

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**HAVACILIK BİLİMİ VE TEKNOLOJİLERİ
ANABİLİM DALI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**HAVA ARAÇLARINDA YILDIRIMSAVAR HİBRİT
KOMPOZİTLERDE KATI PARTİKÜL EROZYONUNUN ETKİSİ**

GÜRKAN ARSLAN

KOCAELİ 2017

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

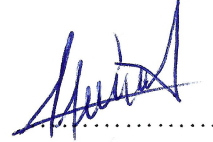
HAVACILIK BİLİMİ VE TEKNOLOJİLERİ
ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HAVA ARAÇLARINDA YILDIRIMSAVAR HİBRİT
KOMPOZİTLERDE KATI PARTİKÜL EROZYONUNUN ETKİSİ

GÜRKAN ARSLAN

Yrd. Doç. Dr. Sinan FİDAN
Danışman, Kocaeli Üniversitesi
Prof. Dr. Tamer SINMAZÇELİK
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi
Yrd. Doç. Dr. Ekrem ALTUNCU
Jüri Üyesi, Sakarya Üniversitesi



Tezin Savunulduğu Tarih: 29.12.2017

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Günümüzde havacılık sektörünün gösterdiği gelişmeler eskiden yapılan birçok tahminin de ötesindedir. Sanayi devrimiyle modern anlamda temelleri atılan bu sektörde bütün milletlerin katkısı vardır bu yönüyle havacılık tarihin vazgeçilmez bir parçası ve insanlığın ortak mirasıdır.

Sivil ve askeri maksatlı üretilen çok çeşitli hava araçlarıyla birlikte yeni problemler ortaya çıkmıştır. Hava araçlarının hızının ve hareket kabiliyetinin artmasıyla katı partikül erozyonu bu problemlerden en çok karşılaşılanlardan biridir.

Bu çalışmada havacılığın şimdilik ulaştığı son nokta olan insansız hava araçlarında gövde üzerinde sıklıkla diğer hava araçlarının belirli kısımlarında kullanılan ve yıldırımsavar vazifesi yapan hibrit kompozitlerin katı partikül erozyonu davranışları incelenecektir.

Yüksek Lisans Tez çalışmalarım esnasında her türlü tecrübe ve fikirleriyle bana yol gösteren Prof. Dr. Tamer SINMAZÇELİK ve Yrd. Doç. Dr. Sinan FİDAN'a süreç içerisinde ve bilhassa deneysel çalışmalarda tatlı bir rekabet içerisinde beni teşvik eden ve hızlandıran mesai ve okul arkadaşım Hakan SEZER'e değerli katkıları için teşekkürü borç bilirim.

Malzeme üretim aşamalarında engin tecrübesiyle çalışmamda çok büyük payı olan değerli büyüğüm Yıldırım SARI ve ekibine, mesai arkadaşım Erkan ÖZDEMİR'e ve havacılık sektöründeki tecrübesiyle yardımını esirgemeyen TUSAŞ personeli Özkan AVCI'ya şükranlarımı sunarım.

Bu çalışmayı beni bugünlere ulaştıran ve yaşam kaynağım olan aileme ve sevdiklerime armağan ediyorum.

Aralık - 2017

Gürkan ARSLAN

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	iv
TABLolar DİZİNİ	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	vii
ÖZET.....	ix
ABSTRACT.....	x
GİRİŞ	1
1. İHA'LARIN TANITIMI.....	4
1.1. İHA'ların Tarihçesi ve Kullanım Alanları	4
1.2. Dünyada İHA Çalışmaları	6
1.3. Ülkemizde İHA Çalışmaları	7
2. HAVA ARAÇLARINA YILDIRIM DÜŞMESİ VE ALINAN ÖNLEMLER.....	9
2.1. Yıldırımın Oluşumu ve Fiziksel Özellikleri	9
2.2. Yıldırımın Hava Araçları Üzerindeki Etkileri	10
2.3. Yıldırımdan Korunmak İçin Alınan Önlemler	13
3. KATI PARTİKÜL EROZYONU	15
3.1. Aşınan Malzeme Özellikleri.....	16
3.2. Aşındırıcı Madde Özellikleri.....	18
3.3. Operasyon Parametreleri	18
3.3.1. Aşındırıcı partiküllerin hızı	18
3.3.2. Partikül çarpma açısı	19
3.3.3. Aşındırıcı partiküllerin boyutu	20
3.3.4. Aşındırıcı partiküllerin kütleli debisi	21
3.3.5. Sıcaklık ve nem	22
4. HİBRİT KOMPOZİTLERİN EROZYON DAVRANIŞLARIYLA İLGİLİ LİTERATÜR ÇALIŞMALARı	23
5. YILDIRIMSAVAR HİBRİT KOMPOZİTLER	25
5.1. Kullanım Amacı ve Yerleri	25
5.2. Üretiminde Kullanılan Materyaller	26
5.2.1. Karbon fiber kumaş özellikleri.....	26
5.2.2. Epoksi reçine ve sertleştirici özellikleri	27
5.2.3. Alüminyum tel örgü özellikleri	29
5.2.4. Macun özellikleri.....	30
5.2.5. Astar ve boya özellikleri	31
5.3. Üretim Aşamaları	31
6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	39
6.1. Aşındırıcı Partiküllerin Özellikleri	39
6.2. Deney Yöntemi.....	40
6.2.1. Aşındırıcı partikül debisinin ölçülmesi	41
6.2.2. Aşındırıcı partikül çarpma hızının çift disk yöntemi ile ölçülmesi	41
6.2.3. Aşınma deneylerinin yapılması	44
6.2.4. Profilometre ile yüzey analizinin yapılması	45

6.2.5. Erozyon oranı hesaplaması.....	46
7. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ.....	47
7.1. Kütleli Debi, Partikül Hız Hesaplamaları ve Deney Parametreleri.....	47
7.2. Parametrelerin Erozyon Oranına Etkisi.....	47
7.2.1. Partikül püskürtme basıncının erozyon oranına etkisi	48
7.2.2. Açık değişiminin erozyon oranına etkisi.....	48
7.2.3. Partikül püskürtme süresinin erozyon oranına etkisi	49
7.2.4. Macun, astar ve boya işleminin erozyon oranına etkisi	50
7.3. Profilometre Analizleri.....	51
7.3.1. Çarpma açısının yüzey pürüzlülüğüne etkisi	57
7.3.2. Püskürtme basıncının yüzey pürüzlülüğüne etkisi	59
7.3.3. Püskürtme süresinin yüzey pürüzlülüğüne etkisi	61
7.3.4. Macun, astar ve boya etkisi	63
7.4. İletkenlik Testleri	65
8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	67
KAYNAKLAR	69
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER	72
ÖZGEÇMİŞ	73

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	MQ9-Reaper (Hell-Fire güdümlü mermisi atış anı).....	5
Şekil 1.2.	Anka test uçuşu	7
Şekil 1.3.	Bayraktar TB2 taktik İHA.....	8
Şekil 1.4.	Vestel karayel taktik İHA.....	8
Şekil 2.1.	Yıldırım oluşumu	10
Şekil 2.2.	Yıldırım hasar bölgeleri	11
Şekil 2.3.	Yıldırım sonucu oluşan hasar örnekleri	12
Şekil 2.4.	Yıldırım hasarı görmüş kanat ucu	13
Şekil 2.5.	LRT6000 döngü direnci test cihazı	14
Şekil 3.1.	Katı partikül erozyonuna etki eden parametreler	16
Şekil 3.2.	Zaman-kütle kaybı grafiği	17
Şekil 3.3.	Açı değişimi-kütle kaybı grafiği	19
Şekil 5.1.	Helikopter pallerinde alüminyum tel örgü	25
Şekil 5.2.	Boyasız(üstte) ve boyalı(alta) numuneler	26
Şekil 5.3.	Karbonfiber kumaş	27
Şekil 5.4.	MGS L 285 epoksi ve sertleştirici	28
Şekil 5.5.	Alüminyum tel örgü	29
Şekil 5.6.	Macun ve sertleştirici	30
Şekil 5.7.	Boya(solda), astar(sağda)	31
Şekil 5.8.	Üretime hazır karbonfiber kumaş ve alüminyum tel örgü	32
Şekil 5.9.	Üretimde kullanılan vakum pompası	32
Şekil 5.10.	Hassas terazi ile reçine ve sertleştirici karışımının hazırlanması	33
Şekil 5.11.	Reçine emdirme işlemi	33
Şekil 5.12.	Vakum İşlemi	34
Şekil 5.13.	Ağırlık plakaları	35
Şekil 5.14.	Üretimi tamamlanmış kompozit levha	35
Şekil 5.15.	Macun uygulama işlemi	36
Şekil 5.16.	Astar uygulama işlemi	37
Şekil 5.17.	Boyalı numune fırınlama işlemi	37
Şekil 6.1.	Hibrit kompozit numune boyutları	39
Şekil 6.2.	Alümina numunesi ve elektron mikroskobu görüntüsü	40
Şekil 6.3.	Deney akış şeması	41
Şekil 6.4.	Çift disk metodu cihazı	42
Şekil 6.5.	1.5 bar (solda), 3 bar (sağda) açı ölçüm diskleri	43
Şekil 6.6.	Katı partikül erozyonu test düzeneği	44
Şekil 6.7.	Nanovea PS50 optik profilometre cihazı	45
Şekil 7.1.	Erozyon oranı-basınç grafiği	48
Şekil 7.2.	Erozyon oranı-açı grafiği	49
Şekil 7.3.	Erozyon oranı-süre grafiği	50
Şekil 7.4.	Erozyon oranı-boya etkisi grafiği	51
Şekil 7.5.	Boyasız numune ve profilometre görüntüleri	52
Şekil 7.6.	Boyasız numune ve profilometre görüntüleri	52

Şekil 7.7. Boyalı numune ve profilometre görüntüleri.....	53
Şekil 7.8. Boyalı numune ve profilometre görüntüleri.....	54
Şekil 7.9. Boyalı numune üç boyutlu profilometre görüntüsü	54
Şekil 7.10. Boyalı numune üzerinde hattın belirlenmesi.....	55
Şekil 7.11. Boyasız numune ve profilometre görüntüleri.....	55
Şekil 7.12. Boyasız numune üç boyutlu profilometre görüntüsü	56
Şekil 7.13. Boyasız numune üzerinde hattın belirlenmesi	57
Şekil 7.14. Açık değişimi profilometre çekimleri	57
Şekil 7.15. Açık-pürüzlülük grafiği.....	59
Şekil 7.16. Basınç değişimi profilometre çekimleri	60
Şekil 7.17. Basınç-pürüzlülük grafiği.....	61
Şekil 7.18. Püskürtme süresi profilometre çekimleri	62
Şekil 7.19. Püskürtme süresi-pürüzlülük grafiği	63
Şekil 7.20. Boya etkisi profilometre çekimleri.....	64
Şekil 7.21. Boya etkisi-pürüzlülük grafiği	65
Şekil 7.22. İletkenlik ölçümleri	66

TABLULAR DİZİNİ

Tablo 1.1. En çok kullanılan İHALar ve üretici ülkeler	6
Tablo 3.1. Malzeme erozyon davranışları	17
Tablo 5.1. MGS L 285 epoksi reçine özellikleri	28
Tablo 5.2. MGS H 285 sertleştirici özellikleri	29
Tablo 5.3. 5052 serisi alüminyum alaşım içerik yüzdeleri.....	29
Tablo 5.4. Macun özellikleri.....	30
Tablo 6.1. Alümina aşındırıcının fiziksel özellikleri.....	40
Tablo 6.2. Debi ölçümleri.....	41
Tablo 6.3. Eroziyon aşınma deneylerinde kullanılan parametreler.....	45
Tablo 6.4. Profilometre cihaz özellikleri	46
Tablo 7.1. Boyalı numune tüm yüzey profilometre ölçüm sonuçları.....	55
Tablo 7.2. Boyalı numune seçili hat profilometre ölçüm sonuçları	55
Tablo 7.3. Boyasız numune tüm yüzey profilometre ölçüm sonuçları.....	56
Tablo 7.4. Boyasız numune seçili hat profilometre ölçüm sonuçları	57

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

θ	: İlk iz ile ikinci iz arasındaki açı, (°)
C°	: Santigrat derece
Cr	: Krom
Cu	: Bakır
E	: Erozyon oran, (g/g)
Fe	: Demir
L	: Diskler arası mesafe, (m)
m_e	: Aşındırıcı kütlesi, (mg)
Mg	: Magnezyum
Mn	: Mangan
n	: Disklerin dönüş hızı, (ms^{-1})
Si	: Silisyum
t	: Partiküllerin üst diskten alt diske ulaşmaları esnasında geçen süre
V	: Partikül çarpma hızı, (ms^{-1})
Zn	: Çinko
α	: Görüntülemenin gerçekleştirildiği açı, (°)
μm	: Mikrometre

Kısaltmalar

AB	: Avrupa Birliği
ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
AFM	: Atomic Force Mikroskopy (Atomik Kuvvet Mikroskobu)
ASELSAN	: Askeri Elektronik Sanayi
ASTM	: American Society for Testing and Materials (Amerikan Test ve Materyalleri Topluluğu)
EASA	: European Aviation Safety Agency (Avrupa Havacılık Emniyet Ajansı)
FAA	: Federal Aviation Administration (Federal Havacılık Kurulu)
HALE	: High Altitude Long Endurance (Yüksek İrtifa Uzun Menzil)
ICAO	: International Civil Aviation Organisation (Uluslar Arası Sivil Havacılık Organizasyonu)
İHA	: İnsansız Hava Aracı
LRT	: Loop Resistance Tester (Döngü Direnci Testi)
MALE	: Medium Altitude Long Endurance (Orta İrtifa Uzun Menzil)
OCCAR	: Organisation For Joint Armament Cooperation (Ortak Silahlanma Birliği Organizasyonu)
PSI	: Pressure Square Inch (İnç Kareye Düşen Basınç)

PTV	: Particle Tracking Velocimetry (Partikül İzleme Hız Ölçümü)
RPM	: Rotation Per Minute (Dakikadaki Dönüş Sayısı)
SEM	: Scanning Electron Microscope (Taramalı Elektron Mikroskobu)
SSM	: Savunma Sanayi Müsteşarlığı
TAI	: Turkish Aerospace Industries (Türk Havacılık ve Uzay Sanayi)
TSK	: Türk Silahlı Kuvvetleri
YAMAHA	: Yabancı Madde Hasarı



HAVA ARAÇLARINDA YILDIRIMSAVAR HİBRİT KOMPOZİTLERDE KATI PARTİKÜL EROZYONUNUN ETKİSİ

ÖZET

Karbon fiber güçlendirilmiş kompozitler hava araçlarının parçalarında ve insansız hava araçlarının (İHA) gövde yapılarında yüksek fiziksel özellikleri ve mekanik dayanıklılıklarından dolayı sıklıkla kullanılmaktadır. Bu üstün özelliklerinin yanında yıldırıma maruz kalmış İHA'larda yetersiz elektrik iletkenliği gösterirler. Karbon fiber güçlendirilmiş kompozitlere metal bir tel örgü eklemek İHA gövde yapılarını yıldırım hasarından korumak için alternatif bir yöntemdir. Katı partikül erozyonu keskin kenarlı partiküllerin hava araçlarının yüzeylerine çarpmasıyla oluşur. Katı partikül erozyonunun kaynaklanan yüzey hasarları aerodinamik kayıplara dolayısıyla yakıt tüketiminin artmasına ve hava araçlarının menzilinün kısalmasına sebep olur. Aynı zamanda hasarlı kısımlar yıldırım direncinin de azalmasına sebep olacaktır. Literatürde karbon fiber-metal örgü hibrit güçlendirilmiş kompozitlerin katı partikül erozyonuyla ilgili yeterli sayıda çalışma yoktur. Bu çalışmanın amacı bu kompozitlerin katı partikül erozyonu davranışlarını karakterize etmek ve numune yüzeylerinde oluşan aşınma hasarını analiz etmektir. Katı partikül testleri ASTM G 76 standartlarına göre dizayn edilmiş test düzeneklerinde yapılmıştır. Katı partikül erozyonu testleri 6 farklı çarpma açısında (15°, 30°, 45°, 60°, 75°, 90°) uygulanmıştır. Katı partikül testlerinden önceki ve sonraki numunelerin yüzey pürüzlenmesinin analizi temassız üç boyutlu lazer profilometre kullanılarak yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: İnsansız Hava Aracı, Karbon Fiber-Metal Örgü Hibrit Güçlendirilmiş Kompozit, Katı Partikül Erozyonu.

SOLID PARTICLE EROSION EFFECT ON AIRSTRIKE LIGHTNING PROTECT HYBRID REINFORCED POLYMER COMPOSITES USED ON AIR VEHICLES

ABSTRACT

Carbon fiber reinforced composite materials (CFRP) are being widely used in aircraft parts and unmanned air vehicle (UAV) airframe production due to their high specific stiffness and strength. Besides their superior characteristics, they have a disadvantage of poor electrical conductivity when used in UAV airframes which subjected to lightning strike during their service life. In order to protect UAV airframe from lightning strike damage, adding a metal wire to CFRP composite is an alternative method. Solid particle erosion caused by sharp edge particles hitting on the surface of the aircraft and UAV parts. Surface damage induced by solid particle erosion cause aerodynamic losses and result with increase in specific fuel consumption or shortening of maximum air vehicle range. Also worn body could be lost its lightning strike residence. It is evident that there is no much literature study about CFRP - metal wire hybrid reinforced composites solid particle erosion behavior. The aim of this study is to characterize the solid particle erosion behavior of CFRP - metal wire hybrid reinforced composite and analyze the post wear damage induced in the surface of the samples. Solid particle tests were performed according to ASTM G 76 standard in a specially designed test rig. Solid particle erosion tests accomplished at six various impact angles (15°, 30°, 45°, 60°, 75°, 90°). Surface roughness analysis of specimens before and after solid particle erosion tests were performed by using 3D non-contact laser profilometer.

Keywords: Unmanned Air Vehicle, Carbon Fiber-Metal Wire Hybrid Reinforced Composite, Solid Particle Erosion.

GİRİŞ

Söz konusu bir hava aracı olduğunda havacılığın aslında birçok bilim dalını tek çatı altında toplayan bir sektör olduğunu görürüz. Bu bilim dallarından ilk akla gelenler; elektrik, aviyonik, aerodinamik, tıp, malzeme, psikoloji, meteoroloji, coğrafya, biyoloji gibi her biri uzmanlık gerektiren bilim dallarıdır. Bir hava aracında can güvenliğini sağlamak bir kara veya deniz aracına göre çok zordur bu yüzden bir hava aracını tasarlamak karmaşık süreçlerin sonucudur. Direkt olarak insan hayatına hükmeden ve hata kabul etmeyen bu süreçlerden biri de malzeme bilimiyle alakalıdır. Havacılıkta kullanılan malzemeler herkesçe bilinen hafiflik ve dayanıklılık dışında birçok spesifik özelliğe sahip olmalıdır. Her türlü iklim koşullarına maruz kalan bu malzemeler uçuş emniyetine ve aerodinamik esaslara da aykırı olmamalıdır.

Seyrüsefer halindeki bir hava aracı birçok etkiye maruz kalır bu etkilerden en çok karşılaşılanlarından biri de katı partikül erozyonudur. Katı partikül erozyonu hava araçlarında kullanılan malzemelere zarar veren, aerodinamik yapının bozulmasına sebep olan, bir süre sonra da uçuş emniyetini tehdit eden bir süreçtir.

Hava içerisindeki farklı şekil ve boyuttaki partiküllerin hava aracına çarpması sonucu yabancı madde hasarı (YAMAHA) oluşur. Bu hasarlar bazen gözle görülebilir boyutlarda olmasına karşın bazen de tespiti için özel yöntemler gerekebilir. Uçuş emniyetini tehdit eden ve gözle görülemeyen bu hasarlar malzemelerin erozif aşınma davranışlarının iyi analiz edilmesi gerekliliğini ortaya çıkarmıştır. Katı partikül erozyonuyla ilgili çalışmalar farklı parametreleri de dikkate alarak erozif aşınma miktarını en aza indirmeye ve malzemeyi koruma amaçlıdır.

Bu çalışmada modern hava araçlarının temel yapı malzemesi olan kompozitlerin yıldırım düşme durumundaki iletkenlikleri ve yıldırıma karşı direnç kazanmaları için uygulanan işlemlerle birlikte bu malzemelerin katı partikül erozyonu davranışları incelenecektir.

Alüminyum gibi sıklıkla kullanılan gövde yapıları yüksek iletkenliğe sahipken karbon fiber güçlendirilmiş kompozitler çok düşük iletkenliğe sahiptir. Yıldırım düştüğü anda büyük miktarda enerji ortaya çıkar ve gövde yapısının aniden yüklenmesine sebep olur. Bu şok dalgası iletken olmayan kısımlarla karşılaştığında o bölgede basınç oluşturup gövdenin hasar almasına sebep olur. Bu aşırı yük, direnç ısına ve sıcaklığın artmasına bu da kompozit yapısında parçalanma, hava aracının elektrik sisteminin hasar görmesi gibi uçuş anında olmaması gereken durumlara sebep olur.

Yıldırım hasarlarını önlemek için kompozitleri metal tel örgü ile kaplamak yıldırımlardan korunmak için sıklıkla kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntemle gövde üzerinde yük homojen bir şekilde dağılır ve yük farkından meydana gelen hasarların önüne geçilmiş olur. Bu tel örgü alüminyum, bakır, bronz gibi iletken maddelerden yapılabilir, hafif olması ve maliyetinin düşük olması sebebiyle en çok tercih edileni alüminyumdur. Uçakların ve helikopterlerin yük birikimi olan bölgelerinde İHAların gövde yapılarında kullanılan alüminyum tel örgü malzemesi zayıf aşınma direncine sahiptir bu yüzden katı partikül erozyonuna maruz kaldığında iletkenliğinde kayıp yaşayabilir. Aşınmadan sonra korozyon oluşumu ve malzemenin tamir edilemez şekilde hasar alması ise ikincil bir negatif etki olarak ortaya çıkar. Bu çalışmada asıl amaç karbonfiber-metal hibrit kompozitlerin erozif aşınmalarını gözlemlemek katı partikül aşınma mekanizmalarını incelemektir.

Tez çalışmasının ilk bölümlerinde yıldırımsavar hibrit kompozitlerin sıklıkla kullanıldığı İHA'ların kısa tanıtımı yapılmış, yıldırımın fiziksel özelliklerinden bahsedilmiştir. Daha sonra teze konu olan yıldırımsavar hibrit kompozitler üretim aşamaları da dahil olmak üzere yapı unsurlarıyla beraber incelenmiştir. Tez kapsamında kaynağı bilinmeyen hazır üretilmiş malzeme kullanılmayıp hedef malzemenin üretiminin yapılması teze özgünlük kazandırmıştır.

Tezin ilerleyen kısımlarında katı partikül erozyonu tanımlanmış parametreleri ile birlikte anlatılmış, yıldırımsavar hibrit kompozitlerin katı partikül davranışlarını etkileyen unsurlar aktarılmıştır. Tezin deneysel aşamalarında ise alümina 80 mesh sert olması ve sivri kenarları sebebiyle aşındırıcı olarak kullanılmış ASTM G 76 standart test metoduna göre yıldırımsavar hibrit kompozitler farklı parametrelerle

aşınma testine tabi tutulmuştur. Numunelerdeki yüzey pürüzlülüğünün anlaşılması için 3 boyutlu lazer profilometre ile aşınmadan sonra yüzey analizi yapılmıştır.

Tezin son bölümünde ise aşınma deneyi sonuçları, profilometre görüntüleri bir bütün olarak ele alınıp tezin sonuç ve irdeleme kısmı tamamlanmış, tasarım, üretim, bakım ve onarım aşamalarında faydalı olabilecek sonuçlara ulaşılmıştır. Yapılan bütün deneyler ve tez gerçek uçuş şartları üzerine planlanmıştır.



1. İHA'LARIN TANITIMI

1.1. İHA'ların Tarihçesi ve Kullanım Alanları

İnsansız hava araçları küçük dronelardan füze atabilen yüksek menzilli (HALE) İHA'lara kadar geniş bir yelpazeye sahiptir. Bir çok alanda olduğu gibi başta askeri amaçla üretilip geliştirilmiş daha sonra sivil kullanıma da adapte edilmişlerdir. İlk olarak zamanlı bir bombayı taşıyan ve Charles Perley tarafından 19.yüzyılın sonlarına doğru üretilen balonlar İHA'ların atası olarak kabul edilir [1]. Uzaktan kumanda edilme özelliği olan ve belli bir maksat için 1916 yılında Archibald Low tarafından tasarlanan İHA ilk modern İHA olarak kabul edilmiştir [2].

1. ve 2. Dünya savaşlarında özellikle keşif gözetleme amaçlı kullanılan İHA'lar halen günümüz gelişmiş modellerinden çok uzaktı. Jet motorların gelişmesi ve havacılığın ivme kazandığı 1950'li yıllarda İHA'larda bu gelişmelerden etkilenmiş boyutları küçülmesine rağmen kabiliyetleri artmıştır.1. dünya savaşında Almanlar tarafından İngiltere'yi bombalamak için kullanılan V-1 modeli bomba yüklü uzaktan kumandalı uçaklar İHA'ların silah taşıma kabiliyetlerini göstermiştir.2.dünya savaşında kullanılan yarı görünmez Firebee modeli paraşütle iniş yapma özelliğine sahiptir [1].

1970 li yıllarda İsrail bu alanda çalışmalarına hız vermiş, Firebee1241, Scout, Pioneer ve Türkiye'nin de ihraç ettiği Heron gibi değişik görevler icra eden İHA'lar üretmiştir. Günümüzde ABD ve İsrail bu teknolojinin geliştirilmesinde öncü olmuştur. İHA pazarının yaklaşık %60'ı ABD nin elindedir. İsrail ve Avrupa İHA'lara yeterli devlet fonu sağlamadığından ABD'nin gerisinde kalmışlardır. Özellikle ABD tarafından üretilen MQ1-PREDATOR modeli tüm dünyaca kabul görmüştür.



Şekil 1.1. MQ9-Reaper (Hell-Fire güdümlü mermisi atış anı) [3]

İHA'ların yaygınlaşmasında ekonomik ve güvenlik konularının önemi büyüktür. Kaza-kırım anında can kaybının söz konusu olmaması İHA kullanımının ilk tercih sebebidir. Pilot idaresindeki bir hava aracında bulunması gereken yaşamsal sistemler, kokpit, emercensi kaçış sistemleri hava aracı üretim maliyetlerini artırmaktadır. Pilot eğitimleri ise başlı başına bir maliyet ve zaman gerektirmektedir. Ayrıca İHA'ların küçük gövde yapıları sayesinde düşük farkedilebilirlik avantajına sahip olmaları ve radara yakalanmamaları diğer hava araçlarına üstünlük kurlmalarını sağlamıştır. Uçuş ekibinin çalışma süresi, yorgunluk, uykusuzluk, maruz kalınan G kuvveti gibi olumsuz etkilere maruz kalması görev süresini, irtifayı ve menzili olumsuz etkilemektedir. İHA'larla birlikte havacılıkta insana bağlı sınırlar aşılmıştır.

Başta kısa menzilli ve sadece keşif ve gözlem amaçlı kullanılan İHA'lar zamanla hız ve menzil kazanmış pilot kumandasındaki bir hava aracının sahip olduğu bütün yeteneklere ve daha fazlasına sahip olmuşlardır. Literatürde İHA'ların sınıflandırması birçok şekilde yapılmıştır.

Görev irtifasına ve hızlarına göre;

1. Mikro İHA: Elle fırlatılabilen sadece keşif amaçlı

2. MALE: Orta irtifa uzun menzilli
3. HALE: Yüksek irtifa uzun menzilli
4. HYPERSONIC: Yüksek hızlı

Kullanım amaçlarına göre;

1. Hedef olarak
2. Keşif gözetleme, istihbarat
3. Lojistik ve taşıma amaçlı
4. Silahlı Taarruz
5. Sivil ve ticari

1.2. Dünyada İHA Çalışmaları

Yaygınlaşan İHA kullanımını nedeniyle uluslararası havacılık kurumları bazı düzenlemeler yapmıştır bunlardan en kapsamlısı ICAO tarafından hazırlanan ve 12 Mart 2015'te yayınlanan rehberdir. ABD de FAA 2013, 2015 ve 2016 yıllarında ticari İHA'lar dahil düzenlemeler yapmıştır. AB'de ise EASA kanalıyla 2008, 2012, 2015, 2017 yıllarında düzenlemeler yapılmıştır [4]. Bu gelişmelerden de anlaşılacağı üzere İHA uygulamaları sürekli olarak gelişmekte bu da beraberinde yeni düzenlemeleri getirmektedir.

ABD Körfez Savaşından itibaren İHA'ların kullanımına ve geliştirilmesine bütçe ayırmış ve İHA pazarının yaklaşık yarısına hakim olmuştur. İsrail ve AB de gelecekte bu pazarda söz sahibi olabilmek için yatırım yapmaktadır. AB ülkelerinden Almanya, Fransa, İspanya, İtalya OCCAR kapsamında operatif sınıf (MALE) İHA projesine 2016 yılında başlamıştır.

Tablo 1.1. En çok kullanılan İHA'lar ve üretici ülkeler

ÜLKE	İHA SİSTEMİ	SINIFI
ABD	R/MQ-4 GLOBAL HAWK	STRATEJİK
	MQ-9 REAPER	MALE+
	MQ-1 PREDATOR	MALE
BAE	UNITED 40 BLOK 5	MALE+
	WING LOONG	MALE
ÇİN	CH-4	MALE
	HERON TP	MALE+
İSRAİL	HERON 1	MALE
	HERMES 900	MALE

1.3. Ülkemizde İHA Çalışmaları

Dünyadaki bu gelişmelerle birlikte hem savunma sanayiinde hem de sivil alanda İHA'ların rolü anlaşılmaya başlanmıştır. İlk İHA çalışmaları savunma alanında yapılmış 1989 yılında Banshee sistemi hedef uçağı olarak TSK envanterine girmiştir.1993 yılında Almanya tarafından hibe edilen 5 adet CL-89 kısa bir süre envanterde kalmıştır [5]. Ülkemizde kullanılan ilk ciddi İHA sistemi 1995 yılında ABD'li firma General Atomics üretimi olan GNAT-750 ve I-GNAT modelleridir. Daha sonra gelişen teknolojiyi takip etmek amacıyla 2007-2010 yılları arasında Heron ve Searcher İHA'ları alınmış ve ASELSAN tarafından modernizasyonlar gerçekleştirilmiştir. Yerli İHA üretimi çabaları ise ilk olarak 1990 yılında TAI ile başlamıştır.2004 yılına kadar İHA-X1, Baykuş, Pelikan gibi modeller geliştirilmiş, Anka ise son proje olarak ortaya çıkmıştır [5].



Şekil 1.2. Anka test uçuşu [6]

2004 yılında SSM'nin teşvikiyle ülkemizde İHA çalışmaları hızlanmıştır. Vestel Savunma Sanayi, Baykar ve TAI firmaları öne çıkmıştır. Baykar firması Bayraktar, Malazgirt mini İHA, Bayraktar TB2 taktik İHA modellerini üretmiş 20 adet Bayraktar İHA Katar'a satılmıştır.



Şekil 1.3. Bayraktar TB2 taktik İHA [7]

2005 yılında ise Vestel Savunma Sanayi Efe mini İHA sistemiyle sektöre ilk giriş yapmış müteakip yıllarda Bora ve Karayel İHA'larıyla süreci devam ettirmiştir.



Şekil 1.4. Vestel karayel taktik İHA [8]

Yapılan bu üretim çalışmaları tamamen yerli üretim hedefine ulaşmayı dışa bağımlılığı azaltmayı hedeflemektedir.

Savunma sanayi dışında ülkemizde İHA'lar kaçak avcılıkla mücadele, elektrik hatlarını kontrolü, haşerelerle mücadele, su havzalarının kontrolü gibi çok çeşitli amaçlar için de kullanılmaktadır.

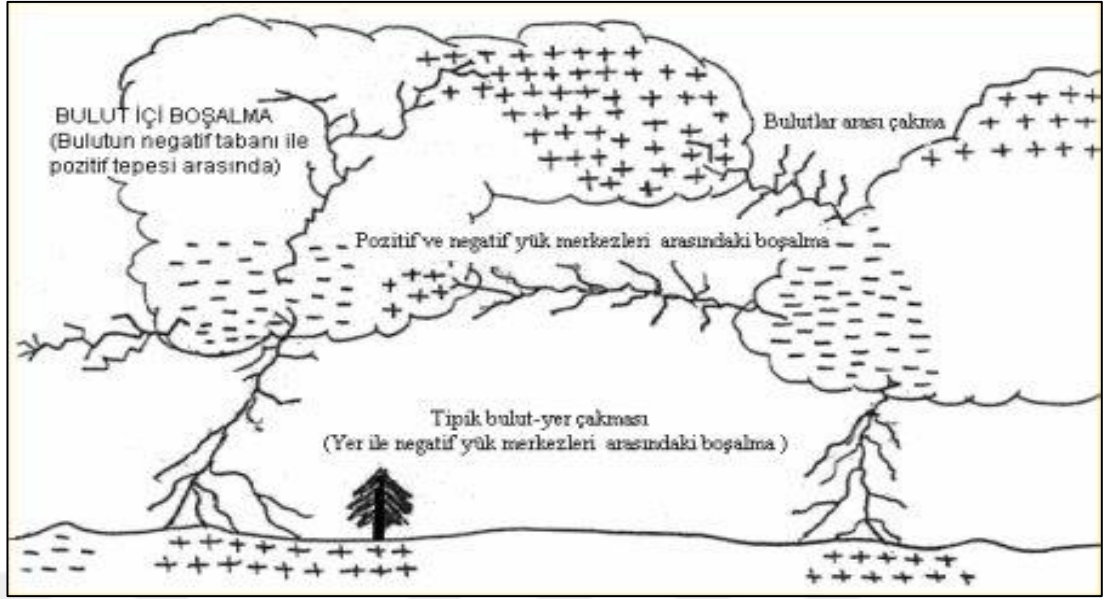
2. HAVA ARAÇLARINA YILDIRIM DÜŞMESİ VE ALINAN ÖNLEMLER

2.1. Yıldırımın Oluşumu ve Fiziksel Özellikleri

Bir bulut içerisinde yağmur zerrecikleri, kar taneleri, dolu gibi parçacıklar (hidrometeor) çarpışma sayesinde yüklenir. Daha büyük parçacıklar daha fazla negatif yük kazanırken, daha küçük parçacıklar daha fazla pozitif yük kazanır. Bu parçacıklar, bulutun yukarı kısımlarının pozitif yük aşağı kısımlarının negatif olarak yüklenirken, dikey hareketler ve yer çekiminin etkisiyle ayrılır. Bu yük ayrılması, hem bulut içerisinde hem de bulut ile yer arasında çok büyük bir elektrik potansiyeli oluşturur [9].

Yıldırım bulut içerisinde biriken güçlü elektriksel yükün yeryüzüne, yapılara veya hava araçlarına boşalmasıyla ortaya çıkan ve hızlı gelişen bir süreçtir. İlk aşamada bulut elektriksel yükü yüklenir ikinci aşama boşalma sürecinin başlaması ve son aşama ana boşalma aşamasıdır [9]. Yıldırımlar genellikle ilkbahar ve yaz aylarında yağışlı ve kötü hava koşullarıyla aynı zaman diliminde görülür. Yıldırımın oluşumu 30 mikrosaniye olup ortalama gücü 1 milyon volt ve 30000 amperdir. Yıldırımın oluştuğu bölgede sıcaklık 30000 °C'ye ulaşabilir [10]. Yıldırımların en çok görüldüğü yükseklik 5000 ile 15000 feet arasındadır.

Yıldırımlar sonucunda ölümler, yaralanmalar ve maddi kayıplar meydana gelmektedir.

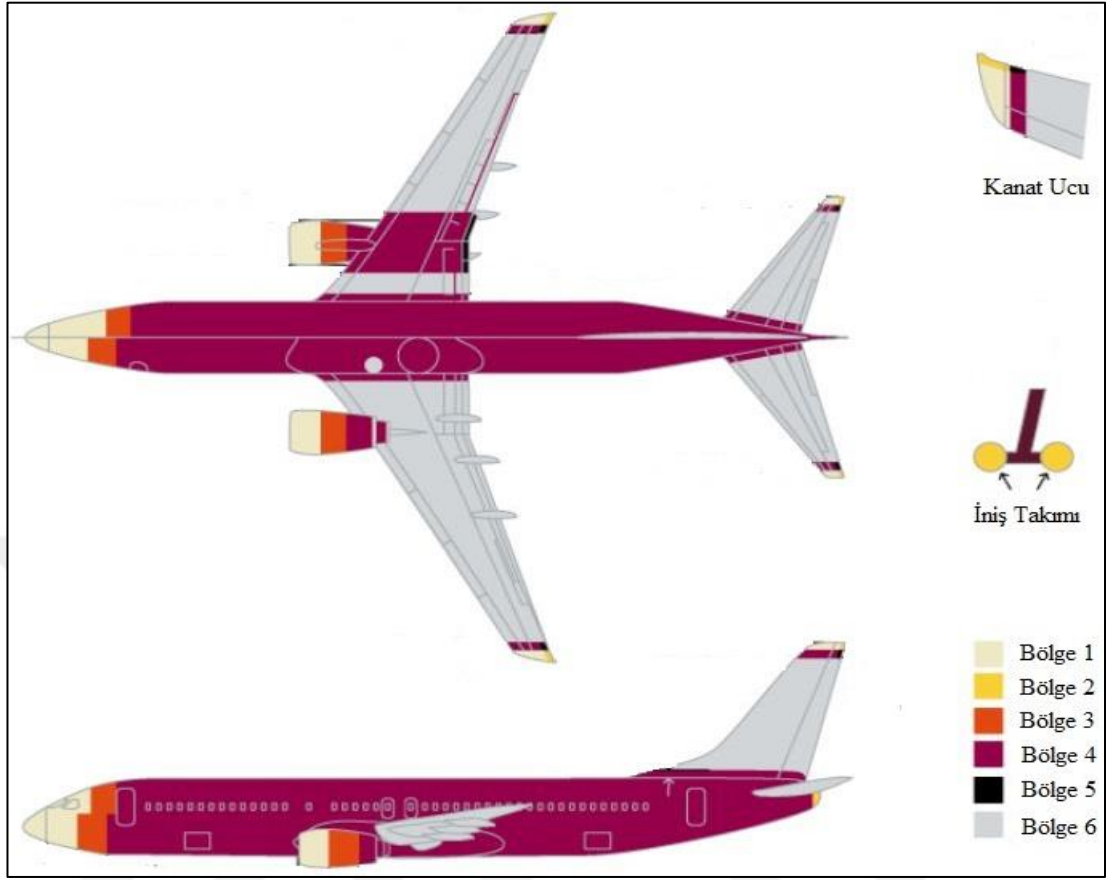


Şekil 2.1.Yıldırım oluşumu [11]

2.2. Yıldırımın Hava Araçları Üzerindeki Etkileri

Hava araçları istatistiklere göre her 1000 uçuş saatinde bir defa yıldırıma maruz kalmaktadır. Bu da uzun mezil uçaklar için ortalama yılda bir defaya denk gelmektedir. Yıldırım çarpma sıklığı hava aracının uçuş yaptığı bölgeye göre değişmekte, ekvatora yakın bölgelerde yıldırım vakaları daha çok yaşanmaktadır.

Park halindeki bir uçağa da yıldırım çarpabilir ve hasara sebep olabilir [12].Yıldırım çoğu zaman hava aracının ön kısmından, kanat yada kuyruk kısımlarından girer ve tüm gövdeye yayılır. Yıldırımın çarpma ihtimali yüksek olan bölgeler radome, motor kanatçıkları, kanat uçları, iniş takımı ve hava veri sensörleridir [13]. Yıldırım hasar bölgeleri 6 kısma ayrılmış Şekil 2.2 de gösterilmiştir.



Şekil 2.2. Yıldırım hasar bölgeleri [13]

Yıldırım sonucu oluşan aşırı yük depolanırsa kompozit gövde yapısı zarar görebilir. Aşırı yük manyetik alan oluşturur ve hava aracının kablo sistemi, navigasyon, uçuş kumandaları gibi elektrik ve elektronik aksamalarını olumsuz etkiler. Seyrüsefer ışıklarının arızalanmasına sebep olur. Yıldırım anında hava aracındaki yakıt depolarının aşırı ısıya maruz kalması yakıt buharının kolay tutuşması sebebiyle yangın tehdidi oluşturmaktadır.

Yıldırım kazası örnekleri:

26 Haziran 1959, Milano/İtalya: TWA Havayolları'na ait Starliner uçağının tırmanış sırasında yakıt depolarında patlama oldu. Kanadı kopan uçak çakıldı. Olayda 68 kişi hayatını kaybetti. Yapılan incelemede yıldırım düşen uçakta buharlaşan yakıtın alev aldığı tespit edildi.

12 Ağustos 1963, Lyon/Fransa: Air Inter'e ait Viscount uçağı iniş sırasında yere vurdu. Kazada 21 kişi hayatını kaybederken çarpan yıldırımın pilotların gözlerini kamaştırdığı ve geçici körlük yaratmış olabileceği iddia edildi.

8 Aralık 1963, Elkton/ABD: Panam'a ait Boeing 707 uçağına iniş sırasında çarpan yıldırım sol kanat yakıt tankındaki yakıt buharını tutuşturdu. Yakıt tanklarının infilak etmesi sonucu 81 kişi öldü.

24 Aralık 1971, Puerto Inca/Peru: Lansa Havayolları'na ait Electra tipi uçak kanadına isabet eden yıldırımla 7 bin metreden düştü. Olayda 91 kişi hayatını kaybetti.

9 Mayıs 1976, Madrid/İspanya: İran Hava Kuvvetleri'ne ait Boeing 747-131F uçağı iniş sırasında tarlaya düştü. 17 kişinin öldüğü kaza sonrasında yapılan araştırmada yıldırımsavar sisteminin çalışmadığı saptandı.

5 Eylül 1980, Montelimar/Fransa: Kuveyt Hava Kuvvetleri'ne ait Lockheed L-100-20 Hercules askeri uçağı yıldırım çarpması sonucunda düştü. 8 kişi öldü.

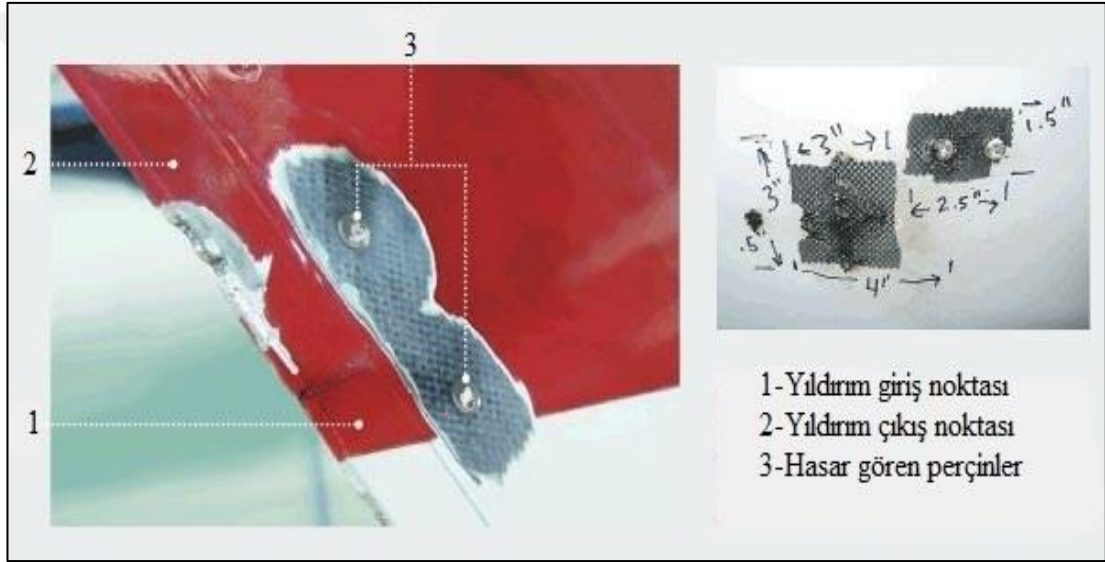
8 Şubat 1988, Mülheim/Almanya: Nürnberger Flugdienst şirketine ait Metro III tipi uçağı iniş sırasında yıldırım çarptı. Sağ kanadı parçalanan uçak mecburi iniş yaparken çakıldı. 21 kişi hayatını kaybetti [14].



Şekil 2.3. Yıldırım sonucu oluşan hasar örnekleri [15]

2.3. Yıldırımdan Korunmak İçin Alınan Önlemler

Yıldırım sonucu yaşanan kazalar üreticileri bu konuda tedbir almaya zorlamış, bu kapsamda yıldırımsavar sistemler üretilmiştir. En son 1988 yılında yıldırım nedeniyle ölümlü uçak kazası yaşanmış bu da alınan önlemlerin faydalı olduğunu göstermektedir. Eski hava araçları genellikle alüminyum gövdeye sahip olduklarından iletkenler ve yıldırım anında üzerlerinde yük birikimi az seviyede oluyordu. Fakat modern hava araçlarında karbon fiberle kullanılan epoxy reçine iletken değildir. İletkenliği artırmak için uçak, helikopter ve İHAların bazı bölgelerinde tel örgü kullanılmaktadır.



Şekil 2.4. Yıldırım hasarı görmüş kanat ucu [13]

Bu tel örgü bakır, bronz, alüminyum gibi iletkenliği iyi olan maddelerden yapılır. Üretim maliyetinin düşük olması ve hafifliği nedeniyle daha çok alüminyum tercih edilmektedir. Yıldırımın yangınlara sebep olmaması için yakıt depolarının izolasyonu artırılmıştır. Depo içindeki yakıt buharının tutuşmamasını önlemek için daha az yakıt buharı yayan yakıtlar üretilmeye başlanmıştır.

Ayrıca hava aracı üzerindeki statik elektriği boşaltmak için statik deşarjerler kanat uçlarına ve kuyruk kısmına yerleştirilmiştir. Hava araçlarının iletkenliğinin test edilmesi için LRT cihazı ile yer testleri yapılmakta, yıldırım direnci test edilmektedir. Bu test hava aracının bir noktasından akım verip diğer noktalardan ölçüm yapma esasına dayanır.



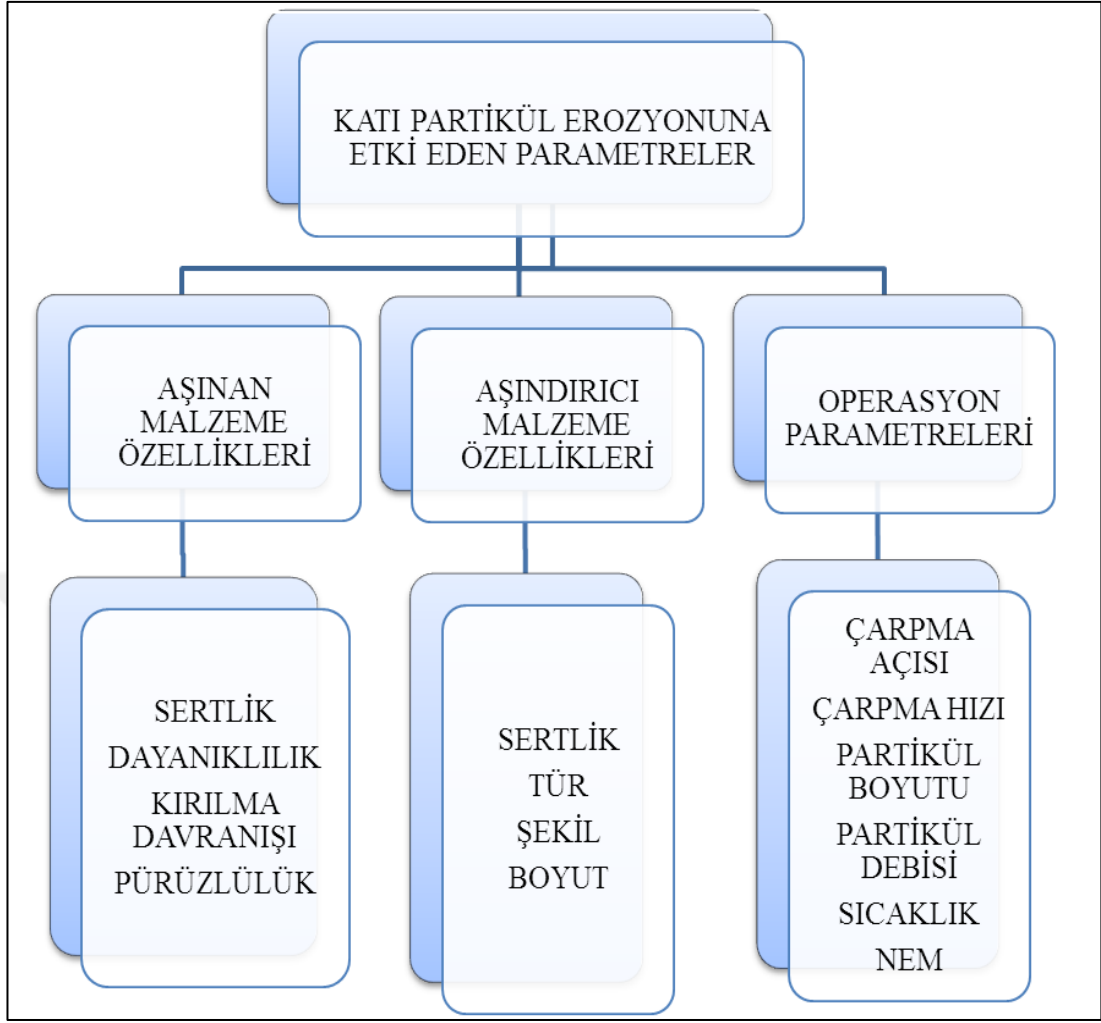
Şekil 2.5. LRT6000 döngü direnci test cihazı [16]

3. KATI PARTİKÜL EROZYONU

Aşınma temel olarak malzeme yüzeyinde meydana gelen kayıp olarak tanımlanabilir. Farklı boyut, şekil ve kimyasal yapıdaki maddeler bu aşınmaya sebep olabilir bu yüzden aşınmaya etki eden birçok parametreden söz edilebilir. Aşınma anlık bir durum olabileceği gibi daha çok bir süreç olarak değerlendirilir. Aşınma genel olarak aşındırıcının katı, sıvı veya gaz halinde olmasına göre sınıflandırılmıştır. Farklı hızlarda farklı geometrik boyutlardaki tanecikler, temasta buldukları katı yüzeylerde darbe etkisi yapar ve malzeme kaybı gerçekleşir. Aşınma bilimi bu kaybın sebeplerini, oluşum aşamalarını, parametrelerini, sonuçlarını inceleyen bir bilim dalı olarak düşünülmelidir. Hızın ve hareketin olduğu ortamlarda aşınmadan bahsedilebilir. Aşınmanın direkt olarak negatif sonuçları arasında parça değişimi gerektirmesi, iş ve zaman kaybı, enerji kaybı, üretimin azalması gösterilebilir. Dolaylı sonuçlar arasında ise insan hayatını tehdit eden problemlere sebep olabilir.

Tüm sanayi türlerinde üretimde kullanılan materyallerin aşınma davranışlarının incelenmesinin ticari ve teknolojik önemi büyüktür. Aşınma ile ilgili çalışmalar 1950 li yıllarda başlamış, sistematik çalışmalar ise 1960'lı yıllarda sanayi ülkelerinde yapılmıştır. Aşınma uzun süredir bilimsel araştırmalara konu olmasına rağmen halen endüstriyel uygulamalarda bir problem olarak ortaya çıkması aşınmanın kompleks bir süreç olduğunun kanıtıdır [17].

Katı partikül erozyonu ise bu aşınma süreçlerinden biri olup aşındırıcı madde ile hedef malzeme arasındaki temasın devam ettiği sıvı erozyonu, bulamaç erozyonu ve kavitasyon(buhar) erozyonu gibi diğer tribolojik süreçlerden farklıdır [18]. Katı partikül erozyonu oluşma süreci farklı parametrelere bağlıdır. Bu parametreler temel olarak; hedef malzemenin özellikleri, aşındırıcı partikül özellikleri ve operasyon parametreleri olarak üç ana başlık altında incelenmektedir. Bu parametreler sayesinde istenen değişiklikler yapıp hedef malzemelerin katı partikül erozyonu davranışları karakterize edilmektedir. Bu ana parametreler ve alt bileşenleri Şekil 3.1'de şematik olarak verilmiştir.

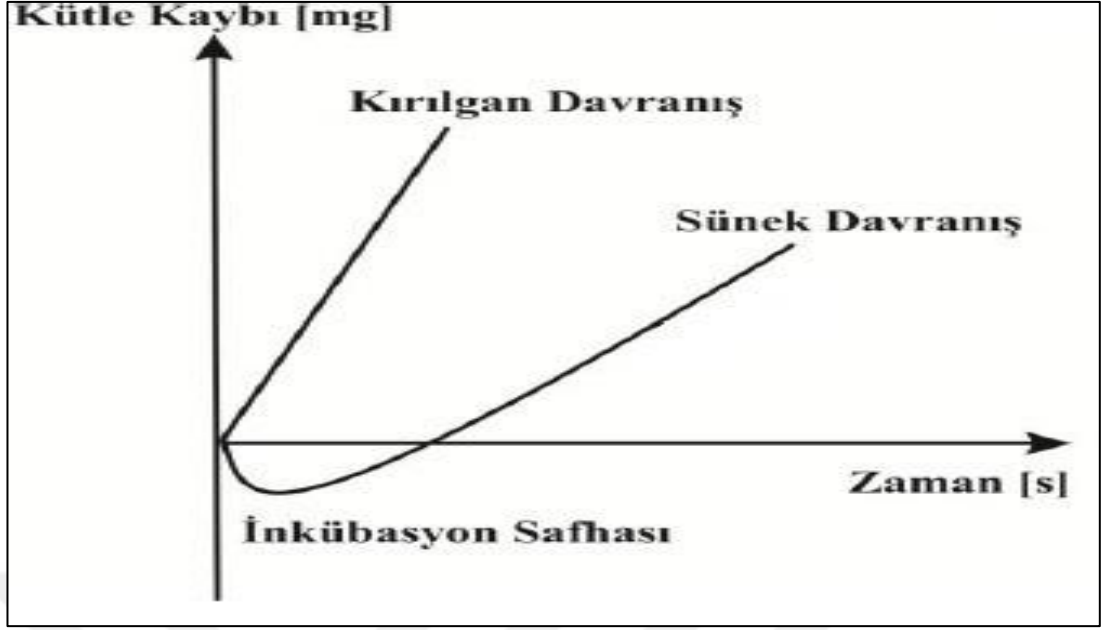


Şekil 3.1. Katı partikül erozyonuna etki eden parametreler

3.1. Aşınan Malzeme Özellikleri

Katı partikül erozyonunda, aşınan malzemenin fiziksel özellikleri yanısıra sertliği dayanıklılığı ve kırılma davranışlarının bilinmesi ve yüzey pürüzlülüğünün tespit edilmiş olması yapılan deneylerde ve elde edilen sonuçların yorumlanmasında önemli faktörlerdir. Örneğin: fiziksel özellikleri aynı iki numuneden düz bir yüzeye sahip olanda kütle kaybı yaşanırken pürüzlü yüzeyde kütle artışı görülebilir.

Aşınan malzemenin sünek veya gevrek olması ise katı partikül erozyonuna etki eden önemli parametrelerden biridir. Sünek ve gevrek iki malzeme diğer tüm parametreler aynı iken farklı erozyon karakteristikleri sergilemektedir.



Şekil 3.2. Zaman-kütle kaybı grafiği [19]

Kütle kaybının zamanla değişiminde kırılgen ve sünek malzemeler farklı davranış gösterirler. İlk anda kırılgen davranış lineer bir artış gösterirken sünek davranış kütle kaybı ekseninde eksi(-) tarafa geçer. Bu sünek malzemenin ağırlığının artması ve aşındırıcı partiküllerin hedef malzeme üzerine gömülmesi anlamına gelmektedir. Kütle kaybı olması beklenen malzemede tam aksine kütle kazancının olduğu bu periyoda inkübasyon periyodu denir. Bir müddet sonra inkübasyon periyodu biter aşındırıcı partiküller malzeme yüzeyini terketmeye başlar. İnkübasyon döneminden sonra sünek malzemeler de kırılgen malzemelerdeki gibi lineer bir kütle kaybı görülmeye başlanır.

Tablo 3.1. Malzeme erozyon davranışları

Malzeme Türü	Erozyon Davranışı
Cam, Seramik, Gevrek Polimer	Çatlak Oluşumu, Gevrek Kırılma
Polimer, Sünek Metaller, Fiber	Kesme ve Sürülme
Takviyeli Polimerler	
Kauçuk, Plastik Esaslı	Yorulma, Yırtılma

Tablo 3.1 de malzeme erozyon davranışları verilmiştir bu çalışmada kullanılan hibrit kompozitler fiber takviyeli kompozitler oldukları için daha çok sünek malzeme özellikleri göstermektedir. Üretimde kullanılan karbon fiber kumaş ve tel örgü esnek bir malzeme iken reçinenin sertleşmesi sonucu malzemenin kırılgenlik özelliği artmaktadır.

3.2. Aşındırıcı Madde Özellikleri

Aşındırıcı malzemenin fiziksel özellikleri katı partikül erozyonuna direkt etki eden parametrelerdendir. Keskin kenarlı aşındırıcı partiküller kesme, kırılma, parçalama gibi deformasyonlara sebep olurken küresel şekilli partiküller plastik deformasyona sebep olmaktadır. Aşındırıcı partikülün boyutları ise hedef malzemenin özellikleri de düşünülerek belli bir kritik değere kadar erozyonu artırmakta sonrasında sonuca etki etmemektedir [20].

3.3. Operasyon Parametreleri

Operasyon parametreleri malzemenin servis esnasında karşılaştığı değişkenlerin tamamını kapsar. Bu parametreler kullanıcıya değişiklik yapıp hedef malzemenin katı partikül erozyonu davranışlarının karakterize edilmesi imkanı sağlar.

3.3.1. Aşındırıcı partiküllerin hızı

Hedef malzemeye ulaşan bir partikülün hızı erozyon karakteristiğine direkt etki eden parametrelerdendir. Aşınan malzemenin özellikleri ve çarpma açısına da bağlı olarak çok düşük hızlarda erozyon davranışı göstermeyip malzeme yüzeyinde yorulmaya sebep olur. Hızın artmasıyla erozyon gözlemlenmeye başlanır. Partikül hızının çok yüksek olması da hedef malzeme üzerinde krater açılmasına veya tamamen delinmesine sebep olabilir.

Amir Mansouri, Hadi Arabnejad Khanouki, Siamack A. Shirazi, Brenton S. McLaury yaptıkları erozyon araştırmalarında 75, 150, 600 µm luk kum partiküllerini ve 75, 150, 600 µm luk cam partiküllerini 46 m/s, 65 m/s, 79,5 m/s, 91,85 m/s, 102,71 m/s ve 112,5 m/s hızlarındaki hava akışı içerisinde püskürterek partiküllerin hızlarını parçacık izleme hız ölçüm tekniği (PTV) ile izlemişlerdir. Yaptıkları gözlemler sonucu partikül hızının artmasının endüstriyel malzemelerde erozyonu artırdığını ifade etmişlerdir [21].

R. A. Shakoore, Paul Okonkwo, A. M. Mohamed yaptıkları erozyon deneylerinde boru hattı çeliği APIX120 üzerinde çalışmışlardır. Çalışmalar sırasında partiküller 43-167 m/s hız aralığında, değişik açılarda ve 0-10 dakika süre aralığında hedef malzemeye uygulanmıştır. Testler oda sıcaklığında yapılmış ve aşındırıcı olarak

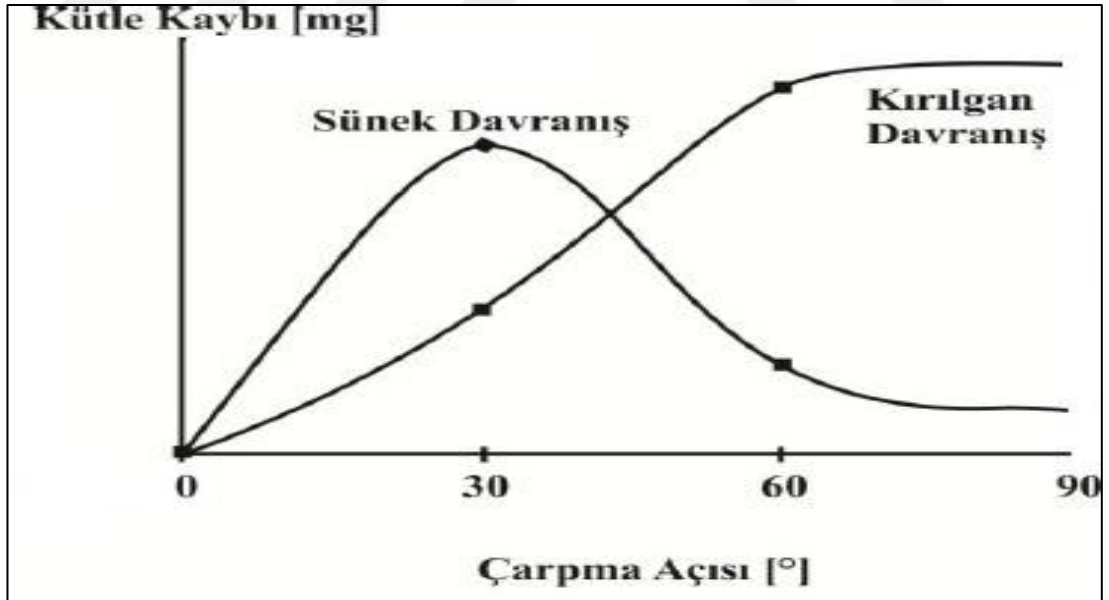
alümina kullanılmıştır. Farklı hızlardaki numunelerin erozyon davranışları incelenmiş elektron mikroskobu ve profilometre yardımıyla yüzey analizleri yapılmıştır. Sonuçlar incelendiğinde düşük hızlarda plastik deformasyonun ve gömülme eğiliminin baskın olduğu yüksek hızlarda ise kırılma, kopma, kesilme, mekanizmalarının ortaya çıktığı gözlemlenmiştir [22].

Bu çalışmalar neticesinde diğer parametreler sabitken partikül hızının artırılması ile kütle kaybı artmakta, bu da hız ve erozyon eğilimlerinin arasındaki pozitif korelasyonu göstermektedir.

3.3.2. Partikül çarpma açısı

Partikül çarpma açısı katı partikül erozyonunda en değişken parametrelerden biridir. Literatürde çarpma açısı iki temel unsura ayrılmıştır; 90° lik çarpmalar dik açılı çarpma olarak, bunun dışındaki açılar eğik açılı çarpma olarak kabul edilmiştir.

Düşük çarpma açılarında aşındırıcı partiküller hedef yüzeye daha uzun süreli temas etmekte buda yumuşak yüzeyler için kütle kaybını arttırmaktadır.



Şekil 3.3. Açı değişimi-kütle kaybı grafiği [19]

Şekil 3.3'de kırılgen ve sünek malzemelerin açı değişimi ile uğradıkları kütle kayıpları birlikte gösterilmiştir. Düşük çarpma açılarında kırılgen malzemeler sünek

malzemelerden daha az kütle kaybına uğrarlar. Açı arttıkça ve 90° ye yaklaştıkça kırılğan malzemenin kütle kaybı sünek malzemededen daha fazla olmuştur.

Y.I.Oka, H.Ohnogi, T.Hosokawa, M.Matsumura aşınma konusunda 325µm boyutlu silika kum parçacıklarıyla 3° den 90° ye kadar çarpma açılarında 130 m/s hıza kadar beş adet metalik, bir adet seramik, bir adet plastik malzeme üzerinde belirtilen parametrelerle deneyler yapmıştır. Yaptıkları deneylerde partikül hızı 50-130 m/s arasında değiştirilmiş, nozul çapı değiştirilerek partikül debisi artırılmış buna rağmen 20° den daha düşük açılarda diğer parametreler ne kadar artırılsa da numunelerin erozyon davranışlarında kayda değer bir değişiklik olmadığı tespit edilmiştir [23].

Md. Aminul Islam Zoheir N.Farhat eriyik alüminyum oksitle APIX42 çeliği üzerinde deneyler yapmıştır. Çalışma parametreleri partikül debisi 160g/min, partikül hızları 36m/s, 47m/s, 56m/s, 81m/s ve partikül çarpma açıları 30°, 45°, 60° ve 90° olarak belirlenmiştir. Yaptıkları testler sonucunda düşük partikül hızlarında darbe açısıyla erozyonun ters orantılı olduğunu gözlemlemişlerdir [24].

Erozyon aşınmasındaki kütle kaybı çarpma açısının bir fonksiyonu olarak ölçüldüğünde sünek ve kırılğan malzemeler farklı özellikler göstermektedir. Sünek malzemelerin karakteristik özelliği düşük çarpma açılarında (15°-30°) maksimum erozyon göstermeleridir. Kırılğan malzemeler maksimum erozyon davranışını normal çarpma açılarında (90°) gösterirler. Fiber takviyeli kompozitler, maksimum erozyonun 45°-60° çarpma açıları arasında ortaya çıktığı yarı-sünek davranış gösterirler [25].

3.3.3. Aşındırıcı partiküllerin boyutu

Bir cismin boyutlarının artması üzerinde taşıyabileceği kinetik enerji miktarını arttırmaktadır. Katı partikül erozyonunda aşındırıcı partiküllerin boyutlarının artması erozyon oluşturma ihtimalini artırır fakat bu artış lineer olmayıp başta hedef malzemenin özellikleri olmak üzere diğer parametrelere de bağlıdır. Hedef malzemenin sünek, gevrek veya yarı-sünek olması partikül boyutunun etkilerini önemli ölçüde değiştirmektedir.

G. Sundararajan, D.P. Mondal, M. Dündar yaptıkları çalışmada pirinç-bakır alaşımından oluşan sünek bir malzeme üzerinde partikül boyutunun erozyon oranına etkisini incelemişlerdir. Boyutları 5-25µm arasında olan silika aşındırıcılar kullanılmış, sonuçlar SEM ve AFM analizleriyle incelenmiştir. Başlangıçta partikül boyutu arttırıldıkça erozyon oranı artmıştır. Partikül boyutu bir eşik değerine ulaştıktan sonra boyut artışının erozyona etki etmediği görülmüştür [26].

V.B.Nguyen, Q.B.Nguyen, Y.W.Zhang, C.Y.H.Lim, B.C.Khoo yaptıkları çalışmalarda içinde kum partikülleri bulunan suyu 30m/s sabit hızla hareket ettirmiş. Parçacık boyutlarını 50, 80, 150, 350, 450, 700 µm olarak belirlenmiş ve bu parametrelerle aşınma deneyi gerçekleştirmişlerdir. Daha küçük boyutlardaki partiküllerin akışkan hızına daha çabuk tepki verdiğini büyük partiküllerin geç hızlandığını belirlemişlerdir. Deneylerden sonra yüzey profilleri incelendiğinde partikül boyutları arttıkça yüzeyde oluşan erozyon miktarının arttığını belirlemişlerdir [27].

3.3.4. Aşındırıcı partiküllerin kütleli debisi

Hedef malzemeye temas eden aynı fiziksel özelliklere sahip her bir aşındırıcı partikülün deney ortamında aynı etkiyi yaptığı düşünülür. Malzeme servis esnasındayken bu etkiler deney ortamından farklı olur. Aşındırıcı partiküller hedef malzemeye ulaşmadan ve ulaştıktan sonra birbirlerini etkilerler. Hedef malzemeye doğru ilerleyen iki partikülden arkadaki öndekine çarptığında kinetik enerjisinin bir kısmını öndekine aktarır bunun sonucu olarak arkadaki partikül yavaşlar öndeki hızlanır. Buna benzer bir etki partiküller hedef malzemeye çarptıktan sonra da görülür. Hedef malzemeye çarpıp geriye dönen bir partikül henüz hedef malzemeye ulaşmamış partiküllere çarparak hızlarının düşmesine belki de hedef malzemeye hiç ulaşamamalarına sebep olur.

Bu etkilerden dolayı partiküllerin kütleli debisi erozyona etki eden faktörler arasında kabul edilmiştir. Partikül debisi birim zamanda hedef malzeme üzerindeki birim alana çarpan partiküllerin toplam külesidir. Partikül debisi değişimi birincil bir etken olmayıp partikül boyutunun büyümesi, nozul çapının genişletilmesi, hızın veya akışın artması vb. parametlerin değişmesi sonucu ortaya çıkar.

Anand K, Hovis S. K, Conrad H, Scattergood R.O. yaptıkları çalışmada partikül debisinin erozyona olan etkilerini incelemiş, geliştirdikleri parçacık çarpışma modelinde başlangıçta debi artışının erozyonu arttırdığını ama kritik bir değerden sonra erozyon oranını arttırmadığını gözlemlemişlerdir. Bu kritik değerinde partikül boyutu, partikül hızı, partikül açısı ve aşınan malzemenin kırılma davranışı gibi diğer parametrelere bağlı olduğunu belirlemişlerdir [28].

3.3.5. Sıcaklık ve nem

Sıcaklık ve nem her zaman doğrusal orantılı artmasada çoğu durumda birbirlerini tetikleyen iki parametredir. Erozyona maruz kalan bir malzemenin sıcaklığı ve ortamın nemi erozyon davranışlarını değiştirir. Sıcaklığı artan bir malzeme genişir ve sünek bir özellik kazanır soğuyan bir malzeme ise büzülür ve kırılma artar. Nem beraberinde korozyonu getirdiğinden nemli ortamda uzun süre kalmış bir malzemenin erozyona uğrama ihtimali artar.

Oğuzhan GÜNGÖR, Sibel TAŞ, Nazif Deniz GÜLTEKİN, Uğur GÜNEŞ., Ahmet TÜRK yaptıkları çalışmada sıcaklığın erozyona etkisinin anlaşılması için partiküllerin ısıtılarak hedef malzemeye gönderilmesi için deney düzeneği oluşturmuş. Sıcaklık dayanımını iyi olması sebebiyle silisyum karbür aşındırıcı olarak kullanılmıştır [29]. Partiküllerin ısındığında genişmesi ve yumuşaması erozyon oranını azaltır. Partikül ve hedef malzeme arasındaki yüksek ısı farkı partiküllerin hedef malzemeye yapışmasına neden olabilir bu durumda kütle artışı gözlemlenebilir.

4. HİBRİT KOMPOZİTLERİN EROZYON DAVRANIŞLARIYLA İLGİLİ LİTERATÜR ÇALIŞMALARI

Hava araçlarında kullanılan yıldırımsavar hibrit kompozitler katı partikül erozyonuna etki eden bütün parametrelerden etkilenirler. Bir hava aracının farklı irtifalarda uçuşması, sıcak ve soğuk iklimlerde kullanılması, yüksek hızlarda hareket etmesi, sürekli manevra yapması katı partikül erozyonu parametrelerinin hepsinin ortaya çıkmasına neden olur. Hibrit kompozitler birden çok yapı elemanının biraraya gelmesiyle oluştuğundan çok çeşitli üretim bandına sahiptirler. Literatürdeki çalışmalar daha çok reçine esaslı ve metal matrisli hibrit kompozitlerle ilgilidir. Bu bölümde bu konuyla ilgili literatür çalışmalarına yer verilecektir.

Sandhyarani Biswas ve Prity Aniva Xess yaptıkları çalışmada doğal lif kullanımıyla elde edilen kompozitlerden bambu, cam elyaf kullanılarak üretilen epoksi reçine takviyeli hibrit kompozitlerin erozyon davranışlarını incelemişlerdir. Epoksi reçine olarak HY951 kullanılmış, 180x180x40 boyutlarında ahşap kalıplarda üretim yapılmıştır. Farklı oranlarda epoksi reçine kullanılarak 30C° de 24 saat bekleme süresi ile 50 kg yük altında sertleştirme işlemi yapılmıştır. Üretilen numunelere ASTM G76 standartlarına göre aşınma testleri uygulanmış, aşındırıcı olarak 125 µm boyutundaki silis kumu kullanılmıştır. Partikül hızı, partikül çarpma açısı, reçine oranı, sıcaklık ve nozul mesafesi olmak üzere beş farklı parametrenin erozyona olan etkileri incelenmiştir. Deneylerden sonra SEM analizleri yapılmıştır. Çarpma açısı olarak 60° lik açının maksimum erozyona sebep olduğu, malzemenin yarı sünek davranış gösterdiği gözlemlenmiştir. Reçine oranının artırılması kırılma davranışı ve erozyon oranını arttırmış, sıcaklık arttıkça sünek davranış ve erozyon artmıştır [30].

K.R.Padmavathia, Dr. R.Ramakrishnan metal matrisli hibrit kompozitlerle ilgili yaptıkları çalışmada 6061 serisi alüminyum, silisyum karbür ve carbon nanotüpten döküm yöntemiyle karıştırma işlemi yaparak üretilen kompozitleri incelemişlerdir. Elde edilen numuneler ASTM G95-99 standartlarına göre %55-65 nem ortamında, oda sıcaklığında aşınma deneylerine tabi tutmuşlardır. Deneyler sonucunda takviyeli

alüminyumun daha iyi aşınma direnci olduğu görülmüştür. Karbon nanotüp oranının artması aşınma oranının azalmasına sebep olmuştur [31].

Mehmet Bağcı, Hüseyin İmrek yaptıkları çalışmalarda borax, cam kumaş ve epoksi reçineden oluşan hibrit kompozitleri incelemişlerdir. Reçine oranının %15 i ve %30 oranında borax eklenerek iki farklı numune elde edilmiştir. Aşındırıcı olarak 200 µm ve 400 µm boyutlarında alümina kullanılmıştır. 23, 34, 53 m/s hızlarındaki partiküller, 30°, 60°90° çarpma açılarındaki iki farklı kumaş oryantasyonunda (0/90/0, 45/-45/45) üretilmiş numunelere erozif aşınma deney tasarımıyla püskürtülmüştür. Aşınma sonucu yüzey morfolojileri taramalı elektron mikroskobu ve x-ray yöntemi ile incelenmiştir. Deneyler sonuçlarının irdelenmesiyle 30° lik çarpma açısında maksimum erozyon oranına ulaşılmış ve malzemenin sünek yapıda olduğu görülmüştür. 45/-45/45 yönlü kumaşla üretilen test numuneleri 0/90/0 yönlü kumaşla üretilenden daha iyi aşınma direnci göstermiştir. Borax eklenmemiş numunelerin aşınma oranı reçine oranının %15 i borax eklenmiş numunelerin aşınma oranından daha düşük olduğu fakat borax oranı artırılıp %30 a çıkarıldığında aşınma oranının azaldığı görülmüştür [32].

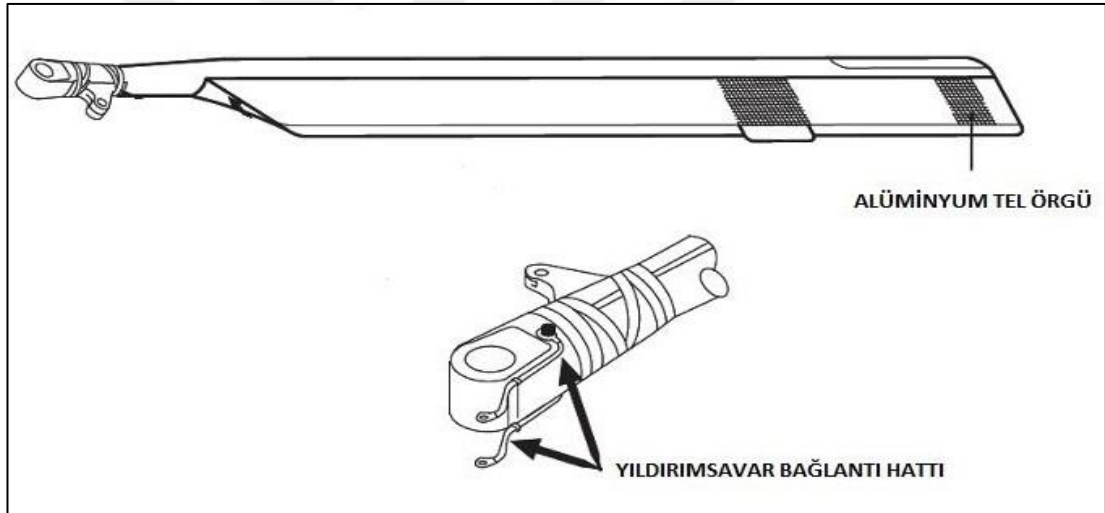
Kunkun Fua, Lin Yea, Li Changa, Chunhui Yangb, Zhong Zhang karbon fiber güçlendirilmiş kompozitlerle ilgili yaptıkları çalışmalarda FE(termal-elektrik sonlu elemanlar) modeliyle iletkenlik testleri yapmışlardır. Testler önce yıldırım simülasyonu uygulanmamış numunelere ve daha sonra yıldırım simülasyonu uygulanmış numunelere uygulanmıştır. Deneyler sonucunda cam elyaf yönünde iletkenliğin daha iyi olduğu, kraterin genişliği ve derinliği arttıkça iletkenliğin azaldığı tespit edilmiştir.

Qi Donga, Yunli Guoa, Jingliang Chenb, Xueling Yaob, Xiaosu Yic, Lu Pinga, Yuxi Ji yaptıkları deneysel çalışmalarda karbon fiber takviyeli polimer kompozitlerin yıldırım esnasındaki davranışlarının anlaşılması için yaptıkları çalışmalarda Boeing ve Airbus model uçaklarda kullanılan hibrit kompozitleri incelemişlerdir. Yıldırım sonucu oluşan hasar mekanizmaları ultrasonik test yöntemi ile gözlemlenmiştir. Uygulanan yük 20Ka ve 30 Ka iken oluşan çukur ve tümsek hasar mekanizmaları benzer iken 40Ka eşik değeri olarak ölçülmüş hasar mekanizmalarının arttığı görülmüştür. İletkenlik artışı hasar mekanizmalarını azaltmıştır.

5. YILDIRIMSAVAR HİBRİT KOMPOZİTLER

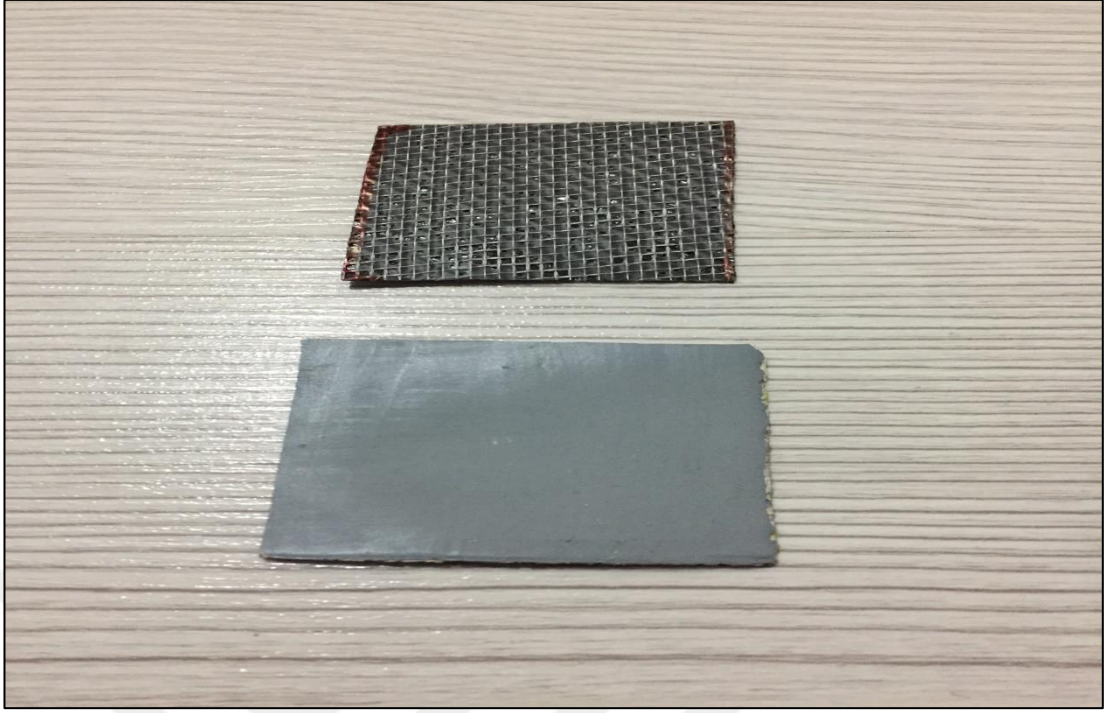
5.1. Kullanım Amacı ve Yerleri

Aşırı yükleme, yıldırım gibi durumlarda elektrik yükünün gövde üzerinde birikmeyip hava aracını terk etmesi için iletkenliğin yeterli seviyede olması gerekir. Hava araçlarının en önemli yapı malzemesi olan kompozitlere tel örgü eklenmesiyle üretilen yıldırımsavar hibrit kompozitler gövde iletkenliğini artırarak oluşacak hasarların önüne geçer. Helikopterlerde pallerin uç kısımlarında, uçaklarda en çok yıldırıma maruz kalan radome olarak adlandırılan burun kompartımanı bölgesinde, İHALarda ise gövde komponentlerinde sıklıkla kullanılmaktadır.



Şekil 5.1. Helikopter pallerinde alüminyum tel örgü

Tel örgü malzemesi hava aracının dış yüzeyine ne kadar yakın olursa yükün dağılımı o derece kolaylaşır yıldırımın zararlı etkileri en aza indirgenmiş olur. Bu yüzden bu kompozitler üzerlerine gerekli olduğu takdirde ince bir macun sonrasında astar ve son kat olarak boya atılarak hava aracının dış yüzeyine yakın yerlerde kullanılırlar. Bu kompozitler gövde içerisinde yer aldıklarından hava aracına diğer sistemler yüklenmeden yapıya dahil edilmelidir.



Şekil 5.2. Boyasız(üstte) ve boyalı(alta) numuneler

5.2. Üretiminde Kullanılan Materyaller

1. Karbon Fiber Kumaş
2. Epoxy Reçine ve Sertleştirici
3. Alüminyum Tel Örgü
4. Macun
5. Astar ve Boya

5.2.1. Karbon fiber kumaş özellikleri

Karbon fiber kumaş farklı örgü biçimleri, üretimden sonra esnek olması, hafiflik ve dayanıklılık özelliklerinden dolayı sıklıkla kompozit üretiminde kullanılırlar.

Bu çalışmada üretim aşamalarında kullanılan kumaşın ağırlığı 300gr/m^2 dir. Hava araçlarında da sıklıkla kullanıldığı için $+45/-45$ çift eksenli fiber oryantasyon tercih edilmiştir. Karbon fiber kumaşın kalınlığı $0,3\text{ mm}$ ($\pm\%15$) boyutundadır.



Şekil 5.3 Karbonfiber kumaş

5.2.2. Epoksi reçine ve sertleştirici özellikleri

Epoksi ısıtıldığında veya vakumla kurumaya bırakıldığında sertleşen kimyasal bir reçinedir. Epoksinin yapıştırıcı görevi yapabilmesi için sertleştiriciyle kimyasal reaksiyona girmesi gerekmektedir. Bu sertleştiriciler epoksi reçineye belli ağırlık oranlarında karıştırılır ve kimyasal reaksiyonun oluşması için katalizör görevi görür.

Epoksi, yüzey kaplamalarında, deniz vasıtalarında, hava araçlarında, inşaat sektöründe yaygın olarak kullanılmaktadır. Epoksilerin bu kadar yaygın kullanılmasının sebebi sahip oldukları ısı ve nem direnci, kimyasala karşı direnç ve mekanik direncinin istenen seviyede olması ve raf ömrünün diğer kimyasal yapıştırıcılara göre daha uzun olmasıdır.



Şekil 5.4. MGS L 285 epoksi ve sertleştirici

Bu çalışmada epoksi reçine olarak MGS L 285 kullanılmıştır. Bu epoksinin imalatçı firma tarafından belirtilen özellikleri Tablo 5.1’de verilmiştir.

Tablo 5.1. MGS L 285 epoksi reçine özellikleri

Sertifika	Alman Havacılık Kurumu
Kullanım Alanları	Gövde Yapıları, Uçak, İHA, Model Hava Araçları
Servis Sıcaklığı	-60°C / +50°C Isıl İşlem Uygulanmadan -60°C / +80°C Isıl İşlem Uygulanırsa
Uygulama Sıcaklığı	+10°C / +50°C
Özellikler	Yüksek dayanıklılık ve uyum İyi mekanik ve termal özellikler
Raf Ömrü	24 ay (Açılmamış Paket)

Bu çalışmada sertleştirici olarak MGS H 285 kullanılmıştır. Bu sertleştiricinin imalatçı firma tarafından açıklanan özellikleri Tablo 5.2’de belirtilmiştir.

Tablo 5.2. MGS H 285 sertleştirici özellikleri

Yoğunluk (gr/cm ³)	0,94 – 0,97
Akışkanlık (mPas)	50-100
Asitlik değeri (mgr KOH/gr)	480-550
Işık geçirgenliği	1,5020 – 1,5500
Ölçüm sıcaklığı	25 °C

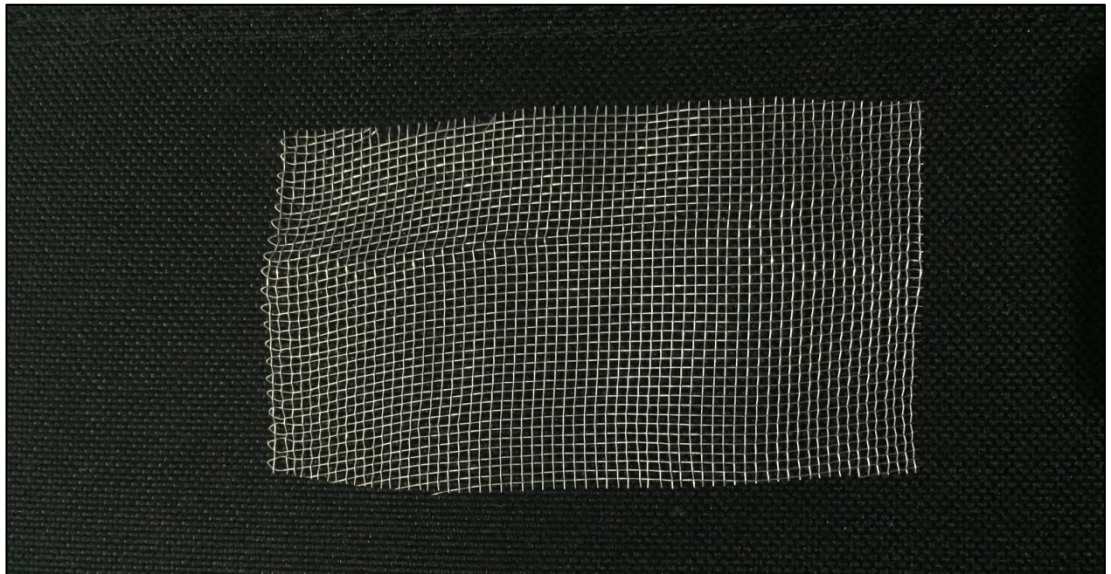
5.2.3. Alüminyum tel örgü özellikleri

Bu tez çalışmasında kullanılan alüminyum tel örgü malzemesi 5000 serisi olarak adlandırılan içerisinde magnezyum bulunan özellikle deniz korozyonuna karşı etkili alüminyum alaşımdan üretilmiştir. Bu özelliklerinden dolayı gemilerde ve deniz üstü düşük irtifada uçan hava araçlarında tercih edilirler. İletkenlik olarak üst seviyede olmaları sebebiyle de kompozit üretiminde yıldırımsavar olarak kullanılmaktadırlar.

Tez çalışmasında kullanılan alüminyum tel örgü 0,25mm kalınlığında 1mm/1mm kare oryantasyonunda ve 110 gr/m² ağırlığındadır.

Tablo 5.3. 5052 serisi alüminyum alaşım içerik yüzdeleri

Alaşım	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Alüminyum
5052	0,25	0,40	0,10	0,10	2,2-2,8	0,15-0,35	0,10	96,3



Şekil 5.5. Alüminyum tel örgü

5.2.4. Macun özellikleri

Bu çalışmada kullanılan macun Akripol Poly GA olup bir genel maksat macunudur. Sertleştirici ile beraber kullanılmaktadır. Yüzey pürüzlülüğünü azaltmak ve aerodinamik yapıya katkı sağlamak amacıyla kullanılır. Macunun üretici firma tarafından deklare edilen fiziksel özellikleri Tablo 5.4'te belirtilmiştir.



Şekil 5.6. Macun ve sertleştirici

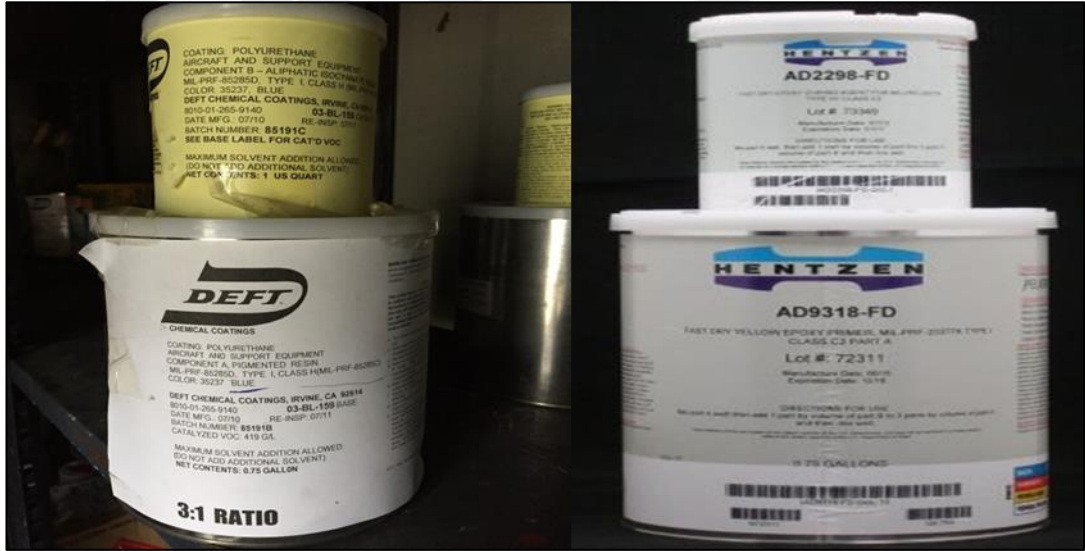
Tablo 5.4. Macun özellikleri

Görünüş	Sıvı şekilde
Renk	Sarı
Kaynama noktası	145°C
Parlama noktası	32°C
Tutuşma sıcaklığı	480°C
Sertleştirici/Macun Oranı	2/100
Kuruma Süresi:	15-20 dk/20 °C 10 dk/40 °C

5.2.5. Astar ve boya özellikleri

Astar 23377 kodlu epoksi astardır. Çift karışımlı bir astar olup karışım oranı 1 birim katalizör 3 birim boya şeklindedir. Hızlı kuruyan, sarı renkte bir astar olup raf ömrü 18 aydır. Alüminyum, kompozit, fiberglass, ve paslanmaz çelik yüzeylerde kullanılmaktadır.

Boya 85285D kodlu poliüretan boyadır. Çift karışımlı bir boya olup karışım oranı 1 birim katalizör 3 birim boya şeklindedir. Saklama koşulları 10-29 °C sıcaklık aralığında olup raf ömrü 12 aydır. Güneş ışığı dayanımının yüksek olması, mekanik ve kimyasal direncinin yüksek olması ve elastiki yapıda olması önemli özellikleridir. Deniz tuzuna karşı korozyon direnci özelliği sebebiyle deniz üstü uçan helikopter, uçak ve insansız hava araçlarında sıklıkla tercih edilmektedir.



Şekil 5.7. Boya(solda), astar(sağda)

5.3. Üretim Aşamaları

Yıldırımsavar hibrit kompozitler üretilirken malzemenin homojen olması tel örgünün karbon kumaşla bileşiminin iletkenliği bozmayacak şekilde olması gerekir. Kompozit yapısındaki bir boşluk veya kırılma iletkenliği azaltır ve yıldırım anında hasara sebep olabilir.



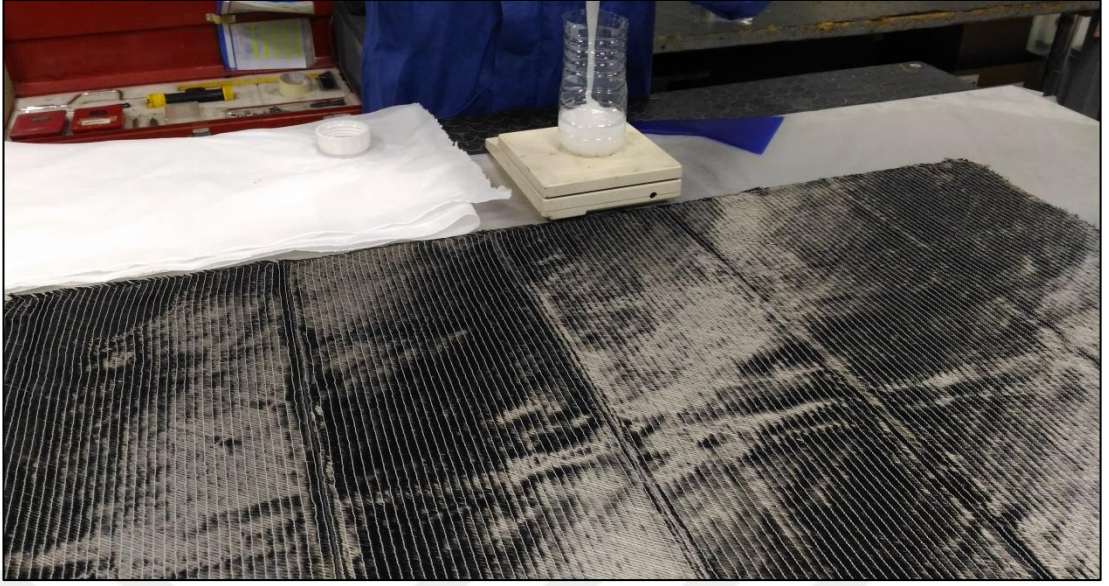
Şekil 5.8. Üretime hazır karbonfiber kumaş ve alüminyum tel örgü

Vakumlama tekniği bu kompozitler üretilirken sıklıkla kullanılan bir yöntemdir. Hedef numuneler elde edilirken bu yöntem uygulanmıştır. Vakum basıncı $22 (\pm 2)$ PSI olup bekleme süresi 24 saattir. Vakumlama işlemi oda sıcaklığında yapılmıştır. Vakum süresince epoksi reçine katalizör etkisiyle kurumakta vakumun etkisiyle karbon fiber kumaş ve alüminyum tel örgü birbirine sıkıca yapışmaktadır.



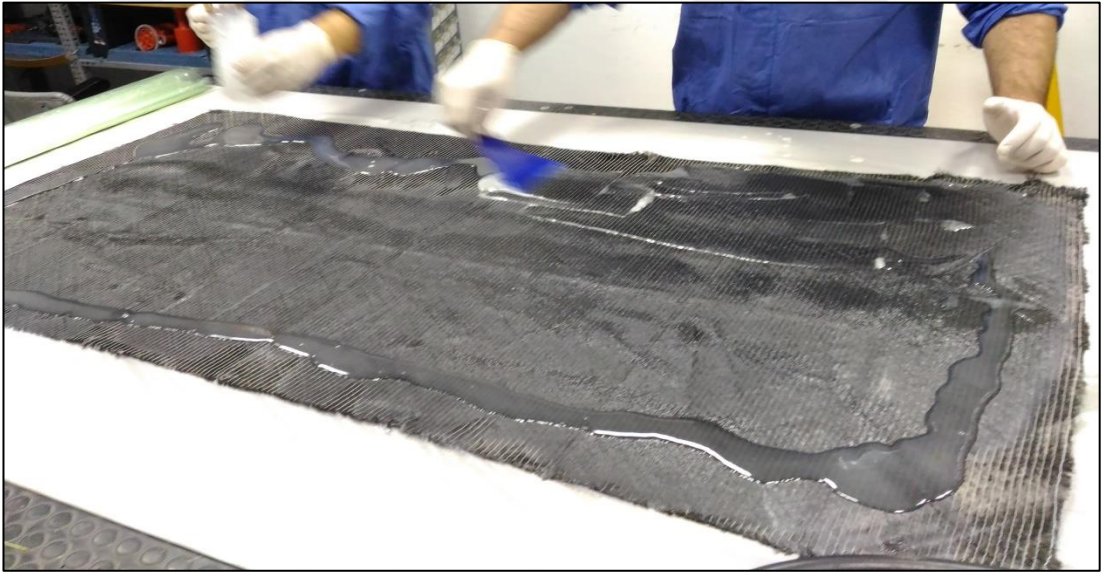
Şekil 5.9. Üretimde kullanılan vakum pompası

İlk olarak epoksi reçine hazırlanır bu hazırlık aşamasında dikkat edilmesi gereken karışım oranıdır. Hangi oranda reçine ve sertleştirici konulması gerektiği fabrika verilerine bakılarak dikkatlice tespit edilmelidir. Bu oranda hata yapılırsa reçine istenilen yapıştırma özelliğinde olmaz bu da kompozit yapısında bozukluklara sebep olur. Bu çalışmada sertleştirici/reçine oranı 1/2 olarak tespit edilmiştir.



Şekil 5.10. Hassas terazi ile reçine ve sertleştirici karışımının hazırlanması

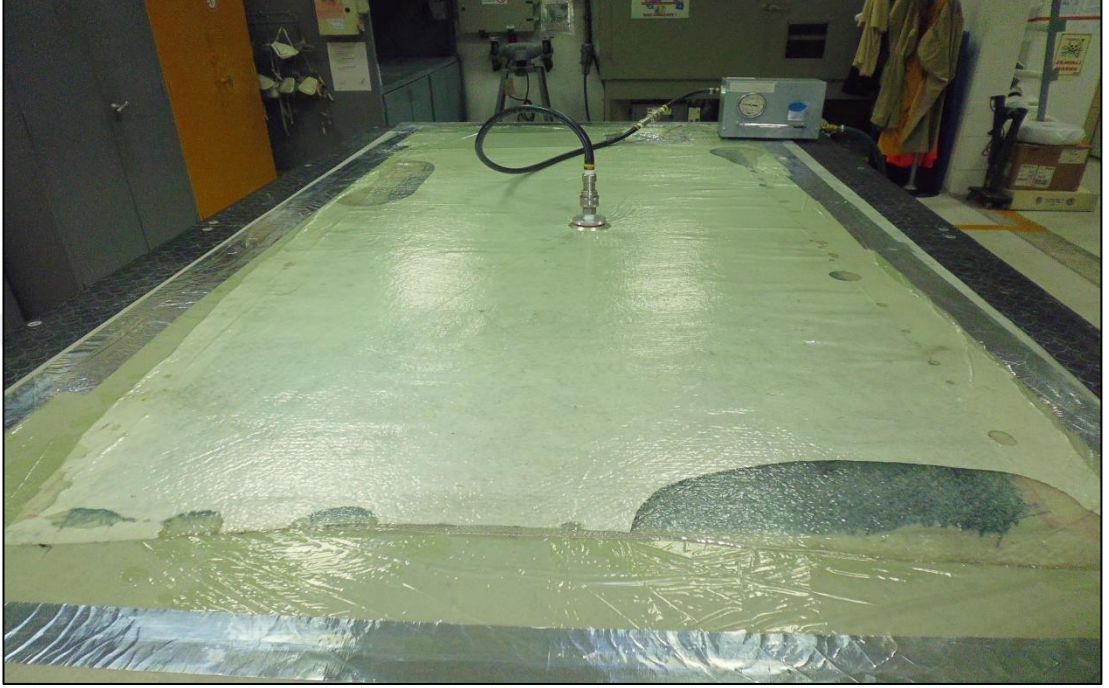
Daha sonra uygun şekilde hazırlanmış reçine karbonfiber kumaş üzerine yayılarak iyice emmesi sağlanır. Bu aşamada reçinenin kumaşın her bölgesine homojen olarak dağıldığından ve kumaşın reçineyi tamamen emdiğinden emin olunmalıdır.



Şekil 5.11. Reçine emdirme işlemi

Alüminyum tel örgü en alta yerleştirilir üzerine reçine emdirilmiş karbon fiber kumaş konulur bu şekilde hedef malzeme vakumlama işlemine hazırdır. Vakumlama işlemine başlamadan dikkat edilmesi gereken husus vakumlanacak bölgede sızdırmazlığın sağlanmış olmasıdır. Bu sızdırmazlık numunenin etrafını naylon ile kaplayarak ve yapışkan bantla etrafını sararak sağlanmıştır. Sızdırmazlık

sağlandıktan sonra vakum pompasını bağlamak için bir noktadan delik açılır ve pompanın nozul kısmı içerde kalacak şekilde bağlantı noktası tekrar kapatılır. Bu şekilde vakum işlemi başlatılır, basınç ve sızdırmazlık hedef malzemenin istenen seviyede yapışması için sıklıkla kontrol edilir.



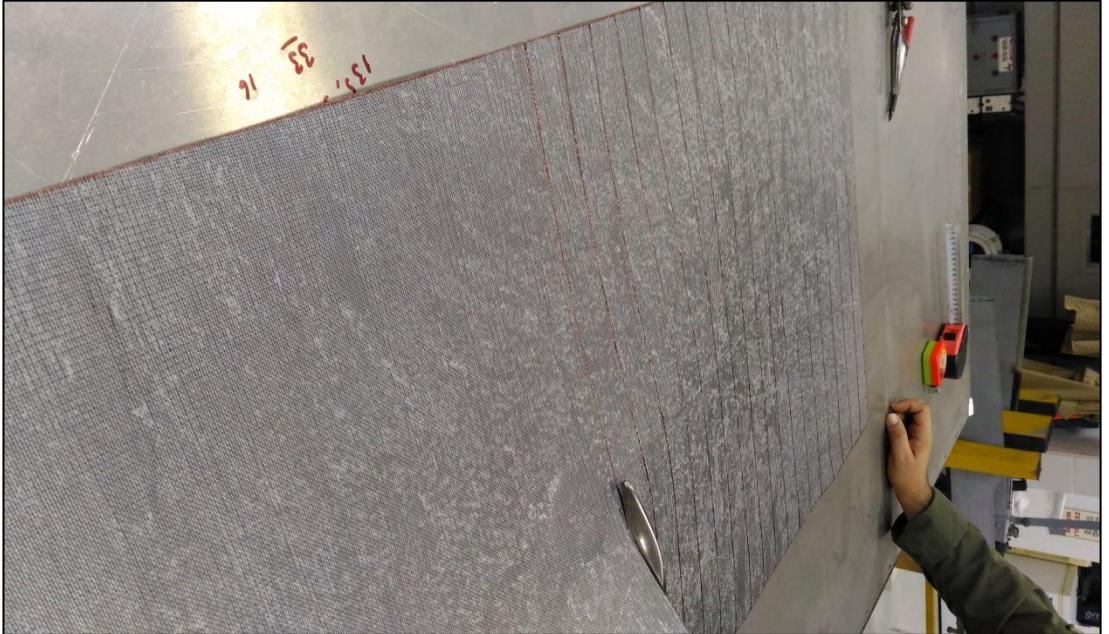
Şekil 5.12. Vakum İşlemi

Vakum işlemi devam ederken malzemenin tam homojen olarak üretilmesi için vakuma ek olarak malzeme üzerine plakalar yerleştirilmiş ve bu plakaların üstüne ağırlıklar konulmuştur. Bu vakum işlemini destekleyici ve üretim kalitesini yükselten bir işlemdir.



Şekil 5.13. Ağırlık plakaları

24 saat bekleme süresi sonunda vakum işlemi tamamlanır ağırlık plakaları ve sızdırmaz bantlar alınarak üretimi yapılan malzeme gözle kontrol edilir. Üretim sonunda kenar ve köşelerdeki birleşme noktaları tekrar kontrol edilir.



Şekil 5.14.Üretimi tamamlanmış kompozit levha

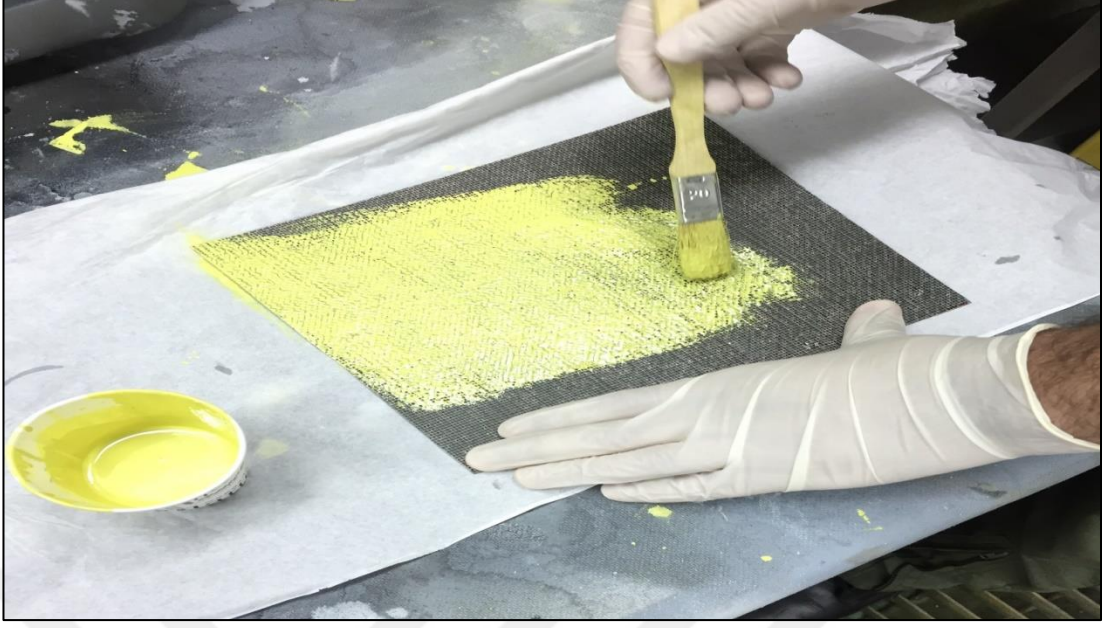
Üretimi tamamlanan kompozitler gövde üzerine yerleştirildikten sonra sırasıyla gerekirse macun sonrasında astar ve boya işlemine tabi tutulur.

Macun hazırlanırken sertleştirici/macun oranı bu çalışmada üretici firma verilerine göre 2/100 olarak ayarlanmıştır. Macun uygulaması özellikle kompozite şekil verilmesi gereken radome gibi eğimli kısımlarda aerodinamik yapıyı bozmamak için uygulanır. Macun kompozit için bir kat daha koruma sağlamakta ve kompozit yapıyı güçlendirmektedir. Macun uygulamasından sonra yüzey pürüzlülüğünü azaltmak amacıyla zımpara işlemi uygulanır.



Şekil 5.15. Macun uygulama işlemi

Macun uygulamasından sonra astar işlemi uygulanır. Boyanın yüzeye düzgün şekilde yapışması için astar işlemi gereklidir. Astar işlemi bir ara işlemdir.



Şekil 5.16. Astar uygulama işlemi

Boya işlemi astardan sonra son işlem olarak uygulanır. Boya işleminin daha iyi olması için 50C° de 2 saat süreyle fırınlama işlemi yapılmıştır. Boya kompozitin aşınma ve korozyon direncini artırır ve servis ömrünün uzamasını sağlar.



Şekil 5.17. Boyalı numune fırınlama işlemi

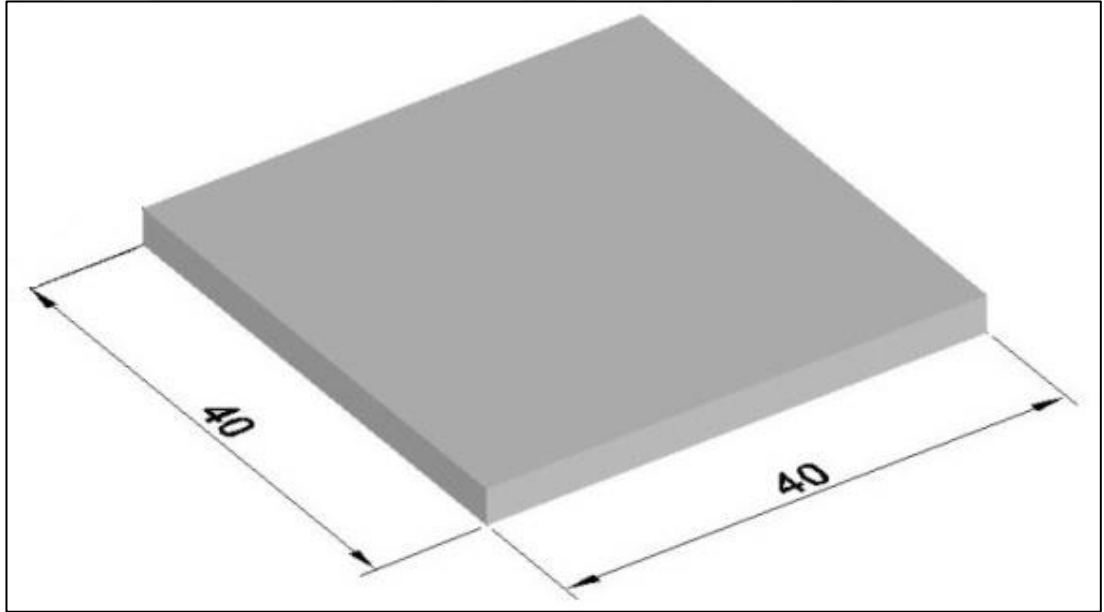
Üretimi tamamlanmış olan hibrit kompozitler hava araçlarında kullanılacakları bölgelere yerleştirilir ve hava aracı servise hazır olur.

Uçuşun başlamasıyla birlikte bu kompozitler bazı etkilere maruz kalırlar. Katı partikül erozyonu bu etkilerden en çok karşılaşılanlardan biridir. Ortalama bir yolcu uçağının hızının saatte 800 km olduğu düşünülürse partikül çarpma hızı, uçağın manevra yaptığı düşünülürse partikül çarpma açısı, özellikle iniş kalkış esnasında oluşan yabancı madde hasarları düşünüldüğünde katı partikül erozyonuna sebep olan parametrelerin ortaya çıktığı görülür.



6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Deneysel aşamalarda kullanılan hibrit kompozit numuneleri hazır alınmamış bu çalışma kapsamında üretimleri yapılmıştır. Üretimde kullanılan alüminyum tel örgü, reçine, karbonfiber kumaş, astar, macun ve boya özellikleri bölüm 5.'de gösterilmiştir. Plakalar halinde yapılan üretimden 40mm x 40mm numuneler kesilerek deneyler yapılmıştır. Numune kalınlığı macun astar veya boya uygulanmasına göre değişkenlik göstermektedir.



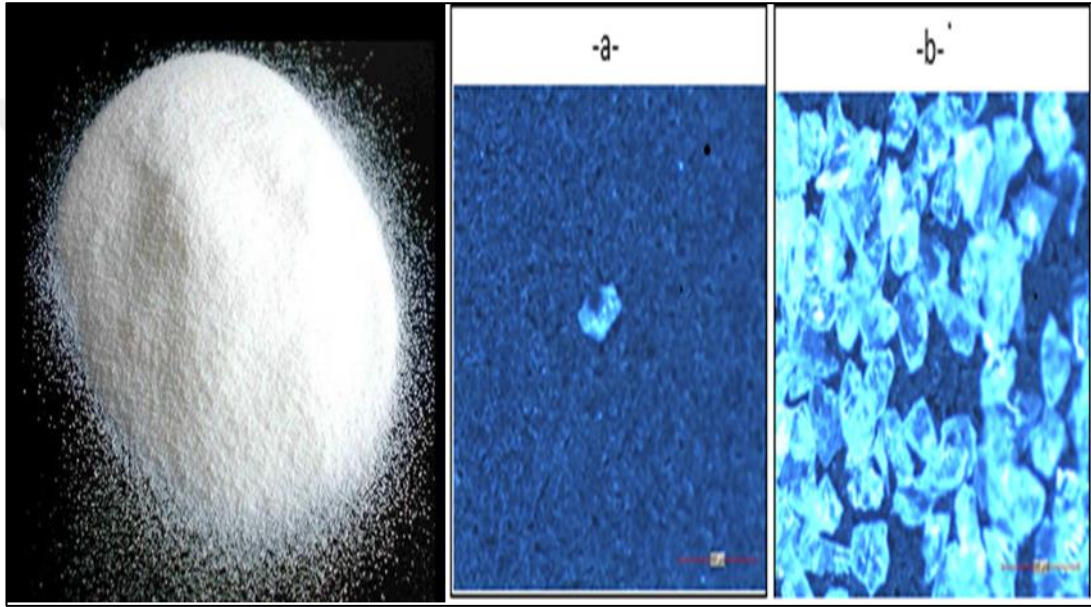
Şekil 6.1. Hibrit kompozit numune boyutları

6.1. Aşındırıcı Partiküllerin Özellikleri

Aşınma deneylerinde aşındırıcı partikül olarak alümina kullanılmıştır. Partikül boyutu 80 mesh olarak belirlenmiştir. Köşeli ve sert ve keskin kenarlı yapısıyla sıklıkla aşınma deneylerinde kullanılmaktadır.

Tablo 6.1. Alümina aşındırıcının fiziksel özellikleri

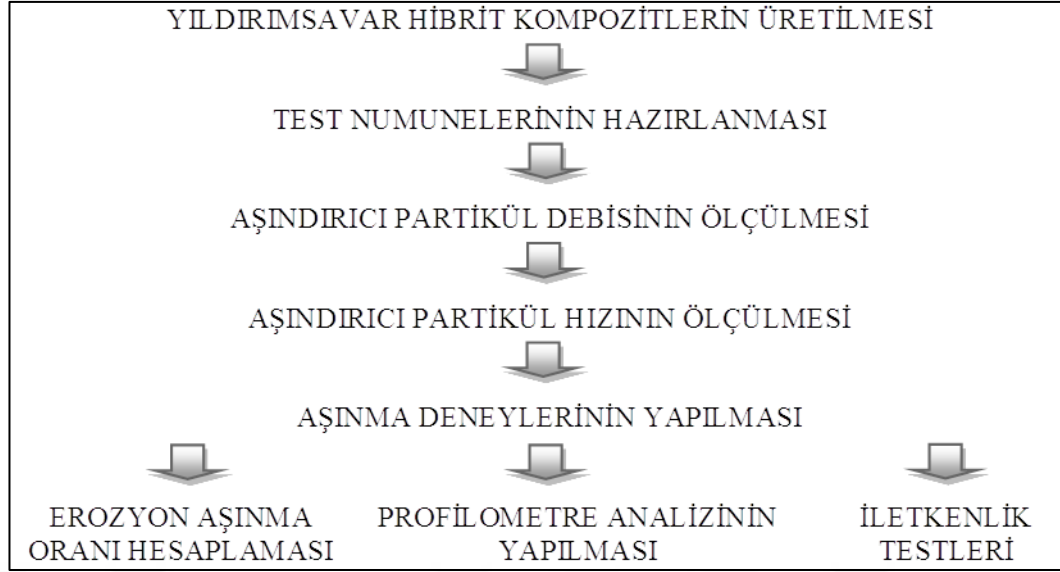
Kimyasal formül	Al ₂ O ₃
Molarkütle	101,96 g-mol ⁻¹
Yoğunluk	3,987 g / cm ³
Erime noktası	2,072 ° C (3,762 ° F; 2,345 K)
Kaynama noktası	2,977 ° C (5,391 ° F; 3,250 K)
Sudaki çözünürlük	Çözünmez
Koku	Kokusuz
Görünüm	Beyaz Katı
Boyut	80 Mesh-177 Micron



Şekil 6.2. Alümina numunesi ve elektron mikroskobu görüntüsü

6.2. Deney Yöntemi

Hibrit kompozitlerin üretimi tamamlandıktan sonra deney parametreleri belirlenmiştir. Partikül debisi ve hızı saptanmış aşınma deneyleri erozif aşınma için özel üretilmiş deney tasarımı ile ASTM G76 standartlarına göre yapılmıştır. Deney sırasında takip edilen aşamalar Şekil 6.3 de verilmiştir.



Şekil 6.3. Deney akış şeması

6.2.1. Aşındırıcı partikül debisinin ölçülmesi

Aşınma deneylerinde kullanılan alümina aşındırıcılar iki farklı basınçta (1, 5 ve 3 bar) püskürtülmüştür. Partiküller (5 ve 10 sn.) olmak üzere iki farklı sürede püskürtülmüştür. Bu parametreler sonucunda dört farklı debi ölçümü gerekmektedir. Debi ölçümlerinden elde edilen değerler, debi değişiminin hibrit kompozitlerde katı partikül erozyonuna etkilerini analiz etmek için kullanılmıştır. Nozuldan püskürtülen aşındırıcı partikül miktarının süreye oranı her bir parametre için debiyi vermektedir. Debi ölçümleri Tablo 6.2’de verilmiştir.

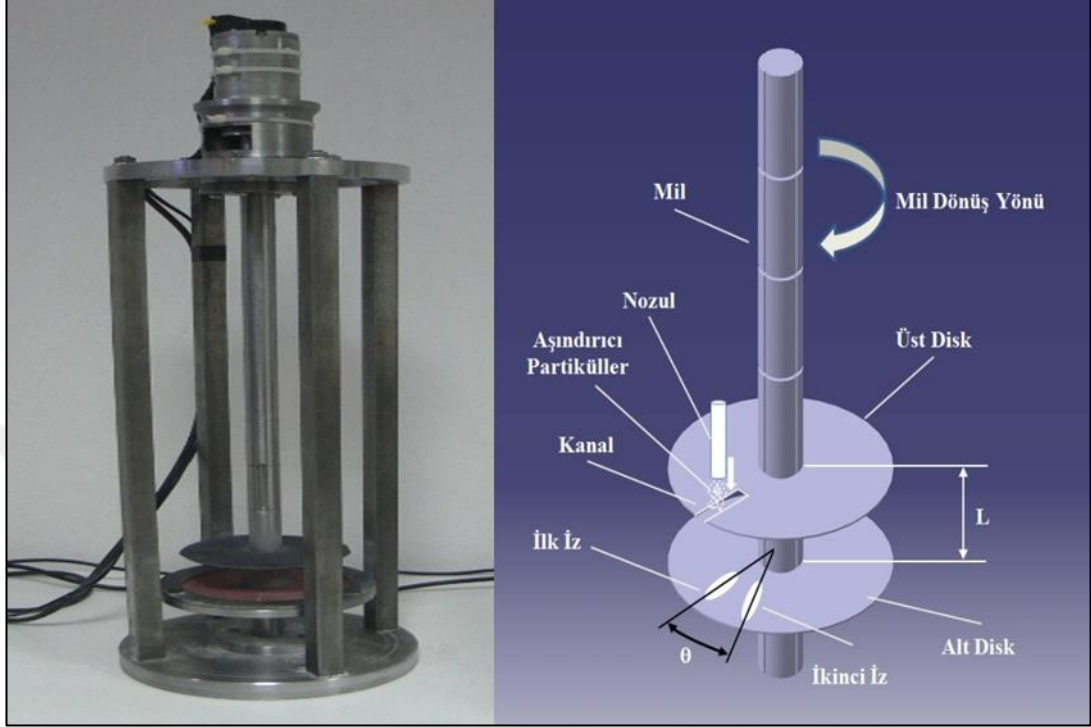
Tablo 6.2. Debi ölçümleri

Basınç	Süre	Partikül Miktarı	Debi
1, 5 bar	5 sn	50, 14 gr	10, 028 gr/sn
1, 5 bar	10sn	100, 36 gr	10, 036 gr/sn
3 bar	5sn	85, 20 gr	17, 040 gr/sn
3 bar	10sn	170, 55 gr	17, 055 gr/sn

6.2.2. Aşındırıcı partikül çarpma hızlarının çift disk yöntemi ile ölçülmesi

Aşındırıcı alümina partiküller 1, 5 ve 3 bar basınçla püskürtülmüş 2 farklı partikül hızı ortaya çıkmıştır. Partikül hızlarının ölçümü çift disk yöntemi ile

gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalar çift disk metodu için özel olarak üretilmiş cihaz ile yapılmıştır.



Şekil 6.4. Çift disk metodu cihazı [25]

İlk aşamada mil dönmüyorken dik açıyla aşındırıcı partiküller üst diskteki aralıktan alt diske yapıştırılan şeffaf disk numunelerine püskürtülür ve ilk iz oluşur. İkinci aşamada mil istenen devirde döndürülür, tekrar püskürtme işlemi yapılır ve ikinci iz oluşur. Bu şekilde ilk iz ve ikinci iz oluşuktan sonra hız hesaplama işlemi yapılır. Bu tez çalışmasında devir hızı 2000 rpm olarak ayarlanmıştır. Sürenin hesaplaması için θ açısının (ilk iz ile ikinci iz arasındaki açı)'nın bilinmesi gerekmektedir. Açı ölçümü yapılırken bu iki izin merkez noktaları esas alınır. Şeffaf disk numuneleri ortak bir merkeze göre konumlandırılır ve yüksek çözünürlükle taramaları yapılır. MB-Ruler açı ölçme programı ile θ açısı bulunur.



Şekil 6.5. 1.5 bar (solda), 3 bar (sağda) açı ölçüm diskleri

Yapılan ölçümler sonucunda 1,5 bar püskürtme basıncı için θ açısı $3,79^\circ$ olarak, 3 bar püskürtme basıncı için θ açısı $3,08^\circ$ olarak tespit edilmiştir.

Partiküllerin üst diskten alt diske ulaşma süresi aşağıdaki formülle hesaplanır.

t = partiküllerin üst diskten alt diske ulaşma süresi (s)

θ = İlk iz ile ikinci iz arasındaki açı ($^\circ$)

n = mil devir hızı (rpm)

$$t = \frac{60 \times \theta}{360 \times n} \quad (5.1)$$

θ açısı ve mil devir hızı bilindiğine göre t süresi hesaplanabilir. Bu çalışmada 1,5 bar püskürtme basıncı için t süresi; 0,000315 sn olarak 3 bar püskürtme basıncı için t süresi; 0,000256 sn olarak hesaplanmıştır.

V = partikül çarpma hızı ($m.s^{-1}$)

L = diskler arası mesafe (m)

t = partiküllerin üst diskten alt diske ulaşma süresi (s)

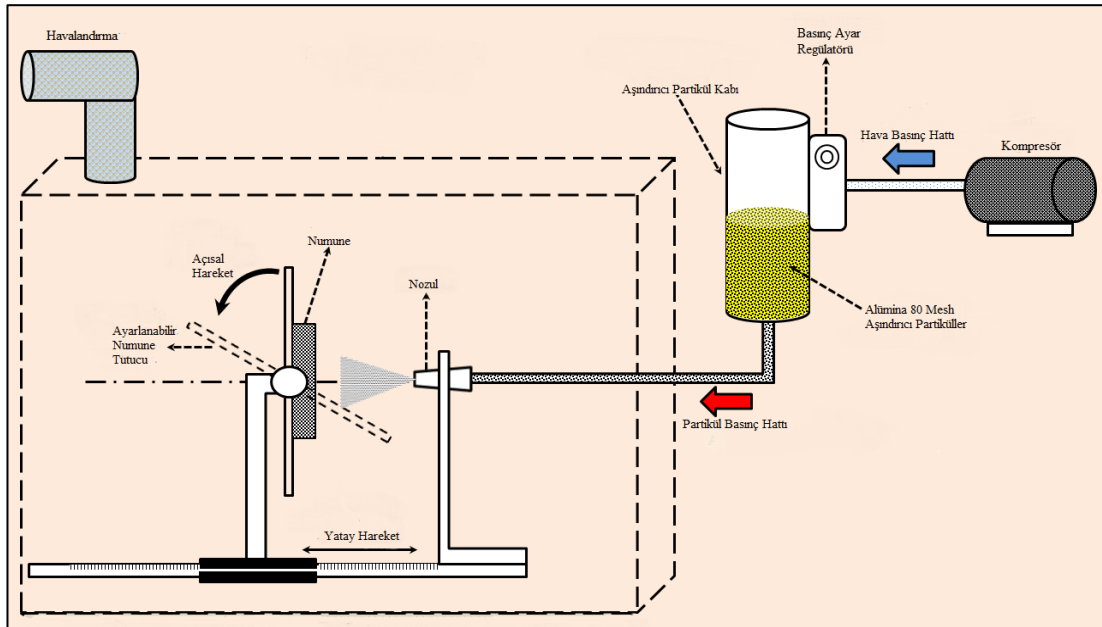
$$V = \frac{L}{t} \quad (5.2)$$

Alt ve üst disk arasındaki uzaklık 20 mm olarak ayarlanmıştır. Partikülün bu mesafeyi kat ettiği süre bilindiğine göre partikülün hızı bulunabilir. Bu çalışmada 1, 5 bar püskürtme basıncı için partikül hızı 63 m/s (226,8 km/h) olarak 3 bar püskürtme basıncı için partikül hızı 78 m/s (280,8 km/h) olarak ölçülmüştür.

6.2.3. Aşınma deneylerinin yapılması

Aşınma deneylerinde kullanılan erozif aşınma test düzeneği değişen parametreleri uygulayabilmek için özel olarak imal edilmiştir. Test düzeneği yapı elemanları; hava kompresörü, basınç ayar regülatörü, aşındırıcı partikül kabı, borular, püskürtme tabancası, nozul, ayarlanabilir numune tutucu ve dış kabinden oluşmaktadır. Püskürtme tabancasına dışarıdan bir ayak pedalı ile kumanda edilmektedir. İstenilen basıncı ayarlamak için dış kabin üzerinde bir basınç regülatörü mevcuttur.

Açıyla ilgili yapılacak çalışmalar içinse numunenin konulduğu açısı ayarlanabilir tutucu kullanılmıştır. Nozul ve numune arasındaki mesafe tutucunun yatay ekseninde yaptığı hareketle sağlanır. Bu tez çalışmasındaki tüm açı, hız ve basınç parametreleri bu cihazla boyasız ve boyalı olmak üzere toplam 48 numuneye uygulanmıştır.



Şekil 6.6. Katı partikül erozyonu test düzeneği

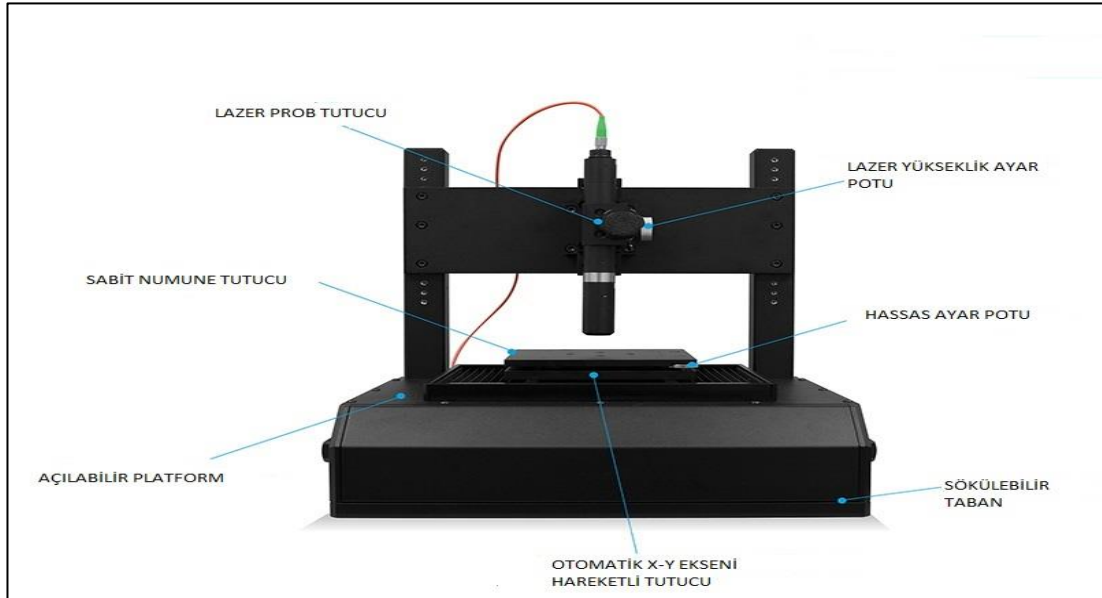
Aşınma deneyleri sırasında katı partikül erozyonuna etki eden ve test düzeneğinde uygulanan parametreler Tablo 6.3'te verilmiştir.

Tablo 6.3. Eroziyon aşınma deneylerinde kullanılan parametreler

Aşındırıcı türü	Alümina
Aşındırıcı Partikül Boyutları	80 mesh (150-212 mikron)
Partikül çarpma açısı	15°, 30°, 45°, 60°, 75°, 90°
Püskürtme basıncı	1, 5 bar, 3 bar
Partikül çarpma hızı	63, 492m/s , 78, 125m/s
Test sıcaklığı	25 °C
Nozul çapı	5 mm
Nozul uzunluğu	50 mm
Nozul – numune arası mesafe	20 mm

6.2.4. Profilometre ile yüzey analizinin yapılması

Aşınma deneylerinde farklı parametrelerle aşındırılan numunelerin yüzey morfolojilerini incelemek ve deneyler sonundaki değişimi gözlemlemek amacıyla profilometre cihazı ile yüzey analizi yapılmıştır. Bu tez çalışmasında boyasız ve boyalı numunelerin tamamı profilometre cihazı ile incelenmiştir. Profilometre cihazı ile yapılan ölçümlerde elde edilen 3 boyutlu grafikler hasar analizinin yapılmasını kolaylaştırmıştır.



Şekil 7.7. Nanovea PS50 optik profilometre cihazı

Tablo 6.4. Profilometre cihaz özellikleri

Tip	Masaüstü
X-Yekseni hareketi	50x50 mm otomatik
Z eksen hareketi	30 mm el ile
Maksimum X-Y eksen hızı	20mm/s
Boyutlar	38x33x43
Ağırlık	8 kg

6.2.5. Erozyon oranı hesaplaması

Erozyon aşınma oranı hesaplaması hibrit kompozitlerin değişen parametrelerle (hız, açı vb.) gösterdikleri aşınma davranışlarının karakterize edilmesi için gereklidir. Erozyon oranı hesaplaması yapılırken belli bir birim aşındırıcının malzeme üzerinde oluşturduğu kütle kaybı esas alınır.

Aynı ortamdaki iki numune aynı parametrelerle aşınmaya uğradığında numunelere temas eden partiküllerin toplam kütlesi birbirinden farklı olacağından bu iki numune arasında karşılaştırma yapıldığında elde edilen veriler doğru olmayacaktır. Erozyon aşınma oranı kütle kaybının (Δm) aşındırıcı partikül kütlesine bölünmesiyle hesaplanır.

$$E = \frac{\Delta m_s}{m_e} \quad (6.1)$$

E = Erozyon oranı

Δm_s = Numune kütle kaybı

m_e = Aşındırıcı partikül kütlesi

7. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

7.1. Kütlesel Debi, Partikül Hız Hesaplamaları ve Deneysel Parametreleri

Üretimi tamamlanmış hibrit kompozit numunelerine aşınma testleri uygulanmadan önce kütlesel debi ve partikül hızı hesabının yapılması kompozitin aşınma davranışlarının anlaşılması için gereklidir.

Debi ölçümü numuneye püskürtülen aşındırıcı partiküllerin toplam kütlesidir. Bu çalışmada 2 farklı basınç ve 2 farklı süre parametresi olduğundan 4 adet debi ölçümü yapılmış sonuçlar Tablo 6.2 de verilmiştir. Debi ölçümleri erozyon hesaplamaları için gereklidir. Hız hesaplamaları ise çift disk yöntemi ile yapılmış, alümina 80 mesh aşındırıcılar 2 farklı basınçta (1,5 bar ve 3 bar) püskürtüldüğünden 2 farklı partikül hızı ortaya çıkmıştır. Bu hızlar ve hesaplama yöntemi Bölüm 6.2.2’de anlatılmıştır.

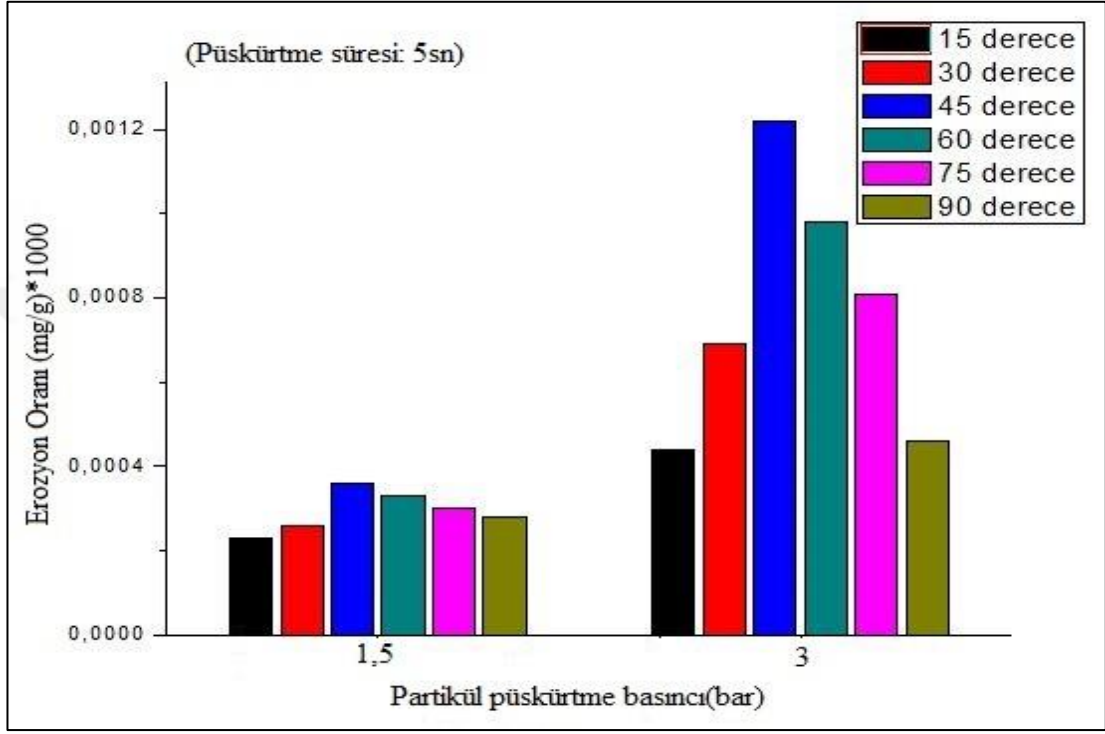
Debi ve hız hesaplamalarından sonra farklı parametrelerle aşınma deneyleri yapılmıştır. 2 farklı basınç parametresi, 6 farklı açı parametresi ve 2 farklı süre parametresi numunelere uygulanmıştır. Deneysel parametreleri Tablo 6.3’de verilmiştir. Boyasız ve boyalı numuneler boya etkisini görmek için aynı parametrelerle aşındırılmıştır.

7.2. Parametrelerin Erozyon Oranına Etkisi

Erozyon oranı hesaplaması değişen parametrelerin numuneler üzerindeki etkisinin analiz edilmesi için gereklidir. Erozyon oranı hesaplaması numunedeki kütle kaybı miktarının numuneye püskürtülen aşındırıcı partiküllerin toplam kütlesel debisine oranlanmasıyla bulunur. Hava aracı üzerinde kullanılan kompozitler macun, astar ve boya işlemine tabi tutulduğu için boyalı numuneler esas alınacak boya etkisi ayrı incelenecektir. Değişen her bir parametrenin erozyon oranına etkisi bu bölümde incelenecektir.

7.2.1. Partikül püskürtme basıncının erozyon oranına etkisi

1, 5 bar ve 3 bar olmak üzere iki farklı basınçla püskürtülen alümina aşındırıcılar ile püskürtme basınç değişiminin erozyon oranına etkisi incelenmiştir. Püskürtme basıncı erozyona etki eden en önemli parametre olarak ortaya çıkmıştır.

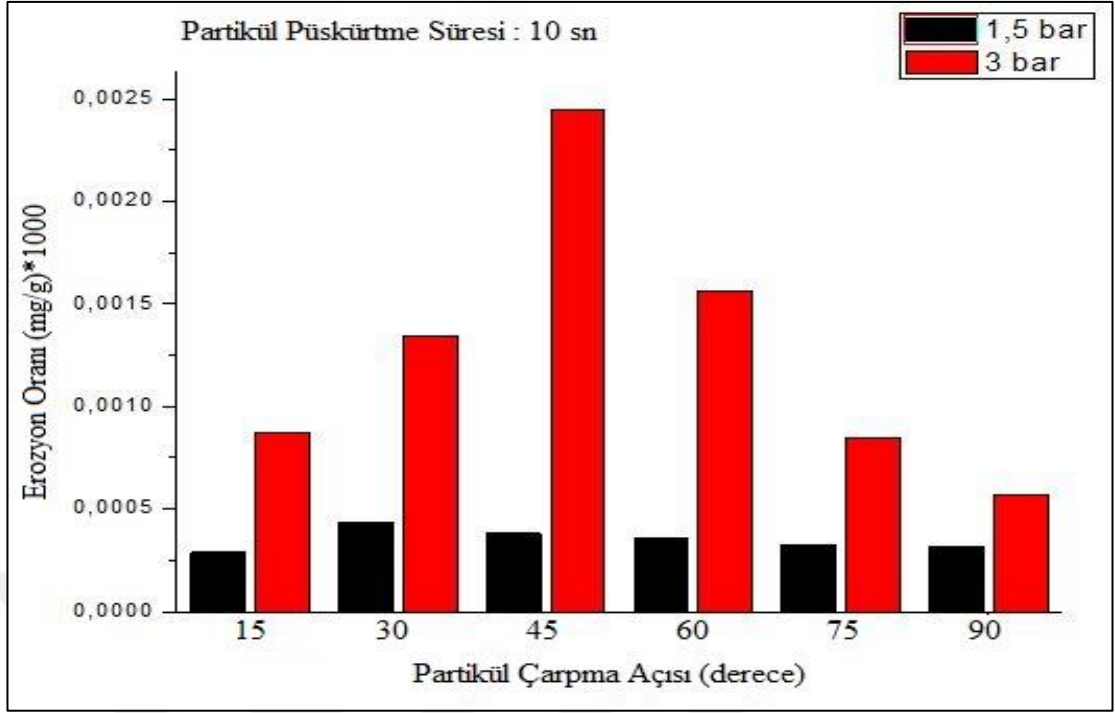


Şekil 7.1. Erozyon oranı-basınç grafiği

Erozyon oranı-basınç grafiği incelendiğinde 5 sn süreyle ve 6 farklı açıda 3 bar ve 1, 5 bar püskürtme basıncı ile aşındırılan numunelerin erozyon oranı karşılaştırılmıştır. 3 bar ile aşındırılan numunelerin tamamında erozyon oranı 1,5 bar ile aşındırılan numunelerin erozyon oranından fazla olduğu görülmüştür. Bütün açılarda basınç artışı aşınma oranını artırmıştır. 10 sn süreyle yapılan deneylerde de bu durum aynı şekildedir.

7.2.2. Açı değişiminin erozyon oranına etkisi

Farklı açılarla hedef numuneye ulaşan partiküllerin numune üzerindeki aşınma mekanizmaları birbirinden farklı olacaktır. Açının etkilerinin daha iyi anlaşılması için bu çalışmada 15°, 30°, 45°, 60°, 75°, 90° olmak üzere 6 farklı açıda aşınma deneyleri yapılmış açının erozyon oranına etkisi grafiklerle açıklanmıştır.

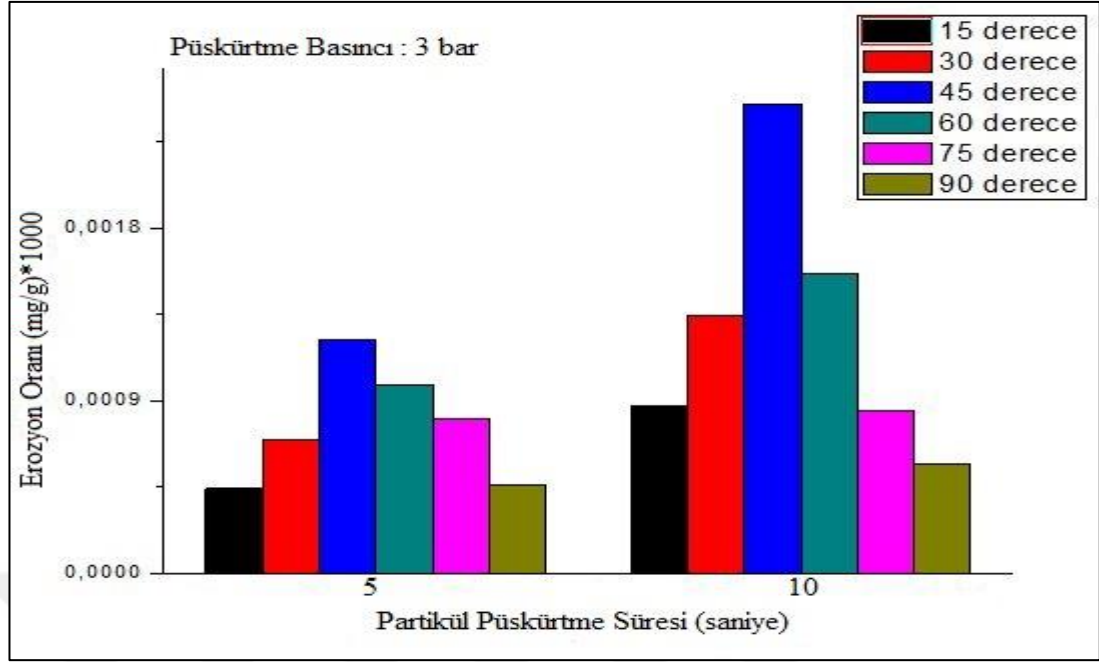


Şekil 7.2. Erozyon oranı-açı grafiği

Erozyon-açı grafiği incelendiğinde 3 barda yapılan aşınma deneylerinde 45° ye kadar erozyon oranı artmış sonrasında azalmaya başlamıştır. En yüksek erozyon oranı 45° de iken en düşük erozyon oranı 90°de görülmüştür. 1,5 bar ile yapılan deneylerde ise açı değişiminin erozyon oranına etkisi az olmuştur. En yüksek erozyon oranı 30° ve 45° açılarında görülmüştür. Boyalı numuneler üzerindeki macun, astar ve boyanın reçine ve tel örgüye göre yumuşak bir yapıda olması sebebiyle sünek erozyon davranışı görülmüştür.

7.2.3. Partikül püskürtme süresinin erozyon oranına etkisi

Deney aşamalarında uygulanan parametrelerden partikül püskürtme süresi 5 sn ve 10 sn olarak belirlenmiştir. Sürenin erozyon üzerindeki etkilerinin analizi için diğer parametreler sabitken süre değiştirilerek oluşan erozyon oranları karşılaştırılmıştır. Partikül püskürtme süresi numuneye püskürtülen partikül debisini direkt olarak etkilemekte süreyle birlikte debi de artmaktadır.

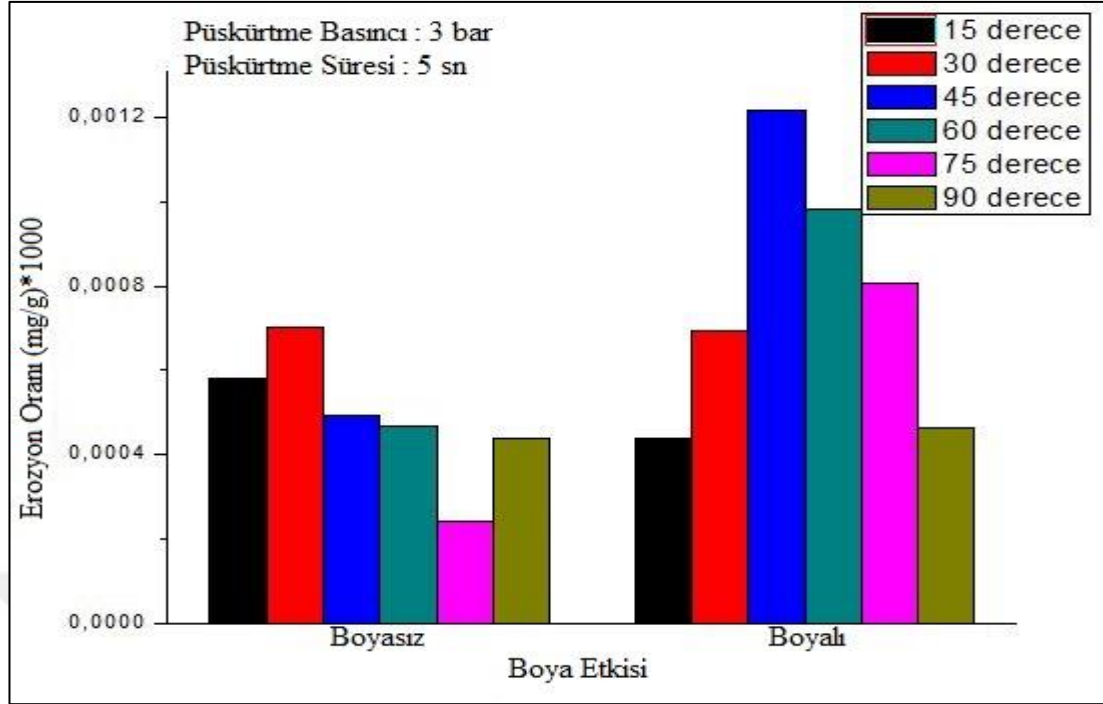


Şekil 7.3. Erozyon oranı-süre grafiği

Erozyon oranı-süre grafiği incelendiğinde 3 bar basınçta yapılan aşınma deneylerinde süre artışının 6 farklı açıda da erozyon oranını artırdığı görülmüştür. 15°, 30°, 45°, 60° açılarında erozyon oranı artışı yüksek seviyede iken 75°, 90° açılarında artış oranı düşük seviyededir.

7.2.4. Macun, astar ve boya işleminin erozyon oranına etkisi

Üretimi tamamlanmış hibrit kompozit numuneleri kullanılacağı yere göre üzerine macun, astar ve boya uygulanabilir. Bu uygulamalar bu kompozitlerin erozyon davranışlarının değişmesine sebep olur. Boya işleminin etkilerinin anlaşılabilmesi için boyalı numunelere uygulanan parametreler boyasız numunelere de uygulanmıştır. Boyasız numune yüzeyleri boya işleminden önce de pürüzlü olduğundan erozyon karakteristikleri tam sünek veya tam kırılğan davranış göstermeyebilir. Macun, astar ve boya işlemi alüminyum tel örgü yapısını korumak ve erozyonu azaltmak için önleyici uygulamadır.



Şekil 7.4. Erozyon oranı-boya etkisi grafiği

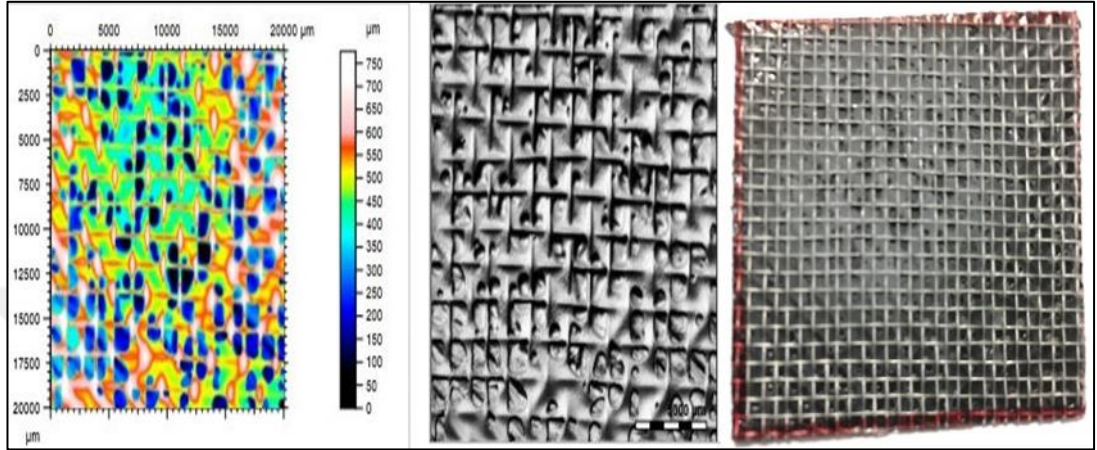
Şekil 7.4'deki grafik incelendiğinde 15° çarpma açısında erozyon oranı boyasız numunede fazla, 30° ve 90° çarpma açıları birbirine yakın 45°, 60°, 75° çarpma açıları boyalı numunelerde daha fazla ölçülmüştür. Boyasız numunelerde yüzey pürüzlü olduğundan elde edilen erozyon oranları değişkenlik gösterebilir, erozyon oranının artması beklenirken azalabilir.

7.3. Profilometre Analizleri

Farklı operasyon parametreleriyle aşındırılmış numune yüzeyleri üzerinde oluşan çukur ve tümsek bölgeler yüzey pürüzlülüğüne sebep olur. Bu tez çalışmasında toplam 48 adet numune değişen parametrelere göre aşınma testlerine tabi tutulmuş bazı numuneler tamamen delinmiş, bazıları kısmen aşınmış, bazıları ise gözle görülemeyecek seviyede yüzey değişimine uğramıştır. Üç boyutlu profilometre analizleri özellikle gözle görülemeyen değişimlerin tespit edilmesinde önem arz etmektedir. Oluşan krater ve tümseklerin renkleri farklı skalalarda gösterilmiştir. Profilometre çekimleri incelenen numuneler için renk skalası 0-1400 µm arasında en yüksek bölgeler beyaz renkten başlamak koşuluyla sırasıyla beyaz, kırmızı, sarı, yeşil, mavi, siyah olarak sıralanmakta en derin çukurlar siyah olarak görünmektedir.

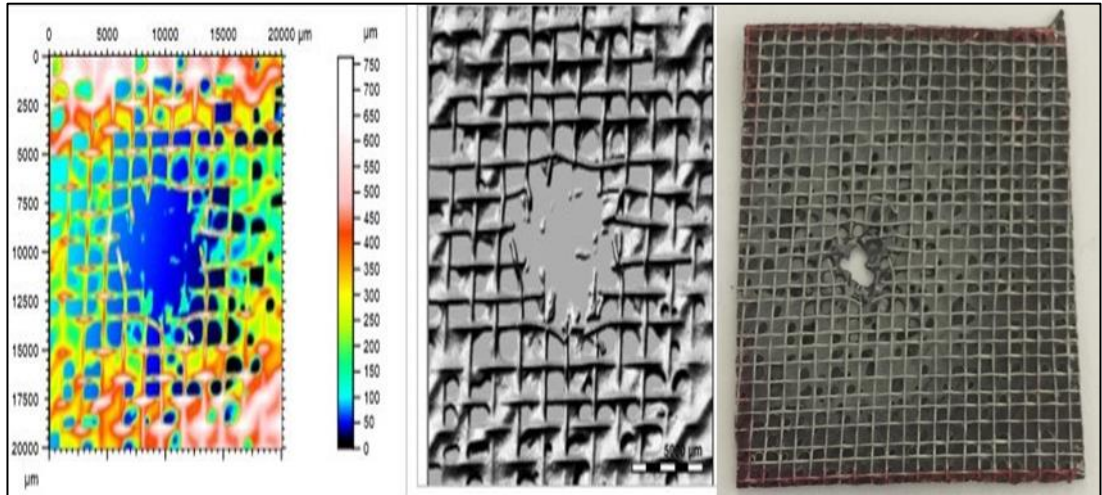
Aşınmanın en fazla olduğu bölgeler çekim sırasında merkez olarak kabul edilmiş numuneler üzerindeki 20mm x 20mm boyutlarında alan taraması yapılmıştır.

Bu bölümde değişen her bir parametre için yüzey analizi yapılacaktır. Boyalı ve boyasız numune yüzeyleri farklı özellikte olacağından ayrı olarak incelenecektir.



Şekil 7.5. Boyasız numune ve profilometre görüntüleri

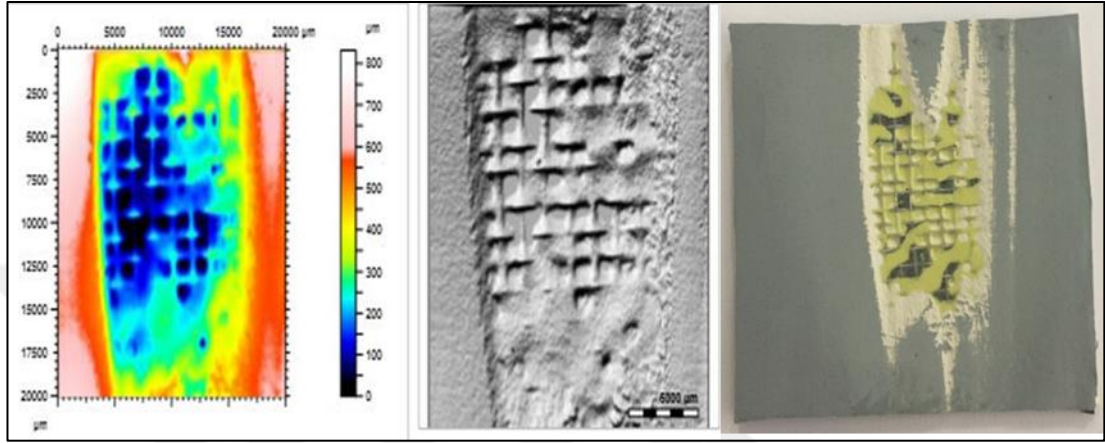
Şekil 7.5’de gösterilen boyasız hibrit kompozit numunesi için parametreler püskürtme basıncı:1, 5bar, açı:90°, süre:15 sn olarak belirlenmiştir. Aşınma sonucu numunede yüzey değişimi görülmüş epoksi reçine aşınmış fakat alüminyum tel örgü yapısı hasar almasına rağmen kopma meydana gelmemiştir.



Şekil 7.6. Boyasız numune ve profilometre görüntüleri

Şekil 7.6’da gösterilen boyasız hibrit kompozit numunesi için parametreler püskürtme basıncı: 3 bar, açı: 90°, süre:10 sn olarak belirlenmiştir. Aşınma sonucu

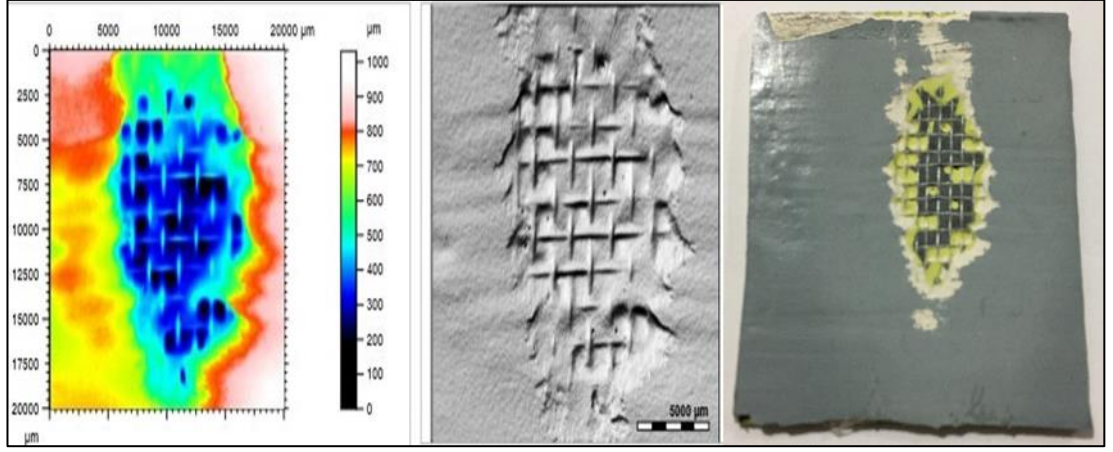
numunenin delinmiş olduğu, malzemenin fiziksel yapısının değiştiği gözle de görülmüştür. Profilometre çekimleri sayesinde sadece oluşan delik değil etrafındaki çukur ve tümsek yüzey morfolojileride incelenebilmiştir. Numune içindeki tel örgünün aşınma sonucunda kopması iletkenliği azaltır bu da hibrit kompozitin yıldırımsavar görevini tam olarak yapamamasına sebep olur.



Şekil 7.7. Boyalı numune ve profilometre görüntüleri

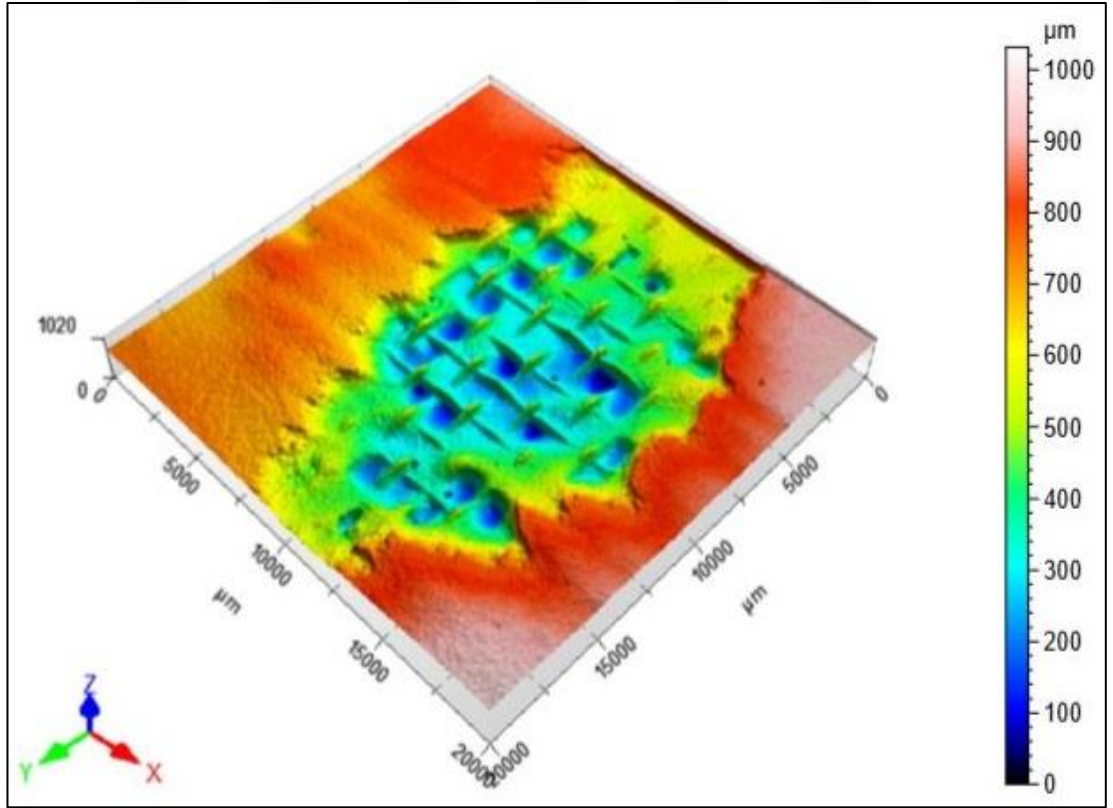
Şekil 7.7’de gösterilen boyalı hibrit kompozit numunesi için parametreler püskürtme basıncı:3 bar, açı:30°, süre:5 sn olarak belirlenmiştir. Aşınma sonucu numune kütle kaybına uğramış alümina aşındırıcı partiküller boyayı ve macunu aşındırarak alüminyum tel örgüye ulaşmış fakat tel örgü yapısında gözle görülebilir bir kopmaya sebep olmamıştır. Macun, astar ve boya uygulamasının tel örgüyü koruduğu görülmüştür.

Profilometre ile yapılan yüzey analizlerinde yüzeylerin en yüksek ve en çukur noktaları belirlenebilmekte yüzey pürüzlülük oranları hesaplanabilmektedir. Numuneler üzerindeki belli bir hat seçilip o hattaki yüzey morfolojileri incelenebilir. Çekimi yapılan 48 adet numuneden bir boyalı ve bir boyasız numunenin ayrıntılı incelemesi bu bölümde anlatılacaktır.



Şekil 7.8. Boyalı numune ve profilometre görüntüleri

Şekil 7.8’de test parametreleri püskürtme basıncı:3 bar, açı:30°, süre:10sn olan boyalı numune üzerinde yapılan çekimler gösterilmiştir. Aşındırıcı partiküller numune üzerindeki boya ve macunu aşındırmış alüminyum tel örgüye ulaşmıştır. Tam bir kopma olmasa da tel örgü yapısında hasarlar meydana gelmiş üretimde kullanılan reçinede kraterler oluşmuştur.

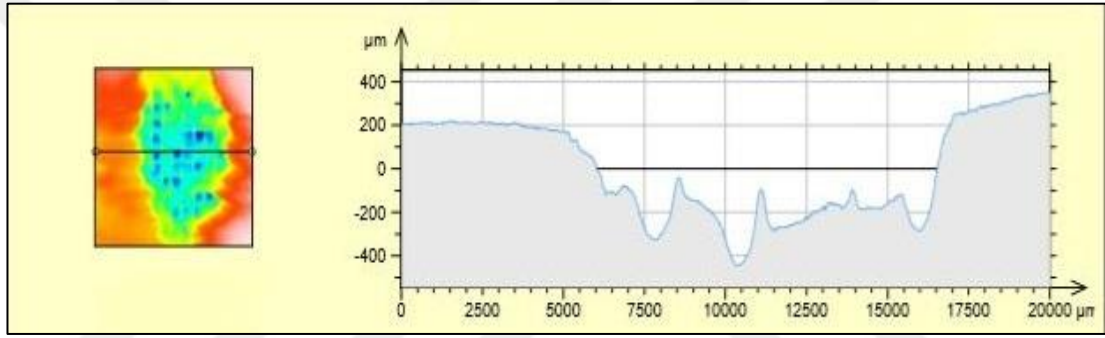


Şekil 7.9. Boyalı numune üç boyutlu profilometre görüntüsü

Tablo 7.1. Boyalı numune tüm yüzey profilometre ölçüm sonuçları

Sp	Maksimum tepe yüksekliği	418, 821 μm
Sv	Maksimum çukur derinliği	612, 220 μm
Sa	Ortalama pürüzlülük değeri	1031, 041 μm
Sz	Maksimum tepe - Maksimum çukur arası mesafe	180, 937 μm

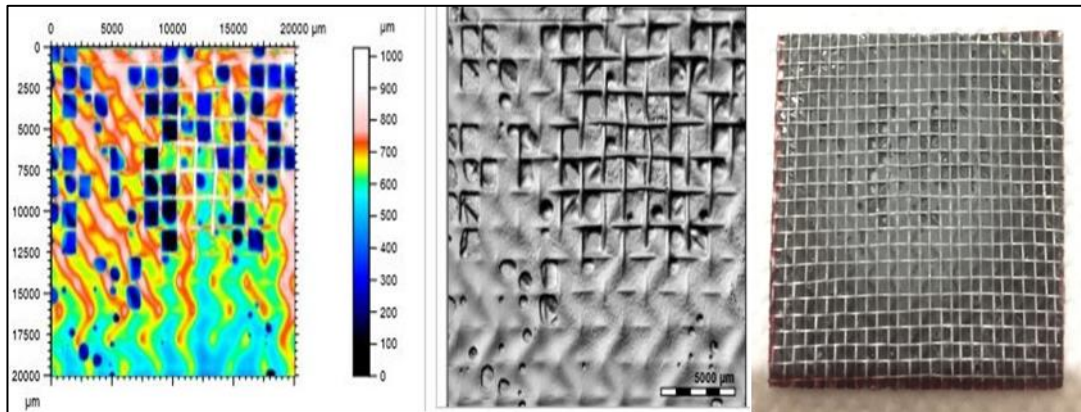
Şekil 7.10'da profilometre çekimleri sırasında aşınmanın en yoğun olduğu bölgede bir hat seçilmiş, bu hat üzerinde en yüksek ve en çukur bölgeler tespit edilmiş ve yüzey pürüzlülüğü hesaplanmıştır. Hat belirleme işlemi ile numune üzerindeki bir hatta inceleme yapma imkanı oluşur. Ölçüm sonuçları Tablo 7.2'de verilmiştir.



Şekil 7.10. Boyalı numune üzerinde hattın belirlenmesi

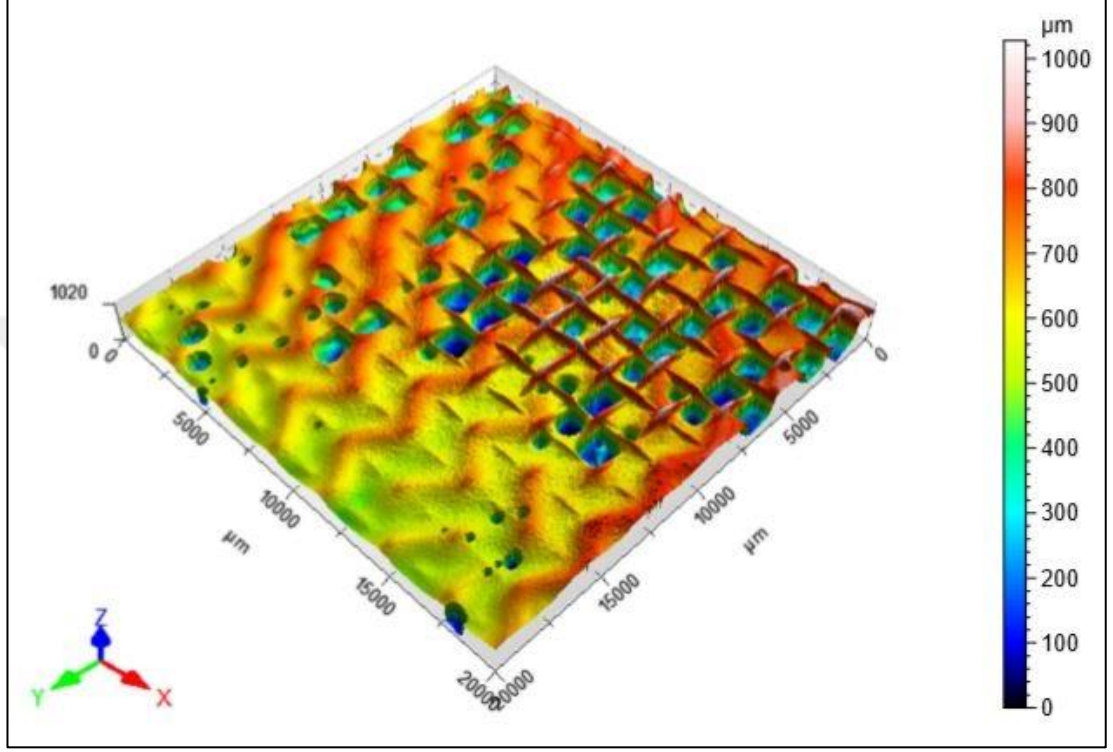
Tablo 7.2. Boyalı numune seçili hat profilometre ölçüm sonuçları

Rp	Maksimum tepe yüksekliği	14, 689 μm
Rv	Maksimum çukur derinliği	12, 103 μm
Ra	Ortalama pürüzlülük değeri	7, 452 μm
Rz	Maksimum tepe - Maksimum çukur arası mesafe	26, 791 μm



Şekil 7.11. Boyasız numune ve profilometre görüntüleri

Şekil 7.11’de deney parametreleri 3bar, 90°, 5sn olan boyasız kompozit numuneler üzerinde yapılan çekimler gösterilmiştir. Aşındırıcı alümina partikülleri alüminum tel örgü yapısının tam kopma olmasada bozulmasına, reçine yapısında ise bazı bölgelerde delikler açılmasına sebep olmuştur.

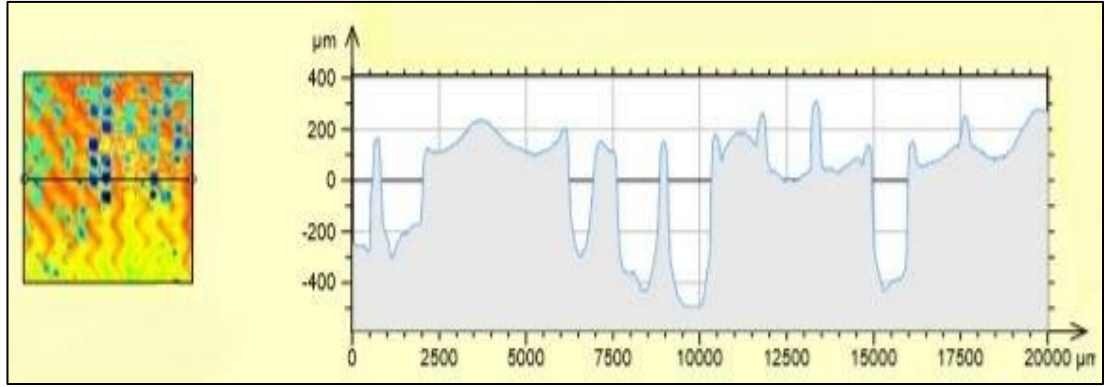


Şekil 7.12. Boyasız numune üç boyutlu profilometre görüntüsü

Tablo 7.3. Boyasız numune tüm yüzey profilometre ölçüm sonuçları

Sp	Maksimum tepe yüksekliği	426, 669 μm
Sv	Maksimum çukur derinliği	600, 599 μm
Sa	Ortalama pürüzlülük değeri	137, 790 μm
Sz	Maksimum tepe - Maksimum çukur arası mesafe	1027, 268 μm

Profilometre çekimleri sırasında boyalı numunelerde olduğu gibi aşınmanın en yoğun olduğu bölgede bir hat seçilmiş ve bu hat üzerinde en yüksek ve en çukur bölgeler tespit edilmiş, yüzey pürüzlülüğü hesaplanmıştır. Ölçüm sonuçları Tablo 7.4’te verilmiştir.



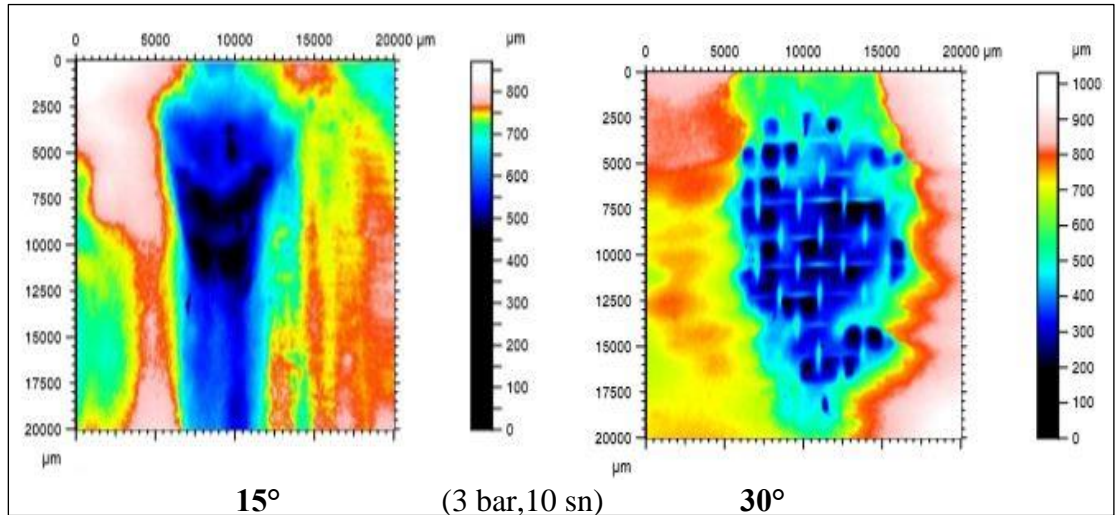
Şekil 7.13. Boyasız numune üzerinde hattın belirlenmesi

Tablo 7.4. Boyasız numune seçili hat profilometre ölçüm sonuçları

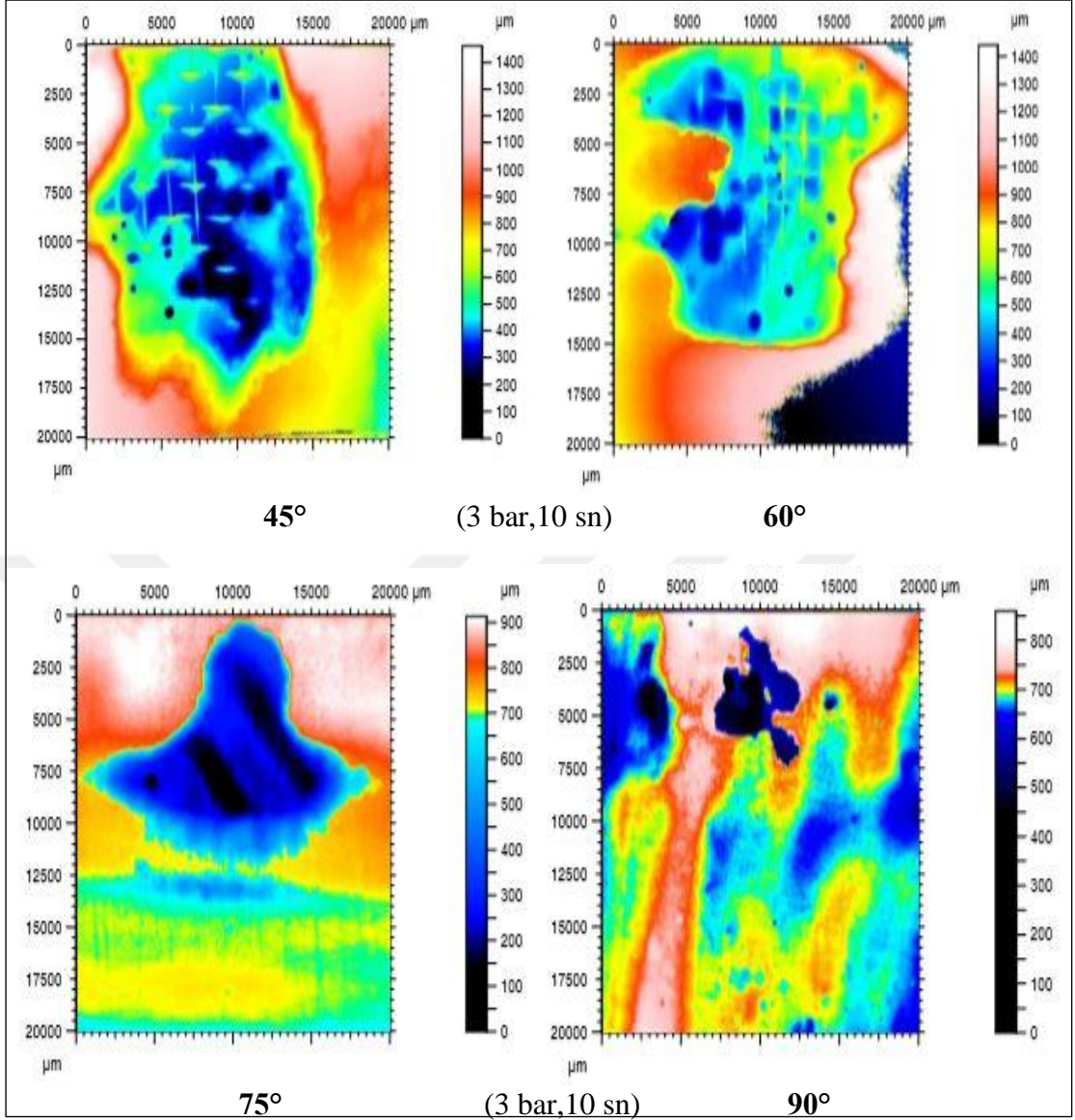
Rp	Maksimum tepe yüksekliği	68, 016 µm
Rv	Maksimum çukur derinliği	58, 365 µm
Ra	Ortalama pürüzlülük değeri	29, 026 µm
Rz	Maksimum tepe - Maksimum çukur arası mesafe	126, 382 µm

7.3.1. Çarpma açısının yüzey pürüzlülüğüne etkisi

Tez çalışması kapsamında (15° , 30° , 45° , 60° , 75° , 90°) açılarında alümina aşındırıcılar püskürtülmüş ve her bir açı için yüzey pürüzlülüğü ölçülmüştür. 3 bar basınçla 10 sn süreyle 6 farklı açıda aşındırılmış boyalı numunelerin karşılaştırılması yapılmıştır. Açı değişiminin ortalama pürüzlülüğe (S_a) etkisi grafiklerle açıklanmıştır.

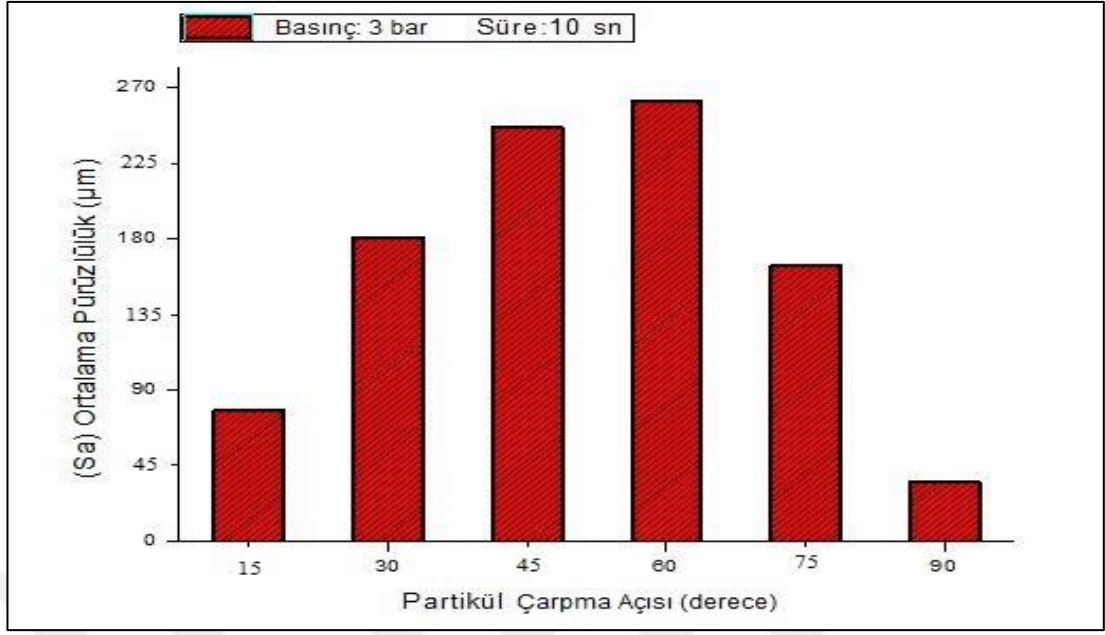


Şekil 7.14. Açı değişimi profilometre çekimleri



Şekil 7.14. (Devam) Açı değişimi profilometre çekimleri

Şekil 7.14'deki profilometre çekimleri incelendiğinde 15°lik ve 90°lik çarpma açısında partiküllerin alüminyum tel örgüye ulaşmadığı 75°lik açıda küçük bir bölgede ulaştığı 30°, 45°, 60° açılarında ise numunelerde yüzey pürüzlülüğünün daha yüksek seviyede olduğu ve alüminyum tel örgü yapısının hasar gördüğü tespit edilmiştir. Aşındırıcı partiküllerin yatay açılarda malzeme yüzeyine sürtünerek malzemeyi boydan boya aşındırdığı, dik ve dike yakın açılarda ise aşınmanın daha dar bölgede olduğu gözlemlenmiştir.

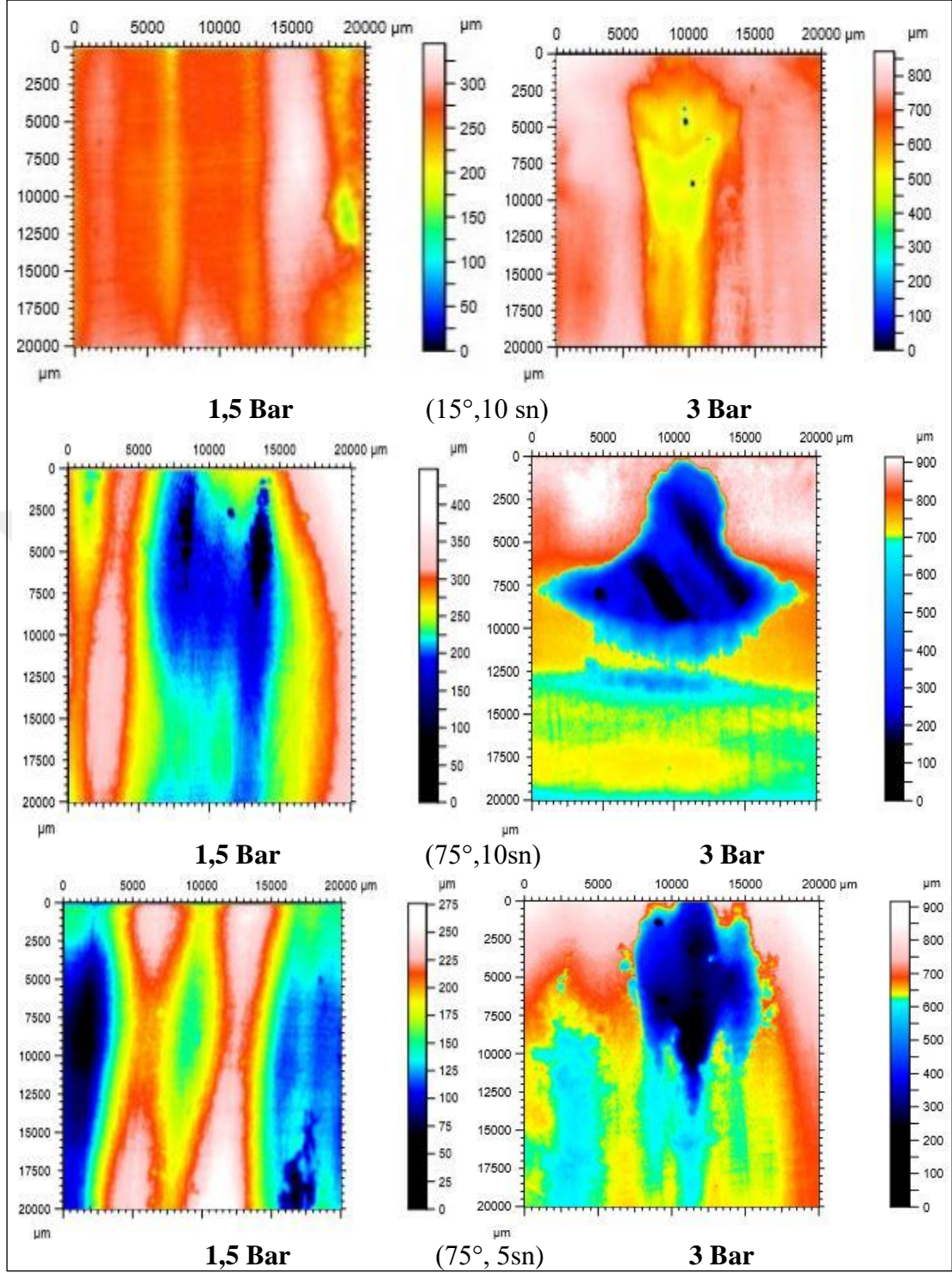


Şekil 7.15. Açı-pürüzlülük grafiği

Şekil 7.15'deki grafik incelendiğinde aşınma testlerine 3 bar basınç, 10 sn süre, ve 6 farklı açı parametreleriyle tabi tutulan boyalı numunelerin yüzey pürüzlülüğünün partikül çarpma açısına göre değişimi gösterilmiştir. En yüksek pürüzlülük değeri 60° lik çarpma açısında en düşük pürüzlülük değeri 90° lik çarpma açısında görülmüştür. 15° lik çarpma açısıyla başlayan testlerde 60° ye kadar pürüzlülük artmış sonrasında hızla azalmaya başlamıştır. Dik açıda partiküller numuneden geri sekmiş, geriden gelen partiküllerin numuneye ulaşmasına engel olmuş bu da pürüzlülüğün düşük seviyede kalmasına sebep olmuştur. Diğer açılarda ise aşındırıcılar numune yüzeyine sürünerek dik açıya nazaran daha fazla yüzey pürüzlülüğüne sebep olmuştur. Bu sonuçlara bakılarak boyalı kompozit numunelerin sünek davranışa daha yakın olduğu söylenebilir.

7.3.2. Püskürtme basıncının yüzey pürüzlülüğüne etkisi

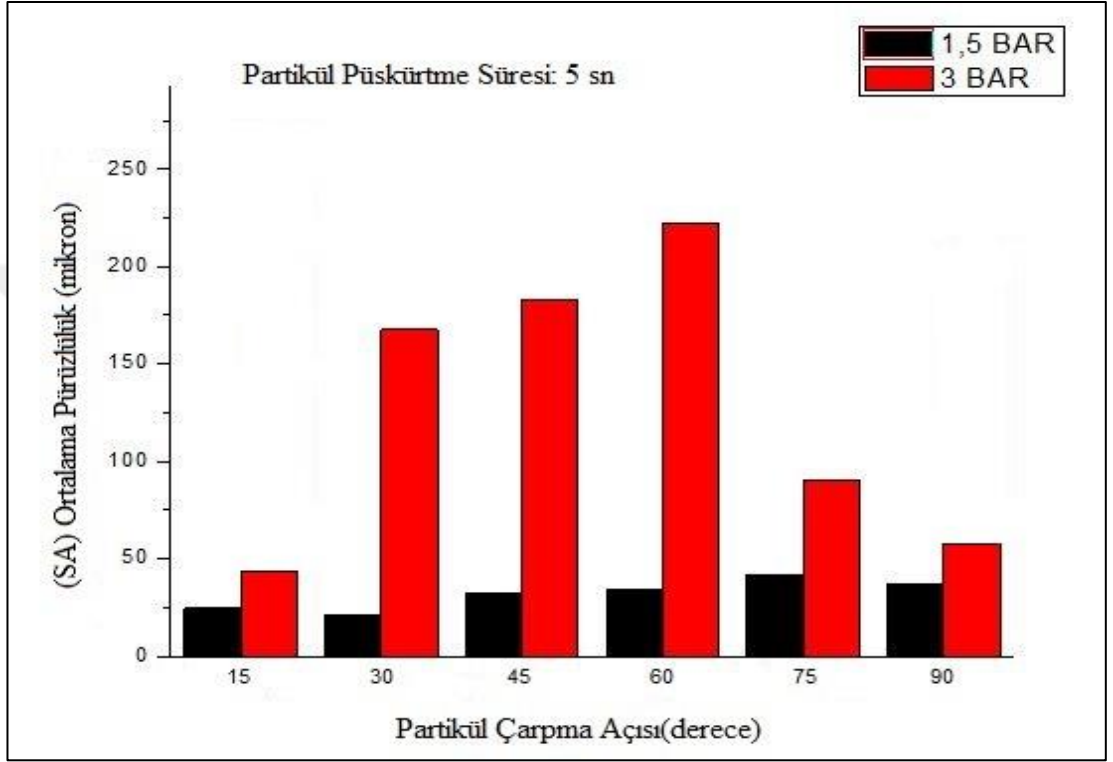
Alümina 80 mesh aşındırıcılar 1, 5 bar ve 3 bar basınçla püskürtülmüş ve iki farklı çarpma hızı ortaya çıkmıştır. Bu kısımda diğer parametreler aynı iken püskürtme basıncının değişiminin yüzey pürüzlülüğüne etkisi incelenecektir. Basınç değişiminin ortalama pürüzlülüğe etkisi (Sa) grafikte açıklanacaktır.



Şekil 7.16. Basınç değişimi profilometre çekimleri

Şekil 7.16'da süre ve açı parametreleri aynı iken basınç değişiminin yüzey pürüzlülüğüne etkisi incelenmiştir. 1, 5 bar ve 3 bar ile aşındırılan 3 çift numune incelendiğinde basıncın artmasıyla yüzey pürüzlülüğünün arttığı gözlemlenmiştir bu durum diğer bütün numuneler içinde geçerlidir.

1.5 bar ile aşındırılan 12 numuneden sadece bir tanesinde alüminyum tel örgü hasar görmüş, 3 bar ile aşındırılan 12 numuneden ise 9 tanesinde tel örgü yapısı hasar görmüştür. Partikül püskürtme basıncının artması yıldırımsavar hibrit kompozitlerin alüminyum tel örgü yapısının bozulmasına dolayısıyla iletkenliğin azalmasına sebep olacaktır.

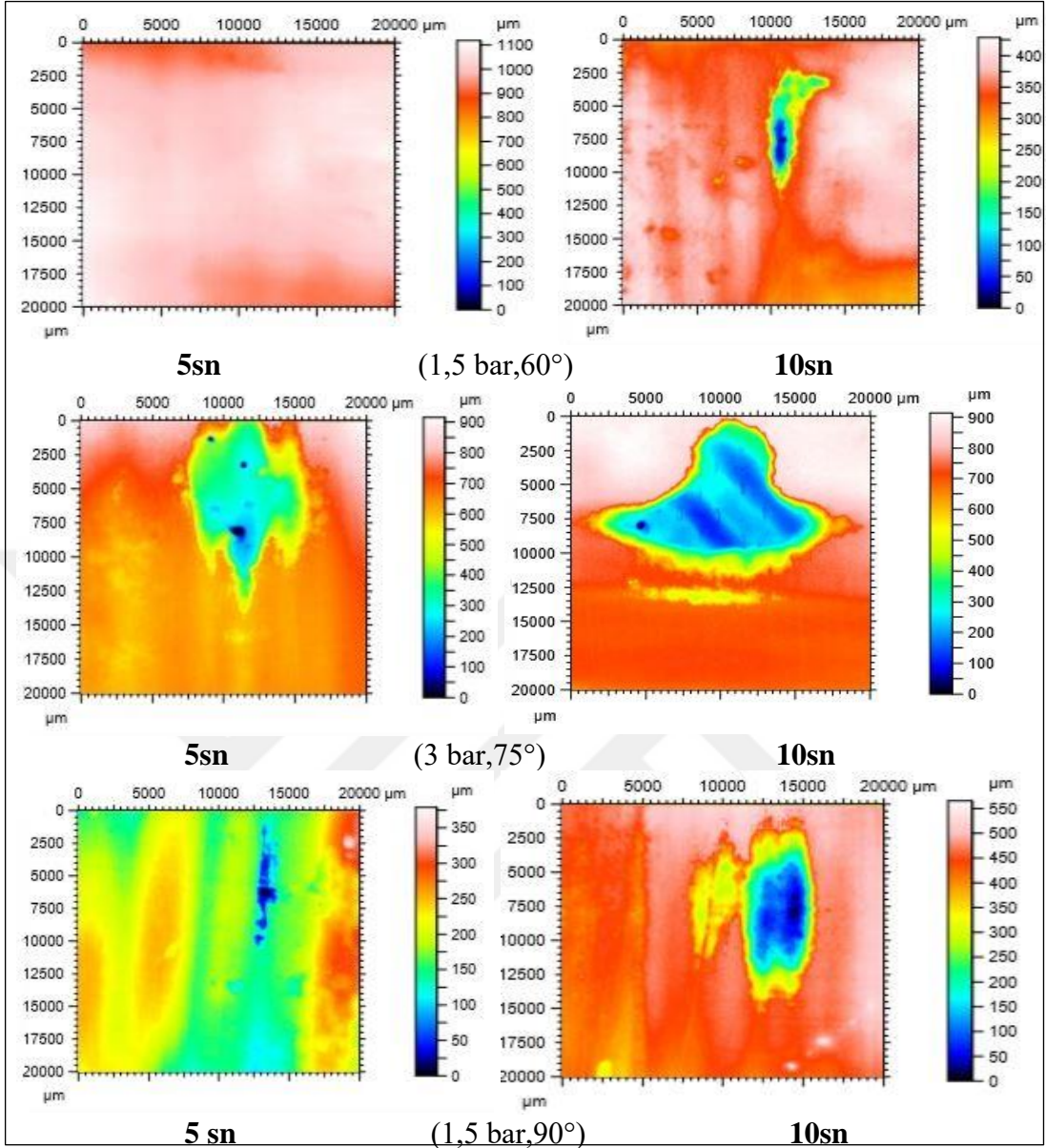


Şekil 7.17. Basınç-pürüzlülük grafiği

Yukarıdaki grafikte süre ve açı parametreleri aynı iken basınç değişiminin yüzey pürüzlülüğüne etkisi incelenmiştir. Püskürtme süresi 5 sn iken 6 farklı açıda 3 bar ile aşındırılan bütün numuneler 1, 5 bar ile aşındırılan numunelerden daha fazla yüzey pürüzlülüğüne uğramıştır. Hibrit kompozitlerde basıncın artmasıyla yüzey pürüzlülüğünün arttığı söylenebilir.

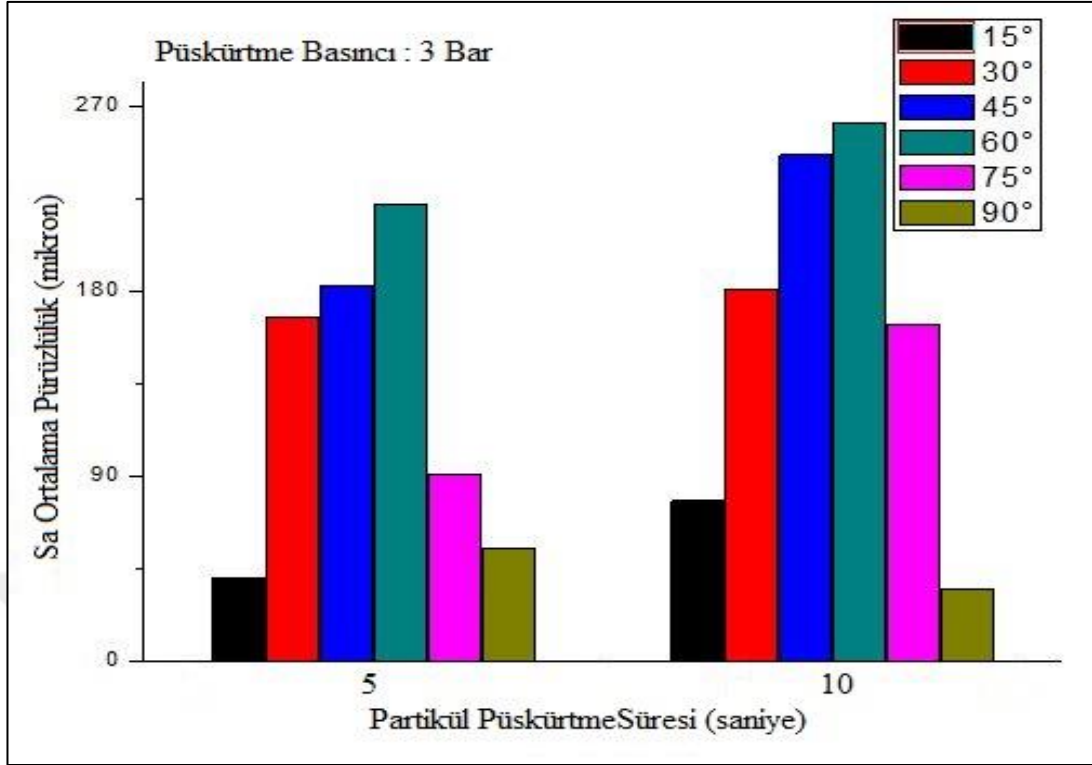
7.3.3. Püskürtme süresinin yüzey pürüzlülüğüne etkisi

Püskürtme süresinin yüzey pürüzlülüğüne etkisinin anlaşılması için aşındırıcılar 5 sn ve 10 sn olmak üzere iki farklı süreyle numunelere püskürtülmüştür.



Şekil 7.18. Püskürtme süresi profilometre çekimleri

Şekil 7.18’de 3 adet numune çiftinin profilometre çekimi verilmiştir. Üç numune çiftinde de sürenin artmasıyla krater oluşumu ve yüzey pürüzlülüğü artmıştır. Deneylede kullanılan 12 numune çiftinin tamamında aynı parametrelerle yapılan deneylede sürenin artmasıyla yüzey pürüzlülüğünün arttığı görülmüştür.

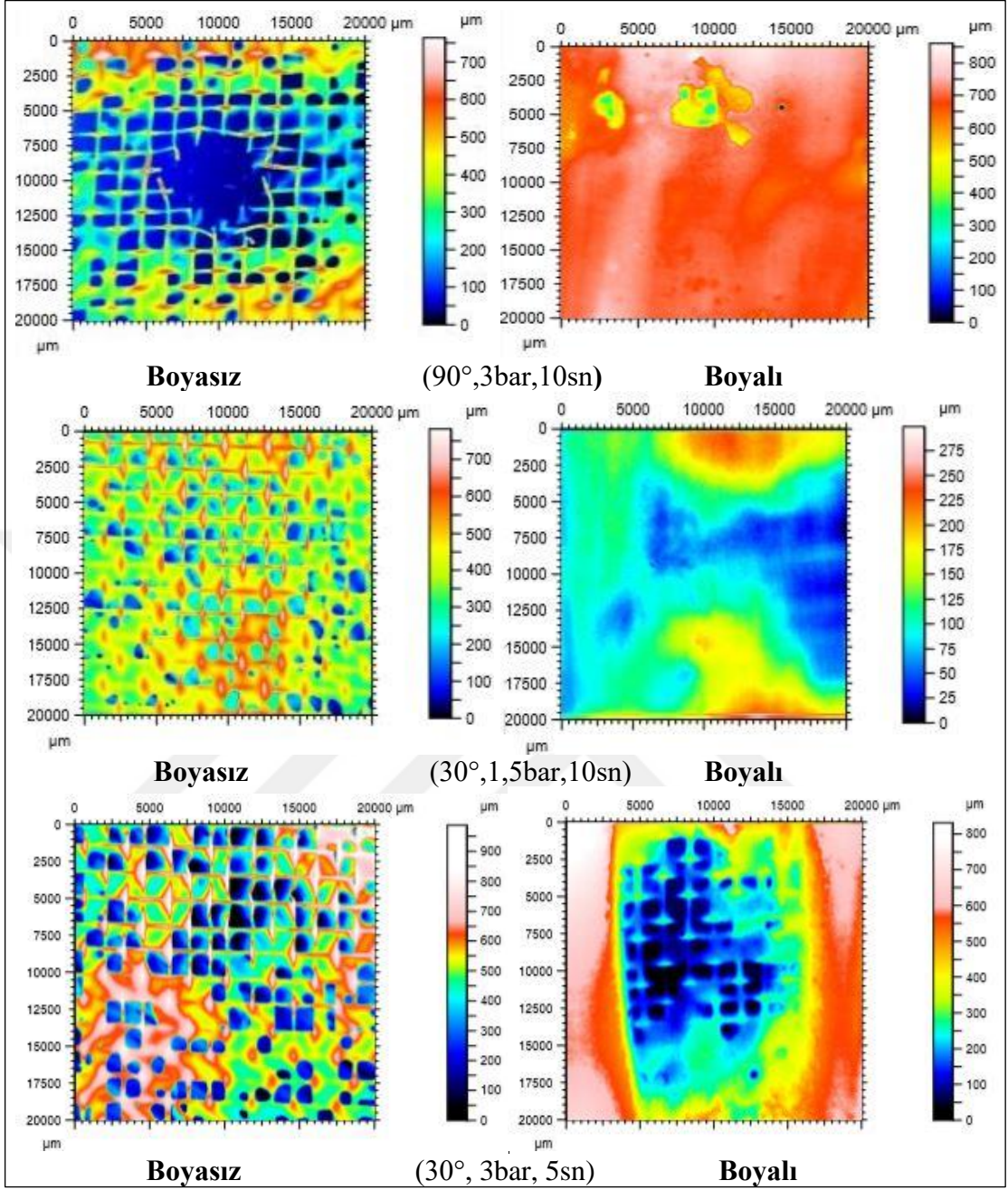


Şekil 7.19. Püskürtme süresi-pürüzlülük grafiği

Süre-pürüzlülük grafiği incelendiğinde 3bar püskürtme basıncı, 6 farklı açı, 5 ve 10 sn olmak üzere 2 farklı süre parametreleriyle aşındırılan numunelerin pürüzlülük değişimleri incelenmiştir.90° lik açıda pürüzlülük değerleri birbirine yakın olarak ölçülmüş diğer tüm açılarda sürenin artmasıyla pürüzlülük değeri artmıştır.

7.3.4. Macun, astar ve boya etkisi

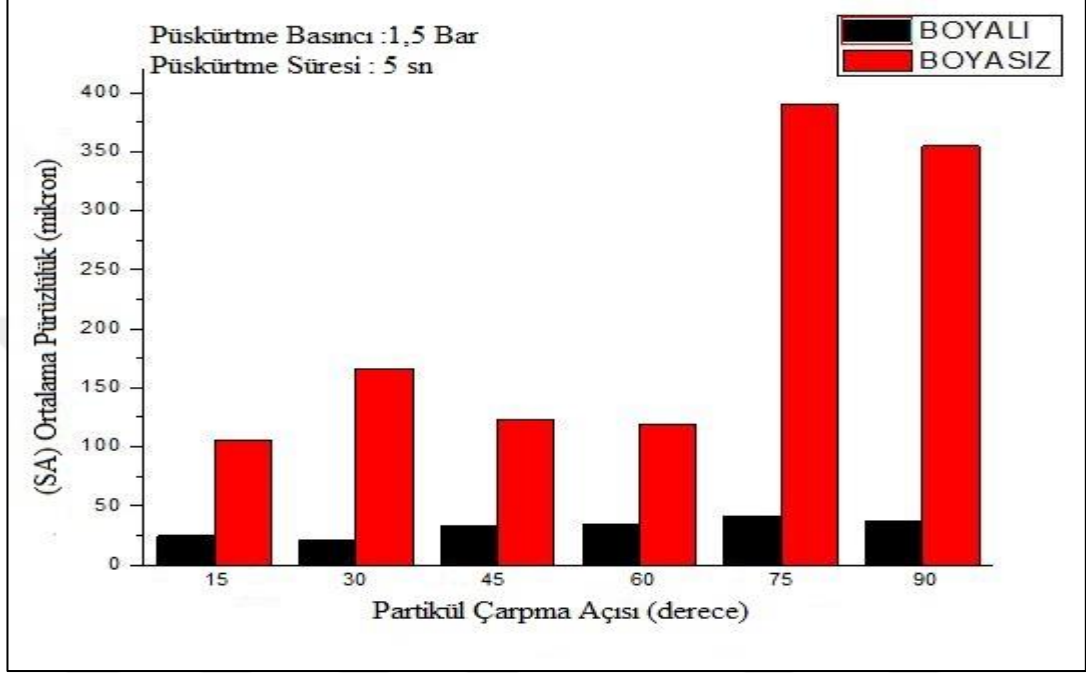
Bu tez çalışması kapsamında boyasız ve boyalı numuneler üretilmiş boyanın aşınmaya etkisini gözlemleyebilmek için aynı parametrelerle aşınma testleri yapılmıştır. Boyalı numuneler üretilirken önce macunla yüzey pürüzlülüğü giderilmiş sonra boyanın etkinliğini artırmak için astar işlemi uygulanmış ve boya işlemi yapılmıştır. Boya işleminden sonra fırınlama yapılarak boyanın fiziksel kabiliyetleri artırılmıştır. Uygulanan bütün işlemler bu kompozitlerin aşınma davranışlarını değiştirmiştir, bu değişimler bu bölümde incelenecektir.



Şekil 7.20. Boya etkisi profilometre çekimleri

Şekil 7.20'de 3 adet aynı parametrelerle aşındırılan boyasız ve boyalı numune çifti incelendiğinde ilk numune çiftinde boyasız numunenin tamamen delindiği boyalı numunede ise aşındırıcıların sadece küçük bir bölgede tel örgüye ulaştığı, ikinci numune çiftinde boyalı ve boyasız numunelerde yüzeysel bir aşınma olduğu, üçüncü numune çiftinde ise boyasız numunede ufak delikler olduğu tel örgü yapısının zarar gördüğü boyalı numunede ise aşındırıcıların tel örgüye ulaşip yüzeysel bir hasar verdiği ama numunenin delinmediği görülmüştür. Farklı parametrelerle yapılan

deneylerde 24 boyasız numuneden 15 adedi delinmiş, 24 boyalı numuneden ise bazılarında tel örgü yapısı hasar görsede hiçbir numune delinmemiştir. Bu sonuçlara göre macun, astar ve boya uygulamasının alüminyum tel örgü yapısını koruduğu söylenebilir.



Şekil 7.21. Boya etkisi-pürüzlülük grafiği

Boya pürüzlülük grafiği incelendiğinde 1, 5 bar, 5 sn sabit parametreleriyle 6 farklı açıda aşındırılmış boyalı ve boyasız numuneler karşılaştırıldığında boyasız numunelerdeki yüzey pürüzlülüğü boyalı numunelerden daha fazladır. Boyasız numunelerin boyalı numunelere göre aşınma öncesinde de yüzey pürüzlülüğü daha fazla olduğundan aşınma deneylerinin bu durumu bu parametrelerle değiştirmedeği görülmüştür.

7.4. İletkenlik Testleri

Yapılan aşınma deneyleri sonucunda boyasız numunelerin bazıları delinmiş tel örgü yapısında kopmalar meydana gelmiş, boyalı numunelerin bazılarında ise tel örgü yapısı hasar görmüştür. Oluşan bu hasarların sonucunda malzeme iletkenlik kaybı yaşamıştır. Bu kayıpların anlaşılması için iletkenlik testi yapılmıştır. Yapılan iletkenlik testi direnç ölçüm temeline dayanmaktadır. Malzemenin iki uçları arasına

yerleştiren problemler sayesinde direnç ölçümü önce aşınmamış numunelere daha sonra erozyon deneylerine tabi tutulan numunelere uygulanmıştır.



şekil 7.22. İletkenlik ölçümleri

Yapılan ölçümlerde tel örgüde meydana gelen hasarların direnci artırıp iletkenlik kaybına neden olduğu oluşan kraterlerin derinliği ve çapı arttıkça iletkenlikte azalma olduğu görülmüştür.

8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Hava araçlarında kullanılan malzemelerin aynı anda birden çok özelliğe sahip olması istenmekte bu da farklı komponentlerin birleşimini ve hibrit kompozitlerin üretimini gerekli kılmıştır. Yıldırımsavar görevi yapan hibrit kompozitler hava araçlarının vazgeçilmez yapı elemanlarından biridir. Bu kompozitlerin aşınma davranışlarının bilinmesi ve hasar durumunda onarım işlemleri için gerekli prosedürlerin oluşturulması önemlidir. Havacılığın pahalı ve zor bir sektör olması bakım maliyetlerini artırmakta bu da zaman, insan kaynağı ve ekonomik kayba sebep olmaktadır.

Bu çalışmanın amacı yıldırımsavar hibrit kompozitlerin aşınma davranışlarını incelemek, gerekli bakım ve onarım prosedürlerinin belirlenmesine yardımcı olmak ve bakım maliyetlerinin azaltılmasına yardımcı olmaktır. Literatürde bu konuda yapılan çalışmaların az ve yetersiz olması bu çalışmaya özgünlük kazandırmıştır.

Deneyel çalışmalarda kullanılan kompozitler hazır olarak temin edilmemiş tez çalışması kapsamında üretimi yapılmıştır. Katı partikül erozyonu hava aracının hızı, manevraları ve hava içerisinde karşılaşacağı yabancı madde hasarları düşünüldüğünde önemli bir negatif etken olarak ortaya çıkar. Hibrit kompozitlerin erozyon davranışlarının karakterize edilmesi için 2 farklı süre(5sn, 10sn), 2 farklı basınç (1,5 bar, 3 bar) ve 6 farklı açı (15°, 30°, 45°, 60°, 75°, 90°) parametreleriyle deneyler yapılmıştır. Deneyler esnasında kompozitlerin hava aracı üzerinde maruz kaldığı etkiler mümkün olduğunca gerçeğe yakın olarak simüle edilmeye çalışılmıştır.

Üretimi tamamlanan hibrit kompozitlerden test numuneleri hazırlanmış ve deney aşaması bu şekilde başlatılmıştır. Erozyon davranışlarının tespiti için debi ve partikül hız ölçümü akabinde aşınma deneyleri yapılmıştır. ASTM G76 standartlarında yapılan testlerde keskin kenarlı alümina 80 mesh aşındırıcı partiküller kullanılmıştır. Aşınma deneylerinin sonuçlarının anlaşılması için sırasıyla erozyon oranı hesabı, yüzey pürüzlülüğünün analizi için profilometre çekimleri yapılmıştır.

Deney sonuçları analiz edildiğinde püskürtme basıncının artışının bütün numunelerde erozyon oranını ve yüzey pürüzlülüğünü artırdığı gözlemlenmiş, sonuca en çok etki eden parametre olduğu görülmüştür. Püskürtme basıncı partikül hızına etki etmekte uçağın iniş, kalkış ve düz uçuş esnasındaki hızı 0-800 km arasında değişkenlik göstermektedir. Hava araçlarında katı partikül erozyonu daha çok iniş kalkış esnasında meydana geldiği için testler 1, 5 bar için 226, 8km/h ve 3 bar için 280,8 km/h hızlarında gerçekleştirilmiştir.

Partikül çarpma açısının etkisi incelendiğinde 15° ile başlayan testlerde 60°ye kadar erozyon oranı ve pürüzlülük artmış, 60°den sonra her ikisi de azalmıştır. Pürüzlülük ve erozyon oranı grafikleri incelendiğinde benzer eğilimler gösterdikleri görülmüştür. Kompozit üzerindeki macun ve boyanın yumuşak yapıda olması sebebiyle numuneler sünek erozyon davranışı göstermiştir.

Partikül püskürtme süresi etkisi gözlemlendiğinde 5 sn den 10 sn ye artırılan sürenin dik ve dike yakın açılarda (75°, 90°) püskürtme süresinin erozyon oranına önemli etki etmediği, yüzey pürüzlülüğünü az seviyede etkilediği diğer açılarda ise (15°, 30°, 45°, 60°) değişimin daha fazla olduğu görülmüştür.

Hava araçlarındaki kompozit yapılar üzerine astar ve boya uygulaması ile eğimli yüzeylerde ve birleşme noktalarında aerodinamik yapının bozulmaması için macun kullanılır. Bu uygulamalar kompozitlerin erozyon davranışlarını önemli ölçüde etkilemektedir. Bu etkiler incelendiğinde boyasız numunelerin reçine etkisiyle sert yapıda olduğu için kırılma erozyon davranışı gösterdiği boyalı numunelerin ise macun etkisiyle yumuşak yapıda ve sünek erozyon davranışı gösterdiği görülmüştür. Boyasız numunelerde delinmeler ve tel örgü yapısında kopmalar meydana gelmesine rağmen boyalı numunelerde tel örgü yapısında hasar görenler olsa da kopma olmamıştır. Boya uygulamasının kompoziti koruduğu, hasarları ve bakım maliyetlerini azalttığı söylenebilir. Deneyler sonrası yapılan iletkenlik testlerinde ise aşınmayı artıran parametrelerin iletkenliği azalttığı tespit edilmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] <http://www.savunmasanayi.net/anka-basarisi-ve-insansiz-hava-araclari/anka-basarisi-ve-insansiz-hava-araclari/>, (Ziyaret Tarihi: 6 Ağustos 2017).
- [2] Taylor,A.J.P.,Jane's Book of Remotely Piloted Vehicles.Jane's Pocket Book 13
- [3] <http://www.kokpit.aero/almanya-predator-ih-almak-istiyor>,(Ziyaret Tarihi: 9 Ağustos 2017).
- [4] <http://mydroneland.com/duzenleme/ab>,(Ziyaret Tarihi: 9 Ağustos 2017).
- [5] Karaağaç C., İHA Sistemleri Yol Haritası Geleceğin Hava Kuvvetleri 2016-2050 Sayfa 24.
- [6] <https://www.tai.com.tr/tr/medya/fotograf-galerileri>,(Ziyaret Tarihi: 12 Ağustos 2017).
- [7] <http://www.al-monitor.com/pulse/tr/originals/2015/12/turkey-drones-what-is-ankaras-hurry.html>, (Ziyaret Tarihi: 13 Ağustos 2017).
- [8] <http://www.vestelsavunma.com/tr/haberler/94/karayel-goklerdeki-sinavinda-basariya-tirmanmaya-devam-ediyor>,(Ziyaret Tarihi: 13 Ağustos 2017).
- [9] <https://www.mgm.gov.tr/FILES/genel/sss/yildirimdan-korunma.pdf>,(Ziyaret Tarihi: 14 Ağustos 2017).
- [10] "Lightning." Encyclopædia Britannica Ultimate Reference Suite. Chicago: Encyclopædia Britannica, 2012.
- [11] <https://www.mgm.gov.tr/genel/sss.aspx?s=simsekyildirim>,(Ziyaret Tarihi: 14 Ağustos 2017).
- [12] Lightning strike involving Airbus A330, VH-XFJ, Perth Airport, Western 26 November 2014, ATSB Transport Safety Report Aviation Occurrence Investigation AO-2014-185.
- [13] Greg Sweers., Bruce Birch., John Gokcen, Instructor Lightning Strikes:Protection, Inspection and Repair AERO QTR-04.12.
- [14] <http://www.kokpit.aero/yildirim,-yildirim>,(Ziyaret Tarihi:15 Ağustos 2017).
- [15] <https://www.quora.com/What-happens-if-lightning-strikes-a-plane>,(Ziyaret Tarihi: 3 Aralık 2017).
- [16] <https://www.ateq-aviation.com/lrt-6000/>,(Ziyaret Tarihi: 16 Ağustos 2017).

- [17] Amar Patnaik., Alok Satapathy., Navin Chand, N.M.Barkoula., Sandhyarani Biswas., Science Direct Wear268(2010)249-263 Solid Particle Erosion Wear Characteristics of Fiber and Particulate Filled Polymer Composites.
- [18] G. Sundararajan., Manish Roy., Solid Particle Erosion Behaviour of Metallic Materials at Room and Elevated Temperatures, Tribology International Vol. 30; No. 5, pp. 339-359, 1997.
- [19] Oğuzhan Güngör., Doç. Dr Ahmet Türk., Yüksek Sıcaklıkta Eroziyon Aşınma Düzenegi, 2012 13-14.
- [20] Czichos H., Habig K H., Reibung und Verschleiß., System analyse, Pruftechnik, Werkstoffe und Konstruktion selement, Friedr. Vieweg&Sohn Verlagsgesellschaft GmbH, *Tribologie-Handbuch*, Wiesbaden, 128, (1992).
- [21] Amir Mansouri., Hadi Arabnejad Khanouki., Siamack A. Shirazi., Brenton S. McLaury., particle tracking velocimetry (PTV) measurement of abrasive microparticle impact speed and angle in both air-sand and slurry erosion testers, Proceedings of the ASME 2016 Fluids Engineering Division Summer Meeting FEDSM2016 July 10-14, 2016, Washington, DC, USA, Pages 2, 3.
- [22] Shakoor RA., Okonkwo P., Mohamed AM., Effects of Particle Speed on Erosive Wear Behaviour of API X120 Pipeline Steel Qatar Foundation Annual Research Conference Proceedings 2016:EEPP2433 <http://dx.doi.org/10.5339/qfarc.2016.EEPP2433>.
- [23] Y.I.Oka., H.Ohnogi., T.Hosokawa., M.Matsumura The impact angle dependence of erosion damage caused by solid particle impact , Wear Volumes 203–204, March 1997, Pages 573-579.
- [24] Md.Aminul Islam Zoheir., N.Farhat., Effect of impact angle and velocity on erosion of API X42 pipeline steel under high abrasive feed rate, Wear Volume 311, Issues 1–2, 15 March 2014, Pages 180-190.
- [25] Sinmazcelik T., Fidan S., Yıldırım Y., Alüminyum Alaşımının Katı Partikül Erozyonu Davranışlarının Karakterizasyonu Yüksek Lisans Tezi Mayıs 2013 Sayfa 22-23.
- [26] Dunder M., İnal O.T., Solid particle erosion of a-brass with 5 and 25 mm particles at normal incidence, Wear, 1999, 224, 226–235.
- [27] V.B.Nguyen., Q.B.Nguyen., Y.W.Zhang., C.Y.H.Lim., B.C.Khoo., Effect of particle size on erosion characteristics Wear Volumes 348–349, 15 February 2016, Pages 126-137.
- [28] Anand K., Hovis S. K., Conrad H., Scattergood R. O., Flux effect in solid particle erosion, *Wear*, 1987, 118, 243-257.
- [29] Güngör O., Taş S., Gültekin N. D., Güneş U., Türk A., Yüksek Sıcaklıkta Eroziyon Aşınma Düzenegi, Sayfa 31.

- [30] Sandhyarani Biswas., Prity Aniva Xess., Erosion Wear Behaviour of Bamboo/Glass Fiber Reinforced Epoxy Based Hybrid Composites, Department of Mechanical Engineering, National Institute of Technology, Rourkela Odisha, India.
- [31] K.R.Padmavathia., Dr. R.Ramakrishna., Tribological behaviour of Aluminium Hybrid Metal Matrix Composite , *12th Global Congress on Manufacturing and Management*, Gcmm 2014 Procedia Engineering 97 (2014) 660 – 667.
- [32] Mehmet Bagci., Huseyin Imrek., (2016) "Erosion wear performance of borax filled novel hybrid composites by using the Taguchi experimental design", *Industrial Lubrication and Tribology*, Vol. 68 Issue: 1, pp.134-140, <https://doi.org/10.1108/ILT-01-2015-0007>.
- [33] Kunkun Fua., Lin Yea., Li Changa., Chunhui Yangb., Zhong Zhang., Modelling of lightning strike damage to CFRP composites with an advanced protection system. Part I: Thermal–electrical transition Composite Structures 165 (2017) 83–90.
- [34] Qi Donga., Yunli Guoa., Jingliang Chenb., Xueling Yaob., Xiaosu Yic., Lu Pinga., Yuxi Ji., Influencing factor analysis based on electrical–thermal-pyrolytic simulation of carbon fiber composites lightning damage, *Composite Structures* 140 (2016) 1–10.

KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER

- [1] **Gürkan A.**, Fidan S., Sinmazçelik T., Solid Particle Erosion Behavior of Airstrike Lightning Protect Hybrid Reinforced Polymer Composites Used on Unmanned Air Vehicle, *International Engineering Research Symposium*, Düzce, Turkey, 11-13 September 2017.
- [2] **Gürkan A.**, Fidan S., Sinmazçelik T., Solid Particle Erosion Behavior of Airstrike Lightning Protect Hybrid Reinforced Polymer Composites Used on Unmanned Air Vehicle, *El-Cezerî Journal of Science and Engineering* Vol: 5, No: 1, 2018 (182-190)



ÖZGEÇMİŞ

1988 yılında Zonguldak'ta doğdu. İlköğretim ve lise öğrenimini Bartın'da tamamladı. 2009 yılında Deniz Astsubay Meslek Yüksek Okulu'ndan mezun oldu. UH-1H, AB-212, S70B helikopterleri ve CESSNA-T182T uçağı temel teknisyenlik kurslarını başarı ile tamamladı.2012 yılında Anadolu Üniversitesi İşletme Fakültesi'ni bitirdi.2013 yılında Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi'nde yüksek lisans öğrenimine başladı.2009 yılından itibaren Türk Silahlı Kuvvetleri'nde helikopter teknisyeni olarak görev yapmaktadır.

