %60, %40 ve %10 azalma sağlanmaktadır. Elde edilen bu sonuçlar, araç lastiği karışımlarında kompozit ZnO malzemelerinin ticari malzemeler yerine kullanılmasının performans açısından olumsuz etkilerinin olmamasının yanı sıra maliyet ve çevresel faktörler bakımından da olumlu sonuçlar getirdiğini göstermiştir. Bu durumda, kompozit ZnO malzemelerinin araç lastiği endüstrisinde kullanımı yüksek potansiyele sahiptir.

## 7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez kapsamında, lastik karışımlarında aktivatör olarak ticari aktivatörlere (Ws-ZnO ve Ac-ZnO) alternatif kullanım potansiyeli olan Kompozit ZnO malzemeleri ele alınmış ve ticari olmayan reçetelerde denemeler gerçekleştirilmiştir. Farklı miktarlarda ZnO içeriğine sahip üç farklı kompozit ZnO malzemeleri (C-ZnO<sub>40:60</sub>, C-ZnO<sub>60:40</sub> ve C-ZnO<sub>90:10</sub>) ile deneme karışımları yapılmış hazırlanan kontrol karışımları ile pişme, mekanik ve fiziksel özellikler açısından karşılaştırılmıştır.

Tez kapsamında yapılan çalışmaların ilk aşamasında, kompozit ZnO malzemelerinin yapısal karakterizasyonları yapılmış olup, bu kapsamda BET yüzey alanı, suda çözünen madde miktarı, uçucu madde miktarı, elek kalıntısı, asidite, WDXRF, ICP-OES, SEM ve EDS analizleri yürütülmüştür.

- BET yüzey alanı değerleri, Kompozit ZnO malzemelerinin, özellikle ZnO içeriğinin artmasıyla Ac-ZnO kontrol malzemesine benzer olduğunu göstermektedir. Bu durumda, kompozit ZnO malzemelerinin partikül boyutlarının WS-ZnO kontrol malzemesinden daha küçük olduğu görülmektedir.
- Suda çözünen madde miktarı, uçucu madde miktarı ve elek kalıntı miktarı tüm kontrol ve deneme malzemeleri için araç lastiği sektöründe kabul gören tanım değerlerinin çok altında olduğu için, aralarındaki farklılıklar önem arz etmemektedir.
- Güvenli pişme açısından hammaddelerin pH değerlerinin düşük olması erken pişmeye neden olacağı için dezavantaj oluşturmaktadır. Bu durumda deneme malzemelerinin, kontrol malzemelerinden daha yüksek pH değerlerine sahip olmaları olumlu bir sonuçtur.
- WDXRF ve ICP-OES analizlerinde, kompozit ZnO malzemelerinin saflık derecelerinin kontrol malzemeleri olan WS-ZnO ve Ac-ZnO benzer olduğu görülmüştür.
- SEM/EDS sonuçlarında, kontrol malzemelerinin tabakalı morfolojiye sahip olduğunu ve düşük yüzey alanlı WS-ZnO malzemesinin Ac-ZnO malzemesine göre daha büyük partikül boyutuna sahip olduğu görülmüştür. Kompozit ZnO malzemelerinde, çinko oksit CaCO<sub>3</sub> üzerine kaplandığı için morfolojilerinde kontrol malzemelerine kıyasla farklılık görülmektedir. EDS haritalaması dikkate alındığında, tedarikçinin kompozit

tasarımını başarılı bir şekilde gerçekleştirdiği ve çekirdek malzemenin yüzeyinin tamamen yoğun ZnO ile kaplandığı anlaşılmaktadır.

Tez çalışmasının diğer aşamasında, Ws-ZnO malzemesi ile oluşturulan kontrol karışımı ile yapılan çoklu denemeler sonucunda, karışımların karıştırma, milledme ve pişirme koşulları literatür bilgisi ve lastik teknolojisi pratiği esas alınarak MDR ile belirlenmiştir.

- Çalışmalar sonucunda pişirme koşulları (sıcaklık x süre), sırt karışımları için 160 °C x 15 dk, kuşak kaplama karışımları için 160 °C x 16 dk ve yanak karışımları için 145 °C x 33 dk olarak seçilmiştir.

Çalışmanın üçüncü aşamasında, kontrol ve deneme ZnO malzemeleri kullanılarak üç farklı reçete (araç lastiği için sırt, kuşak kaplama ve yanak karışımları) literatür bilgileri referans alınarak oluşturulmuştur. Kompozit ZnO malzemelerinin karışım performansına etkisini anlamak amacıyla karışımların fiziksel ve mekanik testleri yürütülmüştür. Aynı zamanda deneme malzemelerinin üretim kaynaklı oluşan karbon ayak izine ve karışım maliyetine etkisi hesaplanmıştır. Yapılan testler ve hesaplar sonrasında elde edilen sonuçlar aşağıda paylaşılmıştır;

- Sırt karışımları için Mooney testi ile belirlenen IV, MV, ML (1+4), t5 ve t35 değerleri kontrol ve deneme karışımları için %5 civarında farklılık göstermektedir, bu durumda standart sapmalar da göz önüne alınarak, pişirme başlangıcında tüm karışımların benzer davranış gösterdiği sonucuna varılmıştır. Böylece, deneme karışımlarının ekstrüder aşamasında kontrol karışımları ile benzer parametreler kullanılarak işlem yapılacağı ve herhangi bir kalıp revizyonu gerekmeyeceği sonucuna varılmıştır.
- Sırt karışımlarının MDR test sonuçlarında Mooney testi ile tutarlı sonuçlar elde edilmiş olup, deneme karışımlarının kontrol karışımlarına benzer şekilde erken yanma problemi göstermeyeceği görülmüştür. Sırt karışımları için Mooney test sonuçları, kompozit ZnO malzemelerinin viskoziteyi etkilemediğini göstermektedir
- Kuşak kaplama karışımları için Mooney viskozimetre sonuçları kuşak kaplama karışımları için kompozit ZnO malzemelerinin viskoziteyi etkilemediği ve kontrol malzemeleri ile benzer işlenebilirliğe sahip olduğu göstermektedir.

- Kuşak kaplama karışımlarının MDR test sonuçlarına bakıldığında kompozit ZnO malzemelerinin, kontrol malzemeleri olan WS-ZnO ve Ac-ZnO ile karşılaştırıldığında benzer pişme özellikleri sağladığı sonucuna varılabilir.
- Yanak karışımlarının Mooney test sonuçlarında kompozit ZnO malzemelerinin viskoziteyi etkilemediği ve kontrol malzemeleri ile benzer işlenebilirliğe sahip olduğu görülmektedir.
- Yanak karışımlarının MDR testlerinde kompozit ZnO malzemelerinin kontrol malzemeleri yerine yanak karışımlarında kullanımı, elde edilen pişme özellikleri açısından uygun olduğu görülmektedir.
- Sırt karışımlarının kopma dayanımı test sonuçları ile kontrol ve deneme karışımları için tüm sonuçlar lastik teknolojisinin bu test için kabul ettiği  $\pm$  % 10 değişim aralığı içerisinde olup, standart sapmalar da dikkate alındığında yaşlandırma öncesi ve sonrası sonuçların benzer olduğu görülmüş, kompozit ZnO malzemelerinin karışımın kopma dayanımını değiştirmedeği belirlenmiştir.
- Sırt karışımlarının kopmada uzama sonuçları, yaşlandırma öncesi ve sonrası sonuçların benzer olduğu görülmüş, kompozit ZnO malzemelerinin karışımın kopmada uzama özelliğini değiştirmedeği belirlenmiştir. Ek olarak, Deneme ve kontrol karışımlarının ısıl yaşlanma hızı aynı olduğu belirlenmiştir.
- Sırt karışımlarının M100, M200 ve M300 modül sonuçlarında, kompozit ZnO malzemelerinin, yaşlandırma öncesi ve sonrası sonuçların kontrol malzemeleri ile benzer değerde olduğu ve bu özelliği değiştirmedeği görülmüştür.
- Kuşak kaplama karışımlarının kopma dayanımı test sonuçlarında Kontrol ve deneme karışımları için tüm sonuçlar lastik teknolojisinin bu test için kabul ettiği  $\pm$  % 10 değişim aralığı içerisinde olup, tüm sonuçların benzer olduğu görülmüş, kompozit ZnO malzemelerinin karışımın kopma dayanımını değiştirmedeği görülmüştür.
- Kuşak kaplama karışımlarının kopmada uzama testi ile kontrol ve deneme karışımları için tüm sonuçlar lastik teknolojisinin bu test için kabul ettiği  $\pm$  % 10 değişim aralığında olup, standart sapmalar da dikkate alındığında yaşlandırma öncesi ve sonrası sonuçların benzer olduğu görülmüş, kompozit ZnO malzemelerinin karışımın kopmada uzama özelliğini değiştirmedeği belirlenmiştir.

- Kuşak kaplama karışımlarının % 100, % 200 ve % 300 uzamadaki gerilim değerleri, karışımların ısıtma yaşlandırma öncesi ve sonrası benzer sonuçlar verdiğini göstermektedir.
- Yanak karışımlarının kopma dayanımı test sonuçlarında kompozit ZnO malzemeleri kullanılan karışımların kopma dayanımı özelliklerini değiştirmediği, Sırt karışımı ve kuşak kaplama karışımı ile karşılaştırıldığında, yanak karışımının ısıtma dayanımının doğal kauçuk içeren kuşak kaplama karışımından daha iyi olduğu ve doğal kauçuk içermeyen sırt karışımına göre daha kötü olduğu görülmektedir.
- Yanak karışımlarının kopmada uzama test sonuçlarında yaşlandırma öncesi ve sonrası sonuçların benzer olduğu görülmüş, deneme ve kontrol karışımlarının ısıtma yaşlanma hızı aynı olması sebebiyle de kompozit ZnO malzemelerinin karışımın kopmada uzama özelliğini değiştirmediği belirlenmiştir.
- Yanak karışımlarının M100, M200 ve M300 değerlerinde kontrol ve deneme karışımları için tüm sonuçlar lastik teknolojisinin bu test için kabul ettiği  $\pm$  % 10 değişim aralığının içinde olup, yaşlandırma öncesi ve sonrası sonuçların benzer olduğu görülmüş, kompozit ZnO malzemelerinin karışımın modül değerlerini değiştirmediği belirlenmiştir.
- Sırt, kuşak kaplama ve yanak karışımının yaşlandırma öncesi sertlik değerleri lastik teknolojisinde bu kullanım yerleri için beklenen performans kriterlerine uygun olarak, sırt karışımları için  $59 \pm 1$ , kuşak kaplama karışımları için  $74 \pm 1$  ve yanak karışımları için  $57 \pm 1$  aralığında bulunmuştur.
- Sırt, kuşak kaplama ve yanak karışımları için Yırtılma B testinde standart sapmalar da dikkate alındığında karışımların her reçete için çatlak yayılma mukavemetlerinin benzer olduğu ve sonuçların lastik teknolojisinde kabul edilen  $\pm$  % 10 aralığında kaldığı görülmektedir. Yırtılma C testi ise daha düşük varyasyona sahip olup, tüm karışımların her reçete için yırtılma mukavemetlerinin benzer olduğu belirlenmektedir.
- Sırt, kuşak kaplama ve yanak karışımları için kontrol ve deneme karışımları, şişme testinde benzer performans sergileyerek, toluen alımına karşı benzer direnç göstermiş, bu da benzer çapraz bağ yoğunluklarıyla sonuçlanmıştır.
- Her reçete için deneme ve kontrol karışımları arasında özgül ağırlık farkı bulunmamaktadır.

- Sekme esnekliği testinde her reçetenin kontrol ve deneme karışımları arasında benzerlik göstermektedir ve karışımların tekrarlanan darbelerin meydana getirdiği dinamik uygulamalar için benzer dayanıma sahip olduğunu belirtmektedir
- Fleksometre test sonuçları, lastik teknolojisinde sırt, kuşak kaplama ve yanak karışımları için öngörülen performans değerleri aralığında olup, her reçetede kontrol ve deneme karışımları benzer sonuçlara sahiptir.
- Yorulma testinde, ęalıřılan karışımlar arasında en düşük sertliğe ve en yüksek sekme esnekliğine sahip olan yanak karışımı, sırt ve kuşak kaplama karışımlarına göre daha yüksek yorulma dayanımına sahiptir. Bunun yanı sıra en yüksek sertliğe ve en düşük sekme esnekliğine sahip olan kuşak kaplama karışımı, karışımlar arasında en düşük yorulma dayanımı göstermektedir.
- Aşınma testinde sırt karışımları için, tüm kayma hızlarında SK1 kontrol karışımı en yüksek partikül boyutuna sahip olması dolayısıyla en fazla ağırlık kaybına uğramış ve en düşük aşınma direncine sahip olduğu görülmüştür. Partikül boyutu küçük olan SK2 kontrol karışımı ve ona en yakın ZnO oranına sahip olan SD9 deneme karışımı en düşük ağırlık kayıpları gösterirken, en yüksek aşınma direncini sergilemişlerdir. Tüm deneme karışımları, düşük partikül boyutları nedeniyle, SK1 kontrol karışımına göre daha iyi aşınma direncine sahiptir. Tüm karışımlarda doğrusal aşınma hızı, daha yumuşak sürüş koşullarında (% 1-7 kayma hızları) sabit kalırken, daha sert sürüş koşullarında (% 10-20 kayma hızları), doğrusal olarak hızlı bir artış göstermektedir
- Kuşak kaplama karışımlarının karışım-metal yapışma testleri 7,5 dk, 16 dk, 40 dk, 60 dk ve 300 dk pişirilen örneklerle yürütülmüş ve optimum pişirme süresinde tüm karışımlar için ęelik kord yüzeylerinin % 100 kaplanmış olduğu, yapışmanın da tam olarak sağlanmış olduğu ortaya görülmektedir.
- Yanak karışımları için statik ve dinamik test koşullarında yürütölen ozon testi sonuçlarında, test sonrası tüm karışımlarda benzer hasarların olduğu ve ozona karşı benzer direnç sağladıkları görülmüştür.
- Yapılan karbon ayakizi ve maliyet etki ęalıřmalarında kompozit ZnO malzemelerinin hem WS-ZnO hem de Ac-ZnO malzemelerine alternatif olarak kullanıldığında maliyet artışına sebep olmadığı ve ekonomik açıdan kullanılabilirliğinin uygun olduğu görülmüştür.

Sonuç olarak yürütülen tez çalışmasında, ZnO partiküllerinin çöktürülmüş CaCO<sub>3</sub> ile kaplandığı kompozit ZnO malzemeleri, sırt, kuşak kaplama ve yanak karışımlarında kullanılmış ve performansları WS- ZnO ve Ac-ZnO ile karşılaştırılmıştır. Deneme karışımları, 40:60, 60:40 ve 90:10 oranlarında ZnO:CaCO<sub>3</sub> karışımlarını içeren kompozit ZnO malzemeleri ile laboratuvar ölçeğinde hazırlanmış ve kontrol karışımları ile karşılaştırılmıştır. Tüm karışımlar, pışme, fiziksel ve mekanik özelliklerinin değerlendirilmesi amacıyla test edilmiş, yapılan gözlemler, ZnO'nun yüzey alanının çapraz bağ yoğunluğu ve dolayısıyla karışım performansı üzerinde önemli bir rol oynadığını göstermiştir. Deneme malzemelerinin, karışımların pışme ve mekanik özellikleri üzerinde olumsuz bir etkisi olmadığı gözlemlenmiştir. Bu nedenle, kompozit ZnO malzemelerinin hem WS- ZnO hem de Ac-ZnO'ya alternatif olarak kullanılabileceği sonucuna varılmaktadır. Daha düşük ZnO içeriği sayesinde çevresel ve ekonomik avantajlar sağlamaktadırlar. Kullanılan karışım reçeteleri ve test sonuçları dikkate alındığında, lastik karışımlarında da yüksek kullanılma potansiyeline sahiptir.

## KAYNAKLAR

- Ahagon, A., Kida, M., Kaidou, H. (1990). Ageing of Tire Parts during Service. I. Types of Ageing in Heavy-Duty Tires. *Ruber Chemistry and Technology*, 63(5), 683-697.
- Akhlaghi, S., Kalaei, M., Mazinani, S., Jowdar, E., Nouri, A., Sharif, A., Sedaghat, N. (2012). Effect of Zinc Oxide Nanoparticles on Isothermal Cure Kinetics, Morphology and Mechanical Properties of EPDM Rubber. *Thermochimica Acta*, 527, 91-98.
- Akiba, M., & Hashim, A. S. (1990). Vulcanization and Crosslinking in Elastomers. *Progress in Polymer Science*, 22(3), 475–521.
- Alam, M. N., Kumar, V., Potiyaraj, P., Lee, D. J., Choi, J. (2022). Synergistic Activities of Binary Accelerators in Presence of Magnesium Oxide as a Cure Activator in the Vulcanization of Natural Rubber. *Journal of Elastomers and Plastics*, 54(1), 123–144.
- Ambelang, J. C., Kline, R. H., Lorenz, O. M., Parks, C. R., Wadelin, C., Shelton, J. R. (1963). Antioxidants and Antiozonants for General Purpose Elastomers. *Rubber Chemistry and Technology*, 36(5), 1497–1541.
- Anggraini, U. A., Sutanto, T. D., Gustian, I., Adfa, M., Maryanti, E. (2023). The Effect of Adding Pine Tar Oil and Petrosin as Tackifier Ingredients on the Quality of Liquid Rubber Compound-Based Adhesives. *Jurnal Kimia Sains dan Aplikasi*, 26 (7), 261–267.
- Ansari, A. H., Jakarni, F. M., Muniandy, R., Hassim, S., Elahi, Z. (2021). Natural Rubber as a Renewable and Sustainable Bio-Modifier for Pavement Applications: A Review. *Journal of Cleaner Production*, 289, 125727.
- Ansari, A., Mohanty, T.R., Sarkar, S., Ramakrishnan, S., Amarnath, S., Singha, N.K. (2024). Epoxy Modified Styrene Butadiene Rubber (SBR) in Green Tire Application. *European Polymer Journal*, 213, 113069.
- Arduini, F., Cinti, S., Mazzaracchio, V., Scognamiglio, V., Amine, A., Moscone, D. (2020). Carbon Black as an Outstanding and Affordable Nanomaterial for Electrochemical (Bio)Sensor Design. *Biosensors and Bioelectronics*, 156, 112033.
- Baker, C. S. L., Gelling, I. R., Newell, R. (1985). Epoxideizd Natural Rubber. *Rubber Chemistry and Technology*, 1, 67-85.
- Bandyopadhyay, S. (2024). Chapter 1 Fundamentals of Rubber Compounding Rubber Products: Technology and Cost Optimisation (1), Bireswar Banerjee, De Gruyter.
- Bera, M., Gupta, P., Maji, P.K. (2018). Structural/Load-Bearing Characteristics of Polymer–Carbon Composites. *Polymer and Composite Materials*, 13(2), 547-502.

- Berber, H. (2013). Emulsion Polymerization: Effects of Polymerization Variables on the Properties of Vinyl Acetate Based Emulsion Polymers, *InTech*, 2, 2013.
- Bieliński, D. M., Klajn, K., Gozdek, T., Kruszyński, R., Świątkowski, M. (2021). Influence of n-ZnO Morphology on Sulfur Crosslinking and Properties of Styrene-Butadiene Rubber Vulcanizates. *Polymers*, 13, 1040.
- Bijarimi, M., Dalour Beg, M., Hassan, Z. (2010). Mechanical Properties of Industrial Tyre Rubber Compounds. *Journal of Applied Sciences*, 10, 13.
- Bodar, C. W. M., Pronk, M. E. J., Sijm, D. T. H. M. (2005). The European Union Risk Assessment on Zinc and Zinc Compounds: The Process and the Facts. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 1, 301–319.
- Blok, J. (2005). Environmental exposure of road borders to zinc. *Science of the Total Environment*, 348, 173-190.
- Boonmahitthisud, A., Boonkerd, K. (2021). Sustainable Development of Natural Rubber and Its Environmentally Friendly Composites. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 28, 100446.
- Boopasiri, S., Sae-Oui, P., Siriwong, C. (2021). Fabrication of microcrystalline cellulose/zinc oxide hybrid composite by hydrothermal synthesis and its application in rubber compounding. *Journal of Applied Polymer Science*, 139, 52065.
- Börüban Bingöl, C., Polat, Ş., Atapek, H. Ş. (2024). Utilization of composite ZnO in SBR/BR compounds and its effect on the cure and physicomechanical properties, *Express Polymer Letters*, 18(5), 461-474.
- Bueche, F. (1957). Mechanical Properties of Natural and Synthetic Rubbers. *Journal of Polymer Science*, 17, 305-324.
- Buytaert, G., Luo, Y. (2014). Study of Cu–Zn–Co ternary alloy-coated steel cord in cobalt-free skim compound. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 28, 1545- 1555.
- Byerley, J. J., Scharer, J.M. (1992). Natural release of copper and zinc into the aquatic environment. *Hydrometallurgy*, 30, 1-3.
- Byers, J. T. (2002). Filler for Balancing Passenger Tire Tread Properties. *Rubber Chemistry and Technology*, 75(3), 527-548.
- Chapman, A. V., Johnson, T. (2005). The Role of Zinc in the Vulcanization of Styrene-Butadiene Rubbers, *Kautschuk Gummi Kunststoffe*, 58, 358–361.
- Chapman, A. V., Porter, M. (1988). Sulphur vulcanization chemistry (13rd ed.). UK: Oxford University Press.

- Chukwu, M. N., Ekhaton, I., Ekebafé, L. O. (2019). Effect of Zinc Oxide Level as Activator on the Mechanical Properties of Natural Rubber Composite, *Nigerian Journal of Technology*, 38, 675-679.
- Ciesielski, A. (1999). An Introduction to Rubber Technology (1st ed.). California: Rapra Technology Limited.
- Ciullo, P. A., Hewitt, N. (2019). The Rubber Formulary (1st ed.). New York: Noyes William Andrew Publishing.
- Coleman, M. M., Shelton, J. R., Koenig, J. L. (1974). Sulfur Vulcanization of Hydrocarbon Diene Elastomers, *Industrial & Engineering Chemistry Product Research & Development*, 13, 154–166.
- Coran, A. Y. (1989). Encyclopedia of Polymer Science & Engineering (2nd ed.). New York, USA: John Wiley and Sons.
- Coran, A. Y. (1995). Vulcanization (1st ed.). San Diego, CA, USA: Academic Press.
- Coran, A. Y. (2005). Science and Technology of Rubber (3rd ed.). Amsterdam: Elsevier Academic Press.
- Councell, T. B., Duckenfield, K. A., Landa, E. R., Callender, E. (2004). Tire-Wear Particles as a Source of Zinc to the Environment. *Environmental Science & Technology*, 38(14), 4206–4214.
- Cunneen, J. I., Russell, R. M. (1970). Occurrence and Prevention of Changes in the Chemical Structure of Natural Rubber Tire Tread Vulcanizates during Service. *Rubber Chemistry and Technology*, 43(5), 1215–1224.
- Das, A., Wang, D. Y., Leuteritz, A., Subramaniam, K., Greenwell, H. C., Wagenknecht, U., Heinrich, G. (2011). Preparation of Zinc Oxide Free, Transparent Rubber Nanocomposites Using a Layered Double Hydroxide Filler. *Journal of Materials Chemistry*, 21, 7194-7200.
- Demir, E., Gerengi, H., Savcı, K., Altundal, G., Yüksel, C., Çağıl, D. (2024). Exploration of Green Alternatives to 6PPD (P-phenylenediamine) Used as Antiozonant and Antioxidant in the Rubber Industry. *Materials Sciences and Applications*, 15, 87–100.
- Ding, R., Leonov, I., Coran, A.Y. (1996). A Study of the Vulcanization Kinetics of an Accelerated-Sulfur SBR Compound. *Rubber Chemistry and Technology*, 69(1), 81-91.
- Fan, Y., Fowler, G. D., Zhao, M. (2020). The Past, Present and Future of Carbon Black as a Rubber Reinforcing Filler – A Review. *Journal of cleaner production*, 247, 119115.

- Flory, P. J. and Rehner Jr., J. (1943). Statistical Mechanics of Cross-Linked Polymer Networks, II, Swelling. *The Journal of Chemical Physics*, 11, 521-536.
- Gent, A. N. (2001). *Engineering with Rubber* (2nd ed.). Munchen: Carl Hanser Verlag.
- Ghorbani, H. R., Mehr, F. P., Pazoki, H., Rahmani, B. M. (2015). Synthesis of ZnO Nanoparticles by Precipitation Method. *Oriental Journal of Chemistry*, 31, 1219-1221.
- Görbe, A., Kohari, A., Barany, T. (2024). Rubber Compounds from Devulcanized Ground Tire Rubber: Recipe Formulation and Characterization. *Polymers*, 16, 455.
- Heideman, G., Noordermeer, J., Datta, R. N., Baarle, B. V. (2004). Zinc Loaded Clay as Activator in Sulfur Vulcanization: A New Route for Zinc Oxide Reduction in Rubber Compounds. *Rubber Chemistry and Technology*, 77, 336–355.
- Heideman, G., Datta, R. N., Noordermeer, J. W. M. (2006). Various Ways to Reduce Zinc Oxide Levels in S-SBR Rubber Compounds. *Macromolecular Symposia*, 245(246), 657–667.
- Hidayat, A. S. (2023). Effect of bonding agent ratio on mechanical and physical properties of natural rubber compounds for rubber to textile adhesion applications. *Eng Appl Sci Res*, 50(1), 82–91.
- Hirata, Y., Kondo, H., Ozawa, Y. (2023). Natural Rubber (NR) for the Tyre Industry. *Chemistry, Manufacture and Applications of Natural Rubber, 2014*, 325-352.
- Huang, Y., Li, J., Qi, M., Si, G.; Tan, C. (2023). In Situ Modification to Reinforce Isoprene Rubber by Sacrificial Bonds. *Applied Polymer Materials*, 5, 6.
- Hurley, P. E. (1981). History of Natural Rubber, *Journal of Macromolecular Science: Part A. Chemistry*, 7, 1279–1287.
- Hoven, V. P., Rattanakaran, K., Tanaka, Y. (2003). Determination of Chemical Components that Cause Mal-Odor from Natural Rubber. *Rubber Chemistry and Technology*, 76, 1128-1144.
- Ihenetu, S. C., Xu, Q., Khan, Z. H., Kazmi, S., Ding, J., Sun, Q., Li, G. (2024). Environmental Fate of Tire-Rubber Related Pollutants 6PPD and 6PPD-Q: A Review, *Environ Res.*, 258, 119492.
- Ikeda, Y., Kato, A., Kohjiya, S., Nakajima, Y. (2004). *Basic Science of Rubber* (2nd ed.). Singapore: Springer.
- Jeon, G. S., Han, M. H., Seo, G. (1999). Effect of ZnO contents at the surface of brass-plated steel cord on the adhesion property to rubber compound. *Korean J. Chem. Eng.*, 16, 248–252.

- Jiang, J., Pi, J., Cai, J. (2018). The Advancing of Zinc Oxide Nanoparticles for Biomedical Applications. *Bioinorganic Chemistry and Applications*, 2018, 1-18.
- Jin, X., Götz, M., Wille, S., Mishra, Y. K., Adelung, R., Zollfrank, C. A. (2013). Novel Concept For Self-Reporting Materials: Stress Sensitive Photoluminescence in ZnO Tetrapod Filled Elastomers. *Advanced Materials*, 25, 1342–1347.
- Kadlcak, J., Kuritka, I., Konecny, P., Cermak, R. (2011). The effect of ZnO Modification on Rubber Compound Properties, *Proceedings of the 4th WSEAS International Conference on Energy and Development - Environment – Biomedicine*, Paris, Fransa, 29-31 Ekim 2011.
- Kane, A., Diakhaté, P.A., Ndao, S., Dieng, M., Cisse, M. and Diop, A. (2024). Identification of Antioxidant Additives in Food Products Sold in Dakar Markets, *Open Journal of Applied Sciences*, 14, 51-62.
- Kannan, M. P., Som, A., Ahuja, T., Subramanian, V., Nair, A. S., Pradeep, T. (2020). Nonstoichiometric Copper Sulfide Nanostructures at the Brass-Rubber Interface: Implications for Rubber Vulcanization Temperature in the Tire Industry, *ACS Appl. Nano Mater.*, 3, 7685–7694.
- Kauhi, F., Vahidifar, A., Naderi, G., Esmizadeh, E. (2023). Tire-derived reclaimed rubber as a secondary raw material for rubber foams: in the framework of circular economy strategy, *Journal of Polymer Research*, 30, 97.
- Kawahara, S., Nishioka, H., Yamano, M., Yamamoto, Y. (2022). Synthetic Rubber with the Tensile Strength of Natural Rubber, *ACS Applied Polymer Materials*, 4(4), 2323-2328.
- Khasraghi, S. S., Momenilandi M., Shojaei, A. (2022). Tire tread performance of silica-filled SBR/BR rubber composites incorporated with nanodiamond and nanodiamond/nano-SiO<sub>2</sub> hybrid nanoparticle. *Diamond & Related Materials*, 126, 109068.
- Khimi, S. R., Pickering, K. L. (2013). A New Method to Predict Optimum Cure Time of Rubber Compound Using Dynamic Mechanical Analysis. *Journal of Applied Polymer Science*, 131, 6.
- Kołodziejczak-Radzimska, A., Jesionowski, T. (2014). Zinc Oxide-From Synthesis to Application: A Review. *Materials (Basel)*, 7(4), 2833-2881.
- Kovochich, M., Liong, M., Parker, J. A., Oh, S. C., Lee, J. P., Xi, L., Kreider, M. L., Unice, K. M. (2021). Chemical mapping of tire and road wear particles for single particle analysis. *Science of the Total Environment*, 757, 144085.
- Krejsa, M. R., Koenig, J. L. (1993). A Review of Sulfur Crosslinking Fundamentals for Accelerated and Unaccelerated Vulcanization. *Rubber Chemistry and Technology*, 66(3), 376–410.

- Kruželák, J., Sýkora, R., Hudec, I. (2016). Sulphur and Peroxide Vulcanisation of Rubber Compounds-Overview. *Chemical Papers*, 70, 1533-1555.
- Kumbalparambil, S. T., Chandaparambil, A. H., Naskar, K. (2023). In-situ Formation of ZnO Anchored Silica: Sustainable Replacement of Conventional ZnO in SBR/NR Blends. *Express Polymer Letters*, 17, 1268-1285.
- Kulkarni, S. B., Patil, U. M., Salunkhe, R. R., Joshi, S. S., Lokhande, C. D. (2011). Temperature Impact on Morphological Evolution of ZnO and Its Consequent Effect on Physico-Chemical Properties. *Journal of Alloys and Compounds*, 509(8), 3486–3492.
- Kumar, B., Smita, K., Cumbal, L., Debut A. (2014). Green Approach for Fabrication and Applications of Zinc Oxide Nanoparticles. *Bioinorganic Chemistry and Applications*, 2014, 1-7.
- Le, H. H., Oßwald, K., Wießner, S., Das, A., Stöckelhuber, K., W., Boldt, R., Gupta, G., Heinrich, G., Radusch, H., J. (2013). Location of Dispersing Agent in Rubber Nanocomposites During Mixing Process. *Polymer*, 54(24), 7009–7021.
- Lee, Y. H., Cho, M., Nam, J. D., Lee, Y. (2018). Effect of ZnO Particle Sizes on Thermal Aging Behavior of Natural Rubber Vulcanizates. *Polymer Degradation and Stability*, 148, 50-55.
- Lolage, M., Parida, P., Chaskar, M., Gupta, A., Rautaray, D. (2020). Green Silica: Industrially Scalable & Sustainable Approach Towards Achieving Improved “Nano Filler – Elastomer” Interaction and Reinforcement in Tire Tread Compounds. *Sustainable Materials and Technologies*, 26, e00232.
- Lopes, H, Silva SP, Carvalho JP, Machado J. (2022). A New Modelling Approach for Predicting Process Evolution of Cork-Rubber Composites Slabs Vulcanization. *Sci Rep.*, 12(1):8002.
- Lovell, P. A., Schork, F. J. (2020). Fundamentals of Emulsion Polymerization, *Biomacromolecules*, 11, 4396-4441.
- Luu, T., Kawahara, S. (2024). Critical Condition of Nanostructured Magnesium Oxide for Accelerated Sulfur Vulcanization of Natural Rubber. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 12(8), 3279–3288.
- Ma, H., Williams, P. L., Diamond, S. A. (2013). Ecotoxicity of Manufactured ZnO Nanoparticles - A Review, *Environmental Pollution*, 172, 76-85.
- Mahmud, S., Abdullah, M.J., Putrus, G.A., Chong, J., Mohamad, A.K. (2006). Nanostructure of ZnO Fabricated Via French Process And Its Correlation to Electrical Properties of Semiconducting Varistors. *Synth. React. Inorg. Met. Org. Nano Met. Chem.*, 36, 155–159.

- Maiti, M., Basak, G. C., Srivastava, V. K., Jasra, R. V. (2016). Influence of Synthesized Nano-ZnO on Cure and Physico-mechanical Properties of SBR/BR Blends. *International Journal of Industrial Chemistry*, 8, 273-283.
- Mangili, I., lasagni, M., Anzano, M., Collina, E., Tatangelo, V., Franzetti, A., Caracino, P., Isayev, A. I. (2015). Mechanical and Rheological Properties of Natural Rubber Compounds Containing Devulcanized Ground Tire Rubber from Several Methods. *Polymer Degradation and Stability*, 121, 369e377.
- Manikandan, B., End, T., Kaneko, S., Murali, K. R., John, R. (2017). Properties of Sol Gel Synthesized ZnO Nanoparticles. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2018, 9474–9485.
- Martínez, J.D., Cardona-Uribe, N., Murillo, R., García, T., López, J.M. (2019). Carbon Black Recovery from Waste Tire Pyrolysis by Demineralization: Production and Application in Rubber Compounding. *Waste Management*, 85, 574-584.
- Marzocca, A., Mansilla, M. (2006). Analysis of Network Structure Formed In Styrene–Butadiene Rubber Cured with Sulfur/TBBS System. *J. Appl. Polym. Sci.*, 103 (2), 1105–1112.
- Marzocca, A., Garraza A., Mansilla M. (2010). Evaluation of the Polymer–Solvent Interaction Parameter X for the System Cured Polybutadiene Rubber and Toluene. *Polym. Test*, 29(1), 119–126.
- Medalia, A. I. (1978). Effect of Carbon Black on Dynamic Properties of Rubber Vulcanizates. *Rubber Chemistry and Technology*, 51(3), 437–523.
- Moezzi, A., McDonagh, A. M., Cortie, M. B. (2012). Zinc Oxide Particles: Synthesis, Properties, and Applications. *Chemical Engineering Journal*, 185 (186), 1–22.
- Mohanty, T., Chandra, A. K., Bhandari, V., Chattopadhyay, S. (2016). Steel Cord Skim Compound for Radial Tyre Based on Natural Rubber-Carbon Black-Organoclay Nanocomposites. *Journal of Materials Science & Engineering*, 6, 113069.
- Mostoni, S., Milana, P., Di Credico, B., D’arienzo, M., Scotti, R. (2019). Zinc-Based Curing Activators: New Trends for Reducing Zinc Content in Rubber Vulcanization Process. *Catalysts*, 9, 664.
- Mostoni, S., D’Arienzo, M., Di Credico, B., Armeleo, L., Rancan, M., Dire, S., Callone, E., Donetti, R., Susanna, A., Scotti, R. (2021). Design of a Zn Single-Site Curing Activator for a More Sustainable Sulfur Cross-Link Formation In Rubber. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 60, 10180-10192.
- Mooibroek, H., Cornish, K. (2000). Alternative Sources of Natural Rubber. *Appl Microbiol Biotechnol*, 53, 355–365.

- Nakajima, N. (1999). *The Science and Practice of Rubber Mixing* (1st ed.). New York: Rapra Technology Ltd.
- Nicholas, P., Cheremisinoff, D. (2001). *Condensed Encyclopedia of Polymer Engineering Terms* (1st ed.). Boston : Butterworth-Heinemann.
- Nideröst, K. J., Walters, M. H. (2000). Cord Reinforced Elastomers. *In Comprehensive Composite Materials*, 2, 77–105.
- Nor, N. A. M., Othman, N. (2016). Effect of Filler Loading on Curing Characteristic and Tensile Properties of Palygorskite Natural Rubber Nanocomposites. *Procedia Chemistry*, 19, 351-358.
- Osayi, J. I., Iyuke, S., Daramola, M. O., Osifo, P., Van Der Walt, I. J., Ogbeide, S. E. (2018). Evaluation of Pyrolytic Oil from Used Tires and Natural Rubber (*Hevea Brasiliensis*). *Chemical Engineering Communications*, 6, 805–821.
- Ooij, W. J. (1984). Mechanism and Theories of Rubber Adhesion to Steel Tire Cords—An Overview. *Rubber Chemistry and Technology*, 57, 421–456.
- Ozawa, K., Kakubo, T., Amino, N., Mase, K., Ikenaga, E., Nakamura, T. (2017). Investigation on the Chemical Origin of Adhesion between Natural Rubber and Brass,. *Langmuir*, 33, 9582–9589.
- Özgür, Ü., Alivov, Y. I., Liu, C., Teke, A., Reshchikov, M. A., Doğan, S., Avrutin, V., Cho, S.J., Morkoç, H. (2005). A Comprehensive Review of ZnO Materials and Devices. *Journal of Applied Physics*, 98(4), 041301.
- Parchall, D., Halasa, A., Rodgers, B. (2024). Graphene as an Antioxidant in Tire Sidewall Compounds. *Rubber Chemistry and Technology*, 97(3), 259-282.
- Patra J. K., Shukla A. C., Das G. (2020). *Advances in Pharmaceutical Biotechnology* (1st ed.). Singapore: Springer Nature Singapore Pte Ltd.
- Patterson, R. G. (1969). The Measurement of Cord Tensions in Tires. *Rubber Chemistry and Technology*, 42(3), 812–822.
- Patsalidis, N., Papakonstantopoulos, G. J., Doxastakis, M. (2024). Vulcanization Accelerators and Silica Coupling Agents in Polyisoprene Melts. *Journal of Physical Chemistry B*, 129(1), 563–578.
- Phuhiangpa, N., Phongphanphanee, S., Smitthipong, W. (2020). Study of Rubber/Calcium Carbonate Composites. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 773, 012013.
- Pyskło L., Parasiewicz W., Pawłowski P., Niciński K. (2007). *Zinc Oxide in Rubber Compounds* (1st ed.). Piastow, Poland: Instytut Przemysłu Gumowego.

- Pysklo L., Pawlovski P., Parasiewicz W. (2008). Study on Reduction Of Zinc Oxide Level In Rubber Compounds: Part II Mechanism of Activation of Sulphur Vulcanisation by Means of the Interphase Transfer Catalyst 18-Crown-6-Ether. *Elastomers and Plastics*, 61, 442–446.
- Rai R. S., Bajpai V. (2020). Hydrothermally Grown ZnO Nss on Bi-Directional Woven Carbon Fiber and Effect of Synthesis Parameters on Morphology. *Ceramics International*, 47, 8208–8217.
- Rai R. S., Bajpai V. (2021). Recent Advances in Zno Nanostructures and Their Future Perspective. *Advances in Nano Research*, 11, 37-54.
- Rajaei, P., Ghasemi, F. A., Fasihi, M., Saberian, M. (2019). Effect of Styrene-Butadiene Rubber and Fumed Silica Nano-Filler on the Microstructure and Mechanical Properties of Glass Fiber Reinforced Unsaturated Polyester Resin. *Composites Part B*, 173, 106803.
- Robertson, C. G., Hardman, N. J. (2021). Nature of Carbon Black Reinforcement of Rubber: Perspective on the Original Polymer Nanocomposite. *Polymers*, 13(4), 538.
- Rodgers, B. (2004). *Rubber Compounding Chemistry and Applications* (1st ed.). New York: CRC Press.
- Rodgers, B., Waddell, W. (2005). *Science and technology of rubber* (3rd ed.). Brooklyn, New York: Academic Press.
- Rohayzi, N. F., Katman, H.Y.B., Ibrahim, M.R., Norhisham, S., Rahman, N.A. (2023). Potential Additives in Natural Rubber-Modified Bitumen: A Review. *Polymers*, 15, 1951.
- Rosomme, E., Hart-Cooper, W. M., Orts, W. J., McMahan, C. M., Head-Gordon, M. (2023). Computational Studies of Rubber Ozonation Explain the Effectiveness of 6PPD as an Antidegradant and The Mechanism of Its Quinone Formation. *Environmental Science & Technology*, 57, 5216–5230.
- Roy, K., Alam, M. N., Mandal, S. K., Debnath, S. C. (2014). Surface Modification of Sol-gel Derived Nano Zinc Oxide (ZnO) and The Study of its Effect on the Properties of Styrene-Butadiene Rubber (SBR) Nanocomposites. *Journal of Nanostructure in Chemistry*, 4, 133–142.
- Sahoo, S., Maiti, M., Ganguly, A., George, J. J., Bhowmick, A. K. (2007). Effect of Zinc Oxide Nanoparticles as Cure Activator on The Properties of Natural Rubber And Nitrile Rubber. *Journal of Applied Polymer Science*, 105, 2407-2415. 2007.

- Salkhi, K., S., Shojaei, A., Momenilandi M. (2023). Enhancing Tire Tread Performance with Combined Nano and Micro-Silica Particles in Styrene Butadiene Rubber/Butadiene Rubber Compound. *Journal of Elastomers & Plastics*, 55(8), 1213-1235.
- Samaržija-Jovanović, S., Jovanović, V., Marković, G., Marinović-Cincović, M. (2009). The Effect of Different Types of Carbon Blacks on The Rheological and Thermal Properties of Acrylonitrile Butadiene Rubber. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 98(1), 275–283.
- Savran, H. Ö. (2001). *Elastomer Teknolojisi-1*, (1st ed.). İstanbul: Kauçuk Derneği Yayınları.
- Schmidt-Mende, L., MacManus-Driscoll, J. L. (2007). ZnO—Nanostructures, Defects, and Devices. *Materials Today*, 10(5), 40–48.
- Shahzad, S., Javed, S., Usman, M. (2021). A Review on Synthesis and Optoelectronic Applications of Nanostructured ZnO. *Frontiers in Materials*, 8, 745524
- Shi, F, Li, X, Bai, Y, Li, L, Pu, M, Liu, L, Lei, M. (2021). Mechanism of the Zinc Dithiocarbamate-Activated Rubber Vulcanization Process: A Density Functional Theory Study. *ACS Applied Polymer Materials*, 3, 5188-5196.
- Shree, S., Dowds, M., Kuntze, A., Mishra, Y. K., Staubitz, A., Adelung, R. (2020). Self-Reporting Mechanochromic Coating: a Glassfiber Reinforced Polymer Composite that Predicts Impact Induced Damage. *Material Horizons*, 7, 598.
- Simpson, R. B. (2002). *Rubber Basics* (1st ed.). Shawbury UK: Rapra Technology Limited,.
- Sofianos, V. M., Lee, J., Silvester, D. S., Samanta, P. K., Paskevicius, M., English, N. J., Buckley, C. E. (2021). Diverse Morphologies of Zinc Oxide Nanoparticles and Their Electrocatalytic Performance in Hydrogen Production. *Journal of Energy Chemistry*, 56, 162-170.
- Song, Y., Wu, G., Peng, J., Zhang, C., Wang, D., Zheng, Q. (2022). Vulcanization Kinetics of Natural Rubber and Strain Softening Behaviors of Gum Vulcanizates Tailored By Deep Eutectic Solvents. *Polymer*, 263, 125504.
- Spanheimer, V., Jaber, G.G., Katrakova-Krüger, D. (2023). Ground Tire Rubber Particles as Substitute for Calcium Carbonate in an EPDM Sealing Compound. *Polymers*, 15, 2174.
- Sreethu, T. K., Naskar, K. (2021). Zinc Oxide with Various Surface Characteristics and its Role on Mechanical Properties, Cure-Characteristics, and Morphological Analysis of Natural Rubber/Carbon Black Composites. *Journal of Polymer Research*, 28, 1-14.

- Stickney, P. B., Falb, R. D. (1964). Carbon Black-Rubber Interactions and Bound Rubber. *Rubber Chemistry and Technology*, 37(5), 1299-1340.
- Studebaker, M.L. (1957). The Chemistry of Carbon Black and Reinforcement. *Rubber Chemistry and Technology*, 30(5), 1400-1483.
- Subramaniam, A. (1999). *Natural Rubber* (1st ed.). Dordrecht: Springer.
- Sun, M, Zhong, H, Qin, K, Xu, T, Yang, W, Zhang, Y, Lu, L. (2024). The Development of Processing Methods and Materials Used for Non-Pneumatic Tires: A Review. *Materials*, 17(22), 5660.
- Susanna, A., D'Arienzo, M., Di Credico, B., Giannini, L., Hanel, T., Grandori, R., Morazzoni, F., Mostoni, S., Santambrogio, C., Scott, R.(2017). Catalytic Effect of ZnO Anchored Silica Nanoparticles on Rubber Vulcanization and Cross-Link Formation. *European Polymer Journal*, 93, 63-74.
- Szadkowski, B., Marzec, A., Zaborski, M. (2020). Use of Carbon Black as a Reinforcing Nano-Filler in Conductivity-Reversible Elastomer Composites. *Polymer Testing*, 81, 106222.
- Taghvaei-Ganjali, S., Malekzadeh, M., Farahani, M., Abbasian, A., Khosravi, M. (2011). Effect of Surface-Modified Zinc Oxide as Cure Activator on the Properties of a Rubber Compound Based on NR/SBR. *Journal of Applied Polymer Science*, 122, 249-256.
- Takeyama, T., Matsui, J. (1969). Recent developments with tire cords and cord-to-rubber bonding. *Rubber Chemistry and Technology*, 42(1), 159–256.
- Tekasakul, P., Tekasakul, S. (2006). Environmental Problems Related to Natural Rubber Production. *Journal of Aerosol Research*, 21, 122-129.
- Thaptong, P., Boonbumrung, A., Jittham, P., Sae-oui, P. (2019). Potential Use of a Novel Composite Zinc Oxide as Eco-Friendly Activator in Tire Tread Compound. *Journal of Polymer Research*, 26, 226.
- Thomas, S., Chan, C.H., Pothan, L.A., Rajisha, K., Maria, H. (2013). Natural Rubber Materials. *Royal Society of Chemistry*, 7, 13.
- Thornley, E.R. (1964). Role of Antiozonants in Modern Tire Compounding. *Rubber Chemistry and Technology*, 37(4), 973-989.
- Tian, L., Zhang, Y., Zhu, H., Gan, F., Yi, N., Wu, Y. (2024). Performance Evaluation of a Nylon-like Polyester Tire Cord Combining the Characteristics of Nylon and Polyester. *Polymers*, 16(12), 1645.
- Tsuzuki, T., McCormick, P.G. (2004). Mechanochemical synthesis of nanoparticles. *J. Mater. Sci.*, 39, 5143–5146.

- URL-1: <https://blackbearcarbon.com/products-2-2/tyres-2/tire-compounds/>, (Ziyaret tarihi: 6 Nisan 2025).
- URL-2: <https://www.continental-tires.com/products/b2c/tire-knowledge/tire-components/>, (Ziyaret tarihi: 2 Aralık 2024).
- URL-3: <https://www.continental-tires.com/tr/tr/b2c/tire-knowledge/tire-types/>, (Ziyaret tarihi: 2 Aralık 2024).
- URL-4: <https://www.coopertires.com.au/light-truck-lt-vs-passenger-tyres/>, (Ziyaret tarihi: 2 Ocak 2025).
- URL-5: <https://www.armstrong-mea.com/passenger-tyres/blog/passenger-tyres-vs-suv-tyres-what-is-the-difference>, (Ziyaret tarihi: 2 Ocak 2025).
- URL-6: <https://www.china-tires.com/ency/tire-classification/>, (Ziyaret tarihi: 2 Ocak 2025).
- URL-7: <https://www.firestonecompleteautocare.com/blog/tires/differences-light-truck-passenger-tires/>, (Ziyaret tarihi: 2 Ocak 2025).
- URL-8: <https://www.theengineeringchoice.com/types-of-tires/> (Ziyaret tarihi: 2 Ocak 2025).
- URL-9: <https://www.hankooktire.com/uk/en/help-support/tire/tire-structure.html>, (Ziyaret tarihi: 2 Aralık 2024).
- URL-10: <https://www.continental-tires.com/products/b2c/tire-knowledge/tire-components/>, Ziyaret tarihi: 5 Aralık 2024).
- URL-11: <https://karyapolymer.com/tire-tread/>, (Ziyaret tarihi: 2 Aralık 2024).
- URL-12: <https://mandmservicecenter.com/2024/01/how-tire-tread-patterns-affect-traction-and-handling>, (Ziyaret tarihi: 2 Aralık 2024).
- URL-13: <https://www.hyperionmt.com/en/Resources/library/understanding-steel-cord-mechanics-for-longer-lasting-tires/>, (Ziyaret tarihi: 15 Aralık 2024).
- URL-14: <https://www.uniroyal-tyres.com/tr/tr/car/service-knowledge/tyre-components/>, (Ziyaret tarihi: 2 Aralık 2024).
- URL-15: <https://www.bridgestone.com/products/aircraft/products/basicstructure/>, (Ziyaret tarihi: 2 Aralık 2024).
- URL-16: <https://www.chaoyangtires.com/support-and-service/tire-guide/tire-structure/>, (Ziyaret tarihi: 3 Aralık 2024).
- URL-17: <https://auto.howstuffworks.com/tire.htm#pt1>, (Ziyaret tarihi: 3 Aralık 2024).

- URL-18: [https://www.bridgestone.com/technology\\_innovation/nanopro-tech/](https://www.bridgestone.com/technology_innovation/nanopro-tech/), (Ziyaret tarihi: 2 Aralık 2024).
- URL-19: [https://www.jatma.or.jp/docs/publications/tyre\\_industry\\_2021.pdf](https://www.jatma.or.jp/docs/publications/tyre_industry_2021.pdf), (Ziyaret tarihi: 2 Aralık 2024).
- URL-20: <http://www.rubber.demon.co.uk/>, (Ziyaret tarihi: 15 Kasım 2024).
- URL-21: <https://inpart24.com/en/resources/article/68/natural-rubber-nr-rubber-definition-types-properties-applications>, (Ziyaret tarihi: 15 Kasım 2024).
- URL-22: <https://www.prescott-instruments.com/natural-rubber-processing-and-testing/>, (Ziyaret tarihi: 15 Kasım 2024).
- URL-23: <https://www.prescott-instruments.com/natural-rubber-processing-and-testing/>, (Ziyaret tarihi: 2 Aralık 2024).
- URL-24: <https://sickft.hu/news/rubber-testing-methods-and-their-evaluation>, (Ziyaret tarihi: 2 Aralık 2024).
- URL-25: <https://analyzing-testing.netzsch.com/en/polymers-netzsch-com/elastomers/nr-natural-rubber>, (Ziyaret tarihi: 2 Aralık 2024).
- URL-26: <https://sealextrusions.com/fr/blogs/news/exploring-the-versatility-of-styrene-butadiene-rubber-sbr-properties-and-applications>, (Ziyaret tarihi: 2 Aralık 2024).
- URL-27: <https://omnexus.specialchem.com/selection-guide/styrene-butadiene-rubber-sbr-guide/key-applications-54>, (Ziyaret tarihi: 15 Aralık 2024).
- URL-28: <https://www.arlanxeo.com/en/families/s-sbr-55>, (Ziyaret tarihi: 10 Aralık 2024).
- URL-29: <https://polymers.netzsch.com/Materials/Details/52>, (Ziyaret tarihi: 2 Aralık 2024).
- URL-30: <https://www.chemicalbook.com/article/1-3-butadiene-overview-applications-in-synthetic-rubber-and-biosynthesis.htm>, (Ziyaret tarihi: 2 Aralık 2024).
- URL-31: <https://www.industrialrubbergoods.com/butadiene-rubber.html>, (Ziyaret tarihi: 2 Aralık 2024).
- URL-32: <https://www.etrma.org/library/reinforcing-fillers-in-the-rubber-industry/> (Ziyaret tarihi: 18 Aralık 2024).
- URL-33: <https://www.carbon-black.org/is-carbon-black-safe>, (Ziyaret tarihi: 18 Aralık 2024).

- URL-34: <https://nanografi.com/blog/carbon-black-properties-and-applications/-60>, (Ziyaret tarihi: 18 Aralık 2024).
- URL-35: [https://www.researchgate.net/figure/vulcanized-rubber-contains-monosulfidic-disulfidic-and-polysulfidic-cross-links\\_fig1\\_248952317-66](https://www.researchgate.net/figure/vulcanized-rubber-contains-monosulfidic-disulfidic-and-polysulfidic-cross-links_fig1_248952317-66), (Ziyaret tarihi: 18 Aralık 2024).
- URL-36: <https://www.studocu.vn/vn/document/hanoi-university-of-science/triet-hoc/types-of-vulcanizing-systems-cv-evsv/38195579>, (Ziyaret tarihi: 8 Aralık 2024).
- URL-37: [https://www.akrochem.com/pdf/technical\\_papers/retarders](https://www.akrochem.com/pdf/technical_papers/retarders), (Ziyaret tarihi: 13 Aralık 2024).
- URL-38: <https://ideaexchange.uakron.edu/cgi/> (Ziyaret tarihi: 13 Aralık 2024).
- URL-39: <https://www.randers-reb.com/fishing-rope/rope-technology/the-basic-elements-of-steel-wire-rope>, (Ziyaret tarihi: 13 Aralık 2024).
- URL-40: <https://www.zinc.org/>, (Ziyaret tarihi: 13 Aralık 2024).
- URL-41: <https://www.zinc.org/coatings-2/>, (Ziyaret tarihi: 13 Aralık 2024).
- URL-42: <https://www.citracakralogam.com/zinc-oxide-in-ceramics-the-secret-of-a-fine-finished-selection/>, (Ziyaret tarihi: 13 Aralık 2024).
- URL-43: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/1993/793/oj/eng>, (Ziyaret tarihi: 13 Aralık 2024).
- URL-44: [https://www.hf-mixinggroup.com/fileadmin/\\_migrated/news\\_uploads/BR-1600-banbury-mixer.pdf](https://www.hf-mixinggroup.com/fileadmin/_migrated/news_uploads/BR-1600-banbury-mixer.pdf), (Ziyaret tarihi: 13 Aralık 2024).
- URL-45: [https://www.ksp108.com/private\\_folder/M/brochure\\_MV2000.pdf](https://www.ksp108.com/private_folder/M/brochure_MV2000.pdf), (Ziyaret tarihi: 15 Aralık 2024).
- URL-46: <https://www.montechusa.com/dynamic-moving-die-rheometer>, (Ziyaret tarihi: 18 Aralık 2024).
- URL-47: <https://www.ektrontek.com/dumbbell-cutter-iron-tqn0000192.html>, (Ziyaret tarihi: 23 Aralık 2024).
- URL-48: [http://www.leitz-pacific.com/en/products\\_detail.asp?class\\_id=383&P\\_ID=240](http://www.leitz-pacific.com/en/products_detail.asp?class_id=383&P_ID=240), (Ziyaret tarihi: 13 Aralık 2024).
- URL-49: <https://zentechmedikal.com/urun/heraeus-inkubator-cihaz-tamiri-bakim-onarimi/>, (Ziyaret tarihi: 13 Aralık 2024).

- URL-50: <https://www.zwickroell.com/tr/ueruenler/sertlik-test-cihazlari/shore-irhd-sertlik-test-cihazlari/analog-ve-dijital-shore-sertlik-test-cihazlari/>, (Ziyaret tarihi: 13 Aralık 2024).
- URL-51: <https://www.alpha-technologies.com/instruments/d2020-series/>, (Ziyaret tarihi: 13 Aralık 2024).
- URL-52: <https://www.zwickroell.com/tr/ueruenler/darbe-testine-ait-ueruenler/geri-sekme-elastikiyet-test-cihazlari/>, (Ziyaret tarihi: 13 Aralık 2024).
- URL-53: <https://www.zwickroell.com/tr/ueruenler/statik-malzeme-test-cihazlari/cift-eksenli-uec-eksenli-test-cihazlari/>, (Ziyaret tarihi: 13 Aralık 2024).
- URL-54: <https://vatanlar.wordpress.com/2016/03/17/kalici-deformasyon-test-aparati/>, (Ziyaret tarihi: 13 Aralık 2024).
- URL-55: [https://www.gibitre.it/page\\_sin.php?ProdottoN=FlexDe](https://www.gibitre.it/page_sin.php?ProdottoN=FlexDe), ASTM D813-07, (Ziyaret tarihi: 11 Aralık 2024).
- URL-56: <http://www.plus-sci.co.kr/product/inst/ueshima/ca-8.htm>, ISO23337:2007, (Ziyaret tarihi: 13 Aralık 2024).
- URL-57: [https://www.gibitre.it/page\\_sin.php?ProdottoN=Ozonom](https://www.gibitre.it/page_sin.php?ProdottoN=Ozonom), (Ziyaret tarihi: 13 Aralık 2024).
- URL-58: <https://mikroskopevi.com.tr/olympus-bx53m-endustriyel-isik-mikroskobu>, (Ziyaret tarihi: 13 Aralık 2024).
- Van Sprang, P.A., Verdonck, F.A., Van Assche, F., Regoli, L., De Schampelaere, K.A. (2009) Environmental Risk Assessment of Zinc in European Freshwaters: A Critical Appraisal, *Sci Total Environ.*, 407(20), 5373-91.
- Vatansver, N., Polat, Ş. (2010). Effect of Zinc Oxide Type on Ageing Properties of Styrene Butadiene Rubber Compounds. *Materials and Design*, 31, 1533-1539.
- Venkatachalam, P., Geetha, N., Sangeetha, P., Thulaseedharan, A. (2013). Natural Rubber Producing Plants: An Overview. *African Journal of Biotechnology*, 12, 1297-1310.
- Wagner, S., Funk, C. W., Müller, K., Raithel, D. J. (2024). The Chemical Composition and Sources of Road Dust, and of Tire and Road Wear Particles—A Review. *Science of the Total Environment*, 926, 171694.
- Wang, M.J., Gray, C. A., Reznick, S. R. (2005). Carbon black, *In Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*, 4, 761–803.
- Wood, S. L. (1940). Synthetic Rubbers: A Review of Their Compositions, Properties, and Uses. *Rubber Chemistry and Technology*, 4, 861-885.

- Wu, J., Xing, W., Huang, G., Li, H., Tang, M., Wu, S., Liu, Y. (2013). Vulcanization Kinetics of Graphene/Natural Rubber Nanocomposites. *Polymer*, 54(12), 3314–3323.
- Xu, T., Jia, Z., Li, J., Luo, Y., Jia, D., Peng, Z. (2018). Study on the Dispersion of Carbon Black/Silica in SBR/BR Composites and its Properties by Adding Epoxidized Natural Rubber as a Compatilizer. *Polymer Composites*, 39, 377–385.
- Yoshioka, A., Komuro, K., Ueda, A., Watanabe, H., Akita, Seiji, Masuda, T., Nakajima, A. (1986). Structure and Physical Properties of High-Vinyl Polybutadiene Rubbers and Their Blends. *Pure and Applied Chemistry*, 58, 1697-1706.
- Youn, S.M., Choi, S.J. (2022). Food Additive Zinc Oxide Nanoparticles: Dissolution, Interaction, Fate, Cytotoxicity, and Oral Toxicity. *Int J Mol Sci.*, 23(11), 6074.
- Youssef, A. (2018). Emulsion & Suspension Polymerization, *Higher Technological Institute*, 2, 10-12.
- Zhao, Y., Wang, Z., Li, X., Liu, Y. (2021). A Novel Approach of Reapplication of Carbon Black Recovered From Waste Tyre Pyrolysis to Rubber Composites. *Journal of Cleaner Production*, 280, 124460.
- Zhao, W., He, J., Yu, P., Jiang, X., Zhang, L. (2023). Recent Progress in the Rubber Antioxidants: A review. *Polymer Degradation and Stability*, 207, 110223.
- Zahoor, R., Jalil, A., Ilyas, S. Z., Ahmed, S., Hassan, A. (2021). Optoelectronic and solar cell applications of ZnO nanostructures. *Results in Surfaces and Interfaces*, 2, 100003.

## KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

- Börüban Bingöl, C., Denizli, S. (2024).** Mum (İng. Paraffin Wax) Malzemesi Karbon Sayısı Dağılımının Tarım Lastiklerinin Ozon Dayanıklılık Performansına Olan Etkisinin İncelenmesi. *35. Ulusal Kimya Kongresi*, Malatya, Türkiye, 9-12 Eylül 2024.
- Börüban Bingöl, C., Nalbant Esentürk, E. (2017).** Synthesis of CuO nanostructures on zeolite-Y and investigation of their CO<sub>2</sub> adsorption properties, *Journal of Materials Research*, 32(19), 3669-3678.
- Börüban Bingöl, C., Nalbant Esentürk, E. (2018).** Activated carbon-supported CuO nanoparticles: a hybrid material for carbon dioxide adsorption, *Journal of Nanoparticle Research*, 20, 59.
- Börüban Bingöl, C., Polat Ş., Atapek H. Ş. (2023).** Ageing Behavior of Rubber Compounds Prepared with Different ZnO Types, *7th International Conference of Engineering Against Failure*, Spetses, Greece, 21-23 Haziran 2023.
- Börüban Bingöl, C., Polat Ş., Atapek H. Ş. (2023).** Wear Behavior of SBR/BR Compounds Including Different ZnO Types, *7th International Conference of Engineering Against Failure*, Spetses, Greece, 21-23 Haziran 2023.
- Börüban Bingöl, C., Polat, Ş., Atapek, H. Ş. (2024).** Ageing Behavior of Rubber Compounds Prepared with Different ZnO Types, *Journal of Physics: Conference Series*, 2692, 012009.
- Börüban Bingöl, C., Polat, Ş., Atapek, H. Ş. (2024).** Utilization of composite ZnO in SBR/BR compounds and its effect on the cure and physicomechanical properties, *Express Polymer Letters*, 18(5), 461-474.
- Börüban Bingöl, C., Polat, Ş., Atapek, H. Ş. (2024).** Wear Behavior of SBR/BR Compounds Including Different ZnO Types, *Journal of Physics: Conference Series*, 2692, 012010.
- Börüban Bingöl, C., Polat, Ş. (2022).** Effect of Composite Zinc Oxide Materials on Curing, Mechanical and Cord-Rubber Adhesion Properties of NR Based Compounds, *Uluslararası Katılımlı Polimer Bilim ve Teknoloji Kongresi*, Malatya, Türkiye, 20-23 Haziran 2022.
- Börüban Bingöl, C., Polat, Ş. (2022).** Influence of Composite ZnO Materials on the Cure and Physico-Mechanical Properties of SBR/BR Compounds, *Tire Technology Expo 2022*, Hannover, Germany, 18-20 Mayıs 2022.
- Börüban Bingöl, C., Yurteri, S. (2021).** Devulkanize Kauçuğun SBR İçeren Karışımlarda a Mekanik Ve Reolojik Özelliklere Olan Etkilerinin İncelenmesi, *Kauçuk Dergisi*, 79, 2146-1821.

## ÖZGEÇMİŞ

2013 yılında Orta Doğu Teknik Üniversitesi Kimya Bölümü'nden lisans, 2016 yılında ise aynı üniversitenin kimya bölümünde yüksek lisans diplomamı aldım. Eğitim hayatım boyunca, özellikle polimer kimyası ve karbon dioksit yakalama üzerine derinlemesine çalışmalar yaptım. Ayrıca, 2011-2013 yılları arasında ODTÜ'deki polimer kimyası laboratuvarında, 'Işığa Duyarlı Polimerlerin Sentezi ve Uygulamaları' başlıklı projede çalışarak, polimer kimyası alanındaki deneyimlerimi pekiştirdim.

Yüksek lisans araştırma alanım, bakır oksit nanoparçacıklarının dekor edildiği destekler aracılığıyla karbon dioksit yakalama ve depolama sistemleri üzerineydi. Ayrıca, yüksek lisans çalışmamda geliştirdiğim CO<sub>2</sub> adsorpsiyon sistemine dair bir patent başvurusu gerçekleştirdim.

2014-2016 yılları arasında Kare Mühendislik'te çalışarak, teşvikler, patent ve faydalı model başvuruları konusunda deneyim kazandım. TÜBİTAK ve KOSGEP'e proje başvuruları yaparken, 'Ergitme Fırını Cürufundan Demir-EDTA Gübre Sentezi ve Kirli Suyu İçme Suyu Üretimi' projelerinin de yöneticiliğini yaptım. Bu projelerden Kirli Suyu İçme Suyu Üretimi, Birleşmiş Milletler Sanayi Kalkınma Teşkilatı (UNIDO, The United Nations Industrial Development Organization) tarafından yürütülen Küresel Temiz Teknoloji Girişimcilik Programı'na (Global Cleantech Innovation Programme) kabul edilerek yarı finalist oldu.

2016 yılının Eylül ayında Brisa'da malzeme geliştirme uzmanı olarak kariyerime başladım. 2018 yılında Kocaeli Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü'nde doktora programına kabul edildim. Yaklaşık 8 yıl süren malzeme geliştirme geçmişimin ardından, Ağustos 2024 itibarıyla Brisa'da Ar-Ge Koordinasyon ve Fikri ve Sınai Haklar Uzmanı olarak kariyerime devam etmekteyim.