



**T.C.**  
**KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**KARBON NANO TÜP VE BOR NİTRÜR NANO  
PARTİKÜL TAKVİYELİ KARBON/EPOKSİ  
NANOKOMPOZİTLERİN AŞINMAYA  
ETKİSİNİN DENEYSEL İNCELENMESİ VE  
MATEMATİKSEL MODELLENMESİ**

**Muhammed Ali OKKA**

**DOKTORA TEZİ**

**Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Ağustos-2019**  
**KONYA**  
**Her Hakkı Saklıdır**

## TEZ KABUL VE ONAYI

Muhammed Ali OKKA tarafından hazırlanan “karbon nano tp ve bor nitrür nano partikül takviyeli karbon/epoksi nanokompozitlerin aşınmaya etkisinin deneysel incelenmesi ve matematiksel modellenmesi.” adlı tez çalışması 21/08/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

### Jüri yeleri

#### Başkan

Prof. Dr. Hüseyin ARIKAN

#### Danışman

Prof. Dr. Ahmet AVCI

#### ye

Prof. Dr. Ömer Sinan şAHİN

#### ye

Doç. Dr. Mehmet BAğCI

#### ye

Dr. Öğr. Üyesi Gürol NAL

### İmza



Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Hakan KARABÖRK  
Enstitü Müdürü

Bu tez alışması BAP tarafından 15201069 nolu proje ile desteklenmiştir.

## **TEZ BİLDİRİMİ**

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

## **DECLARATION PAGE**

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.



**Muhammed Ali OKKA**

Tarih:21.08.2019

# ÖZET

## DOKTORA TEZİ

### KARBON NANO TÜP VE BOR NİTRÜR NANO PARTİKÜL TAKVİYELİ KARBON/EPOKSİ NANOKOMPOZİTLERİN AŞINMAYA ETKİSİNİN DENEYSEL İNCELENMESİ VE MATEMATİKSEL MODELLENMESİ

**Muhammed Ali OKKA**

**Konya Teknik Üniversitesi  
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Danışman: Prof. Dr. Ahmet AVCI**

**2019, 145 Sayfa**

**Jüri**

**Prof. Dr. Hüseyin ARIKAN  
Prof. Dr. Ahmet AVCI  
Prof. Dr. Ömer Sinan ŞAHİN  
Doç.Dr. Mehmet BAĞCI  
Dr. Öğr. Üyesi Gürol ÖNAL**

Bu tez çalışmasında farklı miktarlarda Karbon nanotüp (KNT) ve bor nitrür (BN) takviyeli karbon kumaş epoksi malzemeler üretilmiş ve elde edilen malzemelerin ASTM standartlarına göre çekme mukavemetine ve tribolojik özelliklerine incelenmiştir. Çekme testleri *ASTM D 3039* standartlarında gerçekleştirilmiş olup KNT takviyeli malzemeler içinde çekme dayanımı en yüksek olan %1 KNT lü numune çıkmıştır. Onu sırasıyla %2 KNT li ve % 0,5 KNT li malzeme izlemiştir. Ayrıca içinde %1 Nano parçacık içeren malzemelerin çekme deneyleri karşılaştırıldığında; %1 KNT içeren numune en yüksek çekme mukavemetine sahiptir. Onu sırasıyla % 0,5 (KNT+BN) içeren ve %1 BN içeren malzemenin çekme mukavemeti takip etmiştir. İçine nano parçacık katılan her malzeme çekme deneyinde içine nano parçacık katılmayan saf malzemedan daha mukavemetli çıkmıştır.

Üretilen numunelerin ASTM G133 e göre aşınma testleri yapılmış ve tribolojik özelliklerine iki farklı açıdan incelenmiştir. İlk bakış açısı; deney tasarım metodlarından (DTM), tepki yüzey metodolojisi (TYM) ile önceden belirlenen farklı hız (m/s) ve yüklerde (N) ki girdi parametreleri ve önceden belirlenen  $\mu$  ve aşınma miktarı (gr) gibi çıktı parametrelerine bağlı olarak her malzeme için 13 farklı deney yapılmıştır. İkinci bakış açısı; sabit hız (2m/s) ve sabit yük (20N) altında malzemelerin tribolojik özellikleri incelenmiş ve karşılaştırılmıştır. Sabit yük(N) ve hız(m/s) altında KNT içeren kompozitler karşılaştırıldığında; en düşük ortalama  $\mu$  değeri %1KNT içeren kompozitlerde elde edilmiştir. Onu sırasıyla saf karbon kompozit, % 0,5 KNT ve %2 KNT içeren karbon kompozit takip etmiştir. İçinde %1 oranında nano partikül içeren kompozitler karşılaştırıldığında; en düşük %1 KNT içeren nano karbon kompozit olmuştur onu saf karbon kompozit ve %1 BN ve % 0,5 (KNT+BN) içeren nano kompozitler takip etmiştir. Aşınma katsayılarında ki yüksekliğe rağmen en düşük aşınma miktarı % 0,5 KNT içeren kompozitte gerçekleşmiştir. Onu sırasıyla %2 KNT içeren nano kompozit, % 0,5(KNT+BN) içeren nano kompozit takip etmiştir. En çok aşınma miktarı saf karbon kompozitte meydana gelmiştir. Bu durumda nano partiküllerin kompozitlerin yüzeyinde aşınma miktarını ciddi anlamda düşürdüğü ve bunu kullanılacak yere göre istenirse düşük  $\mu$  de istenirse de yüksek  $\mu$  değerlerinde elde edilebilir.

**Anahtar Kelimeler:** Aşınma, BorNitrür, Karbon Nanotüp, Tepki Yüzey Metodu, Optimizasyon, ANOVA



## ABSTRACT

### PhD THESIS

# EXPERIMENTAL INVESTIGATION AND MATHEMATICAL MODELING OF CARBON NANO TUBE AND BORON NITRIDE NANO PARTICULATED REINFORCED CARBON / EPOXY NANOCOMPOSITES

**Muhammed Ali OKKA**

**Konya Technical University  
Institute of Graduate Studies  
Department of Mechanical Engineering**

**Advisor: Prof.Dr. Ahmet AVCI**

**2019, 145 Pages**

#### Jury

**Prof. Dr. Hüseyin ARIKAN**

**Prof.Dr. Ahmet AVCI**

**Prof Dr. Ömer Sinan ŞAHİN**

**Doç. Dr. Mehmet BAĞCI**

**Dr. Öğr. Üyesi Gürol ÖNAL**

In this thesis, different amounts of carbon nanotube (CNT) and boron nitride (BN) reinforced carbon fabric epoxy materials were produced and the tensile strength and tribological properties of the obtained materials were examined according to ASTM standards. Tensile tests were carried out according to ASTM D 3039 standards and CNT reinforced materials had the highest tensile strength of 1% KNT. This was followed by material with 2% CNT and 0,5% CNT respectively. Also compared to the tensile experiments of materials containing 1% nanoparticle inside; The sample containing 1% CNT has the highest tensile strength. This was followed by the tensile strength of the material containing 0,5% (CNT + BN) and 1% BN, respectively. In the tensile test, each material containing nanoparticles was more resistant than pure material without nanoparticles.

The abrasion tests of the produced samples according to ASTM G133 were performed and their tribological properties were examined from two different angles. first point of view: experimental design methods (DOE), response surface methodology (RSM) and the predetermined speed (m / s) and loads (N) of the input parameters and predetermined wear and abrasion amount (gr) depending on the output parameters 13 different experiments were performed for each material. The second perspective; tribological properties of materials under constant velocity (2m / s) and constant load (20N) were examined and compared. Comparing composites containing CNT under constant load (N) and velocity (m / s); the lowest mean  $\mu$  value was obtained in composites containing 1% CNT. This was followed by carbon composite containing pure carbon composite, 0,5% CNT and 2% CNT, respectively. When compared to composites containing 1% nano particles; nano carbon composites containing the lowest 1% KNT followed by nano composites containing pure carbon composite and 1% BN and 0,5% (CNT + BN). Despite the high wear coefficients, the lowest amount of wear was observed in the composite containing 0,5% CNT. This was followed by nano-composite containing 2% CNT and nano-composite containing 0,5% (CNT + BN). The highest amount of wear occurred in the pure carbon composite. In this case, the nanoparticles can significantly reduce the amount of wear on the surface of the composites and can be obtained at low or high values depending on the place of use.

**Keywords:** Wear, Boron Nitride, Carbon Nanotube, Responce Surface Metodology, Optimisation, ANOVA

## ÖNSÖZ

Tez konusunun belirlenmesinden tezin son aşamasına kadar bana yol gösteren, yoğun iş temposu arasında, çok değerli vakitlerini ayırarak bana destek ve yardımlarını esirgemeyen, akademik kariyerime başladığım günden beri tecrübeleriyle bana ışık tutan Tez Danışmanı saygıdeğer hocam Prof. Dr. Ahmet AVCI 'ya teşekkür ederim. Olumlu ve yapıcı eleştirileriyle beni yönlendiren, tecrübe ve bilgi birikimleriyle her zaman kendilerinden çok şey öğrendiğim tez izleme komitesi üyeleri, çok değerli hocalarım Prof. Dr. Hüseyin ARIKAN ve Prof. Dr. Ömer Sinan ŞAHİN hocama, laboratuvar imkânlarının sağlanmasında destek sağlayan Prof. Dr. Hayrettin DÜZCÜKOĞLU hocama teşekkürlerimi sunarım. Tez ile ilgili çalışmalarında, en başından sonuna kadar beraber çalıştığımız ve malzeme üretiminde yardımcı olan Arş. Gör. Ahmet Caner TATAR 'a, malzeme temininde ve test aşamalarında yardımlarına ve fikirlerine danıştığım Arş. Gör. Dr. Okan DEMİR 'e, Yüksek Makine Mühendisi Muhammed Şenyurt 'a, Arş. Gör. Dr Halil Burak KAYBAL 'e, SEM ve Optik görüntüler için Öğr. Gör. Dr. Fatih ÖZCAN 'a teşekkür ederim.

Tez çalışmamın sanayideki uygulamalarını yakından görme fırsatı sunan kapılarını bize açan Hidrokar Aş yetkililerine, nano malzeme temininde yardımlarından dolayı TEHEL'e ve desteklerinden ötürü Selçuk Üniversitesi ve Konya Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümü arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak, eğitim hayatımda bugünlere gelmemde en büyük pay sahibi olan ve maddi, manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen sevgili eşim Mine OKKA'ya ve babam Mustafa OKKA'ya, dualarını her zaman hissettiğim merhum annem Hacer OKKA'ya sonsuz teşekkür eder, şükranlarımı sunarım..

Muhammed Ali OKKA  
KONYA-2019

# İÇİNDEKİLER

<b>ÖZET .....</b>	<b>iv</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>v</b>
<b>ÖNSÖZ .....</b>	<b>vi</b>
<b>İÇİNDEKİLER .....</b>	<b>vii</b>
<b>SİMGELER VE KISALTMALAR .....</b>	<b>ix</b>
<b>1. GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
1.1. Kompozit Malzemeler.....	1
1.1.1. Kompozit Malzeme Çeşitleri .....	1
1.2. Nano Partiküller .....	3
1.3. Sürtünme .....	3
1.4. Aşınma .....	3
1.4.1. Aşınma Çeşitleri .....	3
1.5. Tezin Kapsamı .....	4
1.6. Tezin Ana Hattı .....	4
1.7. Tezin Amacı .....	5
<b>2. KAYNAK ARAŞTIRMASI .....</b>	<b>6</b>
2.1. Giriş .....	6
2.2. Literatürde Daha Önce Yapılan Çalışmalar .....	7
2.3. Literatürde Oluşmuş Boşluklar .....	29
<b>3. MATERYAL VE YÖNTEM.....</b>	<b>31</b>
3.1. KOMPOZİT MALZEMELER .....	31
3.1.1. Kompozit Malzeme Çeşitleri .....	31
3.2. Nano Partiküller .....	34
3.3. Sürtünme .....	35
3.3.1. Sıvı sürtünme .....	35
3.3.2. Kuru sürtünme .....	36
3.3.3. Sürtünmeyi etkileyen faktörler .....	36
3.4. Aşınma .....	36
3.4.1. Aşınma Çeşitleri .....	37
<b>4. DENEY KURULUMU VE PROSEDÜRÜ .....</b>	<b>42</b>
4.1. Deney Tasarım Metodu .....	42
4.2. DENEY KURULUMU VE UYGULAMASI.....	46
4.2.1. KNT ve BN Nano partikül Takviyeli Karbon Kumaş Epoksi Kompozit Üretimi .....	47
4.2.2. Üretilen Numunelerin Çekme ve Aşınma Deneylerinin Yapılması .....	54
4.3. Deney Prosedürü.....	56

4.4. Deneilerin Sonuçlarının lm .....	57
4.4.1. Malzeme Aşınma Miktarının lm .....	57
4.4.1. Sürtünme Katsayısı lm ( $\mu_s$ ) .....	57
<b>5. ARAŞTIRMA SONUÇ VE TARTIŞMALAR .....</b>	<b>59</b>
5.1. Üretilen Kompozitlerin ekme Testleri ve Sonuçları .....	60
5.2. Nano Partikül Takviyeli Karbon Kumaş EpoksiKompozitin Aşınma Direnci Deney Sonuçları.....	63
5.3. Aşınmanın Matematiksel Modellenmesi .....	74
5.3.1. Tepki Yüzey Metodolojisi .....	74
5.3.2. ANOVA Oluşturulan Matematik Modelleri İçin Test .....	77
5.3.3 Deneysel Sonuçlar ve Modelden Elde Edilen Sonuçlar .....	80
5.4 Temel Etkiler ve Etkileşim Grafikleri .....	82
5.4.1 Temel Etki Grafikleri.....	82
5.4.2 Temel Etkileşim Grafikleri .....	92
5.5. Optimizasyon .....	115
<b>6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....</b>	<b>136</b>
6.1 Sonuçlar .....	136
6.2. neriler .....	138
6.2.1. Nerelerde Kullanılır .....	138
6.2.1. Çalışmanın Bir Sonra ki Aşaması.....	138
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>140</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>144</b>

## SİMGELER VE KISALTMALAR

### Simgeler

A	: Alan ( $m^2$ , $mm^2$ )
F	: Yük
$\mu$	: Sürtünme Katsayısı
$\sigma$	: Gerilme
$\sigma_{mak}$	: Gerilme Maksimum
$\epsilon$	: Birim Şekil Değişirme

### Kısaltmalar

ANOVA	: Varyans Analizi
ASTM	: American Society for Testing and Materials (Amerikan Test ve Malzeme Derneği)
BN	: Bor Nitrür
KNT	: Karbon Nanotüp
ÇCKNT	: Çok Cidarlı Karbon Nanotüp
DTM	: Deney Tasarım Metodu
TYM	: Tepki Yüzey Metodolojisi
MAM	: Malzeme Aşınma Miktarı (gram)
SPM	: Taramalı Prop Mikroskobu
rKF	: Geri Dönüştürülmüş Karbon Fiber
EKF	: Elektrikle Hizalanmış Karbon Fiber
RKF	: Rastgele Hizalanmış Karbon Fiber
PTFE	: Politetrafloroetilene
2BGF	: İki Boyutlu Grafit
3BGF	: Üç Boyutlu Grafit
UHMWPE	: Yüksek Moleküler Ağırlıklı Polietilen
PBO	: Poli (p-fenilen benzobisoksazol)

## 1. GİRİŞ

Karbon kumaş kompozitler hali hazırda uzay ve havacılık sektöründe, enerji sektöründe, otomotiv sektöründe ve denizcilik sektöründe kullanılmaktadır. Gün geçtikçe üretim maliyetleri düşmekte ve kullanım alanları artmaktadır. Özellikle havacılık sektöründe yeni nesil uçakların uçuş maliyetlerini ve emisyon değerlerini düşürmek için gün geçtikçe daha yaygın bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır. Havacılık sektöründe ilk günden itibaren kullanılan alüminyum alaşımlara göre mekanik özellikleri daha iyi ve imalatı daha kolay olan karbon kompozitlerin kullanım alanı genişlemiştir. Enerji sektöründe özellikle yenilenebilir enerji türü olan rüzgar enerjisinden elektrik üretimi için kullanılan rüzgar türbinlerinin kanatlarında hafifliği, sağlamlığı ve üretim kolaylığı yüzünden tercih sebebi haline gelmiştir. Otomotiv sektöründe ilk önce süper ve hiper arabaların imalatında kullanılan; koltukların, ön konsolun imalatında kullanılmış zamanla üretim tekniklerin gelişmesiyle şase ve güç aktarım organlarında kullanılmaya başlanmıştır. Bu günlerde ise otomotiv sektörü daha sağlam ve egzoz emisyonu daha düşük hafif arabalar üretmek için karbon kumaş kompozit parçalardan oluşan arabalar üretmeye başlamışlar ve ayrıca karbon kumaş fabrikaları kurmuşlardır. Denizcilik sektöründe ise yüksek oranda tuz içeren deniz suyunun sebep olduğu korozyona dayanıklı hafif hız tekneleri üretmek için karbon kumaş takviyeli kompozit gövdeler üretilmeye başlanmıştır.

### 1.1. Kompozit Malzemeler

Temelde 3 farklı malzeme türü vardır; metaller, seramikler ve organik malzemeler. İki veya daha fazla malzemenin üstün özelliklerinin ön plana çıkarılması için makro düzeyde birleşerek oluşturdukları yeni malzemeye kompozit denir.

#### 1.1.1. Kompozit Malzeme Çeşitleri

Kompozit malzemeler matrise ve takviyeye göre olmak üzere iki farklı şekilde sınıflandırılırlar.

Matrise göre

- Polimer Matris Kompozitler Matris olarak çeşitli reçineler, elyaf olarak çeşitli malzemeler (cam yünü, karbon elyaf, Au elyaf vb.)

- Metal Matris Kompozitler; otomotiv sektöründe sıkça kullanılan malzemelerdir SiC, bor, karbon ve Alumina gibi malzemeler eklenerek elde edilen malzemelerdir.
- Seramik Matris Kompozitler; Genelde çok yüksek sıcaklıklarda kullanılan kompozitlerdir, matris malzemesi olarak SiC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ve B<sub>4</sub>C yaygın olarak kullanılmaktadır. Takviye elemanı olarak genellikle Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve SiC seramik malzemeler kısa fiber formunda kullanılmaktadır.

Takviyeye göre

- Elyaf Takviyeli Kompozitler; Bu tür kompozitler, birçok özelliklerde artış sağlayan, liflerin ilavesiyle elde edilirler. Mühendislikte kullanılan malzemelerin pek çoğu fiber şeklinde üretildiklerinden mukavemet ve rijitlikleri kütle halindeki değerlerinden çok üst düzeyde olabilmektedir. Örneğin karbon fiberlerin çekme mukavemeti kütle halindeki grafitten çok daha yüksektir. Fiberlerin bu özelliğinin fark edilmesiyle fiber kompozitlerin üretilmesi süreci başlamıştır.
- Parçacık Takviyeli Kompozitler; Bir matris malzeme içinde başka bir malzemenin parçacıklar halinde bulunması ile elde edilirler. Bu tip kompozitler bir veya çok boyutlu mikroskobik parçacıkların veya boyutsuz olarak kabul edilen mikroskobik parçacıkların matris ile oluşturdukları malzemeler olup ortalama gömülen parçacık boyutu 1 µm'den büyük ve elyaf hacim oranı %25'den fazla kullanılmamaktadır. En çok kullanılan parçacıklar ise SiC ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>'den oluşan seramiklerdir.
- Tabakalı Kompozitler Tabakalı kompozit yapı, en eski ve en yaygın kullanım alanına sahip olan tiptir. Bu tür kompozitler farklı özelliklere sahip en az iki tabakanın birleşmesinden oluşur. Çok değişik bileşmelerle tabakalanmış kompozitlerin üretimi mümkündür. Eski türk savaş yayları, araba gövde parçaları vs

Kompozit malzemelerle ilgili daha geniş bilgi üçüncü bölümde verilecektir.

## 1.2. Nano Partiküller

Boyutları 100 nm ve altında kalan tozlar olarak tanımlan nano partiküller ise nanoboyutlu malzemelerin dolayısıyla nanoteknolojinin temelini oluşturmaktadır ve 2] Bu partiküller diğer ticari malzemelerden genelde farklı ve üstün kabul edilen özellikler göstermektedir. Sıkça belirtilen nano partikül özelliklerinin çekiciliğinin günümüzde bilinen nedenleri ise; kuantum boyut etkileri, elektronik yapısının boyut bağımlılığı, yüzey atomlarının benzersiz karakterleri ve yüksek yüzey/hacim oranı olarak ön plana çıkmaktadır

## 1.3. Sürtünme

Sürtünme bir cismin temas halindeki başka bir cismin veya yüzeyin üzerinde hareketini engellemeye çalışan direnç kuvvetidir. Bu kuvvet temas yüzeyine paraleldir ve yönü harekete veya muhtemel harekete zıt yöndedir.

İki tip sürtünme vardır:

**Sıvı sürtünme:** Temas halindeki yüzeyler birbirinden akışkan bir sıvı veya gazla ayrılmışlardır. Bu konu akışkanlar mekaniğinin konusudur.

**Kuru sürtünme:** Yağlayıcı bir akışkanın olmadığı yüzeylerin sürtünmesidir.

## 1.4. Aşınma

Aşınma, mekanik kuvvetler altında katı malzeme yüzeylerinin devamlı bir şekilde azalarak yok olmasıdır. Ayrıca kısaca sürtünme, kayma veya çatlama olarak da tarif edilebilir.

### 1.4.1. Aşınma Çeşitleri

- Adeziv aşınma (sürekli sınırlı aşınma, yenme vb)
- Abraziv aşınma
- Sürtünme oksidasyonu (mekanik korozyon)
- Yorulma aşınması (pitting vb.)
- Eroziv aşınma

Olmak üzere 5 tip aşınma vardır. Daha detaylı bilgi bölüm 3 te verilecektir.



### **1.5. Tezin Kapsamı**

İşletmelerin en büyük girdi maliyetleri enerji ve bakım giderleridir. Yıllardır süregelen araştırmalarda üretilen enerjinin yaklaşık üçte birinin sürtünme sonunda harcadığı gerçeğini ortaya koymuştur. Ayrıca aşınma sonucu ortaya çıkan makine sorunlarını gidermek için yüklü miktarda bütçeler oluşturulmak zorunda kalınmıştır. Sürekli üretim modeli olan bir işletmede aşınma sonucu bakım giderleri, bakım esnasında hattın durmasına sebep olması da eklenince karın %10-20 si arasında bir miktarını bulmaktadır. Ayrıca daha sonra bakım yapılması mümkün olmayan uydu vb cihazlarda aşınmanın oluşturduğu sorunların telafisi mümkün değildir. Bu tezin kapsamı geleceğin favori malzemesi olarak gösterilen nano partikülle mekanik özellikleri yükseltilmiş karbon kumaş takviyeli epoksi kompozitlerin aşınmasının incelenmesidir. Farklı nano partiküllerin değişken miktarlarda kompozite eklenmesi ile birbirinden farklı mekanik özellikler taşıyan altı farklı karbon kumaş nanokompozit malzeme elde edilmiş ve bu malzemelerin aşınmaları kendi aralarında karşılaştırılmış, matematiksel olarak modellenmiş ve optimize edilmiştir. Bu sayede elde edilen matematiksel modellerle, hiç yapılmamış deneylerin sonuçları tahmin edilebilir hale gelmiştir.

### **1.6. Tezin Ana Hattı**

Bu tez, sunulan çalışmanın ne olduğunu, kapsamını ve ulaşılması gereken hedefleri içeren giriş bölümü ile başlar. İlgili literatür bir sonraki bölümde gözden geçirilmiş ve tartışılmıştır. Üçüncü bölümde birinci bölümde kısaca bahsedilen konular derinlemesine tartışılmıştır. Dördüncü bölüm, deney düzeneğini ve takip edilen prosedürü kapsamaktadır. Dördüncü bölümde ayrıca deneylerin tasarımı, bu deneylerin nasıl yapıldığı ve deneylerde hangi araçların / ekipmanların kullanıldığı hakkında ayrıntılı bilgi verilmektedir. Beşinci bölümde aşınmanın modellenmesi, deneysel ve tahmin sonuçları ve bunlarla ilgili tartışmalar sunulmaktadır. Altıncı bölüm, sonuçları ve gelecekteki çalışmaları içerir.

## 1.7. Tezin Amacı

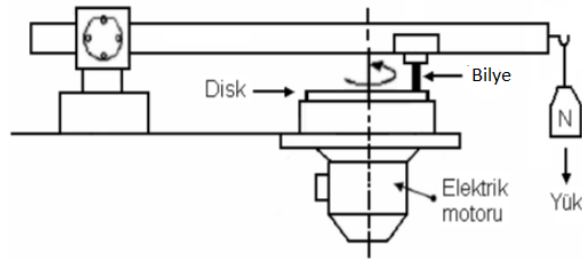
Bu çalışmanın temel amacı, aşınmanın gün geçtikçe kullanım alanı yaygınlaşan karbon kumaş takviyeli nano kompozitlerin üzerindeki etkilerini araştırmak ve iyileştirmektir. şuanda bu malzemeler birçok alanda kullanılmakla beraber en çok havacılık sektöründe kullanılmaktadır. Havacılık üretim endüstrisi her zaman daha hassas ve verimli üretim yöntemlerine ve aynı zamanda zaman açısından maliyet etkinliğine ihtiyaç duyar. Bu çalışma öncelikle havacılık medikal ve enerji endüstrilerini hedeflemekte ve aşınmanın optimize edildiği öngörülebilirliğin arttırıldığı malzemelerin üretimini vaat etmektedir.



## 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

### 2.1. Giriş

Günümüz dünyasında yeni ihtiyaçların gelişmesiyle birlikte mühendislik çözümleri de paralel doğrultuda gelişmiştir ve gelişmeye devam edecektir. Makine mühendisliği ve malzeme bilimi de bu gelişmelerden etkilenmiş ve yeni üretim metotları ve yeni malzemeler geliştirmişlerdir. Bunların en başında yüzyıllardır kullanılan ve hala geliştirilmekte olan kompozit malzemeler gelmektedir. Kompozit malzemelere örnek verirken eski türk savaş yaylarından, kerpiç evlerin temel taşı kerpice kadar geriye gidebiliriz. Temelde üç farklı malzeme vardır; metaller seramikler ve organik bazlı malzemeler. Kompozitler herhangi iki veya daha fazla malzemenin makro düzeyde bir araya getirilerek ihtiyaç doğrultusunda üstün mekanik özelliklerinin ön plana çıkarılmasıyla oluşturulur. Bu çalışmada vakum infüzyon metodu ile üretilmiş, karbon kumaş takviyeli nano partikül eklenerek güçlendirilmiş kompozit malzemelerin en önemli mekanik özelliklerinden olan çekme ve aşınma değerlerine bakılmıştır. Aşınma deneyleri tribometre (Şekil 2.1) aracılığı ile ölçülmüştür ve malzeme aşınma miktarları, anlık  $\mu_s$  ve ortalama  $\mu_s$  değerleri elde edilmiştir. Tribometreye bağlanmış karbon kompozit malzeme sabit 10000 metre yol boyunca farklı hızlarda ve farklı yükler altında döndürülmüştür. Tribometreye bağlanmadan önce ve sonra malzemelerin ağırlıkları ölçülmüş ve elde edilen farktan malzeme aşınma miktarları bulunmuştur. Tribometrede bulunan yük sensörü aracılığı ile de anlık  $\mu_s$  ve ortalama  $\mu_s$  değerleri bulunmuştur. Uygulanan yükler ve hızlar ise aşağıda daha detaylı olarak anlatılacak derin literatür çalışmaları ve ön deneylerle bulunmuştur.



Şekil 2.1 Aşınma Test Cihazı Şematik gösterimi

İlerleyen bölümlerde, ilgili literatür tartışılmış ve araştırmaların kompozit malzemelerde ve karbon kompozit malzemede aşınma konusundaki katkıları özetlenmiştir. Kompozitlerde mekanik özelliklerin araştırılması konusunda çok sayıda çalışma olmasına rağmen, karbon kumaş kompozitlerde aşınma konusuna ve aşınmanın matematiksel olarak modellenmesi ile ilgili literatür çalışmasına rastlanmamıştır, karbon kumaş kompozitlerin mekanik özelliklerinden aşınma gibi spesifik bir alanına odaklanmamıştır. Bu nedenle, bu bölümde kompozitler ve karbon kompozitler ile ilgili sadece birkaç önemli makale belirtilmiştir ve geri kalanı, kompozitlerde aşınmanın üzerine çalışılmıştır. Son olarak ilgili literatürde bulunan eksikler ortaya konmuştur. Bu araştırma çalışmasının amacı, bu çalışmanın sınırlarını belirleyen boşlukları kapamaktır.

## 2.2. Literatürde Daha Önce Yapılan Çalışmalar

I. Ahmad ve ark. (2010) farklı miktarlarda çok cidarlı KNT leri  $Al_2O_3$  ile birleştirerek nano kompozit malzeme üretmişler ve KNT nin mekanik özelliklerinden yararlanarak,  $Al_2O_3$  ü aşınmaya dirençli hale getirmişlerdir. 14N, 25N ve 35N gibi farklı yükler altında ball on disc metodu ile test edilen malzemelerde en iyi sonuç %80 aşınma miktarı azaltılmasıyla %10 MWKNT içeren 14N yük altında gerçekleşmiştir. MWKNT ler  $Al_2O_3$  içine sıcak presleme yöntemi ile konsolide edilip homojen olarak dağıtılmıştır. Nano kompozit malzemedeki MWKNT miktarı arttıkça özellikle düşük yüklerde aşınma miktarında dramatik düşüşler kaydedilmiştir.

Sirong Yu ve ark. (2008) epoksi reçine içine nano kauçuk ekleyerek aşınma direncini iyileştirmeyi hedeflemişlerdir. Deney malzemeleri 10mm\*10mm\*14mm sabit dikdörtgen prizma şeklinde hazırlanmış 3 farklı miktarda %5, %10 ve %16 oranında nano kauçuk ekleyerek pin on disc metodu ile aşınma miktarlarına bakılarak karşılaştırma yapılmıştır. Deney malzemeleri 30, 50, 70 ve 100N altında 30, 45, 60 ve 75 dakika süreleri boyunca aşınmaya maruz bırakılmıştır. Yükün artması ile beraber aşınma miktarlarında lineer artış olmuştur. En düşük aşınma miktarı %5 kauçuk içeren epoksi reçinede elde edilmiştir. Sürtünme katsayısı ( $\mu$ ) 30N ve 100N yüklerde en düşük miktarda çıkmış ara yüklerde  $\mu$  artmıştır. Malzemenin yırtılma tokluğu nano kauçuk miktarı ile doğru orantıda artmakla beraber en iyi aşınma oranı %5 nano kauçuk içeren malzemede elde edilmiştir.

Guijun Xian ve ark. (2006) epoksi reçine içine %7 grafit, %4 TiO<sub>2</sub> ekleyerek matris malzemesi kısa karbon fiberler, aramid ve politetrafluoretilen (PTFE) olan nano kompozit malzemeler elde etmişlerdir. Elde ettikleri bu numuneleri yapışkan ve düşük genlikli salınımlı aşınma modları ile test etmişlerdir. Kısa karbon fiberler her ne kadar düşük salınımlı aşınma direncini düşürsede aramidle birlikte uygulandığında aşınma direncinde yüksek miktarda iyileşmeler görülmüşlerdir. PTFE'nin kısa karbon fiber dolgulu nanokompozitlere eklenmesi, her iki aşınma koşulunda sürtünmeyi ve aşınmayı olumlu şekilde azaltmıştır. Bununla birlikte, Aramid partikülleri PTFE birlikte kullanıldığında aşınmaya kötü etkisi olduğu gözlemlenmiştir. Aşınma oranının ve  $\mu$  en düşük olduğu malzemeler %2-4 hacim oranında kısa fiber ve PTFE içeren nano kompozitler olduğu gözlemlenmiştir. Düşük genlik salınımlı aşınmada en iyi sonuçlar PTFE içermeyen aramid nano kompozit numunelerde görülmüştür. Blok on ring metodu ile aşınma testleri 1MPa yük altında 1m/s hızla 20 saat süre boyunca yapılmıştır.

Golchin ve ark. (2016) su bazlı kaygan yüzeyler de çok cidarlı KNT ve grafen oksitle mekanik özellikleri iyileştirilmiş UHMW polietilen nano kompozitin tribolojik özelliklerini araştırmışlardır. Yapılan çalışmalarda GO eklenmiş UHMWPE nin en düşük aşınma katsayısına ve en iyi aşınma direncine sahip olduğu anlaşılmıştır. Deneylede % 0,5 WNKNT ve % 0,5 GO içeren kompozit malzemeler üretilmiş ve bu malzemeler 4\*4\*4 mm<sup>3</sup> şeklinde numuneler haline getirilmiştir. Deneylede 80 N yük altında 0.13m/s sabit hızda yapılmıştır. Aşınma oranı; hacimsel aşınma miktarının yük ve yolun çarpımına eşit olacak şekilde hesaplanmıştır. Yüzey analizleri SEM görüntüleri ile yapılmıştır. Aşınma değerleri için üç farklı malzemenin üç farklı koşullandırma altındaki karşılaştırmalarını yapmışlardır. Bu üç farklı malzeme saf UHMPWE, UHMPWE+GO ve UHMPWE+MWKNT olmakla beraber üç farklı koşullandırmada ise koşullandırılmamış malzeme, yaşlandırılmış malzeme ve  $\gamma$ -ışınımlanmış edilmiş malzemedir. Elde ettikleri sonuçlar; malzemelerin sürtünme tepkisi, polimerizasyonun  $\gamma$ -ışınımı veya hidro termal yaşlanması üzerine değişmedi, Işınlama ile tüm malzemelerin aşınma oranı artmıştır. Bununla birlikte, hidro termal yaşlanma, malzemelerin aşınma direncinde çeşitli eğilimlere neden olmuştur. Doldurulmamış UHMWPE, aşınmaya karşı dayanıklılık sergilerken, kompozitlerin aşınma oranı, hidrotermal yaşlanma üzerine yükselmiştir. GO ve MWKNT içeren nano kompozitler içermeyenlerden daha iyi tribolojik sonuçlar vermiştir. Elde edilen diğer bir sonuçsa MWNT'lerin polimer matrisine dahil edilmesi, UHMWPE kompozitlerin GO

ile karşılaştırıldığında üstün yağlama ve aşınma direnci elde edilmiştir. Bu çalışmada ana amaç hidroelektrik santrallerinde kullanılan ve suyu kirletme ihtimali bulunan yağlayıcılar yerine suyu yağlayıcı olarak kullanmak ve yağlayıcı olarak su kullanıldığında ortaya çıkacak yağlama eksiklerinin nano kompozit teknolojisi ile çözmektir.

Chaudhary ve ark. (2018) jüt, kenevir ve keten gibi organik çevreci malzemeleri doğal fiber olarak kullanmış ve doğal fiberli epoksi kompozit malzemeler elde etmişlerdir. Elde edilen malzemelerin tribolojik özellikleri incelenmiştir. Bu malzemeler kendi içlerinde elle yatırma tekniği kullanılarak (jüt / kenevir / Epoksi), (kenevir / keten / epoksi) ve (jüt / kenevir / keten / epoksi) olarak hibritlenmişlerdir. Elde edilen numuneler 10N-50N arası yükler altında 1m/s -5m/s hızlarda ve 1000-2000m yol boyunca farklı yük, hız ve mesafelerde test edilmişlerdir. Elde edilen sonuçlara göre içine doğal matris yerleştirilen her numunede tribolojik özellikler gelişmiştir. Yükün sürtünme katsayısına etkisinin düşük olduğunu fakat hızın etkisinin yüksek olduğunu bulmuşlardır. Ortalama sürtünme katsayısı her malzeme için farklı olduğu gözlemlenmiştir. Farklı doğal elyaf kombinasyonları, epoksi aşınma özelliğini önemli ölçüde arttırmıştır. Kayma hızı, uygulanan kompozitlerin, uygulanan yüklerle birlikte aşınma performansı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu gözlemlenmiştir. Jüt kenevir epoksi kompoziti diğer kompozit kombinasyonlarından daha iyi bir tribolojik performans göstermiştir. TGVA analizlerinde yük arttıkça aşınma yüzeyi sıcaklığı arttığı görülmüştür. Aşınma sırasında abrasiv ve pulluk tipi aşınmalar plastik deformasyonlar görülmüştür.

Schön (2004) askeri sanayi ve havacılıkta sıklıkla kullanılan karbon elyaf takviyeli epoksi kompozit kumaşların tribolojik özelliklerini incelemiştir. Çalışmada amaç hava araçlarında kullanılan kompozitlerin civatalı bağlantılarında karşılıklı sürtünmeden kaynaklı hasarların önceden tahmin edilmesini sağlamaktır. Karbon fiber kompozit üzerindeki yorulma yüklü bağlantı noktasının aşınma mekanizmaları TEM ile incelenmiştir. Aşınmadan önce  $\mu_s$  0.65 iken aşınma sonrası  $\mu_s$  0.74 e çıkmıştır; buda göstermektedir ki yarıstatik hata bağlantı noktasında ki sürtünme ile oluşmaktadır. Civatalı bağlantılarda uygulanan yükün büyük bir kısmı sürtünme ile taşınır. Sürtünme kuvvetleri tarafından aktarılan yük, civata deliği yüzeyindeki yatak gerilmelerini azaltır. Bu gerilmelerin rulman hata yükü üzerinde büyük etkisi vardır. Rulman hatası yükünün

doğru tahminleri yapılmadan önce, sürtünme katsayısı bilinmelidir. Sürtünme katsayısı, ek yerlerini doğru bir şekilde modelleyebilmek için de önemlidir. Schön, farklı temas tipleri tarafından taşınan yük miktarından sürtünme katsayısını tahmin etmek için bir model geliştirmiştir.

Rana S. ve ark. (2014) tek çeperli KNT ve CNF lerle güçlendirilerek üretilen karbon kumaş nano kompozitlerin mekanik özelliklerinin karşılaştırmasını yapmışlardır. Üretilen bu nano kompozitlere hem karbon kumaş hem nano partikül gibi farklı takviyelendiriciler içerdikleri için çok derecelendirmeli kompozitler demişlerdir. Karbon / epoksi kompozitlere ağırlıkça %1.5 KNT'nin dahil edilmesi ile, elastik modülde %46, gerilme direncinde %9, kopma gerginliğinde %150, toklukta %170 ve termal iletkenlikte %167 ve ayrıca kompozitlerin aşınma performansında önemli gelişmeler sağlanmıştır. Aşağıda Tablo 2.1 de üretilen kompozitlerin karşılaştırmalı tribolojik özellikleri vardır. Yapılan bu çalışmada sonuç olarak TÇKNT li kompozitlerin işlenmesinin KNF li kompozitlere oranla daha zor ama daha iyi mekanik özelliklere sahip olduğu anlaşılmıştır.

**Tablo 2.1** Karbon Kumaş Takviyeli Kompozitlerin Karşılaştırmalı Tribolojik Özellikleri

Kompozitler	Ağırlık Kaybı(%)	Kalınlık Kaybı (%)	$\mu_0$
Karbon/Epoksi	4.6	3	2.8
1% KNF	3.1	1.1	4.4
1% KNT	1.3	0,5	3.3

Jian Wu ve ark. (2018) karbon fiber Politetrafloroetilene kompozitleri farklı boyutlarda CuO plakalarla güçlendirerek mekanik aşınma özelliklerini iyileştirmişlerdir. Bu çalışmada öncelikle GO ile nano fusiform plaka CuO malzemeler üretilmiştir. SEM ve AFM çalışmaları, CuO nano tabakalarının sırasıyla yaklaşık 13\*400\*1000 nm ölçülerine sahip fusiform plaka şeklinde olduğunu göstermektedir. CF/PTFE içine nano fusiform plaka CuO farklı oranlarda katarak aşınmaları kendi içinde karşılaştırmışlardır. %1.5 nano fusiform plaka CuO katılan nano karbon kompozitin, nano katılmamış karbon kompozite oranla aşınma miktarı %51 daha iyi olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca ticari ürün olan nano granül CuO ve nano çubuk CuO ile karşılaştırılınca nano plaka CuO ların aşınma oranına etkisinin %11 ve %15 olduğu gözlemlenmiştir. Aşınma mekaniğine Fusiform CuO lerin ısı kapasitesi yüksek olduğu için faydası olduğu düşünmüşlerdir. CuO nano plakaların sadece PTFE'nin yıpranmasını ve CF'nin

ayrılmasını engellemekle kalmadığı aynı zamanda transfer filmini de güçlendirdiği gözlemlenmiştir.

H. Dhieb ve ark. (2016) tek yönlü karbon fiber takviyeli epoksi kompozitleri üç farklı bağıl nem seviyesinde ve demineralize suya tam batırma ile 23<sup>0</sup> C de alüminyum ve paslanmaz çelik bilyelerle aşınma testlerini gerçekleştirmişlerdir. Testler %15, %50 ve %80bağıl nemlerde 200000 döngü ile 23<sup>0</sup> C de yapılmıştır. Bağıl nemin etkisi ve aşındırıcı etkisinin farklılıkları gözlemlenmeye çalışılmıştır. Genel olarak nemin ve suyun elyafların bağ yapısını bozduğunu ve aşınmayı olumsuz etkilediği görülmüştür. Paslanmaz çelikte aşınma derinliğinin alüminyuma göre tüm şartlarda daha fazla olduğu görülmüştür. Düşük bağıl nemde fiber bağların çözülmesi yüksek bağıl neme ve suya batırmaya göre belirgin derece de fazla olduğu gözlemlenmiştir. Paslanmaz çelik bilye ile yapılan aşınma deneylerinde aşınma derinliği bağıl nemin artışı ile artmakta, alüminyumda çok değişmediği görülmüştür. Paslanmaz çelikte aşındırmada bağıl neme bağlı yüzeyde oluşan ince film tabaka nemin kompozitte ki aşındırma miktarı daldırma ile oluşan yüzeyden daha fazla olduğunu gözlemlenmiştir. Yüksek nemin oksit debrislerine sebep olduğu ve yüzeyde aşınmanın bu yüzden daha fazla gerçekleştiği düşünülmüştür. Bu debrislerin ,% 85 bağıl nemde paslanmaz çelikte kayan karbon fiber takviyeli epoksi kompozit üzerinde ölçülen sürtünme katsayısının yüksek dalgalanmasına neden olurken, alüminyuma karşı sabit bir sürtünme kat sayısı olduğu görülmüştür.

Abdullah Kafi ve ark. (2014) kompozit laminatların performansını, fiber takviyesi ile matris arasındaki yapışmaya bağlı olduğunu düşünerek, elde edilen yapışma seviyesinin kalitesini arttırmak için liflerin yüzey özelliklerini değiştirerek mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Bu nedenle, donatı elyafları üzerindeki yüzey fonksiyonlarını geliştirmişlerdir. Bu çalışmada, üretimin üç aşaması boyunca karbon elyafların çok ölçekli yüzey analizi; karbonizasyon, elektrolitik oksidasyon ve epoksi boyutlandırması yapılmıştır. Yüzey topografyası, tüm fiber tipleri için fiber eksenine boyunca uzunlamasına sırtlar ve çizgiler ortaya çıkarana kadar SEM kullanılarak incelenmiştir. Taramalı prob mikroskobu (SPM) ile yüzey pürüzlülüğü ölçüldüğünde çok az değişim tespit edilirken, otomatik bir tekli elyaf test cihazı ile ölçülen sürtünme katsayısı, oksitlenmiş ve boyutlandırılmış elyaflar için sırasıyla % 51 ve % 98 artış göstermiştir. Bu sayede farklı modellenmiş liflerin mekanik özellikleri SPM ölçümü ile



ispatlanmış ve elde edilen 3 farklı lif tipi olan oksitlenmiş, oksitlenmemiş ve boyutlandırılmış liflerin mekanik özelliklere etkisi gösterilmiştir. Karbonizasyon, elektrolitik oksidasyon ve epoksi boyutlandırma sonrasında toplanan karbon lifleri, çeşitli teknikler kullanılarak hem fiziksel hem de kimyasal olarak karakterize edilmiştir. SEM ve SPM analizi, üç fiber tipinin morfolojileri ve pürüzlülüğü arasında çok az bir fark olduğunu göstermiştir. SPM ile ölçülen bağıl sürtünme katsayısı da üç elyaf tipi arasında değişmediğini görmüşlerdir, ancak makro ölçekte ölçülen sürtünmenin yüzey işlevselliğinin hassas bir ölçüsü olduğu göstermişlerdir. Tek elyaf test cihazı ile ölçülen sürtünme katsayısı, oksitlenmemiş elyaf için 0.14'ten oksidasyondan sonra 0.22'ye, ardından boyutlandırmadan sonra 0.28'e yükseldiğini gözlemlemişlerdir. Topografya değişmediğinden, bu durum büyük olasılıkla yüzeyin değişen kimyasal doğasından kaynaklandığı sonucuna varmışlardır. XPS, okside edilmemiş lif için oksijen / karbon oranının 0,006'dan oksidasyon sonrası 0,067'ye, ardından boyutlandırmadan sonra 0,209'a çıktığını göstermiştir. Artan oksijen içeriği, SPM kuvvet eğrilerinden belirlenen yüzey enerjisinde bir artışa neden olur. Sonuçlar, yüzey enerjisinde oksitlenmeden okside edilmeden boyutlandırılmış liflere doğru sürekli bir artış olduğunu göstermiştir. Her ölçüm yaklaşık 60 nm çapındaki küçük bir bölgede olduğundan, ölçümlerin standart sapması, elyaf yüzeylerinin enerjisel heterojenitesinin bir ölçüsüdür. Boyutlu liflerin, boyutsuz liflerden çok daha homojen olduğu gösterilmiştir. Interlaminar kayma mukavemetinin, sırasıyla 34, 40 ve 58 MPa'lık mukavemet sergileyen oksitlenmemiş, oksitlenmiş ve boyutlandırılmış elyaftan yapılan kompozitlerle, oksijen / karbon oranı ve yüzey enerjisi ile aynı eğilimi takip ettiği göstermişlerdir.

Venu Mangam ve ark. (2010) elektrokodülasyon tekniğiyle sentezlenen nano boyutlu ceria ( $\text{CeO}_2$ ) partikülleriyle takviye edilmiş bakır matriks nanokompozitlerin sürtünme ve aşınma davranışı incelenmiştir. Deneyler çelik bilye ile değişen yükler altında sabit 11 rpm dönüş hızıyla ball on disc metodu ile yapılmıştır. Deneysel sonuçlar incelendiğinde, bakır kompozitin aşınma direncinin, tüm yüklerde saf bakırdan üstün olduğunu ve bakır matriksindeki artan  $\text{CeO}_2$  miktarı ile arttığını göstermişlerdir. Sürtünme katsayısı ve aşınma oranları, uygulanan yükteki artış ile arttığını tespit etmişlerdir. Metal matris kompozit olan Cu- $\text{CeO}_2$  malzemesinin aşınma grafiği incelendiğinde aşındırıcı bilye önce bakır malzeme yüzeyi aşındırdığı aşınma devam ederken matris içinde bulunan  $\text{CeO}_2$  lerin yüzeye çıktığı ve aşınmanın azaldığı gözlemlenmiştir. Yük arttıkça sürtünme katsayısının artmasını, bazı  $\text{CeO}_2$  parçacıkları

kırılabilir ve  $CeO_2$  parçacıklarının keskin kenarları ile çelik karşı kısım arasındaki temas sürtünmenin artmasına bağlamışlardır. Yüksek yüklerde mekanik olarak karıştırılmış katmanlarda çelik bilyenin tortu sıkıştırmasından dolayı morfolojik sorunlar ortaya çıkmıştır.

B. Suresha ve ark. (2009) karbon fiber gibi yüksek modüllü elyaflarla polimer malzemeleri güçlendirmişler ve daha yüksek mukavemet, daha yüksek sertlik, daha iyi tokluk ve iyi boyutsal stabilite elde etmeye çalışmışlardır. Fiber takviyelerinin, mukavemet ve sertliği arttırmanın yanı sıra, yapışkan durumlarda aşınmayı azalttığını da literatür çalışmalarında tespit etmişlerdir. Yapıştırıcı koşulları genellikle otomotiv ve havacılık uygulamalarında görülür. Bu tür uygulamalarda, kullanılan takviye malzemesi türleri, farklı tribo durumlarında geliştirilmiş performans açısından önemlidir. Bu çalışmada, karbon-epoksi kompozit, disk üzerinde bir pin düzeni kullanılarak tribolojik özellikler için cam elyaf kompozitleriyle karşılaştırmışlardır. Testler, farklı kayma ve yükleme koşulları altında bir sert çelik diske (62 HRC) doğru kayan karbon elyaf numunelerine maruz bırakılarak (disk üzeri aşındırma testi) sabit mesafe de (5000m) değişen yük ve hızlarda gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada karbon elyaf kompozitlerinde kullanılan yük veya hızdan bağımsız olarak cam elyaf kompozitlerine kıyasla daha düşük sürtünme ve düşük kayma aşınması kaybı elde edilmiştir. Deneylerde hız ve yük biri sabit tutularak diğeri değiştirilmek suretiyle yapılmıştır; hız ve yük arttıkça aşınma miktarının gram cinsinden arttığını gözlemlemişlerdir. Aşınma katsayısı yükün artması ile artmakla beraber, hızın artmasıyla düşmüştür.

B. Suresha ve ark. (2010) cam ve karbon kumaş takviyeli vinilester kompozitlerin sürtünme ve kuru kayma aşınma davranışları üzerine çalışmışlardır. Deney sonuçlarında sürtünme katsayısının ve aşınma oranının yük / kayma hızındaki artışla arttığını ve kumaş takviyesinin tipine ve interfazın sıcaklığına bağlı olduğunu görmüşlerdir. Vinilester karbon kompozitlerde tribolojik özellikleri genel olarak mükemmel çıkmıştır. Aşınma ile zamanla karşı yüzey üzerinde oluşturulan ince bir filmin, tribolojik özellikleri iyileştirmede etkili olduğunu tespit etmişler. Aşınmış yüzeylerde SEM görüntülerini incelediklerinde cam elyaflarda daha fazla elyaf kırılması olduğu tespit edilmiştir. Bu çalışmada block on ring metodu ile farklı hızlarda ve yüklerde test yapılmıştır. İki aşındırıcı disk arasında kalan kompozit malzeme aşınmaya maruz kalır ve aşınma miktarı ve aşınma katsayısı ölçülür. Karbon vinilester, uygulanan

sabit yolda farklı yükler altında sürtünme hızını düşürür ve bu sayede yatak uygulamaları için uygun olabileceği sonucuna varmışlardır. Karbon kumaşla güçlendirilmiş vinilesterin spesifik aşınma oranı, cam kumaşla güçlendirilmiş vinilester kompozitinkinden daha düşüktü. Bu, karbon kumaşı dizilim kuvvetinin sadece sürtünme katsayısını düşürmekle kalmayıp aynı zamanda vinilester kompozitin aşınma direncini de arttırdığını göstermiştir. Aşınma oranı karbon vinil kompozitlerde cam vinil kompozitlere oranla %184 daha iyi olduğu görülmüştür. SEM görüntüleri incelendiğinde elyaf kırılması, ara yüz ayrılması, matrisin yırtılması, ince tabaka tabakası oluşumu, vb. gözlemlenmiştir. Bu çalışmaya bakılarak, karbon-vinilester kompozitlerin sürtünme ve kayma aşınma performansının, cam vinilester kompozit ve saf vinilester ile karşılaştırıldığında daha iyi aşınma direnci ve düşük sürtünme katsayısına sahip olduğu tribolojik özelliklerinin daha iyi olduğu sonucuna varılabilir.

X.H. Zhou ve ark. (2009) farklı işlemlerle üretilen karbon kompozitlerin tribolojik özelliklerine karşılaştırmalı incelemiştir. Üretilen karbon kompozitleri MPX-200 tribometresi ile yağsız kuru sürtünme testine tabi tutmuşlardır. Aşınma deneyleri sonucunda elde edilen aşınmış yüzeyleri EDS özelliği olan SEM cihazı ile incelemiştir. Semi-dry işlemlerle üretilen kompozitler aynı grupta bulunan diğer kompozitlerle karşılaştırıldığında her katmanda aşınma sonucu tekdüze  $\mu$ -t grafiği sergilediğini gözlemlenmiştir. Kompozit içerisinde bulunan kohoziv malzemenin hacimce% 40'dan az olması durumunda,  $\mu$ -t grafiği davranışı iki sabit aşama ile karakterize edilmiştir; birinci sabit durumda yağlayıcı dolgu maddesi arttıkça  $\mu$  düştü, ikinci sabit durumda; hacimce yağlayıcı dolgu maddesi %40 dan fazla olduğunda  $\mu$  nün değerinde değişim görülmedi. Yağlayıcı malzeme içermeyen aşınmalarda adesiv aşınma mekanizması görünür fakat bu çalışmada karbon fiber epoksi kompozit malzemeye MoS<sub>2</sub> ekleyerek takviyelendirilmiş ve bu durum adesiv aşınmayı yorulma aşınmasına evirmiştir. Karbon elyaf kompozit malzemede reçinede  $\mu$  değerini ve aşınma miktarını değiştirdiğini gözlemlenmiştir örneğin HM-E8 reçine ile imal edilmiş kompozitte daha düşük  $\mu$  değeri elde edilebilirken aşınma miktarı artar, ancak epoksi fenolik reçine ile imal edilen malzemede daha yüksek  $\mu$  değeri varken daha az aşınma oranı olduğu keşfedilmiştir.

A. Shalwan ve ark. (2014) hurma lifi ve grafit dolgu ile takviyelendirilmiş epoksi kompozitlerin tribolojik özelliklerini karşılaştırmalı olarak araştırmışlardır.

Aşınma deneyleri sonunda numuneleri SEM ile görüntülemişler ve fiber hasarlarını gözlemlemişlerdir. Hurma lifi ile taviyelendirilen epoksi kompozitlerde aşınmaya faydasını gözlemlemişlerdir. Ayrıca farklı oranlarda grafit dolgu malzemesi kullanarak kompozitlerin tribolojik özelliklerini daha da iyileştirmişlerdir. Aşınma testleri blok on ring (BOR) metodu ile sabit 2.8 m/s hız, 50N yük altında 7.56 km boyunca yapılmıştır. Testler sonucu elde edilen sonuçlara göre hurma lifi epoksida doğal lif olarak kullanıldığında tribolojik özellikleri sentetik lifler kadar hatta cam elyaftan daha iyi olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca grafitin yüzeyde kayganlaştırıcı film oluşturmasından dolayı hurma lifli kompozite eklenmesi belli bir miktara kadar aşınmayı olumlu şekilde iyileştirmiştir ama çekme dayanımını düşürmüştür. Kompozitin içinde grafitin belli bir oranın üstüne çıkması mikro çatlaklara sebep olduğunu gözlemlemişlerdir. %3 grafitte en iyi tribolojik sonuçlar elde edilmiştir.

B. Suresha ve ark. (2009) grafit dolgu maddesi ile doldurularak kalıplanmış karbon epoksi (K-E) kompozitlerin iki gövdeli aşındırıcı ile pin on disc metodu kullanılarak tek paso ve çoklu paso ile aşınmasını ve tribolojik sonuçlarını incelemişlerdir. Aşındırıcı olarak SiC zımpara kâğıdı (150-320 tane büyüklüğü) kullanılmıştır. Aşınma testleri farklı yük ve mesafeler altında gerçekleştirilip karşılaştırmalarını yapmışlardır. Genel olarak bakıldığında grafit dolgunun aşınmaya olumlu etkileri olduğunu söylemişlerdir. Aşınma yüzeylerinin yüzey morfolojisini SEM ile incelemişlerdir. Zımparanın aşındırıcı boyutu arttıkça aşınma miktarı artmaktadır. Grafit takviyeli kompozitlere göre aşınma mesafesinde ki artıştan dolayı hacimsel aşınma miktarı karbon kompozitlerde artış gösterdiğini tespit etmişlerdir. Bu çalışmada deneysel sonuçları tahmini sonuçlarla karşılaştırmak için varyans analizi metodu uygulanmış ve bu metod test parametrelerinin tespitinde de faydalı olmuştur. Karbon takviyeli kompozitlerle grafit takviyeli kompozitlerin farklı yükler altında aşınma performansı karşılaştırdığında; tek pasolu, çift gövdeli aşınmalarda spesifik aşınma oranının çok pasolulardan daha büyük olduğunu görmüşlerdir. Grafit dolgulu kompozitin sadece karbon kumaş takviyeli kompozitlerden her farklı koşul altında daha iyi tribolojik özelliklere sahip olduğunu görmüşlerdir. Bunun sebebi olarak grafitin mükemmel homojenlikte bir dolgu malzemesi olduğunu öngörmüşlerdir. SEM görüntülerinden elde ettikleri sonuçlar doğrultusunda tek pasolu, çok pasolu aşınmalarda ve kesmede aşınma mekanizmasında oluşan mikro çatlaklar ve

pulluklanma modeli aşınma mekanizmalarının baskın aşınma mekanizmaları olduğunu tespit etmişlerdir.

N. Guermazi ve ark. (2014) havacılıkta tamirde kullanılan cam elyaf, karbon elyaf ve hibrit kompozit malzemelerin üretilmesi ve mekanik özellikleri üzerine çalışma yapmışlardır. Bu kompozitleri elle yatırma işlemi ile üretilmişlerdir. Deneyler için 3 farklı seri hazırlanmış ilk seri KF takviye malzemesi ile yapılmış olup farklı miktarlarda epoksi içeren gruptur, ikinci seri CE içeren gruptur, üçüncü seri ise hibrit olan içinde hem CE hemde KE içeren gruptur. Fiziksel, termal ve mekanik davranışları nem emilimi, ısı kararlılık, gerilme dayanımı, elastik modül, eğilme dayanımı, eğilme dayanımı ve aşındırıcı aşınma direnci gibi mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Her bir bileşik grubun mekanik özellikleri üzerindeki hidrotermal yaşlanmanın etkisi de ayrıca incelemişlerdir. Genel sonuçlara bakıldığında, suya batırıldıktan sonra, tüm kompozitlerin, özellikle cam / epoksi kompozit için önemli nem emilimi gösterdiğini görmüşlerdir. Karbon / epoksi kompozitlerin, mekanik özellikleri, cam / epoksininkinden oldukça yüksek çıkmıştır; hibrit yapı, ara mekanik özellikler sunmuştur. Aynı eğilim, aşınma özellikleri açısından da gözlenmiştir. Hidrolik yaşlandırmanın tüm kompozit için mekanik özelliklerini azalttığı tespit edilmiştir. Aşınma testleri pin on disc metodu ile gerçekleştirilmiş olup aşındırıcı olarak SiC zımpara kullanılmış ve su ile yağlama yapılarak testler gerçekleştirilmiştir. Her bir test beş kez tekrarlanıp ortalamaları alınmıştır. Test sonuçları arasındaki fark %3 oranını geçmemiştir. Tribolojik özellikleri en iyi olan seri birinci seridir, saf CE içeren serinin aşınma özellikleri her koşulda en kötü çıkmıştır.

B. Shivamurthy ve ark. (2013) epoksi cam kumaşlarından farklı miktarlarda grafit parçalarla güçlendirip el yatırma yöntemi ile kompozit malzeme üretmişlerdir. Bu malzemelerin gerilme, eğilme davranışları, darbe dayanımı, sertliği ve yoğunluğu ölçülmüştür. Diğer mekanik özellikleri tespit edilen kompozit malzemeleri pin on disk metodu ile aşınma testlerine tabi tutulmuş ve spesifik aşınma oranları vb tribolojik özellikleri karşılaştırmalı ölçülmüştür. saf cam elyaf kompozit malzeme ağırlıkça %3,%6 ve %9 grafit içeren olmak üzere dört farklı kompozit malzeme üretmişlerdir. Ağırlık olarak % 3 oranında grafit içeren hibrit kompozitlerin, optimum mekanik ve aşınma performansları sergilediği tespit edilmiştir. Grafit oranının belli oranın üstüne çıkması spesifik aşınma oranını arttırdığı bundan dolayı tribo-mekanik özelliğin bozulduğunu

görmüşlerdir. Aşınma test sonuçlarını SEM de inceleyip elde ettikleri morfolojik sonuçları test sırasında aldıkları sonuçlarla karşılaştırılmış ve aralarında doğru bir bağ olduğunu ispatlamışlardır.

Emad Omrani ve ark. (2015) biyo bazlı bir epoksi kompozitin mekanik ve tribolojik özellikleri üzerindeki karbon elyafının etkisi araştırılmıştır. Farklı miktarlarda karbon fiberler (KF) eklenen kompozitler pin on disc metodu ile aşınma testine tabi tutulmuş ve kendi içlerinde karşılaştırılmışlardır. Kompozitte karbon fiber kullanılması diğer mekanik özelliklerini iyileştirdiği gibi tribolojik özelliklerini de ciddi miktarda artırmıştır. Tribolojik özelliklerde ki değişim SEM ile tespit edilmiştir. Deneyler yapılmadan önce taguchi metodu kullanılmış ve regrasyon analizi sayesinde deney sonuçları tahmin edilebilir yapmışlardır. Deneylerde dört farklı numune hazırlanmıştır; bunlardan ilki içinde karbon fiber içermeyen numunedir, diğerleri %10,%20 ve %30 KF eklenen numunelerdir. En düşük  $\mu$  değeri %30 KF içeren numunede görülmüştür. Karbon fiber miktarı arttıkça  $\mu$  değeri iyileşmiştir. Ama aşınma miktarını artırmıştır. Ayrıca, fiber hacim fraksiyonunda ki artış, karbon fiberler etrafındaki epoksi zincirlerinin hareketliliğindeki azalma nedeniyle sertleşmede gecikmeye neden olur. Hacim kaybı için kayma hızı saf epoksi numuneleri azalan bir eğilim gösterirken, karbonla güçlendirilmiş kompozitler azalan ve sonra artan eğilim gösterdiklerini tespit etmişlerdir.

Bamdad Barari ve ark. (2016) Enerji verimliliğini arttırırken çevreyi korumak için biyo-bazlı kompozitleri geliştirmişlerdir. Bu çalışmada, sıvı kompozit kalıplama (SKK) işlemi kullanılarak bitki kaynaklı selüloz nano elyaflardan (SNF'ler), biyo-bazlı epoksi kompozitler üretilmiştir. Kimyasal modifikasyonlu ve kimyasal olmayan SNF'ler kompozitler üretilip karşılaştırmalı test sonuçları incelenmiştir. Hazırlanan kompozitlerin sertleştirme kinetiği hem izotermal hem de dinamik Diferansiyel Taramalı Kalorimetri (DSC) metotları kullanılarak incelemişlerdir. Üretilen kompozitler üzerinde mekanik ve tribolojik özelliklerin yanı sıra mikroyapıları da incelemişlerdir. Genel olarak bakıldığında üretilen kompozitlerin saf epoksi numuneleri ile karşılaştırıldığında gelişmiş mekanik ve tribolojik özellikleri gösterdiği tespit etmişlerdir. Ayrıca, kimyasal olarak modifiye edilmiş SNF'lerin takviyeli kompozitleri, işlem görmemiş kompozitlerden daha iyi performans gösterdiğini belirlemişlerdir. SNF/epoksi kompozitleri, kayma sırasında yüzeyler arasındaki doğrudan teması en aza indiren,

böylece kompozitlerin hem sürtünmesini hem de aşınmasını azaltan homojen bir tabaka oluşturduğunu gözlemlemişlerdir. SNF li kompozitlerde  $\mu$  hız ve yükün artmasıyla doğru orantıda arttığını gözlemlemişlerdir.

B.N. Ramesh ve ark. (2014) karbon kumaş epoksileri  $Al_2O_3$  ve  $MoS_2$  le modifiye ederek pin on disc metodu ile aşınma testlerine tabi tutmuşlardır. Karbon epoksi numuneler farklı miktarlarda  $Al_2O_3$  ve  $MoS_2$  içerir. Aşınma testleri yapmadan önce deney tasarım metodlarından taguchi metodunu kullanarak belli sayıda (5) girdi değeri ve üç çıktı değeri için aşınma modellenmiştir. Girdi faktörleri; dolgu tipi, dolgu maddesi oranı, SiC kağıdın kum boyutu, normal uygulanan yük ve kayma mesafesi olarak belirlenmiştir. Spesifik aşınma oranı,  $\mu$  ve sertlik çıktı parametresi olarak belirlenmiştir. Aşınmayı etkileyen faktörlerin önem derecesini görmek için deneylerden elde edilen verilerle varyans analizi de (ANOVA) yapmışlardır. Taguchi metodu 5 girdi 3 çıktı değeri için 18 deney öngörmüştür. Analizler sonucunda dolgu oranının, tane büyüklüğünün ve dolgu tipinin C-E kompozitinin spesifik aşınma oranına en çok etki eden girdi faktörleri olduğunu tespit etmişlerdir. Deneyler sonucunda; minimum spesifik aşınma oranı, sürtünme katsayısı ve maksimum sertlik için optimum parametreler ağırlıkça% 10'luk  $MoS_2$  dolgulu karbon kompozitlerde, SiC zımparanın kum büyüklüğü 320 olduğu, uygulanan yükün 15 N ve kayma mesafesinin 30m olduğu testlerde optimum çıktı değerlerini elde etmişlerdir. Elde ettikleri çıktı değerlerini elektron mikrograflarının taranmasıyla da doğrulamışlardır. ANOVA sonuçları incelendiklerinde; aşınma altında dolgu miktarının (% 52.08), zımpara kağıdının (% 29.96), dolgu tipinin (% 7.8), aşınma mesafesinin (% 3.32) ve normal yükün (% 2.45) yüzde olarak aşınmaya etkili olduğunu tespit etmişlerdir.

B. Suresha ve ark. (2006) cam(C)/karbon(K) kumaş takviyeli vinil ester(V) kompozitlerin mekanik aşınma davranışını incelemişlerdir. Ölçülen aşınma hacmi kaybının, aşınma mesafesi ve aşındırıcı parçacık boyutundaki artışla arttığını görmüşlerdir. Ancak, aşınma mesafesindeki artış ve aşındırıcı parçacık büyüklüğündeki azalma ile spesifik aşınma oranı azaldığını görmüşlerdir. Bunun sebebi aşınan malzemenin aşındırıcının yüzeyinde ince film tabakası oluşturmasındandır. Test sonuçlarına göre, en yüksek spesifik aşınma oranının,  $10.89 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3/\text{Nm}$  değerinde olup cam kumaşla güçlendirilmiş vinil ester kompozitlerde elde etmişlerdir. En düşük aşınma oranı ise  $4.02 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3/\text{Nm}$  değerinde olup karbon kumaşla güçlendirilmiş vinil

ester kompozit için olduğunu görmüşlerdir. SEM kullanılarak aşınmış yüzey özellikleri incelenmiştir. Aşınmış yüzeylerin SEM görüntüleri incelendiğinde karbon elyafa göre daha yüksek oranda cam elyaf kırıldığını tespit etmişlerdir. Ayrıca karbonla güçlendirilmiş vinil ester kompozitinde, karbon ve vinil ester arasında daha iyi bir arayüzleşme yapışması gözlemlenmiştir. Deneysel sonuçlara bakıldığında aşındırıcı kağıdın tane büyüklüğünün, kompozitlerin aşınma oranını büyük ölçüde etkilediğini görmüşlerdir. C-V kompozitlerinde aşınma hacmi kaybı, K-V kompozitlerine kıyasla aşınma mesafesindeki artış ile arttığını gözlemlemişlerdir. Kullanılan iki fiber arasında, vinil ester içindeki karbon fiber, farklı yükler / aşınma mesafeleri altında daha iyi aşınma direnci gösterdiğini tespit etmişlerdir. Bunun nedenini literatür taramaları ve gözlemleri doğrultusunda karbon fiberin yüksek özgül mukavemete sahip olması ve kendinden yağlama özelliğine sahip olmasına bağlamışlardır. Ayrıca, karbon fiberli kompozitlerde, vinil ester matrisinin sünekliğinin azaldığı, fiber ve matris yapışmasının daha iyi olmasından dolayı, aşınma direncindeki bu iyileşmenin nedeni olabileceğini düşünmüşlerdir. Aşınmış yüzeylerin SEM çalışmaları incelendiğinde test sonuçları ile arasında düzgün bir korelasyon olduğu tespit etmişlerdir.

Jianzhang Wang (2012) Poli (p-fenilen benzobisoksazol) (PBO) mikro elyafları ve karbon nano elyafları (KNE) ile takviye edilmiş poliamid (PI) mikro ve nano kompozitlerin deniz suyu içindeki aşınma mekaniğini incelemiştir. Deneyler dört farklı numune ile yapılmıştır bunlar; katkısız poliamid, PBO+PI mikro kompozit, KNE+PI nano kompozit ve son olarak PBO+KNE+PI hibrit kompozitlerdir. Öncelikle tek başına PBO veya KNE eklenmesi aşınma mekaniğinin önemli ölçüde iyileştirmiştir ve katkısız PI a göre çok daha iyi sonuçlar verdiğini tespit etmiştir. İki fiberin ortak olarak birleştirilmesi ve hibrit kompozit oluşturulması sayesinde PBO mikro fiberleri ve karbon nano fiberleri arasındaki sinerjiden dolayı tek birinin eklenmesinden daha iyi bir rol oynadığı görmüştür. Bunun birkaç sebebi vardır; Sürtünme ve aşınma işlemi sırasında, esnek PBO mikrofiberleri sürtünme enerjisini etkili bir şekilde emip dağıtabileceği ve sert karbon nano fiberlerin ise PBO / PI arayüzlerini ve PBO mikro fiberlerini mekanik hasarlardan koruyabileceği gözlemlenmiştir.

Claire Guignier ve ark. (2015). 600<sup>0</sup> C ve 900<sup>0</sup> C arasında yaktıkları karbon elyaflarla KNT ekilmiş karbon elyaflar elde etmişler ve elde ettikleri bu KNT ekilmiş karbon elyaf ile ekilmemiş elyaflar arasında ki farkı gözlemlemişlerdir bunun içinde;



ürettikleri bu malzemeleri pin on disc metodu kullanarak mekanik aşınma testlerine tabi tutmuşlar ve sonuçlarını analiz etmişlerdir. Deneysel sonuçlarına göre KNT'lerin varlığının, ilk sürtünme döngülerindeki sürtünme katsayısını arttırdığını ve daha sonra KNT'ler olmadan fiberin  $\mu$ 'sine yakınlaştığını göstermiştir (0.22/0.25). Aşınma mekanizması, az sayıda sürtünme döngüsünden sonra KNT'lerin düzleştiğini ve bir transfer filmi oluşturduğunu görmüşlerdir. 50 çevrimden sonra isin oluşan transfer film yüzeyden ayrılmıştır. Bu çalışmada aşınma testi sadece elyaflar üzerinde yapılmıştır, bu yüzden KNT lerin kompozit yapılırken fiberlerin ıslatılmasına katkısı görülmemektedir.

Qing-Yi Peng ve ark. (2009) eriyik-interkalasyon metodu ile poli (viniliden flüorür) (PVDF) farklı nanokalay içerikli nanokompozitleri hazırlamıştır. Hazırlanan numuneler blok on ring metodu ile çalışan aşınma test cihazı ile aşınma testlerini yapmışlardır. (TEM) ile PVDF matrisinde nanokalay dağılımını görmüşlerdir. (XRD) (FTIR) analizi ile nanokalay birleşiminin PVDF kristal formunu  $\alpha$  fazdan  $\beta$  faza dönüşmeye neden olduğunu ve dolayısıyla malzemelerin polaritesini arttırdığını ortaya çıkardığını görmüşlerdir. Artan nanokalay içeriği ile nanokompozitlerin kristalliğinin azaldığını (DSC) analizi ile görmüşlerdir. %1-%2 nanokalay ağırlık oranına sahip nano kompozitlerde aşınma mekaniğinin iyileştiği aşınmanın saf PVDF e göre daha az olduğu görmüşlerdir. Ağırlıkça nanokalayın %5 i geçtiği nanokompozitlerde ise aşınma miktarı saf PVDF ten daha yüksek görmüşlerdir buda bize nanokalayın PVDF te yeterince iyi çözünmediği sonucunu verdiğini ortaya çıkarmışlardır.

Beibei Chen ve ark. (2012) karbon fiber (KF) ve farklı hacimli polimid (PI) ile eş zamanlı olarak takviye edilmiş politetrafloroetilen bazlı (PTFE bazlı) kompozitleri sıkıştırma kalıplama ve sinterleme metodu ile hazırlamışlardır. Hazırlanan PTFE bazlı kompozitlerin mikroyapı ve faz kompozisyonları (SEM) ve (XRD) ile analiz etmişlerdir. Ayrıca, deniz suyu altındaki sürtünme ve aşınma davranışları, block ring test aleti kullanılarak KF ve PI arasındaki sinerjistik etki ile ilişkili olarak değerlendirilmiş ve bunların aşınmış yüzeyleri de SEM kullanılarak analiz etmişlerdir. Test sonuçlarına göre, PI'nin dahil edilmesinin PTFE'nin mikro yapısının gevşemesine neden olduğunu ancak aşınma direncini arttırdığını tespit etmişlerdir. Yukarıdakilerin aksine, KF'nin dahil edilmesi PTFE'nin kompaktlığının artmasına ve KF içeriğinin artması ile PTFE bazlı kompozitlerin yıpranma direncinide arttırdığı gözlemlenmiştir. Daha da önemlisi, PI ve KF'nin uygun hacimli bir fraksiyonda eşzamanlı olarak dahil

edilmesi, deniz suyu yağlaması altında PTFE'nin aşınma oranını büyük ölçüde düşürdüğü gözlemlenmiştir. Bu sonuç doğrultusunda PI ve KF arasında sinerjik sürtünmeyi azaltan ve aşınmaya dayanıklı etki bulunduğu kanısına varmışlardır. Sonuç olarak, % 5 PI (hacim fraksiyonu) ve % 15 KF içeren PTFE bazlı kompozit, deniz suyu uygulamaları için optimum mekanik özelliklere uygun malzeme olarak belirlemişlerdir.

Dipak Kumar Jesthi ve ark. (2018) karbon ve cam kumaştan hibrit kompozit üretmişler ve ürettikleri bu kompoziti aşınma testlerine tabi tutmuşlardır. Aşınma testlerini yapmadan önce deney tasarım metodlarından tepki yüzey metodolojisini ve onun modelleme metodu olan box-bahken modelleme metodunu tercih etmişlerdir. Bu sayede çok az sayıda deney yaparak bir matematik modeli oluşturmuşlar ve tahmin edilebilir sonuçlar üretmişlerdir. Ayrıca optimizasyonda yapmışlardır. Elle yatırıma yöntemi kullanarak iki dış yüzey karbon kumaştan iç üç yüzeyde cam kumaştan olmak üzere beş katmanlı bir kompozit (KC<sub>3</sub>K) üretmişlerdir. Deney boyunca girdi faktörleri olarak yük, malzeme sertliği ve yolu kabul etmişler, çıktı parametresi olarak spesifik aşınma oranını almışlardır. Spesifik aşınma oranının minimum olduğu  $16.8511 \times 10^{-3} \text{mm}^3/\text{Nm}$  anda yol 1221m, yük 33N ve yüzey sertliği 57 HBN olarak elde etmişlerdir. Her ne kadar optimizasyon yapmış olsalar da sadece tek bir çıktı üzerine gitmekle aslında TYM deki optimizasyonun en önemli özelliği olan önem atfetme olayını yapmamışlardır.

Manuela Andrich ve ark. (2013) cam kumaş ve karbon kumaş epoksi malzemeler üretmişler ve bunları farklı koşullar altında aşınma testine tabi tutmuşlardır. Bu çalışmada amacın sadece kompozitlerin tribolojik özelliklerini iyileştirmek yerine kompozitlerle temas halinde olan metal yüzeylerinde yüzey kalitesini özel tekniklerle iyileştirerek aşınma miktarını düşürmek olduğunu söylemekte. Bu amaç doğrultusunda Andrich ve ark. kompozit malzemeyle etkileşim içinde olan metal malzemeleri ultra sert kaplama (DIAMOR) ile C la elmas gibi 2 µm kalınlığında kaplamışlardır. Kaplanan metal yüzeylerin sertliği 700 HV den 4000 HV artarken yüzey pürüzlülüğü de 0.25 µm ten 0.02 µm düşmüş yani yüzey kalitesini artırmışlardır. Yüzey pürüzlülüğü azalan sertliği artan metal yüzey sayesinde hem saf epoksida, hem cam epoksi kompozitte hem de karbon kompozitte spesifik aşınma oranında ciddi düşüşler yaşamışlar ve tribolojik özellikleri geliştirmişlerdir. Ürettikleri ürünün otomotiv

endüstrisinde kullanılan kaymalı yataklar için oldukça kullanışlı olduğunu düşünmektedirler.

Papadopoulos ve ark. (2016) KNT ile güçlendirilmiş karbon fiber epoksi kompozitlerin tribolojik özelliklerine bakmışlardır. Karbon fiberlere 90° derece yaklaşma açısıyla yapılan aşınma deneylerinde aşınmanın %50 oranında azaldığını gözlemlemişlerdir. Düşük açılı yaklaşma açısıyla yapılan aşınma deneylerinde KNT varlığının aşınmayı görece düşük miktarda azalttığı görmüşlerdir. 60° derece yaklaşma açısı ile yapılan aşınma deneylerinde aşınma oranında KNT takviyesinin ciddi miktarda pozitif etkisi olduğu ve aşınmayı düşürdüğünü tespit etmişlerdir. SEM görüntülerini incelediklerinde KNT nin fiberlerdeki kırılmayı azalttığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca karbon fiberlerin aşındırıcı yüzeydeki aşındırma etkisinin ihmal edilebilir olduğunu da tespit etmişlerdir.

Hak Gu Lee ve ark. (2006) karbon kompozitlerde yüzey aşınmaları sonucunda oluşan kalıntıların yüzeyde sebep oldukları ekstra aşınmanın tespiti ve azaltılması yönünde bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışma da kalıntıları yüzeyden uzaklaştırmak için karbon kompozit yatak yüzeylerine mikro kanallar yapıp bunların aşınma miktarı etkisine bakmışlar ve mikro kanalsız kompozitlerle karşılaştırmışlardır. Pin on disc metodu ile farklı yükler altında yapılan deneyler sonucunda açılan mikro kanalların yüzeyde ki oluşan kalıntıları uzaklaştırdığı ve bu sayede aşınma miktarını ciddi oranda düşürdüğünü tespit etmişlerdir. 8 mpa civarında mikro oluklu sistemlerde aşınma miktarının çok ciddi oranda düşürdüğünü tespit etmişlerdir.

R.K. Upadhyay ve ark. (2019) epoksi-grafen-MoS<sub>2</sub> kompozitleri hazırlanmışlar ve bu numuneler üzerinde fizyokimyasal, termal ve tribolojik testler yapmışlardır. Epoksi kompozitlerin hazırlanmasında ağırlıkça % 5,% 10 ve % 20 oranında grafen ve MoS<sub>2</sub> dolgu malzemeleri kullanmışlardır. Toplamda on farklı tip numune üretmişlerdir bunlar; saf epoksi, üç farklı yüzde (% 5,% 10 ve % 20) oran içeren grafen epoksi, üç farklı yüzde oran (% 5,% 10 ve % 20) içeren MoS<sub>2</sub> epoksi ve üç farklı yüzde oran (% 5,% 10 ve % 20) içeren grafen+ MoS<sub>2</sub> epoksidir. Hazırlanan epoksilerde partikül miktarı arttıkça termal stabilitesi düzeldiğini görmüşlerdir. Eklenen maddeler epoksinin daha sert olmasını sağlarken moleküler arası bağ yapısını güçlendirdiği için ısı artışında mekanik özelliklerini maksimum %20 etkilediğini gözlemlemişlerdir. Her ne kadar

yüzey pürüzlülüğü en düşük saf epoksida olsa da en düşük sürtünme katsayısı ve oranı her üç malzemenin karışımından oluşan kompozitlerde yani grafen+ MoS<sub>2</sub> epoksilerde görmüşlerdir. Bunun nedenini partiküllerin yağlayıcı özelliğine bağlamışlardır. En düşük aşınma oranını % 10 grafen+ %10 MoS<sub>2</sub> epoksida olduğunu tespit etmişlerdir. Üçlü epoksi-grafen-MoS<sub>2</sub> kompozitler, zararlı reaksiyon mekanizmasını tüketerek tribolojik davranışı arttırdığını tespit etmişler, hava ve oksijenin varlığında MoS<sub>2</sub>, sülfid ve oksitler gibi zararlı kimyasalları oluşturduğunu ve tribolojik özellikleri etkilediğini görmüşlerdir. Grafenin polimer matrisine eklenmesi, zararlı reaksiyonların (sülfid ve oksitler) eğilimini azalttığını, böylece düşük sürtünme ve aşınma davranışı sağladığını ve kompozite kaygan yüzey oluşturduğunu görmüşlerdir.

Sudarshan R. K. ve ark. (2015) grafit dolgulu ve saf epoksi karbon kompozitlerin tribolojik özellikleri üzerine çalışmışlardır. Karbon kumaşla el yatırma yöntemi kullanarak saf, %2,%4 ve %6 grafit dolgu içeren dört farklı numune üretmişlerdir. Bu numuneleri 200 µm silisyum aşındırıcı ile farklı açılardan (15°, 30°, 45° ve 60°) yeterli süre aşındırılmışlar ve tribomekanik aşınma olayları üstüne inceleme yapmışlardır. Yapılan diğer çalışmalarda da karbon kumaş kompozit malzemeler yapıları gereğince ne tam sünek ne tam kırılğan olarak tanımlanamadığından davranışları da sünek yada kırılğan olarak tanımlanamaz her ikisi gib davranır bu yüzden kırılğan malzemeler gibi 90° veya sünek malzemeler gibi 0° ye yakın açılarda değil, aşındırıcının yaklaşma açısı 45° olduğunda en iyi aşınma sonucunu verdiği gözlemlenmiştir. Buda malzemenin yarı sünek davranışta olduğunu göstermektedir.

D. M. Nuruzzaman ve ark. (2015) gear elyaf (GE) ve cam elyaftan (CE) kompozit malzemeler üretmişler ve ürettikleri bu malzemeleri farklı yükler (2, 4 ve 6 N,) ve hızlar (0,2, 0,4 ve 0,6 m / s) altında iki farklı yüzeyde (SS201/SS301) aşındırma testine tabi tutmuşlar ve sonuçları karşılaştırmışlardır. Burada hız ve yük değerlerinden anlaşılacağı üzere düşük hız düşük yük değerleri altında sürtünme testini yapmışlardır. Her iki kompozitte (GE ve CE) yükün ve hızın artışı ile aşınma miktarı aşındırıcı plakadan bağımsız bir şekilde artmıştır. En yüksek ve en düşük aşınma katsayısı CE in SS201 çeliğindeki  $\mu$  katsayısı ve GE nin SS301 çeliğindeki  $\mu$  kat sayısı olduğunu tespit etmişlerdir. Aşınma miktarına yükün hızdan daha fazla etkili olduğunu bulmuşlardır.

Farhad Ahmadijokani ve ark. (2019) Fren balataları için ileri düzey malzeme üretmek amacıyla %1, %2 ve %4 karbon fiber ekledikleri fenolik kompozit malzemelerin Dinamik-mekanik ve termogravimetrik analizlerini yapmışlardır. Deneylerde üç farklı hız (6,2m/s, 8,6 m/s ve 11,3 m/s) ve üç farklı normal yük (441N, 548N ve 666N) seçilmiş ve bu seçilen hızların ve yüklerin miktarından anlaşılacağı üzere yüksek hızlı ve ağır yükler altında çalışan kompozitler üretmeyi hedeflemektedirler. Hız ve yükün artmasıyla ortalama  $\mu$  değeri düşmüştür. En düşük ortalama  $\mu$  değeri her hız ve yükte %4 karbon fiber içeren kompozitte olduğunu tespit etmişlerdir. Spesifik aşınma miktarı ise hız ve yükün artmasıyla arttığını görmüşlerdir. Sertlik ve eğilme mukavemeti gibi fiziksel özellikler, karbon fiber içeriğini artırarak istikrarlı bir şekilde artmışlardır. Termo-mekanik analizler, ısıl stabilitenin azaldığını ve depolama modülünün arttığını ve sonuç olarak kompozitlere karbon fiberin katılmasıyla numunelerin sertliğini artırmıştır. Sonuçlar, sert frenleme koşullarında (daha yüksek uygulanan yükler ve kayma hızları) sürtünme kompozitleri için daha yüksek aşınma oranları ve daha düşük COF değerleri gösterdiğini görmüşlerdir. Kısacası ürettikleri karbon fiberli kompozitler fren amacı olan düşük aşınma yüksek  $\mu$  değerine sahip olmadığından fren sistemleri için kullanılması uygun değildir.

K.M. Subbaya ve ark. (2012) karbon kumaş takviyeli epoksi kompozitin (K-E) ikincil donatı olarak farklı ağırlıktaki silisyum karbür dolgusu fraksiyonunun eklenmesi ve mekanik, tribolojik özellikleri karakterize etmeyi amaçlamaktadırlar. Deneyler, deneysel çalışmaları optimize etmek için gri Taguchi'nin (L9) ortogonal dizisine göre tasarlanmışlardır. Dört girdi parametresi belirlenmiş olup bunlar; dolgu maddesi içeriği, tane büyüklüğü, yük ve aşınma mesafesidir. pin on disc metodu ile testleri yapmışlardır. Aşındırıcı aşınmayı etkileyen önemli parametreleri belirlemek için varyans analizi uygulanmışlardır. (K-E) kompozitine SiC partiküllerinin eklenmesinin aşınma direncini önemli ölçüde arttırdığını tespit etmişlerdir. Ağırlıkça% 10 SiC ilavesiyle en yüksek K-E kompoziti aşınma direnci elde etmişlerdir. Dolgu maddesi içeriği ve aşındırıcı tane büyüklüğünün, K-E kompozitinin aşınma davranışı üzerinde en önemli etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Aşınmanın optimum olduğu sonuçlar şu şekilde belirlemişlerdir; % 10 SiC, 320 tane aşındırıcı, 10 N uygulanmış yük ve aşındırıcı mesafesi 75 m. Parçacıklı dolgulu K-E kompozitlerindeki ana aşınma mekanizmaları; mikro kesme, mikro sürme ve mikro çatlamlar olduğunu tespit etmişlerdir.

Helezi Zhou ve ark. (2019) 2B grafit (2BGP) plaka dolgulu epoksi, 3B grafit (3BGF) dolgulu epoksi ve her ikisini içeren hibrit kompozitler üretmişlerdir. Ürettikleri bu kompozitleri pin on disc metodu ile aşınma testleri uygulamışlar ayrıca termal iletkenliklerine bakıp birbirlerine karşı üstünlüğünü karşılaştırmışlardır. Düşük miktarda 3BGF içeriği (<% 0.3 hacim) veya daha yüksek 2BGP içeriği (% 5.38 hacim), saf epoksiye göre termal iletkenlik oranları (yaklaşık% + 170) ve aşınma oranı (yaklaşık % 78) iyileştğini görmüşlerdir. Polimer kompozitler için takviye olarak 2BGP ye göre 3BGF'nin üstünlüğünü görmüşlerdir. Ayrıca 2BGP / 3BGF hibrit kompozitler ise bireysel olarak 2BGP veya 3BGF'den daha üstün olduğunu tespit etmişlerdir. Hibrit kompozitler için grafen / grafit yağlama etkisi ile birlikte aşınma performansını arttırmak için kompozitler üzerinde sıkıştırılmış bir transfer filmi oluşturduğunu gözlemlemişlerdir.

Hanumantharaya R. ve ark. (2018) molibden disülfür ( $\text{MoS}_2$ ), Bor Karbür ( $\text{B}_4\text{C}$ ) ve Uçucu kül (UK) parçacıkları ile takviye edilmiş epoksi kompozitin mekanik ve tribolojik davranışlarını test etmek amacıyla, el yatırma metodu kullanılarak numuneler yapmışlardır. Basma mukavemeti, sertlik, darbe dayanımı ve çekme dayanımı gibi mekanik özellikler ASTM standartlarına göre tespit etmişlerdir. Ayrıca pinon disc metodu kullanarak aşınma deneylerini yapmışlardır. Deneylerde Taguchi metodunu kullanarak varyans analizlerini ve optimizasyonu yapmışlardır. Aşınma deneylerinde girdi parametreleri olarak; yük, mesafe, hız, zaman ve sürat almışlar, çıktı parametreleri olarak; malzeme aşınma miktarı(mg), malzeme hacim miktarı ( $\text{m}^3$ ), spesifik malzeme aşınma miktarı( $\text{K}_s$ ), ve S/N oranını almışlardır. Aşınma testlerine ve ANOVA analizlerine göre; kompozite UK ve  $\text{B}_4\text{C}$ ,  $\text{MoS}_2$  ile eklendiğinde spesifik aşınma oranı azaldığını, numune C nin (% 10  $\text{MoS}_2$  +% 5  $\text{B}_4\text{C}$  +% 15 UK) minimum spesifik aşınma oranını sağladığını görmüşlerdir, SEM görüntüleri sayesinde,  $\text{B}_4\text{C}$  ve UK eklendiğinde adesiv aşınmasının aşındırıcıya dönüştüğünü görmüşlerdir.

Jitendra Narayan Panda ve ark. (2019) kompozitlerin aşınma ve mekanik özelliklerinin korelasyonunu araştırmak için; kısa cam elyafı (KCE) (ağırlık olarak% 30 ve% 40), iki farklı dolgulu kompozite ekleyerek; sentetik grafit (ağırlık olarak% 10) ve Polyaryl eter keton (PAEK) (ağırlık olarak% 60 ve ağırlık olarak% 50), kısa cam elyafın farklı miktarda ve çeşitlilikte dolgu malzemesi içeren epoksi kompozitlerin termal, mekanik ve tribolojik özelliklerine katkısını hesaplamaktadırlar. Kompozitin

içinde KCE nin artışı mekanik özellikleri her ne kadar artırmış olsa da eş zamanlı olarak kompozitin tribolojik özelliklerini bozduğunu tespit etmişlerdir. Bundan dolayı, optimum bir değer yakalamaya çalışmışlardır. Deneyleerde P/V [Mpa/(m/s)] olacak şekilde bir katsayı belirlemişler ve bunu düzenli bir şekilde artırmışlar ne zaman ki modelleme aşınma modellemesi dışına çıkıyor orada  $P/V_{\text{limit}}$  i demişlerdir. Buna göre, sırasıyla ağırlıkça% 30 ve ağırlıkça% 40 SKF dolgulu kompozitler için 112 ve 100 [Mpa/(m/s)] tespit etmişlerdir. Ağırlığın % 40 CF'si (KCF40) olan kompozitin mekanik özellikleri,% 30 ağırlık CF'si (KCF40) olan bir kompozitten daha üstün olduğunu gözlemlemişlerdir. Yaptıkları çalışmalar sonucunda vardıkları en önemli nokta mekanik özelliklerle tribolojik özelliklerin arasında herhangi bir korelasyon bulamamışlardır. Kompozite ağırlıkça% 30 KCF eklenmesi ,%40 KCF eklemeye göre üstün tribolojik özellikler sağlamıştır bunlar; düşük  $\mu$ , düşük  $K_0$ , düşük sürtünme dalgalanmaları ve daha yüksek  $PV_{\text{limit}}$  değeri). Her iki kompozit de çok düşük  $\mu$  (0.04-0.08), çok düşük  $K_0$  ( $1.6-9 \times 10^{-16} \text{ m}^3 / \text{Nm}$ ) ve çok yüksek  $PV_{\text{limit}}$  değerleri (112 MPa m / s). Ayrıca KCF miktarının %30 u aştığı zaman elyafların yeterince ıslanmadığını ve yüksek P/V değerlerinde yüzeyden soyulduğunu gözlemlemişlerdir.

Leyu Lin ve ark. (2019) çevre kirliliğine sebep olan atık karbon fiberleri geri dönüşüm yaparak rKF haline getirerek tribolojik özelliklere sahip mekanik elemanlara çevirmeyi bu sayede çevreyi korumayı ve maliyetleri düşürmeyi hedeflemişlerdir. rKF li kompozitlerle vKFli kompozitleri karşılaştırmışlar. Her ne kadar vKF li kompozitlerin mekanik özellikleri rKF li kompozitlerden üstün olsa da, orta seviye P/V değerlerinde oldukça başarılı tribolojik sonuçlar elde etmişlerdir. Çelik karşı yüzeyde oluşturulan aşınmış yüzeylerin ve tribofilmlerin analizi, sert alt mikropartiküllerin varlığında tribokompozitlerin tribolojik performansını arttırmaya yönelik baskın mekanizmaların, kompozit içindeki takviye karbon fiberlerinin tiplerinden bağımsız olduğunu ortaya koymuşlardır. Başka bir deyişle, takviye edici karbon fiberlerin mekanik özellikleri, bu tür polimerik tribomerlerin tribolojik özelliklerini belirlemek için ikincil bir rol oynadığını tespit etmişlerdir. Bu çalışma sayesinde çevre dostu tribometryaller üretmeyi başarmışlardır. Bu sayede, enerji verimliliği sağlamışlar ayrıca israfın önüne geçmeyi hedeflemişlerdir.

Reza Moghimi Monfared ve ark. (2018) VARIM yöntemi kullanarak çok cidarlı karbon nanotüp (ÇCKNT) ve nano slika (NS) ile desteklenen karbon kumaş kompozit

malzemeler üretmişler ve bunların çekme, tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. Çekme ve triboloji deneyleri için üçü hibrit olmak üzere toplamda beş farklı kompozit üretmişlerdir bunlar: ağırlıkça %9 ÇCKNT içeren karbon kompozitler, ağırlıkça %9 NS içeren karbon kompozitler, Ağırlıkça% 0.2 ÇCKNT + ağırlıkça% 0.7 NS karbon kompozitler, ağırlıkça% 0.7 ÇCKNT + ağırlıkça% 0.2 NS karbon kompozitler ve ağırlıkça% 0.45 ÇCKNT + ağırlıkça% 0.45 NS karbon kompozitlerdir. Yaptıkları testler sonucunda hibrit kompozitlerin mekanik ve tribolojik özelliklerinin tek bir nano partikül içeren karbon kompozitlerden daha iyi olduğunu bulmuşlardır. Özellikle ağırlıkça% 0.45 ÇCKNT + ağırlıkça% 0.45 NS karbon kompozitler çekme deneylerinde % 25,2 ve % 31 daha yüksek mukavemete sahipken, sürtünme katsayısı ve aşınma oranı % 88 ve 98 oranında azaldığını tribolojik özelliklerinde ciddi miktarda iyileşme olduğunu ve beraber sinerjik etki yaptıklarını görmüşlerdir. Reza Moghimi Monfared ve ark. ağırlıkça% 0.45 ÇCKNT + ağırlıkça% 0.45 NS karbon kompozitleri, karbon kompozitlerin tribolojik ve mekanik özelliklerini artırmak için tavsiye etmişlerdir.

Y. Şahin ve ark. (2017) tek yönlü karbon fiberlerle kalıplama yöntemi ile karbon fiber epoksi kompozitler üretmişler ve aşınma sonucu ağırlık kaybını ölçmek ve ağırlık kaybına etki eden parametlerin etki değerlerini bulmak için tepki yüzey metodolojisini kullanarak kompozitleri pin on disc metoduyla Si zımpara ile aşınma testlerine tabi tutmuşlardır. Aşınma testleri fibere paralel ve dik olmak üzere iki farklı fiber oryantasyonu ile yapılmışlardır. Aşınma deneyleri sonucunda yükün ve dönme hızının artması aşınmayı arttırdığını ama fiber oryantasyonunun aşınmaya etki etmediğini görmüşlerdir. TYM ile tasarlanan deneyler sayısı 15 adettir ve girdi olarak yük (N), hız(m/s) ve fiber oryantasyonu olarak belirlemişlerdir. TYM ve ANOVA analizleri sonucu matematik modelleme ve tahmin edilebilir deneyler bulmuşlardır. Matematik modelinden elde edilen tahmin edilebilir sonuçlarda ortalama %2.64 hata payı vardır.

Yan Hao ve ark. (2019) elmas, SiC, MoS<sub>2</sub> ve grafit doldurma yoluyla üç farklı epoksi kompozit kaplama üretmişlerdir. Bunlar; SCE (ağırlıkça içerik SiC, 50%), DOE (ağırlıkça içerik SiC 25% + elmas 25%), ve GME (ağırlıkça içerik SiC 25%, elmas 15%, MoS<sub>2</sub> %5 ve grafit %5) . üretilen üç farklı hibrit kompozitin mekanik ve aşınma testleri yapılmış ve saf epoksi kompozitle karşılaştırılmıştır. Kaplanmış epoksilerin kırılma tokluğu ve Young modülü saf epoksiden oldukça yüksek çıktığını görmüşlerdir. Aşınma deneylerini incelediklerinde malzeme aşınma miktarında %73.8 civarında bir



iyileştirme tespit etmişlerdir. Elde ettikleri bu sonuçları, Saf epoksida düzgün bir şekilde dağılmış olan elmas ve SiC grift işleminin, kaplamalı epoksida daha yüksek mekanik özellikler göstermesini sağlayan, parçacıklar ve matris arasında güçlü bir arayüze yol açtığını düşünmüşlerdir. Ayrıca, yağlayıcı dolgu maddeleri-MoS<sub>2</sub> ve grafit nedeniyle, kaplamalı kompozitin aşınmış yüzeyinde sürtünme kaynaklı ısınmanın etkili bir şekilde azaltılabilen ve matrise daha fazla zarar verebilecek sürekli ve kalın bir kayganlaştırıcı film gözlemlenmiştir.

Y. Şahin ve ark. (2017) karbon kumaşla güçlendirilmiş Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve PTFE tozlarını içeren nano bazlı kompozitlerin tribolojik davranışlarını modellemek üzere çalışma yapmışlardır. Çalışmalarında TYM nin box-bahken bölümünü kullanmışlardır. Girdi parametresi olarak yük (N), dönüş hızını(rpm) ve malzeme çeşidi, çıktı parametresi olarak aşınma miktarını almışlardır. Üç girdi tek çıktı için TYM 15 deney öngörmüştür. ANOVA %95 güven düzeyinde aşınmaya en çok etki eden faktörün yük olduğunu ortaya çıkarmıştır. Doğrusal katkı yüzdesi yaklaşık% 82 (yük % 39.41, hız % 25.22 ve malzeme türü % 17.13) olduğunu görmüşlerdir. 5 N'luk bir yük altında, 80 rpm'lik hızda ve C60 + % 2.5 ağırlıkça% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> epoksi kompozitte en düşük aşınma miktarı elde edilmiştir.

Amit Chanda ve ark. (2019) saf epoksi, elektrikle hizalanmış karbon fiber (EKF) epoksi ve rastgele yerleştirilmiş karbon fiber (RKF) epoksi kompozitler farklı ağırlıklarda üretmiş ve tribolojik testlere tabi tutmuşlar elde ettikleri sonuçları karşılaştırmışlardır. Sabit yük(20N) ve hız altında %1 KF içeren malzemelerin aşınma test sonuçlarını incelediklerinde sırasıyla %1 RKF ve %1 EKF içeren kompozitlerin aşınma direnci farkını saf epoksiye göre 3.5 ve 25 kat arttırmışlardır. Ayrıca,  $\mu$ , saf epoksi için 0.6'dan RKF epoksi kompozitleri için 0.44 ve EKF epoksi kompozitler için 0.24'e düştüğünü gözlemlenmiştir. Geliştirilmiş termal stabilite, normal yük taşıma kapasitesi ve CNF'lerin yağlama etkisi, hizalanmış kompozitlerin üstün aşınma direncine katkıda bulunduğunu tespit etmişlerdir. Test sonucu elde ettikleri yüzeyler incelendiğinde; saf epoksi için aşınma mekanizması adesiv ve pulluklama mekanizmaları etkindir. RKF içeren epoksi kompozitler için, kombine mekanik etki görülmüştür; adesiv, abrasiv ve yorulma aşınması görmüşlerdir. Genel olarak çalışma sonuçlarına göre, KF'lerin epoksi sistemi üzerinde daha iyi tribolojik, elektriksel ve termal özellikler kazandırdığını görmüşler ve ayrıca KF'lerin epoksi matrisi içinde dikey

olarak hizalandığında gelişmiş özellikleri bakımından önemli bir etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir. Üretilen hizalı KF / epoksi kompozit, yüksek aşınmaya dayanıklı polimer rulmanlar, elektriksel olarak iletken burçlar ve termal olarak kararlı kaplamalar gibi uygulamaları için önermişlerdir.

Fei Jie ve ark. (2016) karbon kumaş kompozitten yapılmış ıslak debriyajın kullanım ömrü boyunca hizmet ömründeki değişiklikleri açıkça ortaya koymak için, tribolojik özellikler, yağsız yağlanma durumu araştırmışlardır. Sonuçlara bakıldığında, tork aktarma kabiliyetinin önce bağlanma döngüsü arttıkça arttığını, sonra azaldığını göstermektedir. Sürtünme stabilitesi ve pedal kademeli olarak kötüleşir ve titreme durumu ciddileşir. Karbon kumaş kompozitlerde aşınma mekanizmaları, adesiv aşınma, abrasiv aşınma ve termal bozunma üçlü kombinasyonunu sergilediğini tespit etmişlerdir ve aşınmış yüzeyleri incelediklerinde, farklı yönlerde farklı aşınma özellikleri gösterdiğini görmüşlerdir. Debrajın kullanım döngüsünün artmasıyla birlikte, tork aktarma kabiliyeti öncelikle 8000 kullanım döngüsünden önce arttığını sonra düştüğünü gözlemlemişlerdir. Sürtünme stabilitesi ve pedal kademeli olarak kötüleşip artan titresemeye sebep olduğunu aksine, aşınma oranı kademeli olarak sabit hale geldiğini tespit etmişlerdir. Elde ettikleri deney sonuçlarına göre daha güvenli ve konforlu vites dişliye sahip karbon kumaş ıslak debriyajı tasarlamak ve üretmek ve hizmet ömrünü uzatmak için, mükemmel ısı direncine sahip olan polimer matrisi seçilmesini, karbon kumaş ile fenolik matris arasındaki ara yüzey yapışması iyileştirilmesini önermişlerdir.

### **2.3. Literatürde Oluşmuş Boşluklar**

Detaylı literatür tarama çalışması yapıldıktan sonra öncelikle literatürde bulunan eksikler tek tek tespit edilmiş ve bu eksiklerin doldurulması için hangi tip malzemeler üzerinde ne tür bir çalışma yapılması tartışılmıştır. Ayrıca derin literatür çalışması sonucunda diğer araştırmacıların deneyleri hangi koşullar altında yapılmış, hangi koşullar altında aşınma deneyleri anlamsızlaşıyor belirlenmiştir. Yukarıda anlatılan literatür çalışmaları incelendiğinde karbon kumaş epoksi kompozitin geleceğin malzemesi olacağı kolaylıkla anlaşılmaktadır. Karbon kumaş epoksi kompozitler üzerine yapılan araştırmalarda daha çok çekme, eğilme, kesme, delme gibi mekanik özellikleri araştırılmıştır. Bu çalışmada üretilen karbon kumaş epoksi kompozit malzemelerin en önemli özelliği olan çekme dayanımına ve tribolojik özellikleri

incelenmiş ve geliştirilmiştir. Ayrıca aşınma üzerine yapılan ve yukarıda bahsedilen çalışmalarda genelde karbon kumaş epoksi kompozit malzemelerin yalın halinin aşınma test sonuçlarına bakılmıştır. Bu çalışmada farklı nano partiküllerle (KNT ve BN) farklı miktarlarda kullanılarak güçlendirilmiş nano karbon epoksi kompozit malzemelerin tribolojik özelliklerine bakılmıştır. Yukarıda bahsedilen çalışmalar incelendiğinde yapılan tribolojik testlerin sadece Ramesh, Jesthi, Omrani, Subbaya, Hanumantharaya ve Şahin in deney tasarım metodolojisini uyguladığı görülmektedir. Bu araştırmacılardan sadece Jesthi ve Şahin TYM yi kullanmıştır. TYM bir çok özelliğe sahip bir modelleme olmakla beraber en önemli özelliği çıktı değerlerini kollabrasyonla optimize etmektir. Yani birden fazla çıktı değerinden en önemli olandan en önemsiz olana belli bir kat sayı ile önem atfederek ortak bir optimizasyon çıkarabilir. Yukarıda bahsedilen iki çalışmada bunu yapmamıştır. Jesthi en küçük aşınma değerini optimizasyon olarak göstermiş, Şahin de sadece bir çıktı değeri üzerinden çalışmıştır. Bu çalışmada optimizasyon yapılmış ve iki girdi değeri için önem katsayısı belirlenmiştir. Literatür genel olarak değerlendirildiğinde bu derece kapsamlı, kabul görmüş deney metodolojisini kullanarak deneyleri tasarlayan farklı malzemelerle bu deneyleri yapan deney sonuçlarında matematiksel modelleme, optimizasyon ve regrasyon analizi yapan başka çalışmaya rastlanmamıştır. Bu çalışma içinde barındırdığı eş zamanlı yapılan birçok çalışma ile başlı başına özgün bir çalışmadır. Bu çalışma, günümüzde kullanımı hızla artan ve geleceğin malzemesi olarak görülen nano karbon kumaş epoksi kompozit malzemelerde çekme ve aşınmaya yönelik yeni bir bakış açısı kazandırmayı ve bu çalışmada üretilen malzemelerle yüksek tribo-özelliklere sahip malzemeler üretebilmeyi ve bunların farklı yük ve hızlar altında aşınma değerlerinin ve aşınma katsayılarının tahmin edilebilir hale getirilmesini vaat eder.

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

Sanayi devrimi ile hızla gelişen dünyada, insanlar yeni teknolojileri keşfettikçe elde mevcut bulunan malzemeler üretilmek istenen yeni teknolojiler için yetersiz kalmıştır. Bundan dolayı bilim insanları yeni malzemeler keşfetmeye yeni üretim modelleri oluşturmaya başlamışlardır. Yeni geliştirilen üretim modelleri iki yeni kolaylık getirmiştir; hali hazırda mevcut bulunan ama yetersiz üretim ve işleme teknolojileri yüzünden yeterli miktarda kullanılamayan birçok materyal kullanılmaya başlanmıştır. Getirdiği ikinci kolaylık ise elde bulunan mevcut malzemelerin ihtiyaç olan iyi özelliklerinin ön plana çıkartılarak birleştirilmesinden oluşan yeni hibrit malzemeler geliştirilmiştir. En az iki farklı malzemeden oluşmakta olan bu yeni malzemeler fiziksel ve kimyasal olarak makro düzeyde birleşmişlerdir. Bu birleşme sonucu ihtiyaç olan üstün mekanik özellikler elde edilmiş, fiziksel ve kimyasal zayıflıklar ortadan kaldırılmıştır. Bu malzemelere kompozit malzemeler denir. Kompozit malzemeler başta havacılık olmak üzere, otomotiv, deniz araçları, spor malzemeleri, yapı elemanları, alt yapı, inşaat ve enerji sektöründe uygulama alanları artarak kullanılmaktadır.

#### 3.1. KOMPOZİT MALZEMELER

Temelde 3 farklı malzeme türü vardır; metaller, seramikler ve organik malzemeler. İki veya daha fazla malzemenin üstün özelliklerinin ön plana çıkarılması için makro düzeyde birleşerek oluşturdukları yeni malzemeye kompozit denir.

##### 3.1.1. Kompozit Malzeme Çeşitleri

Kompozit malzemeler matrise ve takviyeye göre olmak üzere iki farklı şekilde sınıflandırılırlar.

###### 3.1.1.1. Matrise Göre

**Polimer Matris Kompozitler:** Matris olarak çeşitli reçineler, elyaf olarak çeşitli malzemeler (cam yünü, karbon elyaf, Au elyaf vb.) Malzemedeki yerine göre sağlamlık,

esneklik, hafiflik, çevre şartlarına (nem, güneş ısınları, gibi) dayanıklılık, darbe dayanımı, sertlik gibi günlük yaşamda kullanılan terimlerle ifade edilen özellikler yanında daha bilimsel bir dille ısıl genleşme katsayıları, yorulma, çatlama ve kırılma, çekme, eğme dayanımları ve benzeri değerlerin uygunluğu aranır. Bütün istenen özellikleri tek bir metal, seramik veya polimer malzemede bulmak son derece ender rastlanan bir olaydır.Çeşitli mühendislik uygulamalarında metallerin yerini tercihen kullanılan polimer kompozitler sadece hafiflik, mekanik dayanım gibi özellikler değil, insan dokuları ile uyum sağlayan ve sertlik derecesi ayarlanabilen yapay doku ve organlar gibi uygulamaların dışında "optik elyaf" ve basınç ile elektrik üretebilen" piezo elektrik özellikli ve istenildiği gibi işlenebilen özel sistemlerin yapımında da metal ve seramik malzemelerin yerlerine kullanılmaktadır Tezin ana konusu günümüzde önemi her geçen gün artan bu polimer matris kompozitlerin mekanik özelliklerinden aşınma direncinin modellenmesi üzerinedir.

**Metal Matris Kompozitler:** SiC, bor, karbon ve Alumina gibi malzemeler eklenerek elde edilen ve otomotiv sektöründe sıkça kullanılan malzemelerdir.Metal matrislikompozit (MMK) malzemeler, istenen ve gerekli özellikleri sağlamak üzere en az biri metal olan iki veya daha fazla farklı malzemenin sistematik bileşimiyle elde edilen yeni malzemelerdir. Metal matrislikompozit malzemeler tek bileşenli alaşımlarla elde edilemeyen özellikleri sağlamak üzere, bir metal matris içinde sürekli veya kısa fiber, whisker veya partikül şeklinde takviye fazı içerir. Günümüz şartlarında üretilebilen metal matrislikompozit malzemeler üç gruba ayrılmaktadır . Elastiklik modülünün, belli oranda da mukavemetin artmasıyla sonuçlanan, bağlayıcı matris içine partikül şeklindeki takviye malzemelerinin ilavesi ile oluşturulan partikül takviyeli metal matrislikompozitler, - Partikül takviyeli metal matrislikompozitlere göre daha büyük yük iletimi yeteneğine sahip, yüksek dayanımlı whisker veya kısa fiber takviye metal matrislikompozitler. Fiberin yüksek performanslı tüm özelliklerini taşıyan sürekli fiber esaslı metal matrislikompozitler. Belirtilen kompozit sistemlerinin her birinin de ayrı ayrı üstünlükleri ve zayıflıkları söz konusudur. Örneğin, partikül esaslı metal matrislikompozitler düşük maliyetlerinin yanısıra, rijitlikte dikkate değer gelişme ve hemen hemen izotropik özellikler gösterir. Ancak mukavemetteki gelişme sınırlıdır. Ayrıca kopmadaki şekil değişiminin ve kırılma tokluğunun düşük olması bu kompozitlerin zayıf yönüdür. Whisker veya kısa fiber katkılı metal matrislikompozitler, partikül esaslılara oranla daha pahalı, fakat daha mukavemettir. Sürekli fiber katkılı

metal matrislikompozitler elastiklik modülü ve mukavemetin en iyi kombinasyonunu vermelerine karşın bu kompozitlerin özellikleri anizotropiktir ve asıl zayıflıkları, kullanılan fiberlerin ve kompozit üretim maliyetlerinin oldukça yüksek olmasından kaynaklanmaktadır.

**Seramik Matris Kompozitler:** Genelde çok yüksek sıcaklıklarda kullanılan kompozitlerdir, matris malzemesi olarak  $Al_2O_3$ , SiC,  $Si_3N_4$  ve B4C yaygın olarak kullanılmaktadır. Takviye elemanı olarak genellikle  $Al_2O_3$  ve SiC seramik malzemeler kısa fiber formunda kullanılmaktadır. Seramik malzemeler, yüksek sıcaklığa dayanıklı ve hafif oldukları ( $d= 1,5 - 3,0 \text{ gr/cm}^3$ ) için oldukça çekicidir. Seramik matrislikompozit malzemeler genellikle yüksek sıcaklıkta çalışması gereken parçalar için kullanılırlar. Sert ve kırılğan malzemeler olan seramik malzemeler, çok düşük kopma uzaması gösterirler, düşük tokluğa sahiptirler ve termal şoklara karşı dayanıksızdırlar. Bu nedenle liflerle takviye edilirler. Buna karşılık çok yüksek elastiklik modülüne ve çok yüksek çalışma sıcaklıklarına sahiptirler. 3 tip seramik matrisli kompozit malzeme vardır

#### **Sürekli fiberlikompozitler**

- Süreksiz fiberlikompozitler
- Partiküllü kompozitler

#### **3.1.1.2. Takviyeye göre**

**Elyaf Takviyeli Kompozitler:** Bu tür kompozitler, birçok özelliklerde artış sağlayan, yüksek etkinliği olan liflerin ilavesiyle elde edilirler. Mühendislikte kullanılan malzemelerin pek çoğu fiber şeklinde üretildiklerinden mukavemet ve rijitlikleri kütle halindeki değerlerinden çok üst düzeyde olabilmektedir. Örneğin karbon fiberlerin

çekme mukavemeti kütle halindeki grafitten 50 kat, rijitliği 3 kat daha yüksektir. Fiberlerin bu özelliğinin fark edilmesiyle fiber kompozitlerin üretilmesi süreci başlamıştır.

**Parçacık Takviyeli Kompozitler:** Bir matris malzeme içinde başka bir malzemenin parçacıklar halinde bulunması ile elde edilirler. Bu tip kompozitler tek veya iki boyutlu mikroskobik partiküllerin veya sıfır boyutlu olarak kabul edilen mikroskobik partiküllerin matris ile oluşturdukları malzemeler olup ortalama gömülen parçacık boyutu 1 µm'den büyük ve elyaf hacim oranı %25'den fazla kullanılmamaktadır. En çok kullanılan parçacıklar ise Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve SiC'den oluşan seramiklerdir.

**Tabakalı Kompozitler:** Tabakalı kompozit yapı, en eski ve en yaygın kullanım alanına sahip olan tiptir. Bu tür kompozitler farklı özelliklere sahip en az iki tabakanın kombinasyonundan oluşur. Çok değişik kombinasyonlarla tabakalı kompozitlerin üretimi mümkündür. Eski türk savaş yayları vs

Kompozit malzemelerle ilgili daha geniş bilgi üçüncü bölümde verilecektir.

### 3.2. Nano Partiküller

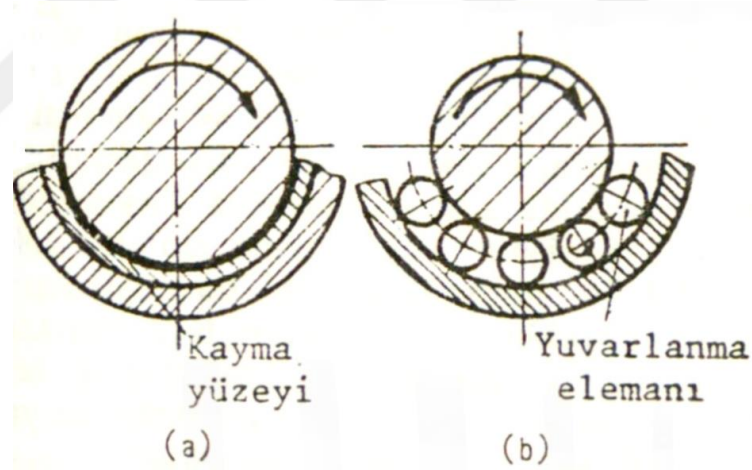
Boyutları 100 nm ve altında kalan tozlar olarak tanımlan nano partiküller ise nanoboyutlu malzemelerin dolayısıyla nanoteknolojinin temelini oluşturmaktadır. (Miller, Serrato, Represas-Cardenas, & Kundahl, 2005) Bu partiküller diğer ticari malzemelerden genelde farklı ve üstün kabul edilen özellikler göstermektedir. Sıkça belirtilen nano partikül özelliklerinin çekiciliğinin günümüzde bilinen nedenleri ise; kuantum boyut etkileri, elektronik yapısının boyut bağımlılığı, yüzey atomlarının benzersiz karakterleri ve yüksek yüzey/hacim oranı olarak ön plana çıkmaktadır (vincenzo turco liveri, 2006)

Nano partikül sentezi bu yapıların sergiledikleri olağandışı özellikler sebebiyle yüksek aktiviteli katalizörler, optik uygulamalar için özel teknolojik malzemeler ile birlikte süperiletkenler, aşınmaya karşı katkılar, yüzey aktif maddeler, ilaç taşıyıcılar ve özel teşhis aletleri gibi birçok teknolojik ve farmakolojik ürünlerin hazırlanmasının yolunu açmıştır. Bunların yanı sıra, malzemelerin nanoboyut seviyesinde kontrolü

nanotaşıyıcılar, sensörler, nanomakinalar ve yüksek yoğunluklu veri depolama hücreleri gibi kendine özgü işlevselliğe sahip minyatürleştirilmiş aygıtların gerçekleştirilmesine izin vermektedir. (Miller et al., 2005) (vincenzo turco liveri, 2006)

### 3.3. Sürtünme

Sürtünme bir cimin temas halindeki başka bir cismin veya yüzeyin üzerinde hareketini engellemeye çalışan direnç kuvvetidir. Bu kuvvet temas yüzeyine paraleldir ve yönü harekete veya muhtemel harekete zıt yöndedir. Hipotetik olarak fonksiyon yüzeyleri arasında hiçbir kuvvet alanının bulunmaması ve kesin olarak aralarında mutlak vakumdan başka bir ortam bulunmaması halinde sürtünmenin olmadığı söylenebilir. Sürtünmeyi en genel anlamda kayma ve yuvarlanma sürtünmesi olarak ikiye ayırabiliriz. Şekil 3.1. Bu fark gözle görülebilir durumlar için geçerlidir. Mikroskopik olarak incelendiğinde aslında ikisinin de aynı olduğu gözlemlenebilir.



Şekil 3.1 Kayma ve Yuvarlanma Sürtünmeleri Gösterimi

Ayrıca sürtünmeyi sürtünmenin olduğu ortama göre de iki farklı şekilde inceleyebiliriz:

#### 3.3.1. Sıvı sürtünme

Temas halindeki yüzeyler birbirinden akışkan bir sıvı veya gazla ayrılmışlardır. Bu konu akışkanlar mekaniğinin konusudur.



### 3.3.2. Kuru sürtünme

Yağlayıcı bir akışkanın olmadığı yüzeylerin sürtünmesidir.

### 3.3.3. Sürtünmeyi etkileyen faktörler

Toplam sürtünme direnci en genel halde aşağıdaki faktörlerden etkilenir:

- Kayma yüzeyinde aşınma mahsulleri veya sistem dışından gelen partiküllerin varlığı,
- Temasta bulunan malzemelerin bir birlerine göre izafi sertliği
- Uygulanan dış yük ve/veya yer değiştirme
- Sıcaklık veya yağlayıcı gibi harici koşullar
- Yüzey topografyası
- Malzemelerin mikro yapısı veya morfolojisi
- Görünür temas alanı
- Temasta bulunan yüzeylerin kinematiği (hareketin yönü, hızın büyüklüğü vb.)

### 3.4. Aşınma

Aşınma, mekanik kuvvetler altında katı malzeme yüzeylerinin devamlı bir şekilde azalarak yok olmasıdır. Ayrıca kısaca sürtünme, kayma veya çatlama olarak da tarif edilebilir. Sürtünme enerji kaybı olduğu gibi sürtünme sonucu oluşan aşınma da malzeme kaybıdır. Makinelerde aşınma sonucu oluşan malzeme kaybı ciddi sorunlara yol açar. Bu sorunların en başında işletme maliyetleri vardır. Aşınan makine elemanları kullanılamaz hale geldiği için sistemin arızaya geçmesine veya tamamen durmasına sebep olmaktadır. Aşınan malzemelerin tespiti ve değiştirilmesi, uzun bir servis süresine sebep olabilir. Bu süreçte makineler durduğu için ciddi iş kayıplarına ve maddi kayıplara sebep olmaktadır. İşletme maliyetlerini düşürmek servis sürelerini uzatmak için iki yol vardır; yüzeyler oldukça iyi bir şekilde yağlanmalı veya aşınmaya dirençli malzemeler geliştirilmeli yada aşınmanın gerçekleştiği yüzeylerde ekstra kaplamalar yapılmalıdır.

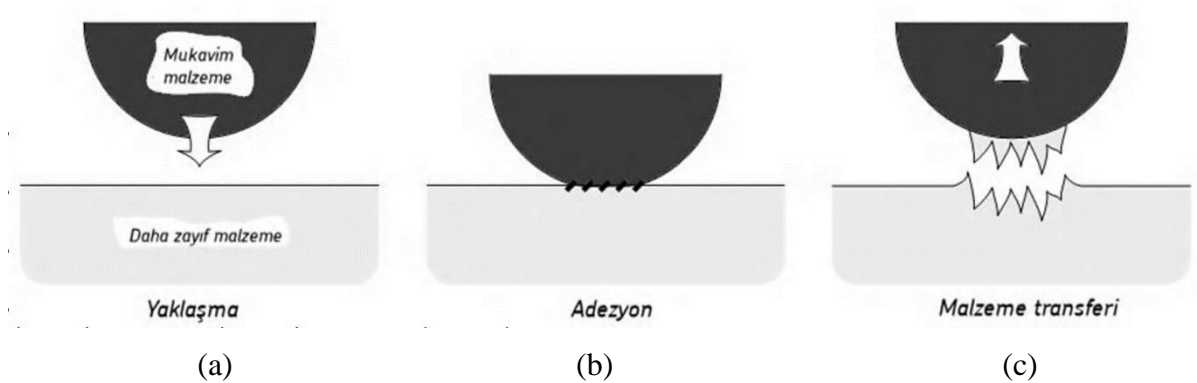
### 3.4.1. Aşınma Çeşitleri

Aşınma çeşitleri aşınan malzemelere göre ve aşınan yüzeylere göre 5 başlık altında incelenir. Bunlar;

- Adheziv aşınma (sürekli sınırlı aşınma, yenme vb)
- Abraziv aşınma
- Sürtünme oksidasyonu (mekanik korozyon)
- Yorulma aşınması (pitting vb.)
- Eroziv aşınma

#### 3.5.1.1. Adhezif Aşınma

Hareket eden takım yüzeyinden geçici bölgesel bağ ile malzemenin uzaklaştırılması daha sonra yüzeyde bağ kırılmasıdır. (Şekil 3.2)



Şekil 3.2 Adhezif aşınma (a-yaklaşma, b-adezyon, c-malzeme transferi)

Asal metaller (altın, gümüş, platin, rutenyum, rodyum, paladyum, osmiyum ve iridyum gibi metaller) dışındaki malzemelerde bir oksit tabakası her zaman mevcuttur. Çok ince olduğu için gözle görülmeyen bu film gerçek metal-metal arası teması engeller. Bundan dolayı metal-metal arası adezyonun vakum altında yapılan testlerde çok büyük olduğu bulunmuştur. Yani, yüzeyler arasındaki adheziv kuvvet, temas kuvvetinden oldukça büyüktür. Diğer bir görüşe göre, temasta bulunan bir pürüz çiftinde bir birini takip eden tabakaların plastik kayması sonucu aşınma mahsulleri oluşur. Bu mekanizmada oluşan aşınma mahsulleri, ince ve eğimlidir. Daha fazla izafi

hareket daha fazla malzeme aşınmasına sebep olmaktadır. Kuru ve sınır sürtünme halindeki fonksiyon yüzeylerinin birbiri ile temas halinde olan pürüz tepelerinde, özellikle akma sınırı aşıldığında kuvvetli bir adheziv veya sıcaklık etkisi ile oluşan koheziv bir bağ meydana gelmektedir. Bu bağ, metal değme yüzeyleri ne kadar temiz ise o oranda kuvvetlidir.

**Sürekli Aşınma:** İçten yanmalı motorlarda, piston ve silindir arasındaki aşınma şekli bunun karakteristik bir örneğidir. Yüzeylerde önemli bir hasar meydana gelmez. Yüzeyler çalışma süresince düzgünleşir. Sınır sürtünmesi bölgesinde çalışan veya zaman zaman sınır sürtünmesi haline maruz fonksiyon yüzeyleri arasında, kontrollü olan bu adheziv aşınmaya sürekli aşınma denir.

**Yenme:** Birbirine göre kayma hareketi yapan yüzeyler arasındaki kayma hızı ve yüzey basıncı belirli bir kritik değeri aşınca ani olarak ortaya çıkmaktadır. Bazı hallerde daha küçük hız ve yüklerde, ancak yüksek ortam sıcaklıklarında yenme olayı ile karşılaşılabilir. Yenme esas itibarı ile çok şiddetli bir bölgesel kaynama veya adezyon olayıdır. Olayın tam niceliksel değerlendirilmesi yapılamamıştır. Yenme, net malzeme kaybı olmaksızın bir yüzeyi bozabilir. İlk etapta kaba pürüzlü olan yüzey, yenme sonucu daha düzgün hale gelebilir. Genel makina konstrüksiyonunda yenme çoğunlukla yetersiz yağlama veya yağ devresinde arıza sonucu ortaya çıkar. Dar toleransa sahip elemanlarda kaynama sonucu blokaja sebep olabilir. Yenme hasarının sayısal olarak ölçülüp, değerlendirilmesi oldukça zordur.

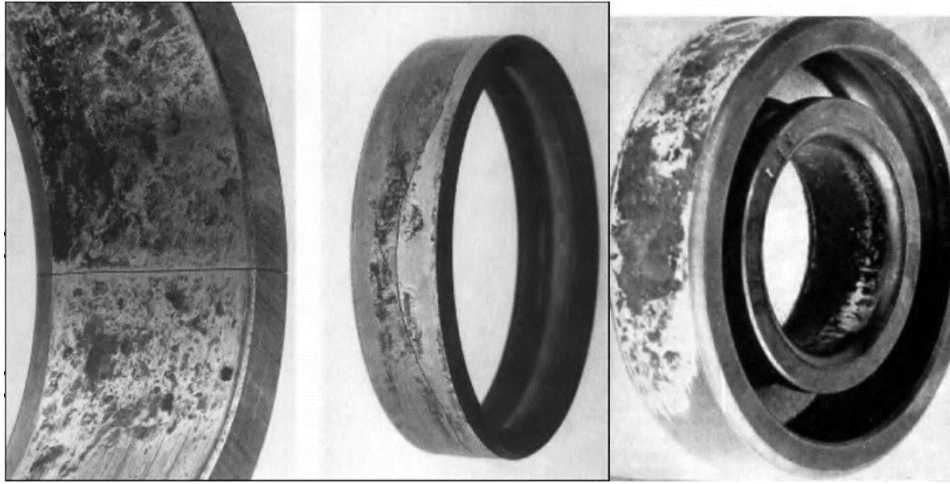
#### 3.4.1.2. Abrasiv Aşınma

Bu aşınma türünde aşındırıcı özellikteki sert partiküllerin bir biri üzerinde kayan yüzeylerin arasına girmesi sonucu meydana gelmektedir. Sert partiküller ya dışarıdan sisteme girer veya adhesiv aşınma sonucu ortaya çıkan malzemelerin abrasiv malzeme gibi davranmasıyla sistem içinde meydana gelir. Ayrıca yağlayıcı içinde bulunabilecek sert partiküller, kum partikülleri de zımpara etkisi yaparak bu tip aşınma meydana getirir. Bununla birlikte pürüzlü çok sert bir karşı yüzeyin daha yumuşak yüzey üzerinde meydana getirdiği aşındırma şekli (eğe ile metalsel yüzey arasındaki durum) abrasiv aşınma olarak tanımlanabilir. Türleri; Kaba (makro) abrazyon oymalı aşınma

(gouging abrasion): Çekiçli değirmenler, cevher öğütme değirmenleri. İnce abrazyon (grinding abrasion): Yağ öğütmeli çimento değirmenleri, kum taşı değirmenleri olarak örneklendirilebilir.

### 3.4.1.3. Sürtünme Oksidasyonu (Mekanik Korozyon)

Genel olarak sürtünme oksidasyonu, yeteri sıklıkta monte edilmeyen mil-göbek geçme yüzeylerinde, örnek olarak çevre yüküne maruz rulman bileziklerinin yeteri derecede sıkı takılmadığı zaman temas yüzeylerinde meydana gelmektedir. Birbirine değen az pürüzlü yüzeyler arasında bir osilasyon (salınım) hareketinin bulunması sürtünme oksidasyonunu teşvik etmektedir. Osilasyon (salınım) genlikleri 0,2 mm ve daha küçüktür. Bu olay kuru ve az yağlı yüzeylerde gözlenmektedir. Yüzeylerin kuru olması halinde yeteri sıklıkta monte edilmemiş yüzey çiftlerinin küçük genlikli osilasyon hareketleri sonucu, yüzeylerde koyu kırmızımtırak bir tabaka oluşmaktadır. Zamanla bu tabakalar bölge bölge kalınlaşarak yüzeylerde büyük bozulmalar ve bunlara bağlı olarak çatlama ve kırılmalar meydana getirmektedir.



Şekil 3.3 Rulmanda aşınma oksidasyonu (Triboloji, İTÜ)

### 3.4.1.4. Yorulma Aşınması

Noktasal veya çizgisel temas hali olan fonksiyon yüzeyleri arasında meydana gelir. Çok küçük değme noktalarında değişken yük etkisi altında zamanla pul şeklinde malzeme parçacıkları yüzeyden ayrılarak, geriye çukurcuklar bırakırlar. Pitting oluşumu

ile ilgili değişik görüşler mevcuttur. Bazı araştırmacılar pitting' in mikro değme noktalarındaki değişken zorlanmalar ve bunun sonucunda ortaya çıkan yorulma neticesinde meydana geldiğini ileri sürmektedirler



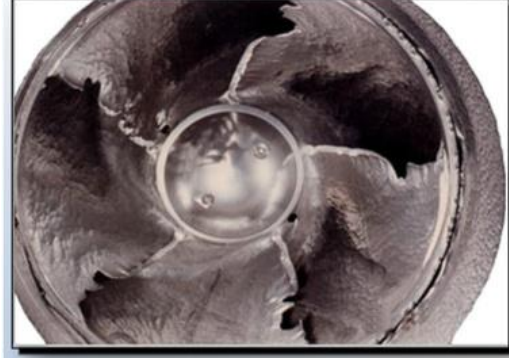
Şekil 3.4 Yorulma Aşınması (Babalık, Fatih C. Mak. El. Ve Kon. rnekleri)

#### 3.4.1.5. Erosiv Aşınma

Genel yapı olarak abraziv aşınmaya benzer. Bundan farkı eroziv aşınmada ana malzemenin kendinden daha sert, kk boyutlu parçacıklar tarafından tekrarlanan bir şekilde darbe yüküne maruz bırakılmasıdır. Bunun yanında kapalı hacimde sıkışmış gaz ve sıvılar da, belirli hızlarda benzer etki yaparlar.

Eroziv aşınmayı etkileyen faktörler aşağıda sunulmuştur.

- Parçacıkların şekli
- Parçacık boyutu
- Parçacıkların sertliği
- Hız
- Sıcaklık



**Şekil 3.5** Erosiv Aşınma (maintenance news)

Tez konusu olan karbon kumaş takviyeli nanokompozitlerin aşınma deneylerinde pin on ball metodu kullanılmıştır. Çelik bir bilye 10000 metre boyunca değişken yükler ve hızlar altında çizgisel olarak nanokompozit malzeme üzerinde aşınma yapmıştır ve yukarıda belirtilen 5 farklı tip aşınma türünden hem kompozitte hem çelik bilyede adheziv aşınma, abraziv aşınma ve yorulma aşınması meydana geldiği gözlenmiştir.

## 4. DENEY KURULUMU VE PROSEDÜRÜ

Bu bölüm, yapılan deneylerde kullanılan tekniklerin, yöntemlerin ve ekipmanın detaylarını içermektedir. Deneyleri modellemek ve deneysel değişkenler ile optimizasyon arasındaki ilişkiyi çıkarmak için istatistiksel teknikler tercih edilmiştir. Mümkün olan en iyi sonuçların elde edilebildiği optimum deneylerin sayısını ve rastgele sıralamasını belirlemek için deney tasarımı (DTM) metodu kullanılmıştır. Tepki yüzey metodolojisi (TYM), DTM'nin araçlarından biridir ve yaygın olarak deney tasarımı için kullanılır. TYM, kullanımdaki sonuç odaklılığı, optimizasyonu sağlaması ve basitliği nedeniyle seçilmiştir. Deneysel çalışmada iyi planlanmış ve tasarlanmış bir deney düzeneği hazırlanmış ve deneyler üç farklı laboratuvarında yüksek hassasiyetle gerçekleştirilmiştir. Deneyler basit ama etkili bir algoritma ile tasarlanmış ve özenle uygulanmıştır. Her şeyden önce deneyler yapılmadan literatür taraması yapılmış ve literatür taraması sonucu aşınmaya etki eden faktörler ve aşınmanın sonucunda elde edilecek çıktılar tek tek tespit edilmiştir. Girdi parametreleri hız ve yük olarak belirlenmiştir. Çıktı parametreleri ise  $\mu s$ , malzeme aşınma miktarı (MAM) ve yüzey pürüzlülüğü olarak belirlenmiştir. Elde edilen bu veriler ışığında ön deneyler yapılmıştır ve ön deneylerde girdi parametrelerinin etkileri çıktı parametreleri üzerindeki etkiye dayalı olarak sınırlandırılmıştır. Deney düzeneği temelde iki bölüme ayrılmıştır; birinci bölüm deney yapılacak malzemenin üretilmesi, ikinci bölüm ise hazırlanmış numunelerin tribometre aracılığı ile aşındırılmasıdır. Yapılan deneylerde uygun koşulları elde etmek ve makul sonuçlar elde etmek için birçok hassas ekipman kullanılmıştır. Aşağıda, deneylerin tasarımı ayrıntılı olarak anlatılmış ve deney düzeneği, prosedürü, ekipmanları ve araçları tanıtılmıştır.

### 4.1. Deney Tasarım Metodu

Deneyler, önceden belirlenmiş bir süreci veya sistemi öğrenmek için araştırmacılar tarafından hemen hemen tüm araştırma alanlarında gerçekleştirilir. Bir deneyi bir test veya bir dizi test olarak tanımlayabiliriz ki, bir prosesin ya da sistemin girdi değişkenlerinde amaca yönelik değişiklikler yapılır, böylece çıkış sonuçlarında gözlemlenebilecek ve bu sayede değişikliklerin nedenlerini gözlemleyebilir ve belirleyebiliriz. Genel kullanımda, deney tasarımı veya deneysel tasarım, varyasyonun mevcut olduğu, deneycinin tam kontrolü altında olup olmadığı gibi, herhangi bir bilgi

toplama çalışmasının tasarımını oluşturur. Deneysel tasarım ve yöntemler birçok disiplinde geniş bir uygulama bulmuştur. Deneysel tasarım, üretim sürecinin performansını iyileştirmek için mühendislik dünyasında kritik öneme sahip bir araçtır. Ayrıca yeni süreçlerin geliştirilmesinde kapsamlı bir uygulamaya sahiptir. Proses tasarımının erken aşamalarında deneysel tasarım tekniklerinin uygulanması ile sonuçlanabilir:

- Geliştirilmiş süreç getirileri
  - Azaltılmış değişkenlik ve nominal veya hedef gerekliliklerine daha yakın uyum
  - Azaltılmış geliştirme süresi
  - Azaltılmış genel maliyetler

Deney tasarım metodunun (DTM) dört temel parçası vardır: Faktöriyel, Tepki Yüzey Metodu (TYM), Taguchi ve Karışık. Taguchi ve TYM yaygın olarak kullanılan DOE yöntemlerinden ikisidir. TYM ve Taguchi yöntemleri arasında bazı avantaj ve dezavantajlar vardır; Bu teknikleri kullanarak sonuçların analiz edilmesindeki en büyük zorluk, kontrol faktörleri ve cevaplarının sayısıdır. Taguchi analizi, sadece bir çıktı değeri varsa kesin bilgi sağlayabilir, ancak birden fazla çıktı değerlerinin optimize edildiği durumlarda sonuçsuz kalır. TYM kullanarak, tek bir eş yükselti çiziminde sadece iki kontrol faktörü görülebilir, ancak bir şekilde dörtten fazla yanıtın yorumlanması çok zordur. Bununla birlikte, bir yanıt yüzeyi mevcut olduğundan, her bir cevap için optimum ayarın belirlenmesine yardımcı olmak için otomatik bir iyileştirici kullanılabilir. Kısıtlamalar, tepki değerleri üzerine ayarlanabilir ve tüm yanıtları bir araya getiren bir bileşik yanıt tanımlama yeteneği, çoklu parametrelili yanıt optimizasyonunu basitleştirir. Bazı gereksinimler diğerlerinden daha önemli sayılırsa, kullanıcı tanımlı ağırlıklandırma da uygulanabilir. Bu, TYM'nin, verilere simülasyonlar için kullanılanlar arasında faktör değerlerinde enterpolasyona olanak tanıyan verilere uyduğu için mümkündür.

Bu çalışmada, iki farklı girdi parametresi (faktör) vardır; hız (m/s) ve yük (N), iki farklı çıkış parametresi (yanıt); malzeme aşınma miktarı (MAM) (gram),  $\mu_s$  ile ilişkilendirilmiştir ve çıkış parametreleri optimize edilmiştir. Taguchi sadece bir sonuçla ilgilenebilir, ancak DTM olan TYM birden fazla yanıtla otomatik optimizasyon yapma yeteneğine sahip olduğundan bu çalışmada kullanılmıştır. Girdi sayısı 2 ve çıktı sayısı 2 olan minimum deney sayısı da TYM ile belirlendi.



TYM istatistiksel yazılım, MİNİTAB®® kullanılarak uygulandı. Deneyler yapılmadan önce, ön deneyler yapılmıştır ve işlem parametrelerinin tanımlanması ve uygun girdi parametrelerinin (hız ve yük) ayarlarının seçilmesi sağlanmıştır. Deneysel yapılan çalışmalarda deneyin doğası gereği birçok değişken hataları olmaktadır ve bunlar deneyin beklenen sonuçlarını bozmaktadır bunların yanı sıra önceden tespit ettiğimiz hız ve yük girdi parametrelerinin haricinde ihmal edilecek deneye cüzi etkileri olan başka parametrelerde vardır. Ama yol sabit tutularak yapılan ön deneyler ve daha önceden yayınlanan yayınlar göstermiştir ki bunların etkisi ihmal edilebilir.

Bu çalışmada kullanılan yüzey aşındırma makinesinin (tribometre) bir çok farklı hız ve yük ayarı olmakla birlikte yapılan ön deneyler ve taranan makaleler eşliğinde uygulanabilecek yükün 10N dan düşük 30N dan fazla olmaması gerektiği görülmüştür. 10 N dan az olan yüklerde aşınma miktarı çok az olduğundan aşınmanın olmadığı 30 N dan fazla olduğu durumlarda ise aşınmadan daha çok ezilme görüldüğü tespit edilmiştir. Ayrıca hız ayarları da aynı yolla tespit edilmiş ve minimum 0.75m/s, maksimum 3.75 m/s olarak tespit edilmiştir. Deneylerde dönme ile alınacak yol ise 10000 m olarak sabit tutulmuştur. Yükler 5 farklı lineer değer olarak kullanılmıştır; bunlar 10N, 15N, 20N, 25N ve 30N dur. Aynı şekilde hızlarda 5 farklı lineer değer olarak kullanılmıştır; 0,75m/s, 1,5/s, 2,25m/s, 3m/s, 3,75m/s dir. Minitab® kodlarla çalışır ve kodları kendisi oluşturur. Kodları oluşturmak için sizden herhangi iki sayı ister, iki sayının orta noktasını bulur ve interpolasyonla verdiğiniz sayıların yanına yeni sayılar ekler ve bu 5 sayı lineer artar. Bu çalışmada kodu oluşturacak sayılar -1 ve +1 olarak seçilmiştir. Beş farklı sayı olacak şekilde kod ( -2, -1, 0, 1, 2) oluşturulmuştur. Oluşturulan kodlar ön deneylerle elde edilen hız ve yük değerleri ile eşleştirilmiştir. Tablo 4.1

**Tablo 4.1** Kodlanmış Faktörlerin Girdi Parametrelerine Karşılık Gelen Değerleri

<b>Kodlar</b>	<b>-2</b>	<b>-1</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>
<b>Hız (m/s)</b>	0,75	1,5	2,25	3	3,75
<b>Yük N</b>	10	15	20	25	30

Bu çalışmada yapılacak deneylerin sayısını belirlemek için MİNİTAB programının deney tasarım bölümünde ki TYM modülü kullanıldı. TYM modülünde iki farklı tip tasarımdan tutarlı olması ve basit olmasından dolayı merkezi kompozit tasarımı kullanıldı (MKT). MKT kullanımında ki sıralı çalışması esnekliği ve verimliliğinden dolayı TYM modülünde en çok tercih edilen modelleme biçimidir.

TYM iki farklı girdi için 13 farklı aşınma deneyi vermiştir. Bu deneylerin içinde tekrar olan deneylerde vardır, tekrar olan deneyler deney doğasında bozukluk var mı dışarıdan gelen rastgele hatalar altında nasıl tepki veriyor onu görmek için oluşturulmuştur. Bu 13 aşınma deneyi daha önce numunesi hazırlanmış saf ve nano partikül takviyeli kompozitlere ayrı ayrı uygulanmıştır. Daha önce numunesi hazırlanan, saf karbon kumaş epoksi kompozit, % 0,5 KNT takviyeli karbon kumaş epoksi kompozit, %1 KNT takviyeli karbon kumaş epoksi kompozit, %2 KNT takviyeli karbon kumaş epoksi kompozit, %1 BN takviyeli karbon kumaş epoksi kompozit, % 0,5 KNT+0,5 BN takviyeli karbon kumaş epoksi kompozit için toplamda 78 aşınma deneyi uygulanmıştır. Deneylerin rastgele sırasına göre kodlanmış değerleri Tablo 4.2'de gösterilmiştir. Bu 13 kodlu aşınma deneyleri girdi parametreleri ayarına dönüştürülmüş ve Tablo 4.3'de verilmiştir.

**Std order:** deneylerin standart sırasını depolar.

**Run order:** deneylerin yapıma sırasını depolar.

**Pt-Type:** nokta türünü depolar. İki seviyeli bir tasarım oluşturursanız, Minitab® bu sütunu CenterPt olarak adlandırır. Genel tam faktörlü tasarım oluşturursanız, Minitab® bu sütunu PtType olarak adlandırır. Kodlar: 0 merkez noktasını belirtir ve 1 ise bir köşe noktasıdır.

**Blocks:** engelleme değişkenini saklar. Tasarım engellenmediğinde, Minitab® tüm sütun değerlerini 1 olarak ayarlar.

**Tablo 4.2** Deneylerin rastgele sırasına göre kodlanmış değerleri

Std-Order	Run-Order	Pt-Type	Blocks	Kod A	Kod B
1	1	1	1	0	-2
5	2	-1	1	0	0
11	3	0	1	-1	-1
4	4	1	1	0	0
2	5	1	1	0	2
13	6	0	1	1	-1
12	7	0	1	-1	1
10	8	0	1	1	1
7	9	-1	1	0	0
6	10	-1	1	-2	0
8	11	-1	1	0	0
3	12	1	1	2	0
9	13	0	1	0	0

**Tablo 4.3** On Üç Kodlu Aşınma Deneyleri Girdi Parametreleri Ayarına Dönüştürülmüş

DENEYLER	HIZ(m/s)	YÜK N
1	2,25	10
2	2,25	20
3	1,5	15
4	2,25	20
5	2,25	30
6	3	15
7	1,5	25
8	3	25
9	2,25	20
10	0,75	20
11	2,25	20
12	3,75	20
13	2,25	20

## 4.2. DENEY KURULUMU VE UYGULAMASI

Bu çalışmada altı farklı malzeme numune olarak kullanılmıştır. Bu malzemeler temelde karbon kumaş epoksi kompozitler olup içlerine mekanik özellikleri gelişmesi için farklı oranlarda KNT ve BN nano partiküller eklenmiştir. Karbon kumaş kompozitler hali hazırda uzay ve havacılık sektöründe, enerji sektöründe, otomotiv sektöründe ve denizcilik sektöründe kullanılmaktadır ve üretim maliyetleri düştükçe kullanım yerleri artmaktadır. Bu tezde Selçuk üniversitesi malzeme laboratuvarında tamamen yüksek hassasiyetle üretilmiş karbon kumaş epoksi kompozit numunelerinin çekme ve aşınma deneylerinden elde edilen sonuçlarının incelenmesi farklı oranda KNT ve BN nano partikülle mekanik özellikleri artırılmış numunelerin sonuçlarının karşılaştırılması, matematiksel modellerinin oluşturulması ve optimizasyonlarının yapılması hedeflenmiştir. Bundan dolayı deney kurulumunu üç ana bölümde inceleyebiliriz; birincisi numunelerin üretilmesi, ikincisi üretilen ürünlerin çekme ve aşınma deneylerinin yapılması ve son olarak istatistiksel bir yazılım olan matlab aracılığı ile sonuçların istatistiksel olarak işlenmesi ve modellemelerin yapılması.

#### 4.2.1. KNT ve BN Nano partikül Takviyeli Karbon Kumaş Epoksi Kompozit Üretimi

Bu tezde yapılan deneylerde kullanılan tüm numuneler literatür taraması sonucu ortaya çıkan yüksek hassasiyet içeren üretim metotları ile üretilmiştir. Numune üretimini dört ana bölüm altında inceleyebiliriz;

- Karbon kumaşların, ayırıcı kumaşların ve vakum torbaların hazırlanması
- KNT ve BN nano partikül takviyeli epoksinin hazırlanması
- VİM ile karbon kumaş takviyeli epoksikompozit plakalarının üretimi
- Karbon kumaş takviyeli epoksikompozit plakaların tribometreye göre ve çekme makinesine uygun hazırlanması

##### 4.2.1.1. Karbon Kumaşların, Ayırıcı Kumaşların ve Vakum Torbaların Hazırlanması

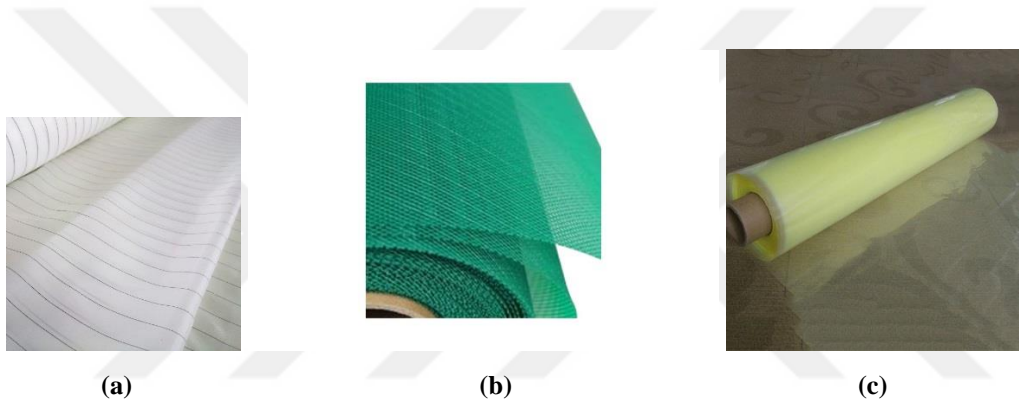
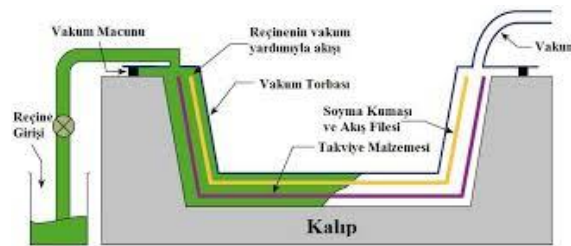
Bu tezde kullanılan karbon kumaşlar bir metre eninde 100metrelik toplar halinde alınmış ve 50cm\*50cm ebatlarında kare olarak kesilmiştir. Aşağıdaki Tablo 4.4 te kullanılan karbon kumaşın özellikleri verilmiştir. Karbon kumaşları ayırmak için peelply (ayırıcı kumaş) 55cm\*55cm ebatlarında kesilmiştir. Vakum edilen epoksinin ilerlemesini sağlayan infüzyon filesi 50cm\*50cm ebatlarında kesilmiştir. Vakum ortamını sağlayacak olan vakum torbası ise 60cm\*60cm ebatlarında kare olarak kesilmiştir.



Şekil 4.1 Karbon Elyaf Kumaş

**Tablo 4.4** Karbon Elyaf Kumaşın Özellikleri

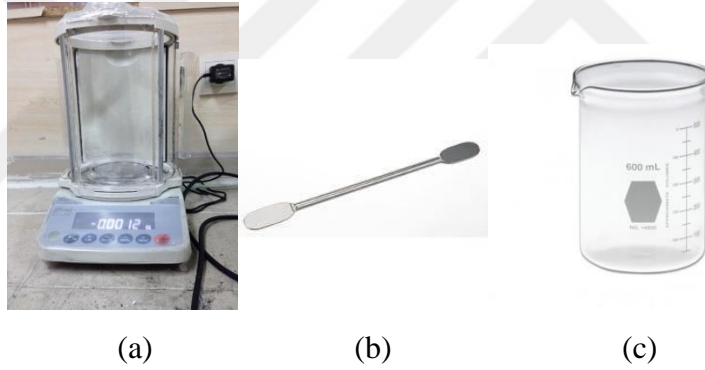
Parameter / Parametre	Property / Özellik
Alansal Ağırlık (gr/m <sup>2</sup> )	530
Dokuma tipi	Plain (Bez ayağı)
Çözüğü ipi	12K Karbon fiber (12K Karbon elyaf) (A-42 - 800 tex – AKSACA)
Çözüğü sıklığı (ends/cm)	3,75 ± %3
Atkı ipi	12K Karbon fiber (12K Karbon elyaf) (A-42 - 800 tex – AKSACA)
Atkı sıklığı (picks/cm)	3,75 ± %3
Kumaş eni (cm)	100
Çekme Mukavemeti (ISO 10618) (MPa)	4200
Kumaş kalınlığı (ISO 5084) (mm)	0,6

**Şekil 4.2** a-PeelPly, b-İnfüzyon Filesi, c-Vakum Torbası**Şekil 4.3** Vakum İnfüzyon Metodu genel gösterimi (NewEco)

#### 4.2.1.2. KNT ve BN Nano Partikül Takviyeli Epoksinin Hazırlanması

Bu çalışmada aşınmalarda kullanılan karbon elyaf epoksikompozitlerin, epoksileri malzeme laboratuvarında hazırlanmıştır. Öncelikle karbon elyaf

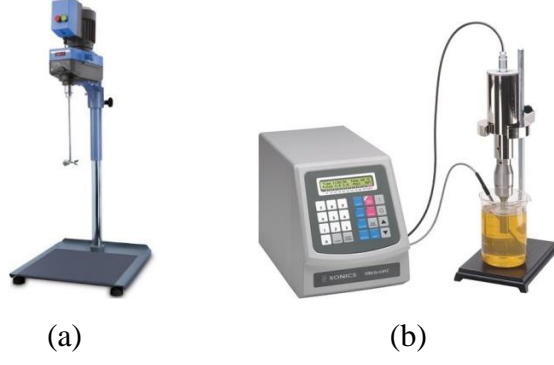
epoksikompozite karıştırılacak KNT ve BN nano partiküller lazım oranı karşılayacak miktarda hassas terazide tartılır. Tartılan nano partiküller asetonda çözdürülür ve 10 dakika boyunca mekanik karıştırıcıda karıştırılır. Nano partiküllerin tamamen aseton içinde çözüldüğü anlaşıldıktan sonra epoksi hassas terazide tartılı ve asetonda çözülmüş nano partiküller epoksiye eklenir. 15 dakika boyunca ultrasonik karıştırıcı ile asetonlu nano partiküller epoksi ile karıştırılır. Elde edilen nano partiküllü aseton epoksi karışımı vakum fırınında asetonun buharlaşma ısısında 65 derecede 24 saat vakum altında sabit sıcaklıkta aseton uçuncaya kadar bekletilir. 24 saat sonunda asetonu buharlaştırılmış ve tamamen homojenik karıştırılmış nano partikül takviyeli epoksi oda sıcaklığına gelinceye kadar soğutulmaya konur. Karışımın sıcaklığı düşerken epoksinin özel sertleştiricisi katalog değerlerince hassas terazide tartılır ve hali hazırda soğutulmuş epoksinano partikül karışımına eklenir. Epoksi sertleştirici ve nano partikülden oluşan karışım 5 dakika boyunca mekanik karıştırıcı ile karıştırılır ve uygulama için hazır hale getirilir.



Şekil 4.5 a-Hassas Terazi, b-Spatula, c-Ölçek



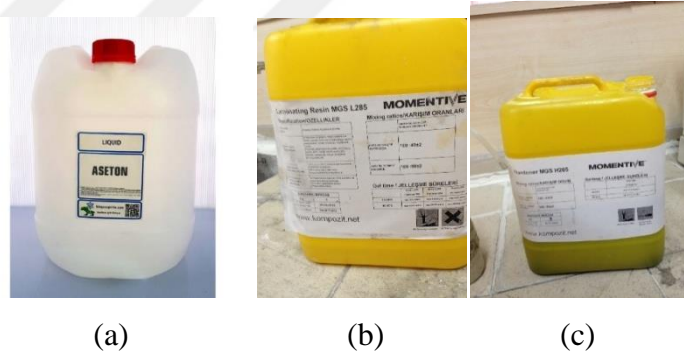
Şekil 4.6 a-Karbon Nanotüp, b-Nano BorNitrür



Şekil 4.7 a-Mekanik Karıştırıcı, b-UltraSonik Karıştırıcı



Şekil 4.8 a-Vakumlu Fırını, b-Pompası



Şekil 4.9 a-Aseton, b-Epoksi, c-Sertleştirici

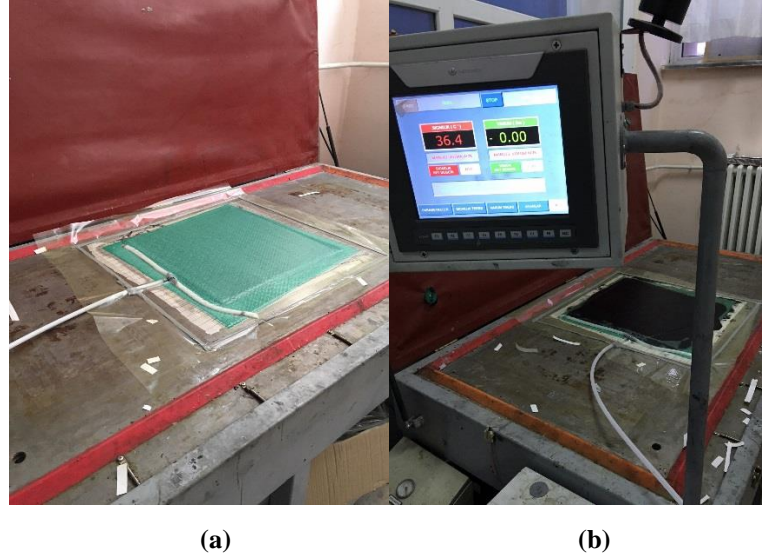
#### 4.2.1.3. Vakum İnfüzyon Metodu (VİM) ile Karbon Kumaş Takviyeli EpoksiKompozit Plakalarının Üretimi

Vakum infüzyon yöntemi kısaca kuru olarak kalıba yatırılmış kumaşların yüzeylerine vakum pompası aracılığı ile elde edilen vakum sayesinde reçinenin emdirilmesi işlemidir. Bu çalışmada literatür taraması ve ön deneyler sayesinde görülmüştür ki nano partikül takviyeli karbon kumaş epoksikompozit üretimi yapılırken, karışımda nano partiküller bulunduğu için ve nano partiküllü epoksi bir kaynaktan narigileye vakum altında emilirken nano partiküllerin kumaş aralarında süzüldüğü ve belli bölgelerde toplandığı ve eşit dağılmadığı görülmüştür. Bundan dolayı elle yatırma metodu tercih edilmiştir. Nano partikül içeren epoksi, fırça yardımı ile her bir 50cm\*50cm ebadında ki kare karbon kumaşlara yedirilmiştir ve böylece nano partiküllerin homojen olarak dağılması sağlanmıştır. Öncelikle VİM makinesine daha önce hazırlanmış infüzyon filesi yerleştirilmiştir. İnfüzyon filesi üzerine ayırıcı kumaş yerleştirilmiştir. Ayırıcı kumaşın üstüne 8 kat karbon kumaş fırça ile nano partiküllü epoksi ile ıslatıldıktan sonra yerleştirilmiştir. Sandviç modeli gibi üzerine tekrar ayırıcı kumaş ve infüzyon filesi yerleştirilmiştir. Kenarlarına sızdırmaz bant çekilmiş, sızdırmaz bandın üstüne bantla desteklenmiş vakum hortumu ve önüne spirali takılmıştır. Son olarak en üste vakum torbası ile kapanıp bütün sızmalar önlenecek şekilde vakum torbası sızdırmaz banda yapıştırılmıştır. Sızdırmazlıktan emin olduktan sonra vakum pompası çalıştırılmış ve fazla olan epoksi kumaştan uzaklaştırılmış ve nargilede atık olarak toplanmıştır.



Şekil 4.10 Vakum İnfüzyon Tezgahı





Şekil 4.11 Deney Düzeneği (a-Vakum Öncesi, b-Vakum Sonrası)

#### 4.2.1.4. Karbon Kumaş Takviyeli Epoksi Kompozit Plakaların Tribometreye Göre ve Çekme Makinesine Uygun Hazırlanması

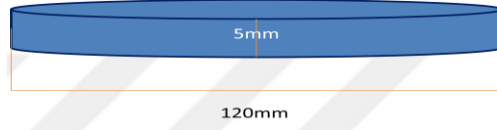
Bu çalışmada numuneler aşınma ve çekme deneylerinin tekrarlanabilme ihtimaline karşı normal ihtiyaçtan daha fazla olacak şekilde 50cm\*50cm ebadında kare olarak üretilmiştir. Ardından numuneler hassas kesim yöntemleri ve uygun kesim aletleri ile karbon kumaş kompozitlerin katmanlarını ayırmayacak şekilde numuneler çekme ve aşınma deneyleri için hazırlanmıştır. Aşınma deneyleri ball on disc metodu ile yapılacağı için numuneler 120 mm çapında yuvarlak daireler olarak kare plakalardan özel punçlar yardımı ile kesilmiştir. Şekil 4.11 ve 4.12. Elde edilen 120mm çapında numuneler aşınma deneyine girmeden önce merkezlerine 10mm çapında bir bağlantı deliği açılır ve yüzeylerinde ki pürüzlülük tamamen giderilinceye kadar sıfır numara zımpara ile zımparalanır. Literatür incelemesi sonucunda ASTM D3039 standartlarına göre çekme deneylerinde kullanılmak üzere her bir numune için beşer adet toplamda 30adet 25mm\*250mm boyutlarında dikdörtgen olarak yüksek hassasiyette kesilmiştir. Kesilen bu numunelerin yüzeyleri iki yönlü olmak üzere sıfır zımpara ile zımparalanmıştır.



Şekil 4.12 Punç ucu Makinesi



(a)

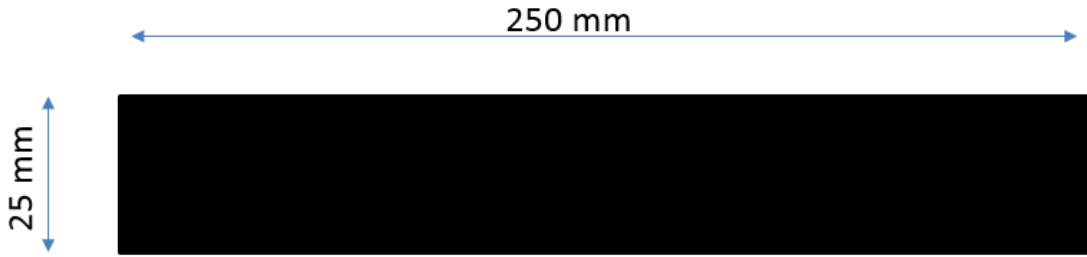


(b)

Şekil 4.13 Aşınma Deneyi İçin Hazırlanmış Numune Örneği (a-Üstten, b-Önden Görünüş)



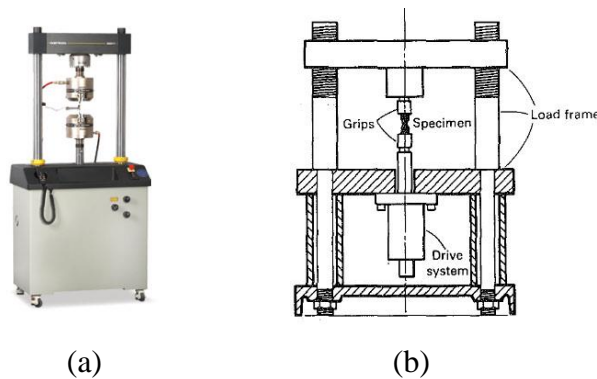
Şekil 4.14 Çekme Numunelerini Kesme Makinesi



Şekil 4.15 Çekme Numunesi

#### 4.2.2. Üretilen Numunelerin Çekme ve Aşınma DeneYlerinin Yapılması

Bu çalışma temelde aşınma direncinin incelenmesi olsa da, bir malzemenin mekanik özelliklerine bakarken mutlaka çekme dayanımına da bakmak gerekir ve çekme mukavemetini incelemek gerekir. Çekme dayanımını ölçmek için çekme test cihazı olarak servohidrolik altçene hareketli SHIMADZU8801 cihazı tercih edilmiştir. Şekil 4.15.



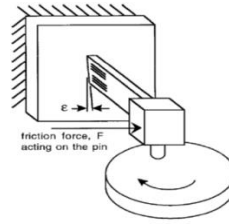
Şekil 4.16 a-Çekme Testi Cihazı, b-Şematik Gösterimi

Bu çalışmanın temel konusu olan aşınma testleri için teknoloji fakültesi bünyesinde bulunan özel tasarım tribometre kullanılmıştır. Mevcut tribometre ASTM G-99 standardına uygun ölçüm yapmaktadır. Tribometre servomotor aracılığı ile kendi eksenini etrafında farklı hızlarda dönebilen bir 12 cm disk mevcuttur. Diskin üzerinde numune tutucu vardır. Sonsuz vidalı bir yük kolu ile bilyenin konumlanması yapılmaktadır. Bu çalışmada yapılan deneylerde 10mm çelik bilye kullanılmıştır. Mevcut tribometre yük sensörü ile aşınma esnasında oluşan yükü gelişmiş bir yazılım

aracılığı ve data logger ile ana bilgisayara anlık olarak kaydetmektedir. Bilgisayara kaydedilen ham veriler programın ara yüzü ile exell dosyasına çevrilmektedir. Exell dosyasına kaydedilen alınan yola bağlı anlık yükler, aşınma için uygulanan yüke bölümünden anlık sürtünme katsayısı elde edilir. Deneyler farklı hızlarda yapıldığı için ve alınan yol 10000m olarak sabit tutulduğu için deneylerin süreleri yol hız zaman denkleri kullanılarak verilen çizgisel hızlar doğrultusunda deney süreleri hesaplanmıştır. Örneğin 2,25 m/s hız ve 10000m yol için 74 dakika süre hesaplanırken 1.5m/s hız ve 10000m için 111 dakika olarak hesaplanmıştır.



(a)



(b)

**Şekil 4.17 a-Aşınma Testi Cihazı, b-Şematik Gösterimi**

Yüksek hassasiyetli terazi ile disk numunelerin ve çelik bilyelerin ilk ve son ağırlıkları tartılmıştır. Böylece malzeme aşınma miktarı ve bilye aşınma miktarı bulunmuştur. Terazinin hassasiyeti 0.001gram dır. Deneyler yürütülürken önceden belirlenen deney sürelerinin başarılı bir şekilde uygulanması için hassas kronometre kullanılmıştır. Aşınma testleri sonucu oluşan yüzeylerin profillerinin çıkarılması, aşınma derinliklerinin, incelenmesi ve yüzey pürüzlülüklerinin ölçülmesi için ileri teknoloji laboratuvarında kurulu bulunan **AFM**(NT-MDT, AFM NTEGRA SOLARİS) ve **SEM**(ZEİSE EVO LS10) cihazları kullanılmıştır. AFM cihazından alınan sonuçlar yeterli çözünürlüğe sahip olmadığı için kullanılmamıştır.



**Şekil 4.18 Taramalı Elektro Mikroskop (SEM)**

Aşınma testlerinde aşındırıcı olarak 10mm AISI 1010 bilyeler kullanılmıştır. Bilyelerin teknik özellikleri Tablo 4.5 te gösterilmiştir.

**Tablo 4.5** AISI çelik bilyelerin özellikleri

<b>Tip</b>	<b>% C</b>	<b>%Si</b>	<b>%Mn</b>	<b>%P</b>	<b>%S</b>
1010	0,08-0,13	0,10-0,35	0,30-0,60	0,040 max	0,050 max
<b>Özellik</b>	<b>Simge</b>	<b>Ölçü Birimi</b>	<b>Tip</b>	<b>Not</b>	<b>Değer</b>
Yoğunluk	$\delta$	[g/cm <sup>3</sup> ]	Fiziksel	Ortam sıc.	7,82
Young Modülü	E	[GPa]	Mekanik	-	200
Özel ısı	c	[J/kg-K]	Termik	Ortam sıc.	468
Lineer termik genişleme katsayısı	$\alpha$	[10 <sup>-6</sup> /°C]	Termik	(DT=0-100°C)	11,8
Termik iletkenlik	$\lambda$	[W/(m·K)]	Termik	Ortam sıc.	57,9
Elektrik özdirenç	$\rho$	[ $\Omega \cdot m \cdot 10^{-9}$ ]	Elektrik	-	155
Bağlı mıknatıs geçirgenliği	$\mu$	-	Manyetik	Ferromanyetik	> 500
Yoğunluk	$\delta$	[g/cm <sup>3</sup> ]	Fiziksel	Ortam sıc.	7,82
<b>Özellik</b>	<b>Tip</b>	<b>Ölçü Birimi</b>	<b>Değer</b>		
Sertlik	Mekanik	[HRB]	60 - 90		
Son çekme dayanımı	Mekanik	[MPa]	200 - 300		
Çalışma sıcaklığı	Termik	[°C]	-40 / 500		

### 4.3. Deney Prosedürü

Deneyler bölüm laboratuvarında bölüme ait makineler ve cihazlar ile gerçekleştirilmiştir. Deneyler, ısı etkileri, çelik bilyeler üzerindeki kir etkileri gibi sabit kabul edilen ama deney doğası gereği düzensiz oluşan faktörlerin etkilerini ortadan kaldırmak için rastgele sırayla gerçekleştirilmiştir. TYM, 13 deney üretti ve bu deneylerin beşini tekrarlanabilirliği bulmak için tekrarladı [2,25, 20]. Tekrarlanabilirlik, operatörlere ve operatör-parça etkileşimine bağlı ölçümlerdeki değişkenliği belirlemek için kullanılır. Her bir aşınma yapılmadan önce numunelerin ve çelik bilyelerin ilk ağırlıkları ölçülmüş, hassas ve sağlam bir şekilde özel tasarlanmış tutucularla yerlerine sabitlendirilmiş ve çelik bilye hassas konumlandırıcı ile doğru şekilde konumlandırılmıştır. Aşınma başlamadan önce özel bir yükseklik ölçücü ile ilk yükseklik sabitlenmiştir. Deneyler, Tablo 4.3 'te verilen değişken ayarları (hız ve yük) ve sabit ayarlarla (yol, sıcaklık) gerçekleştirilmiştir. Aşınma yapıldıktan sonra yükseklik ölçücünün son konumu alınmış ve aşınma derinliği direk ölçülmüştür ve sonrasında numuneler dikkatlice yerlerinden çıkarılmış, asetonla yıkanmış, kurutulmuş ve tekrar

tartılmıştır. Ölçümler ağırlık, yükseklik farkı ve ana bilgisayara kaydedilen  $F_s$  kuvvetidir. Ölçümlerin geri kalanı ( $MAM, \mu_s$ ), hesaplamalar ile gerçekleştirildi.

Deneylerde önemli ölçüde farklı tip malzemelerle, farklı yük ve hızlar altında aşınmalar yapıldı. Elde edilen değerlerin birbirine karışmaması için kayıt altına alınırken bir kod sistemi oluşturuldu. Örneğin KNT%1-1 ve BN%0,5-8 kodlamalarının ilkinde %1 KNT içeren karbon kumaş epoksi nano kompozitin birinci deneyi, ikincisinde ise %0,5 nano BN içeren karbon kumaş epoksi nano kompozitin sekizinci deneyi olacak şekilde kodlanmıştır.

#### 4.4. Deneylerin Sonuçlarının Ölçümü

##### 4.4.1. Malzeme Aşınma Miktarının Ölçümü

Numuneler, hassas bir dijital tartım makinesi kullanılarak aşınma testinden önce ve sonra tartıldı. İlk ve son ağırlıkları bilinen numunelerin aşağıdaki 4.1 formüllünden malzeme aşınma oranları hesaplandı. Ayrıca aynı işlem çelik bilyeler içinde uygulandı 4.2 formülünde gösterildiği şekilde aşındırıcıda oluşan aşınma miktarları da kayıt altına alındı. Ama aşındırıcı bilyede ki aşınma miktarları, numunelerde ki aşınma miktarlarına göre görece olarak ihmal edilecek kadar düşük olduğundan kullanılmadı.

$$MAM N. = Numune İlk Ağırlık (gram) - Numune Son Ağırlık (gram) \quad 4.1$$

$$MAMBilye = Bilye İlk Ağırlık (gram) - Bilye Son Ağırlık (gram) \quad 4.2$$

##### 4.4.1. Sürtünme Katsayısı Ölçümü ( $\mu_s$ )

Aşınma deneyi yapımı sırasında anlık olarak yük hücresinden alınan ham verilerin bir program aracılığı ile işlenmesinden sağlanan veriler bize ( $F_s$ ) sürtünme kuvvetini verir. Elde ettiğimiz bu  $F_s$  kuvvetini normalden uyguladığımız kuvvete bölümünden anlık sürtünme katsayısı bulunur. ( $\mu_s$ ). Anlık alınan sürtünme katsayılarının ortalaması ise bize malzemenin ortalama sürtünme katsayısını verir.

$$\mu s(anlık) = \frac{Fs(anlık)}{FN} \quad 4.3$$

$$\mu S = \frac{\mu s1 + \mu s2 + \mu s3 \dots \mu s(n)}{n} \quad 4.4$$

Dördüncü bölüm deneyin yapılmadan önce deney tasarımının yapılmasını numunelerin hazırlanmasını ve deneylerin ne şartlar altında yapıldığına dair genel bilgi verilmiştir. Bir sonraki bölümde; Araştırma, sonuç ve tartışma bölümüdür. Bu bölümde deney sonuçları tartışılacaktır.



## 5. ARAŞTIRMA SONUÇ VE TARTIŞMALAR

Bu araştırma, farklı oranda nano partikül içeren karbon kumaş/epoksi kompozitlerde aşınma direncinin özelliklerini araştırmak için önemli miktarda deney içermektedir. Bu bölümde; aşınma yüzeylerinin karşılaştırılması, matematiksel modelleme, ana etkiler ve etkileşim çizimleri ve optimizasyonları kullanarak, deneylerin tasarlanması ve modellenmesi yapılmıştır. Bu bölüm, KNT ve BN nano partikül takviyeli karbon kumaş epoksi malzemelerin aşınma testleri için gerekli incelemeleri yaparken geliştirilen ve takip edilen yöntem ve prosedürden oluşmaktadır. İlk olarak, yapılan aşınma deneylerinden elde edilen deney sonuçları Tablo 5.1 den Tablo 5.6 ya kadar tablolarda verilmiştir. Bu veriler daha sonra Minitab® aracılığıyla tepki yüzey metodu (TYM) ve varyans analizi (ANOVA) teknikleri kullanılarak matematiksel modeller oluşturmak için kullanılmıştır. Matematiksel modelleri kullanarak, tahmin edilen sonuçlar hesaplanmış ve Tablo 5.10 den Tablo 5.15 ye kadar tablolanmıştır. Bu sonuçlar arasındaki yüzde hataları da Tablo 5.10-5.22 de gösterilmiştir. Girdilerin aşınma sonuçlarına etkileri daha sonra karşılaştırılmakta ve etkileşim Şekilleri de gösterilmektedir. Bu çalışmada aşınmaya etki eden hız (m/s) ve yük (N) faktörlerinin optimizasyonu ve aşınmaya en çok etki eden faktörün belirlenmesi birincil hedeftir ve takip edilen metodoloji ve optimum sonuçlar da bu bölümde yer almaktadır.

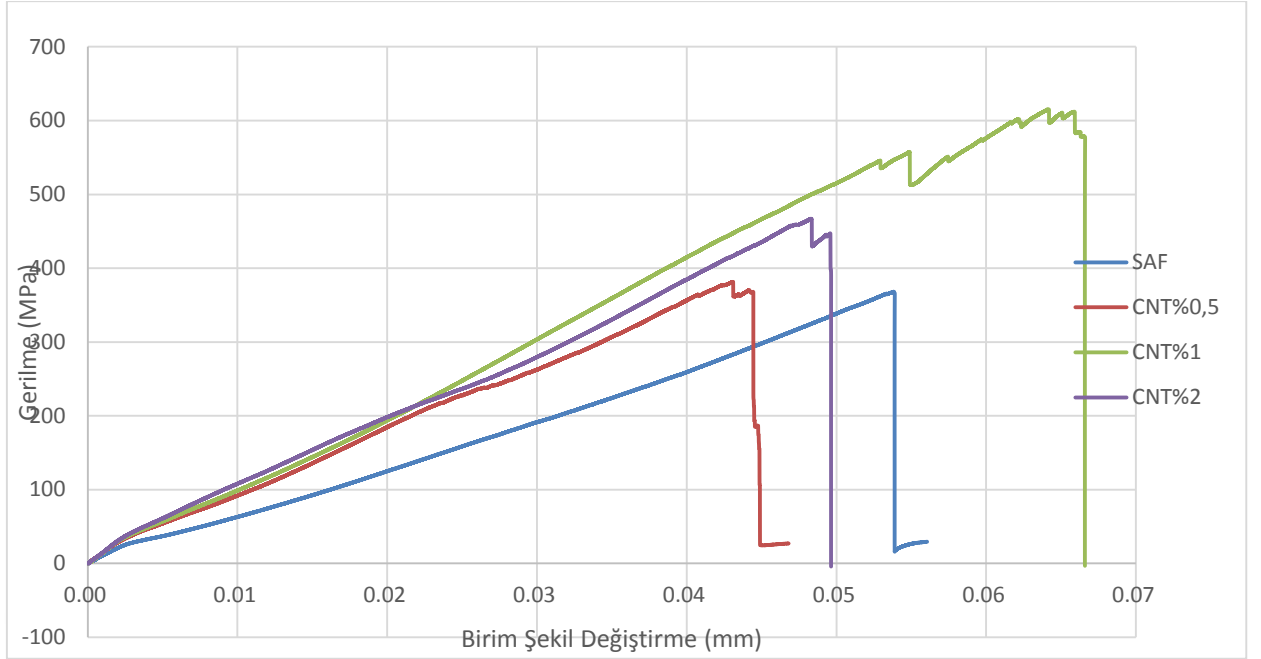
Bu tez çalışmasında, 6 farklı nano partikül takviyeli karbon kumaş/epoksi kompozit incelenmiştir. Bu nedenle, bu araştırma çalışması boyunca elde edilen çok sayıda veri, Şekil, tablo ve ampirik denklem bulunmaktadır. Tüm bu bilgileri bu tezde sunmak yerine sadece seçilmiş sonuçlar tartışılmakta ve geliştirilen metodoloji örnek olarak açıklanmaktadır. Bulunan sonuçların geri kalanı tablolarda gösterilmiştir. Böylece, örnek uygulama olarak %1 KNT içeren karbon kumaş/epoksi nanokompozit ve saf karbon kumaş/epoksi kompozit üzerinde aşınma direncinin detaylı incelenmesi seçilmiştir. Aşınma deneyleri için üretilen malzemelerin, aşınma özelliklerine bakmadan önce mekanik özelliklerin en önemlilerinden olan çekme mukavemet özelliğine bakılmıştır.



## 5.1. Üretilen Kompozitlerin Çekme Testleri ve Sonuçları

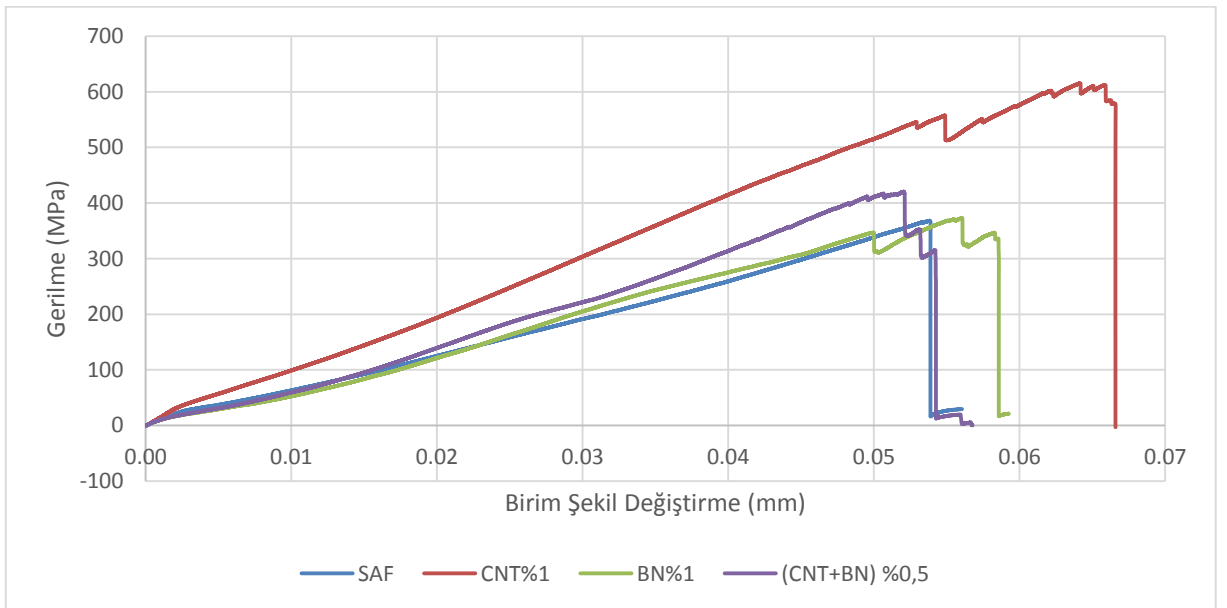
Malzemelerin çekme, basma, kesme, bükülme ve aşınma gibi bir çok mekanik özelliği vardır. Aslında bu özellikler birbirinden bağımsız gibi görünmekle beraber aralarında bir bağ mutlaka vardır. Bu mekanik özelliklerin en önemlilerinden biride çekme mukavemetidir. Bu tez çalışmasının ana başlığı aşınmanın incelenmesi olmakla beraber üretilen kompozit malzemelerin çekme mukavemetine de bakılmıştır. ASTM D 3039 standardına göre numuneler, genişliği 25,4 mm ve boyu 250 mm olacak şekilde kesilen kompozit numunelerin çekme yükleri altındaki mekanik özellikleri belirlemek için çekme testleri 2 mm/dk çekme hızında pozisyon kontrollü olarak yapılmıştır. Altı farklı malzeme için bu deneyler beşer kez tekrarlanmıştır. Sonuçların güvenilir olduğu ispatlanmıştır. Şekil 5.1, şekil 5.2, şekil 5.3 ve şekil 5.4 de çekme deneyi sonuçları karşılaştırılmalı verilmiştir.

Şekil 5.1 de görüleceği üzere içerisinde %0,5 KNT, %1KNT %2 KNT ve nano partikül takviyesi bulunmayan dört farklı tip üretilen karbon kumaş takviyeli kompozit malzemelerin karşılaştırmalı çekme deneyi sonuçları verilmiştir. Şekil 5.1 de % 0,5 KNT ve %2 KNT takviyeli kompozitler daha gevrek olduğunu her ne kadar gerilme mukavemetleri yüksek olsa da biirm şekil değiştirmelerinin daha düşük olduğu görülmektedir. Buda bize %1 KNT takviyeli hariç KNT takviyeli kompozitlerin genel anlamda nano partikül takviyesiz saf kompozite göre daha gevrek olduğunu gösterir.literatürde yapılan araştırmalarda da KNT takviyesinin çapa ve boyuta bağlı olarak malzemeye gevreklik kattığı görülmüştür. (Sinnott and Andrews 2002).



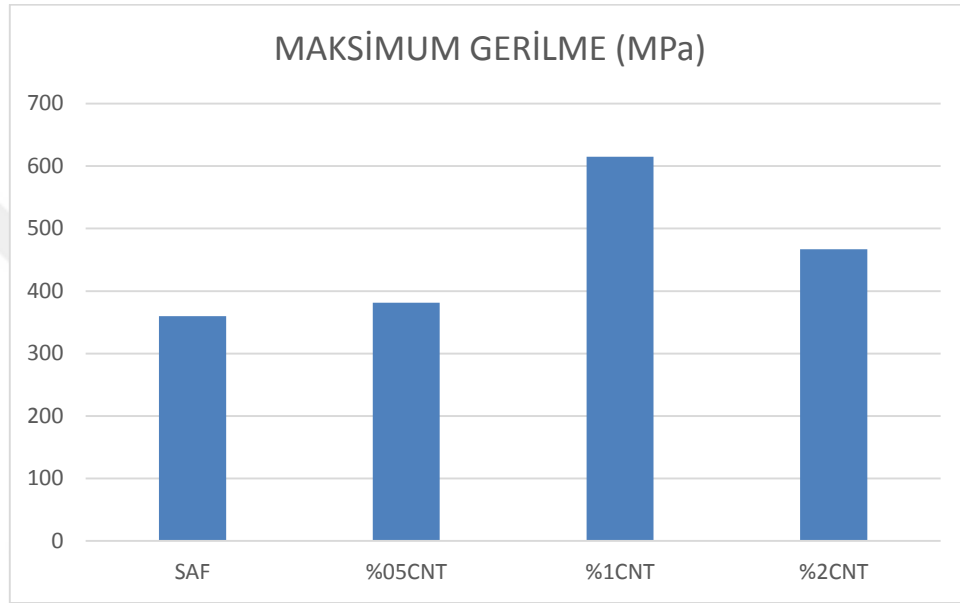
**Şekil 5.1** Saf ve KNT Eklenmiş Kompozitlerin (Gerilme/Birim Şekil DEğişirme) Grafikleri

Şekil 5.2 te içinde %1 oranda nano partikül (%1KNT, %1BN ve %0,5 (KNT+BN) içeren ve içine herhangi bir nano partikül katılmayan karbon kumaş epoksi kompozitlerin çekme dayanımını göstermektedir. Şekil 5.2 de %1 BN takviyeli kompozitin her anlamda saf kompozitten daha mukavemetli ve esnek olduğunu gösterir. Ayrıca % 0,5(BN+KNT) kompozitinde sadece % 0,5 KNT içeren kompozitten daha sünek olduğunu tokluğunun yüksek olduğunu göstermektedir.



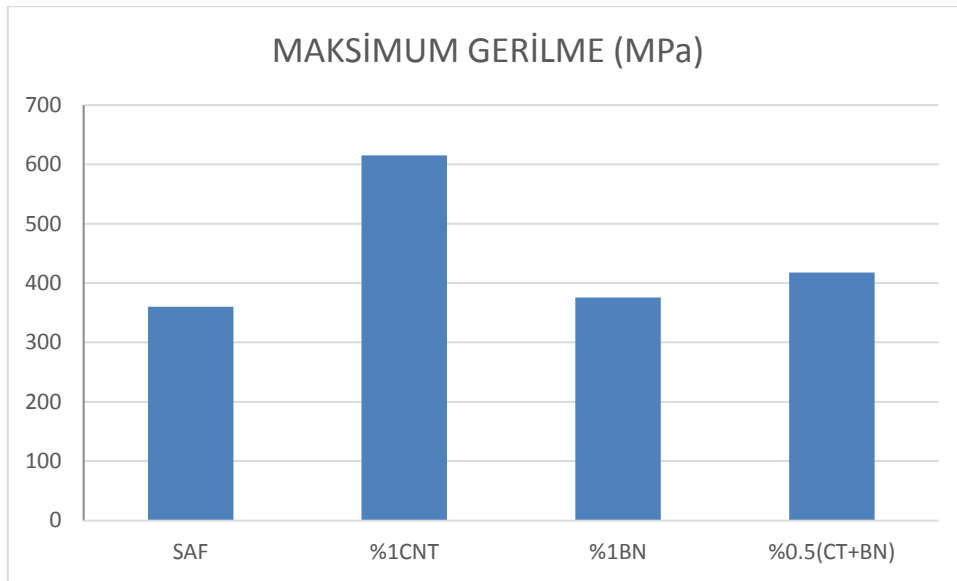
**Şekil 5.2** Saf ve %1 Nano Partikül Eklenmiş Kompozitlerin (Gerilme/Birim Şekil Değişirme) Grafikleri

Şekil 5.3 te Saf karbon kumaş epoksi kompozit malzemelere farklı miktarlarda KNT eklenmiş ve kompozitlerin çekme testleri sonucunda gerilme maksimum değerleri sütun grafiği şeklinde verilmiştir. Maksimum Gerilme kuvvetinin en düşük olduğu saf kompozitte görülmektedir. Karbon kumaş epoksi kompozitte KNT miktarı arttıkça gerilme mukavemeti artmaktadır %1 KNT içeren kompozitin maksimum gerilme mukavemetine sahip olduğu görülmüştür.



Şekil 5.3 Saf ve KNT Eklenmiş Kompozitlerin Karşılaştırmalı Maksimum Gerilme Sütun Grafikleri

Şekil 5.4 te Saf karbon kumaş epoksi kompozit malzemelere %1 oranında KNT, BN ve KNT+BN eklenmiş ve kompozitlerin çekme testleri sonucunda gerilme maksimum değerleri sütun grafiği şeklinde verilmiştir. Şekil 5.4 te %1 KNT takviyeli kompozitin maksimum gerilmeye sahip olduğu görülmüştür. Her ne kadar %1 BN kompozit saf kompozitten daha yüksek maksimum gerilme mukavemetine sahip görünse de %1 nano partikül takviyeli en düşük mukavemete sahip kompozittir. % 0,5 (KNT+BN) içeren kompozit saf kompozitten ve %1 BN içeren kompozitten daha yüksek maksimum gerilme mukavemetine sahip olmakla beraber %1 KNT içeren kompozitten daha düşük maksimum gerilme mukavemetine sahiptir.



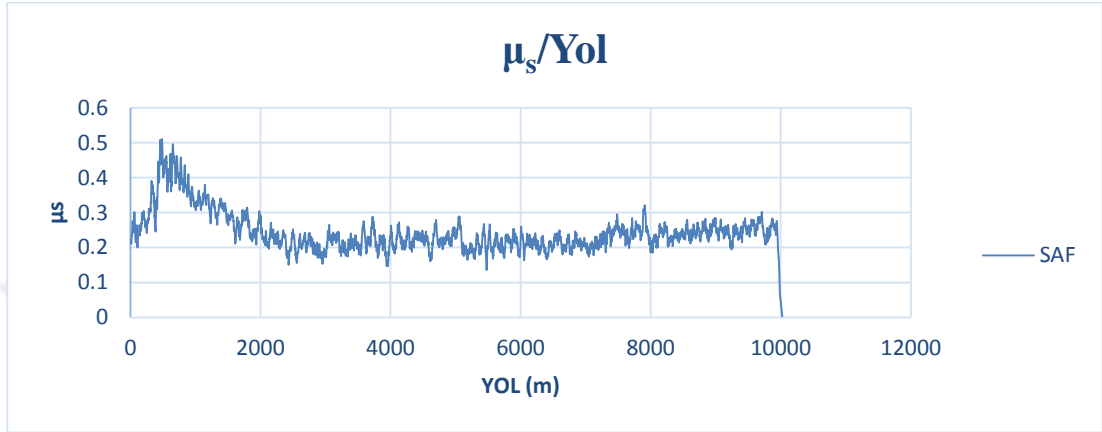
**Şekil 5.4** Saf ve %1 Nano Partikül Eklenmiş Kompozitlerin Karşılaştırmalı Maksimum Gerilme Sütun Grafikleri

Bu çalışmada 6 farklı malzeme için toplam 30 adet çekme deneyi yapılmıştır. Elde edilen sonuçların tamamen tutarlı olduğu görüldüğü için her bir numuneden bir adet örneklendirme yapıp karşılaştırılmıştır. Şekil 5.1, 5.2, 5.3 ve 5.4 bize her anlamda çekme dayanımı en yüksek kompozitin içine %1 miktarda KNT bulunan kompozit olduğunu gösteriyor. Ayrıca diğer nano partiküllerinde gerilme kuvvetini arttırdığı görülmektedir.

## **5.2. Nano Partikül Takviyeli Karbon Kumaş EpoksiKompozitin Aşınma Direnci Deney Sonuçları**

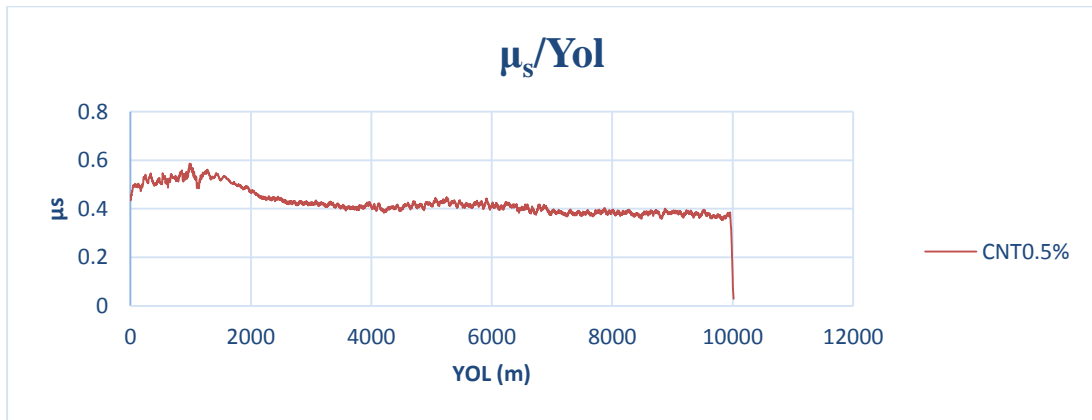
Bu çalışmada altı farklı malzemede aşınma çalışmaları yapılmış ve çıktı değerleri olarak malzeme aşınma miktarı (**MAM**) ve sürtünme katsayıları ( $\mu_s$ ) elde edilmiştir. Şekil 5.5, Şekil 5.6, Şekil 5.7 ve Şekil 5.8 sabit hız ve yük altında farklı miktarlarda KNT içeren karbon kumaş kompozit malzemelerin  $\mu_s$ /Yol grafikleri verilmiştir.

Şekil 5.5 te karbon kumaş epoksi kompozit malzemenin 20N yük ve 2,25 m/s hızda yapılan aşınma deneyi sonucu elde edilen  $\mu_s$ /Yol grafiği verilmiştir. Grafik incelendiğinde ilk 500 metrede  $\mu_s$  nin arttığı sonra azalıp sabit miktarda devam ettiği görülmektedir. Şekil 5.5 te görülen küçük dalgalanmalar ise elyaf kırılmaları olarak düşünülmektedir.



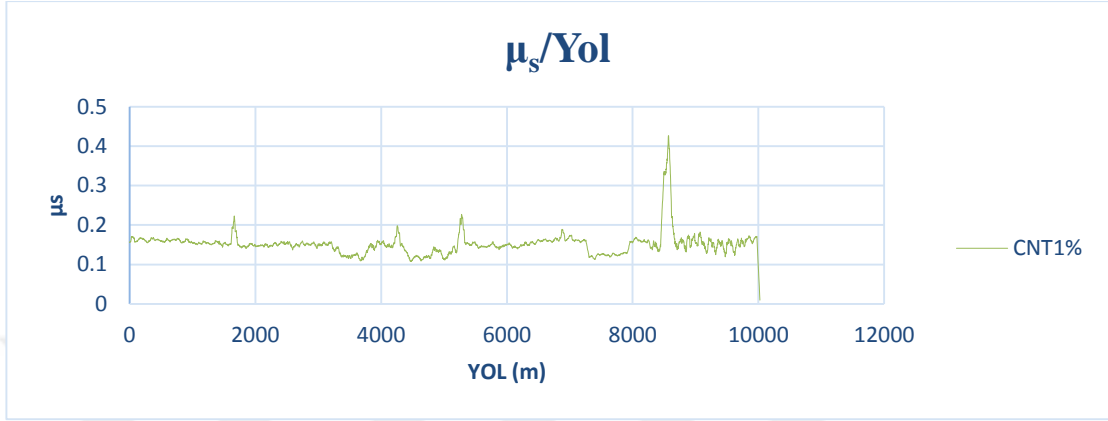
Şekil 5.5 Karbon Kumaş Epoksi Kompozitlerin Aşınma Deneyle Sonucu ( $\mu_s$ /yol) Grafiği.

Şekil 5.6 da %0,5 KNT bulunan karbon kumaş epoksi kompozit malzemenin 20N yük ve 2,25 m/s hızda yapılan aşınma deneyi sonucu elde edilen  $\mu_s$ /Yol grafiği verilmiştir. Grafikte görüleceği üzere  $\mu_s$  miktarı düzenli olarak azalmıştır. Bu azalmaya sebep olan kompozit malzeme içinde bulunan %0,5 miktarında ki KNT dir. Zaman içinde aşınan yüzeyde ince film tabakası oluşturup ısıyı yüzeyden uzaklaştırarak aşınma katsayısını düşürdüğü tespit edilmiştir.



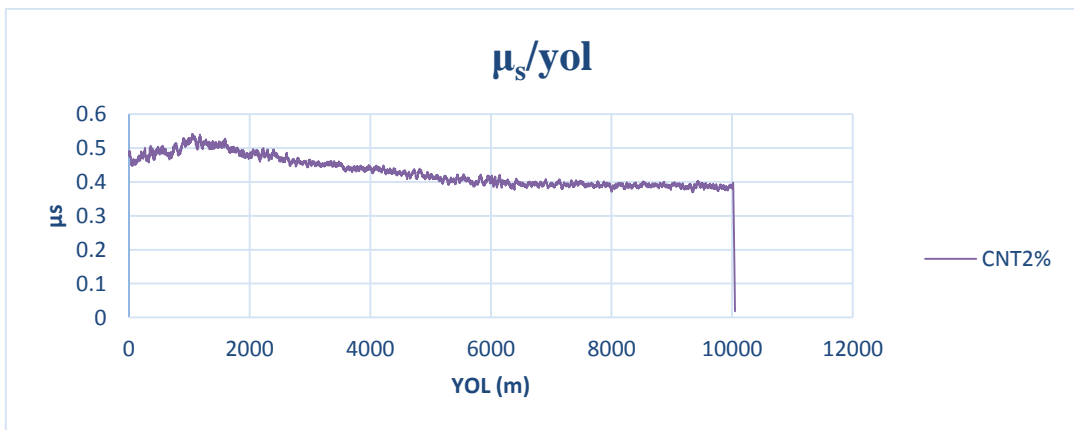
Şekil 5.6 %0,5 KNT Eklenmiş Karbon Kumaş Epoksi Kompozitlerin Aşınma Deneyle Sonucu ( $\mu_s$ /yol) Grafiği

Şekil 5.6 da %1 KNT bulunan karbon kumaş epoksi kompozit malzemenin 20N yük ve 2,25 m/s hızda yapılan aşınma deneyi sonucu elde edilen  $\mu_s$ /Yol grafiği verilmiştir. Grafikten görüleceği üzere 8500 metrelere kadar aşınma katsayısı sabit kalmış 8500 m de pik yapmıştır. Buna sebep olan sistemin 8000 metrelerde büyük bir parça kopması lif kırılması olduğu düşünülmektedir.



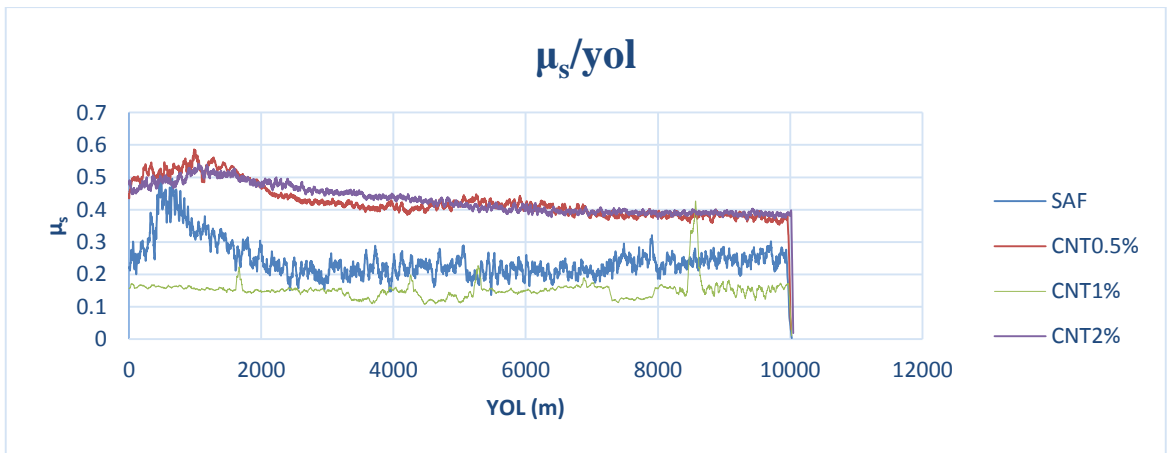
Şekil 5.7 %1 KNT Eklenmiş Karbon Kumaş Epoksi Kompozitlerin Aşınma Deneyleri Sonucu ( $\mu_s$ /yol) Grafiği

Şekil 5.7 de %2 KNT bulunan karbon kumaş epoksi kompozit malzemenin 20N yük ve 2,25 m/s hızda yapılan aşınma deneyi sonucu elde edilen  $\mu_s$ /Yol grafiği verilmiştir. Grafikten görüleceği üzere karbon kumaş kompozit malzemede bulunan %2 miktarında KNT zamanla aşınan yüzeyde ince film tabaka oluşturarak aşınma katsayısını düşürmüştür.



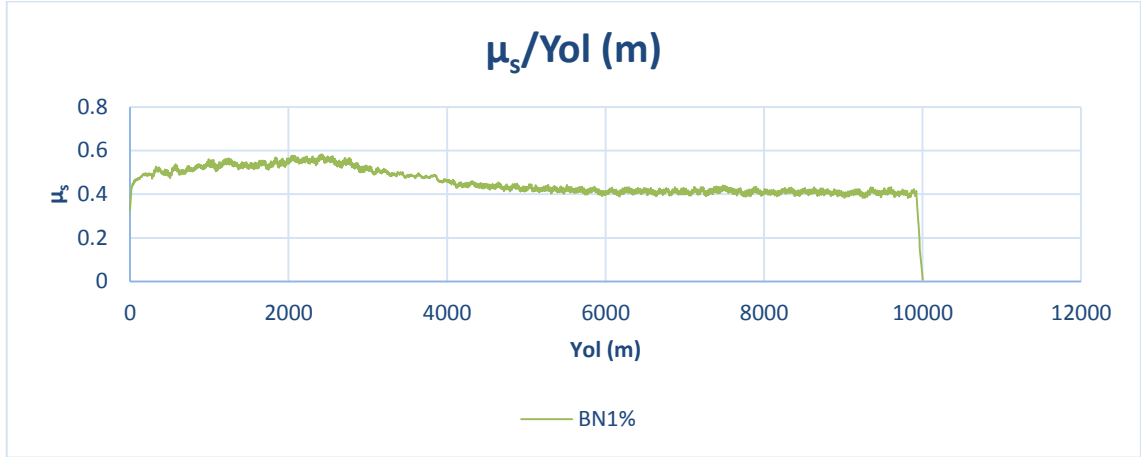
Şekil 5.8 %2 KNT Eklenmiş Karbon Kumaş Epoksi Kompozitlerin Aşınma Deneyleri Sonucu ( $\mu_s$ /yol) Grafiği

Şekil 5.9 da içinde farklı miktarlarda KNT bulunan karbon kumaş epoksi kompozit malzemenin 20N yük ve 2,25 m/s hızda yapılan aşınma deneyi sonucu elde edilen  $\mu_s$ /Yol grafikleri karşılaştırılmalı verilmiştir. Sabit yük ve hız altında (yük=20N, hız= 2,25 m/s) içerisinde nano malzeme bulunmayan saf karbon kompozit ile içinde farklı miktarda KNT içeren karbon kompozitlerin 10000m sabit yol boyunca tribometreden elde edilen  $\mu_s$ /yol grafiğidir. Şekilde de görüleceği üzere bu hız ve yük altında KNT%2 ve KNT% 0,5 birbirine paralel bir hat izlemişler ve üst üste çakışmışlardır. En yüksek  $\mu_s$  değerleri bu iki malzeme de olduğu görülmüştür. KNT%1, saf karbon kompozite göre iyileştirilmiş bir ortalama  $\mu_s$  değeri vermektedir. KNT %1 in 8500 metrelerde oluşan anlık  $\mu_s$  de ki piki o anda Karbon elyafta kırılmanın yüzeyden parça kopmanın olduğunu göstermektedir. dikkatlice incelendiğinde KNT%0,5 ve KNT%2 nano partikül içeren kompozitlerin anlık  $\mu_s$ leri önce bir miktar yükselmiş olsada zamanla azalmıştır. Buna sebep olan mekanizmayı araştırdığımızda karşımıza şöyle bir sonuç çıkmakta ilk anda sürtünme ile beraber anlık yüzey ısısında yükselme görülüyor zamanla ısı KNT aracılığı ile aşınan yüzeyden uzaklaştırılıyor ve yüzeyde kısmı yüzey filmi oluşuyor bu sayede yüzeyde aşınma miktarı zamanla yavaş yavaş azalıyor. KNT %1 de ise genel anlamda 10000m boyunca sabit bir  $\mu_s$  değeri görebiliyoruz. Saf karbon kompozitte ilk başta oldukça yükselen bir  $\mu_s$  değeri ile karşı karşıyayız. Zamanla bu değer düşüyor ve sabitleniyor. İlk anda ısı dağılımı KNT li karbon kompozite göre daha düşük olan, saf karbon kompozit ısıyı dağıtamadığı için  $\mu_s$  yüksek oluyor zamanla ısının aşınma yüzeyinden uzaklaşması ve aşınan partiküllerin yüzeyde ince film tabakası yapması sebebiyle anlık  $\mu_s$  miktarı düşüyor ve sabitleniyor.



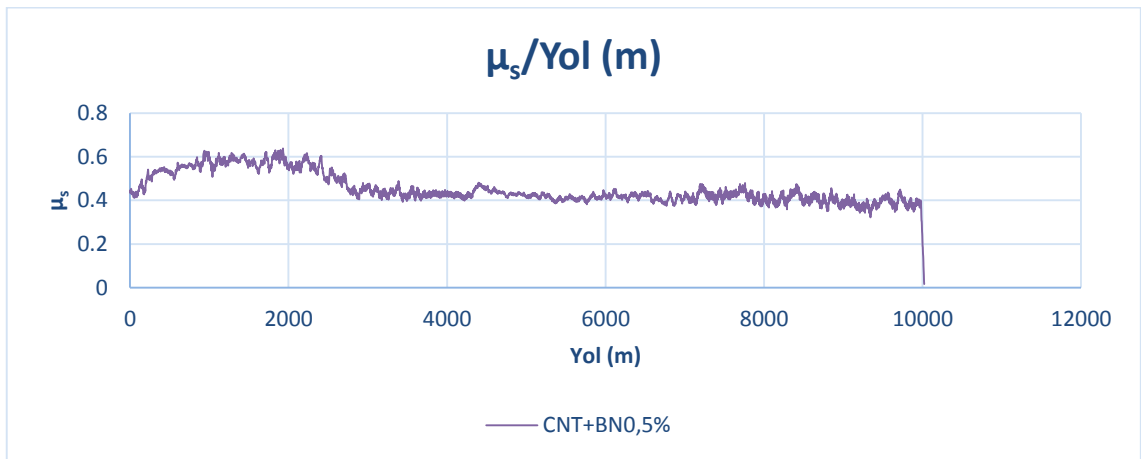
Şekil 5.9 Saf ve KNT Eklenmiş Karbon Kumaş Epoksi Kompozitlerin Aşınma Deneyleri Sonucu ( $\mu_s$ /yol) Grafiği

Şekil 5.10 da %1 BN bulunan karbon kumaş epoksi kompozit malzemenin 20N yük ve 2,25 m/s hızda yapılan aşınma deneyi sonucu elde edilen  $\mu_s$ /Yol grafiği verilmiştir. Karbon kumaş kompozit malzeme içinde bulunan BN takviyesi sayesinde ilk başta aşınma bir miktar azalmış ama devamında BN yüzeyden ısıyı uzaklaştırmaya yardımcı olmuş ve aşınma katsayısı zamanla azalmıştır.



Şekil 5.10 % 1 BN Eklendiği Karbon Kumaş Epoksi Kompozitlerin Aşınma Deneyleri Sonucu ( $\mu_s$ /yol) Grafiği

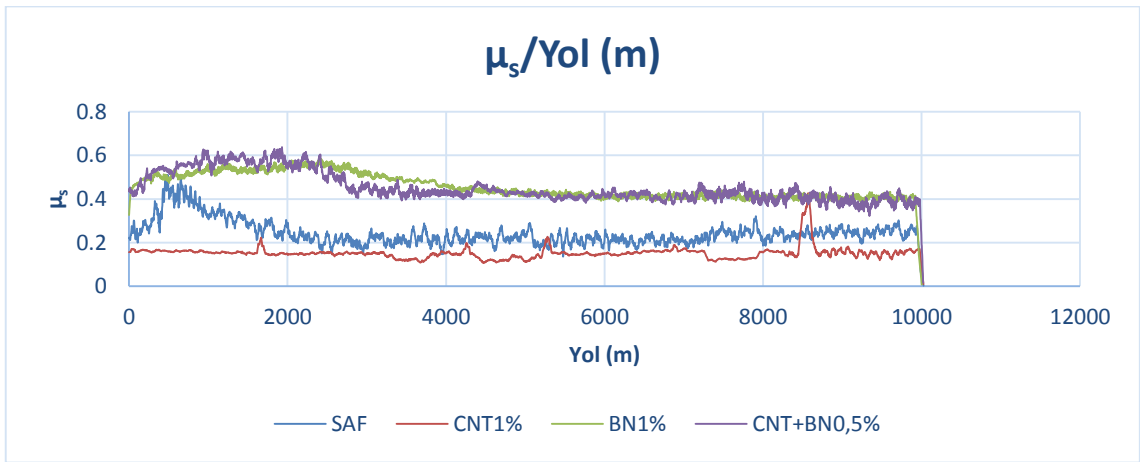
Şekil 5.11 de %0,5 (KNT+BN) bulunan karbon kumaş epoksi kompozit malzemenin 20N yük ve 2,25 m/s hızda yapılan aşınma deneyi sonucu elde edilen  $\mu_s$ /Yol grafiği verilmiştir. Karbon kumaş kompozit malzeme içinde bulunan %0,5 KNT+%0,5 BN sayesinde malzemede aşınma katsayısında ciddi bir düşüş yaşanmış ve zamanla sabit halde kalmıştır.



Şekil 5.11 % 0,5 (KNT+BN) Eklendiği Karbon Kumaş Epoksi Kompozitlerin Aşınma Deneyleri Sonucu ( $\mu_s$ /yol) Grafiği

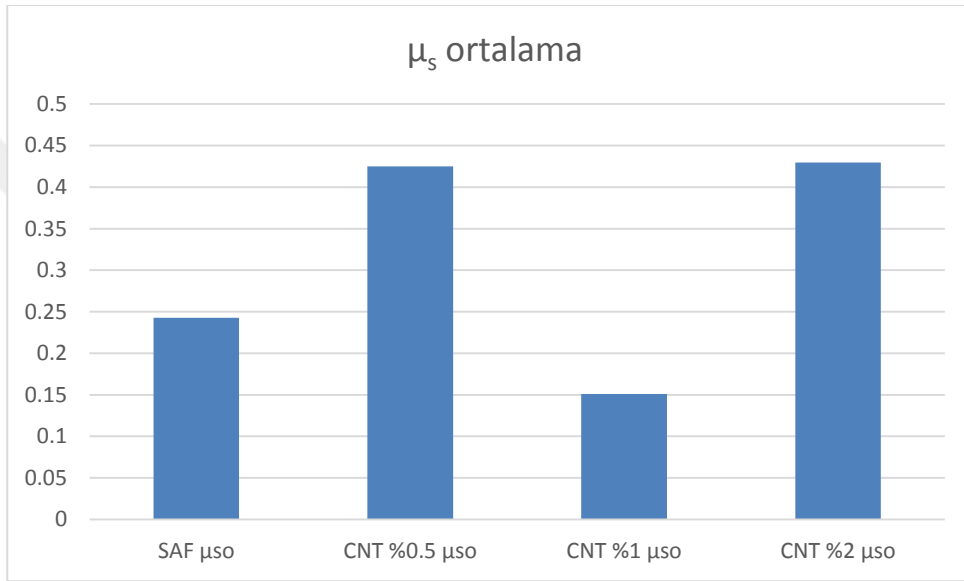


Şekil 5.12 da içeriğinde %1 nano partikül içeren malzemelerin birbiri ile ve saf karbon kumaş kompozitle karşılaştırılmasını görüyoruz. Şekil 5.12 yi incelediğimizde en düşük aşınma direncinin %1KNT ile iyileştirilmiş karbon kumaş kompozitin olduğunu gösteriyor. %1 BN ve % 0,5 (KNT+BN) içeren kompozitlerde anlık aşınmaların safa kompozite göre daha yüksek olduğu ve birbirine paralel ilerlediği görülmektedir. BN ve KNT ile iyileştirilen kompozitlerin  $\mu_s$  değerleri zamanla azaldığı görülmüştür buna sebep olan mekanizma BN ve KNT nin yüzeyi kaplaması ve yüzeyden ısıyı uzaklaştırması olarak gösterilebilir. Ayrıca yüzeyde thin film etkisi de bu sonucu doğurduğu düşünülmektedir.

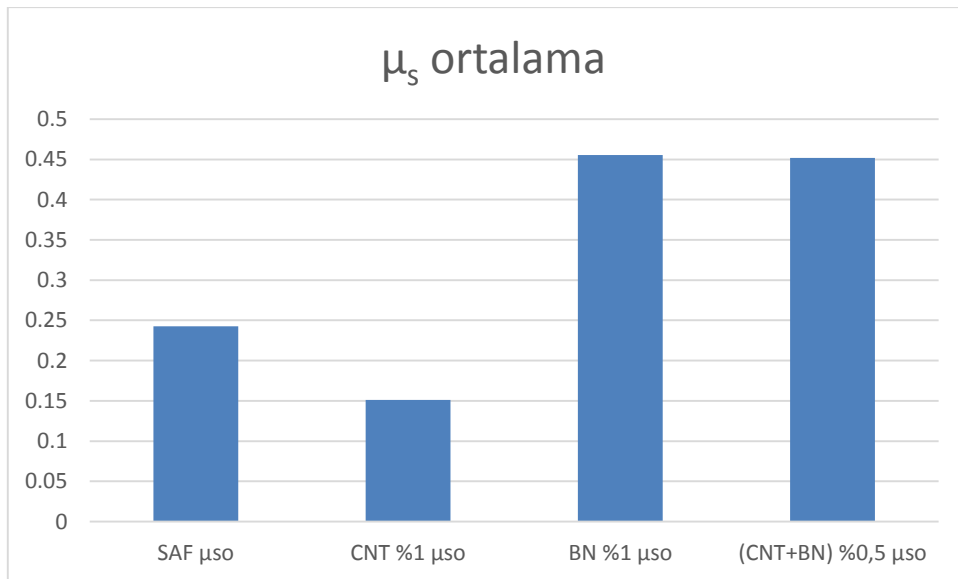


Şekil 5.12 Saf ve BN Eklenmiş Karbon Kumaş Epoksi Kompozitlerin Aşınma Deneyle Sonucu ( $\mu_s$ /yol) Grafiği

Şekil 5.13 te karbon kumaş epoksi kompozit ve KNT eklenmiş karbon kumaş epoksi kompozit malzemelerin karşılaştırmalı ortalama  $\mu_s$  değerleri vardır. En düşük ortalama  $\mu_s$  değeri içerisinde %1 KNT içeren karbon kumaş epoksi nanokompozit malzemede elde edilmiştir onu sırasıyla içinde nano partikül içermeyen saf karbon kumaş epoksi, %0,5 KNT içeren nano kompozit ve %2 KNT içeren nano kompozit vardır. Şekil 5.14 te içinde %1 nano partikül katkılı karbon kumaş kompozit malzemelerin ortalama  $\mu_s$  değeri vardır. ortalama  $\mu_s$  değeri en düşük olan %1 KNT takviyeli karbon kumaş kompozit malzemedir.

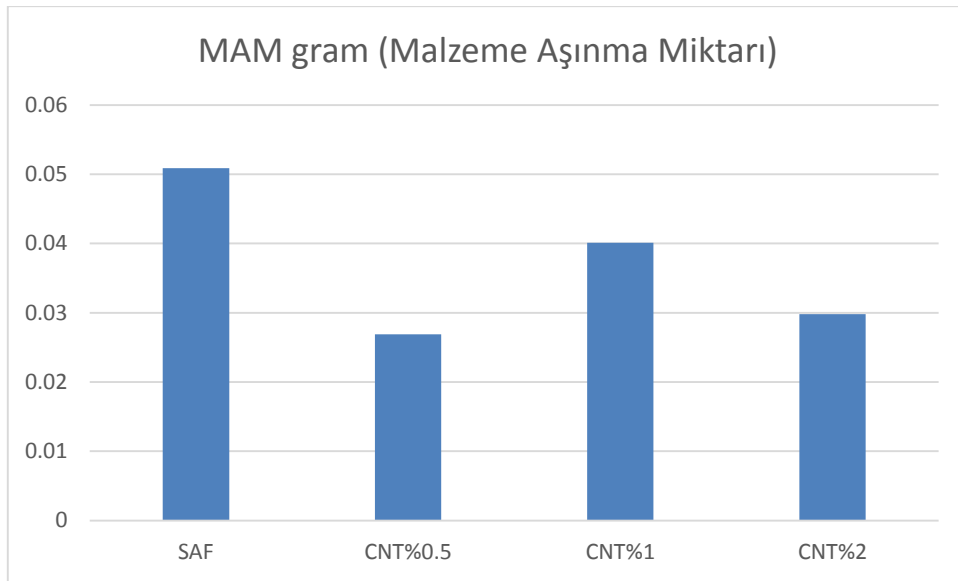


Şekil 5.13 Saf ve KNT Eklenmiş Kompozitlerin Karşılaştırmalı Ortalama( $\mu_s$ ) Grafikleri

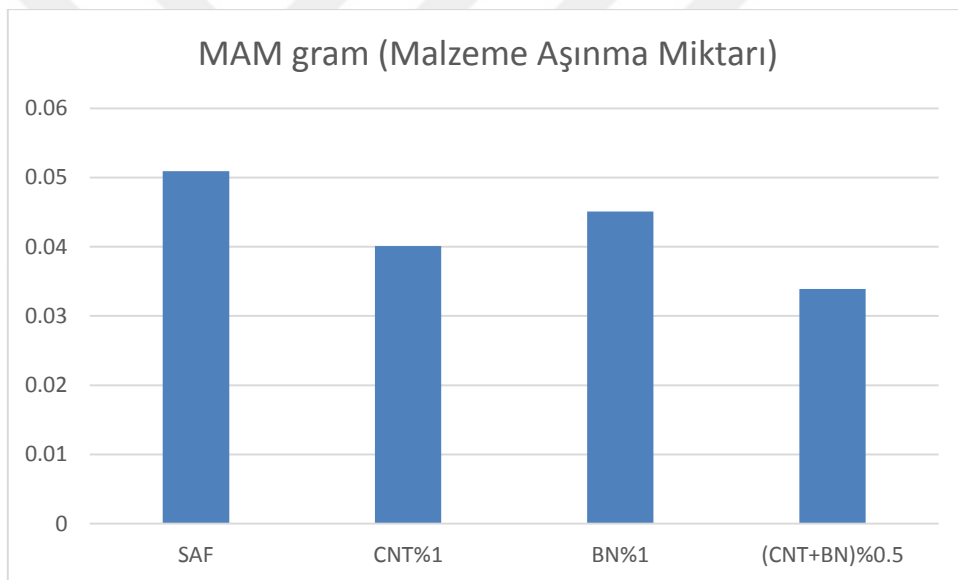


Şekil 5.14 Saf ve %1 Nano Partikül Eklenmiş Kompozitlerin Karşılaştırmalı Ortalama( $\mu_s$ ) Grafikleri

Şekil 5.15 ve Şekil 5.16, saf ve nano partikül eklenmiş karbon kompozitlerin karşılaştırmalı malzeme aşınma miktarı (MAM) grafikleridir. Şekil 5.15 sabit yük, hız ve uzunlukta ki yol boyunca saf karbon kompozit ve farklı miktarlarda KNT içeren karbon kompozitlerin yüzeylerinden aşınan malzeme miktarlarının karşılaştırmasını içermektedir. Daha önce ki Şekil 5.13 te en KNT %0,5 en yüksek  $\mu_s$  değerine sahip olsada malzeme aşınma miktarının çok daha düşük olduğu görünmüştür. En düşük  $\mu_s$  değeri KNT %1 eklenmiş karbon kumaş kompozit malzeme de olsa da KNT %0,5 ve KNT %2 takviyeli karbon kumaş kompozite göre daha fazla aşınma miktarı gerçekleşmiştir. En yüksek aşınma miktarı karbon kumaş kompozitte gerçekleşmiştir. Bu veriler doğrultusunda KNT takviyesinin aşınma miktarını oldukça düşürdüğünü söylemek mümkündür. Özellikle sürtünmenin yüksek olmasını, aşınmanın düşük olmasını istediğimiz durumlarda KNT ile güçlendirilmiş karbon kompozit kullanılması çok fazla mekanik avantaj sağlayacaktır. Şekil 5.16 sabit yük, hız ve uzunlukta ki yol boyunca karbon kumaş kompozit ve %1 Nano partikül içeren karbon kompozitlerin yüzeylerinden aşınan malzeme miktarlarının karşılaştırmasını içermektedir. Şekil 5.16 da en yüksek aşınma miktarı karbon kumaş kompozitte oluşmuş sırasıyla %1 BN, %1 KNT ile güçlendirilmiş karbon kumaş kompozit takip etmiştir. En düşük aşınma miktarı % 0,5 (KNT+BN) içeren karbon kumaş kompozitte görülmüştür. Şekil 5.10 la beraber bakıldığında bu sonucun beklenen sonuç olduğu görülmektedir. Şekil 5.10 da en düşük aşınma % 0,5 KNT içeren karbon kompozitte görülmüştür. %1BN ve %1KNT içeren karbon kompozitleri karşılaştırdığımızda %1 KNT içeren kompozitin daha düşük aşınma miktarına sahip olduğunu görüyoruz. % 0,5 BN ve % 0,5 KNT içeren karbon kompozitte % 0,5 KNT içeren karbon kumaş kompozitten daha fazla aşınma olma sebebi içinde % 0,5 BN içermesi ve aşınma miktarını yukarıya çekmesindedir.



**Şekil 5.15** Saf ve KNT Eklenmiş Kompozitlerin Karşılaştırmalı MAM Şekilleri



**Şekil 5.16** Saf ve %1 Nano Partikül Eklenmiş Kompozitlerin Karşılaştırmalı MAM Şekilleri

Saf karbon kumaş epoksi ve %0,5 KNT, %1 KNT, %2 KNT, %1 BN ve % 0,5 (KNT+BN) içeren karbon kumaş epoksi nano kompozitler için, TYM kullanılarak iki girdi değeri için elde edilen 13 deneyden daha önce ki bölümde bahsedilmiştir. Her bir malzeme için modellenen deneyler tek tek yapıldığında belirlenen hız ve yüklerde elde edilen MAM ve  $\mu_s$  değerleri aşağıdaki tablo 5.1, 5.2, 5.3, 5.4, 5.5 ve 5.6 da verilmiştir. Tabloda geçen soldan sağa; deney no: deneyin sırası, hız ve yük o deneyde kullanacağımız hız (m/s) ve yük (N) değerleri, MAM: deney sonucu elde edilen aşınma miktarı,  $\mu_s$  deney sonucu elde edilen  $\mu_s$  değerleri.

**Tablo 5.1** Karbon Kumaş Epoksi Kompozitin Aşınma Direnci Deney Sonuçları

D deney No	Hız	Yük	MAM	$\mu s$
1	1,50	15	0,057	0,3127
2	0,75	20	0,0838	0,4039
3	2,25	20	0,0588	0,2554
4	3,00	25	0,0441	0,2904
5	3,00	15	0,0707	0,4741
6	2,25	20	0,0566	0,3573
7	2,25	20	0,0509	0,2428
8	2,25	20	0,0563	0,2318
9	2,25	10	0,0567	0,5231
10	3,75	20	0,0442	0,2691
11	2,25	30	0,0794	0,2385
12	1,50	25	0,0779	0,3143
13	2,25	20	0,0596	0,2758

**Tablo 5.2%** 0,5 KNT İçeren Karbon Kumaş EpoksiKompozitin Aşınma Direnci Deney Sonuçları

D deney No	Hız	Yük	MAM	$\mu s$
1	1,50	15	0,0771	0,6517
2	0,75	20	0,1046	0,516
3	2,25	20	0,0569	0,4249
4	3,00	25	0,0407	0,3409
5	3,00	15	0,0333	0,4935
6	2,25	20	0,0549	0,5027
7	2,25	20	0,058	0,3833
8	2,25	20	0,0653	0,5156
9	2,25	10	0,0355	0,9473
10	3,75	20	0,0292	0,2994
11	2,25	30	0,0396	0,3582
12	1,50	25	0,0746	0,452
13	2,25	20	0,0613	0,4606

**Tablo 5.3%** 1 KNT İçeren Karbon Kumaş EpoksiKompozitin Aşınma Direnci Deney Sonuçları

D deney No	Hız	Yük	MAM	$\mu s$
1	1,50	15	0,0654	0,3506
2	0,75	20	0,0614	0,3292
3	2,25	20	0,0694	0,3529
4	3,00	25	0,0796	0,2287
5	3,00	15	0,0731	0,5708
6	2,25	20	0,0743	0,332
7	2,25	20	0,0693	0,3986
8	2,25	20	0,0601	0,3251
9	2,25	10	0,0667	0,4658
10	3,75	20	0,1054	0,3432
11	2,25	30	0,1017	0,3351
12	1,50	25	0,0934	0,4099
13	2,25	20	0,0783	0,3292

**Tablo 5.4**%2 KNT İçeren Karbon Kumaş EpoksiKompozitin Aşınma Direnci Deney Sonuçları

Deney No	Hız	Yük	MAM	$\mu s$
1	1,50	15	0,0391	0,5728
2	0,75	20	0,0395	0,4539
3	2,25	20	0,0438	0,4368
4	3,00	25	0,041	0,3592
5	3,00	15	0,041	0,6882
6	2,25	20	0,0373	0,4296
7	2,25	20	0,0442	0,4427
8	2,25	20	0,0439	0,4736
9	2,25	10	0,0523	0,7915
10	3,75	20	0,0411	0,4076
11	2,25	30	0,0451	0,3444
12	1,50	25	0,0375	0,3592
13	2,25	20	0,0406	0,3841

**Tablo 5.5**%1 BN İçeren Karbon Kumaş EpoksiKompozitin Aşınma Direnci Deney Sonuçları

Deney No	Hız	Yük	MAM	$\mu s$
1	1,50	15	0,0986	0,6724
2	0,75	20	0,0905	0,5968
3	2,25	20	0,0434	0,516
4	3,00	25	0,0858	0,3318
5	3,00	15	0,0227	0,4394
6	2,25	20	0,045	0,5341
7	2,25	20	0,0477	0,4635
8	2,25	20	0,0451	0,4556
9	2,25	10	0,0401	0,7856
10	3,75	20	0,0653	0,3973
11	2,25	30	0,0653	0,3685
12	1,50	25	0,0459	0,4557
13	2,25	20	0,0466	0,4736

**Tablo 5.6**% 0,5 (KNT+BN) İçeren Karbon Kumaş EpoksiKompozitin Aşınma Direnci Deney Sonuçları

Deney No	Hız	Yük	MAM	$\mu s$
1	1,50	15	0,1239	0,655
2	0,75	20	0,1862	0,5816
3	2,25	20	0,0439	0,452
4	3,00	25	0,0625	0,3126
5	3,00	15	0,0158	0,4951
6	2,25	20	0,0486	0,4216
7	2,25	20	0,0491	0,4901
8	2,25	20	0,0455	0,4804
9	2,25	10	0,0533	0,8242
10	3,75	20	0,0565	0,3252
11	1,50	15	0,0443	0,3124
12	1,50	25	0,0746	0,4222
13	2,25	20	0,0498	0,486

Hazırlanan numuneler aşınma deneylerine tabi olduğunda, tekrarlanan deneylerde gözlemlenen yanıtlarda bazı farklılıklar vardır. Deneysel hatalar bu farklılıklara neden olabilir. Ölçüm hataları bu hatalara da neden olabilir. Öte yandan, aşınma deneyleri çok karmaşık bir süreçtir. Aşınma sonuçlarının sonuçlarına güçlü etkisi olan farklı etkili faktörleri vardır. Bazı faktörler kontrol altında tutulabilir, ancak birçoğu kontrol edilemez. Bununla birlikte, TYM, tekrarlanan ölçümlerin ortalama değerleri olarak kabul edildiği bir strateji kullanır.

### 5.3. Aşınmanın Matematiksel Modellenmesi

Bu çalışmada aşınma deneyleri tepki yüzey metodolojisine (TYM) göre modellenip üretilen her bir malzeme için deneyler yapıp deneysel sonuçlar elde edildikten sonra elde edilen malzeme aşınma miktarı (MAM) gram ve ortalama aşınma  $\mu_s$  deney sonuçları matematiksel modelleme yapmak için Minitab® programına girilmiştir. Aşınmanın matematiksel modellenmesinin yapılması bize daha sonraki çalışmalarda büyük kolaylık sağlar. Şöyleki; oluşturulan matematiksel modeller sayesinde deneylerde hiç kullanmadığımız hız ve yük değerlerinin çıktı değerleri olan (MAM) ve  $\mu_s$  değerlerine etkisini öngörebiliriz. ayrıca bu modellemeleri ileride anlatılacak olan varyans analizi (ANOVA) ile kombine edip optimizasyon ve girdi parametrelerin çıktı parametrelerine olan temel etki değerlerini görebiliriz.

#### 5.3.1. Tepki Yüzey Metodolojisi

Tepki yüzey metodolojisi (TYM), çeşitli değişkenlerden etkilenen çıktı veya cevabın modellenmesi ve analiz edilmesi için yararlı olan matematiksel ve istatistiksel tekniklerin bir araya getirilmesidir ve amaç, cevap ve değişkenler arasındaki korelasyonu bulmaktır. Son hedef, yanıtları optimize etmektir. Sistemin davranışını etkileyen değişkenlere faktör denir. Tüm girdi parametreleri nicel değişkenleri temsil ederse, cevaplar, seviyelerin ve değişkenlerin bir fonksiyonu olarak gösterilebilir.

$$Y_u = f(X_{1u}, X_{2u}, \dots, X_{ku}) + E_u$$

5.1

Burada,  $u = 1, 2 \dots N$ , faktöriyel deneyde  $N$  gözlemini temsil eder ve  $X_{iu}$ ,  $u$ th gözlemindeki  $i$ th faktörünün seviyesini temsil eder. 'f' işlevi tepki fonksiyonu olarak

adlandırılır. Artık  $E_u$ ,  $u_{th}$  gözleminin deneysel hatasını ölçer. (Montgomery, Douglas C 2002)

Yapılan bu deneysel araştırmada, hız (m/s), Yük (N) gibi aşınmaya neden olan dış koşulların MAM ve  $\mu_s$  üzerindeki etkileri incelenmiştir. Deneyleerin tasarımı önceki bölümde belirtilmiştir. Aşınma süreci doğası gereği doğrusal olmadığı için, lineer polinomial cevapları doğru olarak tahmin edemeyecektir. Bu nedenle, bu çalışmada, yanıt yüzeyi ve bağımsız parametreler ile ilgili ampirik modelin geliştirilmesi için ikinci dereceden bir polinom (ikinci dereceden model) kullanılmıştır.

$$Y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_1^2 + b_4x_2^2 + b_5x_1x_2 \quad 5.2$$

Daha sonra cevap yüzey metodolojisi uygulanmış ve Yık ve Hız ile ilgili aşınma deneyi süreci ve ilgili aşınma deneyi süreci değişkenleri arasındaki ilişki için matematiksel model elde edilmiştir. Bu denklemler; çıktıları, sabit değerleri, girdi parametrelerini ve katsayılarını içerir. Aşağıdaki formül 5.3 ten formül 5.8 e kadar olan formüller, girdi parametreleri olan değişken hız ve yükler altında ki oluşacak MAM ve  $\mu_s$  çıktı parametrelerinin ampirik matematiksel modellerini içerir ve bu modeller aracılığı ile girdi parametreleri olan Yık ve Hız ın her hangi bir değerinde oluşacak sonuçlar tahmin edilebilir kılınmıştır.

MAM = Malzeme aşınma miktarı

$\mu_s$  = ortalama aşınma katsayısı

v = hız (m/s)

FN = Yık (N)

**Formül 5.3** Karbon Kumaş Epoksi Kompozitin MAM ve  $\mu_s$  değerlerinin Matematiksel Modeli

$$MAM(gram) = -0,0071212 + (0,0042390 * v) + (0,0005428 * FN) + (0,0032295 * v * v) + (0,0000015 * FN * FN) + (-0,0002111 * v * FN)$$

$$\mu_s = 0,540381 + (0,024500 * v) + (-0,001477 * FN) + (0,013057 * v * v) + (0,000011 * FN * FN) + (0,000824 * FN * v)$$



**Formül 5.4** % 0,5 KNT İçeren Karbon Kumaş Epoksi Kompozitin MAM ve  $\mu_s$  değerlerinin Matematiksel Modeli

$$MAM (gram) = 0,0509373 + (-0,0447262 * v) + (0,0082459 * FN) + (0,0032157 * v * v) + (-0,0002211 * FN * FN) + (0,0003267 * v * FN)$$

$$\mu_s = 1,94739 + (-0,04013 * v) + (-0,11045 * FN) + (-0,02238 * v * v) + (0,00195 * FN * FN) + (0,00314 * v * FN)$$

**Formül 5.5** % 1 KNT İçeren Karbon Kumaş Epoksi Kompozitin MAM ve  $\mu_s$  değerlerinin Matematiksel Modeli

$$MAM (gram) = 0,0474688 + (0,0072736 * v) + (-0,0014520 * FN) + (0,0067762 * v * v) + (0,0001605 * FN * FN) + (-0,0014333 * v * FN)$$

$$\mu_s = -0,104105 + (0,344238 * v) + (0,012203 * FN) + (0,016930 * v * v) + (0,000623 * FN * FN) + (0,020093 * v * FN)$$

**Formül 5.5** % 2 KNT İçeren Karbon Kumaş Epoksi Kompozitin MAM ve  $\mu_s$  değerlerinin Matematiksel Modeli

$$MAM (gram) = 0,092544 + (-0,0083295 * v) + (-0,0042637 * FN) + (-0,0008552 * v * v) + (0,0000648 * FN * FN) + (0,0007067 * v * FN)$$

$$\mu_s = 1,11302 + (0,15769 * v) + (-0,06126 * FN) + (-0,00029 * v * v) + (0,00137 * FN * FN) + (-0,00769 * v * FN)$$

**Formül 5.6** % 1 BN İçeren Karbon Kumaş Epoksi Kompozitin MAM ve  $\mu_s$  değerlerinin Matematiksel Modeli

$$MAM (gram) = 0,421098 + (-0,202441 * v) + (-0,014017 * FN) + (0,014545 * v * v) + (0,000025 * FN * FN) + (0,006247 * v * FN)$$

$$\mu_s = 1,81941 + (-0,28350 * v) + (-0,07381 * FN) + (0,00238 * v * v) + (0,00085 * FN * FN) + (0,00927 * v * FN)$$

**Formül 5.7** % 0,5 (KNT+BN) İçeren Karbon Kumaş Epoksi Kompozitin MAM ve  $\mu_s$  değerlerinin Matematiksel Modeli

$$MAM (gram) = 0,647658 + (-0,333532 * v) + (-0,017883 * FN) + (0,034400 * v * v) + (0,000048 * FN * FN) + (0,007000 * v * FN)$$

$$\mu_s = 1,66069 + (-0,12638 * v) + (-0,07196 * FN) + (-0,00614 * v * v) + (0,00101 * FN * FN) + (0,00335 * v * FN)$$

### 5.3.2. ANOVA Oluşturulan Matematik Modelleri İçin Test

Matematiksel modeller oluşturulduktan sonra geliştirilen modellerin yeterliliği için varyans analizi (ANOVA) bir sonraki adımda gerçekleştirildi. Bir modelin yeterliliğini test etmek için kullanılan genel yöntem, uyumsuzluğun saf hataya oranını hesaplamak ve standart değerle karşılaştırmak suretiyle gerçekleştirilir. Analizdeki bu P ( $<\alpha$ -seviyesi) değerleri, regresyon modelinin anlamlı olduğunu ortaya çıkarmaktadır. Bu nedenle, regresyon denklemindeki terimlerden biri, ortalama tepki üzerinde önemli bir etki yapar. Örneğin, F oranı% 95 güven seviyesi için hesaplanırsa, 0.05'ten daha az olan hata değeri anlamlı kabul edilir ve 0.05'ten büyük hata değerler anlamlı değildir ve model tribolojik aşınma tepkileri ve girdi parametreleri arasındaki ilişkiyi temsil etmek için yeterlidir.  $R^2$  ve düzeltilmiş  $R^2$ , oluşturulan ampirik modelin uyumsuzluğunu test eden iki kriterdir. Güven düzeyinin seçilmesi ve kabul edilebilir  $R^2$  ve düzeltilmiş  $R^2$  yüzdeleri, modellenecek sürecin niteliğine ve faktörlerin (girdilerin) ve tepkilerin sayısına bağlıdır. Modellenecek olan sürecin çok faktörlü ve çoklu yanıtları varsa, bu durumda, oluşturulan ampirik modellerin uyum yeteneği azaldığı için, bu sürecin modellenmesi kolay olmayacaktır.

Bu çalışmada, anlamlı ve anlamlı olmayan faktörleri bulmak için tüm matematiksel modellere ANOVA testi yapılmıştır. Örnek bir test % 0,5 (KNT+BN) takviyeli Karbon Kumaş Epoksi Kompozite uygulandı ve hesaplanan F değerleri, P değerleri,  $R^2$  ve düzeltilmiş  $R^2$  yüzdeleri MAM ve  $\mu$ s tepkileri için Tablo 5.8 te 5.9 ve Formül 5.8 'de gösterildi. Verilen tablolarda, deneyin girdi değişkenleri C5: (yük), C6: (hız) olarak adlandırılır.

$R^2$  ve ayarlanmış  $R^2$  yüzdeleri, oluşturulan ikinci dereceden polinomların deney sonuçlarına uyum yeteneğini göstermektedir. Örnek ANOVA testinde,  $R^2$ 'nin kabul edilebilir yüzdeleri ve ayarlanmış  $R^2$  değerleri elde edilmiştir. Geriye kalan diğer nano partikül takviyeli karbon kumaş kompozitler için, bu değerler % 85 ile % 90 aralığında hesaplanmıştır.

**Tablo 5.8** % 0,5 (KNT+BN) takviyeli Karbon Kumaş Epoksi Kompozitin MAM ANOVA test

TermCoef	SE	Coef	T	P
Constant	0,647658	0,082988	7,804	0,000
HIZ	-0,333532	0,035824	-9,310	0,000
YÜK	-0,017883	0,005117	-3,495	0,010
HIZ*HIZ	0,034400	0,004196	8,198	0,000
YÜK*YÜK	0,000048	0,000094	0,514	0,623
HIZ*YÜK	0,007000	0,001507	4,646	0,002

**S = 0,01130 R<sup>2</sup> = 96,1% R<sup>2</sup> (adj) = 93,3%**

Analysis of Variance for MAM

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	5	0,021930	0,021930	0,004386	34,36	0,000
Linear	2	0,010138	0,012772	0,006386	50,02	0,000
Square	2	0,009036	0,009036	0,004518	35,39	0,000
Interaction	1	0,002756	0,002756	0,002756	21,59	0,002
ResidualError	7	0,000894	0,000894	0,000128		
Lack-of-Fit	3	0,000712	0,000712	0,000237	5,21	0,072
PureError	4	0,000182	0,000182	0,000046		
Total	12	0,022824				

**Tablo 5.9** % 0,5 (KNT+BN) takviyeli Karbon Kumaş Epoksi Kompozitin  $\mu$ s ANOVA test

TermCoef	SE	Coef	T	P
Constant	1,66069	0,210565	7,887	0,000
HIZ	-0,12638	0,090895	-1,390	0,207
YÜK	-0,07196	0,012982	-5,543	0,001
HIZ*HIZ	-0,00614	0,010647	-0,576	0,582
YÜK*YÜK	0,00101	0,000240	4,220	0,004
HIZ*YÜK	0,00335	0,003822	0,877	0,409

**S = 0,02867 R<sup>2</sup> = 97,7% R<sup>2</sup> (adj) = 96,0%**

Analysis of Variance for  $\mu$ s

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	5	0,241619	0,241619	0,048324	58,80	0,000
Linear	2	0,223536	0,033175	0,016588	20,18	0,001
Square	2	0,017451	0,017451	0,008726	10,62	0,008
Interaction	1	0,000633	0,000633	0,000633	0,77	0,409
ResidualError	7	0,005753	0,005753	0,000822		
Lack-of-Fit	3	0,002398	0,002398	0,000799	0,95	0,496
PureError	4	0,003356	0,003356	0,000839		
Total	12	0,247372				

Matematiksel modellerin yeterliliğini kontrol etmek için analizden önce önem derecesi (güven seviyesi) belirlenmelidir. Bu seviye% 90 olarak belirlenirse, kritik p değeri 0.1 olur. Daha sonra 0.1 olan renge sahip p değerleri, anlamlı olmayan faktörler olarak kabul edilir ve matematiksel denklemlerden çıkarılır. 0.1'den küçük herhangi bir p değeri, önemli veya en önemli faktörler olarak kabul edilir ve dolayısıyla bu faktörler, yanıtları öngörmek için denklemden bırakılır. ANOVA testi % 0,5 (KNT+BN) takviyeli Karbon Kumaş EpoksiKompozite uygulanmış ve Formül 5.8'da MAM ve  $\mu_s$  için düzeltilmiş tepki denklemleri elde edilmiştir.

**Formül 5.8** % 0,5 (KNT+BN) İçeren Karbon Kumaş Epoksi Kompozitin MAM ve  $\mu_s$  değerlerinin Düzeltilmiş Matematiksel Modeli

$$MAM (gram) = 0,647658 + (-0,333532 * v) + (-0,017883 * FN) + (0,034400 * v * v) + (0,007000 * v * FN)$$

$$\mu_s = 1,66069 + (-0,12638 * v) + (-0,07196 * FN) + (-0,00614 * v * v) + (0,00101 * FN * FN) + (0,00335 * v * FN)$$

Önemli (güven) seviyenin belirlenmesi, daha az hata ile doğru modellenmiş matematiksel modeller elde etmek için birincil öneme sahiptir. Tek çıktılı modeller ve kontrollü test ortamları için, bu anlamlı seviye genellikle% 95 olarak seçilmiştir. Ancak, girdi faktörü sayısı fazla ise ve deneyin doğası gereği etkisi düşük olan yada rastgele oluşan bazı işlem parametrelerinin etkileri dikkate alınmazsa, modelin anlamlılık düzeyi değişebilir. Bu çalışmada, iki girdi değişkeni ele alınmış ve ortam ısıda ki değişim, polarite, anlık frekans kirlenmeleri gibi diğer değişkenlerin bazıları modellere dahil edilmemiştir. Böylece, faktörlerin etkilerini olabildiğince dikkate almak için güven seviyesi değişmiştir. Düzeltilmiş matematik modeller daha sonra diğer geri kalan nano partikül takviyeli karbon kumaş kompozitler için üretilmiştir. Aslında, modellerin  $R^2$  ve düzeltilmiş  $R^2$  yüzdeleri, önerilen modellerin tüm malzemeler için MAM ve  $\mu_s$  modelini göstermek için yeterli olduğunu ispat etmiştir.

### 5.3.3 Deneysel Sonuçlar ve Modelden Elde Edilen Sonuçlar

Tepki yüzey metodolojisi (TYM) ile elde ettiğimiz iki girdi için oluşturulan 13 denklem her bir malzeme için uygulandı. Elde edilen veriler Minitab® programında matematik model ve varyans analizi için kullanıldı. Elde edilen deney sonuçları aracılığı ile aşınma çıktı değerleri olan MAM ve  $\mu_s$  değerleri için matematiksel formüller elde edildi. Aşağıda ki Tablo 5.10, 5.11, 5.12, 5.13, 5.14 ve 5.15, e her bir malzeme için ayrı ayrı tablolar oluşturulmuş ve bu tablolara soldan sağa sırasıyla deney numarası, deney sonucu elde edilen MAM değeri, deney sonucu elde edilen  $\mu_s$  değeri, matematiksel modelden elde edilen öngürülebilir (predict) MAM değeri, matematiksel modelden elde edilen öngürülebilir (predict)  $\mu_s$  değeri, deneyden elde edilen MAM değeri ile matematik modelden elde edilen MAM değeri arasında ki % fark(hata), deneyden elde edilen  $\mu_s$  değeri ile matematik modelden elde edilen  $\mu_s$  değeri arasında ki % fark(hata) eklendi.

Genel olarak bakıldığında MAM değerlerinde ki % hatanın,  $\mu_s$  değerlerinde oluşan % hatadan daha fazla olduğu görülmektedir. Deneyler sırasında bütün çalışmalar yüksek hassasiyet içerisinde yapılmıştır. Fakat, hava şartları ve ortam şartları nedeniyle ayrıca da deneyin doğası gereğince oluşabilecek rastgele hatalar olabilir. Bunların neticesinde bu farklar olmuştur. Ayrıca Fs i ölçen yük sensörlerinin ağırlığı ölçen hassas terazide ki yük sensörlerine göre daha iyi olduğunu rahatlıkla söyleyebiliriz.

**Tablo 5.10** Saf Karbon Kumaş Epoksi Kompozitin Deneysel ve Matematiksel Karşılaştırılması

No	Deney MAM	Deney $\mu_s$	Tahmini MAM	Tahmini $\mu_s$	% hata MAM	%hata $\mu_s$
1	0,057	0,3127	0,0526253	0,352932	8,3	11,3
2	0,0838	0,4039	0,0811624	0,369634	3,2	9,2
3	0,0588	0,2554	0,0515966	0,281514	13,9	9,2
4	0,0441	0,2904	0,042692	0,285699	3,2	1,6
5	0,0707	0,4741	0,0631586	0,423566	11,9	11,9
6	0,0566	0,3573	0,0515966	0,331514	9,6	7,7
7	0,0509	0,2428	0,0515966	0,281514	1,3	13,7
8	0,0563	0,2318	0,0515966	0,281514	9,1	17,6
9	0,0567	0,5231	0,0637124	0,517134	11,0	1,1
10	0,0442	0,2691	0,054729	0,325601	19,2	17,3
11	0,0794	0,2385	0,070279	0,266701	12,9	10,5
12	0,0779	0,3143	0,0796586	0,320366	2,2	1,8
13	0,0596	0,2758	0,0515966	0,281514	15,5	2,0

**Tablo 5.11** % 0,5 KNT İçeren Karbon Kumaş Epoksi Kompozitin Deneysel ve Matematiksel Karşılaştırılması

No No	Deney MAM	Deney $\mu$ s	Tahmini MAM	Tahmini $\mu$ s	% hata MAM	%hata $\mu$ s
1	0,0771	0,6517	0,072363	0,688795	6,5	5,4
2	0,1046	0,516	0,10056	0,521577	4,0	1,1
3	0,0569	0,4249	0,057741	0,454855	1,5	6,6
4	0,0407	0,3409	0,03813	0,316629	6,7	7,7
5	0,0333	0,4935	0,03433	0,548162	3,0	10,0
6	0,0549	0,5027	0,057741	0,454855	4,9	10,5
7	0,058	0,3833	0,057741	0,454855	0,4	-5,7
8	0,0653	0,5156	0,057741	0,454855	13,1	13,4
9	0,0355	0,9473	0,034277	0,904627	3,6	4,7
10	0,0292	0,2994	0,029393	0,287411	0,7	4,2
11	0,0396	0,3582	0,036977	0,394461	7,1	9,2
12	0,0746	0,452	0,071263	0,410162	4,7	10,2
13	0,0613	0,4606	0,057741	0,454855	6,2	1,3

**Tablo 5.12** %1 KNT İçeren Karbon Kumaş Epoksi Kompozitin Deneysel ve Matematiksel Karşılaştırılması

No	Deney MAM	Deney $\mu$ s	Tahmini MAM	Tahmini $\mu$ s	% hata MAM	%hata $\mu$ s
1	0,0654	0,3506	0,055701	0,321561	17,4	9,0
2	0,0614	0,3292	0,070383	0,355628	12,8	7,4
3	0,0694	0,3529	0,068786	0,345369	0,9	2,2
4	0,0796	0,2287	0,086768	0,268694	8,3	14,9
5	0,0731	0,5708	0,080101	0,500094	8,7	14,1
6	0,0743	0,332	0,068786	0,345369	8,0	3,9
7	0,0693	0,3986	0,068786	0,345369	0,7	15,4
8	0,0601	0,3251	0,068786	0,345369	12,6	5,9
9	0,0667	0,4658	0,067416	0,488411	1,1	4,6
10	0,1054	0,3432	0,097683	0,411295	7,9	16,6
11	0,1017	0,3351	0,102249	0,327011	0,5	2,5
12	0,0934	0,4099	0,083868	0,391561	11,4	4,7
13	0,0783	0,3292	0,068786	0,345369	13,8	4,7

**Tablo 5.13** %2 KNT İçeren Karbon Kumaş Epoksi Kompozitin Deneysel ve Matematiksel Karşılaştırılması

No	Deney MAM	Deney $\mu$ s	Tahmini MAM	Tahmini $\mu$ s	% hata MAM	%hata $\mu$ s
1	0,0391	0,5728	0,0446414	0,564182	12,4	1,5
2	0,0395	0,4539	0,037046	0,436776	6,6	3,9
3	0,0438	0,4368	0,0419034	0,441221	4,5	1,0
4	0,041	0,3592	0,0467414	0,328515	12,3	9,3
5	0,041	0,6882	0,0422747	0,625682	3,0	10,0
6	0,0373	0,4296	0,0419034	0,441221	11,0	2,6
7	0,0442	0,4427	0,0419034	0,441221	5,5	0,3
8	0,0439	0,4736	0,0419034	0,441221	4,8	7,3
9	0,0523	0,7915	0,0492126	0,817243	6,3	3,1
10	0,0411	0,4076	0,0429126	0,444376	4,2	8,3
11	0,0451	0,3444	0,047546	0,338309	5,1	1,8
12	0,0375	0,3592	0,038508	0,382415	2,6	6,1
13	0,0406	0,3841	0,0419034	0,441221	3,1	12,9

**Tablo 5.14** %1BN İçeren Karbon Kumaş EpoksiKompozitin Deneysel ve Matematiksel Karşılaştırılması

No	Deney MAM	Deney $\mu$ s	Tahmini MAM	Tahmini $\mu$ s	% hata MAM	%hata $\mu$ s
1	0,0986	0,6724	0,086141	0,692999	14,5	3,0
2	0,0905	0,5968	0,100913	0,612351	10,3	2,5
3	0,0434	0,516	0,050103	0,476014	13,4	8,4
4	0,0858	0,3318	0,078541	0,373932	9,2	11,3
5	0,0227	0,4394	0,021208	0,492466	7,0	10,8
6	0,045	0,5341	0,050103	0,476014	10,2	12,2
7	0,0477	0,4635	0,050103	0,476014	4,8	2,6
8	0,0451	0,4556	0,050103	0,476014	10,0	4,3
9	0,0401	0,7856	0,042146	0,749451	4,9	4,8
10	0,0653	0,3973	0,064746	0,350384	0,9	13,4
11	0,0653	0,3685	0,063113	0,373284	3,5	1,3
12	0,0459	0,4557	0,049775	0,435366	7,8	4,7
13	0,0466	0,4736	0,050103	0,476014	7,0	0,5

**Tablo 5.15** % 0,5(KNT+BN) İçeren Karbon Kumaş Epoksi Kompozitin Deneysel ve Matematiksel Karşılaştırılması

No	Deney MAM	Deney $\mu$ s	Tahmini MAM	Tahmini $\mu$ s	% hata MAM	%hata $\mu$ s
1	0,1239	0,655	0,124925	0,680769	0,8	3,8
2	0,1862	0,5816	0,183596	0,577849	1,4	0,6
3	0,0439	0,452	0,048097	0,461272	8,7	2,0
4	0,0625	0,3126	0,064892	0,310569	3,7	0,7
5	0,0158	0,4951	0,014325	0,525236	10,3	5,7
6	0,0486	0,4216	0,048097	0,461272	1,0	8,6
7	0,0491	0,4901	0,048097	0,461272	2,1	6,2
8	0,0455	0,4804	0,048097	0,461272	5,4	4,1
9	0,0533	0,8242	0,054879	0,802182	2,9	2,7
10	0,0565	0,3252	0,067396	0,317082	16,2	2,6
11	0,0443	0,3124	0,051012	0,322549	13,2	3,1
12	0,0746	0,4222	0,070492	0,415802	5,8	1,5
13	0,0498	0,486	0,048097	0,461272	3,5	5,4

## 5.4 Temel Etkiler ve Etkileşim Grafikleri

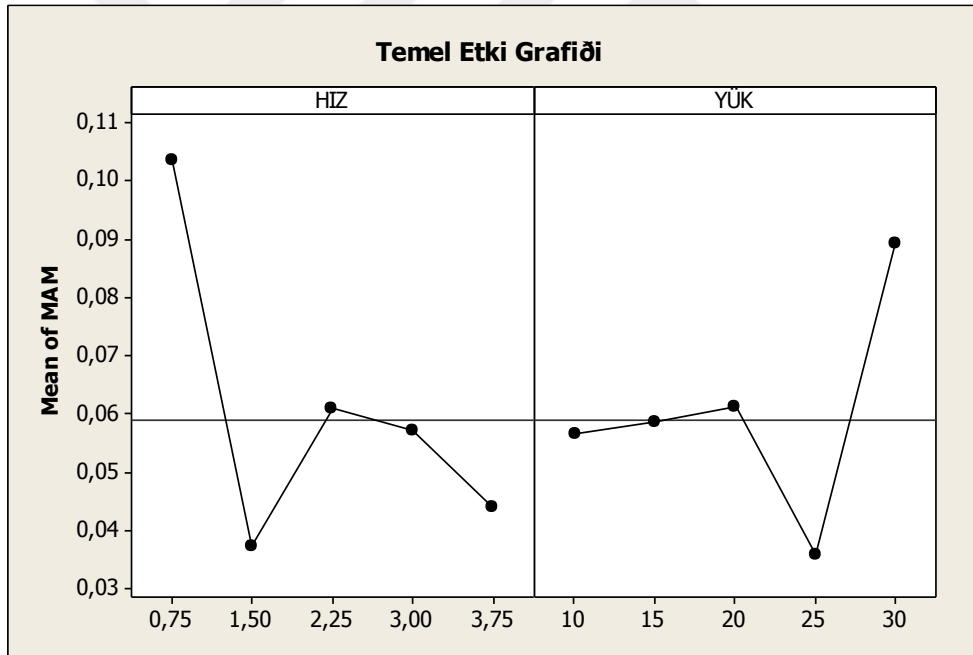
### 5.4.1 Temel Etki Grafikleri

Bir faktörün seviyeleri arasındaki tutarlı bir farklılık sonucu oluşan etkiye temel etki denir. Temel etki Şekilleri, her bir değerin veya her bir değişkenin, eğer değişkenler farklıysa değişkenlerin kombine etkilerinin ortalama sonucunu gösterir. Öte yandan, etkileşim Şekilleri bağımsız olmayan değişkenler arasındaki etkileri göstermektedir.

Bu çalışmada temel etki ve etkileşim Şekilleri girdi faktörleri olan hız(m/s) ve yük (N) ile çıktı parametreleri olan MAM (gr) ve  $\mu$ s arasında olmuştur. Her bir malzeme için ayrı ayrı Şekiller aşağıda verilmiş ve yorumlanmıştır. Temel etki

grafiklerini okurken anlamamız gereken herhangi bir girdi değerinin örnek hız, çıktı değeri örnek MAM üzerinde ki etkisinin hangi değerinde en çok, en az veya ortalama etki ettiğini görürüz.

Şekil 5.17 karbon kumaş epoksi kompozit malzeme üzerinde farklı yükler ve hızlar altında yapılan aşınma deneylerinden elde edilen MAM değerlerinin üzerine hangi yükün ve hangi hızın ne kadar etki ettiğini içermektedir. Hız faktörünün en düşük olduğu seviyede (1.5 m/s) MAM a maksimum etki ettiği görülmektedir. Hızın maksimum olduğu an olan 3.75m/s de ve 1.5 m/s de MAM a hızın etkisinin minimum olduğu görülmektedir. Hızın orta seviye olan 2,25m/s de ve 3m/s de MAM a etkisi ortalama düzeyde olmakta olduğu gözlemlenmektedir. Yükün MAM a etkisi incelendiğinde; maksimum yük olan 30N da MAM a yükün etkisi en yüksek seviyede olmaktadır. Yükün 25N olduğu anda yükün MAM a etkisi minimum olmuştur.

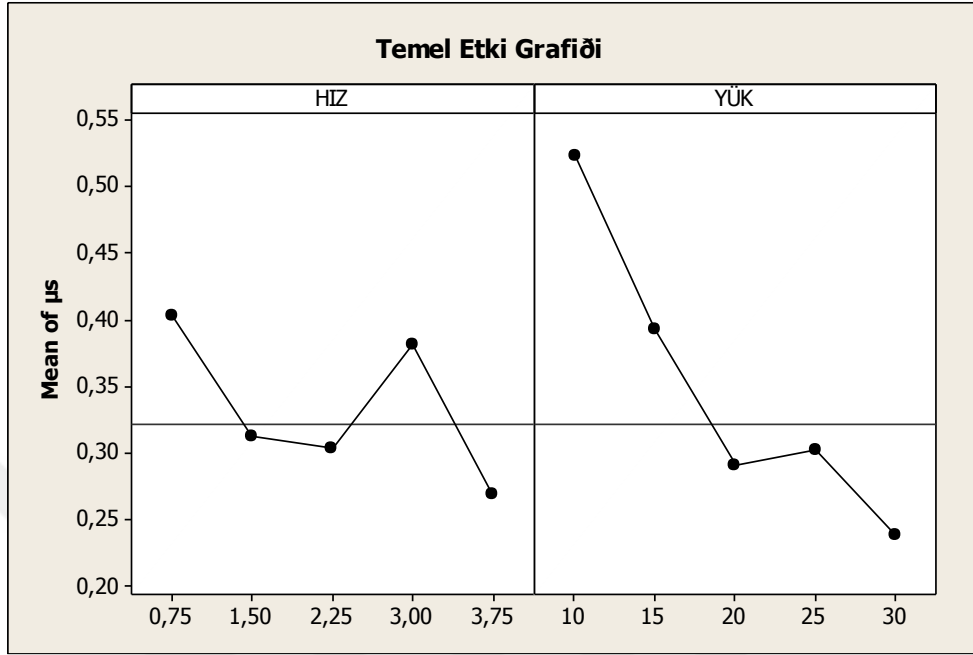


Şekil 5.17 Karbon Kumaş Epoksi Kompozit Temel Etki Grafiği (Hız ve Yük/MAM)

Şekil 5.18 incelediğimizde; karbon kumaş epoksi kompozit malzeme üzerinde yapılan aşınma deneyinde elde edilen diğer önemli bir değer olan  $\mu_s$  değerini hangi girdi parametresinin ne kadar etkilediğini görürüz.  $\mu_s$  değerine en çok etki eden faktörün yük olduğu görülmektedir. Hızın en yüksek olduğu seviye olan 3.75 m/s de, hızın  $\mu_s$  etkisi en düşük seviye de olduğu görülmektedir. Yükün  $\mu_s$  üzerine etkisi tek başına

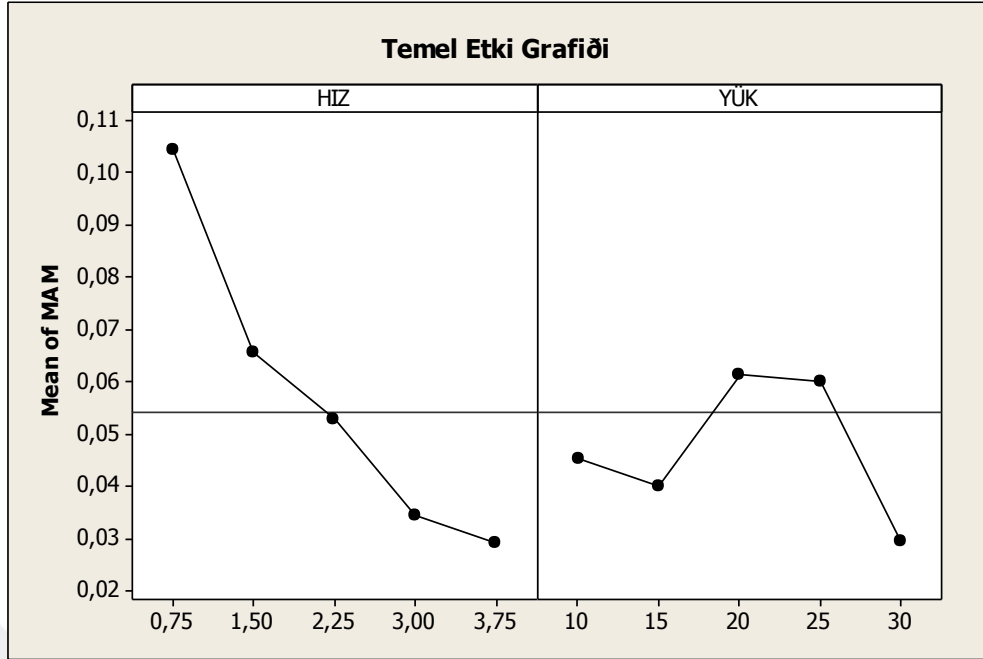


incelendiğinde en düşük yükte (10N)  $\mu_s$  ye etkisi maksimum düzeyde, yükün maksimum olduğu (30N) anda ise  $\mu_s$  ye yükün etkisi minimum düzeyde olmuştur.



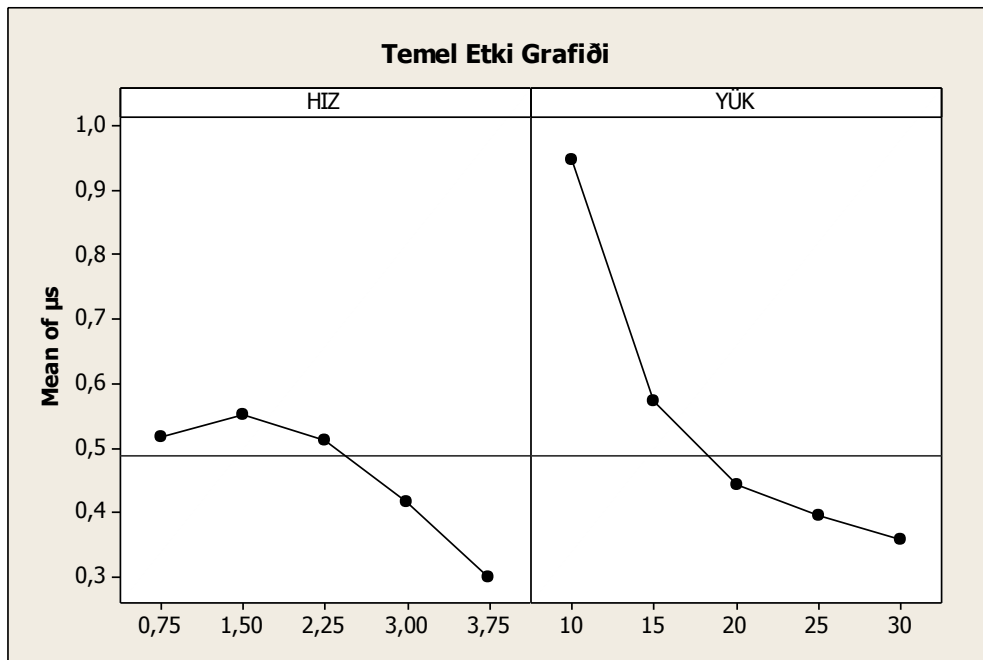
Şekil 5.18 Karbon Kumaş Epoksi Kompozit Temel Etki Grafiği (Hız ve Yük/  $\mu_s$ )

Şekil 5.19 da % 0,5 KNT eklenmiş karbon kumaş epoksi kompozit malzemenin üzerine etki eden farklı değerlerde yük ve hızın, çıktı değerleri MAM a etkisi görülmektedir. Hızın MAM a en fazla etkisi, en düşük hız olan 0.75 m/s de gerçekleşmektedir. En düşük etkisi ise en yüksek hız olan 3.75 m/s de gerçekleşmektedir. Yükün MAM a etkisi en çok 20N da gözlemlenmektedir. En az etkiyi 30 N olan en yüksek yükte göstermektedir.



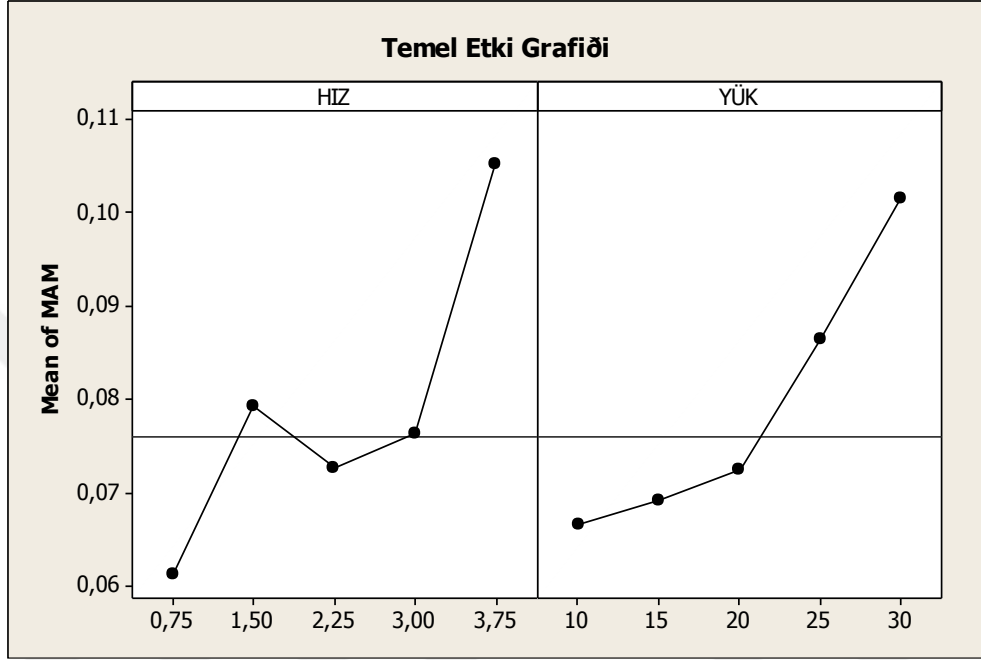
Şekil 5.19 %0,5 KNT eklenmiş Karbon Kumaş Epoksi Kompozit Temel Etki Grafiği (Hız ve Yük/ MAM)

Şekil 5.20 de % 0,5 KNT eklenmiş karbon kumaş epoksi kompozit malzemenin üzerine etki eden farklı değerlerde yük ve hızın, çıktı değerleri  $\mu_s$  ye etkisi görülmektedir. Hızın  $\mu_s$  ye etkisi yüke göre daha düşük olup en az etki gösterdiği nokta hızın en yüksek olduğu 3.75 m/s olduğu andır. Yükün  $\mu_s$  ye etkisinin en yüksek olduğu an yükün en düşük olduğu andır. Yük arttıkça  $\mu_s$  ye etkisi azalmaktadır.



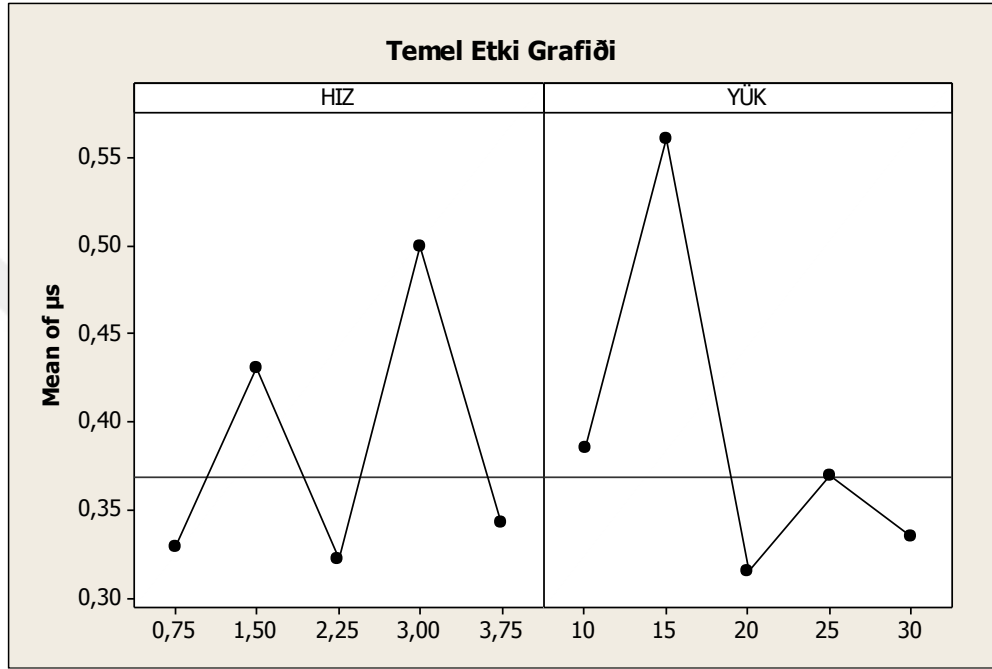
Şekil 5.20 %0,5 KNT Eklenmiş Karbon Kumaş Epoksi Kompozit Temel Etki Grafiği (Hız ve Yük/  $\mu_s$ )

Şekil 5.21 incelendiğinde hızın ve yükün MAM a %1 KNT eklenmiş malzemedeki etkisi saf ve % 0,5 KNT eklenmiş kompozitlere göre farklılık göstermektedir. Düşük hız ve düşük yükte MAM minimum etkilenmekte ve hız yük arttıkça MAM a etkisi artmaktadır.



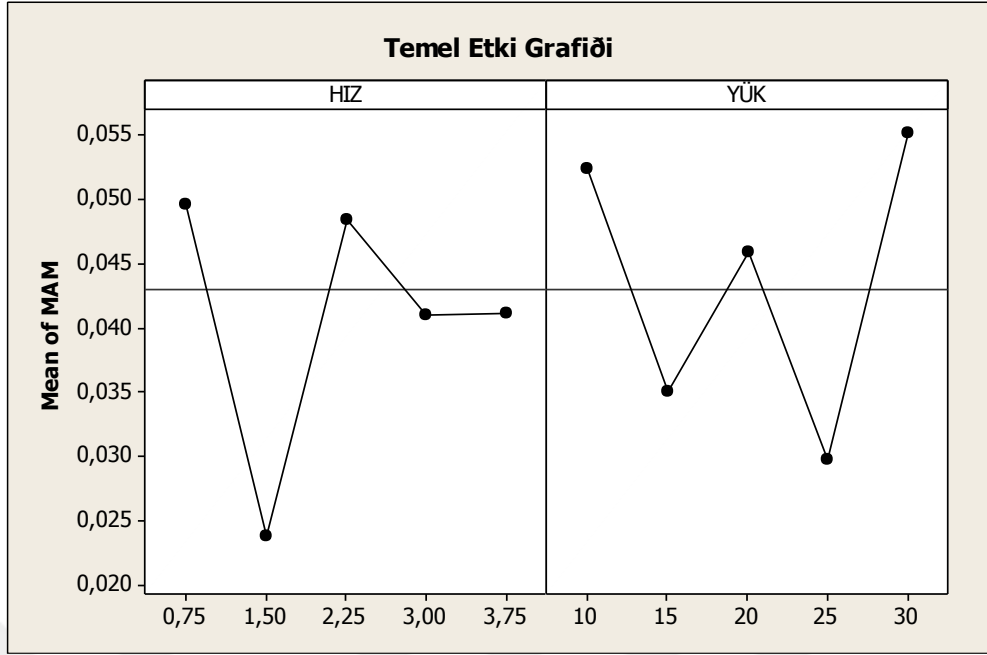
**Şekil 5.21** %1 KNT Eklenmiş Karbon Kumaş Epoksi Kompozit Temel Etki Grafiği (Hız ve Yük/ MAM)

Şekil 5.22 de % 1 KNT eklenmiş karbon kumaş epoksi kompozit malzemenin üzerine etki eden farklı değerlerde yük ve hızın, çıktı değerleri  $\mu_s$  ye etkisi görülmektedir. Hız ve yükün  $\mu_s$  ye etkisi ise lineer bir artış ya da azalış göstermemektedir rastgele bir etkisi vardır. Hızın  $\mu_s$  ye etkisi maksimum olduğu an hızın 3m/s olduğu andır. Yükün  $\mu_s$  ye etkisi ise en fazla olduğu an yükün 15N olduğu deneylerdir.



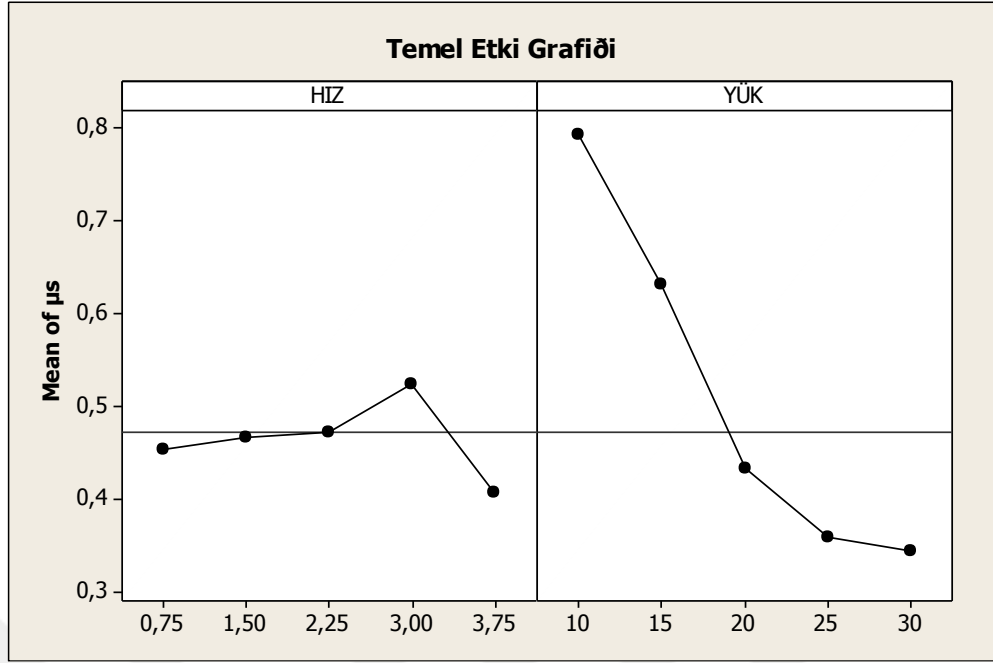
Şekil 5.22 %1 KNT Eklenmiş Karbon Kumaş Epoksi Kompozit Temel Etki Grafiği (Hız ve Yük/  $\mu_s$ )

Şekil 5.23 te %2 KNT eklenmiş karbon kumaş epoksi kompozitlerin farklı hız ve yükler altında MAM a etkileri incelenmiştir. Hızın MAM a etkisinin en yüksek olduğu deney hızın 0.75 m/s olduğu deneydir. Hızın MAM a etkisinin en düşük olduğu deney ise hızın 1.5 m/s olduğu deneydir. Yükün MAM en çok etkisi yükün maksimum olduğu 30N olduğu deneydedir.



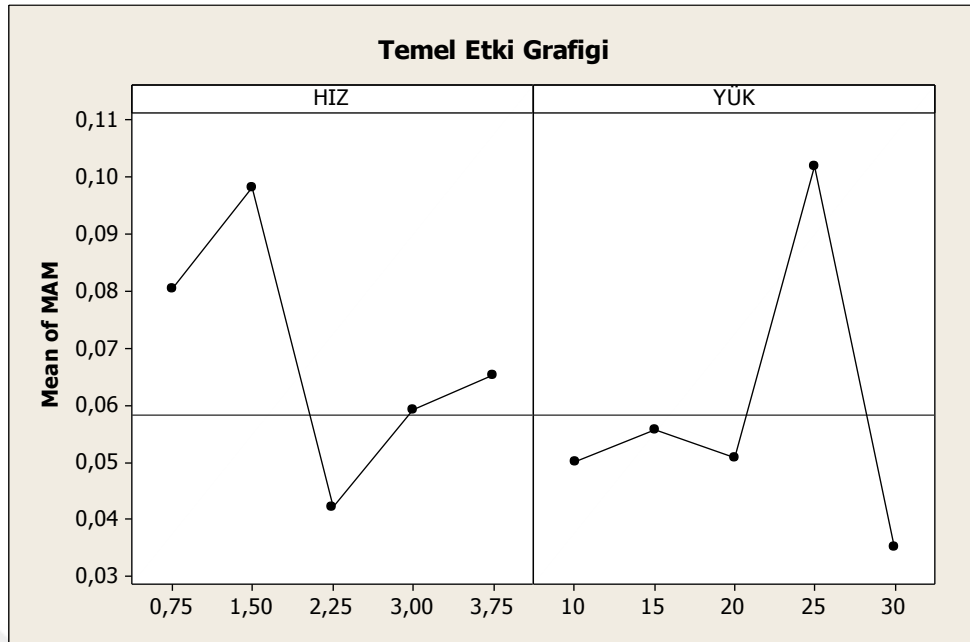
**Şekil 5.23** %2 KNT Eklenmiş Karbon Kumaş Epoksi Kompozit Temel Etki Grafiği (Hız ve Yük/ MAM)

Şekil 5.24 te %2 KNT eklenmiş karbon kumaş epoksi kompozit malzemenin üzerine etki eden farklı değerlerde yük ve hızın, çıktı değerleri  $\mu_s$  ye etkisi görülmektedir. Hızın  $\mu_s$  ye etkisi neredeyse her hızda aynı olmakla birlikte maksimum 3m/s de minimum 3.75 m/s de görünmektedir. Yükün  $\mu_s$  ye etkisi ise yük arttıkça azalmaktadır.



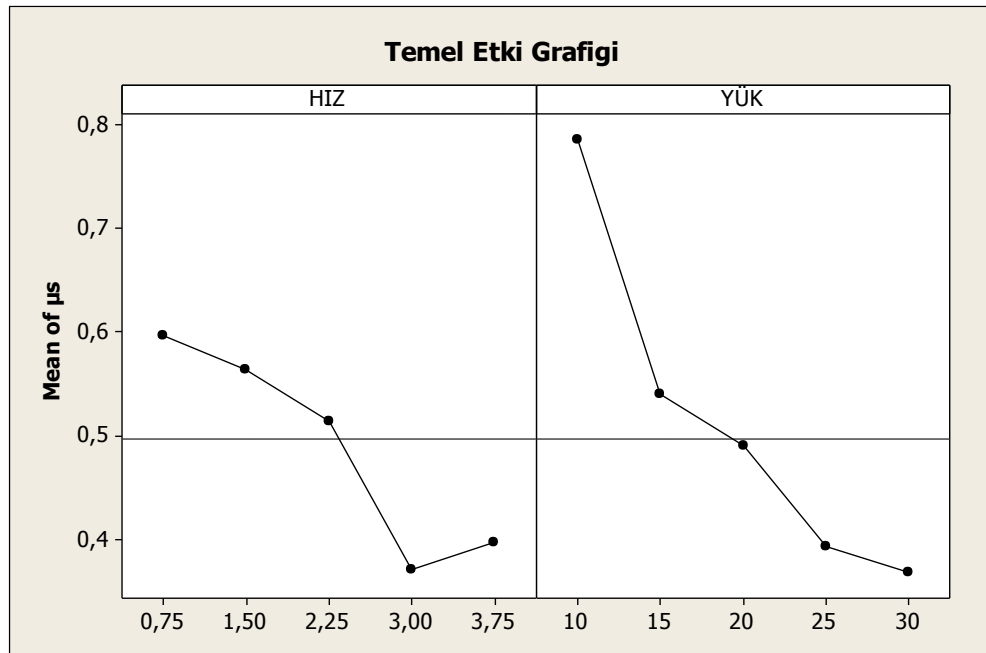
**Şekil 5.24** %2 KNT Eklenmiş Karbon Kumaş Epoksi Kompozit Temel Etki Grafiği (Hız ve YüK/  $\mu_s$ )

Şekil 5.25 te %1 BN eklenmiş karbon kumaş epoksi kompozit malzemenin aşınma deneyi sonucunda elde edilen MAM değerlerine etki eden hız ve yük faktörlerinin etkisi görülmektedir. Hızın MAM a etkisi en çok 1.5m/s hızda olmuştur. 2,25 m/s de ise hızın MAM a etkisi dramatik bir şekilde en düşük seviyesine gelmiştir. YüKün MAM a etkisi yük arttıkça artmış yük 25N iken maksimum etkiye ulaşmıştır. YüK 30N a ulaştığında etki ani bir düşüş göstermiş ve minimum etki göstermiştir



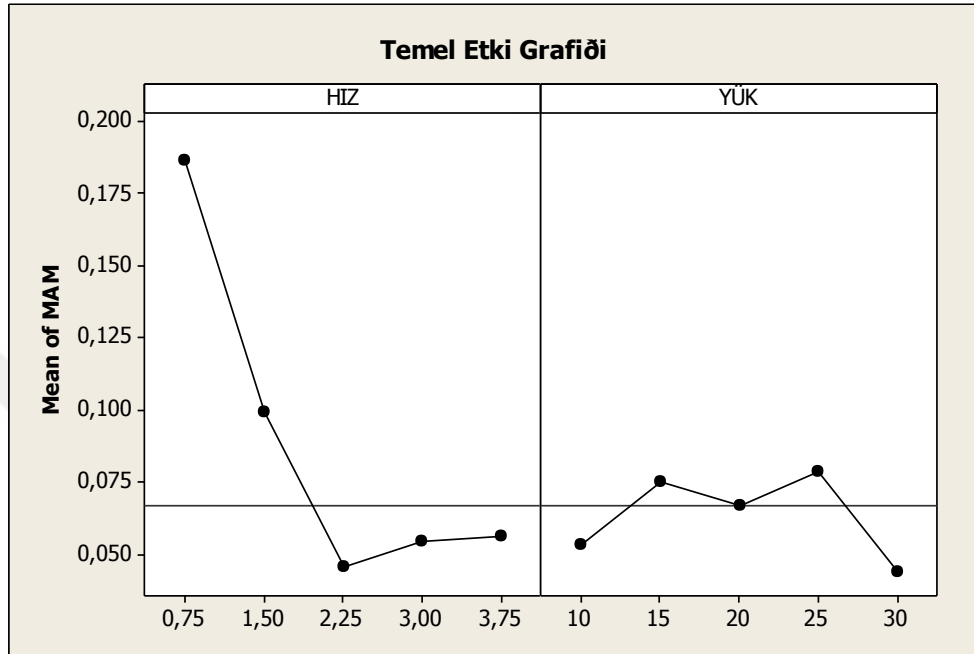
**Şekil 5.25** %1 BN Eklenmiş Karbon Kumaş Epoksi Kompozit Temel Etki Grafiği (Hız ve Yük/ MAM)

Şekil 5.26 da %1 BN eklenmiş karbon kumaş epoksi kompozit malzemenin aşınma deneyi sonucunda elde edilen  $\mu_s$  değerlerine etki eden hız ve yük faktörlerinin etkisi görülmektedir. Hızın ve yükün  $\mu_s$  ye etkisi hız arttıkça düşmüştür. Yüksek hız ve yükte  $\mu_s$  en düşük seviyede olmuştur.



**Şekil 5.26** %1 BN Eklenmiş Karbon Kumaş Epoksi Kompozit Temel Etki Grafiği (Hız ve Yük/  $\mu_s$ )

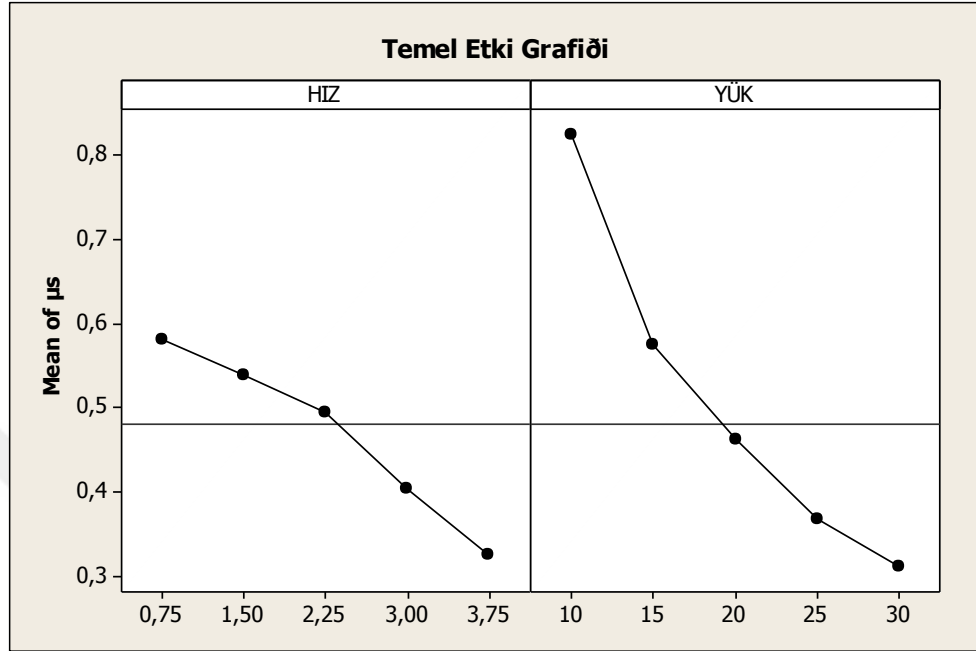
Şekil 5.27 de % 0,5 (KNT+BN) eklenmiş karbon kumaş epoksi kompozit malzemenin aşınma sonucu elde edilen MAM değerine hangi girdi parametrenin ne kadar etki ettiği görülmektedir. MAM hız arttıkça düşmüştür. Yük değişiminin etkisi MAM üzerine çok fazla olmamıştır.



Şekil 5.27 %0,5 (KNT+ BN) Eklenmiş Karbon Kumaş Epoksi Kompozit Temel Etki Grafiği (Hız ve Yük/ MAM)



Şekil 5.28 de % 0,5 (KNT+BN) eklenmiş karbon kumaş epoksi kompozit malzemenin aşınma sonucu elde edilen  $\mu_s$  değerine hangi girdi parametrenin ne kadar etki ettiği görülmektedir.  $\mu_s$  hız ve yükün artışı ile lineer biçimde düşmüştür.

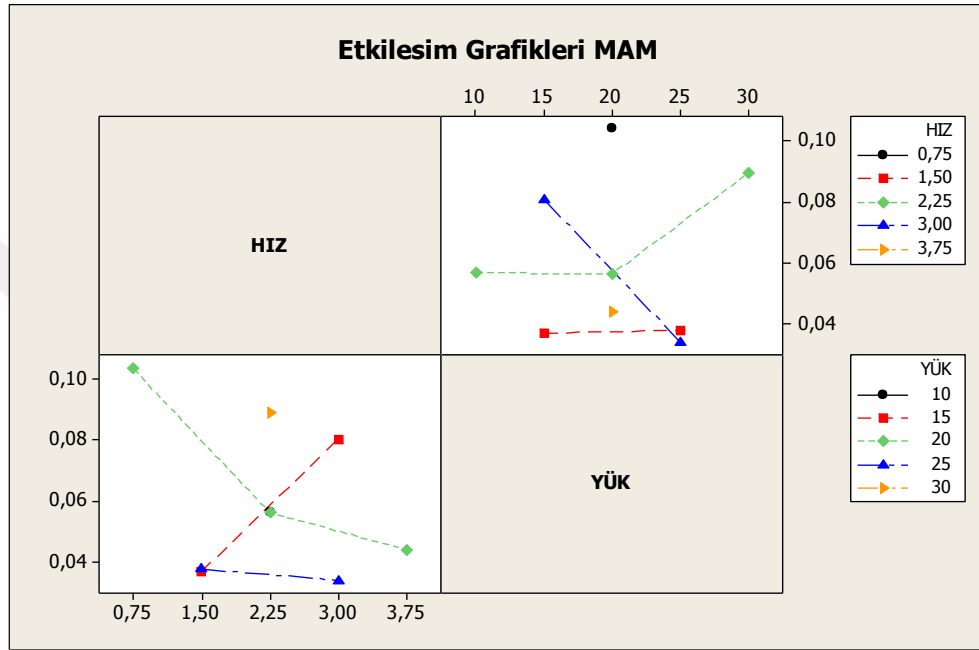


Şekil 5.28 %0,5 (KNT+ BN) Eklenmiş Karbon Kumaş Epoksi Kompozit Temel Etki Grafiği (Hız ve Yük/  $\mu_s$ )

#### 5.4.2 Temel Etkileşim Grafikleri

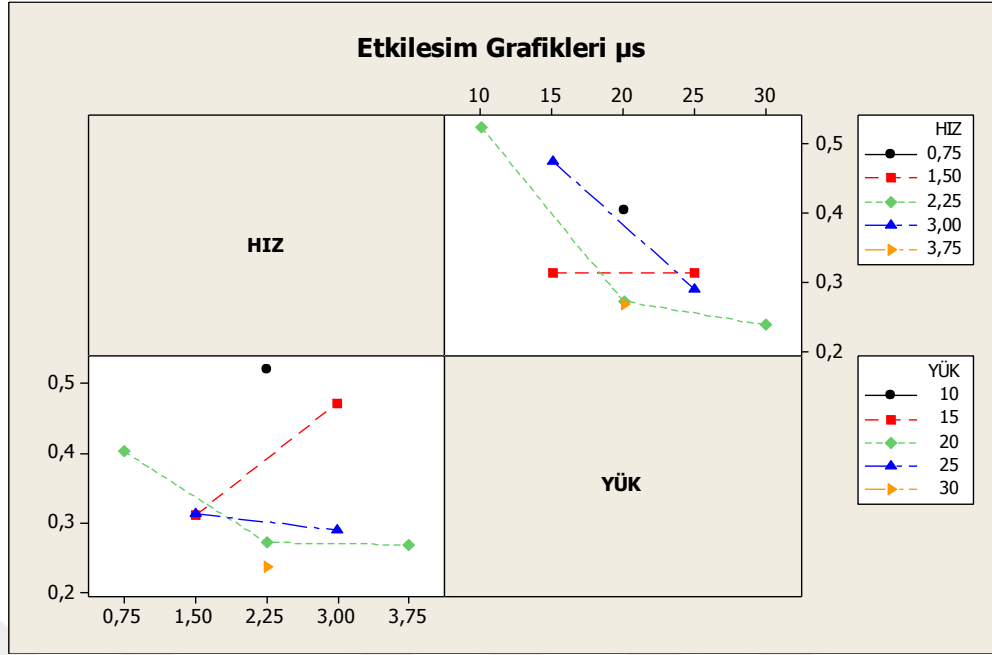
Şekil 5.29 dan 5.40 a kadar olan Şekillerde saf ve farklı miktarlarda nano partikül katılan karbon kompozit malzemelerin aşınma deneyleri sonuçları olarak elde edilen MAM ve  $\mu_s$  ye etki eden hız (m/s) ve yük (N) faktörlerinin birbirleri ile etkileşimini ve bu faktörlerin çıktı değerlerine etkisini göstermektedir. Etki eden faktörlerin sayısı yapılan deney sayısına bağlıdır. Örneğin 3 m/s hızda iki deney olduğu için Şekilde iki noktada gösterilmiştir. Veya uç noktalar olan 30 N ve 0.75 m/s de sadece birer deney olduğu için tek noktada gösterilmiştir.

Şekil 5.29 da karbon kumaş epoksi kompozit malzeme incelenmiştir. MAM için Hız/Yük grafiğini incelediğimizde; Hızın 0.75 m/s olduğu yükün 20 N olduğu deneyde MAM maksimum olmuştur. Hızın 3m/s yükün 25 m/s olduğu anda MAM minimum olmuştur. MAM için Yük/Hız grafiğini incelediğimizde; yükün 30 N hızın 2,25 m/s olduğu anda MAM maksimum olmuştur. Yükün 25 N hızın 3m/s olduğu anda Hız/Yük grafiğinde olduğu gibi MAM minimum olmuştur.



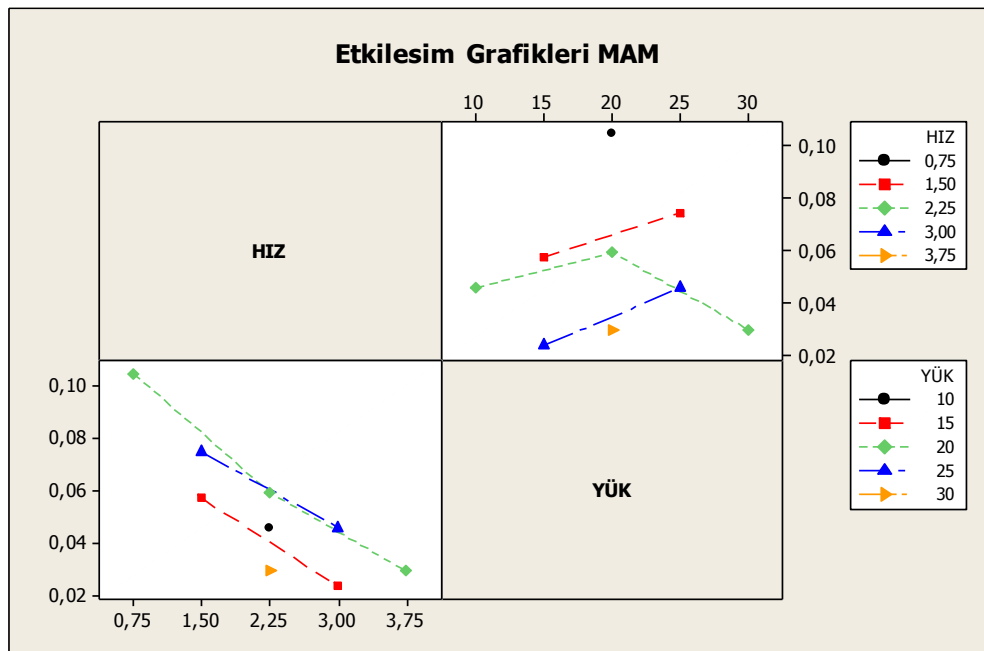
Şekil 5.29 Karbon Kumaş Epoksi Kompozit Etkileşim Grafiği (Hız ve Yük/MAM)

Şekil 5.30 da karbon kumaş epoksi kompozit malzeme incelenmiştir.  $\mu_s$  için Hız/Yük grafiğini incelediğimizde;  $\mu_s$  için Hız/Yük grafiğini incelediğimizde; hızın 2,25 m/s ve yükün 10 N olduğu anda  $\mu_s$  maksimum olmaktadır. Hızın 2,25m/s ve yükün 30 N olduğu anda  $\mu_s$  değeri minimum olmaktadır.  $\mu_s$  için Yük/Hız grafiğini incelediğimizde; hız yük grafiği ile aynı sonuçları elde ederiz.



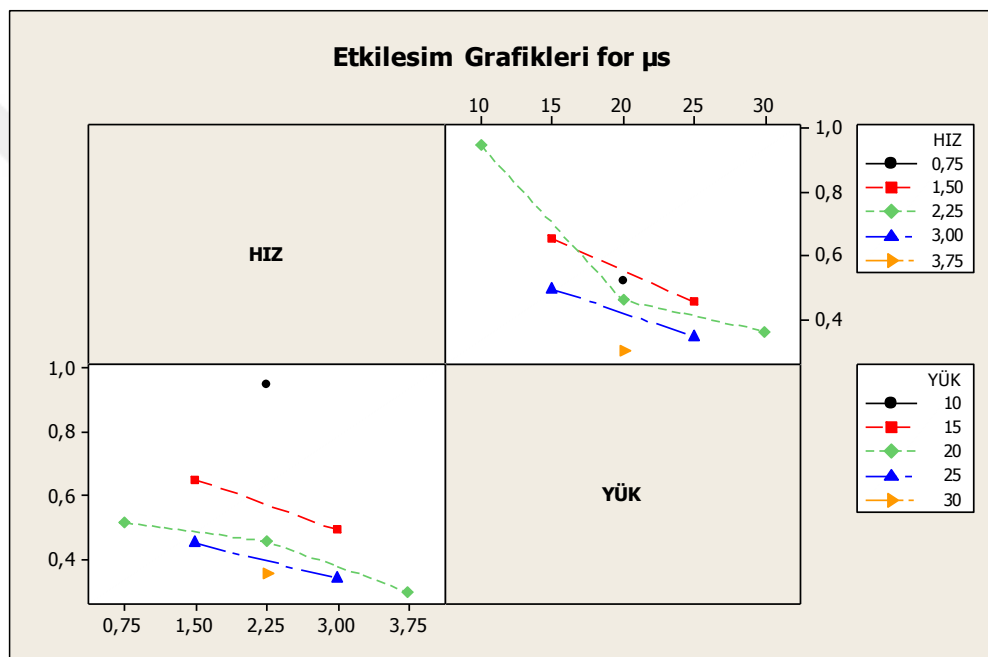
**Şekil 5.30** Karbon Kumaş Epoksi Kompozit Etkileşim Grafiği (Hız ve Yük/  $\mu s$ )

Şekil 5.31 de % 0,5 KNT takviyeli karbon kumaş epoksi kompozit malzeme incelenmiştir. MAM için Hız/Yük grafiği incelendiğinde; hızın 0,75 m/s olduğu ve yükün 20 N olduğu anda MAM ın maksimum, hızın 3 m/s ve yükün 15 N olduğu anda MAM ın minimum olduğu görülmektedir. MAM için Yük/Hız grafiği incelendiğinde; yükün 20 N hızın 0,75 m/s olduğu anda MAM ın maksimum, yükün 15 N hızın 3 m/s olduğu anda MAM ın minimum olduğu görülmektedir.



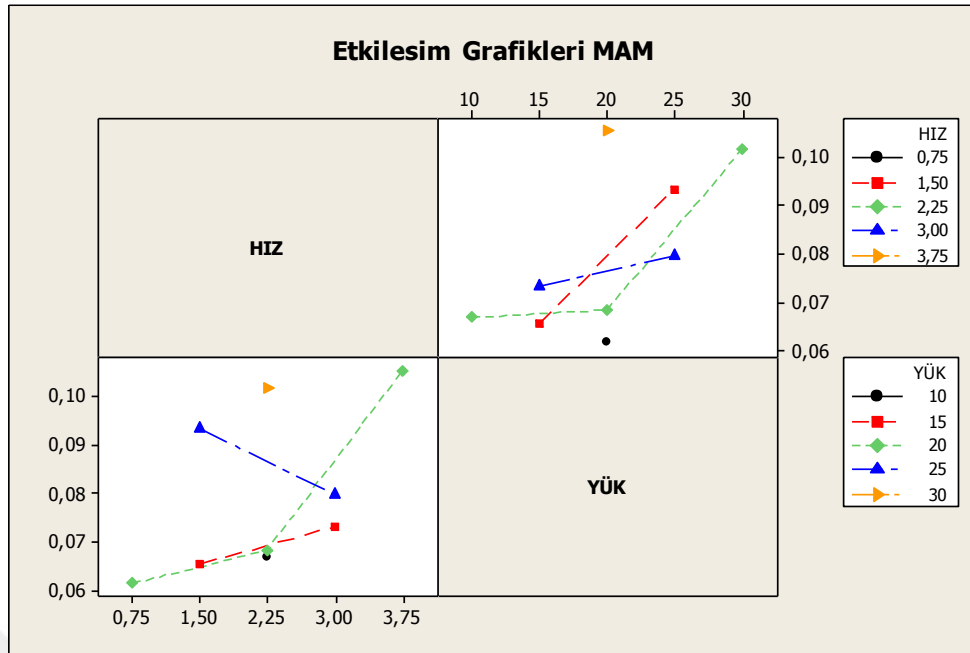
**Şekil 5.31** %0,5 KNT Eklenmiş Karbon Kumaş Epoksi Kompozit Etkileşim Grafiği (Hız ve Yük/MAM)

Şekil 5.32 de % 0,5 KNT takviyeli karbon kumaş epoksi kompozit malzemelerde  $\mu_s$  ye etki eden girdi parametreleri incelenmiştir.  $\mu_s$  için Hız/yük grafiği incelendiğinde; hızın 2,25 m/s yükün 10 N olduğunda  $\mu_s$  nin maksimum, hızın 3.75 m/s yükün 20 N olduğu zaman  $\mu_s$  nin minimum olduğu görülmektedir.  $\mu_s$  için Yük/hız grafiği incelendiğinde, yükün 10 N hızın 2,25 m/s olduğu anda  $\mu_s$  değeri maksimum, yükün 20 N hızın 3.75 m/s olduğu anda  $\mu_s$  minimum olduğu görülmektedir.



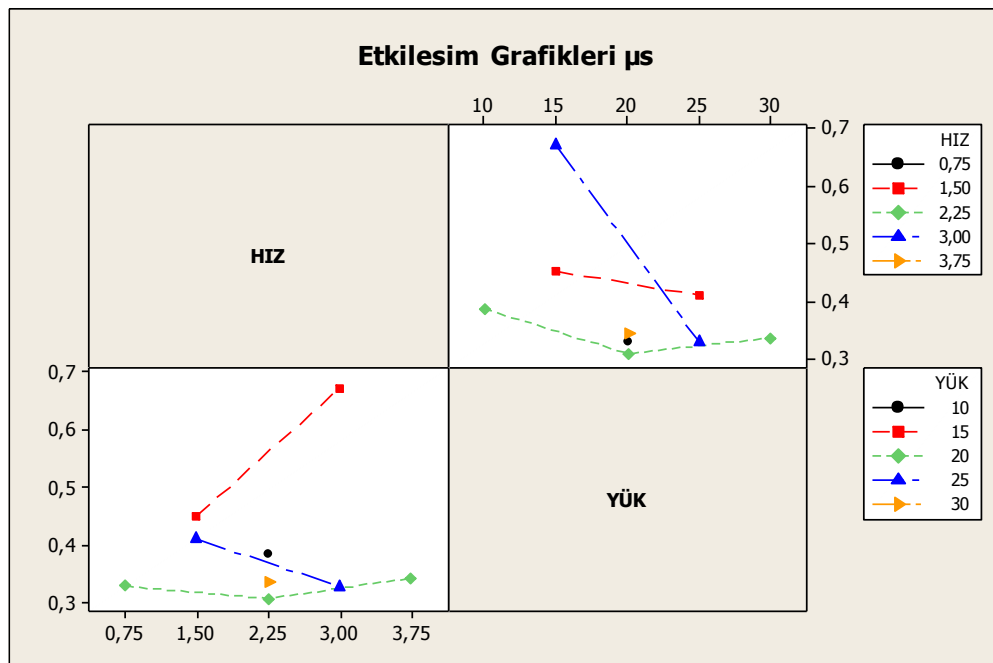
**Şekil 5.32** %0,5 KNT Eklenmiş Karbon Kumaş Epoksi Kompozit Etkileşim Grafiği (Hız ve Yük/  $\mu_s$ )

Şekil 5.33 te % 1 KNT takviyeli karbon kumaş epoksi kompozit malzeme incelenmiştir. MAM için Hız/Yük grafiği incelendiğinde; hızın 3.75 m/s yükün 20 N olduğu anda maksimum, hızın 0.75 m/s yükün 20 N olduğu anda MAM minimum olduğu görülmektedir. MAM için Yük/Hız grafiği incelendiğinde; hız yük grafiğinin aynı sonucunu vermektedir.



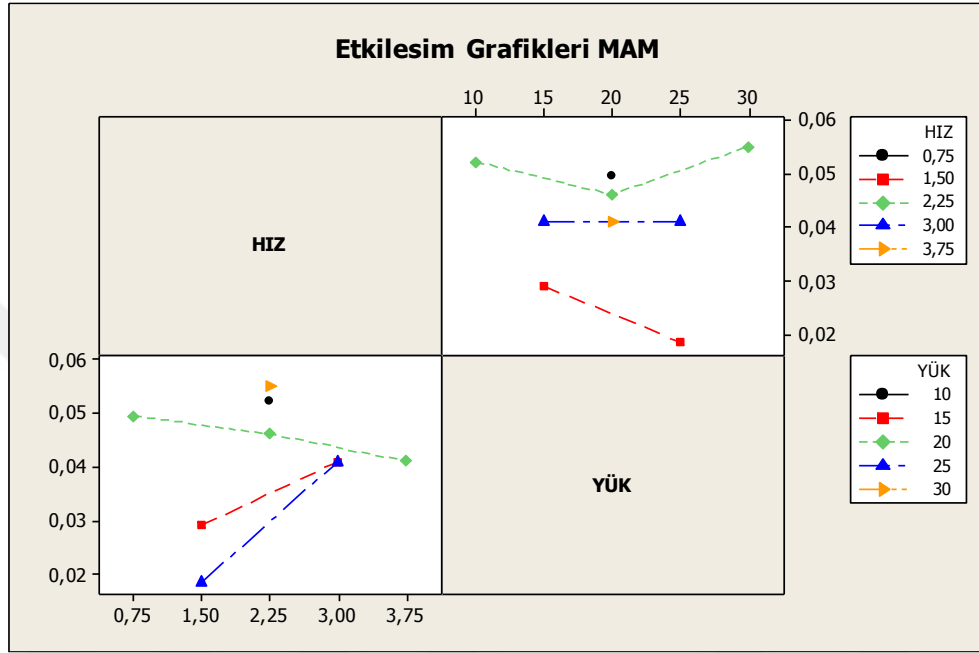
**Şekil 5.33** % 1 KNT Eklenmiş Karbon Kumaş Epoksi Kompozit Etkileşim Grafiği (Hız ve Yük/MAM)

Şekil 5.34 te % 1 KNT takviyeli karbon kumaş epoksi kompozit malzeme incelenmiştir  $\mu_s$  için Hız/Yük grafiği incelendiğinde; hızın 3 m/s yükün 15 N olduğu deneyde  $\mu_s$  maksimum, hızın 2,25 m/s yükün 20 N olduğu deneyde  $\mu_s$  minimum değerde olduğu görülmüştür.  $\mu_s$  için Yük/Hız grafiği incelendiğinde Hız/yük grafiğinin aynı sonuçlarını vermektedir.



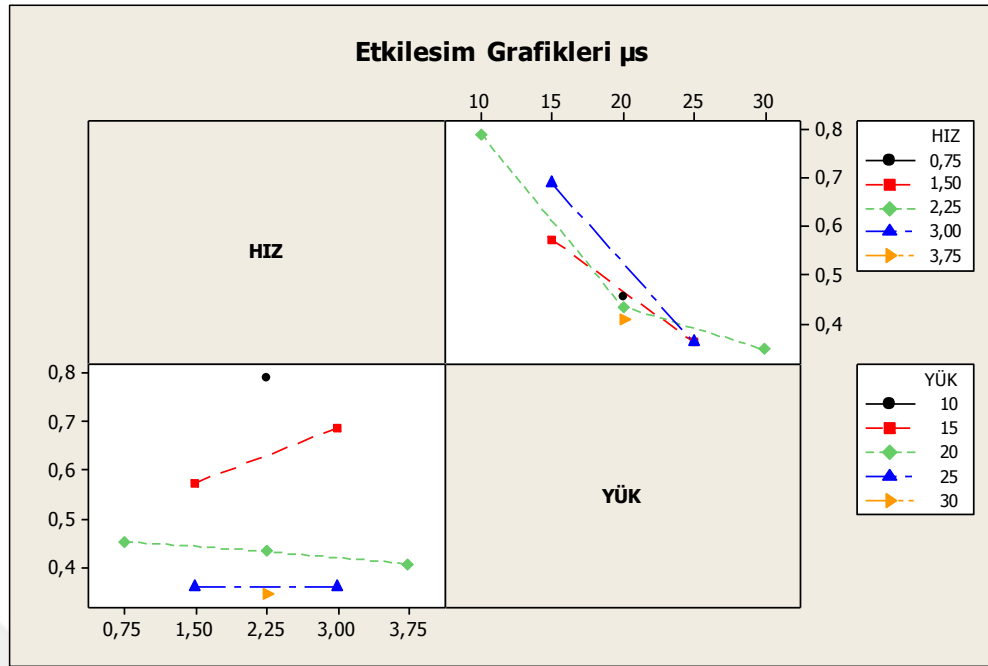
**Şekil 5.34** % 1 KNT Eklenmiş Karbon Kumaş Epoksi Kompozit Etkileşim Grafiği (Hız ve Yük/  $\mu_s$ )

Şekil 5.35 te %2 KNT takviyeli karbonkumaş epoksi kompozit malzeme incelenmiştir. MAM için Hız/Yük grafiği incelendiğinde; hızın 2,25 m/s yükün 30N olduğu anda maksimum, hızın 1.5 m/s yükün 25 N olduğu anda MAM minimum değerde olduğu görülmektedir. MAM için Yük/Hız grafiği incelendiğinde; Hız/Yük grafiğinden elde edilen sonuçlarla birebir aynı sonuçlar elde edilmektedir



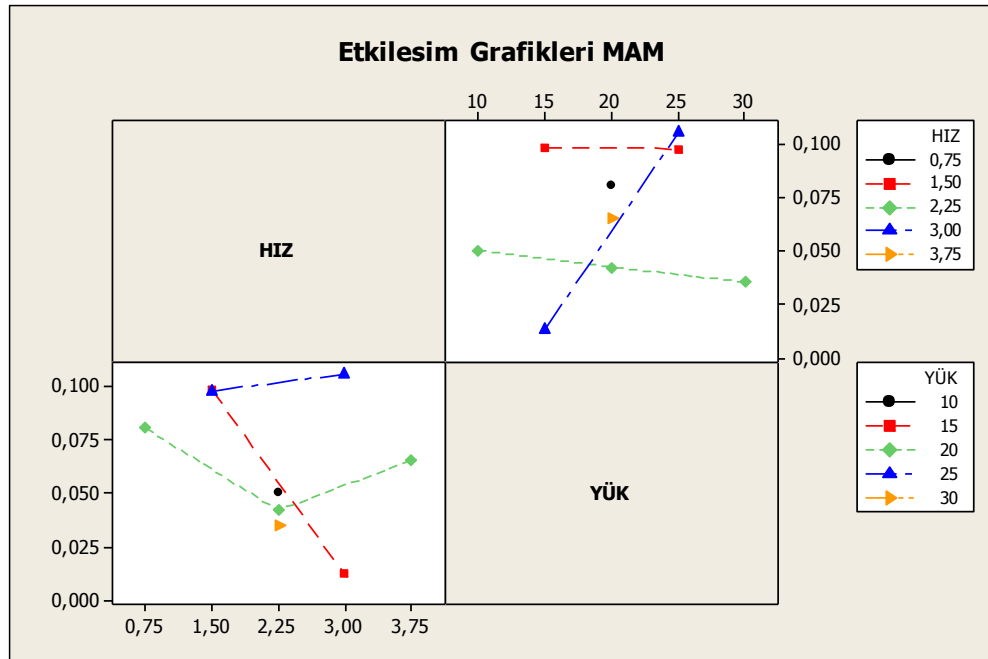
Şekil 5.35 %2 KNT Eklenmiş Karbon Kumaş Epoksi Kompozit Etkileşim Grafiği (Hız ve Yük/MAM)

Şekil 5.36 te %2 KNT takviyeli karbonkumaş epoksi kompozit malzeme incelenmiştir.  $\mu s$  için Hız/Yük grafiği incelendiğinde 2,25 m/s hız 10 N yük altında  $\mu s$  maksimum, 2,25 m/s hız 30 N yük altında  $\mu s$  minimum olduğu görülmektedir.  $\mu s$  için Yük/Hız grafiği incelendiğinde; Hız/Yük grafiğinin aynı sonuçları elde edilmektedir.



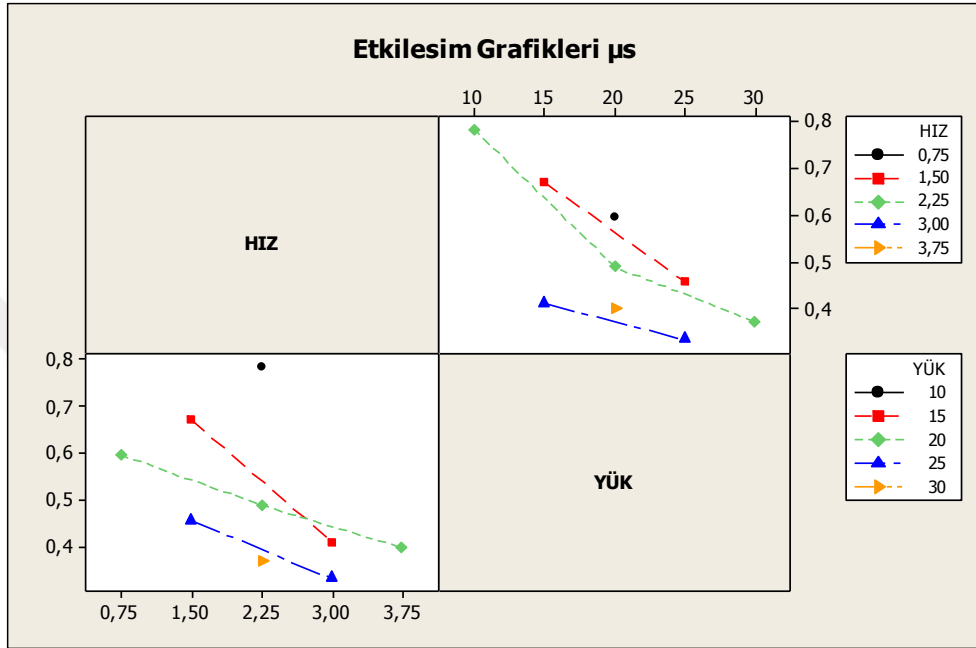
Şekil 5.36 %2 KNT Eklenmiş Karbon Kumaş Epoksi Kompozit Etkileşim Grafiği (Hız ve Yük/  $\mu s$ )

Şekil 5.37 de %1 BN takviyeli karbon kumaş epoksi kompozit malzeme incelenmiştir. MAM için Hız/Yük grafiği incelendiğinde; hızın 3 m/s yükün 25 N olduğu anda MAM maksimum, hızın 3 m/s yükün 15 N olduğu anda MAM minimum olduğu görülmektedir.



Şekil 5.37 %1 BN Eklenmiş Karbon Kumaş Epoksi Kompozit Etkileşim Grafiği (Hız ve Yük/MAM)

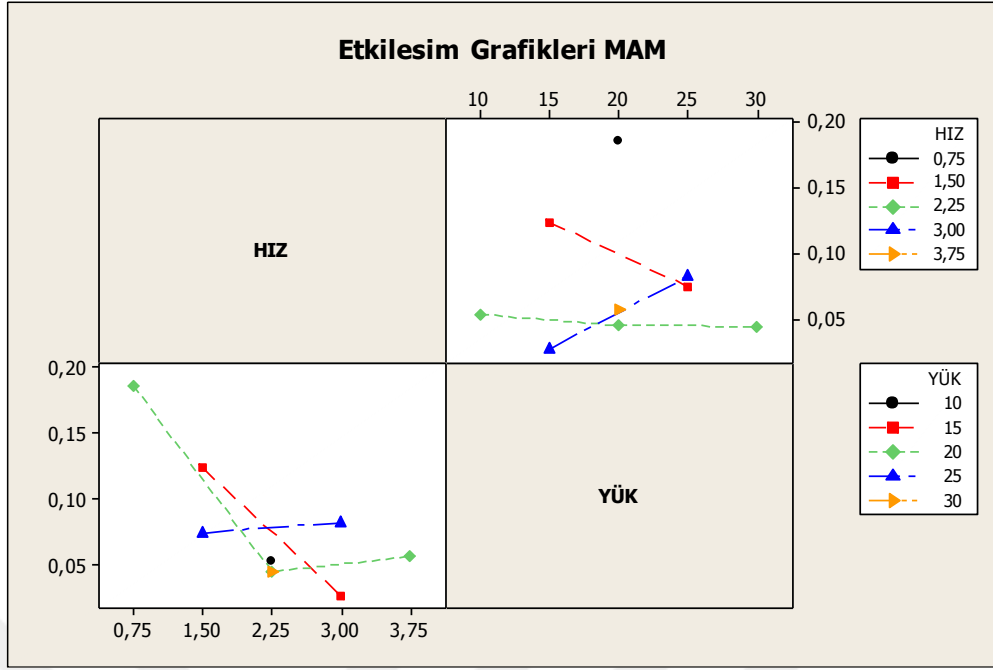
Şekil 5.38 de %1 BN takviyeli karbon kumaş epoksi kompozit malzeme incelenmiştir  $\mu s$  için Hız/Yük grafiği incelendiğinde; hızın 2,25 m/s yükün 10 N olduğu deneyde  $\mu s$  maksimum, hızın 3 m/s yükün 25 N olduğu deneyde  $\mu s$  minimum olduğu görülmüştür. Yük/Hız grafiği incelendiğinde Hız/Yük grafiği sonuçlarına eşit sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 5.38 %1 BN Eklenmiş Karbon Kumaş Epoksi Kompozit Etkileşim Grafiği (Hız ve Yük/  $\mu s$ )

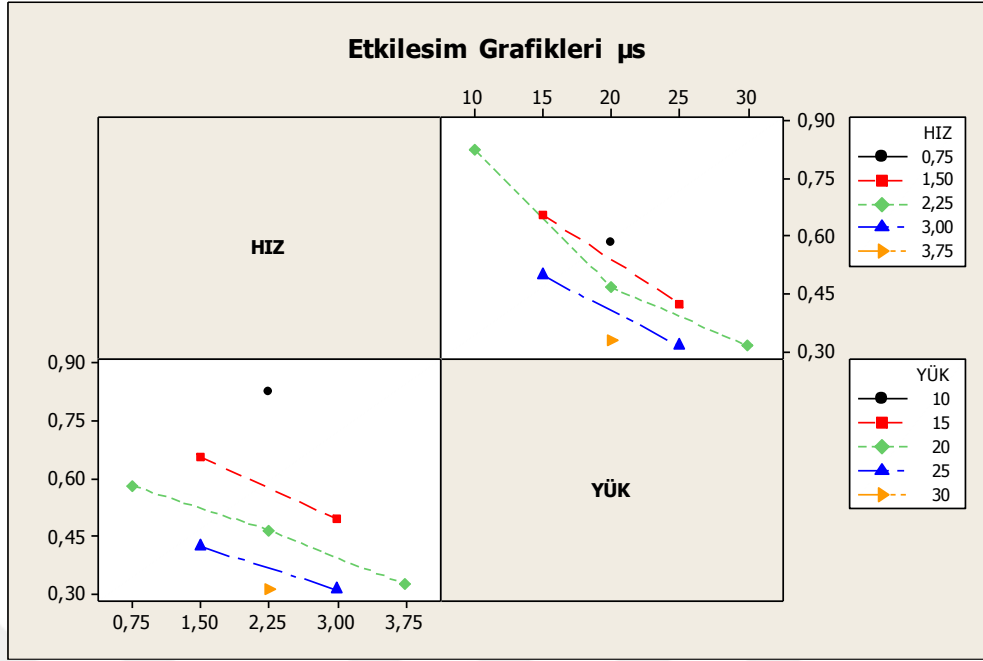
Şekil 5.39 da % 0,5 (KNT+BN) takviyeli karbon kumaş epoksi kompozit malzeme incelenmiştir. MAM için Hız/Yük grafiği incelendiğinde; hızın 0.75m/s yükün 20N olduğu deneyde MAM maksimum, hızın 3 m/s yükün 15N olduğu yerde MAM minimum olmuştur. MAM için Yük/Hız grafiği incelendiğinde; Hız/Yük grafiği sonuçları elde edilmiştir





**Şekil 5.39** %0,5 (KNT+ BN) Eklenmiş Karbon Kumaş Epoksi Kompozit Etkileşim Grafiği (Hız ve Yük/MAM)

Şekil 5.40 ta % 0,5 (KNT+BN) takviyeli karbon kumaş epoksi kompozit malzeme incelenmiştir..  $\mu_s$  için Hız/Yük grafiği incelendiğinde; hızın 2,25m/s yükün 10 N olduğu anda  $\mu_s$  maksimum, hızın 3m/s yükün 25 N olduğu anda  $\mu_s$  minimum değerlerde elde edilmiştir. Yük/Hız grafiği incelendiğinde, Hız/Yük grafiğinin sonuçları ile aynı sonuçlar elde edilmiştir



**Şekil 5.40** %0,5 (KNT+BN) Eklenmiş Karbon Kumaş Epoksi Kompozit Etkileşim Grafiği (Hız ve Yük/ $\mu s$ )

Tablo 5.16, daha önce yukarıda verilen Şekil 5.29 dan 5.40 a kadar olan temel etkileşim grafikleri için özetlenmiş geniş bir bakış açısı sunmak için oluşturulmuştur. Tablo 5.16 incelendiğinde; MAM için Saf karbon kumaş epoksi kompozit ve % 0,5 KNT içeren kompozitlerde minimum hız değeri olan 0,75 m/s de maksimum MAM değerine sebep olmaktadır. Geriye kalan diğer fazla miktarda nano malzeme içeren karbon kompozitlerde orta ve yüksek hızlar kompozitlerde maksimum MAM na sebep olmaktadır. Orta ve ağır yükler maksimum MAM a neden olduğu gözlemlenmektedir. %1 KNT ve %2 KNT takviyeli karbon kompozitler hariç yüksek hız da ve orta yükte kompozitin çalışması minimum MAM olmasını sağlamaktadır.  $\mu s$  ye baktığımızda orta hızlar ve düşük yükler altında çalışan kompozitler genel olarak maksimum  $\mu s$  ye neden olmaktadır. Orta ve yüksek hızlar, orta ve yüksek yüklerle kompozitlere uygulanınca minimum  $\mu s$  sağlanmaktadır. 0,5 KNT ve (0,5 KNT+BN) için MAM ve  $\mu s$  değerlerine baktığımızda etkilendikleri hızlar maksimum ve minimum noktalarında aynı olduğunu görmekteyiz ayrıca %1 KNT ve %1 BN takviyeli karbon kompozitlerin maksimum ve minimum değerlerine etki eden faktörlerin değerlerinin de benzer değerlerde olduğunu göstermektedir. Bu veriler ışığında deney sistemini genele olarak incelediğimizde eşit miktarlarda KNT ve BN nin karbon kompozitin maksimum ve minimum MAM ve  $\mu s$  değerlerine etkisinin paralel olduğunu söyleyebiliriz.

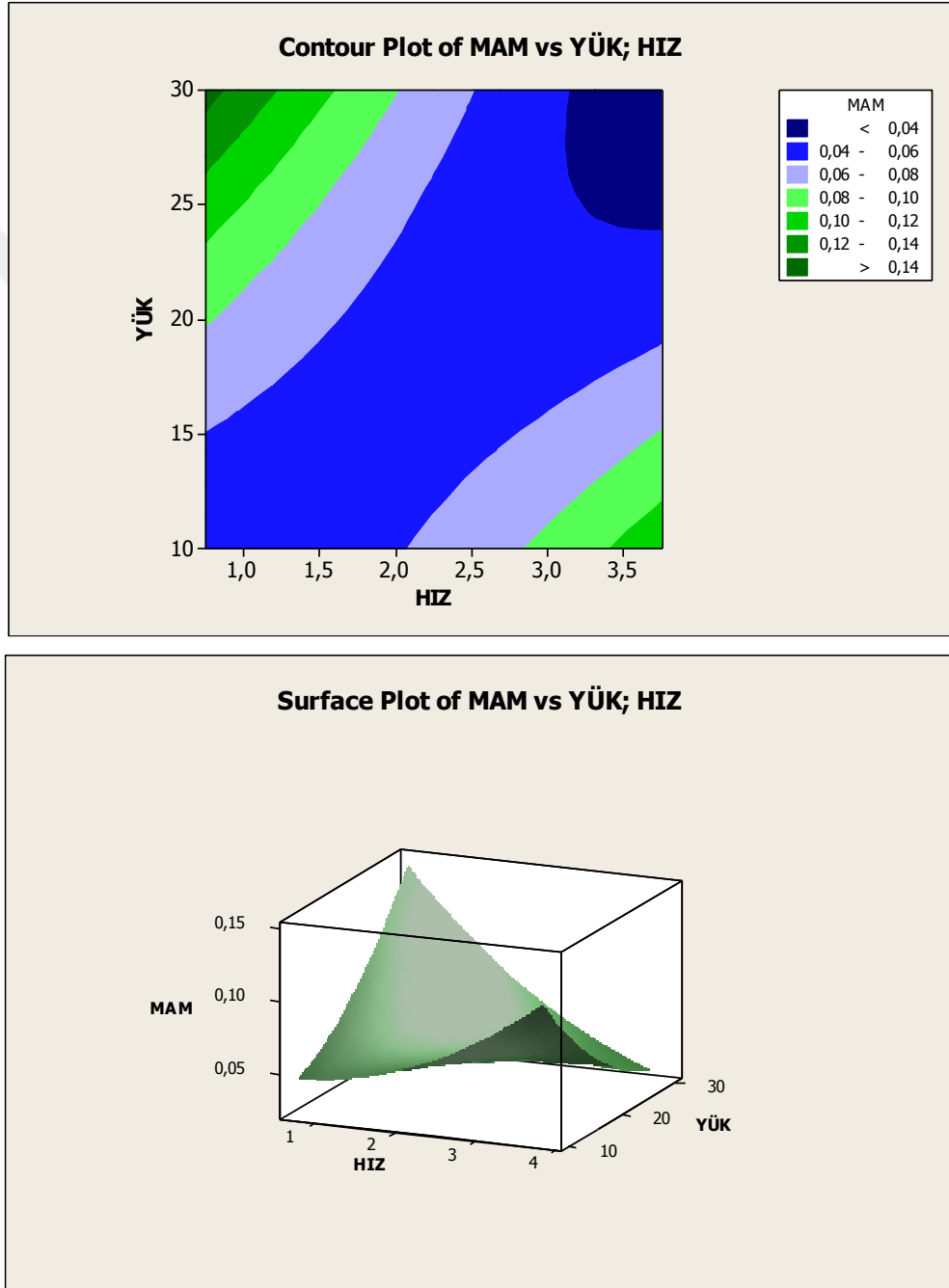
**Tablo 5.16** Temel Etkileşim Grafikleri Genel Sonuç Tablosu

<b>MAM İçin</b> <b>Numune</b>	<b>Maksimum</b>		<b>Minimum</b>	
	<i>HIZ(m/s)</i>	<i>YÜK (N)</i>	<i>HIZ(m/s)</i>	<i>YÜK (N)</i>
<b>SAF</b>	0,75	10	3	25
<b>% 0,5KNT</b>	0,75	20	3	15
<b>%1KNT</b>	3,75	20	0,75	20
<b>%2KNT</b>	2,25	30	1,5	25
<b>%1BN</b>	3	25	3	15
<b>% 0,5(KNT+BN)</b>	0,75	20	3	15

<b><math>\mu_s</math> İçin</b> <b>Numune</b>	<b>Maksimum</b>		<b>Minimum</b>	
	<i>HIZ(m/s)</i>	<i>YÜK (N)</i>	<i>HIZ(m/s)</i>	<i>YÜK (N)</i>
<b>SAF</b>	2,25	10	2,25	30
<b>% 0,5KNT</b>	2,25	10	3,75	20
<b>%1KNT</b>	3	15	2,25	20
<b>%2KNT</b>	2,25	10	2,25	30
<b>%1BN</b>	2,25	10	3	25
<b>% 0,5(KNT+BN)</b>	2,25	10	3	30

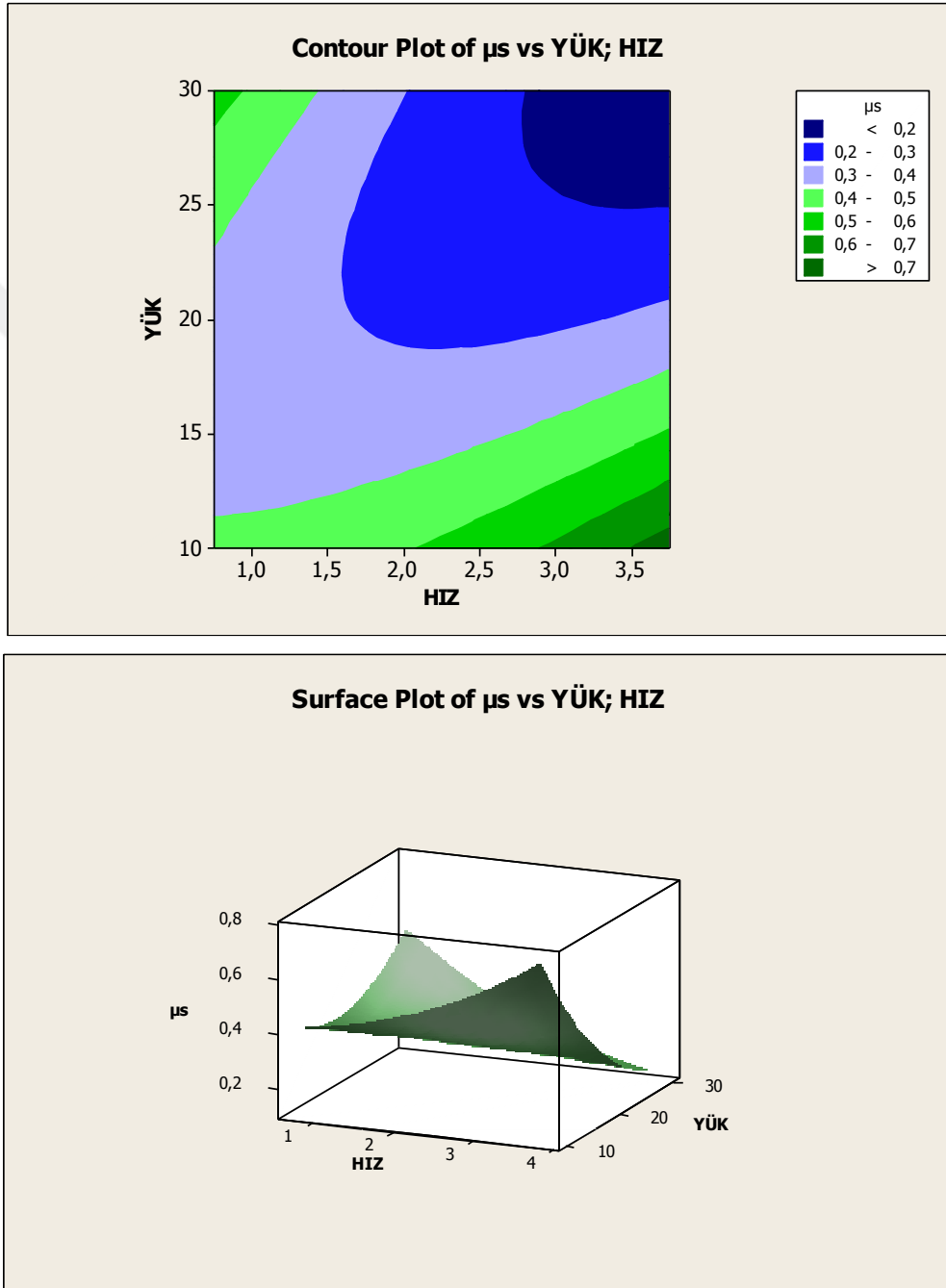
Temel etkileşim grafikleri Şekil 5.29 dan 5.40 a kadar tek boyutlu olarak gösterildi. Varyans analizi sonucunda elde ettiğimiz etkileşim değerlerini Minitab® programı 2B ve 3B olacak şekilde alansal olarak gösterebilir. Bu tür alansal bir grafik gösterimi, grafiğin incelenmesinde ve ara değerlerin tespitinde kolaylık sağlar. Şekil 5.41 den şekil 5.52 ye renklendirilerek gösterilen grafikler her bir malzeme için uygulanan girdi değerlerinin çıktı değerlerine kombine etkisini göstermektedir. 2B grafiklerde renk mavide koyulaştıkça MAM ve  $\mu_s$  değerleri düşmekte, renk yeşilde koyulaştıkça MAM ve  $\mu_s$  değerleri düşmektedir. 3B grafiklerde oluşan şekillerden basitçe girdi parametrelerinin (Hız ve Yük), çıktı parametrelerine (MAM ve  $\mu_s$ ) etkisi kolayca görülmektedir.

Şekil 5.41 de Karbon kumaş epoksi kompozit malzemenin Hız ve Yük girdi parametrelerinin MAM çıktı parametresine ortak etkileşim grafiğinin alan olarak 2B ve 3B olarak gösterimi vardır. Şekil 5.41 incelendiğinde; MAM ın en yüksek seviyede olmasına sebep olan düşük hız/ağır yük veya yüksek hız / hafif yüke karbon kumaş epoksi kompozitin maruz kalmasıdır. Saf karbon kompozit yüksek hızda ve ağır yük altında çalıştığı zaman MAM miktarında düşüş sağlanmaktadır.



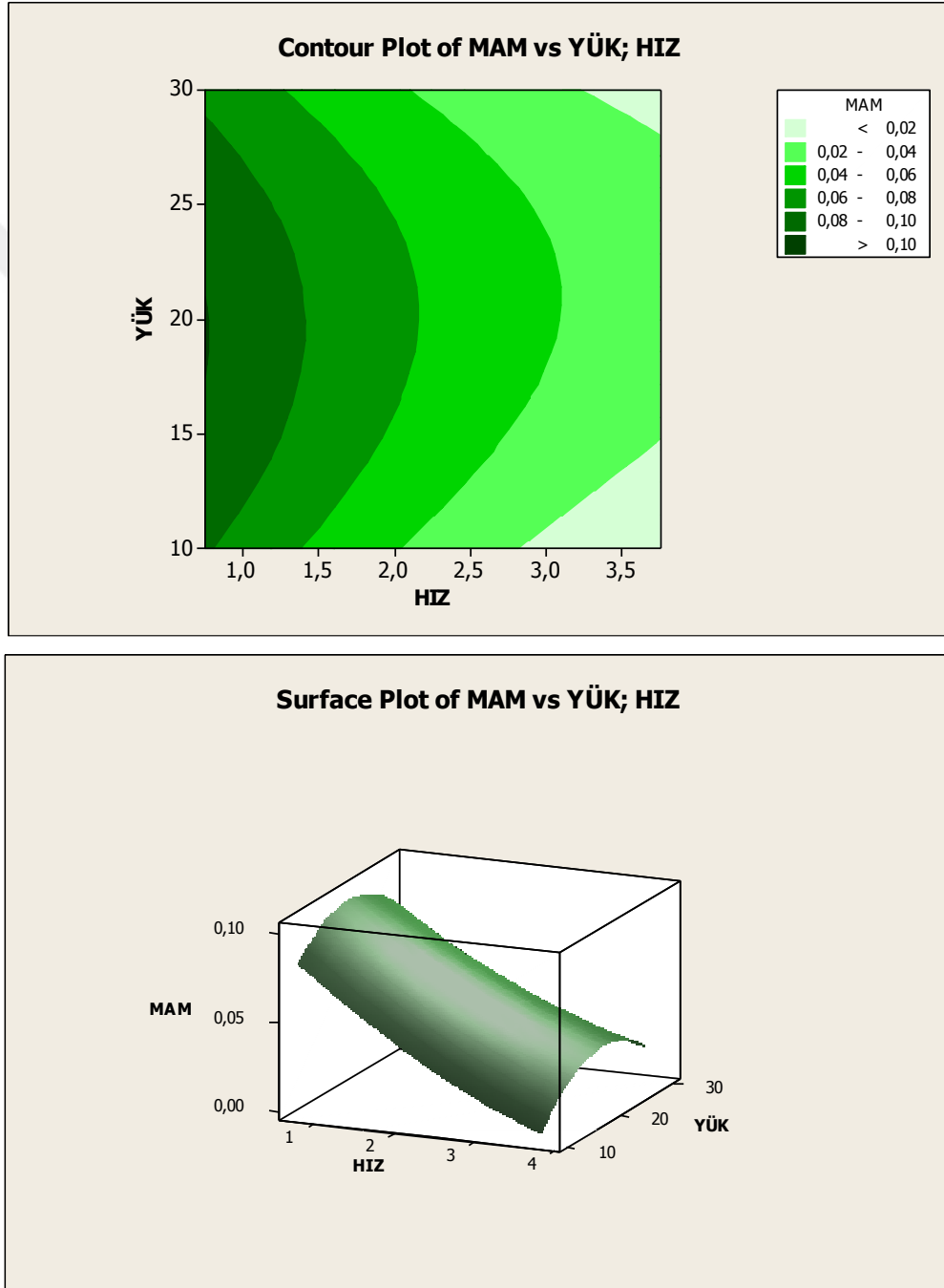
Şekil 5.41 Karbon Kumaş Epoksi Kompozitlerde Aşınma Etkileşim Grafikleri (Hız ve Yük/MAM)

Şekil 5.42 de Karbon kumaş epoksi kompozit malzemenin Hız ve Yük girdi parametrelerinin  $\mu_s$  çıktı parametresine ortak etkileşim grafiğinin alan olarak 2B ve 3B olarak gösterimi vardır. Şekil 5.42 incelendiğinde; Ağır yük/düşük hız veya yüksek hız/hafif yük te  $\mu_s$  maksimum olmaktadır. Karbon kumaş epoksi kompozit malzemelerde Yüksek hız /ağır yük minimum  $\mu_s$  değerini sağlamaktadır.



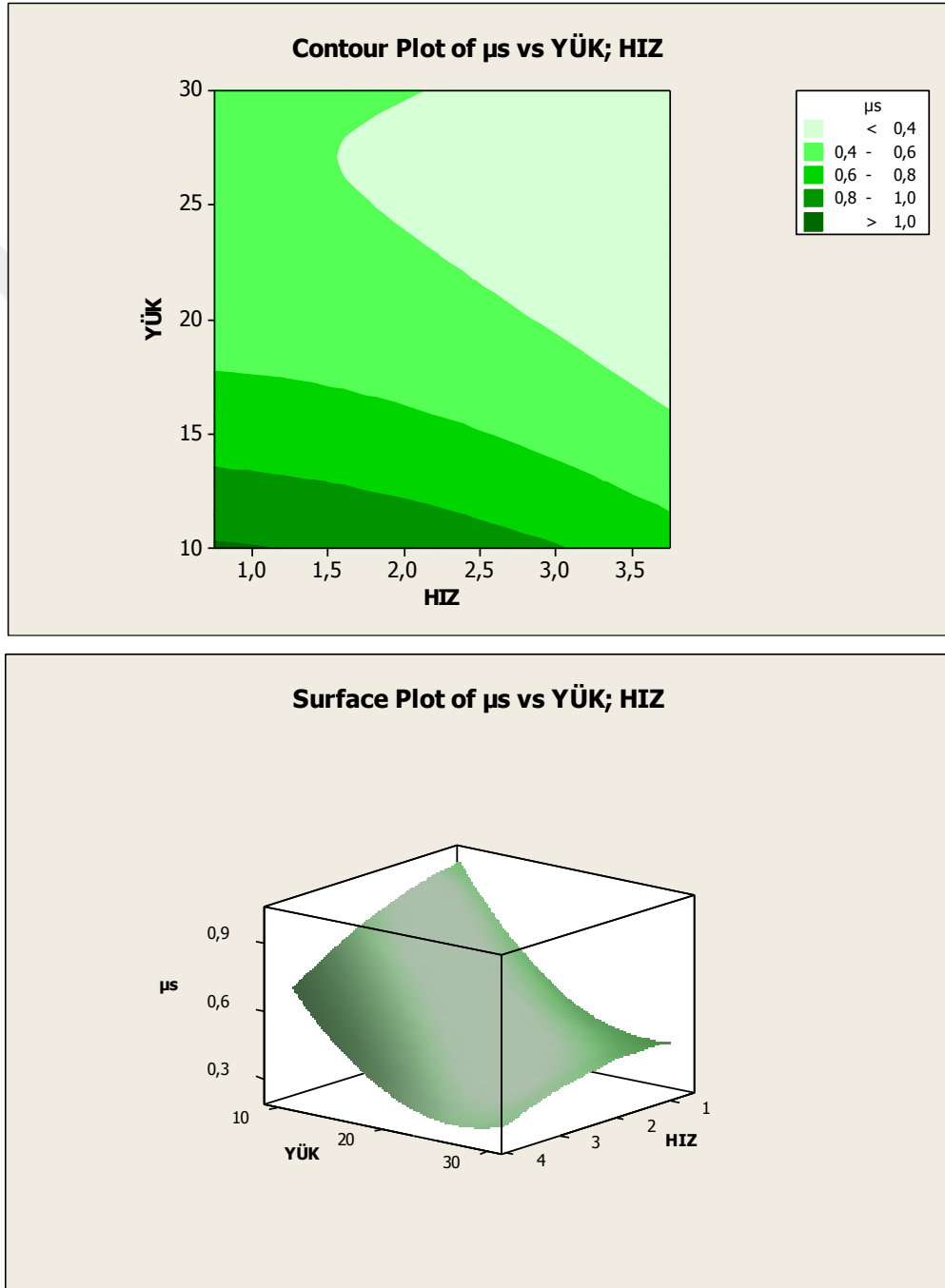
Şekil 5.42 Karbon Kumaş Epoksi Kompozitlerde Aşınma Etkileşim Grafikleri (Hız ve Yük/  $\mu_s$ )

Şekil 5.43 de %0,5 KNT takviyeli karbon kumaş epoksi kompozit malzemenin Hız ve Yük girdi parametrelerinin MAM çıktı parametresine ortak etkileşim grafiğinin alan olarak 2B ve 3B olarak gösterimi vardır. Şekil 5.43 incelendiğinde; % 0,5 KNT li karbon kumaş epoksi kompozitlerde MAM ın üzerine en çok etki eden faktörün hız olduğu görülmektedir. Düşük hızlar yüksek miktarlarda MAM a sebep olmaktadır. Yüksek hızlarda çalışan kompozitlerde düşük MAM sağlanmaktadır.



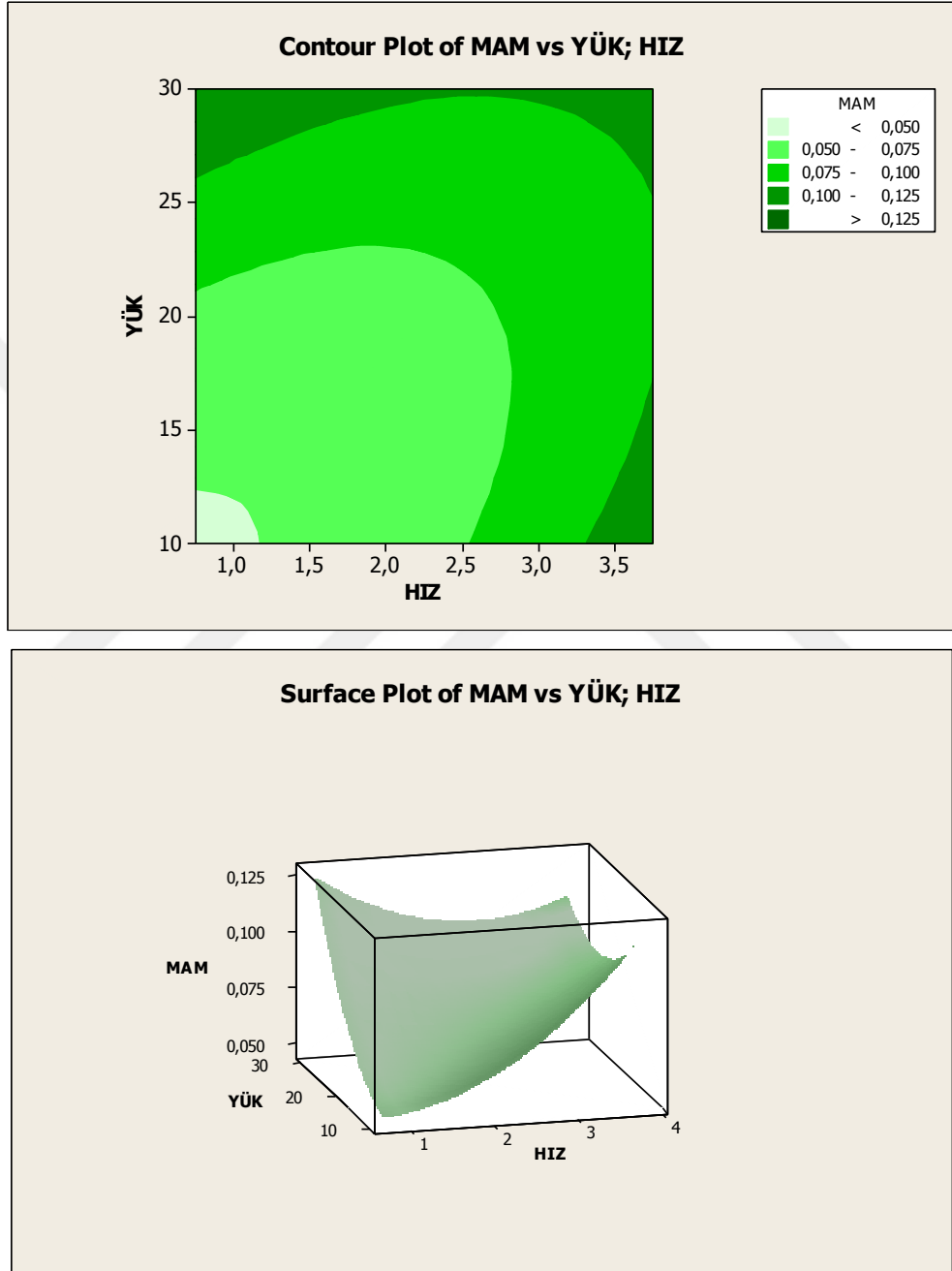
Şekil 5.43 % 0,5 KNT Takviyeli Karbon Kumaş Epoksi Kompozitlerde Aşınma Etkileşim Grafikleri (Hız ve Yük/MAM)

Şekil 5.44 de % 0,5 KNT takviyeli karbon kumaş epoksi kompozit malzemenin Hız ve Yük girdi parametrelerinin  $\mu_s$  çıktı parametresine ortak etkileşim grafiğinin alan olarak 2B ve 3B olarak gösterimi vardır. Şekil 5.44 incelendiğinde; % 0,5 KNT li karbon kompozitlerde yüksek hız ve ağır yükler altında çalıştığında düşük  $\mu_s$  değerleri oluşmaktadır. Düşük hız ve yüklerde ise yüksek  $\mu_s$  değerlerine sebep olmaktadır.



**Şekil 5.44** %0,5 KNT Takviyeli Karbon Kumaş Epoksi Kompozitlerde Aşınma Etkileşim Grafikleri (Hız ve Yük/  $\mu_s$ )

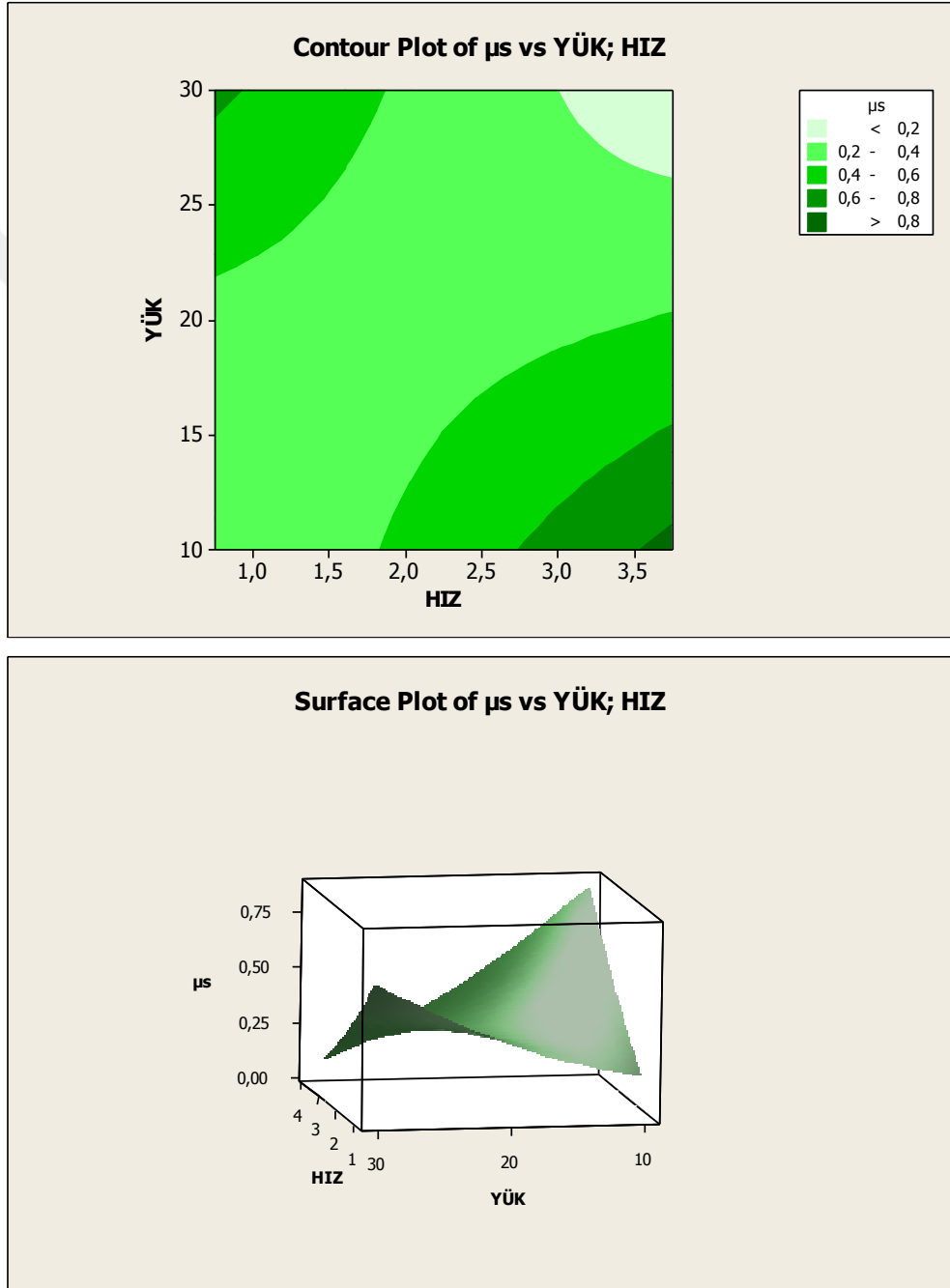
Şekil 5.45 incelendiğinde; %1 KNT içeren karbon kumaş epoksi kompozitlerde MAM değerine hız ve yükün ayrı ayrı benzer şekilde etki ettiği görülmektedir. Düşük hızda ve hafif yükte çalışan %1 KNT li karbon kompozitte düşük MAM sağlanır. Yüksek hızda ve ağır yükte çalışan malzeme de yüksek MAM görülmektedir.



Şekil 5.45 % 1 KNT Takviyeli Karbon Kumaş Epoksi Kompozitlerde Aşınma Etkileşim Grafikleri (Hız ve Yük/MAM)

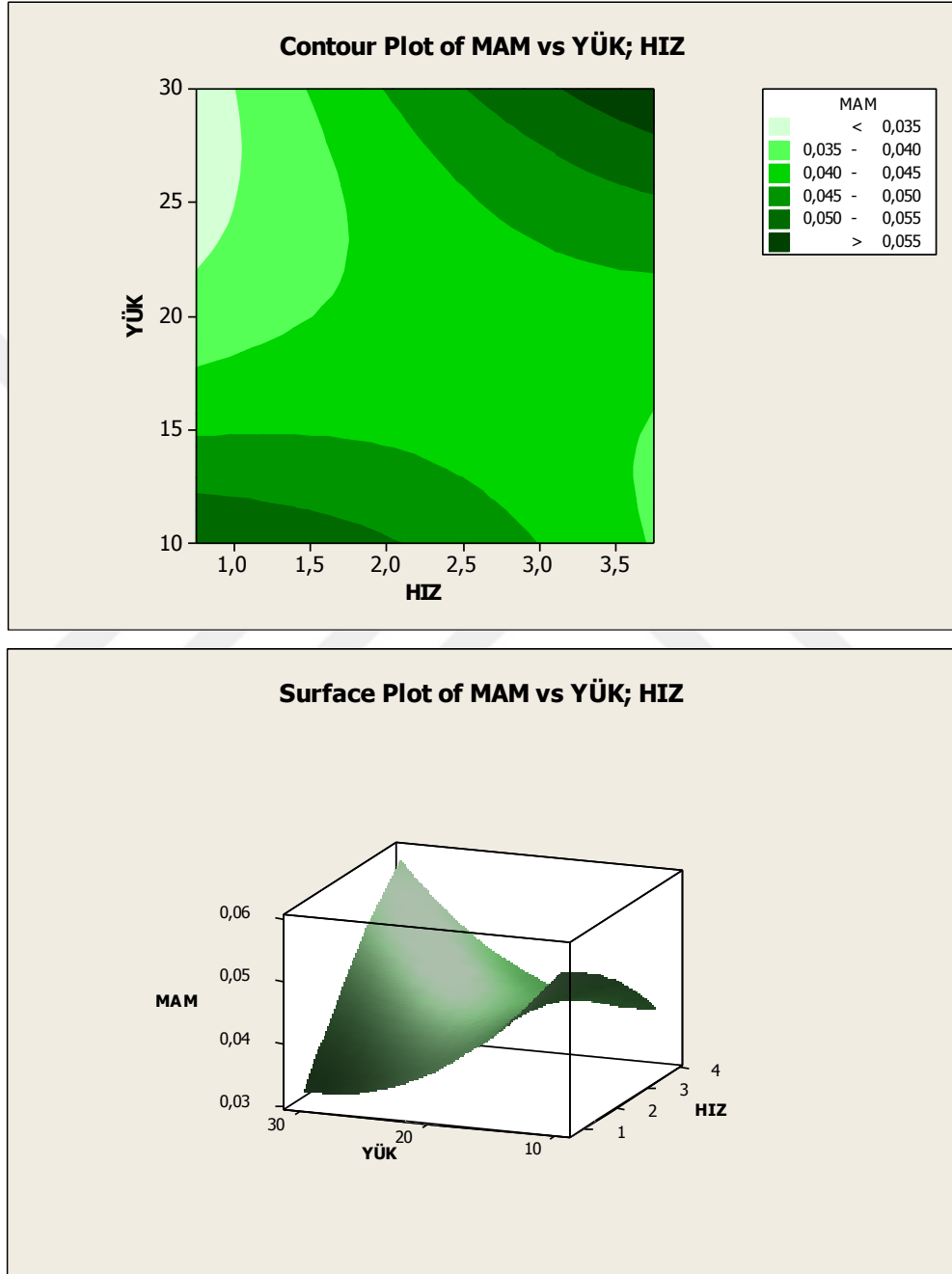


Şekil 5.46 de % 1 KNT takviyeli karbon kumaş epoksi kompozit malzemenin Hız ve Yük girdi parametrelerinin  $\mu_s$  çıktı parametresine ortak etkileşim grafiğinin alan olarak 2B ve 3B olarak gösterimi vardır. Şekil 5.46  $\mu_s$  grafiği incelendiğinde; yüksek hız ve ağır yükte en düşük  $\mu_s$  elde edilmekte ayrıca liner bir çizgi üzerinde ilerleyen yük ve hızlarda da görece düşük  $\mu_s$  değerleri elde edilmektedir. Yüksek hız/hafif yük ve ağır yük/düşük hızda ise  $\mu_s$  maksimum değerlere ulaşmaktadır.



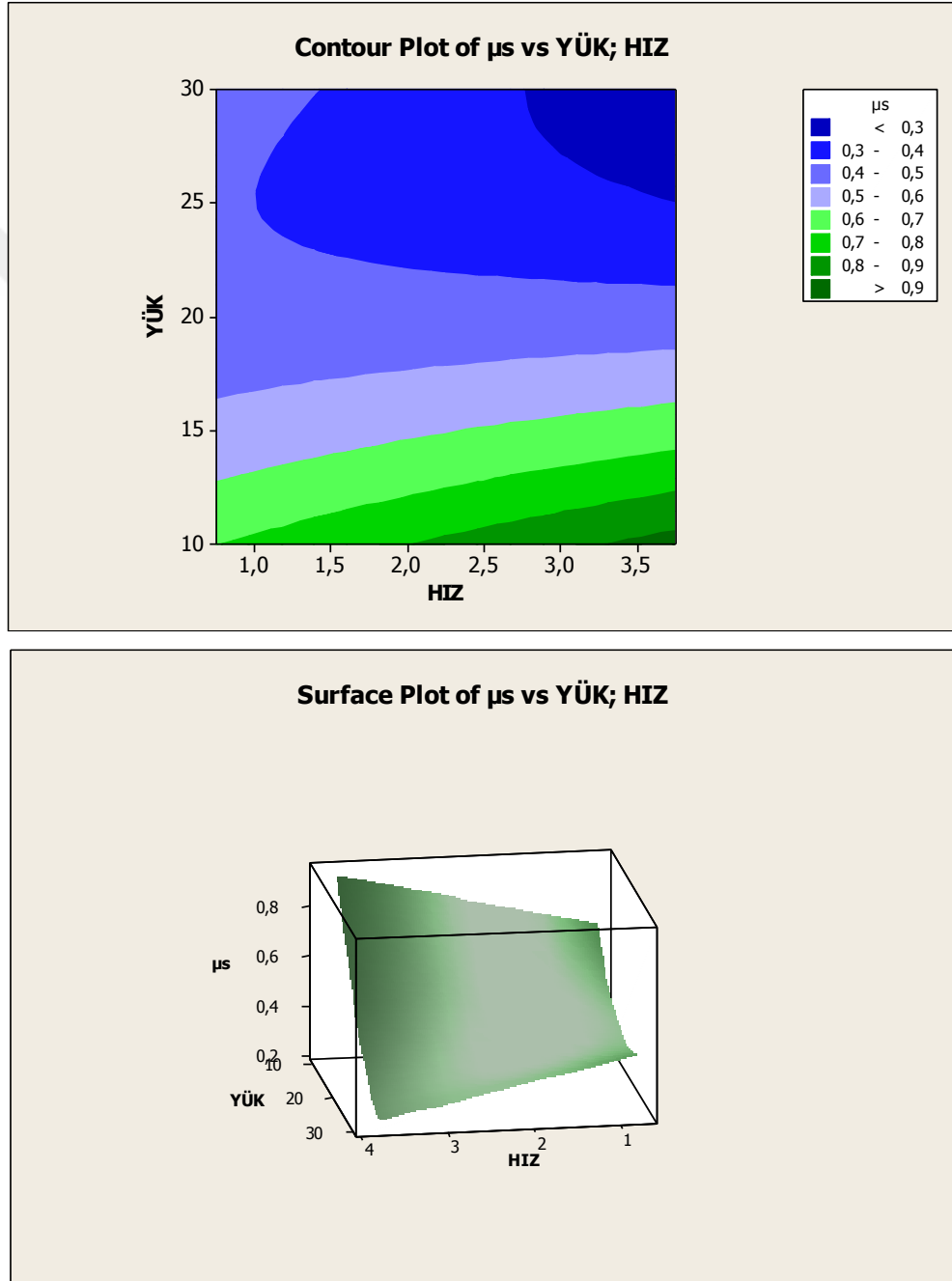
Şekil 5.46 % 1 KNT Takviyeli Karbon Kumaş Epoksi Kompozitlerde Aşınma Etkileşim Grafikleri (Hız ve Yük/  $\mu_s$ )

Şekil 5.47 de %2 KNT içeren karbon kumaş epoksi kompozitlerin aşınma deneyleri incelendiğinde düşük hız/ağır yükler altında çalıştığında minimum MAM değerleri elde edildiği gözlemlenmiştir. Düşük hız/hafif yükler altında veya yüksek hız/ağır yükler altında yüksek MAM değerlerine neden olduğu görülmüştür.



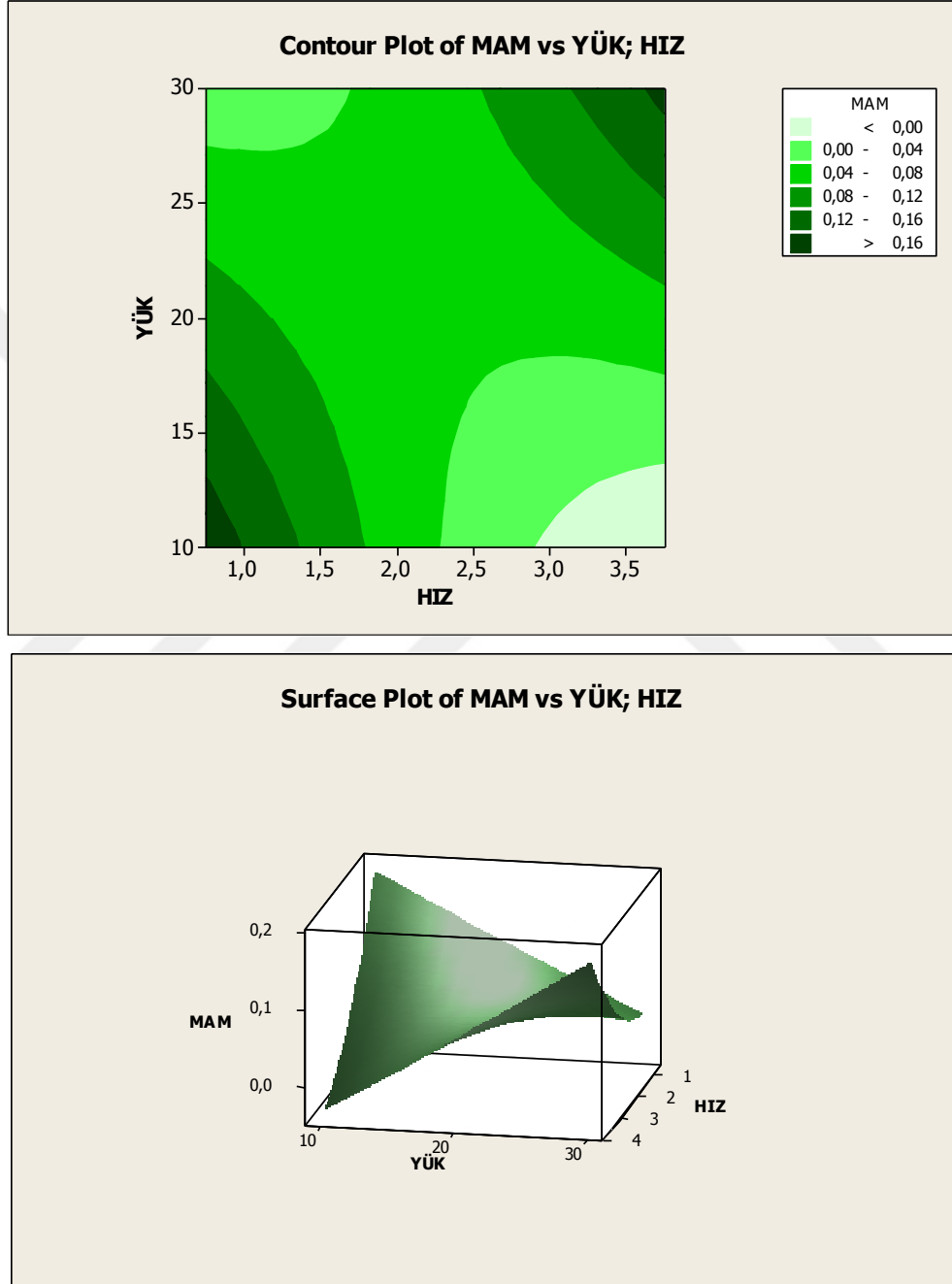
Şekil 5.47 % 2 KNT Takviyeli Karbon Kumaş Epoksi Kompozitlerde Aşınma Etkileşim Grafikleri (Hız ve Yük/MAM)

Şekil 5.48 de % 2 KNT takviyeli karbon kumaş epoksi kompozit malzemenin Hız ve Yük girdi parametrelerinin  $\mu_s$  çıktı parametresine ortak etkileşim grafiğinin alan olarak 2B ve 3B olarak gösterimi vardır. Şekil 5.48 de  $\mu_s$  değerine bakınca yüksek hız/ağır yükler altında çalışan %2 KNT li karbon kumaş epoksi kompozitlerde minimum  $\mu_s$  sağlanmıştır. Hafif yük/yüksek hızlarda çalışan %2 KNT li kompozitlerde maksimum  $\mu_s$  değerleri elde edilmiştir.



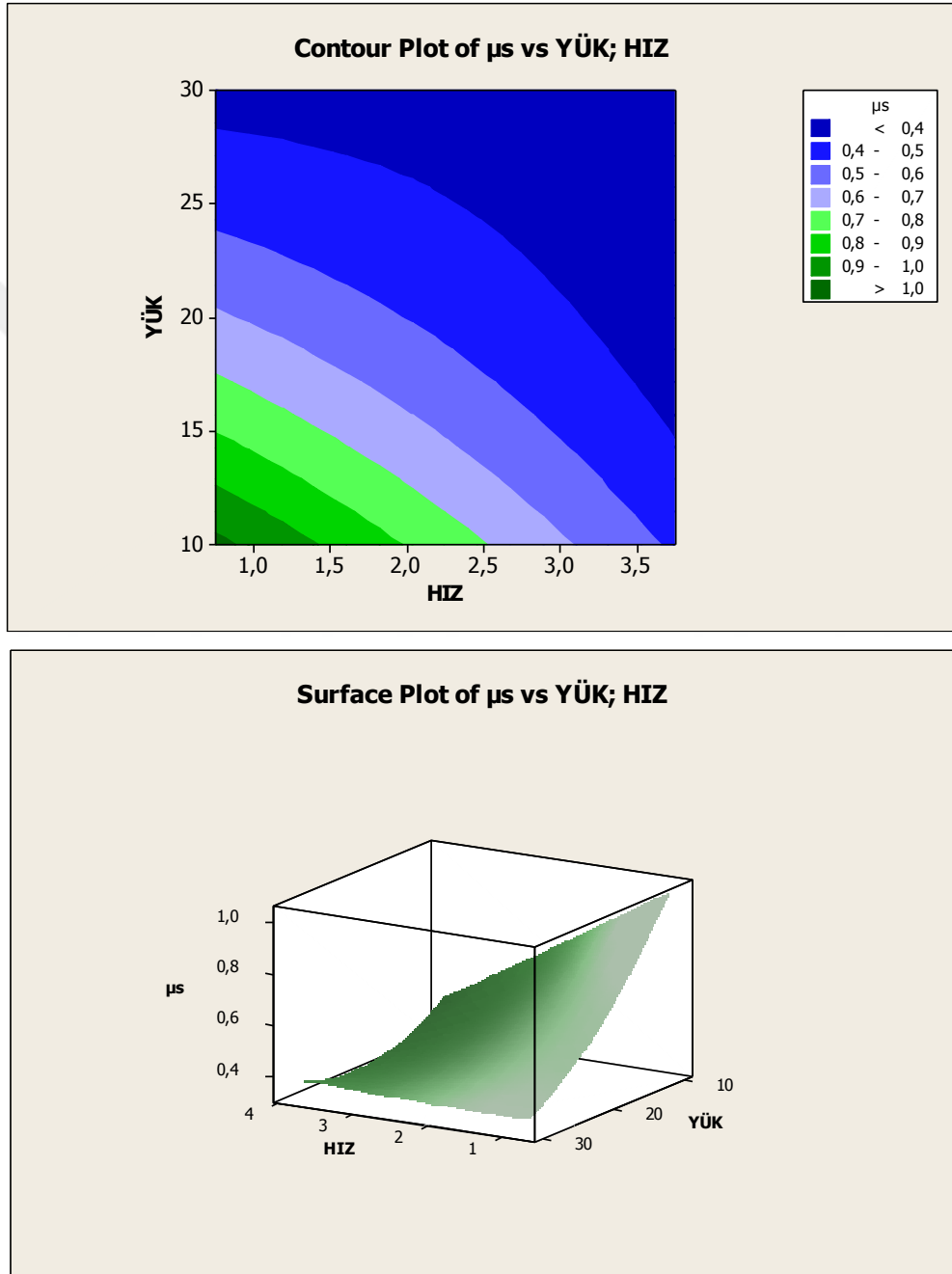
Şekil 5.48 % 2 KNT Takviyeli Karbon Kumaş Epoksi Kompozitlerde Aşınma Etkileşim Grafikleri (Hız ve Yük/  $\mu_s$ )

Şekil 5.49 de %1 BN içeren karbon kumaş epoksi kompozitlerin aşınma deneyleri sonuçlarına bakıldığında, yüksek hız/hafif yük altında MAM minimum seviyelerde olduğu gözlemlenmiştir. Düşük hız/hafif yük altında veya yüksek hız/ağır yük altında maksimum MAM değerlerine sebep olmuştur.



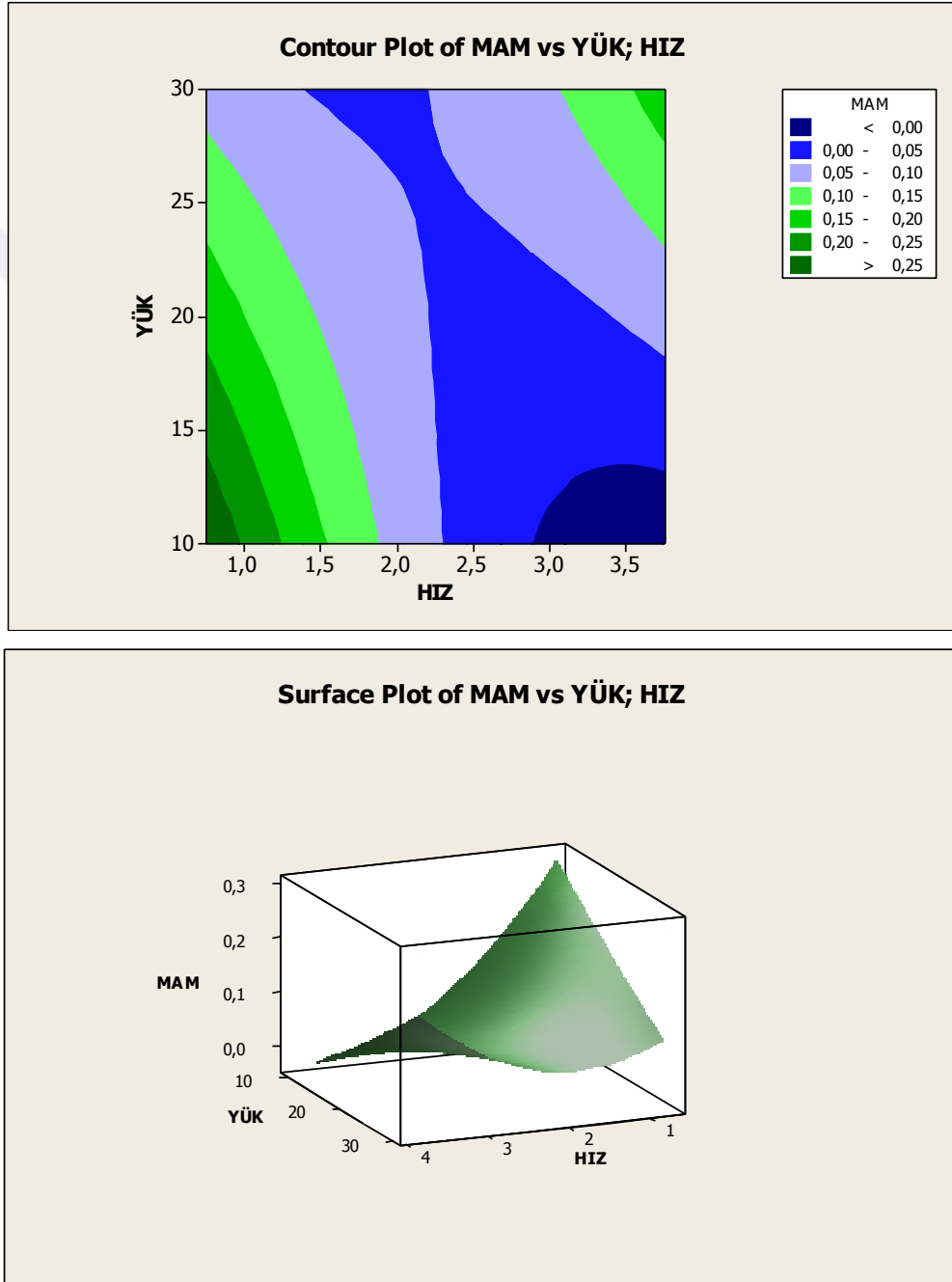
**Şekil 5.49** % 1 BN Takviyeli Karbon Kumaş Epoksi Kompozitlerde Aşınma Etkileşim Grafikleri (Hız ve Yük/MAM)

Şekil 5.50 de % 1 BN takviyeli karbon kumaş epoksi kompozit malzemenin Hız ve Yük girdi parametrelerinin  $\mu_s$  çıktı parametresine ortak etkileşim grafiğinin alan olarak 2B ve 3B olarak gösterimi vardır. Şekil 5.50 de Düşük hız/ hafif yük altında çalışan %1 BN takviyeli karbon kompozitlerde maksimum  $\mu_s$  değerlerine ulaşılmıştır. Yüksek hız/ağır yük altında  $\mu_s$  nin minimum değerleri elde edilmiştir.



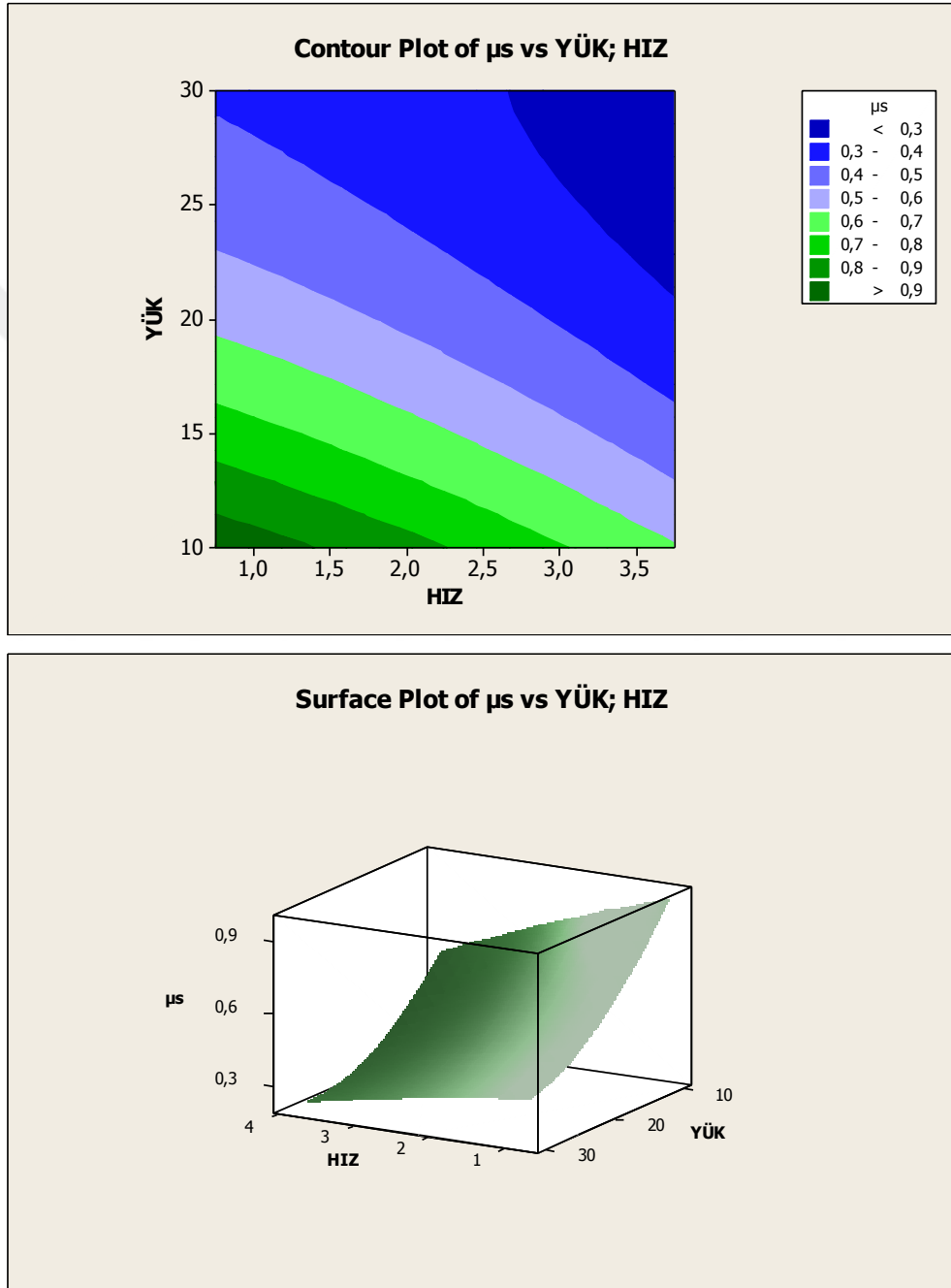
Şekil 5.50 % 1 BN Takviyeli Karbon Kumaş Epoksi Kompozitlerde Aşınma Etkileşim Grafikleri (Hız ve Yük/  $\mu_s$ )

Şekil 5.51 incelendiğinde; % 0,5 (KNT+BN) içeren karbon kumaş epoksi kompozitlerin aşınma deneyleri sonucunda elde edilen MAM değerlerine etki eden hız ve yük parametrelerinin etkileri görülmektedir. Düşük hız/hafif yük altında aşınmaya maruz kalan karbon kompozitlerde MAM değeri maksimum olduğu görülmektedir. Yüksek hız/hafif yük altında çalışan karbon kompozitlerde MAM değeri minimum elde edilmiştir.



Şekil 5.51 % 0,5 (KNT+BN) Takviyeli Karbon Kumaş Epoksi Kompozitlerde Aşınma Etkileşim Grafikleri (Hız ve Yük/MAM)

Şekil 5.50 de % 1 BN takviyeli karbon kumaş epoksi kompozit malzemenin Hız ve Yük girdi parametrelerinin  $\mu_s$  çıktı parametresine ortak etkileşim grafiğinin alan olarak 2B ve 3B olarak gösterimi vardır. Yüksek hız ve ağır yükler altında minimum  $\mu_s$  değerleri elde edilmiştir. Düşük hızlar/hafif yükler altında çalışan malzemede maksimum  $\mu_s$  değerleri olduğu görülmüştür.



Şekil 5.52 % 0,5 (KNT+BN) Takviyeli Karbon Kumaş Epoksi Kompozitlerde Aşınma Etkileşim Grafikleri (Hız ve Yük/  $\mu_s$ )

Şekil 5.41-5.52 ye kadar olan şekillerde karbon kumaş epoksi kompozit ve farklı miktarlarda nano partikül içeren karbon kumaş epoksi kompozitlerin aşınma deneyleri sonucu elde edilen MAM ve  $\mu_s$  çıktı değerlerine etki eden yük ve hız faktörlerinin etkilerinin üçboyutlu tek renk ve iki boyutlu çoklu renkli şekilleri verilmiştir. Sonuçları genel olarak değerlendirecek olursak her bir malzeme içine katılan farklı miktarlarda nano partiküller sayesinde çok farklı aşınma özellikleri sergilemekte ve itiyace binaen kullanıma hazır hale gelmiştir. Burada elde edilen kompozit malzemelerle ihtiyaç doğrultusunda yüksek  $\mu_s$  ve düşük MAM değerine sahip süper spor araba freni, düşük  $\mu_s$  ve düşük aşınma değerine sahip taşıyıcı kanal ya da yüksek  $\mu_s$  ve yüksek MAM değerlerine sahip kesici fleksler üretebiliriz.

## 5.5. Optimizasyon

Matematikte optimizasyon; bir gerçel fonksiyonu minimize ya da maksimize etmek amacı ile gerçek ya da tamsayı değerlerini tanımlı bir aralıkta seçip fonksiyona yerleştirerek sistematik olarak bir problemi incelemek ve çözmek işlemlerini ifade eder. Mühendislikte optimizasyon; bir sistemde var olan en verimli şekilde kullanılarak belirli amaçlara (maliyet en azaltılması, kâr en çoklanması, bakım maliyetlerinin düşmesi gibi) ulaşmayı sağlayan bir terminoloji olarak tanımlanmaktadır Optimizasyonun iki önemli unsuru modellemedir. Modelleme gerçek yaşamda karşılaşılan problemin matematiksel olarak ifade edilmesidir. Çözümleme ise tasarlanan modele ulaşmayı sağlayan en iyi çözümün sağlanmasını kapsamaktadır. Optimizasyon için önce modelleme yapılması gerekmektedir. Giriş parametresinin (faktörlerin) optimizasyonu, TYM ve Minitab® ile kolayca otomatik olarak yapılabilir. Tepki optimizasyonunun kullanımı, tek bir yanıtı veya bir yanıt kümesini birlikte optimize eden giriş değişkeni ayarlarının kombinasyonunu tanımlamaya yardımcı olmaktır. Birleşik optimizasyonu, kümedeki tüm tepkilerin gereksinimlerini karşılamalı ve bu, birleşik önem ile ölçülmelidir.

Tepki optimizasyonunda bileşik önem (D), çözümün tüm yanıtlar için birleşik hedefleri nasıl yerine getirdiğinin bir ölçüsüdür. Bileşik önemin sıfır ila bir [0 ila 1] Aralığına sahiptir. Bir (1) ideal durumu temsil eder; sıfır (0), bir veya daha fazla yanıtın kabul edilebilir sınırlarının dışında olduğunu gösterir. Bileşik önem, cevaplar için bireysel istekliliğin ağırlıklı geometrik ortalamasıdır. Minitab®'da oluşturulan algoritmalar en uygun çözümü hesaplar ve bir çizim çizer. Optimum çözüm, alan için başlangıç noktası görevi görür. Bu optimizasyon grafiği, hassasiyet analizleri yapmak



ve muhtemelen ilk çözümü geliştirmek için giriş değişkeni ayarlarını etkileşimli olarak değiştirmenize olanak sağlar. Bir optimizasyon grafiği oluşturulduktan sonra, giriş değişkeni ayarları değiştirilebilir. Faktoriyel ve tepki yüzey tasarımları için faktör seviyeleri ayarlanabilir. Karışım tasarımları için bileşen, süreç değişkeni ve miktar değişkeni ayarları yapılabilir. Optimizasyon grafiğindeki bu giriş değişkeni ayarları birçok nedenden dolayı değişebilir;

- Girdi faktörleri ayarları ile daha yüksek D değeri elde etmek
- En uygun özelliklere sahip düşük maliyetli girdi değişken ayarlarının aranması
- Tepki değişkenlerinin tasarım değişkenlerindeki değişikliklere duyarlılığının araştırılması
- Bir girdi için öngörülen yanıtların "hesaplanması" için ilgilenilen değişken ayarı
- Yerel bir çözümün çevresindeki girdi değişkeni ayarlarını araştırmak için

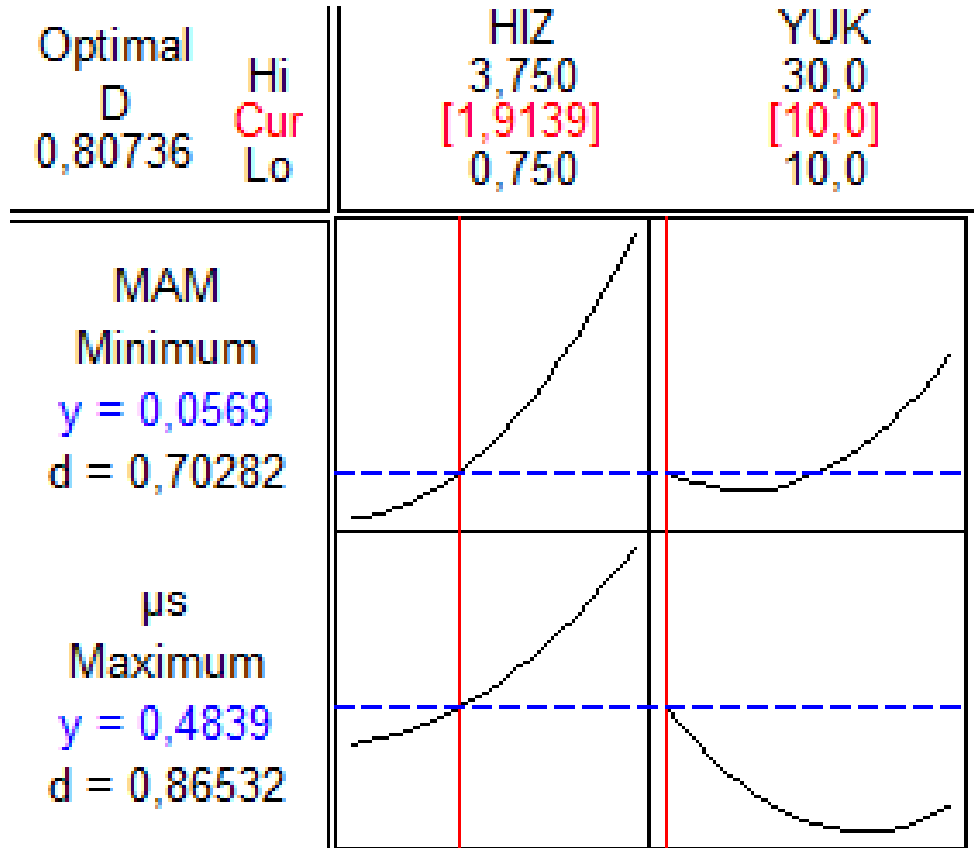
Bu araştırmanın asıl amacı, farklı miktarlarda nano partikül içeren karbon kompozitlerin kullanım yerlerine göre farklı yük ve hızlar altında üzerlerinde oluşacak aşınma miktarlarının belirlenmesi, tahmin edilebilir olması ve kullanım yerlerine göre optimize edilmesini içermektedir. Aşınma işlem değişkenleri ile performansını doğru şekilde ilişkilendiren modeller oluşturmak zor olmuştur. Bu nedenle, öngörülen kısıtlamalar dahilinde de mümkün olan en iyi modeli oluşturmak için optimum aşınma faktörlerini tahmin etmeye yönelik bir girişimde bulunuldu. Bu çalışmada üretilen beş farklı kompozit için farklı kullanım yerlerine göre iki farklı modelleme de bulunmuştur.

İlk modellemede  $\mu_s$  değerinin maksimum olduğu ve önem derecesinin daha fazla olduğu, MAM değerinin minimum olduğu ve önem derecesinin  $\mu_s$  ye göre daha az olduğu bir kurgu tasarlanmıştır. Bu tasarım temel olarak süper spor otomobil, yüksek hızlı trenler ve uçak frenleri düşünülerek yapılmıştır. Frenler araçları durdurma ekipmanları olduğu için  $\mu_s$  nin maksimum MAM ın minimum olması gerekmektedir. Yüksek  $\mu_s$  değerleri daha iyi bir tutunma sağlarken düşük MAM değerleri de frenlerin bakım süresini uzatacaktır. Bu tip araçlarda her ne kadar bakım maliyetleri yüksek olsa da frenin en iyi şekilde tutması daha önemlidir; bu yüzden  $\mu_s$  değerinin önem kat sayısı, MAM değerinin önem katsayısından daha yüksek olmalıdır.

İkinci modelleme de ise  $\mu_s$  ve MAM değerlerinin minimum olduğu MAM değerlerinin daha önemli  $\mu_s$  değerinin MAM değerine göre daha az önemli olduğu bir kurgu tasarlanmıştır. Bu tasarım temel olarak taşıyıcı kanallar, havacılık ve süper spor

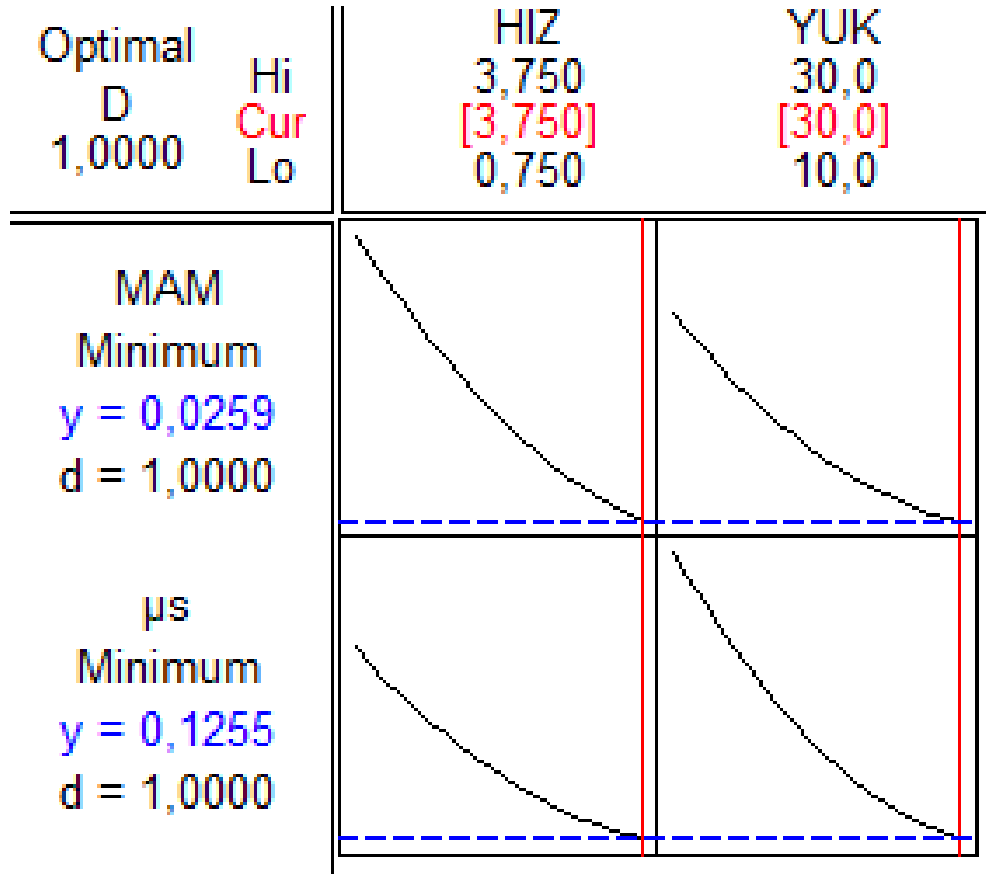
otomobil sanayisinde kullanılan karbon kompozit gövde elemanlarının bağlantı noktaları düşünülerek yapılmıştır. Özellikle toprak altı taşıma kanallarında bakım ve müdahale imkânlarının kısıtlayıcı olduğu göz önüne alınarak ikinci modellemede daha uzun ömürlü malzemeler için MAM değeri daha ön planda tutulmuş  $\mu_s$  değeri MAM a göre ikincil öneme sahip olmak üzere çoklu bileşik optimizasyon yapılmıştır. Altı farklı malzemenin her biri için iki farklı optimizasyon yapılarak toplamda on iki aşınma optimizasyonu yapılmıştır.

Şekil 5.53 te Karbon kumaş epoksi kompozit aşınma deneyi optimizasyonu sonucu elde edilen grafiklerdir. Optimizasyon yapılırken süper spor araçlar ve hava araçları düşünülerek yapılmıştır bundan dolayı minimum MAM ve maksimum  $\mu_s$  değeri elde edilecek şekilde karbon kumaş kompozit malzeme optimize edilmiştir. Ortalama D değeri 0.80 çıkmıştır bu değer kabul edilebilir bir değerdir. Minimum MAM değeri 0.0569 gram ve maksimum  $\mu_s$  değeri 0.4839 elde edilmiştir. Bu değeri elde etmek için gerekli hız 1,9139 m/s ve yük te 10 N dur.



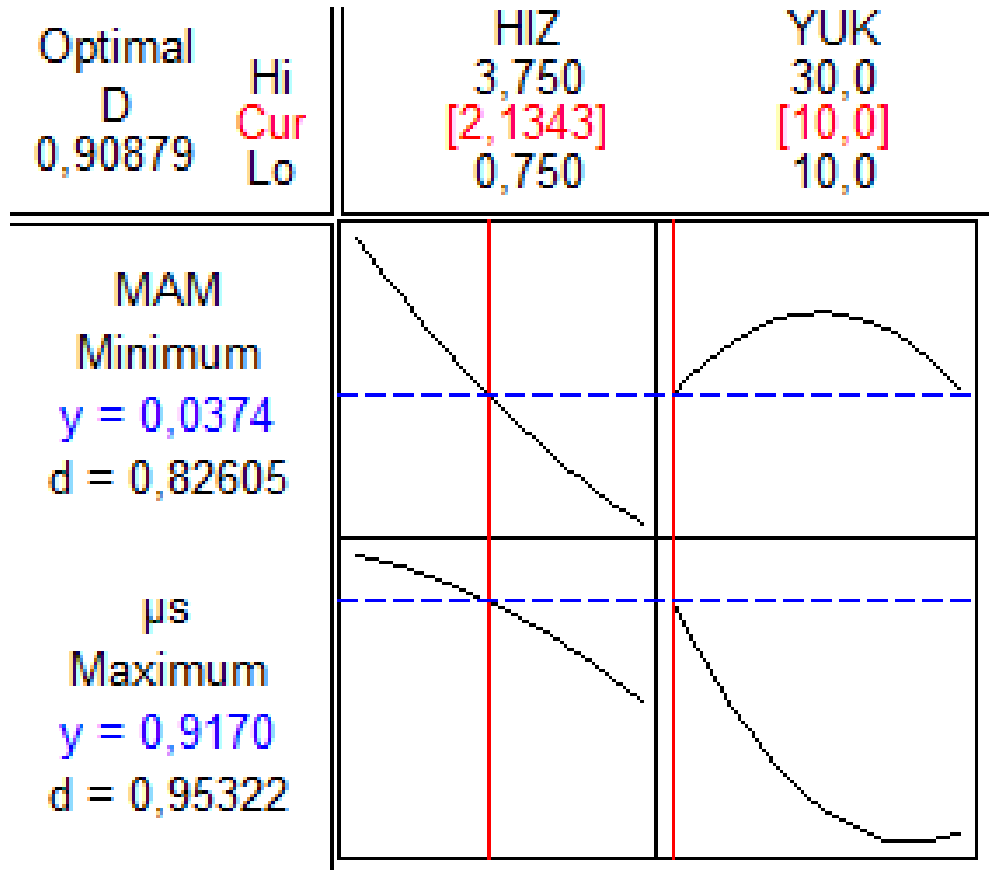
Şekil 5.53 Karbon Kumaş Epoksi Kompozit Aşınma Deneyi Optimizasyonu MAM<sub>(min)</sub>/  $\mu_s$ <sub>(maks)</sub>

Şekil 5.54 te Karbon kumaş epoksi kompozit aşınma deneyi optimizasyonu sonucu elde edilen grafiklerdir. Optimizasyon yapılırken taşıyıcı kanallar düşünülerek yapılmıştır bundan dolayı minimum MAM ve minimum  $\mu_s$  değeri elde edilecek şekilde karbon kumaş kompozit malzeme optimize edilmiştir. Ortalama D değeri 1 çıkmıştır bu değer ideal olan değerdir. Minimum MAM değeri 0,0259 gram ve minimum  $\mu_s$  değeri 0,1255 elde edilmiştir. Bu değeri elde etmek için gerekli hız 3.75 m/s ve yük te 30 N dur.



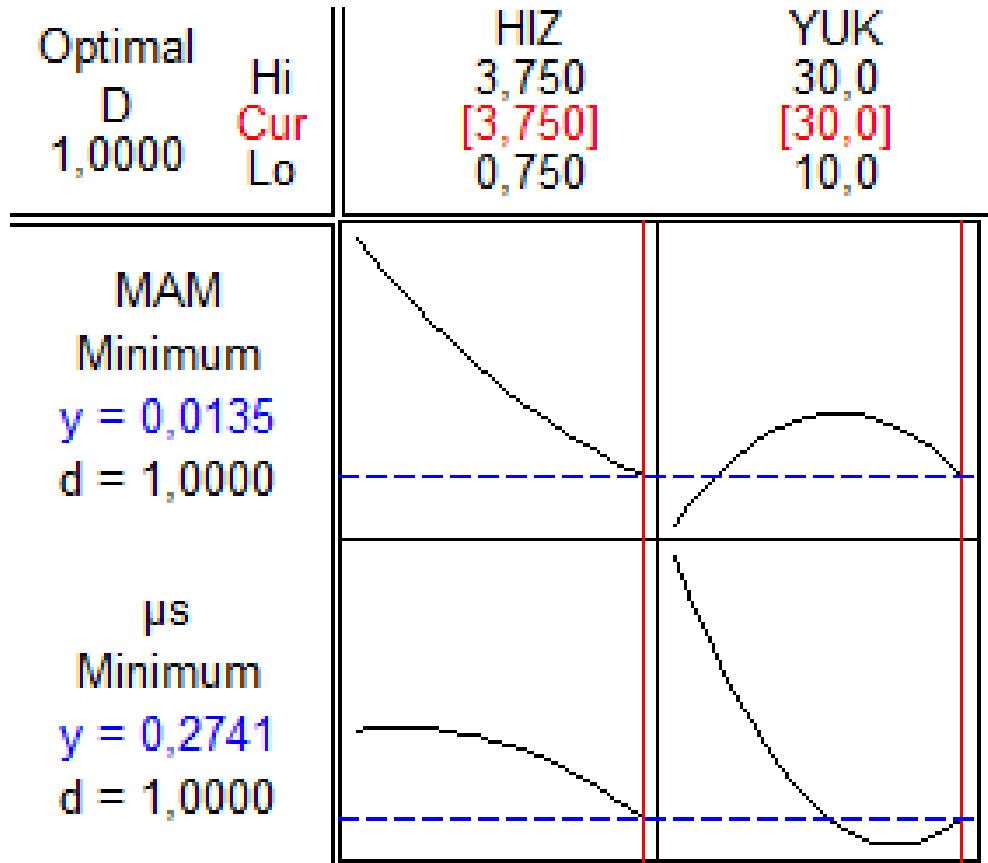
Şekil 5.54 Karbon Kumaş Epoksi Kompozit Aşınma Deneyi Optimizasyonu MAM<sub>(min)</sub>/  $\mu_s$ <sub>(min)</sub>

Şekil 5.55 te % 0,5 KNT takviyeli karbon kumaş epoksi kompozit aşınma deneyi optimizasyonu sonucu elde edilen grafiklerdir. Optimizasyon yapılırken süper spor araçlar ve hava araçları düşünülerek yapılmıştır bundan dolayı minimum MAM ve maksimum  $\mu_s$  değeri elde edilecek şekilde karbon kumaş kompozit malzeme optimize edilmiştir. Ortalama D değeri 0,90 çıkmıştır bu değer kabul edilebilir bir değerdir. Minimum MAM değeri 0,0374 gram ve maksimum  $\mu_s$  değeri 0,917 elde edilmiştir. Bu değeri elde etmek için gerekli hız 2,1343 m/s ve yük te 10 N dur.



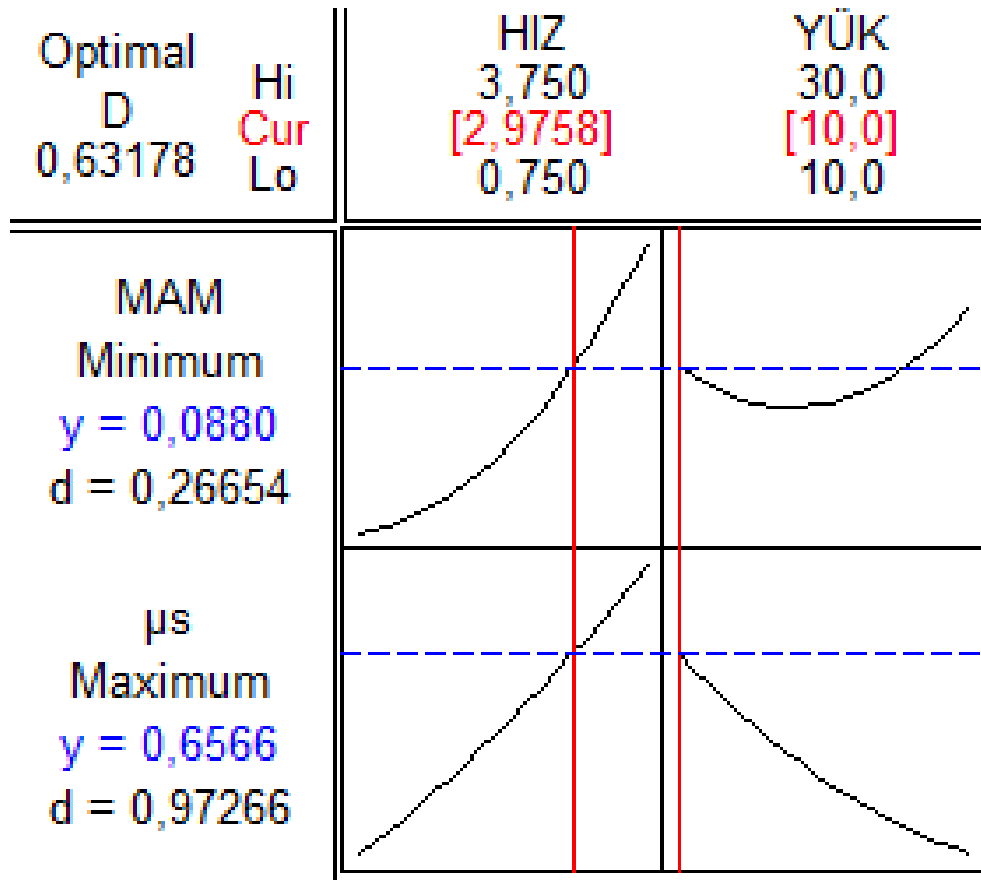
Şekil 5.55 % 0,5 KNT Takviyeli Karbon Kumaş Epoksi Kompozit Aşınma Deneyi Optimizasyonu  
MAM<sub>(min)</sub>/  $\mu_s$ <sub>(maks)</sub>

Şekil 5.56 da % 0,5 KNT takviyeli karbon kumaş epoksi kompozit aşınma deneyi optimizasyonu sonucu elde edilen grafiklerdir. Optimizasyon yapılırken taşıyıcı kanallar düşünülerek yapılmıştır bundan dolayı minimum MAM ve minimum  $\mu_s$  değeri elde edilecek şekilde karbon kumaş kompozit malzeme optimize edilmiştir. Ortalama D değeri 1 çıkmıştır bu değer ideal olan değerdir. Minimum MAM değeri 0,0135 gram ve minimum  $\mu_s$  değeri 0,2741 elde edilmiştir. Bu değeri elde etmek için gerekli hız 3.75 m/s ve yük te 30 N dur.



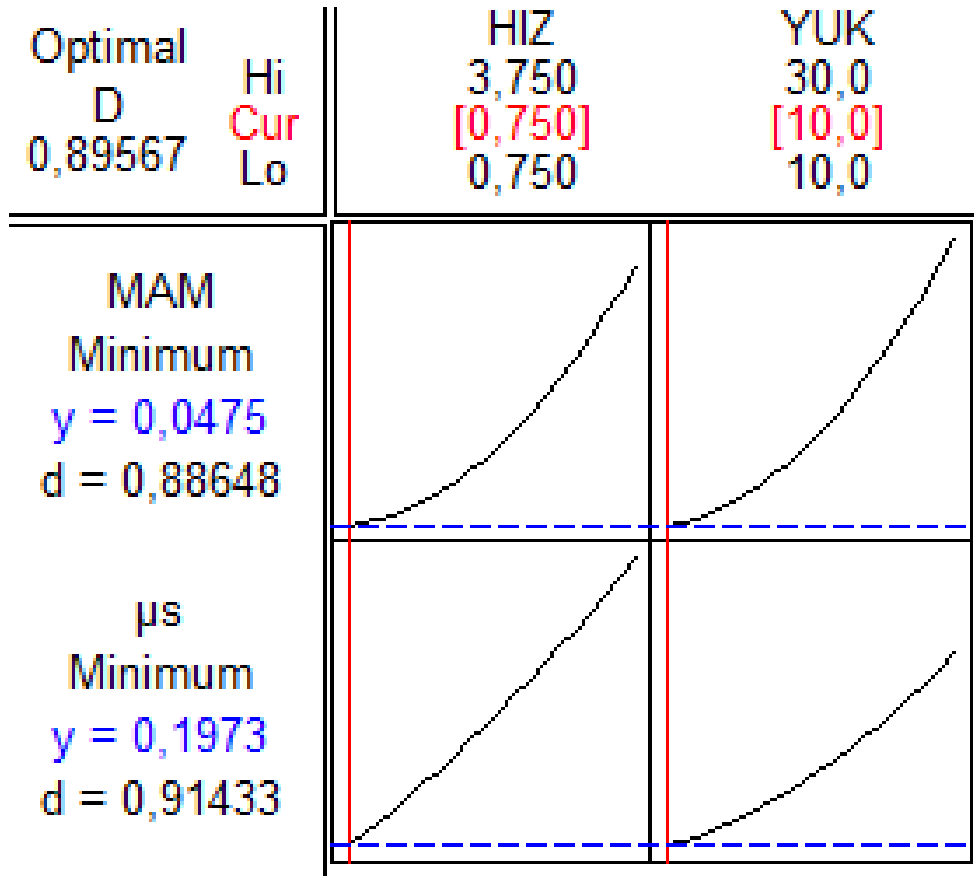
Şekil 5.56 % 0,5 KNT takviyeli Karbon Kumaş Epoksi Kompozit Aşınma Deneyi Optimizasyonu  
MAM<sub>(min)</sub>/  $\mu_s$ <sub>(min)</sub>

Şekil 5.57 de % 1 KNT takviyeli karbon kumaş epoksi kompozit aşınma deneyi optimizasyonu sonucu elde edilen grafiklerdir. Optimizasyon yapılırken süper spor araçlar ve hava araçları düşünülerek yapılmıştır bundan dolayı minimum MAM ve maksimum  $\mu_s$  değeri elde edilecek şekilde karbon kumaş kompozit malzeme optimize edilmiştir. Ortalama D değeri 0.63 çıkmıştır bu değer kabul edilebilir bir değer değildir. Ama değere baktığımızda düşük olmasına sebep olan değer MAM dan gelen D değeridir.  $\mu_s$  den gelen D değeri oldukça yüksektir. Minimum MAM değeri 0,0880 gram ve maksimum  $\mu_s$  değeri 0,6566 elde edilmiştir. Bu değeri elde etmek için gerekli hız 2,9758 m/s ve yük te 10 N dur.



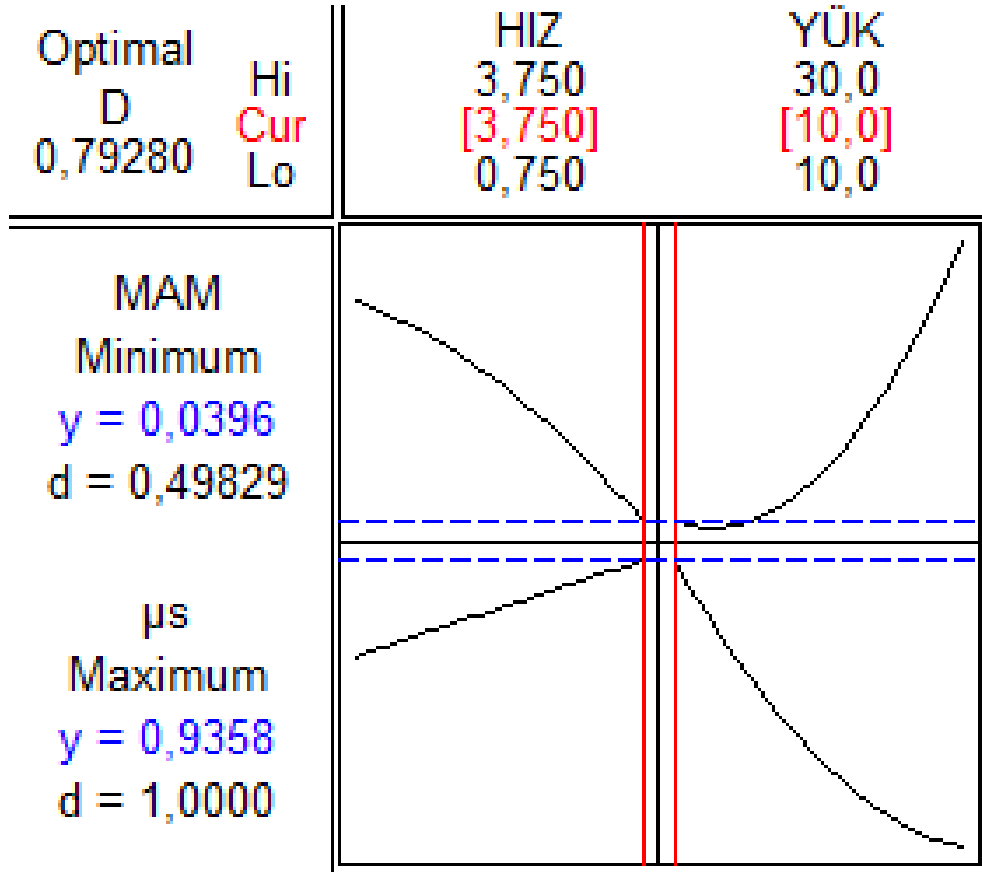
Şekil 5.57 % 1 KNT Takviyeli Karbon Kumaş Epoksi Kompozit Aşınma Deneyi Optimizasyonu  
MAM(min)/  $\mu_s$ (maks)

Şekil 5.58 de % 1 KNT takviyeli karbon kumaş epoksi kompozit aşınma deneyi optimizasyonu sonucu elde edilen grafiklerdir. Optimizasyon yapılırken taşıyıcı kanallar düşünülerek yapılmıştır bundan dolayı minimum MAM ve minimum  $\mu_s$  değeri elde edilecek şekilde karbon kumaş kompozit malzeme optimize edilmiştir. Ortalama D değeri 0,89 çıkmıştır bu değer kabul edilen bir değerdir. Minimum MAM değeri 0,0475 gram ve minimum  $\mu_s$  değeri 0,1973 elde edilmiştir. Bu değeri elde etmek için gerekli hız 0,75 m/s ve yük te 10 N dur.



Şekil 5.58 % 1 KNT takviyeli Karbon Kumaş Epoksi Kompozit Aşınma Deneyi Optimizasyonu  
MAM<sub>(min)</sub>/  $\mu_s$ <sub>(min)</sub>

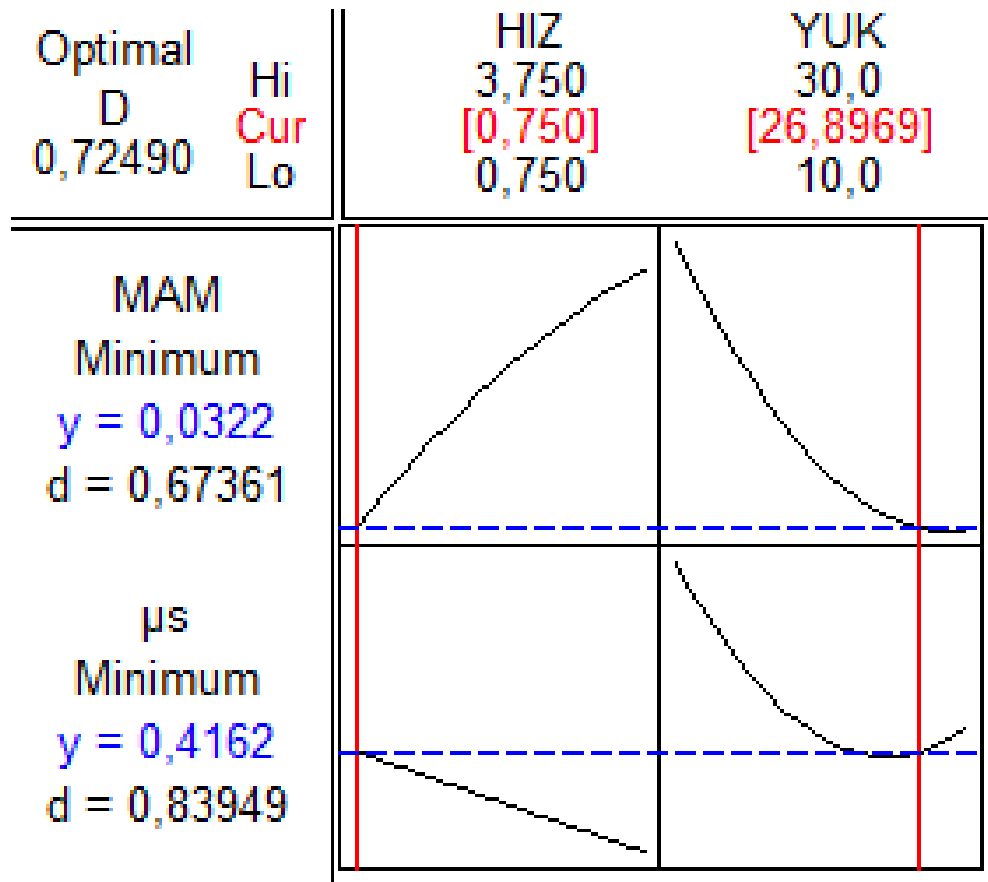
Şekil 5.59 da % 2 KNT takviyeli karbon kumaş epoksi kompozit aşınma deneyi optimizasyonu sonucu elde edilen grafikdir. Optimizasyon yapılırken süper spor araçlar ve hava araçları düşünülerek yapılmıştır bundan dolayı minimum MAM ve maksimum  $\mu_s$  değeri elde edilecek şekilde karbon kumaş kompozit malzeme optimize edilmiştir. Ortalama D değeri 0.79 çıkmıştır bu değer kabul edilebilir bir değerdir. Minimum MAM değeri 0,0396 gram ve maksimum  $\mu_s$  değeri 0,9358 elde edilmiştir. Bu değeri elde etmek için gerekli hız 3,75 m/s ve yük te 10 N dur.



Şekil 5.59 % 2 KNT Takviyeli Karbon Kumaş Epoksi Kompozit Aşınma Deneyi Optimizasyonu  
MAM<sub>(min)</sub>/  $\mu_s$ <sub>(maks)</sub>

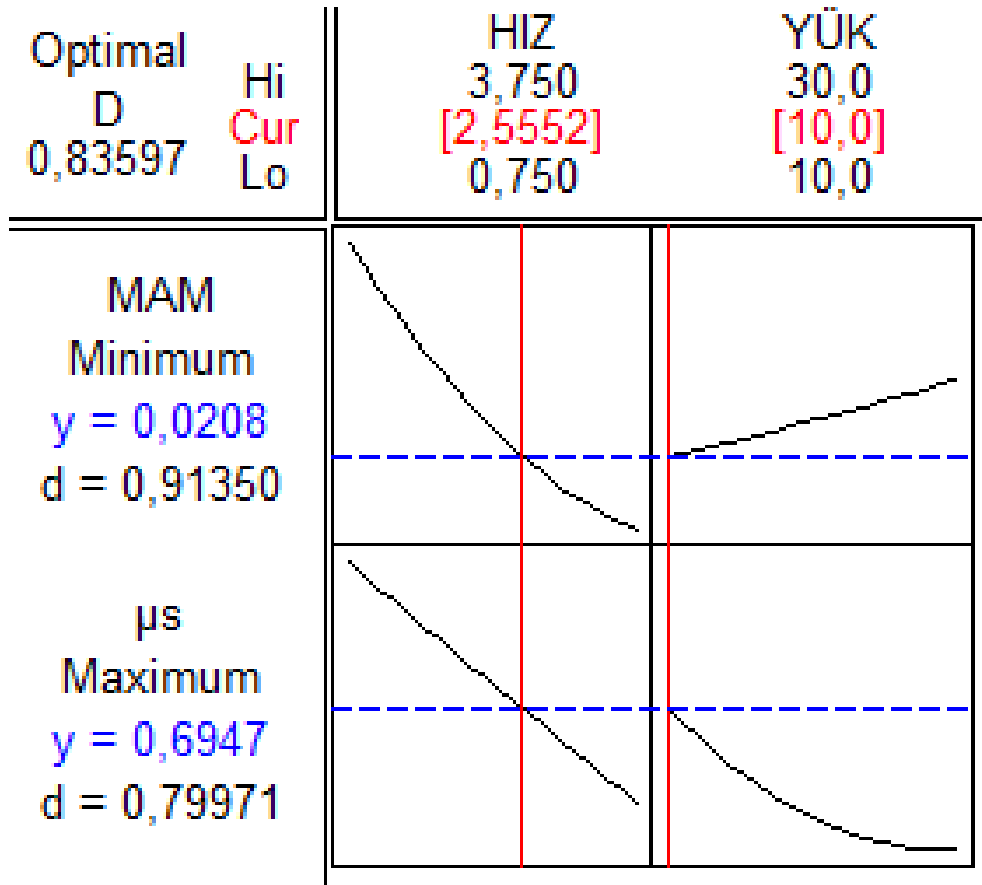


Şekil 5.60 ta % 2 KNT takviyeli karbon kumaş epoksi kompozit aşınma deneyi optimizasyonu sonucu elde edilen grafiklerdir. Optimizasyon yapılırken taşıyıcı kanallar düşünülerek yapılmıştır bundan dolayı minimum MAM ve minimum  $\mu_s$  değeri elde edilecek şekilde karbon kumaş kompozit malzeme optimize edilmiştir. Ortalama D değeri 0,72 çıkmıştır bu değer kabul edilen bir değerdir. Minimum MAM değeri 0,0322 gram ve minimum  $\mu_s$  değeri 0,4162 elde edilmiştir. Bu değeri elde etmek için gerekli hız 0,75 m/s ve yük te 26,89 N dur.



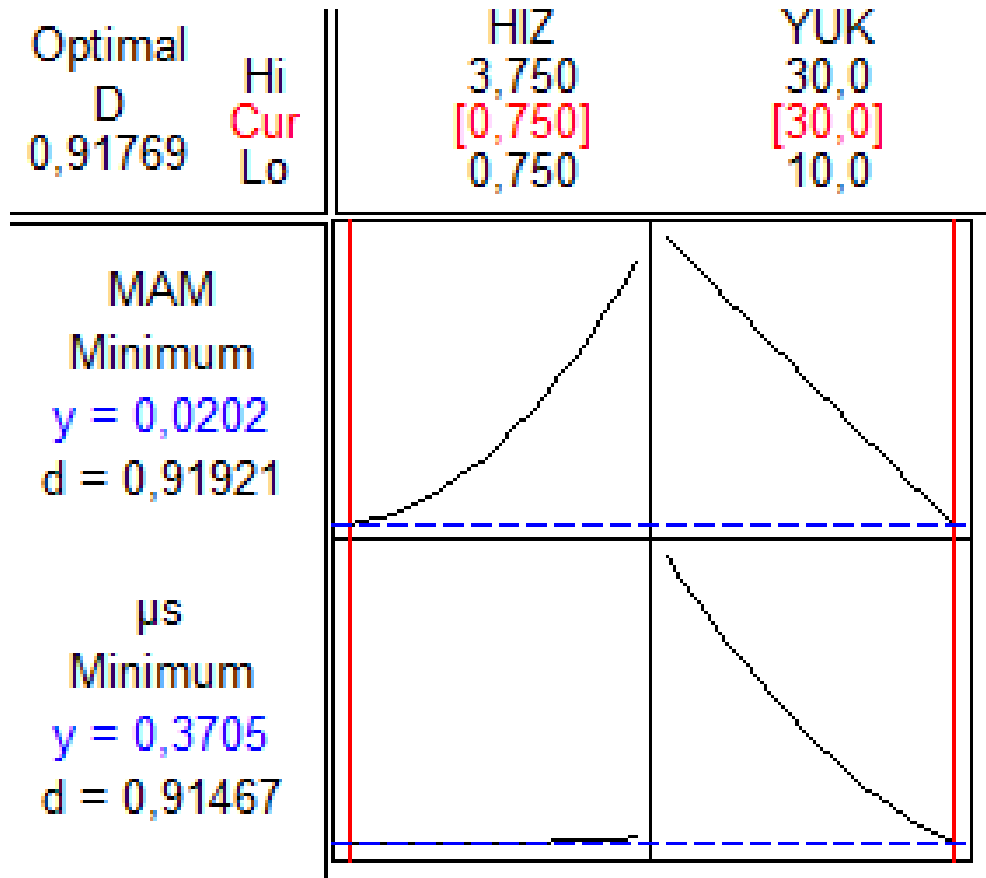
Şekil 5.60 % 2 KNT takviyeli Karbon Kumaş Epoksi Kompozit Aşınma Deneyi Optimizasyonu  
MAM<sub>(min)</sub>/  $\mu_s$ <sub>(min)</sub>

Şekil 5.61 da % 2 KNT takviyeli karbon kumaş epoksi kompozit aşınma deneyi optimizasyonu sonucu elde edilen grafiklerdir. Optimizasyon yapılırken süper spor araçlar ve hava araçları düşünülerek yapılmıştır bundan dolayı minimum MAM ve maksimum  $\mu_s$  değeri elde edilecek şekilde karbon kumaş kompozit malzeme optimize edilmiştir. Ortalama D değeri 0.835 çıkmıştır bu değer kabul edilebilir bir değerdir. Minimum MAM değeri 0,0208 gram ve maksimum  $\mu_s$  değeri 0,6947 elde edilmiştir. Bu değeri elde etmek için gerekli hız 2,55 m/s ve yük te 10 N dur.



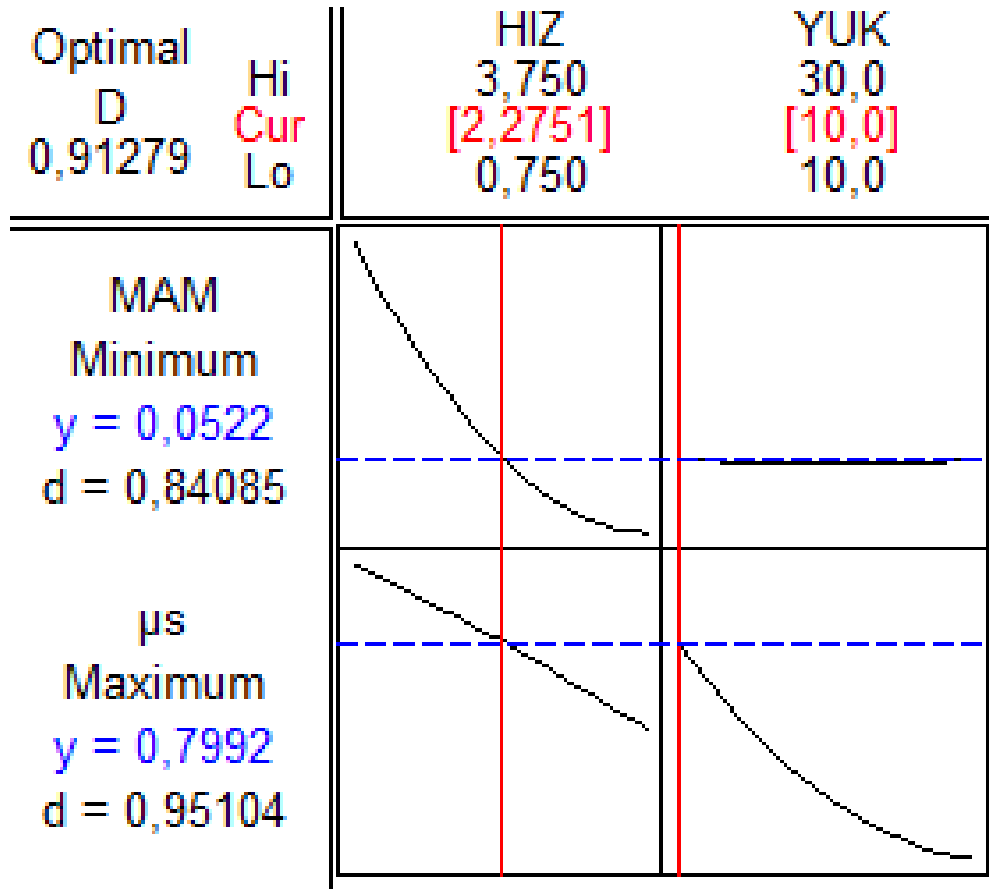
Şekil 5.61 % 1 BN Takviyeli Karbon Kumaş Epoksi Kompozit Aşınma Deneyi Optimizasyonu  
MAM<sub>(min)</sub>/  $\mu_s$ <sub>(maks)</sub>

Şekil 5.62 de % 1 BN takviyeli karbon kumaş epoksi kompozit aşınma deneyi optimizasyonu sonucu elde edilen grafiklerdir. Optimizasyon yapılırken taşıyıcı kanallar düşünülerek yapılmıştır bundan dolayı minimum MAM ve minimum  $\mu_s$  değeri elde edilecek şekilde karbon kumaş kompozit malzeme optimize edilmiştir. Ortalama D değeri 0,917 çıkmıştır bu değer ideale çok bir değerdir. Minimum MAM değeri 0,0202 gram ve minimum  $\mu_s$  değeri 0,3705 elde edilmiştir. Bu değeri elde etmek için gerekli hız 0,75 m/s ve yük te 30 N dur.



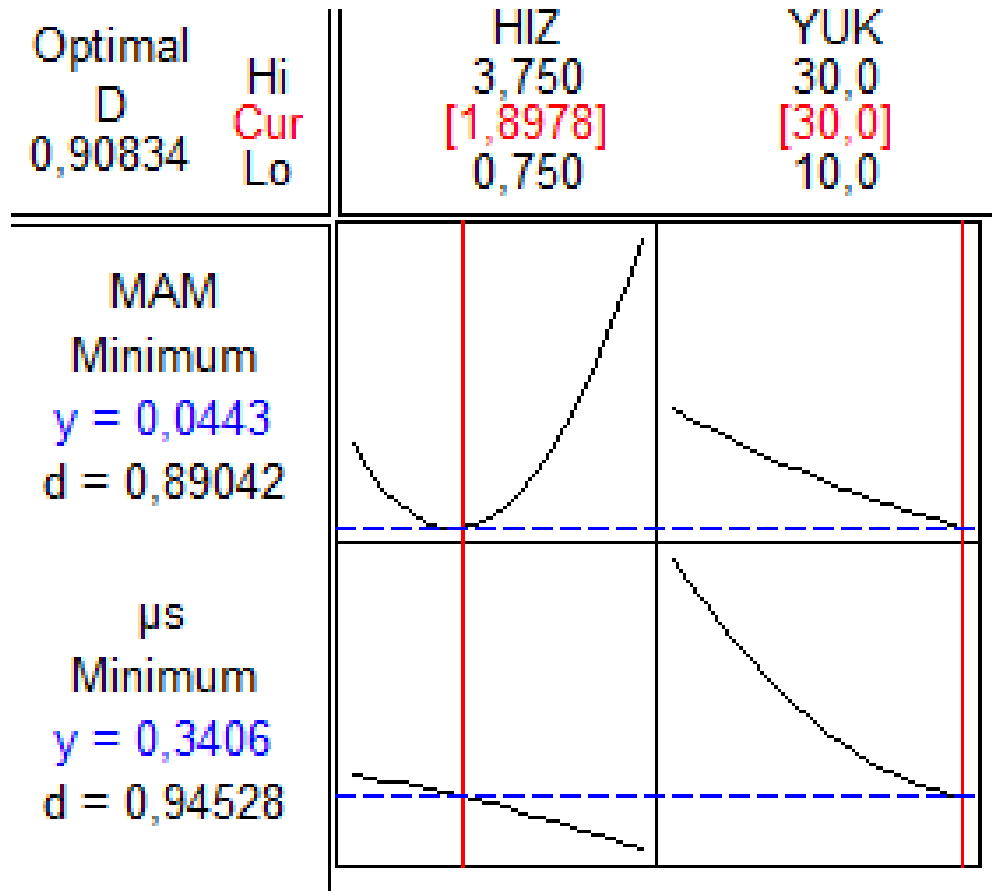
Şekil 5.62 % 1 BN takviyeli Karbon Kumaş Epoksi Kompozit Aşınma Deneyi Optimizasyonu MAM<sub>(min)</sub>/  
 $\mu_s$ (min)

Şekil 5.63 te % 0,5 (KNT+ BN) takviyeli karbon kumaş epoksi kompozit aşınma deneyi optimizasyonu sonucu elde edilen grafiklerdir. Optimizasyon yapılırken süper spor araçlar ve hava araçları düşünülerek yapılmıştır bundan dolayı minimum MAM ve maksimum  $\mu_s$  değeri elde edilecek şekilde karbon kumaş kompozit malzeme optimize edilmiştir. Ortalama D değeri 0.912 çıkmıştır bu değer kabul edilebilir bir değerdir. Minimum MAM değeri 0,0522 gram ve maksimum  $\mu_s$  değeri 0,7992 elde edilmiştir. Bu değeri elde etmek için gerekli hız 2,27 m/s ve yük 10 N dur.



Şekil 5.63 % 0,5 (KNT+ BN) Takviyeli Karbon Kumaş Epoksi Kompozit Aşınma Deneyi Optimizasyonu  
MAM<sub>(min)</sub>/  $\mu_s$ <sub>(maks)</sub>

Şekil 5.64 te % 0,5 (KNT+ BN) takviyeli karbon kumaş epoksi kompozit aşınma deneyi optimizasyonu sonucu elde edilen grafiklerdir. Optimizasyon yapılırken taşıyıcı kanallar düşünülerek yapılmıştır bundan dolayı minimum MAM ve minimum  $\mu_s$  değeri elde edilecek şekilde karbon kumaş kompozit malzeme optimize edilmiştir. Ortalama D değeri 0,908 çıkmıştır bu değer ideale çok bir değerdir. Minimum MAM değeri 0,0443 gram ve minimum  $\mu_s$  değeri 0,3406 elde edilmiştir. Bu değeri elde etmek için gerekli hız 1,8978 m/s ve yük te 30 N dur.



Şekil 5.64 % 0,5 (KNT+ BN) takviyeli Karbon Kumaş Epoksi Kompozit Aşınma Deneyi Optimizasyonu  
MAM<sub>(min)</sub>/  $\mu_s$ (min)

Tablo 5.17 Süper Spor Otomobiller ve Hava Araçları Frenleri İçin (Maksimum  $\mu_s$ , Minimum MAM)  
Optimize Edilmiş Malzemelerin Genel Tablosu

Malzemeler	HIZ(m/s)	YÜK(N)	MAM(gr)	$\mu_s$
SAF	1,9139	10	0,0569	0,4839
% 0,5 KNT	2,1343	10	0,0374	0,9170
%1 KNT	2,9758	10	0,0880	0,6566
%2 KNT	3,7500	10	0,0396	0,9358
%1 BN	2,5552	10	0,0208	0,6947
% 0,5 (KNT+BN)	2,2751	10	0,0522	0,7992

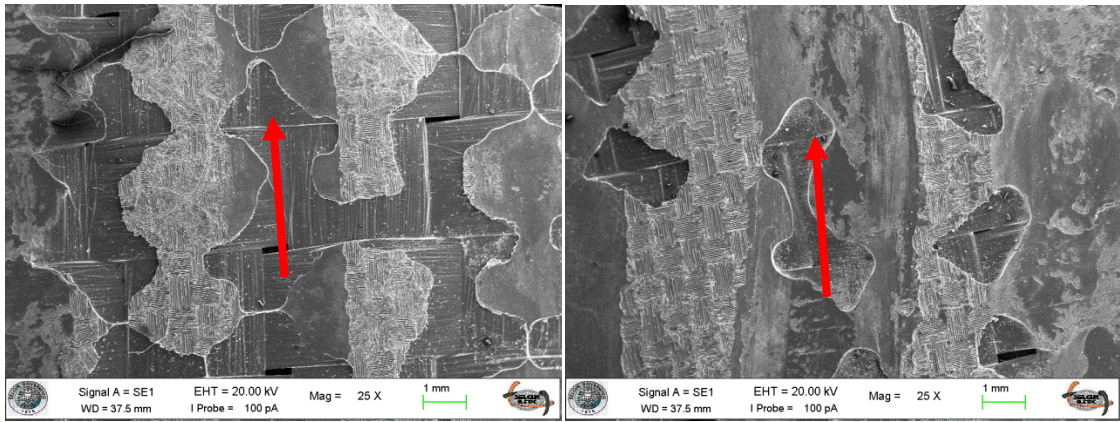
**Tablo 5.18** Taşıma Kanalları İçin (Minimum  $\mu s$ , Minimum MAM) Optimize Edilmiş Malzemelerin Genel Tablosu

Malzemeler	HIZ(m/s)	YÜK(N)	MAM(gr)	$\mu s$
SAF	3,7500	30	0,0259	0,1255
% 0,5 KNT	3,7500	30	0,0135	0,2741
% 1 KNT	0,7500	10	0,0475	0,1973
% 2 KNT	0,7500	26,8969	0,0322	0,4162
% 1 BN	0,7500	30	0,0202	0,3705
% 0,5 (KNT+BN)	1,8978	30	0,0443	0,3406

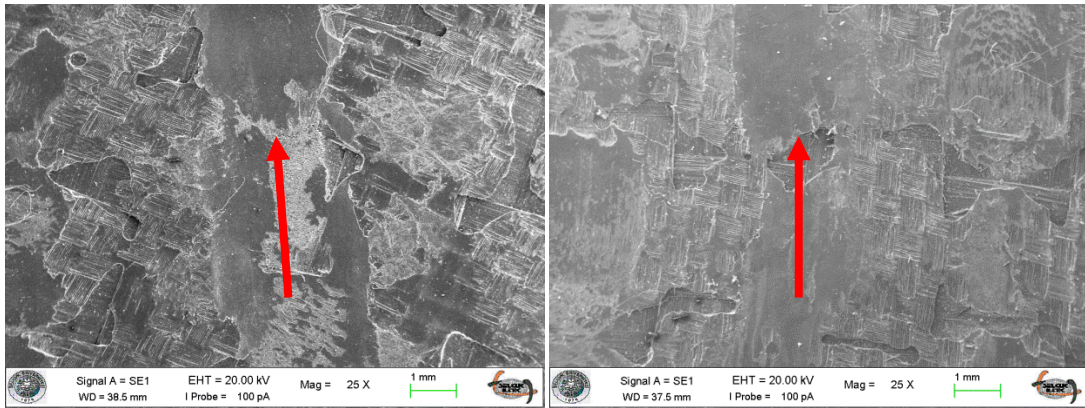
Tablo 5.17 ve Tablo 5.18 de Minitab® programı aracılığı ile yapılan tepki optimizasyonu sonuçları verilmiştir. Tablo 17 de günümüzde süper spor otomobil, tren ve hava araçlarında kullanılmaya başlayan ve hergeçen gün yaygınlaşan karbon kompozit frenler için modelleme yapılmıştır. Etkili ve uzun ömürlü fren için maksimum sürtünme minimum malzeme aşınması hedeflenmiştir ve optimizasyon buna göre yapılmıştır. Farklı malzemeler olmasına rağmen yük 10N da sabit kalmış hız 1.91 m/s ile 3.75 m/s arasında değişmiştir. Optimizasyon sonucu en az az MAM(gr) 0,0208 ile %1BN katılı kompozitte sağlanmıştır. En iyi frenleme ise  $\mu s=0,9258$  değeri ile %2 KNT takviyeli malzeme de sağlanmıştır. Tablo 5.17 bütün halinde incelendiğinde yüksek hızda sabit yükte en iyi  $\mu s$  değeri ve en az üçüncü MAM değeri %2 KNT takviyeli karbon kompozit malzemede sağlanmıştır. Bu malzeme fren için diğer malzemelere göre daha uygundur. Tablo 5.18 de taşıyıcı kanallar için modelleme yapılmıştır. Ömür maliyetlerinin düşük olması ve bakım süreleri uzun olması için MAM miktarı daha önemli olacak şekilde MAM ve  $\mu s$  değerleri minimize edilmiştir. Hız kompozit malzeme çeşitlerine göre 0.75 m/s ile 3.75 m/s ile değişen hızlarda elde edilmiştir. Yük ise 10 N ile 30 N arasında malzeme farklılığına göre değişen yükler olarak elde edilmiştir. En düşük MAM değeri 0,0135(gr) olarak % 0,5 KNT takviyeli karbon kompozitte elde edilmiştir. En düşük  $\mu s$  değeri ise 0,1255 olarak saf karbon kompozitte elde edilmiştir. Optimum şartlarda Tablo 5.17 bütün haliyle incelendiğinde yer altı petrol taşıma kanalları gibi bakımı değişimi zor olan ekipmanlarda %0,5 KNT takviyeli karbon kompozit kullanımı uygundur. Bunu sağlayan yüksek ömürlü düşük sürtünmeli olması ayrıca bunu yüksek hız ve yük altında sağlamasından dolayıdır.

## 5.6. Aşınma Sonucu Yüzey Analizi

Aşınma sonucu elde edilen aşınmış yüzeylerin yüzey durumlarını inceleyebilmek için SEM görüntüleri alınmıştır. Alınan SEM görüntülerinde nano partiküller tespit edilmiştir ve kırılan elyaflar gösterilmiştir. Genel görüntüler 25X yakınlaşma oranı ile, detaylı görüntüler ise 10000X yakınlaşma oranı ile alınmış ve elyaf kırıkları ve nano partiküller belirlenmiştir. Aşağıda önce elde edilen iki boyutlu 25X boyutunda görüntü örnekleri var bu örneklerden sonra 10000X görüntüler ve onların yorumları vardır

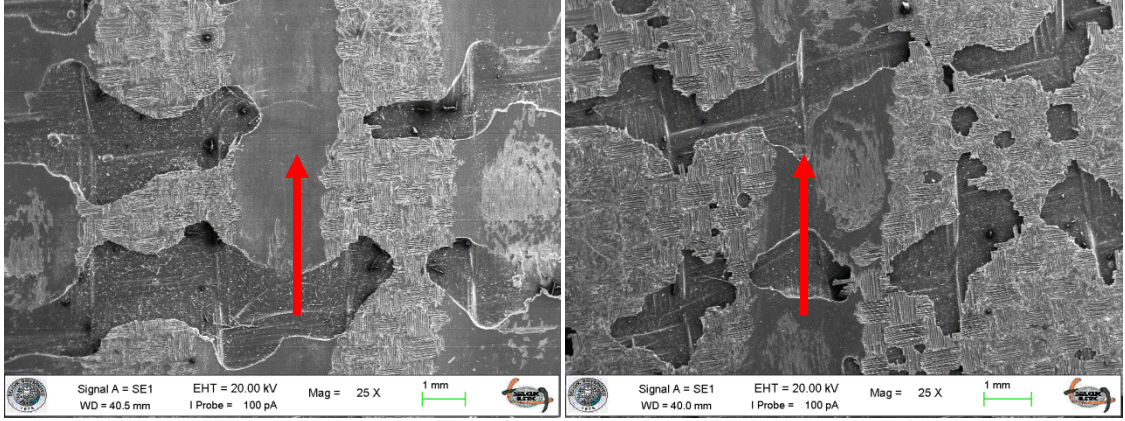


Şekil 5.65 Saf Karbon Kumaş/Epoksi Kompozit Aşınmış Yüzeyler (25X)

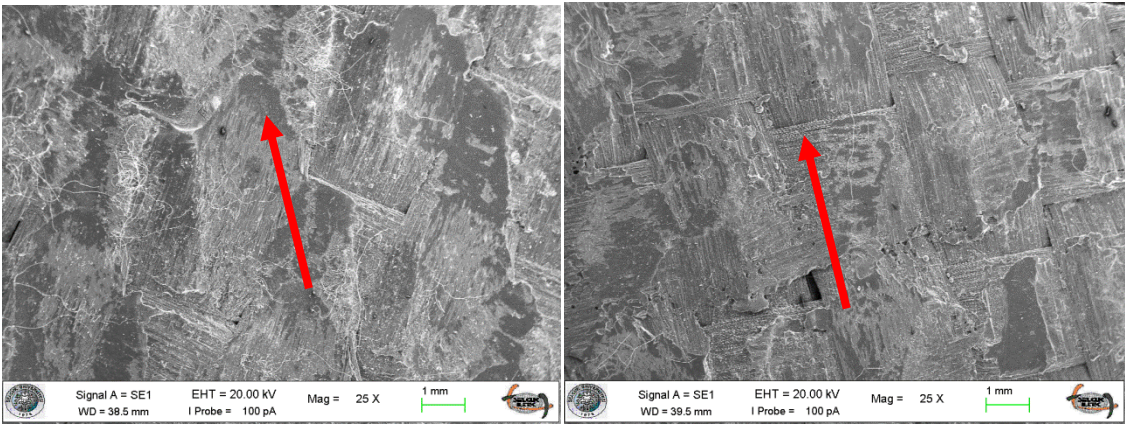


Şekil 5.66 % 0,5 KNT eklemeli Karbon Kumaş/Epoksi Kompozit Aşınmış Yüzeyler (25X)

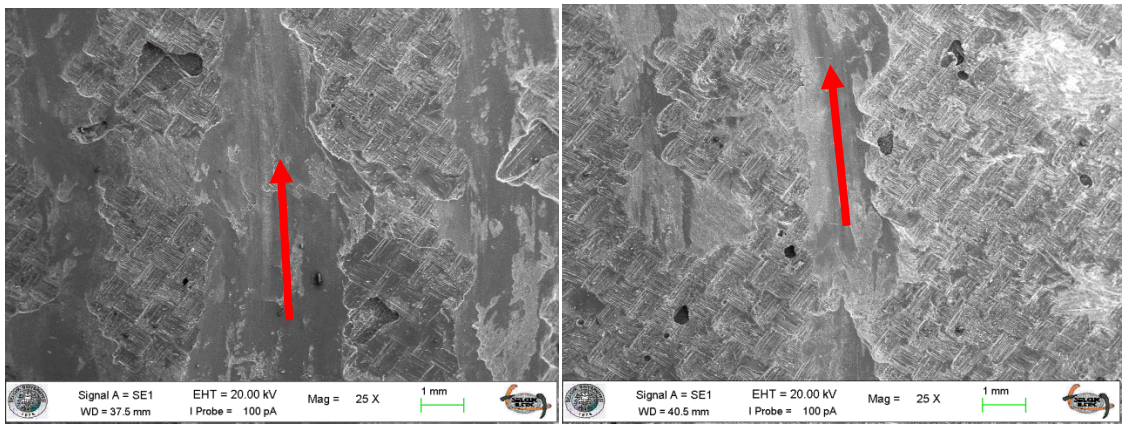




Şekil 5.67 %1 KNT eklemeli Karbon Kumaş/Epoksi Kompozit Aşınmış Yüzeyler (25X)

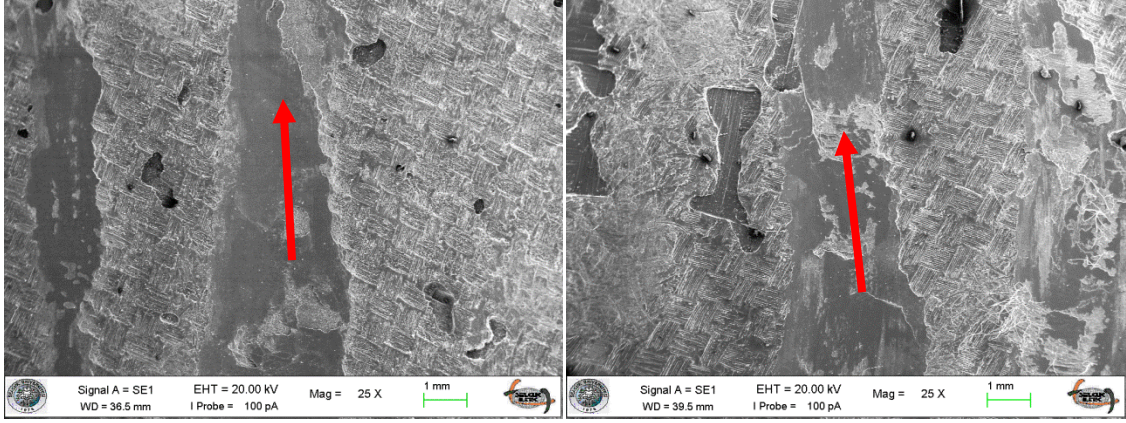


Şekil 5.68 %2 KNT eklemeli Karbon Kumaş/Epoksi Kompozit Aşınmış Yüzeyler (25X)

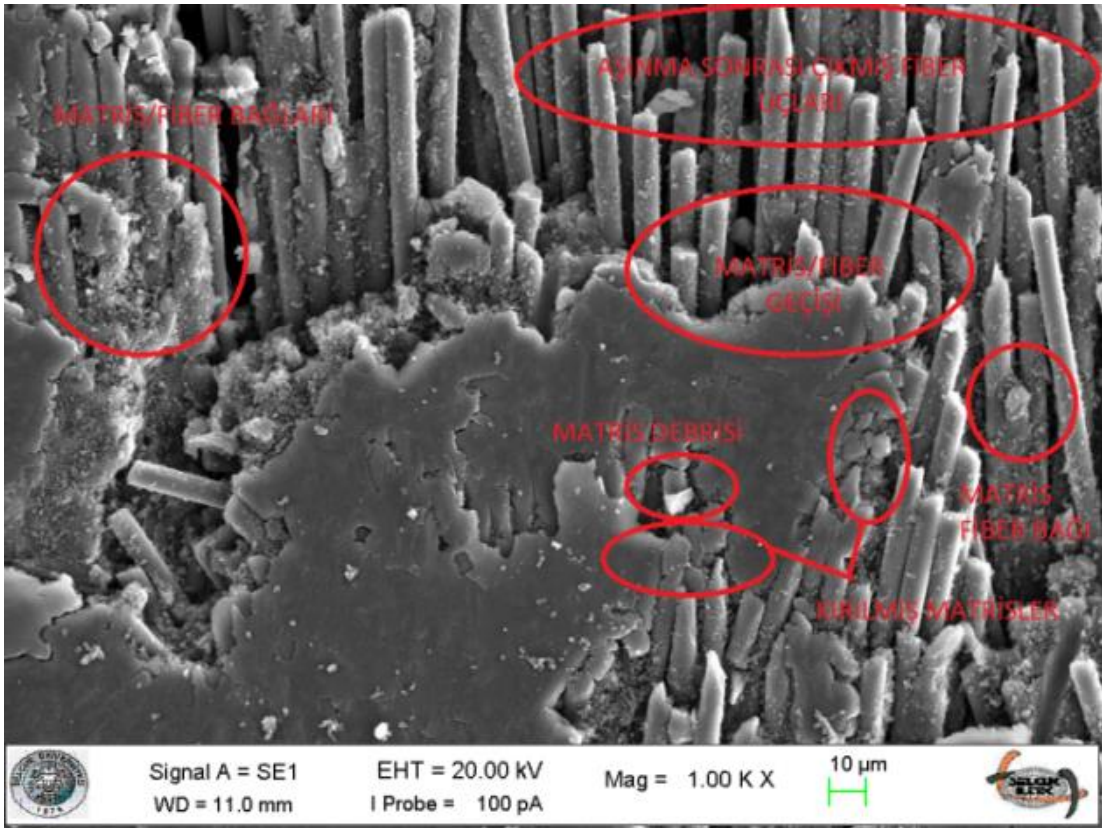


Şekil 5.69 %1 BN eklemeli Karbon Kumaş/Epoksi Kompozit Aşınmış Yüzeyler (25X)

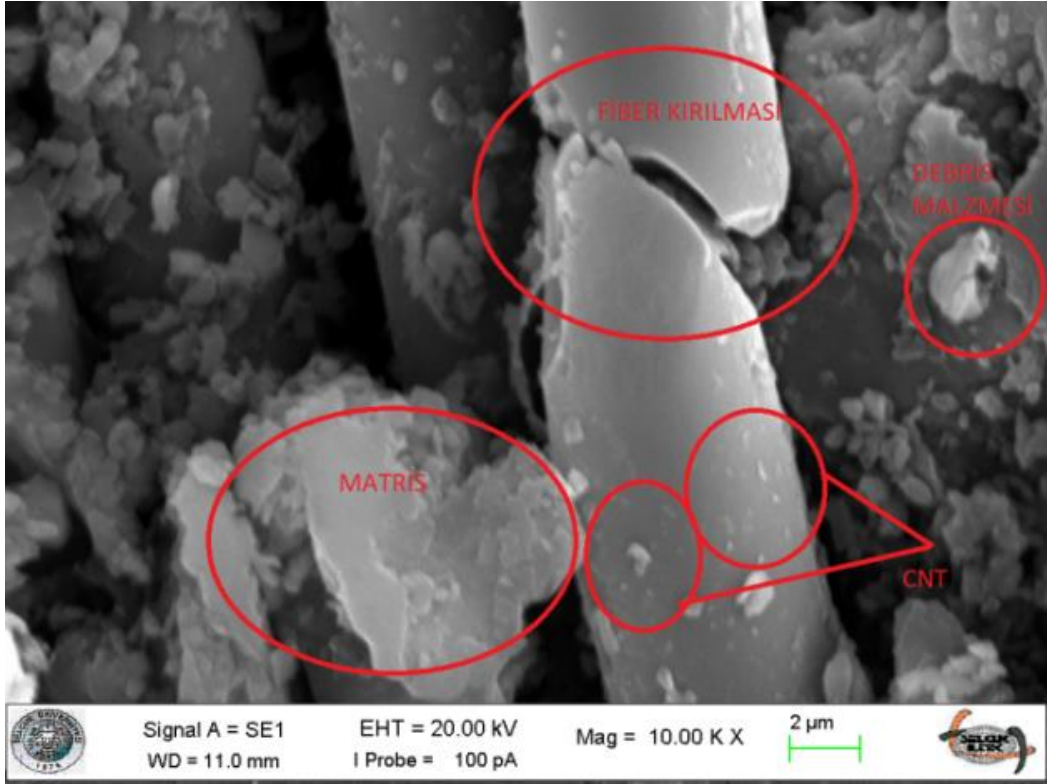




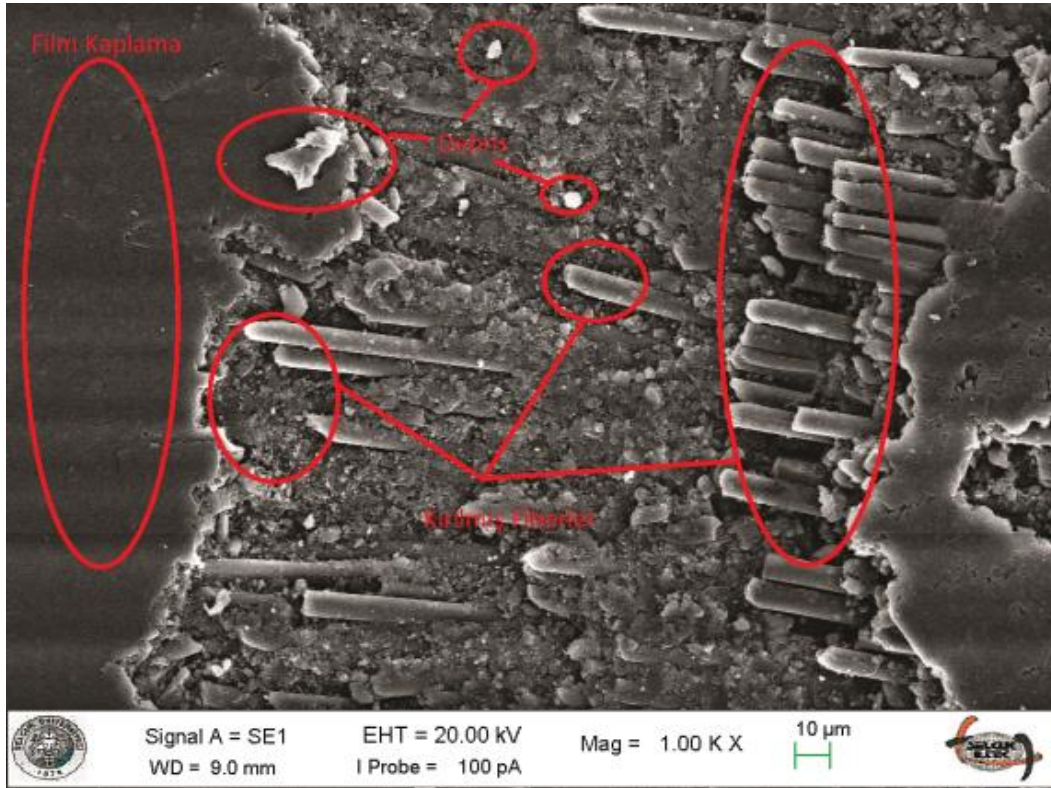
Şekil 5.70 % 0,5 (KNT+BN) eklemeli Karbon Kumaş/Epoksi Kompozit Aşınmış Yüzeyler (25X)



Şekil 5.71 %1 KNT eklemeli Karbon Kumaş/Epoksi Kompozit Aşınmış Yüzeylerde Elyaf Kırılması (1000X)

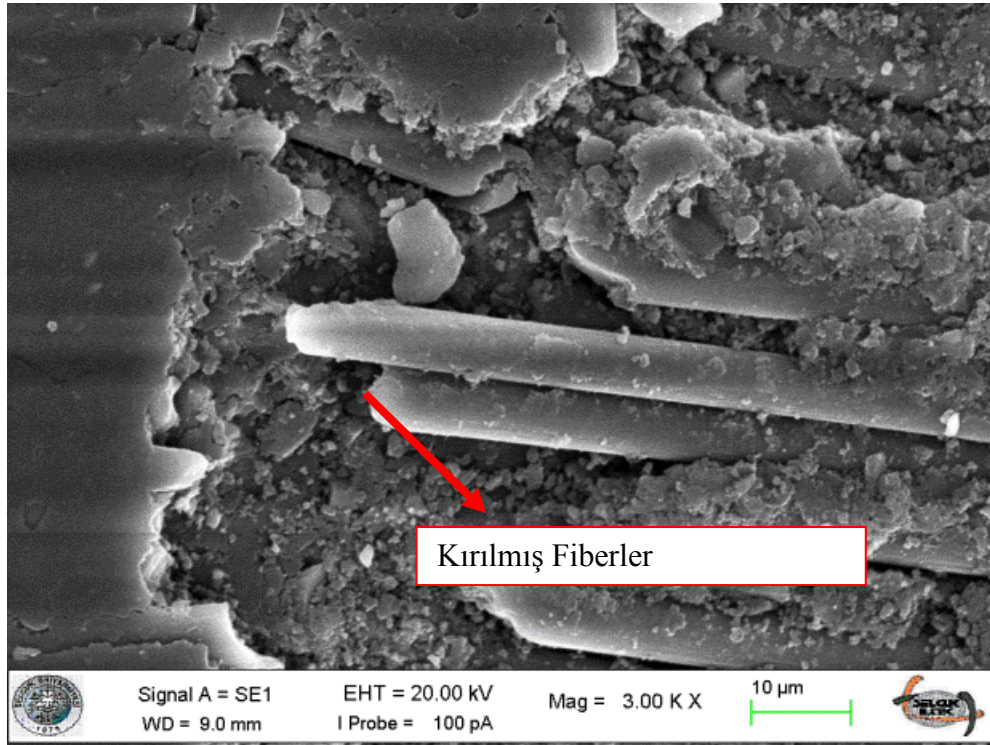


Şekil 5.72 %1 KNT eklemeli Karbon Kumaş/Epoksi Kompozit Aşınmış Yüzeylerde Elyaf Kırılması (10000X)

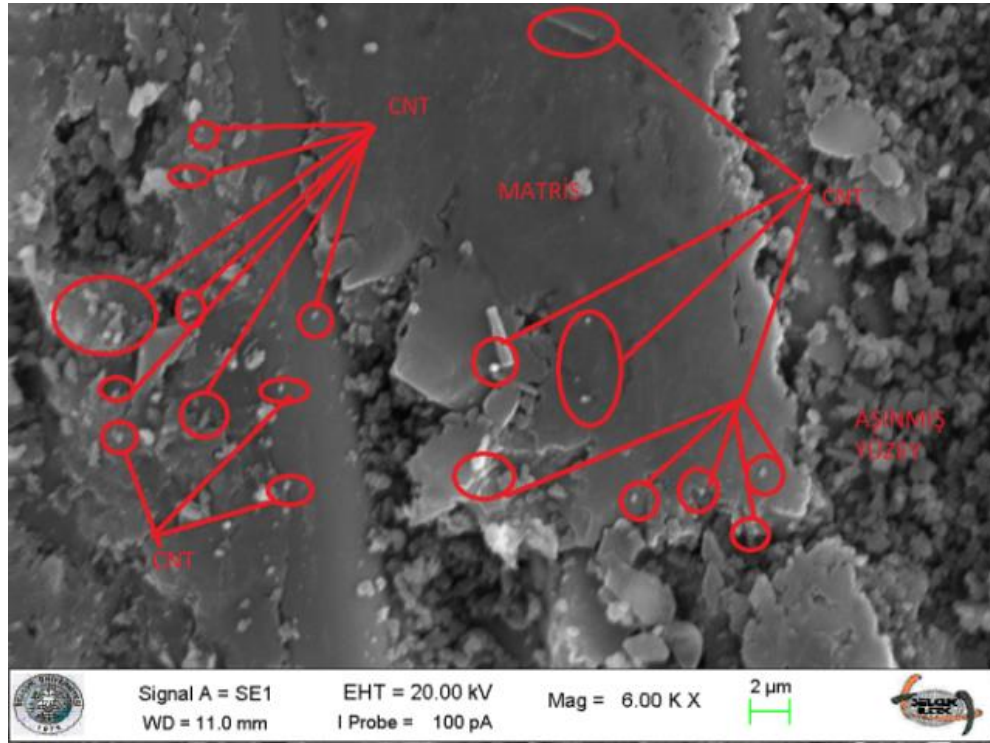


Şekil 5.73 % 0,5 KNT eklemeli Karbon Kumaş/Epoksi Kompozit Aşınmış Yüzeylerde Elyaf Kırılması (1000X)

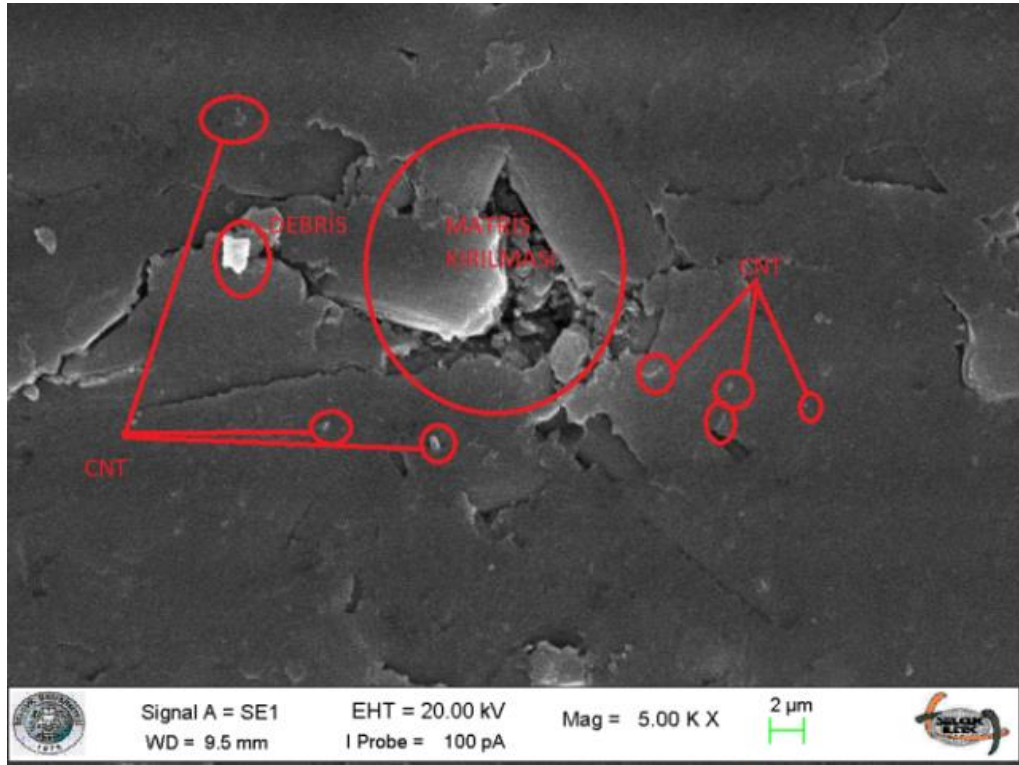




Şekil 5.74 % 0,5 KNT eklemeli Karbon Kumaş/Epoksi Kompozit Aşınmış Yüzeylerde Elyaf Kırılması (3000X)



Şekil 5.75 % 1KNT ve % 0,5 KNT eklemeli Karbon Kumaş/Epoksi Kompozit Aşınmış Yüzeylerde KNT Gösterimi (6000X)



**Şekil 5.76** %1KNT ve % 0,5 KNT eklemeli Karbon Kumaş/Epoksi Kompozit Aşınmış Yüzeylerde KNT Gösterimi (5000X)

Şekil 5.65 ten 5.76 ya kadar olan Şekiller saf ve nano partikül takviyeli karbon kumaş epoksi kompozit malzemelerin SEM görüntülerini içermektedir. Saf karbon kumaşta en fazla aşınmanın olduğu daha önce Şekil 5.15/5.16 da gösterilmiştir. Şekil 5.65 te SEM görüntüleri ile de Şekil 5.15/5.16 yla benzer sonuçlar göstermiştir. Şekil 5.66 % 0,5 KNT takviyesi içeren karbon kumaş epoksinin SEM görüntüsünü içermektedir. Aşınmış yüzey dikkatlice incelendiğinde aşınma miktarlarının çok az olduğu görülmüştür. Şekil 5.71-5.72-5.73 ve 5.74 %1 KNT ve % 0,5 KNT takviyeli karbon kompozit malzemedeki aşınma sonucu epoksidede aşınma ve elyaflarda kırılmayı gösteren SEM görüntülerini içermektedir. Şekil 5.75 ve 5.76 da içinde %1 KNT ve % 0,5 KNT içeren karbon kumaş/epoksi içeren nano kompozitlerin içinde ki KNT leri kırmızı daireler içine alınıp yerleri gösterilmiştir. %1 KNT içeren kompozit malzemedeki miktar olarak daha fazla olmasının sebebi yüzde olarak daha fazla KNT içermesindedir.

Bu tez altı ana bölümden oluşmaktadır bir sonraki bölüm tez de yapılan deneyler elde edilen matematiksel modeller ve optimizasyonlar sonucu elde edilen genel sonuçların çıkarımı ve çalışmanın devamında neler elde edebileceğini içermektedir.

## 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

### 6.1 Sonuçlar

Bu tez çalışmasında, karbon kumaş takviyeli epoksi matrisli kompozit malzemeler üretilmiş ayrıca epoksi matris, farklı miktarlarda karbon nanotüp ve nano bor nitrür kullanılarak modifiye edilmiştir. Toplamda altı farklı malzeme elde edilmiştir bunların dördü tek tip nano partikülle modifiye edilen, biri iki farklı nano partikülle modifiye edilen hibrit ve sonuncusu da içinde nano partikül içermeyen saf karbon kumaş epoksi matrisli numunedir. Üretimi yapılan karbon kumaş takviyeli epoksi matrisli nano kompozit malzeme (Epoksi/KK), nano partikül katkılı karbon kumaş takviyeli epoksi matrisli nanokompozit malzeme (KNT-Epoksi/KK), (BN-Epoksi/KK) ve (KNT+BN-Epoksi/KK) mekanik çekme testlerine tabi tutulmuş ayrıca aşınma deneyleri yapılmıştır. Çekme deneyleri her bir malzeme için numuneler ASTM kurallarına uygun bir şekilde hazırlanıp çekme deneyleri uygulanmıştır. Aşınma deneyleri yapılmadan önce aşınmaya etki eden parametreler ve parametrelerin etkileri literatür taraması yapılarak tek tek tespit edilmiştir. Literatür taraması sonucunda elde edilen veriler ışığında yol sabit tutularak, belli aralıklar arasında beş farklı yük (N) ve hız (m/s) tespit edilmiştir. Deneylerin sayısını azaltmak, matematiksel modeller bulmak ve optimizasyon yapabilmek için; deney tasarım metodolojilerinden (DTM) olan tepki yüzey metodu (TYM) kullanılmıştır. Deney tasarımı yaparken hazır program olan MİNİTAB® kullanılmıştır. Ayrıca regresyon analizi, matematiksel modellemeler, optimizasyon, etkileşim Şekilleri ve temel etki Şekilleri MİNİTAB® programı ile elde edilmiştir. TYM bize iki girdi parametresi olan yük (N) ve hız (m/s) için 13 farklı deney oluşturmuştur, bu 13 farklı deneyin bir kısmı tekrardan ibarettir. Bunların tekrar etmesinin sebebi yapılan deneyin doğasında ki rastgele oluşan hataları ve deneylerin ne derecede tutarlı olduğunu görmek içindir. Ayrıca literatür taramaları verileri ışığında aşınma deneyleri sonucunda elde edilen birçok çıktı parametresi arasında en önemlileri olanların malzeme aşınma miktarı (MAM) ve sürtünme katsayısı ( $\mu$ s) olduğu tespit edilmiştir. 13 farklı deney aşınma deneyi 6 farklı malzeme için uygulanmış ve toplamda 78 aşınma deneyi yapılmıştır. Elde edilen çıktı değerleri MİNİTAB® programına girilerek; istenilen matematiksel modellemeler, regresyon analizleri, optimizasyon ve yukarıda bahsi geçen geri kalan Şekiller elde edilmiştir. Deneyler Tez çalışması sonrası elde edilen veriler şu şekildedir:

- Her anlamda çekme dayanımı en yüksek karbon kumaş kompozit içinde %1 miktarda KNT bulunan kompozit olduğunu gösteriyor.
- Ayrıca diğer nano partiküllerinde gerilme kuvvetini arttırdığı görülmektedir ama % 0,5 KNT ve %2 KNT takviyeli kompozitler daha gevrek bir hal almış her ne kadar gerilme mukavemetleri yüksek olsa da gerinmeleri daha düşüktür.

- Sabit yük ve hız altında (yük=20N, hız= 2,25 m/s), içinde KNT içerenler arasında KNT%2 ve KNT% 0,5 en yüksek  $\mu$ s değerleri bu iki malzeme de olduğu görülmüştür.
- Sabit yük ve hız altında (yük=20N, hız= 2,25 m/s), içeriğinde %1 nano partikül içeren malzemelerin arasında birbiri ile ve saf karbon kumaş kompozitle karşılaştırılması sonuçlarına göre en düşük aşınma direncinin %1KNT ile iyileştirilmiş karbon kumaş kompozitin olduğunu gösteriyor.
- Sabit yük ve hız altında (yük=20N, hız= 2,25 m/s), KNT% 0,5 en yüksek  $\mu$ s değerine sahip olsada malzeme aşınma miktarının çok daha düşük olduğu görülmüştür.
- Sabit yük ve hız altında (yük=20N, hız= 2,25 m/s), En yüksek aşınma miktarı saf karbon kompozitte gerçekleşmiştir.
- Sabit yük ve hız altında (yük=20N, hız= 2,25 m/s), KNT takviyesinin aşınma miktarını oldukça düşürdüğünü söylemek mümkündür.
- Sabit yük ve hız altında (yük=20N, hız= 2,25 m/s), en düşük aşınma miktarı % 0,5 (KNT+BN) içeren karbon kompozitte görülmüştür. Onu %1 KNT, %1 BN ile güçlendirilmiş karbon kompozit takip etmiştir.
- Sabit yük ve hız altında (yük=20N, hız= 2,25 m/s), % 0,5 BN ve % 0,5 KNT içeren karbon kompozitte % 0,5 KNT içeren karbon kompozitten daha fazla aşınma olma sebebi içinde % 0,5 BN içermesi ve aşınma miktarını yukarıya çekmesindedir.
- Optimizasyon sürecinde maksimum sürtünme minimum malzeme aşınması hedeflenmiştir ve optimizasyon buna göre yapılmıştır.
- Bütün malzemelerde optimizasyon için yük 10N da sabit kalmış hız 1.91 m/s ile 3.75 m/s arasında değişmiştir.
- Optimizasyon sonucunda maksimum sürtünme minimum malzeme aşınması için de en az MAM(gr) 0,0208 ile %1BN katılı kompozitte sağlanmıştır.
- Optimizasyon sonucunda maksimum sürtünme minimum malzeme aşınması için de  $\mu$ s=0,9258 değeri ile %2 KNT takviyeli malzeme de sağlanmıştır.
- Optimizasyon sonucunda maksimum sürtünme minimum malzeme aşınması için yüksek hızda sabit yükte en iyi  $\mu$ s değeri ve en az üçüncü MAM değeri %2 KNT takviyeli karbon kompozit malzemedede sağlanmıştır.
- Optimizasyon yaparken MAM miktarı daha önemli olacak şekilde MAM ve  $\mu$ s değerleri minimize edilmiştir. Hız kompozit malzeme çeşitlerine göre 0.75

m/s ile 3.75 m/s ile değişen hızlarda elde edilmiştir. Yük ise 10 N ile 30 N arasında malzeme farklılığına göre değişen yükler olarak elde edilmiştir.

Optimizasyonda MAM değeri daha önemli olacak şekilde yapıldığında En düşük MAM değeri 0,0135(gr) olarak %0,5 KNT takviyeli karbon kompozitte elde edilmiştir. En düşük  $\mu_s$  değeri ise 0,1255 olarak saf karbon kompozitte elde edilmiştir.

## 6.2. Öneriler

### 6.2.1. Nerelerde Kullanılır

Bu çalışmada farklı mekanik özelliklere sahip karbon kumaş takviyeli saf, nano parçacık takviyeli ve hibrit malzemeler üretilmiş ve bunların aşınmalarının matematiksel modellemesi ve optimizasyonu yapılmıştır. Optimizasyon iki farklı model üzerinde yapılmıştır; bunlardan biri için maksimum sürtünme minimum aşınma, diğeri için minimum sürtünme ve minimum aşınma durumları göz önüne alınmıştır. İlk modelde fren ve dişli gibi malzemeler, ikinci model de ise kanal ve benzeri ürünler için modelleme yapılmıştır. Etkili ve uzun ömürlü fren için maksimum sürtünme minimum malzeme aşınması hedeflenmiştir ve optimizasyon buna göre yapılmıştır.  $\mu_s=0,9258$  değeri ile %2 KNT takviyeli malzeme de sağlanmıştır. Bu ürün kısa ve etkili fren mesafeleri için uygundur. Ayrıca optimum şartlarda yer altı petrol taşıma kanalları gibi bakımı değişimi zor olan ekipmanlarda %0,5 KNT takviyeli karbon kompozit kullanımı uygundur. Bunu sağlayan yüksek ömürlü düşük sürtünmeli olması ayrıca bunu yüksek hız ve yük altında sağlamasından dolayıdır.

### 6.2.1. Çalışmanın Bir Sonra ki Aşaması

Bu çalışmada aşınma ve çekme için her ne kadar 6 farklı numune kullanılmış olsa da aslında üretim aşamasında 11 farklı ürün üretilmiştir. Geriye kalan 5 farklı ürün içinde aşınma testleri ve çekme testleri uygulanabilir ve yukarıda bahsi geçen ihtiyaçlar için daha gelişmiş malzemeler bulunabilir.

Bu çalışmada elde edilen matematiksel modeller C+ tabanlı ve Matlab tabanlı programlarla ara yüz ve yapay zeka yardımıyla çift yönlü paket programlar yapılabilir. Kullanıcı istediği sonuçları girdiği zaman hangi parametrelerle çalışması gerektiğini

paket program kendine söyler veya girdi parametrelerini istediği miktarda girer ve çıktı parametrelerini alabilir

Bu çalışmada yüzey analizi için SEM görüntüleri alınmış ama yüzey için Şekil işleme metodu kullanılmamıştır. Eğer Şekil işleme metodu kullanılırsa yüzey topografyası elde edilir ve yüzey analizleri yapılabilir. Elde edilen yüzey analizleride matematiksel modellemede çıktı değerleri olarak kullanılır ve hangi sürede yüzey ne aşamaya gelir önceden tahmin edilebilir olunur.





## KAYNAKLAR

- Ahmad, I., Kennedy, A., & Zhu, Y. Q. (2010). Wear resistant properties of multi-walled carbon nanotubes reinforced Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanocomposites. *Wear*, 269(1–2), 71–78. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2010.03.009>
- Ahmadijokani, F., Alaei, Y., Shojaei, A., Arjmand, M., & Yan, N. (2019). Frictional behavior of resin-based brake composites: Effect of carbon fibre reinforcement. *Wear*, 421(December 2018), 108–115. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2018.12.098>
- Andrich, M., Hufenbach, W., Kunze, K., & Scheibe, H. J. (2013). Characterisation of the friction and wear behaviour of textile reinforced polymer composites in contact with diamond-like carbon layers. *Tribology International*, 62, 29–36. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2013.01.023>
- Barari, B., Omrani, E., Dorri Moghadam, A., Menezes, P. L., Pillai, K. M., & Rohatgi, P. K. (2016). Mechanical, physical and tribological characterization of nano-cellulose fibers reinforced bio-epoxy composites: An attempt to fabricate and scale the “Green” composite. *Carbohydrate Polymers*, 147, 282–293. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.03.097>
- Chanda, A., Sinha, S. K., & Datla, N. V. (2019). Tribological studies of epoxy-carbon nanofiber composites – Effect of nanofiber alignment using AC electric field. *Tribology International*, 138(June), 450–462. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.06.014>
- Chaudhary, V., Bajpai, P. K., & Maheshwari, S. (2018). An Investigation on Wear and Dynamic Mechanical behavior of Jute/Hemp/Flax Reinforced Composites and Its Hybrids for Tribological Applications. *Fibers and Polymers*, 19(2), 403–415. <https://doi.org/10.1007/s12221-018-7759-6>
- Chen, B., Wang, J., & Yan, F. (2012). Synergism of carbon fiber and polyimide in polytetrafluoroethylene-based composites: Friction and wear behavior under sea water lubrication. *Materials and Design*, 36, 366–371. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.11.034>
- Dhieb, H., Buijnsters, J. G., Elleuch, K., & Celis, J. P. (2016). Effect of relative humidity and full immersion in water on friction, wear and debonding of unidirectional carbon fiber reinforced epoxy under reciprocating sliding. *Composites Part B: Engineering*, 88, 240–252. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.11.011>
- Golchin, A., Wikner, A., & Emami, N. (2016). An investigation into tribological behaviour of multi-walled carbon nanotube/graphene oxide reinforced UHMWPE in water lubricated contacts. *Tribology International*, 95, 156–161. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2015.11.023>
- Guermazi, N., Haddar, N., Elleuch, K., & Ayedi, H. F. (2014). Investigations on the fabrication and the characterization of glass/epoxy, carbon/epoxy and hybrid composites used in the reinforcement and the repair of aeronautic structures. *Materials and Design*, 56, 714–724. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.11.043>
- Guignier, C., Bueno, M. A., Camillieri, B., Tournalias, M., & Durand, B. (2015). Tribological behaviour and wear of carbon nanotubes grafted on carbon fibres. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 71, 168–175. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2015.01.013>
- Hanumantharaya, R., Vaishak, N. L., Suhas, Davanageri, M. B., Quadros, J. D., & Premkumar, B. G. (2018). Mechanical and Tribological Wear Behavior of Epoxy Hybrid Composites. *Materials Today: Proceedings*, 5(2), 7947–7953. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.11.477>

- Hao, Y., Zhou, X., Shao, J., & Zhu, Y. (2019). The influence of multiple fillers on friction and wear behavior of epoxy composite coatings. *Surface and Coatings Technology*, 362(November 2018), 213–219. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.01.110>
- Jesthi, D. K., Mandal, P., Rout, A. K., & Nayak, R. K. (2018). Enhancement of mechanical and specific wear properties of glass/carbon fiber reinforced polymer hybrid composite. *Procedia Manufacturing*, 20, 536–541. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.02.080>
- Jie, F., Li, W., Huang, J., Cao, L., & Yao, C. (2016). Variation of the tribological properties of carbon fabric composites in their whole service life. *Tribology International*, 99, 29–37. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2016.03.006>
- Kafi, A., Huson, M., Creighton, C., Khoo, J., Mazzola, L., Gengenbach, T., ... Fox, B. (2014). Effect of surface functionality of PAN-based carbon fibres on the mechanical performance of carbon/epoxy composites. *Composites Science and Technology*, 94, 89–95. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2014.01.011>
- Lee, H. G., Hwang, H. Y., & Lee, D. G. (2006). Effect of wear debris on the tribological characteristics of carbon fiber epoxy composites. *Wear*, 261(3–4), 453–459. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2005.12.012>
- Lin, L., & Schlarb, A. K. (2019). Recycled carbon fibers as reinforcements for hybrid PEEK composites with excellent friction and wear performance. *Wear*, 432–433(April), 202928. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.202928>
- Mangam, V., Bhattacharya, S., Das, K., & Das, S. (2010). Friction and wear behavior of Cu-CeO<sub>2</sub> nanocomposite coatings synthesized by pulsed electrodeposition. *Surface and Coatings Technology*, 205(3), 801–805. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2010.07.119>
- Miller, J. C., Serrato, R., Represas-Cardenas, J. M., & Kundahl, G. (2005). *The Handbook of Nanotechnology - Business, Policy, and Intellectual Property Law*. <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2005.01.006>
- Moghimi Monfared, R., Ayatollahi, M. R., & Barbaz Isfahani, R. (2018). Synergistic effects of hybrid MWKNT/nanosilica on the tensile and tribological properties of woven carbon fabric epoxy composites. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 96(April), 272–284. <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2018.05.007>
- Nuruzzaman, D. M., Chowdhury, M. A., Rahman, M. M., Kowser, M. A., & Roy, B. K. (2015). Experimental investigation on friction coefficient of composite materials sliding against SS 201 and SS 301 counterfaces. *Procedia Engineering*, 105(Ict 2014), 858–864. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.05.106>
- Omriani, E., Barari, B., Dorri Moghadam, A., Rohatgi, P. K., & Pillai, K. M. (2015). Mechanical and tribological properties of self-lubricating bio-based carbon-fabric epoxy composites made using liquid composite molding. *Tribology International*, 92, 222–232. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2015.06.007>
- Panda, J. N., Bijwe, J., & Pandey, R. K. (2019). Optimization of the amount of short glass fibers for superior wear performance of PAEK composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 116(October 2018), 158–168. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2018.10.034>
- Papadopoulos, A., Gkikas, G., Paipetis, A. S., & Barkoula, N. M. (2016). Effect of KNTs addition on the erosive wear response of epoxy resin and carbon fibre composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 84, 299–307. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2016.02.012>
- Peng, Q. Y., Cong, P. H., Liu, X. J., Liu, T. X., Huang, S., & Li, T. S. (2009). The preparation of PVDF/clay nanocomposites and the investigation of their

- tribological properties. *Wear*, 266(7–8), 713–720.  
<https://doi.org/10.1016/j.wear.2008.08.010>
- Ramesh, B. N., & Suresha, B. (2014). Optimization of tribological parameters in abrasive wear mode of carbon-epoxy hybrid composites. *Materials and Design*, 59, 38–49. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.02.023>
- Rana, S., Bhattacharyya, A., Parveen, S., Fangueiro, R., Alagirusamy, R., & Joshi, M. (2014). Comparative studies on the processing and performance of carbon nanotube and nanofibre based multi-scale composites. *16th European Conference on Composite Materials, ECCM 2014*, (June), 22–26.
- Sahin, Y., & Tokdede, A. S. (2017). *The effect of fiber orientation on the dry wear behaviour of carbon fibre- reinforced epoxy composites* *The effect of fiber orientation on the dry wear behaviour of carbon fibre- reinforced epoxy composites*. (June).
- Schön, J. (2004). Coefficient of friction and wear of a carbon fiber epoxy matrix composite. *Wear*, 257(3–4), 395–407. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2004.01.008>
- Shalwan, A., & Yousif, B. F. (2014). Influence of date palm fibre and graphite filler on mechanical and wear characteristics of epoxy composites. *Materials and Design*, 59, 264–273. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.02.066>
- Shivamurthy, B., Udaya Bhat, K., & Anandhan, S. (2013). Mechanical and sliding wear properties of multi-layered laminates from glass fabric/graphite/epoxy composites. *Materials and Design*, 44, 136–143. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.07.059>
- Subbaya, K. M., Suresha, B., Rajendra, N., & Varadarajan, Y. S. (2012). Grey-based Taguchi approach for wear assessment of SiC filled carbon-epoxy composites. *Materials and Design*, 41, 124–130. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.04.051>
- Sudarshan Rao, K., Varadarajan, Y. S., & Rajendra, N. (2015). Erosive Wear Behaviour of Carbon Fiber-reinforced Epoxy Composite. *Materials Today: Proceedings*, 2(4–5), 2975–2983. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2015.07.280>
- Suresha, B., Chandramohan, G., Samapthkumaran, P., Seetharamu, S., & Vynatheya, S. (2006). Friction and wear characteristics of carbon-epoxy and glass-epoxy woven roving fiber composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 25(7), 771–782. <https://doi.org/10.1177/0731684406063540>
- Suresha, B., & Kumar, K. N. S. (2009). Investigations on mechanical and two-body abrasive wear behaviour of glass/carbon fabric reinforced vinyl ester composites. *Materials and Design*, 30(6), 2056–2060.  
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2008.08.038>
- Suresha, B., Shiva Kumar, K., Seetharamu, S., & Sampath Kumaran, P. (2010). Friction and dry sliding wear behavior of carbon and glass fabric reinforced vinyl ester composites. *Tribology International*, 43(3), 602–609.  
<https://doi.org/10.1016/j.triboint.2009.09.009>
- Suresha, B., Siddaramaiah, Kishore, Seetharamu, S., & Kumaran, P. S. (2009). Investigations on the influence of graphite filler on dry sliding wear and abrasive wear behaviour of carbon fabric reinforced epoxy composites. *Wear*, 267(9–10), 1405–1414. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2009.01.026>
- Upadhyay, R. K., & Kumar, A. (2019). Epoxy-graphene-MoS<sub>2</sub> composites with improved tribological behavior under dry sliding contact. *Tribology International*, 130(September 2018), 106–118. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2018.09.016>
- vincenzo turco liveri. (2006). *controlled synthesis of nanoparticles in microheterogeneous system*.
- Wu, J., Huang, X., Berglund, K., Lu, X., Feng, X., Larsson, R., & Shi, Y. (2018). CuO nanosheets produced in graphene oxide solution: An excellent anti-wear additive

- for self-lubricating polymer composites. *Composites Science and Technology*, 162(April), 86–92. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2018.04.020>
- Xian, G., Walter, R., & Hauptert, F. (2006). Friction and wear of epoxy/TiO<sub>2</sub> nanocomposites: Influence of additional short carbon fibers, Aramid and PTFE particles. *Composites Science and Technology*, 66(16), 3199–3209. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2005.02.022>
- Yu, S., Hu, H., Ma, J., & Yin, J. (2008). Tribological properties of epoxy/rubber nanocomposites. *Tribology International*, 41(12), 1205–1211. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2008.03.001>
- Zhou, H., Wang, H., Du, X., Mo, Y., Yuan, H., & Liu, H. Y. (2019). Hybrid three-dimensional graphene fillers and graphite platelets to improve the thermal conductivity and wear performance of epoxy composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 123(April), 270–277. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2019.05.016>
- Zhou, X. H., Sun, Y. S., & Wang, W. S. (2009). Influences of carbon fabric/epoxy composites fabrication process on its friction and wear properties. *Journal of Materials Processing Technology*, 209(9), 4553–4557. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.10.038>
- ( ASTM D 3039, 2005. Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials, Space Simulation; Aerospace and Aircraft; Composite Materials, Annual Book of ASTM, Philadelphia.)
- Sinnott and Andrews Critical Reviews in Solid State and Material Sciences 26(3):145-249 · July 2001 DOI: 10.1080/20014091104189
- Montgomery, Douglas C. Design and Analysis of Experiments (2002)

## ÖZGEÇMİŞ

### KİŞİSEL BİLGİLER

**Adı Soyadı** : Muhammed Ali OKKA  
**Uyruğu** : Türkiye Cumhuriyeti  
**Doğum Yeri ve Tarihi** : KONYA/31.01.1985  
**Telefon** : 05321628250  
**Faks** :  
**E-Posta** : maliokka@gmail.com

### EĞİTİM

Derece	Adı	İlçe	İl	Bitirme Yılı
Lise	: Karatay Anadolu Lisesi			2002
Üniversite	: Gaziantep Üniversitesi			2008
Yüksek Lisans	: Gaziantep Üniversitesi			2011
Doktora	: Selçuk Üniversitesi			2019

### İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görevi
2010-13	Şırnak Üniversitesi	Araştırma Görevlisi
2013-19	Konya Büyükşehir Belediyesi	Kontrol Mühendisi

### UZMANLIK ALANI

**Süper Alaşımların İşlenmesi/ Karbon Kumaş Kompozitlerin Mekanik Özellikleri**

### YABANCI DİLLER

**İyi derecede İngilizce**  
**Başlangıç derecede Arapça, Almanca**

### BELİRTMEK İSTEĞİNİZ DİĞER ÖZELLİKLER

### YAYINLAR

**(Yüksek Lisans tezinden yapılmıştır)**

**International SCI-Expanded Journal Papers:** 1. Oguzhan Yilmaz and M.Ali Okka, Effect of single and multi-channel electrodes application on EDM fast hole drilling performance, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v 51, n 1-4, p 185-195, 2010

**International Refereed Conference Papers:**

1. Oguzhan Yilmaz, A. Tolga Bozdana, M.Ali Okka, I. Huseyin Filiz, An intelligent and automated system for EDM drilling of super alloys, Proceedings' of 5th International Conference on Responsive Manufacturing, Green Manufacturing, ICRM 11-13 January 2010, The University of Nottingham Ningbo, China, ISBN: 978-1-84919-199-9, pp.95-99

2. A.Tolga Bozdana, Oguzhan Yilmaz, M.Ali Okka, I.Huseyin Filiz, Mathematical modelling of EDM hole drilling using response surface methodology, Proceedings of

5th International Conference on Responsive Manufacturing, Green Manufacturing, ICRM 11-13 January 2010, The University of Nottingham Ningbo, China, ISBN: 978-1-84919-199-9, pp.90-94

3. O.Yılmaz, A.T. Bozdana, M.A. Okka, İ.H. Filiz, A comparative investigation of the effects of single and multi-channel electrodes in EDM fast hole drilling of aerospace alloys, 5th International Conference and Exhibition on Design and Production of Machines and Dies/Molds, 18-21 June 2009, Kuşadası, Aydın, Turkey. pp. 223-227, ISBN: 978-605-60732-0-5.

4. A.T. Bozdana, O.Yılmaz, M.A. Okka, İ.H. Filiz, A comparative experimental study on fast hole EDM of Inconel 718 and Ti-6Al-4V, 5th International Conference and Exhibition on Design and Production of Machines and Dies/Molds, 18-21 June 2009, Kuşadası, Aydın, Turkey, pp. 229-232, ISBN: 978-605-60732-0-5. 80

**National Refereed Journal Paper:**

Oğuzhan Yılmaz, A.Tolga Bozdana, M.Ali Okka, İ.Hüseyin Filiz, Uzay ve Havacılık Malzemelerinde Elektriksel Erozyon ile Hızlı Delik Delme Performansının Deneysel İncelenmesi, Mühendis ve Makina, Eylül 2010, Sayı:608, ISSN: 1300-3402.

**National Congress Paper:**

1. Oğuzhan Yılmaz, A.Tolga Bozdana, M.Ali Okka ve İ.Hüseyin Filiz, Uzay ve havacılık malzemelerinde elektriksel erozyon ile hızlı delik delme performansının incelenmesi, TMMOB Makina Mühendisleri Odası Konya Şubesi, V. Makina Tasarım ve İmalat Teknolojileri Kongresi, 17-18 Ekim 2009, Bildiri Kitabı, sayfa: 211-218, Konya, ISBN: 978-9944-89-771-6, MMO Yayın no: E/209/510-1. 2. Oğuzhan Yılmaz, A.Tolga Bozdana, M.Ali Okka, Uzay ve havacılık uygulamalarında kullanılan nikel ve titanium alaşımlı malzemelerde elektriksel erozyon işlemi kullanılarak hızlı delik delme, Makine İmalatı Sektöründe Ar-Ge Proje Pazarı-Gaziantep Sanayi Odası, 25-26 Mart 2010. Bildiri Kitabı.

**(Doktora tezinden yapılmıştır)**

1.Okka M. Ali, Avcı Ahmet, Nano Partikül Takviyeli Karbon Kumaş/Epoksi Kompozit Malzemelerde Mekanik Aşınma (02-May-2019 V. ULUSLARARASI LİF VE POLİMER ARAŞTIRMALARI SEMPOZYUMU)