T.C.
BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

EPDM KAUÇUK HORTUMLARDA ARAMİD TAKVİYESİNİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ VE YAŞLANMA DİRENCİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mellis DEMİRTAŞ

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı

EKİM 2025

T.C.
BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

EPDM KAUÇUK HORTUMLARDA ARAMİD TAKVİYESİNİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ VE YAŞLANMA DİRENCİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Melis DEMİRTAŞ
(22435009041)
ORCID: 0009-0002-2715-4301

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı

Danışman: Doç. Dr. Şeyma DUMAN
ORCID: 0000-0002-6685-5656

EKİM 2025

BTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 22435009041 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Melis DEMİRTAŞ, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "EPDM KAUÇUK HORTUMLARDA ARAMİD TAKVİYESİNİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ VE YAŞLANMA DİRENCİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİ" başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Doç. Dr. Şeyma DUMAN** .....
Bursa Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Doç. Dr. Mustafa Yunus KAYA** .....
Bursa Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Kübra AKBEN .....
Yeditepe Üniversitesi

Savunma Tarihi : 13 Ekim 2025
Teslim Tarihi : …. / …./ 2025

20.04.2016 tarihli Resmi Gazete'de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince; Bu Lisansüstü teze, Bursa Teknik Üniversitesi'nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun rapor alınmıştır.

İNTİHAL BEYANI

Bu tezde görsel, işitsel ve yazılı biçimde sunulan tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uyularak tarafımdan elde edildiğini, tez içinde yer alan ancak bu çalışmaya özgü olmayan tüm sonuç ve bilgileri tezde kaynak göstererek belgelediğimi, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim.

Adı SOYADI: Melis DEMİRTAŞ

İmzası:

ÖNSÖZ

Yüksek lisans tez çalışmam süresince bilgi, deneyim ve rehberliğiyle her aşamada bana yol gösteren değerli danışmanım Doç. Dr. Şeyma Duman'a en içten teşekkürlerimi sunarım. Çalışmalarımın gerçekleştirilmesinde katkı ve desteklerini esirgemeyen Elatek Kauçuk Sanayi Ticaret A.Ş. ve Ar-Ge Müdürü Muhammet Kara'ya teşekkür ederim. Ayrıca, tez inceleme süresince yardımlarını ve iş birliğini esirgemeyen Arş. Gör. Hurşit Sefa Aydın, Doktora Öğrencisi Yüksek Mühendis Hazal Yılmaz Doğan ve Arş. Gör. Cansu Çeltik'e değerli katkılarından dolayı teşekkür ederim. Son olarak, hayatımın her döneminde olduğu gibi yüksek lisans sürecimde de beni daima destekleyen, cesaretlendiren ve bugün olduğum kişi olmamda büyük payı olan canım aileme sonsuz sevgi ve teşekkürlerimi sunarım.

Ekim 2025 Melis DEMİRTAŞ

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ ..... **vii**
İÇİNDEKİLER ..... **viii**
KISALTMALAR ..... **x**
SEMBOLLER ..... **xi**
ÇİZELGE LİSTESİ ..... **xii**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **xiii**
ÖZET ..... **xiv**
SUMMARY ..... **xv**
1. GİRİŞ **1**
2. GENEL BİLGİLER **3**
2.1 Kauçuk Malzemeler 4
2.1.1 Etilen-propilen-dien kauçuk 5
2.2 Takviye Edici Elyafların Hortum Üzerindeki Etkisi 6
2.2.1 Cam elyaf 6
2.2.2 Bor elyaf 7
2.2.3 Karbon elyaf 8
2.2.4 Aramid elyaf 9
2.3 Kauçuk Hortum Üretim Süreçleri 10
2.3.1 Hamur hazırlama 10
2.3.2 Ekstrüzyon prosesi 12
2.3.3 Otoklav prosesi 14
2.4 Örgü Takviyeli Kauçuk Hortumlar 15
2.5 Kauçuk Hortumlara Yapılan Testler 17
2.6 Polimerlerin Endüstriyel Uygulama Alanları 18
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR **20**
3.1 Malzemeler 21
3.2 Hamur Hazırlama 21
3.3 Karışımın Reolojik Özelliklerinin Tayini 22
3.3.1 Reometre testi 22
3.3.2 Mooney viskozite 22
3.4 Kauçuk Hortumların Hazırlanması 23
3.4.1 Ekstrüzyon ve otoklav prosesi 23
3.5 Vulkanizasyon Sonrası Uygulanan Testler 25
3.5.1 Morfolojik analizler 25
3.5.2 Sertlik testi 25
3.5.3 Çekme mukavemeti ve uzama testi 26
3.5.4 Ozon dayanım testi 27
3.5.5 Kalıcı deformasyon testi 28
3.5.6 Çap Genişleme ve patlatma testleri 28
3.5.7 Uzun ömür testi 30
4. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA **32**

4.1 Hamur Hazırlama ve Otoklav Sonra Yapılan Malzeme Testleri 32
4.1.1 Morfolojik analizler 32
4.1.2 Sertlik testi (Shore A) 34
4.1.3 Çekme mukavemeti ve uzama testi 35
4.1.4 Reometre testi 37
4.1.5 Mooney Viskozite 38
4.1.6 Kalıcı deformasyon – sıkıştırma set testi 38
4.2 Ekstrüzyon ve Otoklav Prosesi Analizleri 39
4.3 Çap Genişleme ve Patlatma Testi Analizleri 42
4.4 Uzun Ömür Testi ve Yaşlandırma Sonrası Analizler 44
5. SONUÇ VE ÖNERİLER 48
KAYNAKLAR 49
ÖZGEÇMİŞ 55

KISALTMALAR

EPDM : Etilen Propilen Dien Monomer
CR : Neopren (Kloropen Kauçuk)
NBR : Nitril Bütadien Kauçuk
NR : Doğal Kauçuk
PBR : Polibütadien Kauçuk
PE : Polietilen
PP : Polipropilen
PS : Polistiren
PU : Poliüretan
PVC : Polivinil Klorür
SBR : Stiren Bütadien Kauçuk
SEM : Taramalı Elektron Mikroskobu
UV : Ultraviole

SEMBOLLER

σ	**:** Gerilme
ε	**:** Birim deformasyon
E	**:** Elastik modül
F	**:** Kuvvet
Tg	**:** Cam geçiş sıcaklığı
h	**:** Test yolu yüksekliği
Fmax	**:** Maksimum kuvvet
t	**:** Zaman
N/mm	**:** Kuvvet/ birim uzunluk
dtex	**:** 10.000 m uzunluğundaki ipliğin gram cinsinden kütlesi
°C	**:** Sıcaklık
mm	**:** Uzunluk
MPa	**:** Megapaskal
ML	**:** Minimum tork
ΔM	**:** Maksimum tork farkı

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1: EPDM hamuru için kullanılan bileşen oranları. 11
Çizelge 3.1: Hortum numunelerinin dtex ve hatve mesafeleri. 29
Çizelge 3.2: Çap genişleme ve patlatma testi için parametreler. 29
Çizelge 3.3: Çap genişleme ve patlatma testi için kullanılan numune yapıları. 29
Çizelge 4.1: 930,1100 ve 1680 dtex uzama ve gerilme değerleri. 36
Çizelge 4.2: Yaşlandırma sonrası uygulanan çap genişleme ve patlatma sonuçları. 45
Çizelge 4.3: Uygulama önceliklerine göre iplik-hatve seçimi..... 47

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 3.1: Vizkozimetre cihazı 23
Şekil 3.2: Ekstrüzyon makinesi. 24
Şekil 3.3: Otoklav prosesinde hortum örneği. 25
Şekil 3.4: Sertlik ölçüm cihazı. 26
Şekil 3.5: Papyon tipi kesme kalıbı. 26
Şekil 3.6: Tensometre test cihazı. 27
Şekil 3.7: Çap genişleme ve patlatma test cihazı. 28
Şekil 3.8: Uzun ömür test cihazı. 30
Şekil 4.1: EPDM esaslı kauçuk SEM görüntüleri: (a-b) 930 dtex - 2.9 mm hatve, (c-d) 1100 dtex - 3.3 hatve, (e-f) 1680 dtex - 4 hatve 34
Şekil 4.2: 930, 1100 ve 1680 dtex hortumların gerilme uzama grafikleri. 35
Şekil 4.3: Reometre test sonuç grafiği. 37
Şekil 4.4: Ekstrüzyon makinesinde yarı mamul üzerine çekilen örgü işlemi. 39
Şekil 4.5: Ekstrüzyon cihazı sonrası elde edilen yarı mamulün örgü katmanı. 40
Şekil 4.6: 930 dtex için kat yapışma kuvveti, test yolu grafiği 40
Şekil 4.7: 1100 dtex için kat yapışma kuvveti, test yolu grafiği 41
Şekil 4.8: 1680 dtex için kat yapışma kuvveti, test yolu grafiği 41
Şekil 4.9: Çap genişleme ve patlatma sonrası bozunan hortumlar. 43
Şekil 4.10: Patlatma testi sırasında basınç ile şişen hortumlar. 43
Şekil 4.11: Uzun ömür cihazı sinüzoidal form değişim gösterimi. 45

EPDM KAUÇUK HORTUMLARDA ARAMİD TAKVİYESİNİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ VE YAŞLANMA DİRENCİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

ÖZET

Bu tez çalışmasında, otomotiv sektöründe yaygın olarak kullanılan sentetik kauçuk türlerinden biri olan aramid takviyeli EPDM (etilen-propilen-dien monomer) kauçuğu kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. EPDM, üstün ısı, ozon, yaşlanma ve kimyasal dayanımı sayesinde motor bölgesi gibi yüksek sıcaklık, titreşim ve basınca maruz kalan zorlu çalışma koşullarında tercih edilmektedir. Aramid takviye yapısı ise hortumların mekanik dayanımını, esnekliğini, burkulma direncini ve boyutsal kararlılığını artırmak amacıyla kullanılmaktadır.

Üretim sürecinde, karbon siyahı, dolgu maddeleri, vulkanizasyon ajanları, hızlandırıcılar, antioksidanlar ve işlem yardımcıları belirli oranlarda karıştırılarak kauçuk hamurları hazırlanmış, ardından otoklav ortamında vulkanizasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Farklı aramid iplik kalınlıkları (930, 1100 ve 1680 dtex) ile hatve mesafeleri (2,9 mm, 3,3 mm ve 4,0 mm) kullanılarak numuneler üretilmiş ve bu parametrelerin hortum performansına etkisi sistematik olarak değerlendirilmiştir.

Deneysel çalışmalar kapsamında, üretilen hortumların morfolojik özellikleri SEM (taramalı elektron mikroskobu) analiziyle incelenmiş; kat yapışma, patlatma, çap genişleme, çekme, sertlik ve uzama testleri ile mekanik özellikleri detaylı olarak araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, aramid takviye oranı ve örgü parametrelerinin hortumların basınç dayanımı, deformasyon davranışı, elastikiyet, yorulma direnci ve kat yapışma mukavemeti üzerinde belirleyici bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir.

Sonuç olarak, bu çalışma EPDM matrisli aramid takviyeli hortumların yapısal, morfolojik ve mekanik performansına dair bütüncül bir değerlendirme sunmakta; malzeme seçimi, üretim koşulları ve takviye optimizasyonu konularında hem akademik araştırmalara hem de otomotiv endüstrisindeki uygulamalara önemli katkılar sağlamaktadır.

Anahtar kelimeler: EPDM, Kauçuk, Hatve, Dtex, Optimizasyon parametreleri.

EFFECT OF ARAMID REINFORCEMENT ON MECHANICAL PROPERTIES AND AGING RESISTANCE IN EPDM RUBBER HOSES

SUMMARY

In this thesis study, aramid-reinforced EPDM (ethylene propylene diene monomer) rubber, one of the synthetic rubber types widely used in the automotive industry, was comprehensively investigated. Owing to its superior heat, ozone, aging, and chemical resistance, EPDM is preferred in harsh operating conditions such as the engine compartment, where high temperature, vibration, and pressure are present. The aramid reinforcement structure, on the other hand, is employed to enhance the mechanical strength, flexibility, buckling resistance, and dimensional stability of the hoses.

During the production process, carbon black, fillers, vulcanization agents, accelerators, antioxidants, and processing aids were mixed in specific proportions to prepare rubber compounds, followed by vulcanization in an autoclave. Hoses were manufactured using different aramid yarn thicknesses (930, 1100, and 1680 dtex) and pitch distances (2.9 mm, 3.3 mm, and 4.0 mm), and the influence of these parameters on hose performance was systematically evaluated.

Within the scope of the experimental studies, the morphological properties of the produced hoses were examined using SEM (Scanning Electron Microscopy), while their mechanical behaviors were investigated through adhesion, burst pressure, diameter expansion, tensile, hardness, and elongation tests. The results revealed that the aramid reinforcement ratio and braiding parameters have a significant effect on the pressure resistance, deformation behavior, elasticity, fatigue strength, and layer adhesion performance of the hoses.

In conclusion, this study provides a comprehensive evaluation of the structural, morphological, and mechanical performance of EPDM-based aramid-reinforced hoses and offers valuable insights into material selection, production conditions, and reinforcement optimization, contributing to both academic research and industrial applications in the automotive field.

Keywords: EPDM, Rubber, Pitch, Dtex, Optimization parameters.

1. GİRİŞ

Kauçuk esaslı hortumlar, otomotiv, savunma, denizcilik ve enerji sektörlerinde sıvı ve gaz transferinde kullanılan, sistem güvenliği ve uzun ömürlülüğü açısından kritik öneme sahip mühendislik bileşenleridir. Bu hortumlar yalnızca akışkan taşıma işlevi görmez; aynı zamanda titreşim sönümleme, basınç dayanımı ve çevresel koruma işlevleriyle sistemin bütünsel performansını etkiler. Yüksek basınç altında formunu koruyabilme, sıcaklık değişimlerine dayanıklılık ve kimyasal ortamlarda kararlılığını sürdürebilme özellikleri, hortumların performansını belirleyen başlıca kriterlerdir (Gent ve Mark, 2012; Morton, 2013).

EPDM kauçuğu, ozon, sıcaklık ve yaşlanma dayanımı yüksek bir elastomer olarak otomotiv endüstrisinde yakıt, soğutma ve hava sistemlerinde yaygın biçimde kullanılmaktadır. EPDM esaslı hortumların mekanik davranışı yalnızca elastomer matrisin özelliklerine değil, aynı zamanda takviye tabakasının geometrisine ve kullanılan lif tipine de bağlıdır. Özellikle aramid, polyester gibi yüksek mukavemetli lifler, hortumun iç basınca karşı boyutsal kararlılığını belirlerken; örgü açısı, hatve mesafesi ve iplik inceliği gibi geometrik parametreler hortumun esneklik–rijitlik dengesini doğrudan etkiler (Bilisik ve diğ, 2015; Singh ve diğ, 2020).

Ancak, hatve parametresini esas alan sistematik çalışmalar oldukça sınırlıdır. Xu ve diğ. (2022) farklı hatve değerlerinde eğrilmiş iplikleri karşılaştırmış ve hatve azaldıkça lif yoğunluğunun arttığını, deformasyonun azaldığını ve mekanik dayanımın yükseldiğini göstermiştir (Xu ve diğ, 2022; Ertekin ve diğ. 2022).

Aramid lifler, yüksek çekme dayanımı, düşük yoğunluk ve üstün ısıl kararlılıkları sayesinde esnek hortum yapılarında tercih edilen başlıca takviye elemanlarıdır. Schäfer ve Gries (2016), ±45° örgü açılarında kullanılan aramid takviyelerin darbe altında enerji sönümleme kapasitesini artırdığını; 0° yönlü yerleşimlerin ise boyutsal rijitliği yükselttiğini belirtmiştir. Aramid takviyeli hortumların, büyük deformasyonlar altında bile yapısal bütünlüğünü korumaktadır ve uzun ömürlü performans sergilemektedir. Bu sonuçlar, aramid liflerin hortumun hem kısa vadeli dayanım hem de uzun vadeli yaşlanma direncini artırdığını göstermektedir (Cho ve Yoon, 2016).

Bununla birlikte, doğrudan hatve ve iplik kalınlığı parametrelerinin birlikte ele alındığı sistematik çalışmalar oldukça sınırlıdır. Özellikle otomotiv hortumları gibi uzun ömür ve yüksek güvenilirlik gerektiren uygulamalarda, bu parametrelerin bir arada değerlendirilmesi önemli bir araştırma boşluğu oluşturmaktadır.

Bu doğrultuda, bu tez kapsamında, EPDM esaslı hortumlarda üç farklı aramid iplik kalınlığı (930, 1100 ve 1680 dtex) ve üç farklı hatve mesafesinin (2.9 mm, 3.3 mm ve 4.0 mm) mekanik performans ve yaşlanma direnci üzerindeki etkileri incelenmiştir. Numuneler, ekstrüzyon ve otoklav süreçleriyle üretilmiş; SEM analiziyle morfolojik karakterizasyonu yapılmış, kat yapışma, çap genişleme, patlatma ve uzun ömür testlerine tabi tutulmuştur. Elde edilen sonuçların, EPDM hortumlarda dtex–hatve kombinasyonlarının mekanik dayanım ve deformasyon davranışına etkilerini ortaya koyarak, üretim parametrelerinin optimizasyonuna katkı sağlaması hedeflenmektedir. Böylece literatürdeki eksiklik giderilmekte ve otomotiv sektöründe malzeme seçimi ile proses optimizasyonu için teknik bir temel oluşturulmaktadır.

2. GENEL BİLGİLER

Polimer bilimi, 20. yüzyılda sentetik polimerlerin geliştirilmesiyle önemli bir ivme kazanmıştır. Hermann Staudinger'in çalışmaları, polimerlerin yüksek moleküler ağırlıklı yapılar olduğunu ortaya koyarak modern polimer biliminin temelini oluşturmuştur (Staudinger, 1930; Paul ve Robeson, 2008). Polimerler, monomer adı verilen küçük birimlerin kimyasal bağlarla birleşmesi sonucu oluşan uzun zincirli yapılardır (Billmeyer, 1984; Chamoni ve diğ, 2023). Doğal polimerler (örneğin selüloz, nişasta, proteinler ve doğal kauçuk) biyolojik kökenlidir. Sentetik polimerler ise insan yapımı olup endüstride geniş kullanım alanına sahiptir (Sperling, 2006). Bu grupta öne çıkan EPDM, yüksek sıcaklık, ozon ve hava dayanımıyla bilinen bir elastomer türüdür. Bu özellikleri nedeniyle özellikle otomotiv, izolasyon ve hortum sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Mark, 1999). Polimerlerin yapısal özellikleri; zincir konfigürasyonu, bağ türü ve moleküler düzenine bağlı olarak değişmekte olup, bu faktörler malzemelerin mekanik, kimyasal ve termal davranışlarını doğrudan etkilemektedir. Bu kapsamda polimerler genel olarak termoplastik, termoset ve elastomer yapılar altında sınıflandırılmaktadır (Fried, 2003).

Termoplastik polimerler, ısıtıldıklarında yumuşayan ve şekillendirilebilen; soğutulduklarında ise yeniden sertleşen yapılardır (Gooch, 2011). Bu özellikleri sayesinde birçok kez ısıl işleme tabi tutulabilir ve geri dönüştürülebilirler. Genellikle doğrusal veya dallanmış zincir yapısına sahip olan termoplastikler, uygun çözücülerde çözünür ve kristalin ya da amorf fazlarda bulunabilir (Mandelkern, 1985; Karger ve Kocsis, 1995). Kristallik derecesi; polimerin kimyasal yapısı, zincir mimarisi ve işlem koşullarına bağlı olarak değişmektedir (Zeng, 2024).

Termosetler, ısıtıldıklarında sertleşir ve şekillendirildikten sonra tekrar yumuşamaz; bu nedenle son derece stabil ve dayanıklı malzemelerdir (Li ve diğ, 2014). Epoksi reçineler ve doymamış polyesterler gibi yoğun çapraz bağlı termoset polimerler, üç boyutlu ağ yapıları sayesinde yüksek cam geçiş sıcaklığı, mukavemet, sürünme direnci ve kimyasal dayanım gösterirler (Li ve diğ, 2014; Islam ve diğ, 2024).

Elastomerler, uygulanan gerilme altında büyük deformasyonlara izin veren ve serbest bırakıldığında eski şekillerine dönebilen polimerlerdir (Gent, 2012). Bu özellikler, zincir hareketliliği ve çapraz bağ yoğunluğu ile belirlenir; çapraz bağlar, elastik deformasyonun kalıcı şekil değişimine dönüşmesini engeller (Brinson ve Brinson, 2008). Elastomerlerin çalışma sıcaklığı genellikle cam geçiş sıcaklığının üzerinde olmalıdır, aksi takdirde malzeme kırılganlaşır (Alarifi, 2023). Doğal kauçuk, silikon kauçuk ve neopren gibi elastomerler, otomotiv, medikal ve tüketici ürünlerinde esneklik ve dayanım gerektiren uygulamalarda kullanılır (Mark ve diğ, 2005). Sentetik elastomerlerden EPDM, özellikle ozon, hava ve yüksek sıcaklık dayanımıyla öne çıkar ve hortum, conta, izolasyon ve otomotiv parçalarında yaygın olarak tercih edilmektedir (Mark, 1999; Wang ve diğ, 2022). Takviyeli sistemlerde ise, lif tipi ve örgü yapısı gibi parametreler de mekanik performansı önemli ölçüde etkilemektedir (You ve diğ, 2024).

2.1 Kauçuk Malzemeler

Kauçuklar, elastomerik malzemeler sınıfında yer alır ve yüksek esneklikleri ile geri dönüşümlü deformasyon yetenekleri sayesinde birçok endüstriyel uygulamada kullanılırlar. Hem doğal hem de sentetik olarak üretilebilen bu malzemeler, mekanik dayanım, kopma uzaması ve çevresel etkilere karşı direnç açısından farklılık göstermektedir (Rahman ve diğ, 2013).

Doğal kauçuk, Hevea brasiliensis bitkisinin özsuyu olan lateksten elde edilen, cis-1,4-poliizopren esaslı nötr bir elastomerik polimerdir. Yapısının %90'ından fazlasını oluşturan bu cis konfigürasyonlu polimer zincirleri, doğal kauçuğa yüksek elastikiyet, esneklik ve mekanik dayanım kazandırmaktadır (Blackley, 1997). Yüksek kopma uzaması, yorulma direnci ve üstün mekanik performansı ile dikkat çekmektedir. Ancak ozon ve ultraviyole (UV) ışınlarına karşı düşük dayanım göstermesi nedeniyle çevresel yaşlanmaya açık bir malzeme olarak değerlendirilmektedir (Rahman ve diğ, 2013; Vaysse ve diğ, 2012). Doğal kauçuğun lineer ve amorf yapısı, yüksek gerilme dayanımı ve kopma mukavemeti sağlamada temel rol oynamaktadır (Blackley, 1997; Dick, 2009).

Sentetik kauçuklar, petrokimyasal kaynaklardan elde edilen monomerlerin kontrollü polimerizasyonu yoluyla sentezlenen elastomerlerdir. Yapısal özellikleri, kullanılan monomer türüne ve üretim yöntemine göre çeşitlilik göstermektedir. Sıklıkla

kullanılan türler arasında stiren-bütadien kauçuk (SBR), nitril bütadien kauçuk (NBR), Neopren (CR), polibutadien kauçuk (BR) ve EPDM yer almaktadır (Mark ve diğ, 2005).

SBR, yüksek aşınma direnci ve iyi mekanik performansıyla özellikle otomotiv lastiklerinde yaygınken, BR, düşük sıcaklıklarda üstün elastikiyet sunar ve genellikle doğal kauçukla karıştırılarak kullanılır. NBR ise nitril grupları sayesinde yağ, yakıt ve solventlere karşı yüksek kimyasal direnç sağlar; conta ve hortum gibi sızdırmazlık elemanlarında tercih edilir.CR, kimyasal ve yaşlanma direncinin yanı sıra yanmaya karşı dayanıklılığı ile elektrik izolasyonu, dalış elbiseleri ve teknik hortum üretiminde kullanılırlar. Silikon Kauçuk, geniş sıcaklık aralığında termal kararlılık, yüksek elektriksel yalıtım ve biyouyumluluk sunar; ancak nispeten düşük mekanik dayanımı nedeniyle bazı yapısal uygulamalarda sınırlı kullanılır (Morton, 2013; Hamed, 2000; Choi ve Kim, 2014; El-Shekeil ve diğ, 2021; Mark ve diğ, 2005; Rothon, 2003; Gent ve Mark, 2012).

2.1.1 Etilen-propilen-dien kauçuk

EPDM kauçuk, etilen, propilen ve dien monomerlerinin kopolimerizasyonu ile elde edilen bir sentetik elastomerdir. Yaklaşık –55 °C cam geçiş sıcaklığına sahip olan EPDM, –55 °C ile +150 °C arasında sürekli, kısa süreli olarak ise +175 °C'ye kadar üstün termal performans sergilemektedir. Yapısında bulunan doymuş ana zincir, EPDM'ye ozon, UV ışınları ve oksijen gibi çevresel etkenlere karşı yüksek direnç kazandırmaktadır. Ayrıca, iyi düzeyde elektriksel yalıtım özelliklerine sahiptir. EPDM'nin kimyasal yapısından kaynaklanan bu üstün özellikler, onu yüksek performans gerektiren elastomer uygulamaları için ideal bir malzeme haline getirmektedir. Bu nedenle, özellikle yüksek sıcaklık, basınç ve çevresel etkilere maruz kalan hortum sistemlerinde EPDM yaygın olarak tercih edilmektedir (Dick, 2009; Costa ve diğ, 2024).

Hortum uygulamalarında, EPDM'nin mekanik performansı, çapraz bağ yoğunluğu ve zincir konfigürasyonu ile doğrudan ilişkilidir. Uygulanan çapraz bağlama işlemleri, hortumların yüksek basınç ve titreşim altında şekil değiştirmesini önler, elastik geri dönüşünü korur ve uzun ömürlü hizmet sağlar. Ayrıca, hortumların dayanımını artırmak amacıyla EPDM genellikle aramid veya polyester liflerle takviye edilir. Örgü tipi, sarım açısı ve lif yoğunluğu gibi parametreler, hortumun iç basınç altında deformasyon davranışını ve mekanik stabilitesini belirler (Dick, 2009; Costa ve diğ, 2024; You ve diğ, 2024).

2.2 Takviye Edici Elyafların Hortum Üzerindeki Etkisi

2.2.1 Cam elyaf

Cam elyaflar, erimiş silisli hammaddelerin ekstrüzyonla lif hâline getirilmesiyle elde edilen, yüksek çekme dayanımı ve mükemmel termal kararlılığa sahip anorganik elyaflardır (Gooch, 2011). Hafifliği, kimyasal direnci ve yüksek sıcaklık performansı sayesinde; özellikle sert plastik matrisli kompozitlerde, yapısal levhalarda ve rüzgâr türbinlerinde geniş bir kullanım alanına sahiptir (Karger ve Kocsis, 1995; Mark ve diğ, 2005). Termoplastik ve termoset esaslı matrislerle uyumlu olan cam elyaflar, başta otomotiv, yapı ve denizcilik endüstrisi olmak üzere geniş bir uygulama alanına sahiptir. Yüksek çekme mukavemetine rağmen düşük uzama kabiliyetine sahiptir. Bu nedenle, darbe etkilerine ve sürekli eğilme-bükülmelere maruz kalan hortumlarda çatlama ve fiber kırılması meydana gelebilir (Brinson ve Brinson, 2008; Gent, 2012). Elastik modülü çok yüksektir ve deformasyon sırasında matrisle uyumlu şekilde şekil değiştiremezler. Bu durum, hortumun şişme davranışını sınırlar ve uzun süreli yorulmaya karşı direnci düşürür (Mark ve diğ, 2005). Kauçukla kimyasal bağ oluşturma kapasitesi sınırlıdır. Fiber-matris arayüzünde zayıf yapışma, zamanla mikro ayrılmalara yol açarak mekanik performansı düşürmektedir (Gent, 2012). Bu noktada cam elyaflar, daha çok sert ve rijit kompozitlerin üretiminde, özellikle de boyutsal kararlılığın ve çekme dayanımının ön planda olduğu uygulamalarda değerlendirilmektedir (Elhousari ve diğ, 2021).

Özellikle örgü yapısında kullanılan aramid elyaflar, cam elyaflara kıyasla hem daha hafif hem de daha dayanıklıdır ve bu özellikleri sayesinde hortumların orta katmanlarında örgü takviye elemanı olarak öne çıkmaktadır (Islam ve diğ, 2024). Aramid elyafların üstün darbe dayanımı ve esneklik özellikleri, kauçuk esaslı hortumların yüksek basınca, sıcaklığa ve bükülmeye karşı performansını belirgin şekilde artırmaktadır. Bu bağlamda, cam elyaflar polimer kompozit sistemlerde yerini korumakta olsa da esnek hortum yapılarında aramid elyaflar ile rekabet edebilir düzeyde değildir. Bu nedenlerle, cam elyaf örgü takviyesi özellikle esnekliğin ve şişme direncinin kritik olduğu uygulamalarda tercih edilmemektedir. Bu tür uygulamalarda, yüksek mukavemetle birlikte deformasyon kabiliyeti sunabilen aramid elyaflar çok daha uygun çözümler sunmaktadır (Gent, 2012).

2.2.2 Bor elyaf

Bor elyafları, üstün mekanik performansları ve termal kararlılıkları ile özellikle havacılık ve savunma sanayiinde kullanılan yüksek performanslı elyaf takviye malzemeleridir. Bor elyaflarının en ayırt edici özelliklerinden biri, yüksek çekme dayanımı (yaklaşık 2.400–3.100 MPa) ve çok yüksek elastik modül değeridir (yaklaşık 380–420 GPa). Bu değerler, onları grafit ve karbon elyafları ile karşılaştırılabilir düzeye getirmekte ve rijitliğin ön planda olduğu uygulamalarda önemli avantajlar sunmaktadır (Burningham, 1967; Schwartz, 1967).

Bor elyafları genellikle, kimyasal buhar biriktirme yöntemi ile yaklaşık 12–15 mikron çapında bir tungsten tel çekirdeği üzerine bor biriktirilerek üretilir. Bu yapı sayesinde elyaf, yüksek sıcaklıklara ve termal şoklara karşı direnç göstermektedir. Ayrıca bor, düşük yoğunluğu (~2.6 g/cm³) sayesinde yapısal parçalarda ağırlık azaltma avantajı da sunar. Bu yüksek performans özelliklerine rağmen, bor elyaflarının esnek hortum sistemlerinde kullanımı oldukça sınırlıdır. Bunun temel nedenleri aşağıdaki gibi özetlenebilir (Schwartz, 1967).

Bor elyaflarının sahip olduğu yüksek elastik modül ve rijit yapı, elastomer matrislerle birlikte çalışmaya uygun değildir. Özellikle kauçuk bazlı hortum sistemlerinde istenen esneklik ve deformasyon kabiliyeti, bor elyafının sert doğasıyla örtüşmemektedir. Bu durum, hortumun bükülme, şişme veya dinamik yükler altında çalışması sırasında fiber çatlaması, mikroayrılma veya matris-fiber arayüzü zayıflığına neden olabilir. Bor elyaflarının üretimi, diğer sentetik elyaflara kıyasla oldukça karmaşık ve maliyetlidir. Bu da onları yüksek hacimli ve düşük maliyetli uygulamalar için ekonomik açıdan elverişsiz kılmaktadır. Elastomer hortumlar gibi geniş üretim hacmine sahip uygulamalarda, ekonomik verimlilik önemli bir kriterdir (Burningham, 1967; Schwartz, 1967).

Bor elyafları, yüksek rijitliklerine rağmen düşük darbe dayanımı ve düşük uzama kabiliyeti ile sınırlıdır. Tekrarlayan eğilme, burulma ve iç basınç dalgalanmalarına maruz kalan esnek hortum uygulamalarında, bu kırılgan yapı dezavantaj oluşturur. Bu nedenlerle, bor elyafları polimer matrisli kompozitlerde özellikle sert yapıların üretiminde (örneğin uzay taşıyıcı panelleri, uçak kirişleri, yapısal levhalar vb.) kullanılmakta; ancak elastomerik esnek hortum sistemlerinde takviye katmanı olarak

aramid, polyester veya naylon gibi daha esnek ve yorulma dayanımı yüksek malzemelerin kullanımı tercih edilmektedir (Özben ve Şen, 2021).

2.2.3 Karbon elyaf

Karbon elyaflar, yüksek çekme dayanımı, düşük yoğunluk, yüksek sıcaklık direnci ve üstün boyutsal stabilite gibi özellikleriyle ileri mühendislik uygulamalarında öne çıkan takviye malzemeleridir (Singh, 2017; Sathishkumar ve diğ, 2014). Genellikle termoplastik veya termoset matrisli rijit kompozitlerde kullanılsalar da son yıllarda elastomer bazlı sistemlerdeki potansiyel uygulamaları da araştırılmaktadır. Özellikle örgü takviyeli hortum sistemlerinde, karbon elyaf kullanımı üzerine yapılan çalışmalar, bu malzemenin bazı mekanik avantajlara sahip olduğunu göstermektedir. Örneğin, Ertekin ve diğ. (2022) tarafından yapılan deneysel bir çalışmada, NBR/CPE esaslı kauçuk hortumların orta katmanına farklı elyaflar (cam, aramid, bazalt ve karbon) yerleştirilmiş ve bu hortumlar çap genişlemesi, kalıcı deformasyon ve vakum çökme testlerine tabi tutulmuştur. Sonuçlar, karbon elyaf örgü takviyesinin, düşük çap genişlemesi ve yüksek şekil stabilitesi ile öne çıktığını göstermiştir. Özellikle 25 °C ve 110 °C sıcaklıklarda test edilen karbon takviyeli hortumların, çap genişlemesi değerlerinin diğer elyaflara göre daha düşük olduğu tespit edilmiştir (Ertekin ve diğ, 2022).

Bununla birlikte, karbon elyafların örgü takviyeli elastomer hortumlar için kullanımında bazı sınırlamalar da bulunmaktadır. Her ne kadar yüksek çekme dayanımı ve rijitliği sayesinde boyutsal kararlılık sağlasa da karbon elyafların kırılgan yapısı, düşük uzama kapasitesi ve darbe dayanımı eksikliği, sürekli bükülmeye ve titreşimli yüklere maruz kalan hortum sistemlerinde önemli performans dezavantajlarına neden olabilmektedir (Cho ve diğ, 2016; Brinson ve Brinson, 2008). Ayrıca karbon elyafların kauçuk bazlı matris sistemleriyle kimyasal etkileşim düzeyinin düşük olması, fiber-matris arayüzünde zayıf bağlanmalara ve zamanla mikro ayrılmalara yol açabilir. Bu durum, özellikle uzun süreli kullanımda mekanik özelliklerin bozulmasına neden olur (Gent, 2012). Bu bağlamda, karbon elyaflar ile aramid elyaflar arasında yapılan karşılaştırmalarda, aramid elyafların, elastikiyet, darbe dayanımı ve kauçuk matrisle uyum açısından daha avantajlı olduğu belirtilmektedir. Aramid lifler, yüksek dayanımlarının yanı sıra deformasyona karşı esnek kalabilme özellikleri sayesinde, özellikle hortumların şişme, bükülme ve vakum

dayanımı gibi kritik parametrelerinin iyileştirilmesinde etkin rol oynamaktadır (Islam ve diğ, 2024; Shubhra ve diğ, 2025).

2.2.4 Aramid elyaf

Aramidin en önemli avantajları yüksek mukavemet ve düşük ağırlıktır. Yaklaşık 3620 MPa çekme dayanımı ve 1,44 g/cm³ yoğunluğa sahip para-aramid lifler, yüksek mukavemet/ağırlık oranlarıyla öne çıkmaktadır. Epoksi gibi matrislerle birleştirildiğinde su geçirmezlik sağlarken, kauçukla kompozit yapıldığında esnekliğini koruyarak yüksek performans sunabilmektedir. Cam ve karbon elyafların aksine aramid, kriyojenik sıcaklıklara (–196 °C) kadar mukavemet ve esneklik özelliklerini korumaktadır. Aromatik halkalar içeren moleküler yapısı sayesinde önemli miktarda enerjiyi absorbe edebilmekte, aşınmaya ve kesilmeye karşı direnç göstermekte, termal bozulmaya ve yanıcılığa karşı kararlılığını korumaktadır (Dharmavarap ve Reddy, 2021).

Cam elyaflarla karşılaştırıldığında aramid lifler, yüksek darbe dayanımı, elastik uzama kapasitesi ve yorulma direnci bakımından belirgin üstünlük göstermektedir. Cam elyafların rijit yapısı, bükülme ve şok yüklemeleri altında kırılganlığa yol açabilirken; aramid lifler elastomer matrisle birlikte çalışarak yapısal sürekliliği korumaktadır. Ayrıca düşük yoğunlukları sayesinde toplam ağırlığı azaltmakta, enerji verimliliğine katkı sağlamaktadır (Hintze ve diğ, 2014).

Kauçuk bazlı hortum sistemlerinde aramid lifler genellikle örgü yapı formunda, iç ve dış kauçuk katmanlar arasına yerleştirilerek kullanılmaktadır. Bu örgü katman, hortumun şişmeye, bükülmeye ve dinamik yüklere karşı direncini doğrudan etkileyen takviye mekanizmasını oluşturmaktadır. Yüksek iç basınç altında aramid örgüler, elastik deformasyon kabiliyetini kaybetmeden yapının bütünlüğünü koruyarak boyutsal stabilite sağlamaktadır (Bilisik ve diğ, 2015).

Aramid katkılı elastomer kompozitler üzerine yapılan çalışmalar, bu liflerin yüksek enerji sönümleme kapasitesine sahip olduğunu göstermektedir. Kısa aramid liflerle takviye edilen elastomer matrislerde, deformasyon altında modül artışı ve düşük frekanslı titreşimlere karşı sönümleme kapasitesinde iyileşme sağlanmıştır (Hintze ve diğ, 2014). Bu özellikler, aramid esaslı hortumların hem titreşimli ortamlarda hem de darbeli yüklemelerde uzun süreli performans göstermesine olanak tanımaktadır.

Aramid liflerin uzun dönem davranışları da literatürde incelenmiştir. Kevlar, Twaron ve Technora gibi para-aramid türleri 25–120 °C sıcaklık aralığında ve ayrıca 65 °C'de su, düşük pH ve ham petrol ortamlarında test edilmiş; düşük sürünme (creep) eğilimi ve yüksek dayanım sergiledikleri belirlenmiştir (Fallatah, 2006). Bu bulgular, hortum takviyelerinde aramid kullanımının uzun vadeli deformasyon direncini garanti ettiğini göstermektedir.

Son yıllardaki araştırmalar da aramid takviyelerinin hortum performansına katkılarını doğrulamaktadır. Ertekin ve diğ. (2022), yüksek basınç yakıt hortumlarında aramid örgülerin yüksek patlama basıncı ve deformasyon direnci sağladığını rapor etmiştir. Cho ve diğ, (2013) ile Cho ve Yoon (2016), polyester ve naylona kıyasla aramid takviyelerin daha yüksek elastisite modülüyle elastomer matrisle uyumlu çalıştığını ve büyük deformasyon altında bile yapısal güvenilirlik sunduğunu göstermiştir. Schäfer ve Gries (2016) ise braiding pultrusion yöntemiyle ±45° açılarda kullanılan aramid liflerin darbe altında enerji sönümleme kapasitesi kazandırırken, 0° yönlü liflerin boyutsal rijitliği artırdığını belirtmiştir.

Tüm bu bulgular bir arada değerlendirildiğinde, aramid elyafların hortumlarda takviye malzemesi olarak tercih edilmesinin temel nedenleri; yüksek mukavemet/ağırlık oranı, darbe ve aşınma dayanımı, düşük sürünme davranışı, kimyasal ve ısıl kararlılık, elastomerlerle uyumlu deformasyon kabiliyeti ve uzun dönem dayanıklılık olarak özetlenebilir. Bu özellikler nedeniyle günümüzde aramid esaslı örgüler, yüksek performanslı elastomer hortum sistemlerinde endüstri standardı hâline gelmiştir.

2.3 Kauçuk Hortum Üretim Süreçleri

EPDM esaslı hortumların üretim süreci, genellikle dört temel adımdan oluşmaktadır. Bu adımlar sırasıyla: hamur hazırlama, ekstrüzyon (şekillendirme), vulkanizasyon (çapraz bağlama) ve otoklav prosesi olarak tanımlanmaktadır. Her bir adım, nihai ürünün mekanik, termal ve kimyasal özelliklerini belirlemede kritik rol oynamaktadır.

2.3.1 Hamur hazırlama

Üretim sürecinin ilk aşamasını oluşturan hamur hazırlama adımı, EPDM esaslı kauçuk matrisine çeşitli katkı maddelerinin ve dolgu malzemelerinin homojen bir şekilde karıştırılmasını kapsamaktadır. Bu işlem hem karıştırma hem de dağılım açısından

kontrollü şekilde yürütülmeli; kauçuğun fiziksel, kimyasal ve işlenebilirlik özelliklerini istenen düzeyde sağlayacak bileşim elde edilmelidir.

EPDM hamur bileşimi; elastomer matrisi (EPDM kauçuğu), dolgu maddeleri (örneğin karbon siyahı), yumuşatıcılar (plastifiyanlar), vulkanizasyon ajanları (örneğin sülfür), hızlandırıcılar ve çeşitli işlem yardımcıları gibi bileşenlerden oluşur. Her bileşen, bileşiğin özelliklerine katkıda bulunmakta; işlenebilirlik, sertlik, çekme mukavemeti, ısıl dayanım ve çevresel etkilere karşı direnç gibi parametreleri etkilemektedir. Kullanılan tipik bileşen oranları, Çizelge 2.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 2.1: EPDM hamuru için kullanılan bileşen oranları.

Bileşen	Miktar (phr)	Rolü ve önemi
EPDM Polimeri	100	Ana polimer, temel elastik yapı
Karbon Siyahı	50-80	Mukavemet, aşınma direnci, UV direnci
Vulkanizasyon Ajanı (Peroksit)	1-3	Çapraz bağlama sağlayıcısı
Antioksidanlar ve Stabilizatörler	1-3	Yaşlanma, termal ve oksidatif stabilizasyon
Çinko Oksit ve Stearik Asit	1-5	Vulkanizasyon hızlandırıcı ve aktivatörler
Dolgu Maddeleri (Kalsiyum karbonat)	10-30	Maliyet azaltıcı ve işlenebilirlik artırıcı
Proses Yağı	5-15	İşlenebilirliği kolaylaştırıcı

EPDM esaslı hortum üretiminde ilk adım, işlevsel özellikleri optimize edecek şekilde çeşitli katkı maddelerinin temel elastomerle karıştırılmasıdır. Bu işlem genellikle Banbury mikser gibi yoğun karıştırıcılarda veya iki merdaneli soğutuculardа gerçekleştirilir. Karışım homojenliğinin sağlanması, nihai ürünün mekanik, termal ve kimyasal özelliklerini belirlemesi açısından kritik öneme sahiptir (Morton, 2013; Dick, 2009).

EPDM hamuru, belirli oranlarda katkı maddeleriyle formüle edilir ve her bileşenin karışım üzerindeki işlevi farklıdır. Aşağıda, bu bileşenler ve temel fonksiyonları özetlenmiştir:

- EPDM Polimeri (100 phr): Karışımın temel elastomerik yapısını oluşturur. Termal kararlılık ile ozon ve UV direnci sağlar.

- Karbon Siyahı (50–80 phr): Mekanik dayanımı, aşınma direncini ve UV stabilitesini artırır. Partikül boyutu küçüldükçe mukavemet artar; ancak işlenebilirlik azalabilir (Morton, 2013).
- Dolgu Maddeleri (10–30 phr): Kalsiyum karbonat; ekonomik bir dolgu malzemesi olup sertlik ve basınç dayanımını artırırken, elastikiyet ve aşınma direncini azaltabilir. Talk, hamurun akışkanlığını artırır, işlenebilirliği iyileştirir ve maliyetleri düşürür (Savran, 2001).
- Vulkanizasyon Ajanları (1–3 phr): Kükürt; geleneksel ve yaygın bir vulkanizasyon ajanıdır. Polimer zincirleri arasında çapraz bağlar oluşturarak elastikiyet kazandırır (Coran, 2003). Organik peroksitler (ör. dikumil peroksit); yüksek sıcaklık dayanımı gereken uygulamalarda tercih edilir; kükürt sistemlerine göre daha kararlı çapraz bağlar oluşturur (Dluzneski, 2001).
- Vulkanizasyon Hızlandırıcıları (1–5 phr): Çinko oksit; vulkanizasyon reaksiyonunun hızını artırır ve nihai ürünün mekanik özelliklerini geliştirir. Stearik asit; çinko oksit ile aktivatör olarak çalışır, karışımın homojenliğini ve proses stabilitesini artırır (Coran, 2003).
- Antioksidanlar ve Stabilizatörler (1–3 phr): Fenolik antioksidanlar; termal ve oksidatif bozunmayı yavaşlatarak ürün ömrünü uzatır. UV stabilizatörleri; güneş ışınlarına karşı koruma sağlar, dış ortam koşullarına dayanıklılığı artırır.
- İşlem Yardımcıları (5–15 phr): Plastifiyanlar (ör. parafinik yağlar); karışım viskozitesini düşürerek proses kolaylığı sağlar. Yağlayıcılar; ekstrüzyon ve kalıplama süreçlerinde malzeme akışını artırır, yüzey kalitesini iyileştirir (Gent ve Mark, 2012; Savran, 2001).

Bu bileşenlerin optimum oranlarda seçilmesi, yalnızca işlenebilirliği değil; aynı zamanda nihai ürünün uzun ömürlü, fonksiyonel ve yüksek performanslı olmasını sağlamaktadır.

2.3.2 Ekstrüzyon prosesi

Kauçuk hortum üretiminde, yarı mamulün elde edilmesi amacıyla ekstrüzyon yöntemi, temel bir adım olarak uygulanmaktadır. Bu yöntem, kauçuk bileşiğinin sürekli bir proses boyunca işlenerek istenilen hortum geometrisine dönüştürülmesini sağlar. Ekstrüzyon işlemi sırasında, hazırlanan kauçuk hamur, bir ekstrüder aracılığıyla yüksek basınç altında ısıtılır, plastikleştirilir ve kalıptan geçirilerek şekillendirilir.

Ekstrüder sistemi, kauçuğun beslenmesi, ısıtılması ve kalıpta form kazanmasını sağlayan karmaşık bir mekanizmadır. Kalıp bileşenleri, hortumun iç ve dış çapının hassas şekilde kontrol edilmesine olanak tanırken; ekstrüder çıkışında yer alan soğutma hatları, şekillendirilmiş hortumun geometrik kararlılığını sağlamak amacıyla kullanılır (Nikolic ve Janjic, 2020; Park ve Kim, 2001).

Ekstrüzyon süreci; sıcaklık, basınç ve hız gibi parametrelerin hassas biçimde kontrol edilmesini gerektirir. Bu parametrelerdeki küçük sapmalar dahi, ürünün yüzey düzgünlüğü, çapsal tutarlılığı ve mekanik dayanımı üzerinde olumsuz etkiler yaratabilir. Bu nedenle ekstrüzyon sonrası hortumlar, görsel ve boyutsal kalite kontrollerine tabi tutularak ulusal ve uluslararası standartlara uygunluğu değerlendirilir (ISO 4671, 2007).

Ekstrüzyonu takiben hortumlar, vulkanizasyon işlemine yönlendirilir. Vulkanizasyon, ham kauçuk zincirleri arasında çapraz bağların oluşturulmasını sağlayarak elastomerin mekanik ve termal özelliklerini kalıcı biçimde geliştiren kritik bir kimyasal işlemdir. Vulkanizasyon işlemi genellikle kükürt veya organik peroksit bazlı vulkanizasyon ajanları ile gerçekleştirilir. Kükürt vulkanizasyonu, yaygın ve ekonomik bir yöntem olarak öne çıkarken; peroksit vulkanizasyonu, yüksek sıcaklığa maruz kalacak ya da düşük sıkıştırma seti istenen uygulamalar için daha uygundur (Dluzneski, 2001; Coran, 2003). Vulkanizasyon sıcaklığı genellikle 160 °C ile 200 °C arasında gerçekleştirilirken, işlem süresi 15 ila 30 dakika arasında değişmektedir. Süre ve sıcaklık değerlerinin optimizasyonu, zincirler arası çapraz bağ yoğunluğunu belirleyerek ürünün elastikiyet, sertlik ve yaşlanma direnci gibi temel özelliklerini doğrudan etkilemektedir. Vulkanizasyonun ardından hortumlar, kontrollü biçimde soğutulur ve belirli uzunluklarda kesilerek test aşamasına alınır. Bu aşamada çeşitli kalite kontrol prosedürleri uygulanmaktadır. Boyutsal kontroller, çap, duvar kalınlığı ve uzunluk gibi temel ölçümleri kapsamaktadır. Basınç testleri, hortumun iç basınca dayanımını ve patlama sınırlarını belirlemeye yöneliktir. Sıcaklık direnç testleri, hortumun düşük ve yüksek sıcaklıklardaki mekanik stabilitesini değerlendirmektedir. Kimyasal direnç testleri, antifriz, motor yağı ve benzeri sıvılara karşı gösterilen dayanımı ölçmektedir. Yaşlanma testleri kapsamında ise malzeme, ısı, ozon ve UV ışınlarına maruz bırakılarak uzun vadeli performansı tahmin edilmektedir. Tüm bu işlemler, hortumun nihai uygulama koşullarında güvenli, dayanıklı ve uzun ömürlü bir

performans sergilemesini sağlamak açısından vazgeçilmezdir (Gent ve Mark, 2012; Morton, 2013).

2.3.3 Otoklav prosesi

Vulkanizasyon, kauçuk malzemelerin mekanik ve elastik performansını iyileştirmek amacıyla uygulanan kimyasal bir çapraz bağlama sürecidir. EPDM esaslı hortumların üretiminde, vulkanizasyonun etkili bir şekilde gerçekleştirilmesi için sıklıkla otoklav yöntemi tercih edilmektedir. Bu yöntem hem çapraz bağlanmanın tamamlanmasını hem de hortumun boyutsal stabilitesi ile nihai mekanik özelliklerinin gelişimini sağlamaktadır.

Süreç kapsamında, önceden şekillendirilmiş hortumlar, özel olarak tasarlanmış otoklav kabinlerine yerleştirilir. Otoklav içerisinde sıcaklık kontrollü biçimde 140 °C ile 180 °C aralığına yükseltilirken, sistem basıncı genellikle 2 ila 9 bar arasında ayarlanır. Bu koşullar altında uygulanan sıcak buhar veya sıcak hava, polimer zincirleri arasında daha düzgün ve homojen çapraz bağ oluşumunu teşvik eder. Bu bağlanma, ürünün yapısal bütünlüğünü geliştirerek mukavemet, elastikiyet ve ısıl dayanım gibi temel özelliklerde belirgin iyileşmeler sağlar (Morton, 2013; Coran, 2003).

Otoklav işlem süresi, genellikle 20 ile 60 dakika arasında değişmekte olup; bu süre, ürünün geometrik boyutlarına, kullanılan çapraz bağlayıcı sistemin türüne ve istenen performans kriterlerine bağlı olarak belirlenmektedir. Literatürdeki bulgular, özellikle peroksit esaslı vulkanizasyon sistemlerinin otoklav prosesiyle kullanıldığında, daha yüksek sıcaklık dayanımı ve daha düşük kalıcı deformasyon sağladığını göstermektedir. Bu bağlamda otoklav yöntemi, yalnızca fiziksel bütünlüğü değil, aynı zamanda termal kararlılığı ve servis ömrünü de optimize eden etkili bir vulkanizasyon stratejisi olarak değerlendirilmektedir (Yılmaz ve diğ, 2021).

Hortumların nihai formunu kazanabilmesi için, üretim sürecinin sonunda vulkanizasyon işleminin uygulanması gereklidir. Bu işlem, elastomer yapının kalıcı mekanik ve elastik özellikler kazanmasını sağlayarak ürünün genel performansında belirleyici rol oynamaktadır. Bu amaçla yaygın biçimde kullanılan yöntemlerden biri de açık buhar vulkanizasyonudur. Bu yöntemde hortumlar, otoklav adı verilen büyük hacimli basınç kaplarında, doğrudan sıcak buharla işlenir. İşlem süresince sıcaklık genellikle 150–200 °C, basınç ise 10–20 bar aralığında tutulur. Açık buhar

vulkanizasyonu, çapraz bağ oluşumunu homojenleştirerek kauçuk yapının dayanıklılığını ve uzun vadeli stabilitesini artırmaktadır (Coran, 2003; Dluzneski, 2001).

Buna karşılık, mikrodalga vulkanizasyon yöntemi, özellikle enerji verimliliği ve işlem süresinin kısalığı açısından avantaj sunmaktadır. Bu teknik, özellikle küçük çaplı hortumların üretiminde tercih edilmektedir. Mikrodalga enerjisi, kauçuğu içeriden dışa doğru hızlı şekilde ısıtarak çapraz bağ oluşumunu başlatmakta ve işlem süresini kayda değer biçimde azaltmaktadır. Ayrıca, sürekli üretim hatlarına entegre edilebilirliği sayesinde modern üretim teknolojileri arasında yerini almıştır. Her iki yöntem de hortumun geometrisine, üretim hacmine ve performans gereksinimlerine göre uygun biçimde seçilerek uygulanmaktadır (Abdelrahman ve diğ, 2017).

2.4 Örgü Takviyeli Kauçuk Hortumlar

Kauçuk hortumların yüksek basınç ve mekanik yüklere karşı performansını artırmak amacıyla örgü takviyesi uygulanmaktadır. Hortumun iç ve dış kauçuk tabakaları arasında yer alan bu takviye katmanı spiral, çapraz örgü veya düz örgü teknikleriyle üretilmekte ve elastomer tabakalarla birlikte çalışarak şekilsel stabiliteyi sağlamaktadır (Gent ve Walters, 2011). Örgü yapısı, hortumun mukavemetini artırmakla kalmaz; aynı zamanda yorulma ömrünü uzatır, deformasyonları sınırlar ve basınç altında boyutsal kararlılık kazandırır.

Takviye ipliklerinde P-Aramid ve M-Aramid lifler öne çıkmaktadır. P-Aramid (Kevlar), yüksek çekme dayanımı ve elastik modülü sayesinde hortuma sertlik ve dayanım kazandırırken, M-Aramid (Nomex) yüksek sıcaklıklarda yapısal kararlılığını koruyarak güvenilirlik sunmaktadır. Uzun dönem davranışlar açısından Kevlar, Twaron ve Technora gibi liflerin düşük sürünme eğilimi ve yüksek dayanım sergilediği; su, düşük pH ve petrol gibi çevresel koşullarda ise dayanım kaybının sınırlı kaldığı belirlenmiştir. Bu sonuç, aramidlerin uzun vadeli deformasyon direnci açısından kritik olduğunu ortaya koymaktadır (Fallatah, 2006).

İpliklerin inceliğini tanımlayan dtex değeri ile hatve uzunluğu ve örgü açısı birlikte değerlendirildiğinde hortumun mekanik performansı üzerinde belirleyici bir rol oynamaktadır. Düşük dtex iplikler hortuma esneklik sağlamakta fakat yüksek basınç altında deformasyona karşı sınırlı direnç göstermektedir. Yüksek dtex iplikler ise

hortumu daha sert hale getirmekte, çap büyümesini sınırlandırmaktadır (Yıldız, 2018; Huang et al, 1999). Xu ve diğ, (2022) çalışmasında farklı hatve değerlerinde üretilen iplikler karşılaştırılmış ve hatve kısaldıkça ipliklerin daha yoğun yapıda olduğu, hortum sertliğinin arttığı ve deformasyonların azaldığı gösterilmiştir. Bu durum, hatvenin doğrudan hortumun sertlik–deformasyon dengesi üzerinde etkili olduğunu ortaya koymaktadır (Xu ve diğ, 2022). Hatve ile örgü açısının doğrudan bağlantılı olduğu görülmektedir. Hatve kısaldığında örgü açısı büyümekte, hatve uzadığında örgü açısı küçülmektedir. Singh ve diğ, (2020) yaptığı deneylerde 30° örgü açısı uzun hatveye karşılık gelmiş, hortum daha esnek davranmış ancak lokal ezilmeler baskın hale gelmiştir. 60° örgü açısı ise kısa hatveye karşılık gelmiş, hortum sertleşmiş, global deformasyon davranışı sergilemiş ve yük taşıma kapasitesi artmıştır. Yaklaşık 54° örgü açısına karşılık gelen orta hatve değerleri ise hortumlarda optimum boyutsal stabiliteyi sağlamıştır (Bilisik ve diğ, 2015; Singh ve diğ, 2020).

Yakıt hortumları üzerine yapılan bir çalışmada, örgü hızı ve buna bağlı hatve değişimlerinin de performansı etkilediği görülmüştür. Ertekin ve diğ, (2022), farklı lifler ve örgü hızları kullanarak ürettikleri numunelerde örgü hızı arttıkça hortum sertliğinin azaldığını, çap genişlemesinin arttığını ve patlama basıncının düştüğünü göstermiştir. Özellikle 4 m/dk braiding hızında elde edilen NBR/Bazalt/CPE kombinasyonu, sertlik ve deformasyon dengesi açısından optimum performans vermiştir. Bu bulgu, örgü hızının dolaylı olarak hatveyi ve açıyı etkilediğini, dolayısıyla rijitlik–deformasyon dengesini değiştirdiğini ortaya koymaktadır (Ertekin ve diğ, 2022).

Sayısal analizlerde de hatvenin dolaylı olarak etkili olduğu görülmektedir. Cho ve diğ, (2013), örgü tabakaların izotropik modellerle temsil edilmesinin hortum davranışını olduğundan daha rijit gösterdiğini ve büyük deformasyonları yansıtamadığını belirtmiştir. Homojenizasyon tabanlı ortotropik model ise örgü tabakasının yönelime bağlı özelliklerini dikkate almış ve deneysel sonuçlarla yüksek uyum sağlamıştır. Cho ve Yoon (2016), otomotiv fren hortumlarında farklı direksiyon ve süspansiyon hareketlerini simüle eden analizlerde, hortumun uzun ömür deformasyonlarının yalnızca ortotropik modelle doğru temsil edilebildiğini göstermiştir.

Modern üretim yöntemleri de bu parametrelerle ilişkilidir. Schäfer ve Gries (2016), braiding–pultrusion yöntemi ile liflerin hem 0° hem de ±45° açılarda aynı anda

yerleştirilebildiğini ve böylece sertlik ile deformasyon arasında dengeli bir yapı kurulabildiğini ifade etmiştir.

Sonuç olarak, örgü takviyeli kauçuk hortumların performansı yalnızca kullanılan iplik türleriyle değil; aynı zamanda dtex değeri, hatve uzunluğu ve örgü açısının birlikte değerlendirilmesiyle belirlenmektedir. Kısa hatve–büyük açı kombinasyonu hortuma sertlik ve global stabilite kazandırırken, uzun hatve–küçük açı kombinasyonu hortuma esneklik sağlamakta ancak lokal deformasyon eğilimini artırmaktadır. Optimum performans ise orta hatve değerlerinde, yaklaşık 54° örgü açısına karşılık gelen durumda elde edilmektedir. Aramid liflerin uzun dönem dayanıklılığı ve ortotropik modellemelerin sağladığı doğruluk, örgü takviyeli kauçuk hortumların yüksek basınç altında güvenilir ve uzun ömürlü olmasını sağlamaktadır (Bilisik ve diğ, 2015; Xu ve diğ, 2022; Singh ve diğ, 2020; Ertekin ve diğ, 2022; Cho ve diğ, 2013; Cho ve Yoon, 2016).

2.5 Kauçuk Hortumlara Yapılan Testler

EPDM esaslı hortumların endüstriyel uygulamalarda güvenli, dayanıklı ve uzun ömürlü olarak kullanılabilmesi için mekanik, reolojik ve çevresel performanslarının sistematik biçimde değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu kapsamda hortumların üretim kalitesi ve servis ömrünü belirlemek amacıyla çeşitli standart testler uygulanmaktadır.

İlk aşamada, reometre ve Mooney viskozite testleri gerçekleştirilmiştir. Reometre testi, belirli sıcaklık ve frekans değerlerinde uygulanan tork değişimlerini ölçerek kauçuğun vulkanizasyon davranışı, çapraz bağ yoğunluğu ve optimum kürlenme süresi hakkında bilgi sağlar. Mooney viskozite ölçümleri ise elastomerin işlenebilirliği, akış davranışı ve viskoelastik özelliklerinin kısa süreli yanıtını belirlemek için kullanılır. Bu testler, kauçuk hamurunun üretim sürecine uygunluğunu ve vulkanizasyon parametrelerinin doğruluğunu kontrol etmede kritik öneme sahiptir (Dick, 2009; Singh ve diğ, 2025).

Mekanik performans değerlendirmeleri kapsamında sertlik (Shore A), çekme mukavemeti ve uzama testleri uygulanmaktadır. Sertlik testleri hortum malzemesinin rijitlik derecesini belirlerken, çekme ve uzama testleri elastomerin maksimum dayanım, süneklik ve elastikiyet özelliklerini ortaya koyar. Bu testler, hortumun statik

ve dinamik yükler altındaki davranışını analiz etmek, malzeme seçimi ve üretim parametreleri için yönlendirici veri sağlamak açısından önemlidir (Zhao ve diğ., 2023).

Çevresel etkiler karşısındaki dayanımın belirlenmesi amacıyla ozon dayanımı testi gerçekleştirilmiştir. Bu test, hortumların atmosferik ozon etkisi altında çatlama, yüzey bozulması ve yaşlanmaya karşı direncini değerlendirmektedir. Ayrıca kalıcı deformasyon (sıkıştırma seti) testleri, hortum malzemesinin uzun süreli basınç veya sıkıştırma altında şekil değişimine karşı direncini ve deformasyonu geri kazanma kapasitesini ölçmektedir (Hannifin, 2007).

Hortumların gerçek servis koşullarını simüle etmek amacıyla çap genişleme ve patlatma testleri uygulanmıştır. Bu testlerde farklı dtex ve hatve kombinasyonlarına sahip aramid takviyeli hortum numuneleri, iç basınç altında genişletilerek maksimum dayanım sınırları belirlenmiştir. Patlatma testi, hortumun iç basınca karşı gösterdiği kritik dayanım noktasını ortaya koyarken, çap genişleme testi deformasyon eğilimini ve boyutsal stabiliteyi değerlendirmektedir.

Son aşamada, testi başarıyla geçen numuneler uzun ömür testine tabi tutulmuştur. Bu testlerde hortumlar, belirli çevrim sayıları boyunca tekrarlayan basınç ve deformasyon koşulları altında çalıştırılarak performans kaybı, kat yapışma mukavemeti azalması veya işlevsellik bozulması gibi parametreler gözlenmiştir.

Uygulanan bu test dizisi, hortumların üretim kalitesini doğrulamak, endüstriyel kullanım ömrünü tahmin etmek ve mekanik–çevresel performans ilişkisini bütüncül biçimde değerlendirmek için bilimsel bir temel oluşturmaktadır. Böylece, EPDM esaslı hortumların tasarım optimizasyonu, malzeme seçimi ve kalite kontrol süreçleri için güvenilir ve standartlaştırılmış bir değerlendirme yaklaşımı geliştirilmiştir.

2.6 Polimerlerin Endüstriyel Uygulama Alanları

Bu bölümde, önceki bölümlerde tanımlanan polimer türlerinin endüstriyel ölçekte hangi alanlarda değerlendirildiği özetlenmiştir. Polimer malzemeler, sahip oldukları kimyasal çeşitlilik ve özelleştirilebilir fiziksel-mekanik özellikler sayesinde oldukça geniş bir yelpazede endüstriyel uygulama alanı bulmaktadır. Kullanıldıkları alanlar, polimerin yapısal türüne ve işlem görme şekline bağlı olarak değişkenlik göstermektedir (Billmeyer, 1984; Sperling, 2006).

Termoplastik polimerler, özellikle ambalaj sektöründe, tüketim ürünlerinde ve otomotiv bileşenlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. PE, PP ve PS gibi polimerler; düşük yoğunluk, esneklik ve üretim kolaylığı gibi özellikleri nedeniyle geniş kullanım alanı bulmaktadır. Termoset polimerler ise elektrik yalıtımı ve yapı malzemeleri gibi yüksek sıcaklığa dayanım ve boyutsal kararlılık gerektiren uygulamalarda tercih edilmektedir. Bu grupta yer alan epoksi ve fenolik reçineler, özellikle elektronik ve inşaat sektörlerinde yoğun şekilde kullanılmaktadır (Kausar, 2018).

Elastomerler, özellikle otomotiv endüstrisinde conta, hortum ve lastik uygulamalarında kritik rol oynamaktadır. Sentetik kauçuklar, yüksek elastikiyet ve kimyasal dayanım gibi özellikleri sayesinde bu alandaki işlevselliği artırmaktadır. Polimer esaslı lifler, tekstil ve kompozit uygulamalarında geniş yer tutmaktadır. Özellikle karbon fiber takviyeli polimerler, hafiflik ve yüksek mukavemet gibi avantajları sayesinde havacılık ve otomotiv gibi yüksek performans gerektiren sektörlerde stratejik öneme sahiptir. Polimer bazlı kaplama ve boya sistemleri de hem koruyucu hem de estetik amaçlarla kullanılmaktadır. Akrilik ve poliüretan esaslı kaplamalar, yüzeylerin korozyon ve çevresel etkenlere karşı korunmasında etkin çözümler sunmaktadır. Sonuç baz alındığında, polimer teknolojisinin sağladığı bu geniş uygulama alanı, malzeme mühendisliği, üretim teknolojileri ve sürdürülebilir endüstriyel çözümler açısından stratejik öneme sahiptir (Gebrehiwet ve diğ, 2023).

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Tez çalışması kapsamında, EPDM esaslı hortumların üretim süreçleri ve performans değerlendirmelerine yönelik deneysel çalışmalar yürütülmüştür. Çalışma üç temel aşamadan oluşmaktadır.

İlk aşamada, üretim sürecine geçilmeden önce EPDM kauçuk bileşiğine karakterizasyon testleri uygulanmıştır. Bu testler, bileşiğin mekanik, reolojik ve çevresel direnç özelliklerini belirlemek ve üretimde kullanılacak karışımın kalite ve uygunluğunu doğrulamak amacıyla yapılmıştır.

İkinci aşamada, farklı dtex ve hatve kombinasyonlarına sahip aramid ipliklerle takviye edilen hortum numuneleri üretilmiştir. Üretim süreci ekstrüzyon ve otoklav aşamalarından oluşmaktadır. Ekstrüzyon sonrası numunelerin boyutsal ölçümleri kumpas yardımıyla kontrol edilmiş, ardından otoklav işleminde 9 bar basınç altında 25 dakika vulkanizasyona tabi tutulmuştur. Bu aşamada kullanılan aramid iplikler, hortumların iç basınca karşı boyutsal stabilitesini artırmak amacıyla tercih edilmiştir. Bu çalışmada örgü hatvesi parametresi olarak 2.9, 3.3 ve 4.0 mm değerleri seçilmiştir. Literatürde örgü açısının hortum performansı üzerindeki etkilerine dair çok sayıda çalışma bulunmasına karşın, hatve parametresi doğrudan incelenmemiştir. Hatve ile örgü açısı arasında matematiksel bir ilişki bulunmakta olup, seçilen hatve değerleri ilgili hortum çapı ve taşıyıcı sayısı dikkate alındığında literatürde önerilen açı aralığına karşılık gelmektedir. Böylece düşük, orta ve yüksek yoğunluklu örgü yapıları temsil eden bu üç değer kullanılarak aramid takviyesinin hortum performansına etkileri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

Üçüncü aşamada, üretilen hortum numuneleri performanslarını belirlemek üzere çeşitli testlere tabi tutulmuştur. Bu kapsamda, kat yapışma testi hortumun katmanları arasındaki bağ dayanımını ortaya koymak için uygulanmış; çap genişleme ve patlatma testleri hortumların maksimum basınca karşı dayanım kapasitelerini belirlemiştir. Uzun ömür testleri ile numuneler belirli çevresel koşullarda yaşlandırılmış, ardından tekrar çap genişleme ve patlatma testleri yapılarak hortumların uzun vadeli performansları değerlendirilmiştir.

3.1 Malzemeler

Deneysel çalışmalarda kullanılan elastomerik malzeme, kurum bünyesinde laboratuvar ortamında hazırlanmış olan EPDM esaslı kauçuk bileşiğidir. Hortum takviyesi için kullanılan aramid esaslı iplikler Nomex® firmasından tedarik edilmiştir. Deneylerde kullanılan ipliklerin dtex değerleri 930, 1100 ve 1680 olarak seçilmiş, her iplik tipi 2.9, 3.3 ve 4.0 hatve değerleriyle kombine edilmiştir. Her kombinasyondan iki adet numune hazırlanmış, toplamda altı farklı hortum numunesi üretilmiştir. Çalışmada kullanılan hortumlar 18 mm iç çapa ve 3.5 mm et kalınlığına sahip olacak şekilde üretilmiştir.

3.2 Hamur Hazırlama

EPDM esaslı kauçuk bileşikleri, laboratuvar tipi iki silindirli açık yoğurucu kullanılarak hazırlanmıştır. Hamur hazırlama süreci, üretilecek hortum numunelerinin homojenliğini ve mekanik performansını doğrudan etkilediğinden titizlikle yürütülmüştür. Karışıma başlamadan önce katkı malzemeleri tartılmış ve belirlenen ekleme sırasına göre düzenlenmiştir. İlk aşamada baz polimer olan EPDM beslenmiş, ardından çinko oksit ve stearik asit ilave edilmiştir. Bu katkılar, vulkanizasyon sürecinde etkinliğin artırılması ve kauçuk bileşiğinin işlenebilirliğinin geliştirilmesi amacıyla eklenmiştir. Daha sonra karbon siyahı ve dolgu malzemeleri kademeli olarak ilave edilmiş, homojen bir dağılım elde edilene kadar yoğurma işlemine devam edilmiştir. Karışımın homojenliği sağlandıktan sonra antioksidanlar ve işlem yardımcıları sisteme dahil edilmiştir. Vulkanizasyon sistemini oluşturan sülfür ve hızlandırıcılar en son aşamada eklenmiş, böylece erken kürlenmenin önüne geçilmiştir. Karışım sırasında silindir sıcaklığı 50–60 °C aralığında tutulmuş, silindir açıklığı belirli aralıklarla ayarlanarak karışımın etkin biçimde yoğrulması sağlanmıştır. Ortalama 15 dakika süren yoğurma işlemi sonunda hamur levha haline getirilmiş, soğutulmuş ve vulkanizasyon aşamasına kadar dinlendirilmiştir. Bu hazırlık süreci, hortum üretiminde kullanılacak bileşiğin hem reolojik açıdan kararlı hem de mekanik açıdan homojen olmasını sağlamış, sonraki üretim aşamalarının güvenilirliğini artırmıştır.

3.3 Karışımın Reolojik Özelliklerinin Tayini

3.3.1 Reometre testi

Reometre testleri, ASTM D6049 standardına uygun olarak Alpha Technologies MDR 2000 cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Testlerde kauçuk numuneler 175 °C sabit sıcaklık altında, pozitif basınç ve çift konik diski içeren test boşluğuna yerleştirilmiş; diskler 1,7 ± 0,1 Hz frekansında salınım yapmaya başlamıştır. Kauçuğun katılığına bağlı olarak salınım için gerekli tork zamanın fonksiyonu olarak kaydedilmiş ve tork bir denge veya maksimum değere ulaştığında tamamlanmış bir eğri elde edilmiştir. Bu eğriden elde edilen parametreler şunlardır: Minimum Tork (ML), vulkanize olmamış numunenin torku; Maksimum Tork, tam vulkanize olmuş numunenin maksimum torku; Maksimum Tork Farkı (ΔM), çapraz bağ yoğunluğunu gösterir ve t90, numunenin %90 kürlendiği süreyi ifade eder. Elde edilen veriler, vulkanizasyon süresi, test sıcaklığı ve kauçuk özelliklerinin değerlendirilmesinde kullanılmıştır.

3.3.2 Mooney viskozite

Mooney viskozimetre testi, ASTM D1646 standardına uygun olarak Alpha Technologies Mooney MV2000 cihazı (Şekil 3.1) ile gerçekleştirilmiştir. Test için kauçuk hamurlar, 6–8 mm kalınlığında ve yaklaşık 45 mm çapında dairesel diskler hâlinde hazırlanmış; numunenin merkezine rotor milinin geçebilmesi için gerekli delik açılmıştır. Numuneler test öncesinde laboratuvar ortamında belirli bir süre kondisyona bırakılmıştır. Hazırlanan diskler Mooney viskozimetre haznesine yerleştirilmiş, rotor sabit hızda (2 rpm) döndürülerek ve 100 °C sabit sıcaklık sağlanarak tork değerleri zamanın fonksiyonu olarak kaydedilmiştir. Test sırasında rotorun ani durdurulmasıyla elde edilen gerilme gevşemesi incelenmiş ve kauçuğun viskoelastik özellikleri değerlendirilmiştir. Ölçüm süreci 1 dakika ön ısıtma ve 4 dakika ölçüm süresi şeklinde uygulanmış, ML (1+4) değeri referans alınmıştır.



Şekil 3.1: Vizkozimetre cihazı

3.4 Kauçuk Hortumların Hazırlanması

3.4.1 Ekstrüzyon ve otoklav prosesi

Üretim süreci üç ana aşamada yapılandırılmıştır. İlk aşamada, laboratuvar ortamında formülasyonu oluşturulan EPDM esaslı kauçuk hamur, ekstrüzyon hattında işlenmiştir. Ekstrüzyon sürecinde kullanılan iplik malzemeleri Nomex® firmasından temin edilen aramid iplikler olup, bu iplikler hortumun alt ve üst katmanları arasına yerleştirilmiştir. Çalışmada üç farklı kombinasyon kullanılarak numune üretimi gerçekleştirilmiştir: (1) 930 dtex Aramid iplik ve 2.9 mm hatve, (2) 1100 dtex Aramid iplik ve 3.3 mm hatve ve (3) 1680 dtex Aramid iplik ve 4.0 mm hatve dir. Bu kombinasyonlarla üretilen hortumlar henüz vulkanize edilmemiş formda olup, literatürde "eboş" olarak adlandırılan yarı mamul yapıdadır. Hatve değerleri, her bir ipliğin mekanik sınırlamaları ve işlem kabiliyetine göre belirlenmiştir. Hortum üretiminde kullanılan aramid ipliklerin dtex ve hatve değerleri, örgü yapısının yoğunluğunu ve mekanik özelliklerini belirleyen temel parametrelerdir. Dtex, ipliğin kütlesel inceliğini ifade etmekte olup düşük dtex değerleri daha ince ve esnek, yüksek dtex değerleri ise daha kalın ve dayanıklı iplik yapısını temsil etmektedir. Hatve ise örgü sıklığını tanımlamakta; düşük hatve değerleri daha sıkı örgü yapısı ile hortumun rijitliğini artırırken, yüksek hatve değerleri daha gevşek örgü yapısı ile hortumun esnekliğini artırmaktadır.

Literatürde örgü yapıları genellikle örgü açısı (θ) üzerinden tanımlanmakta olup, hatve değeri ile açı arasında matematiksel bir ilişki bulunmaktadır, Denklem 2.1'de gösterilmiştir (Singh ve diğ. 2020).

$$\tan(\theta) = \frac{\pi . D}{P . N} \tag{2.1}$$

Burada θ örgü açısını, D, hortum çapını, P hatve değerini ve N taşıyıcı (carrier) sayısını ifade etmektedir.

Bu çalışmada kullanılan 2.9, 3.3 ve 4.0 mm hatve değerleri, 18 mm hortum çapı ve tipik bir taşıyıcı sayısı (N = 24) dikkate alındığında sırasıyla yaklaşık 39,2°, 35,5° ve 30,5° örgü açılarına karşılık gelmektedir. Bu açı değerleri, literatürde kritik aralık olarak tanımlanan 30°–55° bandı içerisinde yer almakta olup, seçilen parametrelerin hortumun rijitlik, esneklik ve basınca karşı dayanım davranışlarını temsil etmesi açısından anlamlıdır.



Şekil 3.2: Ekstrüzyon makinesi.

İkinci aşamada, ekstrüzyondan elde edilen eboş hortumların yüzeyleri dikkatlice sıyrılmış ve her bir numunenin boyutsal doğruluğu kumpas yardımıyla ölçülerek kontrol edilmiştir. Ölçüm sonuçları uygun bulunan numuneler otoklavlama işlemine geçilmeden önce metal maçalar üzerine dikkatlice yerleştirilmiştir. Otoklavlama işlemi 9 bar basınç altında ve 25 dakika süreyle gerçekleştirilmiş; bu sırada hortum iç yüzeylerinin zarar görmesini önlemek amacıyla yağlayıcı madde kullanılmıştır. Maçalama işlemi sırasında aramid ipliklerin yüksek mukavemeti nedeniyle

oluşabilecek yerleştirme zorlukları dikkate alınarak uygun yöntemler kullanılmıştır. Bu aşamalar sonucunda elde edilen vulkanize hortum numuneleri, ileri test prosedürlerine geçmeden önce görsel ve fiziksel olarak tekrar gözlemlenmiş ve kalite kontrolleri sağlanmıştır. Aşağıda Şekil 3.3 otoklav ve maçaların görüntüsü gösterilmektedir.



Şekil 3.3: Otoklav prosesinde hortum örneği.

Otoklavdan çıkan vulkanize hortum numuneleri, ilk olarak kat yapışma testine tabi tutulmuştur. Bu test, hortumun iç ve dış katmanları arasındaki yapışma kalitesini değerlendirmek amacıyla uygulanmıştır.

3.5 Vulkanizasyon Sonrası Uygulanan Testler

3.5.1 Morfolojik analizler

Aramid iplik takviyeli EPDM hortum numunelerinin morfolojik özellikleri, SEM ile incelenmiştir. Numuneler sıvı azot ortamında kırılarak gevrek yüzey elde edilmiş. SEM görüntüleri, Zeiss Gemini 300 cihazı kullanılarak alınmış; aramid liflerin matris içindeki dağılımı, ara yüzey bütünlüğü ve boşluklar değerlendirilmiştir.

3.5.2 Sertlik testi

Sertlik, elastomer malzemelerin rijitlik düzeyini belirlemek amacıyla yapılan temel mekanik testlerden biridir. Testler, ASTM D2240 standardına uygun olarak Shore A skalası ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.4: Sertlik ölçüm cihazı.

Numuneler 23±2 °C sıcaklıkta, sabit kuvvetle uygulanan batma iğnesi aracılığıyla test edilmiştir. Her numune için üç ayrı ölçüm yapılmış ve ortalama değerler alınmıştır. Deneyde Zwick/Roell sehpalı mikro IRHD kullanılmıştır ve Şekil 3.4'te gösterilmiştir.

3.5.3 Çekme mukavemeti ve uzama testi

Çekme deneyi ile; malzemelerin statik yük altındaki elastik ve plastik davranışları, rijitliği, sünekliği, mukavemeti gibi mekanik davranışları belirlenerek, malzeme sınıflandırılması ve seçimi gerçekleştirilir. Elastomer malzemelerin maksimum çekme dayanımını belirlemek için ASTM D412 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Numuneler "papyon" tipi kalıplarla hazırlanmış, Şekil 3.5'te gösterilmiştir.



Şekil 3.5: Papyon tipi kesme kalıbı.

Deney düzeneği; birbirine göre aşağı ve yukarı yönde hareket edebilen, deney numunesinin sabitlendiği iki çene ile bu çenelere hareket veya kuvvet uygulayan ve ilgili büyüklükleri ölçen ünitelerden oluşmaktadır. Çenelerden biri sabit hızda hareket ettirilerek deney numunesine değişken oranlarda çekme kuvveti uygulanmakta ve bu kuvvetlere karşılık gelen uzama değerleri kaydedilmektedir. Testler 23±2 °C sıcaklıkta ve 500 mm/dk hızda yapılmıştır. Testlerde, çekme cihazı olarak Testform Tensometre cihazı kullanılmıştır.



Şekil 3.6: Tensometre test cihazı.

Ayrıca, elastomer malzemelerin %100 uzama seviyesindeki gerilme tepkisini değerlendirmek amacıyla %100 uzama modülü ölçümü yapılmıştır. Bu test de ASTM D412 standardına uygun şekilde gerçekleştirilmiş ve aynı test cihazında uygulanmıştır.

3.5.4 Ozon dayanım testi

Ozon dayanımı testi, elastomerlerin atmosferdeki ozon gazına karşı çatlama direncini belirlemek amacıyla yapılmaktadır. Bu test FLTMBP101-01 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiş olup; 38 °C sıcaklık, 50 ppm ozon konsantrasyonu ve %20 uzama koşullarında 70 saat uygulanmıştır ve çatlak oluşumu gözlenmemiştir.

3.5.5 Kalıcı deformasyon testi

Kalıcı deformasyon testi, FLTM BP 108-06 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan numuneler %25 oranında sıkıştırılarak kalıcı deformasyon aparatına yerleştirilmiş ve aparat 70 °C sıcaklıktaki etüve konulmuştur. Numuneler 70 saat boyunca bu koşullarda bekletilmiş, ardından etüvden çıkarılarak vidalar gevşetilmiş ve diskler laboratuvar ortamında 30 dakika bekletilerek kararlı hale getirilmiştir. Son olarak, numunelerin kalınlıkları ölçülmüş ve deformasyon kalıcılığı hesaplanmıştır.

3.5.6 Çap Genişleme ve patlatma testleri

Bu çalışmada hortumların mekanik performanslarını değerlendirmek amacıyla, üç farklı iplik yapısına sahip numuneler üzerinde çap genişleme, patlatma ve akabinde uzun ömür testleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.7’ de çap genişleme ve patlatma cihazı gösterilmektedir.



Şekil 3.7: Çap genişleme ve patlatma test cihazı.

Uygulanan testler için kabul kriterleri aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır. Maksimum izin verilen çap genişlemesi, minimum %10. Minimum kabul edilen patlatma basıncı ise maksimum 12 bar olarak kabul edilir. Numuneler, ipliklerin dtex değerleri ve hatve mesafelerine göre üç gruba ayrılmıştır.

Çizelge 3.1: Hortum numunelerinin dtex ve hatve mesafeleri.

Grup	İplik dtex değeri	Hatve değeri (mm)
1	930	2.9
2	1100	3.3
3	1680	4.0

Tüm gruplar için aynı test koşulları uygulanmıştır. Aşağıda her bir test adımı özetlenmiştir. Numune 1, 2, 3 için Çizelge 3.2 çap genişleme ve patlatma testi parametreleri aynı olup aşağıda gösterilmiştir.

Çap genişleme ve patlatma test bilgileri hortum iç çap, iplik tipi, firmada yapılan çalışmada şartname gereklilikleri ve hamur cinsi aynı olup dtex ve hatve değerleri farklıdır. Çizelge 3.1'de gösterilmektedir.

Çizelge 3.2: Çap genişleme ve patlatma testi için parametreler.

Test parametreleri	
Basınç (bar)	2.5
Zamanlamaya Göre Basınç (sn)	10
Bekleme Zamanı (sn)	60

Test öncesinde her numunenin düz kısmı ip yardımıyla ölçülerek başlangıç çapı kaydedilmiştir. Hortumlara 2.5 bar basınç uygulanarak 60 saniyelik test süreci başlatılmıştır. Basınç; 0.2 bar'dan başlayarak her 10 saniyede bir artırılmış ve toplamda 2.6 bar seviyesine kadar çıkılmıştır. Basınç uygulanırken taşıyıcı sıvı olarak antifriz kullanılmış, antifriz sıcaklığı 25 °C, test kabini sıcaklığı ise 22,8 °C olarak sabitlenmiştir. Testin sonunda hortum çapı yeniden ölçülmüş, başlangıç ve bitiş değerleri arasındaki fark yüzdesel olarak hesaplanmıştır. Eğer bu fark %10'un altında kalmışsa numune kabul edilmiştir. Çap genişleme testini başarıyla geçen numuneler için patlatma testi uygulanmıştır. Test kabini kapatılarak hortumların hava alma işlemi gerçekleştirilmiş, ardından her 10 saniyede bir basınç artırılmıştır. Test, hortumların patlama noktasına ulaşmasına kadar devam etmiş ve elde edilen maksimum basınç değeri kaydedilmiştir.

Çizelge 3.3: Çap genişleme ve patlatma testi için kullanılan numune yapıları.

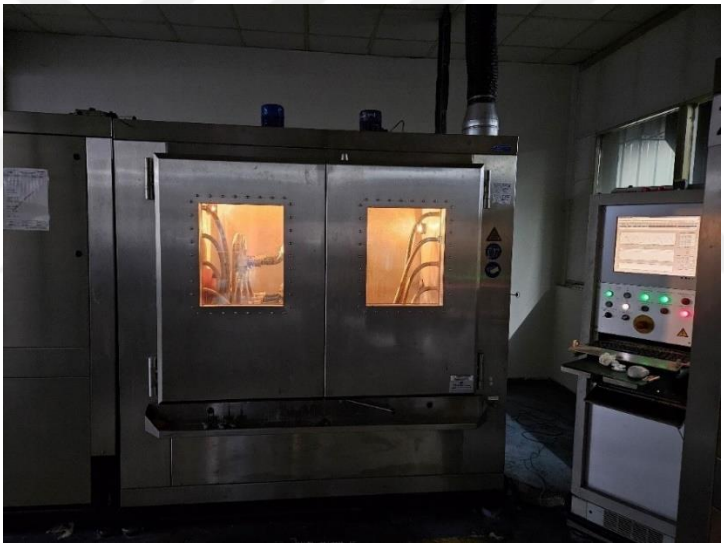
Çap genişleme ve patlatma test bilgileri			
Hamur Cinsi	EPDM	EPDM	EPDM

Çizelge 3.3 (devamı): Çap genişleme ve patlatma testi için kullanılan numune yapıları.

Çap genişleme ve patlatma test bilgileri			
İplik Dtex	930 Dtex	1100 Dtex	1680 Dtex
İplik Hatve	2.9 mm	3.3 mm	4 mm
Hortum Çap	18 mm	18 mm	18 mm
Hortum Et Kalınlığı	3.5 mm	3.5 mm	3.5 mm

3.5.7 Uzun ömür testi

Patlatma testini geçen numuneler, 10 gün süresince döngü bazlı uzun ömür testine tabi tutulmuştur. Bu süreç boyunca numunelerin belirlenen çevrim sayılarına ulaşması sağlanmış ve test süresince herhangi bir deformasyon veya işlev kaybı gözlemlenip kayıt altına alınmıştır. Test cihazının görseli Şekil 3.8' de gösterilmiştir.



Şekil 3.8: Uzun ömür test cihazı.

Uzun ömür cihazına çap genişleme ve patlatma testinde başarılı çıkan ürünler bağlanmıştır. Bu cihaz sinüs adı verilen test ile ölçüm sağlanmaktadır. Cihaz mekanizması gereği yaşlandırma testine tabi tutulurken içerisinden antifiriz geçmektedir. 6 adet numune ile 250000 döngü çalışmaktadır, yaklaşık 10 gün sürmektedir. Test başarılı bir şekilde bittikten sonra hortum ömrü neredeyse 10 sene yaşlanmış olarak kabul edilmektedir ve yaşlandırma değerlerini ölçmek için tekrardan çap genişleme ve patlatma testine tabi tutulmuştur. Uzun ömür testinden geçen numuneler tekrar çap genişleme ve patlatma testlerine tabi tutulur. Bunun sebebi, 10 günlük döngü sonucunda ne kadar yaşlandığını tespit edip farklılıkları analiz edilir

ardından farklı gruplar arasındaki konstrüksiyon değişiklikleri ile değerlendirilir. Yaşlandırma testinde uygun çıkan numuneler ile yaşlanma performansları karşılaştırılır. Elde edilen veriler, gruplar arasındaki performans farklılıklarını belirlemek ve üretim süreçlerini optimize etmek için kullanılmaktadır.

4. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

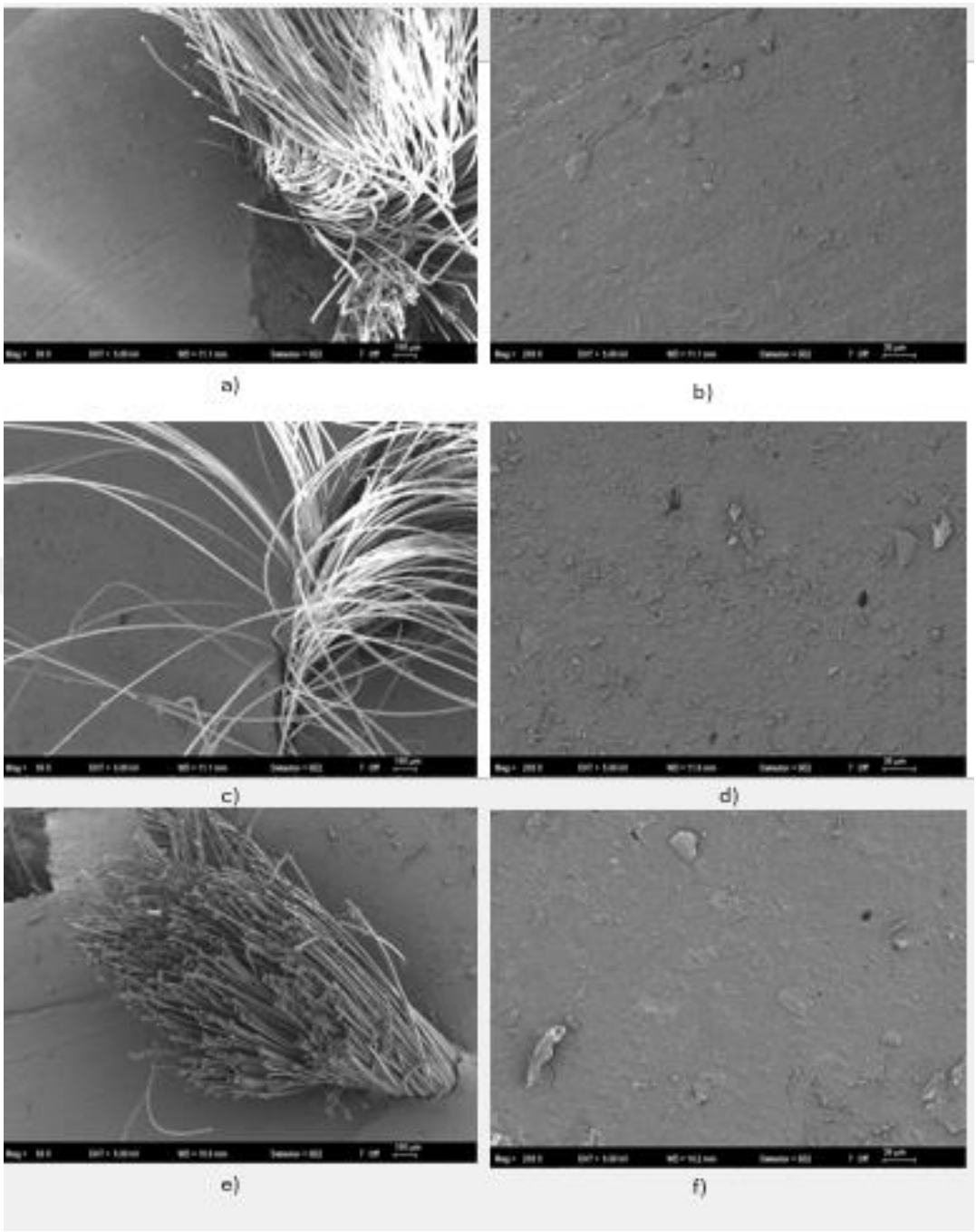
Bu bölümde, gerçekleştirilen deneysel çalışmalar kapsamında hortum numuneleri üzerinde uygulanan kat yapışma, çap genişleme, patlatma ve uzun ömür testlerinden elde edilen veriler sunulmuş ve bulgular doğrultusunda bilimsel değerlendirmeler yapılmıştır. Numuneler, farklı iplik dtex ve hatve değerlerine göre gruplandırılmış, her grup ekstrüzyon yöntemiyle üretilmiş ve otoklav ortamında kürleme işlemine tabi tutulmuştur. Üretim süreci sonrasında elde edilen hortumlar, belirli mekanik testlerden geçirilmiştir. İlk olarak, hortum katmanları arasındaki bağ dayanımını değerlendirmek amacıyla kat yapışma testleri gerçekleştirilmiştir. 2.5 N'nin üzerinde yapışma kuvveti gösteren numuneler, sonraki test aşamalarına alınmıştır. İkinci aşamada, uygun bulunan numunelere çap genişleme testleri uygulanmış; iç basınca maruz bırakılan hortumların deformasyon davranışları değerlendirilmiş ve çap artışı %10'un altında olan numuneler kabul edilmiştir. Takip eden aşamada, çap genişleme testini geçen numunelere yönelik patlatma testleri gerçekleştirilmiştir. Bu testler sonucunda, minimum 12 bar basınca dayanabilen hortumlar bir sonraki test aşamasına geçmiştir. Son olarak, tüm kriterleri karşılayan numuneler, 250.000 döngü bazlı uzun ömür testine tabi tutulmuştur. Bu süreçte hortumların yapısal bütünlüğü ve işlevselliği gözlemlenmiş, olası bozulmalar analiz edilmiş elde edilen bulgular üzerinde tartışmalar sağlanmıştır.

4.1 Hamur Hazırlama ve Otoklav Sonra Yapılan Malzeme Testleri

4.1.1 Morfolojik analizler

Şekil 4.1'de 930 dtex - 2.9 mm hatve, 1100 dtex - 3.3 hatve, 1680 dtex - 4 hatve numunelerinin SEM görüntüleri verilmiştir. 930 dtex – 2.9 mm, 1100 dtex – 3.3 mm ve 1680 dtex – 4 mm hatveye sahip aramid iplik takviyeli EPDM numunelerin SEM görüntüleri ve mekanik test sonuçları birlikte değerlendirildiğinde, mikroyapı ve makro mekanik performans arasında belirgin bir ilişki görülmektedir. 930 dtex – 2.9 mm numunesinde liflerin yoğun ve sıkı bir dağılım gösterdiği, matris–lif ara yüzeyinde boşluk veya ayrışma bulunmadığı tespit edilmiştir. Bu yapı, yük aktarımının etkin

olmasını sağlamış ve gerilme dayanımının en yüksek değere (7.995 MPa) ulaşmasına neden olmuştur. Daha düşük hatveye bağlı olarak liflerin dalgalanma miktarı azalmış, bu da liflerin çekme yönünde daha verimli yük taşımasına katkıda bulunmuştur. 1100 dtex – 3.3 mm numunesinde ise liflerin homojen dağılım göstermesine rağmen bazı bölgelerde mikroboşluklar ve zayıf ıslanma izleri gözlenmiştir. Bu durum, ara yüz dayanımını azaltarak çatlak başlangıcına neden olmuş ve gerilme dayanımının 7.018 MPa ile en düşük seviyede kalmasına yol açmıştır. Liflerin çekilme eğilimi ve yerel boşluklar, yük aktarımını sınırlandırarak mekanik performansı düşürmüştür. 1680 dtex – 4 mm numunesinde liflerin daha kalın olması nedeniyle matris ile ara yüzey temasının azaldığı, bazı bölgelerde ayrışma ve boşlukların oluştuğu belirlenmiştir. Bu zayıf bağlanma, mekanik dayanımı sınırlamış olsa da liflerin yüksek lineer yoğunluğu taşıyıcı katkı sağlamış ve gerilme dayanımı orta seviyede (7.486 MPa) gerçekleşmiştir. Genel olarak hatve arttıkça liflerin matris içerisindeki yerleşim düzeni gevşemekte, dtex arttıkça lif kalınlığı nedeniyle ıslanabilirlik ve yapışma azalmaktadır. Bu nedenle ara yüz kalitesi mekanik performans üzerinde belirleyici bir etken olarak öne çıkmaktadır. 930 dtex – 2.9 mm kombinasyonu, kompakt lif yerleşimi ve güçlü matris–lif etkileşimi sayesinde en yüksek çekme dayanımını sergilemiştir. 1100 dtex örneğinde gözlenen mikroboşluklar dayanımı düşürürken, 1680 dtex örneğinde lif kalınlığı kısmi bir telafi sağlamıştır. Sonuç olarak, optimum performansın düşük hatve ve orta dtex değerleriyle, yani 930 dtex – 2.9 mm aralığında elde edildiği söylenebilir.



Şekil 4.1: EPDM esaslı kauçuk SEM görüntüleri: (a-b) 930 dtex - 2.9 mm hatve, (c-d) 1100 dtex - 3.3 hatve, (e-f) 1680 dtex - 4 hatve

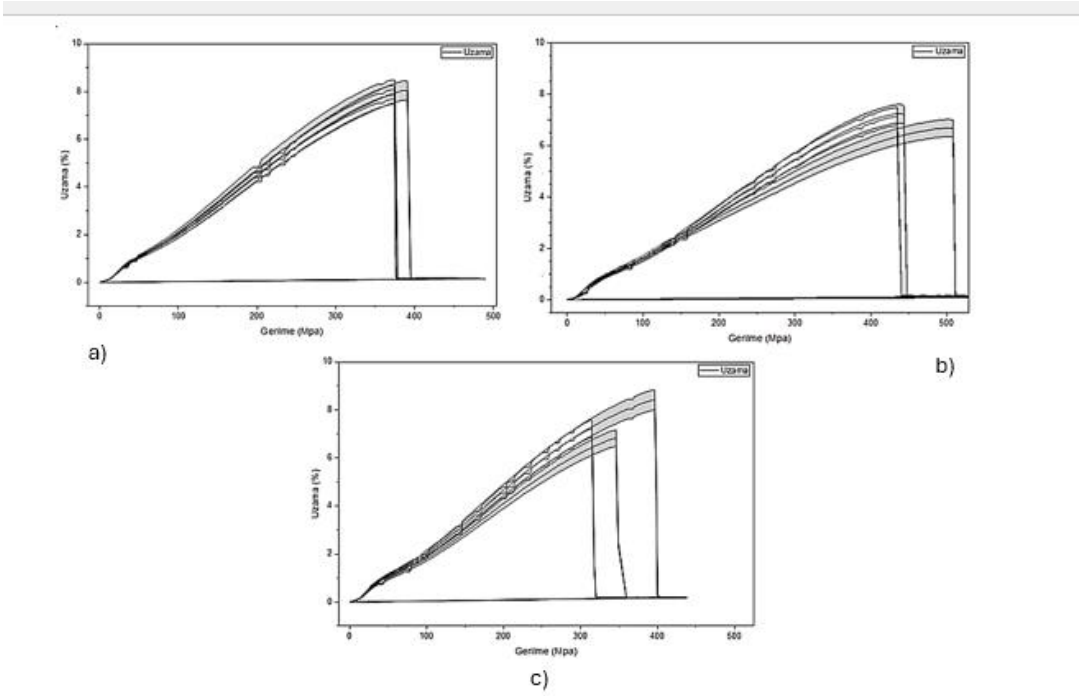
4.1.2 Sertlik testi (Shore A)

Bu çalışma kapsamında EPDM bileşiğinin sertlik ölçümleri, ASTM D2240 standardına uygun Shore A sertlik testi ile gerçekleştirilmiş ve ortalama değer 68 Shore A olarak belirlenmiştir. Sertlik ölçümü, standardın gerekliliklerine uygun şekilde numunenin farklı noktalarından alınan değerlerin ortalamasıyla elde edilmiştir. Kruželák ve diğ. (2022) tarafından bildirilen, peroksit esaslı kürleme sistemiyle

hazırlanan EPDM kompozitlerinde sertlik değerlerinin 65–75 aralığında değiştiği göz önünde bulundurulduğunda, elde edilen değer literatürle tam uyum göstermektedir. Bu sonuç, kullanılan dolgu oranları ve vulkanizasyon koşullarının hortum uygulamaları için optimize edildiğini ortaya koymaktadır. Sertlik değeri, hortumun basınca karşı mekanik dayanımı ile esneklik arasında kritik bir dengeyi temsil etmektedir**.** 68 Shore A**,** hortumun yüksek basınç altında geometrik stabilitesini koruyabilmesi için yeterli sertliği sağlarken, aynı zamanda elastik deformasyon kabiliyetini kaybetmemesini mümkün kılmaktadır. Bu açıdan bakıldığında, elde edilen sertlik değeri EPDM hortumların otomotiv soğutma ve yakıt sistemlerinde güvenilir şekilde kullanılabileceğini göstermektedir.

4.1.3 Çekme mukavemeti ve uzama testi

EPDM hortum numunelerinin farklı dtex değerlerine sahip aramid ipliklerle takviye edilmesi sonucu elde edilen mekanik performans, ASTM D412 standardına uygun çekme testleri ile değerlendirilmiştir. Test sonuçları, numunelerin uzama yüzdeleri, maksimum kuvvet değerleri ve gerilme dayanımları üzerinden karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Şekil 4.2'de ve Çizelge 4.1' de uzama ve gerilme değerleri gösterilmiştir.



Şekil 4.2: 930, 1100 ve 1680 dtex hortumların gerilme uzama grafikleri.

1680 dtex iplik ile üretilen numuneler ortalama %352,23 uzama göstermiştir. Maksimum kuvvet 135 N civarında gerçekleşirken, ortalama gerilme değeri 7,49 MPa olarak hesaplanmıştır. Standart sapma değerlerinin görece yüksek olması (%Cv ≈ 11,7) bu numunelerde tekrarlanabilirliğin düşük olduğunu ve malzeme içi heterojenliklerin daha belirgin olabileceğini göstermektedir. Ancak en yüksek 8,415 MPa'lık değer, 1680 dtex ipliğin yüksek mukavemete katkı sağladığını kanıtlamaktadır.

Çizelge 4.1: 930,1100 ve 1680 dtex uzama ve gerilme değerleri.

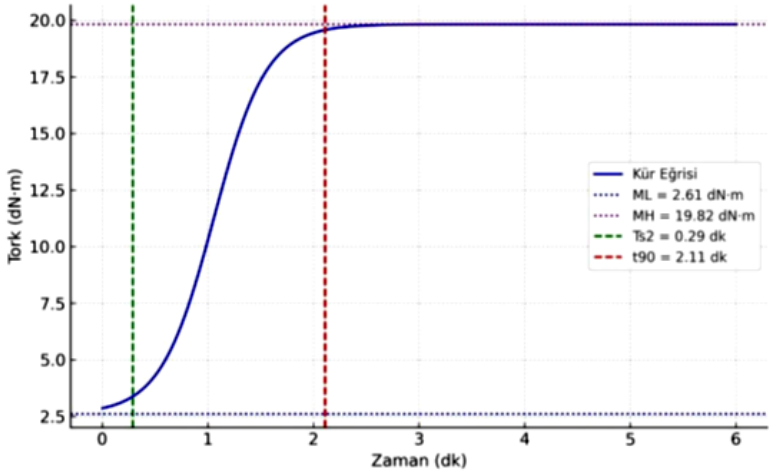
Numune	Uzama (%)	Max. Kuvvet (N)	Gerilme (MPa)
930 dtex	378,25 ± 10,7	155 ± 4	7,995 ± 0,122
1100 dtex	458,56 ± 38.6	138 ± 3	7,018 ± 0,291
1680 dtex	352,23 ± 41.1	135 ± 22	7,486 ± 0,827

930 dtex iplik ile üretilen numunelerde ise ortalama uzama değeri %378,25, maksimum kuvvet 155 N ve ortalama gerilme değeri 7,99 MPa olarak ölçülmüştür. Standart sapma oldukça düşüktür (0,122 MPa). Bu durum, 930 dtex ipliğin daha homojen ve kararlı mekanik performans sunduğunu ortaya koymaktadır. Özellikle gerilme değerlerinin dar bir aralıkta (7,857–8,09 MPa) gerçekleşmesi, bu iplik türünün elastomer matris ile daha uyumlu çalıştığını göstermektedir.

1100 dtex iplik ile üretilen numuneler ortalama %458,56 uzama ile en yüksek deformasyon kabiliyetine sahip olmuştur. Ortalama maksimum kuvvet 138 N olarak belirlenmiş, ortalama gerilme değeri ise 7,02 MPa seviyesinde kalmıştır. Bu numunelerde standart sapma görece yüksektir. Yani, uzama kabiliyeti en yüksek olan grup olmasına rağmen gerilme dayanımı 930 ve 1680 dtex ipliklere göre daha düşüktür. Bu durum, 1100 dtex ipliklerin hortum yapısına esneklik sağlamakla birlikte optimum mukavemeti sınırlı ölçüde desteklediğini ortaya koymaktadır. Genel olarak, 930 dtex iplik ile takviye edilmiş hortumlar, yüksek gerilme dayanımı, düşük varyasyon ve dengeli uzama değerleri sayesinde en kararlı sonuçları vermiştir. 1680 dtex iplik ile takviye edilen hortumlar yüksek mukavemet katkısı sağlarken, standart sapmadaki artış malzeme homojenliğinin sorgulanmasına neden olmuştur. 1100 dtex iplik ile üretilen numuneler ise yüksek uzama kabiliyeti ile esneklik avantajı sağlamış, ancak gerilme dayanımı açısından sınırlı performans göstermiştir.

4.1.4 Reometre testi

Yapılan reometrik analiz sonucunda, EPDM bileşiğinin kürleme davranışını gösteren temel parametreler elde edilmiştir (Şekil 4.3).



Şekil 4.3: Reometre test sonuç grafiği.

ML değeri 2,61 dNm olup, bu değer malzemenin başlangıçtaki viskoelastik özelliklerini yansıtmaktadır. Maksimum tork değeri ise 19,82 dNm olarak ölçülmüş ve kürleme süreci sonunda bileşiğin ulaştığı rijitlik düzeyini göstermiştir. ML ile maksimum tork arasındaki fark, bileşiğin çapraz bağ yoğunluğunun yüksek olduğunu işaret etmektedir. Ön vulkanizasyon süresi 0,29 dakika olarak belirlenmiştir. Bu değer, bileşiğin erken kürleme reaksiyonlarına çok hızlı tepki verdiğini göstermektedir. Optimum vulkanizasyon süresi ise 2,11 dakika olarak ölçülmüştür. Bu kısa süre, malzemenin hızlı bir şekilde kürlenerek üretim açısından avantaj sağladığını göstermektedir. Literatürde EPDM kompozitlerinde t_{90} değerlerinin genellikle 3–8 dakika aralığında raporlandığı belirtilmektedir (Kruželák ve diğ, 2022).

Bu çalışmada elde edilen 2,11 dakikalık vulkanizasyon süresi, sistemin literatüre göre daha hızlı kürlendiğini ortaya koymaktadır. Bu durum, üretim sürecinde zaman kazandırsa da proses parametrelerinin dikkatle kontrol edilmesini gerektirmektedir. Kürleme davranışları, hortumun mekanik özellikleri üzerinde doğrudan etkilidir. Yüksek maksimum tork değeri, kürleme sonrasında daha rijit ve dayanıklı bir yapı sağlamakta; bu da hortumun iç basınç altında şekil stabilitesini artırmaktadır. ML değerinin düşük olması ise bileşiğin işlenebilirliğinin iyi olduğunu göstermekte ve ekstrüzyon sürecinde homojen bir karışım elde edilmesine katkı sunmaktadır. Vulkanizasyon süresi, üretim süresini kısaltarak verimlilik avantajı sağlarken, aynı

zamanda hızlı çapraz bağ oluşumu sayesinde hortumun sertlik ve dayanım değerlerinin istenen seviyelere ulaşmasını kolaylaştırmaktadır. Sonuç olarak, elde edilen reometrik parametreler EPDM hortum bileşiğinin hem üretim süreci hem de nihai mekanik performans açısından uygun özelliklere sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

4.1.5 Mooney Viskozite

Bu çalışma kapsamında EPDM bazlı kauçuk karışımının Mooney viskozitesi 106,5 ML (1+4, 100 °C) olarak ölçülmüştür. Testler, 100 °C'de 1 dakika ön ısıtma ve 4 dakika test süresi koşullarında gerçekleştirilmiştir. Mooney viskozitesi, kauçuk karışımının işlenebilirliği ve zincir hareketliliği hakkında bilgi veren önemli bir parametredir. Elde edilen 106,5 ML değeri, karışımın orta-yüksek viskoziteye sahip olduğunu göstermektedir. Bu durum, bileşiğin ekstrüzyon ve şekillendirme sırasında yeterli akışkanlığa sahip olduğunu**,** ancak aynı zamanda yüksek moleküler ağırlık ve dolgu katkılarının etkisiyle iyi mekanik dayanım sunacağını işaret etmektedir. Liu ve diğ. (2023) tarafından EPDM kauçuk karışımları üzerine yapılan çalışmalarda, farklı formülasyonlarda Mooney viskozite değerlerinin 90–120 ML aralığında değiştiği bildirilmiştir. Bu bağlamda çalışmada elde edilen değer, literatür aralığı ile uyumlu olup, bileşimin hem işlenebilirlik hem de nihai mekanik performans açısından uygun özellikler taşıdığını ortaya koymaktadır.

4.1.6 Kalıcı deformasyon – sıkıştırma set testi

Bu çalışmada gerçekleştirilen sıkıştırma set testleri sonucunda, EPDM bileşiğinin kalıcı deformasyon oranı %72 olarak belirlenmiştir. Bu değer, belirtilen maksimum sınır değeri olan %75'in altında kalmakta ve malzemenin termal stres sonrası elastik geri kazanım kabiliyetinin yeterli olduğunu göstermektedir.

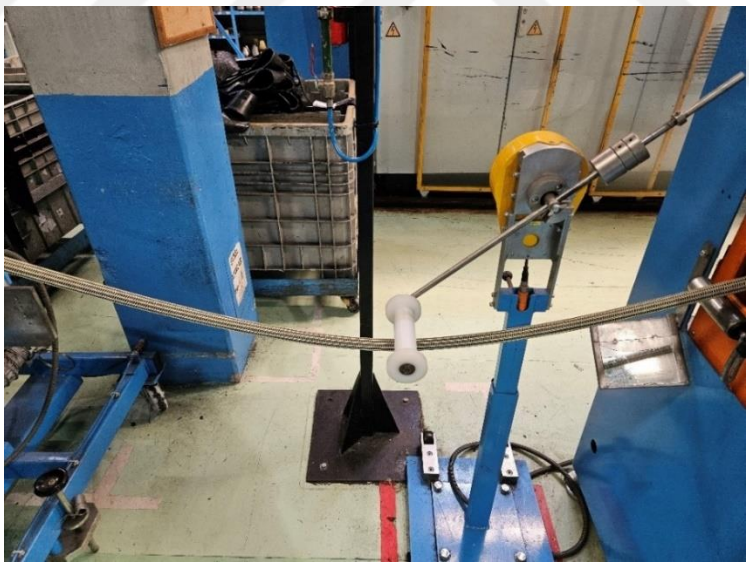
Sıkıştırma set testi, elastomerlerin uzun süreli basınç ve sıcaklık altında şekil koruma yeteneğini değerlendiren kritik bir parametredir. Özellikle statik contalar, bağlantı elemanları ve otomotiv hortum uç bağlantıları gibi sürekli sıkıştırma altında çalışan uygulamalarda düşük sıkıştırma set değerleri, sistemin sızdırmazlık performansı açısından büyük önem taşımaktadır. Elde edilen %72'lik kalıcı deformasyon oranı, malzemenin elastikiyetini belirli ölçüde koruduğunu ve uzun süreli kullanımda kabul edilebilir performans göstereceğini ortaya koymaktadır. Gent ve Mark, (2012) tarafından yapılan çalışmalarda, EPDM bazlı sistemlerde sıkıştırma set değerlerinin genellikle %60–75 aralığında değiştiği bildirilmiştir. Bu açıdan, çalışmada elde edilen

sonuç literatürde raporlanan değerlerle uyumlu olup, bileşiğin uygulama koşulları açısından güvenilir bir performans sunduğunu göstermektedir.

4.2 Ekstrüzyon ve Otoklav Prosesi Analizleri

Yapılan çalışmalarda hortum üretimi için çeşitli yöntemler kullanılmış olmakla birlikte, literatürde ekstrüzyon ve otoklav proseslerini içeren ardışık üretim süreciyle hazırlanmış, aynı iplik farklı dtex ve hatve kombinasyonlarının mekanik özelliklerine etkisini inceleyen kapsamlı bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu tez çalışmasında, iplik takviyeli hortum numuneleri ekstrüzyon yöntemiyle şekillendirilmiş ve ardından 25 dakika boyunca 9 bar basınç altında otoklav ortamında kürleme işlemine tabi tutularak nihai ürün formuna getirilmiştir.

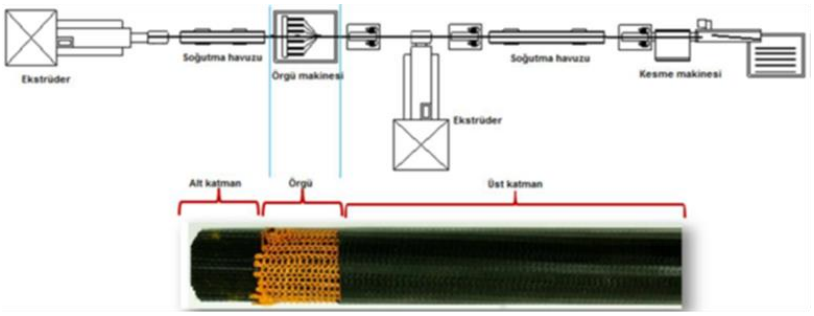
Üretim sürecinde, hortum yapısında istenen hatve değerlerinin sağlanabilmesi amacıyla iplikler hortum yüzeyine düz örgü şekilde sarılmıştır. Bu işlem, ekstrüder çıkışında yer alan döner taşıyıcı sistem ile gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.4'te alt katmanın üzerinde bulunan örgü gösterilmektedir.



Şekil 4.4: Ekstrüzyon makinesinde yarı mamul üzerine çekilen örgü işlemi.

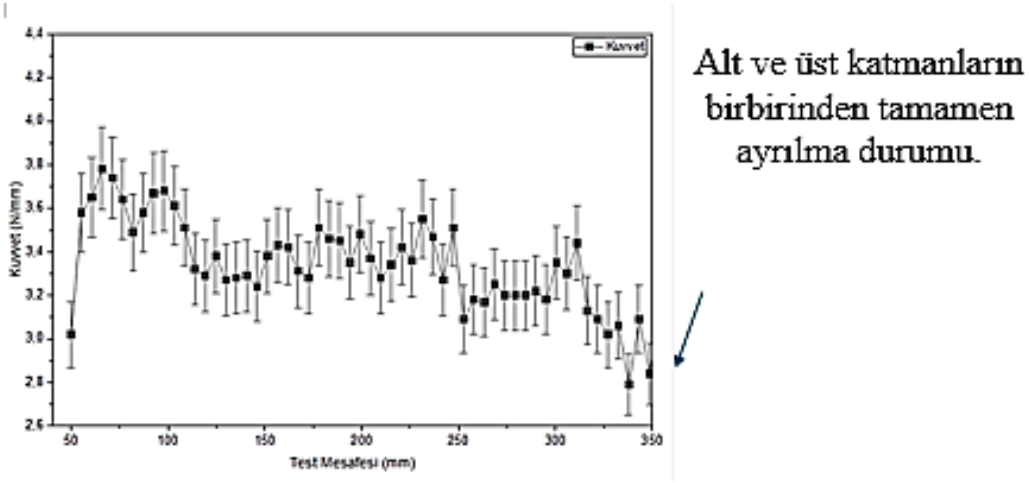
Döner sistemin dönüş hızı ile hortumun ilerleme hızı arasında kurulan oransal ilişki sayesinde hedeflenen hatve mesafeleri elde edilmiştir. Bu doğrultuda; 930 dtex iplik için 2.9 mm, 1100 dtex için 3.3 mm, 1680 dtex için ise 4.0 mm hatve oluşturulmuştur. Düz örgü sarım mekanizması, ipliğin hortum üzerine düzgün ve sabit aralıklarla yerleşmesini sağlayarak hem yapısal bütünlük hem de katmanlar arası mekanik bağın

artırılmasına olanak sağlamıştır. Şekil 4.5'te, ekstrüzyon sırasında hatve oluşumu şematik olarak sunulmuştur.

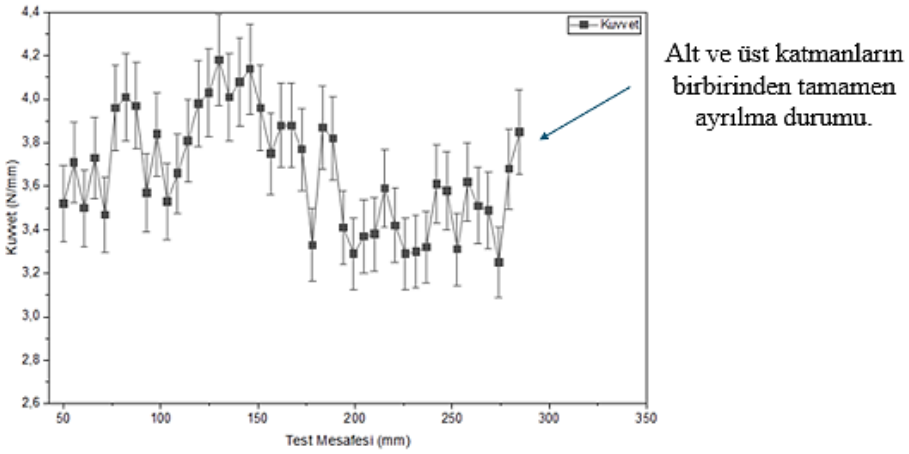


Şekil 4.5: Ekstrüzyon cihazı sonrası elde edilen yarı mamulün örgü katmanı.

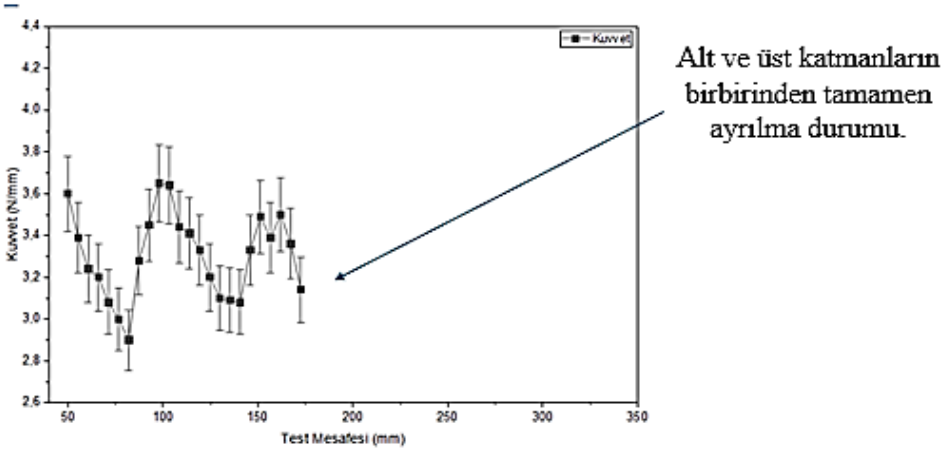
Bu parametrelerle üretilen hortum numuneleri, çok katmanlı yapılarındaki bağ dayanımını değerlendirmek amacıyla kat yapışma testine tabi tutulmuştur. Uygulanan testler sonucunda elde edilen yapışma kuvvetleri, 930 dtex için 3.09 N/mm, 1100 dtex için 3.29 N/mm, 1680 dtex için 2.90 N/mm elde edilmiştir. Elde edilen verilen aşağıda grafik 4.6, 4.7 ve 4.8'de gösterilmektedir.



Şekil 4.6: 930 dtex için kat yapışma kuvveti, test yolu grafiği.



Şekil 4.7: 1100 dtex için kat yapışma kuvveti, test yolu grafiği.



Şekil 4.8: 1680 dtex için kat yapışma kuvveti, test yolu grafiği.

Kat yapışma testinde kabul kriteri olarak, otomotiv endüstrisinde yaygın şekilde referans alınan teknik spesifikasyonlara göre, minimum 2,5 N/mm yapışma kuvveti eşik değeri esas alınmıştır. Bu eşik değer, endüstriyel firmalar tarafından geliştirilen teknik dokümanında tanımlanmıştır. Ancak, söz konusu teknik doküman kamuya açık bir kaynak olmadığından, bu çalışmada yalnızca endüstri pratiğinde yaygın olarak kabul gören limit değerler referans olarak dikkate alınmıştır. Test edilen tüm numunelerin bu minimum sınırın üzerinde sonuç vermesi nedeniyle, çap genişleme ve patlatma testlerine geçilmesi uygun bulunmuştur. Bu yaklaşım, kamuya açık olmayan teknik şartnamelerin, akademik çalışmalarda dolaylı biçimde referans gösterilmesine olanak tanımaktadır.

Tüm numunelerin, kabul sınırı olan 2,5 N/mm yapışma dayanımının üzerinde sonuç vermesi üzerine, çalışmada çap genişleme ve patlatma testlerine geçilmiştir. Elde edilen veriler doğrultusunda, hortum üretiminde kullanılan ipliğin dtex değeri ve hatve mesafesi gibi parametrelerinin, katmanlar arası yapışma performansı üzerinde belirleyici bir etkisi olduğu gözlemlenmiştir. Üç farklı iplik yapısının karşılaştırmalı analizinde, 930 dtex – 2.9 hatve kombinasyonu ile üretilen numunelerin yapışma kuvveti başlangıçta nispeten yüksek olsa da ilerleyen konumlarda dalgalanarak zaman zaman 2,8 N/mm seviyelerine kadar düşmüştür. Bu durum, düşük dtex ve sık sarımın belirli bölgelerde yapışma kalitesini olumsuz etkileyebileceğini göstermektedir. Buna karşın, 1100 dtex – 3.3 hatve kombinasyonu, ortalama 3,7–4,0 N/mm aralığında seyreden kuvvet değerleri ile en yüksek ve en dengeli performansı sergilemiştir. Bu yapı, iplik kalınlığı ile sarım sıklığı bakımından elastomer matris ile optimum etkileşim sağlayarak daha kararlı bir yapışma davranışı göstermiştir. Öte yandan, 1680 dtex – 4.0 hatve kombinasyonuna sahip numunelerde, başlangıçta gözlemlenen yüksek yapışma kuvveti kısa sürede düşüşe geçmiş ve 2,9 N/mm seviyelerine kadar gerilemiştir. Bu durum, yüksek dtex değerine sahip kalın ipliğin daha geniş hatveyle sarılması sonucu iplik-matris etkileşiminin zayıfladığına ve yapışma yüzeyinde homojenliğin bozulduğuna işaret etmektedir. Sonuç olarak, iplik yapısında kullanılan dtex ve hatve parametrelerinin birlikte optimize edilmesi gerektiği; özellikle 1100 dtex – 3.3 hatve kombinasyonunun, EPDM hortumlarda en uygun yapışma performansını sağladığı belirlenmiştir.

4.3 Çap Genişleme ve Patlatma Testi Analizleri

Yapılan çalışmalarda hortum numuneleri üzerinde uygulanan çap genişleme ve patlatma testlerinden elde edilen veriler doğrultusunda, iplik dtex değerleri ile hatve mesafesinin hortumların mekanik dayanımı üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Her bir numune grubuna sabit test koşulları altında aynı prosedürler uygulanmış ve sonuçlar karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Şekil 4,9 ve 4.10'da çap genişleme ve patlatma testi numuneleri gösterilmiştir.



Şekil 4.9: Çap genişleme ve patlatma sonrası bozunan hortumlar.



Şekil 4.10: Patlatma testi sırasında basınç ile şişen hortumlar.

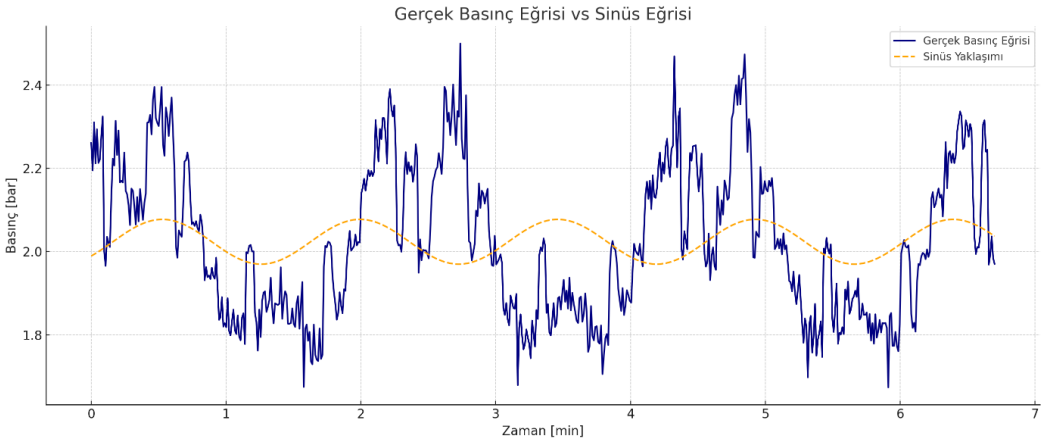
Çap genişleme testi sonuçlarına göre, en düşük genişleme oranı 930 dtex / 2.9 mm hatve değerine sahip numunede yaklaşık %5,38 olarak ölçülmüştür. Bu değeri sırasıyla 1680 dtex / 4.0 mm hatve numunede %8,07, 1100 dtex / 3.3 mm hatve numunede ise %6,93 takip etmiştir. Tüm gruplar, kabul sınırı olan %10'un altında kalarak testi başarıyla geçmiştir. Genişleme oranlarındaki bu artış, hatve mesafesinin uzaması ve iplik sarım sıklığının azalmasıyla ilişkilendirilebilir. Patlatma testleri kapsamında, en yüksek dayanım değeri 930 dtex / 2.9 mm hatve numunede elde edilmiş olup, ortalama patlatma basıncı 24.54 bar olarak kaydedilmiştir. Bu numuneyi sırasıyla 1680 dtex / 4.0 mm hatve numune (22.73 bar) ve 1100 dtex / 3.3 mm hatve numune (23.2 bar)

takip etmiştir. Tüm gruplar, 12 bar kabul sınırının oldukça üzerinde değerler göstererek patlatma testini başarıyla geçmiştir.

Elde edilen sonuçlar doğrultusunda, daha düşük dtex ve daha sıkı hatveye sahip numunenin hem deformasyona karşı daha dirençli olduğu hem de daha yüksek patlatma basıncına ulaştığı belirlenmiştir. Elde edilen bu bulgular, Hua ve diğ, (2021) tarafından geliştirilen teorik model ile örtüşmekte olup, sık örgülü yapının patlama dayanımı üzerindeki olumlu etkisi literatürde de vurgulanmaktadır. Benzer şekilde, Xu ve diğ, (2021) çalışmasında da fiber yönelimi ve örgü yoğunluğunun hortumun rijitliği ve mekanik performansı üzerinde belirleyici olduğu ifade edilmiştir. Bu bağlamda, deneysel veriler hem teorik hem de yapısal modellerle uyum göstermekte, literatürle desteklenen güvenilir sonuçlar sunmaktadır. Bu durum, 930 dtex – 2.9 mm hatve kombinasyonunun hortum performansı açısından daha avantajlı bir yapı sunduğunu göstermektedir.

4.4 Uzun Ömür Testi ve Yaşlandırma Sonrası Analizler

Bu tez çalışmasında hortumların uzun süreli dinamik performanslarını değerlendirmek amacıyla, 6.1.1 Sinüs Test protokolüne uygun olarak uzun ömür testleri gerçekleştirilmiştir. Test öncesinde sistemde bleeding (hava alma), sızdırmazlık kontrolü, ısıtma ve kalibrasyon işlemleri yapılmış; ardından sinüs yükleme çevrimleri başlatılmıştır. Test süresi boyunca kabin sıcaklığı sabit tutulmuş, cihazın otomatik veri kaydı ve basınç kontrol sistemleri yardımıyla çevrimler kesintisiz şekilde uygulanmıştır. Testin sonunda cihazdan elde edilen veriler, hortumun 250.000 döngü boyunca yapısal bütünlüğünü koruduğunu ve test süresince herhangi bir deformasyon, sızıntı veya delaminasyon meydana gelmediğini göstermiştir.



Şekil 4.11: Uzun ömür cihazı sinüzoidal form değişim gösterimi.

Şekil 4.11'da görüldüğü üzere, test boyunca iç basınç 0.2–2.4 bar aralığında sinüzoidal formda değişim göstermiştir. Çizelge 4.2'de yaşlandırma sonrası uygulanan çap genişleme ve patlatma test sonuçları aşağıdaki gibidir.

Çizelge 4.2: Yaşlandırma sonrası uygulanan çap genişleme ve patlatma sonuçları.

Numune	İlk hal	Yaşlandırma sonrası	Ayrım
930 Dtex 2.9 Hatve Çap Genişleme Testi	5,06%	6,82%	**1,76%**
930 Dtex 2.9 Hatve Çap Genişleme Testi	5,71%	8,05%	**2,34%**
930 Dtex 2.9 Hatve Patlatma Testi	24,75 bar	19,99 bar	-4,76 bar
930 Dtex 2.9 Hatve Patlatma Testi	24,34 bar	20,23 bar	-4,11 bar
1100 Dtex 3.3 Hatve Çap Genişleme Testi	6,99%	9,36%	**2,37%**
1100 Dtex 3.3 Hatve Çap Genişleme Testi	6,87%	9,86%	**2,99%**
1100 Dtex 3.3 Hatve Patlatma Testi	23,12 bar	17,39 bar	-5,73 bar
1100 Dtex 3.3 Hatve Patlatma Testi	23,29 bar	17,93 bar	-5,36 bar
1680 Dtex 4 Hatve Çap Genişleme Testi	7,87%	8,99%	**1,12%**
1680 Dtex 4 Hatve Çap Genişleme Testi	8,28%	9,36%	**1,08%**
1680 Dtex 4 Hatve Patlatma Testi	22,85 bar	18,80 bar	-4,05 bar
1680 Dtex 4 Hatve Patlatma Testi	22,61 bar	18,30 bar	-4,31 bar

Elde edilen grafik, cihazın test boyunca yüklemeyi kararlı bir şekilde sürdürebildiğini ve sistemin tepe/dip değerlerine hızlı tepki verebildiğini ortaya koymaktadır. Sinüs

formunun keskinliği ve tekrarlanabilirliği, yüklemenin standarda uygun biçimde uygulandığını göstermektedir. Genel değerlendirme sonucunda, tüm hortum numunelerinin 250.000 döngü boyunca mekanik bütünlüğünü koruduğu ve 6.1.1 Sinüs Testi'ni başarıyla geçtiği belirlenmiştir.

Bu çalışma kapsamında, farklı iplik dtex değerleri ve hatve kombinasyonlarına sahip hortum numuneleri üzerinde çeşitli mekanik testler uygulanmış ve ardından yaşlandırma testleriyle uzun dönemli performansları değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, iplik parametrelerinin ve üretim sonrası yaşlandırmanın, hortumların çap deformasyonu ve iç basınç dayanımı üzerinde doğrudan etkili olduğunu ortaya koymuştur. Yapılan çap genişleme testlerinde, iplik dtex değeri ve hatve mesafesi arttıkça deformasyon oranının da yükseldiği gözlemlenmiştir. İlk test sonuçlarına göre, 930 dtex – 2.9 mm hatve kombinasyonu en düşük deformasyon oranını gösterirken, 1680 dtex – 4.0 mm hatve numunesi daha yüksek deformasyon eğilimi sergilemiştir. Ancak, uzun ömür testinin ardından elde edilen çap genişleme oranlarında en az artışın 1680 dtex numunelerde olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuç, daha kalın ipliğe sahip hortumların yaşlanma etkisine karşı daha dirençli bir davranış sergilediğini göstermektedir. Buna karşın, 1100 dtex – 3.3 mm hatve numunelerinin yaşlandırma sonrası çap genişleme oranlarındaki artış %2,68 ile en yüksek seviyede gerçekleşmiş, patlatma dayanımında da ortalama 5.55 bar'lık düşüşle en zayıf yapı olarak öne çıkmıştır. Bu durumun temel nedeni, 1100 dtex ipliği oluşturan filamentlerin 930 dtex ile tolerans olarak oldukça yakın olması ve bu yapının daha geniş hatve aralığı ile birlikte yapısal kararlılığını yitirmesidir. Patlatma testlerinden elde edilen bulgular da deformasyon eğilimlerini destekler nitelikte olup, yaşlandırma sonrası en az basınç dayanım kaybı (~4.18 bar) 1680 dtex numunelerde gözlenmiştir. Ancak, bu grup ilk testlerde zaten daha düşük patlatma basıncına sahip olduğundan, uzun vadeli uygulamalarda stabilitesi sınırlı kalabilir.

Tüm bu değerlendirmeler ışığında; 930 dtex – 2.9 mm hatve numuneler hem kısa vadeli hem de uzun vadeli testlerde yüksek patlatma dayanımı, düşük deformasyon oranı ve makul düzeyde yaşlanma dayanımı ile en dengeli performansı gösteren yapı olarak belirlenmiştir. Araç içi uygulamalar gibi hem yüksek dayanım hem de uzun ömür gerektiren alanlarda bu yapı en uygun hortum adayı olarak önerilmektedir.

Gerçekleştirilen mekanik testler ve yaşlandırma analizleri sonucunda, iplik kalınlığı ile hatve mesafesi kombinasyonlarının EPDM esaslı hortumların yapısal performansı üzerinde doğrudan etkili olduğu belirlenmiştir. Elde edilen veriler, bu iki parametrenin; üretim prosesi stabilitesi, mekanik dayanım, esneklik ve uzun ömür gibi uygulamaya özgü performans kriterleri doğrultusunda dikkatle optimize edilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Bu doğrultuda, farklı kullanım öncelikleri göz önünde bulundurularak uygun iplik-hatve kombinasyonlarının karşılaştırmalı şekilde değerlendirilmesine olanak tanıyan bir seçim tablosu aşağıda sunulmuştur.

Çizelge 4.3: Uygulama önceliklerine göre iplik-hatve seçimi.

Kriter	930 dtex ve 2.9 mm hatve	1100 dtex ve 3.3 mm hatve	1680 dtex ve 4.0 mm hatve
Başlangıç patlatma dayanımı	~24.5 bar	~23.2 bar	~22.7 bar
Yaşlandırma sonrası performans	~4.5 bar düşüş patlatma ve %2.05 artış çap	~5.5 bar düşüş patlatma ve %2.68 artış çap	~4 bar düşüş patlatma ve %1.10 çap
Üretim uygunluğu	Yüksek	Orta	Düşük
Yapışma performansı	Yüksek	Orta	Düşük
Esneklik ve montaj kolaylığı	Yüksek	Orta	Düşük
Yaşlanma direnci	Orta	Düşük	Yüksek
Tavsiye edilen uygulama alanı	Araç içi hortumlar, sık montaj gereken yerler	Uygun değil	Yüksek dayanım istenen dış ortam uygulamaları

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, üç farklı iplik kalınlığı (930, 1100 ve 1680 dtex) ve bunlara karşılık gelen hatve aralıkları (2.9 mm, 3.3 mm ve 4.0 mm) kullanılarak üretilmiş EPDM esaslı hortum numuneleri, ekstrüzyon ve otoklav işlemlerinden geçirilerek hazırlanmıştır. Numuneler hem üretim sonrası hem de 250.000 çevrimlik uzun ömür yaşlandırma testi sonrası mekanik ve morfolojik olarak değerlendirilmiştir.

Yapılan mekanik testlerde tüm numunelerin kat yapışma değerleri 2.5 N/mm sınırının üzerinde bulunmuş; çap genişleme oranları ilk durumda 930 dtex için %5.38, 1100 dtex için %6.93 ve 1680 dtex için %8.08 olarak ölçülmüştür. Patlatma basınçları sırasıyla ~24.5, ~23.2 ve ~22.7 bar olarak belirlenmiştir. Yaşlandırma sonrasında en düşük çap genişlemesi %1.10 ile 1680 dtex numunesinde görülürken, en dengeli performans 930 dtex iplikli hortumlarda elde edilmiştir.

Çekme testleri, 930 dtex numunesinin en yüksek elastikiyet ve dayanım dengesini sağladığını göstermektedir.

SEM analizleri, düşük hatveye sahip örneklerde iplik–matris ara yüzeyinin daha homojen ve sıkı bir yapı sergilediğini; 1100 dtex grubunda ise lif boşlukları ve yerel deformasyon izlerinin daha belirgin olduğunu ortaya koymuştur.
Sonuç olarak, 930 dtex – 2.9 mm hatve kombinasyonu hem morfolojik analizinde hem de yaşlandırma sonrası ölçümlerde mekanik kararlılık, düşük deformasyon eğilimi ve iyi kat yapışma özellikleriyle öne çıkmıştır. Bu yapı, uzun ömürlü ve yüksek dayanım gerektiren otomotiv hortum uygulamaları için en uygun çözüm olarak önerilmektedir.

Gelecekteki çalışmalarda, çift yönlü sargı veya değişken hatve geometrileriyle örgü yapısının optimize edilmesi ve farklı çevresel koşullarda yaşlandırma testlerinin tekrarlanması, EPDM hortumların dayanım–esneklik dengesinin daha kapsamlı biçimde değerlendirilmesine katkı sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

Abdelrahman, M., Hassan, M., Smith, J. (2017). Microwave vulcanization of rubber: Efficiency and process improvements. *Journal of Elastomer Technology*, 25(3), 123–134.

Ahmed, S., Alam, S., Alam, M. S. (2019). Investigation on compression set and resilience properties of EPDM rubber vulcanizates. *Materials Today: Proceedings*, 18, 1811–1818.

Alarifi, I. M. (2023). A comprehensive review on advancements of elastomers for engineering applications. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, *6*(4), 451-464

Al-Oqla, F. M., Sapuan, S. M. (2015). Natural fiber reinforced polymer composites: A review. Materials & Design, 83, 66–79.

ASTM International. (1994). *ASTM D380-94: Standard Test Methods for Rubber Hose*. West Conshohocken, PA: ASTM International.

ASTM International. (1999). *ASTM D3886-99: Standard Test Method for Abrasion Resistance of Textile Fabrics (Inflated Diaphragm Method)*. West Conshohocken, PA: ASTM International.

ASTM International. (2014). *ASTM D638-14: Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics*. West Conshohocken, PA: ASTM International.

Balea L.L., Dusserre G.G., Bernhart G Mechanical behaviour of plain knit reinforced injected composites: Effect of inlay yarns and fibre type ,Composites: Part B , 20 29 , 2014

Bilisik, K., Karaduman, N. S., Bilisik, N. E. (2015). Applications of braided structures in transportation. In Y. Kyosev (Ed.), *Advances in Braiding Technology* (pp. 567–601). CRC Press.

Billmeyer, F. W. (1984). *Textbook of polymer science* (3rd ed., pp.261-263). Wiley-Interscience.

Blackley, D. C. (1997). *Polymer Latices: Science and Technology*. Springer.

Brinson, H. F., Brinson, L. C. (2008). Polymer engineering science and viscoelasticity: An introduction (pp. 57–100, 101–167, 169–230, 231–285). Springer.

Buran, N., Koru, M. (2018). Aramid esaslı liflerin yüksek sıcaklık uygulamalarındaki performansı. *Tekstil ve Mühendis, 25*(2), 112–119.

Callister, W. D., Rethwisch, D. G. (2012). *Fundametals of Material Science and Engineering.* New Jersey: John Wiley and Sons.

Chamoni, W. H. R., Dodo, O. J., Weerasinghe, M. A. S., Raji, I. O., Wanasinghe, S. V., Konkolewicz, D., De Alwis Watuthanthrige, N. (2023). Characterizing cross-linked polymer networks: functionality, swelling,

gel fraction, mechanical and thermal properties. Polymer Chemistry, 14, 5072–5095

Chen, Z., Wang, Z., Xu, Y. (2019). Influence of elastomer modifiers on the mechanical performance of phenolic resin composites. *Polymer Engineering and Science*, 59(6), 1201–1208. https://doi.org/10.1002/pen.25012

Cho, J. R., Jee, Y. B., Kim, W. J., Han, S. R., Lee, S. B. (2013). Homogenization of braided fabric composite for reliable large deformation analysis of reinforced rubber hose. *Composites Part B, 53,* 112–120.

Choi, S. S., Kim, I. S. (2014). Rubber Chemistry and Technology, 87(4), 622-631.

Choi, S. S., Kim, Y. K. (2014). "Polibütadien kauçuk sentezi üzerine çalışma." *Polimer Bülteni*, 71(7), 1827-1837.

Cho, J. R., Yoon, T. H. (2016). Nonlinear large deformation analysis of automobile power steering hose on cyclic path. *Composite Structures, 152,* 995–1006.

Coran, A. Y. (2003). Vulcanization. In *Science and Technology of Rubber* (3rd ed., pp. 321–366). Academic Press.

Costa, N. L., Hiranobe, C., Cardim, H. P., Dognani, G. (2024). A review of EPDM (ethylene propylene diene monomer) rubber-based nanocomposites: Properties and progress. Polymers, 16(12), 1720.

Dal, Ş. M. (2015). *Kauçuk Türleri, Özellikleri, Üretim Potansiyelleri, Kullanım Alanları ve Atık Kauçuk Geri Kazanımı ve İşlenme Sistemlerinin Araştırılması*. (Yüksek Lisans tezi). Mersin Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mersin.

Dharmavarap, S., Reddy, B. R. (2021). Mechanical and thermal properties of aramid fibers: A review. *Materials Today: Proceedings, 46*(9), 4515–4522.

Dick, J. S. (2009). *Rubber Technology: Compounding and Testing for Performance*. Hanser Publications.

Dluzneski, P. R. (2001). Peroxide vulcanization of elastomers. *Rubber Chemistry and Technology, 74*(3), 451–492. https://doi.org/10.5254/1.3544957

Doğan, S. (2022). EPDM kauçuk bileşiklerinde dolgu katkılarının reolojik ve mekanik etkileri. *Polimer Teknolojileri Dergisi*, 10(2), 45–54.

El-Shekeil, Y. A., Al-Oqla, F. M., Refaey, H. A., Bendoukha, S., Barhoumi, N. (2021). Investigating the mechanical performance and characteristics of nitrile butadiene rubber date palm fiber reinforced composites for sustainable bio-based materials. Journal of Materials Research and Technology, 15, 2508–2520.

Ertekin, M., Ertekin, G., Bakiler, G., İşcan, İ. S., Erden, S. (2022). Characterization of high-pressure fuel hose with braided reinforcement. *Tekstil ve Konfeksiyon, 32*(3), 265–276.

Etcheverry, M., Barbosa, S.E. (2012). Glass fiber reinforced polypropylene mechanical properties enhancement by adhesion improvement. *Materials, 5*(6), 1084–1113.

Fallatah, G. M. (2006). *Long-term behaviour of aramid fibre* (Doctoral thesis), Newcastle University. Newcastle University Library.

Fazli, A., Rodrigue, D. (2021). Phase morphology, mechanical, and thermal properties of fiber-reinforced thermoplastic elastomer: Effects of blend composition and compatibilization. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 41(7–8), 267–283.

Gebrehiwet, L., Abate, E., Negussie, Y., Teklehaymanot, T., Abeselom, E. (2023). Application of composite materials in aerospace & automotive industry: Review. *International Journal of Advances in Engineering and Management (IJAEM), 5*(3), 697–723.

Gent, A. N., **Mark, J. E.** (2012). *Engineering with rubber: How to design rubber components* (3rd ed., pp. 37-110). Hanser Publications.

Graves, M., Rackaitis, D. (2017). *Handbook of Industrial Chemistry and Biotechnology.* OH, USA: Springer International Publishing.

Hamed, G. R. (2000). "Materials and Compounds", Rubber Chemistry and Technology, 73(3), 524-533.

Hanhi, K., Poikelispää, M., Tirilä, H.M. (2007). Elastomeric Materials. Tampere: Tampere University of Technology.

Hannifin, P. (2007). *Parker O-Ring Handbook.* Lexington: Parker Hannifin Corporation.

Hernández-Ortiz, J. P., Osswald, T. A. (2006). Polymer extrusion: A short review. *Polymer Engineering and Science, 46*(10), 1335–1345.

Hintze, C., Sadatshirazi, S., Wiessner, S., Talma, A. G., Heinrich, G., Noordermeer, J. W. M. (2013). Influence of fiber type and coating on the composite properties of EPDM compounds reinforced with short aramid fibers. *Rubber Chemistry and Technology, 86*(4), 579–590.

Hintze, J. M., ve diğ, (2014). Dynamic behavior of short aramid fiber-filled elastomer composites. *Polymer Engineering & Science, 54*(4), 812–819.

Huang, Z. M., Ramakrishna, S., Dinner, H. P., & Tay, A. A. O. (1999). Characterization of a knitted fabric reinforced elastomer composite. *Journal of Reinforced Plastics and Composites, 18*(2), 118–137.

Islam, M., ve diğ, (2024). Thermoplastic and thermoset polymer composites reinforced with flax and aramid fiber. *SPE Polymers, 5*(1), 112–124.

ISO 4671. (2007). *Rubber and plastics hoses and hose assemblies – Methods of measurement of the dimensions of hoses and the length of hose assemblies*.

Kausar, A. (2017). Role of thermosetting polymer in structural composite. *Am. J. Polym. Sci. Eng*, *5*(1), 1-12.

Kausar, A. (2018). Polymer coating technology for high performance applications: Fundamentals and advances. *Journal of Macromolecular Science, Part A*.

Khan, F. (2007). Characterization of EPDM rubber compounds and their performance in high-temperature sealing applications. *Journal of Applied Polymer Science*, 103(5), 3100–3106. https://doi.org/10.1002/app.25579

Köksal, A. (2023). EPDM bazlı karışımlarda proses kolaylaştırıcıların etkisi. *Yüksek Lisans Tezi*, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Kumar, S. K., Deka, H., Mohanty, S. (2022). A drive towards green – Unsaturated polyester resins: A critical review of bio-based building blocks and reactive diluents. European Polymer Journal, 162, 110896

Kruželák, J., Kvasničáková, A., Hložeková, K., Dzuganová, M., Hudec, I. (2022). The effect of temperature and peroxides content on cross-linking and properties of EPDM-based rubber matrix. *Journal of Elastomers & Plastics, 54*(5), 693–717.

Lin, Y. (2020). Transparent semi-crystalline polymeric materials and their nanocomposites: A review. Polymer Engineering & Science, 60(10), 2351–2376

Liu, J., Wu, D., Chen, Y. (2020). Thermogravimetric analysis of phosphorus-containing flame retardants in polyurethane systems. *Polymer Degradation and Stability*, 178, 109190. https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2020.109190

Song, L.-F., Bai, N., Shi, Y., Wang, Y.-X., Song, L.-X., Liu, L.-Z. (2023). Effects of EPDMs with different Moony viscosity on crystallization behavior, structure, and mechanical properties of TPVs. *Polymers, 15*, 642.

Malkin, A. Y., Isayev, A. I. (2017). *Rheology: Concepts, Methods, and Applications* (3rd ed.). ChemTec Publishing.

Mark, J. E., Erman, B., Roland, C. M. (2005). *The Science and Technology of Rubber* (3rd ed.). Elsevier.

Morton, M. (Ed.). (2013). *Rubber Technology* (pp. 1-105*)*. Springer Science and Business Media.

Muzzy, J. D., Kays, A. O. (1984). Thermoplastic vs. thermosetting structural composites. *Polymer Composites*, *5*(3), 169-172.

Nikolic, M., Miskovic-Stankovic, V., Janjic, J. (2020). The modelling of extrusion processes for polymers—A review. *Polymers, 12*(6), 1306.

Nuyken, O., Koltzenburg, S., Maskos, M. (2017). *Polymer Chemistry* (s 486*)*. Berlin: Springer.

Özdemir, R. (2020). Karbon siyahı içeriğinin EPDM elastomer özelliklerine etkisi. *Kauçuk ve Plastik Dergisi*, 8(1), 22–30.

Padhan, R. K, Pandey, S., Mohanty, S. (2018). Etilen Propilen Dien Monomer (EPDM) Kauçuk ve Uygulamaları: Bir İnceleme. *Polimer Bilimi İncelemesi*, 58(1), 1-26.

Paul, D. R., & Robeson, L. M. (2008). Polymer nanotechnology: Nanocomposites. Polymer, 49(15), 3187-3204.

Park, H. S., Kim, D. W. (2001). Extrusion technology of rubber hose and its design parameters. *Journal of Industrial Technology*, 17(4), 45–53.

Pious, C. V., Thomas, S. (2016). Polymeric materials—structure, properties, and applications. *Printing on polymers*, 21-39.

Rahman, M. R., (2013). Progress in Natural Rubber Technology, Elsevier, vol.3, 23-40.

Rosen, S. L. (2008). *Fundamental principles of polymer materials* (pp. 1–61). John Wiley and Sons.

Rothon, R. N. (Ed.). (2003). *Particulate-filled polymer composites*. Rapra Technology Ltd. SP.1145_0 SP.DIN 73411

Sathishkumar, T. P., ve diğ, (2014). Hybrid fiber-reinforced polymer composites – A review. *Journal of Reinforced Plastics and Composites, 33*(5), 454–471.

Savran, H. Ö. (2001). Elastomer teknolojisi 2. *Kauçuk Derneği Dergisi*, 14, 178–186.

Saraç, M. F., Buran, D., Koru, M. (2018). Investigation of thermal and mechanical properties of aramid fiber reinforced thermoplastic polyurethane elastomer composites. *Journal of Natural and Applied Sciences, 22*(2), 477–481

Schäfer, J., Gries, T. (2016). Braiding pultrusion of thermoplastic composites. In Y. Kyosev (Ed.), *Advances in Braiding Technology* (pp. 405–421). Elsevier.

Shirazi, M., Noordermeer, J. W. M. (2011). Factors influencing reinforcement of NR and EPDM rubbers with short aramid fibers. Rubber Chemistry and Technology, 84(2), 187–199.

Shubhra, Q. T. H. (2025). Braided hybrid yarn composites for dynamic load resistance. *Composites Part B: Engineering, 157,* 53–61.

Shokr-zadeh, M., Mohammadi, N., Nazockdast, H. (2014). Rheological behavior of EPDM filled with $CaCO_3$ in peroxide vulcanization systems. *Iranian Polymer Journal*, 23(5), 377–387. https://doi.org/10.1007/s13726-014-0240-7

Singh, A., Reynolds, N., (2020). The effect of braid angle on the flexural performance of structural braided thermoplastic composite beams, Composite Structures, 113314.

Singh, M., Verma, P., Kumar, A. (2022). Recent advances in toughened phenolic resins: A review. *Journal of Applied Polymer Science*, 139(2), e51438. https://doi.org/10.1002/app.51438

Singh, P., Sharma, R., & Gupta, M. (2025). The rubberized mechanical features: Hardness, modulus, tensile strength, elongation at break and aging for manufacturing automotive tires – An overview. Journal of Polymer Engineering, 45(2), 110–128.

Smith, J. A., Patel, R., Roy, S. (2019). Influence of filler type on Shore A hardness and damping in EPDM compounds. *Rubber Chemistry and Technology*, 92(3), 498–506. https://doi.org/10.5254/rct.19.85151

Sperling, L. H. (2006). *Introduction to physical polymer science* (4th ed.). Wiley-Interscience.

Treloar, L. R. G. (1975). The physics of rubber elasticity (3rd ed., pp. 160–175, 252–270). Oxford University Press.

Tejani, J. G. (2023). The Influence of Crosslinking Agents on the Properties of Thermoplastic Elastomers. Silicon Valley Tech Review, 2(1), 1-12.

Topaloğlu, N. (2023). ATH dolgulu EPDM karışımlarında mekanik özelliklerin incelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Van Krevelen, D. W., Nijenhuis, K. (2009). *Properties of polymers: Their correlation with chemical structure; their numerical estimation and prediction from additive group contributions* (4. baskı). Elsevier

Vaysse, L. (2012). "Hevea brasiliensis: Genel Bakış." *Biyolojik Kaynak Teknolojisi*, 103(1), 24-32..

Ward, I. M., Sweeney, J. (2012). *Mechanical properties of solid polymers* (3rd ed.). Wiley.

Xie, R., Wang, C., Yang, R. (2022). Halogen-free flame retardants for polyurethane: From fundamentals to commercial applications. *Materials Today Chemistry*, 25, 100960. https://doi.org/10.1016/j.mtchem.2022.100960

Xu, D., Fan, H., Li, J., Yang, W., Liu, K., Xu, W. (2022). Comparative analysis of the properties of yarn spun by rotary threaded surfaces with different pitches. *Journal of Natural Fibres, 19*(13), 4835–4845.

Yıldız, U, Turbo Hortumu Takviye Örgüsünün Hortum Ömrüne Etkisinin Deneysel Yollarla İncelenmesi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Fakültesi, (Yüksek Lisans Tezi), Şubat 2018

Yıldız, A. (2018). İplik inceliği (dtex) ve lif özelliklerinin elastomer hortum performansına etkileri. *Tekstil Teknolojileri Elektronik Dergisi, 12*(3), 45–54.

Young, R. J., Lovell, P. A. (2011). Introduction to polymers (3rd ed.). CRC Press. Forecasts in two contrasting catchments, *Hydrological Processes, 14*(2), 2157–2172.

Zhao, L., Chen, Y., Wang, T. (2023). Evaluation and rationale of the performance of several elastomer compounds. Polymer Testing, 118, 108014.

ÖZGEÇMİŞ

Ad-SOYAD **:** Melis DEMİRTAŞ

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** **:** 2016-2022, Bursa Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği
- **Yüksek Lisans** **:** 2023-2025, Bursa Teknik Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Programı

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- Proje Mühendisi, Elatek Kauçuk San. Tic. A. Ş. (Ocak 2023 – Temmuz 2024)
- Proje Mühendisi, Aptıv Turkey Teknoloji Hizmetleri Ltd. Şti. (Temmuz 2024 – Devam Ediyor)

TEZDEN TÜRETİLEN ESERLER, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Demirtaş, M., Kara, M., Duman, Ş.** (2025). Effect of aramid yarn dtex and pitch on the mechanical performance and ageing resistance of EPDM-reinforced rubber hoses, *The 7nd International Conferences on Applied Engineering and Natural Sciences,* Konya, Turkey: May 15-16.