

**T.C.
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
TEKSTİL MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**OTOMOTİV ENDÜSTRİSİNDE KARBON ELYAF UYGULAMALARI
İLE İLGİLİ GELİŞMELER VE SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK
YAKLAŞIMLARI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

NURADIS TEMAM AHMED

DENİZLİ, TEMMUZ - 2024

T.C.
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
TEKSTİL MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI



OTOMOTİV ENDÜSTRİSİNDE KARBON ELYAF UYGULAMALARI
İLE İLGİLİ GELİŞMELER VE SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK
YAKLAŞIMLARI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

NURADİS TEMAM AHMED

DENİZLİ, TEMMUZ -2024

Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bilimsel etiğe ve akademik kurallara özenle riayet edildiğini; bu çalışmanın doğrudan birincil ürünü olmayan bulguların, verilerin ve materyallerin bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini ve alıntı yapılan çalışmalara atfedildiğine beyan ederim.

Nuradis Temam AHMED

ÖZET

OTOMOTİV ENDÜSTRİSİNDE KARBON ELYAF UYGULAMALARI İLE İLGİLİ GELİŞMELER VE SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK YAKLAŞIMLARI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

NURADIS TEMAM AHMED

PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TEKSTİL MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

(TEZ DANIŞMANI: PROF. DR. SEMA PALAMUTCU)

DENİZLİ, TEMMUZ - 2024

Tekstil mühendisliğinin çalışma alanında olan karbon elyafı ve karbon kumaş takviyeli kompozit malzeme uygulamaları son on yıl içinde otomotiv mühendisliği alanında yaygın şekilde kullanılmaktadır. Karbon elyaf ve kumaş takviyeli kompozit malzemeler otomotiv mühendisliğinde dönüştürücü bir malzeme olarak, elyaf sürdürülebilir ulaşım çözümleri arayışında çok önemli bir oyuncu haline gelmiştir. Bu tez çalışmasında sürdürülebilirlik hususlarına odaklanarak otomotiv endüstrisindeki karbon elyaf uygulamaları çeşitli boyutları ile araştırılmıştır. Çalışma kapsamında karbon elyafın keşfi, araç tasarımında kullanımı, yüksek mukavemetli, hafif bir malzeme olarak sağlanan avantajlar ve karbon takviyeli kompozitler ile ilgili sürdürülebilirlik yaklaşımları sistematik olarak açıklanmaktadır. Çevresel sürdürülebilirliğe yönelik acil ihtiyacı ele alan çalışma, karbon elyafın gelecekteki yörüngesini şekillendirmede geri dönüşümün rolünü ortaya koymaktadır. Araştırma, enerji yoğun üretim süreçlerini analiz ederek ve geri dönüşüm yöntemlerini savunarak, geri dönüşüm uygulamalarını karbon elyaf endüstrisine entegre etmenin potansiyel çevresel faydalarını ve ekonomik uygulanabilirliğini vurgulamaktadır. Karbon elyaf teknolojisindeki yenilikler ve ilerlemeler, yüzey modifikasyonu, nanokompozit formülasyonlar ve yeni üretim süreçlerinde ile dikkat çekmeye devam etmektedir. Yenilikçi yaklaşımlar sadece mekanik özelliklerin geliştirilmesi ile sınırlı kalmamakta, aynı zamanda uygun maliyetli ve sürdürülebilir üretim yöntemlerinin önünü açarak endüstri inovasyonunu ve pazar rekabet gücünü arttırmaya odaklanmaktadır. Sürdürülebilirlik hususları, malzeme seçiminden kullanım ömrü sonu yönetimine kadar hammadde, üretim süreçleri, kullanım süreci ve imha sürecine kadar tüm evreleri kapsamaktadır. Çalışmada, yaşam döngüsü değerlendirmeleri, döngüsel ekonomi ilkeleri ve sürdürülebilir üretim uygulamaları incelenerek, otomotiv uygulamalarında karbon elyaf entegrasyonuna bütünsel bir yaklaşımı ortaya konmakta; maliyet odaklı dezavantajların çevresel etki avantajları ile Dengelenmesi önündeki bulgular vurgulanmaktadır. Ayrıca pazar eğilimleri ve gelecek beklentileri, otomotiv sektöründe artan karbon elyaf talebi ile bilgiler özetlenmektedir. Asya ülkelerinde artan otomobil üretimi ve hafif malzemelere geçişi yönlendiren sıkı emisyon düzenlemeleri ile dünya otomotiv imalatında karbon elyaf pazarının artan önemi hakkında bilgi verilmektedir.

ANAHTAR KELİMELELER: Karbon Elyaf, Otomotiv Endüstrisi, Kompozit Malzemeler, Araç Ağırlığını Azaltma, Performans Geliştirme, Yakıt Verimliliği

ABSTRACT

FUTURE PROSPECT OF CARBON FIBER AND APPLICATION IN THE AUTOMOTIVE INDUSTRY AND SUSTAINABILITY APPROACHES

MSC THESIS

NURADIS TEMAM AHMED

PAMUKKALE UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE

TEXTILE ENGINEERING

(SUPERVISOR: PROF. DR. SEMA PALAMUTCU)

DENİZLİ, JULY - 2024

Carbon fiber and carbon fabric reinforced composite material applications, which are in the field of textile engineering, have been widely used in the field of automotive engineering in the last ten years. Carbon fiber and fabric-reinforced composite materials are transformative materials in automotive engineering, and the fiber has become a crucial player in the search for sustainable transportation solutions. In this thesis, carbon fiber applications in the automotive industry are investigated in various dimensions by focusing on sustainability issues. Within the scope of the study, the discovery of carbon fiber, its use in vehicle design, its advantage as a high-strength, lightweight material, and sustainability approaches related to carbon-reinforced composites are systematically explained. Addressing the urgent need for environmental sustainability, the study reveals the role of recycling in shaping the future trajectory of carbon fiber. By analyzing energy-intensive manufacturing processes and advocating for recycling methods, the research highlights the potential environmental benefits and economic viability of integrating recycling practices into the carbon fiber industry. Innovations and advances in carbon fiber technology come to the fore by showcasing groundbreaking research in surface modification, nanocomposite formulations, and new manufacturing processes. These advances not only improve mechanical properties but also pave the way for cost-effective and sustainable production methods, increasing industry innovation and market competitiveness. Sustainability considerations permeate every aspect of research, from material selection to end-of-life management. By examining life cycle assessments, circular economy principles, and sustainable manufacturing practices, the study advocates a holistic approach to carbon fiber integration in automotive applications, balancing economic imperatives with environmental management. Market trends and future prospects offer a glimpse into the growing demand for carbon fiber in the automotive industry. With Asia's leading automobile manufacturing and stringent emissions regulations driving the shift to lightweight materials, the global carbon fiber market in automotive applications is poised for significant growth.

KEY WORDS: Carbon fiber, Automotive Industry, Composite Materials, Vehicle Weight Reduction, Performance Enhancement, Fuel Efficiency

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ŞEKİL LİSTESİ	v
TABLO LİSTESİ	vi
SEMBOL LİSTESİ	vii
ÖNSÖZ	viii
1. GİRİŞ	1
1.1 Arka Plan	1
1.1.1. Otomotiv Sektöründe Karbon Elyafın Geleceğinde Geri Dönüşümün Rolü	2
1.1.2 Karbon Elyaf Teknolojisindeki Yenilikler ve İlerlemeler.....	3
1.2 Araştırma Sorusu ve Araştırma Yöntemi.....	5
1.2.1 Araştırma Sorusu	5
1.2.2 Araştırma Yöntemleri	6
1.2.3 Veri Toplama Kaynakları	6
1.3 Amaç.....	7
1.4 Çalışmanın Kapsamı.....	7
1.5 Konunun Önemi	8
2. LİTERATÜR	9
2.1 Otomotiv Endüstrisinde Karbon Elyaf Kullanımı.....	9
2.2 Karbon Elyafının Gelişimi, Pazar Trendi ve Gelecek Beklentileri ..	18
2.2.1 Karbon Elyafının Gelişimi	18
2.2.2. Karbon Elyaf Takviyeli Kompozitlerde Sürdürülebilirlik Araştırmaları	19
2.2.3. Otomotiv Pazar Büyüklüğü	23
2.3 Kompozit Üretim Teknolojileri ve Ürün Kalite Parametreleri.....	24
2.3.1 Kompozit Üretim Yöntemleri.....	24
2.3.2 Kompozit Ürün Kalite Parametreleri.....	27
2.4 Karbon elyaf takviyeli kompozit üretim teknolojisindeki yenilikler.....	29
2.4.1 İleri Üretim Teknikleri ve Malzeme Gelişmeleri	36
2.4.2 Uygulamalar ve Performans İyileştirmeleri	47
2.5 Otomotivlerde Tekstil Bileşenli Yapıların Kullanımı.....	51
2.6 Karbon Elyafın Sürdürülebilirlik Yönü	53
2.6.1 Karbon Elyafın Geri Dönüşümü ve Yeniden Kullanımı.....	60
3 BULGULAR VE TARTIŞMA	64
3.1 Otomotiv Endüstrilerinde Karbon Elyafın Güncel Kullanımı ve Avantajları.....	64
3.2 Karbon Elyaf Üretiminde Teknolojik Gelişmeler	64
3.3 Karbon Elyafın Sürdürülebilirlik Yönü.....	66
4. SONUÇ ve ÖNERİLER	68
4.1 Sonuç.....	68
4.2 Öneriler	68
4.2.1 Sürdürülebilir Üretim Uygulamalarına Yatırım Yapılması.....	68

4.2.2	Üretim Verimliliğinin Optimize Edilmesi	69
4.2.3	Alternatif Malzeme ve Üretim Yöntemlerinin Anlaşılması....	69
4.2.4	Tedarik Zinciri Genelinde İşbirliğinin Teşvik Edilmesi	69
4.2.4	Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (LCA) Uygulamalarının Uygulanması	70
4.2.5	Araştırma ve Geliştirmeye Yatırım Yapılması	70
5.	KAYNAKLAR	71
6.	ÖZGEÇMİŞ	76

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1: Tahmini küresel karbon elyaf tüketimi	12
Şekil 2.2: Karbon elyafın kuvvet – uzama grafiğinin diğer malzemelerle karşılaştırılması.....	16
Şekil 2.3: Bant morfolojisi ve üretim sürecinin KTT'nin mekanik özellikleri üzerindeki etkileri	30
Şekil 2.4: KTT'lerin cıvata yatağı ve enerji soğurma özellikleri	31
Şekil 2.5: Üç tip yayın yük sapma eğrileri.....	33
Şekil 2.6: Üç tip yayın yay oranları (spring rate).....	33
Şekil 2.7: Üç tip yay arıza yükleri (faliure)	34
Şekil 2.8: Üç tip yay için maksimum sıkıştırma	34
Şekil 2.9: Saf PPA polimeri ve PPA-30KE kompozitin uygulanan yüke bağlı olarak spesifik aşınma oranının değişimi	36
Şekil 2.10: (a) Hibrit iplikten ve filament iplik kullanılarak üretilmiş kompozitler (b) Hibrit iplik ve filament iplikten üretilen kompozitlerin	41
Şekil 2.11: Epoksi KETK ve akrilik KETK'nin eğilme gerilme-gerinim eğrileri.....	48
Şekil 2.12: Çeşitli boyutlarda ATH parçacıklarına sahip ATH takviyeli KETK'ler için ILSS (interlaminar shear strength) test sonuçları	49
Şekil 2.13: Otomobillerde tekstil malzemelerinin kullanıldığı yerler.....	52
Şekil 2.14: Otomobiller kullanılan tekstil malzemelerinin dağılımları.....	53
Şekil 2.15: Ezilmiş KEKM	54
Şekil 2.16: Eğilme yükü --sehim (deplasman) eğrileri	55
Şekil 2.17: Benzinli araçlar için araç ağırlığının ve motor boyutunun bir fonksiyonu olarak yakıt tüketimi.....	61

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1: Kompozit malzemelerin araçlardaki ağırlık azaltımına etkileri	10
Tablo 2.2: Tek yönlü elyaf takviyeli epoksinin çekme mukavemeti oranı	14
Tablo 2.3: Bant morfolojisi ve üretim sürecinin KTT'nin mekanik özellikleri üzerindeki etkiler	30
Tablo 2.4: KTT'lerin cıvata yatağı ve enerji soğurma özellikleri	31
Tablo 2.5: Tüm deneylerde kullanılan kombinasyonlar için cam ve karbon elyaflar için ağırlık Fraksiyonları.	38
Tablo 2.6: 23 °C'de malzemelerin mekanik ve fiziksel özellikleri	46
Tablo 2.7: Üç nokta eğilme testinin sonuçları	54

SEMBOL LİSTESİ

PAN	:	Poliakrilonitrilden
KETP	:	Karbon Elyaf Takviyeli Plastikler
KNT	:	Karbon Nanotüpler
KE	:	Karbon Elyaf
RTM	:	Reçine Transfer Kalıplama Yöntemi
DCPD	:	Disiklopentadien
PUR	:	Poliüretan
rKE	:	Geri Dönüştürülmüş Karbon Elyaf
CO₂	:	Karbondioksit
AADCO	:	Automotive Incorporated
KETK	:	Karbon Elyaf Takviyeli Kompozit
PA66	:	Poliamid 66
KTT	:	Karbon Takviyeli Termoplastikler
PMK	:	Polimer Matrisli Kompozitler
YYP	:	Yüksek Yoğunluklu Polietilen
KETTP	:	Karbon Elyaf Takviyeli Termoplastikler
MJ	:	Megajule
Kg	:	Kilogram
Pa	:	Paskal
Mm	:	Milimetre
Gpa	:	Gigapaskal
Mpa	:	Megapaskal
CV	:	Darbe Dayanımı
KN	:	Kilonewton
N	:	Newton

ÖNSÖZ

Başta tüm güzellikleriyle var olan Allah'a sonsuz şükürler olsun. Yarattığı her şeyde bize rehberlik eden ve başarımıza katkı sağlayan O'na minnettarız. Bu değerli çalışmanın gerçekleşmesindeki kılavuzum ve destekçim Prof. Dr. Sema PALAMUTCU'ya en derin teşekkürlerimi sunarım. Her adımda bana ilham veren ve beni en yükseğe taşıyan danışmanıma minnettarlığımı ifade etmek isterim. Aynı zamanda, tekstil mühendisliği bölümündeki değerli öğretim üyelerine de içten teşekkürlerimi iletmek istiyorum. Verdikleri değerli tavsiyeler ve yararlı katkılarla bu araştırmayı daha da zenginleştirdiler. Pamukkale Üniversitesi'ne de, araştırmamın temelini oluşturan literatür ve belgeleri sağladıkları için teşekkür ederim. Türkiye'de eğitim almamı mümkün kılan Türkiye Bursları programına sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Bu değerli burs sayesinde, akademik hedeflerime ulaşma fırsatı buldum ve Türkiye'nin zengin kültürel ve tarihi mirasını yakından tanıma şansını elde ettim. Ayrıca, bu süreçte bana sürekli destek olan aileme, eşime ve arkadaşlarıma da teşekkür ederim.

1. GİRİŞ

1.1 Arka Plan

Karbon elyaf ve karbon elyaf kompozit gelişimi 1950-1960 yılları arasında gerçekleştirilmiştir. Karbon elyaf yüksek karbon içeriğine sahip olan, 5-10 µm aralığında kesit çapında üretilen bir yapay elyaf çeşididir. Karbon elyaf yüksek özgül mukavemet, yüksek özgül modül, yüksek kimyasal ve termal direnç ve düşük termal genişleme özellikleri ile dikkat çeken bir elyaftır. 1958'de Union Carbide firmasından (ABD) Roger Bacon, rayon liflerinin argon gazında ısıtarak karbonun üçlü noktasını ölçmeyi denediğinde yanlışlıkla karbon elyaf üretimi gerçekleştirmiştir. Karbon elyafın keşfinden bu yana, bu yeni malzemenin potansiyeli fark edilmiştir (Zhang ve Lin 2022).

Karbon elyafın yaklaşık %90'ı poliakrilonitrilden (PAN) türetilerek üretilmektedir. Geri kalan %10'luk karbon elyaf çeşidi ise (özellikle daha yüksek modül dereceleri durumunda) suni ipek veya petrol ziftinden elde edilir. Karbon elyafın üretim maliyeti, ağırlıklı olarak, toplam maliyetin yaklaşık %50'sini oluşturan PAN elyaf öncüsünün üretimiyle ilgili maliyetlere bağlıdır. Karbon elyaf üretiminde araştırma konuları üretim giderlerini azaltmak ve karbon elyaf üretiminin genel ekonomik uygulanabilirliğini artırmak için alternatif, daha uygun maliyetli ve sürdürülebilir öncü malzemeleri keşfetmeye odaklanmıştır (Peijs ve Kirschbaum 2022). Düşük maliyetli karbon elyaf üretimine yönelik araştırmalar, gereken çabanın büyüklüğü, sınırlı uzmanlık mevcudiyeti, ekipman tedariki ve maliyet nedeniyle az sayıda kuruluşla sınırlı kalmıştır. Bu tür çabalar tipik olarak daha düşük maliyetli malzemeler kullanarak, işleme maliyetini düşürerek veya ikisinin bir kombinasyonunu kullanarak maliyetin düşürülmesini içermektedir (Darren ve Baker 2013).

1.1.1 Otomotiv Sektöründe Karbon Elyafın Geleceğinde Geri Dönüşümün Rolü

Günümüzde otomotiv endüstrisi, yakıt maliyetlerinin düşürülmesi ve CO₂ emisyonlarının azaltılması gibi çevresel baskılarla karşı karşıyadır. Bu durum, kompozit malzemelerin geleneksel çelik ve alüminyum gibi malzemelerin yerini alması gerekliliğini ortaya koymaktadır. Gelecekteki otomobillerin şekillenmesinde önemli bir rol oynayacak olan tek malzeme olarak plastik kabul edilmektedir. Plastik kullanımının artması, petrol bazlı yakıtta olan bağımlılığı azaltmaktadır. Bu da ortalama bir otomobilin ömrü boyunca yakıt tüketiminde önemli ölçüde azalmaya yol açmaktadır. Plastik esaslı kompozit malzemelerin üretiminde doğal liflerin kullanımı da giderek yaygınlaşmaktadır. Doğal liflerin, cam elyaf ve karbon elyaf kıyasla düşük maliyeti, düşük yoğunluğu, yüksek dayanıklılığı ve biyo-bozunur olması gibi avantajları bulunmaktadır (Çavdar ve Boran 2016).

Karbon elyaf üretimi, yaklaşık 198-595 MJ/kg enerji tüketimi gerektiren, enerji yoğun bir süreç olarak kabul edilmektedir. Sonuç olarak, karbon elyaf, cam elyaf gibi diğer sentetik elyaf çeşitlerine kıyasla önemli ölçüde daha yüksek, yaklaşık on kat daha fazla, enerji tüketimi gerektirmektedir. Bu yüksek enerji tüketimi göz önüne alındığında, karbon elyafın çevresel etkisi, geri kazanım ve geri dönüşüm yöntemleri uygulanarak önemli ölçüde azaltılabilir. Güncel literatür bilgisine göre, karbon elyaf takviyeli plastiklerin (KETP) kimyasal yöntemlerle geri dönüştürülmesinin yaklaşık 38,4 MJ/kg enerji tüketimi ile gerçekleştiği ifade edilmektedir. Geri dönüşüm için yapılan bu enerji harcaması, işlenmemiş elyaf üretimi için gereken toplam enerjinin yaklaşık %10-30'u kadarına eşdeğerdir ve karbon elyaf endüstrisine geri dönüşüm uygulamalarını dahil etmenin potansiyel çevresel faydalarının altını çizmektedir (Zhang ve Cheval 2022). İklim değişikliği, küresel ısınma, çevresel sürdürülebilirlik ve döngüsel ekonomi gibi faktörler göz önünde bulundurulduğunda, KETP atıklarının düzenli depolanmasından veya yakılmasından kaçınılması gerektiği bir gerçektir. Son on yılda, özellikle Avrupa ve ABD'de KETP geri dönüşümü için çeşitli teknolojiler (mekanik, termal ve kimyasal) uygulanmışta olmasına rağmen halen yeni teknolojiler konusundaki araştırmalar devam etmektedir (Loris ve Tiziana 2020).

Bu yöntemlerden olan, karbon elyafın reçinelerden etkili bir şekilde ayrılması yöntemi çevre kirliliğini azaltan bir yöntem olarak dikkat çekmektedir. Bununla birlikte, bozulmamış karbon elyafın geri kazanılmasında ve reçinenin geri dönüşümü ve kullanımında zorluklar devam etmektedir (Pi-Yu ve Ran 2023). Karbon elyaf takviyeli plastikler (KETP), enerji yoğun yapıları ve geri dönüşüm sürecindeki doğal zorluklar nedeniyle geri dönüşüm için umut verici ancak halen karmaşık kabul edilen yöntemler arasındadır. Bu zorluklar çeşitli faktörlerden kaynaklanmaktadır. İlk olarak, KETP'lerin üretiminde ağırlıklı olarak kullanılan matrisler için yeniden eritmeye veya yeniden kalıplama zorluğu olan ve geleneksel geri dönüşüm yöntemlerinin uygulanmasını sınırlayan çapraz bağlı termoset polimerlerin kullanılıyor olması en önemli zorluk olarak görülmektedir. İkincisi, KETP'ler nadiren yalnızca karbon elyaftan ve matristen oluşmakta; genellikle cam ve aramid elyaflar gibi çeşitli takviye türleri, çekirdek malzemeler, boyalar ve metalik katkı maddeleri gibi ek bileşenler içermektedir. Bu ek bileşenler, geri dönüşüm prosedürlerini karmaşıklaştıran karmaşık çok fazlı atık türlerinin oluşmasına neden olmaktadır. Üçüncüsü, KETP'ler için standart bir bileşimin olmaması, atık ürünler arasında değişkenlik yaratarak geri dönüşüm altyapısını geliştirmeyi karmaşık bir görev haline getirmektedir. Son olarak, KETP atığı içindeki farklı bileşimlerin tanımlanması teknik olarak zor olup, bu durum toplama ve ayırma sürecini engellemektedir. Bu engellerin üstesinden gelmek, KETP'lerin geri dönüştürülmesinin çevresel faydalarının kilidini açmak ve bu malzemelerin yaşam döngülerinin sonunda işlenmesinde sürdürülebilir uygulamaları ilerletmek için çok önemlidir (Fang ve Shiqiang 2006).

1.1.2 Karbon Elyaf Teknolojisindeki Yenilikler ve İlerlemeler

Özellikle polimer kompozitlerde üstün mekanik özelliklere sahip yüksek performanslı malzemelere olan talep artmaktadır. Gelişmiş elyaf kompozitler çekme yükü altında mukavemet gösterirken, sıkıştırma mukavemetleri bu kompozitlerin kullanılmasında olumsuz bir karakteristik özellik olarak değerlendirilmektedir. Bu sorunun çözümü için, küçük bir oranda sert nanopartiküllerin polimer matrislerine dahil edilmesinin, mekanik özellikleri önemli ölçüde artırmada oldukça etkili olduğu kanıtlanmıştır. Bu tür nanokompozitlerin, çeşitli endüstriyel uygulamalarda gelişmiş güç ve dayanıklılık taleplerini karşılamada artan önemi olduğu rapor edilmektedir

(Robert ve Remy 2012). Örneğin, Hu ve arkadaşları yaptıkları çalışmada karbon nanotüpler (KNT) ile sprey kaplama yoluyla karbon elyaf (KE) yüzey pürüzlülüğünü arttırmak için uygun maliyetli bir yöntem geliştirmiştir (Chao ve Xinwen 2019).

Otomotiv yakıt verimliliğini optimize etme kapsamında yapılan çalışmalarda, karbon elyaf kullanılan otomotiv bileşenlerindeki birincil yükleme yolları boyunca cam elyaf takviyeli kompozitlerin karbon elyaf takviyeli kompozitlerle beraber kullanılması ile uygun maliyet olanakları araştırılmaktadır. Benzer şekilde hibrit kompozitlerin özelliklerini araştırmak, gelişmiş yakıt verimliliği ve azaltılmış çevresel etki için hafif tasarım ve yapısal bütünlük arasında bir denge kurmak için çeşitli istifleme dizilerinin araştırıldığı çalışmalar mevcuttur (Jin ve Khunlavit 2020). Karbon elyaf kompozitler, araç hafifletme için umut vaat ederken, yüksek maliyetleri ve olumsuz çevresel etkileri nedeniyle havacılık dışı uygulamalarda kullanım halen sınırlı olup, ürün geliştirme çalışmaları devam etmektedir. Geri dönüştürülmüş elyaf kullanımının sağlayabileceği avantaj, düşük mekanik performans ve işleme zorlukları nedeniyle henüz gelişme aşamasındadır. Hizalı, paralel kesikli liflerden oluşan bant formunda malzemelerin kompozit yapılar içinde kullanımı ile ilgili çalışmalar da bu alanda önemli araştırma konuları arasındadır. Geri dönüşüm ve kesikli lif yapısındaki elyaf takviyesi ile üretilen kompozitlerde mekanik ve üretim sınırlamalarının üstesinden gelmek amacı ile hidrodinamik yatırma yöntemi kullanılarak üretilen dokusuz yüzey yapılı elyaf oryantasyonlu kompozit çalışmaları yenilikçi çözüm önerileri arasında sayılabilecektir. (Zhe ve Thomas 2020).

Otomotiv sürdürülebilirliği arayışında, karbon elyaf uygulamaları gelecek uygulamalar için büyük önem taşımaktadır. Otomotiv endüstrisi, gelişmiş yakıt verimliliği için hafif çözümler ararken, karbon elyaf çok önemli bir malzeme olarak ortaya çıkmıştır. Bununla birlikte, üretim maliyetleri ve çevresel etki gibi zorluklar, sürdürülebilir yaklaşımların gerekliliğinin altını çizmektedir.

Bu tez çalışmasında, karbon elyaf takviyeli kompozit malzemelerin otomotiv tasarımındaki potansiyelleri değerlendirilerek karbon elyaf uygulamalarındaki güncel gelişmeler araştırılacaktır. Çalışmada ayrıca yenilikçi sürdürülebilirlik yaklaşımları ortaya konarak, daha çevre dostu ve verimli bir otomotiv endüstrisinin gidişatını şekillendirebilecek içgörülere katkıda bulunulması amaçlanmaktadır.

1.2 Araştırma Sorusu ve Araştırma Yöntemi

1.2.1 Araştırma Sorusu

Çevresel sürdürülebilirlik konusunda artan endişeler ve çeşitli endüstrilerin karbon ayak izini azaltmaya yönelik acil ihtiyaçları dikkate alındığında, otomotiv sektörü bu dönüşüme en hızlı adapte olması beklenen sektördür. Bu dönüşüm sürecinde araç tasarımı ve üretiminde devrim yaratma potansiyeline sahip yüksek mukavemetli, hafif bir malzeme olan karbon elyaf araştırmaları umut vaat eden araştırmalar arasındadır. Bununla birlikte, kabul edilen faydalarına rağmen, karbon elyaf gelecek beklentileri ve otomotiv endüstrisindeki çok yönlü uygulama potansiyelinin gerçekleşmesi için aşılması gereken çok farklı zorluklar olduğu bilinmektedir.

Otomotiv endüstrisi, çevre dostu alternatiflere yönelik her zaman katı emisyon standartları ve tüketici taleplerini karşılamaya odaklı sorunların aşılmasına odaklanmışken, karbon elyaf kullanımı bu alanda potansiyel çözümler geliştirme potansiyeli olan bir alan olarak yalnızca araç performansını artırmakla kalmayıp aynı zamanda genel çevresel etkiyi azaltmak için de umut vaat etmektedir. Karbon elyaf bileşenlerinden oluşan kompozitlerin araçlara entegrasyonu ile daha hafif ve yakıt açısından daha verimli araç tasarım ve üretimleri mümkün olabilmekte, böylece sera gazı emisyonlarında önemli bir azalmaya katkı sunmak mümkün olabilmektedir.

Bu araştırma, otomotiv sektöründe karbon elyaf takviyeli kompozit kullanımının gelecekteki yörüngesini çevreleyen kritik soruları ele almayı amaçlamaktadır.

- Karbon takviyeli kompozitlerin otomotiv sektöründe araç bileşenleri olarak yaygın kullanımının benimsenmesini engelleyen mevcut zorluklar ve engeller nelerdir?
- Karbon elyaf, otomotiv endüstrisinde araç tasarımında, üretim süreçlerinde ve genel sürdürülebilirlikte inovasyon için ne gibi fırsatlar sunmaktadır?

- Ek olarak, bu tür malzemelerin daha geniş ekolojik etkileri ve yaşam döngüsü analizi göz önüne alındığında, karbon elyaf takviyeli kompozitlerin otomotiv üretimine entegrasyonu ile ilişkili sürdürülebilirlik yaklaşımları nelerdir?

1.2.2 Araştırma Yöntemleri

Bu çalışmada, belirli bir konudaki mevcut bilgileri kapsamlı bir şekilde sentezleme yöntemi ile sistematik bir literatür taraması yaklaşımı benimsenmiştir. Sistematik literatür taraması, ilgili literatürü tanımlamak, seçmek ve analiz etmek için yapılandırılmış ve şeffaf bir süreci içermektedir.

Bu çalışma, otomotiv endüstrisinde kullanılan karbon takviyeli kompozitler ile ilgili sistematik bir yaklaşım izleyerek, kurgulanmıştır.

1.2.3 Veri Toplama Kaynakları

Bu çalışmanın birincil veri kaynakları, çeşitli bilimsel literatür kaynaklarıdır. PubMed, ScienceDirect, IEEE Xplore ve Google Scholar gibi akademik veri tabanları, karbon elyaf teknolojisi, otomotiv mühendisliği ve sürdürülebilirlik ile ilgili hakemli makaleler, konferans bildirimleri ve akademik yayınlar veri kaynaklarını oluşturmuştur. Bu veri tabanları, incelemeye dahil edilmek üzere ilgili literatürü belirlemek için önceden tanımlanmış arama terimleri ve kriterleri kullanılarak sistematik olarak taranmıştır.

Akademik kaynaklara ek olarak, endüstri içgörülerini, pazar eğilimlerini ve gelecek beklentilerini toplamak için Otomotiv Mühendisleri Derneği (SAE) ve otomotiv üreticileri gibi kuruluşların sektöre özel veri tabanları ve raporlarından yararlanılmıştır. Bu endüstri kaynakları, otomotiv sektöründe karbon elyafın pratik uygulamaları hakkında bakış açılarının yanı sıra teknolojik gelişmeler, pazar dinamikleri ve sürdürülebilirlik hususları hakkında öngörü oluşması için kullanılmıştır.

Ayrıca, akademik literatürü sektöre özgü veriler, tahminler ve pazar analizleri ile desteklemek için karbon elyaf endüstrisi raporları ve pazar araştırma firmaları gibi kaynaklardan gelen raporlardan yararlanılmıştır. Bu çalışma, çok çeşitli kaynaklardan yararlanarak, otomotiv endüstrisinde karbon elyafın mevcut durumu ve gelecekteki beklentileri hakkında kapsamlı bir genel bakış sağlamayı amaçlamaktadır.

1.3 Amaç

Bu literatür araştırmasında, otomotiv sektöründeki karbon elyaf takviyeli kompozit uygulamalarının çok yönlü boyutlarını ortaya çıkarmayı amaçlayan kapsamlı bir araştırmaya odaklanılmıştır. Konu aşağıdaki kapsamda ele alınacaktır:

- Otomotiv endüstrisindeki mevcut karbon elyaf takviyeli kompozit uygulamalar
- Karbon elyaf teknolojisindeki gelişmeler
- Karbon elyaf kullanımının fayda ve zorlukları
- Sürdürülebilirlik yaklaşımları
- Pazar eğilimleri ve gelecek beklentiler
- Gelecekteki araştırma ve endüstri uygulamaları için öneriler

1.4 Çalışmanın Kapsamı

Tez kapsamında sürdürülebilirlik hususlarına odaklanarak küresel otomotiv endüstrisindeki karbon elyaf takviyeli kompozit kullanımının mevcut ve gelecekteki uygulamalarının kapsamlı bir analizinin yapılması amaçlanmıştır. Çalışmada, tarihsel gelişmeler ve gelecekteki eğilimler göz önünde bulundurularak bölgesel ve coğrafi farklılıklara ilişkili olarak sorgulanacaktır. Ayrıca otomotiv sektöründe gelişmekte olan elektrikli araç pazarlarına vurgu yapılarak binek ve ticari araçların potansiyelleri incelenecektir. Üretim süreçleri ve tasarım metodolojileri de dahil olmak üzere karbon elyaf takviyeli kompozit üretimindeki teknolojik gelişmeler incelenecektir. Yaşam döngüsü değerlendirmeleri ve geri dönüştürülebilirlik gibi sürdürülebilirlik parametreleri diğer temalar olacaktır. Tüketici tercihleri ve endüstri eğilimleri de dahil olmak üzere pazar dinamikleri, ekonomik fizibilite ve pazar kabulü açısından

değerlendirilecektir. Araştırma, otomotiv uygulamalarında karbon elyaf takviyeli kompozit entegrasyonu ile ilgili zorluklar ve fırsatlar hakkında bütünsel bir anlayış sağlamak için malzeme bilimi, mühendislik, ekonomi ve çevre biliminden içgörüler elde ederek disiplinler arası bir yaklaşım ile ortaya konacaktır.

1.5 Konunun Önemi

Karbon elyaf takviyeli kompozit uygulamalarının gelecek beklentileri ve otomotiv endüstrisindeki uygulamaları üzerine yapılan bu literatür araştırmasında; karbon elyaf kullanımının neden olduğu çevresel etkiler, yaşam döngüsü analizi, geri dönüşüm potansiyeli ve ekolojik ayak izi hakkında kapsamlı bilgi verilmiştir. Bu bilgiler, ulaşımın çevresel ayak izini azaltmaya yönelik küresel girişimlerle uyumlu olarak otomotiv sektöründe sürdürülebilir uygulamaları konusunda karbon elyaf kullanımının önemi ve bu konuda farkındalık oluşturma açısından önemlidir. Çalışma ile ek olarak, karbon elyaf konusundaki teknolojik gelişmeler araştırılacak, endüstri paydaşları için son gelişmeler hakkında bilgilendirme yapılacaktır ve otomotiv üretiminde sürdürülebilirlik yaklaşımları karbon elyaf kullanım boyutu ile araştırılacaktır. Piyasa eğilimlerinin ve gelecekteki beklentilerin değerlendirilmesi, karar vericiler, yatırımcılar ve politika yapıcılar için önemli olup, ekonomik uygulanabilirlik ve potansiyel pazarlar konularında öngörü yapılabilmesinde faydalı olacaktır. Tez çalışması ile malzeme bilimi ve mühendislik uygulamaları incelenecek ve böylece gelişmiş malzemeleri optimize etmek isteyen araştırmacılar, mühendisler ve üreticiler için derlenmiş bilgiler ortaya konacaktır. Sürdürülebilirlik yaklaşımları kapsamındaki veriler ile politika oluşturma ve mevzuata uygunluk konularına katkıda bulunularak otomotiv endüstrisinde çevre dostu uygulamaları teşvik eden kılavuzların geliştirilmesine rehberlik edilebilecektir. Ayrıca, araştırma ile akademik çalışmalar, endüstri uygulamaları ve kurumsal sorumluluk girişimleri için destekleyici bilgiler derlenmiş olacaktır. Genel olarak, bu araştırma, konu ile ilgili mevcut zorlukları ele alan ve otomotiv endüstrisinin sürdürülebilir geleceğini şekillendirmek için ileriye dönük bir bakış açısı sağlayan bir başvuru kaynağı olarak yüksek lisans tez çalışması çerçevesine uygun olarak bilgi derleme üretme hedefi gerçekleştirilmiş olacaktır.

2. LİTERATÜR

2.1 Otomotiv Endüstrisinde Karbon Elyaf Kullanımı

Bhambere (2018), araç üretiminde kullanılan karbon elyaf ve karbon elyaf takviyeli kompozit malzemelerle ve araçlarda yoğun olarak kullanılan alüminyum, çelik ve plastik gibi geleneksel malzemelerin karşılaştırılması hakkında ayrıntılı bir açıklama yapmıştır. Tanınmış otomobil markaları tarafından kullanılan üretim teknolojileri, malzemeler ve üretim yöntemleri karşılaştırılmıştır. Makalede çelik, magnezyum, alaşımlar ve kompozitler gibi farklı malzemelerin performans özellikleri KETK ile kıyaslanmıştır. KETK'ye ait üstünlükleri belirtilmiş, ayrıca aracın farklı bölümleri için mevcut ve potansiyel uygulamalar hakkında bilgi verilmiştir. Açıklamalara göre, karbon takviyeli kompozit malzemeler, şasi çerçevesi üzerinde maksimum deformasyonun meydana geldiği doğal frekansta yapısal çelik-52'ye kıyasla daha üstün özellikler sergilemekte ve ağırlıktaki azalma sayesinde enerji verimliliğinde iyileşme mümkün olmaktadır. Aracın kaputu için kullanılan karbon takviyeli yapılar ile metal olan kaputa göre beşte biri oranında daha hafif, ancak metal kadar mukavemetli ve sert malzeme geliştirilmiş olduğu ifade edilmektedir. Böylece otomobil üreticileri için çelik ve alüminyum malzeme dışında daha fazla tasarım esnekliği sunulması sağlanmaktadır.

Zhang ve Chaisomba (2017) göre, karbon elyaf takviyeli epoksi ve karbon elyaf takviyeli plastik (KETP), karbon elyaf içeren son derece güçlü ve hafif elyaf takviyeli polimer malzemelerdir. KETP iki farklı elementten (karbon elyaf ve epoksi) oluştuğundan ve malzeme özellikleri bu iki elemente bağlı olarak tanımlanabilmektedir. Takviye özelliği, KETP'ye, sertlik ve dayanıklılık özelliği kazandırmakta, çelik gibi izotropik malzemelerin aksine, KETP malzemelerde iseilen aksel yönde malzeme mukavemet özellikleri geliştirilebilmektedir. KETP'nin özellikleri, karbon elyaf yerleşimi ve karbon elyaf oranına bağlı olarak değişmektedir. Düşük termal genişleme katsayısı, iyi yorulma direnci ve yüksek çekme / bası dayanımı özellikleri ile birlikte karmaşık şekillerin üretimi için kolaylık gibi çok sayıda olumlu özellikleri nedeniyle KETP, birçok uygulamada çelik ve demir gibi

geleneksel malzemelere alternatif malzemeler haline gelmiştir. KETP, otomobillerde yüksek mukavemet ve toplam ağırlık azalması sayesinde tamponlarda kullanılmaktadır. KETP üretim maliyetlerinin yüksek olması halen bir dezavantaj olmasına rağmen düşük ağırlık ve daha yüksek mukavemet özelliklerinin sağladığı avantajlar önemini korumaya devam etmektedir.

Kompozit malzemelerin otomotiv endüstrisindeki kullanımı üzerine (Ahmad ve Markina 2023) tarafından yapılan araştırmada kompozit malzemelerin otomobil tasarımında ve üretimindeki rolü ele alınmaktadır. Kompozit malzemeler, çeşitli endüstrilerde kullanılan, sağlam, hafif ve yüksek performanslı malzemelerdir. Bu malzemeler genellikle plastik veya polyester matris reçine ile cam, karbon veya aramid elyafının bir araya getirilmesiyle elde edilmektedir Tablo 2.1’de ortalama bir taşıt aracının imalatında kullanılmakta olan malzemelerin ağırlıkça oran aralıkları verilmektedir. Araştırmacının belirttiği gibi, bu malzemelerin otomotiv endüstrisindeki kullanımı, araçların hafifletilmesi ve çevre dostu olmaları nedeniyle tercih edilmektedir.

Tablo 2.1: Kompozit malzemelerin araçlardaki ağırlık azaltımına etkileri (Ahmad ve Markina 2023)

Hafif malzeme	Ağırlık azaltımı
Magnezyum	% 30 – 70
Karbon elyaf takviyeli	% 50 – 70
Alüminyum ve alüminyum matrisli kompozitler	% 30 – 60
Titanyum	% 40 – 50
Cam elyaf takviyeli	% 25 – 35
Gelişmiş yüksek mukavemeti çelik	% 15 – 25
Yüksek mukavemetli çelik	% 10 – 28

Geleneksel malzemelere kıyasla otomotivde kullanılan kompozitlerin avantajları arasında hafiflik, mukavemet ve şekillendirilebilirlik gibi özellikler bulunmaktadır. Bu avantajlar, araçların yakıt tasarrufu yapmasını ve maliyetlerin düşürülmesini sağlar. Araştırmanın sonuçlarına göre, otomotiv endüstrisindeki kompozit kullanımının geleceğinin, talep artışı ve çevre dostu teknolojilere olan geçişin hızı ile ilişkili olacağı ifade edilmektedir. Elektrikli ve alternatif yakıtlı araçlara olan talebin artması ile, kompozit malzemelerin öneminin daha da artacağı

ifade edilmektedir. Sonuç olarak, araştırma, otomotiv endüstrisinde kompozit malzemelerin kullanımı konusundaki mevcut durumu ve gelecekteki eğilimleri açıklamaktadır.

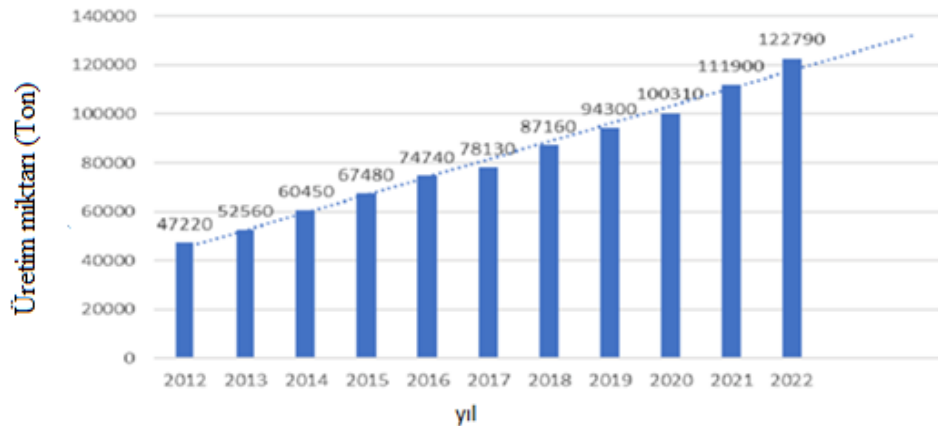
Mubashir ve Muttana (2019), araç üretiminde kullanılan malzemelerin kapsamlı olarak tanımladığı çalışmada otomotiv üretiminde kullanılan malzeme çeşitlerinin özelliklerini karşılaştırmaktadır. Makalede çelik, magnezyum, alaşımlar ve kompozitler gibi farklı malzemeler hakkında genel bilgilendirme yapılmakta, sonrasında bu malzemelerin aracın farklı bölümlerinde potansiyel uygulamaları hakkında öneri geliştirilmektedir. Çalışmada tanımlanan diğer malzeme sınıfı, takviye olarak sentetik veya doğal elyaf çeşitlerinin kullanıldığı kompozit ve plastiklerdir. Sentetik elyaf çeşitleri ile üretilen kompozit malzemelerin daha geleneksel kompozitler olduğu ve çevresel kaygılar nedeniyle otomotiv endüstrisinde popülerlik kazandığı ifade edilmektedir. Kompozitlerle ilgili olarak, maliyet yüksekliğinin bu malzemelerin yaygınlaşması ve kullanımındaki ana engellerden biri olduğu ifade edilmektedir. Bu nedenle, bu makalede bir maliyet analizi de sunulmaktadır. Yazar tarafından farklı otomotiv parçalarının üretimi ve imalatının bir incelemesi de sunulmaktadır.

İnan and Ceviz (2020), yaptığı çalışmada, otomotiv sektöründe kullanılan teknik tekstillerin lif özelliklerinin incelenmesine odaklanmaktadır. Çalışma, günümüzde artan trafik yoğunluğu ve buna bağlı olarak oluşan çevresel sorunlar göz önünde bulundurularak gerçekleştirilmiştir. Özellikle, trafiğin en yoğun olduğu saatlerde dahi otoyolların yetersiz kalması, trafik sorunlarının çözümü için geliştirilen alternatiflerin maliyetli olması gibi faktörler, otomotiv endüstrisinde akıllı sistemlerin ve uygulamaların kullanılmasının zorunlu hale geldiği ifade edilmektedir. Bu bağlamda, otomobillerde kullanılan teknik tekstillerin önemi ve bu tekstillerin oluşturulmasında kullanılan lifler üzerinde durulmuştur. Araştırma, otomobillerin çeşitli bölgelerinde kullanılan tekstil materyalleri ve bu materyallerin filtreleme, izolasyon, dekorasyon ve konfor gibi özellikler açısından sunduğu avantajları ele almaktadır.

Teknik tekstiller, günümüzde çeşitli alanlarda kullanılan ve yüksek teknik özelliklere sahip malzemelerdir. Bu malzemeler, ısıl, elektriksel, mekaniksel ve dayanıklılık gibi ek teknik fonksiyonlara sahiptir. Türk tekstil sektörü de bu alanda

önemli gelişmeler kaydetmektedir. Özellikle, otomotiv endüstrisinde kullanılan teknik tekstiller, araçların iç mekanlarında izolasyon sağlamak, dekorasyon amacıyla kullanılmak ve sürüş konforunu arttırmak için tasarlanmaktadır. Bu tür tekstil ürünlerinin kullanımı, yakıt tasarrufu sağlamak ve çevre dostu araçlar tasarlamak amacıyla giderek artmaktadır. Sonuç olarak, araştırma, otomotiv endüstrisinde kullanılan teknik tekstillerin lif özelliklerinin önemini vurgulamakta ve bu alanda yapılan çalışmaların önemine dikkat çekmektedir.

Xiaosong (2022), çalışmasında son birkaç on yılda karbon elyafı ile ilgili yürütülen kapsamlı araştırma ve geliştirme faaliyetlerini incelemiştir. İncelemede öncelikle karbon elyaf endüstrisindeki en önemli iki konu olan poliakrilonitril (PAN) ve mezofaz aralığı (mesophase pitch) (MA) konularına odaklanılmaktadır. PAN ve MA yapısının ve bileşiminin, ortaya çıkan karbon elyafların özellikleri üzerinde nasıl etken olduğu sorgulanmaktadır. Karbon elyaf üretiminde, gelişmiş performans elde etmek için olası farklılıklar, işleme koşulları ve süreç optimizasyonu hakkında bilgi verilmektedir. İnceleme ayrıca, küresel karbon elyaf tüketimi ve büyük üreticiler hakkında bilgi vererek, zaman içinde üretim ve tüketimde istikrarlı bir artış olduğunu rapor etmektedir. Şekil 2.1 karbon elyafların küresel ölçekte tahmini tüketimini göstermektedir. Yıllar içinde karbon elyaf kullanımındaki artış veya azalışı belirten bu grafik, farklı endüstrilerdeki talep ve kullanım eğilimlerini ortaya koymaktadır. Şekildeki veriler, karbon elyafların sürdürülebilirlik ve gelişim açısından önemini vurgulamaktadır.



Şekil 2.1: Tahmini küresel karbon elyaf tüketimi (Xiaosong 2022)

Karbon elyafların üretim süreci, stabilizasyon, karbonizasyon ve isteğe bağlı grafitleştirme dahil olmak üzere sonraki adımlarla stabilize edilmiş öncü elyafların kontrollü pirolizini içerir. Ortaya çıkan lifler, kristallik, moleküler yönelim ve karbon içeriği gibi faktörlere bağlı olarak çeşitli mekanik özellikler sergilemektedir. İnceleme ile karbon elyaflarda modül ve ısıtma işlem sıcaklıklarına göre sınıflandırma yapılmakta çeşitli uygulama alanları ve özellikleri vurgulanmaktadır. İncelemede, karbon elyaf üretimi için birincil öncüler olarak PAN ve MA'nin önemini altı çizilmekte, maliyet azaltma, mukavemet iyileştirme ve alternatif öncü geliştirme gibi devam eden zorluklar hakkında bilgi verilmektedir. Mekanik özellikleri geliştirmek için karbon elyaf mikro yapısını optimize etmenin önemini vurgulanmakta ve PE ve lignin gibi polimerlerin potansiyel düşük maliyetli öncü malzemeler olarak değerlendirilmesi önerilmektedir.

Özsarıkaya ve Yetgin (2023), tarafından yürütülen araştırmada, poliamid 66 (PA66) polimeri ile farklı oranlarda karbon elyaf (KE) takviyeli PA66 kompozitlerinin tribolojik özellikleri değerlendirilmektedir. Araştırma, çelik diske karşı kuru ortam şartlarında gerçekleştirilen aşınma deneyleri üzerine odaklanmıştır. Çalışmaya karbon elyaf katkılı PA66 kompozitlerinin çift vidalı ekstruderde granül olarak üretilip enjeksiyon makinesi ile aşınma test numunelerinin basılmasıyla başlanmıştır. Aşınma testleri farklı kayma hızları ve yükler altında gerçekleştirilmiş ve sonuçlar incelenmiştir. Araştırmanın bulguları, karbon elyaf katkısının PA66 polimerinin tribolojik özelliklerini önemli ölçüde iyileştirdiğini göstermektedir. Özellikle %30 oranındaki karbon elyaf katkılı PA66 kompozitin, sürtünme katsayısı ve aşınma direnci açısından katkısız PA66'ya göre belirgin bir avantaj sağladığı belirlenmiştir. Bu bulgular, otomotiv endüstrisi gibi alanlarda kullanılabilecek yeni ve performansı yüksek malzemelerin geliştirilmesinde önemli bir adım olarak değerlendirilebilecektir.

Ekşi ve Genel (2016), tarafından yapılan araştırmada, tek yönlü ve dokuma liflerle güçlendirilmiş epoksi kompozitlerin mekanik davranışları deneysel olarak incelenmiştir. Çalışmada, kompozit numunelerin hazırlanmasında cam, aramid ve karbon elyaf dokuma çeşitlerinin yanı sıra tek yönlü cam ve karbon elyaf kullanılmıştır. Kompozitlerin mekanik özelliklerini belirlemek için çekme, basma ve kesme testleri yapılmıştır. Sonuçlar, tek yönlü karbon elyafla cam elyafa kıyasla üstün performans sergilediğini ve 0° yönelimli tek yönlü liflerin 90° yönelimli liflerden daha

iyi mekanik özellikleri olduğunu göstermektedir. Ayrıca, aramid elyaf takviyeli kompozitler, dokuma formlardaki cam ve karbon elyafa kıyasla daha yüksek mekanik özellikler göstermiştir.

Tablo 2.2'de verilen deneysel bulgulara göre, 90° oryantasyona kıyasla 0° yönelimli tek yönlü elyaf kompozitlerde mekanik özelliklerde önemli gelişmeler olduğu görülmektedir. Örneğin, 0° cam epoksi kompozitlerdeki çekme mukavemeti iyileştirme oranı, 90° yönelimli cam elyaf kompozitlerden 8,3 kat daha yüksek düzeydedir. Benzer şekilde, 0° yönelimli karbon elyaf epoksi kompozitlerdeki iyileştirme oranı, 90° yönelimli karbon elyaf kompozitlere göre 22,3 kat daha yüksek olarak belirlenmiştir.

Tablo 2.2: Tek yönlü elyaf takviyeli epoksinin çekme mukavemeti oranı (Ekşi ve Genel 2016)

Tek yönlü elyaf takviyeli epoksi	Çekme dayanımı (Mpa)
0° Cam/90° Cam	8,3
0° Karbon/90° karbon	22,3
0° Karbon/0° Cam	1,91
90° Karbon/90° Cam	0,71

Araştırmada, tek yönlü karbon elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin, cam elyaf takviyeli epoksi kompozitleri geride bırakarak en iyi mekanik performansı sergilediği vurgulanmıştır. Ek olarak, mekanik özelliklerin 0° yönelimli karbon elyaf kompozitlerde 90° yönetime kıyasla daha güçlü olduğu bulunmuştur. Aramid elyaf takviyeli epoksi kompozitler, dokuma elyaf türleri arasında üstün mekanik özellikler göstermiş, dokuma aramid kompozitlerde gerilme mukavemeti, dokuma cam kompozitlere göre 1,5 kat daha fazla bulunmuştur. Bu bulgular, çeşitli elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin mekanik davranışı hakkında değerli bilgiler sağlayarak, belirli mühendislik uygulamaları için malzemelerin seçimine ve optimizasyonuna yardımcı olabilecek bilgiler olarak değerlendirilmiştir. Baltacı and Sarıkanat (2011), tarafından gerçekleştirilen araştırmada, aramid ve karbon lif takviyeli termoplastik kompozit kirişlerin impuls girdi altındaki titreşim davranışlarını incelenmektedir. Kompozit malzemelerin günümüzdeki yaygın kullanımı, özellikle cam, karbon, aramid gibi liflerin takviyeli kompozit malzemelerdeki önemini artırmıştır. Aramid ve karbon lifler, düşük yoğunluk, yüksek darbe dayanımı, aşınma dayanımı, yüksek yorulma

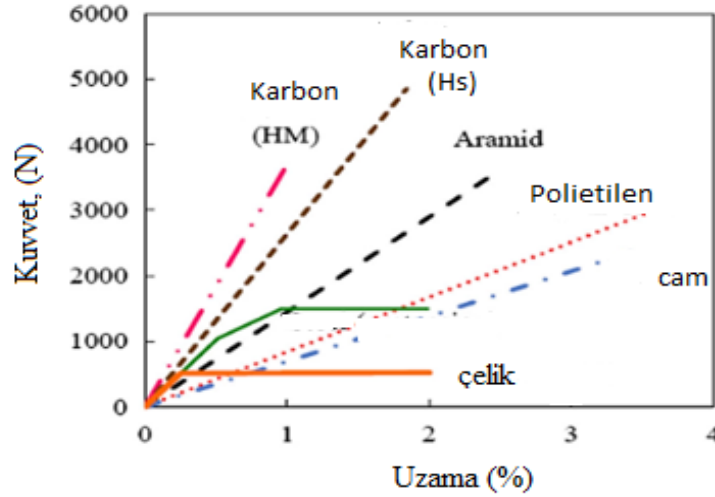
dayanımı ve titreşim sönümlenme gibi özelliklere sahiptirler. Bu özellikler bu yapıların, özellikle askeri kasklar, kurşun geçirmez yelekler, uzay ve uçak sanayi, otomotiv sanayi gibi birçok alanda kullanılmalarını sağlamaktadır. Termoplastik malzemeler ise, üstün kırılma tokluğu, uzun raf ömrü, geri dönüşebilirlik gibi özellikleriyle tercih edilmektedir. Araştırmada, farklı açı oryantasyonlarına sahip aramid ve karbon lif içeren kıvrımsız kumaş takviyeli termoplastik matrisli kompozit malzemeler üretilmiştir. Bu malzemelerden çıkarılan kiriş numuneleri, darbe yüklerine maruz bırakılarak darbe yükü altındaki titreşim davranışları incelenmiştir.

Kompozit malzemelerin yapısal özelliklerini etkileyen birçok faktör bulunmaktadır. Bu faktörler arasında lif takviye malzemesinin türü, liflerin açı oryantasyonları ve matris malzemesi gibi unsurlar yer almaktadır. Araştırmanın sonuçlarına göre, aramid lif takviyeli kompozitlerin karbon lif takviyeli kompozitlere göre doğal frekanslarının ve sönümlenme zamanlarının daha küçük olduğu görülmüştür. Ayrıca, kompozit plakaların çıkarılan numune doğrultularına bağlı olarak anizotropik davranış gösterdiği tespit edilmiştir.

Das ve Ghosh (2019) polimer matrisli kompozitlerde (PMK) karbon elyaf kullanımının önemine ve yaygın kullanımına odaklanmaktadır. Karbon elyaf kullanımını yüksek mukavemet-ağırlık oranı, özellikle düşük ağırlık ve korozyon direncinin çok önemli olduğu uygulamalarda kompozit malzeme çelik gibi geleneksel malzemelere enerji açısından verimli bir alternatif olarak konumlandırmıştır. Karbon elyaf takviyeli PMK'ler, olağanüstü mukavemetleri ve modülleri nedeniyle havacılık, otomotiv, spor malzemeleri ve çeşitli yapısal uygulamalarda önde gelen malzemeler olarak ortaya çıkmıştır. İnceleme, karbon elyaf bazlı polimerik kompozitlerin hazırlanmasını, özelliklerini ve yapısal önemini kapsamlı bir şekilde tartışmakta ve endüstrilerdeki çeşitli uygulamaları hakkında bilgi vermektedir.

Karbon elyaf (KE), hafiflik, yüksek mukavemet, sertlik ve yorulma direnci gibi üstün özellikleri nedeniyle gelişmiş yapısal kompozit malzemeler için birincil hammadde haline gelmiştir. İnceleme, KE bazlı polimerik kompozitlerin yapısal öneminin altını çizerek havacılık, rüzgâr türbini kanatları, spor malzemeleri ve ulaşım sektörlerinde yaygın kullanımlarını vurgulamaktadır. Gerilim-uzama grafiklerinin karşılaştırılması, KE'nin diğer yapısal malzemelere göre üstün yük taşıma kabiliyetini göstermekte ve çeşitli mühendislik uygulamaları için potansiyelini vurgulamaktadır.

Ayrıca, inceleme, farklı öncü bazlı karbon elyaf kompozitlerin hazırlanması ve özellikleri, KE polimer kompozitlerin üretim teknikleri ve teknoloji uzmanlarının karşılaştığı zorluklar hakkında bilgi verilmektedir. Cam, seramik ve bor gibi diğer ticari olarak temin edilebilen lifler de çeşitli yapısal uygulamalarda kullanılmaktadır. Ancak, %0 ile %4 arasındaki gerinimlerde, yük taşıma yeteneği diğer yapısal malzemelerden çok daha iyidir ve bu durum Şekil 2.2'de açıkça gösterilmiştir



Şekil 2.2: Karbon elyafın kuvvet – uzama grafiğinin diğer malzemelerle karşılaştırılması (Ghosh 2019)

KE bazlı polimerik kompozitler gibi çok fazlı kompozit malzemeler, olağanüstü verimlilik gösteren KE takviyesi ile ayrı bileşen fazlarından arzu edilen bir özellik kombinasyonu sunmaktadır. İnceleme, karbon elyaf ve polimer matris arasındaki etkileşimden elde edilen yapısal faydaları açıklığa kavuşturarak, KE bazlı polimerik kompozitlerin takviye potansiyelini detaylandırmaktadır. Polimer matrisi ile etkileşimi arttırmak için karbon elyafın çeşitli modifikasyonları ve kompozitleri güçlendirmek için elyaf oryantasyonunun önemi tartışılmaktadır. İnceleme ayrıca, farklı elyaf kompozit işleme tekniklerini ve bunların yüksek teknoloji, mühendislik ve ulaşım sektörlerindeki uygulamalarını araştırarak, KE bazlı polimerik kompozitler için yapısal uygulamaların gelecekteki eğilimleri hakkında fikir vermektedir.

Çakmakkaya ve Oylu (2023), tarafından yapılan çalışmada, otomotiv endüstrisinde yaygın olarak kullanılan spoyler tasarımında malzeme seçiminin ve tasarımın önemini vurgulamaktadır. Çalışmada, binek araçlarda sıklıkla kullanılan spoylerlerin aerodinamik etkileri ve kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri incelenmiştir. Özellikle, spoylerlerin araç üzerindeki aerodinamik performansı

üzerinde durulmuş ve bu performansın aracın hızlanması ve stabilitesi üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir.

Karşılaştırmalı bir analiz yapmak için plastik ve karbon elyaf malzemelerden tasarlanan spoylerlerin mekanik özellikleri incelenmiştir. Bu analizde, her iki malzemenin çekme, basma ve burulma analizleri yapılmış ve elde edilen veriler karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, karbon elyaf malzemenin üretilmiş spoylerlerin daha üstün mekanik özelliklere sahip olduğunu göstermiştir. Karbon elyaf malzemenin yüksek dayanıklılığı ve hafifliği, özellikle yüksek hızlarda araçların aerodinamik performansını artırarak güvenliği sağlamada önemli bir rol oynamaktadır.

Bununla birlikte, plastik malzemelerin daha uygun maliyetli ve seri üretim için daha pratik olduğu belirtilmiştir. Ancak, yüksek performanslı araçlarda aerodinamik etkilerin önemli olduğu durumlarda, karbon elyaf malzemelerin tercih edilmesi önerilmektedir. Çalışma, otomotiv endüstrisinde spoyler tasarımında malzeme seçiminin ve tasarımın önemini vurgulayarak, gelecekteki araştırmalara ve uygulamalara yön vermektedir.

Ghossein ve Hassen (2018), tarafından yürütülen inceleme çalışmasında karbon elyaf takviyeli polimer kompozitlerin (KETPK) uygulamaları ve gelecekteki eğilimleri hakkında bilgi verilmekte, KEKM malzemelerin dayanıklılık-ağırlık oranı başta olmak üzere tüm üstün özellikleri ve bu özellikler sayesinde yapılabilecek mühendislik uygulamaları geleneksel metallerle kıyaslanarak açıklanmaktadır. KETPK lerin geniş kapsamlı uygulamaları, çok yönlülüğü ve olağanüstü özellikleri sayesinde havacılık, otomobil, imalat ve daha başka sektörlerdeki uygulamaları malzeme seçimi, endüstri performansı ve güvenlik standartları geliştirmedeki önemli rolü vurgulamaktadır. İncelemede, KETPK'nin yapısal önemi vurgulanarak ve özellikle kritik sektörlerdeki uygulamaları hakkında bilgi verilmekte; zorlu çevre koşullarında olağanüstü performans gerektiren uygulamalar için uygunluğu konusunda bilgi verilmektedir.

KETPK teknolojisindeki gelişmelere rağmen, çalışmada özellikle araştırma gerektiren teknik bilgi boşlukları ve zorlukları tanımlamaktadır. Bu zorluklar, maliyet ve üretkenlik açısından konvansiyonel elyaf ve KETPK arasında karşılaştırmalı çalışmalara duyulan ihtiyacın yanı sıra KETPK'nin uzun vadeli hizmet performansı ve geri dönüşümü ile ilgili çalışmalar olarak ortaya konmaktadır. Gelecekteki

araştırma fırsatları, maliyet azaltma, iyileştirmeleri ve yenilikçi atık bertarafı ve geri dönüşüm yöntemlerine odaklanmaktadır. Ek olarak, inceleme, hibrit kompozitlerdeki kusurları ölçmek için tahribatsız muayene yöntemleri geliştirmenin ve böylece yapısal bütünlük ve güvenliğin sağlanmasının önemini vurgulamaktadır.

İnceleme çalışmasında, KETPK'lerin geniş kapsamlı uygulamaları ve gelecekteki eğilimleri hakkında verilen bilgilere ek olarak KETPK'nin yapısal uzun ömürlülük, altyapı esnekliği ve endüstri performansı üzerindeki dönüştürücü etkisi belirtilmektedir. Konuyla ilgili çözülmesi gereken problemlerin çokluğu nedeni ile yeni fırsatların kilidini açmak için sürekli araştırma ve inovasyon ihtiyacı olduğu vurgulamaktadır.

2.2 Karbon Elyafının Gelişimi, Pazar Trendi ve Gelecek Beklentleri

2.2.1 Karbon Elyafının Gelişimi

Karbon fiber, havacılık, otomotiv ve hatta spor malzemeleri dahil olmak üzere çok çeşitli endüstrilerde hayati bir malzeme haline gelmiştir. Mukavemet-ağırlık oranı, korozyon direnci ve dayanıklılığı ile öne çıkan; hafif, yüksek mukavemetli bir malzemedir. Karbon fiberin gelişimi, yüzyılı aşkın bir süredir devam eden, rayon elyaf üretimi ile ilişkilendirilebilecek bir süreç olarak belirlenebilir. 1950'li yılların başlarında roket, uzay ve havacılık gibi ileri teknolojilerin gelişmesiyle birlikte, yüksek özgül mukavemete, özgül modüle ve yüksek sıcaklık dayanımına sahip yeni malzemelere acil ihtiyaç duyulmuştur (Url_1).

1950'lerin başında, Amerika Birleşik Devletleri'ndeki Wright Patterson Hava Kuvvetleri Üssü'nde yürütülen araştırma faaliyetleri kapsamında gerçekleştirilen karbon elyaf üretimi ve bu malzemedен üretilen roket nozulları ve burun konilerinin üretimi için başarı ile kullanılmaya başlanmıştır. 1956 yılında Amerika Birleşik Devletleri'ndeki United Carbide Corporation, "Thornel-25" ticari adı altında yüksek modüllü yapışkan bazlı karbon fiberi ticarileştirmiş ve karbon fiberin mukavemetini ve modülünü geliştirmek için gerilimli grafitleştirme teknolojisini geliştirmiştir. 1980'ler ve 1990'lar, karbon elyaf üretimi ve uygulama alanlarının geliştiği dönem olmuştur (Url_2).

Otomatik sarma makinelerinin piyasaya sürülmesi gibi üretim süreçlerindeki gelişmeler, daha hassas ve verimli karbon elyaf üretimi için gelişme alanı olarak görülmüştür. Karbon elyafın sunduğu ağırlık tasarrufunun performans ve verimliliği artırmak için hayati önem taşıdığı havacılık gibi endüstrilerde karbon elyaf takviyeli kompozitlerin kullanımı da artmıştır. Günümüzde karbon fiber, uçak parçaları, rüzgâr türbini kanatları, spor ekipmanları ve araba parça ve araba gövdeleri dahil olmak üzere çok çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır. Araştırmacılar, karbon fiberi daha uygun maliyetli, sürdürülebilir ve geri dönüştürülebilir hale getirmenin yeni yollarını araştırmaya odaklanmış; bu malzemenin önümüzdeki yıllarda yenilikçi endüstriyel süreçlerde daha da artan kullanım alanı bulacağı öngörülmüştür (Url_3).

2.2.2. Karbon Elyaf Takviyeli Kompozitlerde Sürdürülebilirlik Araştırmaları

Karbon elyaf takviyeli polimerlerin çeşitli endüstrilerde artan kullanımı maliyet etkinliği ve çevresel sürdürülebilirlik boyutları ile gelişmeye devam etmekte; bu kapsamda ayrıca verimli geri dönüşüm teknolojileri ile ilgili gelişmelerin önem kazandığı bilinmektedir (Xiang ve Ruibin 2016). Karbon elyaf kompozit atıkların mekanik olarak geri dönüştürülmesinin çevresel ve finansal fizibilitesini değerlendirdiği ve atık yönetimi stratejileri için kritik öngörülere ışık tuttuğu çalışmasında hafif ve yüksek mukavemet özellikleriyle bilinen KETP'lerin kullanımının özellikle havacılık ve otomotiv sektörlerinde arttığını ifade etmektedir. Karbon elyafa yönelik küresel talebin artmasıyla birlikte, üretim süreçlerinden ve kullanım ömrü sona ermiş ürünlerden kaynaklanan atıkların da orantılı olarak artması beklenmektedir. İşlenmemiş karbon elyaf üretimi sadece maliyetli değil, aynı zamanda enerji yoğun bir ürün olup; bu durum KETP atıklarının geri dönüşümünün ekonomik olarak gerçekleştirilmesinin mali ve çevresel olarak zorunlu hale getirmektedir. KETP malzemeleri için düzenli depolama, enerji geri kazanımlı yakma ve mekanik geri dönüşüm dahil olmak üzere çeşitli atık arıtma yöntemleri yenilikçi yöntemler olarak tanıtılmaktadır. Çalışmada Birleşik Krallık ve AB'deki mevcut atık düzenlemeleri karşılaştırılmış ve her bir arıtma seçeneğinin çevresel etkisini ve finansal performansı kapsamlı olarak değerlendirilmiştir. Küresel ısınma potansiyeli, birincil enerji kullanımı ve çöp sahası atığı üretimi gibi çevresel etkileri ölçmek için yaşam döngüsü envanter modelleri kullanılmaktadır. Düzenli depolama, çevresel etki

boyutuyla makul olmasına rağmen, malzeme geri kazanım girişimleri ile çelişmektedir. Yakma, enerji üretimi yoluyla birincil enerji tüketimini azaltabilirken, yanma sırasında ortaya çıkan karbon salımı nedeniyle önemli bir sera gazı yayıcısı olarak dezavantajlı hale gelmektedir. Mekanik geri dönüşüm, düzenli depolamaya kıyasla sera gazı emisyonlarını, birincil enerji kullanımını ve çöp sahası atık üretimini azaltmak için umut verici bir yol olarak tanımlanmaktadır. Bununla birlikte, yüksek operasyonel maliyeti ve sınırlı gelir akışı, finansal uygulanabilirlik için önemli zorluklar yaratmaktadır.

Çevresel sürdürülebilirlik ve ekonomik uygulanabilirliğin ikili zorunluluklarının kesiştiği karbon elyaf (KE) geri dönüşümü alanında, Meng ve McKechnie (2018) tarafından yürütülen araştırma, ileriye doğru atılmış önemli bir adımdır. Meng'in kapsamlı çalışması, otomotiv uygulamalarında rKE'yi (geri dönüşüm Karbon Elyaf) çevreleyen maliyet analizi ve pazar dinamiklerini incelemektedir. Otomotiv endüstrisinin verimlilik arayışının merkezinde, araç hafifletme stratejileri yer almaktadır. Bununla birlikte, işlenmemiş KE üretiminin yüksek maliyeti halen önemli bir engel teşkil etmekte; geri dönüşüm KE kullanımına yönelik araştırmaların önemi devam etmektedir.

Sürdürülebilirlik ve çevresel sorumluluğun giderek daha hayati önem taşıdığı kompozit üretim ortamında, Caltagirone ve Ginder (2021) 'nin çalışması, rKE kompozit malzemelere entegrasyonuna ilişkin bir öngörü sunmaktadır. Otomotiv üretiminde enjeksiyon kalıplama bileşiklerine odaklanan Caltagirone, geleneksel üretim süreçlerinin çevresel etkisini azaltmaya yönelik ihtiyacı ele alırken, aynı zamanda maliyet düşürme ve atık azaltma yollarını da araştırmaktadır. Caltagirone'nin araştırmasının merkezinde, rKE takviyeli kompozitlerin yapısal ve mekanik özelliklerinin incelenmesi yer almaktadır. Taramalı elektron mikroskobu ve X-ışını bilgisayarlı tomografi gibi gelişmiş görüntüleme tekniklerinin kullanıldığı çalışmada, malzemelerin mikro yapısı derinlemesine incelenmekte, lif hizalaması, boşluk konsantrasyonları ve arıza mekanizmaları hakkında önemli bulgular ortaya konmaktadır. Çalışma, rKE takviyeli kompozitlerin vande KE bazlı malzemelerin mekanik eşdeğerliğini göstererek, geri dönüştürülmüş elyafın uygulanabilirliğini doğrulamaktadır.

Witik ve Jérôme (2010), otomobil uygulamalarında hafif malzemelerin yaşam döngüsü maliyetleri ve çevresel performansı hakkındaki kapsamlı araştırmasıyla, otomotiv endüstrisinde devam eden sürdürülebilir çözüm arayışına ilişkin bilgiler sunmaktadır. Yaşam döngüsü değerlendirmesi ve üretim odaklı yaşam döngüsü maliyetlendirmesine odaklanan araştırma, kompozitlerin otomotiv tasarımına entegre edilmesiyle ilgili potansiyel avantajların ve zorlukların kapsamlı olarak incelenmektedir. Giderek daha sıkı hale gelen emisyon düzenlemeleri ve çevresel etkiyi azaltmak için artan baskı bağlamında, Witik ve Jérôme'yin çalışması, araç verimliliğini artırmak ve karbondioksit emisyonlarını azaltmak için önemli bir strateji olarak ağırlık azaltmanın önemini vurgulamaktadır. Malzeme seçiminin karmaşıklığını inceleyerek, ağırlık azaltmanın yalnızca araç performansını iyileştirmekle kalmayıp, aynı zamanda diğer araç bileşenlerinin küçültülmesini de kolaylaştırdığını ve böylece otomotiv sektöründeki genel verimlilik iyileştirmelerine katkıda bulunduğunu vurgulamaktadır.

Çelik gibi geleneksel otomotiv malzemelerinin potansiyel ikameleri olarak çeşitli hafif malzemelerin karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesi yer almaktadır. Witik, alüminyum ve magnezyum gibi metallerin önemli ölçüde ağırlık tasarrufu sağlamasına rağmen, bu malzemelerle parka üretim aşamalarıyla ilişkili artan çevresel yükler nedeniyle genel çevresel performanslarının her zaman beklentilerle uyumlu olmayabileceğini ortaya koymuştur. Cam takviyeli polimerler ve levha kalıplama bileşikleri dahil olmak üzere polimer kompozit malzemeler, otomotiv uygulamalarında ağırlığın azaltılması için umut verici alternatifler olarak ortaya çıkmaktadır.

Duval ve Heather (2006), araştırmasında, otomotiv plastikleri geri dönüşümünde ürün bilgilerinin kritik rolünü araştırmakta ve geri dönüşüm girişimlerinin fizibilitesini ve çevresel etkisini değerlendirmek için hem finansal hem de yaşam döngüsü değerlendirmelerine ilişkin içgörüler sunmaktadır. Kanada'nın önde gelen otomotiv söküm şirketi AADCO Automotive Incorporated'a (AADCO) odaklanan Duval'in çalışması, tüketici sonrası otomotiv plastikleri geri dönüşüm ağının kurulmasını çevreleyen temel soruları ele almaktadır. Otomobillerde hafif, dayanıklı plastiklerin artan kullanımı, artan yakıt verimliliği ve azaltılmış emisyonları gibi önemli faydalara yol açmıştır. Bununla birlikte, ömrünü tamamlamış araçlardan plastiklerin giderek daha fazla atılması, çöp sahası kapasitesi için zorluklar yaratmakta

ve enerji yoğun işlenmemiş plastik reçine üretimine olan talebi sürdürmektedir. Bu çevresel etkiyi azaltmak için sürdürülebilir bir çözüm olarak otomotiv plastiklerinin geri dönüştürülmesinin uygulanabilirliğini değerlendirmeyi amaçlamaktadır.

Finansal ve yaşam döngüsü değerlendirme modellerinin geliştirilmesi yoluyla, AADCO'nun önerilen bir geri dönüşüm ağına katılımıyla ilişkili potansiyel maliyetleri ve çevresel faydaları araştırdığı çalışmada sera gazı emisyonlarını ve enerji gereksinimlerini ölçerek, otomotiv plastikleri geri dönüşümünde çevresel sürdürülebilirlik ve finansal fizibilite arasındaki ilişkiyi ortaya çıkarmaktadır. Çalışmada elde edilen bulgulardan ilki; önemli çevresel faydalara rağmen, AADCO'nun geri dönüşüm ağına katılmak için katlandığı finansal maliyetler, potansiyel kazançlardan daha ağır basmakta ve bu çabayı şirket için finansal olarak sürdürülemez hale getirmektedir. İkinci bulgu olarak, analiz, geri dönüşüm yoluyla sera gazı emisyonlarını azaltma maliyetleri ile mevcut piyasa koşulları arasındaki eşitsizliği ortaya koymakta ve geri dönüşüm endüstrisinin karşı karşıya olduğu ekonomik zorlukları vurgulamaktadır.

Ayrıca, özellikle etiketleme ve tanımlamada, etkili kullanım ömrü sonu ayırma ve geri dönüşüm süreçlerini mümkün kılmanın ayrılmaz bir parçası olarak ürün bilgilerinin önemini vurgulamaktadır. Sağlam ürün bilgi sistemleri olmadan, plastiklerin geri dönüştürülebilir doğasından yararlanma fırsatları kaybolmakta, bu da 'beşikten mezara' paradigmasını sürdürme ve sürdürülebilir atık yönetimi uygulamalarını engellemektedir. Sonuç olarak, otomotiv plastikleri geri dönüşümünün doğasında bulunan karmaşıklıkların ve zorlukların altını çizmektedir. Çevresel sürdürülebilirlik büyük bir endişe kaynağı olmaya devam ederken, geri dönüşüm girişimlerinin finansal uygulanabilirliği de dikkatle değerlendirilmelidir. Bu zorlukların üstesinden gelmek için, otomotiv endüstrisinde karlı ve sürdürülebilir geri dönüşüm uygulamaları için elverişli bir ortam yaratmak için teknolojik gelişmeleri, pazar teşviklerini ve destekleyici kamu politikalarını içeren çok yönlü bir yaklaşım gerektirmektedir.

2.2.3. Otomotiv Pazar Büyüklüğü

Pazar Büyüklüğü ve Büyüme Tahminleri.

- Otomotiv pazarında küresel Karbon Elyaf 2023 yılında 2311,6 milyon ABD doları değerindeydi.
- 2024-2030 tahmin döneminde %9,0'lık bir CAGR'ye tanık olarak 2030 yılına kadar 4270,8 milyon ABD dolarına ulaşması bekleniyor.

Önemli İtici Güç kaynakları

- Otomotiv endüstrisi, Otomotiv pazarında Karbon Elyafın önemli bir itici gücüdür.
- Küresel otomobil üretimi ve satışları 2017 yılında sırasıyla 97,3 milyon dolar ve 95,89 milyon dolar ile zirve yaptı.
- Küresel otomobil pazarı, küresel ekonomik genişlemenin sona ermesi nedeniyle 2018'de düşüş gördü.
- 2022 yılına kadar dünyada 81,6 milyon araç vardı.

Bölgesel Dağılım

- Dünyadaki otomobillerin %90'ından fazlası Asya, Avrupa ve Kuzey Amerika'da yoğunlaşmıştır.
- Asya, küresel otomobil üretiminin %56'sını, Avrupa %20'sini ve Kuzey Amerika %16'sını oluşturuyor.
- Başlıca otomobil üreticisi ülkeler arasında Çin, Amerika Birleşik Devletleri, Japonya, Güney Kore, Almanya, Hindistan, Meksika ve diğerleri bulunmaktadır.
- Çin, küresel üretimin yaklaşık %32'sini oluşturan en büyük otomobil üreticisi ülkedir.
- Japonya, 2022'de 3,5 milyondan fazla araç ihraç ederek dünyanın en büyük otomobil ihracatçısıdır (Url_4).

2.3 Kompozit Üretim Teknolojileri ve Ürün Kalite Parametreleri

Günümüz imalat teknolojilerinde havacılık sanayi başta olmak üzere çok farklı alanlarda kompozit malzeme kullanılmaktadır. Bu sebeple istenilen özelliklerde ve biçimde kompozit üretimi için birçok farklı yöntem ihtiyacı duyulmaktadır. Kompozit iki ya da daha fazla sayıda farklı malzemenin en iyi özelliklerini tek bir malzeme toplamak amacıyla, makro düzeyde birleştirilmesiyle oluşturulan yeni malzeme yapısı olarak isimlendirilebilmektedir. Diğer bir deyişle kompozit malzemeler birbirlerinin zayıf yönlerini geliştirerek üstün özellikler elde etmek amacıyla bir araya getirilmiş farklı tür malzemelerden veya fazlardan oluşan malzemeler olarak adlandırılmaktadır. (Url_5).

2.3.1 Kompozit Üretim Yöntemleri

İstenilen özelliklerde ve biçimde polimer esaslı kompozit malzeme üretimi için birçok yöntem bulunmaktadır. Özellikle termoset matrislerin kullanıldığı kompozit sektöründe kullanılan üretim yöntemlerini temel olarak iki başlık altında incelemek mümkündür.

2.3.1.1 Açık Kalıp Yöntemleri Üretim

Bu yöntemde çok sayıda kompozit yapı üretmek için tekrar tekrar kullanılacak kalıcı bir kalıp ya da kılavuz kullanılır. Bu kalıplar bozulabilir kalıplar ve kalıcı kalıp olarak ikiye ayrılır.

Elle Yatırma Yöntemi

Dokuma veya kırılmış elyaflarla hazırlanmış takviye kumaşları hazırlanmış olan kalıp üzerine elle yatırılarak üzerine sıvı reçine sürülür ve reçinenin elyaf katmanları arasına emdirilmesi sağlanır. Elyaf yatırılmadan önce kalıp temizlenerek jelkot sürülür. Jelkot sertleştikten sonra elyaf katları yatırılır. Reçine ise kompozit takviye malzemesinin yatırılıp hazırlanmasından sonra en son aşamada sürülür. Bu işlemden önce elyaf kumaşına reçinenin iyi nüfuz etmesi önemlidir. Elle yatırma tekniğinde en çok kullanılan polyeşter ve epoksinin yanı sıra vinil ester ve fenolik reçineler de

tercih edilmektedir. Elle yatırma yoğun işçilik gerektirmesine rağmen düşük sayıdaki üretimler için çok uygundur (Url_6).

Püskürtme Yöntemi

Püskürtme yöntemi elle yatırma yönteminin aletli şekli olarak kabul edilebilir. Kırpılmış elyaf kalıp yüzeyine içine sertleştirici katılmış reçine ile birlikte özel bir tabanca ile püskürtülür. Elyafın kırılma işlemi tabanca üzerinde bulunan ve bağımsız çalışan bir kırpıcı sayesinde yapılır. Püskürtülme işlemi sonrası yüzeyin bir rulo ile düzeltilmesiyle ürün hazırlanmış olur.

Elyaf Sarma Yöntemi

Bu yöntem özel biçime sahip ürünlerin seri üretimine uygundur. Elyaf sarma yöntemi sürekli elyafın reçine ile ıslatıldıktan sonra bir makaradan çekilerek dönen bir kalıp üzerine sarılması işlemi olarak tanımlanabilir. Sürekli liflerin farklı açılarla kalıba sarılmasıyla farklı mekanik özelliklerde ürünler elde edilebilir. Yeterli sayıda elyaf katının sarılmasından sonra ürün sertleşir. Ardından döner kalıp ayrılır. Bu yöntemle yapılan ürünler genellikle silindirik borular, araba şaftları, uçak su tankları, yat direkleri, dairesel basınç tanklarıdır.

2.3.1.2 Kapalı Kalıp Üretim Yöntemleri

Döküm teknolojisi içerisinde daha yaygın olarak kullanılan kapalı kalıplar içerisinde sıvı metalin kalıba doldurulabilmesi için bir yolluk sistemi bulunmaktadır. Kapalı kalıp üretim yöntemlerinde ürünün tamamen saran bir kalıp kullanılır. Açık kalıp uygulamalarına göre daha iyi ürünler elde etmek mümkündür (Url_7).

Reçine Transfer Kalıplama Yöntemi (RTM)

RTM yöntemi çoğunluk jelkotlu veya jelkotsuz her iki yüzeyinde düzgün olması istenen parçalarda kullanılır. Takviye malzemesi kuru olarak keçe, kumaş veya ikisinin kombinasyonu şeklinde olabilmektedir. Takviye malzemesi önceden kalıp boşluğu doldurulacak şekilde kalıba yerleştirilir ve kalıp kapatılır. Elyaf matris içinde geç çözünen reçinelerle kaplanarak kalıp içerisinde sürüklenmesi önlenir. Reçine

basınç altında kalıba pompalanır. Bu süreç daha fazla zaman ister. Matris enjeksiyonu soğuk, ılık veya en çok 80 °C'ye kadar ısıtılmış kaplarda uygulanabilir.

Vakum İnfüzyon Yöntemi

Bu yöntem RTM yöntemine ek olarak içerideki havanın dışarı çıkarılması ve reçinenin elyaf içine iyi işlemesi için vakum kullanılmasıdır. Elyafın kalıba yerleştirilmesini gerektirmesinden dolayı uzun sayılabilecek bir işçilik gerektirir. Kalıp kapalı olduğu için ise zararlı gazlar azalır ve gözeneksiz-hava kabarcıksız bir ürün elde edilebilir. Bu yöntemle karmaşık parçalar üretilebilir. Concorde uçaklarında, F1 arabalarında bazı parçalar bu yöntemle hazırlanmaktadır.

Vakum Torbalama Yöntemi

Vakum torbası kullanılarak, ısıtılmış elyafların (el yatırması sonrası) ya da prepreglerin vakum altında sertleşmesi esasına dayalı bir üretim yöntemidir. Bu uygulamada amaç; fazla reçinenin ve hava boşluklarının kompozit yapı içerisinden alınmasını sağlamak ve yüksek elyaf oranına sahip ürün elde etmektir. Otoklav+Vakum Torbalama: Vakum torbalanan prepreg ürünler oda sıcaklığında vakum etkisiyle sertleşebildiği gibi otoklav adı verilen özel basınçlı makineler içerisinde de sertleşebilmektedir. Otoklavda uygulanan ısı+basınç+vakum etkisiyle, minimum hava boşluğu içeren daha mukavemetli kompozit parçalar elde edilmektedir. Bu yöntem sıklıkla elyaf sarma ve yatırma teknikleri ile bağlantılı olarak uygulanır. Kompozit malzeme tamir işlemlerinde de vakum torbalama yöntemi kullanılmaktadır.

Sıcak Presleme Yöntemi (SMC-BMC-Prepreg)

Hazır kalıplama bileşenlerinin; metal kalıplarda preslenerek ısı ve basınç etkisiyle sertleştirilmesi esasına dayalı bir üretim yöntemidir. Kompozitlerin seri üretimine uygun bir yöntemdir.

Pultrüzyon Yöntemi

Pull ve Extrusion kelimelerinden türetilmiş sürekli profil, boru vb. kompozit ürünlerin üretimini sağlayan bir yöntemdir. Reçine banyosunda emdirilmiş elyaf

fitillerinin ya da kumaşların sıcak kalıplardan geçirilerek şekillendirilmesi ve sertleşmesini takiben makine hattı boyunca çekilmesi ve belirli boyutlarda kesilmesi esasına dayanır.

Sürekli Laminasyon Yöntemi

Levha formunda kompozit ürünlerin üretiminin sağlandığı prosestir. Özel laminasyon makinelerinde elyaf takviyelendirilen reçinenin ısı ve basınç altında hızlı bir şekilde sertleştirilip soğutulmasını takiben bobinlere sarılması ya da belirli boyutlarda kesilmesi ile elyaf takviyeli kompozit paneller elde edilmektedir.

Reaksiyonlu Üretim (RRIM, SRIM)

İki reaktif bileşenin karıştırılarak kalıp boşluğuna enjekte edilmesi ve burada reaksiyon sonucu sertleşmesi esasına dayalı bir üretim yöntemidir. Bu uygulamadaki reçineler genellikle poliüretan (PUR) olup kimi zaman disiklopentadien (DCPD)'de kullanılmaktadır (Url_7).

2.3.2 Kompozit Ürün Kalite Parametreleri

Elyaf takviyeli kompozit yapıların kalite özellikleri, mekanik özellikleri ve performans parametrelerini belirlemek için çeşitli standart testler ile tanımlanmaları gereklidir. Kompozit yapıların yorumlanması ve tasarımına yönelik parametreleri belirlemek ve kalite güvence süreçlerini belirlemek için gerçekleştirilen bu testler TS EN ISO 527-4 Bölüm 4: İzotropik ve ortotropik elyaf takviyeli kompozitler ve TS EN ISO 527-5 ... Bölüm 5: Tek yönlü elyaf takviyeli plastik kompozitler için deney şartları standartlarında belirlenen şartlarda ölçümler gerçekleştirilir. Bu testler ile ölçülmesi istenilen karakteristik sonuçlar ve parametreler aşağıda belirlenmiştir (Url_7).

- Çekme gerilmesi (Pa); Numunenin ilk kesitine ilişkin kuvvetler
- Uzunlamasına genleşme (mm): Yük yönündeki ilk ölçüm uzunluğuna bağlı olarak ölçüm uzunluğundaki değişiklik

- Enine genişleme: Enine yönde ilk ölçüm uzunluğuna bağlı olarak ölçüm uzunluğundaki değişiklik (yalnızca Poisson oranının belirlenmesi durumunda gereklidir)
- Çekme modül(Pa): Elastik aralıkta belirli bir uzama aralığında gerinim-uzama eğrisinin eğimi. Ayrıca esneklik modülü veya kısaca E-modülü olarak da bilinir
- Çekme mukavemeti(Mpa): Çekme testinde belirlenen çekme gerilmesinin maksimum değeri
- Uzama(mm): Çekme mukavemetine ulaşıldığında boyuna uzama
- Poisson oranı: Enine genişleme ve boyuna genişlemenin negatif oranı

Hem TS EN ISO 527-4, TS EN ISO 527-5 hem de ASTM D3039 standart ölçüm yöntemleri, fiber takviyeli plastiklerin testi için test koşullarını belirtmektedir. Test yöntemlerinin benzerliğine rağmen, belirlenen karakteristik değerler tamamen karşılaştırılabilir değildir, çünkü numune şekilleri ve boyutları ile karakteristik değerlerin belirlenmesinde bazı farklılıklar görülmektedir (Url_7).

Bayraktar ve Turgut'un (2021), araştırmasına göre, karbon ve cam elyaf takviyeli kompozit malzemeler, yüksek sertlik ve direnç, düşük termal genişleme ve yüksek sönümlenme özelliklerinden dolayı geniş kullanım alanına sahiptir. Kompozit yapıların montajında genellikle delme işlemine ihtiyaç duyulmaktadır. Delme işlemi, delik yüzey hasarı (delaminasyon) ve elyaf kopması gibi sorunlar meydana getirebilmektedir. Bu nedenle, iş parçası, kesici takım ve kesme parametrelerinin doğru seçimi büyük önem taşımaktadır. Yapılan araştırmalar, yüzey kalitesinin kesme parametreleri, takım geometrisi ve kesme kuvvetlerine bağlı olduğunu göstermektedir.

Soydan ve Var (2024), tekstil takviyeli kompozitlerin mekanik özelliklerini inceleyerek, yüksek mukavemet/ağırlık ve modül/ağırlık oranları gibi özelliklerinden dolayı yüksek performans gerektiren sektörlerde kullanılma potansiyelini değerlendirmektedir. Çalışmada, karbon elyafından üretilmiş bezayağı dokuma kumaş, 2/2 dimi dokuma kumaş ve interlok örme kumaşlar ayrı ayrı ve kombinasyon halinde kullanılarak, dokuma, örme ve dokuma/örme kumaş takviyeli kompozitlerin eğilme ve çekme yükü altındaki dayanım, modül ve uzama değerleri araştırılmıştır. Deneysel sonuçlar hibrit kompozitlerin, dokuma kumaş kompozitlere göre daha düşük

eğilme dayanımı sergilediğini göstermiştir. Ancak, beş kat takviye kumaşı içeren hibrit kompozitlerden dimi ve örme kumaş kombinasyonuna sahip olan kompozitin eğilme modülünün, yedi kat dimi içeren kompozitten daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, hibrit kompozitlerin çekme dayanımı ve modülünün, dokuma kumaş kompozitlere göre daha zayıf olduğu gözlenmiştir. Bununla birlikte, tüm hibrit kompozitlerin cam elyafından üretilmiş kompozitlere göre daha yüksek çekme dayanımına sahip olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, farklı dokuma ve örme kumaş kombinasyonlarının, kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini iyileştirme potansiyelini ortaya koymaktadır.

2.4 Karbon Elyaf Takviyeli Kompozit Üretim Teknolojisindeki Yenilikler

Yi Wan ve Takahash (2021), tarafından yazılan literatür, Japonya'da seri üretilen otomotiv uygulamaları için Karbon Elyaf Takviyeli Termoplastiklerin (KETTP'ler) geliştirilmesine odaklanmaktadır. Proje, süresiz KETTP'ler oluşturmak için yüksek döngülü sıkıştırma kalıplama teknolojilerini kullanarak, otomotiv seri üretiminde KETTP'lerin hafif uygulamalarını ele almaktadır. Makale, bilimsel çıktılar sunmanın yanı sıra, otomotiv kullanımı için KETTP'lerin temel geliştirme taleplerini, özel gereksinimlerini ve mevcut geliştirme durumunu tartışmaktadır. Üretim maliyetleri karbon elyaf, matris reçinesi, prepreg üretimi ve kalıplama işlemi boyunca analiz edilmektedir. Çalışma, maliyete en duyarlı faktör olarak kalıplama döngüsü süresini vurgulayarak bir maliyet duyarlılığı analizi yürütmektedir. KETTP otomotiv parçalarının toplam maliyetini verimli bir şekilde azaltmak için kalıplama döngüsü süresinin azaltılmasının çok önemli olduğunu rapor etmiştir.

Yazar, yüksek performanslı KETTP'lerin, özellikle doğranmış karbon elyaf bant takviyeli termoplastiklerin ve karbon elyaf takviyeli termoplastikler gibi fonksiyonel KETTP'lerin geliştirilmesi hakkında bilgi vermektedir. Diğer ara malzemeler arasında karbon elyaf kağıt takviyeli termoplastikler ve karbon elyaf kart ağ takviyeli termoplastikler bulunmaktadır.

Ultra ince prepreglere sahip karbon takviyeli termoplastikler KTT, yüksek döngülü kalıplama işlemlerine olanak tanımakta, düşük değişkenlik ile mükemmel

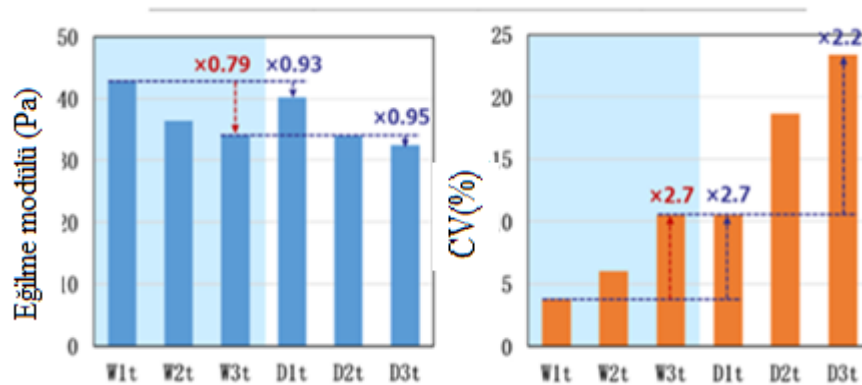
mekanik özellikler sergilemektedir. Çalışmalar, KTT'lerdeki mekanik performansın bant uzunluğuna bağlı olduğunu ve PA6 matrisli KTT'lerin sürekli KETTP'lerle karşılaştırılabilir gerilme ve eğilme özellikleri gösterdiğini ortaya koymaktadır.

Çalışmada, bant morfolojisi ve üretim süreçlerinin mekanik özellikler üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bulgular, bant kalınlığının ve imalat şartlarının mekanik özellikler üzerinde önemli bir etkisi olduğunu göstermektedir. Bu faktörlerin değiştirilmesi, eğilme modülünde %30'dan fazla artışa ve altı kattan fazla varyasyon katsayısı artışına neden olabilmektedir. Ayrıntılı sonuçlar Tablo 2.3'te sunulmaktadır.

Tablo 2.3: Bant morfolojisi ve üretim sürecinin KTT'nin mekanik özellikleri üzerindeki etkileri (Yi Wan ve Takahash 2021)

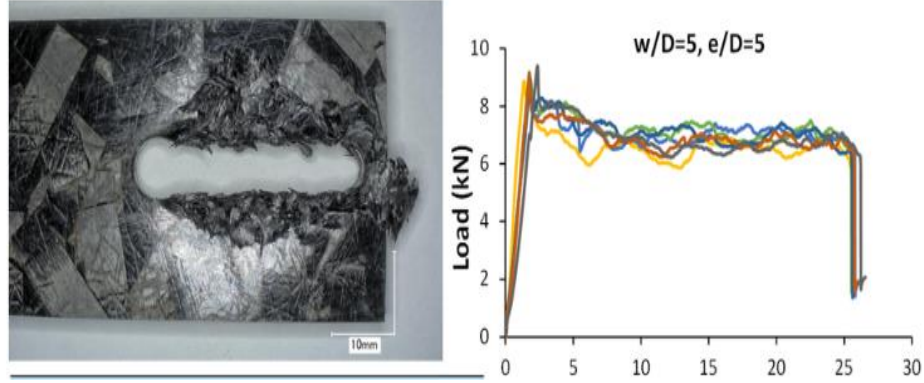
	Bant Kalınlığı (mm)	Eğilme modülü (GPa)	CV (%)
W1t	0,044	43,0	3,9
W2t	0,088	36,4	6,0
W3t	0,132	34,1	10,5
D1t	0,044	40,2	10,5
D2t	0,088	33,9	18,7
D3t	0,132	32,5	23,4

Geleneksel KETTP'ler ve kesikli KERTS'lerle karşılaştırıldığında, KTT'ler enerji absorbe etme konusunda dikkate değer ve kararlı bir yeteneğe sahiptir.



Şekil 2.3: Bant morfolojisi ve üretim sürecinin KTT'nin mekanik özellikleri üzerindeki etkileri (Yi Wan ve Takahash 2021)

Şekil 2.3 ve Tablo 2.3, rulman yükünün yüksek bir seviyede sabit olduğu civata taşıma testi sonuçlarını göstermektedir. Rulman mukavemeti, %2 varyasyon katsayısı (CV) ile KTT'nin çekme mukavemetine yakındır ve bu da KTT'ye yüksek bir özgül enerji absorpsiyon özelliği (300 kJ/kg) sağlamaktadır



Şekil 2.4: KTT'lerin civata yatağı ve enerji soğurma özellikleri (Yi Wan ve Takahash 2021)

Şekil 2.4 ve Tablo 2.4, karbon takviyeli termoplastiklerin (KTT) civata yatağı ve enerji soğurma özelliklerini göstermektedir. Çalışmasına göre, KTT'lerin civata yatağındaki performansı ve enerji soğurma kapasitesi, bu malzemelerin mekanik dayanıklılığı ve güvenilirliği açısından önemli ölçüde belirleyicidir. Bu veriler, KTT'lerin mühendislik uygulamalarındaki potansiyelini ve performanslarını optimize etmede kritik bir rol oynar.

Tablo 2.4: KTT'lerin civata yatağı ve enerji soğurma özellikleri (Yi Wan ve Takahash 2021)

Referans	Modül (Pa)	Mukavemet (N)	Kırılma gerinim (Pa)
KF (vf=55%)	240	4900	2,0
KTT Çekme	49	520	1,1
KTT Eğilme	42	700	1,7

KTT üretim süreci kontrolünün değerlendirilmesinin, olağanüstü mekanik performans sağlamadaki kritik rolünün altını çizmektedir. Ultra ince bantlar ve küçük boyutlarla üretilen KTT'ler, otomotiv uygulamaları için olağanüstü mekanik özellikler, yüksek döngülü kalıplanabilirlik ve tasarım çok yönlülüğü sergilemektedir. Kısaltılmış kalıplama döngüsü süreleri ile maliyet düşüşü sağlanabilirken, satın alınabilirlik seri üretim için bir zorluk olmaya devam etmektedir. Yüksek

performanslı, hızlı kalıplanan bir KTT geliştirilmesine rağmen, maliyet, otomotiv seri üretimi için önemli bir engel olmaya devam ediyor. Sonuç olarak, çalışma, potansiyel çözümler olarak fonksiyonel KETTP'leri ve geri dönüşüm teknolojileri hakkında bilgi vermektedir.

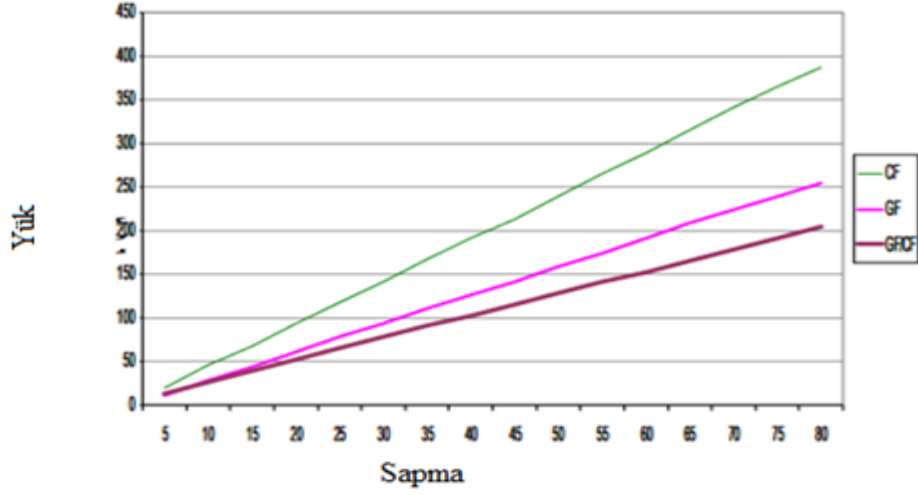
Ek olarak, makalede, geri dönüştürülmüş karbon elyafın KERTP'lerle olağanüstü uyumluluğunu vurgulayarak yüksek verimli karbon elyaf geri dönüşüm teknolojisi araştırılmıştır. Reçinenin çıkarılması sırasında geri dönüştürülmüş karbon elyaf bozunması ve termoplastiklerin yapışması için fonksiyonel grupların rejenerasyonu ile ilgili endişeler tartışılmaktadır. Karbon elyaf ve KETTP'lerin maliyet duyarlılığı analizi, fizibilite ve satın alınabilirliği sağlamayı amaçlamakta ve yapı/malzeme tasarımının optimize edilmesinin KETTP uygulama verimliliğini artırabileceği değerlendirilmektedir. Çalışmada, maliyet duyarlılığı bulgularına dayanarak, KETTP parça maliyetlerinin alüminyum alaşımlarıyla rekabet edecek şekilde azaltılabileceğini ve otomotiv endüstrisinde kitlesel uygulamanın önünü açabileceği de ifade edilmektedir.

Çevresel kaygılar ve emisyon düzenlemeleri nedeniyle hafif otomotiv bileşenlerinin seri üretimi için KETTP'lerin kullanımına yönelik artan ilginin altını çizmektedir. Maliyet ve performans ödünleşimlerini göz önünde bulundurarak bu malzemelerin sistematik gelişimi vurgulanmaktadır. Çalışma, nesne yönelimli malzeme geliştirmenin önemini vurgulamakta ve özel gereksinimleri ve KETTP'lerin mevcut durumunu özetlemektedir. Kısa bir maliyet duyarlılığı analizi, otomotiv seri üretiminde KETTP'lerin fizibilitesini ve satın alınabilirliğini sağlar. Yazarlar, makalenin hafif otomotiv uygulamaları için KETTP'leri benimsemeye araştırmacılar ve mühendisler için değerli bir referans olmasını amaçlamaktadır.

Abdul Budan ve Manjunatha (2010), tarafından yapılan "Otomotiv Uygulamaları için Kompozit Helezon Yayların Fizibilitesinin İncelenmesi" araştırmasında, geleneksel metal helezon yayların kompozit alternatiflerle değiştirilme potansiyeli araştırılmıştır. Cam ve karbon elyafın kullanıldığı araştırma, iki tekerlekli araç uygulamalarında ağırlık azaltma, parça konsolidasyonu ve iyileştirilmiş gürültü, titreşim ve sertlik konularına odaklanmıştır.

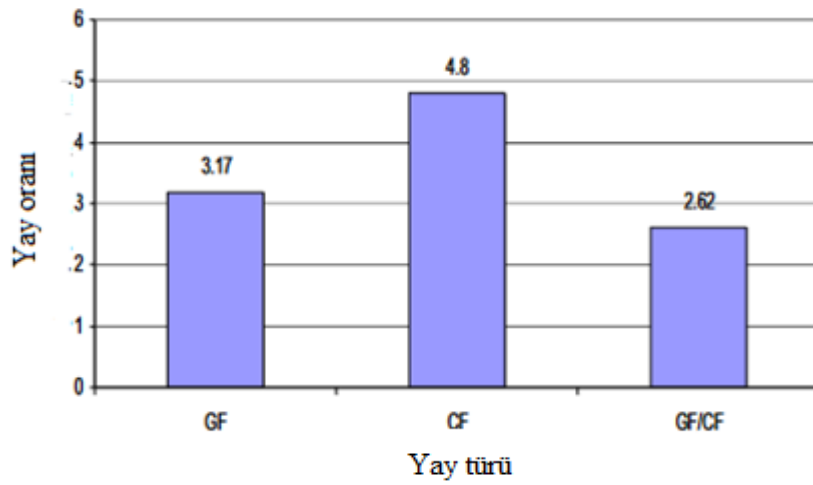
Üç tip yay (cam elyafı, karbon elyafı ve her ikisinin bir kombinasyonu) üretilmiş ve yay hızı ve diğer parametreler için test edilmiştir. Seçilen malzemeler

arasında E-cam ve poli akril nitril-PAN bazlı karbon elyaf fitilin yanı sıra optimum mekanik mukavemet için bir epoksi reçine bulunmaktadır. Filament sarma yöntemi kullanılarak üç tipten üçer adet, toplam dokuz adet kompozit yay üretilmiştir. Analizler sonucunda numunelere ait yük sapma eğrileri incelenmiş ve yayların performans özellikleri gösterilmiştir.



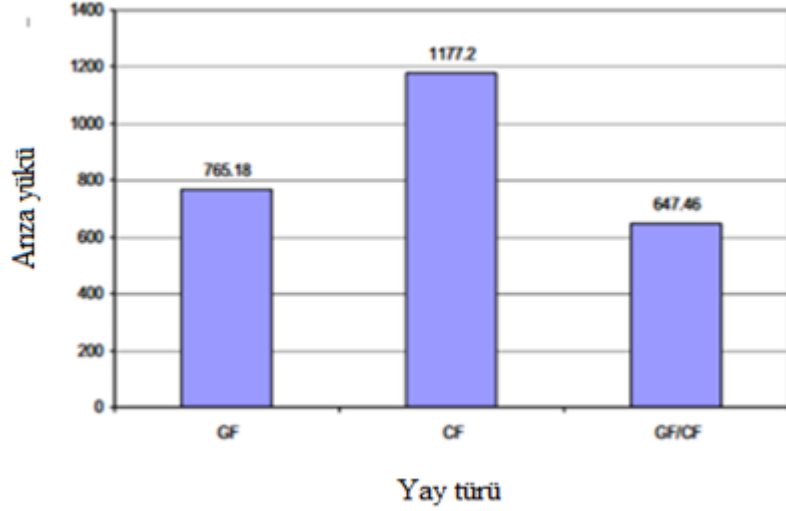
Şekil 2.5: Üç tip yayın yük sapma eğrileri (Abdul Budan ve Manjunatha 2010)

Yay oranları bu eğrilerden hesaplanmıştır (Şekil 2.5). Karbon elyafın üstün mukavemetine atfedilen cam elyaftan %34 ve KE/Cam elyaf yaylardan %45 daha yüksek oranlara sahip karbon elyaf yaylar olduğu belirlenmiştir. Cam elyaf/KE yaylarındaki kusurlu bağlanmanın, daha düşük yay oranlarına neden olduğu belirlenmiştir.

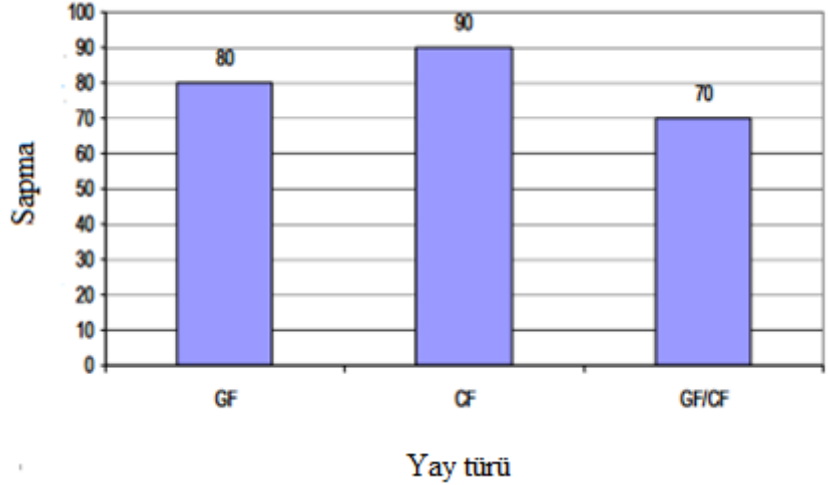


Şekil 2.6: Üç tip yayın yay oranları (spring rate) (Abdul Budan ve Manjunatha 2010)

Arıza yükleri ve maksimum sıkıştırma performansları ile (Şekil 2.6, ve 2.7), karbon elyaf yayların olağanüstü performansı belirlenmiştir. Diğer iki yaya oranla sırasıyla %35 ve %45 oranında daha iyi performans elde edilmiştir. Karbon elyaf yayların ağırlığının cam elyaftan %18 ve cam elyaf/KE yaylardan %15 daha hafif olduğu, çelik yaylara kıyasla %80'lik bir ağırlık azaltımı elde edildiği belirlenmiştir.



Şekil 2.7: Üç tip yay arıza yükleri (faliure) (Abdul Budan ve Manjunath 2010)



Şekil 2.8: Üç tip yay için maksimum sıkıştırma (Abdul Budan ve Manjunatha 2010)

Araştırmacı, karbon elyaf yayların, ağırlık azaltma ve gelişmiş sertlik için umut vaat ettiğini, cam elyaf ve cam elyaf/karbon elyaf yaylara kıyasla avantajlı olduğunu belirlemiştir. Şekil 2.8 çalışmaya göre üç farklı tip yay için maksimum sıkıştırma miktarını göstermektedir. Yayların mekanik özelliklerini karşılaştırarak, her bir yay tipinin maksimum sıkıştırma kapasitesi belirlenmiştir. Bununla birlikte, cam elyafın çelikten %25 daha pahalı ve karbon elyafın %200 daha pahalı olması gibi maliyet hususlarının da göz ardı edilmesi gerektiğini ifade etmiştir. Bu bulgular

kompozit yayların, daha düşük sertliklerin kabul edilebilir olduğu elektrikli ve hibrit araçlar gibi hafif araçlarda kullanıma uygun olduğunu işaret etmektedir. Sarım makineleri ve otomasyon yoluyla üretimi kolaylaştırmak, özellikle seri üretimde zorlukları azaltabilecek ve potansiyel olarak maliyetleri azaltabilecektir.

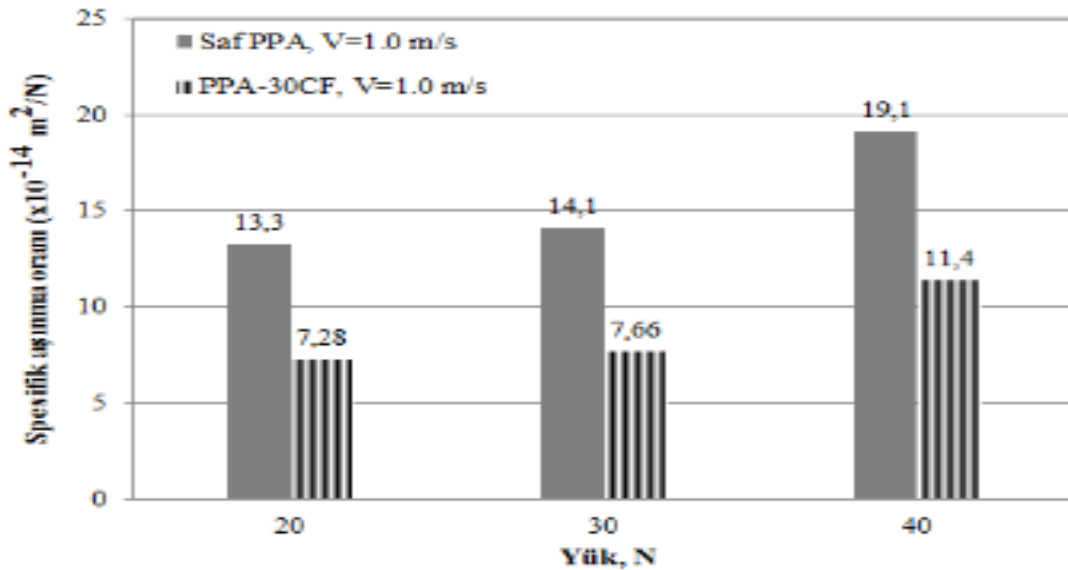
Durgun ve Vatansever (2013), tarafından gerçekleştirilen araştırma, vakum torbalama yöntemi kullanılarak karbon elyaf ile kompozit parça üretimini ele almaktadır. Kompozit malzemelerin günümüzdeki yaygın kullanımı, özellikle otomotiv sektöründe vakum torbalama yöntemiyle üretilen parçaların önemini artırmıştır. Bu yöntem, seri imalat uygulamaları için uygun olmasa da az sayıda parça gerektiği durumlarda ekonomik bir seçenek sunmaktadır. Vakum torbalama yöntemi, kompozit parça üretim sürecinde kullanılan el yatırma yöntemine benzeyen bir süreçtir. Bu işlemde reçinenin lifler arasına daha iyi nüfuz etmesini sağlamak, böylece parçaların mukavemeti artmaktadır. Bu çalışmada, otomotiv endüstrisinde ihtiyaç duyulan bir parça olan torpido üst parçasının karbon elyaf ve epoksi reçine kullanılarak vakum torbalama yöntemiyle üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretilen parçanın boyutsal doğruluğu ATOS marka 3D tarama cihazıyla taranarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, parçanın istenilen beklentileri karşılayacak düzeyde olduğu tespit edilmiştir. Otomotiv endüstrisi gibi alanlarda kompozit malzeme kullanımının artmasıyla birlikte, bu tür üretim yöntemlerinin önemi giderek artmaktadır.

Sim ve Baek (2023), otomobillerde karbon elyaf takviyeli plastiğin (KETP) yapışmasını iyileştirmeye odaklanan bir çalışma yürütmüştür. Araştırmada, mekanik bağlanma ile ilgili zorluklar ele alınmış ve arayüzey tahribatını önlemek için yapışmanın önemi vurgulanmıştır. Çalışmada, KETP nin kimyasal bağlanma özelliği, yüzey morfolojisi ve mekanik özelliklerini geliştirmek için plazma işlemi ve epoksi modifiye astar kaplama kullanılmıştır. Deneysel yaklaşım, plazma işleminden sonra aktive edilmiş KETP yüzeyler üzerinde kimyasal olarak bağlanmış tek bir kaplama tabakası oluşturmayı içermektedir. Araştırma, kimyasal bağlanma mukavemeti, yüzey morfolojisi ve mekanik özelliklerin sistematik olarak incelendiği bir çalışmadır. Yapışma mukavemeti kullanılarak doğrulanmış ve mekanik test sonrasındaki kırılma şekli, kaplamanın etkinliği hakkında fikir vermiştir.

Plazma epoksi-modifiye Astar kaplama işlemi, plazmasız imalata kıyasla, mukavemette %115'lik önemli bir artış göstermiştir. Çalışma, yüzey işlemleri yoluyla bozulmamış durumda zayıf yapışmanın başarıyla ele alındığı bir araştırmadır. Plazma işlemi, kimyasal bağlanmayı iyileştiren oksijen içeren fonksiyonel gruplar oluşturarak yüzey ıslanabilirliğini arttırmıştır. Plazma + Epoksi-Modifiye Astar kaplama işlemi, otomotiv parçaları üretimi için umut verici bir çözüm sunmakta ve ek yüzey işlemi olmadan daha fazla mukavemet elde edilmesi mümkün olmaktadır. Bu yaklaşım, plazma işlemiyle ilişkili dayanıklılık zorluklarını etkili bir şekilde ele alarak otomotiv uygulamaları için hafif ve dayanıklı malzemelerin geliştirilmesine katkıda bulunmuştur.

2.4.1 İleri Üretim Teknikleri ve Malzeme Gelişmeleri

Hatipoğlu ve Ünal (2023), çalışmasında, endüstride kullanılan polimer esaslı malzemelerin tribolojik performansının artırılması ve yenilikçi malzeme teknolojilerinin geliştirilmesi açısından önemli bir katkı sunmaktadır. Çalışmada, polimer ve polimer esaslı kompozit malzemelerden imal edilmiş dişliler gibi üretim makinelerinde hareket iletiminde kullanılan önemli parçaların tribolojik özellikleri üzerine odaklanılmıştır. Özellikle, yüksek performanslı poli-fital-amit (PPA) polimer ve PPA kompozitlerinin kullanımının, makine elemanlarının çalışma ömrünü arttırabileceği üzerinde durulmuştur.



Şekil 2.9: Saf PPA polimeri ve PPA-30KE kompozitin uygulanan yüke bağlı olarak spesifik aşınma oranının değişimi (Hatipoğlu ve Ünal 2023)

Şekil 2.9. Saf PPA polimeri ve PPA-30KE kompozitin uygulanan yüke bağlı olarak spesifik aşınma oranının nasıl değiştiğini göstermektedir. Çalışmada, katkısız poli-fital-amit polimeri ile ağırlıkça %30 oranında karbon elyaf takviyeli poli-fital-amit (PPA-30KE) kompozitin tribolojik performansları detaylı bir şekilde incelenmiştir. Aşınma deneyleri kuru ortam şartlarında çelik disk ile karşılaştırılarak gerçekleştirilmiş ve elde edilen veriler istatistiksel olarak analiz edilmiştir. PPA-30KE kompozitin saf PPA polimerine göre aşınma oranını önemli ölçüde azalttığı ve mukavemetini arttırdığı belirlenmiştir. Bu sonuçlar, kompozitin yüksek yükler altında aşınmaya maruz kalan ortamlarda başarılı bir şekilde kullanılabileceğini göstermektedir. Ayrıca, çalışma çerçevesinde elde edilen bulguların endüstriyel uygulamalara yönelik önemli ipuçları sunduğu ve polimer esaslı malzemelerin tribolojik performansının artırılmasına yönelik yeni stratejilerin geliştirilmesine katkı sağladığı vurgulanmıştır.

Cabrera-Rı'os ve Castro (2004), levha kalıplama bileşiğinde yaygın olarak kullanılan cam elyaflarına alternatif olarak, ilave sertlikleri ile bilinen karbon elyafın dahil edilmesinin potansiyel avantajlarına odaklanan bir çalışma yürütmüştür. Cabrera-Rı'os, karbon elyafın faydalarından etkin bir şekilde yararlanmak için otomotiv kalıpçılarının üretim sürecini basitleştirme ihtiyacını vurgulamıştır. Buradaki zorluk, gerçek birleşik kalıplama üretim sürecinde cam ve karbon elyafın sorunsuz bir şekilde birleştirilmesinde yatmaktadır. Önerilen çözüm, birleşik kalıplama katlarının yalnızca cam elyaf içeren katların yanı sıra yalnızca karbon elyafı birleştirilmesini içermektedir.

Çalışmanın temel amacı, cam elyafın kat bazında karbon elyafı ile ikame edilmesiyle elde edilebilecek fiziksel özelliklerdeki nispi iyileşmeyi araştırmaktır. Birleşik kalıplamalı plakları üretmek için lif içeriği (karbon veya cam) bakımından farklılık gösteren iki farklı kalıplama kombinasyonu kullanılmıştır. Bu kombinasyona karşılık gelen ağırlık oranları Tablo 2.5'te görülmektedir.

Tablo 2.5: Tüm deneylerde kullanılan kombinasyonlar için cam ve karbon elyaflar için ağırlık fraksiyonları (Cabrera-Rı'os ve Castro 2004)

Cam elyafi		Karbon elyaf	
Kat sayısı	Ağırlık oranı (%)	Kat sayısı	Ağırlık oranı (%)
4	0,50	0	0,00
3	0,41	1	0,09
2	0,30	2	0,20
1	0,16	3	0,34
0	0,00	4	0,50

Çalışmada, farklı lif türlerinin karıştırılmasının, nihai gerilme mukavemeti, elastikiyet modülü ve eğilme mukavemeti dahil olmak üzere çeşitli performans ölçütleri üzerindeki etkilerini araştırılmıştır. Temel bulgular, farklı takviyeli katların konumunun nihai gerilme mukavemetini etkilediğini ve karışımdaki varyasyonların çekme mukavemetini, elastisite modülünü ve eğilme mukavemetini etkilediğini göstermektedir. Yalnızca karbon elyaftan üretilen numunenin daha büyük değişkenliğe rağmen tüm ölçümlerde üstün performans gösterdiği belirlenmiştir.

Çalışmanın önemli bir sonucu, cam elyafın ve karbon elyafın kat başına bir yöntem kullanılarak karıştırılmasının fizibilitesinin ve çekiciliğinin gösterilmesidir. Bulgular, mekanik özellikler, üretilebilirlik ve tutarlılık gibi temel performans ölçütlerinde uzlaşmaların varlığına dair kanıtlara katkıda bulunmaktadır.

Patton ve Pittman (1999), tarafından yürütülen araştırma, kompozitler için epoksi ve poli (fenilen sülfür) (PPS) matrislerinde takviye malzemeleri olarak Buharla yetiştirilen karbon Elyafların (vapor grown carbon fibers) (VGKE) potansiyelini araştırıyor. Çapları 100 ila 300 nm arasında değişen ve uzunlukları 10 ila 100 mm olan VGKE, hem epoksi hem de PPS matrislerinde çeşitli elyaf hacmi fraksiyonlarına dahil edildi. Araştırma, elde edilen kompozitlerin mekanik özelliklerini ve termal iletkenliğini değerlendirmeyi amaçladı. Önceki çalışmalar, reçine infüzyonu, elyaf kaplama ve havanın uzaklaştırılmasındaki zorlukların yanı sıra kütleme sırasında hacim daralması ve reçine ile elyaf arasındaki termal genişleme katsayısı uyumsuzlukları ile ilgili sorunlar dahil olmak üzere VGKE kompozitleriyle ilgili zorluklarla karşılaşmıştı.

Araştırma, VGKE kompozitlerinin, önceki bulgulara kıyasla sertlik ve eğilme mukavemetlerinde önemli artışlar sergilediğini ve daha önceki mukavemet azalma gözlemleriyle çeliştiğini buldu. Mekanik özelliklerdeki bu iyileşme, elyaf boyunca daha iyi reçine infüzyonunu ve gelişmiş elyaf-matris bağına kolaylaştıran yüksek basınçlı karıştırma tekniklerinin kullanımına bağlandı. Bununla birlikte, VGKE'nin geniş yüzey alanı nedeniyle reçine infüzyonunun inhibisyonu ve gözenekliliği artırmadan ve mukavemeti azaltmadan daha yüksek lif yüklemeleri elde etmedeki zorluklar gibi zorluklar devam etmektedir.

Kompozitlerinin termal iletkenlik özelliklerini araştırdı ve daha yüksek lif hacmi fraksiyonları ile bir artış gözlemledi. Ancak bu artış, kompozitleri termal olarak iletken malzemeler olarak sınıflandırmak için yeterince önemli değildi. Çalışma, elyaf yükleme yöntemlerini optimize etmek ve termal iletkenliği artırmak için daha fazla araştırmaya duyulan ihtiyacı vurguladı. Genel olarak, bulgular, VGKE kompozitlerinin, VGKE'nin ayırt edici özellikleri nedeniyle benzersiz zorluklar ve hususlarla birlikte, geleneksel karbon Elyaf kompozitlerle karşılaştırılabilir mekanik özellikler elde etme potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir.

Ghossein ve Paquit (2018), tarafından yürütülen araştırma, geleneksel karıştırma rejimleriyle ilgili zorlukları ele almayı amaçlayan, ıslak serilmiş dokusuz yüzeylerde karbon elyaf dağılımını artırmak için yenilikçi bir yöntem sunmaktadır. Aslen kağıt yapım endüstrisinden uyarlanan yaş serim yöntemi ile üretilen elyaf paspaslar, otomotivden havacılık endüstrilerine kadar çeşitli alanlarda uygulama bulan karbon elyaf paspasları üretmek için kullanılmaktadır. Bununla birlikte, bu karıştırma yöntemi ile üretilen matlarda kompozit malzemelerin genel kalitesini ve performansını etkileyen, zayıf lif dağılımı ve boşlukların oluşması gibi kusurlar olduğu ifade edilmiştir.

Bu zorluklara yanıt olarak KE matlarda elyaf dağılımını iyileştirmek için özel olarak tasarlanmış yeni bir karıştırıcı tasarımı sunmaktadır. Önerilen karıştırıcı tasarımı, karıştırma verimliliğini artırmak için çok önemli bir fenomen olan kaotik adveksiyon üretme kapasitesini değerlendirmek için hesaplamalı akışkanlar dinamiği simülasyonları da dahil olmak üzere detaylı bir analiz ortay koymaktadır. Simülasyonlar, önerilen karıştırıcı tasarımının akışkanda kaotik harekete neden olduğunu ve KE'nin matris boyunca daha iyi dağılmasını kolaylaştırdığını

göstermektedir. Bu yenilikçi yaklaşım, geleneksel karıştırma yöntemlerine önemli bir yenilik getirmekte ve KE mat üretiminde uzun süredir devam eden zorlukların üstesinden gelmek için umut vaat etmektedir.

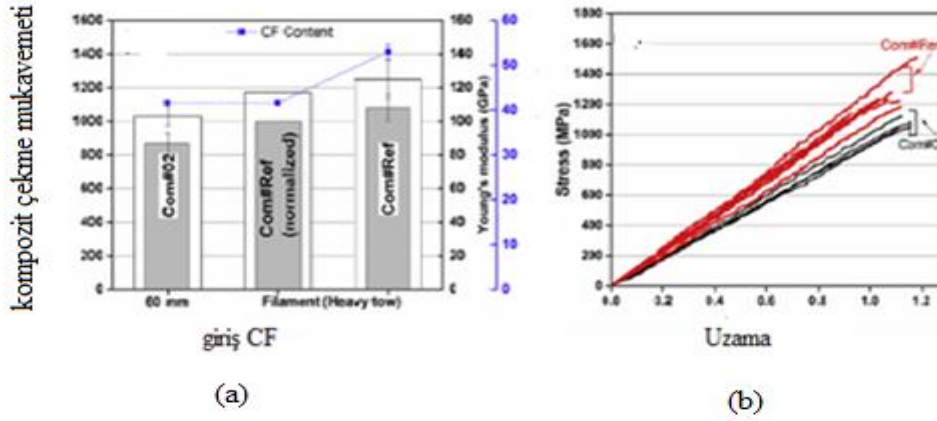
Çalışmadan elde edilen deneysel sonuçlar, yeni mikser tasarımının minimum kusurla homojen dağılımlı paspaslar elde etmedeki etkinliğine dair ikna edici kanıtlar sunmaktadır. Karakterizasyon için arka ışık saçılımı tekniğini kullanan araştırmacılar, geleneksel yöntemlere kıyasla yenilikçi karıştırıcı kullanılarak işlenen paspaslarda elyaf dağılım kalitesinde önemli bir gelişme gözlemlemiştir. Kantitatif analiz, farklı bölgeler arasında elyaf dağılımında yüksek tutarlılık ve minimum standart sapma sergileyen matlar ile yeni karıştırma yaklaşımının üstün performansını daha da doğrulamaktadır.

Ayrıca, önerilen karıştırıcı ile geleneksel yöntemler arasındaki karşılaştırma hem işlem süresi hem de elyaf dağıtım kalitesi açısından birincisinin üstünlüğünün altını çizmektedir. Kaotik adveksiyon ilkeleri ile bilgilendirilen yenilikçi karıştırıcı tasarımı, KE matlarda homojen elyaf dağılımı elde etmenin uzun süredir devam eden zorluğuna umut verici bir çözüm sunmaktadır. Yeni yöntem, daha kısa bir işlem süresi içinde verimli elyaf karışımını mümkün kılarak, dokusuz yüzey kompozit üretim süreçlerinde devrim yaratma potansiyeline sahip olup, çeşitli endüstrilerdeki uygulamalar için yeni yollar açmaktadır.

Dokusuz yüzey kompozit üretimi alanında, özellikle yaş serim paspaslarda karbon elyaf dağılımının artırılmasında önemli bir ilerleme ortay konmaktadır. İleriye dönük olarak, bu yeni yaklaşım, yeniliği teşvik etme ve çeşitli endüstriyel uygulamalar için yüksek performanslı kompozit malzemelerin geliştirilmesini sağlama konusunda fırsatlar ortaya çıkarmaktadır.

Hasan ve Nitsche (2018), tarafından yürütülen araştırma, kesikli karbon elyaf (KE) ve poliamid 6 (PA 6) elyaflarının hibrit iplik yapılarına yenilikçi entegrasyonunu inceleyerek, karbon elyaf takviyeli kompozitlerin (KETK) üretiminde karbon elyaf atıklarının bertarafı ve kaynak sürdürülebilirliği ile ilgili zorlukları ele almak için yeni bir yaklaşım sunmuştur. DREF-3000 sürtülmeli iplik eğirme makinesi kullanarak yaptığı titiz deneylerle, çekirdek-kılıf oranı ve emme havası basıncının karmaşık etkileşimini araştırmış ve geri dönüştürülmüş KE'nin kompozit malzemelere dahil edilmesi için hibrit iplik konfigürasyonlarını optimize etmeyi amaçlamıştır.

Araştırma çabaları, tek yönlü KETK'nin mekanik özelliklerini ve KE içeriğini şekillendirmede işleme parametrelerinin önemli rolü hakkında değerli bilgiler vermektedir. Hasan, çekirdek-kılıf oranının kompozit özellikleri üzerindeki etkisini titizlikle analiz ederek, hibrit iplik bileşimi ile ortaya çıkan KETK performansı arasında detaylı bir ilişki ortaya koymaktadır. Ayrıca çalışma, iplik üretimi sırasında hava emme basıncının etkilerini titizlikle inceleyerek, kompozit mekanik özellikler ve yapısal bütünlük üzerindeki etkisine ışık tutmaktadır. Filament ağır demetten oluşan hibrit ipliklerden üretilen UD kompozitlerin çekme mukavemeti, Young modülü ve KE içeriğinin etkilerinin karşılaştırması Şekil 2.10'da gösterilmektedir.



Şekil 2.10: (a) Hibrit iplikten ve filament iplik kullanılarak üretilmiş kompozitler (b) Hibrit iplik ve filament iplikten üretilen kompozitlerin (Hasan ve Nitsche 2018)

Hibrit ipliklerden elde edilen kompozitler ile KE filamentlerden elde edilen kompozitler arasında titiz karşılaştırmalar yaparak, geleneksel KETK üretim süreçlerine sürdürülebilir bir alternatif olarak hibrit iplik bazlı kompozitlerin önemli potansiyelinin altını çizmektedir. Çalışma, yalnızca atık KE'nin kompozit malzemelere entegre edilmesinin uygulanabilirliğinin altını çizmekle kalmamakta, aynı zamanda DREF-3000 sürtümlü eğirme prosesinin kompozit endüstrisinde çevresel sorumluluk ve kaynak sürdürülebilirliği gündemini ilerletmedeki araçsal rolünün de altını çizmektedir.

Sayam ve Rahman (2022), tarafından yürütülen kapsamlı inceleme, karbon dolgu maddeleri takviyeli polimer matrisli kompozitlerin çok yönlü alanını araştırarak mekanik performanslarına, üretim süreçlerine, yapısal uygulamalarına ve ilgili zorluklara ışık tutmaktadır. Sayam, mevcut literatürün titiz analizi ve sentezi yoluyla, karbon elyaf takviyeli polimer kompozitlerin (KETK 'ler) evrimi hakkında bilgi

vermekte ve doğal sınırlamalarının üstesinden gelmek için yenilikçi yaklaşımları araştırmaktadır. İnceleme, düzgün KETK 'lerin mekanik özelliklerini inceleyerek, performanslarını etkileyen temel parametreleri açıklığa kavuştururken, bu kompozitlerin yaygın olarak benimsenmeleri önündeki engelleri tanımlamaktadır. Özellikle, inceleme, kısa karbon elyaf takviyeli termoplastik kompozitlerin, geleneksel KETK 'lere kıyasla gelişmiş tokluk ve arayüz özellikleri sunan, umut verici bir alternatif malzeme olarak potansiyelini vurgulamaktadır.

Geleneksel KETK'lerin ötesine geçen Sayam, mekanik özellikleri geliştirmek ve dezavantajları azaltmak için karbon elyafın ve diğer yüksek performanslı elyafın bir kombinasyonundan yararlanan elyaf hibrit kompozitlerin stratejik avantajlarını araştırmaktadır. Ayrıca, inceleme, sinerjik takviye etkileri elde etmek ve kırılma davranış ve zayıf arayüzey bağı gibi düzgün KETK 'lerin eksikliklerini gidermek için karbon nanotüpler, grafen ve nano elmasları içeren hiyerarşik kompozitler alanını incelemektedir. Sayam, çeşitli karbon dolgu takviyeli kompozitlerin mekanik performansını tartışmanın yanı sıra, farklı üretim yöntemlerini titizlikle inceleyerek, bu yöntemleri performansa göre kategorize etmekte ve gelecekteki potansiyel alanları önermektedir. Fütüristik bir üretim yöntemi olarak üç boyutlu baskının araştırılması ve karbonlu malzemeler bağlamında avantajlarının ve sınırlamalarının ayrıntılı bir analizi ortaya konmaktadır. Ayrıca, inceleme, havacılık, otomobil, spor malzemeleri ve rüzgâr enerjisi sektörleri dahil olmak üzere çeşitli endüstrilerde karbon dolgu maddeleri takviyeli kompozitlerin yapısal uygulamaları hakkında fikir vermektedir. Sayam, mevcut zorlukları ve gelecekteki beklentileri belirleyerek, bu gelişmiş kompozit malzemelere yönelik küresel talebin üstel büyüme yörüngesinin altını çizerek, yapısal mühendislik ve malzeme biliminin geleceğini şekillendirmedeki önemli rollerini göstermektedir.

Jung ve Park (2019), tarafından yürütülen çalışma, elektron ışını etkisinin karbon elyaf takviyeli termoplastik (KETTP) kompozitler üzerindeki sinerjik etkisini, gerilme mukavemetlerini arttırmaya odaklanarak araştırmıştır. Yüksek yoğunluklu polietilen (YYP) bazlı KETTP'leri yüksek enerjili elektron ışınları ile işleme tabi tutarak, gerilme mukavemeti üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Termoplastik reçinenin çapraz bağlanması ve karbon elyaf (KE) ve YYP arasındaki arayüzey etkileşimlerini artıran yüzey fonksiyonel gruplarının oluşumu ile ilgili çalışma sonuçları ortaya konmuştur. KETTP'ler, gelişmiş üretkenlik ve basitleştirilmiş üretim süreçleri gibi

avantajlar sağlayarak geleneksel KETK'lere umut verici bir alternatif sunmaktadır. Bununla birlikte, KE'ler ve termoplastik reçine arasındaki zayıf temas davranışı ile ilgili zorluklar, bu yöntemin yaygın olarak benimsenmesini engellemektedir. Jung'un çalışması, KE ve YYP 'nin yüzey özelliklerini değiştirmek için elektron ışınlaması ile yapışma kuvvetini arttırdığı ve reçineden KE'ye verimli yük transferi konusundaki zorlukları ele almaktadır.

Spektroskopik analiz yoluyla yapılan incelemede Jung, ışınlama sonrası KE ve YYP yüzeyinde çeşitli oksijen içeren fonksiyonel grupların oluşumunu doğrulamaktadır. Bu fonksiyonel grupların, KE'lerin ve YYP 'nin arayüzünde güçlü yapışma oluşumunu kolaylaştırdığı ve KETTP'lerin gelişmiş mekanik özelliklerine katkıda bulunduğu ifade edilmiştir. Ek olarak, çalışma, verimli yük transferini kolaylaştırarak ve kompozit bütünlüğü iyileştirerek KERTP'lerin gerilme mukavemetini daha da artıran termoplastik reçinede çapraz bağlamanın rolünü vurgulamaktadır. Genel olarak, Jung'un araştırması, termoplastik bazlı KETTK'lerin mekanik özelliklerini geliştirmek için basit ama güçlü bir yöntem olarak elektron ışını kullanımının potansiyelinin altını çizmektedir. Bu çalışma, çapraz bağlama ve arayüzey etkileşimlerinin sinerjik etkilerini açıklığa kavuşturarak, çeşitli endüstrilerde gelişmiş performans özelliklerine ve daha geniş uygulanabilirliğe sahip gelişmiş KETTP'lerin geliştirilmesine katkı sunmaktadır.

Natrayan ve Anjibabu Merneedi (2011), istifleme dizisinin kompozitlerin mekanik özellikleri üzerindeki etkisine odaklanarak, hafif yük taşıyıcı yapılar için cam ve karbon dokuma kumaşlarla güçlendirilmiş hibrit kompozit laminatları araştırmaktadır. Polimer matrisli kompozitler, özellikle karbon ve cam elyafla güçlendirilmiş olanlar, hafif yapıları ve yüksek mukavemet-ağırlık oranları nedeniyle çeşitli endüstrilerde ilgi görmektedir. Otomotiv uygulamalarında, yakıt verimliliğini artırmak ve çevresel etkiyi azaltmak için hafif yapıların gerekli olduğu ifade edilmektedir. Otomotiv endüstrisi, belirli bileşenler için polimer matrisli kompozitleri giderek daha fazla benimserken, yüksek malzeme maliyetleri, yavaş üretim oranları ve geri dönüştürülebilirlik sorunları gibi zorluklar, bu ürünlerin yaygın kullanımlarını engellemektedir.

Bu zorlukların üstesinden gelmek için bir epoksi matrisinde cam ve karbon dokuma kumaşların farklı istifleme dizileri kullanılarak üretilen hibrit kompozit

laminatların mekanik özelliklerini araştırmıştır. Deneysel prosedürler, çeşitli karbon-cam elyaf oranlarına ve istifleme dizilerine sahip laminatların yaş serim imalatını ve ardından gerilme, basma ve üç noktalı eğme dahil olmak üzere statik testleri içermektedir. Çalışmanın sonuçları, %50 karbon elyaf takviyeli hibrit kompozit laminatların, karbon katmanları dış cepheye yerleştirildiğinde en iyi eğilme özelliklerini sergilediğini ortaya koymaktadır. Alternatif olarak, alternatif karbon/cam yerleşimli kompozitlerin en yüksek basınç dayanımını gösterdiği; istifleme dizisinin çekme özellikleri üzerinde minimum etkiye sahip olduğu ve eğilme ve basınç özelliklerinin önemli ölçüde etkilendiği ifade edilmektedir.

Genel olarak, hibrit kompozit malzemelerin mekanik davranışının anlaşılmasına katkıda bulunmakta ve maksimum güç ve performans elde etmek için istifleme dizilerini optimize etme konusunda içgörüler sağlamaktadır. Cam ve karbon elyafın sinerjik etkilerinden yararlanan bu hibrit laminatlar, otomotiv ve diğer endüstrilerdeki hafif yük taşıyıcı yapılar için umut verici çözümler sunmaktadır.

Ashrafi ve Guan (2011), araştırmasında, tek duvarlı karbon nanotüplerin entegrasyonu yoluyla epoksi/karbon elyaf laminat kompozitlerin mekanik performansını artırma ile ilgili araştırma yapmaktadır. Bu çalışma lamine kompozitlerin çok işlevliliğini ve yapısal bütünlüğünü artırmak için tek duvarlı karbon nanotüplerin üstün özelliklerinden yararlanan kompozit malzemeler alanında yenilikçi bir çalışmadır. Tarihsel olarak, karbon nanotüpler geleneksel lamine kompozitlerin doğal zayıflıklarını ele alma potansiyelleri nedeniyle büyük ilgi görmüştür. Bu zayıflıklar, delaminasyon, düşük darbe direnci, zayıf elyaf matris arayüzü ve optimal olmayan enine mekanik özellikler gibi sorunları içermektedir. Ashrafi dispersiyonu artırarak, epoksi reçine ile nanotüpler arasında daha güçlü etkileşim oluşmasını sağlamayı amaçlamakta, böylece karbon elyaf epoksi laminatların genel mekanik performansını geliştirilmesi konusunu incelemektedir.

Tek duvarlı karbon nanotüplerin prepreg yoluyla laminat matris içine entegrasyonu, alternatif yöntemlere göre birçok farklı avantaj sunan stratejik bir yaklaşım olarak öne çıkmaktadır. Özellikle, bu entegrasyon yöntemi, laminat yapı içindeki kalınlık değişimleri ve eşit olmayan takviye gibi endişeleri ortadan kaldırırken, geleneksel üretim süreçlerindeki kesintileri en aza indirerek sorunsuz ölçeklenebilirlik olanağını sunmaktadır. Ashrafi, tek duvarlı karbon nanotüplerin

ağırlıkça%0,1'lik bir oranda kullanımının bile birden fazla performans metriğinde somut iyileştirmeler sağladığını göstermiştir.

Tek duvarlı karbon nanotüplerin kompozit yapı içine dahil edilmesi, darbe hasarı alanında bir azalma, darbe sonrası sıkıştırma mukavemetinde bir artış ve hem Mod I hem de Mod II interlaminar kırılma tokluğunda önemli iyileştirmeler dahil olmak üzere dikkate değer iyileştirmeleri mümkün kılmıştır. Çok duvarlı karbon nanotüp ile modifiye edilmiş lamine kompozitler hakkındaki mevcut literatürle yapılan karşılaştırmalı analizler, tek duvarlı karbon nanotüplerin üstün etkinliğini daha da vurgulamaktadır. Ashrafi'nin araştırması, tek duvarlı karbon nanotüplerin stratejik entegrasyonu yoluyla yeni bir yüksek performans ve çok işlevlilik çağını başlatan kompozit malzeme mühendisliğinde bir paradigma değişimini ortaya koymaktadır.

Fu ve Lauke (2006), tarafından yapılan çalışmada hibrit elyaf kompozitlere, özellikle kısa cam elyaf ve kısa karbon elyaf ile güçlendirilmiş polipropilen (PP) matrislerine yönelik olarak mekanik özellikleri geliştirmek için hibridizasyon potansiyeli incelenmiştir. Hibrit kompozitler, ilgili sınırlamalarını azaltırken her bir elyaf türünün farklı avantajlarından yararlanmak için stratejik bir yaklaşım ortaya konmaktadır.

Olağanüstü mukavemetleri ve sertlikleri ile tanınan karbon elyaf, yüksek performanslı takviye avantajı yanında yüksek maliyet kırılma dezavantajı ile dikkat çekmektedir. Öte yandan, cam elyaf, üstün kırılma direnci ile uygun maliyetli takviye sağlamakta, ancak daha düşük mukavemet ve sertlik dezavantajı da sergilemektedir. Araştırmacılar, bu lifleri tek bir polimer matrisi içinde birleştirerek, mukavemet, sertlik, kırılma direnci ve maliyet etkinliği gibi özellikleri optimize eden sinerjik bir denge elde etmeyi hedeflemektedir. Tablo 2.6'da cam elyafı, karbon elyafı ve polipropilen gibi malzemelerin 23°C'de mekanik ve fiziksel özelliklerini içeren bir tablo olduğunu belirtmek mümkün. Tablo muhtemelen bu malzemelerin gerilme mukavemeti, Young modülü, yoğunluk ve çap gibi özelliklerini karşılaştıran veriler sunmaktadır.

Tablo 2.6: 23 °C'de malzemelerin mekanik ve fiziksel özellikleri (Fu ve Lauke 2006)

Malzeme	Gerilme mukavemeti (MPa)	Young modülü (GPa)	Yoğunluk (Kg/m ³)	Çap (mm)
Cam elyafi	1956,0	78,51	2550,0	13,8
Karbon elyaf	3950,0	238,00	1770,0	7,5
Polipropilen	31,6	1,30	903,0	

Fu ve Lauke (2006), tarafından yürütülen deneysel araştırmalar, hibrit PP kompozitlerin mekanik davranışında dikkate değer eğilimler göstermektedir. Çekme mukavemeti ve modülü, karbon elyafın artan nispi hacim fraksiyonu ile yükseliş eğilimi göstermektedir. Çalışma karbon elyaf dahil edilmesinin kompozitin yük taşıma kapasitesini artırdığını ve mukavemet ve sertlikte iyileşmelere yol açtığını göstermektedir. Bununla birlikte, bağıl karbon elyaf hacim fraksiyonu arttıkça, hibrit kompozitlerin kırılma geriliminin azaldığı, yani mukavemet ve süneklik arasında ters korelasyon olduğu gösterilmektedir.

Hibrit karışımlar kuralı kullanılarak çekme özellikleri üzerindeki hibrit etkilerin değerlendirilmesi, ilgi çekici içgörüler ortaya koymaktadır. Çekme mukavemeti, RoHM tahminlerinden pozitif bir sapma gösterirken, hibridizasyondan kaynaklanan sinerjik bir gelişme olduğunu düşündürürken, gerilme modülü, sertlik üzerinde minimum hibrit etkileri gösteren RoHM tahminleriyle yakından uyumlu bulunmuştur. Ayrıca, hibrit kompozitlerin kırılma dayanımı, sadece karbon elyaf takviyeli kompozitlerin kırılma dayanımı değerini aşmakta ve hibridizasyonun süneklik üzerindeki olumlu etkisini vurgulamaktadır.

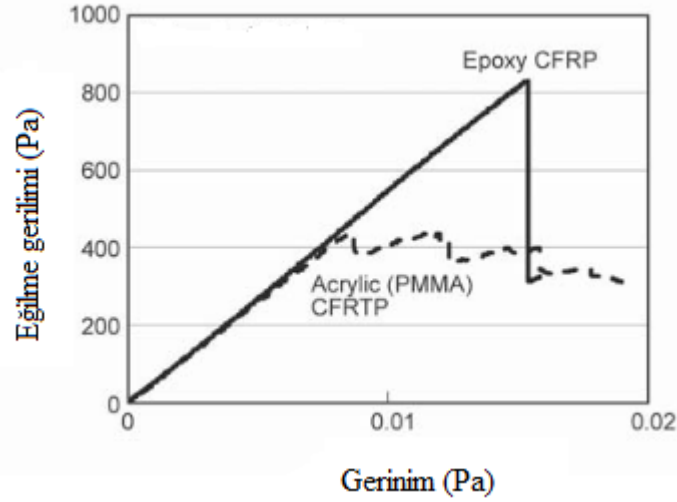
Bu hibrit kompozitlerin hazırlanması, ekstrüzyon bileşimi ve enjeksiyon kalıplama gibi titiz işleme tekniklerini içermektedir. Fu'nun araştırması, polimer matrisi içinde liflerin homojen dağılımını sağlamak için ekstrüzyon ve enjeksiyon kalıplama sırasında sıcaklık profilleri de dahil olmak üzere işleme parametrelerinin optimize edilmesinin önemini vurgulamaktadır. Araştırmacılar, işleme koşullarında ince ayar yaparak hibrit kompozitlerin mekanik performansını daha da artırabilecektir.

Elyaf türleri ve matris özellikleri arasındaki karmaşık etkileşimi ele almak için hibrit elyaf kompozitlerin potansiyeli hakkında değerli bilgiler sunmaktadır. Araştırmacılar, elyaf hacmi fraksiyonlarının dikkatli bir şekilde seçilmesi ve işleme parametrelerinin optimizasyonu yoluyla, özel uygulama gereksinimlerine göre uyarlanmış hibrit kompozitler tasarlamaktadır. Otomotivden havacılığa kadar çeşitli endüstriler için yeni çözümler sunmaktadır.

2.4.2 Uygulamalar ve Performans İyileştirmeleri

Araştırmacı, Kish ve Nakao (2016) potansiyel matrisler olarak akrilik polimerlere odaklanarak karbon elyaf takviyeli termoplastik polimerler (KETTP'ler) alanını araştırmaktadır. Çalışmada KE'ler ve akrilik matrisler arasındaki yapışmayı arttırmak için metil metakrilat (MMA) ile kopolimerizasyon için çeşitli fonksiyonel monomerler araştırılmıştır. Akrilamid (AAm) içeren akrilik kopolimerler, saf polimetil metakrilatı (PMMA) aşarak KE'lerle sağlam arayüzey yapışma mukavemeti sergilemektedir. Ek olarak, hidroksietil akrilat (HEA) ve hidroksietil akrilamid (HEAA) gibi hidroksil grupları içeren kopolimerler, ıslak koşullarda bile KERTP'lerin umut verici eğilme mukavemeti sağlamaktadır.

Deneysel çalışmalarda, ekstrüzyon birleştirme ve enjeksiyon kalıplama teknikleri yoluyla KETTP'ler hazırlanmıştır. Matris polimerleri MMA ve fonksiyonel monomerlerden sentezlenirken, KE düz dokuma kumaşlar takviye elemanı olarak kullanılmıştır. Ortaya çıkan KERTP'ler, mekanik özelliklerde önemli gelişmeler sergilemiş, özel akrilik matrislerin arayüzey yapışmasını ve genel performansı artırmadaki etkinliğini göstermiştir. Şekil 2.11'de epoksi ve akrilik köprüleştirilmiş termoplastik kompozitlerin (KETK) eğilme gerilme-gerinim eğrilerini karşılaştırmaktadır.

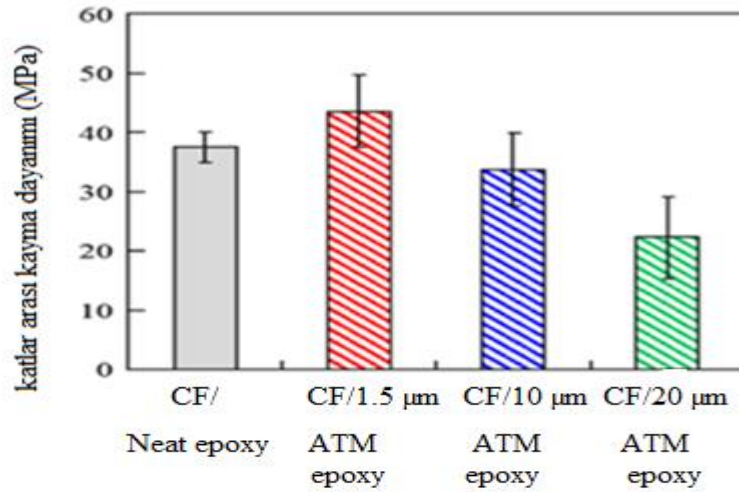


Şekil 2.11: Epoksi KETK ve akrilik KETK'nin eğilme gerilme-gerinim eğrileri (Kish ve Nakao 2016)

Epoksi KETK'ler ile yapılan karşılaştırma, akrilik KERTP'lerin potansiyelini aydınlatmaya yardımcı olacaktır. Epoksi KEKETP'ler üstün eğilme mukavemetine sahipken, akrilik KERTP'ler özellikle kopolimerize matrislerle kayda değer ilerleme göstermektedir. Kırılma modu analizi, KE yüzeylerine gelişmiş yapışma gösteren kopolimerize akrilik matrisler ile mekanik davranışı göstererek arayüzey yapışmasının önemli rolünün altını çizmektedir. Özetle, H. Kishi'nin araştırması, KERTP'lerde özel akrilik matrislerin önemini altını çizerek, arayüzey yapışmasını ve mekanik özellikleri geliştirmeye yönelik içgörüler sunmaktadır. Fonksiyonel monomerlerin dahil edilmesi, KE'lere daha iyi yapışmayı kolaylaştırarak, çeşitli endüstrilerde uygulama potansiyeline sahip yüksek performanslı KERTP'lerin önünü açmaktadır. Bu bulgular, hibrit kompozitlerin anlaşılmasına katkıda bulunmaktadır.

Çalışma, matris bileşimi, elyaf takviye ve işleme teknikleri arasındaki etkileşimin daha fazla araştırılması, KERTP performansını iyileştirmek ve çeşitli endüstriyel sektörlerde faydalarını genişletmek için ek yöntemler hakkında bilgi vermektedir. KETK bileşenlerinin yapısal bütünlüğünü ve uzun ömürlülüğünü sağlamada kritik faktörler olan arayüzey yapışmasını desteklemek ve delaminasyonu azaltmak için çeşitli araştırmalar devam etmektedir. Kwon ve Park 2019, bu zorlukların üstesinden gelmeyi amaçladığı çalışmada, KEKETP'leri güçlendirmenin bir yolu olarak alüminyum trihidroksit mikropartiküllerinin kullanımına odaklanmıştır. Bu araştırma, KETK'lerin katmanlar arası özelliklerini uygun maliyetli ve pratik bir şekilde geliştirmeye yönelik önemli bir adımı temsil etmektedir.

KETK'ler, özellikle katmanlar arası kesme mukavemeti ve katmanlar arası kırılma tokluğu olmak üzere, katmanlar arası özelliklerindeki doğal zayıflıklar bilinen bir dezavantaj olup, bu eksiklik malzemelerde delaminasyona yol açabilmektedir. Bu sınırlamaların üstesinden gelmek için çeşitli yaklaşımlar araştırılmıştır. Geleneksel yöntemler, dikiş, örgü iğneleme gibi tekniklerle KE yapısının değiştirilmesini içermektedir. Bu yöntemler genellikle yüksek üretim maliyetleri gerektirmekte ve düzlem içi mekanik özellik kayıplarına neden olabilmektedir. Birleştirme ajanları ve boyutlandırma ajanları kullanılarak KE'lerin yüzey modifikasyonu, arayüzey yapışmasını arttırmak için izlenen yollar arasındadır. Bununla birlikte, bu yaklaşımlar prosedürel optimizasyon gerektirmekte ve üretim giderlerini arttırabilmektedir.



Şekil 2.12: Çeşitli boyutlarda ATH parçacıklarına sahip ATH takviyeli KETK'ler için ILSS test sonuçları (Kwon ve Park 2019)

Buna karşılık, mikropartiküller kullanılarak çok ölçekli takviye yapılarının dahil edilmesi umut verici bir alternatif sunmaktadır. Şekil 2.12'de çeşitli boyutlarda ATH (Alüminyum Trihidrat) parçacıklarına sahip ATH takviyeli köprüleştirilmiş termoplastik kompozitlerin (KETK) arasındaki interlaminar shear strength (ILSS) test sonuçlarını göstermektedir. Şekil, ATH parçacıklarının büyüklüğünün ve kompozit malzemenin mekanik dayanıklılığı üzerindeki etkilerini analiz etmektedir. Özellikle ATH mikropartikülleri, erişilebilir maliyetleri ve polimerlerin mekanik özelliklerini artırma yetenekleri nedeniyle dikkat çekmiştir. Epoksi matrisleri ve KE boyutlandırma ajanları ile uygun etkileşimleri kolaylaştıran üç hidroksil grubu ile ATH mikropartikülleri, KETK interlaminar özelliklerini desteklemek için önemli bir potansiyele sahiptir.

ATH mikropartiküllerinin KETK interlaminar özellikleri üzerindeki etkisini sistematik olarak araştırılmıştır. Çalışmada, epoksi reçine matrislerine dahil edilen ATH parçacıklarının (1.5 µm, 10 µm ve 20 µm) boyutunu değiştirerek, KETK performansını artırmak için en uygun parametreleri aydınlatmayı amaçlanmıştır. 1,5 µm ATH partiküllerinin dahil edilmesi, kütleme davranışından ödün vermeden reçine çekme özelliklerinde önemli iyileştirmeler sağlamıştır. Ayrıca, KE'ler ve epoksi reçine arasındaki arayüzey yapışmasında, ihmal edilebilir boşluk veya kusur oluşumuna rağmen iyileşmeler gözlenmiştir. Bununla birlikte, çalışma aynı zamanda ATH mikropartiküllerinin etkinliğinde, özellikle partikül boyutuyla ilgili nüansları da ortaya çıkarmıştır. 1,5 µm ATH takviyeli KETK 'ler üstün interlaminar özellikler sergilerken, 10 µm ve 20 µm ATH partikülleri ile takviyeli KETK'ler, reçine gerilme özelliğinin bozulması ve empenye sorunları nedeniyle düşük performans sergilediği görülmüştür. KE'lerin yüzey özelliklerini geliştirmeyi amaçlayan yüzey modifikasyon stratejileri, KETK kompozitlerinin genel performansını ve işlevselliğini artırmada çok önemli bir rol oynamaktadır.

KE'lerin yüzey özelliklerini geliştirmek için karbon nanotüplerin (KNT'ler) KE yapılarına entegrasyonu KNT'lerin yüksek en-boy oranları, olağanüstü mekanik özellikleri ve olağanüstü elektriksel iletkenlikleri önemli fırsatlar sunmaktadır. CNT'ler ürün yüzey alanını artırmak ve KE'ler ile epoksi matris arasındaki yapışmayı iyileştirmek amaçlı kullanılmakta, KNT'lerin etkin entegrasyonu sayesinde, KE'ler ve matris malzemesi arasındaki yüzey enerjisi uyumsuzluğunu azaltmak mümkün hale gelmektedir.

Badakhsh ve An (2020), öncülük ettiği çalışmada, KNT'leri KE yapılara aşılama için yeni metodolojiler geliştirilmiştir. Elektrokaplama yöntemiyle bir katalizör olarak nikel (Ni) yararlanan araştırmacılar, KE yüzeylerinde KNT'lerin yerleşmesini ve bu yüzeylerde yüzey enerjisini önemli ölçüde artmasını sağlamışlar, böylece epoksi reçinesi ile daha iyi yapışma sağlayan yenilikçi yaklaşım ortaya koymuşlardır. Taramalı elektron mikroskopu (SEM) kullanılarak gerçekleştirilen ayrıntılı morfolojik analizler, KNT'lerin yapılarına başarılı bir şekilde entegrasyonunun mümkün olduğunu göstermiştir.

KNT aşılama KE'lerin KETK kompozitlerinin özellikleri üzerindeki etkilerinin araştırıldığı çalışmada KNT entegrasyonunun KETK'lerin temel

performans ölçütleri üzerindeki derin etkileri açıklığa kavuşturulmuştur. Elektriksel özdirenç ölçümleri, KNT ile aşıl原因an KETK için hem işlemsiz muadiller KETK hem de KNT eklenmiş KETK muadillerine kıyasla özdirençte önemli bir azalma olduğunu göstermiştir. Ek olarak, eğilme dayanımı testi sonuçları, KNT'lerin dahil edilmesine atfedilebilen mekanik özelliklerde önemli bir gelişme elde edildiğini göstermiştir. KNT birleşmesi ile kompozit süneklik arasındaki nüanslı ilişkiye ışık tutan süneklik testlerinden elde edilen bilgiler özellikle ilgi çekiciydi. KNT ile yetiştirilen KETK yüksek eğilme mukavemeti sergilerken, KNT eklenmiş KETK'ye kıyasla süneklik indeksinde hafif bir azalma gözlemlendi. Bu ilgi çekici bulgu, KNT büyüme mekanizmaları ile KETK kompozitlerinin ortaya çıkan mekanik davranışı arasındaki karmaşık etkileşimin altını çizmektedir.

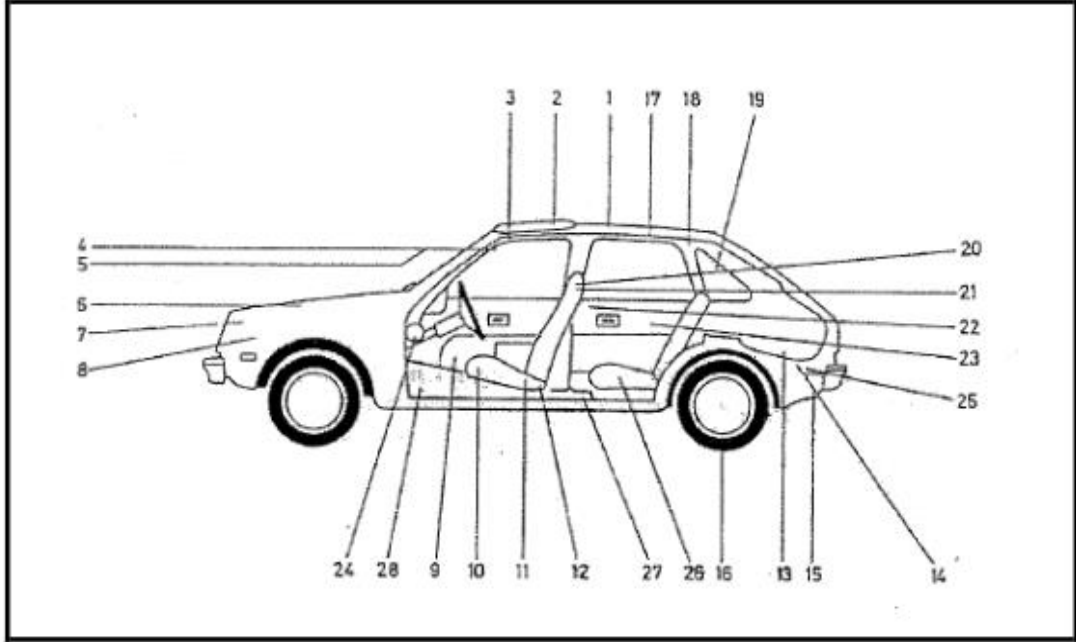
Özetle, Arash Badakhsh ve araştırma ekibi tarafından yürütülen öncü çalışma, KETK kompozitlerinin performansını artırmak için KNT'leri KE substratlarına entegre etmenin dönüştürücü potansiyelinin altını çiziyor. Katalizör ağırlık oranlarının ve büyüme koşullarının titiz optimizasyonu sayesinde araştırmacılar, yüzey enerjilerinde ve mekanik özelliklerde benzeri görülmemiş gelişmelerin kilidini açabilir ve böylece endüstrilerdeki çeşitli uygulamalar için uyarlanmış yeni bir gelişmiş kompozit malzeme çağını başlatabilir. Bu bulgular, kompozit malzeme bilimi alanında önemli bir ilerlemeyi temsil ediyor ve benzersiz performans özelliklerine sahip yeni nesil KETK kompozitlerinin tasarımı ve üretimi hakkında değerli bilgiler sunuyor.

2.5 Otomotivlerde Tekstil Bileşenli Yapıların Kullanımı

Otomotiv tekstilleri, kara, deniz, hava taşıma araçlarının yanı sıra, uzay sanayiinde de kullanılan teknik tekstillerden oluşmaktadır. Değer olarak yaklaşık %20'lik paya sahip olan bu tekstil materyalleri, teknik tekstillerin de en önemli grubunu oluşturmaktadır. İzolasyon, güvenlik, dekorasyon ve filtreleme gibi işlevlerin yanı sıra, araçlarda konfor da sağlayan bu malzemelerin, dünya genelinde motorlu taşıtların artışı ile kullanımlarının da arttığı görülmektedir.

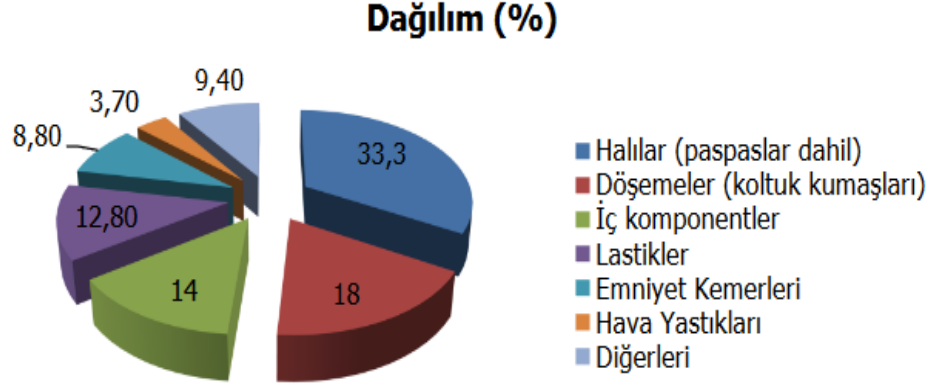
Otomobillerde kullanılan teknik tekstiller dekorasyon, izolasyon, filtreleme gibi işlevlerin yanı sıra araçlarda konfor da sağlamaktadır. Araçların iç döşemelerinde

kullanılan tekstiller de dayanıklılık, toz tutmama, konfor gibi birçok açıdan önem arz etmektedir. Şekil 2.13'te otomobillerde kullanılan çeşitli tekstil malzemelerinin yerlerini göstermektedir. Ayrıca, tekstil malzemeleri taşıt araçlarının zırh kaplamalarında da yoğun olarak kullanılmaktadır (Çokkeser ve Çeven 2011).



Şekil 2.13: Otomobillerde tekstil malzemelerinin kullanıldığı yerler (Çokkeser ve Çeven 2011)

(1) tavan, (2) güneşlik, (3) iç tavan destek malzemesi, (4) güneşten koruyucu dolgu maddesi, (5) güneşlik kaplama malzemesi, (6) karbüratör filtresi, (7) batarya ayıracağı, (8) kayışlar, (9) kapı pedleri, (10) hava yastığı, (11) emniyet kemeri bağlantı noktası kaplaması, (12) emniyet kemeri kaplaması, (13) bagaj kaplamaları, (14) bagaj zemin kaplamaları, (15) susturucu sargı, (16) lastik destek malzemeleri, (17) tavan iç astar kaplamaları, (18) iskelet parçaları, (19) cam fitil kaplamaları, (20) kalıplanmış koltuk kaplanması, (21) döşeme destekleri, (22) yalıtım ve izolasyon malzemeleri, (23) dekoratif kumaşlar, (24) filtreler, (25) kalıplanmış yakıt deposu, (26) poliüretan kaplamalı destek, (27) halılar, (28) tafting halı desteği.



Şekil 2.14: Otomobiller kullanılan tekstil malzemelerinin dağılımları (Çokkeser ve Çeven 2011)

Şekil 2.14'ün otomobillerde kullanılan çeşitli tekstil malzemelerinin dağılımını gösterdiğini ve bu malzemelerin araç içi ve dışı bileşenlerde nasıl kullanıldığını gösterdiğini varsayabiliriz. Araçlarda, emniyet kemeri, hava yastıkları, iç yüzey kaplama malzemeleri, koltuk döşemelikleri, otomobil örtüleri, kord bezleri, iskelet parçaları, dolgu malzemeleri, lastikler, hortumlar, halı, perde, halat, filtre ve kompozit yapılar gibi 28 ayrı yerinde kullanılan tekstil ürünlerinin ayrıca taşıtların zırh kaplamalarında da yoğun olarak kullanıldığı görülmektedir. Tüm bu malzemelerde kullanılan tekstil ürünlerinin, kalite arttırıcı ve daha ekonomik olması yolundaki arayışlar sürmekte ve yüksek mukavemet, uzun süren dayanım, hafif ve iyi bir görünüm sergilemesi beklenmektedir. Özellikle emniyet kemerlerinin üretiminde ve lastiklerde, mukavemet değerleri iyi olan polyester ile aşınma dayanımı yüksek olan poliamid liflerinin kullanıldığı görülmektedir (İnan B 2020).

2.6 Karbon Elyafın Sürdürülebilirlik Yönü

Chen ve Feng (2005), araştırmasında, karbon elyaf takviyeli polimer (KETP) üretiminde ihtiyaç duyulan yüksek enerji tüketimini sorgulamakta, enerji verimliliği, enerji tasarrufu konularının yanında yeniden kullanım seçeneği ile KE ve KETP üretimi için gerekli enerjinin en aza indirilme olanaklarını araştırmaktadır. Çalışma, enerji tüketimini azaltmak ve üretim maliyetlerini azaltmak için karbon elyafın yeniden kullanımını teşvik ederek sürdürülebilir bir çözümü savunarak, otomobillerdeki bazı yapısal parçaların atık KEKM kullanılarak ve/veya karbon Elyaf takviyeli termoplastikler kullanılarak üretilmesini önermektedir.



Şekil 2.15: Ezilmiş KEKM (Chen ve Feng 2005)

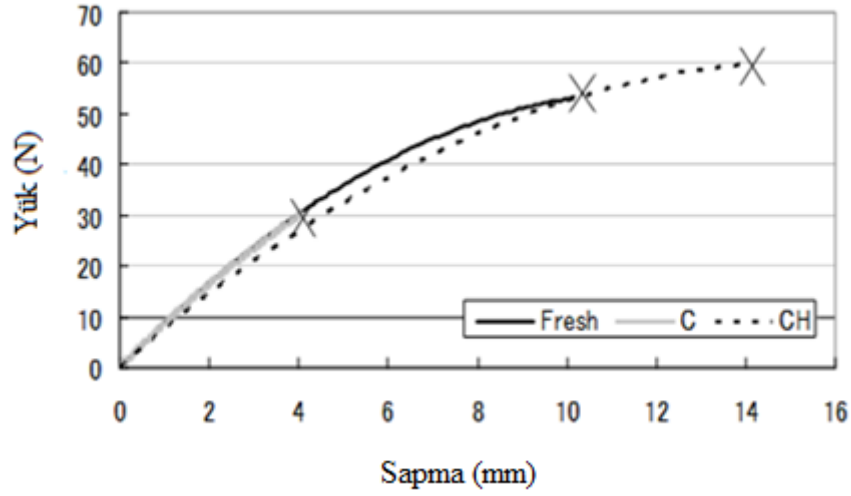
Araştırma, atık karbon elyafın, atık karbon takviyeli kompozit malzemelerin ufalanarak-kesilerek dolgu malzemesi şeklinde kullanımını önermektedir. Yeni ürünlerin tasarımı ve üretimi için termoplastik reçine olarak polikarbonat (PC) seçimi, fiyat, kalıplanabilirlik ve kütle verimliliği hususlarına bağlı optimizasyon yapılabileceği ifade edilmektedir. Şekil 2.15'te ezilmiş kompozit malzemelerin görüntülenmektedir. Tablo 2.7'de ise üç nokta eğilme testinin sonuçlarını içerdiğini tahmin edebilir. Yeni geliştirilmesi önerilen ürünler için 130-200 MPa'lık bir mukavemet aralığı ve 5-20 GPa'lık bir elastik modül aralığı gibi mekanik özellikler hedef değerler olarak tanımlanmaktadır.

Tablo 2.7: Üç nokta eğilme testinin sonuçları (Chen ve Feng 2005)

	VF elyaf hacim oranı (%)	Young modülü (GPa)	Mukavemet (MPa)	Sapma (%)
Yeni	22,5	7,98	142	2,15
K (Crushed CFRP)	17,8	8,22	72.0	0,89
CH(CrushedCFRP that epoxy resin was removed with heat)	23,5	7,25	122	2,18

Deney aşaması, "6 mm'de yeni doğranmış KE", "ezilmiş KEKM (KE/Epoksi Vf=%60)" ve "Epoksi reçinesi çıkarılarak ezilmiş KEKM" dahil olmak üzere toplam 3 farklı KEKM numunesi üzerinde gerçekleştirilen üç noktalı eğilme testini içermektedir. Çalışma bulguları numuneler arasında benzer eğilme modülü değerleri elde edildiğini ortaya koymakta; en yüksek mukavemet, artık epoksi reçine ile karbon

elyaf formunun korunmuş olduğu “Ezilmiş KEKM (KE/Epoksi Vf=%60)” numunesinde gözlemlenmiştir.



Şekil 2.16: Eğilme Yüğü --Sehim (deplasman) Eğrileri (Chen ve Feng 2005)

Bulgular, ezilmiş KEKM'nin (KE/Epoksi) polikarbonat ile yeniden kalıplandığında ikincil otomobil parçaları olarak yeniden kullanılabilirliğini ve geri dönüştürülmüş KEKM 'de kırılma eğilimi önlemek için epoksi reçinenin çıkarılmasının önemini vurgulamaktadır. Araştırmada ayrıca, reçinenin bozulması ve elyafın kısalması nedeniyle geri dönüşüm KE kullanımı ile üretilen numunelerin mekanik özelliklerinde bozulma olduğu ifade edilmiştir. Sonuçlar, tutarlı mekanik özellikleri korumak için sonraki geri dönüşüm aşamalarında reçine ve elyaf ilavesinin dikkatli bir şekilde yönetilmesi ihtiyacının altını çizmektedir.

Polipropilen kompozitlerde kenevir lifi ve geri dönüştürülmüş karbon elyafın hibridizasyonuna odaklanan araştırmacı Shah ve Fehrenbach, (2019) tarafından yürütülen çalışmada yüksek mukavemet gerektiren uygulamalar için doğal elyaf takviyeli kompozitlerin mekanik özelliklerinin araştırılması amaçlanmıştır. Çalışmada polipropilen termoplastik matris içinde kenevir lifinin geri dönüştürülmüş karbon lifi ile hibrit olarak kullanımı ve bu kompozit yapıların mekanik özellikleri araştırılmıştır. Geri dönüştürülmüş karbon elyafın kenevir lifi ile güçlendirilmesi ile üretilen kompozit numunelerin çekme mukavemetinde kayda değer şekilde %10-15'lik bir artış; eğilme mukavemetinde %30-35 aralığında iyileşme elde edilmiştir. Ayrıca, kenevir elyaf takviyeli geri dönüştürülmüş karbon elyaf içerikli polipropilen kompozitlerde darbe dayanımında %35-40 aralığında dikkate değer bir artış elde edilmiştir.

Araştırma, gelişmiş özellikleri ortaya konan geri dönüştürülmüş karbon elyaf içerikli termoplastik matrisli kompozitleri ekonomik olarak uygulanabilir, çevresel olarak sürdürülebilir ürünler olarak tanımlamaktadır. Çalışma ile sentetik ve doğal liflerin bir arada kullanıldığı hibrit kompozitlerin mekanik özellikleri hakkında önemli bulgular ortaya koymuştur. Bu yaklaşım ile yalnızca yüksek performanslı kompozitlerin geliştirilmesi değil, aynı zamanda farklı uygulamalar için uygun maliyetli ürün çeşidi tanımlanmıştır.

Meng ve Turner (2017), tarafından yapılan çalışmada akışkan yatak metodu ile geri dönüştürülmüş karbon elyafın (rKE) yeniden kullanımı ile (rKE) üretimi konusu araştırılmıştır. Özellikle havacılık ve otomotiv uygulamalarında küresel KE talebindeki üstel artış ve bu KE ile üretilen kompozit ürünlerin atıkları ve geri dönüşüm sürecinde ortaya çıkan atıkların yönetimi için yöntem önerilmektedir. Bu yöntemler arasında, piroliz ve akışkan yatak işlemi gibi termal işlemler bulunmakta olup; her iki yöntemde de karbon elyafın yapısal bütünlüğü korunurken, polimer matrisin ayrıştırılması işleminin mümkün olduğu ifade edilmektedir.

Çalışmasında açıklanan akışkan yatak işlemi, çeşitli polimer türleri ve kirleticilerin taşınmasını, ortamdan uzaklaştırılmasını mümkün kıldığı için önemli bulunmuştur. Bu işlem sonucunda elyaf mukavemetinde gözlenen azalmaya rağmen, akışkan yatak işlemiyle elde edilen rKE, kompozit imalatında yeniden kullanım için uygun KE olarak kabul görebilmektedir. Bu işlem süreci ile dögüsel üretim sürecinin uygulaması gerçekleşebilmekte, böylece işlenmemiş karbon elyafa olan bağımlılık azaltılabilmektedir.

Zhu ve Chen (2018), çalışmasında elektrikle çalışan heterojen katalitik bozunma yöntemi kullanarak karbon elyaf takviyeli plastiklerin geri dönüşümüne yönelik bir araştırma yürütmüştür. Bu kapsamda kullanım ömrü sonunda KEKM'lerin neden olduğu çevresel etkiler çeşitli boyutları ile ortaya konmuştur. KEKM'ler için geleneksel geri dönüşüm yöntemleri genellikle karmaşık süreçler, pahalı tesisler veya toksik kimyasallar ile işlem gerektiren süreçler olarak tanımlanmaktadır. Bu durum KEKM atıklarının kullanım potansiyelini sınırlamakta; geri dönüştürülmüş liflerin ticari değerini azaltmaktadır. Zhu'nun araştırmasında, epoksi reçineyi verimli bir şekilde ayrıştırmak ve bu koşullar altında bozulmamış karbon elyafı geri kazanmak

için elektrikle çalışan heterokatalitik ayrışma yöntemi, yeni bir geri dönüşüm teknolojisi olarak tanıtılmaktadır.

Basit ekipman ve toksik olmayan elektrolit bileşenleri kullanarak, işlenmemiş karbon elyaf ile karşılaştırılabilir özellikleri olan geri dönüştürülmüş karbon elyaf elde etmenin fizibilitesi hakkında bilgi vermektedir. Çalışma, KEKM'ler için sürdürülebilir ve uygun maliyetli geri dönüşüm teknolojileri olan mekanik parçalama, piroliz, kimyasal ayrışma ve yüksek sıcaklıkta akışkan yatak işlemleri hakkında bilgi vermektedir. Ayrıca bu yöntemlerin proses karmaşıklığı, tesis gereksinimleri, kirlilik oluşumu ve KEKM atıklarının zarar görmesi gibi dezavantajlar hakkında da değerlendirme yapılmaktadır. Buna karşılık, Zhu tarafından tanıtılan elektrikle çalışan heterojen katalitik bozunma yöntemi, karbon elyafın boyutsal ve mekanik özelliklerinin korunduğu, görece olarak daha kolay geri dönüşümün mümkün olduğu çevre dostu endüstriyel ölçekli bir yaklaşım tanıtımı yapmaktadır.

Pimenta ve Pinho (2010), çalışmasında karbon elyaf takviyeli polimerler için geri dönüşüm süreçlerini incelemiş olup, sürdürülebilir kompozit malzeme üretim yöntemleri hakkında bilgi vermiştir. Pimenta çalışmasında ayrıca artan KE takviyeli kompozit ürün uygulamaları ve artan atık kompozit yığınları arasındaki çelişkili dengeye dikkat çekmektedir. Bu ikilem, çevresel kaygılarla ekonomik zorunluluklar arasında kurulacak bir denge arayışına odaklanılması gerektiğini ifade etmektedir. KEKM geri dönüşümündeki zorluklar olan yapıların bileşimindeki çapraz bağlı termoset reçineler ve hibrit malzemelere dikkat çekilmektedir. İnceleme çalışmasında, bilimsel araştırmaların ve sektördeki gelişmelerin geri dönüştürülmüş KEKM kullanımında artış ve döngüsel ekonomiye katkı potansiyelinde yükselme olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, çevresel kaygılar ve yasal zorunluluklar, üretim maliyetlerinin yüksekliği ve finansal yönetimi konuları gibi aşılması gereken çok yönlü zorluklar olduğu ifade edilmektedir.

Pimenta ve Pinho, geri dönüştürülmüş KEKM 'ler için pazar büyüklüğünü araştırırken, otomotiv, havacılık ve inşaat gibi endüstrilerdeki yapısal bileşenlerde gelecek vaat eden bir uygulama yelpazesi olduğunu tanımlamaktadır. Geri dönüştürülmüş KEKM'lerin mekanik özellikleri ortaya konmuş olsa da, bu ürünlerin yapısal uygulamalara yaygın olarak kabul ve entegrasyon sağlamada engellerinhalen devam etmekte olduğu vurgulanmıştır. Paydaşlar arasındaki iş birliği ve sürekli

araştırma çabaları, teknik ve teknik olmayan engellerin aşılmasında temel çözüm yaklaşımları olarak ortaya çıkmaktadır. İnceleme, KEKM geri dönüşümünün doğasında bulunan zorlukları ve fırsatları açıklığa kavuşturarak, yalnızca stratejik karar verme sürecini bilgilendirmekle sınırlı tutulmamış, aynı zamanda kompozit malzemeler için daha yeşil, daha sürdürülebilir bir geleceğe yönelik kolektif eylem gerekliliğini ortaya koymaktadır.

Véronique ve Robert (2012), karbon elyaf takviyeli kompozit atık: Geri dönüşüm, enerji geri kazanımı ve düzenli depolamanın çevresel değerlendirilmesi başlıklı araştırmasında karbon elyaf takviyeli plastik malzeme atıkları için kullanılan çeşitli kullanım ömrü sonu işlemlerinin çevresel etkilerini araştırmıştır. KEKM'lere olan talep endüstriler arasında artmaya devam ettikçe, etkili atık yönetimi stratejilerine duyulan ihtiyacın çok daha önemli hale geldiği ifade edilmiştir.

Witik ve Jérôme (2017), tarafından yapılan çalışmada KEKM atıklarının bertarafını çevreleyen karmaşıklıklar ortaya konmuş ve geri dönüşümün, yakma yoluyla enerji geri kazanımının ve düzenli depolamanın çevresel etkileri değerlendirilmiştir. Avrupa Birliği (AB) atık yönetimi çerçeve direktifi, çevreye verilen zararı en aza indirmek için atık önleme, yeniden kullanım ve geri dönüşümün önemini vurgulamakta; düzenli depolama ve yakma gibi geleneksel atık işlemlerine katı sınırlamalar getirmekte ve geri dönüşümü tercih edilen bir seçenek olarak tanımlamaktadır. Witik, geri dönüşümün diğer kullanım ömrü sonu işlemlerine karşı çevresel etkilerini değerlendirirken, yakma işleminin, atık hiyerarşisinde düzenli depolamaya göre öncelikle tercih edildiğini ancak bu yöntemin neden olduğu iklim değişikliği etkilerinin ihmal edilmesi gerektiğini vurgulamaktadır. Araştırma, KEKETP'lerin geri dönüşümüyle ilgili ekolojik kısıtlamaları belirtmekte ve ikincil uygulamalarda geri dönüştürülmüş karbon elyaf kullanımı da dahil olmak üzere süreci geniş çerçevede değerlendirmek gerektiğine işaret etmektedir. Süreç ile ilgili teknik kısıtlamalar, pazar gelişimi ve geri dönüşüm teknolojilerindeki gelişmelerin tamamının KEKM atıklarının geri dönüşümünün fizibilitesini ve çevresel uygunluğunu belirlemede önemli roller oynadığı ifade edilmektedir.

Pickering (2005), çalışmasında termoset kompozitler, bu yapıların (Pickering, 2005) geri dönüşüm teknolojileri ile ilgili zorluklar ve potansiyel çözüm önerileri hakkında bilgiler sunmaktadır. Pickering tarafından açıklandığı gibi,

otomotivden inşaatı kadar çeşitli endüstrilerde yaygın olarak kullanılan termoset kompozitler, karmaşık bileşimleri ve doğal özellikleri nedeniyle geri dönüşüm süreçleri zorluklar içeren süreçler olarak bilinmektedir. Bilindiği üzere termoplastiklerin aksine, kompozitler içinde ısıyla sertleşen polimerler çapraz bağlanmakta bunun sonucu olarak yeniden kalıplamaya karşı dirençli hale gelmektedir. Bu nedenle geleneksel geri dönüşüm metodolojilerinin kullanımı mümkün olmamaktadır. Pickering tarafından tartışıldığı gibi mekanik geri dönüşüm işlemleri, yeni kompozit malzemede dolgu maddesi veya kısmi takviye olarak yeniden kullanıma uygun geri dönüştürülmüş ürünler üretmek uygun bir yöntemdir. Ancak bu teknikler, sadece bozulan mekanik özellikler ve işlenmemiş malzemelerle uyumsuzluk sorunları gibi sınırlamaları olan geri dönüştürülmüş ürünler üretilmesine fırsat vermektedir. Benzer şekilde takviye malzemeleri olarak kullanım potansiyelleri olmasına rağmen, lifli geri dönüşüm malzemeler bağlanma zorlukları getirebilmekte ve nihai kompozit ürünler içinde stres yoğunlaştırıcılar olarak olumsuz işlev görebilmektedir.

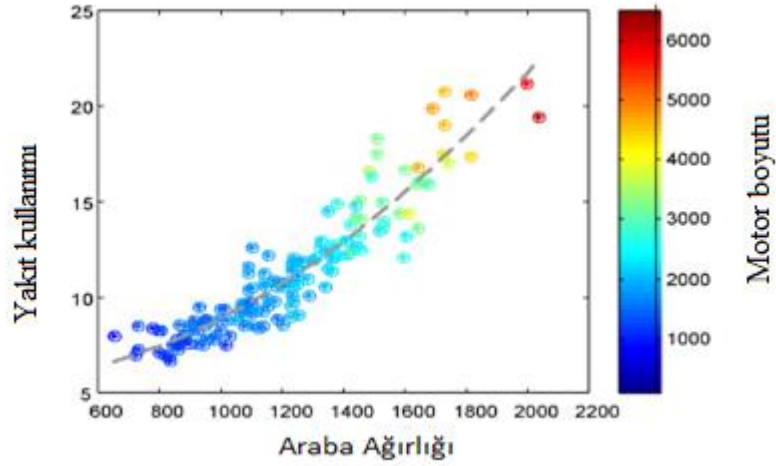
Buna karşılık, piroliz ve akışkan yatak prosesleri (pyrolysis and fluidised bed processes) dahil olmak üzere termal geri dönüşüm prosesleri, hurda kompozitleri parçalamak için ısıyı kullanarak alternatif yollar sunmaktadır. Özellikle piroliz işlemleri, geri dönüştürülmüş lifler üzerinde değişen derecelerde kömür olmasına rağmen, polimerden organik ürünler üreterek umut vaat etmektedir. Bununla birlikte, piroliz işlemlerinin karmaşıklığı ve ardından daha fazla işleme ihtiyaç duyulması bu yöntemin, büyük ölçekli uygulama için önemli zorlukları olarak ortaya çıkarmaktadır. Pickering tarafından vurgulandığı gibi, termoset kompozitler için geri dönüşüm yollarının uygulanabilirliğinin değerlendirilmesinde çevresel hususlar çok önemli bir rol oynamaktadır. Mekanik geri dönüşüm, malzeme geri kazanımını en üst düzeye çıkarırken, çevresel etkisi her zaman optimum olmayabilmektedir. Kimyasal hammaddeler üretebilen piroliz prosesleri, enerji geri kazanımı potansiyeli sunmakta, ancak kabul edilebilirliklerini değerlendirmek için kapsamlı çevresel denetimler gerektirmektedir.

Termoset kompozit malzemeler için geri dönüşüm tekniklerine yönelik önemli araştırma çabalarına rağmen, Pickering'in belirttiği gibi, ticari uygulanabilirlik küresel ölçekte belirsizliğini korumaktadır. Bu zorluk, öncelikle rekabetçi fiyatlarla

geri dönüştürülmüş malzemeler için mevcut pazarların olmamasından kaynaklanmaktadır. Bununla birlikte, kompozitler için geri dönüşüm yollarını zorunlu kılan katı Avrupa mevzuatının ortasında, atık yönetimi zorluklarını ele almak ve sektördeki geri dönüşüm faaliyetlerini teşvik etmek için Avrupa Kompozitleri Geri Dönüşüm Konsepti gibi girişimler ortaya çıkmıştır. Sonuç olarak, Pickering'in kapsamlı incelemesi, termoset kompozitlerin geri dönüşümünün karmaşık doğasının ve teknik ve ekonomik engelleri aşmak için sürekli araştırma ve geliştirmeye duyulan zorunlu ihtiyacın altını çizmektedir. Kompozit endüstrisi, yenilikçi geri dönüşüm teknolojilerini keşfederek ve endüstri paydaşları arasında iş birliğini teşvik etmeli, sürdürülebilir geri dönüşüm çözümlerine doğru çaba göstermeli, böylece çevresel etkiyi en aza indirerek uzun vadede kaynak verimliliğini en üst düzeye çıkarabilmelidir.

2.6.1 Karbon Elyafın Geri Dönüşümü ve Yeniden Kullanımı

Duflou ve De Moor (2009), araştırmasında özellikle geleneksel çelik yapılara kıyasla hafif bir alternatif olarak karbon elyaf takviyeli polimerlerin benimsenmesine odaklanarak, otomobil üretiminde kompozit kullanımının çevresel etki analizine ilişkin bilgiler vermiştir. Düşük yakıt tüketimi ve azaltılmış emisyonlarla karakterize edilen otomotiv çözümlerine yönelik artan taleple birlikte, KEKM'ler gibi hafif malzemelere olan talep de artmıştır. Çalışmada, yapısal araç bileşenlerinin KEKM alternatifleriyle değiştirilmesinin çevresel etkilerini değerlendirmek için kapsamlı bir yaşam döngüsü analizi metodolojisi kullanılmıştır. Araştırma, bir referans otomobil modelini, KEKM beyaz gövde yapısına sahip yeniden tasarlanmış bir varyantla karşılaştırarak, otomotiv tasarımında kompozitlerin yaygın olarak benimsenmesiyle ilişkili potansiyel faydalara ve zorluklara ışık tutmuştur. Şekil 2.17'de benzinli araçlar için araç ağırlığı ile motor boyutu arasındaki ilişkiyi ve bu ilişkinin yakıt tüketimi üzerindeki etkilerini göstermektedir.



Şekil 2.17: Benzinli araçlar için araç ağırlığının ve motor boyutunun bir fonksiyonu olarak yakıt tüketimi (Dufloy ve De Moor 2009)

Géraldine ve Dandy (2015), çalışmasında, elyaf takviyeli polimerlerin ve ilgili teknolojilerin, yeniden kullanım stratejilerinin ve ortaya çıkan özellikler, geri dönüşüm mevcut durum, zorluklar ve fırsatlar hakkında bilgiler sunmaktadır. Sürdürülebilirlik ve çevresel sorumluluğa verilen önemin artmasıyla birlikte, elyaf takviyeli polimerlerin geri dönüşümü, çeşitli endüstrilerde üretilen kompozit atıkların artan hacimlerini ele alma ihtiyacından kaynaklanan kritik bir araştırma ve geliştirme alanı olarak ortaya çıkmıştır. Çalışmada, öğütme ve öğütmeye benzer diğer mekanik işlemlerden termoliz ve solvoliz (grinding and milling) gibi termo-kimyasal yöntemlere kadar elyaf takviyeli polimerlerin geri dönüşümü için geliştirilmiş çeşitli teknikleri tanıtılmıştır. Bu teknikler, her biri kendi zorluklarını ve fırsatlarını sunan kompozit atıklardan değerli malzemelerin geri kazanılmasında farklı derecelerde verimlilik ve etkinlik sunan yöntemler olarak belirtilmiştir. Mekanik geri dönüşüm teknikleri, özellikle üretim atıklarını geri dönüştürmek için üreticiler tarafından uygulandığında, cam elyaf takviyeli kompozitler için umut vaat ederken, işleme sırasında bozulma ve takviye potansiyelindeki sınırlamalar gibi sorunlar nedeniyle ortaya çıkan geri dönüştürülmüş cam elyaflarının (rGF'ler) etkin bir şekilde yeniden kullanılmasında zorluklar olduğu ifade edilmiştir.

Buna karşılık, termo-kimyasal proseslerin, karbon elyaf takviyeli kompozitlerden yüksek kaliteli karbon elyafların geri kazanılması için uygun seçenekler olduğu belirtilmiş; ortaya çıkan piroliz ve solvoliz ile reçine matrislerinden değerli ürünlerin geri kazanılması için alternatif yollar olarak tanıtılmıştır. Bununla birlikte, bu süreçler, enerji yoğun işleme gereksinimleri ve ıslah sonrası elyaf kalitesi ve

mekanik özelliklerdeki sınırlamalar dahil olmak üzere kendi zorluklarını da beraberinde getirmekte olup; süreç optimizasyonu ve inovasyonun devam ettiği bilinmektedir. İncelemenin önemli bir odak noktası, geri dönüştürülmüş liflerin yeniden kullanımı ve ilgili teknolojik konulardır. Elyafın yeniden hizalanması, kontinü ipliklerin yeniden şekillendirilmesi ve kullanıma hazır yarı ürünlerin geliştirilmesi gibi stratejiler, geri dönüştürülmüş elyafların yeni uygulamalara dahil edilmesini kolaylaştırmanın bir yolu olarak araştırılmaktadır. Ayrıca, inceleme, geri dönüştürülmüş elyafı karakterize etmek ve geri dönüştürülmüş malzemelerin yaygın endüstriyel kabulünü teşvik etmek için özel standartlar geliştirmenin ve böylece performanslarına ve güvenilirliklerine olan güveni artırmanın önemini vurgulamaktadır.

Ekonomik ve çevresel hususlar, özellikle genellikle daha pahalı lifler içeren ve ileri mühendislik uygulamaları üzerinde daha büyük bir etkiye sahip olan KERK'ler söz konusu olduğunda, elyaf takviyeli kompozitlerin geri dönüşüm süreçlerini şekillendirmede önemli bir rol oynamaktadır. Karbon elyafın yüksek maliyetinin ve geri dönüşüm süreçlerinin enerji yoğun doğasının getirdiği zorluklara rağmen; proses inovasyonu, geri dönüştürülebilir reçinelerin geliştirilmesi ve karbon elyaf üretim maliyetlerinin azaltılması konusunda devam eden çabalar, kompozit geri dönüşümün sürdürülebilirliğini ve uygulanabilirliğini artırmak için umut verici yollar sunmaktadır.

Howart ve Mareddy (2014), çalışmasında karbon elyaf kompozitlerin mekanik geri dönüşümünün enerji yoğunluğu ve çevresel analizi üzerine yaptığı araştırma, kompozit endüstrisindeki geri dönüşüm teknolojileriyle ilgili zorluklar ve fırsatlar hakkında bilgiler vermektedir. Kompozitlerin artan kullanımı ve katı çöp sahası bertaraf yönetmelikleri ile birlikte, kaynak verimli geri dönüşüm yöntemleri geliştirmek için artan bir aciliyet vardır. Howarth'ın çalışması, karbon elyaf kompozit için bir geri dönüşüm seçeneği olarak öğütmenin elektrik enerjisi gereksinimlerini modellemeye odaklanmakta ve geri dönüşüm süreçlerinin çevresel etkisini değerlendirmek için yeni bir yaklaşım sunmaktadır. Çalışma, elyaf takviyeli plastiklere, özellikle karbon elyaf takviyeli plastiklere (KEKM'ler) yönelik önemli pazar talebini ele almakta; otomotiv ve havacılık gibi endüstrilerdeki uygulamalar için uygunluğunu vurgulamaktadır. Bununla birlikte, KEKM'lerin yaygın olarak benimsenmesi, atık hacimlerinde buna karşılık gelen bir artışa yol açmış ve verimli

geri dönüşüm teknolojilerinin geliştirilmesini gerektirmiştir. Düzenli depolama bertarafına ilişkin mevzuat ve sektöre özel direktifler, kompozit malzemeler için sürdürülebilir atık yönetimi çözümlerine duyulan ihtiyacın altını çizmektedir.

Kompozit geri dönüşümündeki en önemli zorluklardan biri, özellikle farklı kompozit türleri arasındaki atık hacimleri ve malzeme değerlerindeki eşitsizlik göz önüne alındığında, ekonomik boyut ile çevresel boyut arasındaki dengesizliktir. Howarth'ın araştırmasında, atık KEKETP için bir geri dönüşüm seçeneği olarak öğütme için özgül enerji talebinin hesaplandığı bir model geliştirilmektedir. Çalışma, mekanik performansın daha az kritik olduğu kısa elyaf içerikli kompozitlerde geri dönüştürülmüş elyaf kullanmanın potansiyel çevresel faydalarını göstermektedir. Bulgular, geri dönüşüm süreçleri ile işlenmemiş karbon elyafın somutlaşmış enerjisi arasındaki özgül enerjideki önemli farkı vurgulayarak, mekanik geri dönüşümün potansiyel çevresel avantajlarını öne çıkarmaktadır. Ayrıca çalışma, geri dönüşüm süreçlerinin enerji verimliliğinin belirlenmesinde işleme hızının önemini vurgulamakta; daha yüksek verim ve endüstriyel ölçekli işlemenin daha enerji verimli olduğu kanıtlamaktadır.

İleriye bakıldığında, araştırma, mekanik geri dönüşüm için kapalı döngü uygulamalarının geliştirilmesi ve kimyasal ve mikrodalga piroliz süreçleri gibi farklı geri dönüşüm yöntemlerinin değerlendirilmesi de dahil olmak üzere daha ileri çalışmalar için önerileri özetlemektedir. Çalışma, geri dönüştürülmüş malzemeleri karakterize ederek ve bunların yeni ürünlere dahil edilmesini araştırarak, kompozitler için atık yönetimini kolaylaştırmayı ve geri dönüşüm uygulamalarının çevresel sürdürülebilirliğini arttırmayı amaçlamaktadır. Sonuç olarak, Howarth'ın araştırması, yaşam döngüsü değerlendirmesi için yeni veri setleri sağlayarak ve geri dönüşüm verimliliğinde işleme oranının önemini vurgulayarak, kompozit sektöründe sürdürülebilir atık yönetimi uygulamalarını teşvik etmek isteyen araştırmacılar, endüstri paydaşları ve politika yapıcılar için değerli bilgiler sunmaktadır.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1 Otomotiv Endüstrisinde Karbon Elyafın Güncel Kullanımı ve Avantajları

Tez çalışması kapsamında incelenen literatür, karbon elyafın otomotiv sektöründeki kullanımını ve avantajları hakkında kapsamlı bir araştırma sunarak alüminyum, çelik ve plastik gibi geleneksel malzemelere göre üstünlüğünü ortaya koymaktadır. Karbon elyaf takviyeli polimer (KETP) malzemeler, dikkate değer dayanıklılık-ağırlık oranları özelliği boyutu ile kapsamlı bir şekilde tartışılmakta ve bu özelliğin taşıt aracı üretimindeki hafifletme amaçlı uygulamaları hakkında bilgi verilmektedir. Otomotiv sektöründe yaygın kullanımı olan çelik malzeme kullanımı ile yapılan ayrıntılı karşılaştırmalar, KETP malzemelerinin daha düşük von Mises gerilimi özelliği ve yoğunluğunu vurgulanarak, yalnızca hafiflik avantajı değil, gelişmiş performans ve enerji verimliliği avantajı ile araçlarda şasi çerçeveleri ve bileşenleri olarak kullanılmaktadır.

Çalışmalarda, araçlarda kaputlar, kapılar, gövde panelleri ve yapısal elemanlar dahil olmak üzere bir dizi otomotiv bileşeni için KETP'nin yaygın olarak kullanılmakta olduğu belirlenmiştir. KETP'lerin otomotiv imalat süreçlerine hammadde olarak dahil edilmesi, araçlarda yapısal bütünlüğü korurken ağırlığın önemli ölçüde azaltılmasını sağlayarak gelişmiş araç performansına, yakıt verimliliğine ve güvenliğe katkıda bulunmaktadır. Ayrıca, karbon elyaf kompozitlerin sunduğu doğal esneklik ve tasarım özgürlüğü, otomobil üreticilerinin gelişmiş aerodinamik özellik, çarpışmaya dayanıklılık ve genel performans için araç tasarımını yenileme ve optimize etme süreçlerinde kolaylık sağlamaktadır.

3.2 Karbon Elyaf Üretiminde Teknolojik Gelişmeler

Çalışmalar toplu olarak karbon elyaf teknolojisinde önemli ilerlemeler ortaya koyuyor, belirli zorlukları ele alıyor ve karbon Elyaf takviyeli malzemelerin

performansını ve uygulanabilirliğini artırmak için yenilikçi çözümler araştırmaktadır. Araştırma, karbon elyaf takviyeli plastiğin (KETP) plazma + epoksi modifiye astar (EMA) kaplama işlemi yoluyla yapışmasında önemli bir gelişme olduğunu gösterdi. Sonuçlar, bozulmamış KETP'ye kıyasla mukavemette kayda değer bir artış gösterdi ve yüzey işlemlerinin zayıf yapışmayı ele almadaki ve KETP'nin mekanik özelliklerini geliştirmedeki etkinliğini vurguladı. Bulgular, arayüzey tahribatını önlemede kimyasal bağın önemini vurgulamakta ve otomotiv uygulamaları için hafif ve dayanıklı malzemelerin geliştirilmesine katkıda bulunmaktadır.

Otomotiv parçaları için sac kalıplama bileşiğine (sheet molding compound) (AHB) cam elyaflarına alternatif olarak karbon elyafın dahil edilmesinin potansiyel faydalarını araştırdı. Çalışma, üretim sürecini basitleştirerek ve karbon ve cam elyaflarını SMC katlarında seçici olarak birleştirerek, stratejik elyaf kullanımı yoluyla elde edilebilecek gelişmiş fiziksel özellikler gösterdi. Bulgular, karbon Elyafın SMC tabanlı otomotiv bileşenlerinde sertliği ve mekanik performansı artırmak için uygun bir çözüm sunduğunu ve kompozit imalatta karbon Elyaf takviyelerin daha geniş çapta benimsenmesinin önünü açtığını göstermiştir.

Kompozitler için epoksi ve poli (phenylene sulfide) (PPS) matrislerinde takviye malzemesi olarak buharla yetiştirilen karbon elyafın (YKE) kullanımını araştırdı. Sertleşme sırasında reçine infüzyon inhibisyonu ve hacim daralması gibi zorluklara rağmen, YKE kompozitleri önceki bulgulara kıyasla sertlik ve eğilme mukavemetlerinde önemli artışlar sergiledi. Çalışmanın bulguları, YKE kompozitlerinin, benzersiz zorluklar ve hususlarla birlikte, geleneksel karbon Elyaf kompozitlerle karşılaştırılabilir mekanik özellikler elde etme potansiyelini vurgulamaktadır. YKE kompozitleri, elyaf yükleme yöntemlerini optimize ederek ve işleme zorluklarını ele alarak, hafif ve yüksek mukavemetli malzemeler gerektiren çeşitli endüstriyel uygulamalar için umut vaat edilmektedir.

Gerilme mukavemetini arttırmak için elektron ışınlamasının karbon elyaf takviyeli termoplastik (KERTP) kompozitler üzerindeki sinerjik etkisini araştırdı. Çalışma, elektron ışını ışınlaması kullanılarak karbon elyafın ve yüksek yoğunluklu polietilenin (YYP) yüzey modifikasyonu yoluyla, mekanik özelliklerde, özellikle çekme mukavemetinde önemli gelişmeler gösterdi. Bulgular, elektron ışını ışınlamasının termoplastik bazlı KERTP'lerin performansını arttırmak, zayıf arayüzey

yapışması ile ilgili zorlukları ele almak ve reçine matrisi ile karbon elyaf arasında verimli yük transferini teşvik etmek için basit ama güçlü bir yöntem sunduğunu göstermektedir.

3.3 Karbon Elyafın Sürdürülebilirlik Yönü

Akışkan yataklı geri dönüştürülmüş karbon elyafın (rKE) yeniden kullanımıyla birlikte enerji ve çevresel değerlendirme üzerine yapılan kapsamlı çalışmalar dikkate alındığında, karbon elyaf takviyeli polimer (KETP) üretimi ve atık bertarafı ile ilişkili çevresel etkilerin azaltılması için sürdürülebilir geri dönüşüm stratejilerinin planlanması gerektiği görülmüştür. Akışkan yatak prosesi ile geri dönüşüm, enerji tüketimini ve çevresel etkiyi en aza indiren bir yöntem olarak kullanılmakta olduğu, kullanım ömrü sona ermiş ürünlerden karbon elyafın verimli bir şekilde geri kazanılması için umut verici bir yaklaşım olarak dikkat çektiği belirlenmiştir. Yaşam döngüsü değerlendirmesi, geleneksel atık işleme yöntemlerine kıyasla geri dönüştürülmüş karbon elyafın kullanılmasının çevresel etkileri ve faydalı yönleri hakkında çok sayıda çalışma yapıldığı anlaşılmış, KETP üretimi ve atık yönetiminde sürdürülebilir uygulamaların benimsenmesi yönünde önemli adımlar atıldığı görülmüştür.

Elektrikle çalışan heterojen katalitik bozunma konusundaki öncü çalışmaların atık KETP kompozitlerinin geri dönüştürülmesine yeni bir yaklaşım sunduğu görülmüştür. Elektrikle çalışan heterokatalitik ayrışma yöntemi, epoksi reçinenin verimli bir şekilde ayrışmasını ve bozulmamış karbon elyafın çevresel yükü daha hafif koşullar altında geri kazanılmasını sağlayan basitleştirilmiş ve çevre dostu bir geri dönüşüm teknolojisi sunmaktadır. Heterokatalitik ayrışma yöntemi, geleneksel geri dönüşüm yöntemlerinin sınırlamalarının üstesinden gelen bir yöntem olarak, geri dönüştürülmüş karbon elyafın mekanik özelliklerinin korunduğu, yenilikçi bir yöntem olarak kabul edilmektedir. Bu yöntemle beraber karbon takviyeli kompozit malzemeler de dahil diğer tüm kompozit malzemeler için döngüsel ekonomiye geçişin mümkün olabileceği görülmektedir.

Karbon elyaf takviyeli polimerler (KETP'ler) için geri dönüşüm ortamının incelenmesi, çevresel kaygılar ve ekonomik zorluk arasındaki dengenin ortaya

konması için yenilikçi geri dönüşüm teknolojileri geliştirilmesinin önemli olduğu görülmüştür. Bu kapsamda geri dönüşüm elyaf ıslahı, yeniden üretim süreçleri ve geri dönüştürülmüş ürünlerin ticarileştirilmesindeki gelişmeler, çeşitli endüstrilerde geri dönüştürülmüş KETP'lerin dönüştürücü potansiyeli olduğu belirlenmiştir. Geri dönüştürülmüş KETP'lerin yapısal uygulamalarda yaygın olarak kabul edilmesi ve entegrasyonu ile ilgili zorlukların halen devam ettiği, kompozit malzemelerin döngüsel ekonomi süreçlerine dahil olması ile ilgili girişimlerin çaba gerektirdiği belirlenmiştir.

Geri dönüştürülmüş karbon elyafın kompozit malzemelere entegrasyonuna yönelik çalışmalar, otomotiv endüstrisinde sürdürülebilir üretim uygulamalarına yönelik artan talep olduğu görülmüştür. Araştırmalar, geri dönüştürülmüş ve işlenmemiş yeni karbon elyaf takviyeli kompozitlerin mekanik eşdeğerliğini gösterebilmekte, otomotiv uygulamalarında geri dönüştürülmüş elyafın daha geniş çapta benimsenmesine yönelik bir potansiyel olduğu anlaşılmıştır. Bulgular, geri dönüştürülmüş karbon elyafın üretim zincirine dahil edilmesinin, endüstrinin sürdürülebilir üretime geçişinde, kaynak verimliliğinde artışa, üretim maliyetlerinde azalmaya ve atık üretiminde düşüşe olanak tanıdığı ve toplam çevresel etkilerde azalmanın mümkün olabileceğini göstermektedir.

Otomobil uygulamalarında hafif malzeme araştırmaları, araç enerji verimliliğini artırma amaçlı çalışmalar ve karbon emisyonlarının azaltılması yönündeki arayışlar tüm otomotiv üreticileri tarafından önemle izlenmektedir. Bulgular, ekonomik hususları çevresel etkilerle dengeleyen ve inovasyonu daha sürdürülebilir ulaşım çözümlerine yönlendiren malzeme seçimine yönelik bütünsel yaklaşımların önem kazandığını göstermektedir.

Otomotiv endüstrisinde kullanılan kompozit malzemelerin geri dönüşümünde ürün bilgileri üzerine yapılan araştırmalar, ürünlerin kullanım ömrü sonu ayırma ve geri dönüşüm süreçlerine odaklanmıştır. Çalışmaların geri dönüşümün çevresel zorunluluğunu vurgulamakta olduğu, ancak bu sürecin finansal boyutunun kurumsal stratejiler ile belirlenmesi gerektiği belirlenmiştir. Bu kapsamda zorlukların üstesinden gelmek, karlı ve sürdürülebilir geri dönüşüm uygulamaları için elverişli bir ortam yaratmak için teknolojik gelişmeleri, pazar teşviklerini ve destekleyici kamu politikalarını içeren çok yönlü bir planlama yapılması gerektiği görülmüştür.

4. SONUÇ ve ÖNERİLER

4.1 Sonuç

Karbon elyaf teknolojisindeki gelişmelerin, sürdürülebilirlik konuları, pazar eğilimlerinin ve gelecek beklentilerinin kapsamlı bir şekilde gözden geçirilmesi, otomotiv endüstrisindeki karbon elyaf malzemelerin dönüştürücü potansiyelinin altını çiziyor. Sürdürülebilirlik hususları, karbon elyaf teknolojisinin geleceğini şekillendirmede çok önemli bir rol oynamaktadır ve araştırmacılar, atıkları ve çevresel etkiyi en aza indirmek için karbon elyafın yeniden kullanılmasını ve geri dönüştürülmesini savunmaktadır. Geri dönüştürülmüş karbon elyafın termoplastik matrislere entegrasyonu, verimli geri dönüşüm teknolojileri ve sürdürülebilir üretim uygulamaları için endüstri talepleriyle uyumlu, ekonomik olarak uygulanabilir ve çevresel olarak sürdürülebilir çözümler sunar. Pazar eğilimleri ve gelecekteki beklentiler, araç hafifletme stratejileri, çevresel düzenlemeler ve tüketici tercihleri gibi faktörlerin etkisiyle otomotiv uygulamalarında karbon elyafa olan talebin arttığını göstermektedir. Karbon elyaf teknolojisinin otomotiv endüstrisinde yenilik, verimlilik ve sürdürülebilirliği teşvik etmedeki önemli rolünü vurgulamaktadır.

4.2 Öneriler

4.2.1 Sürdürülebilir Üretim Uygulamalarına Yatırım Yapılması

Otomotiv üreticileri, çevresel etkiyi en aza indiren yenilikçi karbon elyaf teknolojilerinin benimsenmesi de dahil olmak üzere sürdürülebilir üretim uygulamalarına yapılan yatırımlara öncelik vermelidir. Bu, kullanım ömrü sona ermiş ürünlerden ve üretim hurdalarından karbon elyafın geri kazanılması için geri dönüşüm stratejilerinin üretim süreçlerine entegre edilmesi, böylece atıkların azaltılması ve kaynakların korunması mümkün olabilecektir.

4.2.2 Üretim Verimliliğinin Optimize Edilmesi

Üretim çıktısını artırmak ve maliyetleri azaltmak için otomotiv üreticileri, süreç otomasyonu, yalın üretim ilkeleri ve gelişmiş üretim teknolojileri aracılığıyla üretim verimliliğini optimize etmeye odaklanmalıdır. Şirketler, üretim iş akışlarını düzene sokarak, malzeme israfını en aza indirecek tedbirleri planlamalı ve ekipman kullanımını en üst düzeye çıkararak, birim başına üretim maliyetlerini düşürerek daha yüksek üretim hacimleri elde edilebilecektir. Ek olarak, işgücü eğitim programlarına ve beceri geliştirme girişimlerine yatırım yapılarak, çalışanların verimliliğinin artırılması ve değişen üretim taleplerine hızla uyum sağlanması mümkün olabilecektir.

4.2.3 Alternatif Malzeme ve Üretim Yöntemlerinin Anlaşılması

Otomotiv üreticileri, karbon elyaf ek olarak, karşılaştırılabilir performans ve çevresel faydalar sunan alternatif hafif malzemeler ve üretim yöntemlerini araştırmalıdır. Bu kapsamda biyo bazlı kompozitler, doğal lifler ve eklemeli üretim teknolojileri, karbon emisyonlarını azaltmak, atıkları en aza indirmek ve malzeme kaynaklarını çeşitlendirmek için fırsatlar sunmaktadır. Şirketlerin, fizibilite çalışmaları ve pilot projeler yürüterek, belirli otomotiv uygulamaları için alternatif malzemelerin ve üretim yöntemlerinin uygulanabilirliğini değerlendirilmesi, inovasyon ve maliyet azaltma fırsatlarının değerlendirilmesi gerekmektedir.

4.2.4 Tedarik Zinciri Geninde İşbirliğinin Teşvik Edilmesi

Karbon elyaf tedarik zincirindeki paydaşlar arasında işbirliği, inovasyonu teşvik etmek, üretim süreçlerini optimize etmek ve maliyetleri azaltmak için çok önemlidir. Otomotiv üreticileri, süreç optimizasyonu, malzemenin yeniden kullanımı ve atık azaltma fırsatlarını belirlemek için karbon elyaf tedarikçileri, geri dönüşüm tesisleri ve araştırma kurumlarıyla işbirliği yapmalıdır. Şirketler, ortaklıklar ve bilgi paylaşımı girişimlerini teşvik ederek, sektör genelinde sürdürülebilir uygulamaların ve teknolojilerin benimsenmesini hızlandırmalıdır.

4.2.4 Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (LCA) Uygulamalarının Uygulanması

Yaşam döngüsü değerlendirme (LCA) uygulamalarının ürün geliştirme ve üretim süreçlerine dahil edilmesi, otomotiv üreticilerinin karbon elyaf malzemelerin çevresel etkilerini değerlendirmesine ve iyileştirme fırsatlarını belirlemesine yardımcı olabilecektir. Şirketler, kapsamlı LCA'lar yürüterek ürünlerinin çevresel ayak izini değerlendirebilmekte, malzeme seçimini optimize edebilmekte ve ürün yaşam döngüsü boyunca enerji tüketimini en aza indirmek mümkün olmaktadır. Çevre yönetimine yönelik bütünsel yaklaşımlarla, sera gazı emisyonlarında, kaynakların tükenmesinde ve atık oluşumunda önemli azalmalar mümkün olabilecektir.

4.2.5 Araştırma ve Geliştirmeye Yatırım Yapılması

Otomotiv endüstrisinde inovasyonun teşvik edilmesi ve karbon elyaf teknolojisini ilerletmek için araştırma ve geliştirmeye sürekli yatırım yapmak çok önemlidir. Şirketler, üretim süreçlerini iyileştirmeye, malzeme performansını artırmaya ve uygun maliyetli geri dönüşüm çözümleri geliştirmeye odaklanan araştırma girişimlerine kaynak ayırmalıdır. Bu yaklaşımla şirketler, akademik kurumlar ve endüstri uzmanlarıyla ortak araştırma projelerini ve ortaklıkları destekleyerek teknolojik gelişmelerin ön saflarında yer alabilecek ve pazarda rekabet avantajını koruyabilecektir.

5. KAYNAKLAR

Abdul Budan, D. and Manjunatha, T., "Investigation on the feasibility of compositecoil spring for automotive applications", *International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering*, 4(10), 1035-1039, (2010).

Ahmad, H., Markina, AA., Porotnikov, M V. and Ahmad, F., "A review of carbon fiber materials in automotive industry". *Materials Science and Engineering*, 971(3), 032011, (2020).

Ashrafi, B., Guan, J. and Mirjalili, V., "Enhancement of mechanical performance of epoxy/carbon fiberlaminat composite using single-walled carbon nanotubes", *Composites*, 71, 1569 – 1578, (2011).

Badakhsh, A., An, KH. and Kim, BJ., "Enhanced surface energetics of cnt-grafted carbonfibers for superior electrical and mechanical properties", *Polymers*, 12(6), 1432, (2020).

Baltacı, A., Sarıkanat, M. and Turan, M., "Aramid ve karbon lif takviyeli termoplastikkompozit kırışlerin impuls girdi altındaki titreşim davranışları", *The Journal of Textiles and Engineers*, 18(84), 1- 7, (2011).

Bayraktar, ř. and Turgut, Y., "Elyaf takviyeli polimer kompozit malzemelerin delinmesi üzerine", *Composite Structures*, (2012).

Bhambere, A., "Feasibility of using carbon fibers and its components in automobiles", *International Journal of Mechanical and Industrial Technology*, 6 (1), 23 – 26, (2018).

Cabrera-Ri'Os, M. and Castro, JM., "An economical way of using carbon fibers in sheetmolding compound compression molding forautomotive applications". *Jo. Polymer Composites*, 27(6), 718-722, (2004).

Caltagirone, PE., Ginder, RS., Ozcan, S., Li, K. and Gay, AM., "Substitution of virgin carbon fiber with low-cost recycled fiber in automotive grade injection molding polyamide 66 for equivalent composite mechanical performance with improved sustainability", *Composites*, 221(15), (2021).

Chao. H. and Xinwen, L., "The fabrication and characterization of high densit polyethylene composites reinforced by carbon nanotube coated carbon fibers", *Composites*, 121, 149 – 156, (2019).

Chen, PY., Feng, R., Xu, Y. and Zhu, JH., "Recycle of carbon fiber reinforced plastics for automotive application", *Green Chemistry*, 15(17), 3508, (2005).

Çakmakkaya, M. and Oylu, F., "Spoyley tasarımında abs ve karbon fiber malzemelerin analizi", *Afyon Kocatepe University International Journal of Engineering Technology and Applied Sciences*, 6(1), 1-13, (2023).

- Çavdar, A. D. and Boran, S., "Doğal liflerin otomotiv sanayinde kullanımı", *Kastamonu Univ., Journal of Forestry Faculty*, 16(1), 253 – 263, (2016).
- Çokkeser, HK. and Çeven, EK., "Otomotivde kullanılan teknik tekstiller", *The Journal of Textiles and Engineers*, 14(3), (2011).
- Baker, DA. and Rials, TG., "Recent advances in low-cost carbon fiber manufacture from Lignin", *Journal of Applied Polymer Science*, 130(2), 713-728, (2013).
- Das, TK., Ghosh, P. and Das, NC., "Preparation, development, outcomes, and application versatility of carbon fiber-based polymer composites", *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 2, 214 – 233, (2019).
- Dhiman, B., Guleria, V. and Sharma, P., "Applications and future trends of carbon fiber reinforced polymer composites ", *International Research Journal of Engineering and Technology*, 7 (10), 1-7, (2020).
- Duflou, J., De Moor, J., Verpoes, I. and Dewulf, W., "Environmental impact analysis of composite use in car manufacturing.", *CIRP Annals- Manufacturing Technology*, 58 (1), 9 – 12, (2009).
- Durgun, İ. and Vatansever, O., "Akum torbalama yöntemi ile karbon fiber parçaiiretimi", *The Journal of Textiles and Engineers*, (2013).
- Duval, D. And Heather, L., "The role of product information in automotive plastics recycling: a financial and life cycle assessment", *Journal of Cleaner Production*, 15(12), 1158 - 1168, (2006).
- Ekşi, S. and Genel, K., "Comparison of mechanical properties of unidirectional and woven carbon, glass and aramid fiber reinforced epoxy composites", *Acta Physica Polonica*, 132(3), 879-882, (2016).
- Fang, L., Shiqiang, D. and Jianing, Z., "Mechanical properties of epoxy and its carbon fiber composites modified by nanoparticles", *Journal of Nanomaterials*, 2017(1), 8146248, (2006).
- Fu, SY., Lauke, B., Mäder, E., Yue, CY., Hu, X. and Mai, YW., "Hybrid effects on tensile properties of hybrid short-glass-fiber and short-carbon-fiber-reinforced polypropylene composites", *Journal of materials science*, 36(2001), 1243 – 1251, (2006).
- Géraldine, O., Dandy, L. and Leeke, G., "Current status of recycling of fibre reinforced polymers: review of technologies, reuse and resulting properties", *Progress in Materials Science*, 72, 61 – 99, (2015).
- Ghossein, H., Hassen, AA., Paquit, V. and Love, LJ., "Innovative method for enhancing carbon fibers dispersion in wet-laid nonwovens", *Materials Today Communications*, 17, 100-108, (2018).
- Göztok, SP. and İçier, F., "Karbon fiber destekli kabin kurutucuda farklı sıcaklıklarda elmadilimlerinin kurutulmasının incelenmesi: kurutma karakteristikleri ve performans değerlendirmesi", *Akademik Gıda*, 15(4), 355 – 367, (2017).

- Hasan, MMB., Nitsche, S., Abdkader, A, and Cherif, C., "Carbon fibre reinforced thermoplastic composites developed from innovative hybrid yarn structures consisting of staple carbon fibres and polyamide 6 fibres", *Composites Science and Technology*, 167, 379 – 387, (2018).
- Hatipoğlu, G., Ünal, H. and Yetgin, S., "Karbon fiber takviyesinin poli-fital-amit (ppa) polimerinin tribolojik özelliklerine etkisinin araştırılması", *Journal of science*, 11(3), 744 – 755, (2023).
- Howarth J., Mareddy, S. and Mativenga, P., "Energy intensity and environmental analysis of mechanical recycling of carbon fibre composite", *Journal of Cleaner Production*, 81, 46 – 50, (2014).
- İnan, RP. and NÖ, Ceviz., "Otomotiv teknik tekstillerinde kullanılan liflerin özelliklerinin incelenmesi", 19-21, (2020).
- Jin, Z. and Khunlavit. C., "Hybrid composite laminates reinforced with glass/carbon woven fabrics for lightweight load bearing structures", *Materials and Design*, 36, 75 -80, (2011).
- Jin, Z., Venkata, S. and Hao, W., "Current status of carbon fibre and carbon fibre composites recycling", *Composites*, 193, 108053, (2020).
- Jung, S. and Park, S., Ghim, H., Lee, DY. and Yoo, SH., "Synergetic effect of cross linking and interfacial interaction in carbon fiber reinforced thermoplastic to enhance its tensile strength by electron beam irradiation", *Carbon Letters*, 30, 165-175, (2019).
- Kishi, H., Nakao, N., Kuwashiro, S. and Matsuda, S., "Carbon fiber reinforced thermoplastic composites from acrylic polymer matrices: interfacial adhesion and physical properties", *eXPRESS Polymer Letters*, 11(4), 334 – 342, (2016).
- Kwon, DJ., Park, SM., Kwon, IJ., Park, JM. and Jeong, E., "Improvement of interlaminar properties of carbon fiber reinforced epoxy composites using aluminum trihydroxide", *Carbon Letters*, 29, 183-191, (2019).
- Loris. G. and Tiziana, B., "Recycling of carbon fiber reinforced composite waste to close their life cycle in a cradle-to-cradle approach", *Science Direct*, 26, 100368, (2020).
- Meng, F., McKechnie, J. and Pickering, S., "An assessment of financial viability of recycled carbon fibre in automotive applications" *Composites*, 109, 207- 220, (2018).
- Meng, F., McKechnie, J., Turner, T. and Pickering, S., "Energy and environmental assessment and reuse of fluidised bed recycled" *composites*, 100, 206 – 214, (2017).
- Mubashir, S., and Muttana, S. B., "Carbon fibre composites: Outlook for the automobile sector", *Auto tech review*, 1(6), 18-23, (2012).
- Natrayan, L., Anjibabu Merneedi, G., Bharathiraja, S., Kaliappan., Dhinakaran Veeman. and Murugan, P., "Processing and characterization of carbon nanofibre composites for automotive applications." *Journal of Nanomaterials*, 1, 7323885, (2021).

Özsarıkaya, B., Yetgin, S. and Köse, S., "Karbon fiber katkılı poliamit 66 polimer kompozitlerin tribolojik özelliklerinin değerlendirilmesi", *Istanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 22(44), 267 – 280, (2023).

Patton, R., Pittman, C., Wang, L. and Hill, J., "Vapor grown carbon fiber composites with epoxy and poly(phenylenesulfide) matrices", *Composites*, 30, 1081 – 1091, (1999).

Peijs, T. A., Robert, K. and Pieter, J. L., "Critical review of carbon fiber and related products from an industrial perspective", *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, 5, 90 -106, (2022).

Pickering, S.J., "Recycling technologies for thermoset composite materials—current status", *Composites*, 37, 1206–1215, (2005).

Pimenta, S. and Pinho, S., "Recycling carbon fibre reinforced polymers for structural applications" *Composites*, 31, 378 – 392, (2010).

Pi-Yu, C., Ran, F., Ying, X. and Ji-Hua, Z., "Recycling and reutilization of waste carbon fiber reinforced plastics: current status and prospects", *Polymers*, 15(17), 3508, (2023).

Robert. A., Remy, T., Véronique, M., Christian, L. and Jan-Anders, E., "Carbon fibre reinforced composite waste: an environmental assessment of recycling, energy recovery and landfilling", *Composites*, 49, 89 – 99, (2012).

Sayam, A., Rahman, M., Smrit, S. and Ahmed, S., "Review on carbon fiber reinforced hierarchical composites: mechanical performance, manufacturing process, structural applications and allied challenges", *Carbon Letters*, 32, 1173 – 1205, (2022).

Shah, N., Fehrenbach, J. and Ulven, CA., "Hybridization of hemp fiber and recycled-carbonfiber in polypropylene composites sustainability", *Mechanical Engineering Department, North Dakota State University*, 11(11), 3163, (2019).

Sim, KB., Baek, D., Shin, JH., Shim, GS. and Jang, SW., "Enhanced surface properties of carbon fiber reinforced plastic by epoxy modified primer with plasma for automotive applications", *Composites Science and Technology*, 71, (2020).

Soydan ve Var. "Structures, assessment of a unique reinforcement construction on mechanical behaviour of composite", *The Journal of The Textile Institute*, 115(3), 341-349, (2023).

Url_1 <https://www.reinforcer.com/en/category/detail/Carbon-Fiber-Growth-in-the-Automotive-Market/57/323/0> , erişim tarihi: 16.06.2024

Url_2 <https://tr.hgcomposites.com/info/development-history-of-carbon-fiber-83346733.html> erişim tarihi: 17.06.2024

Url_3 <https://tr.doshinemateria.com/info/the-development-history-of-carbon-fiber-90089865.html> erişim tarihi: 17.06.2024

Url_4 <https://www.linkedin.com/pulse/carbon-fiber-automotive-market-size-share-cagr-90-mvxmc> erişim tarihi: 10.04.2024

Url_5 <https://www.ceyrekmuhendis.com/kompozit-uretim-yontemleri/erişimtarihi:17.06.2024>

Url_6 <https://butexcomp.org/wp-content/uploads/2023/10/Kompozit-MalzemeHizli-Uretim-Teknolojileri.pdf> erişim tarihi: 18.06.2024

Url_7 <https://www.zwickroell.com/tr/sektoerler/kompozitler/astm-d3039-cekme-testi-kompozitleri/> erişim tarihi: 18.06.2024

Witik, R., Jérôme, P., Véronique, M., Christian, L. and Jan-Anders, E., "Assessing the life cycle costs and environmental performance of lightweight materials in automobile applications", *Composites*, 42, 1694 – 1708, (2010).

Xiang, L., Ruibin, B. and Jon, M., "Environmental and financial performance of mechanical recycling of carbon fibre reinforced polymers and comparison with conventional disposal routes", *Journal of Cleaner Production*, 127, 451 – 460, (2016).

Xiaosong, H. "Fabrication and properties of carbon fibers", *Materials*, 2, 2369 – 2403, (2009).

Yaman, A., "Karbon liflerinin üretimi", *The Journal of The Textile Institute*, 7(42), 128-136, (2020).

Yi Wan. and Takahash, J., "Development of carbon fiber-reinforced thermoplastics formass produced automotive applications in japan", *Composite science*, 5(3), 86, (2021).

Zhang, J., Chaisombat, K., He, S. and Wang, CH., "Hybrid composite laminates reinforced with glass/carbon wove fabricsfor lightweight load bearing structures", *Composite Structures*, 36,75-80, (2011).

Zhang. J., Gang. L. and Hao.W., "Past, present and future prospective of global carbon fibre composite developments and applications", *Composites*, 250, 110463, (2022).

Zhe. L. and Thomas, A., "Development of high performance recycled carbon fibre composites with an advanced hydrodynamic fibre alignment process", *Journal of Cleaner Production*, 278, 123785, (2020).

Zhu, JH., Chen, P., Su, M., Pei, C. and Xing, F., "Recycling of carbon fibre reinforced plastics byelectrically driven heterogeneous catalyticdegradation of epoxy resin", *Green chemistry*, 21(7), 1635-1647, (2018).