

**T.C.
ONDOKUZ MAYIS ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**



**RAYLI SİSTEMLER İÇİN GRAFİT PLAKALARIN
SÜRTÜNME VE AŞINMA DAVRANIŞLARININ
GELİŞTİRİLEN DENEY DÜZENİĞİ İLE ARAŞTIRILMASI**

Doktora Tezi

Muhammet Anıl KAYA

Danışman

Prof. Dr. Kemal YILDIZLI

Bu çalışma Ondokuz Mayıs Üniversitesi tarafından PYO.MUH.1904.21.004 proje numarası ile desteklenmiştir.

SAMSUN
2023

TEZ KABUL VE ONAYI

Muhammet Anıl KAYA tarafından, **Prof. Dr. Kemal YILDIZLI** danışmanlığında hazırlanan “**RAYLI SİSTEMLER İÇİN GRAFİT PLAKALARIN SÜRTÜNME VE AŞINMA DAVRANIŞLARININ GELİŞTİRİLEN DENEY DÜZENEĞİ İLE ARAŞTIRILMASI**” başlıklı bu çalışma, jürimiz tarafından 16.1.2023 tarihinde yapılan sınav sonucunda oy birliği ile başarılı bulunarak Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.

	Unvanı Adı Soyadı Üniversitesi Ana Bilim/Ana Sanat Dalı	Sonuç
Başkan	Prof. Dr. Hakan ADATEPE Giresun Üniversitesi Makine Mühendisliği Konstrüksiyon ve İmalat Ana Bilim Dalı	☒ Kabul ☐ Ret
Üye	Prof. Dr. Kemal YILDIZLI Ondokuz Mayıs Üniversitesi Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı	☒ Kabul ☐ Ret
Üye	Doç. Dr. Mevlüt GÜRBÜZ Ondokuz Mayıs Üniversitesi Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı	☒ Kabul ☐ Ret
Üye	Dr. Öğr. Üyesi İbrahim İNANÇ Ondokuz Mayıs Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Ana Bilim Dalı	☒ Kabul ☐ Ret
Üye	Dr. Öğr. Üyesi Aydemir Güralp URAL Samsun Üniversitesi Havacılık ve Uzay Mühendisliği	☒ Kabul ☐ Ret

Bu tez, Enstitü Yönetim Kurulunca belirlenen ve yukarıda adları yazılı jüri üyeleri tarafından uygun görülmüştür.

Prof. Dr. Ahmet TABAK
Enstitü Müdürü

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANI

Hazırladığım Doktora tezinin bütün aşamalarında bilimsel etiğe ve akademik kurallara riayet ettiğimi, çalışmada doğrudan veya dolaylı olarak kullandığım her alıntıya kaynak gösterdiğimi ve yararlandığım eserlerin Kaynaklar'da gösterilenlerden oluştuğunu, her unsurun enstitü yazım kılavuzuna uygun yazıldığını ve TÜBİTAK Araştırma ve Yayın Etiği Kurulu Yönetmeliği'nin 3. bölüm 9. maddesinde belirtilen durumlara aykırı davranılmadığını taahhüt ve beyan ederim.

Etik Kurul Gerekli mi ?

Evet ☐ (Gerekli ise ekler kısmına ekleyiniz)

Hayır ☒

03/02/2023

Muhammet Anıl KAYA

TEZ ÇALIŞMASI ÖZGÜNLÜK RAPORU BEYANI

Tez Başlığı : RAYLI SİSTEMLER İÇİN GRAFİT PLAKALARIN SÜRTÜNME VE AŞINMA DAVRANIŞLARININ GELİŞTİRİLEN DENEY DÜZENEĞİ İLE ARAŞTIRILMASI

Yukarıda başlığı belirtilen tez çalışması için şahsım tarafından 22/12/2022 tarihinde intihal tespit programından alınmış olan özgünlük raporu sonucunda;

Benzerlik oranı : % 9

Tek kaynak oranı : % 3 çıkmıştır.

03/02/2023

Prof. Dr. Kemal YILDIZLI

ÖZET

RAYLI SİSTEMLER İÇİN GRAFİT PLAKALARIN SÜRTÜNME VE AŞINMA DAVRANIŞLARININ GELİŞTİRİLEN DENEY DÜZENEGİ İLE ARAŞTIRILMASI

Muhammet Anıl KAYA
Ondokuz Mayıs Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı
Doktora, Ocak/2023
Danışman: Prof. Dr. Kemal YILDIZLI

Günümüz şehirlerinde yaşanan trafik ve ulaşım sorununun çözümünde hafif raylı sistemler yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. HRS'lerin tercih edilmesinde konforlu toplu taşımaya uygun olmasının yanı sıra çevreye duyarlı olması ve enerji verimliliğinin yüksek olması gibi teknik özellikleri etkili olmaktadır. Elektrik enerjisinin HRS'lerin güç aktarma sistemine iletilmesinde pantograf-katener sistemi aktif rol oynamaktadır. Bu doktora tezinde, pantograf mekanizması elemanlarından akım toplayıcı grafit plaka ile katener temas teli arasında meydana gelen kayar sürtünmeli örseleme hareketini gerçeğe yakın bir şekilde simüle eden, programlanabilir ve ölçüm yapabilen bir deney düzeneğinin tasarımı ve imalatı yapılmıştır. İmalatı yapılan deney düzeneğinde, grafit plaka ve temas telinin etkileşimi sırasında temas kuvveti, sürtünme kuvveti değişim trendleri Taguchi Metodu ve ANOVA istatistiksel analiz ile değerlendirilmiştir. Ayrıca imalatı yapılan deney düzeneğinde Samsun ili OMÜ Yurtlar-Tekkeköy HRS güzergâh hattı durak bilgileri kontrol analiz yazılımı ile benzeştirilmiş, böylelikle grafit plakaların mekanik sürtünme ve aşınma davranışları gerçeğe yakın bir şekilde araştırılmıştır. Kuru ve sulu ortam şartlarında yapılan deneyler sonucunda temas kuvveti, hız ve mesafeye bağlı olarak sürtünme ve aşınma verileri elde edilmiş, elde edilen aşınmış grafit plakaların yüzey görüntüleri analiz edilmiş ve yorumlanmıştır. Deneyler sonucunda raylı sistemler alanında tren hareketini gerçekçi bir şekilde benzeştirebilen, senkron çalışabilen bir tribolojik deney düzeneği literatüre kazandırılmıştır. Deneysel çalışmalar sonucunda, sürtünme ve aşınma deneyleri sırasında kullanılan temas kuvveti, mesafe ve hız parametrelerinin, aşınma ortamı değişmediği sürece sürtünme katsayısını etkilemediği belirlenmiştir. Samsun ili OMÜ Yurtlar-Tekkeköy HRS güzergâh hattı boyunca kuru şartta, 50-55 N temas kuvveti değeri altında yapılan aşınma deneylerinde sürtünme katsayısı 0,75, çalışma sıcaklığı 55 °C, aşınma sonucunda grafit plakanın kütle kaybı ise 0,72 g olarak ölçülmüştür. Aynı güzergâh bilgileri ile sulu şartta yapılan deney sonucunda ise sürtünme katsayısı 0,65, çalışma sıcaklığı 32 °C, aşınma sonucunda grafit plakanın kütle kaybı ise 0,98 g olarak ölçülmüştür. Aşınmış grafit plakaların yüzeylerinde yapılan SEM ve AFM analizleri sonucunda, kuru şartta yüzeyin orijinal haline göre daha pürüzsüzleştiği (R_a 28,34 nm), abrasiv ve adhesiv aşınma mekanizmalarının etkili olduğu, bakır temas telinden malzeme transferi gerçekleştiği ve yüzeylerde plastik deformasyon hasarları olduğu belirlenmiştir. Sulu ortam sonuçlarında ise yüzeyin orijinal haline göre yakın pürüzlülük değerine (R_a 55,35 nm) sahip olduğu görülmüş ve malzeme transferine rastlanılmamıştır. Kuru ortam şartına göre daha fazla yüzey hasarı görüntülenmiştir.

Anahtar Sözcükler: Demiryolu, pantograf, katener sistem, grafit, sürtünme, aşınma

ABSTRACT

INVESTIGATION ON WEAR AND FRICTION OF CARBON STRIPS BY DEVELOPED TESTING SYSTEM FOR RAILWAY SYSTEMS

Muhammet Anıl KAYA
Ondokuz Mayıs University
Institute of Graduate Studies
Department of Mechanical Engineering
Ph.D., January/2023
Supervisor: Prof. Dr. Kemal YILDIZLI

Light rail systems are widely used to solve the traffic and transportation problems in today's cities. In addition to being suitable for comfortable public transportation, the technical features such as being sensitive to the environment and high energy efficiency are effective in the preference of HRS. The pantograph-catenary system plays an active role in the transmission of electrical energy to the power transmission system of the HRS. In this doctoral thesis, a programmable and measuring experimental setup that simulates the sliding frictional disturbance movement between the current collector graphite plate and the catenary contact wire, which is one of the pantograph mechanism elements, has been designed and manufactured. In the experimental setup, the contact force and friction force change trends were examined during the interaction of the graphite plate and the contact wire, and then these parameters were analyzed with the Taguchi Method and ANOVA statistical program. In addition, in the experimental setup, the stop information of the Samsun province OMU Yurtlar-Tekkeköy HRS route line was simulated with the control analysis software, thus the mechanical friction and wear behaviors of the graphite plates were investigated in a realistic way. As a result of the experiments carried out in dry and wet conditions, friction and wear data were obtained depending on the contact force, speed and distance, and the surface images of the worn graphite plates were analyzed and interpreted. As a result of the experiments, a synchronous tribological experiment setup, which can realistically simulate the train movement in the field of rail systems, has been brought to the literature. As a result of the experimental studies, it was determined that the contact force, distance and speed parameters used during the friction and wear tests do not affect the friction coefficient as long as the wear environment does not change. The friction coefficient was measured as 0,75, the operating temperature was 55 °C, and the mass loss of the graphite plate as a result of wear was 0,72 g in the wear tests carried out under the 50-55 N contact force in dry condition along the OMU Yurtlar-Tekkeköy HRS route line in Samsun. As a result of the experiment performed in wet condition with the same route information, the friction coefficient was measured as 0,65, the operating temperature was 32 °C, and the mass loss of the graphite plate as a result of wear was 0,98 g. As a result of SEM and AFM analyzes performed on the surfaces of the worn graphite plates, it was determined that the surface became smoother in dry condition (R_a 28.34 nm), abrasive and adhesive wear mechanisms were effective, material transfer from the copper contact wire and plastic deformation damages occurred on the surfaces. In the results of the wet environment, it was observed that the surface had a roughness value (R_a 55.35 nm) close to its original state and no material transfer was observed. More surface damage was observed compared to the dry environment condition.

Keywords: Railway, pantograph, catenary system, graphite, friction, wear

ÖN SÖZ VE TEŞEKKÜR

Doktora eğitim hayatım boyunca tecrübesini, yardımını ve desteğini esirgemeyen tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Kemal YILDIZLI' ya teşekkür ederim.

Tez çalışmalarım boyunca bilgi birikimini ve zamanını esirgemeyen Sayın Doç. Dr. Mevlüt GÜRBÜZ'e ve Dr. Öğretim Üyesi İbrahim İNANÇ'a ayrıca teşekkürü bir borç bilirim.

Doktora çalışmalarına her an bilgi ve tecrübesiyle destek veren, fikirlerini esirgemeyen değerli arkadaşım Dr. Cengiz Görkem DENGİZ'e ve yine tecrübesiyle çalışmalarına katkı sağlayan Dr. Erkan ÖZTÜRK'e teşekkür ederim.

Doktora sürecimde her zaman yanımda olan, çalışmalarım sırasında gayretini ve desteğini esirgemeyen kıymetli eşim Dr. Zeliha KAYA' ya, her anıyla bize mutluluk veren oğlum Ahmed Alp KAYA' ya ve bugünlere gelmemde büyük emekleri olan değerli anneme, babama, kardeşime ve eşimin sevgili ailesine teşekkür ederim.

Tez çalışmama desteklerinden dolayı SAMULAŞ A.Ş. firmasına teşekkür ederim.

Muhammet Anıl KAYA

İÇİNDEKİLER

TEZ KABUL VE ONAYI	i
BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANI	ii
TEZ ÇALIŞMASI ÖZGÜNLÜK RAPORU BEYANI	ii
ÖZET	iii
ABSTRACT	iv
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
TABLolar DİZİNİ	xv
1. GİRİŞ	1
1.1. Çalışmanın Amacı	3
1.2. Tez Kapsamı	5
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	6
3. RAYLI SİSTEMLERİN TANIMI, ÇEŞİTLERİ VE GRAFİT MALZEME	25
3.1. Kent İçi/Şehir İçi Raylı Toplu Taşıma Türleri	25
3.1.1. Tramvay	25
3.1.2. Hafif Raylı Sistem (HRS)	27
3.1.3. Metro	29
3.1.4. Banliyö	30
3.1.5. Maglev (Manyetik Levitasyon Treni)	31
3.1.6. Monoray Sistem (Monorail)	32
3.1.7. Yüksek Hızlı Tren (YHT)	33
3.1.8. Otomatik Sürücüsüz Sistemler (AGT)	34
3.2. HRS’lerde Elektrik Enerjisi ile Güç Beslemesi	35
3.2.1. Katener Sistem (Havai Hat)	37
3.2.2. Pantograf Mekanizması	41
3.2.3. Pantograf ve Katener Teması	43
3.3. Raylı Sistemlerde Grafit’in Rolü	46
3.3.1. Grafitin Elektriksel, Mekanik ve Tribolojik Özellikleri	48
4. MATERYAL VE METOD	54
4.1. Deney Düzeneği Kriterleri, Bileşenleri ve Tasarımı	54
4.2. Deney Düzeneğinin Çalışma Prensibi	59
4.3. Deney Düzeneğinin İmalatı	60
4.3.1. Mekanik İmalat İşlemleri	60
4.3.2. Elektronik Kontrol ünitesi ve Özgün Yazılımı	64
4.3.2.1. Servo Motor, Sürücü ve Redüktör Kullanımı	64
4.3.2.2. PLC ve Özgün Kontrol Analiz Yazılımı	66
4.3.2.3. Endüktif Sensörler	70
4.3.3. Hidrolik Sistem	71
4.3.4. Pnömatik Sistem	73
4.3.5. Dinamometre Tasarımı, İmalatı ve Kalibrasyonu	74
4.3.5.1. Gerinim Ölçerler	74
4.3.5.2. Dinamometre Tasarımı, İmalatı ve Kalibrasyonu	76
4.3.5.2.1. F_e Kuvvetinin Kalibrasyonu ve Ölçümlerin İstatistiksel Değerlendirilmesi	80
4.3.5.2.2. F_r Kuvvetinin Kalibrasyonu ve Ölçümlerin İstatistiksel Değerlendirilmesi	85
4.3.5.2.3. F_t Kuvvetinin Kalibrasyonu ve Ölçümlerin İstatistiksel Değerlendirilmesi	90
4.3.5.2.4. Kuvvet Çapraz Etkileşimlerinin Giderilmesi ve Fonksiyonların Tayini	95
4.3.6. Deney Düzeneği ve Bileşenlerinin Montajı	99

4.4. Deneyisel Çalışma.....	101
4.4.1. Grafit Plaka Malzemesi.....	101
4.4.2. Bakır Boru Malzeme.....	101
4.4.3. Validasyon ve Kalifikasyon Testleri.....	101
4.4.4. Kütle Kaybı Ölçümleri.....	102
4.4.5. Sürtünme Katsayısının Ölçümlerinin İstatistiksel Belirlenmesi	102
4.4.5.1. Taguchi Metodu İle Deney Tasarımı	102
4.4.5.2. Deney Parametrelerinin Belirlenmesi ve L9 Ortogonal Taguchi Dizilerinin Kurulması	104
4.4.6. Samsun İli OMÜ Yurtlar-Tekkeköy HRS Güzergah Hattının Kuru ve Sulu Şartta Deneyisel Çalışması.....	105
4.4.7. Çalışma Sıcaklık Ölçümleri	110
4.4.8. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizi	110
4.4.9. Atomik Kuvvet Mükroskobu (AFM) Analizi	111
5. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	112
5.1. Validasyon ve Kalifikasyon Testleri.....	112
5.2. Taguchi Metodu ile Ölçülen Sürtünme Katsayılarının İstatistiksel Değerlendirilmesi.....	113
5.3. Samsun İli OMÜ Yurtlar-Tekkeköy HRS Güzergâh Hattının Veri Çalışması	128
5.4. Samsun İli OMÜ Yurtlar-Tekkeköy HRS Güzergâh Hattının Kuru ve Sulu Şartlarda Aşınma Deneyisel Çalışması	131
5.5. Aşınma Yüzey Görüntüleri	142
5.6. SEM Analiz Sonuçları	145
5.7. AFM Analiz Sonuçları	151
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	154
KAYNAKLAR.....	159
ÖZGEÇMİŞ.....	166

SİMGELER VE KISALTMALAR

SİMGELER

Ag	: Gümüş	-
C	: Karbon	-
Cr	: Krom	-
Cu	: Bakır	-
F_e	: Eksenel Kuvvet	N
F_s	: Sürtünme Kuvveti	N
F_r	: Radyal Kuvvet	N
F_t	: Temas Kuvveti	N
G	: Gerinim Ölçer Gösterge Faktörü (Gage Factor)	-
HRB	: Brinell Sertliği	HB
M_d	: Döndürme Momenti	Nm
n	: Deney Sayısı	-
P	: Güç	kW
R	: Gerinim Ölçerlerin Orijinal Direnci	ohm
R_a	: Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü	nm
S^2	: Gözlenen Verilerin Varyansı	-
Sn	: Kalay	-
Zr	: Zirkonyum	-
V	: Volt	-
V_0	: Çıkış Voltajı (Gerilimi)	V
V_s	: Giriş Voltajı (Gerilimi)	V
X	: F_e Kuvveti için Ölçüm Kodu	-
X_1	: 1.Durum için F_e Kuvveti Ölçümleri	-
X_2	: 2.Durum için F_e Kuvveti Ölçümleri	-
X_3	: 3.Durum için F_e Kuvveti Ölçümleri	-
Y	: F_r Kuvveti için Ölçüm Kodu	-
Y_1	: 1.Durum için F_r Kuvveti Ölçümleri	-
Y_2	: 2.Durum için F_r Kuvveti Ölçümleri	-
Y_3	: 3.Durum için F_r Kuvveti Ölçümleri	-
y_i	: Deneyler Sırasında Gözlenen Veriler	-
$\bar{y}$	: Gözlenen Verilerin Ortalaması	-
Z	: F_t Kuvveti için Ölçüm Kodu	-

Z_1	: 1.Durum için F_t Kuvveti Ölçümleri	-
Z_2	: 2.Durum için F_t Kuvveti Ölçümleri	-
Z_3	: 3.Durum için F_t Kuvveti Ölçümleri	-
ε	: Gerinim	mm/mm
ΔL	: Kısalma veya Uzama Miktarı	mm
ΔR	: Uzama veya Kısalmadan Kaynaklı Direnç Değişimi	ohm
μ	: Sürtünme Katsayısı	-
S/N	: Sinyal Gürültü Oranı	-

KISALTMALAR

AC	: Alternating Current
AFM	: Atomic Force Microscopy
AGT	: Automated Guidway Transit
ANOVA	: Analysis of Variance
ARGE	: Araştırma ve Geliştirme
DC	: Direct Current
EDS	: Energy Dispersive Spectroscopy
EP	: Epoksi
HRS	: Hafif Raylı Sistem
KİTAM	: Karadeniz İleri Teknoloji Araştırma Merkezi
KS	: Karbon Siyahı
MAGLEV	: Magnetically Levitated Train
OMÜ	: Ondokuz Mayıs Üniversitesi
PE	: Polietilen
PLC	: Programmable Logic Controller
SAMULAŞ A.Ş	: Samsun Proje Ulaşım İmar İnşaat Yatırım Sanayi Ticaret Anonim Şirketi
SEM	: Scanning Electron Microscope
SPS	: Spark Plasma Sintering
SPSS	: Statistical Package for the Social Sciences
SZGH	: Shenzhen Guan Hong Automation Company
TAUM	: Erciyes Üniversitesi Teknoloji ve Araştırma Uygulama Merkezi
UITP	: The International Association of Public Transport

YHT : Yüksek Hızlı Tren
3D : Üç Boyutlu Katmanlı İmalat



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1. Raylı sistemlerin sınıflandırılması	25
Şekil 3.2. Bursa şehiriçi tramvay	26
Şekil 3.3. Samsun HRS	27
Şekil 3.4. Ankara metro hattı	30
Şekil 3.5. Gebze - halkalı banliyö treni.....	31
Şekil 3.6. Longyang Lu şehri ve Şanghai Pudong Uluslararası Havalimanı arasında yolcu taşıyan maglev treni.....	32
Şekil 3.7. Moskova monoray sistemi	33
Şekil 3.8. Ankara-Konya ve Ankara-Eskişehir hatlarında hizmet veren YHT	34
Şekil 3.9. Florida Tampa/ABD uluslararası havaalanında yolcu taşıyan AGT	35
Şekil 3.10. Raylı sistem güç besleme şeması.....	36
Şekil 3.11. Konvansiyonel katener sistemin genel görünüşü.....	37
Şekil 3.12. Katener temas teli kesiti görünümü	38
Şekil 3.13. Katener sisteminde konsol-hoban bileşenleri	39
Şekil 3.14. Katener temas telinin zigzak hareketi	40
Şekil 3.15. Pantograf mekanizmasının görünümü	41
Şekil 3.16. Pantograf mekanizması ve bileşenleri	42
Şekil 3.17. Akım toplayıcı grafit plakaların görünümü	43
Şekil 3.18. Akım toplayıcı plaka ile temas teli etkileşimi.....	44
Şekil 3.19. Karbon allotroplarının şematik gösterimi	46
Şekil 3.20. Grafitin kristal kafes yapısının görünümü	47
Şekil 3.21. Temsili iletken yapının görünümü	49
Şekil 4.1. Deney düzeneği bileşenleri	55
Şekil 4.2. Deney düzeneğinin tasarım görüntüsü ve bileşenleri	56
Şekil 4.3. Deney düzeneğinin farklı açıdan tasarım görüntüsü ve bileşenleri	57
Şekil 4.4. Deney düzeneğinin bütünleşik yapısının şematik görünümü	59
Şekil 4.5. Taban parçasının görüntüsü	61
Şekil 4.6. Bakır sarıli aşındırma çemberi	62
Şekil 4.7. Dinamometre gövdesi parçasının görüntüsü.....	62
Şekil 4.8. Grafit tutucu (A) ve grafit tutucu alt plaka (B) parçalarının görüntüsü.....	63
Şekil 4.9. Üç parçanın montaj edilmiş görüntüsü	64
Şekil 4.10. 13380CC model servo motor, sürücüsü ve bağlantı kablosu.....	65
Şekil 4.11. Planet redüktör	66
Şekil 4.12. Deney düzeneğinde kullanılan PLC modülü	67

Şekil 4.13. Deney düzeneği elektronik kontrol panosu.....	67
Şekil 4.14. Özgün kontrol ve analiz programı arayüzünün görüntüsü.....	68
Şekil 4.15. Manuel ve hidrolik kontrol arayüzünün görüntüsü.....	69
Şekil 4.16. Kalibrasyon arayüzünün görünümü	70
Şekil 4.17. Endüktif sensörlerin görünümü	71
Şekil 4.18. Elektro-hidrolik devresi	71
Şekil 4.19. Hidrolik ünitenin görünümü	72
Şekil 4.20. Pnömatik devre	73
Şekil 4.21. Tipik gerinim ölçerin yapısı.....	74
Şekil 4.22. Wheatstone köprüsü.....	75
Şekil 4.23. Tek gerinim ölçer bağlantılı Wheatstone köprüsü	76
Şekil 4.24. Gerinim ölçerlerin yerleştirilmesi ve kuvvetlerin belirlenmesi	77
Şekil 4.25. Dinamometrenin deney düzeneğine montajlanmış görüntüsü.....	78
Şekil 4.26. Dinamometrenin kalibrasyonu sırasında yükleme/boşaltma görüntüleri	79
Şekil 4.27. Yükleme ve boşaltma sırasında F_e kuvveti için ölçülen gerilim değerlerinin farkı.....	82
Şekil 4.28. Yükleme ve Boşaltma sırasında F_r kuvveti için ölçülen gerilim değerlerinin farkı.....	87
Şekil 4.29. Yükleme ve Boşaltma sırasında F_t kuvveti için ölçülen gerilim değerlerinin farkı.....	92
Şekil 4.30. Çıkış gerilimleri	97
Şekil 4.31. Çıkış gerilimleri	98
Şekil 4.32. Çıkış gerilimleri	99
Şekil 4.33. Deney düzeneğinin montaj edilmiş bir bütün olarak görünümü.....	100
Şekil 4.34. OMÜ Yurtlar - Tekkeköy deney rotasının kuru şartta akış diyagramı ..	107
Şekil 4.35. OMÜ Yurtlar-Tekkeköy deney rotasının sulu şartta akış diyagramı.....	109
Şekil 4.36. Termal kamera	110
Şekil 4.37. Taramalı elektron mikroskobu.....	111
Şekil 4.38. Atomik kuvvet mikroskobu	111
Şekil 5.1. A1B1C1 deney koşullarında zamana göre F_t değişimi.....	114
Şekil 5.2. A1B1C1 deney koşullarında zamana göre μ değişimi.....	114
Şekil 5.3. A1B2C2 deney koşullarında zamana göre F_t değişimi.....	115
Şekil 5.4. A1B2C2 deney koşullarında zamana göre μ değişimi.....	115
Şekil 5.5. A1B3C3 deney koşullarında zamana göre F_t değişimi.....	116
Şekil 5.6. A1B3C3 deney koşullarında zamana göre μ değişimi.....	117
Şekil 5.7. A2B1C2 deney koşullarında zamana göre F_t değişimi.....	118

Şekil 5.8. A2B1C2 deney koşullarında zamana göre μ değişimi.....	118
Şekil 5.9. A2B2C3 deney koşullarında zamana göre Ft değişimi.....	119
Şekil 5.10. A2B2C3 deney koşullarında zamana göre μ değişimi.....	119
Şekil 5.11. A2B3C1 deney koşullarında zamana göre Ft değişimi.....	120
Şekil 5.12. A2B3C1 deney koşullarında zamana göre μ değişimi.....	120
Şekil 5.13. A3B1C3 deney koşullarında zamana göre Ft değişimi.....	121
Şekil 5.14. A3B1C3 deney koşullarında zamana göre μ değişimi.....	122
Şekil 5.15. A3B2C1 deney koşullarında zamana göre Ft değişimi.....	123
Şekil 5.16. A3B2C1 deney koşullarında zamana göre μ değişimi.....	123
Şekil 5.17. A3B3C2 deney koşullarında zamana göre Ft değişimi.....	124
Şekil 5.18. A3B3C2 deney koşullarında zamana göre μ değişimi.....	124
Şekil 5.19. S/N oranlarının ana etki grafiği.....	126
Şekil 5.20. Samsun HRS güzergahı	129
Şekil 5.21. Ortalama hız değerleri.....	131
Şekil 5.22. Kuru şart deney koşulunda zamana göre Ft değişimi	132
Şekil 5.23. Kuru şart deney koşulunda zaman göre μ değişimi.....	133
Şekil 5.24. Kuru temas şartında sıcaklık ölçümü.....	133
Şekil 5.25. Sulu şart deney koşulunda zamana göre Ft değişimi	134
Şekil 5.26. Sulu şart deney koşulunda zamana göre μ değişimi.....	135
Şekil 5.27. Sulu temas şartında sıcaklık ölçümü.....	135
Şekil 5.28. Kuru ve sulu şart deney koşullarında zamana göre μ değişimi	136
Şekil 5.29. Kuru şart deney koşulunda zamana göre Ft değişimi	137
Şekil 5.30. Kuru şart deney koşulunda zaman göre μ değişimi.....	138
Şekil 5.31. Sulu şart deney koşulunda zamana göre Ft değişimi	139
Şekil 5.32. Sulu şart deney koşulunda zaman göre μ değişimi.....	140
Şekil 5.33. Kuru ve sulu şart deney koşullarında zamana göre μ değişimi	141
Şekil 5.34. Grafit plakanın kuru şartta aşınma deneyi öncesi (a) ve deney sonrası (b) yüzey görüntüleri	142
Şekil 5.35. Grafit plakanın sulu şartta aşınma deneyi öncesi (a) ve deney sonrası (b) yüzey görüntüleri.....	143
Şekil 5.36. Yerli üretim grafit plakanın kuru şartta aşınma deneyi öncesi (a) ve deney sonrası (b) yüzey görüntüleri.....	144
Şekil 5.37. Yerli üretim grafit plakanın sulu şartta aşınma deneyi öncesi (a) ve deney sonrası (b) yüzey görüntüleri.....	145
Şekil 5.38. Orijinal grafit plaka numunesinin kırık yüzey SEM görüntüsü.....	146
Şekil 5.39. Kuru şartta aşınma deneyi öncesi ve sonrası grafit plaka yüzeyinin SEM görüntüsü.....	147

Şekil 5.40. Grafit plaka numune yüzeyinin deney öncesi (a) ve kuru şartta deney sonrası (b) yüzeylerinin EDS analiz görüntüleri	147
Şekil 5.41. Kuru şartta aşınma deneyi sonrası grafit plaka numunesi yüzeyinde oluşan deformasyon bölgeleri	148
Şekil 5.42. Kuru şartta gerçekleştirilen deney sonucu grafit plaka yüzeyinde oluşan kayma izleri.....	149
Şekil 5.43. Sulu şartta aşınma deneyi sonrası grafit plaka yüzeyinin SEM görüntüsü	150
Şekil 5.44. Grafit plaka numune yüzeyinin deney öncesi (a) ve sulu şartta deney sonrası (b) yüzeylerinin EDS analiz görüntüleri.....	150
Şekil 5.45. Sulu şartta gerçekleştirilen deney sonucu grafit plaka yüzeyinde oluşan kayma izleri.....	151
Şekil 5.46. Grafit plaka numunesinin deney öncesi, kuru ve sulu şartta deney sonrası AFM analiz görüntüleri	152

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 2.1. Literatürdeki deney düzeneklerinin karşılaştırılması.....	16
Tablo 3.1. Türkiye' deki HRS projeleri.....	29
Tablo 3.2. Konsol-hoban bileşeni parça isimleri	39
Tablo 4.1. Deney düzeneği bileşenlerinin ana elemanları ve görevleri	58
Tablo 4.2. Kuvvet dinamometresi için kodlamalar	80
Tablo 4.3. Fe kuvveti için yükleme ve boşaltma durumlarında çıkış gerilim değerleri	81
Tablo 4.4. Fe kuvveti kalibrasyonunda yükleme-boşaltma durumları çıkış verilerinin istatistiksel değerlendirilmesi	83
Tablo 4.5. Yükleme ve boşaltma durumları için lineer regresyon analiz ve R^2 değerleri	83
Tablo 4.6. Fe kuvvet kanalının kalibrasyonu için seçilen gerilim verileri ve çapraz duyarlılıkları	84
Tablo 4.7. Fr kuvveti için yükleme ve boşaltma durumlarında çıkış gerilim değerleri	86
Tablo 4.8. Fr kuvveti kalibrasyonunda yükleme-boşaltma durumları çıkış verilerinin istatistiksel değerlendirilmesi	87
Tablo 4.9. Yükleme ve boşaltma durumları için lineer regresyon analiz ve R^2 değerleri	88
Tablo 4.10. Fr kuvvet kanalının kalibrasyonu için seçilen gerilim verileri ve çapraz duyarlılıkları	89
Tablo 4.11. Ft kuvveti için yükleme ve boşaltma durumlarında çıkış gerilim değerleri.....	91
Tablo 4.12. Ft kuvveti kalibrasyonunda yükleme-boşaltma durumları çıkış verilerinin istatistiksel	92
Tablo 4.13. Yükleme ve boşaltma durumları için lineer regresyon analiz ve R^2 değerleri...	93
Tablo 4.14. Ft kuvvet kanalının kalibrasyonu için seçilen gerilim verileri ve çapraz duyarlılıkları	94
Tablo 4.15. Kuvvetler için çapraz etkileşim parametreleri	95
Tablo 4.16. Dönüşüm denklemleri için seçilmiş veri setleri.....	96
Tablo 4.17. X_1 bağımsız değişkenine bağlı Fe fonksiyonun tayini.....	97
Tablo 4.18. Y_1 ve Y_2 bağımsız değişkenine bağlı Fr fonksiyonun tayini.....	98
Tablo 4.19. Z_1 ve Z_3 bağımsız değişkenine bağlı Ft fonksiyonun tayini	99
Tablo 4.20. RH 84 kalite kodlu grafit plaka malzemenin özellikleri.....	101
Tablo 4.21. Deney sırasında kullanılacak parametreler, değerleri ve seviyeleri.....	104
Tablo 4.22. L_9 ortogonal dizine göre belirlenen deneyler ve seviyeleri.....	105
Tablo 5.1. L_9 ortogonal dizisine göre ölçülen sürtünme katsayıları ve hesaplanan S/N oranları.....	125
Tablo 5.2. Ortalamaların cevap tablosu	125
Tablo 5.3. Faktörlerin sürtünme katsayısı üzerindeki etkisinin incelenmesi	126
Tablo 5.4. Deney düzeneği kontrol analiz yazılımına girilecek durak ve parkur verileri	130
Tablo 5.5. Grafit plakanın kuru ve sulu şartta deneyler sonucu aşınma oranları ve çalışma sıcaklıkları.....	137

Tablo 5.6. Yerli üretim grafit plakanın kuru ve sulu şartta deneyler sonucu aşınma oranları.....	141
Tablo 5.7. Ortalama yüzey pürüzlülük ve kütle kaybı değerleri.....	153



1. GİRİŞ

Demiryolu sistemleri güzergâh hattı boyunca birçok bütünleşik yapı ve altyapı sistemlerinden oluşmaktadır. Raylar, istasyon binaları, sinyalizasyon, enerji besleme ve haberleşme sistemi, köprü ve tüneller bu bütünleşik sistemi meydana getirmektedir. Günümüzde demiryolu taşımacılığı; güvenilirliği, çevreye olan duyarlılığı, taşıma konforu, büyük şehirlerde problem haline gelen toplu taşımaya çözüm olması ve gelişen teknolojisi ile hızla büyümektedir.

Gelişmiş ülkeler son dönemde yaşadıkları çevresel sorunlar, nüfusu yüksek şehirlerde karşılaşılan trafik ve toplu taşımacılık problemleri nedeniyle demiryolu taşımacılığına büyük önem vermektedir. Yaşanan bu sorunlar demiryolu teknolojisinin çeşitlenmesini sağlamış ve gelişmesinin önünü açmıştır. Teknolojide yaşanan gelişmelerle birlikte demiryolu sadece şehirlerarası bir ulaşım türü olmaktan çıkmış, şehir içi trafik ve toplu taşıma problemlerinin çözümü noktasında önemli bir ulaşım ve altyapı sistemi haline gelmiştir. Kent içi veya şehir içi raylı sistemler adını alan bu sistemler çeşitlenmiş ve Dünya'nın bir çok şehrinde işletmeye alınmıştır.

1983 yılında Uluslararası Toplu Taşımacılar Birliği' ne bağlı Uluslararası Hafif Raylı Sistemler Komisyonu hafif raylı sistemler (HRS) ile ilgili şu tanımlı yapmıştır: 'Hafif raylı sistemler; kendi geçiş hakkında, yeraltında, yer seviyesinde veya yükseltilmiş şekilde işletilebilen, modern tramvaydan hızlı transit sistemine kadar aşamalı bir şekilde geliştirilebilen ray temelli bir taşımacılık biçimidir'. Almanya, İsviçre, Belçika gibi ülkeler 1950'lerde ve 1960'larda tramvayların topluca kapanmasıyla ortaya çıkan pek çok mevcut sistemi modernize ederek yenilenmiş ve 'hafif raylı sistemler' adını almıştır. Tramvayların caddelerden kalktığı pek çok ülkede, 1970'lerin ortalarından bu yana tamamen yeni sistemler geliştirilmiştir. Kuzey Amerika, Asya Pasifik bölgesi ile İngiltere ve Fransa gibi birkaç Avrupa ülkesinde bu şekilde uygulanmıştır. Günümüzde 50 ülkede 400'ü aşkın hafif raylı ulaşım ve tramvay sistemi mevcuttur. Bununla birlikte, Dünya çapında şuan çalışmaları devam etmekte olan 100' ü aşkın HRS planlaması söz konusudur.

HRS' ler 750V DC gerilim ile 3.raydan veya çoğunlukla katenerden enerji beslemesi yapılarak hareket ettirilmektedir. Bir sürücü tarafından sinyalizasyon sistemine uygun bir şekilde kumanda edilen sistem, her 600 - 1000 metre mesafede özel istasyonlarda yolcu indirip bindiren, ortalama 30 - 70 km/s hızla kendine ait

çoğunluğu tam korumalı hatlarda işletilen bir toplu taşıma aracıdır (Bhargava, 1999; Üstünişik ve Beyazıt, 1996). Günümüzde raylı sistemler içerisinde HRS' ler yatırım maliyetinin daha düşük olması, yüksek yolcu taşıma kapasitesine elverişli olması, trafiğin yoğun saatlerinde diğer ulaşım araçlarına göre hızlı ve yüksek sayıda yolcu taşınması, ağır hava koşullarına rağmen ulaşımın aksamadan emniyetli bir şekilde devam etmesi, elektrikle çalışan sistemler olduğu için çevre kirliliği ve gürültü gibi problemlerinin olmaması aynı zamanda şehirler için gelişmişlik göstergesi olduğu için tercih edilmekte ve büyük şehirlerde hayata geçirilmek istenmektedir. Bunun yanında raylı sistemlerin yol güzergâhları, yeni yaşam ve ticaret alanları oluşmasında ve şehrin gelişmesine oldukça fazla katkıda bulunmaktadır. Bu sebeplerden dolayı hem Türkiye' de hemde Dünya' da mevcut HRS ağlarına sahip olan şehirler mevcut ağlarını daha genişletmek için yatırımlarına devam etmektedirler (Pektaş ve Kahraman, 2021; Baştürk, 2014).

HRS' lerde motorların tahriki ve diğer servislerin beslenmesi elektrik enerjisi ile sağlanır. Raylı sistemlerde güç beslemesinin asıl amacı tren hareketini sağlamaktır. Basit olarak şehirlerarası elektrik iletim hatlarından alınan yüksek gerilimli elektrik enerjisi bir indirici trafo merkezi tarafından gerilim seviyesi ihtiyacına göre ayarlanır. Trafo merkezinden alınan elektriğin HRS' nin güç ünitelerine iletilmesini ve sistemin güzergâh boyunca beslenmesini pantograf mekanizması üzerinde yer alan akım toplayıcı grafit plakanın ve bakır malzemeden ekstrüzyon ürünü olarak imal edilmiş katener temas teli adı verilen yüksek gerilim telinin birbirine zikzak şeklinde kayar sürtünmeli teması sağlar. Mekanik titreşimler nedeni ile akım iletiminin kesilmemesi için grafit plakaların tel yüzeyine yeterli bir basınçla sürekli teması sağlanmalıdır. Grafit malzeme katı bir yağlayıcı olması nedeniyle ile ara yüzey sürtünme direnci oldukça düşüktür. Bu sayede yüksek gerilim taşıyan katener bakır tellerin aşınmasının uzun süre önüne geçilir. Grafit plakalar, grafit tozlarının yüksek basınç altında sıkıştırılıp sinterlenerek imal edilmiş sürtünme nedeni ile kolay aşınarak tükenen tipte plaka şeklinde üretilmiş ithal olarak satın alınan sarf parçalarıdır. Sürtünme sonucu zamanla aşınarak tükendiği için yenisi ile değiştirilmesi gerekir (Bucca ve Collina, 2015; Zhang vd., 2018).

Sonuç olarak, üretimi karmaşık ve maliyeti yüksek olan bu plakaların yüzeyinden çevresel ve çalışma şartlarının etkisiyle grafit tozlarının hızla ayrılması ekonomik bakımdan istenmeyen bir durum olup, iki yapının birbirine teması

sırasında oluşan mekanik aşınma etkileşiminin, hassas bir şekilde kontrol edilebilen ve ölçüm yapabilen özgün bir test düzeneği ile araştırılması oldukça önemlidir. Bilhassa hem ülkemizde hem de Dünya’da raylı sistemler alanında yapılan teknolojik yatırımlar düşünüldüğünde bu alanda yapılan çalışmaların ihtiyacı ve önemi daha da artmaktadır. Böyle bir test düzeneği imalatının ülkemizde ve Dünya’ da çok az sayıda girişilmiş çalışmalardan olması, HRS’ler ve YHT için Ar-Ge projelerinin geliştirilmesine katkı sağlayacağını öngörülmesi ve ithal alınan akım toplayıcı grafit plakaların millileştirme çalışmalarına katkı sağlayacağını düşünülmesi bu tez çalışmasına başlanması açısından önemli unsurlar olmuştur.

1.1. Çalışmanın Amacı

Bu doktora tezinde HRS’ lerde bulunan katener temas teli (bakır tel) ve akım toplayıcı grafit plaka arasındaki tribolojik etkileşimleri gözlemlemek için trenin gerçek hareket ve durak şartlarını benzeştirebilen, ölçebilen universal bir deney düzeneğini tasarımının ve imalatının yapılması, ayrıca katener tel ile grafit plakalar arasındaki mekanik sürtünme ve aşınma davranışlarının gerçekçi düzeyde araştırılması amaçlanmıştır. Deney düzeneği için yapılan imalatlar ve eklentilerle sistem programlanabilir, kontrol edilebilir, rijit ve ölçülebilir hale gelmesi sağlanıp, temas sırasındaki temas kuvveti, sürtünme kuvveti ve değişim trendleri veri olarak kaydedilmiştir. Taguchi metodu ile oluşturulan deney modeli dizilerinin sonuçları ANOVA varyans analiziyle istatistiksel olarak incelenmiş sistemin doğruluğu ve etki parametreleri belirlenmiştir. İmalatı yapılan deney düzeneğinde Samsun ili OMÜ Yurtlar - Tekkeköy HRS güzergâh hattı durak bilgileri girilerek, plakaların aşınma ömrü kuru ve sulu ortam şartlarında temas kuvveti, mesafe ve hıza bağlı olarak hesaplanmış, sürtünme ve aşınma verileri elde edilmiş ve grafit plakaların yüzey görüntüleri yorumlanmıştır. Bu kapsamda yapılan yazılım, imalat ve deneylerde aşağıda belirtilen uygulama adımları izlenmiştir;

- HRS’ lerin gerçek hareket şartlarından örnek alınıp laboratuvar tipi deney düzeneğinin tasarımı gerçekleştirilmiştir. Daha sonra bütün sistemi bir arada tutacak taban üzerine U direği pnömatik sistem ile hareket ettiren lineer kızakların ve U direğin montajı, U direk üzerinde akım toplayıcı grafit plakayı tutan çerçevenin üretimi ve montajı, gerinim ölçerleri üzerinde bulunduracak dinamometre gövdesi parçasının üretimi, sistemin zikzak hareketini oluşturabilmesi için aşağı

yukarı hareket eden hidrolik silindirlerin ve redüktör montajı yapılmıştır.

- Üzerine bakır tel sarılmış ve montajlanmış aşındırma çemberinin istenen hızda dönmesini sağlayacak uygun güç ve devirde servo motorun montajı yapılmıştır. Ayrıca hareket şartlarını benzeştirmek ve servo motoru kontrol etmek amacıyla istenilen değerlerin bilgisayar arayüzü üzerinden girilebildiği, kontrol edilebildiği özgün bir yazılım üretilmiş ve programlanabilir mantıksal denetleyici (PLC) üzerinden programlanmıştır. Servo motor sürücüsü, PLC eklentisi, endüktif sensörler ve elektrik bağlantıları bir panoda toplanıp montajı yapılmıştır.
- Test düzeneğinden grafit plakaların aşındırma çemberi ile teması sırasında oluşan 3 eksen yönünde kuvveti ölçebilen dinamometre tasarımı oluşturulmuştur. Dinamometre gövdesi parçası üzerine gerinim ölçerler yapıştırılıp uygun wheatstone köprü bağlantıları yapılmış ve bir veri toplayıcı ile entegre çalışması sağlanmıştır. Ardından üretilen dinamometrenin uygun yönlerde ve yüklerde kalibrasyonu yapıp deney düzeneğine montajı yapılmıştır.
- Deney düzeneğinin mekanik ve elektronik bağlantılarının tamamlanmasının ardından bütün bileşenlerin birlikte çalıştığı ön deneme testlerine geçilmiş sistem veri alabilir ve ölçebilir duruma getirilmiştir.
- Belirli miktarda grafit plakalar temin edilmiş, değişen hız, temas kuvveti, mesafe, durma/kalkma, kuru/sulu ortam şartları gibi parametre varyasyonlarında programlanmış ve aşındırma testleri imalatı yapılan deney düzeneğinde gerçekleştirilmiştir.
- Samsun ili OMÜ Yurtlar - Tekkeköy HRS güzergâhı hattının durak verileri ile programlanan deney düzeneğinde grafit plakaların kuru/sulu şartlarda deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneyler sonucunda elde edilen temas kuvveti ve sürtünme katsayısı değişim grafikleri oluşturulmuştur.
- Elde edilen veriler vasıtasıyla plakaların aşınma miktarları ve oranları belirlenmiş birbirleri ile karşılaştırmaları yapılmıştır.

- Aşınan grafit plakaların yüzey görüntüleri incelenmiştir. İncelemenin sonucunda aşınma mekanizmaları belirlenmiş ve yüzey topografik yapısı ortaya koyulmuştur.

1.2. Tez Kapsamı

Bu doktora tez çalışması 6 ana bölümden oluşmaktadır.

1. Bölümde demiryolu taşımacılığı önemi ve çeşitleri hakkında bilgi verilmiştir. Ayrıca HRS' lerin tanımı ve elektrik iletimi sırasında pantograf ve katener temas telinin etkileşiminin önemi kısaca açıklanmıştır. Son olarak ortaya çıkış amacı ve hedeflerinden bahsedilip, tezin uygulama adımları belirtilmiştir.

2. Bölümde grafit malzemesinin elektrik iletimi ve yağlayıcı olma özelliği hakkındaki çalışmaların yanı sıra, raylı sistemlerde pantograf mekanizmasıyla katener temas teli teması hakkında literatürde yapılmış çalışmalara yer verilmiştir. Bu tez çalışmasında imalatı yapılan deney düzeneği ile mevcut literatürde bulunan deney düzenekleri arasındaki benzer ve farklı özellikleri ortaya konulup tablo olarak sunulmuştur.

3. Bölümde demiryolu çeşitleri arasında günümüz çağında öne çıkan toplu taşımacılık sistemi olan elektrikli raylı toplu taşıma sistemlerinin genel özellikleri ve çeşitleri hakkında bilgi verilmiştir. HRS' lerde elektriğin güç aktarım organlarına nasıl iletildiği ve pantograf-katener temas teli etkileşimi detaylı olarak açıklanmıştır.

4. Bölümde tez çalışmasında uygulanan deneysel yöntemlerin detaylı bir şekilde açıklaması yapılmıştır. İlk olarak test düzeneğinin tasarım ve imalat süreçleri ile düzeneğe yapılan eklentilerin nasıl oluşturulduğu ve üretildiği, montajının nasıl yapıldığı kapsamlı olarak anlatılmıştır. Ardından yapılan deneyler sonucunda deney düzeneğinden alınacak verilerin belirlenmesinden kullanılan yöntem ve formüller hakkında bilgiler verilmiştir.

5. Bölümde deneyler sonucunda elde edilen veri ve sonuçlar paylaşılmıştır. Bu verilerin ve sonuçların değerlendirilmesi yapılmıştır.

6. Bölümde bu tez sonucunda elde edilen sonuçlar sunulmuş ve çalışmanın daha da ileriye gidebilmesi için öneri ve tavsiyelerde bulunulmuştur

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Son yıllarda HRS üzerine birçok araştırmacı tarafından çalışmalar yapılmaktadır. Fakat pantograf mekanizmasında yer alan akım toplayıcı grafit plaka ile katener temas telinin sürtünme ve aşınma davranışı üzerine yapılan çalışmalar, deney düzeneklerinin yeterince gerçekçi simüle edilememesinden dolayı genel olarak ele alınmıştır.

(Zhang vd., 2018), pantograf ve katener sistemi arasındaki temas kuvvetinin dinamik model değerini sonlu elemanlar yöntemiyle 70 N olarak hesaplamış ve daha sonra elektrik akımı altında farklı genlik, frekans ve hızlarda grafit plakanın sürtünme katsayısı ve aşınma oranı değişimini test düzeneğinde yaptıkları deneysel çalışmalarla incelemişlerdir. Çalışmalarının sonucunda temas kuvveti genlik değerinin artmasıyla grafit plaka ile temas teli arasında kararsız temasın meydana geldiğini bunun sonucunda oluşan ark deşarjının grafit plakanın hızlı aşınmasına yol açtığını belirtmişlerdir. 40 km/s hızlarının altında grafit plakanın aşınmasında mekanik aşınmanın etkili olduğunu fakat hız değerinin 80 km/s üzerine çıkmasıyla grafit plaka yüzeyinde ark erozyonunun baskın aşınma mekanizması haline geldiğini ifade etmişlerdir.

(Yang vd., 2019a), deney düzeneklerinde katener temas telinin grafit plaka üzerinde tanımlanan bir kayma mesafesinin değişimine bağlı olarak farklı hızlarda aşınma davranışlarını elektrik akımlı ve akımsız olarak araştırmışlardır. Sonuçları incelediklerinde; akımsız durumda sürtünme katsayısı ve aşınma oranının artan kayma mesafesi ile arttığını, elektrik akımlı deneylerde ise sürtünme katsayısının önce arttığını ama belli bir mesafeden sonra artan kayma mesafesi ile azalmaya başladığını belirlemişlerdir. Ayrıca elektrik akımsız testlerden elde ettikleri yüzey görüntülerinde ana aşınma mekanizmasının adhesiv aşınma olduğunu tespit etmişlerdir.

(Yang vd., 2021), deneysel çalışmalarında, akım toplayıcı saf karbon plaka ile bakır temas teli arasında sürtünme ve aşınma deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Deneyler sırasında değişen kayma hızı ve temas kuvveti parametreleri kullanmışlardır. Deneysel çalışmaları sonucunda grafit plaka yüzeyinde meydana gelen hasarda, ark deşarjının ana aşınma mekanizması olduğunu ve aşınma oranının düşürmek için uygun temas kuvvetinin uygulanması gerektiğini belirtmişlerdir.

(Bucca ve Collina, 2009), akım toplayıcı grafit plaka ile temas eden bakır tel arasındaki dinamik etkileşimi simüle eden bir model üzerinde çalışmış ve kabul edilen aşınma modeli ile elektrik akımının etkisinde dahil olmak üzere bir aşınma haritası oluşturmuşlardır. Grafit plaka ve bakır telin aşınma miktarlarını inceleyen araştırmacılar; bakır telin gerginliğinin 17-20 kN değerinde tutulmasıyla bakır teldeki aşınmanın yaklaşık % 50 ve grafit plakaların aşınma derinliğinin de yaklaşık % 10 azaldığını tespit etmişlerdir.

(Ding vd., 2011a), saf karbon plaka ile bakır telin temasını elektrik akım varlığında ve akımsız olarak değişken parametre değerlerinde test etmişlerdir. Deney düzeneğinde normal kuvvet, hız ve akım parametrelerini farklı değerlerde uygulamışlardır. Yapılan araştırmalarda sürtünme katsayısının elektriksiz çalışmada, elektrik akımlı çalışmaya göre daha yüksek olduğunu bulmuşlardır. Ayrıca artan hız parametresi ile akımsız deneyde sürtünme katsayısının küçük de olsa arttığını belirtmişlerdir. Elektrik akımının varlığı ile yapılan deneyler sonucunda, akımsız deneylere göre grafit plakanın aşınma oranının yüksek oranda arttığını gözlemlemişlerdir.

(Wei vd., 2019), pantograf ve katener sisteminin aşınma oranını yaklaşık olarak belirlemek için hesaplama modelleri kullanmışlardır. Bu modelleri kullanırken Çin’deki metro hatları üzerinde çalışmalar yapmışlardır. Yaptıkları çalışma sonucunda, trenin hızının aşınmada önemli bir etken olduğunu, aşınma oranının trenin hızlanma bölgesinde yavaşlama bölgelerine göre çok daha yüksek olduğu sonucunu elde etmişlerdir. Elde edilen veriler ışığında aşınma oranını uygun değer aralıklarında tutabilmek için tren güzergah hattına özgü bir hız eğrisinin belirlenmesi gerektiğini önermişlerdir.

(Chen vd., 2009), yaptıkları çalışmada yapısına bakır emdirilmiş karbon plaka ile paslanmaz çelikten imal edilmiş telin sürtünme ve aşınma davranışlarını pin on disc deney düzeneğinde araştırmışlardır. Deneylerinde değişken temas kuvveti akım ve hız değeri kullanan araştırmacılar çalışmaları sonucunda, elektrik akımı varlığında artan akım değeri etkisiyle bakır emdirilmiş karbon plakanın aşınma oranının arttığını, artan temas kuvveti ile azaldığını ifade etmişlerdir.

(Huang vd., 2020), krom (Cr) içeren bakır matrisli kompozite farkı oranlarda pul şeklinde grafit ilave etmiş ve bu karışımları toz metalurjisi yöntemiyle plaka

halinde üretmişlerdir. Grafit/bakır matrisli kompozitleri bir aşınma deney düzeneğinde değişen hız, temas kuvveti, elektrik akımlı ve akımsız parametre koşullarında araştırmışlardır.

(Ding vd., 2011b), elektrik akımlı ve akım olmadan test düzeneğinde çalışma sıcaklığı ve ark deşarjının etkisiyle pantograf ile katener temas teli arasındaki tribolojik değişimleri incelemişlerdir. Yaptıkları çalışma sonucunda grafit plakadaki aşınmanın temel olarak termal aşınma ve ark erozyonundan kaynaklandığını belirtmiş, grafit plakaların aşınmasında ark deşarj parametresinin sıcaklık parametresine göre daha büyük etkiye sahip olduğunu belirlemişlerdir. Ayrıca pantograf – katener temas çiftinin termal aşınmasını azaltmak için soğutma işlemi uygulanmasını önermişlerdir.

(Mei, 2020), çalışmada Çin’de kullanılan metro hattının yapısını irdeleyip pantograf mekanizmasında bulunan bakır emdirilmiş akım toplayıcı grafit plaka ve bakır-gümüş alaşımı katener temas telinin aşınma deneyleri sonucunda tribolojik etkileşimini incelemiştir. Deneysel çalışma için gerçek Çin metro hattının parametrelerini dikkate almışlardır. Yapılan incelemeler sonucunda; sürtünme katsayısının 0.3 ile 0.38 arasında değiştiği, çift arasında ana aşınma mekanizmalarını adhesiv aşınma ve ark erozyonu olarak belirlenmiştir. Pantograf da oluşacak titreşimin grafit plaka ve katener temas telinin etkileşimini oldukça etkilediği vurgulanmıştır. Elektrik akımının artmasıyla birlikte etkileşim çiftinin sıcaklığının yükseldiği ve ark deşarj enerjisinin arttığı görülmüştür.

(Yang vd., 2012), akım toplayıcı grafit plaka ve katener temas teli çiftinin sürtünme ve aşınma davranışlarını incelemek için bir dizi deneysel çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada kullanılacak grafit plaka malzemesi elektrikli demir yollarında kullanılan malzemeyle aynı olacak şekilde özel bir proses ile grafit tozundan üretilmiştir. Deneylerin sırasında temas kuvveti ile etkileşim çiftinin aşınma oranı, temas kuvveti ile elektrik akımı, aşınma oranı ile elektrik akımı değişimleri belirlenmiş ve SEM ile aşınma yüzeyleri incelenmiştir. Yapılan incelemeler sonucunda; ark deşarj kalitesinin titreşimler ile ilgili olduğu ve bu titreşimlerden kaynaklanan temas kaybı sonucunda ark boşalmalarının meydana geldiğini belirtmişlerdir. Ortalama ark deşarj enerjisinin temas kuvvetinin artmasıyla önce keskin bir şekilde azaldığı daha sonra ise yavaş yavaş bir azalma gösterdiğini tespit etmişlerdir. SEM incelemeleri sonucunda düşük yükte uygulanan temas

kuvveti deneylerinden ana aşınma mekanizması ark erozyonu, yüksek yükte ise adhesyon ve abraziv aşınma olarak belirlenmiştir.

(Wang vd., 2017a), iyi bir elektrik iletkenliğe ve aşınma direncine sahip olması amacıyla ürettikleri pulsuz ve pullu olmak üzere karbon fiber/bakır fiber takviyeli karbon matris kompozit ve saf karbon malzemenin mikro yapısını, mekanik ve elektriksel özelliklerini araştırmışlardır. Sürtünme ve aşınma deneylerini pin on disc şeklindeki aşınma test cihazında gerçekleştirmişlerdir. Deneyler sonucunda, C_f/Cu_f -C kompozit malzemenin Çin’de yüksek hızlı trenlerde kullanılan karbon kompozit plakaya göre mekanik ve elektriksel özellikleri açısından önemli avantajları olduğunu belirtmişlerdir. Pul grafitin elektrik akımı altında aşınma yüzeyinde sürekli bir yağlayıcılık etkisi oluşturmamasından dolayı; C_f/Cu_f -C kompozit malzemenin sürtünme katsayısı, karbon kompozit malzemeye göre daha düşük bir değerde elde edilmiştir. Termal stres çatlaklarının yayılması ve büyümesi, aynı aşınma testi altında karbon kompozitinin aşınma mekanizmalarından farklı olan pul grafitli C_f/Cu_f -C kompozit içindeki karbon fiberler tarafından bloke edilmiştir.

(Yang vd., 2015), grafit plakalar ile katener temas telinin birbirlerine teması sırasında oluşan titreşim üzerine bir dizi deneysel çalışmaları yüksek hızla dönen halka şeklinde bir test düzeneğinde gerçekleştirmişlerdir. Deneysel çalışmalar sonucunda; temas sırasında oluşan titreşimin artan kayma hızıyla kötüleştiği, grafit plakaların katener teline karşı sürtünme katsayısının elektrik akımı ile azaldığı ve artan kayma hızı ile aşınma oranının arttığını belirtmişlerdir. Kayma hızının artışı ile plaka ve katener telin temas yüzey sıcaklığının elektrik akımı ile hızlı bir şekilde arttığı, ark deşarjının da artan kayma hızı ile daha da güçlendiği ve bunun üzerine grafit plakaların yüzeylerinde yüksek miktarlarda ark erozyonun olduğu gözlemlenmiştir.

(He vd., 2000), yaptıkları çalışmada farklı malzemelerin değişen koşullar altında aşınma testlerini gerçekleştirip, raylı sistemin çalışmasını simüle etmeye çalışmışlardır. Çalışmaları sonucunda bakır palak üzerinden oluşturuksları yağlayıcı etkisiyle sürtünme katsayısının azaldığını belirtmişlerdir.

(Wang vd., 2020), elektrik akımı taşıyan bakır temas telin hareketsiz olduğu, grafit plakanın ise ileri geri hareket yaptığı bir sürtünme ve aşınma test düzeneği tasarlamışlardır. Test düzeneği sayesinde elektrik akımı, su miktarı ve temas kuvveti

parametrelerinin, bakır temas teliyle grafit plakanın teması sırasında sürtünme ve aşınma özellikleri üzerindeki etkilerini incelemişler ve sonuç olarak; düşük akım koşullarında sürtünme çiftinin aşınmasının birleşme etkisi ve akım ile birlikte önce arttığı, grafit plaka üzerindeki su miktarının artırılması ile suyun yağlayıcı özelliği ve oksit tabakasının oluşumu ile azaldığını belirlemişlerdir. Temas sırasında karbon plaka üzerindeki su miktarının sabit tutulduğunda; suyun yağlayıcı özelliğinin ortadan kalktığını ve artan akım ile ısınan temas çiftinin daha fazla aşınmaya başladığını görmüşlerdir. Düşük akım koşullarında normal yükün artmasıyla temas durumu iyileşmiş, kötü temastan kaynaklanan deşarjın neden olduğu elektriksel aşınmanın ortadan kalkmasıyla temas çiftinin aşınma miktarı azalmıştır.

(Kubota vd., 2013), deneylerinde kullanmak üzere üç farklı bakır alaşımı emdirilmiş C/C kompozit malzemeleri değişen elektrik akım değeri, sabit hız ve temas kuvveti değerleri altında test etmişlerdir. Çalışmaları sonucunda akım toplayıcı grafit plaka yüzeyinde yüksek çalışma sıcaklığının etkisiyle emdirilmiş metalin eridiğini, bozulan C/C yapısının yüzey hasarının artmasına sebep olduğunu vurgulamışlardır.

(Kubo ve Kato, 1999), çalışmalarında bakır emdirilmiş akım toplayıcı grafit plaka ile bakır temas telinin, temas kopması sırasında oluşan ark deşarjının aşınmayı önemli bir derecede etkilediğini belirtmiş ve bakır emdirilmiş grafit plaka malzemesiyle bakır temas telinin sürtünme ve aşınma testlerini, oluşturdukları deney düzeneğinde araştırmışlardır. Deneyler sırasında aşınma oranı, sürtünme katsayısı ve kuvvetindeki değişim, yüzey pürüzlülük değerleri, temas çifti yüzeylerindeki sıcaklık ve elektrik akım değerinin değişim ölçümlerini yapmış, aşınma yüzeyleri SEM ile görüntülenmiştir. Deneyler sonucunda, aşınma oranının test sırasındaki deşarj enerjisiyle doğru orantılı olduğunu belirtmişler ve bunu bir formül ile ifade etmişlerdir. Deney sırasında aşınma sürecini başlangıç ve sabit aşınma diye iki bölüme ayırmışlar, bu geçişler sırasında değerlerde önemli ölçüde değişiklik olduğunu belirtmişlerdir.

(Cui vd., 2018), basınçsız emdirme yöntemi (PLI) ile ürettikleri karbon/karbon-bakır (C/C)-Cu (bakır emdirilmiş) kompozit malzemenin mekanik, tribolojik ve elektriksel özelliklerini karbon/karbon (C/C) ve karbon/bakır (C/Cu) kompozit malzemeler ile karşılatırmışlardır. Bu karşılaştırmaları yaparken malzemelerin mekanik özelliklerini belirlemek için 3 nokta eğilme testi, elektriksel özelliklerini

belirlemek için elektrik özdirenç yöntemi, tribolojik özelliklerini belirlemek için ise bir disk üzerinde bloğun aşınmasını sağlayan (block-on-disk) test cihazında sürtünme ve aşınma testleri gerçekleştirmişlerdir. Yaptıkları incelemelerde ürettikleri (C/C)-Cu sıkı malzeme yapısının elektronik ve gerilim iletimi için oldukça önemli bir ağ yapısı oluşturduğunu belirtmişlerdir. (C/C)-Cu kompozit malzemenin elektrik özdirenç değeri diğer malzemelere göre en düşük değeri almıştır. Bunun sebebinin Cu alaşımının kompozit yapı içerisinde dağılarak bir ağ iletimi oluşturduğu, elektron iletimini daha da kolaylaştırdığı ve malzeme üzerinde sürekli bir elektrik iletimi elde edildiğini belirtmişlerdir. Yapılan sürtünme ve aşınma testlerinde en düşük sürtünme katsayısı  l  m n n C/Cu kompozit malzemedan elde edildiğini fakat bu malzemenin elektriksel ve mekanik özelliklerinin diğer malzemelere göre zayıf kaldığını söylemişlerdir. Yapılan  alışma sonucunda (C/C)-Cu kompozit malzemenin raylı sistemler teknolojisinde kayan akım toplayıcı şerit malzeme olarak etkili bir şekilde kullanılabileceğini vurgulamışlardır.

(Shangguan vd., 2010), metal emdirilmiş karbon malzemeyle C/C kompozit malzemenin sürtünme ve aşınma testlerini pin on disc şeklinde bir aşınma test cihazında gerçekleştirmişlerdir. Deneyler sırasında genellikle katener temas telinde kullanılan bakır malzeme yerine bronz malzeme kullanılmıştır. Deneyler sırasında, elektrik akımının değişimine bağlı olarak aşınma oranındaki değişim ve aşınma yüzeylerinin SEM ile görüntüleri elde edilmiştir. Deneyler sonucunda artan elektrik akımının grafit plaka yüzeyinde aşınma oranını arttırdığını ifade etmişlerdir.

(Bucca ve Collina, 2015), pantograf mekanizmasına akım toplayıcı grafit plakalar ile havai hat katener temas telinin kayma esnasında etkileşimi sırasında gerçekleşen aşınma mekanizmasının farklı fonksiyonları olduğunu belirtmişlerdir. Bunlar; sürtünme nedeniyle mekanik, akım akışı nedeniyle elektriksel ve ark üretiminden kaynaklı elektrik arkları nedeniyle oluştuğunu ifade etmişlerdir. Yaptıkları çalışmada katener temas telinin temas sırasında aşınma mekanizması ile ilgili etkileşimini mekanik, elektriksel ve ark oluşumları ile açıklayan bir aşınma modeli geliştirmişler ve test düzeneğinde deneysel çalışmasını gerçekleştirmişlerdir. Kayma hızı, temas kuvveti ve elektrik akımı gibi parametreleri simüle eden sayısal bir modelleme kullanmışlar ve böylelikle pantograf ve katener sistemindeki temas telinin aşınma oranını azaltılabilecek potansiyel iyileştirmeleri belirlemişlerdir.

(Hu vd., 2017), Cu-Ag alaşımlı ve saf bakırdan oluşan katener temas telinin yüksek hızlarda ve elektrik akımı altında grafit akım toplayıcı plakalara sürtünmesini, sürtünme katsayısı, aşınma miktarı ve ark deşarj enerjisi gibi parametreleri dikkate alarak test düzeneğinde araştırmıştır. Yaptıkları testlerde alaşımlı katener temas telinin sürtünme katsayısının saf bakır katener telin sürtünme katsayısından büyük olduğunu, aşınma oranının alaşımlı katener temas telinde daha yüksek sonuç verdiğini ve aşınma mekanizmalarından ark erozyon ve adhesiv aşınma türlerinin görüldüğünü bulmuşlardır.

(Nagasawa ve Kato, 1998), tramvay temas telinin aşınma ömrü üzerine elektrik akımı altında sürtünme ve aşınma deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada sinterlenmiş demir alaşımlı plaka üzerinde kayan Cu-Cr-Zr, Cu-Sn ve Cu malzeme üç çeşit alaşımlı tel kullanılmıştır. Test sonuçları telin aşınma oranının temas yüzeylerinde üretilen ısı ile ilişkili olduğunu göstermiştir. Isı' nın plaka ile tel arasında temas kaybı yaşandığında, sürtünme kuvveti, elektrik temas direnci ve elektrik arkı vasıtasıyla oluştuğunu belirtmişlerdir.

(Ambrósio vd., 2013), pantograf mekanizması ve katener hattı arasındaki temas kalitesinin iyileştirilmesi ve optimizasyonu için bir prosedür önermişlerdir. Bu prosedür de temel tasarım değişkenleri olan yay sertliği, sönümleme özellikleri ve yay kütlesi üzerinde modelleme çalışması yapılmıştır. Yaptıkları çalışmada temas kalitesinin iyileştirilmesinde alanın oldukça sınırlı olduğunu görmüşlerdir. Standart bir yüksek hızlı pantograf mekanizmasında yaklaşık % 11 potansiyel iyileşme elde etmişlerdir. Temas kalitesinin iyileştirilmesi ve optimizasyonu için daha fazla çalışma yapılması gerektiğini de vurgulamışlardır.

(Song vd., 2017), grafit plaka ile katener temas teli arasındaki temas kuvvetindeki dalgalanmayı azaltmak ve mevcut akım toplama kapasitesini daha da iyileştirmek için aktüatörler geliştirmişlerdir. Farklı iki konfigürasyonlarda simüle edilen bu aktüatörler sayesinde sayısal kontrol kazanımlarının kontrol performansı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Dış düzensizlik olarak adlandırılan rüzgar kuvveti ve lokomotifin titreşiminin, temas kuvvetinde yüksek dalgalanmaya ve temas kaybına neden olabileceğini, bunun da önüne geçebilmek amacıyla çok gövdeli pantograf üzerine monte edilen kontrolör ile azaltılabileceğini ön görmüşlerdir.

(Shimanovsky vd., 2016), yeni pantograf mekanizma tasarımlarının oluşturulmasında grafit plakaların geometrik seçiminin, katener temas telin ve grafit plakanın minimum aşınması için önemli bir parametre olduğunu belirtmişlerdir. Bu sebeple grafit plaka ile katener temas teli arasındaki etkileşim sırasında oluşan dinamik kuvvetleri belirlemek için sonlu elemanlar yöntemiyle çeşitli simülasyon analizleri yapmışlardır. Bu simülasyon vasıtasıyla grafit plaka üzerinde katener telin kayması esnasında grafit plaka da oluşan gerilme değerlerini tespit etmişlerdir. Ayrıca pantograf mekanizmasının süspansiyonu için bir hesaplama modeli geliştirmişlerdir.

(Senouci vd., 1999), çalışmalarında grafit plakanın elektriksel iletim tensörünün kayar elektrikli temasta düşük sürtünme ve aşınma oranına yol açan tensörler ile ilişkisini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda grafitin sürtünme ve aşınma davranışının elektrikten etkilediği ayrıca temas sırasındaki elektrik yoğunluğunun, temas yüzeyinde, transfer tabakasında ve temas sırasındaki elektrik potansiyel düşüşünde önemli bir rol oynadığını gözlemlemişlerdir. Grafit plakanın sertliğini veren yüzey morfolojisinde aşınma davranışı ve transfer tabakasıyla ilişkili olduğunu bildirmişlerdir.

(Collina ve Bruni, 2002), pantograf ve katener sistemin dinamik etkileşimi için bir matematiksel model geliştirmişlerdir. Model sistemin davranışını geniş bir frekans aralığında araştırmayı, farklı pantograf katener sistemi tasarımlarının değerlendirilmesinin yanısıra özellikle temas eden yüzeylerde düzenli ve düzensiz aşınma oluşumunu amaçlamışlardır.

(Alo ve Otunniyi, 2021), polietilen/epoksi içerisine hibrit dolgu malzemesi olarak belli oranlarda grafit/karbon siyahı ekleyip çeşitli karışımlar hazırlamış ve bu karışımların elektrik iletkenliklerini incelemişlerdir. Farklı karışım oranlarında hazırlanan polietilen/epoksi/grafit (PE/EP/G) ve polietilen/epoksi/grafit/karbon siyahı (PE/EP/G/KS) kompozit malzemelerin elektrik iletkenlik değerlerinin karşılaştırmalı sonuçlarını sunmuşlardır. Yaptıkları değerlendirmeye göre; kompozit malzeme karışımı içerisinde G/KS dolgu malzemesinin artışı ile elektrik iletkenliğinin arttığını, iletkenlik anizotropisinin ise azaldığını belirlemişlerdir. Hem G/KS hem de sadece G dolgu takviyeli kompozitlerin dolgu malzeme katkı oranının artışı ile düzlem içi ve düzlem boyunca elektrik iletkenliğinin arttığını tespit etmişlerdir. Bu artışın dolgu malzemesi oranının arttıkça dolgu parçacıkları

arasındaki temas sayısındaki artıştan kaynaklandığını ve artışın sonucunda daha iletken ağ oluşumunun elektrik iletkenliğini iyileştirdiğini belirtmişlerdir. G/KS veya sadece G dolgu takviyeli kompozitlerin elektrik iletkenliklerini de karşılaştıran araştırmacılar, KS' nin nano boyutlu yapısı sayesinde mikro boyutlu yapıya sahip G içerisinde bulunan yapı boşluklarında köprü işlevi gördüğünü ve iletken bağlar oluşturmamasından dolayı G/KS dolgu takviyesinin sadece G dolgu takviyesi içeren kompozit malzemeye göre elektrik iletkenliğinin daha iyi sonuçlar verdiğini analiz etmişlerdir.

(Tu vd., 2017) vakumlu ortamda ve basınç altında emdirme yöntemi ile üretilen karbon matris yapısına sahip karbon ve bakır elyaf takviyeli kompozit malzemenin ($C_f/Cu-C$) elektrik iletkenliği ve mekanik özelliklerini ticari AR129 karbon malzeme ile karşılaştırmışlardır. Sonuçları incelediklerinde $C_f/Cu-C$ kompozit malzemenin elektrik direnç ölçümünü $10.16 \mu\Omega m$, AR129 malzeme için ise $33 \mu\Omega m$ olarak bulmuşlardır. $C_f/Cu-C$ kompozit malzemenin iyi elektrik iletkenliği sağlamasında yapıya eklenen ve iletken kanallar oluşturan bakır elyafların etkili olduğu vurgulanmıştır. İki malzemenin sürtünme ve aşınma testleri sonucunda aşınma oranları incelendiğinde ise birbirlerine yakın değerler elde etmişlerdir.

(Zakaria vd., 2015) çalışmalarında epoksi matrisli yapı içerisine iletken dolgu malzemesi olarak sentetik grafit ve kısa çubuklar şeklinde yuvarlatılmış karbon elyaflar ekleyerek kalıplama yöntemi ile belli oranlarda kompozit malzemeler üretmişlerdir. Üretilen kompozit malzemelerin düzlem içi ve düzlem yönü elektrik iletkenlikleri ölçülmüştür. Kompozit malzeme içerisinde karbon elyafların artışı ile iki yönde de elektrik iletkenlik değerinin önce arttığını sonra ise belli bir miktar düştüğünü görmüşlerdir.

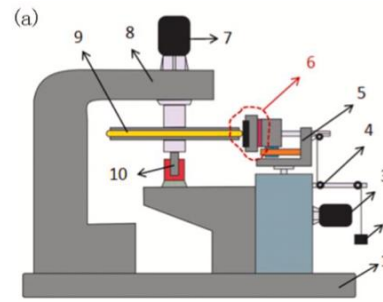
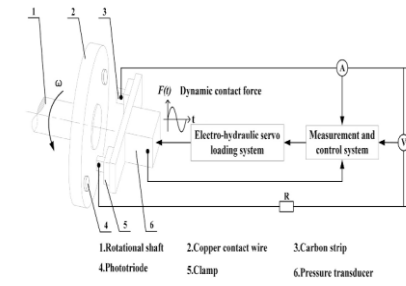
(Wie vd., 2021) yaptıkları çalışmada spark plazma sinterleme (SPS) yöntemi ile farklı bakır oranlarına sahip bakır-grafit ($Cu-C$) kompozit malzemeler üretmiş ve aynı bakır oranlarına sahip fakat dağlanmış bakır-grafit ($Cu-C$) kompozit malzemeler ile yoğunluk, mikroyapı, sertlik, elektrik öz direnci, sürtünme ve aşınma özellikleri açısından karşılaştırılmalı olarak incelenmiştir. Yaptıkları çalışma sonucunda malzeme içerisinde artan bakır oranı ile yoğunluğun arttığını, elektrik direncinin düştüğünü yani elektrik iletiminin iyileştiğini belirlemişlerdir. Aynı bakır oranına sahip fakat dağlanmış numunelerin elektrik direnç değerleri incelendiğinde ise dağlanmamış numuneye göre elektrik iletkenliğinin azaldığını fakat bu azalmanın

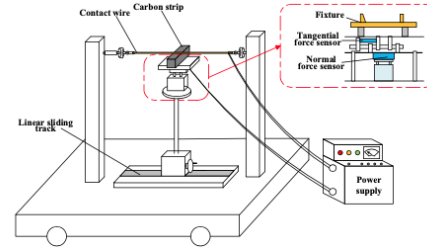
önemli bir değeri olmadığını vurgulamışlardır. Dağlanmış numunenin elektrik iletkenliğinin kötüleşmesine etken olarak, dağlama işleminin malzeme içerisinde yol açtığı ve elektrik iletimini zorlaştıran gözenekli/çukurlu yapıya bağlamışlardır.

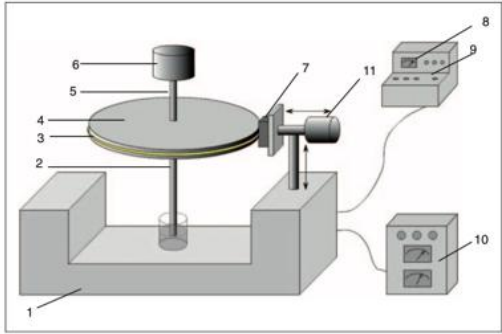
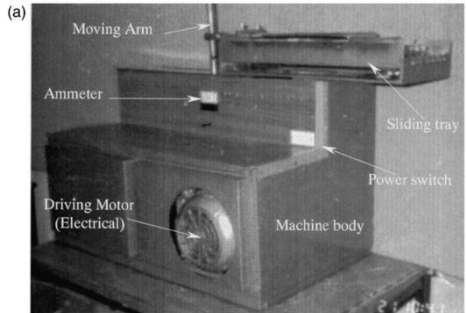
Raylı sistemler çalışmalarında literatürde karşılaşılan bazı aşınma simülatörleriyle bu tez çalışmasında imalatı yapılan aşınma simülatörünün karşılaştırılması Tablo 2.1’de verilmiştir.

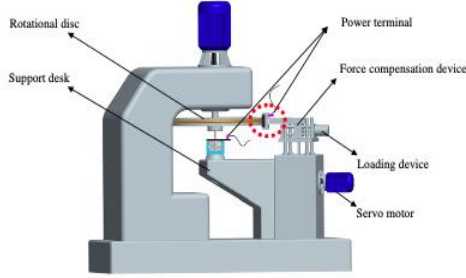
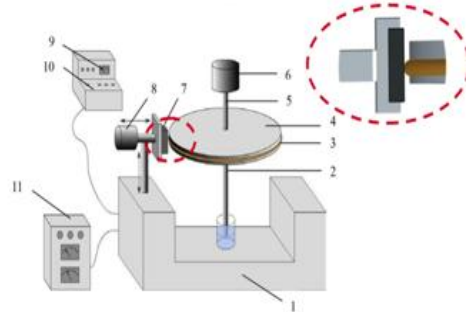


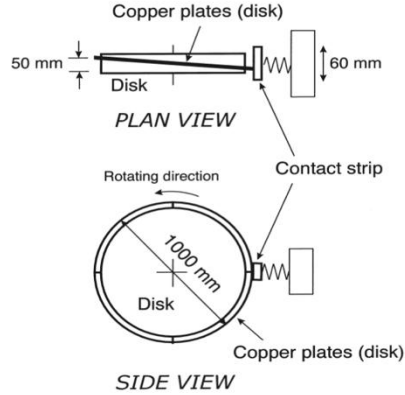
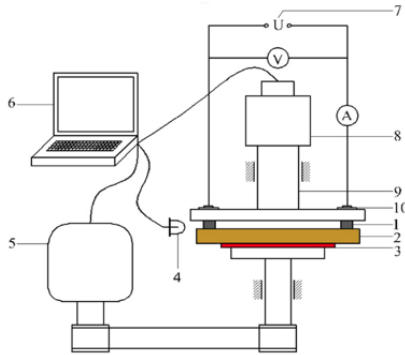
Tablo 2.1. Literatürdeki deney düzeneklerinin karşılaştırılması

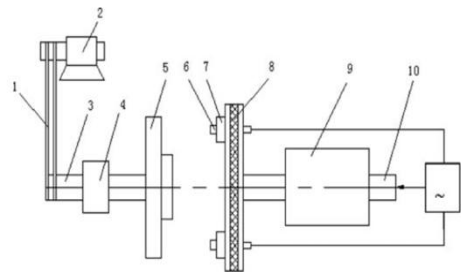
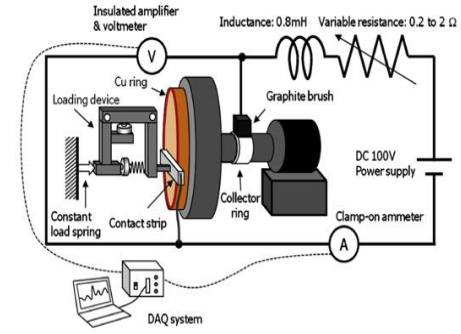
NO	MAKALE ADI	UYGULANAN KUVVET (N)	HIZ (km/s)	SÜRE	İNCELENEN PARAMETRE	TEST DÜZENEĞİ	FARKLAR
1	Tribological performance of rigid overhead lines against pantograph sliders under DC passage, (Mei, 2020)	30	40,60,80, 100, 120	120 km	Yüzey pürüzlülük, sıcaklık, aşınma oranı, sürtünme katsayısı, elektrik akım enerjisi		Disk aşağı yukarı hareket yapmıyor. Zikzak hareketini çerçeve sağlıyor. Dur-kalk gibi bir yol benzeşimi mevcut değil. Trenin gerçek hareketini benzeştirmiyor. Elektrik akımlı ve akımsız testler yapılmış.
2	Tribological properties of pure carbon strip affected by dynamic contact force during current-carrying sliding, (Zhang vd., 2018)	70	40, 60, 70, 80, 90, 100	2 saat	Aşınma oranı, sürtünme katsayısı, temas kuvveti değişimi, aşınma yüzeyi		Plaka ve tel sabit, standart sürtünme ve aşınma test cihazı. Zikzak hareketi mevcut değil, Dur-kalk gibi bir yol benzeşimi mevcut değil. Trenin gerçek hareketini benzeştirmiyor. Elektrik akımlı ve akımsız testler yapılmış.

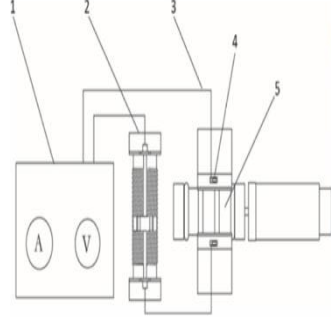
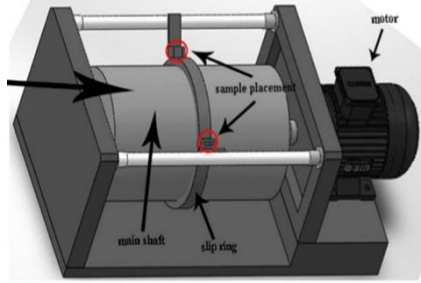
NO	MAKALE ADI	UYGULANAN KUVVET (N)	HIZ (m/sn)	SÜRE	İNCELENEN PARAMETRE	TEST DÜZENEĞİ	FARKLAR
3	Effect of wet condition on the wear performance of carbon strip and metal contact wire with electric current, (Wang vd., 2020)	20, 30, 40, 50	1,5	60 dk	Sürtünme katsayısı, aşınma oranı, aşınma yüzeyleri		Zikzak hareketini sağlamak için teli açılı bir şekilde montaj yapmış.Yol ve zaman değerleri gerçek tren hareketine uygun değil. Dur-kalk gibi bir yol benzeşimi mevcut değil. Trenin gerçek hareketini benzeştirmiyor. Elektrik akımlı ve akımsız testler yapılmış.
4	Influence of contact parameters on the tribological behaviour of various graphite / graphite sliding electrical contacts, (Poljanec vd., 2018)	1,25, 2,5, 5	2,5, 5, 10	24 saat	Sürtünme katsayısı, aşınma oranı, aşınma yüzeyleri		Standart tribolojik sürtünme ve aşınma test cihazı gibi durmaktadır. Zikzak hareketi yok, aşınma çifti sabit. Dur-kalk gibi bir yol benzeşimi mevcut değil. Trenin gerçek hareketini benzeştirmiyor. Elektrik akımlı ve akımsız testler yapılmış.

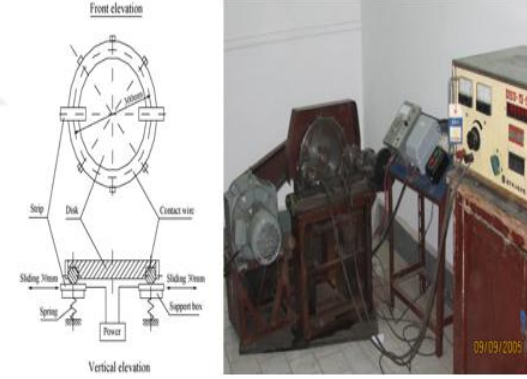
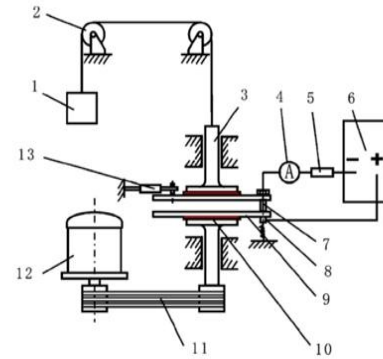
NO	MAKALE ADI	UYGULANAN KUVVET	HIZ	SÜRE	İNCELENEN PARAMETRE	TEST DÜZENEĞİ	FARKLAR
5	Effect of the vibration on friction and wear behavior between the carbon strip and copper contact wire pair, (Yang vd., 2012)	60, 80, 100, 120, 140 N	80, 120, 160 km/s	50 km	Aşınma oranı, elektrik enerjisi, aşınma yüzeyleri		Disk sabit, zikzak hareketi sağlanmış. Temas kuvveti için bir elektrik silindiri kullanılmış. Dur-kalk gibi bir yol benzeşimi mevcut değil. Trenin gerçek hareketini benzeştirmiyor. Elektrik akımlı ve akımsız testler yapılmış.
6	A sliding wear tester for overhead wires and current collectors in light rail systems, (He vd., 2000)	1,45 kg	0,12 m/sn	1 000 000 çevrim	Sürtünme katsayısı, aşınma yüzeyleri		Tel ve grafit plaka sabit. Zikzak hareketi mevcut değil. Dur-kalk gibi bir yol benzeşimi mevcut değil. Trenin gerçek hareketini benzeştirmiyor.

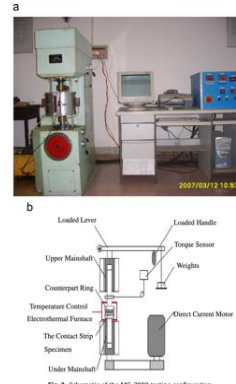
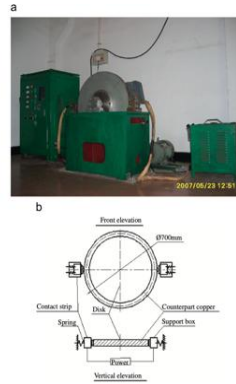
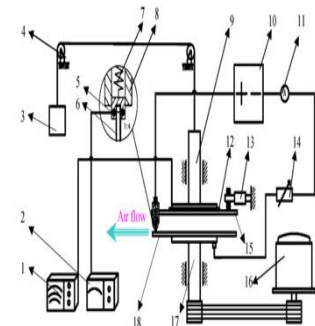
NO	MAKALE ADI	UYGULANAN KUVVET (N)	HIZ (km/s)	SÜRE	İNCELENEN PARAMETRE	TEST DÜZENEĞİ	FARKLAR
7	Friction and wear behavior of pure carbon strip sliding against copper contact wire under AC passage at high speeds, (Ding vd., 2011b)	60, 90, 120, 150	140, 150, 160, 170	150 km	Yüzey pürüzlülük, elektrik enerjisi, sürtünme katsayısı, sıcaklık, aşınma yüzeyleri		Zikzak hareketi mevcut. Disk sabit, plaka hareketli. Grafit çerçevesi 110 mm genlikte hareket edebiliyor. Dur-kalk gibi bir yol benzeşimi mevcut değil. Trenin gerçek hareketini benzeştirmiyor. Elektrik akımlı ve akımsız testler yapılmış.
8	Influence of reciprocating distance on the delamination wear of the carbon strip in pantograph-catenary system at high sliding-speed with strong electircal current, (Yang vd., 2019b)	140	200, 250, 300	30 km	Sürtünme katsayısı, aşınma oranı, aşınma yüzeyleri		Zikzak hareketi mevcut. Disk sabit, plaka hareketli. Grafit çerçevesi A genliğinde hareket edebiliyor. Temas kuvveti elektrik servo aktüatör ile sağlanmış. Dur-kalk gibi bir yol benzeşimi mevcut değil. Trenin gerçek hareketini benzeştirmiyor. Elektrik akımlı ve akımsız testler yapılmış.

NO	MAKALE ADI	UYGULANAN KUVVET (N)	HIZ	SÜRE	İNCELENEN PARAMETRE	TEST DÜZENEGİ	FARKLAR
9	Effect of arc discharge on the wear rate and wear mode transition of a copper-impregnated metallized carbon contact strip sliding against a copper disk, (Kubo ve Kato, 1999)	49	100 km/s	30 dk	Sürtünme katsayısı, yüzey pürüzlülük, sıcaklık, elektrik akımı, aşınma yüzeyleri		Zikzak hareketi oluşturulmuş. Plaka sabit, tel açılı hareket ediyor. Dur-kalk gibi bir yol benzeşimi mevcut değil. Trenin gerçek hareketini benzeştirmiyor. Elektrik akımlı ve akımsız testler yapılmış.
10	Wear and friction behaviours of copper mesh and flaky graphite-modified carbon/carbon composite for sliding contact material under electric current, (Wang vd., 2017a)	70	10-30 m/sn	20 km/s	Sürtünme kuvveti, elektrik akımı, aşınma oranı, aşınma yüzeyleri		Pin on disk şeklinde standart bir aşınma test düzeneği. Zikzak hareketi mevcut değil. Dur-kalk gibi bir yol benzeşimi mevcut değil. Trenin gerçek hareketini benzeştirmiyor. Elektrik akımlı ve akımsız testler yapılmış.

NO	MAKALE ADI	UYGULANAN KUVVET (N)	HIZ	SÜRE	İNCELENEN PARAMETRE	TEST DÜZENEGİ	FARKLAR
11	Comparative study on wear behaviors of metal-impregnated carbon material and C/C composite under electrical sliding, (Shangguan vd., 2010)	80	10, 20, 30, 40, 50 m/sn	30 saat	Elektrik akımı, aşınma oranı, aşınma yüzeyleri	 Fig. 1—Schematic diagram of the wear tester: 1, belt; 2, electric motor; 3, drive shaft; 4, torque meter; 5, disk; 6, pins; 7, holding device; 8, Bakelite; 9, guide sleeve; 10, loading pole.	Pin on disk şeklinde standart bir aşınma test düzeneği. Zikzak hareketi mevcut değil. Bakır tel yerine bronz tel kullanılmış. Dur-kalk gibi bir yol benzeşimi mevcut değil. Trenin gerçek hareketini benzeştirmiyor. Elektrik akımlı ve akımsız testler yapılmış.
12	Sliding wear behavior of copper alloy impregnated C/C composites under an electrical current, (Kubota vd., 2013)	59	200 km/s	50 km	Aşınma oranı, elektrik akımı, sıcaklık, aşınma yüzeyleri		Block on disk şeklinde standart bir aşınma test düzeneği. Zikzak hareketi mevcut değil. Temas kuvvetini sabit bir yay mekanizması ile Dur-kalk gibi bir yol benzeşimi mevcut değil. Trenin gerçek hareketini benzeştirmiyor. Elektrik akımlı testler yapılmış.

NO	MAKALE ADI	UYGULANAN KUVVET	HIZ	SÜRE (s)	İNCELENEN PARAMETRE	TEST DÜZENEĞİ	FARKLAR
13	Effect of flake graphite content on wear between behavior between P/M copper-based pantograph slide and contact wire, (Huang vd., 2020)	70 N	40, 60, 70, 80, 90, 100 km/s	2	Sertlik, aşınma miktarı, sürtünme katsayısı, yüzeylerde SEM, EDS ve XRD incelemeleri	 	Aşınma çiftinde plaka sabit tel hareketli fakat zikzak hareketi mevcut değil. Dur-kalk gibi bir yol benzeşimi mevcut değil. Elektrik akımlı ve akımsız testler yapılmış.
14	Effect of electrical current density, apparent contact pressure, and sliding velocity on the electrical sliding wear behavior of Cu-Ti3AlC2 composites, (Zhao vd., 2020)	1,25, 2,5, 5, 7,5 N/cm ²	2,5, 5, 10, 15 m/sn	5	Sürtünme katsayısı, aşınma miktarı, elektrik akım enerjisi, aşınma yüzeyleri		Raylı sistemlerden daha ziyade elektrik ileten malzemelerin sürtünme ve aşınma testlerini gerçekleştiren bir sistem olmuş. Aşınma çiftinde plaka sabit tel hareketli fakat zikzak hareketi mevcut değil. Dur-kalk gibi bir yol benzeşimi mevcut değil. Elektrik akımlı ve akımsız testler yapılmış.

NO	MAKALE ADI	UYGULANAN KUVVET (N)	HIZ (km/s)	SÜRE	İNCELENEN PARAMETRE	TEST DÜZENEĞİ	FARKLAR
15	Sliding wear behavior of copper alloy contact wire against copper-based strip for high-speed electrified railways, (Jia vd., 2007)	45	18	72 km	Aşınma miktarı, elektrik akımı, aşınma yüzeyleri		Test düzeneği hakkında yeterli bir bilgi verilmemiş. Zikzak hareketi mevcut değil. Dur-kalk gibi bir yol benzeşimi mevcut değil. Trenin gerçek hareketini benzeştirmiyor. Elektrik akımlı testler yapılmış.
16	Friction and wear behaviour of stainless steel rubbing against copper-impregnated metallized carbon (Chen vd., 2009)	40, 60, 80	60, 80, 100	100 km	Sürtünme katsayısı, yüzey profili, aşınma miktarı, aşınma yüzeyleri	 Fig. 1. Schematic diagram of the pin on disc test machine: (1) balance weight, (2) pulley, (3) pin frame, (4) ampere metre, (5) resistor, (6) controlled silicon rectifier, (7) pin specimen, (8) carbon brush, (9) disc specimen, (10) insulated material, (11) belt, (12) DC driving motor and (13) strain gauge load cell.	Pin on disk şeklinde standart bir aşınma test düzeneği. Zikzak hareketi mevcut değil. Gerinim ölçerler kullanılmış. Dur-kalk gibi bir yol benzeşimi mevcut değil. Trenin gerçek hareketini benzeştirmiyor. Elektrik akımlı ve akımsız testler yapılmış.

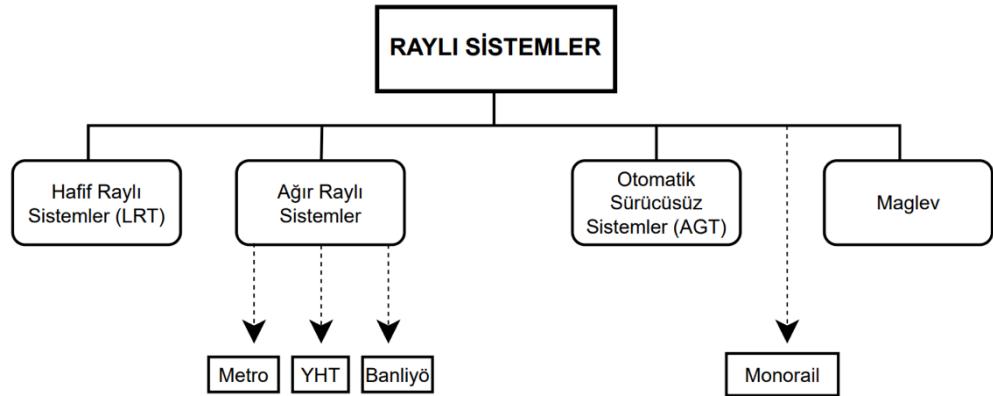
NO	MAKALE ADI	UYGULANAN KUVVET	HIZ	SÜRE	İNCELENEN PARAMETRE	TEST DÜZENEĞİ	FARKLAR
17	Thermal wear and electrical sliding wear behaviors of the polyimide modified polymer-matrix pantograph contact strip, (Tu vd., 2009)	50, 150	1,3 ve 41,7 m/sn	30, 60 dk	Sıcaklık, aşınma miktarı, aşınma yüzeyleri	 	Bir fırın içerisinde ve oda şartlarında aşınma çiftinin testlerini gerçekleştirmiştir. Zikzak hareketi mevcut değil. Dur-kalk gibi bir yol benzeşimi mevcut değil. Trenin gerçek hareketini benzeştirmiyor. Elektrik akımlı testler yapılmış.
18	Effect of temperature and arc discharge on friction and wear behaviours of carbon strip/copper contact wire in pantograph-catenary system, (Ding vd., 2011a)	55	70 km/s	30, 60, 90, 180 km	Sıcaklık, aşınma miktarı, sürtünme katsayısı, aşınma yüzeyleri		Pin on disc şeklinde standart bir aşınma test düzeneği. Zikzak hareketi mevcut değil. Dur-kalk gibi bir yol benzeşimi mevcut değil. Trenin gerçek hareketini benzeştirmiyor. Elektrik akımlı ve akımsız testler yapılmış.

3. RAYLI SİSTEMLERİN TANIMI, ÇEŞİTLERİ VE GRAFİT MALZEME

Bu bölümde raylı sistemlerin türleri hakkında genel olarak kısa bilgilere yer verilmiş ve HRS'lerin elektrik enerjisiyle güç beslemesinin temel altyapısı açıklanmıştır. Ayrıca akım toplayıcı grafit plaka malzemesinin raylı sistemlerdeki önemi ve rolü hakkında bilgilere değinilmiştir.

3.1. Kent İçi/Şehir İçi Raylı Toplu Taşıma Türleri

Büyük ve gelişmiş şehirlerde artan insan nüfusunun etkisiyle ortaya çıkan toplu taşımacılık problemlerinin çözümü noktasında demiryolu teknolojisi önemli bir çözüm noktası olmuştur. Teknolojinin de yıllar içerisinde gelişmesiyle kent içi veya şehir içi raylı taşıma türleri ortaya çıkmış, çeşitlenmiş ve etkin bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır. Günümüzde Dünya şehirlerinde sıklıkla kullanılan kent içi raylı toplu taşıma türleri tramvay, hafif raylı sistem, metro, banliyö, maglev ve yüksek hızlı tren olarak sınıflandırılmaktadır. İlgili şehirde hangi raylı toplu taşıma sisteminin kullanılacağı bölgenin nüfusu, fiziki durumu, güzergah detayı, yolcu kapasitesi ve yatırım maliyeti gibi etkenler göz önünde bulundurularak belirlenmektedir. Kent içi veya şehir içi raylı toplu taşıma sistemlerinin yaygın olarak bilinen türlerine aşağıdaki kısımlarda yer verilmiştir.



Şekil 3.1. Raylı sistemlerin sınıflandırılması

3.1.1. Tramvay

Şehir içi toplu taşımacılığında kullanılan en eski sistemlerinden biridir. Eski tarihlerde atların çektiği yolcu taşıma tramvaylarından günümüze gelindiğinde gelişen teknolojinin de etkisiyle elektrik enerjisi ile çalışan bugünkü tramvay

sistemlerine ulaşılmıştır. Tramvay sistemleri kara yolu ulaşım araçlarının kullandığı yol ve güzergahları kullanan, karmaşık trafik içerisinde diğer kara yolu araçları ile ilerleyen ve aynı geçiş bölgelerinde hareket edebilen ve bir sürücü tarafından kumanda edilen en düşük yolcu kapasiteli raylı toplu taşıma sistemidir. Kara yolu ile aynı seviyede yerleştirilen raylar üzerinde hareket ettiğinden dolayı büyük çaplı kazı ve inşaat altyapı çalışmaları gerektirmeden istenilen yol güzergahı oluşturulabilir. Tramvay toplu taşıma sistemlerinde, yolcuların araca ineceği ve bineceği durak olarak mevcut otobüs durakları veya onlar ile aynı görevi sağlayan basit yapılar kullanılmaktadır. Tramvay sistemlerinde hareketin sağlanması için gerekli enerji katener adı verilen havai besleme hattından genellikle 750 V DC gerilimi olarak alınır. Şehir içi ulaşım sırasında ortalama hızları 28-30 km/s olan tramvay sistemlerinin maksimum hızları 50 km/s hızını bulabilmektedir. Araç boyları 22 – 27 m arasında değişen ve sınırlı olan tramvaylar kara yolunu kullanan araçlarla beraber mevcut trafiği kullandığı için yolcu taşıma kapasitesi bakımından da sınırlı yolcu taşıma kapasitesine sahiptirler. Yolcu taşıma kapasitesi bakımından bakıldığında tramvay sistemi içerisinde oturan ve ayakta seyahat eden toplam yolcu sayısı 80-180 kişi arasında değişmektedir. Saatteki yolcu taşıma kapasitesi ise maksimum 15 000 kişi yolcu/yön olarak ifade edilmektedir. Bursa büyükşehir belediyesi tarafından Bursa şehrinde işletmeye alınan ve karışık trafik içerisinde karayolu taşıtlarıyla birlikte ilerleyen tramvayın görüntüsü Şekil 3.2’de verilmiştir (Şimşek, 2008; Baştürk, 2014).



Şekil 3.2. Bursa şehiriçi tramvay

3.1.2. Hafif Raylı Sistem (HRS)

Kent içi raylı toplu taşıma sistemleri içerisinde yer alan ve bazı çalışmalarda benzer teknik özellikleri sebebiyle tramvay ile aynı kategoride gösterilen HRS, ayırt edici genel özellikleri bakımından tramvay ile metro arasında yer alan raylı sistem aracıdır. Bilhassa milenyum çağından sonra şehirlerde büyük gelişim gösteren HRS altyapıları 2016 yılında Dünya çapında yaklaşık 10 milyon yolcu, 2018 yılında ise yaklaşık 14 milyon yolcu sayısına ulaşmıştır. Yine 2018 UITP verilerine göre Dünya’da 389 şehirde HRS’ ler toplu taşımada etkin olarak hizmet vermektedir. Avrupa HRS altyapısı bakımından ilk gelişmeleri yakalayan ve ilerleten lider bölge konumunda olsa da onu bu alanda altyapı yatırımlarını hızlı bir şekilde yapan, işletmeye alan ve büyüten Asya Pasifik ve Kuzey Amerika bölgeleri takip etmektedir. Bu haliyle bakıldığında Çin ülke olarak en büyük yatırımları yapan ve geliştiren ülke konumundadır. Avrupa ve Avrasya bölgeleri eski sistemleri göz önüne alındığında bakım ve modernizasyona daha fazla kaynak ayırması ayrıca filo, raylar, istasyon durakları vb. altyapıların yenilenmesi gerekmektedir. Dünya’ da işletmeye alınmış HRS araç sayısına genel olarak bakıldığında 37 bin 290 araç sayısına ulaşıldığı ve bunun 20 bin 750 ‘sinin Avrupa’da yer aldığı görülmektedir. Samsun şehrinde Samsun Büyükşehir Belediyesi tarafından hizmete alınan ve Tekkeköy – Üniversite yerleşim güzergahında yolcu taşıyan HRS ve yolcu indirme bindirme durağının görüntüsü Şekil 3.3’de verilmiştir.



Şekil 3.3. Samsun HRS

2018 yılında UITP tarafından yapılan çalışmada HRS sistemi ile kent içi yolcu taşımacılığında en çok yolcu taşıyan şehir Budapeşte olmuştur. HRS sistem uzunluğunun yolcu sayısına bölünmesiyle ortaya çıkan en kalabalık HRS ağının ise İskenderiye şehrinde, onun ardından da İstanbul şehrinde olduğu anlaşılmaktadır. Yine aynı çalışmadan edinilen bilgiye göre Dünya’ da en uzun HRS ağı Melbourne şehrinde 250 km olarak belirtilmiştir. Melbourne şehrinin ardından en uzun HRS ağı St.Petesburg ve Berlin olarak gelmektedir (UITP, 2019). Şehirlerdeki trafik tıkanıklığını azaltmak, sera gazını oranını düşürüp hava kalitesini iyileştirmek ve yerden tasarruf sağlamak gibi ilave pozitif katkıları da düşünüldüğünde HRS’ ler ve altyapıları Dünya genelinde sürekli gelişmeye ve yatırım almaya devam etmektedir.

HRS’ ler 750 V DC veya 1500 V DC gerilim ile 3.raydan veya kataner havai hattından elektrik beslemesi ile enerji alır. Bir sürücü tarafından kendi yol güzergâhları boyunca kısmen veya tam korumalı olarak oluşturulan bölgelerde sinyalizasyon sistemine uygun olarak kumanda edilir. Büyük oranda kendisine ait tam korumalı güzergâhları olsa da şehir içinde yer alan bazı bölgelerde karayolu taşıtları ile aynı yolu paylaşabilir. Yine kendine özgü oluşturan bu güzergahlar içerisinde fiziki şartların uygun olmadığı durumlarda yer altından tünel şeklinde veya yol üstünde viyadükler şeklinde alt yapılar oluşturulabilir. Ayrıca yolcu indirme ve bindirme durakları gibi peronlar, mevcut yolun üstünde veya altında kalacak şekilde uygun fiziki yol durumlarına göre inşa edilir. Buna benzer altyapı çalışmaları gerektiren sebeplerden dolayı yatırım ve inşaat maliyeti açısından HRS’ler tramvay sistemlerinin altyapı yatırımına göre daha yüksek bir oranda iş yükü ve yatırımı gerektirir.

HRS güzergâhları boyunca ve uygun yol koşullarına göre maksimum 80 km/s hızına ulaşabilse de uygun çalışma hızı 18-40 km/s aralığındadır. HRS’ leri oluşturan araç uzunlukları incelendiğinde ortalama 18 - 42 m boyunda değişen araç boyuna ulaşabildiği görülmektedir. Tramvaya göre oldukça uzun araç boylarına sahip olduğu için saatlik maksimum 35 000 kişi yolcu/yön yolcu kapasitesine sahiptir (Aydın, 2012; Arı, 2021, 2010).

Tablo 3.1. Türkiye' deki HRS projeleri

Hat İsmi	Hattın Uzunluğu (km)	İstasyon Miktarı	Ortalama Yolcu Sayısı (Kişi/Gün)	Besleme Sistemi
İstanbul HRS (T1-T3-T4-T5)	46	75	525 000	750 V DC
Ankaray HRS	8,7	19	175 000	750 V DC
Bursaray ve HRS (T1-T2-T3)	16,5	36	250 000	750 V DC
Konya HRS	41,1	43	300 000	750 V DC
Eskişehir (Estram)	55	74	100 000	750 V DC
Samsun HRS	35	43	90 000	750 V DC
Gaziantep HRS	35	16	75 000	750 V DC
Kayseri HRS	37,2	62	-	-

3.1.3. Metro

Dünya genelinde büyük şehirlerde yaygın şekilde kullanılan ve en fazla yolcu taşıma kapasitesine sahip raylı toplu taşıma sistemidir. Metro diğer ulaşım araçlarından tamamen ayrılmış tam korumalı yol güzergâh ve alt yapısına sahip sistemlerdir. Yol güzergâh durumuna göre bazen yol üzerinde bazen de yer altında ulaşımını sağlayabilir. Tamamen kendine özgü tam korumalı bir güzergaha sahip olduğundan dolayı diğer araçlar ile herhangi bir trafik kesişmesi veya geçişi yoktur. Metro sistemlerinin güç beslemesi katener havai hattın, rijit katener sistemden veya 3.raydan 750 V DC, 1500 V DC veya 3000 V DC gerilim seviyeleri kullanılarak sağlanır. Genel olarak metro araçlarının boyu 180 – 200 m uzunluklarını bulabilir. Tam korumalı güzergahları boyunca genellikle 2-10 vagondan oluşan ve 70-90 km/s işletme hızlarına ulaşabilen metro sistemleri saatte 60 000 kişi yolcu/yön kapasitesine sahiptirler. Metro sistemleri hem yüksek otomasyon sistemine sahip olmaları bakımından hem de metro güzergahı boyunca yapılacak yol ve altyapı inşaat yatırımları düşünüldüğünde yüksek yatırım maliyeti gerektiren bir raylı toplu taşıma

sistemidir. Ankara Büyükşehir Belediyesi tarafından Ankara şehrin de işletilen ve bir çok noktaya sefer düzenleyen metro aracının ve istasyonun görüntüsü Şekil 3.4’de verilmiştir (Can, 2020; Ulusoy, 2010).



Şekil 3.4. Ankara metro hattı

3.1.4. Banliyö

Şehir içinden dışarısında yer alan uzak yerleşim bölgelerine yolcu taşımak için kullanılan ve metro sistemlerine göre daha fazla yolcu taşıma kapasitesine sahip raylı toplu taşıma sistemidir. Banliyö treninin hareketi güzergahı boyunca yer üstünde gerçekleşir. Yolcuların inip bindiği istasyonlar yerleşim bölgelerine ve yoğunluğa göre güzergâh üzerinde belirlenir ve inşa edilir. Banliyö trenleri güzergahları boyunca mevcut demiryoluna ait hatlarında kullanabilirler. Banliyö sistemlerinde enerji temini katener havai hattından 15-25 kV AC gerilim seviyesinde sağlanmaktadır. Banliyö hattının ray açıklığı 1435 mm’dir. İşletme giderleri ve enerji tüketim değerleri hesaplandığında diğer raylı sistem toplu taşıma türlerine göre oldukça düşük maliyet değerlerine sahiptir. Seyahat güzergahına bağlı olmak kaydıyla banliyö treninin çalışma hızı 110-130 km/s değerlerine ulaşabilmektedir. Yüksek yolcu taşıma kapasitesine sahip banliyö sistemleri tek yönde saatte 100 000 kişi yolcu/yön taşıma kapasitesine sahiptir. Ulaştırma Bakanlığı tarafından hizmete alınan Gebze – halkalı banliyö raylı sistemine ait trenin görüntüsü Şekil 3.5’de verilmiştir (Can, 2020; Arı, 2021).



Şekil 3.5. Gebze - halkalı banliyö treni

3.1.5. Maglev (Manyetik Levitasyon Treni)

Maglev treni (manyetik levitasyon treni) süper iletken mıknatısların birbirini itme gücüne dayalı sistem alt yapısı ile çalışmaktadır. Bu sistemde trenin yol güzergahı boyunca dizilmiş bobinlere manyetik bir alan oluşturmak için alternatif akım verilir. Bu akım trenin raylara yakın kısımlarına yerleştirilmiş mıknatıslar ile etkileşime girip manyetik yastık adı verilen bir itme gücünün oluşmasını sağlar. Manyetik yastık treni yaklaşık 10-15 cm havaya kaldırıp hareket etmesini sağlar. Bu manyetik güç aracılığıyla treni havada tutan ve istenilen şekilde yönlendirme ilkesine dayanan sisteme manyetik levitasyon (maglev) denir. Trenin yolu boyunca yerleştirilen bobinlere verilen elektrik akım frekansının değiştirilmesi ile trenin hızı kontrol edilir. Oldukça gelişmiş ve kompleks bir sistem olan maglev treninin ilk ticari hattı Çin’de 2001 yılında altyapı inşaatına başlanılan ve 2004 yılında hizmete açılan Şanghai maglev tren hattıdır. Maglev tren hattı, Longyang Lu şehri ile Şanghai Pudong Uluslararası Havalimanı arasında hizmet vermekte olup hattın uzunluğu 30,5 km’dir. İki istasyon arası yolculuk yaklaşık 7 dakika 20 saniye sürmekte ve hat üzerinde trenin maksimum hızı 431 km/s olarak ölçülmüştür. Bilhassa coğrafi olarak geniş ve şehirlerarası mesafenin uzak olduğu ülkelerde zamandan büyük oranda tasarruf sağlayan maglev trenlerinin araştırma ve geliştirme çalışmaları uzakdoğu ülkelerinin öncülüğünde sürmektedir. Longyang Lu şehri ve Şanghai Pudong Uluslararası Havalimanı arasında yolcu taşıyan maglev treninin

görüntüsü Şekil 3.6’da verilmiştir (Balestreire ve Hollenberger, 2015; Fidan, 2018; Ulusoy, 2010; Vikipedi, 2022).



Şekil 3.6. Longyang Lu şehri ve Şanghay Pudong Uluslararası Havalimanı arasında yolcu taşıyan maglev treni

3.1.6. Monoray Sistem (Monorail)

Günümüzde monoray sistemleri fark oluşturan ikonik ve estetik tasarımları ile şehir fiziki yapısına kolay entegrasyon sağlamaktadır. Bu entegrasyon toplu taşıma maliyetlerine etkin ve hızlı çözümler getirmesinin yanı sıra şehirlerin gelişimlerinin de olumlu yönde iyileştirmektedir. Monoray sistemleri, kendi yol güzergahlarında sokak seviyesinin üstünde özel olarak yapılmış yüksek çelik veya beton yapıları kolonlara monte edilen ray üzerinde veya asılı bir şekilde karayolundan bağımsız hareket eden ve ray üzerinden aldığı elektrik ile çalışan şehir içi raylı toplu taşıma araçlarıdır. Çevre dostu ve enerji tasarrufu sağlayan bu sistemler tam otomatik operasyon kumanda sistemleri sayesinde toplu taşımada hızlı ve etkin çözümler sunmaktadır. Ray üzerinden elektrik temin edildiği için havai elektrik hattı ve direklerine ihtiyaç duyulmaz, bu avantajı sayesinde şehir mimarisinde göze hoş gelmeyen yapılardan kaçınılmış olur. Raylı sistemler içerisinde metro’dan daha az yolcu taşıma kapasitesine sahip olan monoray sistemler işletme hızı bakımından 20-40 km/s hızlarında görev yapsada, maksimum hızları 60-90 km/s hızlarını bulabilmektedir. Şekil 3.7’de görüntüsü verilen 4,7 km hat uzunluğuna sahip Moskova şehir içi raylı monoray toplu taşıma sistemi 60 km/s işletme hızına ulaşmakta ve günlük 16 000 kişi yolcu taşıma kapasitesine sahiptir (Timan, 2015; Kuwabara vd., 2001; Ölmez, 2020).



Şekil 3.7. Moskova monoray sistemi (Vikipedi, 2022b)

3.1.7. Yüksek Hızlı Tren (YHT)

Standart bir tanımını olmamakla beraber kendine özgü bir ray sistem olan ve 200-250 km/s hızlarının üzerinde seyahat edebilen demiryolu yolcu taşımacılığı türüdür. YHT'ler nüfusu yoğun yaşadığı bölgelerde gürültü kirliliği, yol güzergahı üzerinde mevcut olan tüneller vb. yapılar, yolcu güvenliği ve taşıma kapasitesi sebeplerinden dolayı hızlarını 160-180 km/s işletme değerlerine çekebilmektedir. Yüksek hızlara ulaşım tamamen trenin güzergahı üzerindeki altyapı bileşenlerine bağlıdır (Altan ve Kızıltaş, 2020). Trenin hareketini sağlayan enerji beslemesi büyük çoğunluklar katener havai hattından yüksek gerilim seviyelerinde sağlanır. Yüksek hızlarıyla kendilerine özgü tasarlanan, standart hat açıklığı 1435 mm olan sürekli kaynaklı raylarda sefer yaparlar (Bhargava, 1999). Günümüzde bir çok ülke metropol şehirlerini birbirine bağlamak, yol ve zamandan tasarruf sağlamak amacıyla varolan demiryolu hatlarını yüksek hızlı demiryolu olarak yenilemekte veya yeni yüksek hızlı tren hatları altyapısı inşa etmektedir. Bu bağlamda ülkemizde YHT yolcu taşımacılığı üzerine yatırımlar yapılmış ilk YHT yolcu taşımacılığı 13 Mart 2009 tarihinde Ankara-Eskişehir yüksek hızlı demiryolu hattının işletmeye alınmasıyla birlikte başlamıştır. 13 Mart 2019 tarihinde Gebze-Halkalı Marmaray hattının işletmeye açılmasıyla birlikte YHT'lerin İstanbul'daki güzergâhı Pendik'ten

Söğütlüçeşme ve Halkalı istasyonlarına kadar uzatılmıştır. 2021 yılı sonuna kadar Ankara-İstanbul, Ankara-Eskişehir, Ankara-Konya ve Konya-İstanbul olmak üzere 4 güzergâhta YHT yolcu taşımacılığı yapılmıştır (TCDD, 2021).



Şekil 3.8. Ankara-Konya ve Ankara-Eskişehir hatlarında hizmet veren YHT (Vikipedi, 2022c)

3.1.8. Otomatik Sürücüsüz Sistemler (AGT)

AGT (Automated Guidway Transit) olarak bilinen otomatik sürücüsüz sistemler bir operatör olmadan bilgisayarlar tarafından kontrol edilen ve kısa mesafeler arasında düşük yolcu kapasitesine sahip küçük taşıtlardır. Kendilerine belirlenen kılavuz yolda lastik tekerlekler üzerinde hareket ederek yolcuların kısa noktalarda taşınmasını sağlar. Güç beslemesi elektrik enerjisi ile sağlandığından dolayı çevre dostu araçlardır. Vagonları parçalı birbirlerinden ayrı montaj edilebilen ve küçük kapasiteli olduklarından manevra kabiliyetleri oldukça iyidir. AGT' ler düşük yolcu taşıma kapasitesine sahip olmalarından ve alt yapıları için yüksek yatırım gerektirdiğinden dolayı yaygın değildir (Arı, 2021; Pastor, 1989).



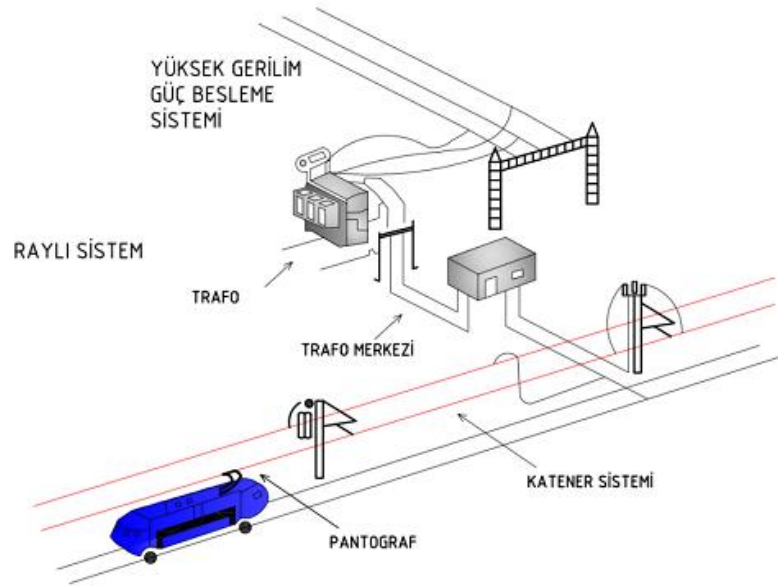
Şekil 3.9. Florida Tampa/ABD uluslararası havaalanında yolcu taşıyan AGT (Wikipedia, 2022)

3.2. HRS'lerde Elektrik Enerjisi ile Güç Beslemesi

Demiryolu sistemi içerisinde şehir içi veya kent içi raylı sistemlerde trenin hareket ettirilmesi için gerekli olan enerji elektrik enerjisinden sağlanır. Raylı sistemler teknolojisinde, elektrik enerjisinin diğer enerji sistemlerine göre tercih edilmesinde mekanik, teknik, maliyet ve sosyal açıdan birçok üstünlüğü bulunmaktadır. Hem kömür ve akaryakıt tedarikinde yaşanan sorunlar hem de elektrik enerjisinin daha ucuz olmasının yanında gürültü ve çevre kirliliği oluşturmaması elektrik enerjisinin tercih edilmesinin önemli sebepleridir. Ayrıca elektrik enerjisi kullanan sistemlerde motorların küçük hacimde olması, elektrik enerjisinin yüksek tonajda yükleme yapılması durumlarında verimli olması ve personel sayısından tasarruf gibi avantajları nedeniyle raylı sistemler teknolojisinde yaygın olarak kullanılmasını sağlamıştır (MEB, 2011; Mei, 2021).

Elektrikli demiryolu sistemlerinde motorların tahriki ve diğer servislerin beslenmesi için gerekli olan güce cer gücü denir. Raylı sistemlerin enerji beslemesinin türü ihtiyaca ve motor karakteristiğine göre belirlenir. Bu nedenle sistem beslemesi kullanım alanı ve ihtiyaca göre farklılık göstermektedir. Raylı sistemlerde güç beslemesinin asıl amacı tren hareketini sağlamaktır. Elektrikli demiryolu sistemlerinde elektrik enerjisinin trene alınması iki şekilde sağlanır. Bunlardan birincisi enerjinin direkler ve iletim hatlarından oluşan katener sistemden (havai hat) alınması , diğeri ise genellikle zeminde var olan iki rayın yanına, bazen de ortasına ilave edilerek enerji sağlanan 3.ray sisteminden alınmasıdır. Her ne kadar

üçüncü ray sistemi yatırım maliyeti yönünden düşük olması ve kurulumunun kolay olması gibi avantajları bulunsa da, güvenliği tehlikeye düşürecek durumlar oluşturması sebebiyle az tercih edilmektedir. 3.ray sisteminin aksine daha karmaşık bileşenlerden oluşan katener sistem, elektrikli demiryolu hatlarında enerjinin trene alınmasında daha fazla kullanılan sistemdir. Basit olarak şehirlerarası elektrik iletim hatlarından alınan yüksek gerilimli elektrik enerjisi bir indirici trafo merkezi tarafından gerilim seviyesi ihtiyacına göre ayarlanır. Elektrik enerjisinin transformatörler tarafından istenilen güçte ve gerilim seviyesinde elde edilmesinin ardından, elektrik enerjisi katener sistem ardından da pantograf mekanizması üzerinden trene aktarılır. Tren hareketi için gerekli olan elektrik enerjisinin sağlandığı merkezlere cer gücü trafo merkezi adı da verilir. Şekil 3.10'da bir raylı sistemin güç beslemesi gösterilmiştir. Raylı sistemlerde enerji beslemesi alternatif akım (AC) ve doğru akım (DC) olmak üzere iki kısımda incelenebilir. Ülkemizde HRS'lerin güç beslemesinde genellikle 750 V DC gerilim seviyesi kullanılmaktadır (Aydın, 2012; Karaköse, 2014; Liu, 2015).



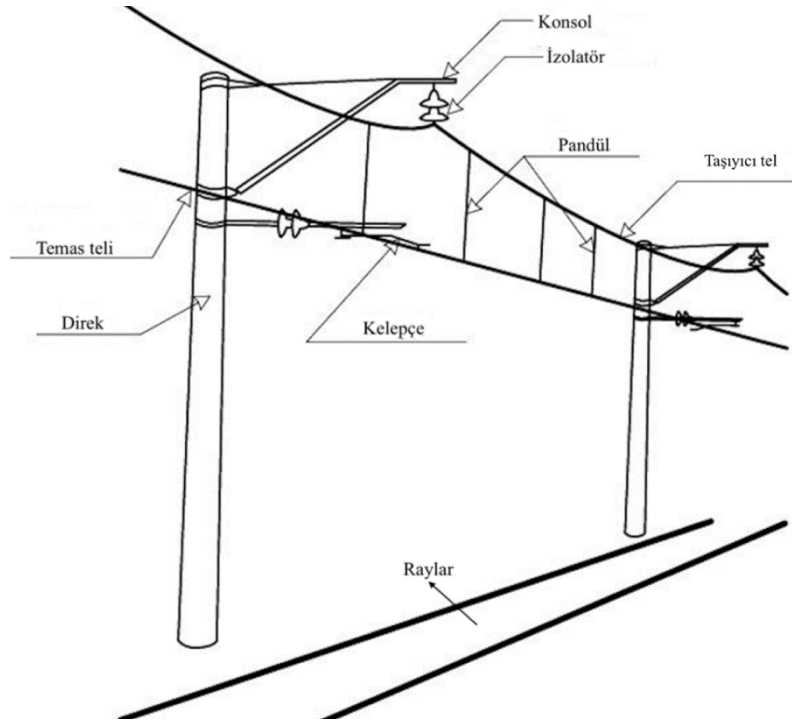
Şekil 3.10. Raylı sistem güç besleme şeması (Aydın, 2012)

Elektrik enerjisinin mevcut yüksek gerilim hattından trene alınması ve güç iletim sistemlerine aktarılması oldukça karmaşık ve gelişmiş bir teknolojinin eseridir. Bu teknolojik çalışma sisteminde oldukça önemli iki sistem bütünü diğer yapılara göre daha çok önem arz etmektedir. Bunlardan biri; HRS'nin güzergahı boyunca belirli mesafe aralıklarıyla direklere asılı şekilde havada bulunan ve üzerinde birçok

bütünleşik yapıyı taşıyan katener (havai hat) adı verilen sistem, bir diğeri ise trenin üzerinde yer alan pantograf mekanizması adlı sistemdir. Pantograf mekanizması tren üzerine sabitlenmiş fakat trenin hareketi ile dinamik çalışan, katener sistemi ise sabit iki ayrı sistemdir. Elektrik enerjisinin trenin güç aktarım organlarına alınması bu iki sistemin trenin hareketi boyunca birbirine kayar sürtünmeli teması ile sağlanmaktadır. Yüksek gerilim hattından trafo merkezine getirilen elektrik enerjisi, katener sistemi bileşenlerinden temas teli aracılığıyla pantograf mekanizması üzerinde yer alan akım toplayıcı plakalar sayesinde trenin güç aktarım organlarına iletilir (Bucca ve Collina, 2009; Arnold ve Simeon, 2000).

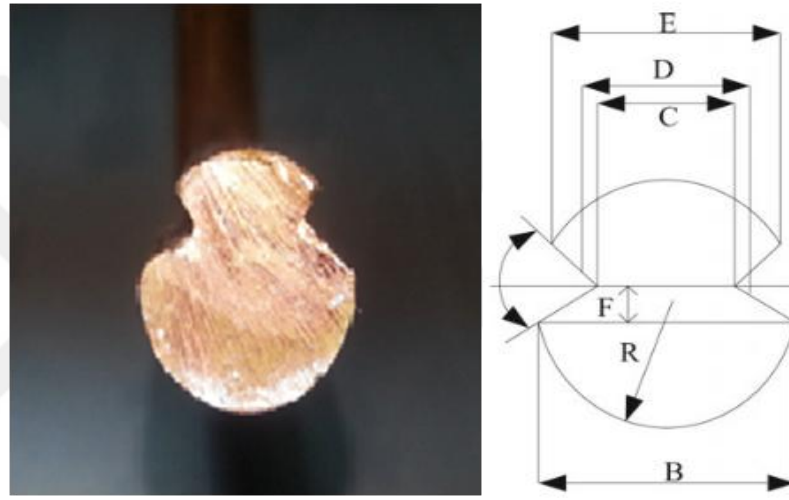
3.2.1. Katener Sistem (Havai Hat)

Raylı sistemlerde pantograf aracılığıyla elektrik enerjisinin alındığı havai hat sistemidir. Katener sistemleri konvansiyonel ve rijit katener sistemi olmak üzere iki çeşidi bulunmaktadır. Konvansiyonel katener sistemi, demiryolu raylarının üzerinde taşıyıcı teli, temas teli, izolatör, pandül, gergi düzenekleri, direk, konsol, hoban ve bağlantı parçalarından oluşmaktadır. Katener sistemin genel görünüşü Şekil 3.11’de verilmiştir. Bu sistem rayın yan tarafındaki direklere bağlanan konsollar tarafından tutulmaktadır (Cho vd., 2010).



Şekil 3.11. Konvansiyonel katener sistemin genel görünüşü (Efanov vd., 2016)

Trenin hareketi sırasında pantograf mekanizması aracılığıyla elektrik enerjisinin alındığı telin adı temas teli diğer adıyla seyir telidir. Elektrolit sert bakır telden yapılan temas telinin kesiti taşıdığı akım yüküne ve trenin hızına göre değişmektedir. Temas telleri 107 mm^2 , 120 mm^2 ve 150 mm^2 kesit alanlarında olabilmektedir. HRS' lerde genellikle 107 mm^2 kesitli temas teli tercih edilmektedir ve %20 aşınma miktarına kadar kullanılabilir. Temas telinin örnek bir kesit görünümü Şekil 3.12'de verilmiştir. Şekil'de; B kesit genişliği, E kafa genişliği, C boşluk yuvası (oluk) uçları, D yuva taban açıklığı, R yarıçapı ifade etmektedir. Katener tel çapı genelde 13 mm' dir.

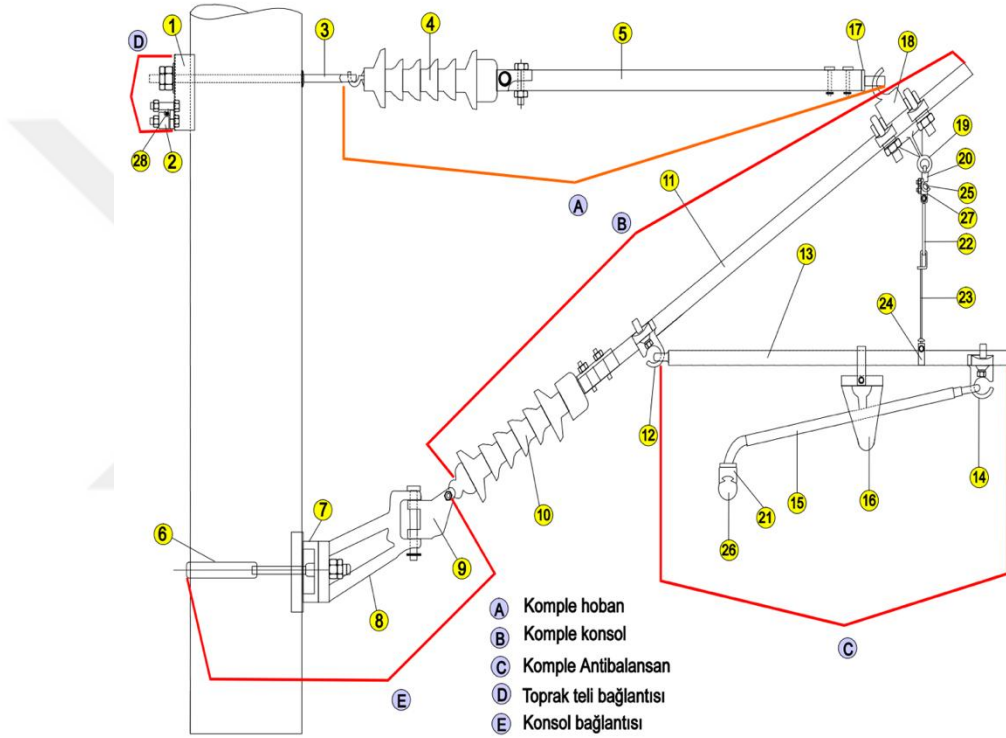


Şekil 3.12. Katener temas teli kesiti görünümü (Wu vd., 2019)

Rayların yanında belirli aralıklarla dizilmiş direkler, katener sistemin ve bileşenlerinin havada tutulması amacıyla genellikle 20-30 m aralıklarla dizilmektedir. Katener sistemi oluşturan bileşenlerin katener direklerine bağlanabilmesi için konsol-hoban adı verilen yapılar kullanılmaktadır. Konsol-hoban yapısının görünümü ve parçalarının isimleri Şekil 3.13'de verilmiştir. Hoban parçası galvanizli çekme boru veya alüminyumdan imal edilmektedir. Elektriksel yalıtkan görevi gören izolatörler sayesinde direğe bağlanan konsolun görevi hoban borusunu taşımaktır (Nåvik, 2013; Karaköse, 2014).

Temas teli pandül adı verilen elemanlarla ve belirli aralıklarla bronz malzemeden üretilen taşıyıcı tele askıda olacak şekilde bağlıdır. Temas telinin taşıyıcı tel ile askıya alınmasının amacı oluşan sehimin azaltılmasına yöneliktir. Pandüller bakır malzemeden yapılan bağlantı elemanları olup temas telinin yüksekliğinin ayarlanmasında görev almaktadır. Değişen iklim dönemlerinde veya

farklı çevre koşulları sebebiyle değişebilen tel esnekliklerini uygun durumda tutmak amacıyla taşıyıcı tel otomatik gerdirme cihazları ile gerdirilip uygun pozisyona getirilmektedir. Tel esneklikleri pantograf mekanizmasında yer alan akım toplayıcı plaka ile temas telinin teması sırasında enerjinin verimli bir şekilde alınabilmesi açısından oldukça önemlidir. Konsol-hoban yapısı yukarıda bahsedilen önemli bileşenlerine ilave olarak birçok bağlantı ve yapı elemanlarından oluşmaktadır. Bu elemanların amacı konsol-hoban yapısını bir arada tutmak ve katener direğine uygun bir şekilde montajının yapılmasını sağlamaktır.

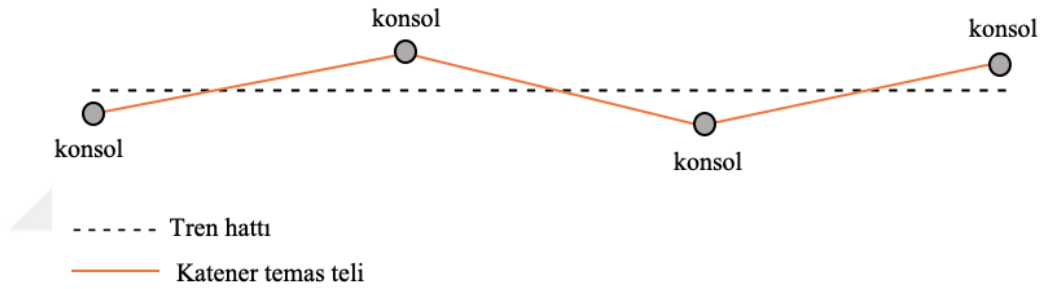


Şekil 3.13. Katener sisteminde konsol-hoban bileşenleri

Tablo 3.2. Konsol-hoban bileşeni parça isimleri

1.	Toprak teli klemensi tespit demiri	15.	Rapel kolu
2.	Toprak teli klemensi	16.	Antivan
3.	Hoban bağlantı tiji	17.	Delikli hoban tiji
4.	Hoban izolatörü	18.	Kroşeli portör kepeçesi
5.	Hoban tüpü	19.	Halkalı kelepçe
6.	Kelepçe	20.	Portör için kroşeli askı pensi
7.	Konsol ayağı bağlantı demiri	21.	Seyir teli pensi
8.	Tüp konsol için ayak	22.	Tutucu pandül
9.	Hareketli parça	23.	Hareketli pandül
10.	Konsol izolatörü	24.	Antibalansan tüp için kolye
11.	Konsol borusu	25.	Etriye
12.	Antibalansan bağlantısı	26.	Temas teli
13.	Antibalansan tüpü	27.	Portör
14.	Kancalı rapel tutucu	28.	Toprak teli

Temas teli katener sistemde yer alan ve elektrik enerjisinin kesintisiz bir şekilde trene aktarılmasındaki en önemli elemanlardan biridir. Bu sebeple hem pantograf mekanizması üzerinde yer alan akım toplayıcı grafit plakalarda hem de katener sistemde yer alan temas telinde aşınma miktarının mümkün olduğunca düşük olması bakım maliyetlerini azaltmak açısından büyük önem taşımaktadır. Bu aşınmayı azaltmak için temas telinin tren güzergahına yerleştirilmesinde yapılan iki önemli durum vardır. Bunlardan ilki, katener sistemi taşıyan her iki direk arasında bakır temas telleri düz değil, düşük açılı hafif çapraz şekilde gerdirilmiştir. İkinci direktan, üçüncü direk bitimine kadar benzer, ancak tam tersi açıyla çekilerek bir zigzak geometrisi oluşturulur. Bu yerleştirme şekli bakır telin, grafit plaka yüzeyinde ileri-geri hareket ederek sürtünmesini ve hem temas telinin hem de grafit plakaların daha az aşınmasını sağlar. Katener temas telinin zigzak hareketini gösteren çizim Şekil 3.14’de verilmiştir (Kiessling vd., 2018; Nàvik, 2013; Morris vd., 2015).



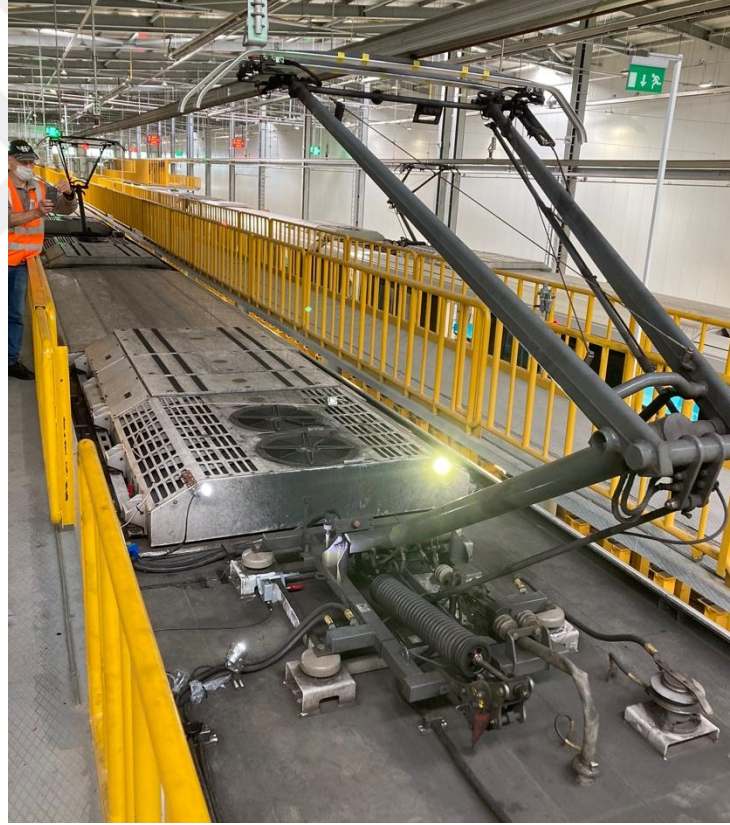
Şekil 3.14. Katener temas telinin zigzak hareketi

Katener temas teli ve grafit plakanın aşınmasını azaltacak diğer bir durum, katener temas telinin iki direk arasında destek noktalarından biraz daha aşağıya sarkıtılmasıdır. Bu sarkıtılma işlemi katener temas hattının desteklerde ve iki direk arasında daha benzer esnekliğe sahip olmasını sağlar. Böylelikle hatta oluşabilecek sertlik değişiminden kaynaklı temas kuvveti değişimleri azaltılır. Çünkü iki direk arasındaki hat açıklığı düşünüldüğünde destek elemanlarına yakın bölgelerde sertlik yüksek, orta kısımlarda ise düşüktür. Eğer katener temas telinde sarkıtılma işlemi yapılmazsa pantograf mekanizması sertliğin düşük olduğu orta kısma geldiğinde bu bölgeyi daha fazla yükseklığe kaldıracaktır. Sarkıtılma işlemi iki direk arasında katener temas telinin pantograf mekanizması tarafından yaklaşık olarak sabit yükseklığe kaldırılmasını sağlar. Bilhassa 200 km/s’ den düşük hızlar altında çalışan raylı sistemlerde daha iyi çalışma kalitesi sağladığı bulunmuştur. 200 km/s hız

değerinin üstüne çalışan sistemlerde sarkma işlemi sistemde olumsuz etkiler gösterebilir (Cho vd., 2010; Nāvīk, 2013; Liu, 2015).

3.2.2. Pantograf Mekanizması

Yüksek gerilimli bakır temas teline sürtünerek sistem için gerekli elektrik enerjisini trenin cer ünitesine aktaran yay kuvvetli mekanizmanın adına pantograf adı verilir. Pantograf mekanizması trenin üzerine sabitlenmiş, izolatorler kullanılarak trenin çatısından izole edilmiş ve trenin çalışması sırasında belirli bir temas kuvveti ile bakır malzemeden üretilmiş katener temas teline sürekli bastıran bir mekanizmadır. Tren çeşitlerine, çalışma şartlarına ve ülkelere göre farklılıklar gösteren pantograf çeşitleri bulunmaktadır. Pantograf mekanizmasının genel görünümü Şekil 3.15’de verilmiştir (Morris vd., 2015).



Şekil 3.15. Pantograf mekanizmasının görünümü

Pantograf mekanizması genel olarak beş kısımda incelenebilir. Bunlar; akım toplayıcı plakalar, ana gövde, kol, pantograf kafası ve sürücüdür. Şekil 3.16’da pantograf mekanizması ve onu oluşturan ana bileşenleri gösterilmiştir. Pantograf kafasının hemen üzerinde trenin çalışması sırasında katener temas teline temas eden ve grafit malzemesinden üretilen akım toplayıcı plakalar bulunmaktadır. Bu

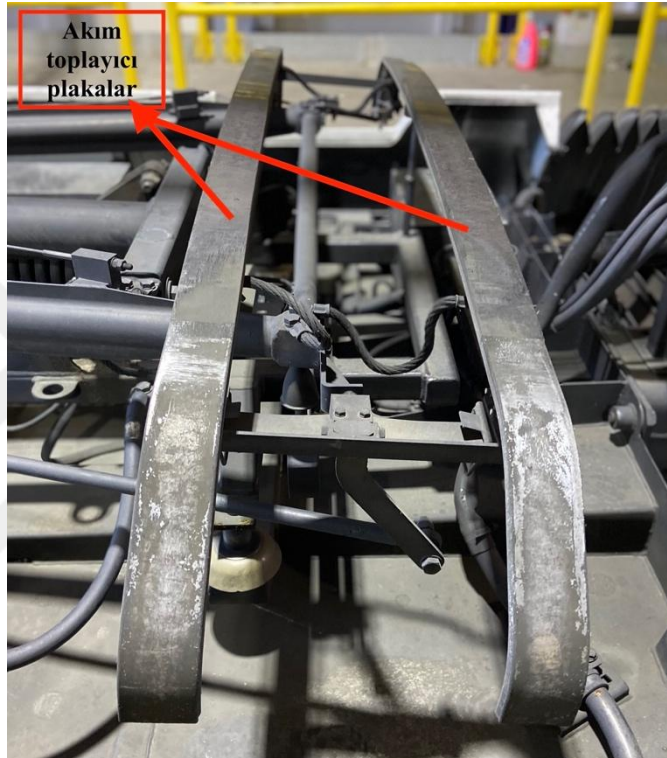
plakaların dengeli bir şekilde temas teline dokunması için orta kısımda dengeleme çubuğu adı verilen çelik parça bulunmaktadır. Pantograf kafası döner bir şasi üzerine monte edilmiş ve akım toplayıcı plakalar ile dengeleme çubuğunu bulunduran kısımdır. Pantograf mekanizmasının tüm bileşenlerini şase görevi görerek bir arada tutan ve pantograf mekanizmasının mesnet izolatorler vasıtası ile tren çatısına sabitlenmesi sağlayan kısım ise ana gövdedir. Ana gövde kaynaklı konstrüksiyona sahip kare profiller, çelik köşebentler ve levhalardan oluşur. İzolatörler montaj görevinin yanında yalıtım görevi de görmektedir.



Şekil 3.16. Pantograf mekanizması ve bileşenleri (Stemmann teknik)

Pantograf mekanizmasının çalışmadığı veya bakım yapılması sırasında kol mekanizması ile otomatik olarak katlanması, çalışması sırasında sürekli katener temas teline bastırılmasını sağlayan bileşen ise pnömatrik aktüatör sürücüdür. Trenin hareketi sırasında oluşacak mekanik titreşimler pantograf mekanizmasının dinamik durumunu büyük ölçüde etkiler. Trenin hareketi boyunca akım iletiminin

kesilmemesi için akım toplayıcı grafit plakaların temas teli yüzeyine yeterli bir kuvvetle sürekli teması sağlanmalıdır. Bu temas kuvveti çalışma şartlarına göre değişkenlik gösterse de genel olarak 60-100 N aralığında değişmektedir (Liu, 2015; Nâvik, 2013). Akım iletimini sürdürülebilir kılmak için, pantograf mekanizmasında, genelde birbirine paralel iki ayrı akım toplayıcı yani grafit plakalar kullanılır. Pantograf mekanizmasının üzerinde yer alan akım toplayıcı grafit plakaların görünümü Şekil 3.17’de verilmiştir.



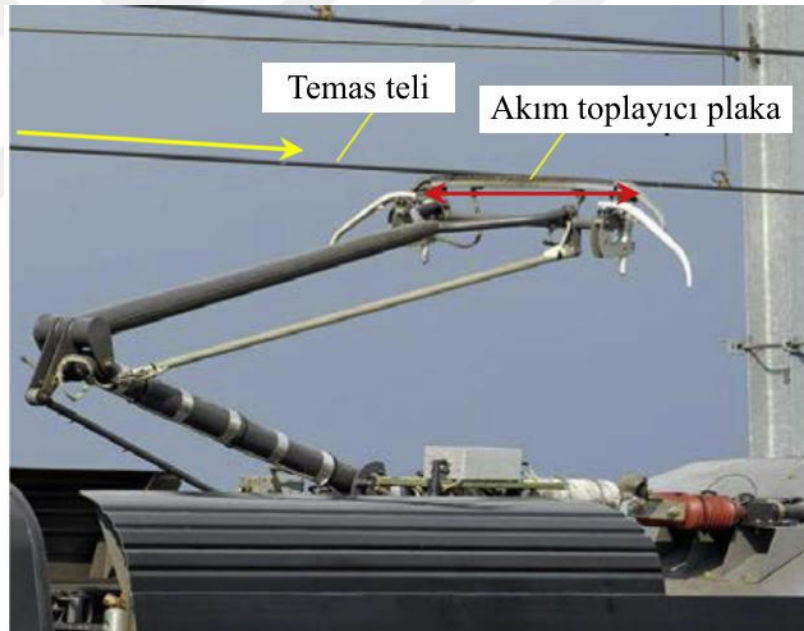
Şekil 3.17. Akım toplayıcı grafit plakaların görünümü (Samulaş A.Ş.)

3.2.3. Pantograf ve Katener Teması

Raylı sistemler teknolojisinde elektrik enerjisinin trenin güç aktarma organlarına aktarılması için pantograf mekanizmasının güzergah boyunca katener temas teline sürtünerek kayması gerekir. Bu kayma hareketi sırasında grafit plakalar akım toplayıcı görevi görüp elektrik enerjisinin katener havai hattından alınması sağlanır. Alınan elektrik enerjisinin güç aktarma organlarına iletilmesiyle trenin hareketi için gerekli enerji elde edilmiş olur. Akım toplayıcı plaka ile temas telinin etkileşim görünümü Şekil 3.18’de verilmiştir.

HRS sistemlerinde pantograf mekanizmasında yer alan akım toplayıcı grafit plakaların ve katener temas telinin temas etkileşimi, HRS’lerin verimli bir şekilde

alışmaları için oldukça önemlidir. Bu etkileşim sırasında trenin hareketi, pantograf mekanizmasının dinamik bir sistem oluşu, titreşim, yol ve çevresel faktörler zaten karmaşık bir etkileşim içerisinde olan pantograf - katener temasını daha da karmaşık bir hale getirir. Çünkü, temas çiftinin etkileşimi sırasında meydana gelen herhangi bir arıza elektrik iletiminin bozulmasına, trenin hareket sağlayan sistemlerine gücün iletilememesine ve bunun sonucunda hareketinin kısıtlanmasına, durmasına ve hatta kazalara sebep olabilir. Pantograf mekanizması üzerinde yer alan akım toplayıcı plaka ile temas telinin birbirlerine sürtünerek çalışması sırasında oluşun etkileşimi etkileyen birçok parametre bulunmaktadır. Bunlardan en önemlileri; akım toplayıcı plakların sürekli bir şekilde temas teline baskısını sağlayan temas kuvveti, katener telden alınan elektrik akımı, aşınma çifti arasında oluşun sürtünme katsayısı, yine çalışma sırasında oluşun sıcaklık ve temas kaybından oluşun ark deşarjı olarak sayılabilir (Yang vd., 2019a; Zhao vd., 2020; Wang vd., 2020).



Şekil 3.18. Akım toplayıcı plaka ile temas teli etkileşimi (Yang vd., 2019b)

Elektrik iletkenliği ve katı bir yağlayıcı olması gibi özellikleri nedeniyle raylı sistemlerin elektrik iletim yapılarında akım toplayıcı olarak tercih edilen grafit plakalar üretimleri karışık, ithal edilen ve maliyetli sarf malzemelerdir. Grafit plakalar temas teliyle sürtünmeli etkileşimi sonucunda zamanla aşınarak kalınlığının belirli bir değerin altına düşmesi sebebiyle yenisiyle değiştirilmesi gerekmektedir. Raylı sistemlerin hareketi sırasında pantograf ile katener arasındaki çalışmanın elektriksel, çevresel ve mekanik temas durumları göz önüne alındığında grafit

plakaların ve temas telinin aşınma davranışının tribolojik değişimlerinin incelenmesi, sistemin görevini verimli bir şekilde yerine getirmesi ve çalışma davranışlarının anlaşılabilmesi noktasında kritik öneme sahiptir. Ayrıca raylı sistemlerin dur-kalk şeklinde farklı hızlarda, değişen yol mesafelerinde, değişen temas kuvvetlerinde ve değişen çevresel dönemlerde çalışması da grafit plakaların servis ömürlerinin değişmesine sebep olmaktadır. Bu çalışma şartlarına göre grafit plakaların değişim ömürlerinin uzatılması veya daha verimli çalışabilmesi için araştırmacılar pantograf ve katener telin temas şartını benzeştiren farklı deney düzenekleri tasarlamış ve değişen parametreler altında araştırmalar gerçekleştirmişlerdir (Zhang vd., 2021; Chehreh C. vd., 2016)

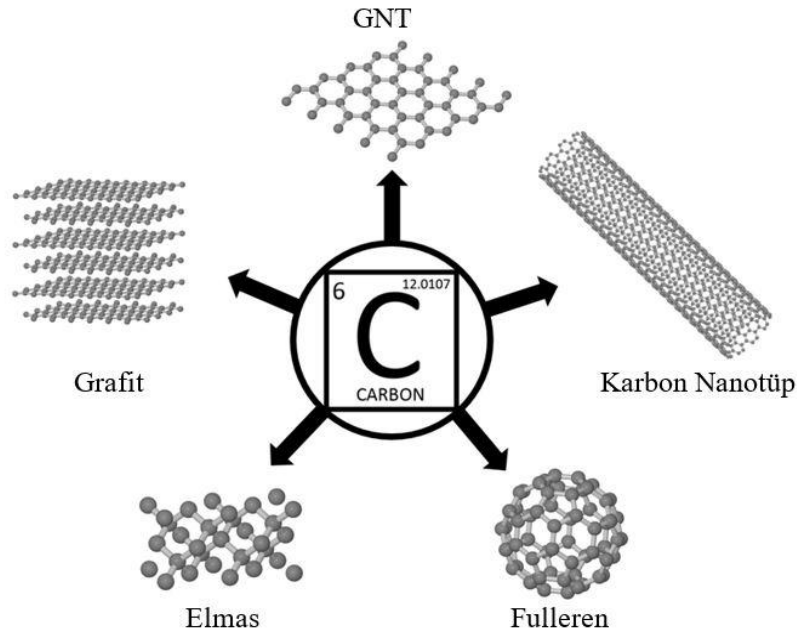
Raylı sistem taşıma araçları hareket ederken, bakır telin grafit plakalara dik şekilde sürtünmesi istenmez. Çünkü bu durum, bakır telin dik bir şekilde grafit plakaları kesmeye çalışması anlamına gelir. Pantograf mekanizmasındaki akım toplayıcı grafit plakaların bakır yüzeye sürtünmesi ileri-geri yönlü bir hareket tarzındadır. Katener sistemi taşıyan her iki direk arasında bakır teller düz değil, düşük açılı hafif çapraz şekilde gerdirilmiştir. İkinci direkten, üçüncü direk bitimine kadar benzer, ancak tam tersi açıyla çekilerek bir zikzak geometrisi oluşturulur. Bu geometrik tasarım, bakır telin, grafit plaka yüzeyinde ileri-geri hareket ederek sürtünmesini sağlar. Böylece, bakır telin, grafit plakalar üzerinde sürtünerek kanal açması veya plakaları kesmesi engellenir. Böylelikle yüksek fiyatlara ithal edilen grafit plakaların değişim süreçleri uzatılmış olur yani kullanım ömrü artar.

Pantograf sistemi üzerinde yer alan akım toplayıcı plakaların katener teline belli bir kuvvet değerinde ve baskılı bir şekilde sürekli olarak temas ettirilmesi akım kalitesinin bozulmadan trenin güç ve enerji sistemlerine aktarılması açısından oldukça önemlidir. Bilhassa yüksek hızlarda ve trenin çalışma şartlarına bağlı olarak sistem üzerinde oluşan titreşim temas kalitesini olumsuz yönde etkilemektedir. Temas kalitesinin kötüleşmesi aşınma çifti yüzeylerinde ark deşarjına neden olmaktadır. Ark deşarjının artışı malzemelerin yüzeylerinde ark erozyonu aşınma türünün oluşmasına ve aşınma oranının yüksek bir şekilde artmasına neden olur. Bu yüzden temas kuvvetinin uygun bir değerde sürekli olarak sağlanması aşınma çiftinin verimli çalışabilmesi ve katener telinden akımın verimli bir şekilde trene alınabilmesi açısından son derece önemlidir. Temas kuvvetinin yeterli bir değerde uygulanmadığı

Çalışma şartlarında oluşan temas kayıplarından ötürü meydana gelen ark deşarjı yüzeylerde ark erozyonu oluşmaktadır.

3.3. Raylı Sistemlerde Grafit'in Rolü

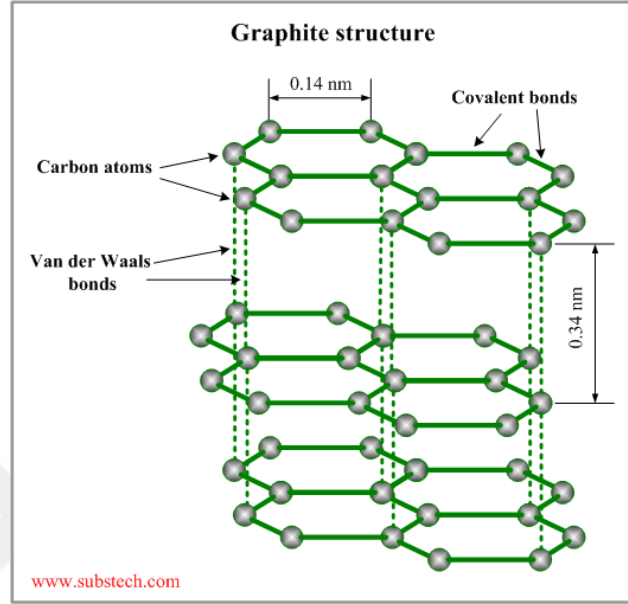
Karbon esaslı malzemelerden biri olan grafit yapısındaki karbon atomlarının altıgen şeklinde birbirlerine bağlanmasıyla meydana gelmiştir. Hekzagonal kristal kafes yapısına sahip grafit adına bazal düzlem adı verilen katmanlardan oluşmaktadır. Karbon atomları kendi bazal düzlem yapısı içerisinde birbirlerine kovalent bağ ile bağlanırken, her bir bazal düzlem birbirlerine st üste zayıf Van der Waals kuvvetleri ile bağlıdır. Bu iki farklı bağlanma türü grafit malzemesinin birçok alanda kullanılmasını sağlayan oldukça önemli bir özelliktir. Katmanlar arasında bulunan zayıf Van der Waals bağları sebebiyle st üste katmanlar şeklinde bulunan bazal düzlemler birbirleri üzerinde kolayca kayabilir. Bu zellik grafit malzemesinin katı bir yağlayıcı olarak birçok alanda yaygın bir şekilde kullanılmasını sağlamıştır.



şekil 3.19. Karbon allotroplarının şematik gösterimi (Nylander, 2018)

Grafit malzemesinin bir diğer önemli özelliği de çok iyi bir ısı ve elektrik iletkenliğine sahip olmasıdır. Grafitin iyi bir elektrik iletkeni olmasında yapısında bulunan ve 'Delokalize Elektron' adı verilen elektronların katmanlar arasında serbestçe hareket edebilmesidir. Grafitin yapısında her karbon atomunun dış kabuğunda bağlanma için uygun dört karbon atomu vardır. Bu atomlardan  komşu atomlara bağlanmada görev alırken kalan atom bağlanmada görev almaz ve

serbest halde kalır. Ayrıca grafit' in yapısındaki katmanların aromatik olması sadece grafitin yapısını güçlendirmekle kalmaz aynı zamanda elektronların katmanlar boyunca serbest hareket etmesine izinde verir. Serbest kalan delokalize atomlar elektrik akımının taşınmasını ve elektriğin iletilmesini sağlar.



Şekil 3.20. Grafitin kristal kafes yapısının görünümü (SubsTech, 2022)

Grafitin kristal yapısında yukarıda bahsedilen önemli farklılıklardan kaynaklanan, iyi bir yağlayıcı ve elektrik iletkeni olması özellikleri elektrik ile çalışan raylı sistemlerde pantograf mekanizmasının üstünde yer alan akım toplayıcı plakaların malzemesi olarak kullanılmasını sağlamıştır (He ve Manory, 2001; Lin vd., 2011). Akım toplayıcı plakalar ve katener tel birbirlerine sürtünerek etkileşime girerler. Bu etkileşim sonucunda akım toplayıcı grafit plakalar vasıtasıyla katener telden toplanan elektrik akımı güç iletim sistemlerine ulaştırılıp trenin hareketi sağlanmaktadır. Grafit'in yapısının katman şeklinde ve zayıf Van der Waals bağları bağlardan oluşması plakaların sürtünmeli şekilde çalışmaları sırasında bu katmanların birbirlerinden koparak iyi bir yağlayıcı görevi görmesini ve katener telin rahatça grafit plakaların üzerinde kaymasını sağlar. Yine grafitin kristal yapısında bulunan delokalize atomların grafitin kristal yapısının katmanları arasında serbestçe dolaşabilmesinden ötürü katener telden alınan elektrik akımı katmanlar arası kolayca taşınır ve iletilmiş olur.

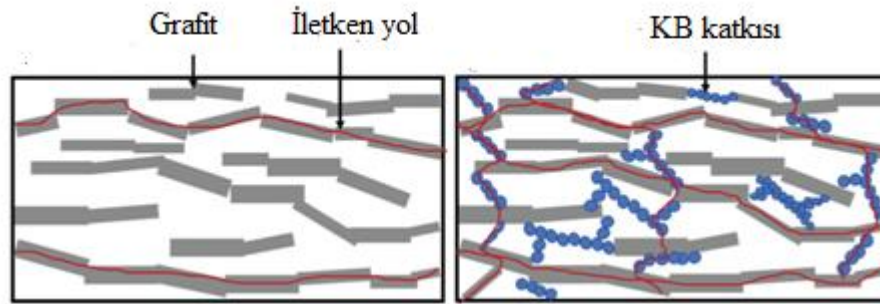
Elektrik ile çalışan raylı sistemlerde akım toplayıcı grafit plakalar ile katener teli dinamik temasının kalitesi raylı sistemin görevini düzgün bir şekilde

gerçekleştirmesi açısından oldukça önemlidir. Çünkü bu temas etkileşiminde yaşanabilecek herhangi bir aksaklık veya problem yatırım maliyeti yüksek olan raylı sistemin verimsiz çalışmasına, akım toplama kapasitesinin azalmasına, servis maliyetinin artışına ve istenmeyen kazalara sebep olabilmektedir. Trenin güzergahı boyunca çalışması sırasında pantograf sisteminin ve katener telin karmaşık dinamik etkileşimi ve çevresel şartların sisteme etkileri araştırmacılar tarafından araştırılmaktadır. Temas sırasındaki dinamik etkileşimde meydana gelen sürtünmeli çalışmada elektriksel ve mekaniksel aşınma, sürekli temas kuvvetinin etkisi, çalışma sırasında yaşanan titreşim, trenin hızı, ıslak ve kuru değişken çevresel faktörler yüksek maliyetli akım toplayıcı grafit plakaların servis ömürlerini ve elektrik iletim kapasitelerini etkileyen en önemli koşullardır (Zhang vd., 2018; Wang vd., 2017a; Lin vd., 2011).

3.3.1. Grafitin Elektriksel, Mekanik ve Tribolojik zellikleri

Genel olarak bakıldığında pantograf mekanizmasında yer alan akım toplayıcı plaka malzemesinin birçok çeşidi bulunmaktadır. Fakat pratikte saf karbon (grafit), metal/karbon ve karbon/karbon kompozitler yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Deng vd., 2017). Raylı sistemler teknolojisinin gelişmesi ve şehirlerde yaygınlaşmasıyla pantograf sistemi ve katener telin verimli etkileşimi daha da önem kazanmıştır. Bu öneminin artışı ve diğer malzemelerin performanslarında yaşanan kısıtlamalar daha yüksek performans gösteren akım toplayıcı karbon esaslı malzemelerin imalatı ve kullanımını sistem için gerekli hale gelmiştir. Bu sebeple pantograf sisteminin oldukça kritik parçalarından biri olan akım toplayıcı karbon esaslı grafit plakaların var olan yağlayıcı özelliklerinin yanında tribolojik özelliklerinin ve elektrik iletkenlik kalitelerinin daha da yükseltilmesi, düşük olan dayanımlarının geliştirilmesi bu alanda çalışmalar yapan araştırmacılar için öncelikli konulardan biri olmuştur. Katener telden grafit plakalar vasıtasıyla toplanan elektrik akımının kalitesinin arttırılması için yapılan çalışmalar genellikle farklı özellikleri bir arada bulunduran kompozit malzemelerin geliştirilmesiyle elde edilmiştir. Karbon esaslı kompozit malzemelere elektrik iletkenliğini arttırıcı yönde yapılan malzeme ilaveleri iletken ve sıkı, yani boşluksuz bir ağ yapısının oluşması açısından değerlidir. Karbon esaslı malzeme yapısı içerisine farklı yapıda ve özelliklerde birçok malzeme ilavesi yapılarak oluşturulan kompozit malzemelerin elektrik iletkenlikleri önemli ölçüde arttırılabilmektedir (He vd., 1998; Tu vd., 2009).

Bakır düşük elektrik direnci sebebiyle elektrik iletkenliği açısından önemli bir malzemedir. Yapılan çalışmalarda karbon/bakır kompozit malzemelerin bileşim oranlarında bakır ilavesinin artırılması elektrik iletkenliğinin olumlu yönde gelişmesine sebep olmuştur. Kompozit malzeme içerisinde bakır miktarının artışıyla oluşan bakır ağlarının hem daha az gözenekli sıkı bir yapıyı oluşturduğu hem de oluşan bakır ağından elektrik akımı daha kolay şekilde iletilir ve sürekli bir elektrik iletimi sağlanır (Wie vd., 2021; Cui vd., 2018). Yapıdaki gözenekli ve çukurlu yapının elektrik iletimini olumsuz yönde etkilediği bilinmektedir. Bu nedenle kompozit malzemelerin yapısı içerisinde kullanılan dolgu parçacık malzeme oranının artması, yapı içerisinde bulunan boşlukların giderilmesi ve birbirine temas eden iletken ağ oluşumunu sağlaması açısından oldukça önemlidir. Bir tür saf karbon olan karbon siyahının (Carbon Black) grafitin yapısına dolgu malzemesi olarak eklenmesiyle oluşan grafit dolgu takviyeli kompozitlerin elektrik iletkenlikleri incelendiğinde karbon siyahının nano boyutlu yapısı sayesinde mikro boyutlu yapıya sahip grafit içerisinde bulunan yapı boşluklarında köprü işlevi gördüğü ve iletken bağlar oluşturmamasından dolayı grafit/karbon siyahı dolgu takviyesinin sadece grafit dolgu takviyesi içeren kompozit malzemeye göre elektrik iletkenliği daha iyi sonuçlar verir (Alo ve Otunniyi, 2021). Şekil 3.21’de karbon siyahının grafit yapısı içerisine eklenmesiyle oluşturduğu iletken yapının temsili resmi gösterilmektedir.



Şekil 3.21. Temsili iletken yapının görünümü (Alo ve Otunniyi, 2021)

Karbon matris yapısına sahip malzemenin içerisine dolgu malzemesi olarak karbon ve bakır elyaf malzemelerin ilavesiyle üretilen karbon matrisli, karbon ve bakır elyaf takviyeli kompozit malzemeler (C_f/Cu_f-C) geleneksel karbon esaslı malzemelere göre daha iyi elektrik iletkenliği sağlamaktadır. Karbon ve bakır elyaf takviyelerin boşluksuz nano yapıları sayesinde grafit yapısı içerisinde sıkı ve birbirine temas eden iletken kanallar kurması elektrik iletiminin sağlanması açısından

önemlidir. Yine bakır elyafların bakır ağlar şeklinde malzeme içerisine yerleştirilmesi ve karbon matris içerisinde eşit dağılımı da elektriksel iletkenlik için engelsiz bir geçiş sağlar. Ayrıca takviyelerden karbon elyafın anizotropik özelliği nedeniyle yapı içerisinde nasıl dizildiği yöne bağlı elektrik iletimin değerini etkileyen önemli durumdur (Tu vd., 2017; Kubota vd., 2013). Kompozit malzemeler içerisine dolgu malzemesi olarak çoklu yapının oluşturulması da elektrik iletkenliğinin geliştirilmesi açısından önemlidir. Dolgu malzemesi olarak kullanılan sentetik grafitin tek başına dolgu malzemesi olarak kullanılması ile dolgu malzemesi yapısına grafitin yanında kısa çubuklar şeklinde yuvarlatılmış karbon elyafların eklenmesiyle oluşan çoklu dolgu yapısı kompozit malzemenin hem düzlem yönü hem de düzlem içi elektrik iletkenliğini artırır. Fakat yapı içerisinde dolgu malzemesinin giderek artışı bir süre sonra yığılma nedeniyle elektrik iletkenlik artışını azaltır (Zakaria vd., 2015).

Karbon esaslı grafit malzemesinin yüksek elektrik iletkenliği ve önemli bir katı yağlayıcı olması gibi yapısal avantajları raylı sistemlerin kritik parçalarından biri olan akım toplayıcı plakaların malzemesi olarak tercih edilmesini sağlamıştır. Ancak grafitin yumuşak ve kırılgan doğal yapısı nedeniyle mekanik özelliklerinin düşük olması pantograf ve katener telinin çalışma şartları düşünüldüğünde önemli bir zayıflık olarak görülmektedir. Plakaların katener tel ile kayar sürtünmeli çalışması sırasında oluşan aşınma, malzeme üzerindeki basma şeklindeki sürekli temas kuvveti, trenin hareketi sırasında titreşimli çalışma, katener telden alınan elektrik akımının oluşturduğu aşınma ve değişen ıslak/kuru çevresel çalışma koşulları gibi dış etkenler grafitin elektrik iletkenliği ve yağlayıcı olma özelliklerinin yanında mekanik ve tribolojik olarak da dayanıklı bir yapıya sahip olması ihtiyacını ve gerekliliğini ortaya çıkarmıştır. Bu nedenle raylı sistemler teknolojisinde grafit malzemelerin mekanik ve tribolojik açıdan da geliştirilmesi için çeşitli çalışmalar yapılmıştır (Zakaria vd., 2015; Xiao vd., 2013). Metal emdirilmiş karbon malzemeler Avrupa'daki çoğu raylı sistemlerde kullanılmaktadır. Fakat bu malzemelerin raylı sistemlerde kullanılması sırasında yaşanan performans sorunları C/C kompozit malzemelerin önünü açmıştır. C/C kompozit malzemelerin hafiflik, yüksek sıcaklığa sahip çalışma koşullarında gösterdiği üstün mekanik ve termal özelliklerin yanı sıra önemli aşınma direncine sahip olmaları raylı sistemlerde akım toplayıcı şerit malzemesi olarak kullanılmasını sağlamıştır (He ve Manory, 2001; Nagasawa ve

Kato, 1998; Kubo ve Kato, 1999). Kurşun ve antimon içeren metal emdirilmiş karbon malzeme ile C/C kompozit malzemelerin elektrik akımı altında aynı şartlarda gerçekleştirilen deneyler sonucu ortaya çıkan ortalama aşınma oranları incelendiğinde, C/C kompozit malzeme metal emdirilmiş karbon malzemeye göre daha iyi bir aşınma performansı gösterir. Deney başlangıcında temas yüzeyinde elektrik akımı ve sürtünmeden kaynaklı artan sıcaklık emdirilmiş metallerin yumuşamasına ve temas kuvvetinin de baskısıyla yüzeyde sürtünmeyi azaltan bir yağlayıcı metal film oluşmasına sebep olur. Oluşan metal film tabakasının etkisiyle deney başlangıcında düşük aşınma oranları elde edilir. Fakat artan hız ve elektrik akımının etkisi sıcaklığın metalleri eritecek bir noktaya yükselmesine sebep olur. Eriyen metal yapı, baskılı temas kuvvetinin etkisiyle matrise sızar ve yüzeye yapışır. Böylelikle yüzeyde aşınma oranının düşük olmasını sağlayan yağlayıcı metal film ortadan kalkıp temas yüzeyi pürüzlü hale gelir buda malzemenin aşınma oranını arttırır. Elektrik akımının yüksek olduğu ve hızın arttığı çalışma koşullarında arkdeşarjlarının da oluşmasıyla malzeme kısa süre içerisinde bozulur ve verimini yitirir (Wang vd., 2012a; Huang vd., 2013). Sürtünme ve aşınma sırasında görülen aynı oluşumlar raylı sistemlerde akım toplayıcı plakaların malzemesi olarak tercih edilen bakır emdirilmiş karbon malzeme aşınma yüzeylerinde de görülmektedir (Wang vd., 2012b). C/C kompozit malzemeyle metal emdirilmiş karbon malzemenin aynı değerdeki elektrik akımı ve hızında oluşan temas yüzeyleri karşılaştırıldığında C/C kompozit malzemenin daha pürüzsüz temas yüzeyine sahip olduğu görülür. C/C kompozit malzemenin aynı koşullarda pürüzsüz temas yüzeyine ve düşük aşınma oranında sahip olmasındaki etken iyi bir yağlanma özelliği sağlayan yapısındaki birikmiş karbondur. Ayrıca pürüzsüz temas yüzeyi sayesinde C/C kompozit malzeme ile disk arasında arkdeşarjı meydana gelme olasılığı metal emdirilmiş karbon malzemeye daha düşüktür. Bu sebeplerden dolayı C/C kompozit malzemelerin akım taşıma kapasiteleri ve aşınma oranları metal emdirilmiş karbon malzemelere göre yüksek oranda performanslıdır (Shangguan vd., 2010). C/C kompozit malzemeler her ne kadar metal emdirilmiş geleneksel karbon malzemelere göre üstünlük sağlasalar da raylı sistemlerin ihtiyaçlarını karşılayabilmeleri için sürekli geliştirilmeye muhtaçlardır. C/C kompozit malzemelerin elektrik dirençlerini azaltmak için üretilen bakır emdirilmiş C/C kompozit malzemelerde bakırın yapı içerisinde süreksiz dağılımı gibi sorunlar yapı içerisinde homojenlik göstermeyen direnç değerleri oluşturur (Wang vd., 2012a; Huang vd., 2013). Fakat karbon elyaflar ile

güçlendirilmiş karbon matrisli (C_f/C) kompozit malzemelerin içerisinde emdirilen çeşitli bakır alaşımlarının oluşturduğu ağ yapıları sayesinde malzemelerin elektrik iletkenliğine olumlu etkisi de bilinmektedir (Kubota vd., 2013). Araştırmacılar C/C kompozit malzemelerin elektrik dirençlerini azaltmak, mekanik ve tribolojik özelliklerini iyileştirmek için yapısına eklenen dolgu malzemeleri gibi eklentiler ile daha performanslı bir ürün haline dönüştürmeye çalışmışlardır. C/C kompozit malzemelerin yapısına ilave edilen karbon elyaf takviyelerin sahip oldukları yüksek özgül mukavemet C/C kompozit malzemelerin yapısal uygulamalarda güçlenmesine imkan sağlamıştır (Yuan vd., 2014). C/C kompozit malzemelerin yapısına bakır ve karbon elyaf takviyelerin eklenmesiyle oluşturulan malzeme (C_f/Cu_f-C) ile aynı C_f/Cu_f-C kompozit malzeme yapısına ilave olarak pul şeklinde grafit malzemenin eklenmesiyle oluşturulan kompozitlerin geleneksel C/C kompozit malzeme ile fiziksel ve tribolojik özellikleri karşılaştırılmıştır. Değerler incelendiğinde yapıya eklenen bakır ve karbon elyafların elektrik direncini azalttığı, dayanımı ise iyileştirdiği görülür. Sürtünme ve aşınma testlerinden elde edilen verilere göre, pul grafit takviyeli C_f/Cu_f-C kompozit malzemenin sürtünme katsayısı bakır emdirilmiş C/C kompozit malzeme ile neredeyse aynı, C_f/Cu_f-C kompozit malzemenin değerinden daha düşüktür. Pul grafit takviyeli C_f/Cu_f-C kompozit malzemenin sürtünme katsayısının C_f/Cu_f-C kompozit malzemeye göre daha düşük değerde çıkmasında yapıya eklenen pul şeklinde grafitin önemi büyüktür. Pul şeklinde grafit sürtünme çiftleri arasında çizilmeyi önleyen sürekli bir film tabakasının oluşmasında etkilidir.

Kayma hızının artışıyla sürtünme katsayısı değeri üç malzeme içinde azalır. Bu azalma üç malzeme içinde ark erozyonunun neden olduğu katı yağlayıcı etkisine bağlanabilir. Kayma hızının artışıyla temas yüzeyinde meydana gelen arkdeşarj yoğunluğunun artması temas yüzeyinin ısınmasına ve bunun sonucu olarak bakır diskin ve bakır liflerin oksitlenmesine ve yumuşamasına ardından da temas yüzeyine yapışmasına neden olur. Bu yapışmanın etkisiyle oluşan bakır oksit sürtünme filmi yüzeyi pürüzsüzleştirir ve temas yüzeyini çizilmelere karşı korur. Bakır oksit tabakasının yağlayıcı görevi görmesi sürtünme katsayısını azaltır. C/C kompozit malzemenin aşınma oranı C_f/Cu_f-C ve pul grafitli C_f/Cu_f-C kompozit malzemelere göre çok daha yüksektir. Kayma hızının başlangıçta artışıyla üç malzemenin de aşınma oranları düşer. Kayma hızının başlangıçta düşük seviyelerde olması ve belirli

seviyelerde tutulmasıyla aşınma oranı bir süre sabit kalır. Bu oluşum aşınma çifti arasında iyi bir temasın varlığına ve arkdeşarjının az olmasına bağlanır. Bu sırada temas yüzeyinde etkili olan aşınma türü abrasif aşınma türüdür. Kayma hızının belli bir değerin üzerine çıkmasıyla kötüleşen temasın etkisiyle oluşmaya başlayan arkdeşarjı, sürtünme yüzeyinin sıcaklığını önemli ölçüde etkiler ve pürüzlü bir yüzeyin oluşmasına sebep olur. Aşınma oranı değerlerinde pul grafitli C_f/Cu_f -C kompozit malzemenin daha performanslı bir sonuç göstermesi yapısına eklenen pul şeklinde grafitin iyi bir katı yağlayıcı olarak işlev görmesi sonucunda pürüzsüz bir film tabakasının oluşumuna bağlıdır. Bu film tabakası mekanik aşınmayı azaltan etkiye sahiptir. Standart C/C kompozit malzemenin aşınma yüzeyleri incelendiğinde yüksek sıcaklıkta arkdeşarjının neden olduğu yuvarlak veya oval şekilli ablasyon çukurları ve termal stres çatlakları görülür. Kesme gerilimi ve normal kuvvetin etkisiyle bu çatlakların büyümesi ve yayılmasıyla matris yüzeyinden parçalar kopar ve boşluklar oluşur. Bu durumda standart C/C kompozit malzemenin aşınma yüzeyinde delaminasyon aşınma türü etkindir. Pul grafitli C_f/Cu_f -C kompozit malzemenin temas yüzeyinde arkdeşarjının etkisiyle bakır liflerin oksitlenmesi ve buharlaşması, ablasyon çukurlarının yanında termal çatlakların oluşmasıyla ilerleyen çatlaklar matris yapısı içerisinde gözenekli ve kusurlu yapılar ile birleşip büyür. Ancak çatlaklar karbon elyaflar ile karşılaştıklarında liflerin etrafında yayılmaya mecbur kalır. Karbon liflerin sıkı ve boşluksuz yapıları nedeniyle bu çatlakların oluşumu ve ilerlemesi pul grafitli C_f/Cu_f -C kompozit malzemenin yüzeyinde daha zordur. Çünkü bu çatlakların oluşması ve büyümesi karbon lifleri tarafından bloke edilir ve bu çatlakların pul grafitli C_f/Cu_f -C kompozit malzeme yüzeyinden ilerleyebilmesi için çok daha fazla enerji gereksinimi vardır (Wang vd., 2017b). Bakır alaşımı emdirilmiş ve karbon elyaflar ile güçlendirilmiş C/C kompozitlerin sürtünme ve aşınma davranışları incelendiğinde kompozit malzemenin yapısında farklı türlerde bulunan karbon elyafların yüksek arkdeşarjının yaşandığı durumlarda akım toplayıcı plakaların aşınma oranını azaltmada etkili olmadığı belirtilir. Fakat karbon elyaflar çatlakların uzamasını ve yayılmasını engeller bu da malzemenin hasara uğramasını geciktirir (Kubota vd., 2013).

4. MATERYAL VE METOD

HRS işletmelerinde, katener temas telinden alınan elektrik enerjisinin trenin güç aktarma sistemine iletilmesi pantograf mekanizmasında yer alan grafit plakaların temas teline sürtünmeli kayar teması ile sağlanmaktadır. Bu bölümde, katener temas teli ve akım toplayıcı grafit plakalar arasında meydana gelen mekanik sürtünme ve aşınma etkileşimlerini gerçekçi düzeyde simüle eden ve ölçebilen aşınma simülatörü olarak adlandırılan deney düzeneğinin tasarım, imalat ve test süreçleri anlatılmıştır. Deney düzeneğinin tasarımı ve imalatı sırasında yapılan mekanik imalat işlemleri, elektronik kontrol ünitesi ve yazılım kurulumu, dinamometre tasarımı, kalibrasyonu ve montajı, hidrolik ve pnömatik devrenin oluşturulması, deney düzeneğine entegre edilmesi, sistemin bir bütün halinde çalışma entegrasyonunun sağlanması ve testler sırasında yapılan deneysel çalışmalar detaylıca açıklanmıştır.

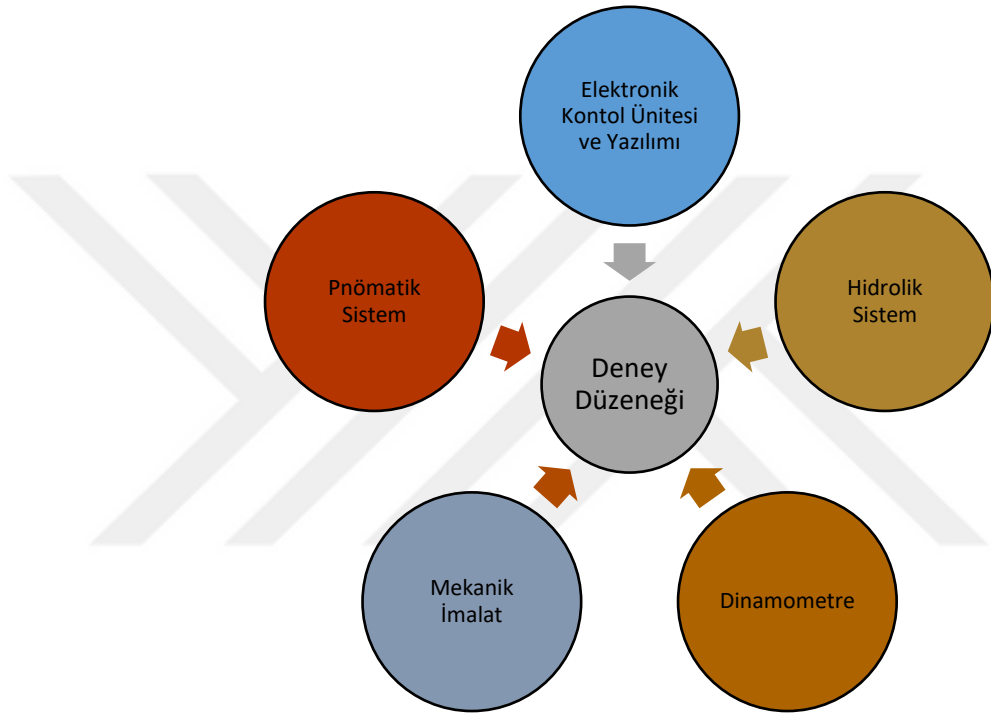
4.1. Deney Düzeneği Kriterleri, Bileşenleri ve Tasarımı

Deney düzeneğinin imalat işlemi öncesi, trenin hareketi sırasında katener temas teli ve pantograf mekanizması arasında oluşan etkileşim detaylıca irdelenmiş ve bu etkileşimi deney düzeneğine aktarabilmek için gerekli tasarım kriterleri ve eklenecek bileşenler belirlenmiştir. Deney düzeneğinin, aşınma çifti arasındaki etkileşimi gerçekçi bir şekilde ortaya koyabilmesi için gerekli tasarım kriterleri şu şekilde belirlenmiştir. Deney düzeneğinin;

- Düşük maliyetli özgün ve ulusal,
- Rijit ve dayanıklı,
- Kolay montaj/demontaj,
- Hassas ölçülebilir ve kontrol edilebilir,
- Kalibre edilebilir,
- Zikzak örseleme hareketini yapabilir,
- Mesafe / zaman / durak bilgileri / dur-kalk / yavaşlama ve hızlanma süresi verilerine göre programlanabilir,
- Temas kuvveti sürekli sağlanabilir,
- Hidrolik/pnömatik ve servo motor kontrol bileşenleriyle senkronize

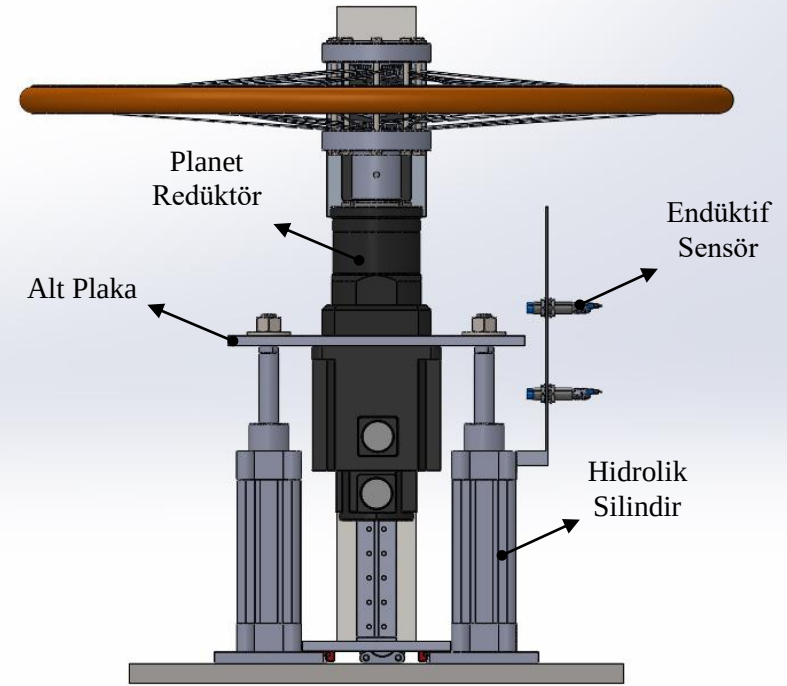
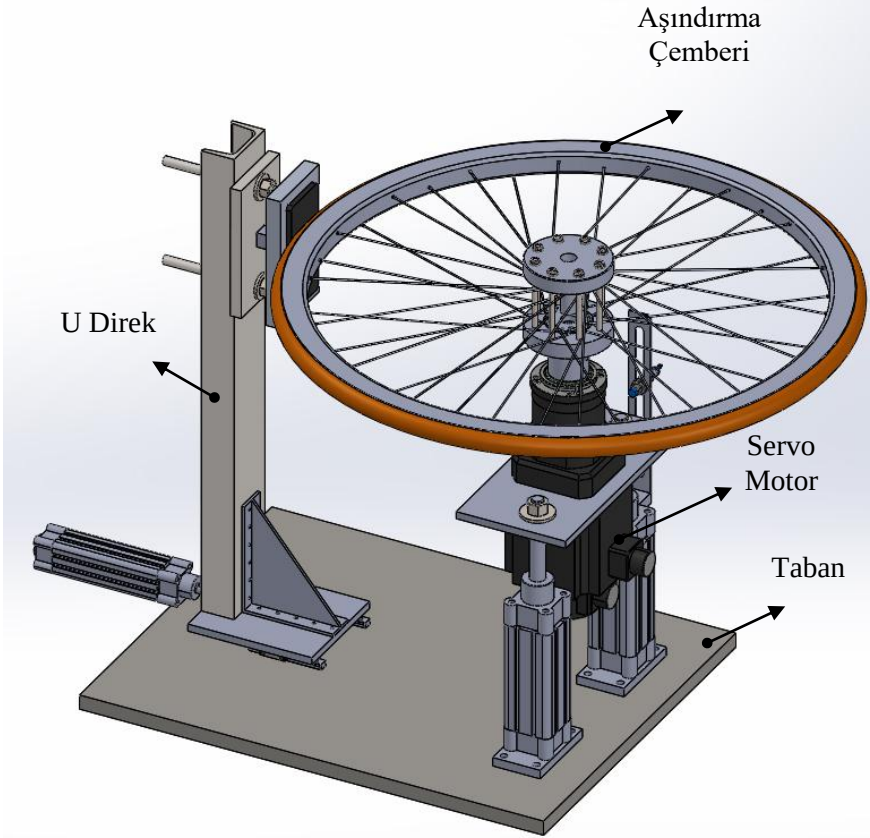
çalışabilir olması gibi özellikler dikate alınarak deney düzeneğinin tasarımı yapılmış ve temel kriterleri oluşturmuştur.

Bu kriterler dikkate alındığında deney düzeneğinin görevini yerine getirebilmesi için tasarım ve imalat aşamasında gerekli bileşen eklentilerinin yapılması gerektiği ortaya çıkmıştır. Sistemin oluşturulabilmesi için gerekli deney düzeneği bileşenleri Şekil 4.1’de verilmiştir. Bu bileşenlerden bazıları var olan sistemlerinin deney düzeneğine uygun hale getirilip entegre edilmesiyle çalıştırılmış, bazılarının ise tasarım ve imalatları yapıldıktan sonra aşınma simülatörü deney düzeneğine bağlantıları ve montajları yapıp entegre edilmişlerdir.

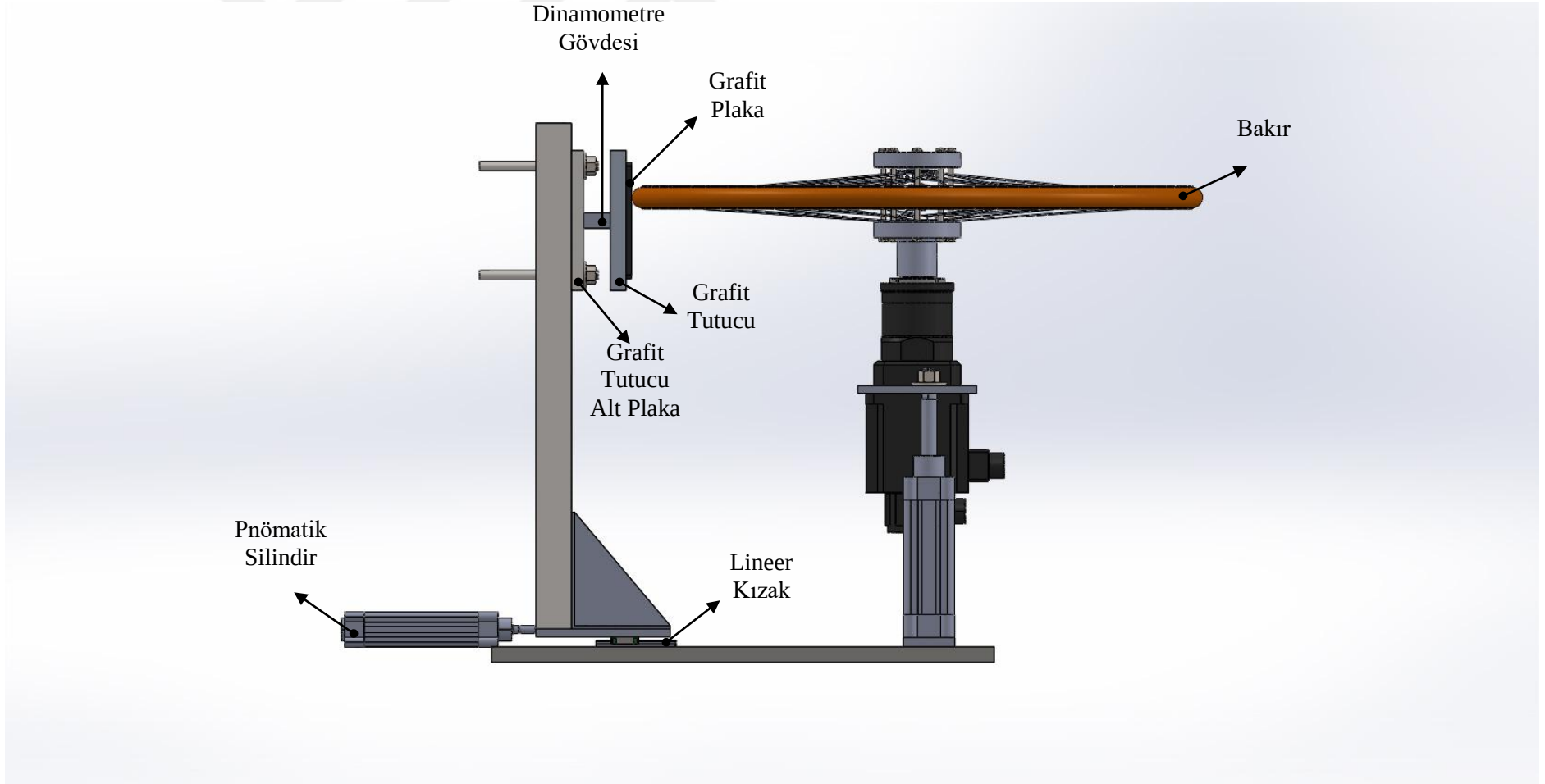


Şekil 4.1. Deney düzeneği bileşenleri

Deney düzeneğine entegre edilen bileşenler, düzeneği oluşturan yapının mekanik imalatlarından, hidrolik ve pnömatik sistemlerden, gerinim ölçerler sayesinde imalat edilen özgün dinamometreden, elektronik kontrol ünitesi ve özgün yazılımdan oluşmaktadır. Bu bileşenlerin deney düzeneği sisteminde yapacağı görev ve ana elemanları Tablo 4.1’de verilmiştir. Tasarım kriterleri ve gerekli bileşenler dikkate alınarak yapılan çalışmalar sonucunda deney düzeneğinin katı model tasarımları oluşturulmuş ve görüntüleri Şekil 4.2 ve Şekil 4.3’de verilmiştir.



Şekil 4.2. Deney düzeneğinin tasarım görüntüsü ve bileşenleri



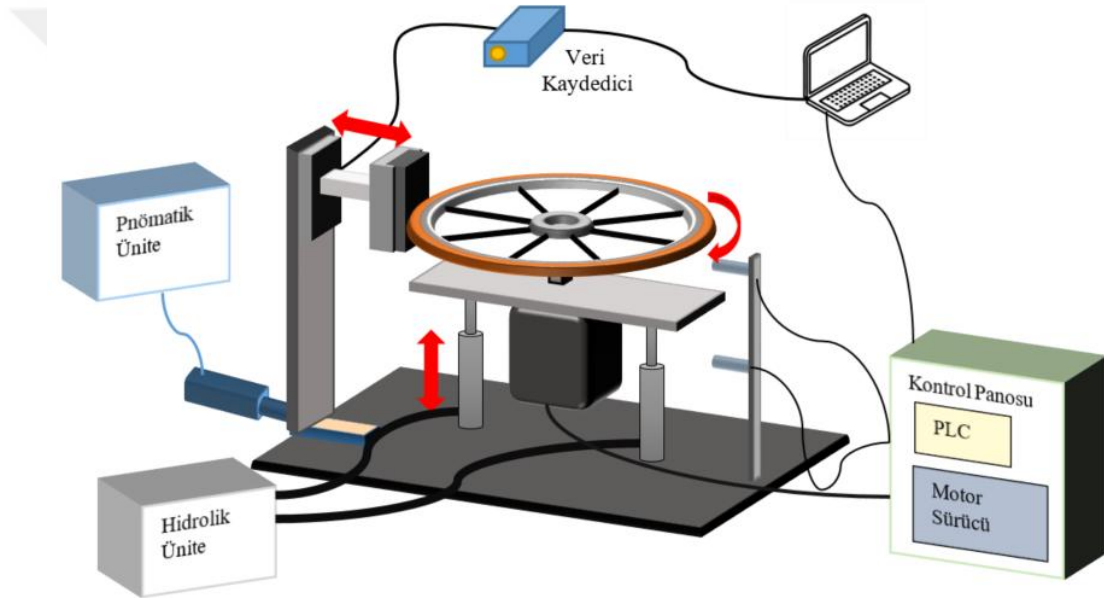
Şekil 4.3. Deney düzeneğinin farklı açıdan tasarım görüntüsü ve bileşenleri

Tablo 4.1. Deney düzeneği bileşenlerinin ana elemanları ve görevleri

<u>Bileşen</u>	<u>Eleman</u>	<u>Görevi</u>
Mekanik İmalat	- Taban	Deney düzeneğini bir arada tutmak ve bileşenlerin montaj yapılmasını sağlamak
	- U direk	
	- Grafit tutucu	
	- Grafit tutucu alt plaka	
	- Dinamometre gövdesi	
	- Aşındırma çemberi	
	- Bağlantı elemanları	
Elektronik Kontrol Ünitesi ve Özgün Yazılımı	- Servo motor ve sürücü	Hareketin sağlanması, sistemin kontrol edilmesi, durak verilerinin alınması
	- PLC ve kontrol panosu	
	- Kontrol ve analiz yazılımı	
	- Endüktif sensörler	
	- Redüktör	
Hidrolik Sistem	- Silindirler	Zikzak hareketinin oluşturulması
	- Tank	
	- Pompa	
	- Motor	
	- Filtre	
	- Valfler	
	- Gösterge	
	- Bağlantı boruları	
Pnömatik Sistem	- Silindir	İstenilen değerlerde temas kuvvetinin oluşturulması ve kuvvetin sürekli sağlanması
	- Tank	
	- Pompa	
	- Motor	
	- Filtre	
	- Valfler	
	- Gösterge	
	- Bağlantı boruları	
Dinamometre	- Gerinim ölçerler	Temas kuvvetinin ve sürtünme kuvvetinin ölçülmesi
	- Bağlantı kabloları	
	- Veri kaydedici	
	- Yazılım	
	- Dinamometre gövdesi	

4.2. Deney Düzenekinin Çalışma Prensibi

Tablo 4.1’de verilen deney düzenekini oluşturan bileşenler ve görevleri düşünüldüğünde, ayrı ayrı farklı görevleri yerine getiren karmaşık bir yapının senkron bir şekilde birlikte çalışacağı görülmektedir. Bileşenlerin deney düzenekine entegre edilmesiyle üretilcek olan bütünleşik sistemin HRS’ deki temas teli ile grafit plaka arasındaki teması benzeştirmesi, sistemin senkronize çalışabilmesi, kontrol edilebilmesi ve ölçüm değerleri alınabilmesi oldukça önemlidir. Şekil 4.2 ve Şekil 4.3’de verilen tasarım görüntülerinde yer alan bileşenlerin bir araya getirilmesi ve gerekli bağlantıların yapılmasıyla ortaya çıkan bütünleşik sistemin şematik görüntüsü Şekil 4.4’de verilmiştir.



Şekil 4.4. Deney düzenekinin bütünleşik yapısının şematik görünümü

Şekil 4.2 ve Şekil 4.3’de görüleceği gibi deney düzenekinde, titreşimi soğurması ve bileşenleri bir arada tutması için kalın kesitli kır dökme demirden bir taban, bu tabana montajlı iki hidrolik silindir ve bu silindirler sayesinde aşağı-yukarı hareket eden bir alüminyum plaka kullanılmaktadır. Katener sisteminde yer alan temas telinin görevini yerine getirmek amacıyla bakır tel sargılı bir aşındırma çemberi, alüminyum plakanın merkezine 3D katmanlı imalat yöntemi kullanılarak üretilen bağlantı elemanları vasıtasıyla yataklanmış ve redüktör kullanılarak, sürücülü 15 Nm’lik bir servo motor tarafından tahrik edilmektedir. Aşındırma çemberinin dönme hızı sisteme entegre edilen ve kontrol panosuna yerleştirilen PLC ile bilgisayar üzerinden özgün bir şekilde hazırlanmış yazılım ile kontrol

edilmektedir. Aşındırma çemberi dönmesi sırasında, grafit plaka yüzeyinde zikzak çizecek şekilde aşağı-yukarı hareket etmesi hidrolik silindirler için hazırlanan bir devre yardımı ile sağlanmaktadır. Aşındırma çemberinin aşağı-yukarı hareketini yaptığı mesafe, yani çalışma aralığı endüktif sensörler yardımıyla grafit plaka yüzeyinde yaklaşık 65 mm olarak ayarlanmıştır. Test numunesi grafit plaka, grafit tutucu parçası sayesinde dört kenarından sabitlenerek sürtünme teması nedeniyle kayması engellenmiştir. Yaklaşık 67 cm çapta tasarlanan aşındırma çemberinin hareketi, tramvayın gerçek hareket bilgilerinin girilebildiği özgün kontrol yazılımı sayesinde programlanabilmektedir. Böylelikle girilen durak sayısı, iki durak arası mesafe, çalışma hızı, bekleme süreleri, hızlanma hızı ve yavaşlama hızı gibi bilgiler sayesinde istenilen güzergah parkuru, deney düzeneğinde gerçek şartlara yakın bir şekilde simüle edilebilmektedir.

HRS'lerin çalışması sırasında grafit plaka ile katener temas teli arasında sağlanan temas kuvvetini benzeştirmek amacıyla sadece aşındırma çemberine dik bir yönde hareket edebilen lineer kızak mekanizması U direk altına yerleştirilmiş ve grafit plakayı taşıyan U direğin pnömantik silindirin etkisiyle aşındırma çemberine istenilen değerde sürekli olarak etki ettirilmesi sağlanmıştır. Çalışma sırasında grafit plaka ile aşındırma çemberi arasında oluşan temas kuvvetini ve dönme sırasında meydana gelen radyal kuvveti ölçebilmek amacıyla gerinim ölçer gövdesi üzerine uygun dizilişte gerinim ölçerler yerleştirilmiş, yani bir kuvvet dinamometresi oluşturulmuştur. Dinamometrenin doğru sonuçlar vermesi amacıyla ilgili yük değerleriyle kalibrasyonu yapılmıştır. Deney sırasında aşındırma çemberi ile grafit plaka arasında oluşan temas kuvveti ve sürtünme kuvveti ölçüm değerleri sisteme entegre edilen bir veri kaydedici sayesinde anlık olarak bilgisayara gönderilmekte ve kayıt edilmektedir.

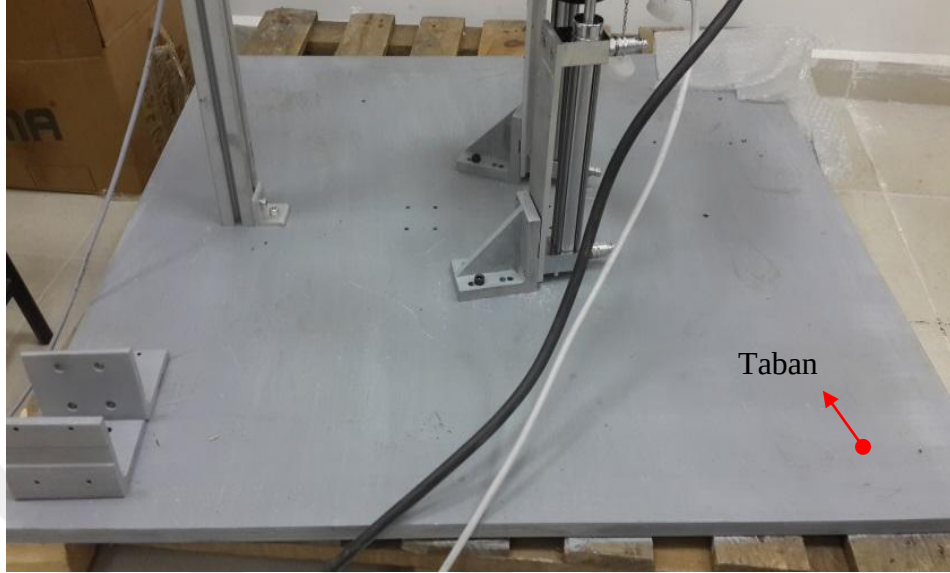
4.3. Deney Düzeneğinin İmalatı

Bu bölümde deney düzeneğini oluşturan bileşenlerin tasarım, imalat aşamaları, yapacağı görevler ve deney düzeneğinin bir bütün olarak imalat montajı detaylı bir şekilde anlatılmıştır.

4.3.1. Mekanik İmalat İşlemleri

Deney düzeneğinde çalışma sırasında oluşabilecek titreşimi soğurması ve bütün bileşenlerin montajının yapılabileceği kalın kesitli, 100x100 cm boyutlarında

ve 160 kg ağırlığında kır dökme demirden plaka şeklinde bir taban üretilmiş yüzeyleri işlenmiş, boyanmış ve montaj delikleri hazırlanmıştır. Taban parçasının görüntüsü Şekil 4.5’de verilmiştir.



Şekil 4.5. Taban parçasının görüntüsü

HRS’ lerde mevcut olan katener temas telinin işlevini görmesi amacıyla 2 mm cidar kalınlığına ve 21,4 mm çapa sahip sert bakır boru temin edilmiş ve 55 cm çapında bisiklet jantının kanalına yerleştirilmiştir. Kanala yerleştirme öncesinde bakır boru bükme yöntemiyle jant kanalı formuna uygun bir şekilde deforme edilerek bükülmüştür. Bükme işlemi sırasında bakır borunun çap formu bozulmaması için önlem alınmıştır. Bükme işleminin ardından bisiklet jantı kanalına sıkıca yerleştirilen bakır boru uçları, boşluk kalmayacak ve açılmayacak şekilde puntalanmış ardından oksiasetilen kaynağı sayesinde Cu - Zn alaşımı, 450 °C sıcaklıkta ergitilip bakır boru uçlarının sert lehimleme işlemi yapılmıştır. Sert lehimleme işlemi sayesinde yüksek temas kuvveti altında bakır borunun açılması ve hasara uğraması önlenmiştir. Aşındırma çemberi ve bakır borunun görünümü Şekil 4.6’da verilmiştir.



Şekil 4.6. Bakır sarılı aşındırma çemberi

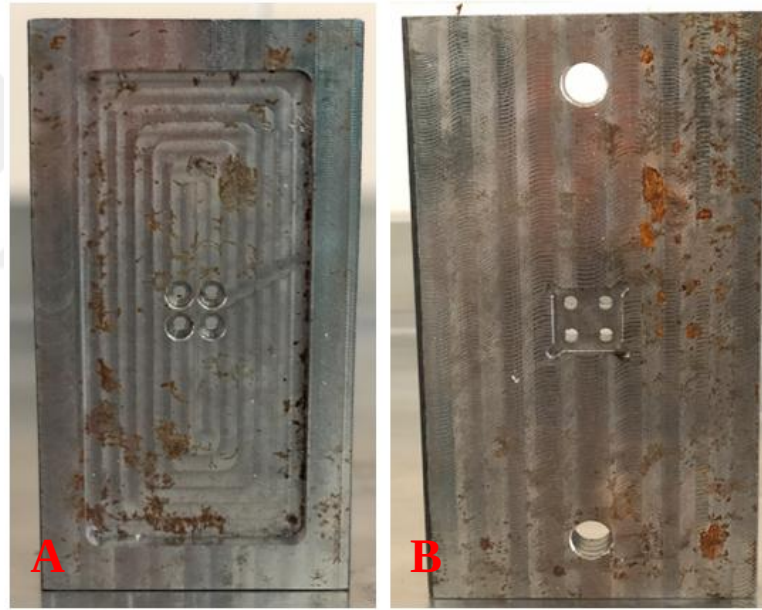
Grafit plaka ile aşındırma çemberinin birbirine teması sırasında ortaya çıkan farklı eksenlerdeki kuvvet değerlerini doğru bir şekilde ölçebilmek için gerinim ölçerlerden faydalanılmıştır. Bu gerinim ölçerlerin ölçüm yapabilmesi için üzerine gerinim ölçerlerin yapıştırılacağı ve düşük elastik şekil değişimine izin veren ‘dynamometre gövdesi’ olarak adlandırılan parça tasarlanmış ve talaşlı imalat yöntemi ile üretilmiştir. Talaşlı imalat yöntemiyle üretilen dynamometre gövdesi parçasının görüntüsü Şekil 4.7’de verilmiştir.



Şekil 4.7. Dynamometre gövdesi parçasının görüntüsü

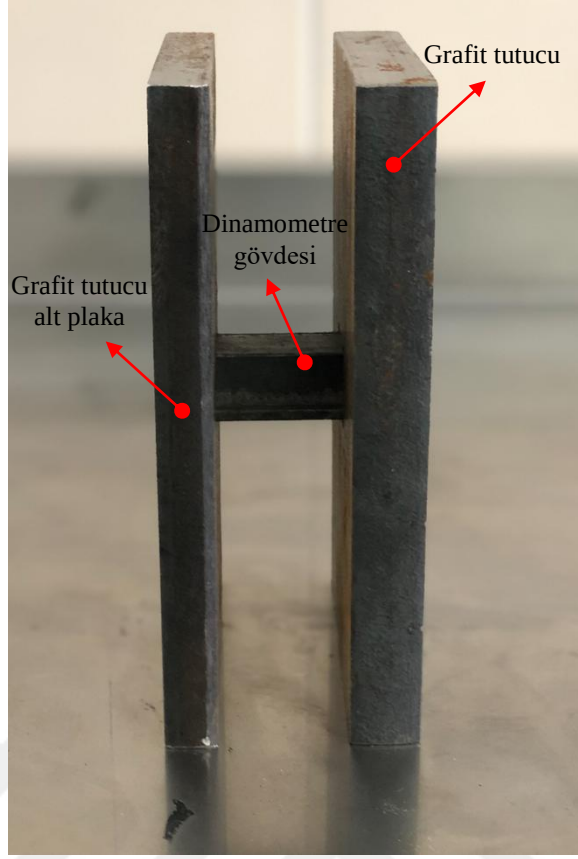
Deneyisel çalışmalarda kullanılacak grafit plaka numunelerinin düzgün bir şekilde yerleştirilebilmesi ve deney sırasında yerinden çıkmaması için grafit tutucu adı verilen parça tasarlanmış ve talaşlı imalat yöntemiyle üretilmiştir. Grafit tutucu parçasının yanlarına monte edilen sabitleme cıvataları ile grafit plaka numunelerinin deney sırasında yerinden çıkması önlenmiştir. Grafit tutucu parçasının talaşlı imalat yöntemi ile üretilen görüntüsü Şekil 4.8 A’da verilmiştir.

Grafit tutucu parçasının montaj halinde olduğu gerinim ölçer gövdesine montaj olan ve bu bütün yapının U direk olarak adlandırılan parçaya montajını sağlayan parçaya grafit tutucu alt plaka parçası adı verilmiştir. Sistemin çalışması esnasında ortaya çıkan kuvvetleri dinamometre gövdesine aktarabilen grafit tutucu alt plaka parçası talaşlı imalat yöntemi ile üretilmiştir. Grafit tutucu alt plaka parçasının talaşlı imalat yöntemi ile üretilen görüntüsü Şekil 4.8 B’de verilmiştir.



Şekil 4.8. Grafit tutucu (A) ve grafit tutucu alt plaka (B) parçalarının görüntüsü

Dinamometre gövdesi, grafit tutucu ve grafit tutucu alt plaka parçalarının bir arada montajlı halinin görünümü Şekil 4.9’da verilmiştir. Montaj edilmiş bu üç parça bir bütün halinde U direk adlı parçaya montaj edilmektedir. Üç parçanın U direk parçasına montajı grafit tutucu alt plaka üzerinden gerçekleşmektedir. Deney düzeneğinin çalışması sırasında grafit tutucu alt plaka sabit durumdayken, grafit tutucu üzerine gelen kuvvetler dinamometre gövdesi parçası üzerinde bulunan gerinim ölçerler sayesinde veri kaydediciye iletilmektedir.



Şekil 4.9. Üç parçanın montaj edilmiş görüntüsü

4.3.2. Elektronik Kontrol ünitesi ve Özgün Yazılımı

Deney düzeneğinin hassas bir şekilde kontrol edilebilmesi ve değişken hız, zaman ve mesafe gibi deney parametrelerinin test edilebilmesi amacıyla belirlenen özelliklerde servo motor, sürücü ve redüktör temin edilmiştir. Servo motor, yine temin edilen PLC modülü sayesinde programlanabilir hale getirilmiş ve özgün yazılım ara yüzüyle kumanda edilmiştir. Tüm elektrik ve veri bağlantıları bir elektronik kontrol ünitesi panosunda toplanmıştır.

4.3.2.1. Servo Motor, Sürücü ve Redüktör Kullanımı

HRS' lerde katener temas teli ile grafit plakaların temas hareketini oluşturmak amacıyla, etrafına bakır tel malzemeden sarılan aşındırma çemberinin montaj edildiği 1/10 planet redüktör, servo motor ve sürücüsü deney düzeneğine entegre edilmiştir. Aşındırma çemberinin dönme hareketini istenen hız değerlerinde yapabilmesi ve kontrol edilebilmesi amacıyla SZGH firmasının 13380CC model servo motor ve sürücüsü temin edilmiştir. 15 N.m sürekli tork üretebilen 13380CC model AC servo motor, bir yüksek atalet servo motorudur. 3.8 kW anma gücüne sahip olan servo

motor 2500 d/d anma hızı ile çalışmaktadır. Elektrik bağlantı özellikleri üç fazlı 380 V ve anma akımı 13.5 A olarak verilmektedir. Deney düzeneğinde kullanılan servo motor, sürücü ve veri kablosunun görüntüleri Şekil 4.10’da verilmiştir.



Şekil 4.10. 13380CC model servo motor, sürücüsü ve bağlantı kablosu

Deney düzeneği kurulumunun ilk zamanlarında aşındırma çemberi direkt servo motor miline montaj edilmiş fakat aşındırma çemberi çapının büyük olması neticesinde oluşan yüksek atalet momenti, servo motorun aşındırma çemberine dönme hareketini iletmesine engel olmuş ve sürekli sürücüye hata kodu göndermiştir. Bunun üzerine servo motorun Çin’deki üretici firmasıyla yapılan görüşmeler ve araştırmalar sonucunda aşındırma çemberi ile servo motor mili arasına yerleştirilecek planet redüktör tedarik edilmiş ve montajı yapılmıştır. Redüktörün sistemdeki görevi, servo motorun ürettiği yüksek dönüş hızını deney düzeneğinde gerekli olan hıza indirmek suretiyle yüksek tork üretmektir. İçerisindeki bulunan dişli kutusu sayesinde servo motorun açısal hızını 1/10 oranında azaltıp aşındırma çemberinin dönme hareketini yapabilmesi için uygun tork üretilmiştir. Deney düzeneğinden kullanılan planet redüktörün görüntüsü Şekil 4.11’de verilmiştir.



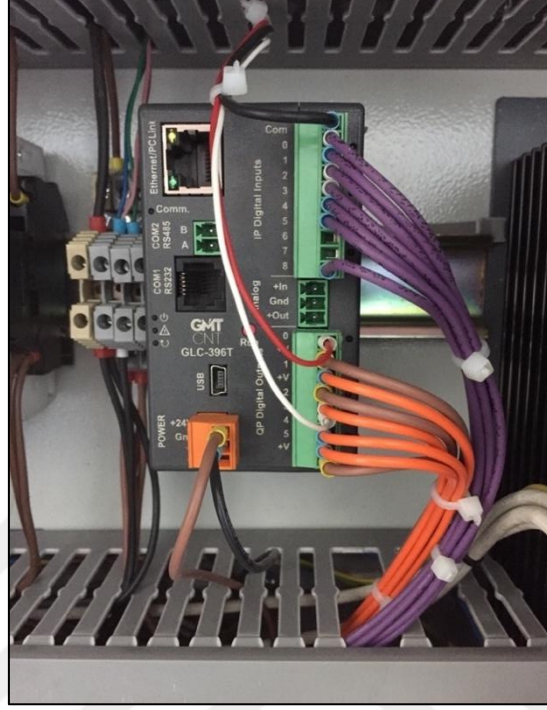
Şekil 4.11. Planet redüktör

4.3.2.2. PLC ve Özgün Kontrol Analiz Yazılımı

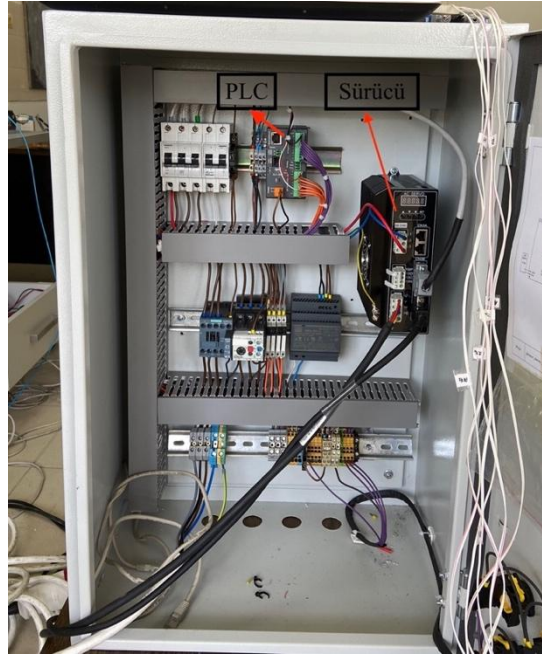
HRS' de, trenin gerçek hareket şartlarını benzeştirmek amacıyla servo motora dur-kalk şeklinde mesafe, hız, hızlanma süresi, yavaşlama süresi ve bekleme süresi gibi değerlerinin girilebildiği ve kumanda edilebildiği gerçek hareket şartlarını benzeştiren özgün bir yazılım üretilmiş ve PLC üzerinden programlanmıştır.

PLC, makinelerin kontrolü için kullanılan içerisinde mikroişlemcinin bulunduğu özel bilgisayarlardır. PLC içerisinde bulunan işletim sistemi vasıtasıyla kendisine bağlı genişleme modüllerinden bilgi almakta, bu bilgileri milisaniye hızlarında taramakta ve buna uygun çıkış verilerini gerçek zamana yakın bir şekilde vermektedir. PLC'ler kullanılan bilgisayarların aksine elektriksel gürültülere, sıcaklık farklarına, mekanik darbe ve titreşimlerine dayanıklı tasarlanmışlardır. Bu sebeple endüstride bir çok alanda başarılı bir şekilde kullanılmaktadır. Deney düzeneğinde GMT firmasına ait GLC-396T PLC modülü kullanılmış ve firmaya ait GMT Suite editör yazılımı ile merdiven metodu üzerinden programlanmıştır. Ethernet portu üzerinden haberleşme sağlanan GLC-396T, 24VDC besleme ile çalışmakta, 9 kanal 24V DC PNP/NPN giriş ve 6 kanal 24V DC 300 mA kısa devre korumalı transistör çıkışına sahiptir. PLC modülü kontrol panosuna yerleştirilmiş, servo motor ve sürücü ile ethernet üzerinden haberleşme bağlantıları yapılmış ve

sistem kumanda edilebilir hale getirilmiştir. Deney düzeneğinde kullanılan ve kontrol panosuna montajı yapılan PLC modülünün görüntüsü Şekil 4.12’de, kurulan elektrik-elektronik kontrol panosunun görüntüsü Şekil 4.13’de verilmiştir.

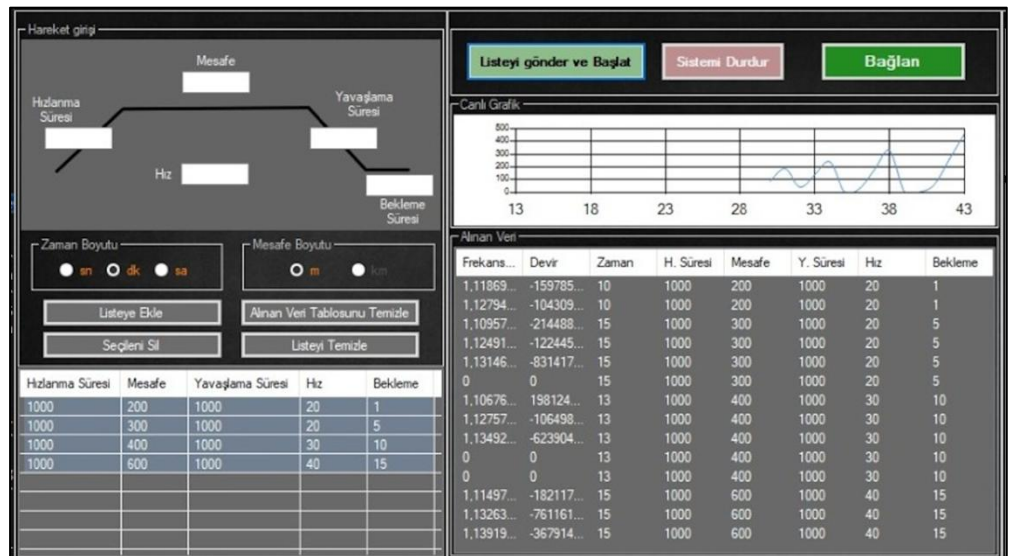


Şekil 4.12. Deney düzeneğinde kullanılan PLC modülü



Şekil 4.13. Deney düzeneği elektronik kontrol panosu

Çalışmaya ilişkin özgün PLC kontrol ve analiz yazılımı, Microsoft Visual Studio altyapısı ile C# dilinde geliştirilmiş, ana kontrol-izleme, manuel kontrol ve kalibrasyon formları olmak üzere üç farklı pencere/formdan ve yaklaşık 1500 kod satırından oluşacak şekilde yazılmıştır. Ana kontrol formu ve izleme formu aracılığı ile sistemin hareket durumları liste halinde planlanabilmekte, bu liste xlsx formatından çıktı alınabilmekte ve yine gerekli olması halinde aynı liste tekrar programa yüklenebilmektedir. Herhangi bir raylı sistemin iki durak arası mesafe, trenin maksimum hıza ulaşacağı hızlanma süresi, yavaşlama ve bekleme süreleri gibi değerler durak sayısı kadar programlanabilmekte yani aşındırma çemberinin dönme hareketi istenilen şekilde kumanda edilebilmekte ve böylelikle trenin gerçek güzergah testleri simüle edilebilmektedir. Deney düzeneğinin hareket planlamasına göre çalışması esnasında anlık olarak hız değeri grafik olarak gösterilirken frekans, devir, zaman, mesafe, hız gibi çeşitli veriler toplanmakta ve geçici belleğe kaydedilmektedir. Deney sonucunda bu hareket verileri xlsx veya txt formatında kaydedilebilmektedir. Kontrol ve analiz yazılımının arayüzünün görüntüsü Şekil 4.14’de verilmiştir. Görüntüden anlaşılacağı gibi ‘bağlan’ komutuyla bilgisayar ve PLC bağlantısı kurulduktan sonra istenilen değerlerde hareket girişi verileri girilir, ardından ‘listeyi gönder ve başlat’ komutu ile servo motor istenilen zaman, hız ve mesafe değerlerinde harekete başlar. Çalışma esnasında herhangi bir problem olması durumunda ‘sistemi durdur’ komutu ile servo motorun çalışması anında durdurulabilmektedir.



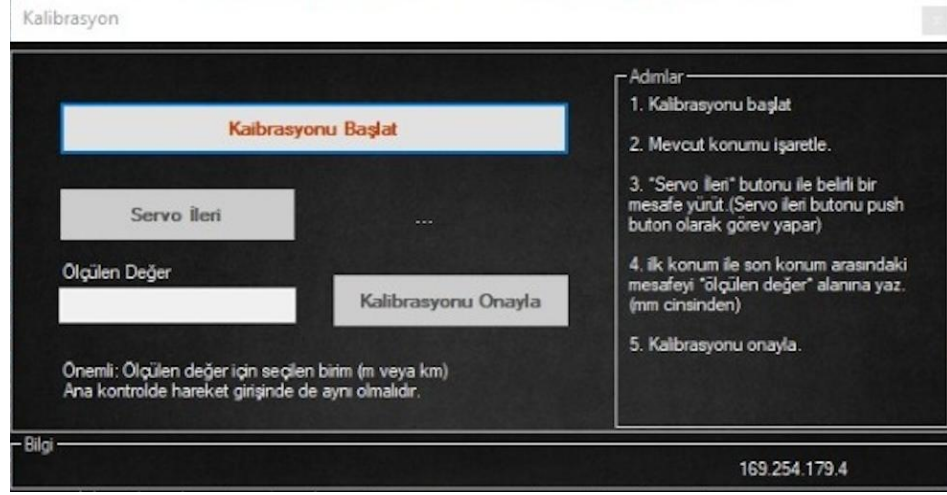
Şekil 4.14. Özgün kontrol ve analiz programı arayüzünün görüntüsü

Manuel hareket formu ile deney düzeneği ve kontrol yazılımı arasındaki veri iletişimi test edilebilir ve gerekli durumlarda mekanik sisteme müdahale için kullanılabilir. Girilen hız ve rampa değerleri ile deney düzeneğinin fonksiyonları gerçek deney öncesi kontrol edilebilir. Hidrolik hareket formu ile deney düzeneğinin hidrolik devresinde kullanılan motora açma kapama komutları gönderilebilmektedir. Ayrıca aşındırma çemberi, redüktör ve servo motoru taşıyan hidrolik silindirler aşağı yukarı manuel bir şekilde hareket ettirilebilmektedir. Böylelikle aşındırma çemberinin grafit plaka üzerinde deneye başlayacağı bölge belirlenebilir. Manuel ve hidrolik hareket formunun oluşturulduğu arayüzünün görüntüsü Şekil 4.15’de verilmiştir.



Şekil 4.15. Manuel ve hidrolik kontrol arayüzünün görüntüsü

Kalibrasyon formu ile test öncesi ve sonrasında servo motor hareketiyle dönen aşındırma çemberinin aldığı mesafenin cm/m/km cinsinden doğruluğu kalibrasyon işlemiyle ölçülebilmektedir. Bu işlem yapılırken kalibrasyon arayüzünde yer alan ‘kalibrasyonu başlat’ komutu ile aşındırma çemberinin kalibrasyon öncesi mevcut konumu işaretlenir, yine kalibrasyon arayüzünden ‘servo ileri’ komutu ile daha önce işaretlenmiş konuma gelene kadar aşındırma çemberine çevresi kadar 1 tam tur dönme hareketi yaptırılır. Yani ilk konumu ile son konumu aynı duruma getirilir. Ardından aşındırma çemberinin daha önce ölçülmüş çevre uzunluk değeri ‘ölçülen değer’ kısmına aynı mesafe birimi cinsinden yazılır ve ‘kalibrasyonu onayla’ komutu ile kalibrasyon işlemi sonlandırılır. Deneyler sırasında kalibrasyon işlemi belli periyotlar ile tekrarlanıp aşındırma çemberinin aldığı mesafenin doğruluğu kontrol edilir. Kalibrasyon arayüzünün görünümü Şekil 4.16’da verilmiştir.



Şekil 4.16. Kalibrasyon arayüzünün görünümü

4.3.2.3. Endüktif Sensörler

HRS'lerde bakır temas teli ile grafit plakanın kayar sürtünmeli teması sırasında oluşan zikzak hareketinin deney düzeneğinde oluşturulması amacıyla hidrolik silindirlerin bağlı olduğu alüminyum plaka aşağı ve yukarı yönde belirli bir mesafe aralığında hareket ettirilmektedir. Bu hareketi alüminyum plakanın bağlı olduğu hidrolik silindirler sağlamaktadır. Alüminyum plakanın hareket etmesiyle, taşıdığı servo motor ve servo motorun redüktör aracılığı ile bağlı olduğu aşındırma çemberi aynı anda ve yönde aşağı yukarı hareket etmektedir. Alüminyum plakanın aşağı yukarı hareketi sırasında aşındırma çemberinin grafit plaka üzerinde hangi mesafe aralığında çalışacağını sisteme entegre edilen endüktif sensörler belirlemektedir. Kendisine yaklaşan metal cisimlerin varlığını, oluşturduğu manyetik alanın içerisine girmesiyle belirli bir mesafeden algılayan bu sensörler, çıkış sinyalinin değişmesi ile hidrolik silindirlerin hareket yönünü değiştirmektedir. Deney düzeneğinde kullanılmak üzere 3 adet IFM firmasının IF590 kodlu endüktif sensörü tedarik edilmiş ve yapılan talaşlı imalat ile 2 adeti aşağı yukarı hareket mesafesini sınırlayıcı olarak, diğeri ise devir sayacı olarak sisteme entegre edilmiştir. 5 mm mesafe içerisinde algılama yapabilen bu sensörlerin bağlantıları elektrik-elektronik panosuna yapılmış ve sensörlerin manuel kontrolü özgün yazılım içerisindeki hidrolik hareket arayüzünden sağlanmıştır. 65 mm mesafe aralığıyla alt ve üste yerleştirilen 2 adet endüktif sensör alüminyum plakayı algılayacak şekilde konumlandırılmıştır. Böylelikle hareket sırasında, alüminyum plaka üst sensöre ulaştığında silindirler aşağı yönde hareket ettirilmekte, alt sensöre ulaştığında ise yukarı yönde hareket

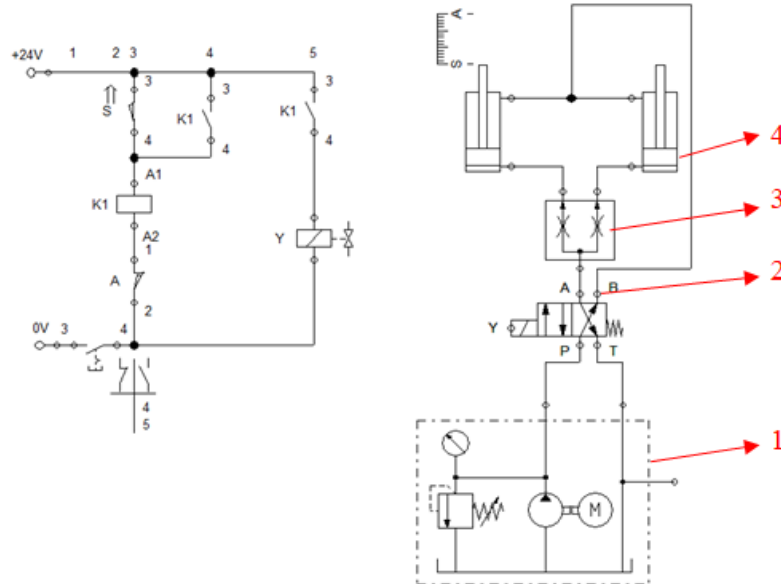
ettirilmekte ve zikzak hareketi, dönme hareketi sırasında sürekli olarak oluşturulmaktadır. Deney düzeneğinde kullanılan endüktif sensörlerin görünümü Şekil 4.17’de verilmiştir.



Şekil 4.17. Endüktif sensörlerin görünümü

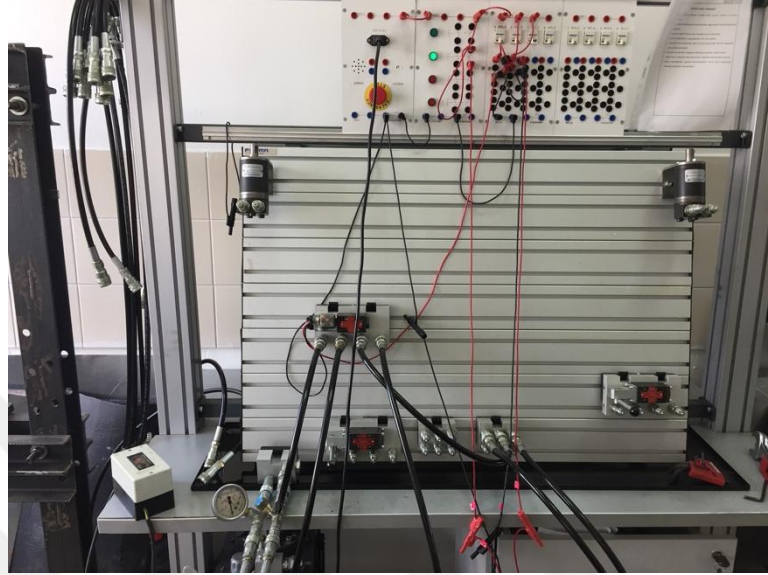
4.3.3. Hidrolik Sistem

Deney düzeneğinde zikzak hareketini oluşturmak amacıyla, silindirlerin aşağı yukarı yönde hareket etmesini sağlayan elektro-hidrolik devresi Şekil 4.18’de verilmiştir.



Şekil 4.18. Elektro-hidrolik devresi

Devre güç ünitesi (pompa, motor, basınç kontrol valfi), 4 yollu 2 konumlu selenoid kontrollü yay geri dönüşlü yön kontrol valfi (4/2 yön kontrol valfi), akış bölücü valf ve silindirlerden oluşmaktadır. Deney düzeneğine entegre edilen hidrolik ünitenin görünümü Şekil 4.19’da gösterilmiştir.



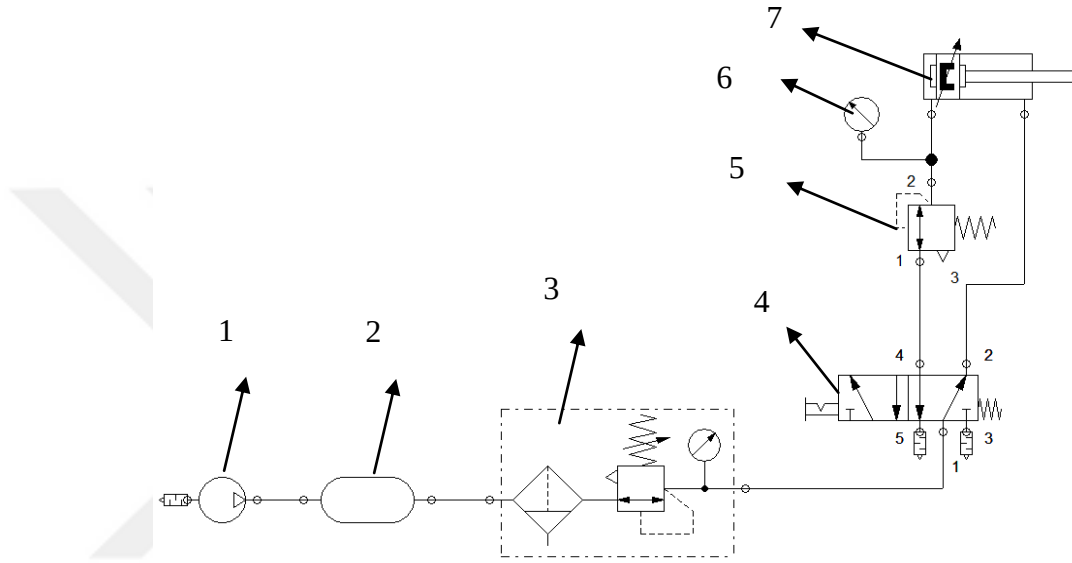
Şekil 4.19. Hidrolik ünitenin görünümü

Devre ilk çalışma anında tüm silindirleri aşağıda tutmaktadır. Dolayısıyla silindirlere montajlı halde bulunan alüminyum plaka, servo motor, redüktör ve aşındırma çemberi de aşağıda konumlanmaktadır. Elektrik devresi üzerinden sistem tahrik edildiğinde Y rölesi tetiklenerek 2 numaralı valfi açmakta ve 1 numaralı güç ünitesinden gelen basınçlı akışkan 3 numaralı akış bölücü valften geçerek 4 numaralı silindir çubuklarının ileri doğru çıkmasına sebep olmaktadır. Silindir çubuklarının montajlı olduğu alüminyum plaka A ile gösterilen endüktif mesafe sensörü tarafından algılandığında elektrik devresindeki A anahtarı devredeki elektriği kesmekte ve 2 numaralı valf selenoidinin enerjisi kesilmektedir. Bu durumda valf üzerindeki yay, valfi geri iterek ilk konumuna geri almaktadır. Valfin ilk konuma gelmesi ile basınçlı akışkan B hattından silindirlerin üst girişlerine dolmakta ve silindir çubuklarını geri çekmektedir. Çubukların en alt konuma gelmesiyle alüminyum plaka bu sefer S endüktif mesafe sensörü tarafından algılanıp elektrik devresini tamamlamakta ve K1 rölesini enerji ile beslemektedir. Ardından K1 rölesi K1 anahtarlarını kapatarak devreyi mühürlemektedir. Böylece silindirler S sensöründen ayrıldıktan sonra bile Y rölesine enerji sağlanmaya devam etmektedir. Silindir çubukları tekrar ileri çıkıp A sensörüne kadar gitmekte ve bu döngü devre

enerjisi tamamen kesilene kadar sürekli olarak devam etmektedir. S ve A endüktif sensörlerinin mesafe aralığı 65 mm olarak belirlenmiştir.

4.3.4. Pnömatik Sistem

Şekil 4.20’de deney düzeneğinde, grafit plakanın sabit kuvvet ile aşındırma çemberi üzerindeki bakır malzemeye baskı yapmasını ve süreli temas etmesini sağlayan pnömatik devre verilmiştir.



Şekil 4.20. Pnömatik devre

Devre, kompresör (1), basınçlı hava tankı (2), şartlandırıcı (3), 5 yollu 2 konumlu butonlu yön kontrol valfi (4), basınç düşürücü valf (5), manometre (6) ve pnömatik silindirden (7) oluşmaktadır. Kompresör ile basınçlandırılan hava, tank içerisinde 6 bar basınçta depolanmaktadır. Tank içerisinden çıkan hava filtre ve basınç emniyet valfinden geçip 5/2 yön kontrol valfine gelmektedir. Normalde valf üzerinden geçen hava silindiri kapalı konumda tutmaktadır. Kullanıcı valf üzerindeki butona bastığında valf konum değiştirerek havayı basınç düşürücü valf (5) üzerine göndermektedir. Valf üzerinden geçen hava silindirin içerisini doldurarak silindirin ileri çıkmasını sağlamaktadır. Silindirin ileri çıkması ile birlikte U direk üzerinde montajlı halde bulunan grafit plaka bakır boruya temas etmekte ve baskı oluşturmaktadır. Bu baskı değeri hava basıncının kullanıcı tarafında basın düşürücü valf üzerinden ayarladığı değere kadar artmasına izin verilmektedir. Bu basınç değeri anlık olarak basınç düşürücü valfin çıkışındaki manometreden okunabilmekte ve

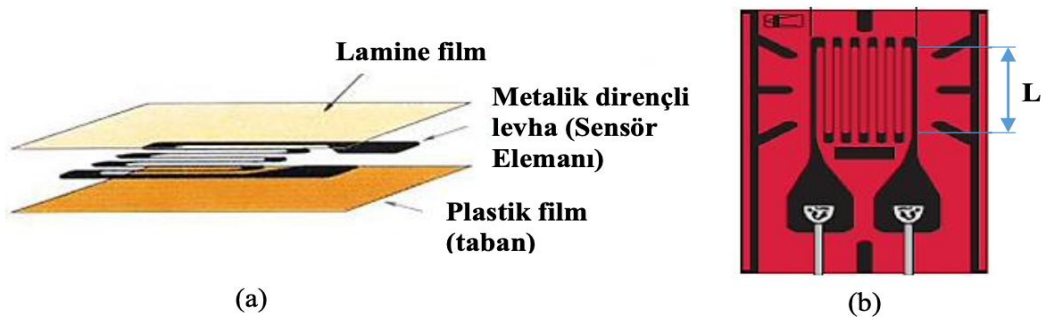
silindir içerisindeki basınç, basınç düşürücü valfin ayarlanan değerine ulaştığı anda valf kendisini kapatarak daha fazla havanın silindire gitmesini engellemektedir. Bu sayede silindir içerisinde kullanıcı tarafından ayarlanmış olan basınç değerinde hava kalmaktadır. Sistem çalıştıkça bu sabit basınç altında grafit plaka tarafından bakır boruya baskı uygulamaktadır. Silindirdeki basınç değeri düştüğünde basınç düşürücü valf açılarak sistemi hava ile beslemekte ve basıncın sürekli ayarlanan değerde kalmasını sağlamaktadır.

4.3.5. Dinamometre Tasarımı, İmalatı ve Kalibrasyonu

HRS'lerde pantograf mekanizması üzerinde yer alan akım toplayıcı grafit plakayla katener sisteminde asılı olan temas teli arasındaki etkileşim, trenin verimli bir şekilde çalışabilmesi ve görevini düzgün bir şekilde yapabilmesi açısından oldukça önemlidir. Trenin hareketi sırasında grafit plakalar belirli bir temas kuvvetiyle katener temas teline bastırılmaktadır. Çalışma sırasında temas çiftinin arasındaki etkileşim, yol güzergahı ve dış etkenler düşünüldüğünde oldukça karmaşık ve dinamik bir yapıdır. Bu nedenle temas kuvvetinin sürekli ve istenilen değer aralığında uygulanması gerekmektedir.

4.3.5.1. Gerinim Ölçerler

Elektriksel direnç gerinim ölçer veya direnç gerinim ölçer adları ile de bilinen gerinim ölçerler ince plastik bir film üzerine yerleştirilmiş ve üzeri lamine filmle kaplanmış ızgara hattı şeklinde çok ince metalik dirençli şekil değişikliği ölçme cihazı olarak ifade edilebilirler. Statikten dinamiğe birçok ölçüm uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Öztürk, 2015; 2020).



Şekil 4.21. Tipik gerinim ölçerin yapısı (Öztürk, 2015)

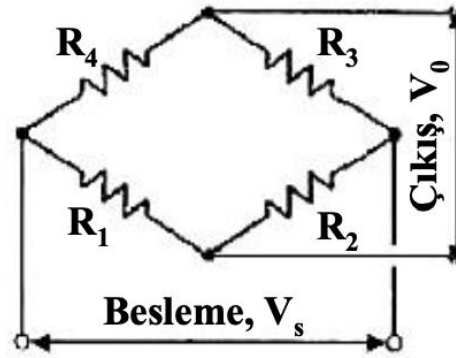
Gerinim ölçer, içerisindeki dirençte meydana gelen değişiklik vasıtasıyla gerilimi ölçer. Ölçüm yapılacak yüzeye yapıştırılan gerinim ölçer, yüzeyde veya cisimde oluşan şekil değişimini, içerisinde bulunan ve ızgara şeklinde yerleştirilmiş metalik dirençli levha hattında meydana gelen uzama veya kısalmanın sebep olduğu direnç değişimi ile ölçmektedir. Gerinim ölçer içerisindeki ızgara hattı çoğunlukla bakır-nikel alaşımlarından yapılmaktadır (Öztürk, 2015; 2020).

$$\frac{\Delta R}{R} = G \frac{\Delta L}{L} \quad (4.1)$$

$$\frac{\Delta R}{R} = G \varepsilon \quad (4.2)$$

Burada G gösterge faktörü (Gage factor), R gerinim ölçerin orijinal direnci, ΔR uzama veya kısalmadan kaynaklı direnç değişimi, L ızgara hattının orijinal boyu, ΔL kısalma veya uzama miktarı, ε şekil değiştirmedir.

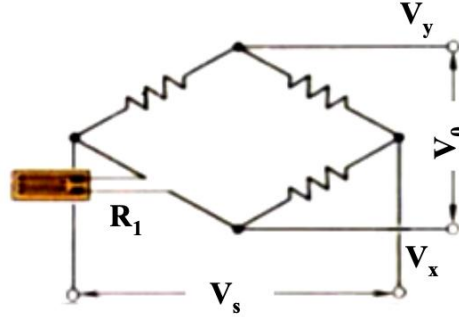
Bir gerinim ölçerde şekil değiştirmenin sebep olduğu direnç değişimi oldukça küçüktür. Direnç değişiminin oldukça küçük olması bir gerinim ölçerden ölçüm yapılmasını zorlaştırmaktadır. Ölçüm yapılabilmesi için anlık direnç değişimlerinden belirlenmesinde kullanılan ve Wheatstone köprüsü olarak adlandırılan köprü devrelerinden faydalanılmaktadır. Wheatstone köprüsünde bilinmeyen bir direnç değeri bilinen dirençler yardımı ile ölçülmektedir (Öztürk, 2015; 2020).



Şekil 4.22. Wheatstone köprüsü (Öztürk, 2015)

Wheatstone köprüsü dört dirençten meydana gelmektedir. $R_1=R_2$ ve $R_3=R_4$ olması durumunda giriş voltajı hangi değeri alırsa alsın çıkış voltajı sıfır değerini alacaktır. Böyle bir durumda köprü denge durumunda olacaktır. Dengenin bozulması durumunda ise voltaj çıkışı gerçekleşecektir. Dengenin bozulması için köprü devresinde yer alan tüm dirençlerin eşit (R) ve R_1 direncinin yerine bir gerinim ölçer

bağlanırsa; gerinim ölçer yüklendiği zaman oluşan ΔR direnç farkından dolayı V_x ve V_y voltajları artık birbirlerine eşit olmayacak ve köprü devresinden voltaj çıkış değeri (V_o) ölçüm değeri okunabilecektir (Öztürk, 2015; 2020).



Şekil 4.23. Tek gerinim ölçer bağlantılı Wheatstone köprüsü (Öztürk, 2015)

$$V_o = \frac{1}{4} \frac{\Delta R}{R} V_s \quad (4.3)$$

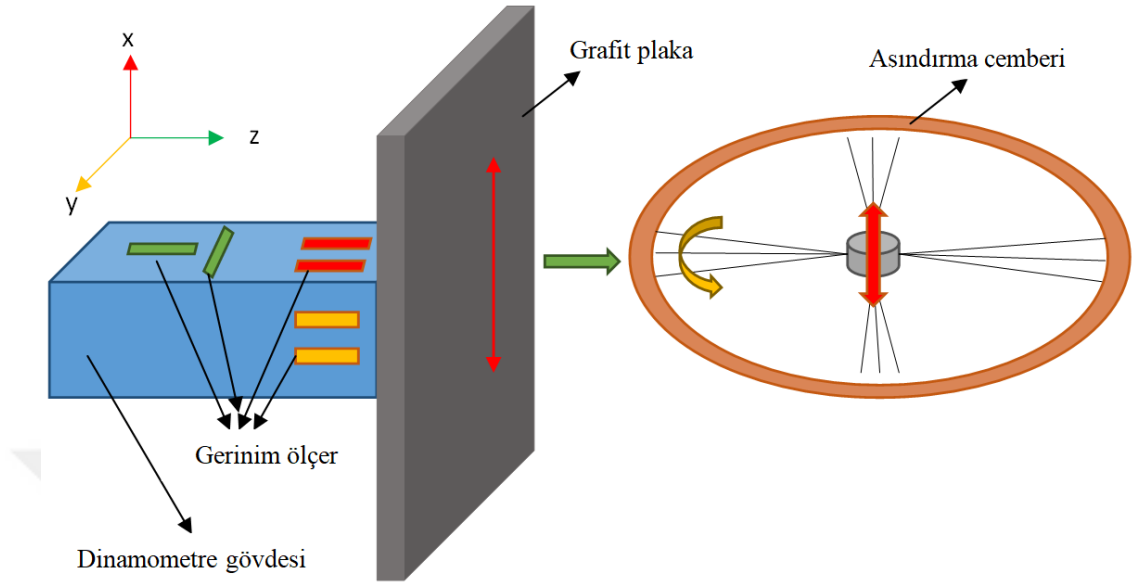
$$V_o = \frac{1}{4} G \epsilon V_s \quad (4.4)$$

Bu denklemlerde V_o çıkış voltajını, V_s giriş voltajını temsil etmektedir. Tam köprü, yarım köprü ve çeyrek köprü şeklinde üç çeşit Wheatstone köprü çeşidi bulunmaktadır.

4.3.5.2. Dinamometre Tasarımı, İmalatı ve Kalibrasyonu

Deney düzeneğinde, grafit plakaların aşındırma çemberi ile yaptığı temas sırasında 3 adet kuvvet bileşeni grafit plaka üzerinde oluşmaktadır. Elastik şekil değiştirmeye izin veren ölçülerde imal edilen dinamometre gövdesi üzerinde, yeşil renk ile gösterilen ve yerleştirilen gerinim ölçerler Z ekseninde oluşan F_t temas kuvvetini ölçebilmek için, kırmızı renk ile gösterilen ve yerleştirilen gerinim ölçerler aşındırma çemberinin silindirler vasıtası ile aşağı yukarı hareketi sırasında X ekseninde oluşan F_e eksenel kuvvetini ve sarı renk ile gösterilen ve yerleştirilen gerinim ölçerler ise aşındırma çemberinin servo motor vasıtası ile dönmesi sırasında Y ekseninde oluşacak olan F_r radyal kuvvetini belirlemek için tasarlanmıştır. Gerinim ölçerlerin dinamometre gövdesi üzerine yerleştirilmesi ve aşınma çifti arasında teması gösteren şematik görüntü Şekil 4.24'de verilmiştir. Şekil' de

gösterilen yüzeylere yerleştirilen gerinim ölçerler, dinamometre gövde yüzeylerine simetrik olarak yerleştirilmiştir.



Şekil 4.24. Gerinim ölçerlerin yerleştirilmesi ve kuvvetlerin belirlenmesi

Bu kuvvetin buna benzer dinamik çalışan sistemlerde ve literatürde teorik olarak hesaplanması halen belirsizdir. Bu sebeple, grafit plaka ve bakır telin temasının gerçek çalışma şartlarına yakın simüle edilmesi, kuvvetlerin ölçülebilmesi ancak özgün ve kalibre edilmiş bir dinamometre ile mümkün olabilir.

Dinamometre kalibrasyonu sırasında oluşan kuvvetleri doğru ölçebilmek için dönüşüm denklemleri elde edilmeli ve kullanılmalıdır. Bu amaçla, deney düzeneğine uygun kalibrasyon şekli adapte edilmiş ve deney düzeneğinin çalışması sırasında oluşacak değişim durumunu dikkate alan kalibrasyon metodu kullanılmıştır. Kalibrasyon işlemi sırasında ölçüm değerlerinin güvenilirliğini etkileyebilecek faktörler dikkate alınıp kalibrasyon işlemi yapılmıştır. Bu faktörler başlıca;

- Deney düzeneği üzerinde kalibrasyon yapılarak boyutsal ve konumlama farklılıkları minimuma indirgenmesi,
- Çalışma sırasında grafit numunelerin aynı boyutlarda kullanılması,
- Kalibrasyon sırasında üç yöndeki kuvvet bileşenleri birbirlerine diklik şartları dikkat edilerek yüklemeler yapılması,
- Kuvvetlerin çapraz etkileşiminin giderilmesi şeklinde sıralanabilir.

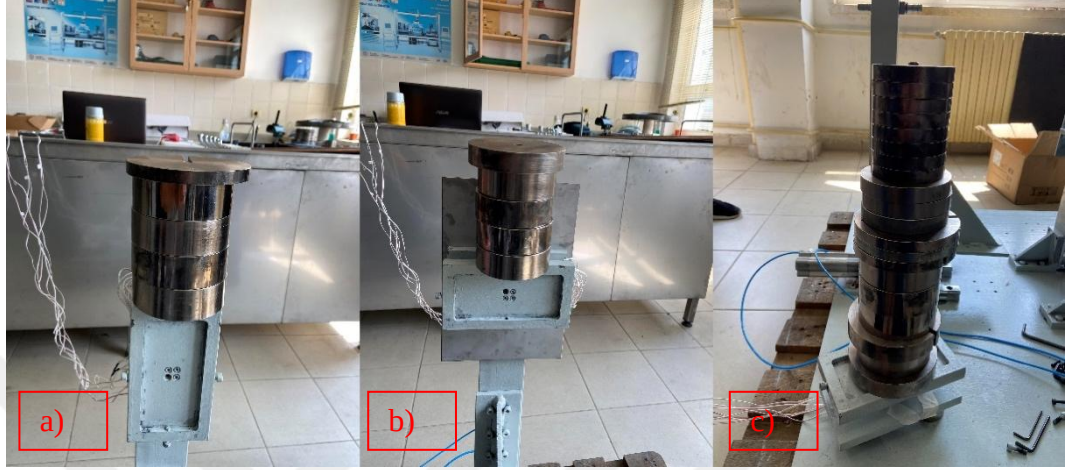
F_e , F_r ve F_t kuvvet bileşenleri için gerinim ölçer temelli üç ayrı kanal kurulmuş ve kalibrasyonları sırasında, ilgili standart ağırlıklar kuvvet bileşeninin doğrultusunda etki ettirilerek dönüşüm denklemleri oluşturulmuştur. Dinamometre, zemine paralel konumlandırılan deney düzeneğine çalışma şartlarına uygun bir şekilde montajlanmış ve kalibrasyon sırasında ağırlıklar asılarak çıkış verileri toplanmıştır. İmalatı yapılan dinamometre ve deney düzeneğine montajlanmış görüntüsü Şekil 4.25’de verilmiştir.



Şekil 4.25. Dinamometrenin deney düzeneğine montajlanmış görüntüsü

Dinamometre, zemine paralel konumlandırılmış bir şekilde deney düzeneğine çalışma şartlarına uygun montajlanmış ve kalibrasyon sırasında ağırlıklar asılarak çıkış verileri toplanmıştır. İlk aşamada, ağırlıklar asılırken F_e ve F_r kuvvet bileşenleri için dinamometre Şekil 4.26 a-b’de gösterilen konumda montajlanmış olup ağırlıklar asılmıştır. Diğer kuvvet bileşen olan F_t için, Şekil 4.26 c’deki gibi dinamometre zemine yerleştirilmiş, paralelliği sağlanıp üzerine yüklemeler yapılmış

ve elde edilen veriler kaydedilmiştir. Yüklemeler hem artan hem de azalan sırada olacak şekilde üretilen dinamometreye etki ettirilerek elde edilen gerilim değerleri kaydedilmiştir. İkinci aşamada ise tüm kuvvet bileşenlerinin çapraz etkileşimleri incelenmiştir. Kalibrasyonda bir kuvvet bileşen için kendi doğrultusunda yükleme



Şekil 4.26. Dinamometrenin kalibrasyonu sırasında yükleme/boşaltma görüntüleri

veya boşaltma yapılırken üç kuvvet bileşenin de verileri kaydedilmiş ve irdelenmiştir. Çapraz etkileşimin görüldüğü durumlarda matematiksel yaklaşım oluşturulup dönüşüm fonksiyonları ortaya koyulmuştur.

Grafit plaka üzerine etki eden kuvvet bileşenleri (F_e , F_r ve F_t) için ayrı ayrı yapılan kalibrasyon işlemleri bu kısımda ayrıntılı olarak irdelenmiştir. Üç kuvvet için aynı sistematiğe işlemler uygulanmıştır. ÖZTÜRK ve Ark. gerinim ölçer temelli kesici takımlar için ürettikleri kuvvet dinamometresinde çapraz etkileşimleri giderdikleri yenilikçi yaklaşımları ile kalibrasyon işlemlerini sistematik olarak listelemişlerdir (Öztürk, 2015).

Benzer sistematik yöntem bu çalışmada üretilen özgün dinamometrenin kalibrasyonunda uygulanmış olup işlem adımları sırayla aşağıda listelenmiştir.

1. F_e ve F_r kuvvet bileşeni için grafit plaka deney düzeneğine montajlanmış, diğer kuvvet bileşeni olan F_t için zemine yerleştirilmiş ve her kuvvet için paralellik kontrolü yapılmıştır.
2. Ağırlıklar hem yükleme hem de boşaltma durumları için kademeli olarak aparat kullanılarak asılıp ve çıkarılıp, 0,02 saniye zaman diliminde bir ölçüm verisi alınmış ve kaydedilmiştir.

3. Ölçülen gerilim değerlerinin 5 saniyelik zaman dilimleri şeklinde her bir yük için değişimleri/kararlılığı incelenmiştir.
4. Yükleme ve boşaltma verilerinin benzerlikleri istatistiksel olarak değerlendirilmiş ve kullanılacak veri seti tayin edilmiştir.
5. Seçilen veriler kodlanıp kalibrasyon işlemi sırasında oluşan çapraz etkileşimler irdelenmiştir.
6. Son olarak çapraz etkileşim oluşuyorsa matematiksel olarak giderilip dönüşüm fonksiyonları elde edilmiştir.

Kurulan dinamometre her bir kuvvet bileşenini için birer ölçüm kanalına sahiptir. Bu ölçüm kanallarının temsil ettikleri kuvvetler eksen takımlarına göre X,Y ve Z simgeleri ile kodlanmıştır. Kuvvetler, ölçüm kodları ve ölçüm frekansları Tablo 1’de ayrıntılı olarak gösterilmiştir.

Tablo 4.2. Kuvvet dinamometresi için kodlamalar

Ölçüm Kanal No	Ölçülen Kuvvet	Eksen Takımı (x,y,z)	Ölçüm Kodu	Ölçüm Frekansları
1	F_e	x	X	X1,Y1,Z1
2	F_r	y	Y	X2,Y2,Z2
3	F_t	z	Z	Z1,Z2,Z3

4.3.5.2.1. F_e Kuvvetinin Kalibrasyonu ve Ölçümlerin İstatistiksel Değerlendirilmesi

F_e kuvvetinin kalibrasyonu sırasında ağırlıklar, kuvvet dinamometresine Şekil 4.24’de verilen x,y,z referans eksen takımlarına göre kuvveti F_e doğrultusunda (+x doğrultusu) Şekil 4.26 a’ da gösterildiği gibi etki ettirilmiştir. Kalibrasyon sırasında dinamometre deney düzeneğine montaj halinde olup zemine paralel konumdadır. Ağırlıklar yüksüz durumdan (0 N) 230 Newtona kadar 10’ar Newtonluk artış ve tam tersi şeklinde 230 Newtondan yüksüz duruma 10’ar Newtonluk azalış şeklinde tesir ettirilmiştir. Ağırlıklar grafit plakanın takıldığı tablanın üzerinden nötr eksen doğrultusunda yüklenmiştir.

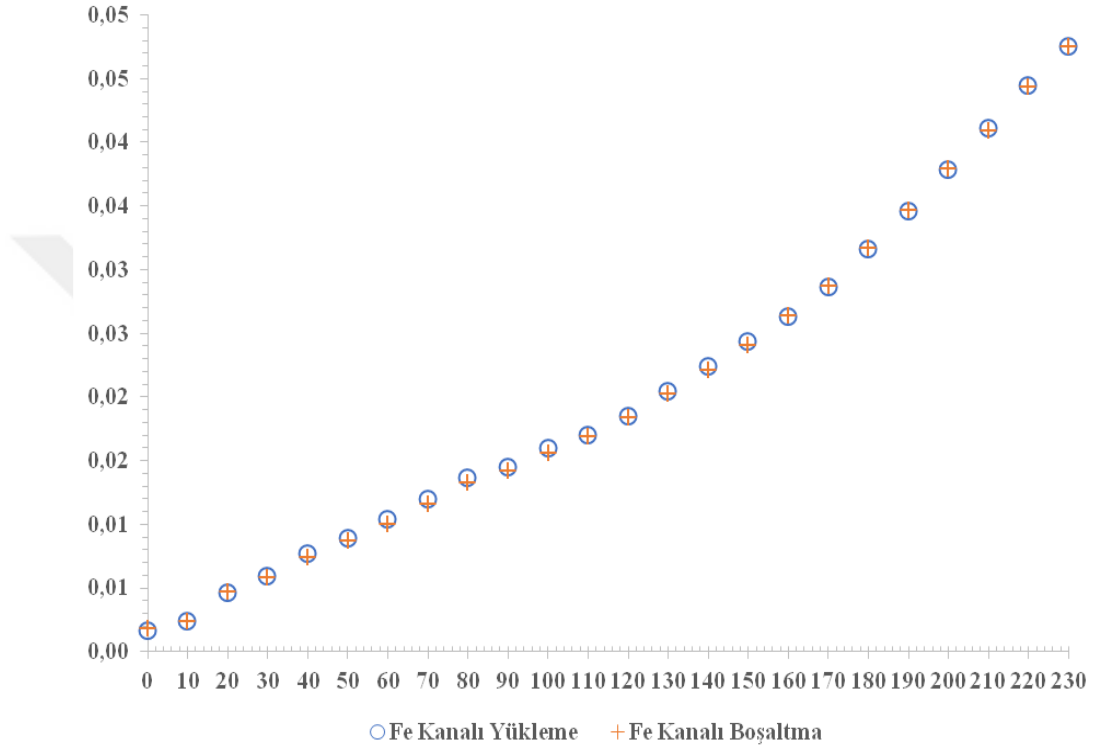
Gerilim değerleri toplamda 5 saniyelik zaman dilimlerinde 50 Hz toplama frekansında kaydedilmiştir. Öncelikle gerilim değerlerinin her bir yüklemede birbirleri ile olan etkileşimleri irdelenmiştir. Her bir yük değeri için 5 sn’lik zaman diliminde ölçülen gerilim değerlerinin çok küçük düzeyde değişimler gösterdiği

standart sapmaları ve varyasyon katsayıları hesaplanarak tespit edilmiştir. F_e kuvveti için yükleme ve boşaltma durumlarında çıkış gerilim değerleri Tablo 4.3’de verilmiştir. Ölçüm değerlerinin mV/V biriminde küçük değerler olmasından dolayı, varyasyon katsayılarına da ayrıca bakılmış ve çıkış gerilim değerlerinin aritmetik ortalamaya göre yükleme ve boşaltma durumlarında çok küçük olduğu görülmüştür. Ayrıca 5 sn’lik ölçümlerde toplanan verilerin standart sapma ve varyasyon katsayıları dikkate alındığında çıkış gerilim değerlerinin çok çok küçük olduğu tespit edilmiştir. Bu sebeple, çıkış gerilim değerlerinin değişmediği kabul edilebilir olduğu ve aritmetik ortalamalarının kalibrasyon işlemlerinde kullanılması uygun görülmüştür. Şekil 4.27’de yükleme-boşaltma sırasında F_e kuvveti için ölçülen gerilim değerlerinin farkları verilmiştir.

Tablo 4.3. F_e kuvveti için yükleme ve boşaltma durumlarında çıkış gerilim değerleri

Yük (N)	Yüklemde çıkış gerilimi ortalamaları (mV/V)	Standart sapma	Varyasyon katsayısı	Boşaltmada çıkış gerilimi ortalamaları (mV/V)	Standart sapma	Varyasyon katsayısı
0	0.00171	0.00008	4.95358	0.00190	0.00008	4.37479
10	0.00240	0.00012	5.00891	0.00243	0.00010	4.23624
20	0.00466	0.00013	2.76436	0.00474	0.00009	1.96007
30	0.00598	0.00003	0.41859	0.00584	0.00009	1.62665
40	0.00777	0.00016	2.06636	0.00743	0.00007	0.97288
50	0.00898	0.00008	0.94087	0.00872	0.00011	1.31469
60	0.01039	0.00009	0.84819	0.01004	0.00008	0.78604
70	0.01204	0.00009	0.71709	0.01167	0.00010	0.86702
80	0.01367	0.00008	0.55310	0.01333	0.00007	0.55555
90	0.01454	0.00010	0.67139	0.01421	0.00009	0.60910
100	0.01597	0.00010	0.60510	0.01569	0.00013	0.81562
110	0.01709	0.00009	0.50594	0.01691	0.00010	0.56700
120	0.01852	0.00008	0.43352	0.01844	0.00010	0.51808
130	0.02046	0.00010	0.49958	0.02026	0.00008	0.38537
140	0.02241	0.00009	0.39313	0.02220	0.00009	0.38784
150	0.02437	0.00010	0.41267	0.02414	0.00009	0.38170
160	0.02638	0.00011	0.43215	0.02647	0.00012	0.47128
170	0.02866	0.00011	0.39056	0.02880	0.00012	0.42936
180	0.03165	0.00013	0.42128	0.03171	0.00014	0.44462
190	0.03460	0.00028	0.81302	0.03477	0.00020	0.57663
200	0.03786	0.00011	0.29300	0.03802	0.00031	0.80676
210	0.04115	0.00020	0.47403	0.04101	0.00016	0.38323
220	0.04446	0.00012	0.26699	0.04441	0.00010	0.23484
230	0.04755	0.00011	0.24123	0.04755	0.00011	0.24123

Gerinim ölçer bazlı tasarlanan ve bu tip çalışmalarda kullanılan kuvvet dinamometrelerinin yükleme ve boşaltma durumlarında mümkün olduğunca az farklılık göstermesi istenmektedir. Şekil 4.27 incelendiğinde verilerin birbirleri ile çok yakın olduğu görülmektedir. Ayrıca yükleme veya boşaltma durumlarında ölçülen gerilim değerlerinin kullanım şekli ve diğer kuvvet bileşenleriyle çapraz etkileşimi istatistiksel olarak da değerlendirilmiştir.



Şekil 4.27. Yükleme ve boşaltma sırasında F_e kuvveti için ölçülen gerilim değerlerinin farkı

F_e kuvvetinin kalibrasyon işlemi sırasında tasarlanan dinamometrenin 3 ayrı kanalından da yükleme ve boşaltma durumları için veriler kaydedilmiştir. Çıkış gerilim değerlerinin normalliği incelendiğinde 3 kanaldan ölçülen değerlerin normal dağılıma uyduğu görülmüştür. Bunun üzerine yükleme ve boşaltma durumlarının birbirleri ile ilişkisi/farkı SPSS paket programı kullanılarak incelenmiştir. Yükleme ve boşaltma durumlarında dinamometreden ölçülen gerilimler, asılan ağırlığa bağımlı olması ve gerilim değerlerinin normal dağılıma uygunluk göstermesinden dolayı parametrik önemlilik testlerinden İki Eş Arasındaki Farkın Önemlilik Testi (Paired T Test) kullanılmıştır. İstatistiksel değerlendirmede H_0 hipotezi, “Yükleme ve boşaltma durumlarında ölçülen gerilmeler arasında fark yoktur.” şeklindedir. 23’er adet çıkış gerilim değerleri için istatistiksel analiz sonucunda hesaplanan p güven aralığı

değerleri ve analiz türleri Tablo 4.4’de özetlenmiştir. Güven aralığı p değerleri, yanılma düzeyinden (0.05) F_e ve F_r kanalında küçük çıkarken F_t kanalında büyük çıkmıştır. Bu yüzden H_0 hipotezi F_e ve F_r kanalları için reddedilmiş olup F_t kanalı için kabul edilmiştir.

Tablo 4.4. F_e kuvveti kalibrasyonunda yükleme-boşaltma durumları çıkış verilerinin istatistiksel değerlendirilmesi

Ölçüm Kanalı	Durum	n	Analiz Türü	p	H_0 hipotezi
F_e	Yükleme	23	Paired T Testi	0.01	p<0.05 reddedilir
	Boşaltma	23			
F_r	Yükleme	23	Paired T Testi	0.00	p<0.05 reddedilir
	Boşaltma	23			
F_t	Yükleme	23	Paired T Testi	0.451	p>0.05 kabul edilir
	Boşaltma	23			

F_e ve F_r kanallarından ölçülen çıkış gerilmeleri yükleme ve boşaltma durumları için farklı çıkmıştır. Bu nedenle, iki kanalda yükleme ve boşaltma çıkış gerilimlerinin aritmetik ortalamalarını kalibrasyon eğrilerinde kullanmak uygun olmayacaktır. Ancak F_t kanalında H_0 hipotezi kabul edildiği için yükleme ve boşaltma değerlerinin ortalamasını almak mümkündür. Ağırlık altında elastik bölgede davranış gösteren dinamometrenin kademeli yük artışlarında lineer davranış gösterdiği Şekil 4.27’de görülmektedir. Yükleme veya Boşaltma durumlarından hangi verinin kullanılacağı lineer Regresyon analizi ile R^2 değerleri incelenerek seçilmesi uygundur. R^2 değerleri F_e ve F_r kanalları için ayrı ayrı incelendiğinde yükleme ve boşaltma durumlarında eşit oldukları görülmüştür. Bu sebeple, veri seçiminde her bir asılan ağırlık için yükleme ve boşaltma gerilim değerlerinden üst sınır değeri (mutlak maksimum) seçilerek Tablo 4.5 oluşturulmuştur. Ayrıca, üç kuvvet bileşeni aynı anda ölçülebildiği için birbirleri ile çapraz duyarlılıkları hesaplanmıştır. Burada seçilen veri setleri X1, Y1 ve Z1 şeklinde sırasıyla F_e , F_r ve F_t kuvvetleri için kodlanmıştır.

Tablo 4.5. Yükleme ve boşaltma durumları için lineer regresyon analiz ve R^2 değerleri

Ölçüm Kanalı	Durum	n	Analiz Türü	R^2
F_e	Yükleme	23	Lineer	0.97
	Boşaltma		Regresyon	0.97
F_r	Yükleme	23	Lineer	0.99
	Boşaltma		Regresyon	0.99

Tablo 4.6. F_e kuvvet kanalının kalibrasyonu için seçilen gerilim verileri ve çapraz duyarlılıkları

Yük (N)	F_e kanalı			F_r kanalı			F_t kanalı			F_e-F_r çapraz duyarlılık (%)	F_e-F_t çapraz duyarlılık (%)
	Yüklemeye (mv/V)	Boşaltma (mv/V)	X1 (mv/V)	Yüklemeye (mv/V)	Boşaltma (mv/V)	Y1 (mv/V)	Yüklemeye (mv/V)	Boşaltma (mv/V)	Z1 (mv/V)		
0	0.00171	0.00190	0.00190	0.00043	0.00105	0.00105	0.00020	0.00024	0.00022	54.99	11.53
10	0.00240	0.00243	0.00243	0.00053	0.00140	0.00140	0.00025	0.00034	0.00029	57.66	12.12
20	0.00466	0.00474	0.00474	0.00105	0.00175	0.00175	0.00063	0.00048	0.00055	37.03	11.70
30	0.00598	0.00584	0.00598	0.00135	0.00222	0.00222	0.00071	0.00051	0.00061	37.13	10.16
40	0.00777	0.00743	0.00777	0.00174	0.00244	0.00244	0.00088	0.00073	0.00080	31.45	10.33
50	0.00898	0.00872	0.00898	0.00192	0.00292	0.00292	0.00096	0.00094	0.00095	32.52	10.58
60	0.01039	0.01004	0.01039	0.00228	0.00314	0.00314	0.00094	0.00099	0.00097	30.22	9.29
70	0.01204	0.01167	0.01204	0.00275	0.00367	0.00367	0.00109	0.00116	0.00112	30.51	9.33
80	0.01367	0.01333	0.01367	0.00310	0.00389	0.00389	0.00131	0.00118	0.00125	28.45	9.13
90	0.01454	0.01421	0.01454	0.00365	0.00436	0.00436	0.00150	0.00133	0.00142	30.01	9.73
100	0.01597	0.01569	0.01597	0.00398	0.00465	0.00465	0.00156	0.00169	0.00162	29.09	10.17
110	0.01709	0.01691	0.01709	0.00427	0.00507	0.00507	0.00169	0.00185	0.00177	29.66	10.36
120	0.01852	0.01844	0.01852	0.00474	0.00545	0.00545	0.00187	0.00181	0.00184	29.41	9.93
130	0.02046	0.02026	0.02046	0.00511	0.00561	0.00561	0.00196	0.00195	0.00195	27.45	9.56
140	0.02241	0.02220	0.02241	0.00545	0.00602	0.00602	0.00196	0.00195	0.00196	26.89	8.74
150	0.02437	0.02414	0.02437	0.00587	0.00634	0.00634	0.00228	0.00237	0.00233	26.04	9.55
160	0.02638	0.02647	0.02647	0.00633	0.00694	0.00694	0.00257	0.00275	0.00266	26.21	10.04
170	0.02866	0.02880	0.02880	0.00679	0.00724	0.00724	0.00288	0.00284	0.00286	25.13	9.93
180	0.03165	0.03171	0.03171	0.00735	0.00781	0.00781	0.00284	0.00319	0.00301	24.64	9.50
190	0.03460	0.03477	0.03477	0.00808	0.00832	0.00832	0.00326	0.00340	0.00333	23.92	9.57
200	0.03786	0.03802	0.03802	0.00849	0.00893	0.00893	0.00356	0.00360	0.00358	23.49	9.41
210	0.04115	0.04101	0.04115	0.00926	0.00936	0.00936	0.00397	0.00403	0.00400	22.76	9.72
220	0.04446	0.04441	0.04446	0.00985	0.00998	0.00998	0.00421	0.00423	0.00422	22.45	9.49
230	0.04755	0.04755	0.04755	0.01052	0.01052	0.01052	0.00437	0.00437	0.00437	22.13	9.18

4.3.5.2.2. F_r Kuvvetinin Kalibrasyonu ve Ölçümlerin İstatistiksel Değerlendirilmesi

F_r kuvvetinin kalibrasyonu sırasında yükler, kuvvet dinamometresine Şekil 4.24’de verilen x,y,z referans eksen takımlarına göre F_r kuvveti doğrultusunda (+y doğrultusu) Şekil 4.26 b’de gösterildiği gibi bir aparat yardımıyla etki ettirilmiştir. Kalibrasyon işlemi sırasında dinamometre düzeneğe montaj halinde olup zemine paralel konumdadır. Ağırlıklar F_e kalibrasyon metoduyla aynı şekilde, yüksüz durumdan (0 N) 230 Newtona kadar 10’ar Newtonluk artış ve tam tersi şeklinde 230 Newtondan yüksüz duruma 10’ar Newtonluk azalış şeklinde tesir ettirilmiştir. Ağırlıklar grafit plakanın takıldığı tablanın üzerinden nötr eksen doğrultusunda yüklenmiştir.

F_e kuvvetinin kalibrasyon metodundaki gibi lineer artan ve azalan yükler için gerilim değerleri toplamda 5’er sn’ lik zaman dilimlerinde 50 Hz toplama frekansında alınmış ve kaydedilmiştir. Gerilim değerlerinin her bir yüklemede birbirleri ile olan etkileşimleri irdelenip her bir yük değeri için çok küçük düzeyde değişimler gösterdiği, standart sapmaları ve varyasyon katsayıları hesaplanarak tespit edilmiştir. F_r kuvveti için yükleme ve boşaltma durumlarında çıkış gerilim değerleri Tablo 4.7’ de verilmiştir. Ölçüm değerlerinin mV/V birimi cinsinden küçük değerler olmasından dolayı varyasyon katsayılarına da bakılmıştır. Yüksüz durumda ölçüm değeri sıfıra çok yakın olduğundan varyasyon katsayısı çok yüksek çıkmıştır. Diğer verilerde yüksek varyasyon katsayısı söz konusu olmayıp, verilerin kullanılmasında bir sorun görülmemiştir. 5 saniyelik ölçümlerde toplanan verilerin standart sapma ve varyasyon katsayıları dikkate alındığında çıkış gerilim değerlerinin çok çok küçük olduğu görülmüştür. Bu sebeple, çıkış gerilim değerlerinin değişmediği, kabul edilebilir olduğu ve aritmetik ortalamalarının kalibrasyon işlemlerinde kullanılması uygun görülmüştür. Şekil 4.28’de yükleme-boşaltma durumları için ölçümlerin farkları verilmiştir.

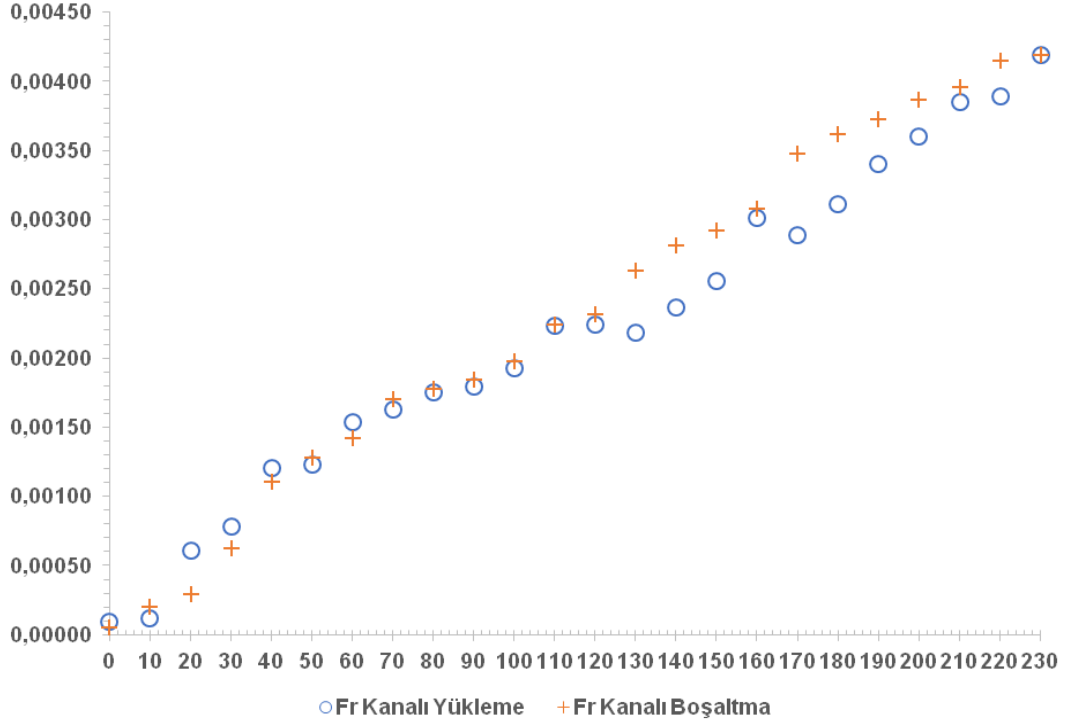
Gerilim ölçer bazlı tasarlanan kuvvet dinamometrelerinin yükleme ve boşaltma durumlarında mümkün olduğunca az farklılık göstermesi istenmektedir. Şekil 4.28 incelendiğinde verilerin birbirleri ile benzer şekilde olduğu görülmektedir. Yükleme veya boşaltma durumlarında ölçülen gerilim değerlerinin kullanım şekli ve diğer kuvvet bileşenleriyle çapraz etkileşimi istatistiksel olarak değerlendirilmiş ve veri seçimi yapılmıştır.

Tablo 4.7. F_r kuvveti için yükleme ve boşaltma durumlarında çıkış gerilim değerleri

Yük (N)	Yüklemeye çıkış gerilimi ortalamaları (mV/V)	Standart sapma	Varyasyon katsayısı	Boşaltmada çıkış gerilimi ortalamaları (mV/V)	Standart sapma	Varyasyon katsayısı
0	0.00009	0.00007	75.72140	0.00006	0.00005	89.69602
10	0.00012	0.00001	7.90197	0.00021	0.00003	15.04066
20	0.00061	0.00005	8.82245	0.00029	0.00004	14.98112
30	0.00078	0.00008	10.20478	0.00063	0.00005	8.57982
40	0.00120	0.00010	8.49651	0.00111	0.00010	9.20288
50	0.00123	0.00007	5.75792	0.00128	0.00007	5.59157
60	0.00154	0.00007	4.70213	0.00142	0.00011	7.44516
70	0.00163	0.00009	5.41747	0.00171	0.00011	6.33161
80	0.00176	0.00005	3.00754	0.00178	0.00008	4.38455
90	0.00180	0.00009	4.84204	0.00184	0.00010	5.39020
100	0.00193	0.00005	2.80346	0.00198	0.00010	4.85554
110	0.00223	0.00009	4.17022	0.00225	0.00012	5.49255
120	0.00225	0.00008	3.46178	0.00232	0.00007	3.03586
130	0.00218	0.00009	3.92587	0.00264	0.00008	2.97778
140	0.00237	0.00006	2.59424	0.00281	0.00008	2.81728
150	0.00256	0.00006	2.50890	0.00292	0.00006	1.90216
160	0.00301	0.00007	2.32923	0.00308	0.00008	2.68007
170	0.00289	0.00007	2.40517	0.00348	0.00005	1.57726
180	0.00311	0.00008	2.59691	0.00362	0.00006	1.59556
190	0.00341	0.00006	1.78911	0.00373	0.00008	2.12429
200	0.00360	0.00006	1.53685	0.00387	0.00005	1.38940
210	0.00385	0.00010	2.51142	0.00396	0.00007	1.68924
220	0.00390	0.00008	2.16500	0.00415	0.00007	1.79047
230	0.00419	0.00006	1.53234	0.00419	0.00006	1.53234

F_r Kalibrasyon işlemi sırasında üç ölçüm kanalı da aynı anda çalıştırılmıştır. Çıkış gerilimler değerlerinin normalliği incelendiğinde 3 kanaldan ölçülen değerlerin normal dağılıma uyduğu görülmüştür. F_e ölçüm kanalında boşaltma verileri normal dağılıma uygunluk göstermezken diğer gerilim ölçümlerinin hepsi normal dağılmıştır. Yükleme ve boşaltma durumlarında dinamometreden ölçülen gerilimler asılan ağırlığa bağımlı olup F_r ve F_t kanallarından ölçülen gerilim değerlerinin normal dağılıma uygunluk göstermesinden dolayı parametrik önemlilik testlerinden İki Eş Arasındaki Farkın Önemlilik Testi (Paired T Test) kullanılmıştır. Normal dağılıma uygunluk göstermeyen A1 çıkış gerilim değerleri için parametrik olmayan önemlilik testlerinden Wilcoxon Eşleştirilmiş İki Örnek Testinin

kullanılması yerindedir. İki test için de istatistiksel değerlendirmede H_0 hipotezi, “Yükleme ve boşaltma durumunda ölçülen gerilmeler arasında fark yoktur.” şeklindedir. 23’er adet çıkış gerilim değerleri için istatistiksel analiz sonucunda hesaplanan p güven aralığı değerleri ve analiz türleri Tablo 4.8’de özetlenmiştir. Güven aralığı p değerleri, yanılma düzeyinden (0,05) üç ölçüm kanalı içinde küçük çıkmıştır. Bu yüzden H_0 hipotezi reddedilmiştir.



Şekil 4.28. Yüklem ve Boşaltma sırasında F_r kuvveti için ölçülen gerilim değerlerinin farkı

Tablo 4.8. F_r kuvveti kalibrasyonunda yüklem-boşaltma durumları çıkış verilerinin istatistiksel değerlendirilmesi

Ölçüm Kanalı	Durum	n	Analiz Türü	p	H_0 hipotezi
F_e	Yüklem	23	Wilcoxon Testi	0.01	p<0.05 reddedilir
	Boşaltma	23			
F_r	Yüklem	23	Paired T Testi	0.00	p<0.05 reddedilir
	Boşaltma	23			
F_t	Yüklem	23	Paired T Testi	0.00	p<0.05 reddedilir
	Boşaltma	23			

Üç ayrı kanaldan ölçülen çıkış gerilmeleri yüklem ve boşaltma durumları için birbirlerinden farklı çıkmıştır. Bu nedenle, aritmetik ortalamalarını kalibrasyon eğrilerinde kullanmak uygun olmayacaktır. Şekil 4.28’de yüklem ve boşaltma

durumlarında F_r kanalının davranışı görülmektedir. Yükleme veya Boşaltma durumlarından hangi verinin kullanılacağı lineer Regresyon analizi ile R^2 değerleri incelenerek seçilmesi uygundur. R^2 değerleri F_r kanalı için incelendiğinde yükleme ve boşaltma durumlarında neredeyse aynı oldukları görülmüştür. Bu sebeple, veri seçiminde her bir asılan ağırlık için yükleme ve boşaltma gerilim değerlerinden üst sınır değeri (mutlak maksimum) seçilmesi, diğer iki kanal için ise R^2 değerinin büyük olduğu durumun seçilmesi uygundur (Tablo 4.9). Ayrıca, üç kuvvet bileşeni aynı anda ölçülebildiği için birbirleri ile çapraz duyarlılıkları hesaplanmıştır (Tablo 4.10). Burada seçilen veri setleri X2, Y2 ve Z2 şeklinde sırasıyla F_e , F_r ve F_t kuvvetleri için kodlanmıştır.

Tablo 4.9. Yükleme ve boşaltma durumları için lineer regresyon analiz ve R^2 değerleri

Ölçüm Kanalı	Durum	n	Analiz Türü	R^2
F_e	Yükleme	23	Lineer Regresyon	0.54
	Boşaltma			0.82
F_r	Yükleme	23	Lineer Regresyon	0.98
	Boşaltma			0.99
F_t	Yükleme	23	Lineer Regresyon	0.59
	Boşaltma			0.17

Tablo 4.10. F_r kuvvet kanalının kalibrasyonu için seçilen gerilim verileri ve çapraz duyarlılıkları

Yük (N)	F_r kanalı			F_e kanalı			F_t kanalı			$F_e - F_r$ çapraz duyarlılık (%)	$F_e - F_t$ çapraz duyarlılık (%)
	Yüklemeye (mv/V)	Boşaltma (mv/V)	Y2 (mv/V)	Yüklemeye (mv/V)	Boşaltma (mv/V)	X2 (mv/V)	Yüklemeye (mv/V)	Boşaltma (mv/V)	Z2 (mv/V)		
0	0.00009	0.00006	0.00009	0.00000	0.00004	0.00004	0.00004	0.00010	0.00004	43.82	46.20
10	0.00012	0.00021	0.00021	-0.00002	0.00002	0.00002	0.00002	0.00008	0.00002	9.79	9.78
20	0.00061	0.00029	0.00061	-0.00004	0.00003	0.00003	0.00005	0.00008	0.00005	4.33	7.98
30	0.00078	0.00063	0.00078	-0.00005	0.00002	0.00002	0.00004	0.00007	0.00004	2.06	4.65
40	0.00120	0.00111	0.00120	-0.00005	-0.00003	-0.00003	0.00000	0.00005	0.00000	-2.32	-0.41
50	0.00123	0.00128	0.00128	-0.00007	-0.00004	-0.00004	0.00002	0.00002	0.00002	-2.77	1.26
60	0.00154	0.00142	0.00154	-0.00007	-0.00004	-0.00004	0.00001	0.00002	0.00001	-2.60	0.58
70	0.00163	0.00171	0.00171	-0.00007	-0.00005	-0.00005	0.00002	0.00003	0.00002	-2.68	0.93
80	0.00176	0.00178	0.00178	-0.00006	-0.00007	-0.00007	0.00002	0.00003	0.00002	-3.66	0.98
90	0.00180	0.00184	0.00184	-0.00007	-0.00005	-0.00005	0.00002	0.00004	0.00002	-2.94	1.26
100	0.00193	0.00198	0.00198	-0.00009	-0.00007	-0.00007	0.00002	0.00004	0.00002	-3.30	1.10
110	0.00223	0.00225	0.00225	-0.00008	-0.00008	-0.00008	0.00003	0.00004	0.00003	-3.71	1.15
120	0.00225	0.00232	0.00232	-0.00009	-0.00010	-0.00010	0.00003	0.00005	0.00003	-4.36	1.14
130	0.00218	0.00264	0.00264	-0.00011	-0.00009	-0.00009	0.00003	0.00005	0.00003	-3.24	1.30
140	0.00237	0.00281	0.00281	-0.00009	-0.00010	-0.00010	0.00004	0.00006	0.00004	-3.64	1.38
150	0.00256	0.00292	0.00292	-0.00010	-0.00009	-0.00009	0.00004	0.00006	0.00004	-3.14	1.50
160	0.00301	0.00308	0.00308	-0.00010	-0.00009	-0.00009	0.00005	0.00007	0.00005	-3.02	1.66
170	0.00289	0.00348	0.00348	0.00000	-0.00011	-0.00011	0.00006	0.00007	0.00006	-3.29	1.71
180	0.00311	0.00362	0.00362	-0.00012	-0.00011	-0.00011	0.00006	0.00008	0.00006	-3.11	1.75
190	0.00341	0.00373	0.00373	-0.00010	-0.00010	-0.00010	0.00007	0.00009	0.00007	-2.61	1.87
200	0.00360	0.00387	0.00387	-0.00010	-0.00012	-0.00012	0.00008	0.00009	0.00008	-3.23	1.96
210	0.00385	0.00396	0.00396	-0.00013	-0.00011	-0.00011	0.00008	0.00009	0.00008	-2.80	2.01
220	0.00390	0.00415	0.00415	-0.00013	-0.00010	-0.00010	0.00009	0.00010	0.00009	-2.43	2.12
230	0.00419	0.00419	0.00419	-0.00011	-0.00011	-0.00011	0.00009	0.00009	0.00009	-2.65	2.23

4.3.5.2.3. F_t Kuvvetinin Kalibrasyonu ve Ölçümlerin İstatistiksel Değerlendirilmesi

F_t kuvvetinin kalibrasyonu sırasında yükler, kuvvet dinamometresine Şekil 4.24’de verilen x,y,z referans eksen takımlarına göre F_t kuvveti doğrultusunda (+z doğrultusu) Şekil 4.26 c’ de gösterildiği gibi etki ettirilmiştir. Kalibrasyon sırasında grafit tutucu alt plaka U direktten sökülmüş olup dinamometre zemine paralel şekilde yerleştirilmiş ve üzerine ağırlıklar konulmuştur. Ağırlıklar, dinamometrenin diğer iki kanalının kalibrasyon metoduyla aynı şekilde, yüksüz durumdan (0 N) 230 Newtona kadar 10’ar Newtonluk artış ve tam tersi şeklinde yani 230 Newtondan yüksüz duruma 10’ ar Newtonluk azalış şeklinde tesir ettirilmiştir. Ağırlıklar grafit tutucu plakanın üzerinden nötr eksen doğrultusunda yüklenmiştir.

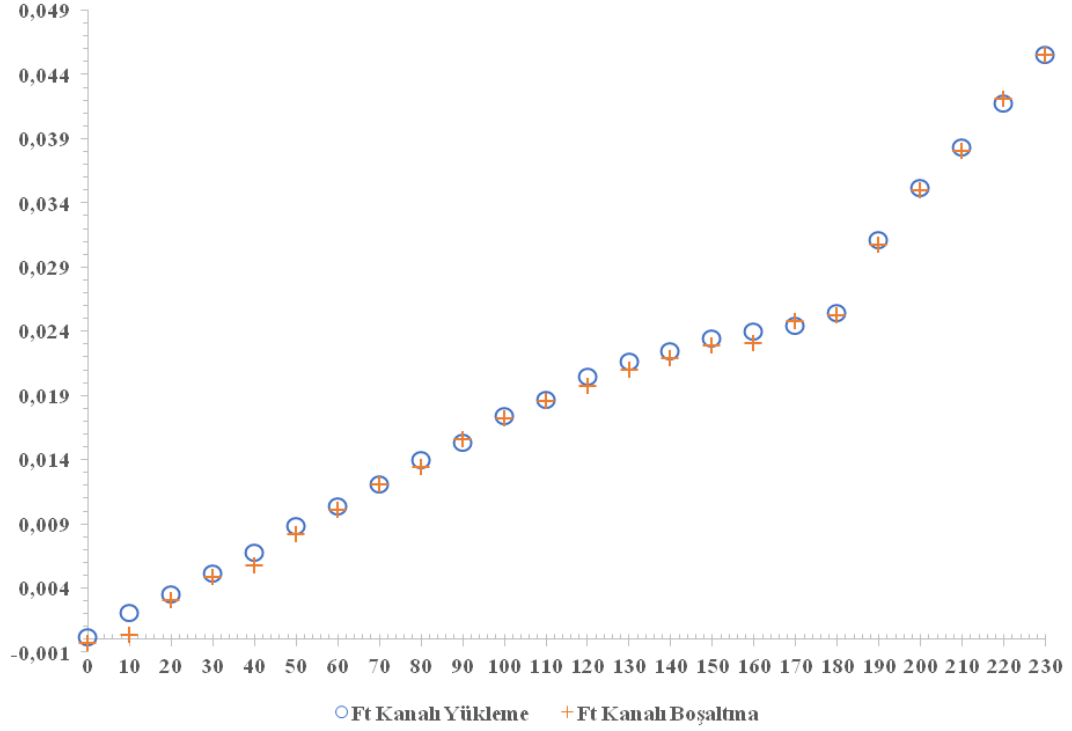
F_t kuvvetinin kalibrasyonu sırasında lineer artan ve azalan yükler için gerilim değerleri toplamda 5’er saniyelik zaman dilimlerinde, 50 Hz toplama frekansında alınmış ve kaydedilmiştir. Gerilim değerlerinin her bir yüklemede birbirleri ile olan etkileşimleri incelenip her bir yük değeri için çok küçük düzeyde değişimler gösterdiği standart sapmaları ve varyasyon katsayıları hesaplanarak tespit edilmiştir (Tablo 4.11). Ölçüm değerlerinin mV/V biriminde küçük değerler olmasından dolayı, varyasyon katsayılarına da bakılmıştır. Yüksüz durumda ölçüm değeri sıfıra çok yakın olduğundan varyasyon katsayısı yüksek çıkmıştır. Diğer verilerde yüksek varyasyon katsayısı söz konusu olmayıp, verilerin kullanılmasında sorun yoktur. 5 sn’lik ölçümlerde toplanan verilerin standart sapma ve varyasyon katsayıları dikkate alındığında çıkış gerilim değerlerinin çok çok küçük olduğu görülmüştür. Bu sebeple, çıkış gerilim değerlerinin değişmediği kabul edilebilir ve aritmetik ortalamalarının kalibrasyon işlemlerinde kullanılması uygun görülmüştür. Şekil 4.29’da yükleme-boşaltma durumları için ölçümlerin farkları verilmiştir.

Gerilim ölçer bazlı tasarlanan kuvvet dinamometrelerinin yükleme ve boşaltma durumlarında mümkün olduğunca az farklılık göstermesi istenmektedir. Şekil 4.29 incelendiğinde verilerin birbirleri ile benzer şekilde doğrusala yakın dağıldığı görülmektedir. Ayrıca yükleme veya boşaltma durumlarında ölçülen gerilim değerlerinin kullanım şekli ve diğer kuvvet bileşenleriyle çapraz etkileşimi istatistiksel olarak değerlendirilmiş ve veri seçimi yapılmıştır.

Tablo 4.11. F_t kuvveti için yükleme ve boşaltma durumlarında çıkış gerilim değerleri

Yük (N)	Yüklemede çıkış gerilimi ortalamaları (mV/V)	Standart sapma	Varyasyon katsayısı	Boşaltmada çıkış gerilimi ortalamaları (mV/V)	Standart sapma	Varyasyon katsayısı
0	0.00020	0.00015	75.28750	-0.00026	0.00010	-39.84099
10	0.00212	0.00010	4.59002	0.00038	0.00014	37.31169
20	0.00359	0.00008	2.23507	0.00312	0.00010	3.21380
30	0.00518	0.00010	1.99692	0.00493	0.00010	2.11605
40	0.00679	0.00011	1.66363	0.00578	0.00103	17.76470
50	0.00887	0.00010	1.18288	0.00827	0.00010	1.25824
60	0.01039	0.00009	0.84923	0.01014	0.00008	0.83117
70	0.01215	0.00009	0.76980	0.01207	0.00012	0.97128
80	0.01401	0.00011	0.81733	0.01346	0.00087	6.49307
90	0.01532	0.00011	0.74375	0.01560	0.00010	0.62082
100	0.01740	0.00008	0.47409	0.01721	0.00016	0.91811
110	0.01871	0.00008	0.41195	0.01861	0.00010	0.51659
120	0.02050	0.00015	0.71895	0.01973	0.00011	0.57363
130	0.02167	0.00012	0.57561	0.02101	0.00052	2.48889
140	0.02249	0.00009	0.39680	0.02192	0.00009	0.43085
150	0.02346	0.00010	0.43784	0.02292	0.00037	1.60783
160	0.02397	0.00011	0.45789	0.02308	0.00199	8.63193
170	0.02451	0.00012	0.49901	0.02481	0.00080	3.23260
180	0.02545	0.00012	0.47112	0.02529	0.00012	0.46919
190	0.03118	0.00015	0.47908	0.03080	0.00010	0.33699
200	0.03515	0.00033	0.93513	0.03498	0.00008	0.22666
210	0.03833	0.00024	0.63023	0.03810	0.00013	0.34384
220	0.04175	0.00016	0.37959	0.04210	0.00017	0.40953
230	0.04560	0.00013	0.27956	0.04560	0.00013	0.27956

F_t kalibrasyon işlemi sırasında üç ölçüm kanalı da aynı anda çalıştırılmış ölçülen çıkış gerilimlerinin normalliği incelenmiştir. F_t kanalı yükleme ve boşaltma durumları için normal dağılıma uygunluk gösterirken, F_r kanalı verileri normal dağılmamıştır. F_e ölçüm kanalında yükleme verileri normal dağılıma uygunluk göstermezken, boşaltma normal dağılım göstermiştir. Yükleme ve boşaltma durumlarında dinamometreden ölçülen gerilimler asılan ağırlığa bağımlı olup F_t kanalından ölçülen gerilim değerleri için normal dağılıma uygunluk göstermesinden dolayı parametrik önemlilik testlerinden İki Eş Arasındaki Farkın Önemlilik Testi (Paired T Test) uygundur.



Şekil 4.29. Yükleme ve Boşaltma sırasında F_t kuvveti için ölçülen gerilim değerlerinin farkı

Normal dağılıma uygunluk göstermeyen F_e ve F_r kanalları çıkış gerilim değerleri için parametrik olmayan önemlilik testlerinden Wilcoxon Eşleştirilmiş İki Örnek Testinin kullanılmalıdır. İki test için de istatistiksel değerlendirmede H_0 hipotezi, “Yükleme ve boşaltma durumunda ölçülen gerilmeler arasında fark yoktur.” şeklindedir. 23’er adet çıkış gerilim değerleri için istatistiksel analiz sonucunda hesaplanan p güven aralığı değerleri ve analiz türleri Tablo 4.12’de özetlenmiştir. Güven aralığı p değerleri, yanılma düzeyinden (0,05) üç ölçüm kanalı içinde küçük çıkmıştır. Bu yüzden H_0 hipotezi reddedilmiştir.

Tablo 4.12. F_t kuvveti kalibrasyonunda yükleme-boşaltma durumları çıkış verilerinin istatistiksel

Ölçüm Kanalı	Durum	n	Analiz Türü	p	H_0 hipotezi
F_e	Yükleme	23	Wilcoxon Testi	0.00	p<0.05 reddedilir
	Boşaltma	23			
F_r	Yükleme	23	Wilcoxon Testi	0.00	p<0.05 reddedilir
	Boşaltma	23			
F_t	Yükleme	23	Paired T Testi	0.00	p<0.05 reddedilir
	Boşaltma	23			

Üç kanaldan ölçülen çıkış gerilmeleri yükleme ve boşaltma durumları için birbirlerinden farklı çıkmıştır. Bu nedenle, aritmetik ortalamalarını kalibrasyon eğrilerinde kullanmak uygun olmayacaktır. Şekil 4.29’da yükleme ve boşaltma durumlarında F_t kanalının davranışı görülmektedir. Yükleme veya Boşaltma durumlarından hangi verinin kullanılacağı lineer Regresyon analizi ile R^2 değerleri incelenerek seçilmesi uygundur. R^2 değerleri F_t kanalı için incelendiğinde yükleme ve boşaltma durumlarında aynı oldukları görülmüştür. Bu sebeple, veri seçiminde her bir asılan ağırlık için yükleme ve boşaltma gerilim değerlerinden üst sınır değeri (mutlak maksimum) seçilmesi, diğer iki kanal için ise R^2 değerinin büyük olduğu durumun seçilmesi uygundur (Tablo 4.13). Ayrıca, üç kuvvet bileşeni aynı anda ölçülebildiği için birbirleri ile çapraz duyarlılıkları hesaplanmıştır. Burada seçilen veri setleri X3, Y3 ve Z3 şeklinde sırasıyla F_e , F_r ve F_t kuvvetleri için kodlanmıştır (Tablo 4.14).

Tablo 4.13. Yükleme ve boşaltma durumları için lineer regresyon analiz ve R^2 değerleri

Ölçüm Kanalı	Durum	n	Analiz Türü	R^2
F_e	Yükleme	23	Lineer Regresyon	0.61
	Boşaltma			0.17
F_r	Yükleme	23	Lineer Regresyon	0.78
	Boşaltma			0.76
F_t	Yükleme	23	Lineer Regresyon	0.96
	Boşaltma			0.96

Tablo 4.14. F_t kuvvet kanalının kalibrasyonu için seçilen gerilim verileri ve çapraz duyarlılıkları

Yük (N)	F_t kanalı			F_r kanalı			F_e kanalı			$F_r - F_e$ çapraz duyarlılık (%)	$F_r - F_t$ çapraz duyarlılık (%)
	Yüklemeye (mv/V)	Boşaltma (mv/V)	Z3 (mv/V)	Yüklemeye (mv/V)	Boşaltma (mv/V)	X3 (mv/V)	Yüklemeye (mv/V)	Boşaltma (mv/V)	Y3 (mv/V)		
0	0.00020	-0.00026	0.00026	0.00003	-0.00027	0.00003	-0.00019	-0.00138	-0.00019	9.81	-74.66
10	0.00212	0.00038	0.00212	0.00011	-0.00018	0.00011	-0.00017	-0.00140	-0.00017	5.33	-8.14
20	0.00359	0.00312	0.00359	0.00007	-0.00014	0.00007	-0.00010	-0.00133	-0.00010	1.84	-2.76
30	0.00518	0.00493	0.00518	0.00016	-0.00006	0.00016	0.00011	-0.00144	0.00011	3.01	2.05
40	0.00679	0.00578	0.00679	0.00027	0.00013	0.00027	-0.00011	-0.00135	-0.00011	3.96	-1.66
50	0.00887	0.00827	0.00887	0.00035	0.00031	0.00035	0.00011	-0.00131	0.00011	3.96	1.19
60	0.01039	0.01014	0.01039	0.00047	0.00045	0.00047	0.00013	-0.00135	0.00013	4.56	1.29
70	0.01215	0.01207	0.01215	0.00071	0.00025	0.00071	0.00012	-0.00128	0.00012	5.86	0.98
80	0.01401	0.01346	0.01401	0.00056	0.00036	0.00056	0.00015	-0.00122	0.00015	4.02	1.10
90	0.01532	0.01560	0.01560	0.00070	0.00057	0.00070	0.00030	-0.00117	0.00030	4.49	1.90
100	0.01740	0.01721	0.01740	0.00072	0.00051	0.00072	0.00027	-0.00103	0.00027	4.15	1.53
110	0.01871	0.01861	0.01871	0.00065	0.00053	0.00065	0.00022	-0.00110	0.00022	3.47	1.16
120	0.02050	0.01973	0.02050	0.00071	0.00050	0.00071	0.00032	-0.00094	0.00032	3.45	1.56
130	0.02167	0.02101	0.02167	0.00079	0.00046	0.00079	0.00053	-0.00090	0.00053	3.66	2.43
140	0.02249	0.02192	0.02249	0.00075	0.00042	0.00075	0.00045	-0.00087	0.00045	3.33	2.00
150	0.02346	0.02292	0.02346	0.00077	0.00039	0.00077	0.00034	-0.00078	0.00034	3.27	1.46
160	0.02397	0.02308	0.02397	0.00075	0.00010	0.00075	0.00034	-0.00080	0.00034	3.11	1.41
170	0.02451	0.02481	0.02481	0.00073	0.00083	0.00073	0.00044	0.00048	0.00044	2.92	1.76
180	0.02545	0.02529	0.02545	0.00070	0.00063	0.00070	0.00064	0.00061	0.00064	2.75	2.53
190	0.03118	0.03080	0.03118	0.00081	0.00000	0.00081	0.00053	0.00003	0.00053	2.60	1.70
200	0.03515	0.03498	0.03515	0.00071	0.00000	0.00071	0.00106	0.00026	0.00106	2.02	3.02
210	0.03833	0.03810	0.03833	0.00069	-0.00002	0.00069	0.00133	0.00060	0.00133	1.79	3.47
220	0.04175	0.04210	0.04210	0.00076	0.00045	0.00076	0.00148	0.00134	0.00148	1.81	3.51
230	0.04560	0.04560	0.04560	0.00054	0.00054	0.00054	0.00171	0.00171	0.00171	1.18	3.75

4.3.5.2.4. Kuvvet Çapraz Etkileşimlerinin Giderilmesi ve Fonksiyonların Tayini

Tablo 4.6, Tablo 4.10 ve Tablo 4.14 incelendiğinde F_e kanalının kalibrasyonu sırasında çapraz etkileşimlerin ihmal edilebilir düzeyde olmadığı, F_r ve F_t kuvvet kanallarının kalibrasyonunda ise hesaplanan çapraz etkileşim değerlerinin yüksüz durum dışında küçük değerler olduğundan ihmal edilebilir olduğu görülmektedir. Bu sebeple, kanalların ölçüm eğrileri oluşturulmadan önce çapraz etkileşimlerin giderilmesi gereklidir. Her bir kuvvet etkidikleri eksen takımına göre X,Y ve Z şeklinde sırasıyla F_e , F_r ve F_t kuvvetleri için kodlanmıştır. Ardından çapraz etkileşimleri gidermek için aralarında matematiksel yaklaşım kurulmuştur. Probleme yaklaşım şekli Tablo 4.15’de özetlenmiştir.

Tablo 4.15. Kuvvetler için çapraz etkileşim parametreleri

Kalibrasyon Durumu	Ölçüm kanalı		
	F_e Kanalı	F_r Kanalı	F_t Kanalı
1. durum (F_e kuvvetinin kalibrasyonu)	X1	Y1	Z1
2. durum (F_r kuvvetinin kalibrasyonu)	X2	Y2	Z2
3. durum (F_t kuvvetinin kalibrasyonu)	X3	Y3	Z3

Dinamometre kalibrasyonlar sırasında tek bir kuvvet etkisinde çalışırken, ölçüm düzeneğinin kullanımında tek kuvvet bileşeni etkisinde çalışmayabilir. 2 veya 3 kuvvet bileşeni aynı anda etki edebilir. Tablo 4.15’de özetlenen çapraz etkileşim durumlarında her kanalda etkili olan veri setleri yeşil ile gösterilmiştir. Örneğin; F_r kanalının kalibrasyonunda etkili veri setleri Y1 ve Y2 kodları ile belirtilen ölçümlerdir. Ölçüm verilerinin N birimine dönüşümde kullanılacak veri setlerinin kurgusu aşağıdaki eşitliklerde ifade edilmiştir.

$$F_e = X1 \quad (4.5)$$

$$F_r = Y1 + Y2 \quad (4.6)$$

$$F_t = Z1 + Z3 \quad (4.7)$$

Kanallarda ölçülen çıkış gerilmelerindeki F_e kuvvetinden kaynaklı çapraz etkileşimler 1,2 ve 3 numaralı eşitlikler kullanılarak giderilebilir. Bu eşitlikler ile ölçümler arasında geçiş işlemleri yapılmış olup Tablo 4.16’da özetlenmiştir. Geçiş

işlemleri sırasında her bir veri aralığı için fonksiyonların türü/derecesi ve eğri uydurma işlemleri SPSS paket programı kullanılarak belirlenmiştir. Tablo 4.16’da yeşil ile belirtilen veri setleri kuvvet dönüşüm fonksiyonlarının türetilmesinde kullanılmıştır. Böylece F_r ve F_t kanalından ölçülen değerleri daha doğru tahmin etmek mümkün olacaktır.

Tablo 4.16. Dönüşüm denklemleri için seçilmiş veri setleri

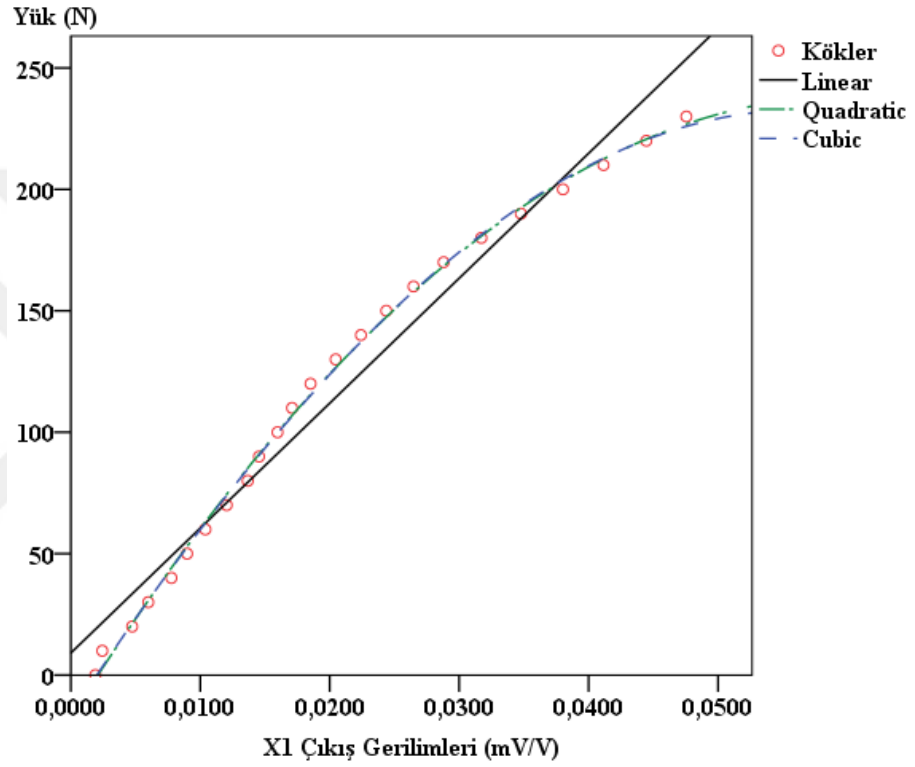
Yükleme	F_e Kanalı	F_r kanalı			F_t kanalı		
	X1 (mV/V)	Y1 (mV/V)	Y2 (mV/V)	Y1+Y2 (mV/V)	Z1 (mV/V)	Z3 (mV/V)	Z1+Z3 (mV/V)
0	0.00190	0.00105	0.00009	0.00114	0.00022	0.00026	0.00048
10	0.00243	0.00140	0.00021	0.00161	0.00029	0.00212	0.00242
20	0.00474	0.00175	0.00061	0.00237	0.00055	0.00359	0.00414
30	0.00598	0.00222	0.00078	0.00301	0.00061	0.00518	0.00579
40	0.00777	0.00244	0.00120	0.00365	0.00080	0.00679	0.00760
50	0.00898	0.00292	0.00128	0.00420	0.00095	0.00887	0.00982
60	0.01039	0.00314	0.00154	0.00468	0.00097	0.01039	0.01135
70	0.01204	0.00367	0.00171	0.00538	0.00112	0.01215	0.01327
80	0.01367	0.00389	0.00178	0.00567	0.00125	0.01401	0.01526
90	0.01454	0.00436	0.00184	0.00621	0.00142	0.01560	0.01702
100	0.01597	0.00465	0.00198	0.00662	0.00162	0.01740	0.01902
110	0.01709	0.00507	0.00225	0.00732	0.00177	0.01871	0.02048
120	0.01852	0.00545	0.00232	0.00777	0.00184	0.02050	0.02234
130	0.02046	0.00561	0.00264	0.00825	0.00195	0.02167	0.02362
140	0.02241	0.00602	0.00281	0.00884	0.00196	0.02249	0.02445
150	0.02437	0.00634	0.00292	0.00927	0.00233	0.02346	0.02579
160	0.02647	0.00694	0.00308	0.01002	0.00266	0.02397	0.02663
170	0.02880	0.00724	0.00348	0.01072	0.00286	0.02481	0.02767
180	0.03171	0.00781	0.00362	0.01144	0.00301	0.02545	0.02846
190	0.03477	0.00832	0.00373	0.01205	0.00333	0.03118	0.03451
200	0.03802	0.00893	0.00387	0.01280	0.00358	0.03515	0.03873
210	0.04115	0.00936	0.00396	0.01333	0.00400	0.03833	0.04234
220	0.04446	0.00998	0.00415	0.01413	0.00422	0.04210	0.04632
230	0.04755	0.01052	0.00419	0.01471	0.00437	0.04560	0.04997

F_e kuvveti sadece X1 ölçüm değerlerine bağlı bir fonksiyondur. Bu sebeple, fonksiyonun davranışı SPSS paket programı kullanılarak R^2 değerlerine göre belirlenmiştir. Kuadratik eğrinin kullanımının uygun olduğuna karar verilmiştir. Fonksiyonun formülasyonu Tablo 4.17’de verilmiş olup eğilimi ise Şekil 4.30’da gösterilmiştir.

Tablo 4.17. X1 bağımsız değişkenine bağlı F_e fonksiyonun tayini

Model Özeti ve Katsayı Tahmini						
Bağımlı Değişken: Gerilim (mV/V)						
Denklem	Model özeti		Katsayı tahmini			
	R ²	Sig.	Sabit	b1	b2	b3
Lineer	0.969	0.000	9.080	5143.921	-	-
Kuadratik	0.998	0.000	-17.450	8473.613	-70121.791	-
Kübik	0.998	0.000	-16.237	8187.527	-55061.932	-210398.354
Fonksiyon	$F_e(x) = -17.45 + 8473.613*(x) - 70121.791*(x^2)$					

Not: x değeri yerine F_e kanalından ölçülen değer yazılarak hesaplama yapılır.

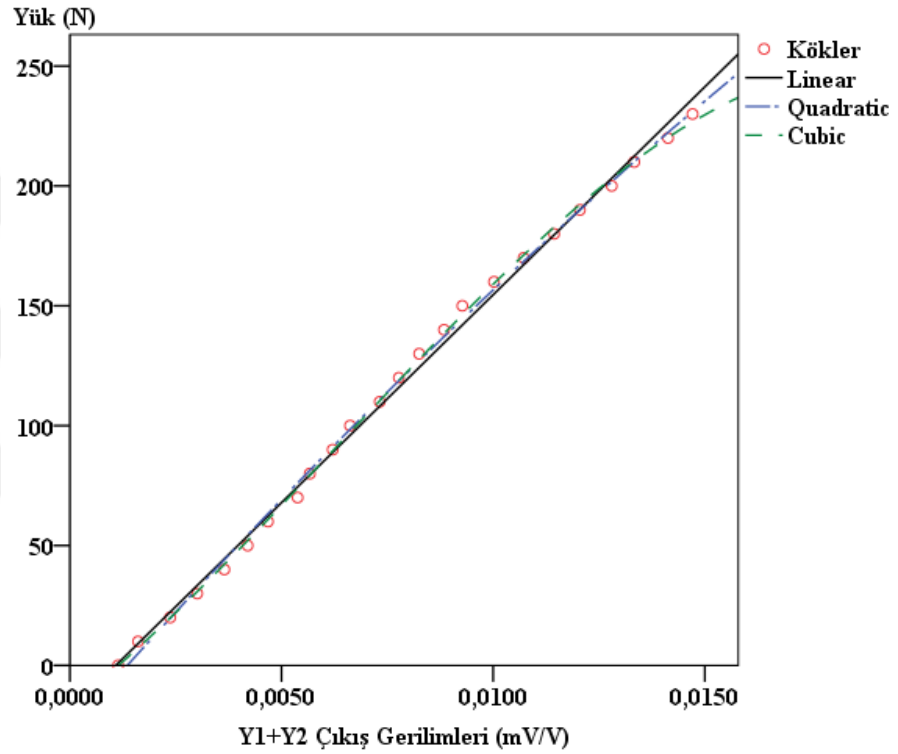


Şekil 4.30. Çıkış gerilimleri

F_r kuvveti Y1 ve Y2 ölçüm değerlerine bağlı bir fonksiyondur. Bu sebeple, fonksiyonun davranışı SPSS paket programı kullanılarak R² değerlerine göre belirlenmiştir. Kübik eğrinin kullanımının uygun olduğuna karar verilmiştir. Fonksiyonun formülasyonu Tablo 4.18’de verilmiş olup eğilimi ise Şekil 4.31’de gösterilmiştir.

Tablo 4.18. Y1 ve Y2 bağımsız değişkenine bağlı F_r fonksiyonun tayini

Model Özeti ve Katsayı Tahmini						
Bağımlı Değişken: Gerilim (mV/V)						
Denklem	Model özeti			Katsayı tahmini		
	R ²	Sig.	Sabit	b1	b2	b3
Lineer	0.997	0.000	-18.839	17345.086	-	-
Kuadratik	0.998	0.000	-26.994	20102.822	-174021.821	-
Kübik	0.999	0.000	-16.953	13932.047	763724.368	-39768307.2
Fonksiyon	$F_r(\mathbf{x}) = -16.953 + 13932.047 * (\mathbf{x}) + 763724.368 * (\mathbf{x}^2) - 39768307.2 * (\mathbf{x}^3)$					
Not:	x değeri yerine F_r kanalından ölçülen değer yazılarak hesaplama yapılır.					

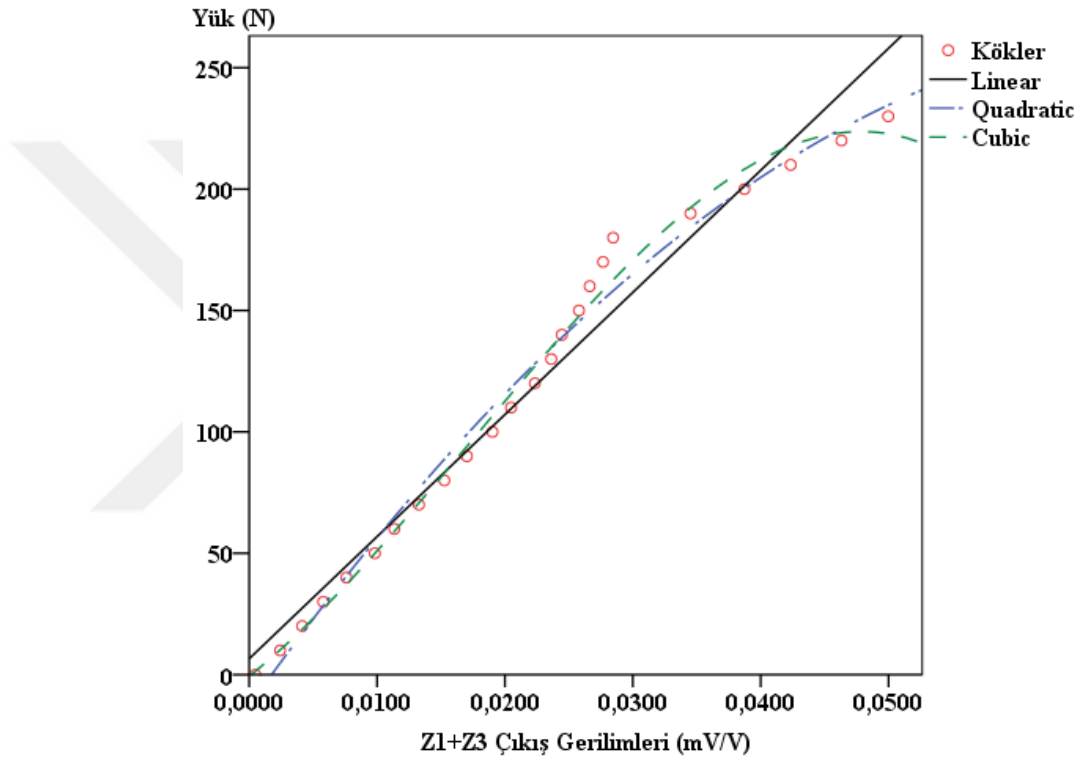


Şekil 4.31. Çıkış gerilimleri

F_t kuvveti Z1 ve Z3 ölçüm değerlerine bağlı bir fonksiyondur. Bu sebeple, fonksiyonun davranışı SPSS paket programı kullanılarak R² değerlerine göre belirlenmiştir. Kübik eğrinin kullanımının uygun olduğuna karar verilmiştir. Fonksiyonun formülasyonu Tablo 4.19’da verilmiş olup eğilimi ise Şekil 4.32’de gösterilmiştir.

Tablo 4.19. Z1 ve Z3 bağımsız değişkenine bağlı F_t fonksiyonun tayini

Model Özeti ve Katsayı Tahmini						
Bağımlı Değişken: Gerilim (mV/V)						
Denklem	Model özeti			Katsayı tahmini		
	R ²	Sig.	Sabit	b1	b2	b3
Lineer	0.966	0.000	6.566	5029.023	-	-
Kuadratik	0.986	0.000	-12.851	7404.483	-49081.921	-
Kübik	0.992	0.000	-0.644	4207.145	117860.561	-2253061.462
Fonksiyon	$F_t(\mathbf{x}) = -0.644 + 4207.145 * (\mathbf{x}) + 117860.561 * (\mathbf{x}^2) - 2253061.462 * (\mathbf{x}^3)$					
Not: x değeri yerine F_t kanalından ölçülen değer yazılarak hesaplama yapılır.						

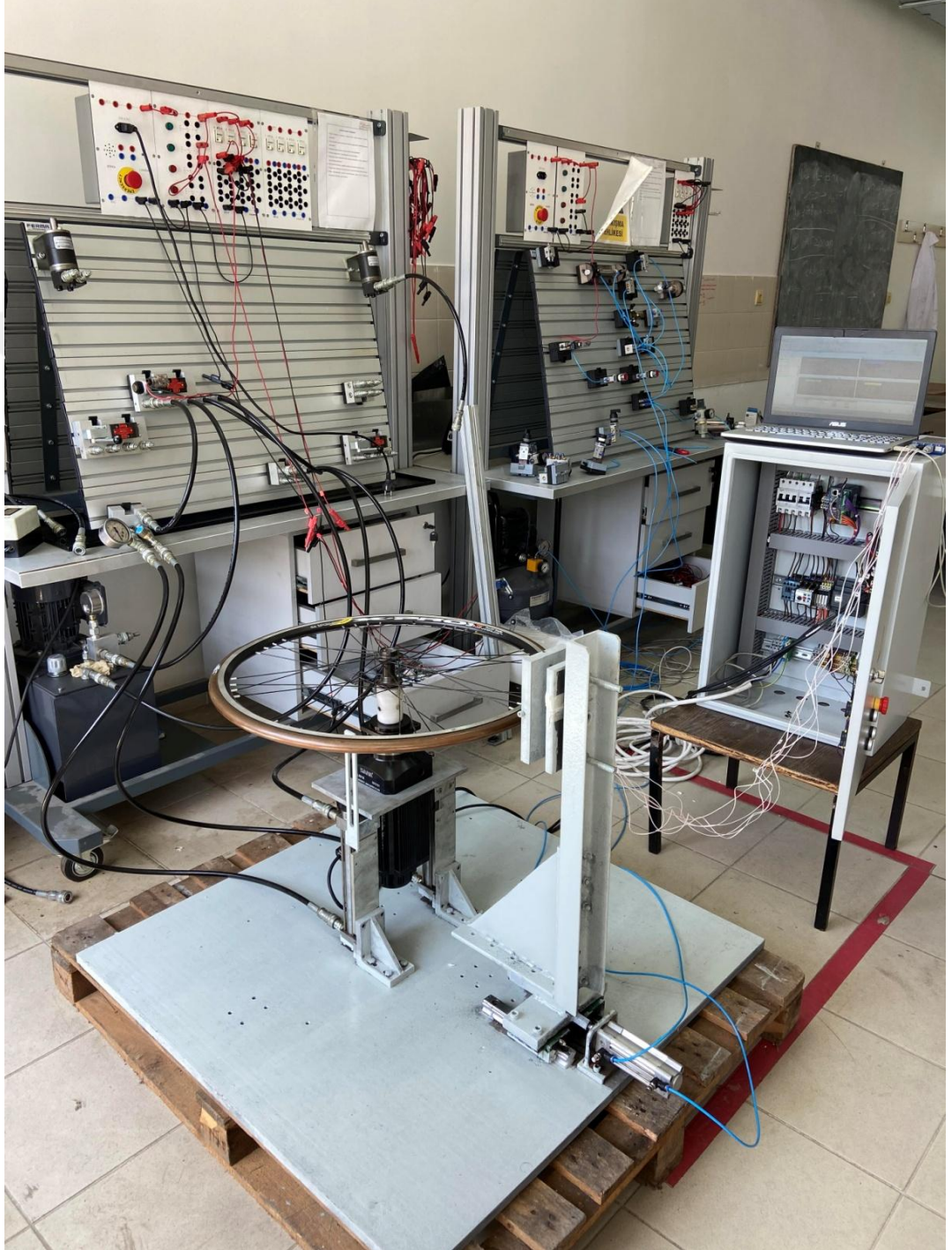


Şekil 4.32. Çıkış gerilimleri

4.3.6. Deney Düzenneği ve Bileşenlerinin Montajı

Deney düzenneğini oluşturan bileşenlerin imalatları yapılmış ve önce deney düzenneğini bir bütün halinde oluşturacak sistemin mekanik montajı gerçekleştirilmiştir. PLC ile kontrol edilen servo motorun gerekli veri ve elektrik bağlantıları yapılmış ve kontrol analiz yazılımı üzerinden dönme hareketi için gerekli kontroller sağlanmıştır. Hidrolik ve pnömatik sistemi oluşturan bağlantılar yapılmış manuel komutta çalışma biçimleri test edilmiştir. U direk ve lineer kızakların tabana montajının yapılmasının ardından, pnömatik sistem yardımıyla grafit plaka ve

aşındırma çemberi arasında oluşacak olan temas şekli kontrolleri yapılmıştır. Dinamometre bileşeninin gerekli veri kaydedici ve bilgisayar bağlantılarının yapılmıştır. Gerekli montaj işlemlerinin ardından oluşan deney düzeneğinin görünümü Şekil 4.33’de verilmiştir.



Şekil 4.33. Deney düzeneğinin montaj edilmiş bir bütün olarak görünümü

4.4. Deneysel Çalışma

Bu kısımda deney düzeneğinin imalatında ve montajından sonra bileşenlerin bir bütün halinde senkron çalışabilmesi için yapılan çalışmalar, deney düzeneğinden alınan ölçüm verilerin doğruluğunun ve çalışmayı etkileyen parametrelerin istatistiksel olarak değerlendirilmesi için yapılan deneysel çalışmalar, ayrıca Samsun hafif raylı sistemin ilk durağı olan OMÜ Yurtlar ile son durağı olan Tekkeköy güzergahı arasındaki durak bilgileriyle yapılan kuru-ıslak deneysel çalışmalara yer verilmiştir.

4.4.1. Grafit Plaka Malzemesi

Deneysel çalışmalar sırasında kullanılmak üzere daha önce bir miktar kullanılmış Pantrac GmbH firmasına ait RH 84 kalite kodlu saf karbon grafit plakalar, Samulaş A.Ş. firmasından tedarik edilmiştir. RH 84 kalite kodlu grafit plaka malzemesinin özellikleri Tablo 4.20’de verilmiştir. Deneysel çalışmalar sırasında RH 84 kalite kodlu grafit plaka malzemenin yanısıra, Teydeb 7201128 numaralı araştırma projesinde üretilen yerli grafit plakalarında sürtünme ve aşınma testleri gerçekleştirilmiştir. Tedarik edilen grafit plakalar 70 x 150 mm boyutlarında tel testere ile kesilmiş ve grafit tutucu parçasına montaj edilebilecek duruma getirilmiştir. Her deney parkuru öncesi grafit plakaların yüzeyi sırasıyla 100’lük ve 1000’lik ince kum su zımpara ile düz hale getirilmiş ve saf alkol ile temizlenmiştir.

Tablo 4.20. RH 84 kalite kodlu grafit plaka malzemenin özellikleri

Kalite	Yoğunluk (g/cm ³)	Özgül Direnç (μΩm)	Sertlik HRB (5/150)	Bükülme Mukavemeti (N/mm ²)	Emprenye
RH 84*	1,73	34	95	37	-

*Bilgiler Pantrac GmbH firmasının kataloğundan alınmıştır.

4.4.2. Bakır Boru Malzeme

Aşındırma çemberine montajı yapılan ve grafit plaka ile kayar sürtünmeli hareketi yapacak olan saf sert bakır boru, 2 mm cidar kalınlığına ve 21,4 mm dış çapa sahiptir.

4.4.3. Validasyon ve Kalifikasyon Testleri

Deney düzeneğinin, akım toplayıcı grafit plaka ile katener temas teli arasındaki etkileşimi simüle edebilmesi için deney düzeneği bileşenlerinin bir bütün halinde

senkron çalışması ve deney düzeneğinin kontrol analiz yazılımında girilen duruk bilgilerini uygulayabilmesi oldukça önemlidir. Bu amaçla deney düzeneği, kısa mesafelerde düşük hızlarda belirli bir süre çalıştırılmış ve sistemin bir bütün olarak çalışmasını engelleyen sorunlar tespit edilmiştir.

4.4.4. Kütle Kaybı Ölçümleri

Grafit plakaların parkur deneyleri sonrası aşınma miktarlarını belirlemek amacıyla deneysel çalışma öncesi ve sonrası ağırlıkları ölçülmüştür. Ağırlık ölçümleri 0,01 mg hassasiyette dijital terazide yapılmıştır. Her ölçüm öncesi dijital terazi kalibre edilmiştir. Elde edilen aşınma miktarlarının alınan mesafeye oranı aşınma oranı verilerini vermiştir.

4.4.5. Sürtünme Katsayısının Ölçümlerinin İstatistiksel Belirlenmesi

Tasarlanan ve imalatı yapılan deney düzeneğinin çalışması sırasında grafit plaka ile bakır temas teli arasında meydana gelen sürtünme katsayısı ve aşınma oranının değerlendirilmesi, aşınma çifti arasındaki tribolojik etkileşime etkisi olan parametrelerin etki değerlerine göre belirlenmesi amacıyla Taguchi metodu ile deney tasarımı kurgulanmış, çeşitli deneyler yapılmış ve elde edilen veriler irdelenmiştir.

4.4.5.1. Taguchi Metodu İle Deney Tasarımı

Deneyleri gerçekleştirilecek sistemin gerçek çalışma ortamında belirlenen ilgili parametreleri kullanılarak tüm deneylerini yapmak çeşitli sorunları da beraberinde getirmektedir. Bu sorunlardan bazıları gerçek çalışma ortamında iş güvenliğinin sağlanamaması, yüksek maliyet ve deneylerin çok uzun sürelerde gerçekleşmesi olarak belirtilebilir. Bu gibi sorunlardan dolayı Dr. Genichi Taguchi tarafından deneysel çalışmalarda kullanılmak üzere istatistiksel bir metot geliştirilmiştir. Taguchi metodu adı verilen yöntem, gerçek deney sonuçlarını etkileyen parametrelerin seviye kombinasyonlarını belirlemede kullanılır. Bunun yanında sayısal olarak daha az sayıda deneysel çalışma yapıp, yapılması planlanan tüm deneysel çalışma hakkında fikir yürütme olanağı sağlamaktadır (Taguchi vd., 1989; Yang ve Tarng, 1998; Chua vd., 1993; Davim, 2003)

Taguchi metodunun kullanıldığı deneysel çalışmaların tasarım stratejisi, bütün sonuçlara etkili olan parametre ve seviyeleri deneysel çalışma yapmadan özel ortogonal deney dizileri kullanarak az sayıda deneysel çalışmayla yapıp

parametrelerin sonuçlar üzerindeki etkisini tahmin etmektir(de souza vd., 2013; Abhang ve Hameedullah, 2012).

Deneylerden elde edilen sonuçlar sinyal-gürültü oranı (S/N) adı verilen bir değere dönüştürülür. Gerçek deney sonuçlarının istenmeyen rastgele gürültü değerlerine oranı şeklinde tanımlanan S/N oranı, deneysel verilerin bir performans özelliğidir (Günay ve Yücel, 2013). Üç performans yaklaşımı şeklinde hesaplanan S/N oranının belirlenmesinde, yaklaşımlar içerisinde uygun olan deneysel davranışların nasıl olması gerektiğini tespit edebilecek bir uzman tarafından seçilmesi gerekmektedir. Bahsedilen üç yaklaşımın formülasyonu aşağıda verilmiştir (Ic vd., 2016).

- En küçük en iyi durum:

$$\frac{S}{N} = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (4.8)$$

- En büyük en iyi durum:

$$\frac{S}{N} = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (4.9)$$

- Nominal en iyi durum:

$$\frac{S}{N} = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\bar{y}^2}{S^2} \right) \quad (4.10)$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \quad (4.11)$$

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i + \bar{y})^2 \quad (4.12)$$

Yukarıda verilen denklemlerde y_i deneysel çalışma sırasında gözlenen veriler, n deney sayısı, $\bar{y}$ gözlenen verilerin ortalaması ve S^2 gözlenen verilerin varyansı olarak tanımlanmaktadır.

Taguchi metodu kullanılarak kurgulanan deney tasarımıda kullanılan genel adımlar aşağıdaki gibi sırasıyla izlenebilir (de souza vd., 2013).

- a) Deneysel çalışma sırasında irdelenecek çıkış/sonuç değişkeni belirlenir,
- b) Çıkış/sonuç değişkenlerini etkileyecek parametreler (giriş verisi) belirlenir ve bu parametrelerin seviyeleri seçilir.
- c) Daha önce yapılmış ve literatürde yer alan ortogonal Taguchi dizilerinden parametre ve seviyeleri seçilir.
- d) Seçilen ortogonal dizilime göre deneysel çalışmalar gerçekleştirilir ve çıkış verileri elde edilir.
- e) Elde edilen çıkış verilerine göre seçilen yaklaşım dikkate alınarak S/N oranları hesaplanır ve optimum deney parametresi belirlenir.
- f) Hesaplanan S/N oranları varyans analizi (ANOVA) ile karşılaştırılır ve seçilen parametrelerin sonuçlar üzerindeki etkisi ortaya çıkarılır.
- g) Belirlenen optimum deney parametresi eğer gerekliyse deneysel olarak doğrulanır.

4.4.5.2. Deney Parametrelerinin Belirlenmesi ve L9 Ortogonal Taguchi Dizilerinin Kurulması

Bu çalışmada, imalatı yapılan deney düzeneğiyle, grafit plakalar, aşındırma çemberine sarılı bakır boru malzemeye değişen mesafe, hız ve temas kuvvetleri değerleri altında kayar sürtünmeli aşınma deneyleri yapılmıştır. Mühendislik açısından literatürde ve Samulaş A.Ş. firmasından alınan bilgilere göre aşındırma çemberinin dönme hızı, alınan mesafe ve temas kuvvetleri, sürtünmeyi ve sonucunda aşınmayı etkileyen parametreler olarak araştırılmıştır. Bahsedilen bu üç parametre sürtünme katsayısı ve aşınma miktarı ölçümlerinde etkili olabilecek parametreler olarak belirlenmiştir. Deneyler sırasında kullanılması belirlenen parametreler, değerleri ve seviyeleri aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Tablo 4.21. Deney sırasında kullanılacak parametreler, değerleri ve seviyeleri

FAKTÖRLER	SEMBOLLER	SEVİYE 1	SEVİYE 2	SEVİYE 3
Hız (km/s)	A	15	20	25
Mesafe (km)	B	10	15	20
Temas Kuvveti (N)*	C	30-35	40-45	50-55

*. Temas kuvveti, deneyler sırasında verilen aralıklarda davranış göstermiştir.

Kurgulanan deney tasarımı dinamometre sayesinde ölçülen F_r ve F_t kuvvet değerleri için denklem 4.13 kullanılarak hesaplanan sürtünme katsayıları için “en küçük durum en iyisidir” hipotezine göre S/N oranları, Minitab 19 paket programı ile hesaplanmıştır. Her faktör için 3 farklı seviye olduğundan L9 ortogonal dizine göre deneyler yapılmıştır.

$$F_r = \mu F_t \quad (4.13)$$

Denklemden F_t temas sırasında uygulanan temas kuvvetini, F_r dönme hareketi sırasında oluşan radyal kuvveti (F_s sürtünme kuvveti) ve μ aşınma çifti arasında oluşan sürtünme katsayısını ifade etmektedir (Ludema, 1996; He vd., 2000).

Tablo 4.22. L9 ortogonal dizine göre belirlenen deneyler ve seviyeleri

Deney No	A	B	C
1	1	1	1
2	1	2	2
3	1	3	3
4	2	1	2
5	2	2	3
6	2	3	1
7	3	1	3
8	3	2	1
9	3	3	2

Her bir ortogonal deney dizisi için deney öncesi ve sonrası 0,01 mg hassasiyette dijital terazi ile grafit plakaların ağırlık ölçümleri yapılmış, aşınma sonrası ağırlık kayıpları belirlenmiştir.

4.4.6. Samsun İli OMÜ Yurtlar-Tekkeköy HRS Güzergah Hattının Kuru ve Sulu Şartta Deneysel Çalışması

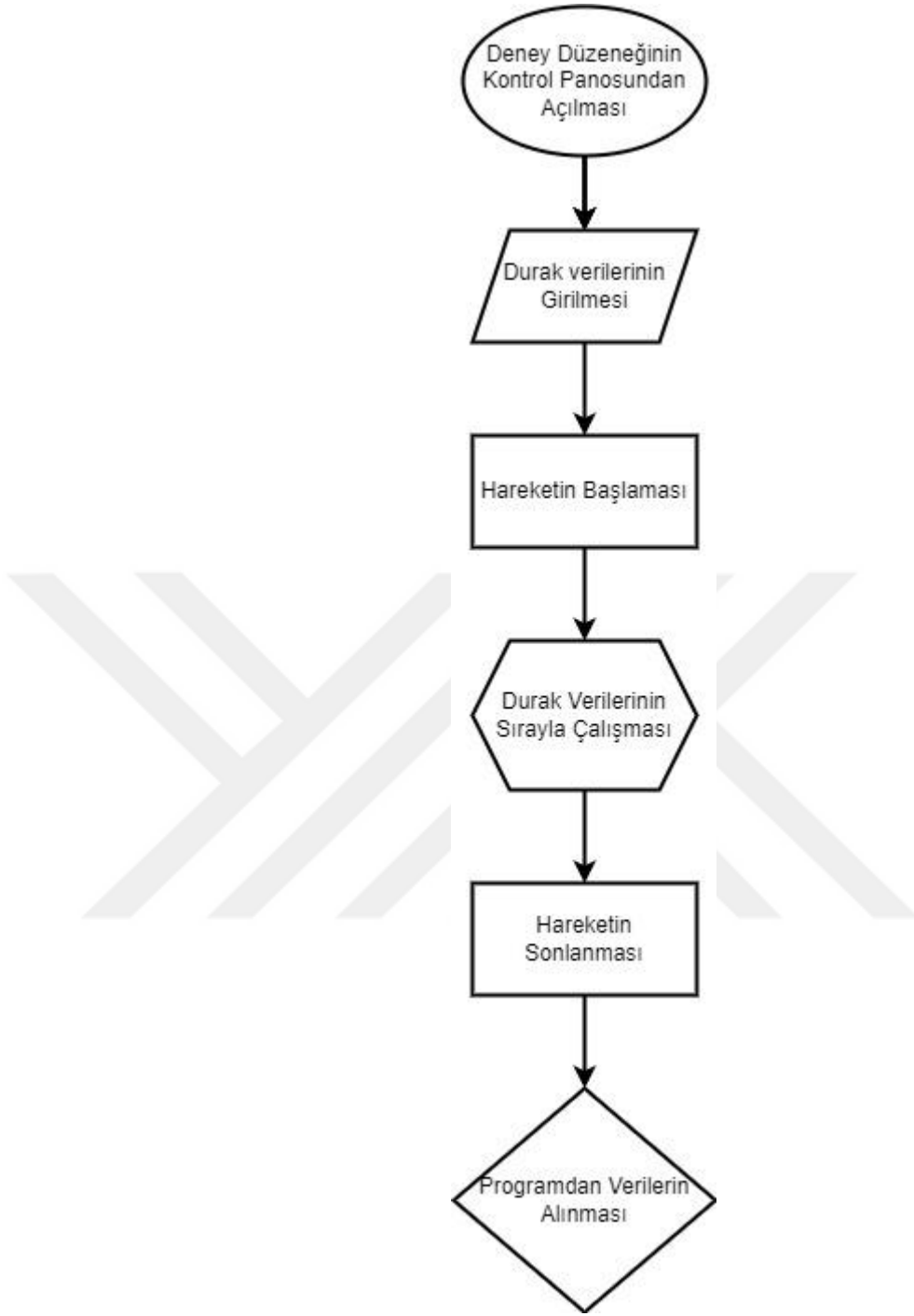
Samsun HRS’ nin OMÜ Yurtlar – Tekkeköy güzergah hattı boyunca kuru şartta sürtünme katsayısı ve aşınma miktarı ölçümlerini yapabilmek amacıyla Şekil 4.34’de verilen deneysel çalışma akışı aynen uygulanmıştır. Buna göre daha önce uygun boyutlarda kesilen grafit plakaların yüzey zımparalama ve temizleme işlemlerinin yapılmasının ardından grafit plakanın deney öncesi ağırlığı hassas dijital terazide ölçülür ve kaydedilir. Ağırlık ölçümü yapılan grafit plaka grafit tutucu parçasına montajlanır ve yan kısımlarından sıkma cıvataları sayesinde, sürtünme sırasında kaymaması için sabitlenir. Bu montaj yapılırken her deney parkuru için

grafit plaka aynı köşeleri denk gelecek şekilde aynı yerden montajlanır. Böylelikle aşındırma çemberinin her parkurda aynı bölgeye temas etmesi sağlanır.

Deney düzeneğinin elektronik kontrol panosundan aktif hale getirilmesinin ardından, kontrol analiz programında yer alan hidrolik hareket arayüzünden komut verilerek hidrolik silindirlere basınç gönderilir ve aşındırma çemberi grafit plaka malzemesinin merkez seviyesi yüksekliğine getirilir. Her parkur için deney başlamadan önce aşındırma çemberinin bir tam turda aldığı mesafenin kalibrasyonu yapılır ve çevresinin uzunluk değeri girilir. Kalibrasyon ve değer girişi kontrol analiz programının kalibrasyon arayüzünden yapılır.

Bu işlemlerin ardından dinamometre 5 Hz frekansında ölçüm alacak şekilde veri kaydedicinin yazılım programı üzerinden çalıştırılır ve ölçüm aldığı görülür. Pnömatik devre ünitesi üzerinden istenilen temas kuvveti değerinin ayarlanmasının ardından açma butonu vasıtası ile basınçlı hava U direk mekanizmasının altında yer alan pnömatik silindire gönderilir ve grafit plakanın aşındırma çemberine baskı yapması yani temas kuvveti oluşturulması sağlanır. Deney çalışması sırasında parkur testleri için 50 – 55 N arasında değişen temas kuvveti değeri kullanılmış ve bu değer aralığı sürekli olarak sağlanmıştır.

OMÜ Yurtlar – Tekkeköy güzergah verilerin elde edilmesi sonucu ortaya çıkan durak bilgileri olan iki durak arası mesafe, ortalama hız, bekleme süresi, hızlanma ve yavaşlama süresi değerleri kontrol analiz yazılımı ana ekran arayüzünden girilir. Yine aynı arayüz üzerinden bağlan ve listeyi gönder başlat komutlarının sırasıyla uygulanmasının ardından aşındırma çemberini hareketinin dönme hareketi başlar ve OMÜ Yurtlar – Tekkeköy deney rotası güzergahı için aşınma deneyi başlamış olur. Tüm durak bilgilerinin uygulanmasının ardından kontrol ve analiz yazılımı deney cihazının oluşturulan parkurun son durağından sonra otomatik durmasını sağlar ve hareket sonlanmış olur.



Şekil 4.34. OMÜ Yurtlar - Tekkeköy deney rotasının kuru şartta akış diyagramı

Hareketin sonlanmasının ardından dinamometrenin anlık kaydettiği veriler .xls formatında veri kaydedici programından alınır. Grafit plakanın grafit plaka tutucu parçasından sökülmesinin ardından ağırlık ölçümü yapılır ve ölçülen değer kaydedilir.

Deneyisel çalışmanın sulu koşullarda yapılması sırasında uygulanan adımlardan farkı parkur hareket başlamadan önce kurulan serum aparatı tankı sayesinde 1,3 ml/s debisinde akan suyun grafit plaka ile bakır boru malzeme arasına gönderilmesidir. Diğer uygulama adımları tamamen aynıdır. Samsun HRS' nin OMÜ Yurtlar – Tekkeköy deney rotası güzergah hattı boyunca sulu şartta sürtünme katsayısı ve aşınma miktarı ölçümlerini yapabilmek amacıyla uygulama adımlarını içeren akış diyagramı Şekil 4.35’de verilmiştir.

Verilerin düzenlenmesi ve işlenmesi adımı, dinamometre tarafından ölçülen ve kaydedilen F_r ve F_t kuvveti değerleri için denklem 4.13 kullanılarak hesaplanan sürtünme katsayısı ve temas kuvveti tüm parkur boyunca değişimini gösteren grafik haline dönüştürülür. Dönüştürülen veri grafiği kuru ve sulu şartlar için karşılaştırılıp Ayrıca grafit plakanın deney öncesi ve sonrası ağırlık değişimi karşılaştırılıp dönüştürülen veri grafiği kuru ve sulu şartlar için karşılaştırılıp neden sonuç ilişkisine bağlı olarak irdelenir. Ayrıca grafit plakanın deney öncesi ve sonrası kütle kaybı değişimleri kuru ve sulu şartlar için değerlendirilir.



Şekil 4.35. OMÜ Yurtlar-Tekkeköy deney rotasının sulu şartta akış diyagramı

4.4.7. Çalışma Sıcaklık Ölçümleri

Aşındırma çemberine montajlı halde buluna bakır malzeme ile grafit plakanın teması sırasında ortaya çıkan sıcaklık değerini ölçebilmek amacıyla Testo marka 881-2 model termal kamera kullanılmıştır. Termal kamera ile kuru ve ıslak şartlarda çalışma sırasında aşınma çiftinin çalışma bölgesinden ölçümler yapılmıştır. Ölçümler sırasında kullanılan termal kameranın görünümü Şekil 4.36’da verilmiştir.



Şekil 4.36. Termal kamera

4.4.8. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizi

Grafit plaka malzemesinin, kuru ve ıslak ortam şartlarda deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen aşınma yüzeylerinden alınan numuneler, OMÜ KİTAM’ da bulunan Jeol JSM 7001F marka ve model taramalı elektron mikroskobu kullanılarak görüntülenmiş ve orijinal yüzey ile karşılaştırmaları yapılmıştır. Ayrıca aşınma yüzeylerinde EDS analizleri gerçekleştirilmiş aşınma testi öncesi ve sonrası yüzeyin elementsel değişimleri incelenmiştir. Çalışma sırasında kullanılan taramalı elektron mikroskobunun görüntüsü Şekil 4.37’da verilmiştir.



Şekil 4.37. Taramalı elektron mikroskobu

4.4.9. Atomik Kuvvet Mükroskobu (AFM) Analizi

Grafit plaka malzemesinin kuru ve ıslak şartlarda deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen aşınma yüzeylerinden alınan numuneler, Erciyes Üniversitesi TAUM’ da bulunan atomik kuvvet mikroskobu kullanılarak incelenmiş, iki boyutlu ve üç boyutlu olarak yüksek çözünürlükte yüzey görüntüleri alınmıştır. Ayrıca yüzeylerin ortalama yüzey pürüzlülük (R_a) değerleri belirlenmiştir. Çalışma sırasında kullanılan atomik kuvvet mikroskobunun görüntüsü Şekil 4.38’ de verilmiştir.



Şekil 4.38. Atomik kuvvet mikroskobu

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

Deney düzeneğinin imalatı sırasında ve deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen bulgular bu başlık altında açıklanmış ve irdelenmiştir.

5.1. Validasyon ve Kalifikasyon Testleri

Deney düzeneği bileşenlerinin montajının yapılmasının ardından bir bütün halinde senkron çalışmasını sağlamak ve gerçek deneyler öncesi sistemin hatalarını görebilmek amacıyla sistem kısa mesafelerde ve düşük hızlarda test edilerek çalıştırılmıştır. Bütünleşik sistemin aynı anda çalışması sırasında ortaya çıkan problemler belirlenmiş ve çözüm yolları geliştirilmiştir.

Servo motorun bakır aşındırma çemberine montajının yapılmasının ardından PLC kontrollü arayüz yazılımı üzerinden 10, 15, 20 km kısa mesafelerde ve 15, 20, 25 km/s düşük hız değerlerinde dönme hareketi verilmiştir. Fakat servo motor aşındırma çemberini döndürememiş ve sürücüyü 13 numaralı ‘aşırı yükleme’ hatası uyarı kodu göndermiştir. Bunun üzerine yapılan araştırmalar ve üretici firmanın da yönlendirmesiyle, aşındırma çemberi çapının büyük olmasından dolayı yüksek eylemsizlik momenti oluşturduğu belirlenmiştir. Yani servo motorun oluşturduğu döndürme momentinin, bakır aşındırma çemberini hareket ettirebilmesi için gereken döndürme moment değerine erişemediği tespit edilmiştir. Denklem 5.1’e göre yapılan hesaplamalarda 3.8 kW anma gücüne ve 2500 d/d hıza sahip servo motorun döndürme momenti yaklaşık 15 Nm bulunmuştur. Servo motorun döndürme momentini arttırmak ve ilk kalkış hareketi sırasında aşındırma çemberinin eylemsizlik momentinin üzerinde bir değere ulaşmak amacıyla 1/10 oranında planet redüktör temin edilmiş ve montajlanmıştır. Seçilen redüktör sayesinde servo motorun döndürme momenti 10 kat arttırılmıştır. Redüktörün moment artışı sağlaması nedeniyle aşındırma çemberi, HRS çalışma şartları için istenilen dönüş hız değerlerine ulaşmıştır.

$$M_d = 9550 \times \frac{P}{n} \quad (5.1)$$

Denklem 5.1’e göre M_d döndürme momentini, P güç ve n dakikada devir sayısını ifade etmektedir (Koç, 2015).

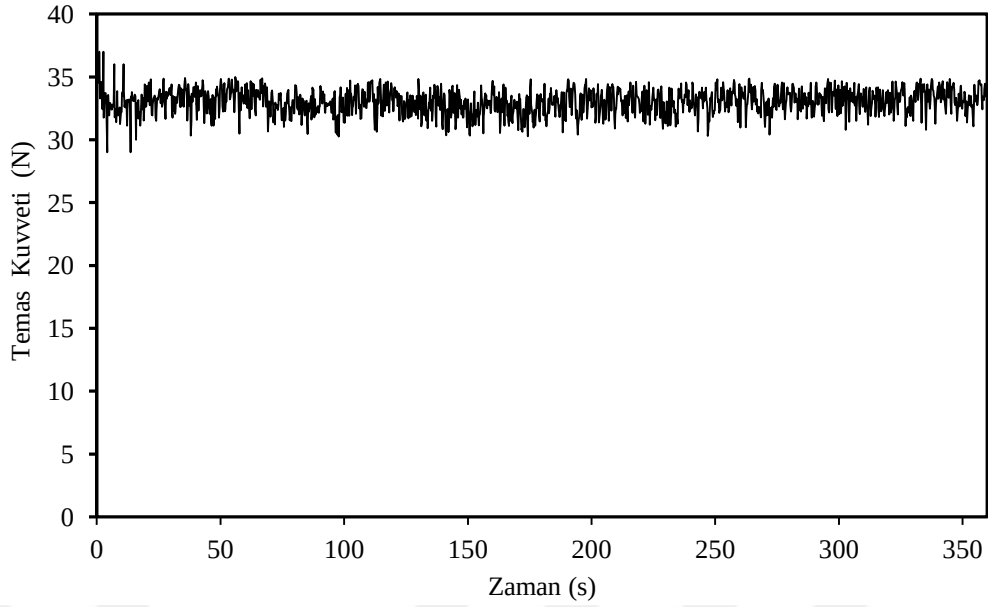
Servo motor ve dinamometrenin aynı anda çalıştırılması sırasında servo motorun yaydığı elektromanyetik sinyal gürültüsü veri kaydediciyi etkileyip

kapama hatasına düşürmüştür. Başlangıçta bu hatadan dolayı kuvvet ölçümleri yapılamamış ve veriler alınamamıştır. Sorun faraday kafesi teorisi ve uygulaması dikkate alınarak alüminyum folyo ile hem servo motor hem de veri kaydedici tamamen kaplanarak minimize edilmiştir. Böylelikle servo motordan çıkan elektromanyetik sinyal gürültüsünün veri kaydediciye ulaşması engellenmiş ve aynı anda çalışmaları sağlanmıştır (Warne vd., 2012).

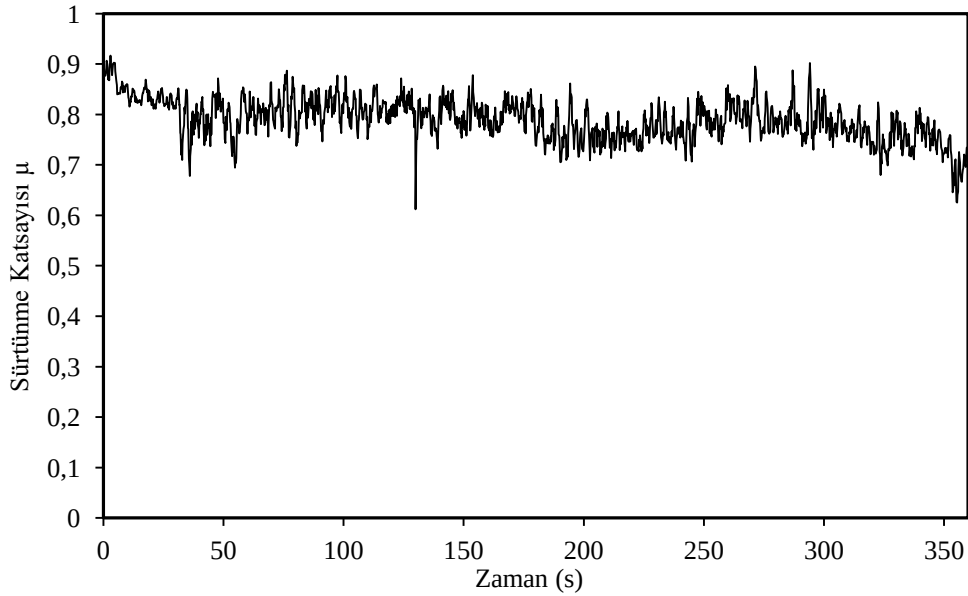
5.2. Taguchi Metodu ile Ölçülen Sürtünme Katsayılarının İstatistiksel Değerlendirilmesi

Taguchi metodu sayesinde oluşturulan deney tasarımında, L9 dizisine göre kurgulanan deney koşulları altında kuru şartta sürtünme ve aşınma deneyleri gerçekleştirilmiş, deneylerden elde edilen verilere göre, temas kuvveti ve sürtünme katsayısının zamana bağlı değişimi izlenmiştir. Bu grafikler oluşturulurken deney süresinin ilk, orta ve son kısmı sınıflandırılmış ve toplam yaklaşık 6 dakika ölçüm alınmıştır. Ayrıca her deney öncesi ve sonrası grafit plakaların dijital hassas terazide kütle ölçümleri yapılmış ve deney sonrası kütle kayıpları belirlenmiştir.

A1B1C1 koşullarına göre yapılan deneysel ölçüm sonuçlarına göre temas kuvvetinin zamana bağlı değişimi Şekil 5.1’de, sürtünme katsayısının değişimi ise Şekil 5.2’de verilmiştir. Dinamik temas kuvvetinin deney başlangıcında kurgulandığı değer aralığı olan 30-35 N aralığında değişim gösterdiği görülmüştür. Temas kuvveti değişiminin ortalama olarak yaklaşık 33 N değer bölgelerinde yığıldığı grafikten anlaşılmaktadır. Sürtünme katsayısı grafiğinde sürtünme katsayısının başlangıçta yaklaşık 0,89 olduğu daha sonra 0,80’e düşmüştür. Test süresince sürtünme katsayısı en yüksek 0,90, en düşük 0,61 ölçülmüştür. Sürtünme katsayısının genel ortalamasına bakıldığında grafikten anlaşılağı üzere ortalama 0,79 değerinde sürtünme katsayıları gözlenmiştir. A1B1C1 koşullarına göre yapılan deney sonrası grafit plakada aşınmadan kaynaklı 0,14 g kütle kaybı belirlenmiştir.



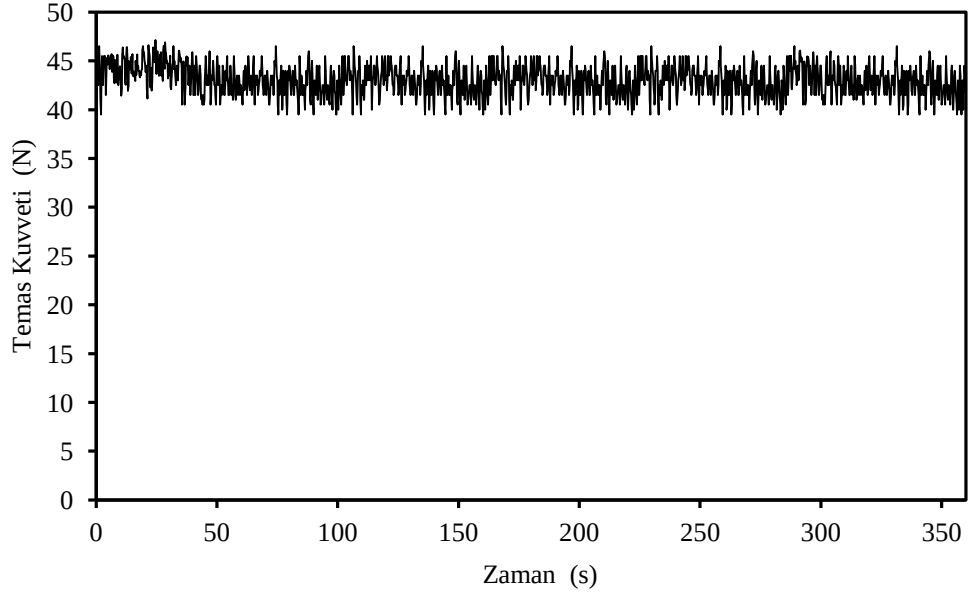
Şekil 5.1. A1B1C1 deney koşullarında zamana göre F_t değişimi



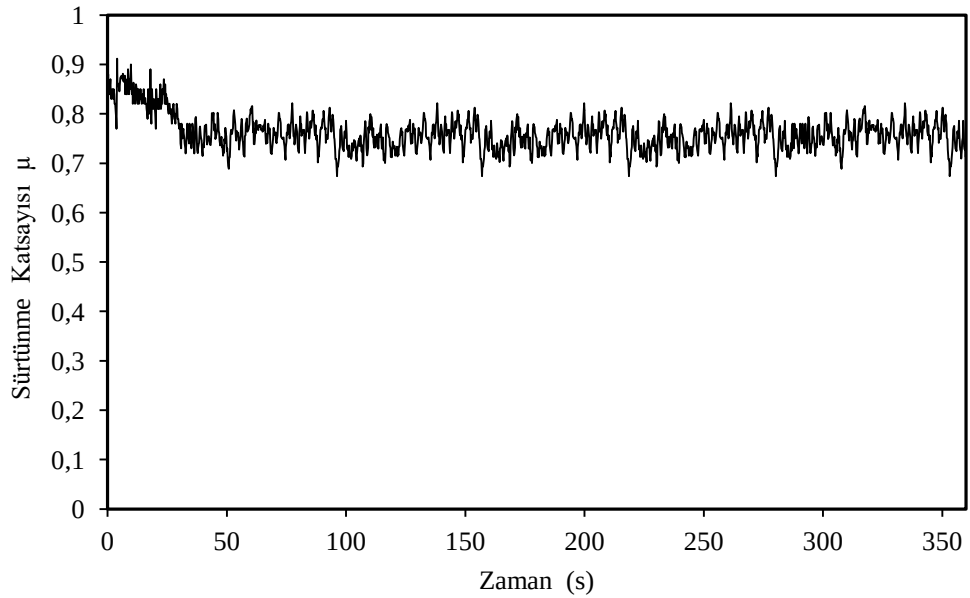
Şekil 5.2. A1B1C1 deney koşullarında zamana göre μ değişimi

A1B2C2 koşullarına göre yapılan deneysel ölçüm sonuçlarına göre temas kuvvetinin zamana bağlı değişimi Şekil 5.3’de, sürtünme katsayısının değişimi ise Şekil 5.4’de verilmiştir. Dinamik temas kuvvetinin deney başlangıcında kurgulandığı değer aralığı olan 40 - 45 N aralığında değişim gösterdiği, fakat 43 N değerinde toplandığı görülmüştür. Sürtünme katsayısı μ - t zaman grafiği incelendiğinde sürtünme katsayısının başlangıçta yaklaşık 0,85 iken 0,89 değerine yükseldiği ve daha sonra 0,76 değerine düştüğü görülmektedir. Zamanın ilerlemesiyle sürtünme

katsayısının en yüksek 0,91 en düşük 0,67 olarak ölçülmüştür. Genel ortalama sürtünme katsayısı değeri 0,76 civarındadır. A1B2C2 koşullarına göre yapılan deney sonrası grafit plakada aşınmadan kaynaklı 0,31 g kütle kaybı belirlenmiştir.



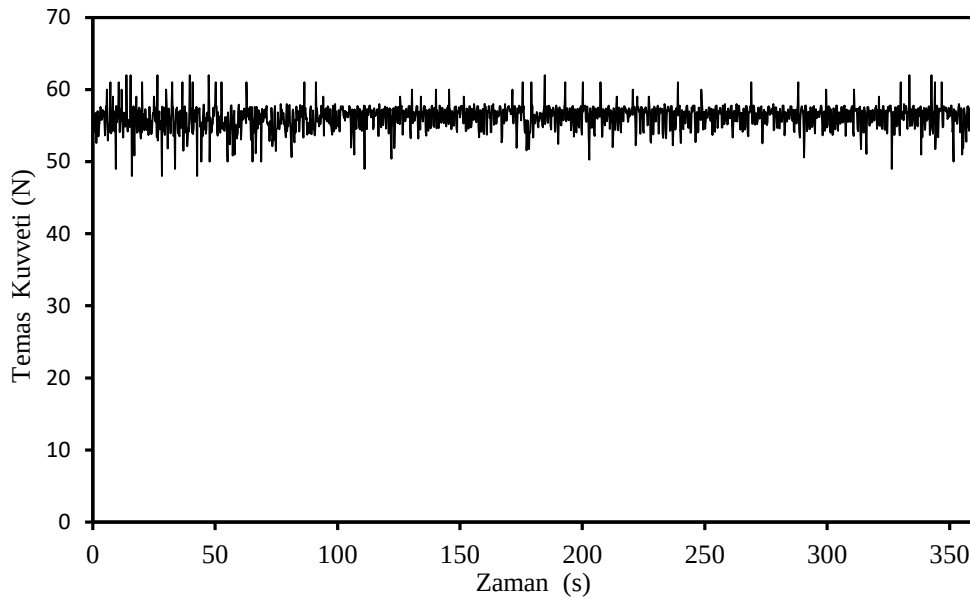
Şekil 5.3. A1B2C2 deney koşullarında zamana göre F_t değişimi



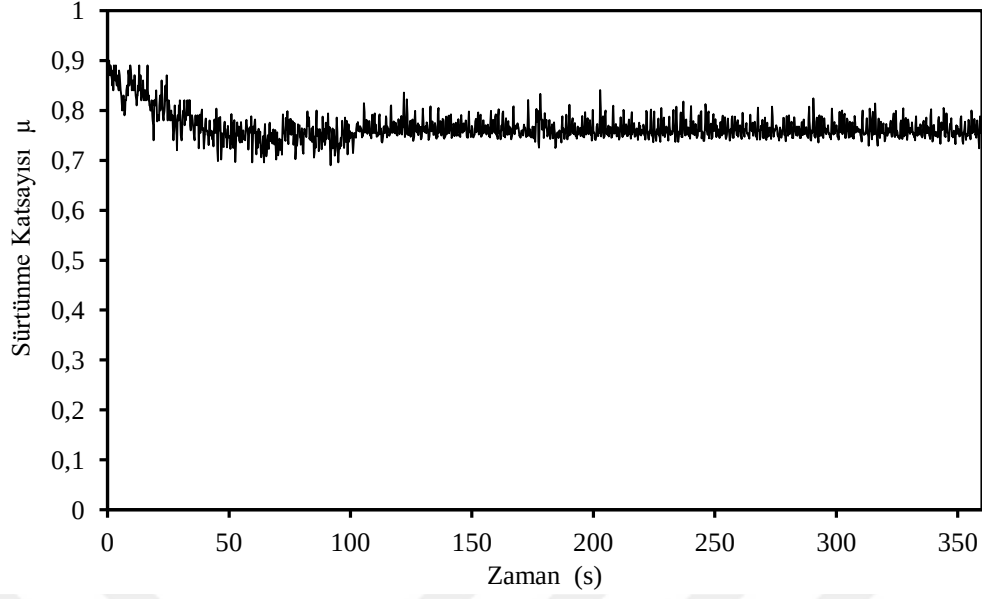
Şekil 5.4. A1B2C2 deney koşullarında zamana göre μ değişimi

A1B3C3 koşullarına göre yapılan deneysel ölçüm sonuçlarına göre temas kuvvetinin zamana bağlı değişimi Şekil 5.5’de, sürtünme katsayısının değişimi ise

Şekil 5.6’da verilmiştir. Dinamik temas kuvveti 49 - 62 N aralığında saçılan bir şekilde değişim göstermesine rağmen çoğunlukla 55 N değerine yakın noktalarda toplandığı görülmüştür. Daha önceki deneylerde olduğu gibi dönme hareketi nedeniyle oluşan titreşimlerden etkilenen temas kuvveti A1B1C1 ve A1B2C2 koşullarında gerçekleştirilen deneylere göre bir miktar daha fazla saçılma göstermiştir. Sürtünme katsayısının zamana bağlı ölçüm grafiği incelendiğinde sürtünme katsayısının başlangıçta yaklaşık 0,89 olduğu ardından kademeli olarak 0,75 değerine düştüğü ve en sonunda 0,78 değerine yükselip burada kararlı bir şekilde devam ettiği görülmektedir. Zamanın ilerlemesiyle sürtünme katsayısı belirli değerler arasında saçılma göstermiş en yüksek 0,89 en düşük 0,69 olarak ölçülmüştür. Daha önceki deneylerde elde edilen alt ve üst değer arasındaki fark en düşük bu deney koşullarında elde edilmiştir. Genel ortalama sürtünme katsayısı değeri 0,77 civarındadır. A1B3C3 koşullarına göre yapılan deney sonrası grafit plakada aşınmadan kaynaklı 0,51 g kütle kaybı belirlenmiştir.

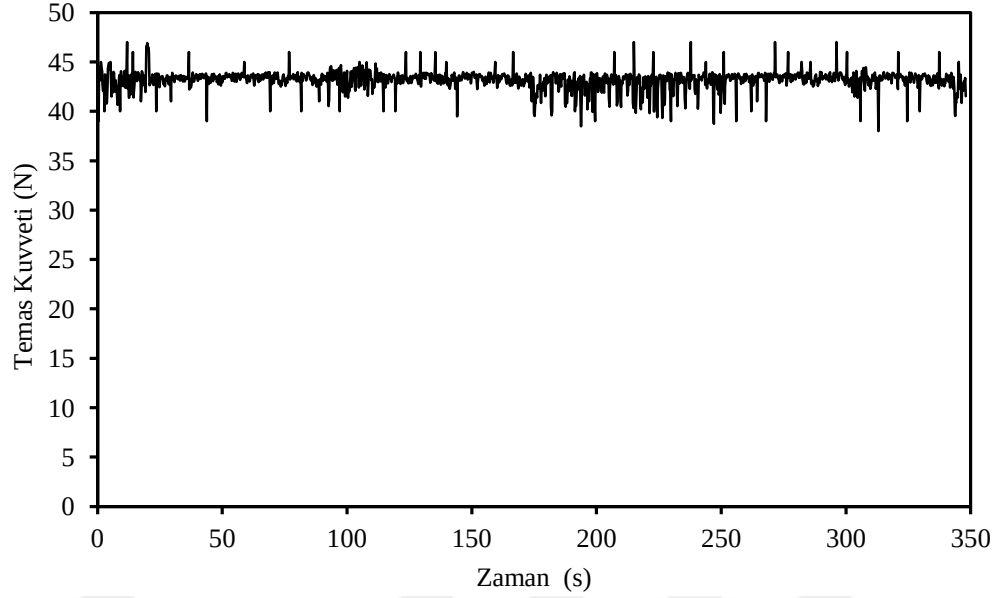


Şekil 5.5. A1B3C3 deney koşullarında zamana göre F_t değişimi

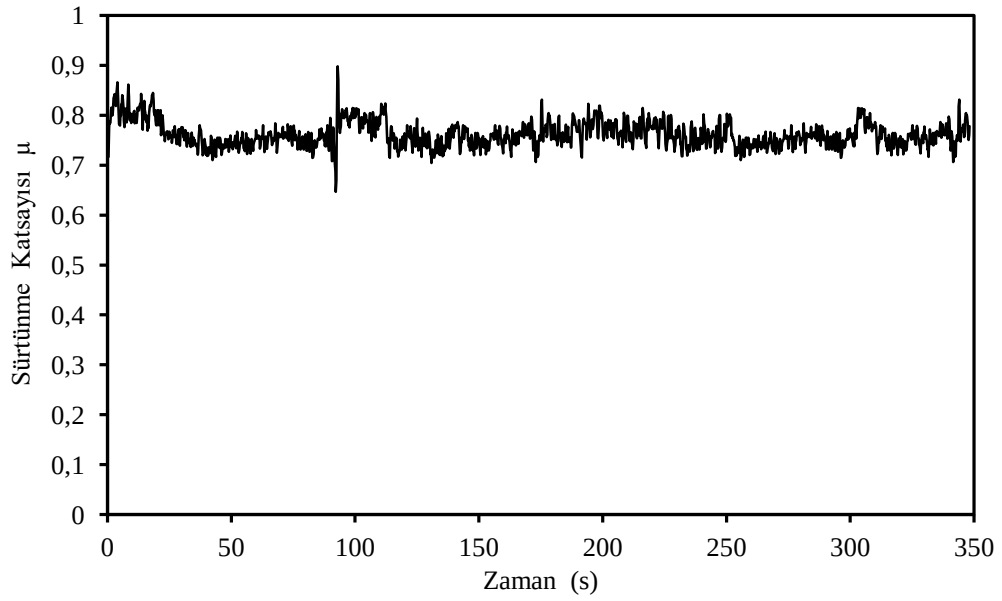


Şekil 5.6. A1B3C3 deney koşullarında zamana göre μ değişimi

A2B1C2 koşullarına göre yapılan deneysel ölçüm sonuçlarına göre temas kuvvetinin zamana bağlı değişimi Şekil 5.7’de, sürtünme katsayısının değişimi ise Şekil 5.8’de verilmiştir. Dinamik temas kuvvetinin 38 - 47 N aralığında değişim gösterdiği, fakat 44 N değerinde toplandığı görülmektedir. Böylelikle 44 N değerinde toplanan ölçümlerin deney başlangıcında kurgulanan temas kuvveti değer aralığı olan 40 – 45 N aralığı içerisinde kaldığı belirlenmiştir. Sürtünme katsayısı zamana bağlı ölçüm grafiği incelendiğinde sürtünme katsayısının başlangıçta yaklaşık 0,80 olduğu ardından 0,86 değerlerine yükseldiği ve daha sonra dalgalı bir şekilde tepki verdiği anlaşılmaktadır. Bu dalgalanmaya daha önceki deney koşullarına göre hızın bir miktar daha artmasının sebep olduğu düşünülmektedir. Zamanın ilerlemesiyle sürtünme katsayısı belirli değerler arasında saçılma göstermiş en yüksek 0,89 en düşük 0,66 ölçülmüştür. Genel ortalama sürtünme katsayısı değerine bakıldığında 0.76 ölçüm sonucu elde edilmiştir. A2B1C2 koşullarına göre yapılan deney sonrası grafit plakada aşınmadan kaynaklı 0,31 g kütle kaybı belirlenmiştir.



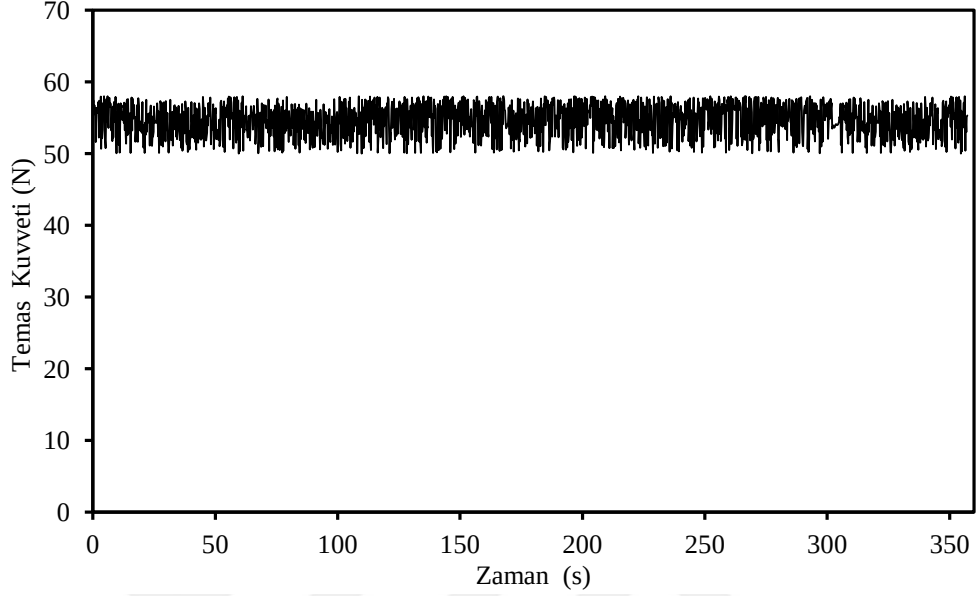
Şekil 5.7. A2B1C2 deney koşullarında zamana göre F_t değişimi



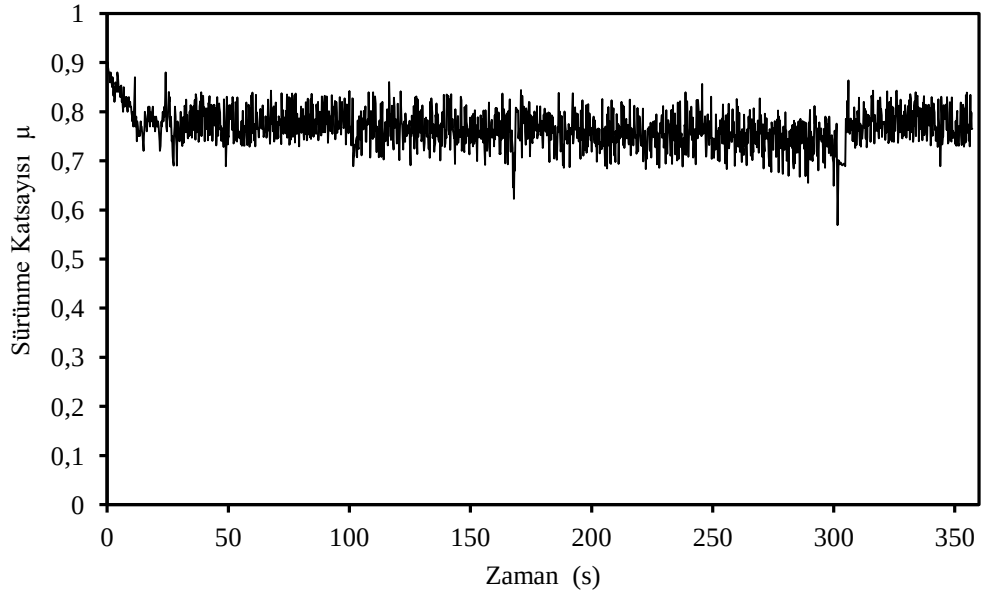
Şekil 5.8. A2B1C2 deney koşullarında zamana göre μ değişimi

A2B2C3 koşullarına göre yapılan deneysel ölçüm sonuçlarına göre temas kuvvetinin zamana bağlı değişimi Şekil 5.9’da, sürtünme katsayısının değişimi ise Şekil 5.10’da verilmiştir. Dinamik temas kuvvetinin 50 - 59 N aralığında değişim gösterdiği, fakat 55 N değerinde toplanan düzgün dağılım gösterdiği görülmektedir. Bu durumda temas kuvvetinin deney başlangıcında kurgulanan 50 - 55 N temas kuvveti aralığında kaldığı belirlenmiştir. Sürtünme katsayısının başlangıçta yaklaşık 0,88 olduğu ardından 0,76 değerlerine düştüğü grafikten anlaşılmaktadır. Zamanın ilerlemesiyle sürtünme katsayısı belirli değerler arasında saçılma göstermiş en

yüksek 0,88 en düşük 0,56 ölçülmüştür. Genel ortalama sürtünme katsayısı değerine bakıldığında 0,77 civarındadır. A2B2C3 koşullarına göre yapılan deney sonrası grafit plakada aşınmadan kaynaklı 0,40 g kütle kaybı belirlenmiştir.



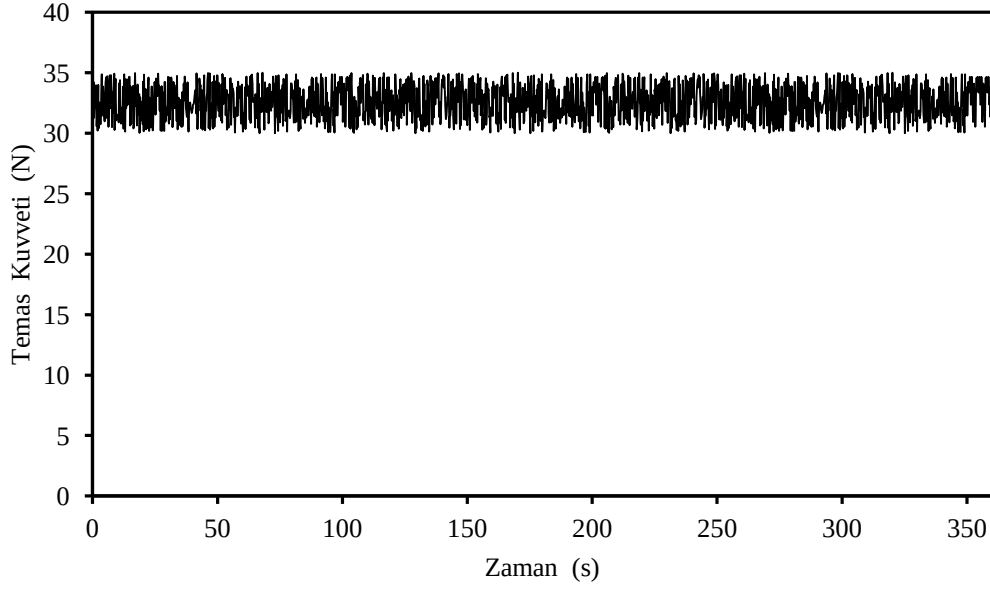
Şekil 5.9. A2B2C3 deney koşullarında zamana göre F_t değişimi



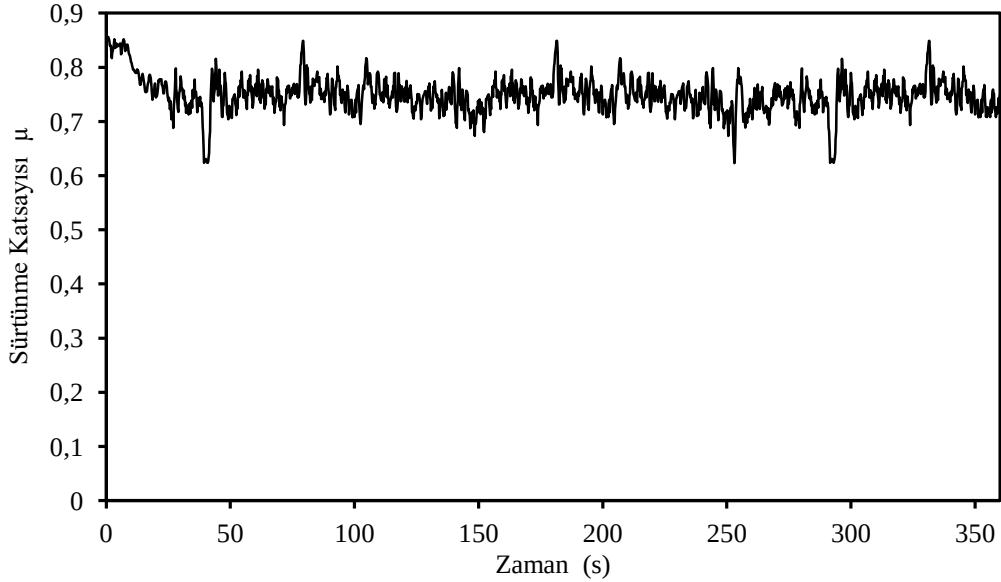
Şekil 5.10. A2B2C3 deney koşullarında zamana göre μ değişimi

A2B3C1 koşullarına göre yapılan deneysel ölçüm sonuçlarına göre temas kuvvetinin zamana bağlı değişimi Şekil 5.11’de, sürtünme katsayısı değişimi ise Şekil 5.12’de verilmiştir. Dinamik temas kuvvetinin kurgulanan 30 - 35 N aralığında düzgün dağılım gösterdiği görülmektedir. Sürtünme katsayısının başlangıçta yaklaşık

0,85 ardından 0,75 değerlerine indiği grafikten anlaşılmaktadır. Zamanın ilerlemesiyle sürtünme katsayısının belirli değerler arasında saçılma göstermiş en yüksek 0,88 en düşük 0,62 ölçülmüştür. Genel ortalama sürtünme katsayısı değerine bakıldığında 0,75 ölçüm sonucu elde edilmiştir. A2B3C1 koşullarına göre yapılan deney sonrası grafit plakada aşınmadan kaynaklı 0,18 g kütle kaybı belirlenmiştir.



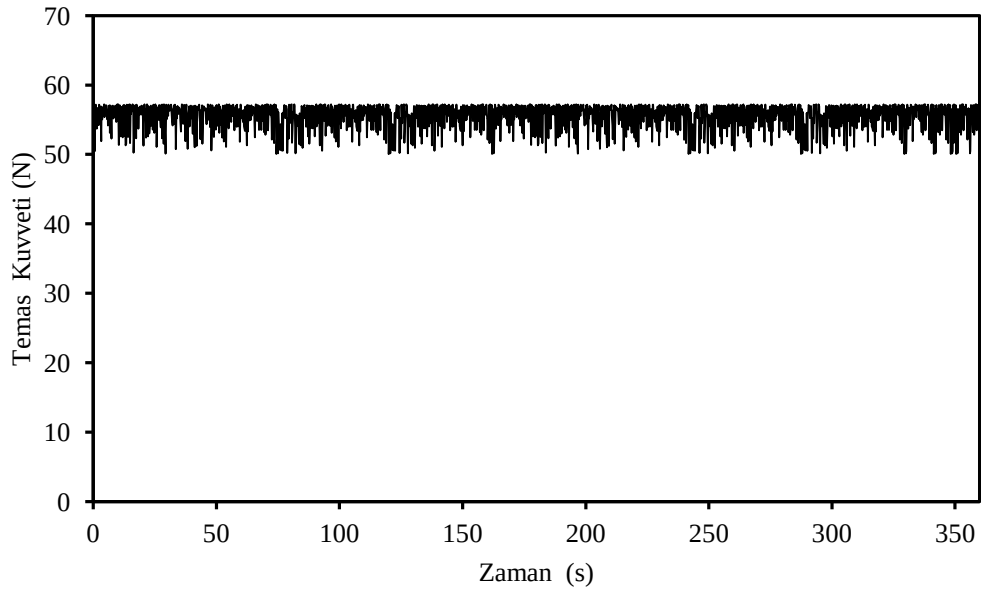
Şekil 5.11. A2B3C1 deney koşullarında zamana göre F_t değişimi



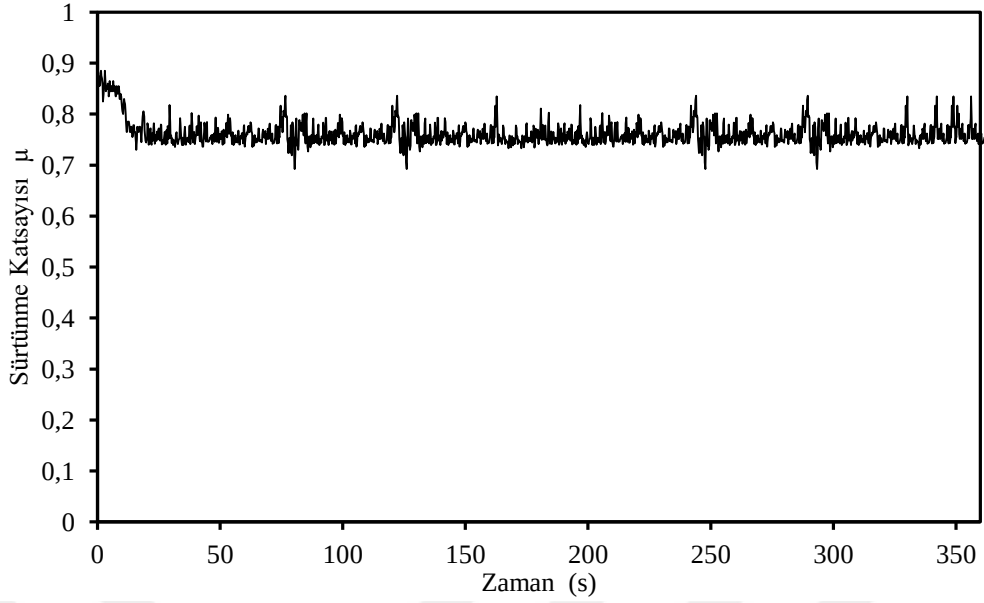
Şekil 5.12. A2B3C1 deney koşullarında zamana göre μ değişimi

A3B1C3 koşullarına göre yapılan deneysel ölçüm sonuçlarına göre temas kuvvetinin zamana bağlı değişimi Şekil 5.13’de, sürtünme katsayısının değişimi ise

Şekil 5.14’ de verilmiştir. Dinamik temas kuvvetinin kurgulanan 51 - 57 N aralığında saçılan bir dağılım gösterdiği ve 56 N değerinde genel olarak toplandığı görülmektedir. Bu değer deney önce kurgulanan 50-55 N temas kuvveti değer aralığının çok az miktar dışında kalsa da ihmal edilecek bir fark oluşturmaktadır. Sürtünme katsayısının başlangıçta yaklaşık 0,87 ardından 0,76 değerine düştüğü grafikten anlaşılmaktadır. Zamanın ilerlemesiyle sürtünme katsayısı belirli değerler arasında saçılma göstermiş en yüksek 0,83 en düşük 0,70 ölçülmüştür. Genel ortalama sürtünme katsayısı değerine bakıldığında 0,76 ölçüm sonucu elde edilmiştir. A3B1C3 koşullarına göre yapılan deney sonrası grafit plakada aşınmadan kaynaklı 0,26 g kütle kaybı belirlenmiştir.

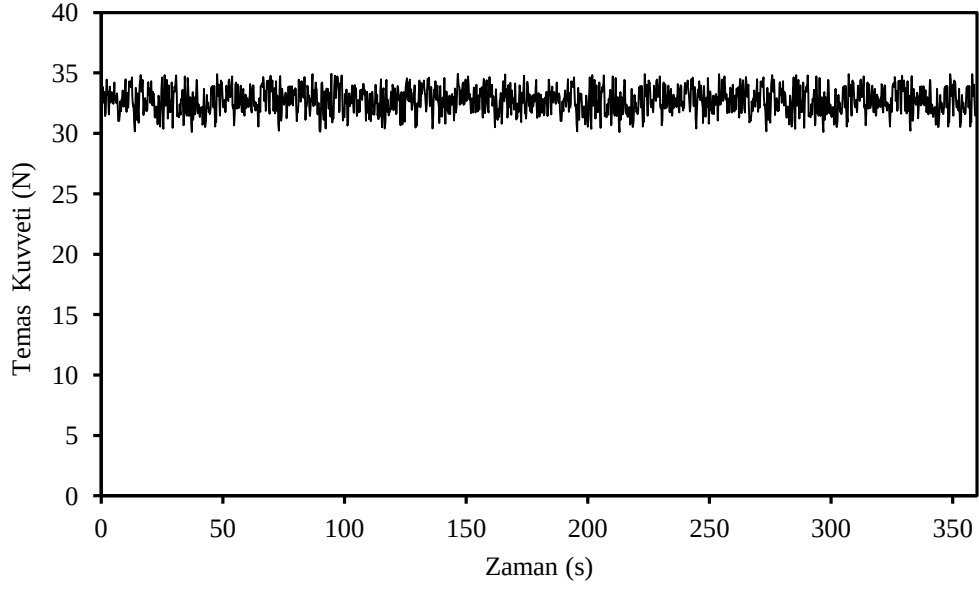


Şekil 5.13. A3B1C3 deney koşullarında zamana göre F_t değişimi

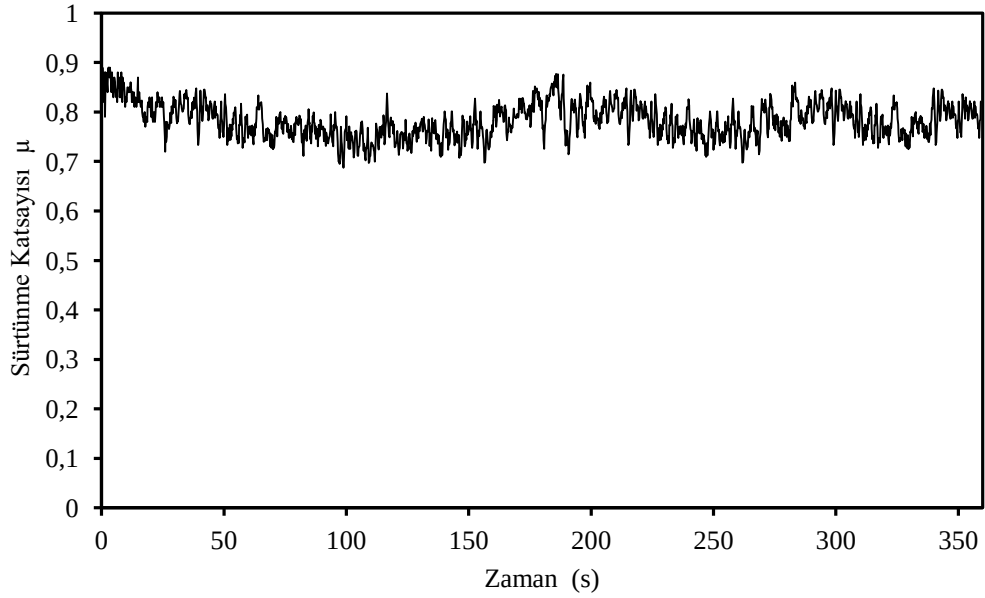


Şekil 5.14. A3B1C3 deney koşullarında zamana göre μ değişimi

A3B2C1 koşullarına göre yapılan deneysel ölçüm sonuçlarına göre temas kuvvetinin zamana bağlı değişimi Şekil 5.15’de, sürtünme katsayısının değişimi ise Şekil 5.16’da verilmiştir. Dinamik temas kuvvetinin kurgulanan 30 - 35 N aralığında düzgün dağılım gösterdiği ve 33 N değerinde genel olarak toplandığı görülmektedir. Sürtünme katsayısının başlangıçta yaklaşık 0,86 ardından 0,73 değerine düştüğü tekrar 0,81 değerlerine çıkıp inişli çıkışlı bir değişim içinde olduğu grafikten anlaşılmaktadır. Zamanın ilerlemesiyle sürtünme katsayısı belirli değerler arasında saçılma göstermiş en yüksek 0,87 en düşük 0,70 ölçülmüştür. Genel ortalama sürtünme katsayısı değerine bakıldığında 0,78 olarak ölçüm sonuçları elde edilmiştir. A3B2C1 koşullarına göre yapılan deney sonrası grafit plakada aşınmadan kaynaklı 0,18 g kütle kaybı belirlenmiştir.



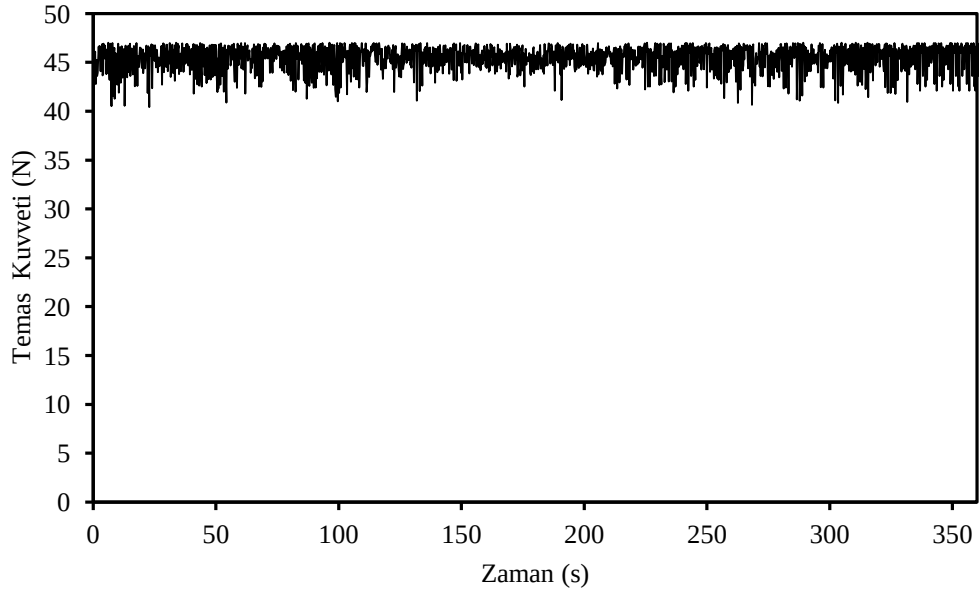
Şekil 5.15. A3B2C1 deney koşullarında zamana göre F_t değişimi



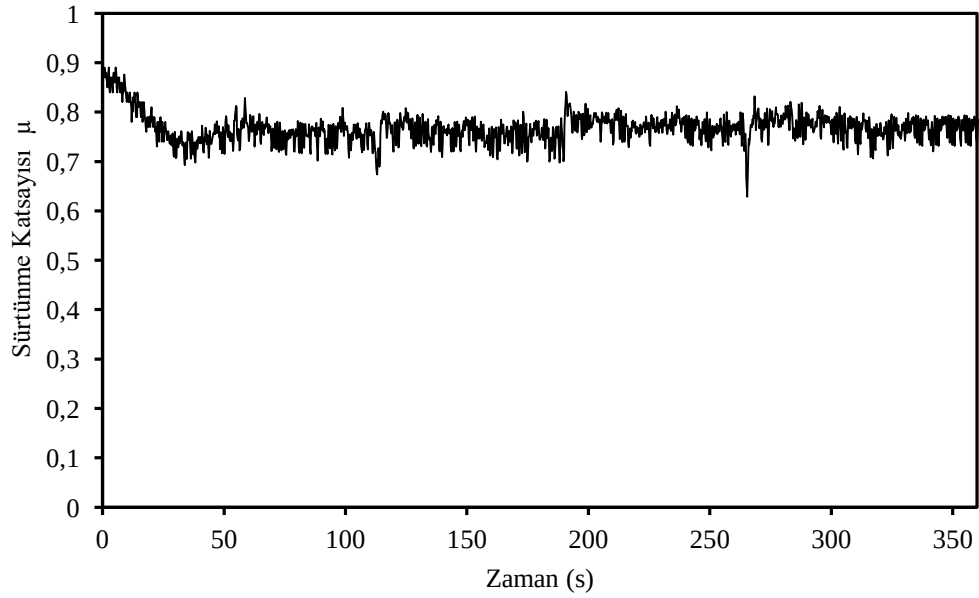
Şekil 5.16. A3B2C1 deney koşullarında zamana göre μ değişimi

A3B3C2 koşullarına göre yapılan deneysel ölçüm sonuçlarına göre temas kuvvetinin zamana bağlı değişimi Şekil 5.17’de, sürtünme katsayısının değişimi ise Şekil 5.18’ de verilmiştir. Dinamik temas kuvvetinin kurgulanan 40 - 46 N aralığında saçılan bir dağılım gösterdiği ve genel olarak 46 N değerinde toplandığı görülmektedir. Sürtünme katsayısının başlangıçta yaklaşık 0,88 ardından 0,73 değerine indiği ardından tekrar 0,77 değerlerine çıkıp inişli çıkışlı bir değişim içinde

olduğu grafikten anlaşılmaktadır. Zamanın ilerlemesiyle sürtünme katsayısı belirli değerler arasında saçılma göstermiş en yüksek 0,88 en düşük 0,64 ölçülmüştür. Genel ortalama sürtünme katsayısı değerine bakıldığında 0,76 olarak ölçüm sonuçları elde edilmiştir. A3B3C2 koşullarına göre yapılan deney sonrası grafit plakada aşınmadan kaynaklı 0,35 g kütle kaybı belirlenmiştir.



Şekil 5.17. A3B3C2 deney koşullarında zamana göre F_t değişimi



Şekil 5.18. A3B3C2 deney koşullarında zamana göre μ değişimi

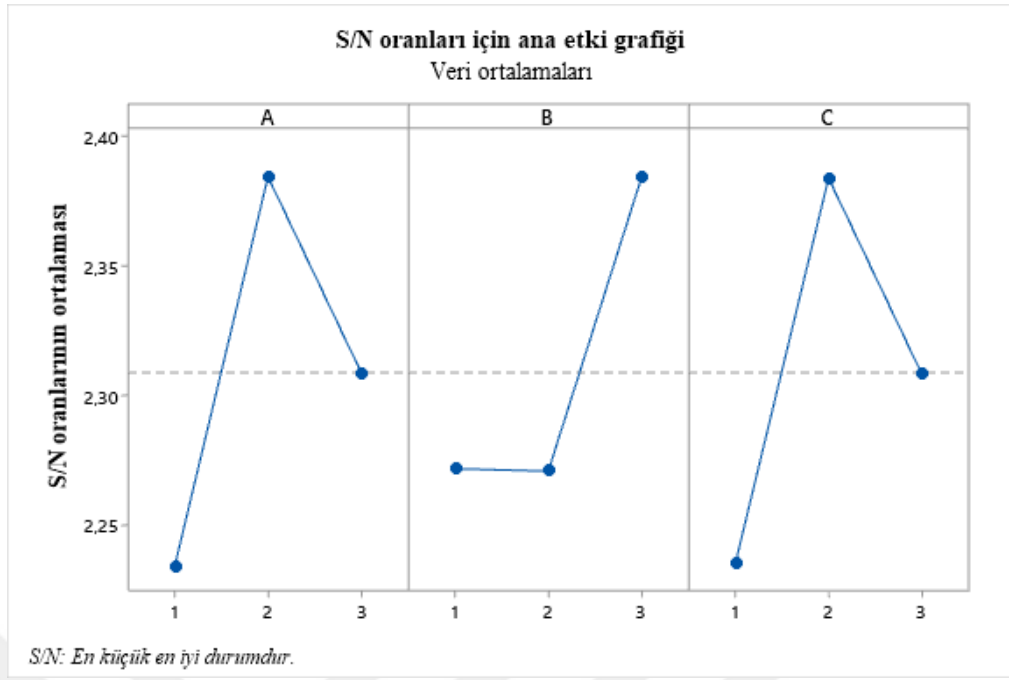
Tablo 5.1. L9 ortogonal dizisine göre ölçülen sürtünme katsayıları ve hesaplanan S/N oranları

A	B	C	μ	S/N oranı
1	1	1	0.79	2.04746
1	2	2	0.76	2.38373
1	3	3	0.77	2.27019
2	1	2	0.76	2.38373
2	2	3	0.77	2.27019
2	3	1	0.75	2.49877
3	1	3	0.76	2.38373
3	2	1	0.78	2.15811
3	3	2	0.76	2.38373

Ana etki grafikleri, deney tasarımında parametrelerin deney sonuçları ile ilişkisi arasındaki önemi göstermektedir. Bir seviyenin diğerine kıyasla ortalamaya göre değeri arttıkça buradaki fark ana etkisidir (Gologlu ve Sakarya, 2008). Bu sebeple, Tablo 5.2’de verilen ortalamaların cevap tablosunda ve Şekil 5.19’da verilen ortalamaların ana etki grafiğinde görüldüğü gibi en fazla artışlar A1B1C1 koşullarında görülmüştür. Ayrıca, S/N oranlarının ana etki grafiğinde en küçük değerler A1B1C1 koşulu olarak hesaplanmış ve verilerle örtüşmekte olduğu görülmüştür. Bu sebeple optimumum koşulun A1B1C1 koşulu olduğu söylenebilir. L9 dizisine göre yapılan deneyler ile aynı koşul gözlemlendiğinden bu koşulda ölçülen sürtünme katsayısının tekrardan doğrulanmasına gerek yoktur.

Tablo 5.2. Ortalamaların cevap tablosu

SEVİYE	A	B	C
1	0.7733	0.7700	0.7733
2	0.7600	0.7700	0.7600
3	0.7667	0.7600	0.7667
DELTA DERECEİ	2	3	1



Şekil 5.19. S/N oranlarının ana etki grafiği

Deneyler farklı seviyelerde belirlenen faktörlerin (hız, mesafe ve temas kuvveti) ölçülen sürtünme katsayısı değerleri üzerinde etkili olup olmadığını araştırmak için S/N oranları üzerinde Varyans Analizi (ANOVA) uygulanmıştır (Rajabi vd., 2015; Prates vd., 2018). Uygulanan ANOVA %95 güvenirlilik ile kurgulanmış olup, α güven aralığı değeri 0,05'tir. ANOVA'nın sonuçları Tablo 5.3' de faktörlerin yüzde etki katkıları ve α değerleri olarak gösterilmiştir. Üç faktöründe α değerleri 0,05 değerinden büyük hesaplandığı için bu faktörlerin sürtünme katsayıları üzerinde istatistiksel olarak etkili olmadıkları görülmüştür. Bir başka ifade ile sürtünme katsayısı değerleri bu üç parametrenin değişiminden kayda değer şekilde etkilenmemekte ve değişmemektedir.

Tablo 5.3. Faktörlerin sürtünme katsayısı üzerindeki etkisinin incelenmesi

Faktörler	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Düzeltilmiş Kareler Toplamı	Düzeltilmiş Ortalama Kareler	F	P	% Katkı Oranı
A	2	0.03395	0.03395	0.01697	0.57	0.638	22.26
B	2	0.02557	0.02557	0.01279	0.43	0.700	16.76
C	2	0.03328	0.03328	0.01664	0.56	0.560	21.82
HATA	2	0.05974	0.05974	0.02987			39.16
TOPLAM	8	0.15254					100

L9 ortogonal dizisine göre yapılan kuru şartta sürtünme ve aşınma deneylerinde, imalatı yapılan deney düzeneğinin programlanabilir, senkron bir

şekilde çalışabildiği test edilmiş ve doğrulanmıştır. Ayrıca çalışma sırasında elde edilen ölçüm sonuçlarından anlaşıldığı üzere, değişen deney koşullarına göre sistemin kararlı ve mantıklı bir şekilde cevap verdiği görülmüştür. Bu doğrulamanın ardından Samsun şehri OMÜ Yurtlar – Tekkeköy HRS hattı güzergahının kuru ve sulu şartta aşınma deneylerinin imalatı yapılan deney düzeneğinde istenilen şekilde yapılabileceği ortaya konulmuştur.

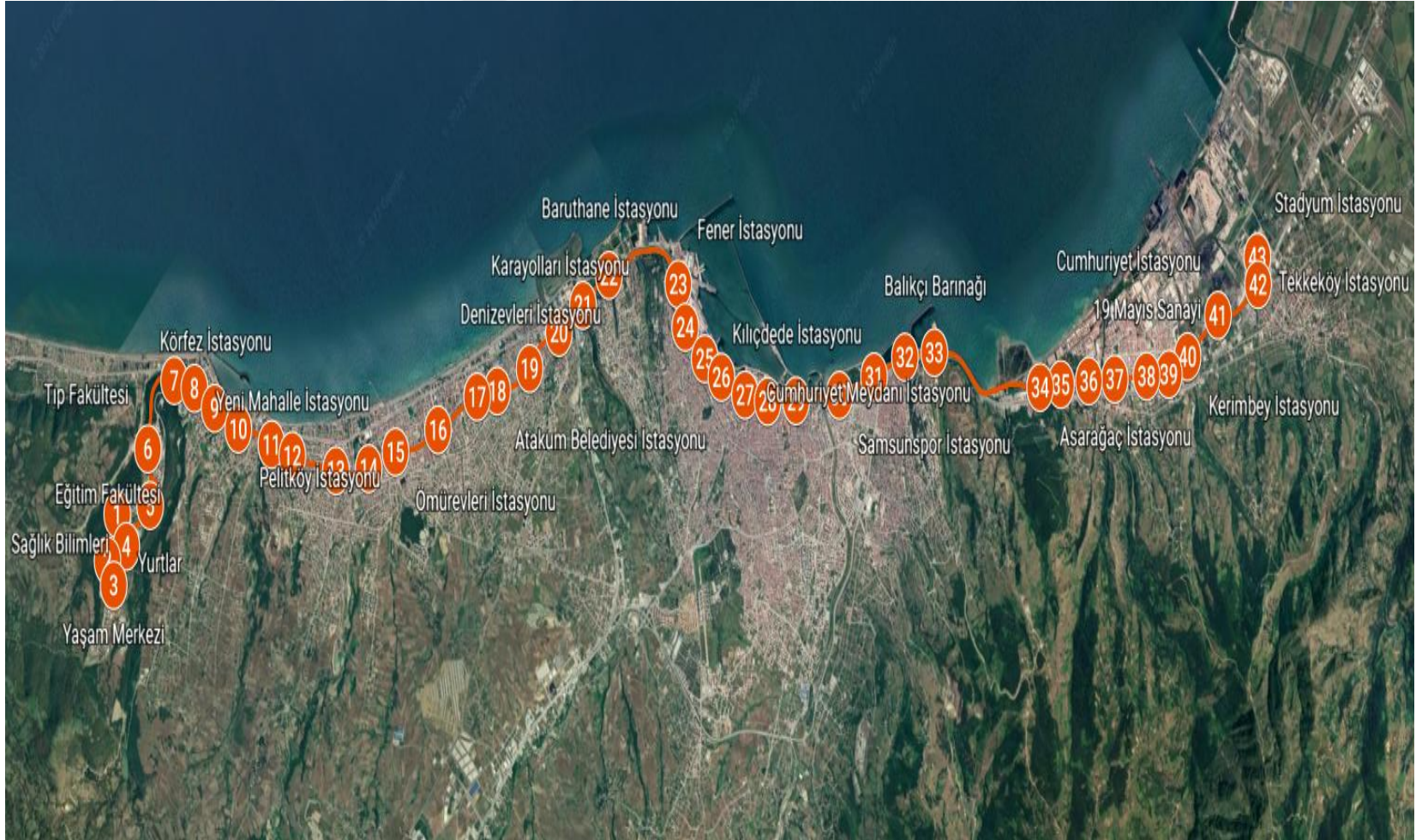
L9 ortogonal dizisine göre yapılan kuru şartta sürtünme ve aşınma deneylerinden elde edilen veriler incelendiğinde, aşındırma çemberi ile grafit plakanın teması sırasında oluşan titreşimin temas kuvvetini ve sürtünme kuvvetini etkilediği bunun sonucunda sürtünme katsayısı ölçümünün önemsiz bir değişimde olsa ortalama değerden farklı alt ve üst değerler verdiği görülmüştür. Grafiklerde dönme hareketi sırasında meydana gelen titreşimden kaynaklı saçılmalar görülse de temas kuvvetinin artışıyla ölçülen sürtünme katsayısı alt ve üst değerler arasında fark azalmıştır. Sürtünme katsayısı değerinin deney başlangıcında yüksek değerlerde ölçülmesinde, statik sürtünme yani durağan halden hareket haline geçiş anında oluşan yüksek sürtünme kuvvetinin etkisi önemli rol oynamaktadır. Çünkü durağan halde grafit plaka yüzeyinde aşındırma çemberinin hareketine karşı bir direnç söz konusudur ve hareketin sağlanması için daha yüksek bir kuvvete ihtiyaç duyulmaktadır (Babalık ve Çavdar, 2018).

Yapılan ölçümlerden elde edilen sürtünme katsayısı değişimleri incelendiğinde deney başlangıcında durağan halden hareket haline geçiş sırasında sürtünme katsayısı ölçümünde yaşanan değişim dikkate alınmadığı takdirde, zamanın ilerlemesiyle beraber sürtünme katsayısı ölçüm değerinin kararlı bir ortalama değerde deney sonuna kadar değişmeden devam ettiği görülmektedir. Literatürde aşınma üzerine yapılan çalışmalardan da anlaşılabileceği üzere aşınma çifti arasında sürtünme katsayısı değerinin değişmesi için aşınma çifti malzemelerinden birinin değişmesi veya aşınma çiftinin temas ettiği ortam şartlarının değişmesi gerekmektedir. L9 ortogonal dizisine göre yaptığımız her deneyde ne malzeme çifti ne de aşınma çiftinin ortam şartları değişmiştir. Bu nedenle sürtünme katsayısı ölçümlerinin birbirine oldukça yakın çıkması beklenen ve doğal bir durumdur (Shobert, 1965; Kalpakjian ve Schmid, 2009; Babalık ve Çavdar, 2018).

5.3. Samsun İli OMÜ Yurtlar-Tekkeköy HRS Güzergâh Hattının Veri  alışması

Samsun ili OM  Yurtlar-Tekkeköy HRS hattı güzergahı boyunca bakır temas teliyle akım toplayıcı grafit plakaların mekanik aşınmasını simüle edebilmek amacıyla önce HRS' nin güzergah hattı çalışma parametreleri detaylıca incelenmiştir. şekil 5.20'de harita üzerinden güzergah hattı gösterilen HRS, 34 430 m (~ 35 km) hat uzunluğuna ve 43 durağa sahiptir.

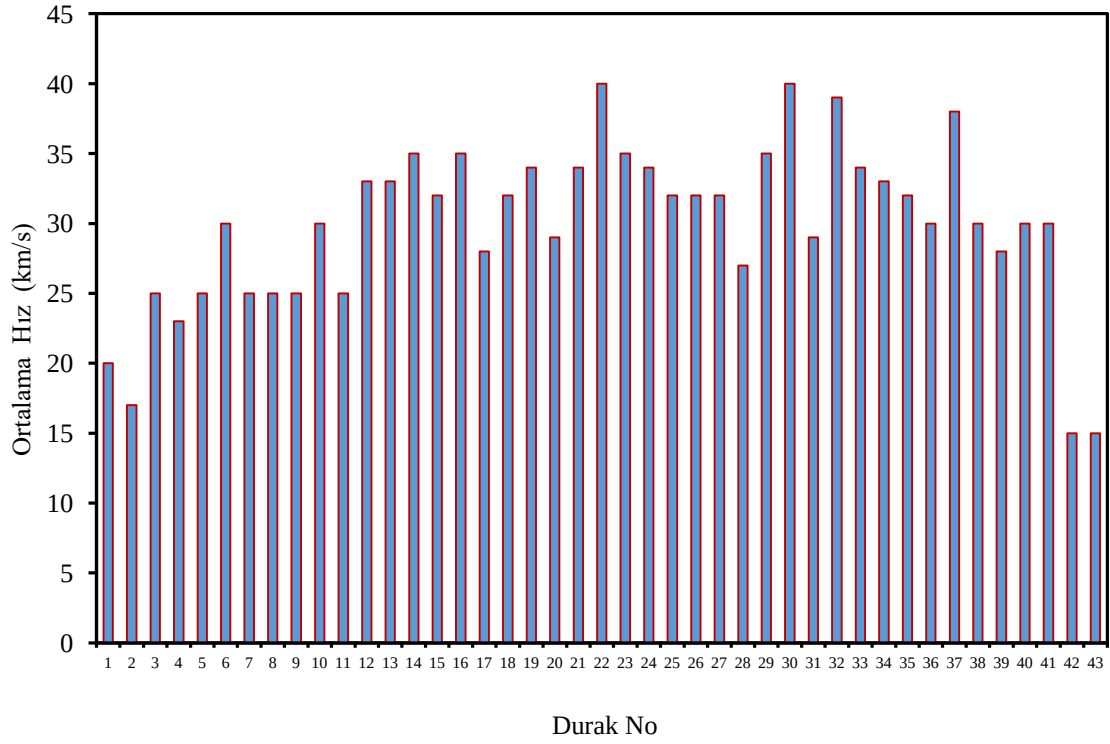
SAMULAş A.ř firmasından alınan HRS hareket verileri ve HRS hattında yolculuk sırasında mobil uygulama ile elde edilen veriler analiz edilmiş ve irdelenmiştir. Analiz edilen verilerden HRS' nin hat üzerinde çalışması sırasında duraklar arasında yaptığı mesafe, hız, bekleme süresi, yavaşlama ve hızlanma süresi gibi veriler incelenmiş ve imalatı yapılan deney düzeneğinin kontrol analiz yazılımına giriş verisi haline getirilmiştir. HRS' nin güzergah hattı boyunca çalışması sırasında duraklarda belirli bir standart bekleme süresi olmadığı, bu s renin vatman adı verilen HRS sürücüsü tarafından yolcu yoğunluğu ve trafik durumuna göre belirlendiği anlaşılmıştır. Bu sebeple deney düzeneğimizin kontrol analiz yazılımına girilecek bekleme süresi değeri değişken değerler girilmiştir. HRS' nin duraklar arası mesafe değeri HRS hareket verilerinden alındığı gibi kabul edilmiş ve deney düzeneğinin kontrol analiz yazılımına girilmiştir. Ayrıca HRS' nin kumanda kontrol yazılımında maksimum hız değeri olarak belirlenen 55 km/s hızına ulaşabildiği, fakat bu hıza ancak yol durumunun düz, yani virajsız olduğu bölümlerde anlık olarak ulaşılabildiği belirlenmiştir. HRS' nin güzergah boyunca çalışması sırasında duraklar arası mesafe alınırken SAMULAş A.ř. firmasından alınan hız veri tablosu analiz edilmiş ve HRS' nin anlık hızının yaklaşık her 3 saniyede ölçüm yapılarak kaydedildiği görülmüştür. Bu sebeple deney düzeneğimizin kontrol analiz yazılımına girilecek hız değeri için durak arasında her 3 saniyede bir alınan değerlerin ortalama değeri alınarak, her durak arası mesafe için ortalama hız değeri belirlenmiştir. Böylelikle OM  Yurtlar-Tekkeköy güzergah hattı için deney düzeneğinin kontrol analiz yazılımına girilecek durak verileri Tablo 5.4'deki gibi oluşturulmuştur. Ayrıca HRS' nin güzergah boyunca ortalama hızının değişim grafiği oluşturulmuş ve 5.21'de verilmiştir.



Şekil 5.20. Samsun HRS güzergahı

Tablo 5.4. Deney düzeneği kontrol analiz yazılımına girilecek durak ve parkur verileri

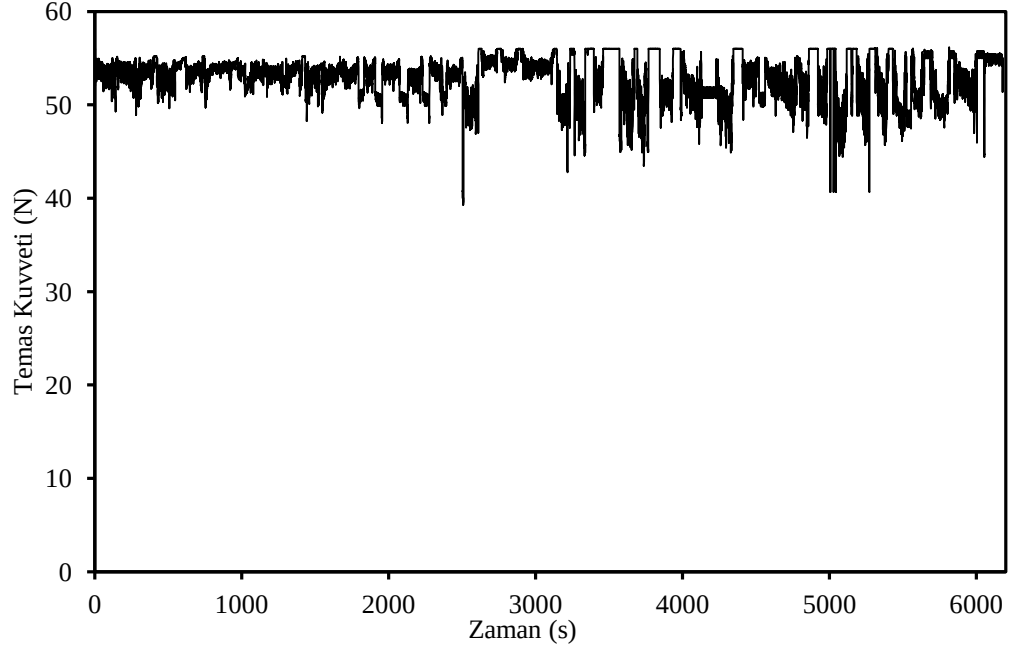
Durak No	Durak Adı	Mesafe (m)	Hızlanma Süresi (s)	Ortalama Hız (km/s)	Yavaşlama Süresi (s)
1	Yurtlar	650	25	20	25
2	Eğitim Fakültesi	620	25	17	25
3	Yaşam Merkezi	600	25	25	25
4	Sağlık Bilimleri	850	25	23	25
5	Diş Hekimliği	850	25	25	25
6	Tıp Fakültesi	1350	25	30	25
7	Lojmanlar	600	25	25	25
8	OMÜ Rektörlük	550	25	25	25
9	Körfez	750	25	25	25
10	Pelitköy	800	25	30	25
11	Kurupelit	600	25	25	25
12	Yenimahalle	1100	25	33	25
13	Atakent	800	25	33	25
14	Çobanlı	600	25	35	25
15	Ömürevleri	1000	25	32	25
16	Türkiş	1000	25	35	25
17	Mimar Sinan	550	25	28	25
18	Atakum Belediyesi	900	25	32	25
19	Denizevleri	850	25	34	25
20	Karayolları	700	25	29	25
21	Güzel Sanatlar	800	25	34	25
22	Baruthane	1800	25	40	25
23	Fener	670	25	35	25
24	Gençlik Parkı	650	25	34	25
25	Liman	480	15	32	15
26	Büyük Camii	600	25	32	25
27	Cumhuriyet Meydanı	540	25	32	25
28	Gar	640	25	27	25
29	Kılıçdede	1050	25	35	25
30	Samsunspor	890	25	40	25
31	Belediye Evleri	750	25	29	25
32	Mavi Işıklar	2650	25	39	25
33	Balıkçı Barınağı	480	15	34	15
34	Asarağaç	480	15	33	15
35	Kirazlık	700	25	32	25
36	Örnek Sanayi	630	25	30	25
37	İlkadım Sanayi	640	25	38	25
38	19 Mayıs Sanayi	640	25	30	25
39	Organize Sanayi	510	15	28	15
40	Kerimbey	960	25	30	25
41	Cumhuriyet	1150	25	30	25
42	Tekkeköy	500	15	15	15
43	Stadyum	400	15	15	15



Şekil 5.21. Ortalama hız değerleri

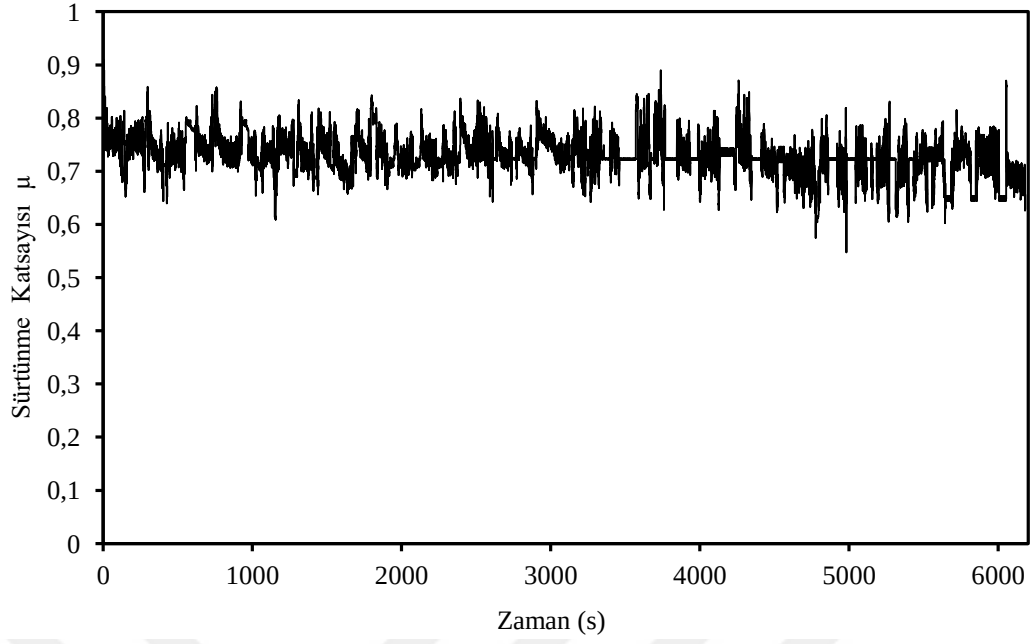
5.4. Samsun İli OMÜ Yurtlar-Tekkeköy HRS Güzergâh Hattının Kuru ve Sulu Şartlarda Aşınma Deneysel Çalışması

Samsun ili OMÜ Yurtlar-Tekkeköy HRS güzergah hattının bakır temas teliyle akım toplayıcı grafit plakaların kuru şartta mekanik aşınmasını simüle edebilmek amacıyla Tablo 5.4’de verilen durak verileri kontrol analiz yazılımına girilmiş ve 50-55 N temas kuvveti altında deneyler gerçekleştirilmiştir. Parkurun tamamlanması ile birlikte hat boyunca ölçülen temas kuvvetinin değişimi Şekil 5.22’de verilmiştir. Grafikten anlaşılabacağı üzere temas kuvveti değişen deney hızlarında dalgalı bir değişim gösterse de genel olarak uygulanan 50-55 N aralığında ölçülmüştür. HRS’ nin gerçek hareket şartlarında yaptığı gibi durak verilerine göre oluşturulan deney parkurunda, durak mesafelerine gelindiğinde deney düzeneği durmuş, değişken bekleme sürelerinde beklemiş ve bunun sonucunda temas kuvveti değişim grafiğinde beklemeyi ifade eden belirgin bekleme zaman aralıkları oluşmuştur.



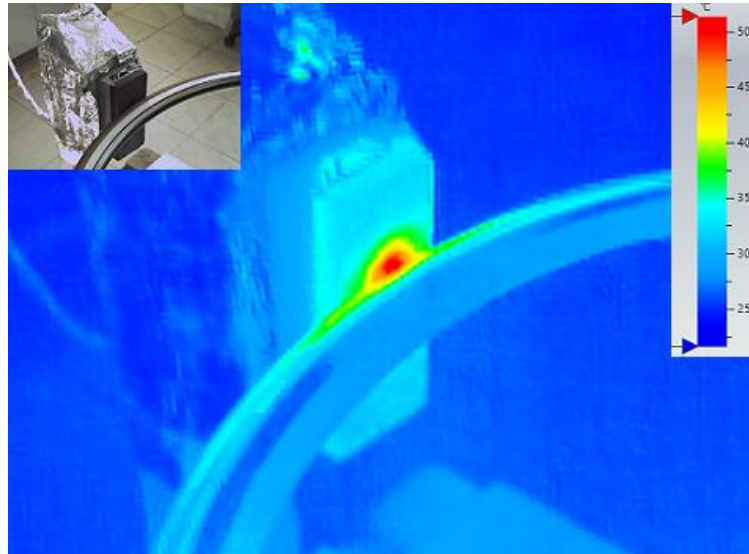
Şekil 5.22. Kuru şart deney koşulunda zamana göre F_t değişimi

Kuru şartta gerçekleştirilen deney rotası boyunca ölçülen F_t ve F_r (F_s , sürtünme katsayısı) kuvvet değerleri için denklem 4.8 kullanılarak sürtünme katsayısı değerleri hesaplanmış ve deney parkuru boyunca zamana göre değişimini gösteren Şekil 5.23 grafiği elde edilmiştir. Sürtünme katsayısı başlangıçta yaklaşık 0,89 ve zamanın ilerlemesiyle belirli değerler arasında saçılma göstermiş, en yüksek 0,89 en düşük 0,54 olarak ölçülmüştür. Genel ortalama sürtünme katsayısı değerine bakıldığında 0,75 olarak ölçüm sonuçları elde edilmiştir. Kuru şartta gerçekleştirilen deney rotası sonrası grafit plakada aşınmadan kaynaklı 0,72 g kütle kaybı belirlenmiştir.



Şekil 5.23. Kuru şart deney koşulunda zaman göre μ değişimi

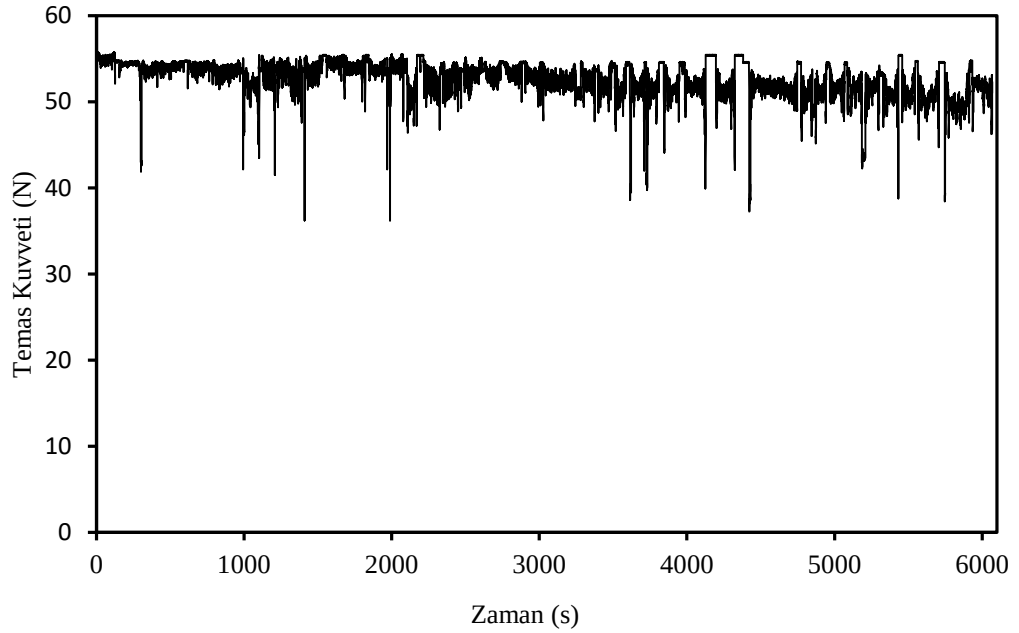
Kuru şartta gerçekleştirilen parkur çalışması sırasında aşınma çifti arasında oluşan çalışma sıcaklık değeri termal kamera ile 55 °C olarak ölçülmüştür. Sıcaklık ölçümü sırasında elde edilen analiz görüntüsü Şekil 5.24’de verilmiştir. Çalışma sırasında ortaya çıkan sıcaklık değeri elektrik akımı olmadan yapılmış çalışmalar ile yakın ölçüm sonucu vermiştir. Elektrik akımı altındaki deneysel çalışmalarda çalışma sıcaklığının daha yüksek değerlere ulaştığı bilinmektedir (Zhang vd., 2018; Ding vd., 2011a).



Şekil 5.24. Kuru temas şartında sıcaklık ölçümü

Samsun ili OMÜ Yurtlar-Tekkeköy HRS güzergah hattının, bakır temas teliyle akım toplayıcı grafit plakaların sulu şartta mekanik aşınmasını simüle edebilmek amacıyla Tablo 5.4’de verilen durak verileri kontrol analiz yazılımına girilmiştir. 50-55 N temas kuvveti altında deneyler gerçekleştirilmiştir. Sürtünme sırasında aşınma çifti arasına test parkuru sonuna kadar debisi 1,3 ml/s su gönderilmiştir.

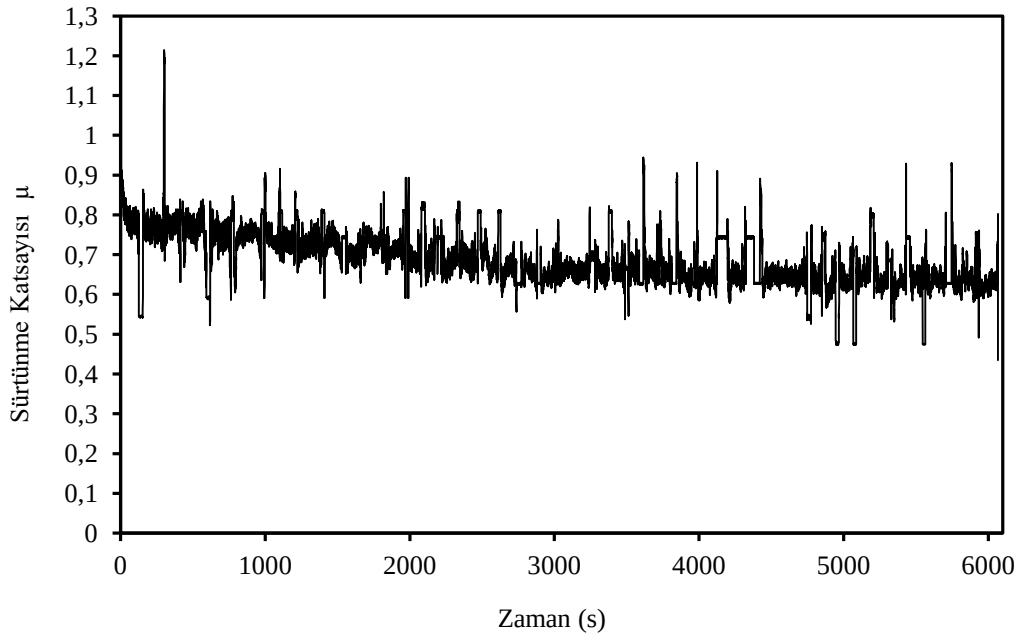
Hattın tamamlanması ile birlikte parkur boyunca ölçülen temas kuvvetinin değişimi Şekil 5.25’de verilmiştir. Grafikten anlaşılabacağı üzere temas kuvveti değişen deney hızlarında dalgalı bir değişim göstermiştir. Genel olarak uygulanan kuvvet 50-55 N aralığında ölçülmüştür. HRS’nin gerçek hareket şartlarında durak verilerine göre oluşturulan test rotasında, durak mesafelerine varıldığında durmuş, değişken bekleme süresinde beklemiş ve bunun sonucunda tıpkı kuru şartta gerçekleştirilen test rotasında olduğu gibi temas kuvveti grafiğinde belirgin bekleme zaman aralıkları oluşmuştur.



Şekil 5.25. Sulu şart deney koşulunda zamana göre F_t değişimi

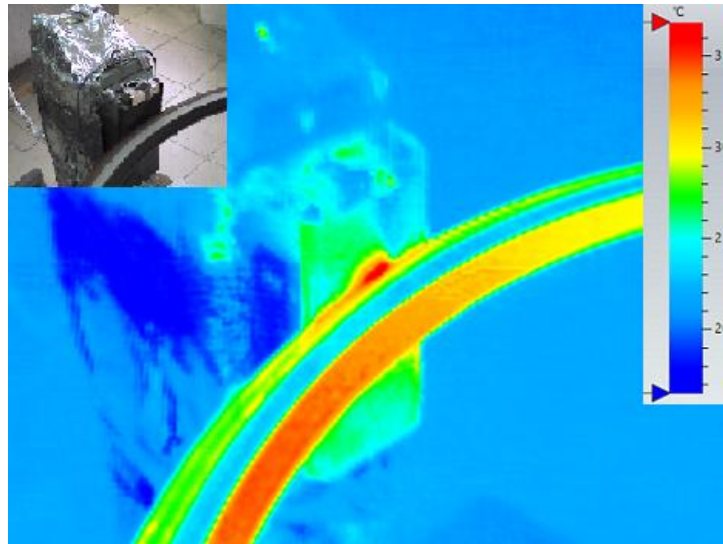
Sulu şartta test rotasında F_t ve F_r (F_s , sürtünme kuvveti) kuvvet değerleri için denklem 4.8 kullanılarak sürtünme katsayısı hesaplanmış ve test rotası boyunca zamana göre değişimini gösteren Şekil 5.26 grafiği verilmiştir. Sürtünme katsayısı başlangıçta yaklaşık 0,88 iken zamanla saçılma göstermiş, en yüksek 1,21, en düşük 0,43 ölçülmüştür. Genel ortalama sürtünme katsayısı 0,65 ölçülmüştür. Sulu şartta

gerçekleştirilen test rotası sonrası, grafit test plakasında 0,98 g kütle kaybı belirlenmiştir.



Şekil 5.26. Sulu şart deney koşulunda zamana göre μ değişimi

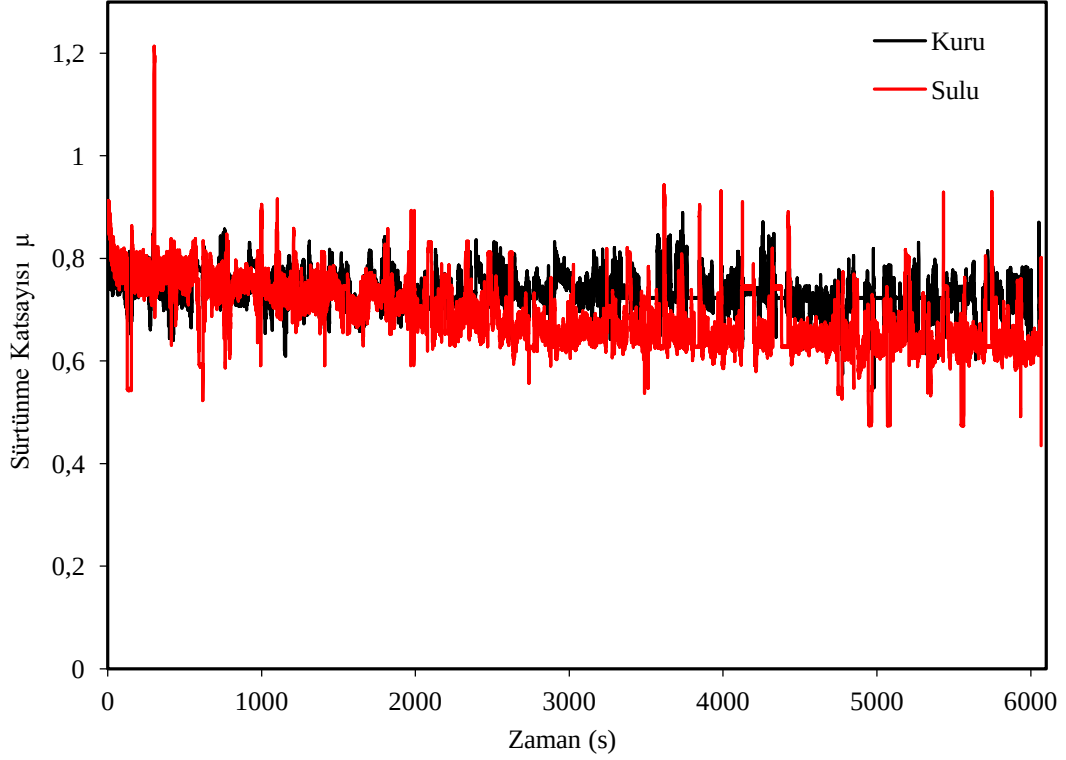
Sulu şartta gerçekleştirilen test rotasında aşınma çifti arasında oluşan çalışma sıcaklık değeri termal kamera ile 32 °C ölçülmüştür. Sıcaklık ölçümünde elde edilen ısı ldeğişim görseli Şekil 5.27’de verilmiştir.



Şekil 5.27. Sulu temas şartında sıcaklık ölçümü

Kuru ve sulu şartlarda elde edilen sürtünme katsayısı değişimlerinin karşılaştırma grafiği Şekil 5.28’de verilmiştir. Grafikte, aşınma çifti arasına su gönderilmesiyle sürtünme katsayısı değeri düşmüştür. Durak verileri ve temas

kuvveti değerlerinin değişmediği halde sürtünme katsayısı değerinin azalmasında, suyun aşınma bölgesinde oluşturduğu yağlayıcı su filmi tabakasının etkili olduğu düşünülmektedir (Wang vd., 2020).



Şekil 5.28. Kuru ve sulu şart deney koşullarında zamana göre μ değişimi

Kuru ve sulu şartlarda gerçekleştirilen deneyler sonucunda sulu şartta gerçekleştirilen deneyin sürtünme katsayısı değerinin kuru şarta kıyasla azaldığı kütle kaybının ise arttığı belirlenmiştir. Denklem 5.2'ye göre grafit plakaların kuru ve sulu şartlarda gerçekleştirilen deneyler sonucu elde aşınma oranları hesaplanmıştır (Mei, 2020; Huang vd., 2020). Ayrıca, kuru şartta gerçekleştirilen deneyler sırasında 55 °C olarak ölçülen çalışma sıcaklığının, sulu şartta suyun soğutma etkisiyle 32 °C'ye düştüğü saptanmıştır.

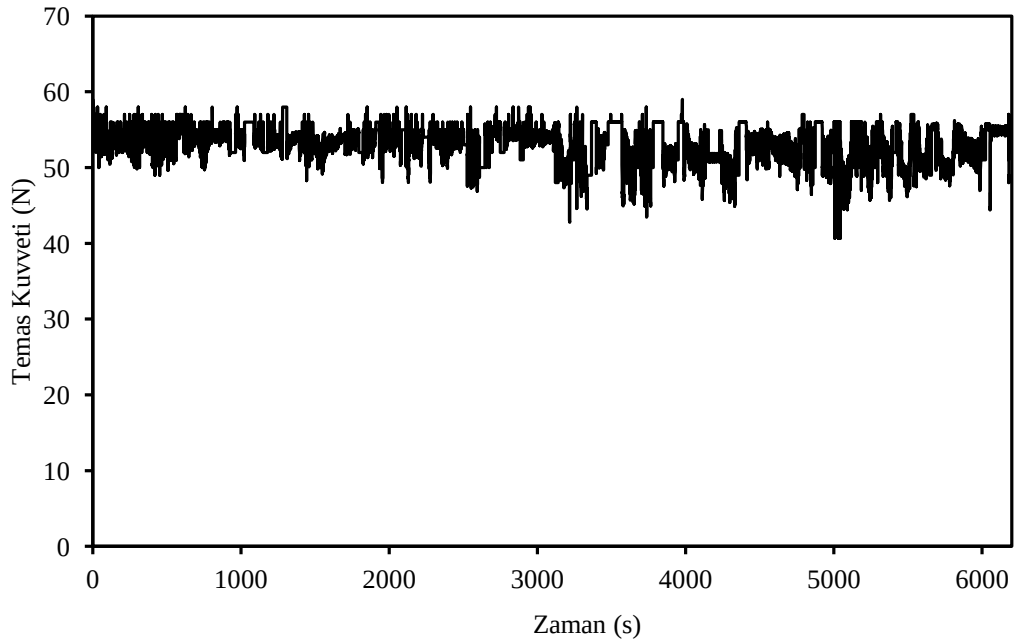
$$\text{Aşınma Oranı} = \frac{M_0 - M_1}{L} \quad (5.2)$$

Denklem 5.2'de verilen M_0 grafit plakanın deney öncesi ölçülen kütlesi, M_1 , deney sonrası ölçülen kütlesi ve L ise test sonunda alınan örseleme mesafesini temsil etmektedir. Grafit plakanın kuru ve sulu şartta deneyler sonucu aşınma oranları ve çalışma sıcaklıkları Tablo 5.5'de verilmiştir.

Tablo 5.5. Grafit plakanın kuru ve sulu şartta deneyler sonucu aşınma oranları ve çalışma sıcaklıkları

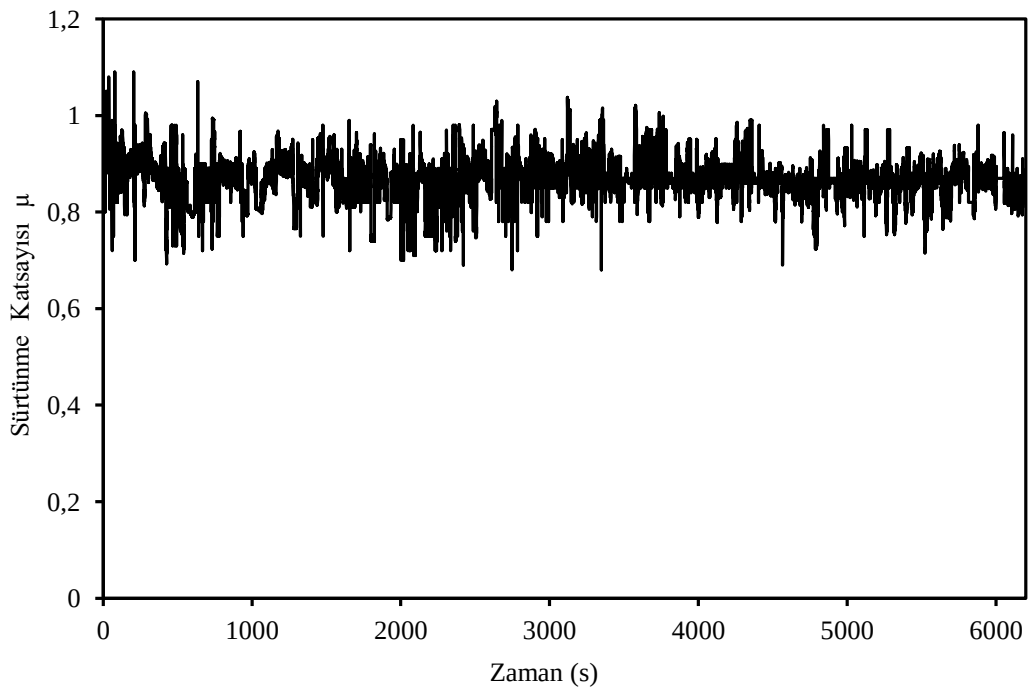
Deney Şartı	Kütle Kaybı (g)	Aşınma Oranı (g/km)	Çalışma Sıcaklığı (°C)
Kuru	0,72	0,020	55
Sulu	0,98	0,028	32

Deneyisel çalışmalarda orijinal grafit plaka numunesinin yanısıra Teydeb 7201128 numaralı araştırma projesinde üretilen yerli grafit plakalarında sürtünme ve aşınma testleri gerçekleştirilmiştir. Deneyler orijinal grafit plakalara uygulanan deney koşullarında gerçekleştirilmiştir. Yerli üretim grafit plaka kullanılarak kuru şartta gerçekleştirilen deney sonucunda ölçülen temas kuvvetinin değişimi Şekil 5.29’ da verilmiştir. Temas kuvveti 50-55 N aralığında saçılan bir değişim göstermiştir. HRS’ nin gerçek hareket şartlarında yaptığı gibi durak verilerine göre oluşturulan deney parkurunda, durak mesafelerine gelindiğinde deney düzeneği durmuş, değişken bekleme sürelerinde beklemiş ve bunun sonucunda temas kuvveti değişim grafiğinde beklemeyi ifade eden belirgin bekleme zaman aralıkları oluşmuştur.



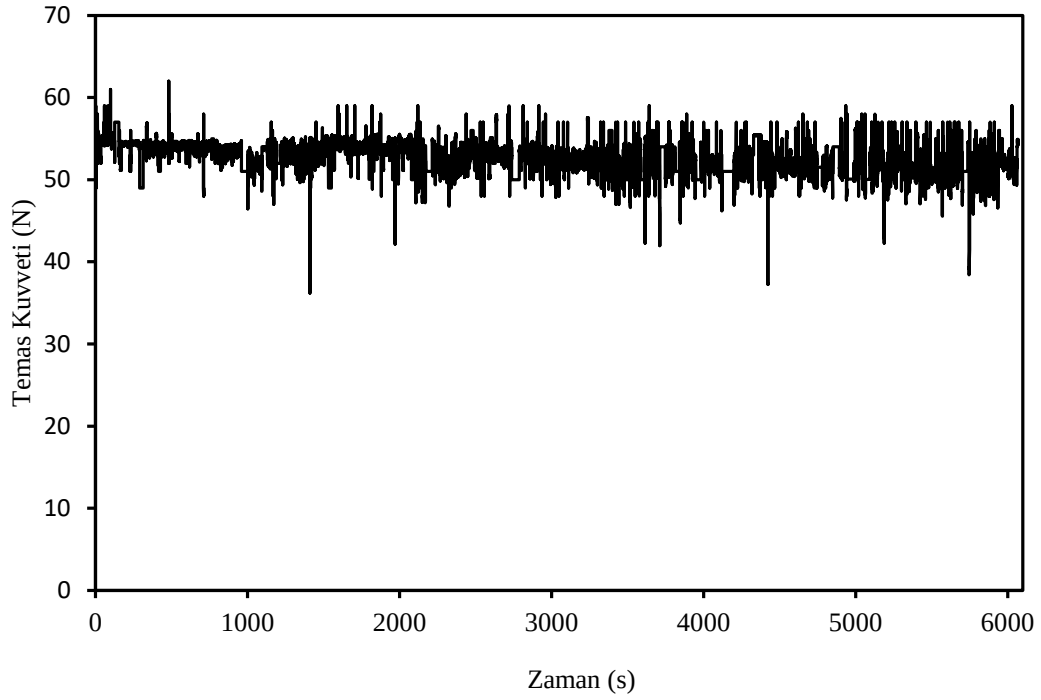
Şekil 5.29. Kuru şart deney koşulunda zamana göre F_t değişimi

Yerli üretim grafit plaka numunesiyle kuru şartta gerçekleştirilen deneyler sonucunda, deney rotası boyunca ölçülen F_t ve F_r (F_s , sürtünme katsayısı) kuvvet değerleri için denklem 4.8 kullanılarak sürtünme katsayısı değerleri hesaplanmış ve deney parkuru boyunca zamana göre değişimini gösteren Şekil 5.30 grafiği elde edilmiştir. Sürtünme katsayısı başlangıçta yaklaşık 0,97 ve zamanın ilerlemesiyle saçılma göstermiş, en yüksek 1,09 en düşük 0,68 olarak ölçülmüştür. Genel ortalama sürtünme katsayısı değerine bakıldığında 0,87 olarak ölçüm sonuçları elde edilmiştir. Kuru şartta gerçekleştirilen deney rotası sonrası grafit plakada aşınmadan kaynaklı 4,91 g kütle kaybı belirlenmiştir.



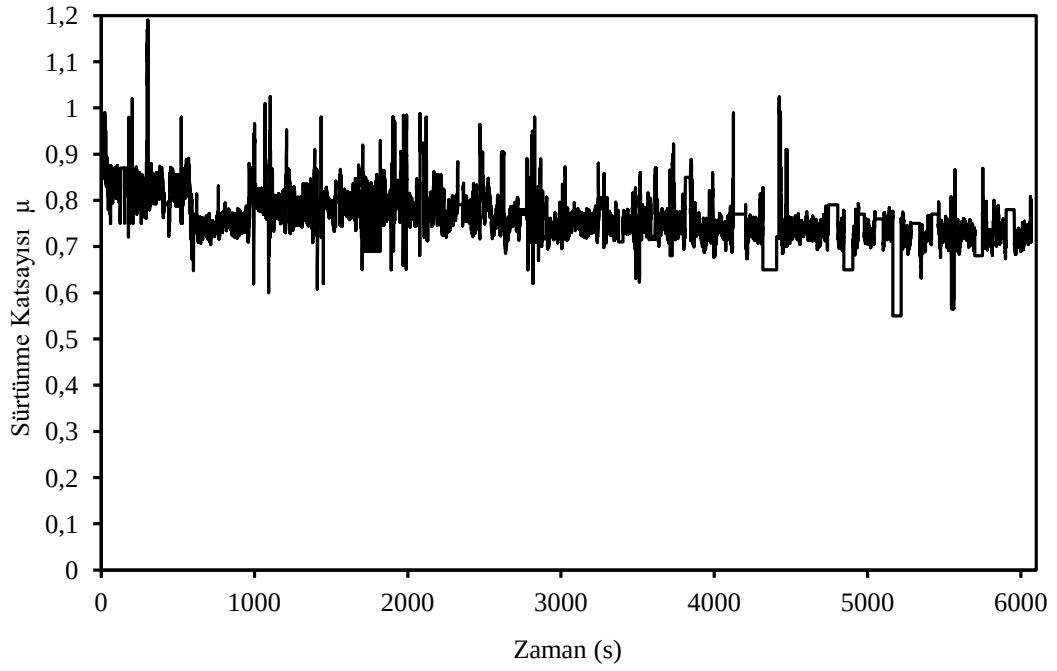
Şekil 5.30. Kuru şart deney koşulunda zaman göre μ değişimi

Yerli üretim grafit plaka kullanılarak sulu şartta gerçekleştirilen deney sonucunda ölçülen temas kuvvetinin değişimi Şekil 5.31’ de verilmiştir. Temas kuvveti saçılan bir değişim gösterebilir, genel olarak 50-55 N arasında toplanmıştır. HRS’ nin gerçek hareket şartlarında yaptığı gibi durak verilerine göre oluşturulan deney parkurunda, durak mesafelerine gelindiğinde deney düzeneği durmuş, değişken bekleme sürelerinde beklemiş ve bunun sonucunda temas kuvveti değişim grafiğinde beklemeyi ifade eden belirgin bekleme zaman aralıkları oluşmuştur.



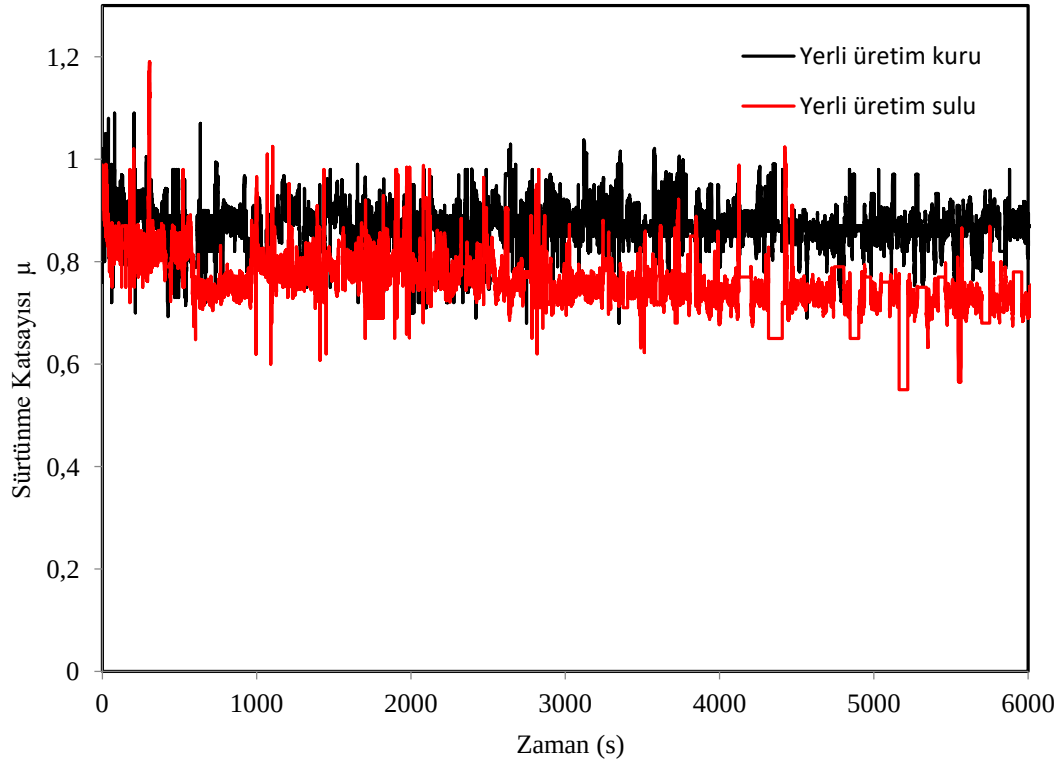
Şekil 5.31. Sulu şart deney koşulunda zamana göre F_t değişimi

Yerli üretim grafit plaka numunesiyle sulu şartta gerçekleştirilen deneyler sonucunda, deney rotası boyunca ölçülen F_t ve F_r (F_s , sürtünme katsayısı) kuvvet değerleri için denklem 4.8 kullanılarak sürtünme katsayısı değerleri hesaplanmış ve deney parkuru boyunca zamana göre değişimini gösteren Şekil 5.32 grafiği elde edilmiştir. Sürtünme katsayısı başlangıçta yaklaşık 0,99 değerlerinde ölçülmüş zamanın ilerlemesiyle en yüksek 1,19 en düşük 0,6 ölçülmüştür. Genel ortalama sürtünme katsayısı değerine bakıldığında 0,76 ölçüm sonucu elde edilmiştir. Sulu şartta gerçekleştirilen deney rotası sonrası grafit plakada aşınmadan kaynaklı 1,01 g kütle kaybı belirlenmiştir.



Şekil 5.32. Sulu şart deney koşulunda zaman göre μ değişimi

Yerli üretim grafit plakanın kuru ve sulu şartlarda elde edilen sürtünme katsayısı değişimlerinin karşılaştırma grafiği Şekil 5.33’de verilmiştir. Grafikte, aşınma çifti arasına su gönderilmesiyle sürtünme katsayısı değeri düşmüştür. Durak verileri ve temas kuvveti değerlerinin değişmediği halde sürtünme katsayısı değerinin azalmasında, tıpkı orijinal grafit plaka numunesi deneylerinde olduğu gibi suyun aşınma bölgesinde oluşturduğu yağlayıcı su filmi tabakasının etkili olduğu düşünülmektedir (Wang vd., 2020).



Şekil 5.33. Kuru ve sulu şart deney koşullarında zamana göre μ değişimi

Yerli üretim grafit plakanın kuru ve sulu şartlarda gerçekleştirilen deneyler sonucunda, sulu şartta gerçekleştirilen deney sonucu elde edilen sürtünme katsayısı değerinin ve deney sonucunda ölçülen kütle kaybının kuru şarta kıyasla azaldığı belirlenmiştir. Denklem 5.2'ye göre yerli üretim grafit plakaların kuru ve sulu şartlarda gerçekleştirilen deneyler sonucu elde aşınma oranları hesaplanmış ve Tablo 5.6' da verilmiştir.

Tablo 5.6. Yerli üretim grafit plakanın kuru ve sulu şartta deneyler sonucu aşınma oranları

Deney Şartı	Kütle Kaybı (g)	Aşınma Oranı (g/km)
Kuru	4,91	0,136
Sulu	1,01	0,028

5.5. Aşınma Yüzey Görüntüleri

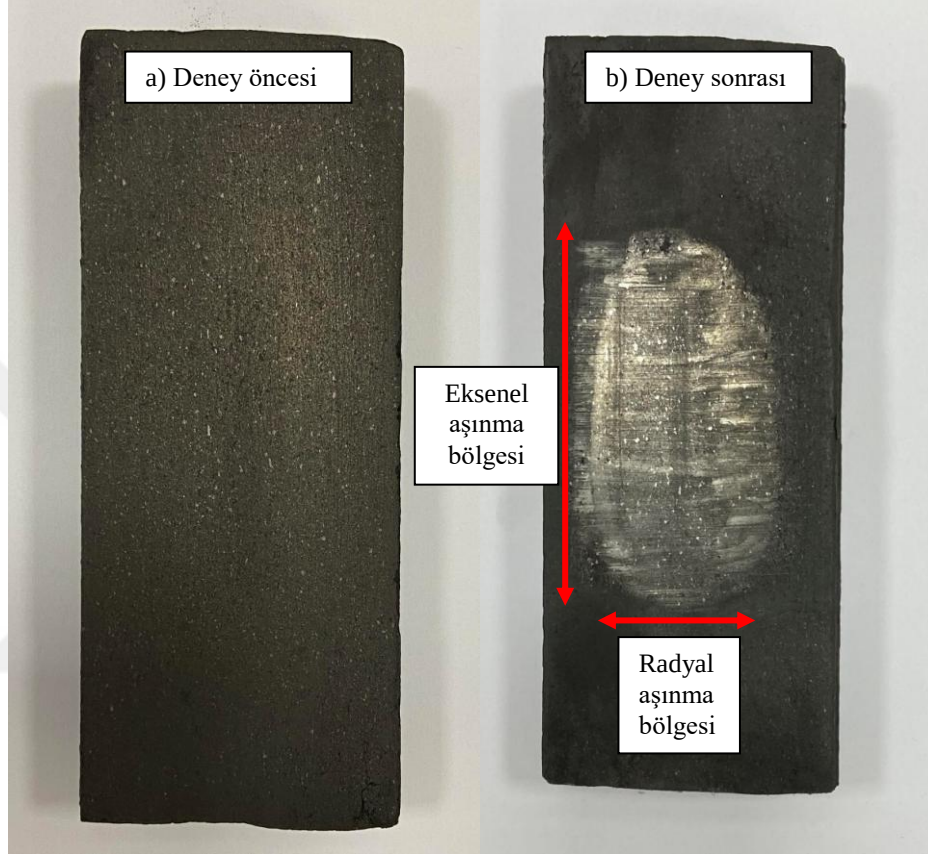
İmalatı yapılan deney düzeneğinde Samsun ili OMÜ Yurtlar-Tekkeköy HRS güzergah hattı verileri ile kuru şartta gerçekleştirilen sürtünme ve aşınma deneyleri sonucu, grafit plaka numunesinin deney öncesi ve sonrası yüzey görüntüleri Şekil 5.34’de verilmiştir. Grafit plaka numunesinin deney sonrası yüzeyinde aşınmış bölgenin parlak pürüzsüz bir şekilde olduğu, aşınmış bölge içerisinde bazı temas bölgelerinde gözenekli bir yapının ortaya çıktığı görülmüştür. Aşındırma çemberinin grafit plaka yüzeyinde zikzak şeklinde örseleme hareketi ile eksenel aşınma bölgesi, dönme hareketiyle radyal aşınma bölgeleri oluşmuştur.



Şekil 5.34. Grafit plakanın kuru şartta aşınma deneyi öncesi (a) ve deney sonrası (b) yüzey görüntüleri

İmalatı yapılan deney düzeneğinde, Samsun ili OMÜ Yurtlar-Tekkeköy HRS güzergah hattı verileri ile sulu şartta gerçekleştirilen sürtünme ve aşınma deneyleri sonucu, grafit plaka numunesinin deney öncesi ve sonrası elde edilen yüzey görüntüleri Şekil 5.35’de verilmiştir. Grafit plaka numunesinin deney sonrası yüzeyi incelendiğinde, kuru şartta oluşan grafit plaka yüzeyine göre kısmen parlak olduğu ve aşındırma çemberi izlerini gözle ayırt edilebilmektedir. Kuru şartta

gerçekleştirilen deney sonrası elde edilen yüzey görünümünde, açıkça belli olan yağsı yüzey görünümü, sulu şartta elde edilen grafit plaka yüzey görünümünde rastlanmamıştır. Aşındırma çemberinin grafit plaka yüzeyinde zikzak şeklinde örseleme hareketi ile aksenel aşınma bölgesi, dönme hareketiyle radyal aşınma bölgeleri oluşmuştur.



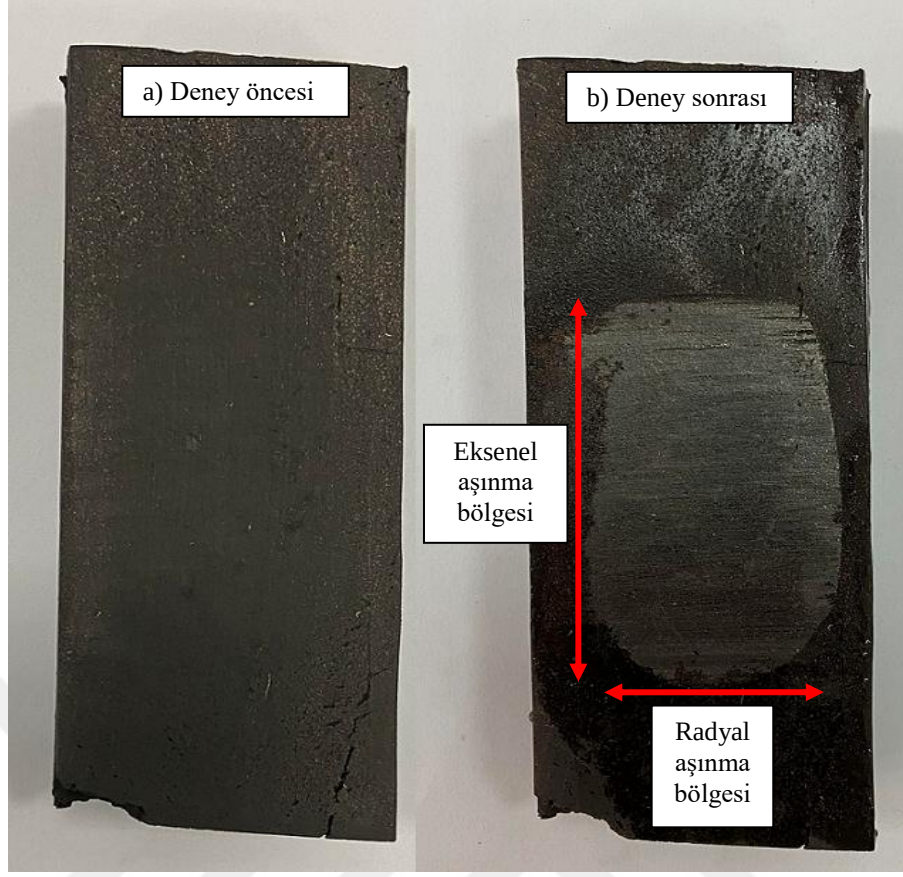
Şekil 5.35. Grafit plakanın sulu şartta aşınma deneyi öncesi (a) ve deney sonrası (b) yüzey görüntüleri

İmalatı yapılan deney düzeneğinde, Teydeb 7201128 numaralı araştırma projesinde üretilen yerli grafit plaka numunesi kullanılarak Samsun ili OMÜ Yurtlar-Tekkeköy HRS güzergah hattı verileri ile kuru şartta gerçekleştirilen sürtünme ve aşınma deneylerinde deney öncesi ve sonrası elde edilen yüzey görüntüleri Şekil 5.36’ da verilmiştir. Grafit plaka numunesinin deney sonrası yüzeyinde aşınmış bölgenin mat ve pürüzsüz bir şekilde olduğu, aşınmış bölge içerisinde bazı temas bölgelerinde kayma izlerinin ortaya çıktığı görülmüştür. Aşındırma çemberinin grafit plaka yüzeyinde zikzak şeklinde örseleme hareketi ile aksenel aşınma bölgesi, dönme hareketiyle radyal aşınma bölgeleri oluşmuştur.



Şekil 5.36. Yerli üretim grafit plakanın kuru şartta aşınma deneyi öncesi (a) ve deney sonrası (b) yüzey görünümleri

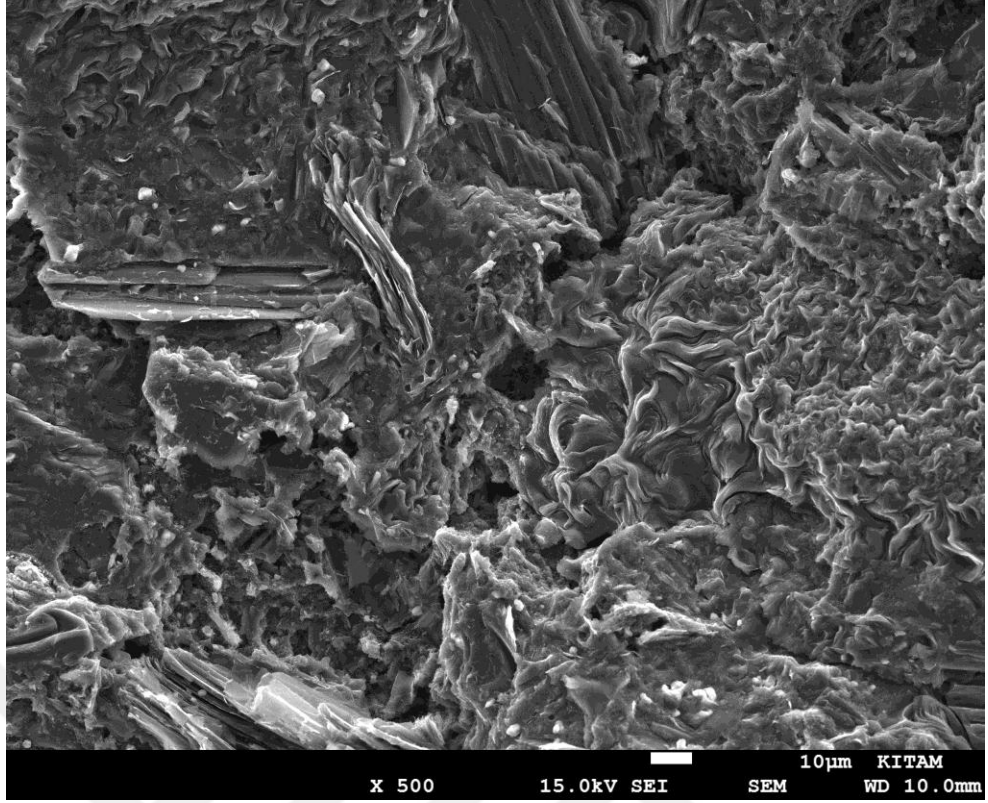
İmalatı yapılan deney düzeneğinde, Teydeb 7201128 numaralı araştırma projesinde üretilen yerli grafit plaka numunesi kullanılarak Samsun ili OMÜ Yurtlar-Tekkeköy HRS güzergah hattı verileri ile sulu şartta gerçekleştirilen sürtünme ve aşınma deneylerinde deney öncesi ve sonrası elde edilen yüzey görünümleri Şekil 5.37’de verilmiştir. Grafit plaka numunesinin deney sonrası yüzeyi incelendiğinde, kuru şartta oluşan grafit plaka yüzeyine göre daha mat ve pürüzsüz olmadığı görülmüştür. Yerli grafit plaka kullanılarak kuru şartta gerçekleştirilen deney sonrası elde edilen yüzey görünümünde, mat bir şekilde olan yağsı yüzey görünümü, sulu şartta elde edilen grafit plaka yüzey görünümünde rastlanmamıştır. Aşındırma çemberinin grafit plaka yüzeyinde zikzak şeklinde örseleme hareketi ile eksenel aşınma bölgesi, dönme hareketiyle radyal aşınma bölgeleri oluşmuştur.



Şekil 5.37. Yerli üretim grafit plakanın sulu şartta aşınma deneyi öncesi (a) ve deney sonrası (b) yüzey görüntüleri

5.6. SEM Analiz Sonuçları

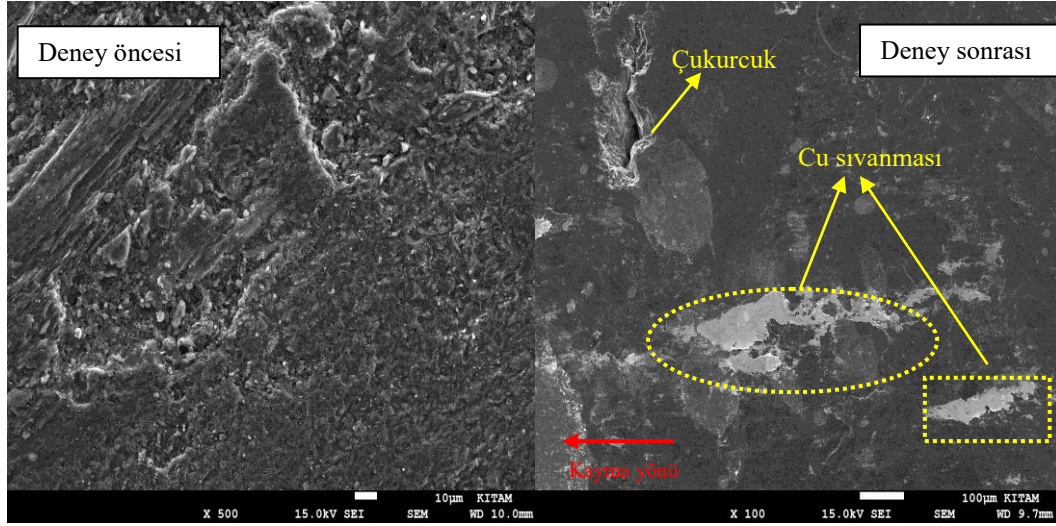
Orijinal grafit plaka numunesinin yapısını incelemek amacıyla kırık yüzeyi SEM ile incelenmiştir. İnceleme sonucunda elde edilen görüntü Şekil 5.38’ de verilmiştir. Elde edilen görüntüden grafit plaka numunesinin sıkı yapıda olduğu ve az sayıda gözenek içerdiği belirlenmiştir.



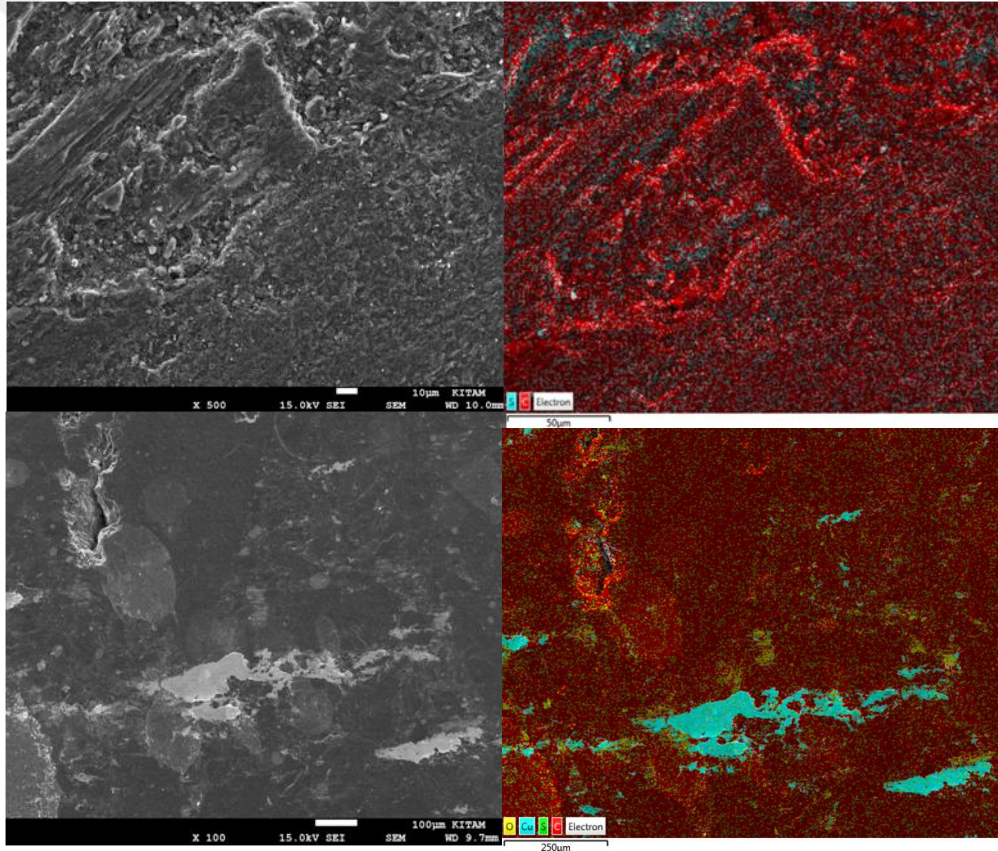
Şekil 5.38. Orijinal grafit plaka numunesinin kırık yüzey SEM görüntüsü

Kuru şartta sürtünme ve aşınma deneyi yapılmış grafit plaka numunesinin yüzeyleri SEM ile incelenmiş, deney öncesi ve sonrası oluşan görüntüleri Şekil 5.39’da verilmiştir. Yüzey görüntülerinden, deney öncesi grafit plaka yüzeyinde herhangi bir bakır (Cu) malzeme varlığı görülmemiş fakat aşınma deneyi sonrası yüzeyde bakır malzemenin grafit plaka yüzeyine yapıştığı ve sıvandığı görüntülenmiştir. Aşınma yüzeyindeki incelemelerde, mekanik aşınma mekanizmalarından abrasiv ve adhesiv aşınmanın etkili olduğu belirlenmiştir.

Aynı yüzey bölgelerinde yapılan EDS analiz sonuçları Şekil 5.40’da verilmiş, sonuçlardan görüleceği üzere test rotasında gerçekleştirilmesi sırasında aşındırma çemberine sarılı ve montajlı olan bakır malzemeden grafit plaka yüzeyine malzeme transferi olduğu ve aşınma bölgesinde oluşan sürtünme ısı ve adhesiv aşınma mekanizmasıyla bakır malzemenin yüzeye yapıştığı ve sıvandığı görüntülenmiştir. Literatürde yapılan çalışmalarda adhesiv aşınma mekanizmasının görüldüğü yüzeylerde genellikle yapışmanın etkisiyle malzeme transferinin olması bu analizi desteklemektedir (Ding vd., 2011a; Xue vd., 2018; Rigney, 2000).



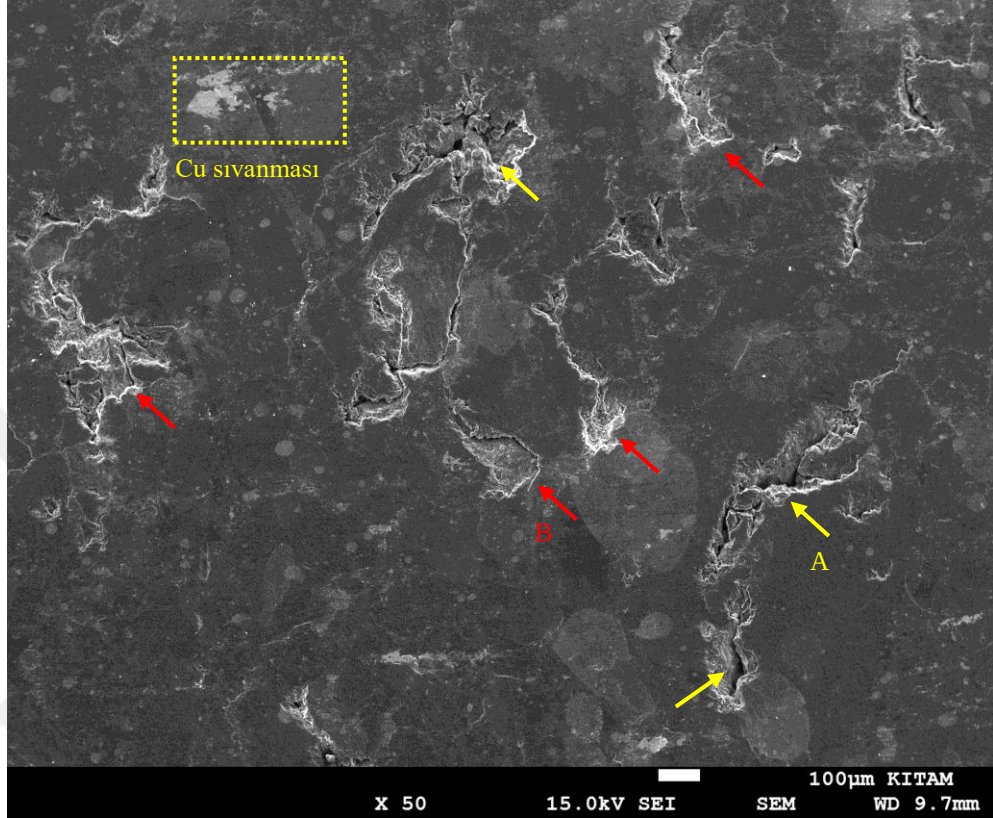
Şekil 5.39. Kuru şartta aşınma deneyi öncesi ve sonrası grafit plaka yüzeyinin SEM görüntüsü



Şekil 5.40. Grafit plaka numune yüzeyinin deney öncesi (a) ve kuru şartta deney sonrası (b) yüzeylerinin EDS analiz görüntüleri

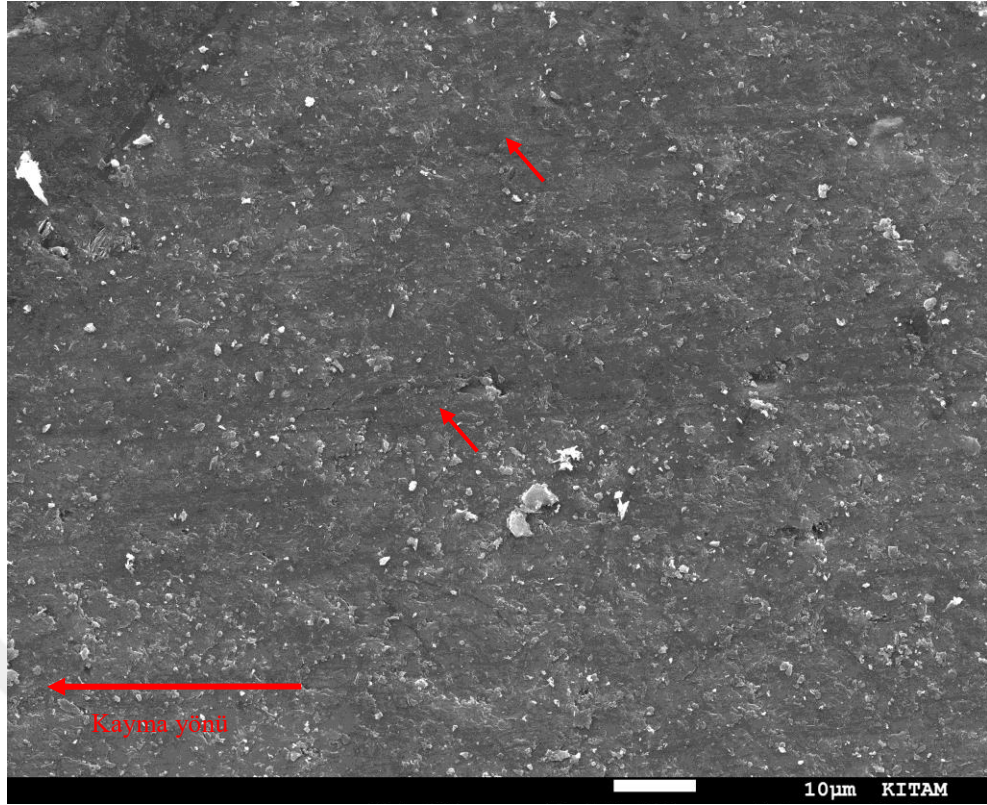
Şekil 5.41’de, SEM yüzey görüntülerinde çukurcuk ve oyuk şeklinde hasara uğramış yüzey yapılarının ortaya çıktığı belirlenmiştir. Görüntülerde detay A olarak adlandırılan çukurcukların malzeme içerisinde zaten var olan gözeneklerin yüzeyde aşınmanın etkisiyle ortaya çıkan ve hasara uğrayan yapılar olduğu düşünülmektedir.

Detay B olarak adlandırılan oyuk şeklindeki yüzey yapılarının oluşması sırasında ise sert Cu parçalarının abrasiv aşınma mekanizmasıyla grafit plaka yüzeyinde malzeme kaldırılması şeklinde plastik deformasyona neden olduğu söylenebilir (Huang vd., 2020; Lin vd., 2011; Zhang vd., 2013).



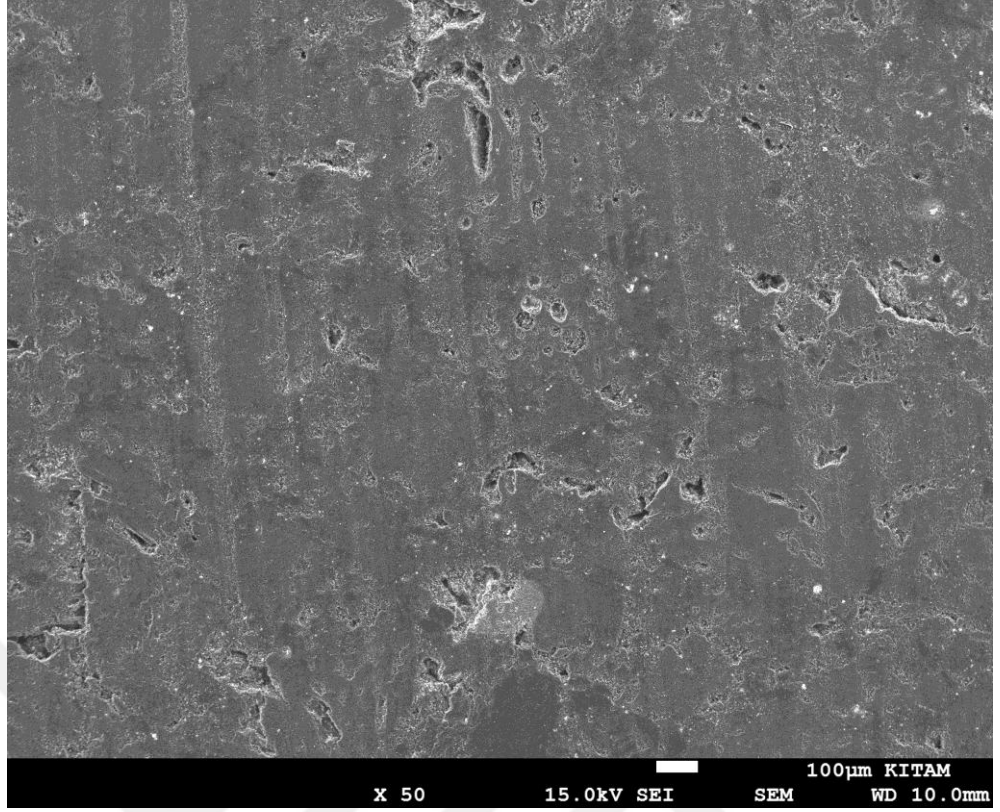
Şekil 5.41.Kuru şartta aşınma deneyi sonrası grafit plaka numunesi yüzeyinde oluşan deformasyon bölgeleri

SEM analiz sonuçlarından elde edilen Şekil 5.42 görüntüsü incelendiğinde aşındırma çemberinin grafit plaka yüzeyinde dönerek kaymalı örseleme hareketi sonucunda yüzeyde belirgin bir şekilde ayırt edilebilen kayma izlerinin olduğu saptanmıştır. Yüzeyin belirli bölgelerine daha önce yapılmış çalışmalar ile benzer şekilde dağılmış kayma doğrultu izlerinin birbirlerine ve ayrıca Cu malzeme sıvanma izlerine paralel olduğu görülmüştür. Bakır malzeme izleri bu doğrultuda yüzeye yapışmış ve uzamış olarak karakterize edilmiştir. (Huang vd., 2020; Yang vd., 2012).

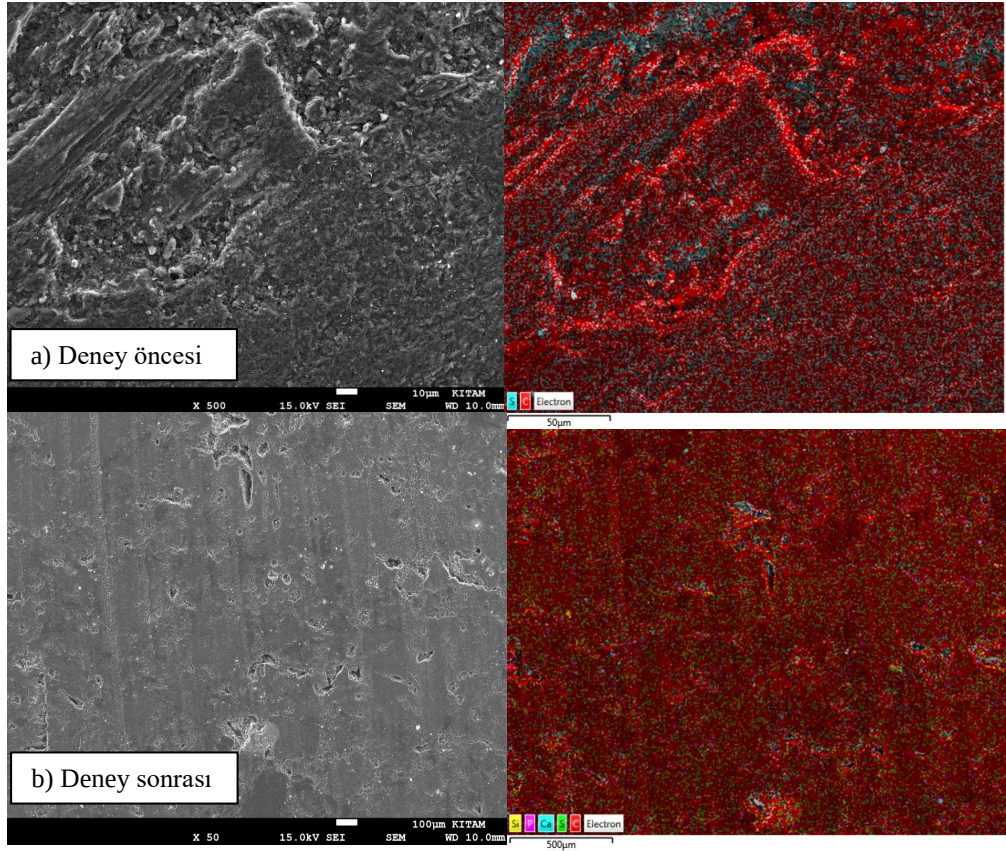


Şekil 5.42. Kuru şartta gerçekleştirilen deney sonucu grafit plaka yüzeyinde oluşan kayma izleri

Şekil 5.43’de sulu şartta gerçekleştirilen deneysel çalışma sonucunda elde edilen grafit plaka yüzeyinin SEM analiz görüntüsü verilmiştir. Analiz görüntüsü incelendiğinde yüzeyde oluşan çukurcuk ve oyuk miktarının, kuru şartta yapılan deney görüntüsüne göre daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca grafit plaka numunesinin deney öncesi ve sulu şartta deney sonrası yüzeyinde yapılan EDS analiz sonuçları Şekil 5.44’de verilmiş ve analizde görüleceği üzere sulu şartta yapılan deney sonrasında bakır malzeme, kuru şartta yapılan aşınma deneyine göre yüzeyde tutunamamıştır. Yüzeye yapışıp sıvanamamıştır. Deney sırasında aşınma çifti arasına gönderilen suyun bakır malzemenin grafit plaka yüzeyine yapışmasına ve uygun tutunma alanına izin vermediği söylenebilir. Ayrıca aşınan bakır parçaları sıvanma olmaksızın aşındırıcı plaka olarak davranmış, grafit partikülleri ise suyla beraber yüzeyden atıldığından, grafit katı yağlayıcı özelliğini yitirmiştir. Sulu şartta yapılan deneyler sonucu elde edilen görüntülerde abrasiv aşınma mekanizmasının etkili olduğu görülmektedir (Mei, 2020).

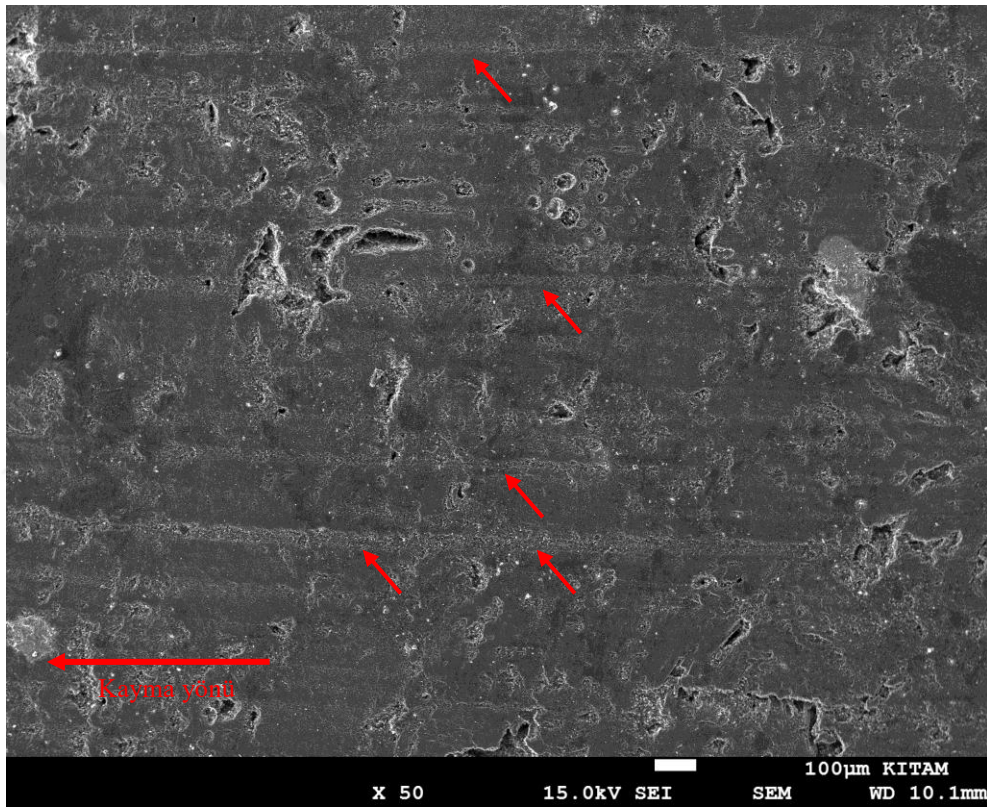


Şekil 5.43. Sulu şartta aşınma deneyi sonrası grafit plaka yüzeyinin SEM görüntüsü



Şekil 5.44. Grafit plaka numune yüzeyinin deney öncesi (a) ve sulu şartta deney sonrası (b) yüzeylerinin EDS analiz görüntüleri

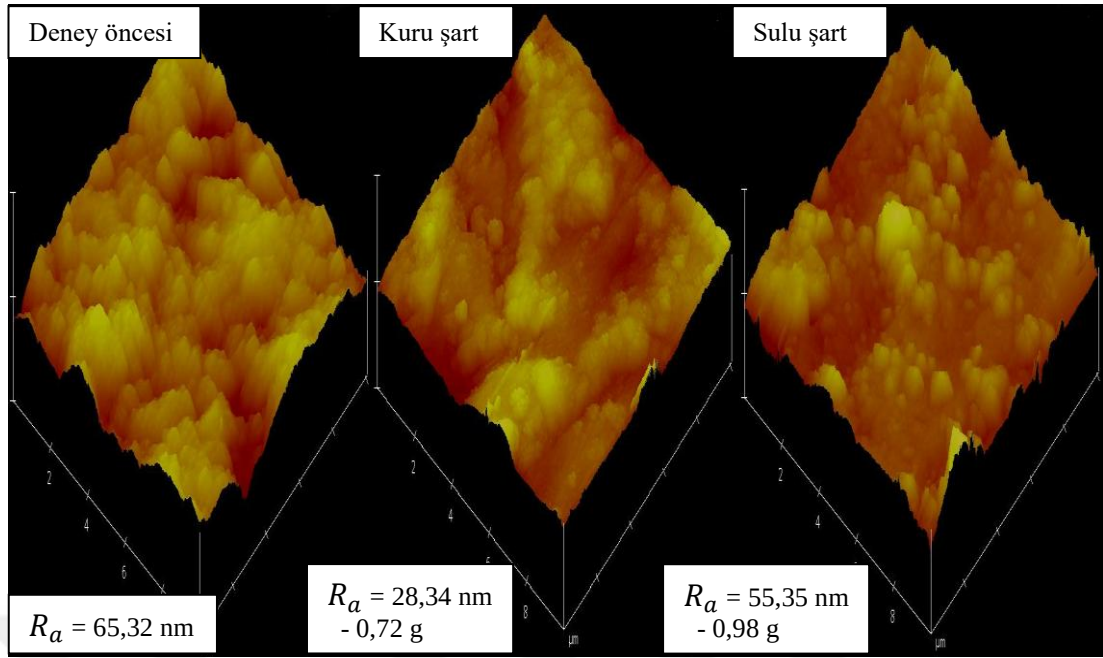
Sulu şartta gerçekleştirilen deney sonucunda elde edilen başka bir yüzey görüntüsü olan Şekil 5.45 incelendiğinde, kuru şartta gerçekleştirilen deneye göre bakır sıvanmasının ve yapışmasının görünmediği, ancak daha fazla oranla çukurcuk ve oyuk yüzey hasarlarının olduğu gözlemlenmiştir. Sulu şartta yüzey hasarı miktarının fazla olması kütle kaybının kuru şarttakine göre daha fazla olmasını desteklemektedir. Aşınma yüzey hasarlarının, sulu şartta daha fazla olmasında, grafit plaka yüzeyine yapışmayan bakır malzeme plakalarının suyun da etkisiyle çukurcuk ve oyuk kısımlarda daha fazla aşındırıcı etki gösterdiği ve zamanla daha fazla kütle kaybına neden olduğu düşünülmektedir.



Şekil 5.45. Sulu şartta gerçekleştirilen deney sonucu grafit plaka yüzeyinde oluşan kayma izleri

5.7. AFM Analiz Sonuçları

Orijinal grafit plaka test numunesinin deney öncesi, kuru ve sulu şartta deney sonrası oluşan yüzey topografyasını incelemek amacıyla AFM (Atomik Kuvvet Mikroskobu) analizleri gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçlarından elde edilen görüntüler Şekil 5.46’da karşılaştırılmalı olarak verilmiştir.



Şekil 5.46. Grafit plaka numunesinin deney öncesi, kuru ve sulu şartta deney sonrası AFM analiz görüntüleri

Şekil 5.38’de verilen AFM yüzey topografya görüntülerinden görüldüğü üzere deney öncesi yüzey topografyası incelendiğinde oldukça pürüzlü bir yüzeyin var olduğu, kuru şartta yapılan deney sonrasında ise bu pürüzlülüğün azaldığı net bir şekilde görülmektedir. Sulu şartta yapılan deney sonucunda elde edilen yüzeyde ise genel olarak pürüzlülüğün deney öncesi grafit plaka yüzeyine göre bir miktar azaldığı fakat yine pürüzlü bir yüzey yapısının var olduğu saptanmıştır. Tablo 5.7’de analiz sonuçlarından elde edilen ortalama yüzey pürüzlülük (R_a) ve kütle kaybı değerleri incelendiğinde sonuçların SEM analiz sonuçlarını doğrulamakta olduğu anlaşılmaktadır. Kuru şartta grafit malzemenin katı yağlayıcı olarak davranmasından dolayı deney sonucunda yüzeyinde aşınma daha az gerçekleşmiştir. Sulu şartta ise daha önceki kısımlarda belirtildiği üzere Cu malzeme partiküllerinin yapışması ve sıvanması yerine su içerisinde aşındırıcı olarak davrandığı, daha yumuşak yapıda olan grafit malzeme partiküllerini aşınma bölgesinden suyla uzaklaştırmasından dolayı katı yağlayıcı özelliğini yitirmiştir. Sistemde yağlayıcı görevi görmesi beklenen su ise sert bakır tanelerini ihtiva etmesinden dolayı o da yağlayıcı gibi davranmamıştır.

Tablo 5.7. Ortalama yüzey pürüzlülük ve kütle kaybı değerleri

Numune Cinsi	Ortalama Yüzey Pürüzlülük (R_a) (nm)	Kütle Kaybı (g)
Orijinal	65,32	-
Kuru Şart	28,34	0,72
Sulu Şart	55,35	0,98

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında HRS' lerin pantograf mekanizmasında yer alan akım toplayıcı grafit plaka ile katener temas teli arasında meydana gelen etkileşimi simüle etmek, temas çifti arasında oluşan mekanik sürtünme ve aşınma davranışlarını araştırmak amacıyla özgün bir yazılım ile programlanabilir ve kontrol edilebilir aşınma deney düzeneği imalatı yapılmıştır. İmalatı yapılan deney düzeneğinin doğruluğu Taguchi metodu ve ANOVA analizleriyle desteklenmiş ve imalatı yapılan deney düzeneğinde, Samsun şehrinin OMÜ Yurtlar-Tekkeköy HRS güzergah hattı boyunca grafit plaka numunelerinin mekanik aşınması kuru ve sulu şartlarda simüle edilmiş ve karşılaştırılmıştır.

Deney düzeneğinin imalatı ile elde edilen sonuçlar şunlardır;

1. İmalatı yapılan deney düzeneğiyle HRS' lerin gerçek hareket şartlarını simüle edebilen, programlanabilir ve kontrol edilebilir yerli bir aşındırma simülatörü elde edilmiştir. İmalatı yapılan aşındırma simülatörü Türk Patent Enstitüsü tarafından Faydalı Model olarak tescillenmiştir.
2. HRS' ler de katener temas teli ve grafit plaka arasındaki tribolojik etkileşimi gerçeğe yakın bir şekilde ortaya koyabilen bir test düzeneği sistemi oluşturulmuştur.
3. İstenen şehire ait HRS güzergah hattının hareketini simüle edebilecek hız, mesafe, temas kuvveti vb. verilerinin girilebileceği ve kontrol edilebileceği özgün bir kontrol analiz yazılımı üretilmiştir.
4. İmalatı yapılan deney düzeneğinde bakır temas teli ile grafit plakanın etkileşimi sırasında ortaya çıkan temas kuvveti ve radyal kuvveti ölçebilen bir dinamometre geliştirilmiş ve kalibrasyonu yapılmıştır.
5. Taguchi metodu kullanılarak oluşturulan L9 ortogonal deney dizisine göre belirli parametre değişkenlerini içeren deneyler yapılmış ve sonucunda, kullanılan parametrelerden hız, temas kuvveti ve mesafenin sürtünme kuvvetini etkilemediği ANOVA analizi ile belirlenmiştir.

İmalatı yapılan deney düzeneği ile Samsun şehrinin OMÜ Yurtlar-Tekkeköy HRS güzergah hattı verileriyle kuru şartta yapılan aşınma deney sonuçları şunlardır;

1. Samsun şehrinin OMÜ Yurtlar-Tekkeköy HRS güzergah hattı boyunca orijinal grafit plaka numunesiyle kuru şartta aşınma deneyleri yapılmış ve sürtünme katsayısı değeri ortalama 0,75 olarak ölçülmüştür.
2. Samsun şehrinin OMÜ Yurtlar-Tekkeköy HRS güzergah hattı verileri ve orijinal grafit plaka numunesiyle kuru şartta yapılan aşınma deneyleri sonucunda grafit plaka numunesi 0,72 g kütle kaybına uğramıştır.
3. Samsun şehrinin OMÜ Yurtlar-Tekkeköy HRS güzergah hattı verileri ve orijinal grafit plaka numunesiyle kuru şartta yapılan aşınma deneylerinde aşınma çiftinin çalışma sıcaklığı ortalama 55 °C olarak ölçülmüştür.
4. Orijinal grafit plaka numunesiyle kuru şartta yapılan deney sonucunda elde edilen yüzey yapıları SEM' de incelendiğinde aşındırma çemberinin, aşınmış grafit plaka yüzeyinde oluşturduğu kayma yönü izlerinin belirgin bir şekilde görüldüğü, adhesiv aşınmanın etkisiyle bakır malzemenin grafit plaka yüzeyine transfer olduğu, yapıştığı ve kayma yönü boyunca sıvandığı görüntülenmiştir. Ayrıca yüzeyde yapılan incelemelerde grafit plaka malzemesi içerisinde yer alan gözenekli yapının abrasiv aşınmanın etkisiyle ortaya çıktığı ve yine abrasiv aşınmanın etkisiyle yüzeyden malzeme kaldırması şeklinde plastik deformasyon bölgelerinin oluştuğu görülmüştür.
5. Orijinal grafit plaka numunesiyle kuru şartta yapılan deney sonucunda elde edilen yüzey topografyası AFM' de analiz edildiğinde, grafit plaka yüzeyinin deney öncesi oldukça pürüzlü olan yüzey yapısının pürüzsüzleştiği analiz edilmiştir. Deney öncesi R_a 65,32 nm değerindeyken, kuru şartta deney sonrası 28,34 nm değerine düşmüştür.
6. Samsun şehrinin OMÜ Yurtlar-Tekkeköy HRS güzergah hattı boyunca yerli üretim grafit plaka numunesiyle kuru şartta aşınma deneyleri yapılmış ve sürtünme katsayısı değeri ortalama 0,87 olarak ölçülmüştür.
7. Samsun şehrinin OMÜ Yurtlar-Tekkeköy HRS güzergah hattı verileri ve yerli üretim grafit plaka numunesiyle kuru şartta yapılan aşınma deneyleri sonucunda grafit plaka numunesi 4,91 g kütle kaybına uğramıştır.

İmalatı yapılan deney düzeneği ile Samsun şehrinin OMÜ Yurtlar-Tekkeköy HRS güzergah hattı verileriyle sulu şartta yapılan aşınma deney sonuçları şunlardır;

1. Samsun şehrinin OMÜ Yurtlar-Tekkeköy HRS güzergah hattı verileri ve orijinal grafit plaka numunesiyle sulu şartta aşınma deneyleri yapılmış ve sürtünme katsayısı değeri ortalama 0,65 olarak ölçülmüştür. Kuru şarta göre sürtünme katsayısı değerinin düşmesinde aşınma çifti arasında gönderilen suyun oluşturduğu su filmi tabakasının sürtünmeyi azalttığı belirlenmiştir.
2. Samsun şehrinin OMÜ Yurtlar-Tekkeköy HRS güzergah hattı verileri ve orijinal grafit plaka numunesiyle sulu şartta yapılan aşınma deneyleri sonucunda grafit plaka numunesi 0,98 g kütle kaybına uğramıştır.
3. Samsun şehrinin OMÜ Yurtlar-Tekkeköy HRS güzergah hattı verileri ve orijinal grafit plaka numunesiyle sulu şartta yapılan aşınma deneylerinde aşınma çiftinin çalışma sıcaklığı ortalama 32 °C olarak ölçülmüştür.
4. Orijinal grafit plaka numunesiyle sulu şartta yapılan deney sonucunda elde edilen yüzey yapıları SEM’ de incelendiğinde aşındırma çemberinin, aşınmış grafit plaka yüzeyinde oluşturduğu kayma yönü izlerinin belirgin bir şekilde görüldüğü tespit edilmiştir. Yüzeyde yapılan EDS analizinde herhangi bir Cu malzeme transferine rastlanmamıştır. Yüzeyde yapılan incelemelerde grafit plaka yüzeyine yapışmayan bakır malzeme partikülleri suyunda etkisiyle çukurcuk ve oyuk kısımlarda daha fazla aşındırıcı etki gösterdiği yorumlanmıştır.
5. Orijinal grafit plaka numunesiyle sulu şartta yapılan deney sonucunda elde edilen yüzey topografyası AFM’ de analiz edildiğinde deney öncesi R_a 65,32 nm değerindeyken, sulu şartta deney sonrası 55,35 nm değerine düşmüştür.
6. Samsun şehrinin OMÜ Yurtlar-Tekkeköy HRS güzergah hattı verileri ve yerli üretim grafit plaka numunesiyle sulu şartta aşınma deneyleri yapılmış ve sürtünme katsayısı değeri ortalama 0,76 olarak ölçülmüştür. Kuru şarta göre sürtünme katsayısı değerinin düşmesinde aşınma çifti arasında gönderilen suyun oluşturduğu su filmi tabakasının sürtünmeyi azalttığı belirlenmiştir.

7. Samsun şehrinin OMÜ Yurtlar-Tekkeköy HRS güzergah hattı verileri ve yerli üretim grafit plaka numunesiyle sulu şartta yapılan aşınma deneyleri sonucunda grafit plaka numunesi 1,01 g kütle kaybına uğramıştır.

İmalatı yapılan deney düzeneği ile Samsun şehrinin OMÜ Yurtlar-Tekkeköy HRS güzergah hattı boyunca kuru ve sulu şartta yapılan aşınma deney sonuçlarının karşılaştırma sonuçları şunlardır;

1. Orijinal grafit plaka numunesiyle kuru şartta yapılan aşınma deneyi sonucunda sürtünme katsayısı değeri 0,75 sulu şartta ise 0,65 değerine düştüğü ölçülmüştür. Sürtünme katsayısı değerinin sulu şartta gerçekleştirilen deneylerde düşmesinde, aşınma çifti arasına gönderilen suyun yüzeyde oluşturduğu sürtünmeyi azaltıcı su filmi tabakasının varlığı olduğu düşünülmektedir.
2. Orijinal grafit plaka numunesiyle kuru şartta yapılan aşınma deneyinde ölçülen 55 °C çalışma sıcaklığının, sulu ortamda 32 °C' ye düşmesinde suyun çalışma bölgesinde oluşturduğu soğutucu etkisidir.
3. Orijinal grafit plaka numunesiyle kuru ve sulu şartta yapılmış aşınma yüzey analizleri karşılaştırıldığında, kuru şartta gerçekleştirilen deneyler sonucunda, bakır malzemeden grafit plaka yüzeyine malzeme transferi olduğu ve bakır malzemenin adhesiv aşınmanın etkisiyle yüzeye yapışıp sıvandığı görülmüştür. Sulu şartta gerçekleştirilen deney sonucunda oluşan grafit plaka yüzeyi incelendiğinde ise herhangi bir malzeme transferine rastlanmamıştır. Aşınma bölgesinde oluşan su filmi tabakası bakır malzemenin grafit plaka yüzeyine yapışmasına izin vermemiştir.
4. Orijinal grafit plaka numunesiyle yapılan kuru şart ve sulu şart aşınma yüzey analizleri karşılaştırıldığında, kuru şartta gerçekleştirilen deneyler sonucu oluşan görüntüde abrasiv aşınmanın etkisiyle yüzeyde çukurcuk ve oyuk şeklinde adlandırılan yüzey hasarlarının olduğu görülmüştür. Sulu şartta yapılan deney sonucu elde edilen yüzey görüntüsü incelendiğinde ise kuru şartta yapılan aşınma yüzeyine benzer fakat daha fazla miktarda yüzey hasarı görülmüştür. Sulu şartta yüzey hasarı miktarının fazla olmasının, yüzeye yapışmayan bakır

plakalarının çukurcuk ve oyuk hasar bölgelerinde daha fazla aşınmaya sebep olduğu düşünülmektedir. Kuru ve sulu şartta yapılan deney sonucunda elde edilen kütle kayıpları karşılaştırıldığında, sulu şartta kütle kaybının fazla olması bu düşüncüyü desteklemektedir.

5. Orijinal grafit plaka numunesiyle kuru ve sulu şartta yapılan deney sonuçlarında elde edilen aşınma yüzeylerinde yapılan AFM analizlerinde, deney öncesi (R_a :65,32 nm) yüzey topografyasının, kuru şartta (R_a :28,34 nm) yapılan deney sonrası daha pürüzsüz bir yüzey haline geldiği, sulu şartta (R_a :55,35 nm) yapılan deney sonucunda ise deney öncesi duruma göre az miktarda pürüzsüzleştiği görülmüştür. Sulu şartta yapılan deney sonucu oluşan yüzey topografyasının kuru şartta göre daha pürüzlü bir yapı olmasında, Cu malzemenin yüzeye yapışıp sıvanamaması ve aşınma sırasında aşınan Cu malzeme partiküllerinin daha fazla aşındırıcı olarak çalışmasında etkisi büyüktür. SEM görüntüleri ve kütle kaybı ölçümleri bu düşüncüyü desteklemektedir.
6. Yerli üretim grafit plaka numunesiyle kuru şartta yapılan aşınma deneyi sonucunda sürtünme katsayısı değeri 0,87 sulu şartta ise 0,76 değerine düştüğü ölçülmüştür. Sürtünme katsayısı değerinin sulu şartta gerçekleştirilen deneylerde düşmesinde, aşınma çifti arasına gönderilen suyun yüzeyde oluşturduğu sürtünmeyi azaltıcı su filmi tabakasının varlığı olduğu düşünülmektedir.

Deney düzeneğinin imalatı ve deneysel çalışmaları sonrasında yapılabilecek öneriler şu şekilde sıralanmıştır:

1. Deney düzeneği gerekli yatırım ile seri imalata uygun bir hale getirilebilir.
2. Yatırım ile daha uygun hale getirilen deney düzeneği ülkemizin raylı sistemler ve ithal edilen grafit plakaların geliştirilmesi çalışmalarında etkin olarak kullanılabilir.
3. Gerekli saha ve güvenlik koşulları sağlandığında deney düzeneğine elektrik akımı verilip akımlı deneyler gerçekleştirilebilir.

KAYNAKLAR

- Abhang, L.B. ve Hameedullah, M. (2012). Optimal machining parameters for achieving the desired surface roughness in turning of steel. *Journal of Engineering Research*. 9 (1). 37–45.
- Alo, O.A. ve Otunniyi, I.O. (2021). Electrical Conductivity of Polyethylene / Epoxy / Graphite / Carbon Black Composites : Synergy of Blend Immiscibility and Hybrid Filler. *Polymer-Plastics Technology and Materials*. 60 (18). 2075–2088.
- Altan, M.F. ve Kızıltaş, M.Ç. (2020). Yüksek Hızlı Demiryolları, Yolcu Ve Yük Taşımacılığı Karşılaştırmaları Bağlamında Küresel Ölçekli Bir Derleme Çalışması. *DÜMF Mühendislik Dergisi*. 11 (1). 319–328.
- Ambrósio, J., Pombo, J., ve Pereira, M. (2013). Optimization of high-speed railway pantographs for improving pantograph-catenary contact. *Theoretical and Applied Mechanics Letters*. 3 (1). 013006.
- Arı, M.E. (2021). Kent İçi Raylı Sistem Araçlarının Tasarım Kriterleri Örnek Bir Metro Tasarımı Araç Gövdesinin Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Aerodinamik ve Statik Analizi. Karabük Üniversitesi.
- Arı, V. (2010). *Kent İçi Raylı Sistemler*. İstanbul.
- Arnold, M. ve Simeon, B. (2000). Pantograph and catenary dynamics: A benchmark problem and its numerical solution. *Applied Numerical Mathematics*. 34 (4). 345–362.
- Aydın, T. (2012). Hafif Raylı Sistemlerin Elektrik Güç Beslemesinde Güvenilirlik Analizi. c. 66 İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Babalık, F.C. ve Çavdar, K. (2018). *Makine Elemanları ve Konstrüksiyon Örnekleri*. Bursa Dora.
- Balestreire, M. ve Hollenberger, J. (2015). Maglev: Transportation of the Future?. *Fifth Annual Freshman Conference*. 7 (1). 37–72.
- Baştürk, G. (2014). Kent İçi Raylı Toplu Taşıma Sistemleri İncelemesi ve Dünya Örnekleri ile Karşılaştırılması.
- Bhargava, B. (1999). Railway Electrification Systems and Engineering. *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.99CH36364)*. 445–450.
- Bucca, G. ve Collina, A. (2009). A procedure for the wear prediction of collector strip and contact wire in pantograph–catenary system. *Wear*. 266 (1–2). 46–59.
- Bucca, G. ve Collina, A. (2015). Electromechanical interaction between carbon-based pantograph strip and copper contact wire: A heuristic wear model. *Tribology International*. 92 . 47–56.
- Can, M. (2020). Kent İçi Raylı Sistemlere Yeni Hat Entegrasyonunda Farklı Koşulların İşletme Sürekliliğine Etkisinin İncelenmesi. Kocaeli Üniversitesi.
- Chehreh C., S., Rudolph, M., Kratzsch, R., Sandmann, D., ve Gutzmer, J. (2016). A Review of Graphite Beneficiation Techniques. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. 37 (1). 58–68.
- Chen, G.X., Li, F.X., Dong, L., Zhu, M.H., ve Zhou, Z.R. (2009). Friction and wear behaviour of stainless steel rubbing against copper-impregnated metallized

- carbon. *Tribology International*. 42 (6). 934–939.
- Cho, Y.H., Lee, K., Park, Y., Kang, B., ve Kim, K.N. (2010). Influence of Contact Wire Pre-sag on the Dynamics of Pantograph Railway Catenary. *International Journal of Mechanical Sciences*. 52 (11). 1471–1490.
- Chua, M.S., Rahman, M., Wong, Y.S., ve Loh, H.T. (1993). Determination of optimal cutting conditions using design of experiments and optimization techniques. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 33 (2). 297–305.
- Collina, A. ve Bruni, S. (2002). Numerical simulation of pantograph-overhead equipment interaction. *Vehicle System Dynamics*. 38 (4). 261–291.
- Cui, L., Luo, R., Wang, L., Luo, H., ve Deng, C. (2018). Novel copper-impregnated carbon strip for sliding contact materials. *Journal of Alloys and Compounds*. 735 . 1846–1853.
- Davim, J.P. (2003). Design of optimisation of cutting parameters for turning metal matrix composites based on the orthogonal arrays. *Journal of Materials Processing Technology*. 132 (1–3). 340–344.
- de souza, H.J.C., Borges, M., B. Moyses, C., Lopes, F., J., F., R. Ferreira, U., N., R., ve da Silv, C.E.S. (2013). Robust Design and Taguchi Method Application. *Design of Experiments - Applications*. 1–20.
- Deng, C., Yin, J., Zhang, H., Xiong, X., Wang, P., ve Sun, M. (2017). The tribological properties of Cf/Cu/C composites under applied electric current. *Tribology International*. 116 . 84–94.
- Ding, T., Chen, G.X., Bu, J., ve Zhang, W.H. (2011a). Effect of temperature and arc discharge on friction and wear behaviours of carbon strip/copper contact wire in pantograph–catenary systems. *Wear*. 271 (9–10). 1629–1636.
- Ding, T., Chen, G.X., Wang, X., Zhu, M.H., Zhang, W.H., ve Zhou, W.X. (2011b). Friction and wear behavior of pure carbon strip sliding against copper contact wire under AC passage at high speeds. *Tribology International*. 44 (4). 437–444.
- Efanov, D., Osadchy, G., Sedykh, D., Pristensky, D., ve Barch, D. (2016). Monitoring system of vibration impacts on the structure of overhead catenary of high-speed railway lines. *Proceedings of 2016 IEEE East-West Design and Test Symposium, EWDTS 2016*. (October 2016).
- Fidan, P. (2018). Raylı Sistemlerde Enerji Kalitesi Problemleri. Yıldız Teknik üniversitesi.
- Gologlu, C. ve Sakarya, N. (2008). The effects of cutter path strategies on surface roughness of pocket milling of 1.2738 steel based on Taguchi method. *Journal of Materials Processing Technology*. 206 (1–3). 7–15.
- Günay, M. ve Yücel, E. (2013). Application of Taguchi method for determining optimum surface roughness in turning of high-alloy white cast iron. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*. 46 (2). 913–919.
- He, D.H. ve Manory, R. (2001). A novel electrical contact material with improved self-lubrication for railway current collectors. *Wear*. 249 (7). 626–636.

- He, D.H., Manory, R., ve Sinkis, H. (2000). A sliding wear tester for overhead wires and current collectors in light rail systems. *Wear*. 239 (1). 10–20.
- He, D.H., Manory, R.R., ve Grady, N. (1998). Wear of railway contact wires against current collector materials. *Wear*. 215 (1–2). 146–155.
- Hu, Y., Chen, G.X., Zhang, S.D., Gao, G.Q., Wu, G.N., Zhang, W.H., ve Zhou, Z.R. (2017). Comparative investigation into the friction and wear behaviours of a Cu–Ag contact wire/carbon strip and a pure copper contact wire/carbon strip at high speeds. *Wear*. 376–377 . 1552–1557.
- Huang, J., Wang, M., Li, Y., Xu, E., Jiang, K., Li, M., Zhong, H., Liu, J., ve Jiang, Y. (2020). Effect of flake graphite content on wear between behavior between P/M copper-based pantograph slide and contact wire. *Materials Research Express*. 7 (7).
- Huang, S., Feng, Y., Liu, H., Ding, K., ve Qian, G. (2013). Electrical sliding friction and wear properties of Cu–MoS 2-graphite-WS 2 nanotubes composites in air and vacuum conditions. *Materials Science and Engineering A*. 560 . 685–692.
- Jia, S.G., Liu, P., Ren, F.Z., Tian, B.H., Zheng, M.S., ve Zhou, G.S. (2007). Sliding wear behavior of copper alloy contact wire against copper-based strip for high-speed electrified railways. *Wear*. 262 (7–8). 772–777.
- Kalpakistan, S. ve Schmid, S.R. (2009). *Manufacturing Engineering and Technology*. Prentice Hall.
- Karaköse, E. (2014). Raylı Sistemlerde Pantograf-Katener Sisteminin Modellenmesi, Simülasyonu ve Arıza Teşhis Yöntemlerinin Geliştirilmesi.
- Kiessling, F., Puschmann, R., Schmieder, A., ve Schneider, E. (2018). *Contact Lines for Electric Railways: Planning, Design, Implementation, Maintenance*. Wiley.
- Koç, E.P.D. (2015). *Makina Elemanları*. Samsun Akademisyen Kitabevi.
- Kubo, S. ve Kato, K. (1999). Effect of arc discharge on the wear rate and wear mode transition of a copper-impregnated metallized carbon contact strip sliding against a copper disk. *Tribology International*. 32 (7). 367–378.
- Kubota, Y., Nagasaka, S., Miyauchi, T., Yamashita, C., ve Kakishima, H. (2013). Sliding wear behavior of copper alloy impregnated C/C composites under an electrical current. *Wear*. 302 (1–2). 1492–1498.
- Kuwabara, T., Hiraishi, M., Goda, K., Okamoto, S., Ito, A., ve Sugita, Y. (2001). New solution for urban traffic: Small-type monorail system. *Hitachi Review*. 50 (4). 139–143.
- Lin, X.Z., Zhu, M.H., Mo, J.L., Chen, G.X., Jin, X.S., ve Zhou, Z.R. (2011). Tribological and electric-arc behaviors of carbon/copper pair during sliding friction process with electric current applied. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)*. 21 (2). 292–299.
- Liu, Z. (2015). Numerical Study on Multi-Pantograph Railway Operations at High Speed. KTH Royal Institute of Technology School.
- Ludema, K.C. (1996). *Textbook in Tribology*. CRC press, London, UK.
- MEB. (2011). *Raylı Sistemler Teknolojisi Sinyalizasyon Elektrifikasyon ve Haberleşme Tesisleri*.

- Mei, G. (2020). Tribological performance of rigid overhead lines against pantograph sliders under DC passage. *Tribology International*. 151 (February). 106538.
- Mei, G. (2021). Impact of voltage on the electric sliding tribological properties of current collectors against overhead lines. *Wear*. 474–475 (March). 203868.
- Morris, B., Foiadelli, F., ve Zaninelli, D. (2015). *Electrical Railway Transportation Systems*. c. 7.
- Nagasawa, H. ve Kato, K. (1998). Wear mechanism of copper alloy wire sliding against iron-base strip under electric current. *Wear*. 216 (2). 179–183.
- Nåvik, P.R. (2013). Numerical Analysis of the Dynamic Behaviour of Railway Catenary Systems in Accordance with Norwegian Conditions. Norwegian University of Science and Technology.
- Ölmez, T. (2020). Energy Distribution Modelling In Railway Systems. Marmara University.
- Öztürk, E. (2015). Prizmatik Parçaların İşlenmesinde Kesme kuvvetlerinin Analizi. Ondokuz Mayıs Üniversitesi.
- Pastor, G.J. (1989). The Case for Automated-Guideway Transit. *National Conference on Light Rail Transit*. 79–88.
- Pektaş, İ. ve Kahraman, Y. (2021). *Raylı Sistemler Sektör Raporu 2021*. Ankara.
- Poljanec, D., Kalin, M., ve Kumar, L. (2018). Influence of contact parameters on the tribological behaviour of various graphite/graphite sliding electrical contacts. *Wear*. 406–407 (April). 75–83.
- Prates, P.A., Adaixo, A.S., Oliveira, M.C., ve Fernandes, J. V. (2018). Numerical study on the effect of mechanical properties variability in sheet metal forming processes. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 96 (1–4). 561–580.
- Rajabi, A., Kadkhodayan, M., Manoochehri, M., ve Farjadfar, R. (2015). Deep-drawing of thermoplastic metal-composite structures: Experimental investigations, statistical analyses and finite element modeling. *Journal of Materials Processing Technology*. 215 (1). 159–170.
- Rigney, D.A. (2000). Transfer, mixing and associated chemical and mechanical processes during the sliding of ductile materials. *Wear*. 245 (1–2). 1–9.
- Senouci, A., Frene, J., ve Zaidi, H. (1999). Wear mechanism in graphite–copper electrical sliding contact. *Wear*. 225–229 . 949–953.
- Shangguan, B., Zhang, Y., Xing, J., Sun, L., ve Chen, Y. (2010). Comparative study on wear behaviors of metal-impregnated carbon material and c/c composite under electrical sliding. *Tribology Transactions*. 53 (6). 933–938.
- Shimanovsky, A., Yakubovich, V., ve Kapliuk, I. (2016). Modeling of the Pantograph-Catenary Wire Contact Interaction. *Procedia Engineering*. 134 . 284–290.
- Shobert, E.I. (1965). *Carbon Brushes: The Physics and Chemistry of Sliding Contacts*. Chemical Publishing Company.
- Şimşek, A.E. (2008). Elektrikli Raylı Sistemlerin İncelenmesi Ve Kent İçi Raylı Ulaşım Sistemlerinde Enerji Kalitesi Ve Geri Kazanımı. Yıldız Teknik

Üniversitesi.

- Song, Y., Ouyang, H., Liu, Z., Mei, G., Wang, H., ve Lu, X. (2017). Active control of contact force for high-speed railway pantograph-catenary based on multi-body pantograph model. *Mechanism and Machine Theory*. 115 . 35–59.
- SubsTech. (y.y.). SubsTech. https://www.substech.com/dokuwiki/lib/exe/detail.php?id=graphite&cache=cac he&media=graphite_structure.png, erişim 20 Aralık 2022.
- Taguchi, G., El Sayed, E.A., ve Hsiang, T. (1989). *Quality Engineering in Production Systems*, Mc Graw Hill, New York.
- TCDD. (2021). *2021 Yılı Faaliyet Raporu*. Ankara.
- Timan, P.E. (2015). Why Monorail Systems Provide a Great Solution for Metropolitan Areas. *Urban Rail Transit*. 1 . 13–25.
- Tu, C., Chen, Z.H., ve Xia, J. (2009). Thermal wear and electrical sliding wear behaviors of the polyimide modified polymer-matrix pantograph contact strip. *Tribology International*. 42 (6). 995–1003.
- Tu, C.J., Deng, L.P., Chen, D., Xiong, X.Z., Wang, Y.F., ve Zhu, Y. (2017). Preparation of Cf/Cu–C contact strip and wear behaviour under electric current. *Materials Science and Technology (United Kingdom)*. 33 (1). 98–103.
- UITP. (2019). The Global Tram and Light Rail Landscape October 2019. (October). 1–8.
- Ulusoy, A. (2010). Ulaşımında Raylı Sistemler ve Kayseray. Erciyes Üniversitesi.
- Üstünişik, B. ve Beyazıt, S. (1996). Türkiye’de kentsel ulaşım planlaması yaklaşımları ve kentiçi raylı taşımacılık. 53–62.
- Wikipedi. (2022). Şanghay Maglev Treni. https://tr.wikipedia.org/wiki/Şanghay_Maglev_Treni, erişim 23 Temmuz 2022.
- Wang, P., Zhang, H., Yin, J., Xiong, X., Tan, C., Deng, C., ve Yan, Z. (2017a). Wear and friction behaviours of copper mesh and flaky graphite- modified carbon/carbon composite for sliding contact material under electric current. *Wear*. 380–381 . 59–65.
- Wang, P., Zhang, H., Yin, J., Xiong, X., Tan, C., Deng, C., ve Yan, Z. (2017b). Wear and friction behaviours of copper mesh and flaky graphite- modified carbon/carbon composite for sliding contact material under electric current. *Wear*. 380–381 . 59–65.
- Wang, X., Wang, H., Yang, Z., Deng, L., Gao, G., ve Wei, W. (2020). Effect of Wet Condition on the Wear Performance of Carbon Strip and Metal Contact Wire with Electric Current. 1–4.
- Wang, Y.A., Li, J.X., Yan, Y., ve Qiao, L.J. (2012a). Effect of pv factor on sliding friction and wear of copper-impregnated metallized carbon. *Wear*. 289 . 119–123.
- Wang, Y.A., Li, J.X., Yan, Y., ve Qiao, L.J. (2012b). Effect of electrical current on tribological behavior of copper-impregnated metallized carbon against a CuCrZr alloy. *Tribology International*. 50 . 26–34.
- Warne, L.K., Bystrom, E., Jorgenson, R.E., Montoya, S.L., Merewether, K.O., Coats,

- R.S., Martinez, L.E., ve Jojola, J.M. (2012). *Protection characteristics of a Faraday cage compromised by lightning burnthrough*. Sandia National Laboratories (SNL), Albuquerque, NM, and Livermore, CA
- Wei, X.K., Meng, H.F., He, J.H., Jia, L.M., Li, Z.G., Meng, H.F., He, J.H., Jia, L.M., ve Li, Z.G. (2019). Wear Analysis and Prediction of Rigid Catenary Contact Wire and Pantograph Strip for Railway System.
- Wie, H., Zou, J., Li, X., ve Xiao, C. (2021). Friction and Wear Behavior of Copper-graphite Composites with Different Compositions in Water Environments. 1288–1296.
- Xiao, J.K., Zhang, L., Zhou, K.C., ve Wang, X.P. (2013). Microscratch behavior of copper-graphite composites. *Tribology International*. 57 . 38–45.
- Xue, W., Gao, S., Duan, D., Zhang, J., Liu, Y., ve Li, S. (2018). Material Transfer Behavior between a Blade and Two Types of Coating during High-Speed Rubbing. *Tribology Transactions*. 61 (5). 827–841.
- Yang, H., Hu, B., Liu, Y., Cui, X., ve Jiang, G. (2019a). Influence of reciprocating distance on the delamination wear of the carbon strip in pantograph–catenary system at high sliding-speed with strong electrical current. *Engineering Failure Analysis*. 104 (May). 887–897.
- Yang, H., Hu, B., Liu, Y., Cui, X., ve Jiang, G. (2019b). Influence of reciprocating distance on the delamination wear of the carbon strip in pantograph–catenary system at high sliding-speed with strong electrical current. *Engineering Failure Analysis*. 104 . 887–897.
- Yang, H., Li, C., Liu, Y., Fu, L., Jiang, G., Cui, X., Hu, B., ve Wang, K. (2021). Study on the delamination wear and its influence on the conductivity of the carbon contact strip in pantograph–catenary system under high-speed current-carrying condition. *Wear*. 477 (February).
- Yang, H.J., Chen, G.X., Gao, G.Q., Wu, G.N., ve Zhang, W.H. (2015). Experimental research on the friction and wear properties of a contact strip of a pantograph–catenary system at the sliding speed of 350 km/h with electric current. *Wear*. 332–333 . 949–955.
- Yang, H.J., Chen, G.X., Zhang, S.D., ve Zhang, W.H. (2012). Effect of the vibration on friction and wear behavior between the carbon strip and copper contact wire pair. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*. 226 (8). 722–728.
- Yang, W.H. ve Tarng, Y.S. (1998). Design optimization of cutting parameters for turning operations based on the Taguchi method. *Journal of Materials Processing Technology*. 84 (1–3). 122–129.
- Yuan, H., Wang, C., Zhang, S., Lin, X., ve Yu, M. (2014). Densification treatment and properties of carbon fiber reinforced contact strip. *Science and Engineering of Composite Materials*. 21 (1). 49–58.
- Zakaria, M.Y., Sulong, A.B., Sahari, J., ve Suherman, H. (2015). Effect of the addition of milled carbon fiber as a secondary filler on the electrical conductivity of graphite/epoxy composites for electrical conductive material. *Composites Part B: Engineering*. 83 . 75–80.
- Zhang, Y., Yang, Z., Song, K., Pang, X., ve Shangguan, B. (2013). Triboelectric

behaviors of materials under high speeds and large currents. *Friction*. 1 (3). 259–270.

Zhang, Y.Y., Zhang, Y.Z., Du, S.M., Song, C.F., Yang, Z.H., ve Shangguan, B. (2018). Tribological properties of pure carbon strip affected by dynamic contact force during current-carrying sliding. *Tribology International*. 123 . 256–265.

Zhang, Yanyan, Li, C., Pang, X., Song, C., Ni, F., ve Zhang, Yongzhen. (2021). Evolution processes of the tribological properties in pantograph/catenary system affected by dynamic contact force during current-carrying sliding. *Wear*. 477 (February).

Zhao, H., Feng, Y., Zhou, Z., Qian, G., Zhang, J., Huang, X., ve Zhang, X. (2020). Effect of electrical current density, apparent contact pressure, and sliding velocity on the electrical sliding wear behavior of Cu–Ti3AlC2 composites. *Wear*. 444–445 (December 2019). 203156.

(2020). rmc. <https://rmc.com.tr/strain-gage-gerinim-olcer-ile-gerinim-ve-basinc-olcumu/>, erişim 26 Aralık 2020.

ÖZ GEÇMİŞ

Muhammet Anıl KAYA, Giresun Lisesi'ni bitirdikten sonra Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği bölümünden 2010 yılında mezun oldu. Mezun olduktan sonra bir savunma sanayi firmasında 2017 yılına kadar Kalite Kontrol Müdürü olarak görev yaptı. 2017 yılında KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı Yüksek Lisans programını bitirdi. 2017 yılında OMÜ LEE'de Makine Mühendisliği ABD Doktora programına başladı. 2017 yılından bu yana Giresun Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu'nda Makine ve Metal Teknolojileri Bölümünde Öğretim Görevlisi olarak görev yapan KAYA, iyi derecede İngilizce bilmektedir. (21/12/22)

İletişim Bilgileri

ORCID ID : 0000-0002-5717-0698

Yayınlar:

Ulusal Hakemli Dergilerde Yayınlanan Makaleler:

1. Kaya, M. A., Dengiz, C. G., Büyükkaya, K. (2022). Investigation of Static Strain Aging Behaviour of AISI 304 Austenitic Stainless Steel, *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi*, 12 (1), 340-354.

Uluslararası Bilimsel Toplantılarda Sunulan ve Bildiri Kitaplarında (Proceedings) Basılan Bildiriler:

1. Kaya, M. A., Dengiz, C. G., Öztürk, E., Yıldızlı, K. (2022, Haziran). “Tribological Interaction Test Equipment for Rail Systems”. *International Technology Sciences and Design Symposium in Giresun/TURKEY*, Giresun Üniversitesi, Giresun.
2. Kaya, M. A., Dengiz, C. G., Yıldızlı, K. (2022, Haziran). “Hafif Raylı Sistemlerde Pantograf ve Katener Temasının İncelenmesi”. *Uluslararası Multidisipliner İnovatif Yaklaşımlar Kongresi, İstanbul/TÜRKİYE*, Beykent Üniversitesi, İstanbul.
3. Kaya, M. A., Taşkın A., G., Dengiz, C. G., Şenel, M. C. (2022, Ekim). “Hidrolik Kontrollü Zımparalama ve Parlatma Makinesi Tasarımı”. *2nd International Conference on Engineering and Applied Natural Sciences, Konya/TURKEY*.

Patent ve Faydalı Model Tescili:

1. Yıldızlı, K., Kaya, M. A., Dengiz, C. G. (Başvuru tarihi: 31.12.2019, Tescil tarihi: 21.03.2022), Tribolojik Etkileşim Deney Cihazı, Tescil Numarası: 2019 23114.

Projelerde Yaptığı Görevler:

1. Giresun Üniversitesi Bilimsel Araştırma ve Geliştirme Projeleri, Derin Çekilmiş Paslanmaz Çelik Kapların Yaşlandırma Isıl İşlemi İle Güçlendirilmesi, Proje Yürütücüsü: BÜYÜKKAYA Kenan, Yrd. Araştırmacılar: KAYA Muhammet Anıl, GÜLER Birkut, 12.04.2017-24.09.2020)

2. OMÜ Bilimsel Araştırma Projeleri, Raylı Sistemler İçin Grafit Plakaların Sürtünme ve Aşınma Davranışlarının Geliştirilen Deney Düzenegi ile Araştırılması, Proje Yürütücüsü: YILDIZLI Kemal, Yrd. Araştırmacı: KAYA Muhammet Anıl, 15.03.2021-Devam ediyor)