

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**UÇAK FREN BALATALARINDA KARBON FİBER BOYUT VE
ŞEKLİNİN TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERE ETKİSİ**

SİNAN AÇIN

KOCAELİ 2019

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

UÇAK FREN BALATALARINDA KARBON FİBER BOYUT VE
ŞEKLİNİN TRIBOLOJİK ÖZELLİKLERE ETKİSİ

SİNAN AÇIN

Prof.Dr. Muharrem YILMAZ

Danışman, Kocaeli Üniv.

Prof.Dr. Şenol YILMAZ

Jüri Üyesi, Sakarya Üniv.

Doç.Dr. Onur ÇOBAN

Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.


.....

.....

.....

Tezin Savunulduğu Tarih: 01.02.2019

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Ulaşım sektöründe havacılığa olan ilgi her geçen gün daha fazla artmaktadır. Artan bu ilgi neticesinde uçaklar ve uçuş güvenliği konuları üzerine önemli araştırmalar yapılmaktadır. Gün geçtikçe büyüyen ve hızlanan uçakları güvenli biçimde kontrollü olarak durdurabilmek için fren sistemlerine büyük önem verilmektedir. Uçuş güvenliğinin en önemli unsurlarından biri olan fren sistemleri sürekli güncellenmekte ve geliştirilmektedir. Yüksek aşınma ve sıcaklık dayanımının gerekli olduğu fren sistemlerinde, karbon fren balata ve disklerinin kullanımı birçok avantajı beraberinde getirmiştir. Yeni nesil uçakların tamamına yakınında karbon fren balataları kullanılmaktadır.

Bu çalışmada yabancı kaynaklardan yararlanılmış olup, karbon fren balatalarının özellikleri ve kullanım ömrünü etkileyen parametreler incelenmiştir. Yapılan deneysel işlemlerde ise farklı boyut ve şekillerde takviye edilen karbon fiberler ile üretilen fren balata numunelerinin aşınma dayanımları karşılaştırılmıştır.

Tezimi hazırlama aşamasında sabırla kıymetli görüşlerini ve ilgisini eksik etmeden beni destekleyen değerli tez danışmanın Sn. Prof. Dr. Muharrem YILMAZ'a sonsuz şükranlarımı sunarım. Deneysel çalışmalarına destek sağlayan kıymetli hocam Sn. Prof. Dr. Taner YILMAZ'a teşekkür ederim. Birçok konuda yardımlarını esirgemeyen KOÜ Fen Bilimleri Enstitüsü sekreteri ve gönül insan Sn. Durmuş İMAT'a teşekkür ederim. Ayrıca malzeme ve teknik imkân desteği sağlayan THY Teknik A.Ş. Bakım Onarım Müdürü Sn. Gürkan AKIN'a ve manevi desteklerini esirgemeyen tüm AÇİN ailesine teşekkür ederim.

Bu tez 05 Aralık 2018 tarihinde dünyaya gelen kızımız Aymira AÇİN'e armağan olsun.

Ocak – 2019

Sinan AÇİN

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	iv
TABLolar DİZİNİ	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	vii
ÖZET.....	viii
ABSTRACT	ix
GİRİŞ	1
1. GENEL BİLGİLER	2
1.1. Uçaklarda Fren Sistemleri	2
1.1.1. Uçaklarda İniş Takımları	3
1.2. Uçaklarda Frenleme Sistemi	6
1.2.1. Thrust reversers sistemi	7
1.2.2. Uçak fren kanatları ve hava freni (spoilers and airbrake).....	8
1.2.3. Normal frenleme sistemi.....	9
1.2.4. Anti skid fren sistemi.....	10
1.2.5. Park ve uçuş frenleri	10
1.2.6. Elektrikli fren sistemi	11
1.3. Diskli Fren Sistemleri	11
1.3.1. Tek diskli frenler.....	11
1.3.2. Çok diskli frenler	12
1.4. Uçak Fren Sistemlerinde Kullanılan Malzemeler	13
1.4.1. Lastiklerde kullanılan nitrojen gazı	14
1.4.2. Metalik balata ve diskler	14
1.4.3. Karbon balata ve diskler	15
1.5. C/C Kompozit Fren Diskleri	16
1.5.1. Karbon fren disk malzemelerinin özellikleri	17
1.5.2. Karbon fren diski üretim yöntemi	19
1.5.2.1. Ara ürün işlemleri	19
1.5.2.2. Karbonizasyon işlemi	20
1.5.2.3. RTM ve CVD yöntemleri ile yoğunlaştırma işlemi	21
1.5.3. Karbon Fren Disklerinin Aşınma Dayanımı	24
1.5.3.1. Disklerde nem ve oksidasyon etkisi	26
1.5.3.2. Disklerin maruz kaldığı yük ve zorlamalar	26
1.5.4. Karbon Disklerin Kullanım Ömrünü Etkileyen Parametreler	27
2. MALZEME VE YÖNTEM.....	29
2.1. Deney Numunelerinin Hazırlanması	30
2.1.1. Örgü prepreg karbon fiber numuneler	30
2.1.2. Karma fiber numuneler	31
2.2. Pin on Disk Aşınma Deneyinin Yapılışı	33
2.2.1. Örgü prepreg karbon fiber numunelerin analizi	34
2.2.2. Karma fiber numunelerin analizi	35
2.3. Deney Numunelerinin SEM Analizi	39

2.4. Aşınma Oranlarının Hesaplanması	40
3. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	43
KAYNAKLAR	44
KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER	46
ÖZGEÇMİŞ	47



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Boeing B-52 uçağının iniş takımları ve paraşüt kullanarak frenlemesi.....	2
Şekil 1.2. Airbus A380 uçağının acil frenleme sırasındaki görüntüsü.....	3
Şekil 1.3. Tipik bir iniş takımının yapısı.....	4
Şekil 1.4. Çapraz örgülü lastik (bias ply tyre) sol, radyal lastik sağ.....	5
Şekil 1.5. Yolcu uçağında ön (burun) ve ana (arka) iniş takımlarının görüntüsü.....	5
Şekil 1.6. Uçak iniş takımları ve fren sistemlerinin elemanları.....	6
Şekil 1.7. Bir uçağa etki eden kuvvetlerin şematik gösterimi. (İtme, Çekme, Kaldırma, Ağırlık).....	7
Şekil 1.8. Üç farklı türde çalışma prensibine sahip thrust reserve sistemlerinin şematik gösterimi.....	8
Şekil 1.9. Kanat üzerinde açılmış olan birden fazla spoiler sayesinde uçak yavaşlar.....	9
Şekil 1.10. İniş sırasında normal frenleme yapan uçağın ana (arka) iniş takımları.....	10
Şekil 1.11. Hafif bir uçakta bulunan tek diskli metalik bir fren tertibatının şematik (sol) ve uçak tekeri üzerindeki bağlantısının (sağ) görüntüsü.....	12
Şekil 1.12. Fren parçalarının monte edildiği rotor ve stator yığınının oluşan piston düzeneği (sol) ve çok diskli karbon frenin iniş takımı üzerindeki bağlantısı (sağ).....	12
Şekil 1.13. Boeing 767 uçağında kullanılan çok diskli karbon fren disklerinin şematik görüntüsü.....	13
Şekil 1.14. Uçak frenleme sürecinin özellikleri (a), çok diskli C/C fren disk (b), C/C fren diskinin sıcaklığa bağlı aşınma oranı değişimi (c) ve sürtünme yüzeyi görüntüsü (d).....	16
Şekil 1.15. Airbus A330 sol iniş takımında karbon fren sistemlerinin görünümü.....	17
Şekil 1.16. Boeing 787 Dream Liner Fren Sistemi.....	18
Şekil 1.17. Fiber ipliğini istenilen boyda kesen robot ve vakumlu kalıbın birbiri ile senkronize çalıştığı 4P prosesi.....	20
Şekil 1.18. Şematik olarak karbonizasyon işlemi.....	21
Şekil 1.19. RTM yöntemi şematik gösterimi.....	22
Şekil 1.20. RTM işlemi sonrası karbon disk mikro yapısı.....	22
Şekil 1.21. Tüp fırınlı termal CVD sisteminin şematik tasarımı.....	23
Şekil 1.22. CVD yüzey işleminden önce (a) ve sonra (b) C fiberlerin mikro yapıları.....	23
Şekil 1.23. Karbon ve çelik fren disklerinin farklı enerji bölgelerindeki fren aşınma oranları.....	24
Şekil 1.24. MESSIER-BUGATTI'ya göre fren sıcaklığına karşı karbon aşınma oranı grafiği.....	25

Şekil 1.25. HONEYWELL-ALS (A330/A340) standardına göre fren sıcaklığına karşı karbon aşınma oranı grafiği	25
Şekil 1.26. BF GOODRICH'e göre fren sıcaklığına karşı karbon aşınma oranı grafiği (SUPERCARB-A321/A330/A340).....	25
Şekil 1.27. Kullanılmamış yeni karbon frenleri (sol), aşınmış karbon frenleri (sağ)	28
Şekil 2.1. Dolapta -18 0C'de muhafaza edilen prepreg malzemeler (sol) ve karma fiber numunelerinde kullanılan çeşitli fiberler (sağ)	29
Şekil 2.2. Kat kat yapıştırıldıktan sonra etrafı kesilen prepreg malzemeler.....	30
Şekil 2.3. Otoklav sisteminden çıkarılan numunelerin vakum torbasındaki görünümü (sol) ve vakumdan çıkarılan kürlenmiş prepreg numuneler.....	31
Şekil 2.4. Takviye malzemesi olarak kullanılan çeşitli karbon fiberler	31
Şekil 2.5. Ortalama boyut dağılımı sırası ile 5, 15 ve 25 mm olarak kesilen karbon fiberler	32
Şekil 2.6. Farklı boyutta kesilen fiberler (sol) ile karıştırılan 9390 epoksi reçine (sağ)	32
Şekil 2.7. A, B ve C numunelerinin 90 0C sıcaklık ve 7 bar vakum altında 4 saat süren kür işlemi	32
Şekil 2.8. CNC cihazında otomasyon yöntemi ile hassas kesimleri yapılan 2x2x2 cm boyutlarındaki test numuneleri	33
Şekil 2.9. Pin on disk aşınma test cihazı genel görüntüsü.....	34
Şekil 2.10. Aşınma testi için hazırlanan örgü numuneler.....	34
Şekil 2.11. Örgü numunelerin dokuma sıklığına göre sürtünme katsayısı değişimi	35
Şekil 2.12. Aşınma testi için karma fiberlerden oluşan A,B ve C grubu numuneleri.....	36
Şekil 2.13. Pin on disk aşınma testi sırasında seramik bilyanın, numune yüzeyine teması (sol) ve test sonrası numune yüzeyinde meydana gelen aşınma izi	36
Şekil 2.14. 75 m kayma mesafesinde A,B ve C numunelerinin sürtünme katsayılarındaki değişimi gösteren grafik	38
Şekil 2.15. 300 m kayma mesafesinde A,B ve C numunelerinin sürtünme katsayılarındaki değişimi gösteren grafik	38
Şekil 2.16. Kalın örgü prepreg numune aşınma yüzeyinin 9x büyütme SEM görüntüsü.....	39
Şekil 2.17. İnce örgü prepreg numune aşınma yüzeyinin 9x büyütme SEM görüntüsü.....	39
Şekil 2.18. Sırası ile karma a,b ve c numunelerinin 75 m kayma mesafesinde aşınma testi sonucu yüzeyinde oluşan aşınma izinin 9x büyütme altındaki SEM görüntüsü.....	40
Şekil 2.19. 300 m kayma mesafesinde aşınma deneyine girmiş olan sırası ile karma b ve c numunelerinin SEM yüzey analizi görüntüleri.....	40
Şekil 2.20. Numunelerin 75 m ve 300 m kayma mesafelerinde aşınma oranlarını gösteren grafik	42

TABLolar DİZİNİ

Tablo 2.1. Örgü numunelerin sicim sayıları ve 75 m kayma mesafesinde elde edilen sürtünme katsayıları	35
Tablo 2.2. Karma fiber numunelerinin ortalama sürtünme katsayıları ve boyut dağılımı	37
Tablo 2.3. Aşınma izi genişliğinden aşınma hacmi ve aşınma oranlarının hesaplanarak kıyaslanması	41



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

V	: Aşınma Hacmi (mm ³)
π	: Pi sayısı (3,1416)
R	: Sürtünme Yarıçapı, mm
D	: Aşınma İzi Genişliği, mm
r	: Prop Yarıçapı, mm
k	: Aşınma Oranı (mm ³ /Nm)
L	: Uygulanan Yük, (Newton)
X	: Kayma Mesafesi, m



UÇAK FREN BALATALARINDA KARBON FİBER BOYUT VE ŞEKLİNİN TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERE ETKİSİ

ÖZET

Uçaklarda kullanılan en önemli güvenlik sistemlerinden biri fren sistemleridir. Uçak fren sistemlerinin sürtünme prosesindeki en önemli komponenti ise fren balatasıdır. Bu çalışmada karbon fren balatalarında, karbon fiber boyut ve şeklinin sürtünme performansına etkileri incelenmiştir. Yapılan deneysel işlemler için iki farklı grupta numuneler hazırlanmıştır. Birinci grupta farklı dokuma kalınlığına (ince dokuma ve kalın dokuma) göre üretilmiş olan düzenli örgü prepreg (önceden reçine emdirilmiş karbon) numuneler karşılaştırılmıştır. İkinci grupta ise farklı boyutlarda kesilen çeşitli karbon fiberler ile takviye edilmiş, epoksi matrisli numuneler karşılaştırılmıştır. Numuneler aşınma testi yapıldıktan sonra SEM analizinde incelenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda sicim kalınlığının ve fiber boyutunun aşınma katsayısını önemli oranda etkilediği anlaşılmıştır. Düzenli örgü yapısına sahip, dokuma metodu ile üretilmiş olan prepreg numunelerde sicim kalınlığının aşınma oranını arttırdığı görülmüştür. İkinci grupta yer alan, farklı boyutta kesilmiş fiberler ile takviye edilen epoksi matrisli karma numunelerde ise artan karbon fiber boyutunun sürtünme direncini düşürdüğü sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Fren Balata, Karbon Fiber, Sürtünme Katsayısı, Uçak Fren.

THE EFFECT OF SIZE AND SHAPE ON TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF CARBON FIBER AIRCRAFT BRAKE PADS

ABSTRACT

One of the most important safety systems used in aircrafts is brake systems. The most important component of the friction process of the aircraft brake systems is the brake lining. In this study, the effects of carbon fiber size and shape on friction performance of carbon brake pads were investigated, for the experimental procedures, samples were prepared in two different groups, the first group, regular weave prepreg (pre-impregnated carbon) samples which were produced according to different weaving thicknesses (fine weaving and thick weaving). The second group was supplemented with various carbon fibers that are cut in comparable different sizes plus epoxy matrix samples; the samples were examined by SEM analysis after the wear test. As a result, it was understood that the thickness of the twine and the fiber size affected the wear coefficient significantly, moreover, it increased the wear rate in prepreg samples which are produced by the weaving method. The second group which is located on different sized cut fibers reinforced with epoxy matrix composite samples indicates that increasing the size of carbon fiber reduces the frictional resistance.

Keywords: Break Pads, Carbon Fiber, Friction Coefficient, Aircraft Brake.

GİRİŞ

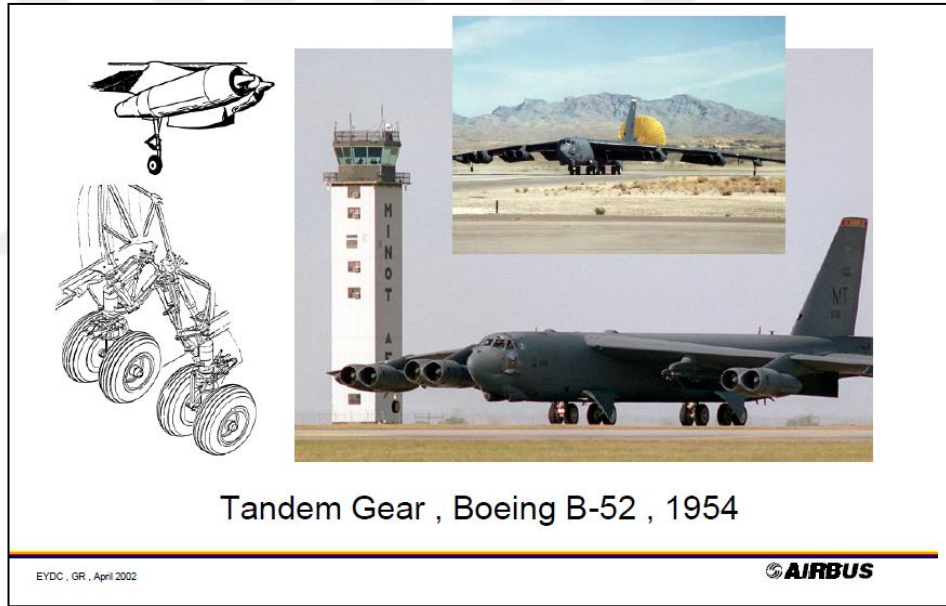
Havacılığa olan ilginin artması ile birlikte uçakların insan yaşamı içerisindeki konumu da hayati önem taşımaya başlamıştır. İnanların önemli miktarda çoğunluğu seyahatlerinde çoğu zaman uçakları tercih etmektedir. Askeri alanda önemi oldukça fazla olan uçaklar, hava taşımacılığına olan ilginin artması sebebi ile sivil havacılıkta da önem kazanmıştır. Gelişen teknoloji sayesinde üretilen yeni nesil uçaklar artık daha fazla yolcu kapasitesine ve konforuna sahiptirler. Yolcu kapasitesinin artışı ile birlikte uçakların boyutlarında ve hızlarında meydana gelen artışlar bir diğer konu olan uçuş güvenliğini de gündeme taşımıştır. Devasa büyüklükte olan uçakları güvenli ve kontrollü bir şekilde durdurabilmek, uçuş güvenliğinin en önemli amaçlarından biridir. Uçuş güvenliğinin en önemli unsurlarından biri olan fren sistemleri sürekli güncellenmekte ve geliştirilmektedir. Yüksek aşınma ve sıcaklık dayanımının gerekli olduğu fren sistemlerinde, karbon fren balata ve disklerinin kullanımı birçok avantajı beraberinde getirmiştir. Yeni nesil uçakların tamamına yakınında karbon fren balataları kullanılmaktadır.

Bu çalışmada uçakların iniş sistemleri hakkında genel bilgiler verildikten sonra fren sistemlerinde kullanılan malzemeler üzerine değinilmiştir. Uçak fren sistemlerinde metalik fren balatalarından, karbon fren balatalarına yönelimi ve bu yönelimin avantajları açıklanmıştır. Deneysel bölümde ise karbon fren balata ve disklerinin en önemli malzemesi olan karbon fiber katkılı balata malzemeleri üretilmiştir. Farklı şekil ve boyut içeriğine sahip karbon takviye malzemelerinin aşınma direncine olan etkileri araştırılmıştır.

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Uçaklarda Fren Sistemleri

Havacılık sektörüne olan talebin artışı ile birlikte uçak teknolojisi büyük gelişmeler göstermiştir. Büyüklük, konfor ve hızın yanında uçuş güvenliğinin en önemli unsurlarından biri olan fren sistemleri üzerine ise birçok çalışma yapılmıştır. Uçağın güvenli bir şekilde havada kalabilmesi ne kadar önemli ise; aynı uçağın güvenli bir biçimde piste teker koyması ile durdurulması da bir o kadar önemlidir. Fren sistemleri, uçuş güvenliğini sağlayan önemli unsurlarda bir diğeridir.



Şekil 1.1. Boeing B-52 uçağının iniş takımları ve paraşüt kullanarak frenlemesi

Uçak frenleri, uçağın inişi sırasında anahtar görevindedir. Güvenli bir şekilde gerekli durdurma torkunu oluşturmak için sürtünme parçaları kullanılır. Sürtünme parçaları sayesinde, uçağın kinetik enerjisi ısı enerjisine dönüştürülerek uçağın yavaşlatılması ve durdurulması sağlanır. Hızlı havacılık bilimi ve teknolojisinin gelişmesiyle birlikte, özellikle A380 ve B747-8 gibi modellerin gelişimi ile büyüklük ve ağırlıkta kayda değer bir artış gözlenmiştir. Bazı özel uçak tipleri daha kısa iniş ve kalkış mesafeleri

talep edilmektedir. Bu da önemli ölçüde daha fazla iniş neden olmaktadır. Daha fazla iniş, daha fazla ısı enerjinin ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Bu nedenle, frenleme malzemeleri için daha yüksek enerji adsorpsiyonlarına sahip malzemeler tercih edilmeye başlanmıştır. Geleneksel frenlerde, yüksek fren enerjisini taşımak için, frenlerin ısıl kapasitesini artırmak ve fren sıcaklığını düşürmek için frenlerin ağırlığı artırıldı, bu da yakıt tüketimi ve motor emisyonları ile sonuçlandı [1].

Sürtünme frenlerinin amacı, sürtünme yoluyla aracın kinetik enerjisini ısıya dönüştürerek ve bu ısının çevreye yayılmasını sağlayarak aracı yavaşlatmaktır. Bu özelliklerin yanında yüksek aşınma direncine sahip olan karbon fren balataları bu özellikleri sağlaması nedeniyle çok fazla tercih edilmektedir. Airbus A380 uçaklarının fren sistemlerinde, karbon fren diskleri tercih edilmektedir.

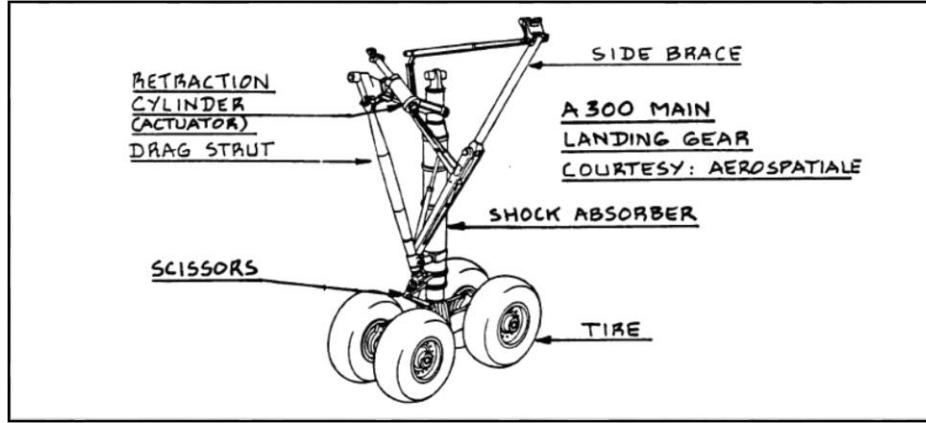


Şekil 1.2. Airbus A380 uçağının acil frenleme sırasındaki görüntüsü.

1.1.1. Uçaklarda iniş takımları

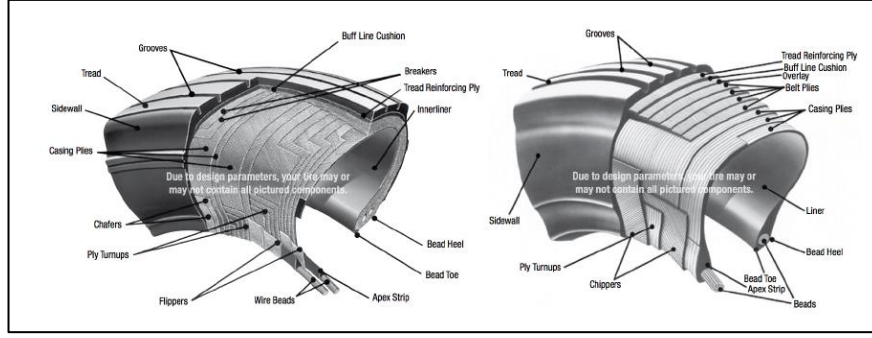
Uçak endüstrisinin karşılaştığı problemlerden biri, iniş takımı aparatlarının ağırlık ve titreşimli çalışma şartlarında deformasyon problemidir. Havacılık sektöründe ağırlığın önemi göz önüne alındığında metalik iniş takımlarının ağırlığı nedeniyle uçuş sırasında fazla yüke neden olduğu tespit edilmiştir. İniş takımları, büyük uçaklarda inkar edilemez derecede büyük bir kargaşanın da kaynağını oluşturmaktadır. Bu kargaşanın kaynağı ise; büyük uçan makinelerin, inişe geçtikten sonra duruncaya kadar olan frenleme yaklaşımının getirmiş olduğu karmaşadır. İniş takımlarının gövde

adaptasyonu ve lastiklerin özellikleri fren donanımlarında dikkate alınan konulardır [2].



Şekil 1.3. Tipik bir iniş takımının yapısı [3].

İniş takımı tasarımı beraberinde yapılar, ağırlıklar, kinematik, ekonomi ve pist tasarımı içeren farklı mühendislik disiplinlerini içerir. Bu farklı disiplinler arasındaki etkileşim iniş takımlarını karmaşık bir sistem yapar. İniş takımlarını uçakta konumlandırmak çeşitli gereksinimlerle sınırlıdır. Gereksinimler arasında kalkış stabilitesi, piste iniş (touchdown) stabilitesi, kanat ucu ve motor boşluğu, zemin kullanımı ve taksilerde stabilite sayılabilir. Tüm bu sınırların değerlendirilmesi, mümkün olan en kısa iniş takımlarının bulunduğu uygun bir tasarım alanı ile sonuçlanır. Ortaya çıkan iniş takımı konumundan iniş takımı destekleri üzerindeki yükler hesaplanır. Lastikler ve tekerlekler seçilir ve frenler ve amortisörler tasarlanır. Yapı içerisinde akma ve bükülmenin önlenmesi için gerekli bileşen kalınlıklarının hesaplanması gerekir. Çok sayıda lastik sırasına sahip iniş takımları için iniş yüklerine bakmak özellikle önemlidir. Çünkü sert iniş, şok yüklerde yüksek frekansta tepe noktaları oluşturur. Bu tepe noktaları, farklı zamanlarda zemine çarpan ön ve arka aks lastikleri arasındaki etkileşimden kaynaklanır. Şok yüklerin absorbe edilmesi için amortisör sistemleri kullanılmıştır [3].



Şekil 1.4. Çapraz örgülü lastik (bias ply tyre) sol, radyal lastik sağ. (Goodyear, 2002)

Uçakların iniş takımları konumlarına göre temel olarak iki farklı grupta incelenebilir. Birinci grup, uçağın ön kısmında (burun) pilot kabininin hemen altına denk gelen bölgede yer alan ön iniş takımlarıdır. Uçağı yerde dengede tutmak ve hareket yönünü belirlemek için kullanılır. Pilot tarafından kumanda edilen burun iniş takımı sayesinde, uçak yerde iken istenilen yöne doğru hareket ettirilebilir. Uçağın kanat hizasına denk gelen bölgenin altında bulunan iniş takımları ise ana (main) iniş takımları olarak adlandırılırlar. Ana iniş takımları, uçağın genel yükünü taşıyan ve frenleme mekanizmasını bünyesinde barındıran bölümlerdir. Uçak boyutlarının artması ve uçakların gün geçtikçe daha çok hız kabiliyeti kazandığı günümüzde uçağı durdurabilmek için güçlü fren sistemlerine ihtiyaç duyulmuştur. Bu ihtiyacı giderebilmek için her tekerere gelen yükü azaltmak için teker sayısı artırılmıştır. Tandem sistemi olarak bilinen bu yöntem ile iniş sırasındaki yük tekerlek sayısı ile azaltılarak tekerlere bölünmüştür.

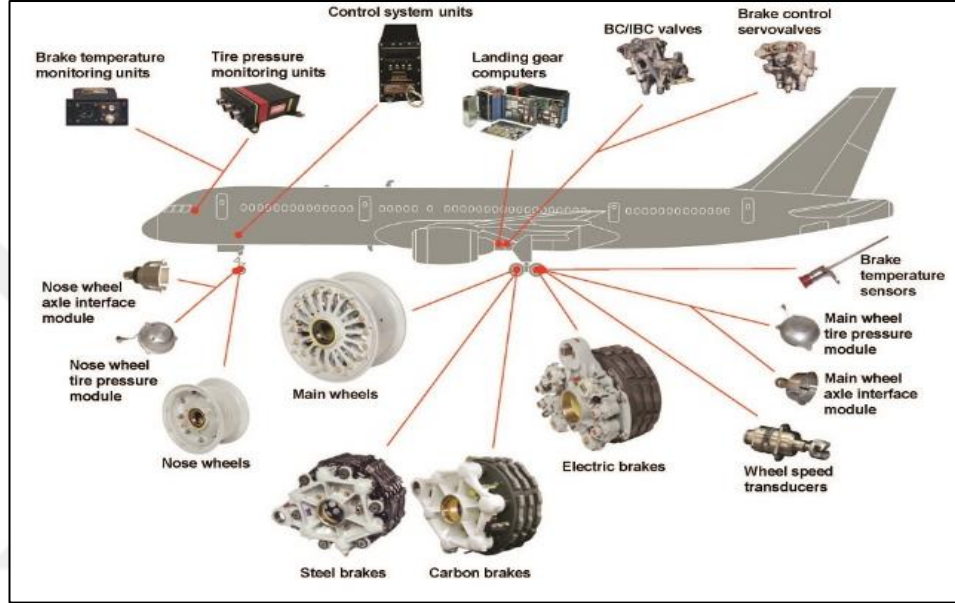


Şekil 1.5. Yolcu uçağında ön (burun) ve ana (arka) iniş takımlarının görüntüsü.

İniş sistemlerinin uçak yapısı üzerinde üç temel görevi vardır. Bunlar yerde hareket, kalkış işlemi (take off) ve iniş işlemi (landing) olarak sınıflandırılabilir.

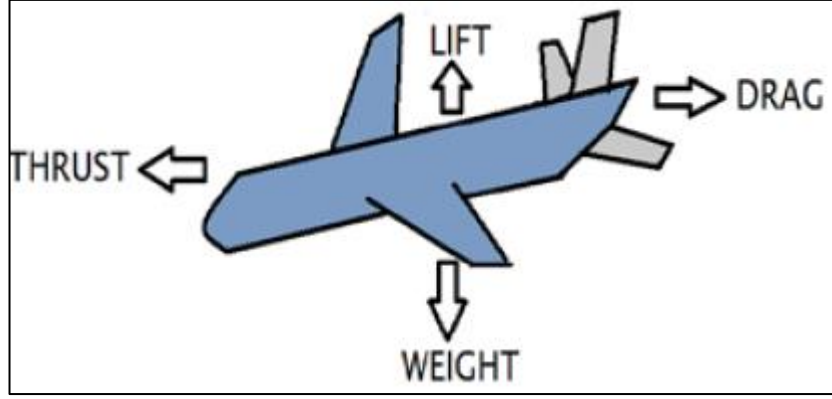
1.2. Uçaklarda Frenleme Sistemi

Uçuş güvenliğinin en önemli unsurlarından biri olan frenleme sistemi üzerinde birçok yeni donanımlar geliştirilmiştir.



Şekil 1.6. Uçak iniş takımları ve fren sistemlerinin elemanları (Meggitt 2019)

Uçakların boyutları ve hızları arttıkça, frenleme sırasında dönüştürülmesi gereken enerji miktarı da artmıştır. Dönüştürülmesi gereken kinetik enerji miktarının büyüklüğü arttıkça, geliştirilen fren tasarımlarında değişiklikler gözlenmiştir. Eski tip fren sistemlerinde kampana ve papuç kullanılır iken, yeni fren sistemlerinde diskli fren sistemleri kullanılmaya başlanmıştır. Bunların yanında uçak fren sistemleri antiskid ve acil fren sistemi (elektrikli fren sistemi) ile desteklenmiştir. Günümüz fren sistemlerinin iki görevi vardır. Birincisi uçağı iniş, kalkış ve kalkıştan vazgeçme (RTO, Rejected Take Off) sırasında durdurma. İkincisi ise uçağı park pozisyonunda ve yer operasyonları sırasında sabit tutma [4].



Şekil 1.7. Bir uçağa etki eden kuvvetlerin şematik gösterimi. (İtme, Çekme, Kaldırma, Ağırlık)

Sürtünmeyi artırarak aşırı kinetik enerjinin termal enerjiye dönüştürülmesinden frenler sorumludur. Sürtünme miktarının artırılması (yani, bir aracın hareketine verilen dirençtir), aracın hareket hızını azaltır. Fren sistemleri, araçların yavaşlatılması veya durdurulması için bu prensibi kullanır. Uçaklardaki fren sistemleri, üç temel tiptedir: mekanik, hidrolik ve pnömatik frenler. Mekanik frenler, bağlantılar, kaldıraçlar kamları vb. Kullanılarak çalıştırılanlardır. Hidrolik frenler, fren bileşenlerine basıncın aktarılması için sıvı basıncını kullanırken, Pnömatik frenler fren gücünü iletmek için hava basıncı kullanır. Bu sistemler, hava frenleri, spoiler, kanatlar, ters iticiler, sürüklenme kanalları vb. İle çevredeki hava sürüklemesini artırır veya etkin frenleme için dübel, kızak vb. Kullanarak zemin sürüklemesini artırır [5].

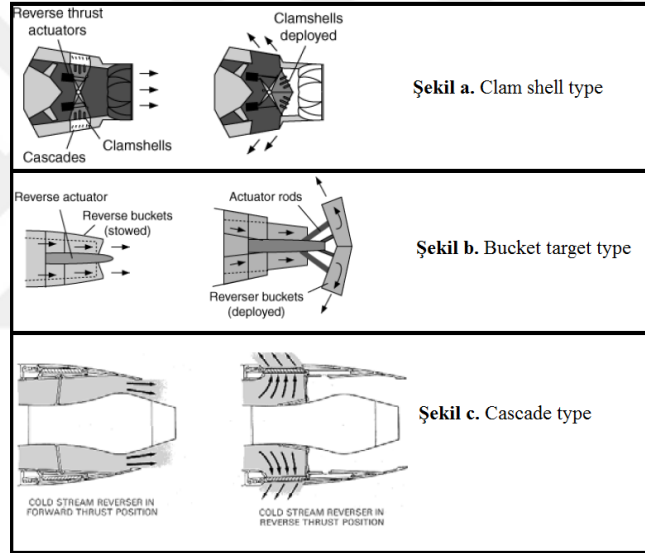
1.2.1. Thrust reversers

İtme gücünü terse çevirici olarak tanımlanır. Motorların meydana getirdiği itme gücünü iniş sırasında tersi yönde kullanarak hareketi yavaşlatıcı etki yaparlar. Genellikle pist sürtünme katsayısının düştüğü karlı ve buzlu havalarda daha çok tercih edilirler. Duruş mesafesini kısaltıcı etkileri vardır.

İtme ters çeviricileri (thrust reversers), uçağın hareketine karşı bir sürtünme kuvveti oluşturmak için egzoz gazlarının yönünün tersine çevrilmesi veya pervane eğiminin değiştirilmesi prensibi üzerinde çalışır. Esas olarak durma mesafesini azaltmak için kullanılır. Daha küçük pistlere iniş, tekerlek fren aşınması ve taksi mesafesinin azalmasını sağlar. Reddedilen kalkışlar durumunda da kullanılır. Islak veya buzlu pistlerde su tabakası, tekerlek yüzeyi ile pist arasında kayganlaştırıcı bir film gibi

davranır. Bunun bir sonucu olarak, sürtünme azalır. Yüzey sürtünmesinden bağımsız olan itme ters çeviricilerin yerleştirilmesi, bu koşullarda daha iyi frenleme sağlar. Belirli uçak modellerinde, iniş pisti üzerinde en kısa sürede ters yönde itiş kuvveti oluşturarak uçağı durdurmak önemlidir. Turbojet ve turbofan uçaklarında, egzoz gazlarının hava akışını motordan yönlendirerek baskı işlemi tersine çevrilir. Aerodinamik kısıtlamalar nedeniyle, boşaltma açısı 45 derece tutulur ve sonuç olarak, her iki sistem için üretilen sürgü, ileri itmenin% 40-60'ı kadardır [5].

Turbo jet veya turbo fan motorlarda itmeyi tersine çevirmenin birkaç yöntemi vardır. Bunlar: clam Shell type, bucket target type ve cascade type olmak üzere üç türdür. Şekil 1.8.'de şematik olarak bu üç tür gösterilmiştir.



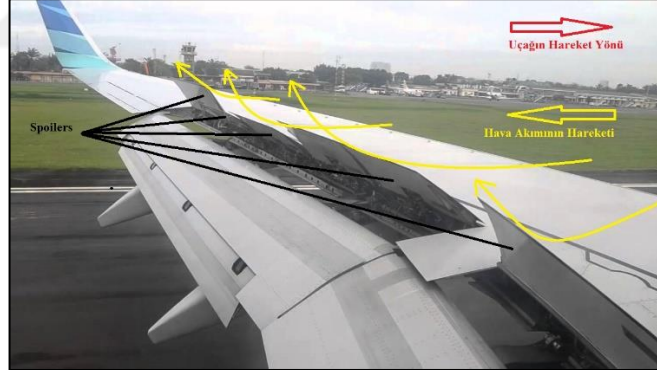
Şekil 1.8. Üç farklı türde çalışma prensibine sahip thrust reserve sistemlerinin şematik gösterimi.

1.2.2. Uçak fren kanatları ve hava freni (spoilers and airbrake)

Spoiler, bir uçağın kalkmasını tahrip etmek için kullanılan cihazlardır. Bunlar, ön kenarı kanatlara (bir açıyla) menteşeli olan ve böylece hava akışını düzene sokarak kaldırma miktarını değiştiren dikdörtgen kesitli kanat yapısıdır. Düşey doğrultuda uçaktaki net kuvvet, ağırlığın eksi yönde hareket etmesine (yere doğru yapışması) neden olur. Bu sebepten ötürü, spoiler kullanıldığında kaldırma yönlü asansör etkisi azalır ve gövdeye etkiyen net kuvvet aşağı yönde artar. Uçuş spoileri, hızı yükseltmeden asansör etkisini azaltmak için kullanılır. Uçağın daha kolay inişine izin verir. Sonuç olarak, uçağın ağırlığı kanatlardan alt şasiye transfer edilir. Bu fren

kolaylığı sağlar ve ayrıca kayma riskini azaltır. Spoiler aynı zamanda yer hareketlerinde manevra kabiliyetini artırır. Pilot kontrol tekerleğini sağa hareket ettirdiğinde, sağ kanat spoileri uzar ve sağ kanadın yukarı yönde hareketi engellenir. Uçak daha sonra sağa döner. Benzer şekilde sola dönüşler içinde sol kanat spoileri yukarı uzanır. Spoiler ayrıca kalkış reddinde, yani bazı teknik arızalardan veya herhangi bir nedenden ötürü bir uçağın kalkışının iptalinde de kullanılabilir [5].

Dalış freni olarak da bilinen havalı frenler, etkinleştirildiğinde uçaktaki sürtüşmeyi artıran bir dizi metal bıçaktan oluşan bir cihazdır. Yüksek performanslı uçaklarda kullanılırlar. Kanatların üstünde veya altında veya gövdenin yakınında bulunurlar. Hava frenleri asansöre minimum etkiye bulunduğundan spoilerden farklıdır. Aksine, havaya ısıtarak sürüklemeyi artırırlar. Diğer bir fark, Hava frenlerinin ya tamamen istiflenmiş ya da tamamen açılmış durumdayken, spoilerin farklı konumlarda açılabilmesidir. Hem hava frenleri hem de spoiler açıldığında, şok soğutma tehlikesinden korunmak için (hızlı iniş nedeniyle) motora optimum güç sağlanmalıdır [5].



Şekil 1.9. Kanat üzerinde açılmış olan birden fazla spoiler sayesinde uçak yavaşlar.

1.2.3. Normal frenleme sistemi

Pilotun kokpitte bulunan pedallara basması sonucu hidrolik sistemin devreye girmesiyle birlikte, tekerlerdeki disklerin sıkıştırılması sistemidir. Hidrolik sıvısı pistonların ileriye doğru itişini gerçekleştirir. Pistonlar rotor içerisindeki birden fazla diski baskılayarak sürtünme sonucu frenleme işlemini gerçekleştirir.



Şekil 1.10. İniş sırasında normal frenleme yapan uçağın ana (arka) iniş takımları.

1.2.4. Anti skid fren sistemi

Anti skid fren sistemi, otomobillerdeki ABS sistemine benzeyen bir sistemdir. Buradaki amaç tekerleklerin kilitlenmesini önlemektir. Eğer frenleme sırasında tekerlekler kilitlenirse, tekerlekler sadece kinetik sürtünme katsayısının etkisinde kalacağından dolayı çok az fren kuvveti uygulanmış olur. Uçağın ön iniş takımlarında sensörler bulunur ve bu sensörler ile ölçülen hızı referans olarak alınıp ana iniş takımlarının fren hızları ile karşılaştırılır. Aralarındaki fark belli bir oranın altına düşer ise fren yapan tekerleklerdeki fren basıncı, optimal olarak belirlenen fark katsayısına tekrar ulaşılacak şekilde azaltılır. Uçak lastikleri ile pistin arasında belirlenen ortalama sürtünme katsayısı %15'dir. En yüksek frenleme kuvveti bu oranda sağlanabilir. Sürtünme oranı %30'dan daha fazla olursa tekerleklerin kilitlenmesine yol açar. Bu istenmeyen durum karşısında fren basıncı, tekerleklerin sürtünmesini düşürmek için kısa süreli düşebilir. Anti skid fren sistemi, böylelikle tekerlerin kilitlenmesi sebebiyle oluşabilecek kaymayı engellemiş olur.

1.2.5. Park ve uçuş frenleri

Park freninin, otomobillerdeki el freni mantığına benzeyen bir işlevi vardır. Uçağın park pozisyonunda iken tekerleklerini kilitleyerek hareketini engeller. Ayrıca uçak motorları çalıştığında dahi (motor testleri v.b.) park freni kullanılarak uçağın sabit kalması sağlanır.

Uçuş freni ise kıkış işleminden sonra kapanan iniş takımlarında tekerleklerin kilitlenmesini sağlar. Uçuş sırasında tekerleklerin hareketinin uçuşu etkilemesine ve

gövde içerisinde herhangi bir yapıya zarar vermesine engel olmak için kullanılır. İniş takımları açılıncaya kadar tekerlekler gövde içerisinde uçuş freni ile sabitlenmiş olur.

1.2.6. Elektrikli fren sistemi

Uçak ana iniş takımlarında yer alan fren sistemleri, daha önceleri hidrolik donanımlar ile birlikte kullanılmıştır. Fakat hidrolik yağlarının sızıntısından kaynaklanan temel problemler, elektrikli fren sistemlerinin geliştirilmesine neden olmuştur. Elektrikli fren sistemlerinde hidrolikler ile çalışan pistonlar kullanımdan kaldırılmıştır. Bunların yerine elektromekanik donanımlar yerleştirilmiştir. Geliştirilmiş olan elektrikli fren sistemlerinde komutlar kokpitten elektronik sinyaller ile iniş takımlarına gönderilir. Ana iniş takımlarının olduğu bölgede bulunan kontrol kutusu bu sinyalleri toplayarak, fren disklerinin bağlı olduğu elektrik motorlarına iletir. Elektrik motorlarının, fren diskleri üzerine uyguladığı kuvvet disklerin birbirine sürtünmesini sağlar ve frenleme işlemi gerçekleşir. Kokpitten ana iniş takımlarına giden elektronik sinyaller, jant içerisinde bulunan diskleri harekete geçirerek elektromekanik harekete dönüştürmüştür.

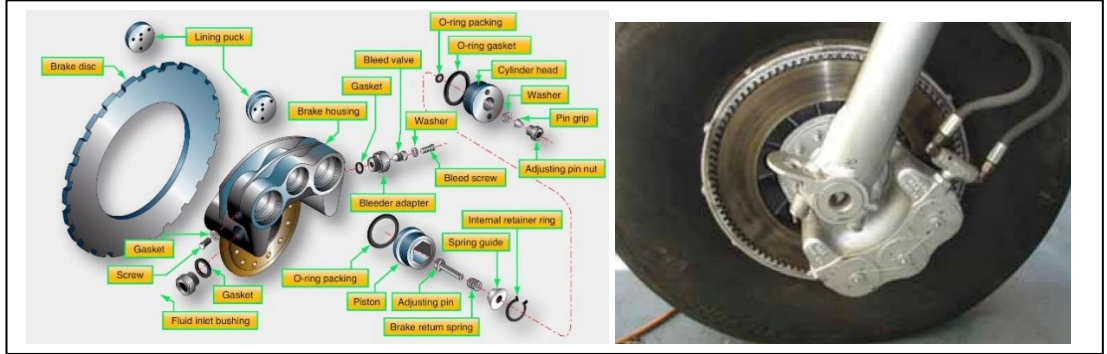
1.3. Diskli Fren Sistemleri

Uçaklarda genellikle tek diskli (metalik) ve çok diskli (karbon) frenler kullanılır. Tekerlek grubuna takılı dönen disk, sabit tutulan fren kaliperleri ve asbest, seramik, karbon vb. gibi malzemelerden yapılmış fren balataları içerir. Fren pedalına basıldığında Basınç altındaki fren hidroliği, ana silindirden ikincil silindire tüplerle akar. Yardımcı silindir, gelen sıvı basıncının kuvvetiyle harekete geçen pistondan oluşur. Piston, fren balatalarını dönen diske karşı zorlar. Fren balatası ve disk yüzeyi arasındaki sürtünme, dönme hareketine dayanır ve durur. Günümüzde kullanılan disk frenler diferansiyel tiptir, yani sol ve sağ birim birbirinden bağımsızdır. Bu ayrıca daha fazla manevra kabiliyeti sağlar.

1.3.1. Tek diskli frenler

Küçük, hafif uçaklar tiplerinde tercih edilirler. Genellikle metalik disk kullanılır. Tekerleğe sabitlenmiş olan disk, tekerlek ile birlikte döner. Diskin her iki tarafında sürtünme uygulanarak frenleme sağlanır. Kaliper gövdesindeki hidrolik basınç altında

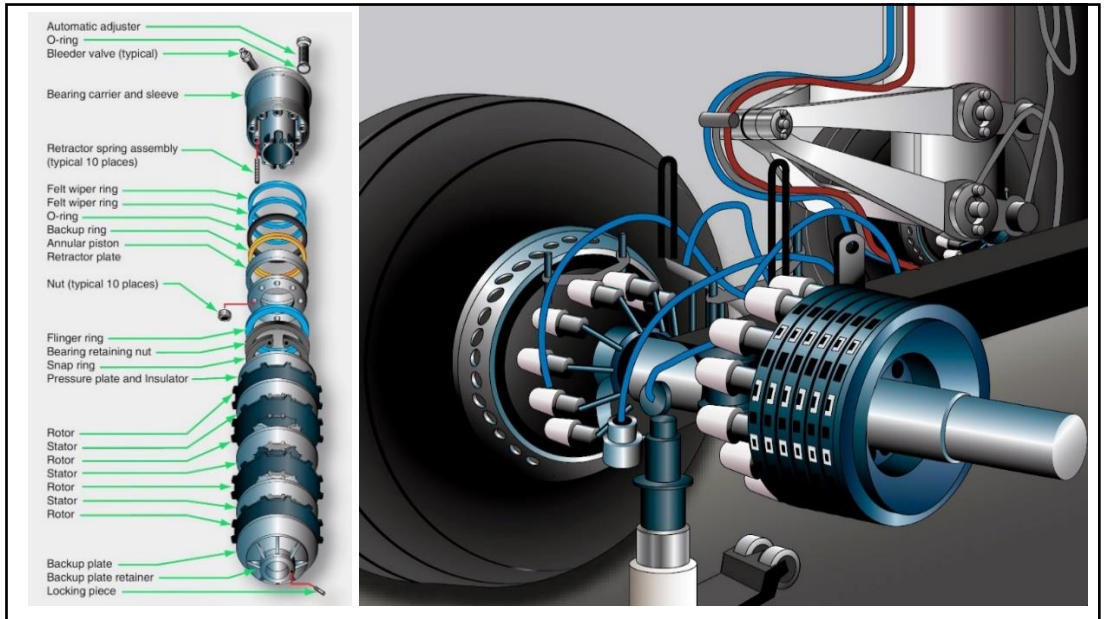
pistonlar harekete ederek fren balataları veya diske dayanır. Bu temas sırasında frenleme gerçekleşir.



Şekil 1.11. Hafif bir uçakta bulunan tek diskli metalik bir fren tertibatının şematik (sol) ve uçak tekeri üzerindeki bağlantısının (sağ) görüntüsü [6].

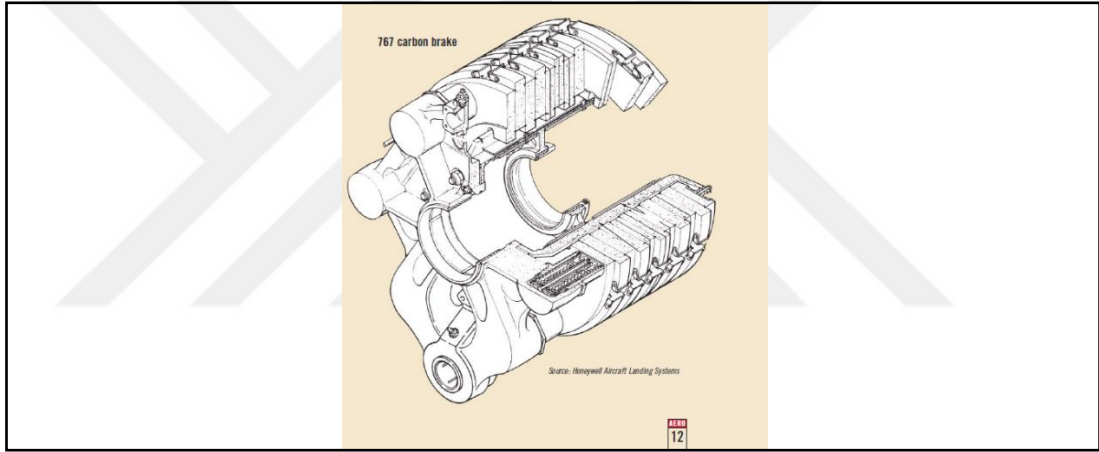
1.3.2. Çok diskli frenler

Büyük gövdeli ve yüksek ağırlığa sahip olan ticari uçaklarda çok diskli frenler kullanılmaya başlamıştır. Çok sayıda diskin bir araya gelmesiyle oluşmuştur. Ağırlığı diğer uçaklara göre çok daha fazla olan büyük uçakların frenlemesinde, kinetik enerjinin ısı enerjisine dönüşümü esnasında ortaya yüksek ısıya ve gerilme kuvvetleri çıkmaktadır. Çok diskli frenler, ortaya çıkan yüksek ısı ve gerilme kuvvetlerine dayanabilir özelliklere sahiptir [7].



Şekil 1.12. Fren parçalarının monte edildiği rotor ve stator yığından oluşan piston düzeneği (sol) ve çok diskli karbon frenin iniş takımı üzerindeki bağlantısı (sağ) [6].

Büyük ve yüksek performanslı uçaklarda frenleme sırasında tekerleklerin dönüş hızı yavaşlatılırken, ortaya çıkan yüksek ısı miktarı sorunlara neden olmaktadır. Ortaya çıkan bu ısının daha iyi dağılması için, parçalara ayrılmış rotor diskli frenler geliştirilmiştir. Parçalı rotor diskli frenler, şekil 1.12’de görüldüğü üzere çok diskli frenlerdir. Ancak daha önce tartışılardan daha modern bir tasarıma sahiptir. Birçok geliştirilmiş çeşidi mevcuttur. Ortaya çıkan ısının kontrolüne ve dağılmasına yardımcı olan sayısız elemanlar içerir. Frenleme, dönen parçalarla temas eden birkaç sabit, yüksek sürtünme özelliğine sahip fren balata seti vasıtasıyla gerçekleştirilir. Rotorlar, aralarında boşluk bulunan bölümlerle inşa edilir ve bu da ısının dağılmasına yardımcı olur. Rotorlu çok diskli frenler, hava taşıyıcı uçaklarda kullanılan yüksek performanslı standart frenlerdir.



Şekil 1.13. Boeing 767 uçağında kullanılan çok diskli karbon fren disklerinin şematik görüntüsü.

1.4. Uçak Fren Sistemlerinde Kullanılan Malzemeler

Uçaklardaki fren sistemleri, uçağı en kısa sürede, güvenli bir biçimde ve düşük maliyet ile durdurmayı amaçlamaktadır. Frenleme sistemleri için geliştirilen donanımların yanında en önemli görev iniş takımlarına düşmektedir. İniş takımlarında kullanılan malzemelerin iyi ısı transferi ve yüksek aşınma direnci özelliklerine sahip olması gerekmektedir. İniş takımlarının kinetik enerjisi, sürtünme etkisiyle ısı enerjisine dönüştürerek uçağı durduracak kabiliyete sahip olması gerekmektedir. Bu ısı enerjisini karşılayan temel yapı, iyi ısı iletken özelliğine sahip olarak kullanılan fren disk gruplarıdır. Fren disk ve balatalarında temel olarak iki tür kullanılmaktadır; birincisi

metalik balata ve diskler, ikincisi karbon balata ve disklerdir. Ayrıca uçuş güvenliği açısından lastiklerde nitrojen gazı kullanılmaktadır.

1.4.1. Lastiklerde kullanılan nitrojen gazı

Hava ile doldurulan lastiklerde sıcak hava ve soğuk hava değişimlerinden kaynaklanan sıcaklık farkı ile lastik basıncı da değişmektedir. Lastik basıncının sürekli değişmesi lastik yapısında deformasyona neden olur. Bu nedenle uçak lastikleri hava ile değil, azot (nitrojen) gazı ile şişirilmektedir. Azot oksijene göre daha kararlı bir madde olduğu için yüksek ısı ve basınca dayanabilmektedir. Ayrıca, nitrojen (azot) gazı ile şişirilen lastik daha hafif olur. Uçak lastiklerine basılan nitrojen yol tutuşunu ve frenlemeyi kesinlikle değiştirmez. Lastiklerde nitrojen gazı kullanımının diğer faydalarında bir diğeri de jant üzerinde oluşabilecek pasın (oksitlenme) önlenmesidir. Metal eğer su ile temas ederse zamanla oksitlenmeye başlayacağından pas oluşumu gözlenir. Lastik içindeki hava basınca maruz bırakıldığında su buharı oluşmaktadır. Sıcaklığının düşmesi ile havada bulunan su buharı sıvılaşır ve bu da pas oluşumunu tetikler. Fakat saf nitrojen gazının bileşiminde su oluşumunu tetikleyici element bulunmadığından bu mümkün olmayacaktır.

İniş sırasında uçak lastikleri üzerine etki eden tonlarca yük, bazı durumlarda lastiğin patlaması için gerekli basıncı oluşturmaktadır. Fakat uçuş güvenliğini sağlamak için bu durum karşısında termik tapalar kullanılmaktadır. İniş sırasında oluşan yüksek sıcaklıklar da ayrıca lastik basıncını arttırmaktadır. Yüksek sıcaklıklarda (yaklaşık 200-300 °C) dahi devreye giren termik tapalar, lastiğin içindeki azot gazını dışarıya vererek basıncı azaltıyor. Bu şekilde uçak lastiklerinin, pist üzerinde yüksek sıcaklık ve basınç etkisiyle patlamalarının önüne geçilmiştir.

1.4.2. Metalik balata ve diskler

Metalik fren balataları, genellikle çok ağır frenleme şartların ve yüksek sıcaklıklarda kararlı sürtünme dayanımına sahiptirler. Termal ısı iletkenliğinin getirmiş olduğu fayda sayesinde sürtünme sırasında açığa çıkan ısı hızlıca transfer edilir. Frenleme basıncındaki artışın sürtünme katsayısına çok fazla bir etkisi olmaz. Genellikle hafif ve yavaş araçlarda tercih edilirler. Büyük taşıt ve kamyonlar düşük hızlara sahip olduğundan tercih sebebidir. Konforun ön planda olduğu binek tipi hafif araçlarda

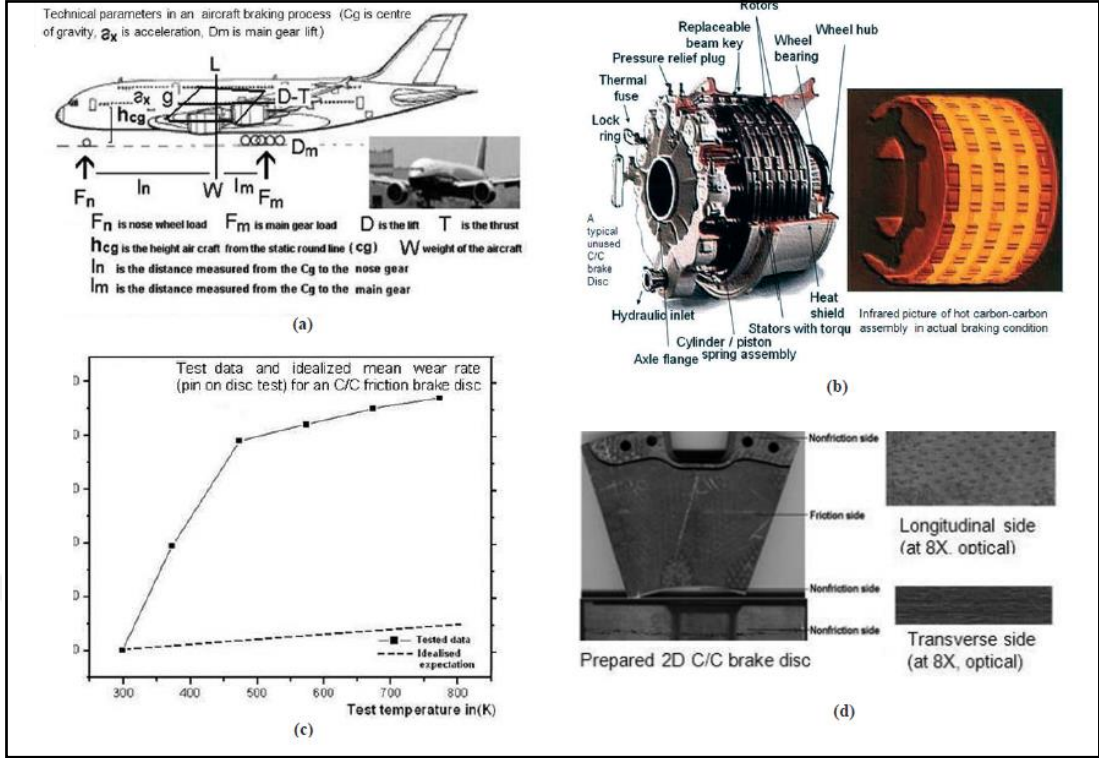
kullanılırlar. Uçaklarda ise frenleme sırasında yüksek sıcaklık dayanımına gereksinim olmayan hafif uçaklarda kullanılırlar. Büyük uçaklarda metalik balatalar tercih edilmezler. Çünkü metalik balataların gürültü ve vibrasyona eğilimli olması, disk yapısında deformasyona neden olur ki bu istenmeyen bir durumdur.

Sinterlenmiş sürtünme malzemesi metal bir matrinden (temel olarak Fe bazlı veya Cu bazlı), karbür ve seramik gibi metalik olmayan bileşenlerden ve katı yağlayıcılardan oluşur. Metalik bileşenler kuvvet verir ve metalik olmayan seramikler sürtünme katsayısı (COF) artışından ve daha iyi frenleme performansından sorumludur. Demir bazlı sinterlenmiş sürtünme malzemeleri, frenleme sırasındaki sıcaklığın 1100 °C'ye kadar çıkabileceği fren uygulamaları için en uygun olanıdır, bakır bazlı sinterlenmiş sürtünme malzemeleri ise sadece 600 °C'ye dayanır. Ayrıca, demir bazlı sinterlenmiş sürtünme malzemeleri, diğer ürünlere göre daha az maliyetlidir. Bu nedenle demir bazlı sürtünme malzemeleri, ticari savaş uçaklarında olduğu gibi ağır hizmet fren uygulamalarında kullanılır [8].

1.4.3. Karbon balata ve diskler

Ağır taşıt sektörlerinde, örneğin yarış arabaları, büyük otomotiv taşıyıcıları, yüksek hızlı tren, savaş uçakları ve askeri sistemler, geleneksel fren sistemlerinden daha fazla aşınma dayanımı sağlayan fren sistemleri gerektirir. Uyumlu fren sistemi, ağır araçlar için güvenlik ve ayrıca performans artışı anlamına gelir. Buna göre, bu frenleme sistemlerinde daha fazla aşınma dayanımı sağlayabilen ve çok daha yüksek sıcaklıklarda çalışabilen karbon karbon (C/C) kompozitler gibi ileri teknoloji ürünü malzemeler uygulanmaktadır.

Çok sayıda kaza, bir yokuşlu yolda inerken frenleri aşırı ısınan ve ardından durdurulamayan kamyonlardan kaynaklanmaktadır. Örneğin, saatteki hızı 60 km olan 20 tonluk bir kamyon yüzde 10'luk bir eğimden inerken durma mesafesi, döküm frenlerle yaklaşık 80 m'dir. Hesaplamalar, durma mesafesinin karbon frenlerle yalnızca 25 metreye kadar azaltılabileceğini göstermektedir. Karbon fren kullanımı, uçakların pist üzerinde daha kısa mesafede durabilmesine imkan sağlamaktadır. Böylelikle karbon fren sistemlerinin pistin ömrünü uzatmada önemli bir etkisi vardır [9].



Şekil 1.14. Uçak frenleme sürecinin özellikleri (a), çok diskli C/C fren diski (b), C/C fren diskinin sıcaklığa bağlı aşınma oranı değişimi (c) ve sürtünme yüzeyi görüntüsü (d) [9].

Taşıtların hızı, büyüklüğü ve ağırlığında gelişen teknoloji sayesinde büyük bir artış meydana gelmiştir. Fakat kullanılan fren sistemlerinin boyutlarında ise tam tersine küçülmeye gidilmiştir. Bu gelişmeler neticesinde frenleme esnasında birim alana düşen enerji miktarı artmıştır. Dolayısıyla gerçekleşen bu enerji artışına göre oluşan yüksek sıcaklık şartlarında çalışan balata malzemelerinin, ısı transferini sağlayabilmesi için yüzey alanında küçültmeye gidilmiştir [10].

1.5. C/C Kompozit Fren Diskleri

C/C kombinasyonları daha çok iniş hızlarının 250 km/h'nin üzerinde olduğu uçak frenlerinde, iniş ağırlıklarının 100.000 kg'dan fazla olduğu durumlarda kullanılır. Bu standartlarda fren enerjisi 10-50 milyon Jul değerindedir ve iniş takımlarının bu enerjiyi absorbe edebilecek nitelikte olması gerekmektedir. Boeing 777-300ER uçağının azami iniş ağırlığı yaklaşık olarak 251.500 kg'dır. Uçak bu ağırlıktan daha fazla bir oranla iniş yapmak zorunda kaldığında, bu iniş fazla ağırlıkta iniş (overweight landing) olur. Fazla ağırlıkta iniş acil durumlar dışında uygulanmaz. Örneğin, Airbus

319, Boeing 767 ile Boeing 777 gibi ticari uçaklarda ve F-15 ile F-22 gibi askeri uçaklarda C/C frenleri kullanıyor.

1.5.1. Karbon fren disk malzemelerinin özellikleri

Üretilen karbon karbon (C/C) kompozitlerin neredeyse %63'ü dünyanın her yerindeki uçak frenlerinde kullanılır. Fren diskleri, uçağı durduran sürtünme momentini sağlamak için gereklidir. Üretilen ısı çok yüksektir ve yapısal bir bileşen görevi görür, rotor ve sabit disk arasındaki yüzey ve sürtünme sıcaklıkları sırasıyla 500 °C, 2000 °C'dir. Yukarıdakilerin hepsine bağlı olarak, karbon karbon (C/C) kompozit, yüksek ısı iletkenliği ve çok düşük ısıl genleşme katsayısı nedeniyle seçilebilecek en ideal malzemedir. Karbon karbon (C/C) kompozit frenlerin ısı kapasitesi çelikten 2,5 kat fazladır. Karbon karbon (C/C) kompozit frenler çelikten 300 kg daha hafiftir. Fren sistemlerinde kullanılan karbon karbon (C/C) kompozitler şu şekildedir; karbon kumaş laminatlar, yarı rastgele doğranmış karbon fiberler ve çapraz takviyeli lamine karbon fiber keçelerdir [11].



Şekil 1.15. Airbus A330 sol iniş takımında karbon fren sistemlerinin görünümü.

Kompozitlere bir yük uygulandığında, ilk önce matris fazına uygulanacak, daha sonra kompozitin toplam mukavemetinde bir artışa neden olacak şekilde takviye fazına aktarılacak ve dağıtılacaktır. Karbon-Karbon (C/C) kompozitlerinin fiziksel özellikleri, takviye edici liflerin hakimiyetindedir [12].



Şekil 1.16. Boeing 787 Dream Liner Fren Sistemi [12].

Sürtünme malzemesi olarak kullanılan karbon karbon (C/C) uçak frenlerinin teknik özelliklerini incelediğimizde gerçekten de bazı daha büyük uçaklar için, tam yüklü bir iniş ve kalkış, karbon karbon fren kullanılmadan mümkün olmayabilir. Karbon karbon kompozitlerinin yüksek sıcaklık iletkenliği ve metallerde görülen yorgunluğun olmaması bazı avantajlarıdır. Uçaklarda ağırlığın önemi göz önüne alındığında, metalik fren sistemlerine göre oldukça hafiftirler. Düşük performanslı uçak frenlerinde kullanılan çelik ve bakır tabanlardan dört kat daha hafif olması en belirgin örneklerden gösterilebilir. Ayrıca yüksek ısıl kapasiteler (çeliğe oranla iki kat), sabit sürtünme katsayısı, çok çeşitli kayma koşullarında düşük aşınma oranı ve özellikle de 1000 °C sıcaklığın üzerinde dayanım göstermesi en önemli özellikleri arasındadır.

Karbon-Karbon (C/C) kompozitler, 3000 °C'nin üzerindeki yüksek sıcaklıklarda tokluk ve yüksek mukavemet gibi mekanik özellik gösterir. Grafit 2,2 g/m³'lük tahmini yoğunluğa sahiptir. Karbon malzemeler yaklaşık 50 GPa'ya kadar çok yüksek özgül güce sahiptir ve bu yüksek gücü 1500° C'den yüksek sıcaklıklarda tutar. Karbon karbon (C/C) kompozitler düşük ısıl genleşme katsayısı, düşük aşınma katsayısı ve aşınma oranları nedeniyle deformasyon olmadan ısıyı emebilmektedir. Karbonun olağanüstü mekanik ve termal özellikleri, karbon malzemelerindeki atomlar arasındaki güçlü kovalent bağdan kaynaklanmaktadır. Karbonun bu özelliği, yapısı karbondan oluşan fren sistemlerini olumlu yönde etkilemektedir [11].

Avantajları incelediğimizde oldukça fazla yararlı özelliği nedeni ile tercih edildiği yukarıda belirtilmiştir. Dezavantajlarına bakıldığında yüksek ilk yatırım maliyeti ve

sınırlı fren balatası seçimi vardır. Büyük ticari uçaklarda ilk yatırım maliyetinin yüksek olması bir problem teşkil etmemekle birlikte çoğu büyük uçaklarda kullanılmaktadır.

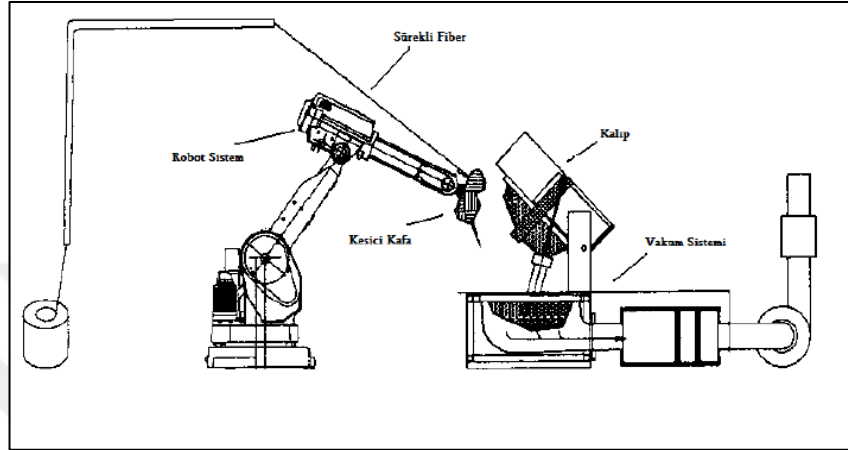
1.5.2. Karbon fren diski üretim yöntemi

Temel olarak kullanılan ana malzeme karbondur. Üretim prosesinde adım adım ilerlerken temel mantık her adımda yapı içerisindeki karbon oranını ve yoğunluğu arttırarak diğer maddelerin yapıdan uzaklaşmasını sağlamaktır. İlk olarak yapıda kullanılacak olan karbonun şekli ve boyutu belirlenir ve bu oranlara göre kalıbın içerisinde karbon malzemeler doldurulur. Bu işlem yapılırken en yaygın ve ekonomik olan yöntem, geleneksel elle yatırma yöntemidir. Maliyetin önemsiz olduğu durumlarda bu işlem 3D karbon fiber dokuma (yüksek maliyetlidir) cihazları ile yapılır. Şekil verilen karbon malzemelere reçine emdirilerek ara ürün ortaya çıkarılır. Ardından 1200 °C sıcaklığın üzerinde karbonizasyon işlemi uygulanarak, C haricindeki maddeler yapıdan uzaklaştırılır ve ara üründeki C oranı arttırılmış olur. Karbonizasyon işlemi ile karbonlar grafit forma dönüştürülür. C oranı yüksek fakat yoğunluğu düşük olan gözenekli ara ürüne CVD yöntemi uygulanır. Proseste sona doğru yaklaşıldıkça gözeneklilik azalır ve yapının neredeyse tamamına yakını karbon formuna dönüşmüş olur. CVD yöntemi sonunda yoğunluk yaklaşık olarak 1,80 g/cm³ civarındadır.

1.5.2.1. Ara ürün işlemi

Ara ürün işleminde fiberler geleneksel elle yatırma yöntemi ile kalıba yerleştirilebilir. Eğer ürünün kullanılacağı yerde ürüne olan ihtiyaç, maliyetten daha önemli ise şekil 1.17'de şematik olarak gösterilen sistem kullanılır. 4P adı verilen sistem sayesinde fiber boyutları robot tarafından istenilen ölçülerde kesilerek kalıba yerleştirilir. Böylelikle fiber boyut dağılımı kontrol altında tutulmakta ve homojen bir yapı meydana getirilmiş olmaktadır. Robot tarafından istenilen ölçülerde kesilerek vakumlu kalıba yerleştirilen fiber iplikleri kalıbın şeklini almaktadır. Ortalama 90 katman olarak uygulanan işlemde katmanlar arasına reçine emdirilir. Böylece fiber ipliklerinin yapıda tutunması sağlanır. Ardında kalıp kapatılarak yüksek basınç altında şekillendirme ve sıkılaştırma sağlanır.

Programmable Powder Preforming Process (4P) yöntemi olarak anılan bu aşama el yatırması yöntemine benzeyen ancak daha gelişmiş ve robot sistemleri ilave edilmiş bir prosestir. Bilgisayar ortamında girilen komutlar yardımıyla fiberler belirli boyutlarda kesilir ve bu esnada fiber parçacıkları istenilen şekilde disk kalıbına püskürtülür. Bu aşamada belirli aralıklarda reçine ilavesi ile fiberler bağlanır [13].



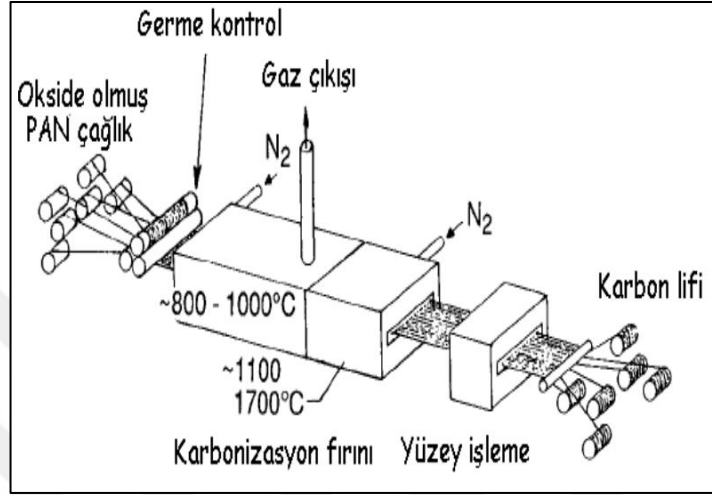
Şekil 1.17. Fiber ipliğini istenilen boyda kesen robot ve vakumlu kalıbın birbiri ile senkronize çalıştığı 4P prosesi [13].

Daha önceden yapılmış olan uygulamalardan birisini incelediğimizde benzer adımlar izlendiği görülmektedir; Sıkıştırma tipi kalıplama yoluyla ve reçine ile yapılan her bir karbon kumaş ön hazırlık tipinden yapılmıştır. A tipi disklerde fenolik reçine, öğütülmüş karbon fiber, C/C uçak frenlerinin ısıl ve tribolojik özellikleri ile karıştırılmıştır. B tipi disklerde ise saf reçine kullanılmıştır. Diskler, atıl atmosferde (yüksek saflıkta azot) 1000 °C sıcaklığa kadar karbonize edildi ve sonra petrol zifti kullanılarak yoğunlaştırıldı. Yoğunlaştırma işlemi üç aşama, ziftle emprenye etme, yaklaşık 1000 barlık basınç altında 700 °C sıcaklığa kadar yüksek basınçlı karbonizasyon ve 2000 °C'nin üzerinde grafitleme içeriyordu. Yoğunlaşma döngüleri, gerekli 1,8 g/cm³ yoğunluğa ulaşıncaya kadar tekrar edildi [14].

1.5.2.2. Karbonizasyon işlemi

Karbonizasyon işlemi, yapıda karbon dışında bulunan maddelerin uzaklaştırılması ve yapıdaki karbon oranının mümkün olabilen en yüksek düzeye çıkarılması işlemidir. Fiberlerin yapılarında ergime veya yanma olmadan yüksek sıcaklıklarda (1000 °C üzeri) yapıdaki karbon dışındaki maddelerin yanması sağlanır. Böylece karbon dışındaki maddelerin sıcaklık dayanımı düşük olduğundan yanarak yapıdan

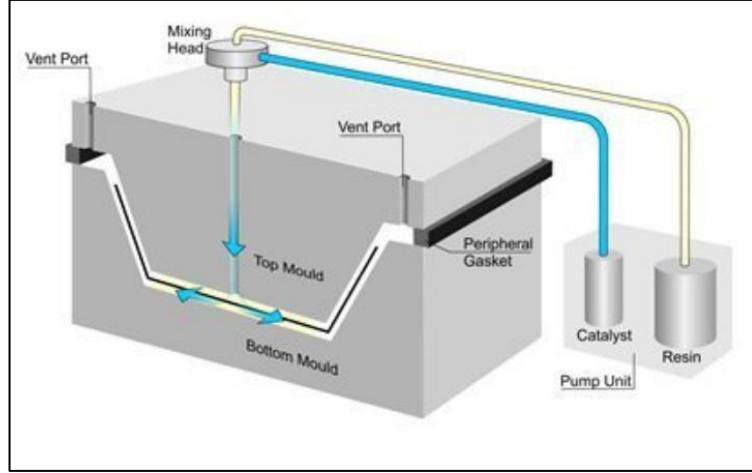
uzaklaştırılırlar. Karbonizasyon işlemi sonrasında yapıdaki karbon oranı %99 seviyelerine yaklaşmaktadır. Karbonizasyon işlemi sırasında yapıdaki maddelerin çoğu giderildiğinden dolayı, yapı gözenekli ve düşük yoğunluğa sahip olmaktadır. Bu gözenekli bölgeler RTM ve CVD yöntemleri ile doldurularak yoğunlaştırma işlemi uygulanmaktadır.



Şekil 1.18. Şematik olarak karbonizasyon işlemi [15].

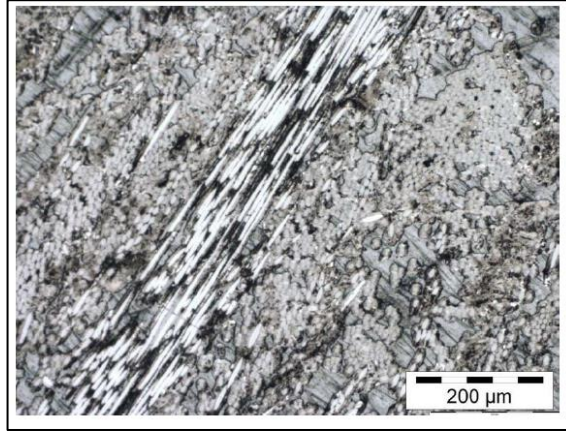
1.5.2.3. RTM ve CVD yöntemleri ile yoğunlaştırma işlemi

RTM ve CVD yöntemleri karbonizasyon işlemi sonrasında, yapıdaki yoğunluğu arttırmak için en çok tercih edilen yöntemlerdir. Sıvı reçinenin, karbonizasyon sonrası yüksek basınç altında kalıp içerisindeki ara ürüne emdirilmesi işlemi RTM (Resin Transfer Molding) olarak adlandırılır. RTM yönteminin şematik görüntüsü şekil 1.19'da verilmiştir. CVD (Chemical Vapour Deposition) veya CVI olarak adlandırılan yöntemle buhar fazından ve basıncı istenilen değerlere ayarlanmış bir ortamda katı kaplama malzemesi üretimi temel alınır. Her iki yöntem ile yapının yoğunluğu artırılarak, yüksek termal ve mekanik özellikler kazandırılır.



Şekil 1.19. RTM yöntemi şematik gösterimi [17].

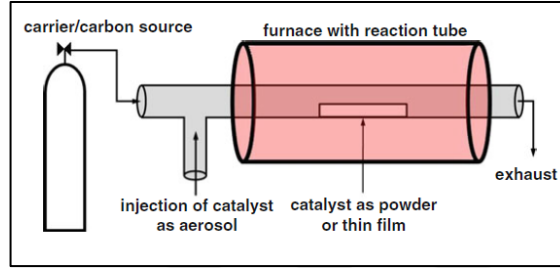
Fren malzemelerinin üretiminde C fiberler istenilen boyutlarda kalıp içerisine kesilerek yerleştirilir ve reçine emdirilir. Ara ürün oluşuktan sonra karbonizasyon işlemi uygulanır ve yapıdan C dışındaki maddeler uzaklaştırılır. Ardından sırası ile önce RTM ve CVD yöntemleri uygulanır. RTM işlemi çok kısa bir süre içinde tamamlanarak, CVD işlemine geçilir. RTM işlemi, CVD işleminde yapılabilecek olan yoğunlaştırma (densifikasyon) işlemlerinin sayısını azaltmaktadır [13,16].



Şekil 1.20. RTM işlemi sonrası karbon disk mikro yapısı [18].

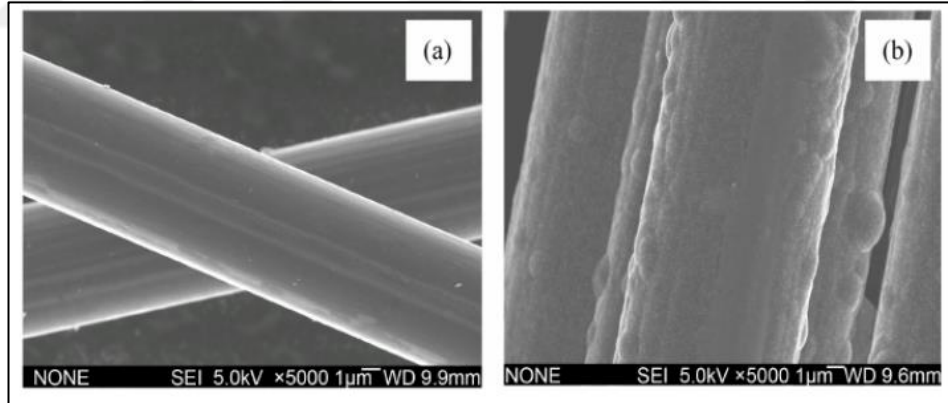
CVD yöntemi hidrokarbonların (asetilen, etilen, propilen, metan, benzen, toluen vb.) veya fırın sisteminde metal katalizörlerin yüzeyi üzerinde atıl gaz akışında seyreltilmiş diğer karbon besleme stoğunun (polimerler, karbon monoksit) pirolizi içerir. Katalizör malzemesi katı, sıvı veya gaz olabilir ve fırının içine yerleştirilebilir veya sürekli olarak dışarıdan beslenebilir. Ayrıştırılmış karbon türleri, metal nanoparçacıklarda çözülür, ancak metalik partiküllerde sınırlı bir karbon çözünürlüğü nedeniyle, süper

doğunluğa ulaşılır ve bunu bir karbon silindirene uzanan bir fulleren kubbe şeklinde karbon çökeltmesi izler. Sentez için tipik sıcaklık aralığı atmosferik basınçta 500–200 °C'dir. Termal CVD yönteminde kullanılan tipik sistem, şekil 1.21'de gösterilmektedir. CVD için üç ana parametre atmosfer, karbon kaynağı, katalizör ve büyüme sıcaklığıdır [19].



Şekil 1.21. Tüp fırınlı termal CVD sisteminin şematik tasarımı [19].

CVD işlemi, RTM işlemi sonrasında yapıda kalan boşlukların doldurulması ve yoğunluğun artırılması için yapılır. Şekil 1.22'de CVD yüzey işleminden önce ve sonra karbon fiberlerin mikro yapı görüntüleri verilmiştir.

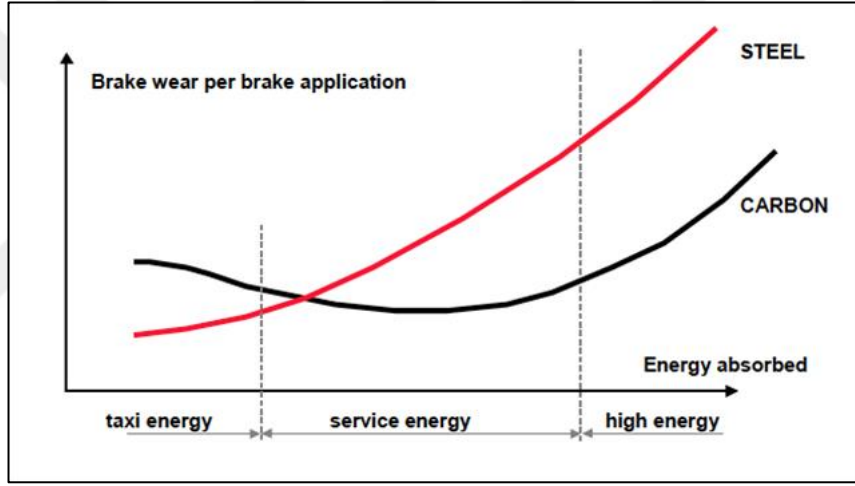


Şekil 1.22. CVD yüzey işleminden önce (a) ve sonra (b) C fiberlerin mikro yapıları [20].

CVD işleminin ardından C/C fren disklerinin termomekanik özelliklerinde artış gözlenir. Malzemenin termal ısı dayanımı ve ısı iletkenliği artar. Malzemenin yoğunluğu ve yüzey sertliğinin artması da ayrıca sonraki işlemler için mekanik dayanım sağlamaktadır.

1.5.3. Karbon fren disklerinin aşınma dayanımı

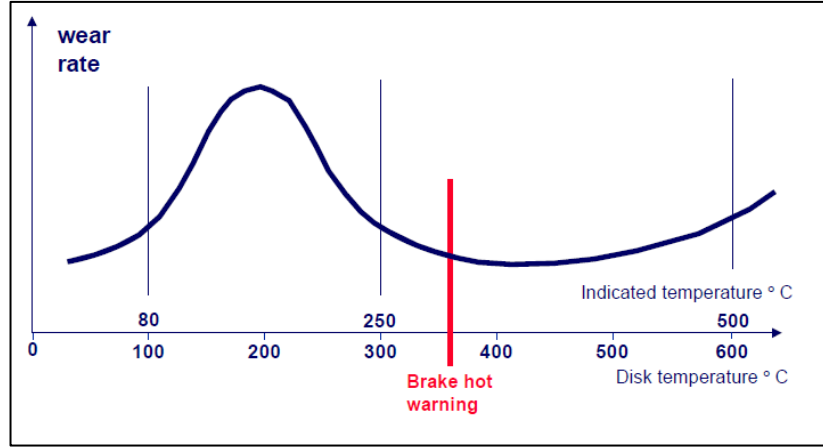
Karbon fren sistemlerinde disk sıcaklığı ile aşınma oranı arasında bir bağıntı vardır. Karbon fren diskleri en yüksek aşınma dayanımını yüksek enerjili bölgede gösterir. Bu nedenle, karbon fren ömrünü artıracak operasyonel tavsiyeler, karbon sıcaklığını yüksek aşınma bölgelerinin dışında tutmaya odaklanmaktadır. Karbon fren ömrünü arttırmak için, frenlerin ya sıcak ya da soğuk kullanılması gerekir, ancak ara bölgedeki sıcaklıklarda çalıştırılması aşınma dayanımı düşürmektedir. Enerji teorik olarak karbon aşınması için birincil parametre değildir, oysa çelik frenler için en önemli bir parametredir. Bununla birlikte, frene daha fazla enerji uygulanması, fren sıcaklığındaki artış nedeniyle aşınmayı doğrudan etkilemektedir. Şekil 1.23'te karbon ve çelik fren disklerinin, enerji değişimlerine göre fren aşınma oranları gösterilmiştir.



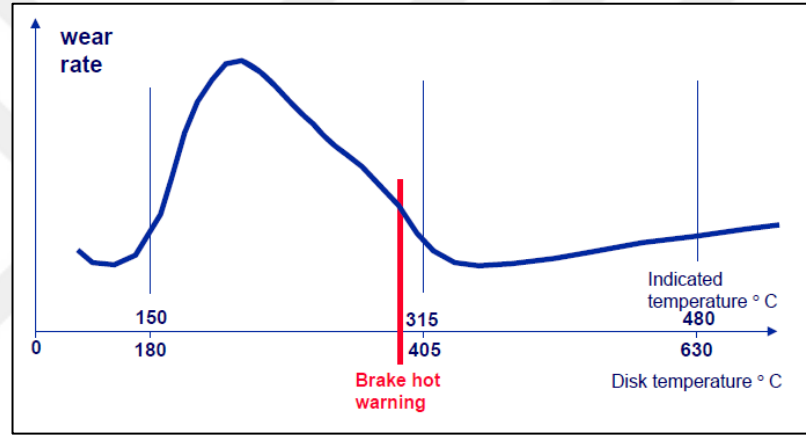
Şekil 1.23. Karbon ve çelik fren disklerinin farklı enerji bölgelerindeki fren aşınma oranları [21].

Karbon fren diskleri ile çelik fren diskleri karşılaştırıldıklarında; uçak taksi pozisyonunda iken çelik fren disklerinin daha verimli olduğu, yüksek enerjinin ortaya çıktığı iniş veya uçağın kalkıştan vazgeçtiği RTO (rejected take off) şartlarında karbon fren disklerinin dayanımının daha iyi olduğu görülmektedir.

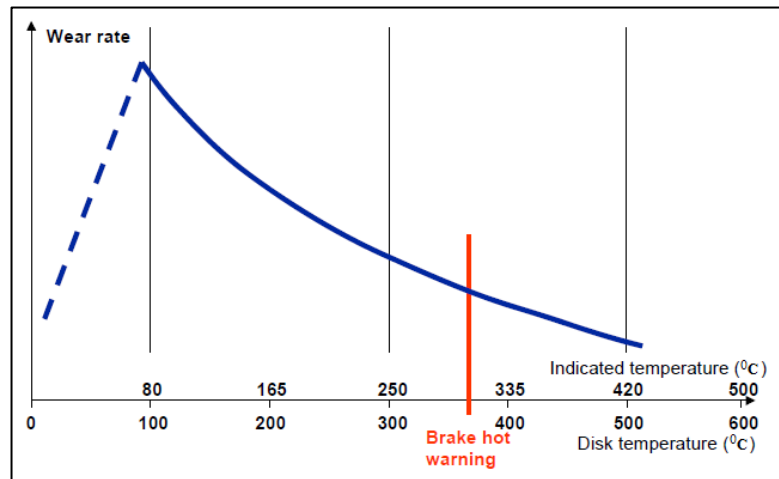
Tüm fren üreticileri, karbon aşınmasının fren sıcaklığından ağır bir şekilde etkilendiğini vurgulamaktadır. Aşağıdaki Şekil 1.24, Şekil 1.25 ve Şekil 1.26'da üç fren üreticisi (Messier-Bugatti, Honeywell-ALS ve BF Goodrich) tarafından sağlanan, disk sıcaklığına karşı karbon aşınma oranının tipik spektrumlarını göstermektedir. Bununla birlikte, disk sıcaklığı ile kokpitte belirtilen sıcaklık arasındaki ilişki genellikle doğrusal değildir ve aynı zamanda bir üreticiden diğerine değişir [21].



Şekil 1.24. MESSIER-BUGATTI'ya göre fren sıcaklığına karşı karbon aşınma oranı grafiği [21].



Şekil 1.25. HONEYWELL-ALS (A330/A340) standardına göre fren sıcaklığına karşı karbon aşınma oranı grafiği [21].



Şekil 1.26. BF GOODRICH'e göre fren sıcaklığına karşı karbon aşınma oranı grafiği (SUPERCARB-A321/A330/A340) [21].

Yukarıda üç farklı üretici tarafından üretilen karbon fren disklerinin, sıcaklığa bağlı olarak aşınma oranlarını gösteren grafikler hazırlanmıştır. Üçü tarafından varılan sonuç göstermektedir ki karbon fren disklerinde sıcaklık arttıkça, aşınma oranı düşmektedir. Sıcaklığın ve enerjinin çok yüksek olduğu şartlarda karbon fren sistemlerinin kullanımı daha avantajlıdır.

1.5.3.1. Disklerde nem ve oksidasyon etkisi

Su ve kimyasal sıvıların karbon fren balatalarına temas etmesi yapısal hasarlara neden olur. Uçak frenleme yaptığı sırada ortaya çıkan ısı nedeni ile su yapıdan uzaklaştırılsa da uzun süreli su teması karbon fren disk yapısında bozulmaya neden olabilmektedir. Kış mevsiminde uçakları soğuk havadan korumak için uçak kaportasına uygulanan deicing (buz çözücü) işlemi nedeni ile uygulanan kimyasal sıvının fren disklerine teması aynı şekilde yapısal bozulmalara neden olmaktadır. Bu nedenlerden dolayı karbon fren disklerinin kimyasal sıvılar ile temasına ve uzun süreli nem etkileşimine dikkat edilmektedir.

Oksidasyon normal iniş sırasındaki frenleme şartlarında kendiliğinden oluşmaktadır. İniş sırasında kinetik enerjinin, ısı enerjisine dönüşmesi nedeni ortaya çıkan sıcaklık, karbon fren disklerinin sıcaklık dayanımı yüksek olması nedeni ile sorun teşkil etmemektedir. Fakat 1000 °C'nin üzerine çıktığı acil iniş ve RTO şartlarında disk yüzeyinde oluşan oksidasyon, sürtünme oranını düşürdüğünden dolayı ciddi problemlere neden olabilmektedir. Oksidasyon nedeni ile yeterli sürtünme sağlanamadığında frenleme oranında düşüş meydana gelir ki bu da uçuş güvenliğini tehlikeye sokmaktadır.

1.5.3.2. Disklerin maruz kaldığı yük ve zorlamalar

Uçağın inişi sırasında yapılan frenleme neticesinde iniş takımlarında ciddi titreşim ve vibrasyon etkisi oluşmaktadır. Frenleme esnasında meydana gelen titreşimler, yapı üzerinde vibrasyona neden olmaktadır. Vibrasyon etkisi ile rotor ve statorların birbirlerine sürtmesi sonucu disk yapısında malzeme kayıpları meydana gelmektedir. Ayrıca yüksek vibrasyon etkisi, uçak malzemelerinde yorulma hasarlarına sebebiyet verebilmektedir. Bu problemin çözümü için uçak fren disk ve balata malzemelerinin yüzey pürüzlülük oranları azaltılmaya çalışılmaktadır.

1.5.4. Karbon disklerin kullanım ömrünü etkileyen parametreler

Her malzemenin bir ömrü olduğu gibi karbon fren disk ve balatalarının da bir ömrü vardır. Fakat bazı uygulama ve koşullar malzeme ömrünü etkileyen parametrelerdir. Yukarıdaki konularda bazı parametreler detaylı olarak açıklandığından dolayı, genel özellikleri ile açıklanacaktır. Fren malzemelerinin kullanım ömrünü belirleyen parametreler; disk sıcaklığı, absorbe edilen enerji, frenleme sayısı, çevresel şartlar ve bakım onarım programıdır.

Disk sıcaklığının aşınmaya olan etkisi, üreticiden üreticiye değişiklik gösterse de ortak olan yönleri çok fazladır. Disk sıcaklığının düşük olduğu durumlarda aşınma oranı genel olarak yüksektir. Uçak taksi pozisyonuna geçtiğinde artış gösteren disk sıcaklığı ile birlikte aşınma oranı ciddi derecede artış göstermektedir. Fakat yüksek sıcaklıklara doğru gidildikçe, örneğin iniş sırasında ortalama 1000 °C'lere kadar sıcaklık artış gösterebilir. Bu durumda disk yüzeyinde oluşan oksit tabakası malzemenin aşınmasını önler. Bu nedenle yüksek sıcaklıklarda karbon fren balata ve disklerin kullanımı tercih edilmektedir.

Frenleme sayısı aşınma oranını arttırmaktadır. Özellikle uçuş trafiğinin yoğun olduğu havalimanlarında taksi pozisyonlarında bekleyen uçaklar, sık sık frenleme yapma gereği duyarlar. Bu sık frenleme ihtiyacı fren disklerinin ömrünü yaklaşık olarak %20-30 düşürmektedir.

Çevresel şartların frenleme üzerinde etkisi nem, yağ ve kimyasallar olarak etki etmektedir. Yapı üzerinde uzun süreli bu etkiler, malzeme yapısını bozmaktadır.

Bakım onarım programlarının sürekliliği ve takibi fren sistemleri açısından kritik öneme sahiptir. Zamanında bakım onarım sayesinde, fren balata ve disklerinde meydana gelmiş olan hasarların daha büyük hasarlara sebebiyet vermesi engellenmiş olur. Fren sistemlerine bulaşmış olan hidrolik yağları, kimyasal çözücüler ve kirler aşınma dayanımını düşürürler. Malzemelerin temizlenmesi ve hasar analizlerinin yapılması kullanım ömrü ve verimliliği uzatan etkiler yapmaktadır.



Şekil 1.27. Kullanılmamış yeni karbon frenleri (sol), aşınmış karbon frenleri (sağ).



2. MALZEME VE YÖNTEM

Deney numuneleri iki farklı grupta üretildi. Birinci grupta, farklı dokuma kalınlığına sahip örgü numunelerden oluşan prepreg karbon fiber malzemeler kullanıldı. İkinci grupta ise farklı boyutlarda kesilen, çeşitli karbon fiberlerden oluşan karma malzemeler kullanıldı. Kullanılan bu malzemelerin görüntüleri şekil 2.1’de gösterildi.



Şekil 2.1. Dolapta -18 °C’de muhafaza edilen prepreg malzemeler (sol) ve karma fiber numunelerinde kullanılan çeşitli fiberler (sağ).

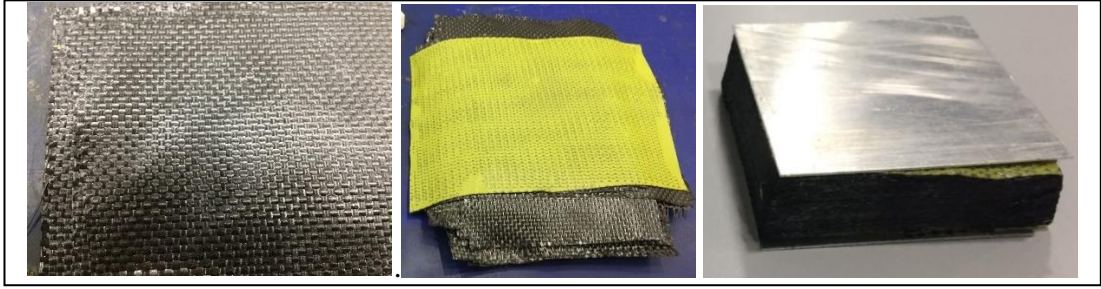
Sıcaklık ve basınç kullanılarak kür edilen numuneler, ardından CNC işleme tezgâhında hassas kesim yapılarak test şartlarına hazırlandı. Her bir malzemedен üç adet hazırlanan test numuneleri, pin on disk aşınma testine tabi tutuldu. Farklı fren mesafelerinde (75 m ve 300 m) aşınma testine tabi tutulan numunelerin aşınma oranları çok düşük olduğundan dolayı ağırlık kaybı ölçülemedi. Fakat pin on disk aşınma test cihazı otomatik olarak ortalama aşınma katsayılarını belirledi ve aşınma grafiğinin çizimi için gerekli verileri sağladı. Aşınma oranlarının hesaplanabilmesi için aşınma izi genişliğine ihtiyaç duyuldu ve nedenle SEM analizi yapıldı. SEM analizi ile ölçülen ortalama aşınma izi sayesinde aşınma oranları hesaplandı. Aşınma oranlarına bağlı olarak numuneler hakkında değerlendirmelerde bulunuldu.

2.1. Deney Numunelerinin Hazırlanması

Deney numuneleri için farklı 2 grupta karbon malzemeler kullanıldığından dolayı birinci grupta örgü prepreg karbon fiber malzemeleri, ikinci grupta ise farklı boyutlarda kesilen, çeşitli karbon fiberlerden oluşan karma malzemeler kullanıldı.

2.1.1. Örgü prepreg karbon fiber numuneler

Birinci grupta önceden epoksi reçine emdirilmiş olan örgü fiberlerden oluşan prepreg (pre-empregne) malzemeler kullanıldı. Bu numuneler $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de soğuk havada dolabından alındı. Dolaptan alınan kalın dokuma (4 cm^2 'de 25 sicim) ve ince dokuma (4 cm^2 'de 100 sicim) prepregler belirlenen ölçülerde kesilerek 100 kat olacak şekilde yapıştırıldı ve 2 adet plaka şekli elde edildi. Şekil 2.2'de prepreg malzemenin kat kat yapıştırılması gösterildi.



Şekil 2.2. Kat kat yapıştırıldıktan sonra etrafı kesilen prepreg malzemeler.

Kalın dokuma ve ince dokuma örgü prepreglerden oluşan plakalar vakum hatta 7 bar altında vakuma alındı. Vakum altında kısa bir süre bekleyen (24 saati aşan bekleme sürelerinde kür olmaya başlamaktadır) plakalar otoklav sisteminde basınç altında ve sıcaklıkta bir gaz altında (basınçlı gaz yalnızca torba kalıbı üzerine uygulanmaktadır) sertleşme işlemine tabi tutuldu. Kür olma süreci tamamlanan örgü numuneler şekil 2.3'de gösterildiği gibi 2 plaka olarak elde edildi.



Şekil 2.3. Otoklav sisteminden çıkarılan numunelerin vakum torbasındaki görünümü (sol) ve vakumdan çıkarılan kürlenmiş prepreg numuneler.

2.1.2. Karma fiber numuneler

İkinci kategoride karma fiberlerden oluşan epoksi matrisli numuneler üretildi. Matris malzemesi olarak 9390 epoksi reçine kullanılırken, takviye malzemesi olarak 8 farklı çeşitte karma fiberler kullanıldı. Kullanılan fiber çeşitleri şekil 2.4’te gösterildi.



Şekil 2.4. Takviye malzemesi olarak kullanılan çeşitli karbon fiberler.

Üç farklı numune için üç farklı boyut aralığında fiberler kesildi. Kesilen fiber boyut dağılımı A numunesi için 1-10 mm, B numunesi için 10-20 mm ve C numunesi için 20-30 mm arasında ölçüldü. 100 g fiber, 130 g reçine ile karıştırıldı (1/1,3 oran).



Şekil 2.5. Ortalama boyut dağılımı sırası ile 5, 15 ve 25 mm olarak kesilen karbon fiberler.

Karma fiberlerden oluşan üç farklı numune, plaka şeklinde hazırlanan kalıplara dökülerek vakum torbasına yerleştirildi ve 7 bar altında vakuma alındı. Vakum altında 2 saat bekleyen karma numuneler bu sırada kalıbın şeklini de tam olarak almış oldu.



Şekil 2.6. Farklı boyutta kesilen fiberler (sol) ile karıştırılan 9390 epoksi reçine (sağ).

Kür olma işlemi için elektrikli ısıtıcı kullanılmıştır. Vakum torbası içinde vakum altında olan numunelerin üzerine elektrikli ısıtıcı konulmuş ve 90 °C'de 4 saat boyunca ısıya maruz bırakılmıştır. Sıcaklık altında 4 saat kalan numuneler kür olmuştur.



Şekil 2.7. A, B ve C numunelerinin 90 °C sıcaklık ve 7 bar vakum altında 4 saat süren kür işlemi.

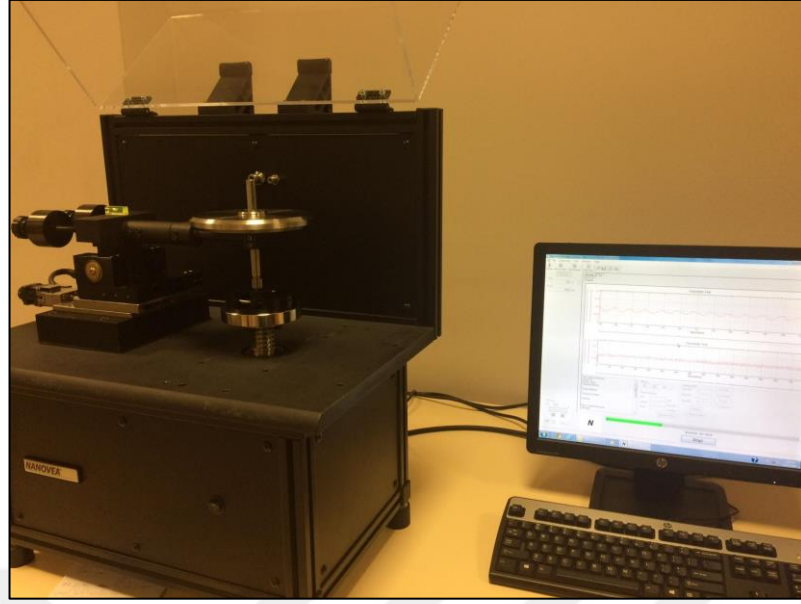
2.2. Pin On Disk Aşınma Deneyinin Yapılışı

Pin on disk aşınma testi cihazı için numunelerin uygun boyutlarda olması gerektiğinden dolayı, kesme işlemi CNC cihazında otomasyon yöntemi ile yapıldı. Kesme işlemi sırasında numunelerin herhangi bir kimyasal ile temasından kaçınıldı. Ayrıca numune hazırlama sürecinde, aşınma testlerinin uygulanacağı yüzeylere dikkat edildi. İki grupta ayrı ayrı incelenecek numuneler için toplamda 5 plaka üretildi. Her plakadan 3 adet olmak üzere toplam 15 adet 2x2x2 cm ölçülerinde numuneler hazırlandı.



Şekil 2.8. CNC cihazında otomasyon yöntemi ile hassas kesimleri yapılan 2x2x2 cm boyutlarındaki test numuneleri.

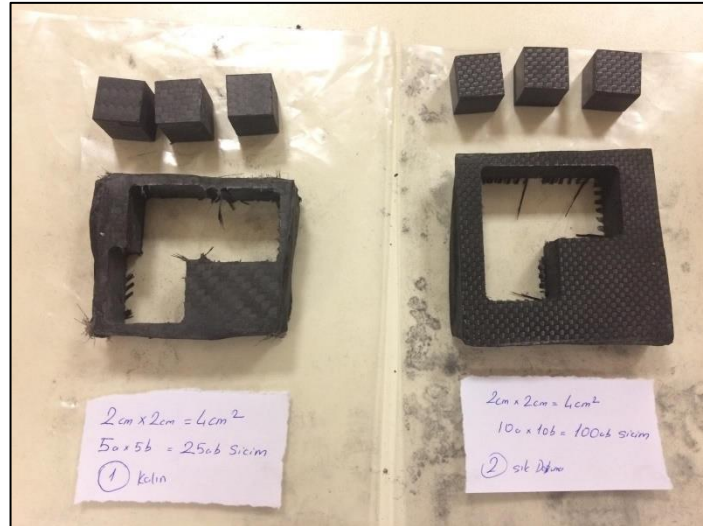
2x2x2 cm ölçülerinde hazırlanan numuneler pin on disk cihazında, seramik bilya (Al_2O_3) ile aşınma testlerine tabi tutuldu. Aşınma deneyi 20 N, 150 rpm şartlarında 75 m kayma mesafesinde yapıldı. Karma fiber numuneler için 300 m kayma mesafesinde tekrar aşınma deneyi yapıldı. Böylece aşınma katsayıları karşılaştırılmış oldu.



Şekil 2.9. Pin on disk aşınma test cihazı genel görüntüsü.

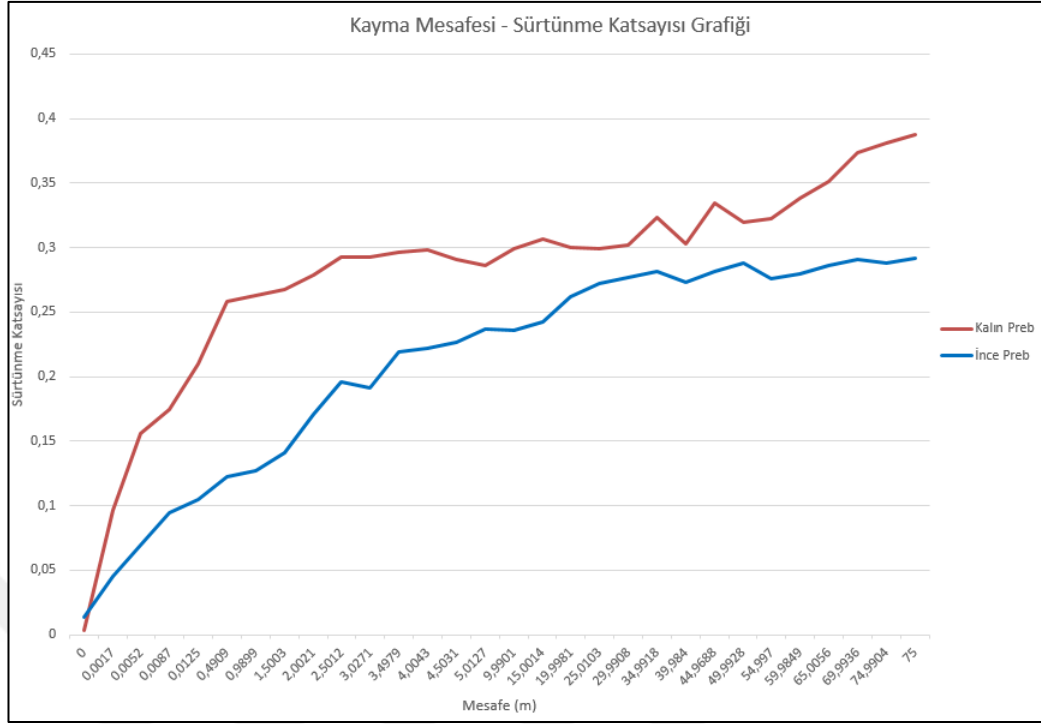
2.2.1. Örgü prepreg karbon fiber numunelerin analizi

CNC otomasyon tezgahında uygun ölçülerde kesilen test numuneleri, şekil 2.10'da gösterildiği gibi hazırlandı. Pin on disk aşınma test cihazına bağlanmadan önce numunelerin karışmaması için farklı renklerle markalama yapıldı.



Şekil 2.10. Aşınma testi için hazırlanan örgü numuneler.

Örgü numuneler için 75 m kayma mesafesinde pin on disk aşınma testi uygulandı. Elde edilen verilere göre şekil 2.11'deki grafikler çizildi. Grafığe bakıldığında birim alandaki sicim sayısı artışının olduğu ince dokumanın, kalın dokumaya oranla daha az aşındığı görüldü.



Şekil 2.11. Örgü numunelerin dokuma sıklığına göre sürtünme katsayısı değişimi.

Aşınma testleri sonrasında elde edilen verilere göre tablo 2.1 oluşturuldu. Bu tabloya göre sicim sayısının fazla olduğu ince dokumanın, sicim sayısı azalan kalın dokumaya oranla daha düşük aşınma oranı olduğu tespit edildi.

Tablo 2.1. Örgü numunelerin sicim sayıları ve 75 m kayma mesafesinde elde edilen sürtünme katsayıları.

	Sicim Sayısı (4 cm ² alanda)	Sürtünme Katsayısı
İnce Dokuma	100 Sicim	0,267
Kalın Dokuma	25 Sicim	0,31

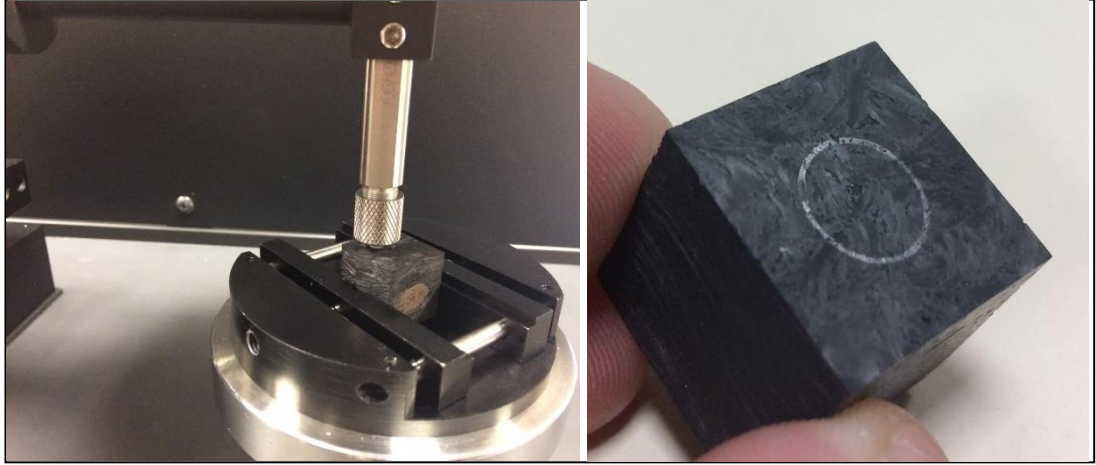
2.2.2. Karma fiber numunelerin analizi

Karma fiberlerden oluşan numune türlerinin her birinden üç adet test numunesi hazırlanarak, pin on disk cihazında aşınma testi uygulandı. Fiber boyut uzunluğu farklı olan A,B ve C numunelerine ait küplerin karışmaması için her üçü kendi arasında belirli renkler ile markalandı.



Şekil 2.12. Aşınma testi için karma fiberlerden oluşan A, B ve C grubu numuneleri

Karma numune türlerinden her gruba ait üç adet numune ile test yapıldı. Aşınma testleri sonucunda ortalama aşınma katsayıları tespit edilmiştir. Tablo 2.2’de her bir numune için elde aşınma katsayıları ve bu verilerden yola çıkılarak elde edilen ortalama aşınma katsayıları ile ortalama fiber boyut dağılımları belirtilmiştir.



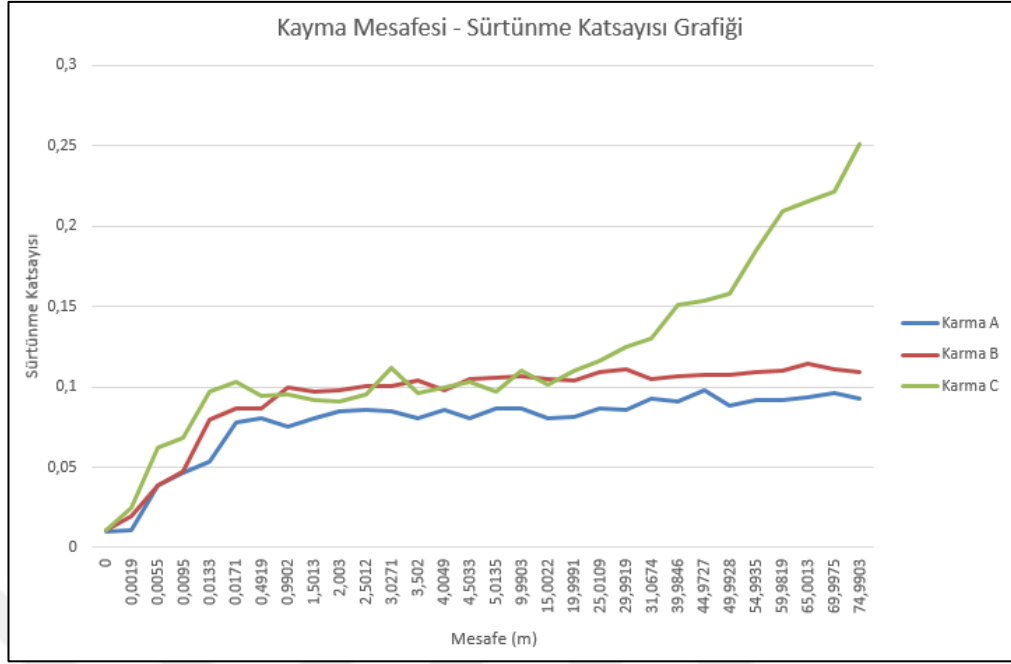
Şekil 2.13. Pin on disk aşınma testi sırasında seramik bilyanın (Al_2O_3), numune yüzeyine teması (sol) ve test sonrası numune yüzeyinde meydana gelen aşınma izi.

Aşınma testi sırasında her gruptan üçer adet numune teste tabi tutuldu. Üç gruba ait toplam dokuz numune üzerinde yapılan test sonuçlarının ortalaması alındı. Numunelerin bir yüzeyi 75 m kayma mesafesinde aşındırılırken, diğer yüzeyi 300 m kayma mesafelerinde aşındırıldı.

Tablo 2.2. Karma fiber numunelerinin ortalama sürtünme katsayıları ve boyut dağılımı

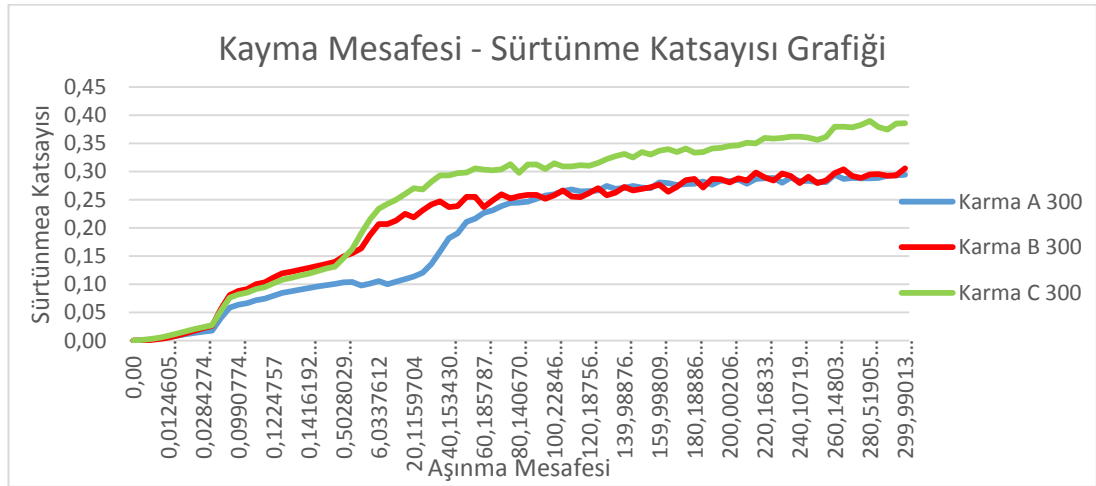
Numune Grup	Numune Kod	75 m Kayma mesafesi Ort. Sürtünme Katsayısı	300 m Kayma mesafesi Ort. Sürtünme Katsayısı	Ort. Fiber Boyutu (mm)
Karma A	K-A1	0,099	0,250	5
	K-A2			
	K-A3			
Karma B	K-B1	0,103	0,268	15
	K-B2			
	K-B3			
Karma C	K-C1	0,141	0,327	25
	K-C2			
	K-C3			

Karma fiber numunelere ilk olarak 75 m kayma mesafesinde aşınma testi uygulandı ve bu test neticesinde ortalama veriler elde edilerek şekil 2.14’de verilen grafik çizildi. Grafikte aşınma katsayılarının mesafe veya zamana dağılımı gösterildi. Fiber boyut dağılımı en kısa olan karma a numunesi en az aşınma gösterirken, fiber boyut dağılımının en uzun olduğu karma c numunesinin de en fazla aşınan numune olduğu sonucu çıkarıldı.



Şekil 2.14. 75 m kayma mesafesinde karma A,B ve C numunelerinin sürtünme katsayılarındaki değişimi gösteren grafik.

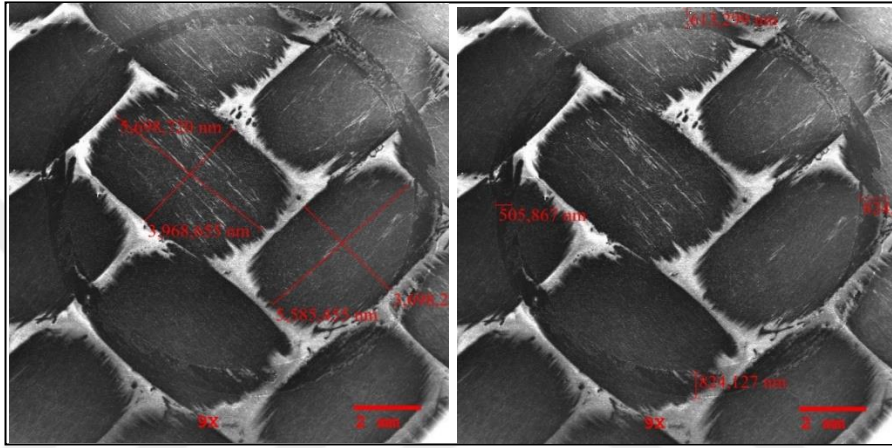
Aşınma deneyi 75 m (15 dk) kayma mesafesinde yapıldıktan sonra karma fiber katkılı A,B ve C numuneleri 300 m (60 dk) kayma mesafesinde tekrar aşınma deneyine tabi tutuldu. Yalnızca kayma mesafesi arttırılarak yapılan deneyde (diğer tüm şartlar aynı tutuldu) elde edilen veriler neticesinde şekil 2.15’te gösterilen grafik oluşturuldu.



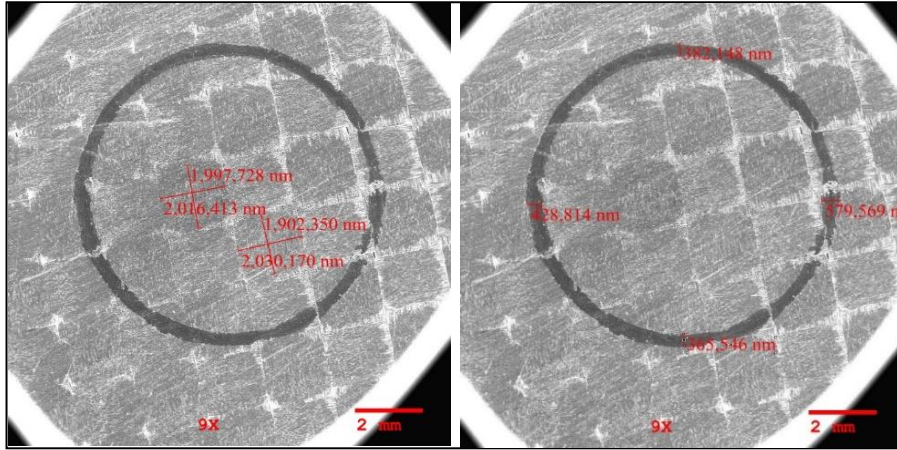
Şekil 2.15. 300 m kayma mesafesinde karma A,B ve C numunelerinin sürtünme katsayılarındaki değişimi gösteren grafik.

2.3. Deney Numunelerinin SEM Analizi

Aşınma testine tabii tutulan numunelerde ağırlık kaybı çok az olduğu için aşınan oran hassas terazi ile tespit edilemedi. Bu nedenle aşınma izi genişliğinin ölçüsünden yola çıkarak hem aşınma oranı hesabı hem de aşınan yüzeyin inceleyebilmek için SEM analizine ihtiyaç duyuldu. Örgü prepreg numunelerden kalın örgünün SEM analizi görüntüsü şekil 2.16'da verildi, ince örgünün SEM analizi görüntüsü de şekil 2.17'de verildi.



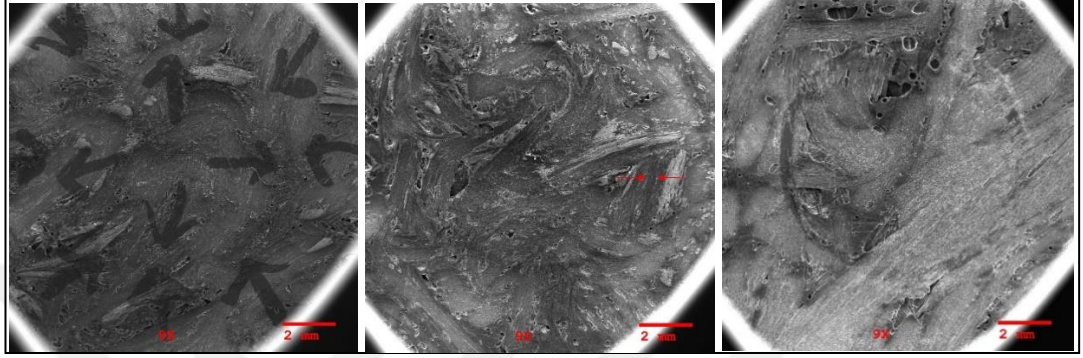
Şekil 2.16. Kalın örgü prepreg numune aşınma yüzeyinin 9x büyütme SEM görüntüsü.



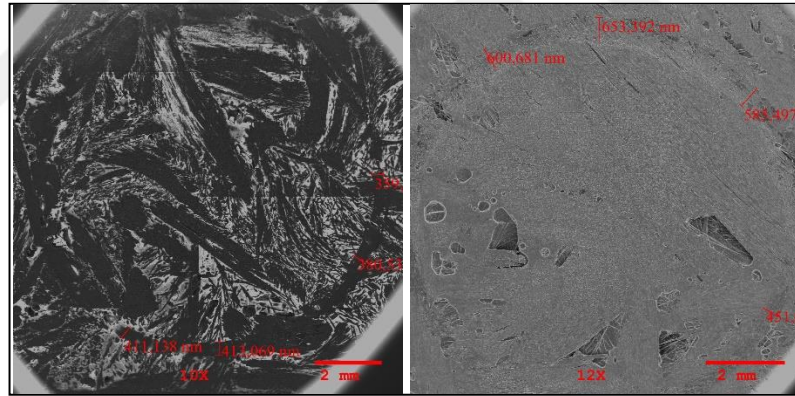
Şekil 2.17. İnce örgü prepreg numune aşınma yüzeyinin 9x büyütme SEM görüntüsü.

Karma fiber A,B ve C numunelerinin 75 m kayma mesafesinde aşınma izi görüntüleri şekil 2.18'de verildi. Resimleri incelediğimizde, fiber boyutu kısa olan numunenin yüzeyinde aşınma izi çok zor belli olurken, fiber boyutunun artmasıyla birlikte B numunesinde aşınma izi biraz daha belirgin, fiber boyutunun en uzun olduğu C

numunesinde ise bariz bir şekilde aşınma izine rastlanmaktadır. Karma fiber numunelerinin 300 m kayma mesafesindeki aşınma testi sonrası A numunesinden görüntü alınamamıştır. Karma B numunesinin ve altın-paladyum solüsyonu kullanılarak aşınma izi görüntüsü elde edilen C numunesinin SEM görüntüleri şekil 2.18’de gösterildi.



Şekil 2.18. Sırası ile karma a,b ve c numunelerinin 75 m kayma mesafesinde aşınma testi sonucu yüzeyinde oluşan aşınma izinin 9x büyütme altındaki SEM görüntüsü



Şekil 2.19. 300 m kayma mesafesinde aşınma deneyine girmiş olan sırası ile karma b ve c numunelerinin SEM yüzey analizi görüntüleri. Karma c numunesinin yüzeyi altın paladyum içerikli solüsyon kullanılarak hazırlanmıştır.

2.4. Aşınma Oranlarının Hesaplanması

Aşınma oranı hesaplarının yapımında aşağıdaki denklemler kullanıldı. SEM analizinde tespit edilen aşınma izi genişliği içi ölçülen değerlerin ortalaması alındı. Böylelikle aşınma testi sonrası ölçülen aşınma izi genişliği ve belli olan parametrelerden yola çıkarak aşınma oranları hesaplamaları denklem (2.1) ve (2.2)’deki gibi hesaplandı [22, 23]. Yapılan hesaplamaların sonuçları tablo 2.3’te gösterildi.

$$\text{Aşınma Hacmi (mm}^3\text{): } V = (\pi.R.D^3) / (6.r) \quad (2.1)$$

$$\text{Aşınma Oranı (mm}^3\text{/Nm) : } k = V / L.X \quad (2.2)$$

$$V: \text{Wear Volume (Aşınma Oranı, mm}^3\text{)} \quad (2.3)$$

$$R: \text{Friction Radius (Sürtünme Yarıçapı, mm)} \quad (2.4)$$

$$D: \text{Wear Trace Width (Aşınma İzi Genişliği, mm)} \quad (2.5)$$

$$r: \text{Ball Radius (Prop Yarıçapı, mm)} \quad (2.6)$$

$$L: \text{Load (Uygulanan Yük, N)} \quad (2.7)$$

$$X: \text{Sliding Distance (Kayma Mesafesi, m)} \quad (2.8)$$

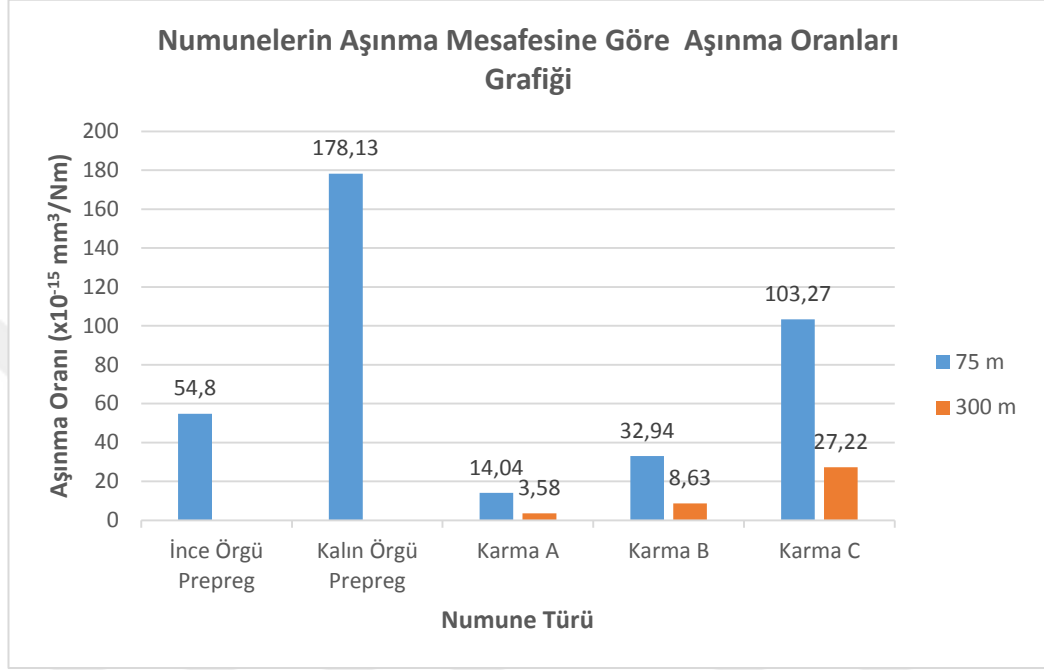
$$k: \text{Wear Rate (Aşınma Oranı, mm}^3\text{/Nm)} \quad (2.9)$$

Deney Şartları: $R = 5 \text{ mm}$, $r = 3 \text{ mm}$, $L = 20 \text{ N}$, $X_1 = 75 \text{ m}$, $X_2 = 300 \text{ m}$, $D = \text{SEM}$ analizi ile belirlenmiş olup tablo 2.3'te belirtildi.

Tablo 2.3. Aşınma izi genişliğinden aşınma hacmi ve aşınma oranlarının hesaplanarak kıyaslanması.

	75 m Mesafede			300 m Mesafede		
	Aşınma İzi Genişliği (nm)	Aşınma Hacmi (mm ³)	Aşınma Oranı (mm ³ /Nm)	Aşınma İzi Genişliği (nm)	Aşınma Hacmi (mm ³)	Aşınma Oranı (mm ³ /Nm)
İnce Örgü Prepreg	455	82,20.10 ⁻¹²	54,80.10 ⁻¹⁵	-	-	-
Kalın Örgü Prepreg	674	267,19.10 ⁻¹²	178,13.10 ⁻¹⁵	-	-	-
Karma A	289	21,06.10 ⁻¹²	14,04.10 ⁻¹⁵	291	21,50.10 ⁻¹²	3,58.10 ⁻¹⁵
Karma B	384	49,41.10 ⁻¹²	32,94.10 ⁻¹⁵	390	51,77.10 ⁻¹²	8,63.10 ⁻¹⁵
Karma C	562	154,90.10 ⁻¹²	103,27.10 ⁻¹⁵	572	163,32.10 ⁻¹²	27,22.10 ⁻¹⁵

SEM analizi ile belirlenen aşınma izi genişliklerinden yola çıkarak, denklem (2.1)'de yer alan aşınma hacmi (V) ve denklem (2.2)'de yer alan aşınma oranı (k) hesaplamaları yapıldı. Numunelerin farklı kayma mesafelerindeki aşınma oranları şekil 2.20'deki grafik üzerinde gösterildi.



Şekil 2.20. Numunelerin 75 m ve 300 m kayma mesafelerinde aşınma oranlarını gösteren grafik.

3. SONUÇ VE ÖNERİLER

Deney sonuçlarına bakıldığında aşınma izi genişliklerinden yola çıkarak, aşınma oranları hesaplamaları yapıldı. Deney sonuçlarına göre; örgü şeklinin ince olması aşınma dayanımını daha çok artırırken, kalın örgülerde sicim sayısı azaldığından dolayı aşınma dayanımının düştüğü sonucuna varıldı. Karma fiber numunelere bakıldığında; fiber boyutunun artması aşınma direncini düşürürken, fiber boyutunun kısılmasıyla birim alanda fiber yoğunluğu artmakta bu da aşınma direncini arttırmaktadır. Karma B ve C numunelerinin kısa mesafeye kıyasla uzun mesafelerde daha düşük aşınma oranına sahip olduğu sonucuna varıldı. Karbon fiber boyutu azaldıkça, kısa boylu fiberler kompozisyondaki diğer partiküllerle bağ yapma şansını daha fazla arttırdığından aşınma dayanımını da arttırmaktadır. Karbon fiber boyutu azaldıkça, fiberlerin kompozisyon içerisinde bağ yapma potansiyeli artmaktadır.

Karbon fiber boyut ve şeklinin mekanik özelliklere olan etkisi vardır. Prepreg örgü numunelerde örgü sıklığının (sicim sayısı) artmasıyla aşınma dayanımı artmaktadır. Prepreg kullanımında dokuma sıklığı (sicim sayısı) oranı yüksek olan malzemenin aşınma dayanımı daha yüksek olacaktır. Karma fiber numunelerde ise fiber boyutu azaldıkça fiber yoğunluğu ve homojenliği artar bu artış ise aşınma dayanımını artırır. SEM görüntülerinde yola çıkarak, fiber yoğunluğunun yüksek olduğu bölgelerde aşınma oranı düşüktür. Neredeyse aşınma izi görülememektedir. Fiber boyutu arttıkça, heterojen yapıya dönüşen uzun karbon fiber takviyeli numunelerde (karma C numunesi) aşınma izi belirgin olarak görülmektedir. Fiber oranının düşük olduğu bölgelerde aşınma oranının yüksek olduğu, SEM analizi görüntüsünde edilen iz derinliğinden de anlaşılabilir. Karbon fiber boyut ve şeklinin aşınma oranına olan etkisi, fiberlerin bağ yapma potansiyelleri ile açıklanabilir.

KAYNAKLAR

- [1] Fan Sh., Yang C., He L., Du Y., Krenkel W., Greil P., Travitzky N., *Progress Of Ceramic Matrix Composites Brake Materials For Aircraft Application*, 2015.
- [2] Bodramoni B., Undavalli V., Landing Gear of an Aircraft Structure: A Review, *International Journal of Engineering and Technical Research*, DOI: 10.17577/IJERTV4IS120005.
- [3] Heerens N.C., Landing Gear Design İn An Automated Design Environment, Yüksek Lisans Tezi, Delft University of Technology, Aerospace Engineering, Hollanda, 2014.
- [4] <http://www.flight-mechanic.com/brake-anti-skid-systems-part-one/> (Ziyaret Tarihi: 10.01.2019)
- [5] Nair Ş., Aircraft Braking System, *IJRMET*, ISSN : 2249-5770.
- [6] https://www.aircraftsystemstech.com/p/aircraft-brakes_9081.html (Ziyaret Tarihi: 14.01.2019).
- [7] Messier-Bugatti, *Wheels and Brakes, Electric Braking, a Major Technological Advance*, Technical Publications, Molsheim, France, 2010.
- [8] Asif M., Chandra K., Misra P.S., Development of Iron Based Brake Friction MMC Used for Military Aircraft Application by A New P/M Route, *Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering*, 2011, Vol. 10, No.8, 693-705.
- [9] Mohanty R.M., Climate Based Performance of Carbon-Carbon Disc Brake for High Speed Aircraft Braking System, *Defence Science Journal*, 2013, Vol. 63, No. 5, 531-538.
- [10] Day A.J. Friction, Friction Materials, 2000 and Brake Friction Layers and Friction Operational Characteristics, Short Course on the Braking of Films on PMC Brake Pads, *Wear* 257, 215-226. Road Vehicles, University of Bradford, 2004, 13.
- [11] Arabab S., Research In Carbon-Carbon Composites, Yüksek Lisans Tezi, Southern Illinois University, Carbondale, 2015.
- [12] Morgan P., *Carbon Fibers and Their Composites*, 1st Edition, CRC Press, Boca Raton, 586-591. 2005.

- [13] Fatz A., Manufacture of Functionally Gradient Carbon-Carbon Composites, *National Composite Center*, Ohio, USA, 2007.
- [14] Gururaja Rao J., Sinnur K.H., Jain R. K., Effect of Weave Texture of Carbon Fabric on Mechanical, Thermal and Tribological Properties of Carbon/Carbon Aircraft Brakes, *International Journal of Composite Materials*, DOI: 10.5923/j.cmaterials.20150505.01.
- [15] Edie, D.D., Diefendorf R.J., C C Materials and Composites- Chapter 2 Carbon fiber Production
- [16] Meggit Aircraft Braking Technology, “Carbon Disc Manufacture”, Dunlop Aircraft Braking Systems Investor Day, London, England, 2006.
- [17] <https://www.indiamart.com/proddetail/resin-transfer-moulding-10495972962.html> (Ziyaret tarihi: 15.01.2019).
- [18] Tran, P., Oxidative Stabilization Of Mesophase Pitch: Permeability Measurements And Kinetics,, Yüksek Lisans Tezi, Chemical and Biomolecular Engineering, University of Notre Dame, Indiana, USA, 2007.
- [19] Koziol K., Boskovic B., Yahya N., Synthesis of Carbon Nanostructures by CVD Method, *Carbon and Oxide Nanostructures*, DOI 10.1007/8611_2010_12.
- [20] Wang C., Li B., Peng L., He W., Zhao L., Li K., CVD Treatment of Carbon Fibers and Evaluation of Their Dispersion in CFRC, Scientific Research Publishing, 2017, 8, 649-661.
- [21] Di Santo G., Proper Operation Of Carbon Brakes, *A330/A340 Family Technical Symposium*, Sun City, USA, 29 May - 2 June 2006.
- [22] L. Ceschini, E. Lanzoni, C. Martini, D. Pranstraller, G. Sambogna, Comparison of dry slipping friction and wear of Ti6Al4V alloy treated by plasma electrolytic oxidation and PVD coating, *Wear* 264 (2008) 86-95.
- [23] M. Sokovic, P. Panjan, R. Kirn., Possibilities of improvement of dies casting tools with duplex treatment *Journal of Materials Processing Technology* 157-158 (2004), 613-616

KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER

- [1] **Açın S., Yılmaz M.**, Uçak Fren Balatalarında Karbon Fiber Boyut ve Şeklinin Tribolojik Özelliklere Etkisi, *Uluslararası Marmara Fen ve Sosyal Bilimler Kongresi*, Kocaeli, Türkiye, 23-25 Kasım 2018.



ÖZGEÇMİŞ

1991 yılında Erzincan'da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini İstanbul'da tamamladı. 2009 yılında girdiği Cumhuriyet Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü'nden 2014 yılında mezun oldu. 2016-2019 yılları arasında, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek lisans öğrenimini tamamladı. 2016 yılından beri Türk Hava Yolları A.O. bünyesinde görev yapmaktadır.

