



**DIŞ ORTAMLARDA KULLANILAN GRESLERE METAL
MİKROPARÇACIKLARIN EKLENMESİ DURUMUNDA ISIL
PERFORMANSLARININ İNCELENMESİ**

Gökhan GÖKDEMİR

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

AĞUSTOS 2021

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Gökhan GÖKDEMİR

02/08/2021

DİŞ ORTAMLARDA KULLANILAN GRESLERE METAL MİKROPARÇACIKLARIN EKLENMESİ DURUMUNDA ISIL PERFORMANSLARININ İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Gökhan GÖKDEMİR

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ağustos 2021

ÖZET

Dış ortamlarda çalışan büyük iş makinalarının hareketli aksamalarını yağlamakta kullanılan gres yağlarından iki tipi, ısı özellikleri incelenmek üzere seçilmiştir. Katkısız ve katkılı (mikroparçacık ilaveli) greslerin sıcaklık, moment, ısınım ve ısı iletim katsayısı özellikleri deneysel olarak incelenmiştir. Sıcaklık ve moment değişimi için zaman kontrollü çalışma periyoduna sahip bir deney düzeneği hazırlanmıştır. Işınım özellikleri görünür ve 2,5–20 µm’lik kızılötesi dalgaboyu aralığında incelenmiştir. Isı iletim deneyleri konvansiyonel bir ısı iletim deney setinde 20–65°C sıcaklık aralıklarında gerçekleştirilmiştir. Kısa ve uzun çalışma sürelerine göre, katkısız ve mikroparçacık katkılı greslerin ısı iletim katsayıları değerlendirilmiştir. Isıl iletkenlik özellikleri yüksek olan CuO, TiO₂, ZnO ve grafit katkı malzemeleri olarak seçilmiş ve kullanılmış olup, incelenen sıcaklık, moment ve soğurma sonuçları grafikler halinde verilmiştir. Sıcaklık değişimleri gresin tipine göre farklılık göstermektedir. Gres 2, Gres 1’e göre daha yüksek sıcaklıklarda çıkmaktadır. Mikroparçacık katkılı Gres 1 numunelerinin sıcaklık değerleri katkısız Gres 1’in değerlerinden küçüktür. Gres 2’de ise, katkılı numunelerin sıcaklık değişimleri katkısız Gres 2’nin değerlerinden daha fazladır. %0,02, %3,33 ve %10 mikroparçacık katkılı gres numuneleri kızılötesi dalga boyundaki incelemelerinde, katkılı numunelerin soğurma değerleri katkısız gres numunelerin soğurma değerlerinden küçük olduğu görülmektedir. %10 katkılı Gres 1’in soğurma değerlerinde grafit katkılı numunenin sonuçları belirgin farkla yüksektir ve Gres 2’nin soğurma ölçümlerinde, TiO₂ katkılı numune 12,5 µm’den büyük dalga boylarında yüksek değerlere ulaşmaktadır. Isı iletim katsayısı bakımından karşılaştırıldığında, katkılı Gres 1’in ısı iletim özellikleri, katkısız Gres 1 numunelerinden daha düşüktür. Gres 2’de ise, katkılı numuneler katkısız numunelerden daha yüksek ısıl iletkenliklere sahiptir. En yüksek ısıl iletkenlikler ZnO katkılı Gres 2 ve en düşük ısıl iletkenlikleri de TiO₂ katkılı Gres 2 numunelerinde tespit edilmiştir. Katkılı gres numunelerin moment değerleri, katkısız gres numunelerin değerlerinden küçüktür.

Bilim Kodu : 91412

Anahtar Kelimeler : Isı transferi, Gres, Metal mikroparçacıklar, Soğurma, Işınım özellikleri, Isı iletim katsayısı

Sayfa Adedi : 99

Danışman : Doç. Dr. Nimeti DÖNER

İkinci Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Zerrin SERT

INVESTIGATION OF THERMAL PERFORMANCES AT ADDITION METALLIC MICROPARTICLES TO GREASES USED IN OUTDOOR ENVIRONMENTS

(M. Sc. Thesis)

Gökhan GÖKDEMİR

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

August 2021

ABSTRACT

Two types of greases used to lubricate the moving parts of huge machines operating in external environments were selected to be examined thermal properties. Temperature, torque, absorbance properties and thermal conductivity coefficients of the greases with nonadditive and including additive (microparticles) were experimentally investigated. An experimental setup with one-hour controlled working period was prepared to examine of the temperature and torque changes. The radiative properties of the greases were examined in the UV-visible spectrum and the infrared wavelength range of 2,5–20 μm . The measurements of thermal conductivity were carried out in a conventional thermal conductivity measurement device in the temperature range of 20–65 $^{\circ}\text{C}$. CuO, TiO₂, ZnO and graphite additives with high thermal conductivity properties were used and the measured absorption values of the samples were presented in graphics. The changing of temperature vary according to the type of greases. The Grease 2 reaches higher temperatures than the Grease 1. The temperature values of Grease 1 with microparticle additives are smaller than the values of Grease 1 without additives. For Grease 2, temperature changes of the samples with additives are higher than those values of Grease 2 without additives. In the infrared wavelength range, for the greases of 0,02wt%, 3,33 wt% and 10wt% microparticle-added, the absorption values of the samples are smaller than the samples without additives. In the absorption values of 10wt% additive Grease 1, the absorption results of the sample with graphite additive are significantly higher and in the absorption measurements of Grease 2, the sample with TiO₂ additive receives high values at wave lengths after 12,5 μm . The thermal conductivity of Grease 1 with additives are smaller than those of Grease 1. For Grease 2, the added samples have higher thermal conductivities than those of Grease 2 without additive. The highest thermal conductivities were determined in Grease 2 with ZnO and the lowest thermal conductivity in Grease 2 with TiO₂ samples. The torque values of the grease samples with additives are smaller than the values of the grease samples without additives.

Science Code : 91412

Key Words : Heat transfer, grease, metallic microparticles, absorption, radiative properties, thermal conductivity coefficient

Page Number : 99

Supervisor : Doç. Dr. Nimeti DÖNER

Co-Supervisor : Dr. Öğr. Üyesi Zerrin SERT

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren motive eden tez danışmanlarım Sayın Doç. Dr. Nimeti DÖNER ve Dr. Öğr. Üyesi Zerrin SERT hocalarıma teşekkürlerimi sunarım.

Hayatım boyunca maddi ve manevi hiçbir desteğini esirgemeyen, beni bu günlere getiren ve her daim bana güvenen aileme sonsuz teşekkür ederim. Yalnızca tez döneminde değil hayatımın her anında bana olan inancını ve desteğini yanımda hissettiğim sevgili eşim Duygu GÖKDEMİR ve biricik oğlum Eren GÖKDEMİR'e sonsuz teşekkür ederim.



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
RESİMLERİN LİSTESİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. GRESLER ve LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	3
2.1. Sürtünme ve Yağlama	3
2.1.1. Yağlayıcılar	5
2.2. Literatür Araştırması	9
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	15
3.1. Görünür Dalgaboyunda Soğurma Değerlerinin Ölçülmesi.....	15
3.2. Uzun Dalgaboyunda Soğurma Değerlerinin Ölçülmesi.....	18
3.3 Isı İletim Katsayısının Ölçülmesi.....	19
3.3.1 Isı iletim katsayısının hesaplanması ve deneysel çalışmalar.....	21
3.4. Isıl Performans Test Düzeneği	24
3.4.1. Test düzeneğinin uygulama prosedürü.....	26
3.5. Mikromalzemeler	27
3.5.1. Bakır oksit (CuO).....	28
3.5.2. Titanyum oksit (TiO ₂)	28
3.5.3. Çinko oksit (ZnO)	29

	Sayfa
3.5.4. Grafit	29
4. DENEYSEL SONUÇLAR VE YORUMLAR	31
4.1. Görünür Dalgaboyunda Soğurma Ölçümleri	31
4.2. Yakın Kızılötesi Dalgaboyunda Soğurma Ölçümleri	32
4.3. Isı İletim Katsayısı Ölçümleri	35
4.4. Isıl Performans Test Düzenegi ile Sıcaklık ve Moment Ölçümleri	38
5. SAYISAL ANALİZ VE YORUMLAR.....	51
5.1. Soğurma ve Saçılma Etkenliklerinin Sayısal Hesabı	51
5.2. Isıl İletkenlik Ölçüm Sonuçlarının Değerlendirilmesi	55
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	59
KAYNAKLAR	61
EKLER.....	67
EK-1. Deneysel ölçümlerin hata analizi.....	68
EK-2. Belirsizlik analizi program çıktıları.....	73
ÖZGEÇMİŞ	98

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. UV ölçümleri için seyreltilen greslerin çözelti miktarları	18
Çizelge 3.2. Mikromalzemelere ait genel özellikler	29
Çizelge 5.1. Mikroparçacıkların ışınım özellikleri	53
Çizelge 5.2. Deney sonuçlarına göre Eş. 3.5 ile hesaplanan ısı iletim katsayıları.....	55
Çizelge 5.3. Deney sonuçlarına göre Eş. 3.6 ile hesaplanan ısı iletim katsayıları.....	56



ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Sürtünme katsayısının hız ile değişimi (Stribeck eğrisi)	4
Şekil 2.2. Greslerin sınıflandırılması	7
Şekil 2.3. Lityum bazlı gresin farklı yaşlanma durumlarındaki soğurma değerleri.....	11
Şekil 2.4. Gresin 3.2–6.7 µm dalga boyu aralığındaki soğurma ölçümleri.....	12
Şekil 2.5. Cu nanoparçacıkların kızılötesi dalga boyundaki geçirgenlik değerleri.....	13
Şekil 3.1. Elektromanyetik ışıının dalga boylarına dağılımı	15
Şekil 3.2. Test cihazının çalışma prensibi.....	20
Şekil 3.3. Gres ısı performans deneysel test düzeneğinin şematik görünümü.....	24
Şekil 3.4. Aşınma çenesi ve aşınma plakası (7 ve 6 numaralı cihaz parçaları) sürtünme yüzeyinin detayları	26
Şekil 4.1. İncelenen gres numunelerinin (katkısız) görünür ışııkta soğurma değerleri ...	31
Şekil 4.2. Katkısız ve katkılı Gres 1 soğurma ölçüm sonuçları (a) %0,02 katkılı, (b) %3,33 katkılı , (c) %10 katkılı ve (d) ZnO katkılı	33
Şekil 4.3. Katkısız ve katkılı Gres 2 soğurma ölçüm sonuçları (a) %0,02 katkılı, (b) %3,33 katkılı, (c) %10 katkılı ve (d) ZnO katkılı	35
Şekil 4.4. 5W güçte çalışmada katkısız ve katkılı Gres 1 numunelerinin sıcaklık ölçümleri	36
Şekil 4.5. 10W güçte çalışmada katkısız ve katkılı Gres 1 numunelerinin sıcaklık ölçümleri	37
Şekil 4.6. 5W güçte çalışmada katkısız ve katkılı Gres 2 numunelerinin sıcaklık ölçümleri	37
Şekil 4.7. 10W güçte çalışmada katkısız ve katkılı Gres 2 numunelerinin sıcaklık ölçümleri	38
Şekil 4.8. Katkısız greslerin sıcaklık değişimleri (a) Gres 1 ve (b) Gres 2.....	40
Şekil 4.9. Katkısız greslerin moment değişimleri (a) Gres 1 ve (b) Gres 2.....	40
Şekil 4.10. %0,02 katkılı Gres 1 numunelerinin sıcaklık değişimleri (a) CuO, (b) Grafit, (c) TiO ₂ ve (d) ZnO katkılı	41
Şekil 4.11. %0,02 katkılı Gres 2 numunelerinin sıcaklık değişimleri (a) CuO, (b) Grafit, (c) TiO ₂ ve (d) ZnO katkılı	42

Şekil	Sayfa
Şekil 4.12. %0,02 katkılı Gres 1 numunelerinin moment değişimleri (a) CuO, (b) Grafit, (c) TiO ₂ ve (d) ZnO katkılı	43
Şekil 4.13. %0,02 katkılı Gres 2 numunelerinin moment değişimleri (a) CuO, (b) Grafit, (c) TiO ₂ ve (d) ZnO katkılı	44
Şekil 4.14. Katkısız ve katkılı Gres 1 numunelerinin sıcaklık değişim eğrileri (a) %0,02 (b) % 3,33 ve (c) ZnO katkılı	45
Şekil 4.15. Katkısız ve katkılı Gres 2 numunelerinin sıcaklık değişim eğrileri (a) %0,02 (b) %3,33 ve (c) ZnO katkılı	46
Şekil 4.16. Katkısız ve katkılı Gres 1 numunelerinin moment değişim eğrileri (a) %0,02 (b) %3,33 ve (c) ZnO katkılı	48
Şekil 4.17. Katkısız ve katkılı Gres 2 numunelerinin moment değişim eğrileri (a) %0,02 (b) %3,33 ve (c) ZnO katkılı	49
Şekil 5.1. Katkılı ve katkısız greslerin farklı saçılma indekslerinin soğurma etkenliği üzerine etkisi: (a) $k = 1,5$; (b) $k = 4,5$	53
Şekil 5.2. Gres içindeki tek ZnO parçacığının DDA ile hesaplanan (a) soğurma ve (b) saçılma etkenlikleri	55
Şekil 5.3. Gres 1 için k değerlerinin karşılaştırılması	58
Şekil 5.4. Gres 2 için k değerlerinin karşılaştırılması	58

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 3.1. Görünür dalga boyunda soğurma değeri ölçümünde kullanılan cihaz	16
Resim 3.2. a) Gres 1 b) Gres 2 çözeltileri	17
Resim 3.3. Deneylerde kullanılan vorteks karıştırıcı	17
Resim 3.4. Kızılötesi dalga boyu aralıklarındaki soğurma ölçümleri için kullanılan cihaz	19
Resim 3.5. Isı iletim katsayısı ölçüm cihazının resmi	20
Resim 3.6. Gres 1 numuneleri, (a) katkısız, (b) CuO, (c) Grafit, (d) TiO ₂ ve (e) ZnO katkılı	23
Resim 3.7. Isı deneylerinden sonra Gres 1 numuneleri, (a) katkısız, (b) CuO, (c) Grafit, (d) TiO ₂ ve (e) ZnO katkılı	23
Resim 3.8. Gres 2 numuneleri, (a) katkısız, (b) CuO, (c) Grafit, (d) TiO ₂ ve (e) ZnO katkılı	23
Resim 3.9. Isı deneylerinden sonra Gres 2 numuneleri, (a) katkısız, (b) CuO, (c) Grafit, (d) TiO ₂ ve (e) ZnO katkılı	23
Resim 3.10. Deney düzeneğinin resmi	25
Resim 4.1. Greslere mikroparçacıkların katılmış halleri	39

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
A	Soğurma
Q	Işınım etkenlikleri (soğurma veya saçılma)
c	Molar konsantrasyon
I	Işınım şiddeti
k	Isı iletim katsayısı (W/mK)
par	Parçacık
r_e	Elektriksel direnç
T	Geçirgenlik
T	Sıcaklık
N	Parçacık sayısı
N	Dipol sayısı
ε	Molar soğurma katsayısı
κ	Soğurma katsayısı
λ	Dalgaboyu
$base$	Baz akışkan, gres
0	Başlangıç
$total$	Toplam

1. GİRİŞ

Gresler, endüstriyel yağlamada çok fazla kullanılan yarı katı bir yağ çeşitidir. Viskoz özelliğe sahip olan gresler menteşeler, pimler, kayar raylar, darbe ve talaşlı imalat tezgâhlarının ayna, mengene, kovan, mil, dişli gibi tüm hareketli parçalarda, otomotiv ve iş makinelerinin rulmanlı ve kaymalı yataklarında kullanılmaktadır. Sürtünmeyi azaltarak makinelerin daha az tahrip olmasını sağlar, korozyonu önler ve enerji tasarrufu sağlar.

Greslerin bozunumu kimyasal ve mekanik yaşlanma şeklinde gerçekleşir ve yüksek yoğunluk yani yoğun kıvama sahiptirler. Bu özellikleri nedeniyle hareketli yataklarda, sızıntı olmadan yağlama işlevini gerçekleştirirler. Ancak bazı çalışma şartlarında, gresler yüksek kesme gerilmelerinin etkisi ile yapısal bozunumlara (yumuşama) uğramakta ve yataktan sızıntılara sebebiyet vermektedir.

Maden ocaklarında ve yol yapım çalışmalarında kullanılan büyük arazi araçları ve iş makinalarının hareketli parçaları periyodik olarak, gresler ile yağlanmaktadır. Bu şekilde araçların düzenli çalışmaları sağlanır ve yağlama işlemi koruyucu ve hasar önleyici özellik gösterdiği için, araçların hareketli güç aktarma parçalarının aşınması önlenir. Böylece büyük arazi araçları ve iş makinalarının servis bakım zamanının uzaması, parçaların daha sağlıklı ve uzun süre çalışması ve enerji tasarrufu sağlanır. Daha sık periyotlarda yapılan yağlama süreci, çalışanların zaman kaybına sebep olurken, aynı zamanda kullanılan gres maliyetini de artırmaktadır.

Bazı çalışma koşullarında (yüksek sıcaklık, aşırı yük, düşük çalışma hızları gibi şartlarda) mekanik sistemlerde görülen sürtünme ve aşınma problemleri için özel çözümler gerektirmektedir. Sürtünmenin sebep olduğu ısının, baz akışkandan daha yüksek ısı iletkenliğe sahip nano ya da mikro parçacıklar kullanılarak ortamdan hızlı aktarımının sağlanması ve yağlama özelliğinin sürdürülebilirliğinin devamı için katkı maddesi ilavesi düşünülmüştür. Bu çalışmada ağır iş makineleri için kullanılan birisi lityum esaslı, diğeri de kalsiyum esaslı iki çeşit grese dört farklı metalik mikroparçacık (CuO, TiO₂, ZnO ve Grafit) maddeleri ilave edilerek, katkılı gres numunelerinin hareketli bağlantı bölgelerindeki ısı iletim özellikleri incelenmiştir. Ağır yüklerin mevcut olduğu, yüksek devirli ortamlarda kullanılan lityum esaslı gresler, -12°C ile 130°C gibi bir çalışma sıcaklık aralığına sahiptir. Çalışmamızda kullanılan numune, Alman standardına göre DIN 51 502-KP 2 K-20 kodlu

grestir. Orta ve hafif yükler için ve su bulunan ortamlarda kullanılan kalsiyum esaslı gres numunesi de Alman standardına göre DIN 51825-KP 2 E-10 kodlu yağdır. Tezin genelinde, lityum esaslı gres Gres 1, kalsiyum esaslı gres ise Gres 2 olarak adlandırılmıştır. Gerçek çalışma şartlarını simule etmek için, deneysel çalışma olarak motorla karşılıklı dönme hareketlerini yapan çelik-prinç disklerden oluşan, sıcaklık ve hız kontrollü bir deney düzeneği hazırlanmıştır. Isıl iletkenlik özellikleri yüksek olan CuO, grafit, ZnO ve TiO₂ şeklindeki metal oksitler katkı malzemeleri olarak seçilmiştir. Tasarlanan bu düzenek ile katkısız gresler, CuO, grafit, ZnO ve TiO₂ mikroparçacıklarının karıştırıldığı greslerin dış ortamda çalışan iş makinelerinin yataklarına benzeyen test düzeneğinde kontrollü çalışma şartlarında, sıcaklık ve moment değişimleri şeklinde incelenmiştir. Ayrıca, mikroparçacık karıştırılmış gres numunelerinin görünür ve kızılötesi (infrared) dalgaboyu aralıklarındaki soğurma özellikleri de deneysel olarak ölçülmüştür. Aynı şekilde, ağırlıkça %3,33 katkılı ve katkısız Gres 1 ve Gres 2 için ısı iletim özellikleri hem deneysel hem de sayısal yöntemlerle analiz edilmiştir. Isı iletim deneyleri konvansiyonel bir ısı iletim deney setinde 20–65°C sıcaklık aralıklarında gerçekleştirilmiştir. Kısa ve uzun çalışma süreleri için yapılan deney sonuçlarına göre, katkısız ve mikroparçacık katkılı greslerin ısı iletim katsayıları değerlendirilmiştir.

2. GRESLER ve LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2.1. Sürtünme ve Yağlama

Birbirine temas eden iki yüzeyden birinin diğerinin bağıl hareketine karşı gösterdiği dirence *sürtünme* denir. Sürtünmeye bağlı olarak ısınma, aşınma ve enerji kaybı oluşur. Sürtünmenin birbirinden tamamen farklı üç hali vardır ve sürtünme; kuru sürtünme, sıvı sürtünme ve bu ilk ikisi arasında bulunan karma sürtünme (yarı sıvı sürtünme) olarak sınıflandırılabilir (İleri, 1972).

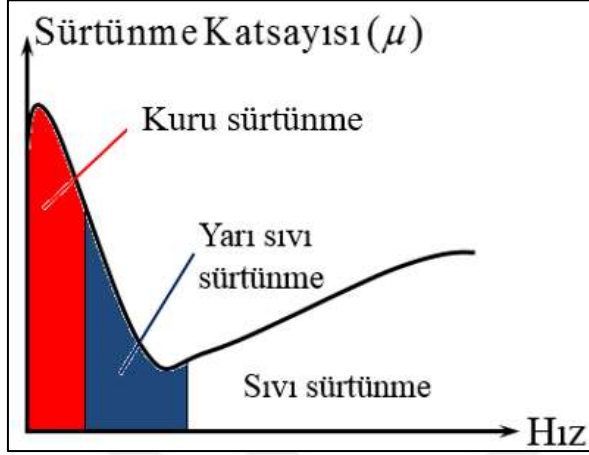
Kuru sürtünmede, katı cisim yüzeyleri arasında hiçbir şekilde yağlayıcı madde olmaksızın doğrudan doğruya temas ettiği sürtünme şeklidir. En hassas işlemede bile yüzey üzerinde pürüzler mevcuttur. Pürüzler farklı yükseklikte ve yüzeye heterojen olarak yayılmıştır. Cisimlerin birbirine temas ettikleri alanların küçük olmasından kaynaklı, bu noktalarda yüzey basıncı hesaplanan ortalama basıncın çok üzerindedir. Bu yüksek basınç plastik deformasyona ve temas eden tepeciklerin birbirleriyle kaynak bağlantısı oluşturmalarına sebep olur. Kuru sürtünmede hareket süresince bu kaynak noktacıklarındaki kısımlarda kesme ve kopmalar gözlenir.

Sıvı sürtünmede, katı cisim yüzeyleri arasında hiçbir yüzey pürüzü karşı tarafa temas etmeyecek şekilde yağ filmi oluşturulmuştur. Burada iki farklı yağlama söz konusudur. Yağ filmi, elemanların hareketleri sayesinde oluştuğunda “hidrodinamik yağlama”, eğer yağ filmi dışarıdan bir pompa vasıtasıyla sağlanıyorsa “hidrostatik yağlama” adını alır. Bu durumda sürtünme yağın viskozitesi ile oluşmaktadır (Babalık ve Çavdar, 2018).

Yarı sıvı sürtünme durumunda ise yağ filmi yeteri kalınlıkta oluşmamaktadır. Bu durumda katı cisimler arasındaki katı pürüz tepecikleri birbirine doğrudan temas edebilir.

İki katı cisim arasındaki bağıl harekete göre sürtünme çeşitlerinden birbirinden diğerine geçiş ve sürtünme katsayısının nitel değişimi Şekil 2.1’de verilen Stribeck eğrisi ile anlatılmaktadır. Bu eğri sürtünme katsayısı ve dönme hızı ile ilişkilidir. Kuru sürtünme mil hızının çok düşük olduğu (sıfır ve/veya sıfıra yakın) bölgede oluşur ve büyük sürtünme katsayısına sahiptir. Yarı sıvı sürtünme alanında ise düşük devirlerde, bir önceki bölgeye göre daha küçük sürtünme katsayısı oluşur. Minimum sürtünme katsayısının oluştuğu

dönüm noktasından itibaren, sıvı sürtünme bölgesi başlamakta ve devamında sürtünme katsayısında belirgin bir artış görülmektedir.



Şekil 2.1. Sürtünme katsayısının hız ile değişimi (Stribeck eğrisi)

Toplam enerji kaybının yaklaşık üçte birinin sürtünme ve aşınmadan kaynaklandığı yapılan bir çok araştırmalar ile tespit edilmektedir. Hatta maden mineralleri kullanılarak üretilen enerjinin %40'dan fazlası sürtünmeyi azaltabilmek için harcanmakta ve dünya genelinde CO₂ salınımının yaklaşık %2,7'si sürtünme ve aşınma nedeniyle oluşmaktadır. Bu nedenle, sürtünme ve aşınma kaybını azaltmak ve enerji korunumu sağlamak için yeni ve etkili stratejiler geliştirilmeye çalışılmaktadır (Holmberg ve Erdemir, 2017; Holmberg, Kivikytö-Reponen, Härkisaari, Valtonen, ve Erdemir, 2017). Özellikle son yıllardaki araştırmalarda yüksek ısıl iletkenlikli nano akışkanlar üzerine çalışılmaktadır. Nano ve/veya mikro parçacıkların kullanıldığı doğal taşınım çalışmaları (Haddad, Oztop, Abu-Nada ve Mataoui, 2012; Das, Roy ve Basak, 2017; Amber ve Donovan, 2018) ve zorlanmış taşınım çalışmaları (Heidary ve Kermani, 2010; Rao, Sreeramulu, Rao ve Ramana, 2017; Safari, Saffar-Avval ve Amani, 2018) ile literatürde karşılaşılmaktadır. Genellikle nanoparçacıklar geleneksel ısı transferi akışkanları olan su, etilen glikol ve sentetik yağlar ile karıştırılarak nanoakışkan elde edilmektedir (Sert ve Timuralp, 2015; Şahin ve Namlı, 2018; Karakaya, Gürü, Sözen, Aydın ve Bilici, 2019).

Gresler, diğer madeni yağlayıcılardan daha yüksek viskoziteye sahip yarı katı yağlayıcılardır. Özellikle vakum, radyasyon ve çok yüksek temas basıncı altında çalışan mekanik aksamaların rahatça çalışabilmesi ve aşınmasının önlenmesi için endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır. Gresin içeriği ve ısıl özellikleri, çalışma koşullarına ve kullanıldığı endüstriyel uygulamalara göre çeşitlilik gösterir. Gres üç ana bileşenden oluşur. Bunlar;

kalınlaştırıcı, baz yağ ve katkı maddeleridir ve içerdği kalınlaştırıcıya göre adlandırılırlar (Kaneta, Ogata, Takubo ve Naka, 2000). Lityum ile kalınlaştırılmış gres ağır yük ve yüksek hızda çalışan mekanik sistemlerde geniş uygulama sıcaklığı, su geçirmez özelliği ve düşük maliyet nedeniyle oldukça yaygın kullanılmaktadır. Kauçuk ile kalınlaştırılmış gres ise genellikle orta ve hafif yük altında çalışan mekanik sistemlerde kullanılmaktadır (Lugt, 2013; Sanchez ve diğerleri, 2011). Gresin performansı en çok kalınlaştırıcı maddenin konsantrasyonu ile baz yağ tipi ve viskozitesinden etkilenmektedir.

2.1.1. Yağlayıcılar

İki yüzey arasında bir film tabakası oluşturarak sürtünmeyi azaltan maddelere *yağlayıcı* adı verilmektedir. Yağlayıcıların avantajları;

- ✓ Eş çalışan yüzeyler arasındaki sürtünme ve aşınmayı azaltmak.
- ✓ Yeterli yağlama ile fonksiyon yüzeylerine yabancı madde girişini önlemek.
- ✓ Soğutucu olarak işlev görerek, oluşan ısıyı yatak bölgesinden uzaklaştırmak.
- ✓ Korozyon ve paslanmadan malzemeyi korumak.
- ✓ Hidrostatik güç aktarımında mekanik enerji aktarımını sağlamak.
- ✓ Bazı hallerde yalıtkan olarak da yararlanmak şeklinde sıralanabilir.

Yağlayıcılar katı, sıvı, plastik (gres) ve gaz yağlayıcılar olmak üzere fiziksel hallerine göre dört gruba ayrılabilir.

Katı Yağlayıcılar

Grafit, molibdendisülfid gibi toz şeklindeki yağlayıcılardır ve yüzeye iyi yapışıp kayganlaştırırlar. Katı yağlayıcılar toz şeklinde yalnız başlarına kullanıldığı gibi katkı maddesi olarak da kullanılmaktadırlar. Katkı maddesi olarak kullanılan katı yağlayıcılar, sıvı yağlara veya gres içerisine karıştırıldığında pastamsı bir yağlayıcı kıvamına gelir.

Saf katı yağlayıcılar özellikle makinede işlenen malzemenin yağ veya gres nedeniyle kirlenmesinin istenmediği durumlarda kullanılırlar.

Grafit, hava veya suyun bulunduğu ortamlarda, madensel yüzeylerde kayma gerilmesi küçük ama kopma mukavemeti yüksek bir tabaka oluşturarak yağlama işlemini gerçekleştirir. Hava

ve suyun bulunmaması durumunda (vakum ortamda), yağlama özelliği dışında çok kuvvetli bir aşındırma elemanı olur. Özellikle grafit roket vb. gibi yüksek sıcaklık etkisindeki makinelerin hareketli aksamalarında yatak malzemesi olarak kullanılmaktadır. Ayrıca sentetik koloidal grafit, yağlar ile karıştırılarak uygulandığında yüzeylerin sürtünme ve aşınma problemlerinde iyileştirme yaptığı da tespit edilmiştir.

Molibdendisülfid yağlayıcılar, madensel yüzeylerin üzerinde her ortam için çok iyi bir yağlama işlemi gerçekleştirirler. Hava veya su ortamının olması yağlama işlemi etkilemez. Molibdendisülfid vakum ortamda veya oda sıcaklığında çok iyi bir yağlama özelliğine sahiptir. Grafit ve molibdendisülfidin ısıl kararlılıkları çok iyidir. Grafitin özgül ağırlığı daha küçük olduğundan, sıvı ile grafitin karıştırılmasıyla elde edilen karışım, molibdendisülfite göre daha stabildir. Grafit ve molibdendisülfid çok temiz olmaları gerekir; aksi durumda yüzeyleri şiddetli bir şekilde aşındırırlar. Bazı durumlarda grafit ve molibdendisülfid döküm sırasında metalik malzemeye karıştırılarak kullanılır.

Plastik Yağlayıcılar – Gresler

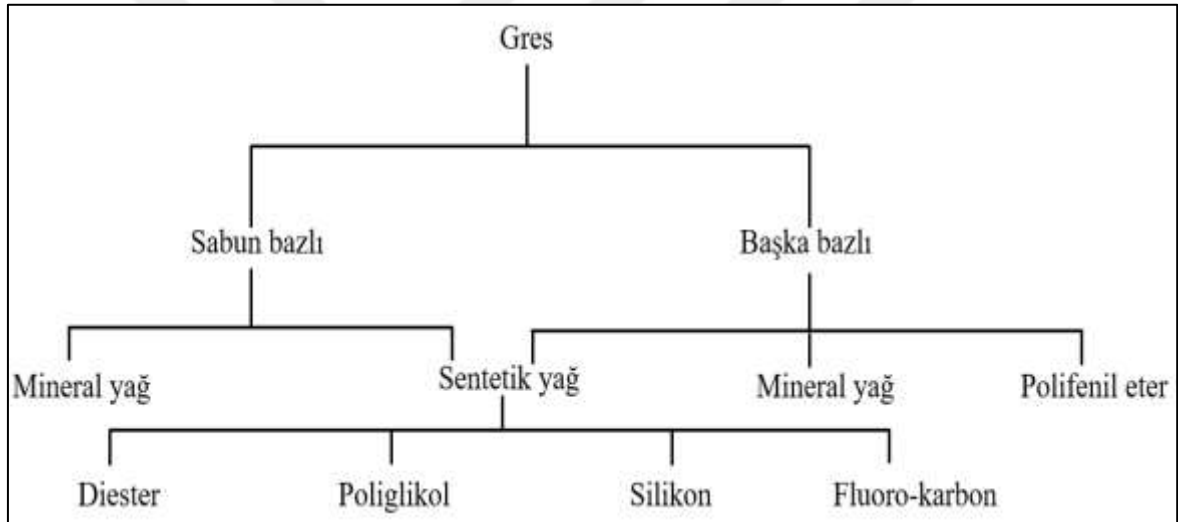
Plastik yağlayıcılar, krem kıvamında madeni sabun yapılı, organik kökenli veya sentetik yöntemle, örneğin gliserin bir yağ asidiyle esterleştirilmesiyle elde edilirler. Yağlama pratiğinde plastik yağlayıcılar gres olarak bilinirler. Gresin, sıvılara göre viskoziteleri daha yüksektir. Genel olarak gresler baz yağı, kalınlaştırıcı ve katkı maddeleri birleşiminden oluşurlar.

Genel olarak gres yağlaması, sıvı yağ ile sağlanan yağlama değeri kadar iyi değildir. Bununla birlikte gres yağlamasından vazgeçilmeyecek birçok durum mevcuttur. Örneğin, tozlu yerlerde veya açıkta çalışan makinelerde gres ile yağlama tercih edilmektedir. Çünkü, yataktan çıkan gres önde bir kapak teşkil etmekte, tozun ve yağmurun yatağa girmesine engel olmaktadır. Aynı sebepten rulmanlı yataklarda da gres, yağlayıcı olarak kullanılır. Çok yüksek basınca maruz ve çok yavaş dönen yataklarda gres ile yağlama çok defa avantajlıdır. Keza çok az yağa ihtiyacı olan kayma yerlerinin de gres ile yağlanması amaca uygundur. Özellikle santrifüj etkisi dolayısıyla sıvı yağ kullanılamayan kayma yerlerinde gres yağlaması söz konusu olur. Çünkü, greslerin yüzeye tutunması ve kalıcı olması sıvı yağlayıcılara göre daha iyidir.

Gres, katılığın bir ölçüsü olup, kullanım yerlerine göre gres türleri vardır. Kullanım alanları için dikkat edilen hususlar;

- ✓ Çalışma ortamı sıcaklık aralığı,
- ✓ Çalışma bölgesindeki zorlanma büyüklüğü,
- ✓ Çalışma ortamındaki hız,
- ✓ Çalışma ortamında titreşimin varlığı,
- ✓ Çalışma ortamında su veya gıda ile temas edip etmeme gibi seçim kriterine göre tercih edilip, kullanılırlar.

Şekil 2.2’de greslerin sınıflandırılması şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.2. Greslerin sınıflandırılması

Sabun bazlı greslerin; kalsiyum, sodyum, lityum ve alüminyum sabunlu gres olmak üzere çeşitleri mevcuttur.

Kalsiyum sabunlu gres:

Günümüzde kullanım yüzdesi en fazla, nispeten ucuz ve suya dayanımı yüksek olan bir gres türüdür. Ayrıca kalsiyum sabunlu gres suda erimez. Böylelikle su etkisine maruz yataklarda gres akıp gitmez. Fakat rutubetli ortamlarda gres içine giren su emülsiyon oluşturmadığından demir bazlı yüzeylerde korozyon yapmaktadır.

Sıcaklığa dayanıklı değildir. Damlama noktası 100-150°C arasında olup, çalışma sıcaklığı 60°C civarındadır. Genel maksatlı makinaların ve açıkta çalışan düşük hızlı mekanizmaların yağlanması kullanılır. Damlama noktası, gresin ısı dayanım göstergesi olup, damlama noktası testi gresin katıdan sıvı faza geçtiği en düşük sıcaklığı bulmak için yapılmaktadır.

Bu çalışmadaki Gres 2 olarak adlandırılan gres de Kalsiyum sabunlu gres türüdür.

Sodyum sabunlu gres:

Kullanıldığı ortamda çok az su ile etkileştiğinde suya (korozyon etkisine) karşı koruyucu görevini gerçekleştirmesine rağmen, fazla miktarda su ile etkileştiğinde ortamdan yıkanıp gitmesi nedeniyle suya dayanıklı değildir.

Bu gresler kalsiyum sabunlu greslerden daha fazla sıcaklığa dayanırlar. Damlama noktası 150-200°C arasında değişir. Yeni geliştirilen sıcaklığa ve suya dayanıklı olan greslerden sonra daha az kullanılmaya başlanmış ve üretimi azalmıştır.

Lityum sabunlu gres:

İlk olarak, İkinci Dünya Savaşı'nda uçak motorları ve diğer kontrol mekanizmaları için geliştirilmiş ve kullanılmışlardır. Rulmanlı yatakların yağlanmasında daha çok kullanılırlar. Suya ve sıcaklığa dayanım bakımından kalsiyum ve sodyum sabunlu greslerden daha iyi özelliklere sahiptirler. Lityum sabunlu gresler su ile temas ettiklerinde yapısı bozulmaz. Böylelikle demir esaslı yüzeyleri korozyondan korur. Günümüzde kullanılan greslerin %50 den fazlası lityum sabunlu greslerdir. Bu çalışmadaki Gres 1 olarak adlandırılan gres de Lityum sabunlu gres türüdür.

Bu greslerin damlama noktaları 185-215°C (silikon yağı) arasındadır ve işletme sıcaklığı 145°C a kadar çıkabilir.

Alüminyum sabunlu gres:

Yüksek yağlayıcılık özelliğine rağmen, mekanik özelliklerinin iyi olmaması ve yüksek maliyeti gibi bazı dezavantajları vardır. Bu nedenle, çok yaygın bir kullanım alanına sahip değildir.

Sıvı Yağlayıcılar

İsteklere en iyi cevap veren yağlayıcılardır. Sıvı yağlayıcılarda yağlama tekniğinde uygulanan yağlayıcı maddelerin büyük çoğunluğu hidrokarbon bileşiklerinden oluşur. Kullanılmakta olan sıvı yağların büyük çoğunluğu petrol ürünlerinin işlenmesiyle elde edilmektedir. Sentetik hidrokarbon bileşikleri üç gruba ayrılır. Bunlar; mineral yağlar, organik yağlar ve sentetik yağlardır.

Gaz Yağlayıcılar

Gıda ve ilaç sektörlerinde sıvı yağ ve plastik yağ yani gres kullanılmak istenmez. Bu durumlarda ve yüksek hızlı az yüklü sıvı sürtünmeli sistemlerde, gaz niteliğini taşıyan yağlayıcılar kullanılır. Gaz yağlayıcıların, viskoziteleri sıvılara göre çok küçüktür. Bu nedenle gaz yağlayıcıların kullanıldığı sistemlerde oluşan sürtünme ve sürtünme neticesinde oluşan sıcaklık çok az olur. Ayrıca yük taşıma kabiliyetleri düşüktür. Gaz yağlayıcı olarak kükürt heksafloridler, sıvı nitrojen ve organik buhar günümüz teknolojisinde daha çok kullanılmaktadır. Böylece hızlı santrifüjlerde, yüksek hızlı taşlama tezgahlarının ana millerinde, elektrik motorlarında uygulanan bu yağlama türü, gaz türbinleri, jet motorları, roketler, nükleer reaktörler gibi yüksek teknolojik sistemlerde kullanılmaktadır.

2.2. Literatür Araştırması

Endüstriyel mühendislik sistemlerindeki ısı transferi uygulamaları aktif ve pasif yöntemler olarak, iki ayrı şekilde tanımlanır. Birincisi, sistem dışından etkilerin ısı transferini iyileştirmek için kullanılmasıdır. İkincisinde sistem dışından yeni etkilerin kullanılmasına gerek olmayıp, sistemin kendisinin değerlendirilmesidir. Nanoteknolojinin ısı transferi uygulamalarında kullanılması pasif metot olarak adlandırılmaktadır

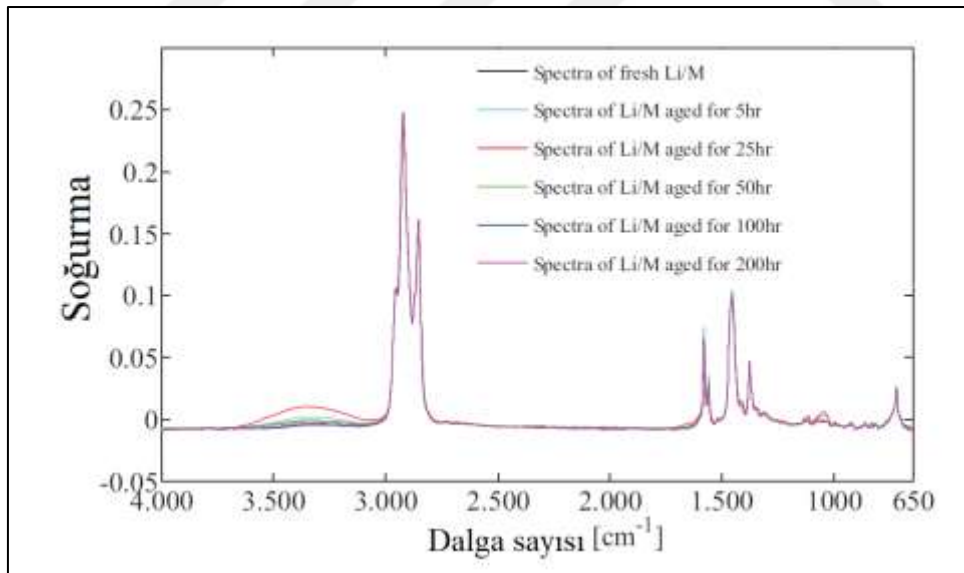
Nicoletti (2014), sayısal çalışmasında Si, SiO₂, Al, Al₂O₃, Cu, CuO gibi nano parçacıkların grese eklenmesini modellemiş ve nano parçacık içeren greslerin viskozitelerinin yüksek oranda sıcaklığa bağlı olduğu tespit edilmiştir. Nanoakışkanların ısıl iletkenlik iyileştirme çalışmaları sonucunda, parçacık büyüklüğü ve katkı miktarı (konsantrasyonu) şeklindeki iki önemli özelliğin etkin parametreler olduğu tespit edilmiştir (Pryazhnikov, Minakov, Rudyak ve Guzei, 2017). Goyal, Dang, Dhami ve Chauhan (2017) grese nano parçacık eklenmesinin

ısı özellikleri nasıl etkilediğini irdeleyen bir derleme çalışması yapmışlardır. Çalışmalarının sonucunda, grese nano parçacık eklemenin yatak-yük taşıma kapasitesini artırdığını, sürtünme kuvvetlerini ve temas yüzeylerindeki temas alanını azalttığını gözlemlemişlerdir. Peña-Parás, Garcia-Pineda, Maldonad-Cortes, Garza ve Taha-Tijerina (2017), CuO ve TiO₂ nanoparçacık katkılı yağlayıcıların aşırı basınç dayanım davranışının sıcaklığa bağımlılığı üzerine çalışmışlar ve hareketli yüzeylerin temas alanında bir azalma ve yük taşıma kapasitesinde bir artış olduğunu bulmuşlardır. Hong, Waynick ve Roy (2007) karbon nanotüp eklenmiş greslerin ısı iletkenliklerini araştırmışlar ve nano parçacıkların ağırlıkça karışım oranının ısı özellikleri etkilediği sonucuna ulaşmışlardır. Lee ve diğerleri (2009) ise çalışmalarında grafit katkılı gresin sıcaklık ve viskozitenin gres performansı üzerine etkilerini araştırmışlardır ve sıcaklık arttıkça viskozitenin azaldığını görmüşlerdir.

Verma, Dabas, Upadhyay ve Singh (2014) Fe, Al ve Cu tozlarını lityum kalınlaştırıcı greslere farklı ağırlık oranlarında katarak ısı iletim katsayısındaki değişimi deneysel olarak incelemişlerdir. Ayrıca ısı iletim katsayısı için, katkı maddelerinin ağırlıkça yoğunluğunun fonksiyonu olarak bir bağıntı geliştirmişlerdir. Çalışmalarında bakırın iletim katsayısının alüminyumdan daha yüksek olmasına rağmen, ağırlıkça aynı karışım oranında en yüksek Al katkılı gresin ısı iletim katsayısına sahip olduğunu tespit etmişlerdir. Üç farklı yapısal özellikteki (mikrodisk, nanoblok ve mikroküre) CuO parçacıkların gres ile farklı hacimsel oranlarda karışımıyla elde edilen katkılı gresler, ısı iletim katsayısındaki değişim açısından deneysel olarak Yu ve diğerleri (2015) tarafından incelenmiş ve katkılı greslerin ısı iletim katsayılarının katkısız grese göre daha yüksek olduğunu görmüşlerdir. Benzer bir çalışma, Fu ve diğerleri (2019) tarafından yapılmış ve ağırlıkça %4 grafit ile karıştırılan gresin ısı iletim özelliklerinin %55,5 arttığı deneysel olarak tespit edilmiştir. He ve Wang (2019) tarafından yapılan ısı greslerin ısı özelliklerinin iyileştirilmesi çalışmasında, katkı maddelerinin miktarı belirli orana ulaşmadıkça, ısı özelliklerindeki beklenen iyileşme gerçekleşmemektedir. Örneğin, incelenen greslere katkı maddeleri hacimce %23 oranında ilave edildiğinde ısı iletkenlik, katkısız durumdakinin yaklaşık 4 yada 5 katı artmaktadır. Katkı maddeleri hacimce %12 oranlarında katıldığında ise ısı iletkenlikteki artış çok daha az gerçekleşmektedir. Özellikle yüksek ısı iletkenliğe sahip metal parçacık katkılı gres kullanımı, hareketli yüzeyler arasındaki boşluğu doldurarak iki yüzey arasında termal bir bağlantı oluşturup ısı transfer etkinliğini artırdığı Christensen ve diğerleri (2020) tarafından yapılan çalışmalar ile de teyit edilmiştir.

Gres ile yağlama lityum, sodyum ve kalsiyum gibi uzun yağ asidi zincirli sabunların kalınlaşma özelliğinin dağılımı ile gerçekleşir. Lityum esaslı gres yağları çok fonksiyonlu özellikleri ve uzun kullanım süreleri ile sodyum ve kalsiyum esaslı gres yağlarının yerini almıştır (Fikry, El-Adly, Ismail El-Tabei ve Al-Aidy, 2013).

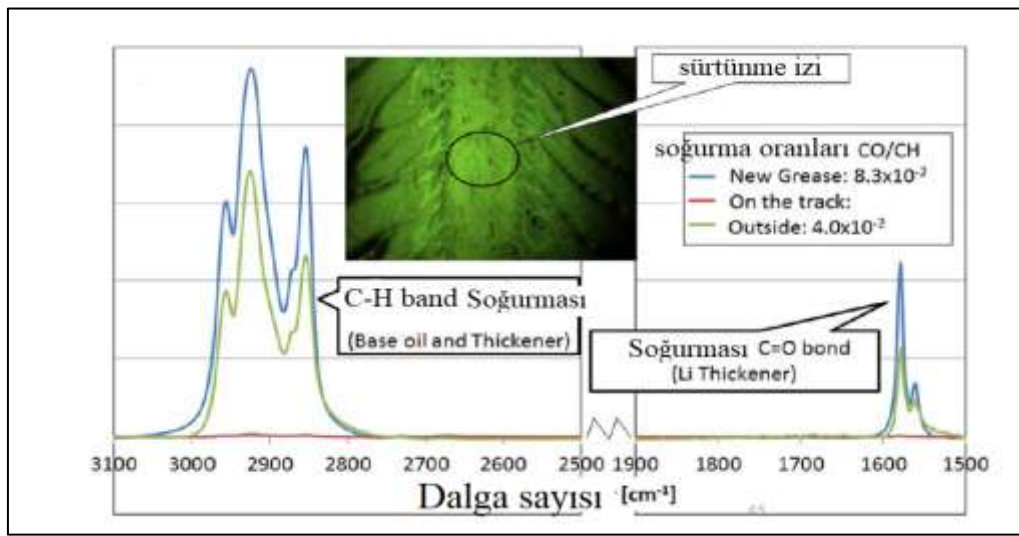
Lityum esaslı gresin taze ve yaşlanmış durumdaki viskoz özellikleri düşük sıcaklıklarda Zhou, Bosman ve Lugt (2018) tarafından incelenmiştir. Belirli bir yük altında yapılan deneysel çalışmalarda lityumlu gres yağdaki bozunmanın kalınlaşan mikro yapıdaki değişime sebep olduğu görülmüştür. Orijinal yapının deforme olması sonucu, yağlama özelliklerindeki değişim ve bozulmalar tespit edilmiştir. 200 saatlik çalışma ve 83 dev/dak'lık dönme hızı ile yapılan yaşlandırma işleminde Li/M katkılı gres yağı için uygulanacak tork hesaplanmış ve soğurma özellikleri incelenmiştir. Hesaplamalara göre, ilk çalışma anlarında yüksek tork gerektirdiği, 50 saat'ten sonraki çalışma sürecinde gereken torkun üçte bire düştüğü görülür. İlgili çalışmada ayrıca soğurma analizleri de yapılmıştır. Dalga boyu 2,5 ile 15,385 μm aralığındaki soğurma ölçüm sonuçları aşağıda Şekil 2.3'de verilmiştir.



Şekil 2.3. Lityum bazlı gresin farklı yaşlanma durumlarındaki soğurma değerleri (Zhou ve diğerleri, 2018)

Döner kayar sistemde gres ile yapılan yağlamanın film oluşturması ve sürtünme etkileri Kanazawa, Sayles ve Kadiric (2017) tarafından deneysel olarak incelenmiştir. Greslerin uygulandığı yüzey alanı büyüdükçe, aynı sıcaklık şartlarında, gresin sürtünme katsayısı değerleri de artmaktadır. Yine, yüzey alanı büyük durumlarda, sıcaklıklar 70 ve 120°C lerde

işlem hızı artarken sürtünme katsayısı da artmaktadır. Özellikle lityumlu greslerin küçük yüzey alanı uygulamalarında, 25–120°C sıcaklık aralığındaki sürtünme katsayısı çok değişmemektedir ve rakamsal olarak 0,01–0,02 civarındadır. Bu çalışmada da lityum katkılı yaşlanmamış gresin 3,2–6,7 μm dalga boyu aralığındaki soğurma ölçümleri yapılmıştır ve Şekil 2.4’de sunulmuştur. Düşük hızlarda ortaya çıkan kalınlaşma durumunun, yüksek hızlarda görülen yağ durumuna geçiş özelliği, sıcaklıklardan etkilenmeden, incelenen gresin sabit bir kalınlığında gerçekleşmektedir. Test edilen greste film oluşumu, yağ içindeki nanoparçacıkların dağılımı ile doğru orantılıdır.



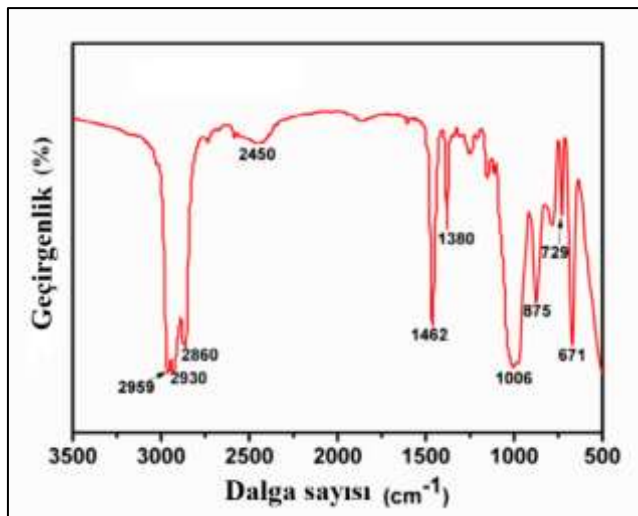
Şekil 2.4. Gresin 3.2–6.7 μm dalga boyu aralığındaki soğurma ölçümleri (Kanazawa ve diğerleri, 2017)

Nanomalzemelerin sürtünmeyi azaltma etkilerinin tespit edilmesi sonucu, çeşitli nanoparçacıklar akışkan yağlara ilave edilerek endüstriyel uygulamalar için kullanılmaktadır. Yağlara ilave edilen bu metal nanoparçacıkların sürtünme üzerindeki etkilerini değerlendiren çalışma Uflyand, Zhinzhiro ve Burlakova (2019) tarafından yapılmıştır. Bu derleme çalışmasına göre, karbon, karbon nanotüpler, grafin oksit, bor nitrat ve silisyum oksit gibi nanomalzemeler yağlara katılarak, sürtünme ve basınç etkileri, dayanıklılık özellikleri araştırılmıştır. Bakır (Cu) düşük erime noktası ve yumuşaklık (ductility) özelliği nedeniyle, nano yağlayıcıların özelliklerini oldukça iyileştirmiştir. Sürtünmeyi %49 azalttığı tespit edilmiştir edilmiştir (Scherge, Böttcher, Kürten ve Linsler (2016); Wang, Yin, Zhang, Wang ve Zhao (2013); Wang, Guo, He, Jiang ve Sun (2017); Zhang ve diğerleri (2015)).

Nanoparçacık katkılı greslerin ısı özellikleri Peña-Parás ve diğerleri (2015) tarafından çalışılmıştır. Bu çalışmada TiO_2 , CuO , Al_2O_3 ve çok duvarlı nanotüpler ile 75°C sıcaklıkta, 600 dev/dak dönme hızında deneysel çalışmalar yapılmış ve herbir nanomalzemenin iyileştirme durumları tespit edilmiştir. CuO katkılı gres yağının viskozitesinin diğer katkı maddelerinin sonuçlarına göre belirgin yüksek değerlerde olduğu görülmüştür. Yine CuO katkılı gresin ısı iletkenlik değerlerinin, TiO_2 katkılı gresin değerlerinden yüksek olduğu tespit edilmiştir. Sürtünme katsayısı ve basınç kaybı parametreleri için bakıldığında, TiO_2 katkılı gresin sonuçları, CuO katkılı gresin sonuçlarından iyi olduğu görülmektedir.

Kalsiyum esaslı gresin çok duvarlı karbon nanotüpler ile karışımının ısı iletkenliği ve reolojik özellikleri Kamel, Mohamed, El Sherbiny ve Abed (2016) tarafından çalışılmıştır. Farklı konsantrasyonlarda (%0,5; %1; % 2 ve %3) katılan çok duvarlı karbon nanotüp miktarına bağlı olarak kesme gerilmesi, viskozite, ısı iletkenlik ölçümleri yapılmıştır. Çok duvarlı karbon nanotüp konsantrasyonu arttıkça ısı iletkenliğin ve kesme gerilmesinin belirgin bir şekilde arttığı tespit edilmiştir.

Lityum esaslı grese Cu nanoparçacıkların ilavesinin tribolojik özellikleri (sürtünme katsayısı, titreşim, yatak dönme hızının sıcaklıkla değişimi gibi) deneysel olarak Qiang, Anling, Yangming, Liu ve Yachen (2017) tarafından çalışılmıştır. Grese ağırlıkça %0,25'lik Cu ilavesi yapıldığında, sürtünme katsayısının çok azaldığı, titreşim hızı ve yataktaki sıcaklık artışının azaldığı tespit edilmiştir. Bu çalışmada kullanılan Cu nanoparçacıkların kızılötesi dalga boyundaki geçirgenlik ölçüm grafiği Şekil 2.5'de verilmektedir.



Şekil 2.5. Cu nanoparçacıkların kızılötesi dalga boyundaki geçirgenlik değerleri

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde katkılı gres çalışmalarında gresin çoğunlukla tribolojik özelliklerinin (aşınma, sürtünme ve yağlama) araştırıldığı görülmektedir. Isıl özellikleri incelenen çalışmalarda ise gresin viskoz özelliklerine bakıldığı görülmüştür.

Literatürde greslerin özelliklerini inceleyen çalışmalardan, baz yağdan daha yüksek ısı iletkenliğe sahip nanoparçacıklar kullanıldığında, sistemde oluşan ısının ortamdaki hızla uzaklaştırıldığı ve yağlama özelliğinin sürdürülebilirliğinin korunduğu görülmüştür. Ancak, literatürde bir iki çalışma dışında, greslerin ısıyım özelliklerinin pek incelenmediği tespit edilmiştir. Bu nedenle, çalışmamızda dış ortamlarda çalışan makinelerde kullanılan greslerin katkısız ve mikroparçacık katkılı durumları, sıcaklık, moment, ısı iletkenlik ve ısıyım özellikleri bakımından incelenecektir.

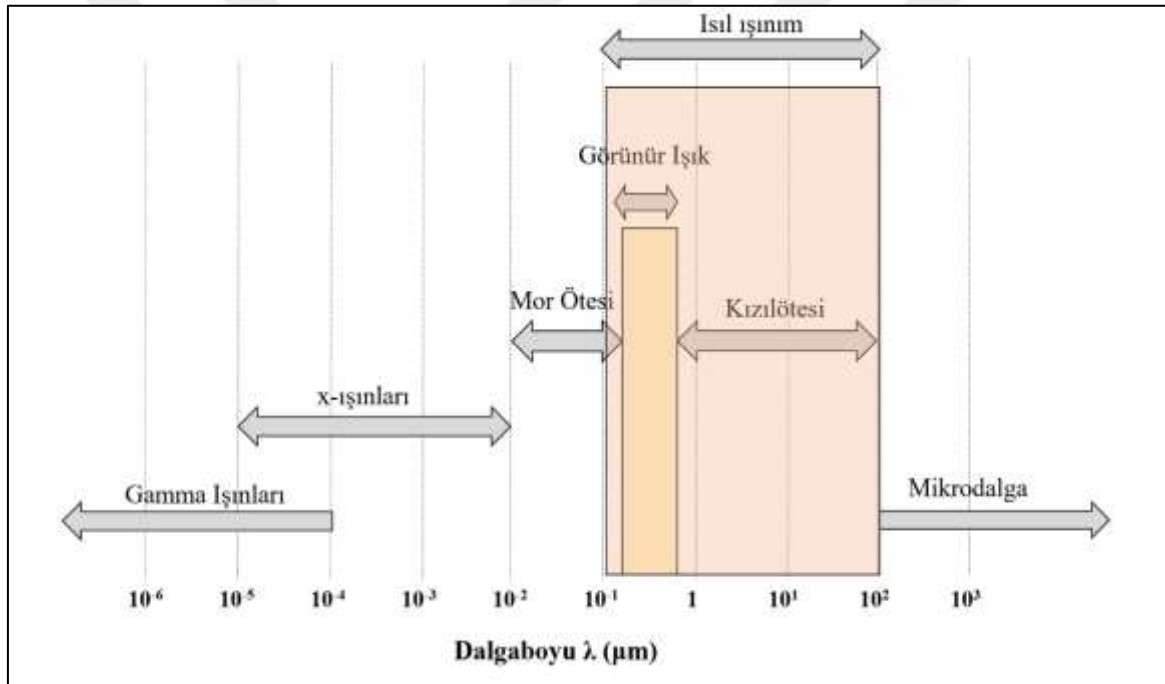
Literatür araştırmalarımıza göre, ağırlıkça %10 katkı maddesi içeren bir gres karışımının soğurma ölçümünü gerçekleştirmiş bir çalışma ile karşılaşılmamıştır. Bu nedenle, ağırlıkça %10 katkı maddesi içeren numunelerin soğurma ölçümleri, hem katkı maddelerini maksimize etmek hem de konsantrasyonunun sonuçlarını gözlemlemek amacıyla yapılmıştır.

Bu çalışmamızın literatürdeki çalışmalara göre en önemli farklılığı, hem parçacık boyutlarının nano yerine mikro olması hem de baz akışkan (madde) olarak farklı greslerin test edilmesidir. Çalışmamızda, literatürde görülen gres çalışmalarında en fazla kullanılan katkı maddeleri tercih edilirken, gresler için ise endüstride en çok karşılaşılan gres tipleri kullanılmıştır. Ayrıca, bir çok çalışmada deneyler kısa sürelerle sınırlandırılırken, bu çalışmada ısı performans test düzeneği ile bir saatlik çalışma sürelerinde deneyler yapılmıştır.

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

3.1. Görünür Dalgaboyunda Soğurma Değerlerinin Ölçülmesi

Isı transferinin üçüncü mekanizması olan ışınmada, bir cisim elektromanyetik dalgalar veya fotonlar ile ısı transferini gerçekleştirir. Cisim ısı enerjisinden kaynaklanan elektromanyetik dalgalar veya foton yayınımları (ışınlamalar) sayesinde çevresi ile ısı etkileşiminde bulunmaktadır. Elektromanyetik dalgalar (ışınlamalar) dalga özelliklerine göre sınıflandırılır. Enerjileri, frekans ve dalgaboyu ile değerlendirilir. Şekil 3.1’de elektromanyetik ışınlama dalga spektrumu verilmiştir



Şekil 3.1. Elektromanyetik ışınlamaların dalga boylarına dağılımı

Isı transferi mekanizması, sıcaklığa bağlı olarak maddeden yayılan enerji ile ilgilidir. Bizi çevreleyen tüm maddelerden (dünyadaki tüm objelerden) ısı ışınlama yayılmaktadır. Isıl ışınlama $0,1 \mu\text{m} - 10^2 \mu\text{m}$ dalga boyu aralığında, görünür ve kızılötesi (IR) ışınlamaların tamamı ile morötesi (UV) ışınlamaların bir kısmını kapsamaktadır. Görünür ışık $0,4$ ile $0,7 \mu\text{m}$ aralığında yayılır.

Dış ortamlarda güneş ışınlamalarına uzun süre maruz kalan iş makinelerinin hareketli aksamalarının yatak bölgelerindeki greslerde; sürtünme sonucu oluşan sıcaklık artışı (ısınma) ile birlikte, güneş ışınlamalarının soğurulması sonucu daha fazla sıcaklık artışı (ısınma)

oluşmakta, dolayısıyla yataklardaki ısı problemi daha karmaşık hale gelmektedir. İş makinelerinin çalışma periyodunun aksamaması ve hareketli aksamaların efektif ve uzun süre çalışabilmesi için, yataklardaki ısıнын hızlı bir şekilde ortamdan transfer edilmesi yada yapısal özellikler ile ısı artışının önlenmesi gibi çözümler gerektirmektedir. Bunun için görünür ve kızılötesi dalga boylarındaki soğurmayı en aza indirmek önemlidir.

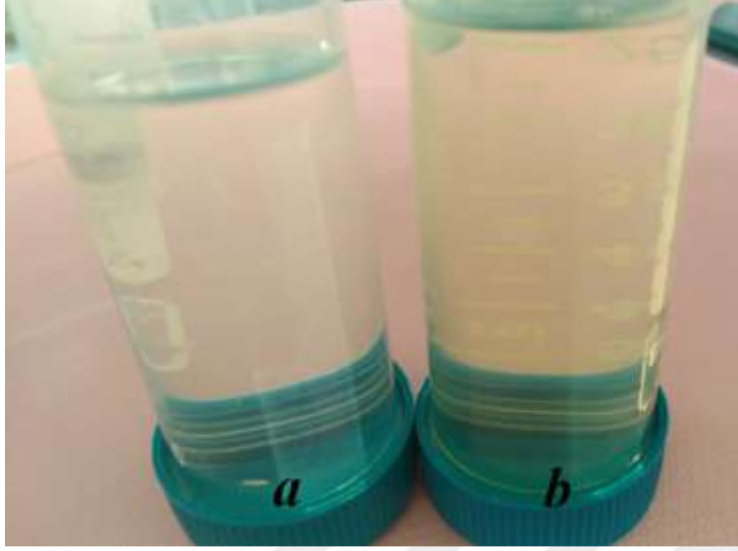
Görünür dalga boyundaki soğurma değerlerinin ölçülmesi Dumlupınar Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Biyokimya Bölümü, Nanoteknoloji Laboratuvarında bulunan Resim 3.1. ile gösterilen PerkinElmer marka Lambda 750 model cihazında (UV-VIS-NIR) gerçekleştirilmiştir.



Resim 3.1. Görünür dalga boyunda soğurma değeri ölçümünde kullanılan cihaz

Bu cihaz 250 nm ile 800 nm dalga boyu aralığında soğurma (absorpsiyon) ölçümünü yapabilmektedir. Organik moleküllerin, iyon veya komplekslerin tanımlanmasında sıkça kullanılan bir yöntemdir. UV-VIS dalga boyundaki soğurma ölçümleri, organik ve inorganik maddelerin miktarını belirlemek için sıkça kullanılan bir yöntemdir. Moleküler absorpsiyon spektroskopisi, λ dalga boyunda bir ışın yolu olan şeffaf bir kap içinde bir çözeltinin geçirgenliğinin (T) veya soğurmasının ($A = -\log T$) ölçülmesine dayanır. Bu soğurma ölçümleri çözelti halindeki numunelere uygulanabilmektedir. Bu yüzden yarı-katı yağlayıcı olan gres, hekzan ile seyreltilerek çözelti haline getirilmiştir. Sekiz adımda oluşturulan çözelti üzerinden soğurma ölçümleri yapılmıştır. Birinci çözelti, 50 ml hekzan ile 0,1 gr gres Resim 3.3'de gösterilen manyetik karıştırıcıda 30 dakika karıştırılıp, 0,4 μm 'lik filtreden süzülerek oluşturulmuştur. Daha sonraki yedi çözelti, 2 ml önceki adımdaki çözelti

(gres+hekzan karışımı) ve 2 ml hekzanın vorteks karıştırıcı ile karıştırılması ile elde edilmiştir. Bu süreç, Gres 1 ve Gres 2 için aynı adımlar ve sürelerde tekrarlanmıştır. İşlem sonrası hazırlanan çözeltilerin görüntüsü Resim 3.2’de verilmiştir. Çizelge 3.1’de ise sekiz farklı çözeltinin miktarları verilmiştir.



Resim 3.2. a) Gres 1 b) Gres 2 çözeltileri



Resim 3.3. Deneylerde kullanılan vorteks karıştırıcı

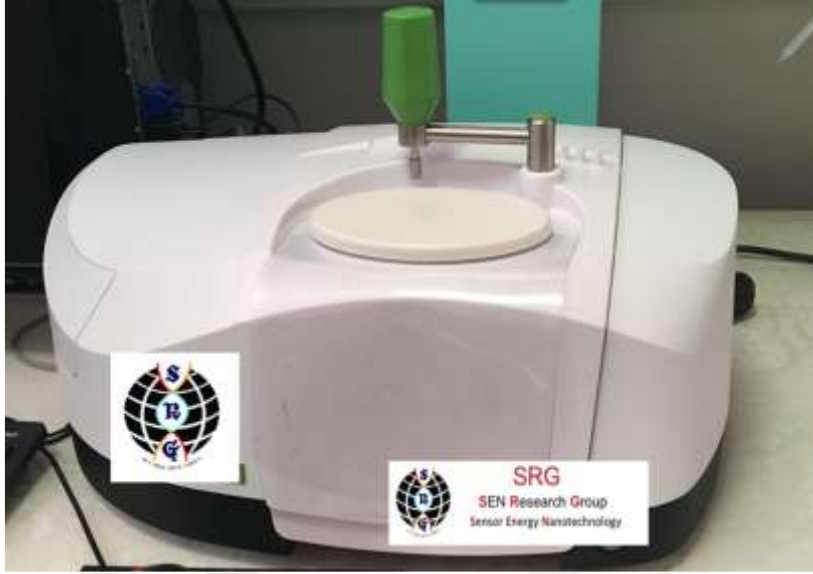
Çizelge 3.1. UV ölçümleri için seyreltilen greslerin çözelti miktarları

Çözelti No	Karışım Oranları	
	Gres 1	Gres 2
1	50 ml Hekzan + 0.1 gr gres	50 ml Hekzan + 0.1 gr gres
2	2ml 1. çözelti + 2 ml Hekzan	2ml 1. çözelti + 2 ml Hekzan
3	2ml 2. çözelti + 2 ml Hekzan	2ml 2. çözelti + 2 ml Hekzan
4	2ml 3. çözelti + 2 ml Hekzan	2ml 3. çözelti + 2 ml Hekzan
5	2ml 4. çözelti + 2 ml Hekzan	2ml 4. çözelti + 2 ml Hekzan
6	2ml 5. çözelti + 2 ml Hekzan	2ml 5. çözelti + 2 ml Hekzan
7	2ml 6. çözelti + 2 ml Hekzan	2ml 6. çözelti + 2 ml Hekzan
8	2ml 7. çözelti + 2 ml Hekzan	2ml 7. çözelti + 2 ml Hekzan

Görünür dalga boyunda sadece katkısız greslerin soğurma değerleri ölçülebilmektedir, katkılı greslerin ölçümleri için birçok test yapılmış ancak, metal parçacıkların çökmesi nedeniyle sonuç elde edilememiştir.

3.2. Uzun Dalgaboyunda Soğurma Değerlerinin Ölçülmesi

Gresin kızılötesi dalgaboyundaki soğurma analizleri FTIR ile yapılmaktadır. Uzun dalgaboyundaki soğurma değerlerinin ölçülmesi için de Dumlupınar Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Biyokimya Bölümü, Nanoteknoloji Laboratuvarında bulunan Resim 3.4’de gösterilen PerkinElmer marka SpectrumTwo model cihazında (FTIR) gerçekleştirilmiştir. Tüm ölçümler oda sıcaklığında yapılmış ve sonuçların hassasiyeti için en az üç kez tekrarlanmıştır.



Resim 3.4. Kızılötesi dalga boyu aralıklarındaki soğurma ölçümleri için kullanılan cihaz

Kızılötesi dalgaboylarındaki soğurma ölçümleri, yüzde geçirgenlik (% T) ve dalgaboyu için (cm^{-1}) cinsinden elde edilmiştir. Bu birimleri Soğurma (A) ve dalgaboyu (μm) cinsine çevirmek için aşağıdaki Eş.3.1'den yararlanılmıştır.

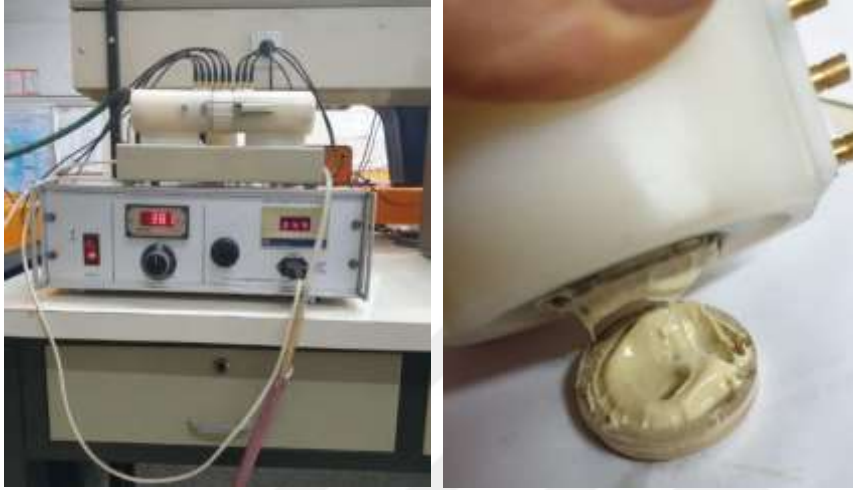
$$A = 2 - \log(\%T) \quad (3.1)$$

Uzun dalgaboyundaki ölçümler için katkısız gresler ve mikro parçacık katkılı gresler kullanılmıştır. Gres 1 ve Gres 2 içerisine sırasıyla ağırlıkça %0,02; %3,33 ve %10 oranında katkı maddeleri katılarak ölçümler yapılmıştır. (ZnO için yeterli miktarda mikro parçacık olmadığından %10 katkılı ZnO+gresler için ölçüm yapılamamıştır.)

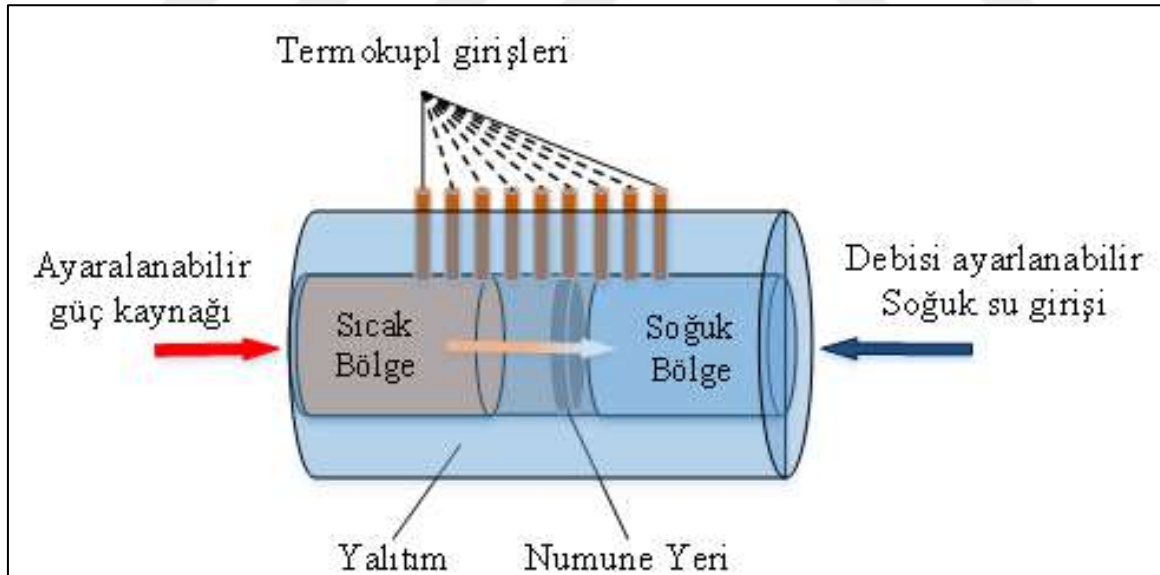
3.3 Isı İletim Katsayısının Ölçülmesi

Isıl iletkenlik, malzemelerin ısıyı iletme kabiliyetinin bir ölçüsüdür. Malzemelerin ısıl iletkenlikleri büyük bir aralıkta değişim gösterir (Incropera, 2015). Greslerin ısı iletim katsayılarının düşük olduğu bilinmektedir (Hong ve diğerleri, 2010; Fu ve diğerleri, 2019). Halbuki hareketli aksam arasında bulunan gresin, ısıyı kendi içerisinde depolamak yerine temas ettiği yüzeylere iletimle ısı geçişini gerçekleştirerek yani ortamdan ısının uzaklaştırılmasını sağlaması, aynı zamanda gresin ısınarak aşınma ve sürtünmeye direnç özelliğini yitirmemesi istenmektedir. Bu amaçla, ısı iletim özelliği yüksek metal nano/mikro parçacıklar kullanılarak, en uygun metalik malzeme ve en uygun karışım oranları tespit edilmeye çalışılmıştır.

Isı iletim deneyleri, Resim 3.5.'de gösterilen, Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği laboratuvarlarında bulunan ASTM D 5470-06 standartlarında ölçüm yapan konvansiyonel bir ısı iletim deney setinde 20–65°C sıcaklık aralıklarında gerçekleştirilmiştir. Kısa ve uzun çalışma sürelerine göre, katkısız ve %3,33 oranında mikroparçacık katkılı greslerin ısı iletim katsayıları analiz edilmiştir.



Resim 3.5. Isı iletim katsayısı ölçüm cihazının resmi



Şekil 3.2. Test cihazının çalışma prensibi

Isı iletim katsayısı analizleri için, P.A. Hilton marka ölçüm cihazı kullanılmıştır. Deney düzeneği klasik ısı transferi prensibine göre çalışmaktadır. Eksenel doğrultuda, elektrik enerjisi ile ısıtılan sıcak taraftan, laboratuvar şartlarında sürekli verilen soğuk su ile soğutulan tarafa doğru sıcaklık gradyenti oluşturularak, düzenek üzerinde 9 U tipi termokupl

ile sıcaklık ölçümleri yapılmaktadır. Cihazın katalog hassasiyeti $\pm\%5$ 'tir. Pirinç malzemeden yapılmış numune kabı 2,3 cm çapında ve 1,5 mm derinliğindedir. Deney düzeneğinin çalışma sıcaklık aralığı -20 ile 120°C arasındadır.

Cihazın elektrik gücü ayarlanarak, istenilen sıcaklıklarda ölçümler yapılabilmektedir. Isı yalıtımlı sıcak ve soğuk bölgelerin arasında bulunan numune kabına ısı iletim katsayısı ölçülecek numune konularak, testler gerçekleştirilir. Cihazda sıcak bölgeden soğuk bölgeye doğru gerçekleşen sıcaklık gradyanı, iki bölgenin geçişinde bulunan numunenin üzerinden geçmektedir. Numunenin önündeki ve arkasındaki sıcaklıklar termokupllardan okunarak, ısı iletim katsayısı hesaplanmaktadır.

3.3.1 Isı iletim katsayısının hesaplanması ve deneysel çalışmalar

Herhangi katkılı bir akışkanın (nanoakışkanın) ısı iletim özelliği, küresel büyük boyutlu parçacıkların karıştırıldığı durumlar için, Maxwell (1881) denklemi kullanılarak hesaplanabilmektedir. Eş.3.2'de verilen Maxwell denkleminde, baz akışkanın ısı iletkenliği λ_f ve karıştırılan malzemenin ısı iletkenliği λ olmak üzere,

$$\lambda = \lambda_f \left[1 + \frac{3(1-\varphi)\varphi}{1 + 2\varphi - \varphi(1-\varphi)} \right] \quad (3.2)$$

ifadesi tanımlanır. Buradaki $\tilde{\omega}(\lambda_f/\lambda_p)$ baz akışkanın ısı iletkenliğinin, parçacık ısı iletkenliğine oranını ifade etmektedir. Bu eşitlik, küresel olmayan parçacıklar kullanıldığında, hassas olmayan sonuçlar verebilmektedir. İkinci efektif ve önemli model, Bruggmen denklemi (Eş. 3.3) ile tanımlanmaktadır. Buradaki α boyutsuz bir sayıdır. Katkı malzemesinin ısı iletim katsayısı, baz malzemenin ısı iletim katsayısından çok büyük olduğunda uygulanan denklemdir.

$$\frac{k_{nf}}{k_{bf}} = \frac{1}{(1-\varphi) \frac{3(1-\alpha)}{(1+2\alpha)}} \quad (3.3)$$

Hamilton ve Crosser (1962), Maxwell denkleminde iyileştirme yaparak, parçacık şeklinden bağımsız olarak, Eş.3.4'de verilen ifadeyi tanımlamışlardır (Yang, Ji, Huang ve Xu, 2019).

$$\frac{k_{nf}}{k_{bf}} = \frac{k_p + (n-1)k_{bf} + (n-1)(k_p - k_{bf})\varphi}{k_p + (n-1)k_{bf} - (k_p - k_{bf})\varphi} \quad (3.4)$$

Bu ifadedeki, k_{nf} nanoakışkanın ısı iletim katsayısını, k_{bf} baz akışkanın ısı iletim katsayısını, k_p parçacıkların ısı iletim katsayılarını göstermektedir. φ küresel parçacığın yüzey alanının hacmine oranını göstermektedir. Bu ifadedeki n sayısı 3 olduğunda Maxwell denkleminde indirgenir. Silindirik parçacıklar için $n=6$ alınır. Bu ifadeler, parçacık büyüklüğünü dikkate almadan hesaplandığında, deneysel çalışmalara göre daha küçük fark ile sonuçlar vermektedir. Isıl iletkenliğin parçacık konsantrasyonu ile ilişkisi, Eş.3.5 ile tanımlanmaktadır.

$$\frac{k_{eff}}{k_o} = 1 + C_k \quad (3.5)$$

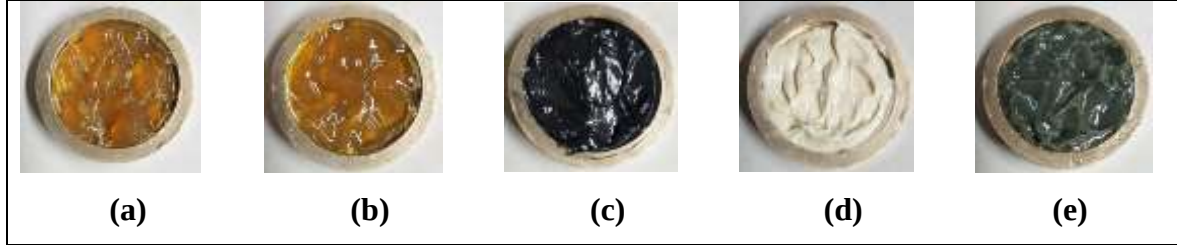
Burada k_{eff} nanoparçacık katkılı akışkanın ısı iletkenliği, k_o baz akışkanın ısı iletkenliği olmak üzere, C_k ısı iletkenlik iyileştirme katsayısını göstermektedir. Parçacık miktarından (konsantrasyonundan) bağımsızdır ve baz akışkanın ısı iletim katsayısı ile normalize edilmiştir (Maheshwary, Handa ve Nemade, 2017).

Çalışma prensibi anlatılan test cihazının numune kabına katkısız ve katkılı gresler doldurularak, laboratuvar şartlarında deneyler gerçekleştirilmiş, elde edilen sıcaklık değerlerinin Eş.3.6'da ifade edilen Fourier formülünde uygulanmasıyla, k değerleri hesaplanmıştır.

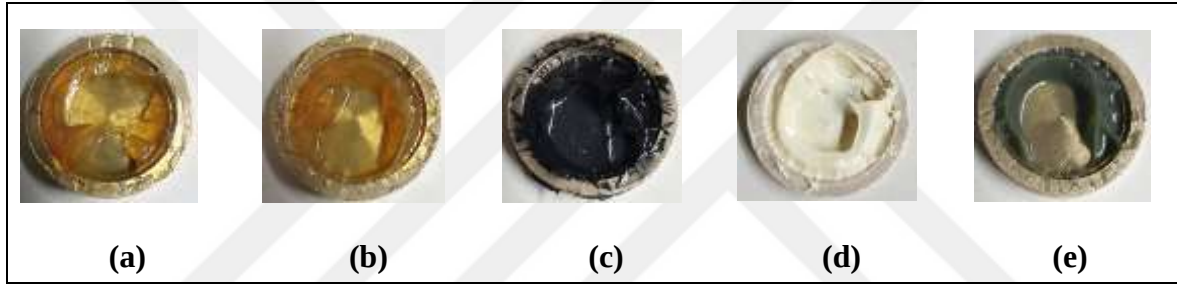
$$Q = kA \frac{(T_i - T_{i+1})}{L} \quad (3.6)$$

Burada Q sistemdeki elektrik gücünü (W), A numune kabının alanını (m^2) ve T_i ve T_{i+1} numunenin öncesindeki ve sonrasındaki termokupl sıcaklıklarını ifade etmektedir. Gerçek çalışma şartlarını simule edebilmek için, deneyler önce 5 W'lık elektrik gücünde, daha sonra 10 W'lık elektrik gücünde en az 45 dakikalık, toplamda 1,5 saatten fazla çalışma sürelerinde testler yapılmıştır. Bu durum endüstriyel uygulamalarda, makinaların kısa ve uzun çalışma durumlarına karşılık gelmektedir. Ölçümlerde her 15 dakikada sıcaklık değerleri alınmıştır

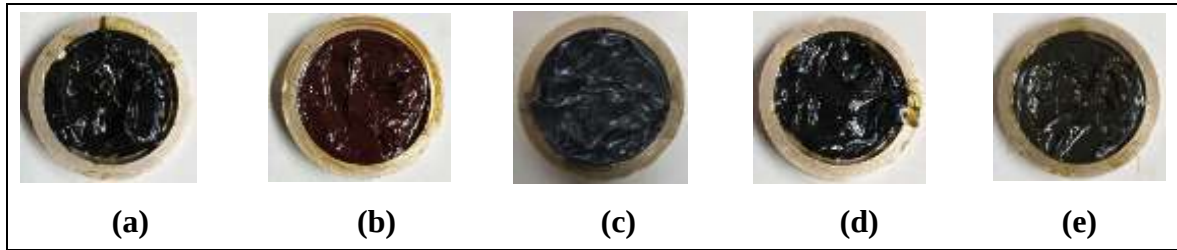
ve deneyler laboratuvar sıcaklığında ve üçer kez tekrarlanarak yapılmıştır. Numunelerin deney öncesi ve sonundaki durumlarını gösteren resimleri Resim 3.6, 3.7, 3.8 ve 3.9'da verilmektedir. Isı deneylerinin sonunda, Resim 3.7 ve Resim 3.9'dan görüldüğü üzere hem katkısız hem katkılı greslerde sıvılaşma (yumuşama) durumu görülmektedir.



Resim 3.6. Gres 1 numuneleri, (a) katkısız, (b) CuO, (c) Grafit, (d) TiO₂ ve (e) ZnO katkılı



Resim 3.7. Isı deneylerinden sonra Gres 1 numuneleri, (a) katkısız, (b) CuO, (c) Grafit, (d) TiO₂ ve (e) ZnO katkılı



Resim 3.8. Gres 2 numuneleri, (a) katkısız, (b) CuO, (c) Grafit, (d) TiO₂ ve (e) ZnO katkılı



Resim 3.9. Isı deneylerinden sonra Gres 2 numuneleri, (a) katkısız, (b) CuO, (c) Grafit, (d) TiO₂ ve (e) ZnO katkılı

uygulanacak yük miktarı ayarlanmaktadır. Aşındırma çenesi mili (9) üzerinden yük aşındırma çenesine iletilmektedir. Aşındırma çenesi milinin üzerine, uygulanan kuvvetin mil üzerinde sürtünme kuvveti oluşturarak sürtünme kuvvetinin ölçümünde hataya neden olmaması için noktasal temas sağlamak üzere bir adet çelik bilye yerleştirilmiştir. Aşındırma çenesi milinin eksen boyuncası 5 mm çapında bir delik açılarak test edilecek gres yağının sürtünme ortamına bu kanaldan sevk edilmesi sağlanmıştır. Yükleme miktarı bir load-cell (11) ile ölçülerek elektronik kontrol kartına gönderilmektedir. Bu değer ölçülmesi, yapılacak ölçüm karşılaştırmalarının aynı şartlarda olmasını sağlamak açısından önemlidir.

Yükleme, aşınma plakası üzerinden aksel yönde doğrudan tahrik tablasına (5) etkidiğinden, yükü üzerine alarak redüktöre ek yük getirmemesi için konik bir yükleme rulmanı (3) kullanılmıştır. Tüm yük bu rulmanın üzerinde olup diğer tahrik parçalarına ek bir kuvvet uygulanmamaktadır.

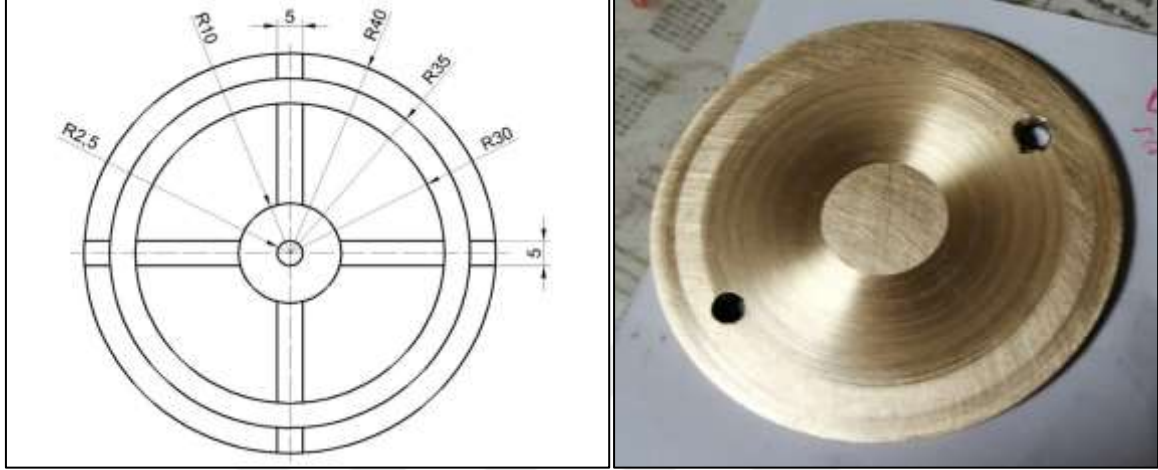
Aşınma plakası 80 mm çapında, 5 mm kalınlığında pirinç-bronz malzemeden yapılmıştır. Bu malzeme bir çok uygulamada yatak malzemesi olarak kullanıldığından gerçek çalışma şartlarını sağlamak üzere seçilmiştir.

Deney düzeneğinin görüntüsü Resim 3.10.'da verilmiştir.



Resim 3.10. Deney düzeneğinin resmi

Aşındırma çenesinin ayrıntılı görseli Şekil 3.4’de verilmiştir. Tam bir düz yüzey yerine kanallardan oluşan bir profil seçilmiştir. Bu profil ile hem sürtünme alanı düşürülerek az bir yük ile daha yüksek basınç elde edilmektedir, hem de bu boşluklar çalışma sürecinde test edilen gresin geçici depolama alanı olarak kullanılmaktadır.



Şekil 3.4. Aşınma çenesi ve aşınma plakası (7 ve 6 numaralı cihaz parçaları) sürtünme yüzeyinin detayları

Elektronik kontrol ünitesi (2), Arduino Uno cinsi programlama kartına sahip bir elemandır. Ünitenin içinde aynı zamanda üç fazlı motoru kontrol etmek üzere elektrik kontaktörleri mevcuttur. Bu kontaktörler sayesinde elektrik motorunun dönme zamanı ve yönü kontrol edilmektedir. Elektronik programlama kartı, sıcaklık ve yük sensörlerinden aldığı bilgileri işleyerek kontrol ünitesinin üzerindeki LCD ekrana ve kullanılan bir seri port veri yolu ile bilgisayar ortamına göndermektedir.

3.4.1. Test düzeneğinin uygulama prosedürü

Hazırlanan kontrol programında elektrik motorunun, dolayısıyla sürtünme parçalarının birbiri üzerinde hangi süreyle sağa sola döneceği ayarlanmaktadır. Bu uygulama için 11 saniye sağa, 11 saniye sola dönecek şekilde ayarlanmıştır. Her bir sağa ve sola dönüş tamamlandığında 1 tekrar yapılmış sayılmaktadır. Bu süre göz önünde bulundurularak tekrar sayısı kontrol ünitesi üzerinde ayarlanabilmektedir. Kontrol ünitesi, her bir tekrardan sonra tekrar sayacını 1 arttırarak saymakta, ayarlanan tekrar sayısına ulaşıncaya sistemi durdurmaktadır.

Aşınma plakası tahrik tablasına yerleştirildikten sonra, 60 cc hacimli bir enjektör ile test gresi aşındırma çenesinin eksenel kanalı boyunca çalışma alanına sevk edilir. Enjektör ile gönderilen gres miktarı ölçülebilmektedir. Bu durum, test edilerek karşılaştırılacak gres numunelerinin aynı şartlarda ve aynı miktarda uygulanması açısından önemlidir. Yapılan test denemelerinde yağ kanallarında bulunan yağ dahil sisteme verilen ilk gres miktarı 12 cc'dir. Bunun 6 cc'lik kısmı yağ sevk kanalı içinde kalmakta, 6 cc'lik kısmı ise çalışma alanı içine (aşındırma çenesi ile aşınma plakası arası) ulaşmaktadır. Test sırasında her 20 dakikada bir 6 cc yeni gres çalışma alanına gönderilmek üzere kanala enjekte edilmektedir. Bu sayede, sevk kanalı içinde bulunan hali hazırda çalışma sıcaklığındaki gres çalışma alanına ulaştırılarak sistemin sıcaklığında ani bir düşme olmasının önüne geçilmektedir.

Greslerin uygulaması yapıldıktan sonra çeneler birbiri üzerine oturtularak yükleme somunu ile uygulanmak istenen yük miktarı ayarlanmaktadır. Yük miktarı eş zamanlı olarak LCD ekran üzerinden görüldüğü için miktar ayarı kolaylıkla yapılabilmektedir. Yapılan bu testlerde yükleme miktarı ortalama 30 kg olarak seçilmiştir. Bu yükleme miktarı tüm numunelerin test edilmesi sırasında aynıdır.

Yükleme işleminden sonra teste başlama butonuna basılarak test başlatılmaktadır. Aşınma plakası artık, saat yönünde ve tersi yönde belirli aralıklarla dönmeye başlamaktadır. Ayarlanan tekrar sayısına ulaşıncaya kadar cihaz çalışmakta, her bir tekrar sonunda ölçülen yükleme, moment, sıcaklık ve tekrar sayısı LCD ekranda ve bilgisayar seri ekranına yazılarak kaydedilmektedir.

Tüm numuneler test edildikten sonra elde edilen ölçüm sonuçları, katkısız gres ile mikroparçaçık katkılı greslerin, aynı çalışma sürelerinde, elde edilen sıcaklık ve moment ölçüm sonuçları grafikler halinde karşılaştırılarak yorumlanmaktadır.

3.5. Mikromalzemeler

Endüstriyel proseslerde kullanılan ve ısı transfer akışkanı olarak adlandırılan su, mineral yağlar, etilen glikol, parafin, ester, tuz hidratları gibi malzemelerin ısı özellikleri, çalışma şartlarına (ısıtma-soğutma işlemi, ısı geri kazanımı, yalıtım vs.) göre ayrı bir önem arz etmektedir. Düşük ısı özelliklere sahip bu malzemelerin, istenilen performanslarda çalışabilmesi için gerekli ısı özelliklere sahip olması istenir. Bunun için bazı nano/mikro

malzemeler ilave edilmektedir. Bu kapsamda düşünölen ve tez çalışmasında incelenen gres yağlarına katkı maddesi olarak mikron büyüklüklerdeki bakır oksit (CuO), grafit, çinko oksit (ZnO) ve titanyum oksit (TiO₂)'in özelliklerine burada kısaca değinilecektir. Gres numunelere katılan mikromalzemelere ait karakteristik bilgiler Çizelge 3.2.'de listelenmiştir. Kullanılan mikromalzemeler Sigma-Aldrich firmasından temin edilmiştir.

3.5.1. Bakır oksit (CuO)

Bakır oksit katkılı çeşitli akışkanların ısı iletkenliklerinin iyileşmesi üzerine pek çok çalışmalar yapılmıştır. Yu ve diğerleri (2015), bakır oksit katkılı thermal gresin ısı iletimdeki değişimini inceleyen deneysel bir çalışma yapmışlardır. Bakır oksit katkı oranına göre, ilave edilen bakır oksit nanoparçacıkları ısı iletim katsayısını belirgin bir derecede artırmıştır. Katkisız thermal gresin ısı iletkenliği 20 °C sıcaklıkta yaklaşık 0,12 W/mK olup, hacimsel olarak %4 katkılı gresin ısı iletim katsayısı ~0,16 W/mK ve %9 katkılı gresin ısı iletim katsayısı ~0,24 W/mK değerlerine ulaşmıştır. Deneysel çalışmada kullanılan bakır oksit parçacıkları mikrodisk, nanoküresel ve nanoblok geometrilerindedir. Mikrodisk parçacığın düzlemsel boyutları 1-1,8 µm, kalınlığı 50-100 nm, mikroküresel parçacığın çapı 1 µm, nanoblok parçacığın düzlemsel uzunlukları 200-350 nm, ve kalınlığı 100-150 nm dir. Isı iletim katsayısı üzerine parçacık şeklinin ve boyutlarının önemli etkilere sahip oldukları bu deneysel çalışma ile görölmüştür.

3.5.2. Titanyum oksit (TiO₂)

Titanyum oksit genel olarak kozmetik ürünlerde ve güneş kremlerinde kullanılmaktadır. Yarı iletken bir özelliğe sahip olup, belirli şartlar altında serbest radikaller üreterek ışıınımı soğurmaktadır. Kolay üretilebilmektedirler ve kimyasal stabiliteye sahiptirler. Temel akışkanlar ile karıştırmak için herhangi başka bir kimyasal maddeye (surfactant) ihtiyaç duymamaktadır (He ve diğerleri, 2007). Saf suya karıştırılmış farklı büyüklüklerde ve konsantrasyonlardaki kuru TiO₂ parçacıklarının ilave edilmesiyle elde edilen nanoakışkanın ısı iletkenliği, vizkositesi ve ısı taşınım katsayısı ölçümlerini gerçekleştiren He ve diğerlerinin (2007) yaptığı çalışmada, TiO₂ parçacığının yoğunluğuna bağılı olarak, ısı iletkenliklerinin saf suya göre arttığı tespit edilmiştir.

3.5.3. Çinko oksit (ZnO)

Çinko oksit, ZnO formülü ile gösterilen bir inorganik bileşiktir. ZnO, suda çözünmeyen beyaz bir tozudur ve yaygın olarak kauçuk, plastik, seramik, cam, çimento, yağlayıcı, boya, merhem, yapıştırıcı, sızdırmazlık maddesi, pigment, yiyecekler, bataryalar, ferritler, yangın geciktiriciler ve ilk yardım bantları gibi kullanım alanlarına sahiptir. Mineral çinko oksit, doğal olarak meydana gelmesine rağmen, çoğu çinko oksit sentetik olarak üretilir. Saf ZnO beyaz bir toz halinde olup, suda çözünmeyen bir kimyasal yapıya sahiptir. Çinko oksit altıgen ve kübik kristal yapılarda olabildiği gibi, en yaygın olanı altıgen kristal yapıda olanıdır. Isıya dayanıklılık, yüksek ısı iletkenliği ve düşük termal genleşme özellikleri ile birçok uygulamada tercih edilen bir yarı iletken özellikli malzemedir.

3.5.4. Grafit

Grafit karbon esaslı malzemedir. Grafit nanomalzemelerin ısı özellikleri yoğunluklarına göre değişmektedir. Yoğunluğu arttıkça, ısı iletim katsayısı da aynı oranda artmaktadır (Afanasov ve diğerleri, 2009). Grafit parçacık büyüklüğünün etkisini araştıran Ye, Shentu ve Weng'in (2006) yaptıkları çalışma ile, büyük parçacıkların küçük parçacıklara göre daha fazla ısı iletim özelliklerine sahip olduklarını tespit etmişlerdir.

Deneylerde kullanılan mikromazmelere ait genel özellikler Çizelge 3.2.'de verilmiştir.

Çizelge 3.2. Mikromalzemelere ait genel özellikler

Mikromalzeme çeşitleri	Genel Özellikleri		
	Şekil ve büyüklük	Safılık (%)	Isı iletim katsayısı(W/mK)
CuO	Küresel, çap< 5 µm	97	36 (Hwang ve diğerleri, 2007)
TiO ₂	Küresel, çap< 5 µm	98	8.4-11,2 (Kim, Choi ve Kim, 2006)
Grafit	Küresel, çap<20 µm	98	119-165 (Ma ve diğerleri, 2017)
ZnO	Hegzagonal prizma, çap< 5µm	99	29 (Tawfik, 2017)

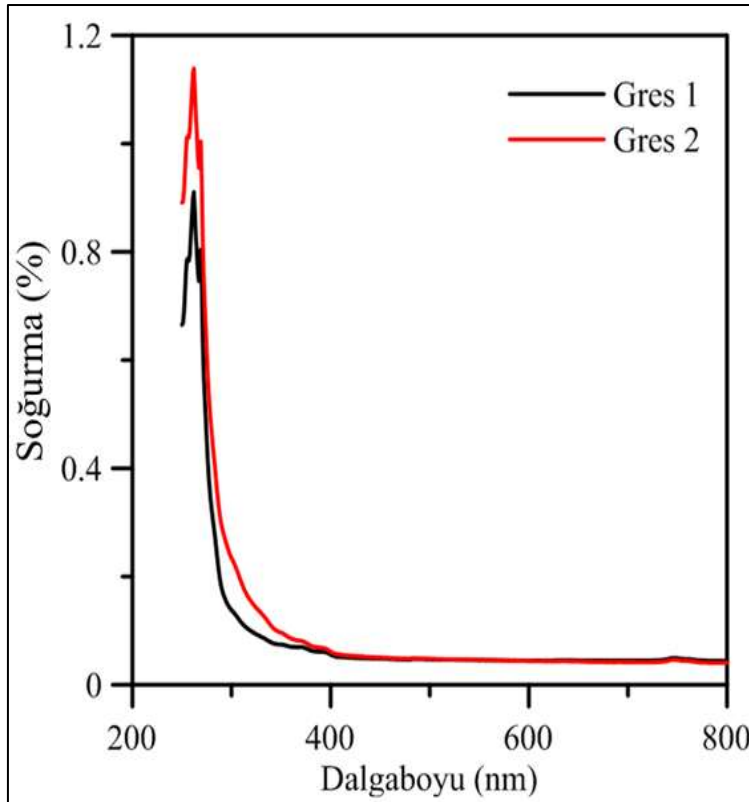


4. DENEYSEL SONUÇLAR VE YORUMLAR

Çalışmamızda ısı transfer özelliklerinin incelenmesi iki bölümden oluşmaktadır. İlk olarak, greslere mikro parçacık ilavesinin soğurma ve ısı iletim katsayısı özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. İkinci olarak ise mikro parçacık katkısının sıcaklık ve moment (sürtünme) değişimlerine etkisinin incelenmesi için test düzeneği hazırlanmış ve tüm numuneler test edilmiştir.

4.1. Görünür Dalgaboyunda Soğurma Ölçümleri

Önceki bölümde anlatıldığı gibi sadece katkısız Gres 1 ve Gres 2'nin görünür ışınım dalgaboyu aralığındaki soğurma değerleri ölçülmüş ve Şekil 4.1'de verilmiştir. Soğurma, ışının bir madde içine nüfuz etmesidir. İncelenen dalga boyu aralığında yaklaşık 300 nm civarlarında hem Gres 1 hem de Gres 2 için belirgin bir pik soğurma değerleri görülmektedir. Bu dalga boyundaki Gres 2'nin soğurma değeri, Gres 1'e göre daha yüksektir. Yani, 0,4 μm 'den büyük dalga boyu aralıklarındaki soğurma değerleri ile karşılaştırıldığında Gres 1'in yaklaşık 8 kat, Gres 2'nin yaklaşık 10 kat büyük soğurma özelliğine sahip olduğu görülür.



Şekil 4.1. İncelenen gres numunelerinin (katkısız) görünür ışıktaki soğurma değerleri

4.2. Yakın Kızılötesi Dalgaboyunda Soğurma Ölçümleri

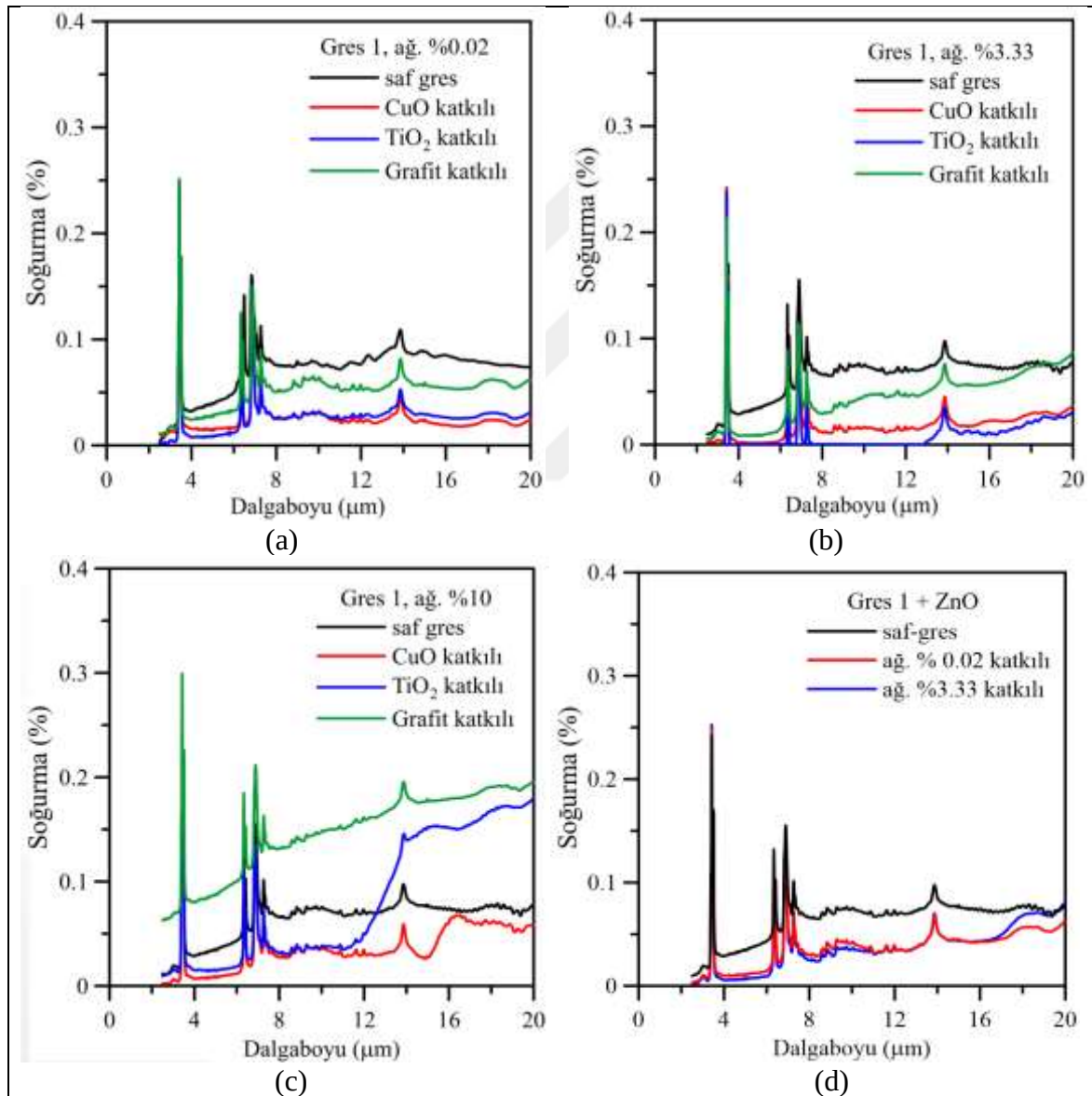
Yakın kızılötesi dalga boyu aralığındaki soğurma özelliği, parmak izi bölgesini (7,7-16 μm) içerdiğinden, malzemelerin karakteristik özelliklerini yansıtır. Isı transferi işleminin gerçekleştiği ısıl işlem dalgaboyunun (0,1 ile 100 μm olan bölge) yaklaşık %20'lik bölümüne karşılık gelmektedir. Bu nedenle yakın kızılötesi dalga boyundaki soğurma ölçümleri önemlidir. Daha önceki çalışmada (Kanazawa ve diğerleri, 2017) tespit edilen gresin 3,33-3,57 μm lik dalga boyundaki C-H band soğurması ve 6,5 μm deki C-O band soğurması, tez çalışmasında incelenen her iki gresin hem katkılı hem katkısız numunelerinin soğurma analizlerinde de görülmektedir.

Soğurma ölçümleri çok az miktardaki numune ile yapılabilmektedir. Bu yüzden yakın kızılötesi dalga boylarındaki ölçümler katkısız ve ağırlıkça %0,02; %3,33 ve %10 katkılı numuneler için yapılmıştır. Ancak, elimizde yeterli miktarda ZnO mikroparçacık olmadığından dolayı %10 ZnO katkılı numuneler için bu ölçüm yapılamamıştır. Tüm soğurma ölçümleri en az üç kez tekrarlanmıştır.

Ağırlıkça %0,02 ,%3,33 ve %10 oranlarında mikroparçacıklar karıştırılan Gres 1 numunelerinin 2,5–20 μm dalga boyundaki soğurma özelliklerinin ölçüm sonuçları Şekil 4.2'de verilmektedir. Katkı oranları sırasıyla (a) %0,02, (b) %3,33 ve (c) %10 şeklinde düzenlenmiştir. (ZnO katkısı için sadece %0,02 ve %0,03 oranında katkılı olarak ölçüm yapılmıştır). Şekil 4.2.(d)' deki grafik incelendiğinde ise, ZnO katkılı Gres 1'in ağırlıkça iki katkı durumunda da soğurma değerlerinin birbirine yakın olduğu ve katkısız Gres 1'in değerlerinin çok altında olduğu görülmektedir. Sadece, ağırlıkça %10 katkılı grafit karıştırılmış Gres 1'in soğurma değerleri, katkısız Gres 1'in değerlerinden oldukça yüksektir. Ağırlıkça %10 TiO_2 katkılı Gres 1'in soğurma değerleri de 12 μm 'den büyük dalga boylarında, % 10 grafit + Gres 1 gibi yüksektir.

Soğurma ölçüm sonuçlarımız Kanazawa ve diğerlerinin (2017) lityum kalınlaştırıcılı gres ile yaptıkları deneysel çalışmadaki ~3,4 μm 'de C-H bağlarını ve ~6,5 μm 'de C=O bağlarını gösteren, dalga boyu yapısal değişimleri ile aynı değişimleri göstermektedir. Ağırlıkça %0,02 ve %3,33 grafit katkılı Gres 1'in soğurma değerleri, katkısız Gres 1 değerlerine çok yakındır. Ayrıca, %0,02 ve %3,33 katkı durumlarında CuO ve TiO_2 içeren Gres 1'in soğurma değerleri birbirine yakın elde edilmiştir.

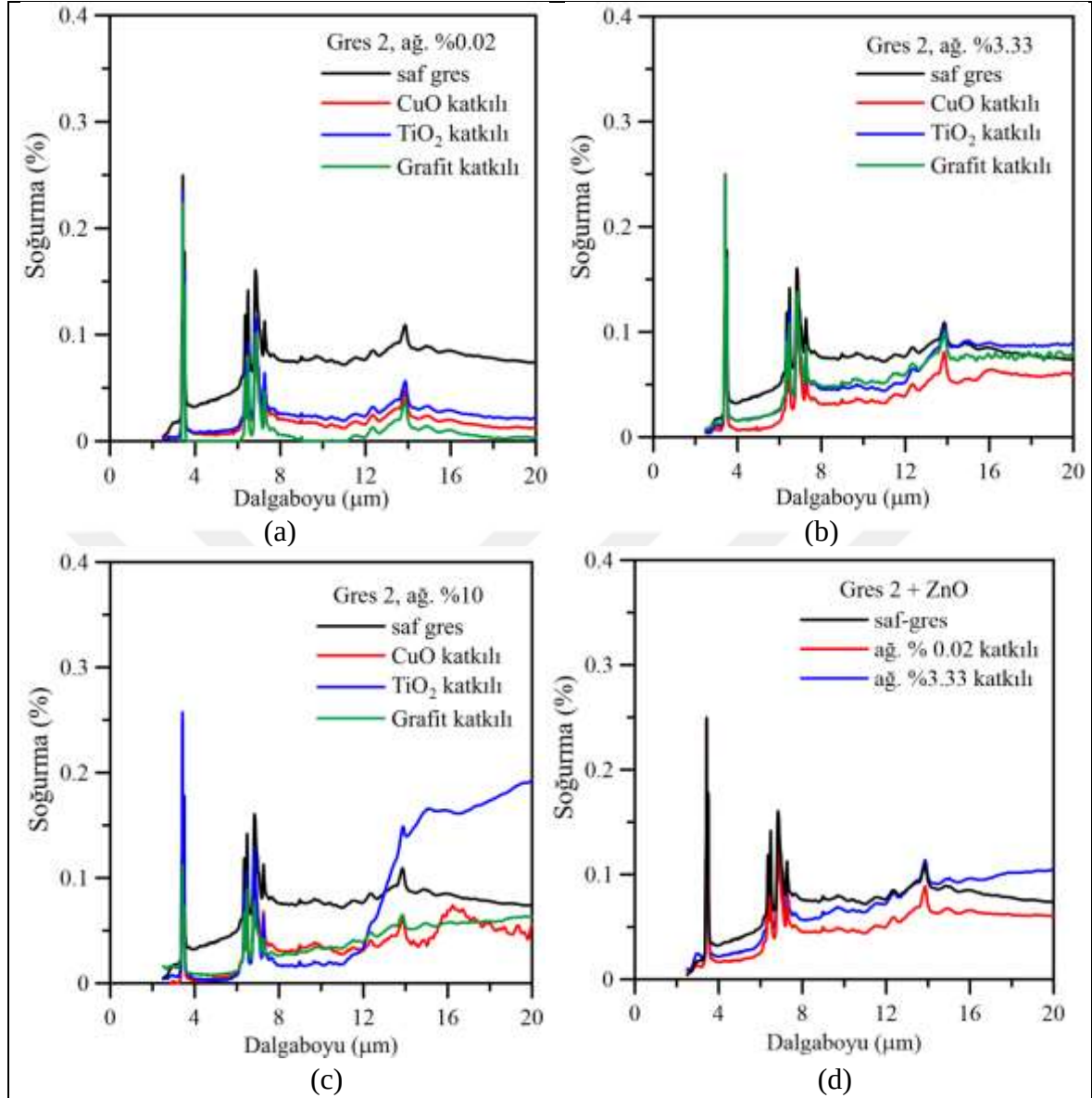
Ağırlıkça %10 grafit katkılı Gres 1, Şekil 4.2 (c)'de görüldüğü gibi, incelenen tüm dalga boylarında maksimum değerlere ulaşmaktadır. Bu durum özellikle katkı maddesinin yüksek miktarda olmasından kaynaklanmaktadır. Hagen-Rubens ilişkisi ile değerlendirilen grafit+Gres 1'in soğurması, tüm dalga boylarında açıkça yüksek olarak elde edilmiştir. Dalga boyu 12 μm 'den büyük olduğunda TiO_2 için de benzer absorptans değerleri gözlenmiştir. Yakın kızılötesi dalga boyu aralığında Gres 1'e eklenen mikro parçacıkların miktarı arttıkça soğurma değerleri artmıştır.



Şekil 4.2. Katkisız ve katkılı Gres 1 soğurma ölçüm sonuçları (a) %0,02 katkılı, (b) %3,33 katkılı , (c) %10 katkılı ve (d) ZnO katkılı

Ağırlıkça % 0,02 , % 3,33 ve %10 oranlarında mikroparçacık katkılı Gres 2'nin hem katkılı hemde katkisız durumda 2,5–20 μm dalga boyu aralığındaki soğurma özellikleri Şekil

4.3.'de verilmektedir. 2,5–15 μm dalga boyundaki soğurma değerleri, katkısız durumdaki Gres 2'nin katkılı değerlere göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu durum dalga boyu arttıkça, ağırlıkça %0,02 katkılı durumda devam ederken, katkı miktarı arttıkça soğurma değerlerinin katkısız duruma yaklaştığı görülmektedir. Özellikle ağırlıkça %3,33 katkılı Gres 2 için 15–20 μm dalga boyu aralığındaki soğurma değerleri katkısız gresin soğurma değerlerine çok yakındır. Ayrıca ağırlıkça %10 katkılı Gres 2 hariç, Gres 2'nin soğurma değerleri Gres 1'e benzer özellik göstermektedir. 12 μm 'den daha büyük dalga boyunda, ağırlıkça %10 TiO_2 katkılı Gres 2'nin soğurma değerleri, katkısız Gres 2'ye göre daha yüksektir (Bknz Şekil 4.3 (c)). TiO_2 katkılı Gres 2'nin soğurma değerleri, yüksek elektrik direncinden dolayı 13,5–20 μm 'de en yüksektir. Kullanılan mikroparçacıkların elektrik dirençleri CuO için $1,72 \times 10^{-6}$ (Lide, 2008), grafit için 122×10^{-5} (Xi ve Chung, 2021), TiO_2 için 39×10^{-6} (Lide, 2008) şeklindedir. $\lambda=12$ μm 'den daha büyük dalga boylarında grafit katkılı Gres 2'nin soğurma ölçümleri Gres 1'in sonuçlarına benzer bir durum göstermemiştir. C-H ve C-O bağları tarafından oluşturulan pikler $\sim 3,2$ ve $\sim 6,7$ μm 'de Gres 2 için de görülmektedir (Kanazawa, 2017). Gres 2'de grafit katkılı da ağırlıkça %0,02 ve %3,33'te, TiO_2 'nin ise ağırlıkça %10 katkılı da soğurma değeri 3,2 μm 'de maksimum değerler elde edilmiştir. Şekil 4.3. (d)'deki grafik incelendiğinde ise ZnO katkılı Gres 2'nin soğurma değerleri, katkısız Gres 2'ye göre düşük değerlerdedir. %3,33 ZnO katkılı Gres 2'nin ölçülen soğurma değerlerinin, dalgaboyu aralığı 14–20 μm de, katkısız Gres 2'nin değerlerinin üzerine olduğu görülür. Katkı maddesinin ağırlıkça miktarı fazla olduğu için, %3,33 ZnO katkılı numunenin soğurma değerlerinin, %0,02 ZnO katkılı numunenin değerlerinden biraz daha yüksektir. Ayrıca, incelenen gresler için parmak izi bölgesinde ($\sim 7,1$ –16 μm dalga boyu aralığı) $\sim 13,8$ μm 'de absorpsiyon değerlerinde bir değişim piki vardır. Bu tepe değerlerinin gresin baz akışkanın yapısından kaynaklandığı düşünülmektedir. Soğurma değerlerinin artan dalga boyu ile artan, dalga hareketi durumu Şekil 4.2. ve Şekil 4.3.'deki ölçüm sonuçlarında görülmektedir. Nicoletti(2014), nanoparçacık katkılı yağlayıcılarda, yataкта sürtünme nedeniyle üretilen ısının minimumda tutulmasının, yağlayıcıların viskozitesindeki bozulmaları azalttığını belirlemiştir. Greslerin soğurma değerlerinin düşmesi, gresin ortamdan gelen ışıını absorbe edemeyeceğini ve çalışılan yataкта ısıya dönüşmeyeceğini gösterir. Bu nedenle, hem sürtünmeden kaynaklanan ısının hem de dış ortamlardan gelen ışıının neden olduğu kompakt ısı etkilerin, Nicolletti'nin (2014) çalışmasında belirttiği gibi gresler tarafından ortadan kaldırılabilir veya azaltılabileceği görülmektedir.



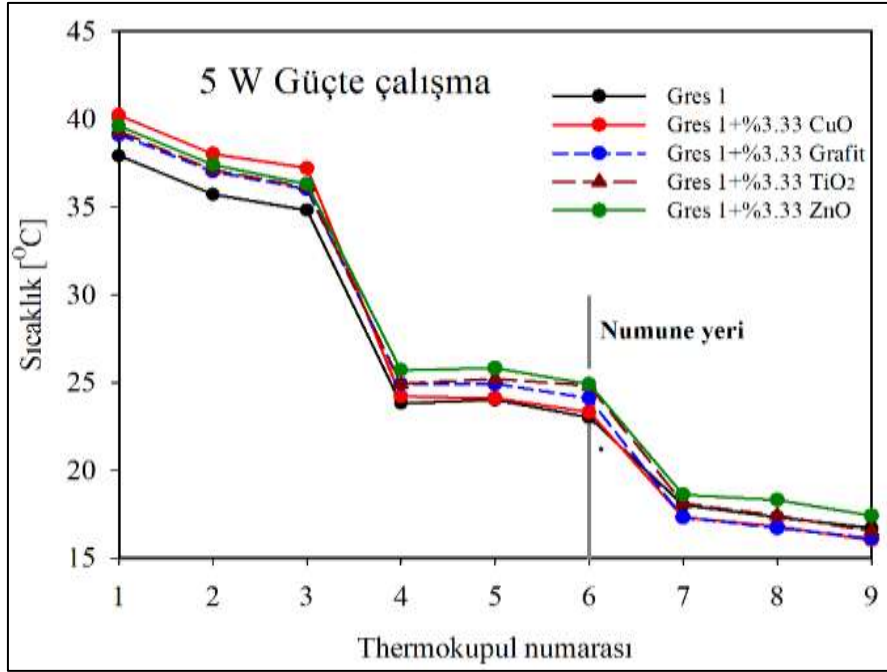
Şekil 4.3. Katkısız ve katkılı Gres 2 soğurma ölçüm sonuçları (a) %0,02 katkılı, (b) %3,33 katkılı, (c) %10 katkılı ve (d) ZnO katkılı

4.3. Isı İletim Katsayısı Ölçümleri

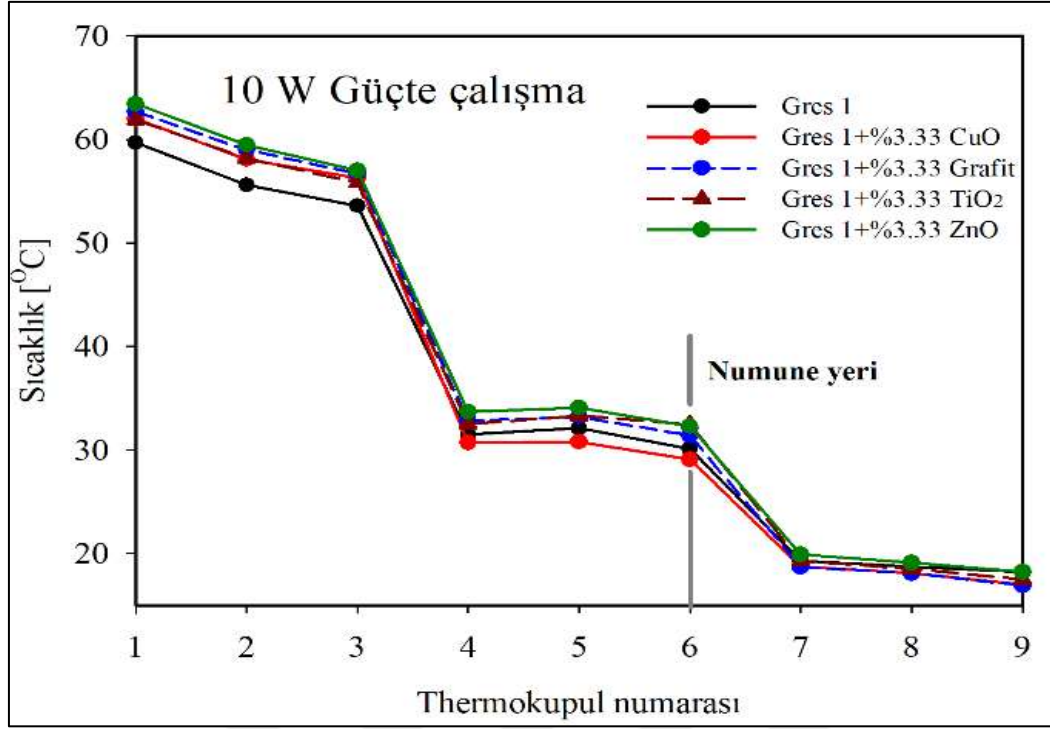
Katkı maddesi olarak kullanılan metal mikroparçacıklar, Çizelge 3.2’de verilen ısı iletim özelliklerine göre en yüksekte en düşük malzemeye doğru sıraladığımızda, grafit, CuO, ZnO ve TiO₂ şeklindedir. Burada grafitin ısı iletim özelliği, CuO ve ZnO’nin özelliklerinin üç katından ve TiO₂’nin ısı iletim özelliğinin yaklaşık on katından daha fazla olduğu görülmektedir. En düşük ısı iletim özelliğe TiO₂ sahiptir. Çalışmamızda yataklardaki çalışma sürelerini temsilen kısa çalışma süresi 5 W ve uzun çalışma süresi 10 W için testler yapılmıştır. Gres 1 ve Gres 2’nin katkısız ve ağırlıkça %3,33 katkılı durumları için elde edilen sıcaklık değerleri grafikler halinde verilmiştir. Gres 1’in 5W güçteki ölçüm sonuçları Şekil 4.4’de, 10W

güçteki sonuçları ise Şekil 4.5’de verilmektedir. Gres 2 için yapılan 5 W ve 10 W güçteki ölçüm sonuçları sırasıyla Şekil 4.6 ve Şekil 4.7’de görülmektedir.

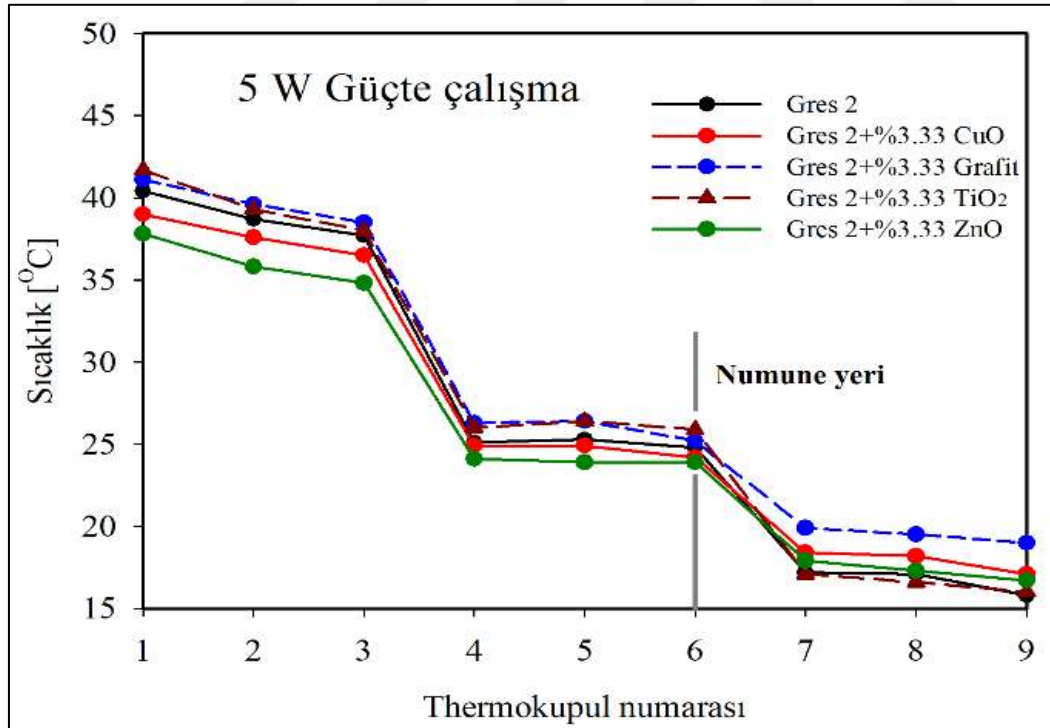
Greslerin içine karıştırılan metal mikroparçacıklar, He ve Wang’ın (2019) çalışmasında olduğu gibi gres ortamında ısı yünden birbirleri ile temas oluşturarak, greslerin ısı iletim özelliklerinde iyileşmeyi sağlamaktadırlar.



Şekil 4.4. 5W güçte çalışmada katkısız ve katılı Gres 1 numunelerinin sıcaklık ölçümleri



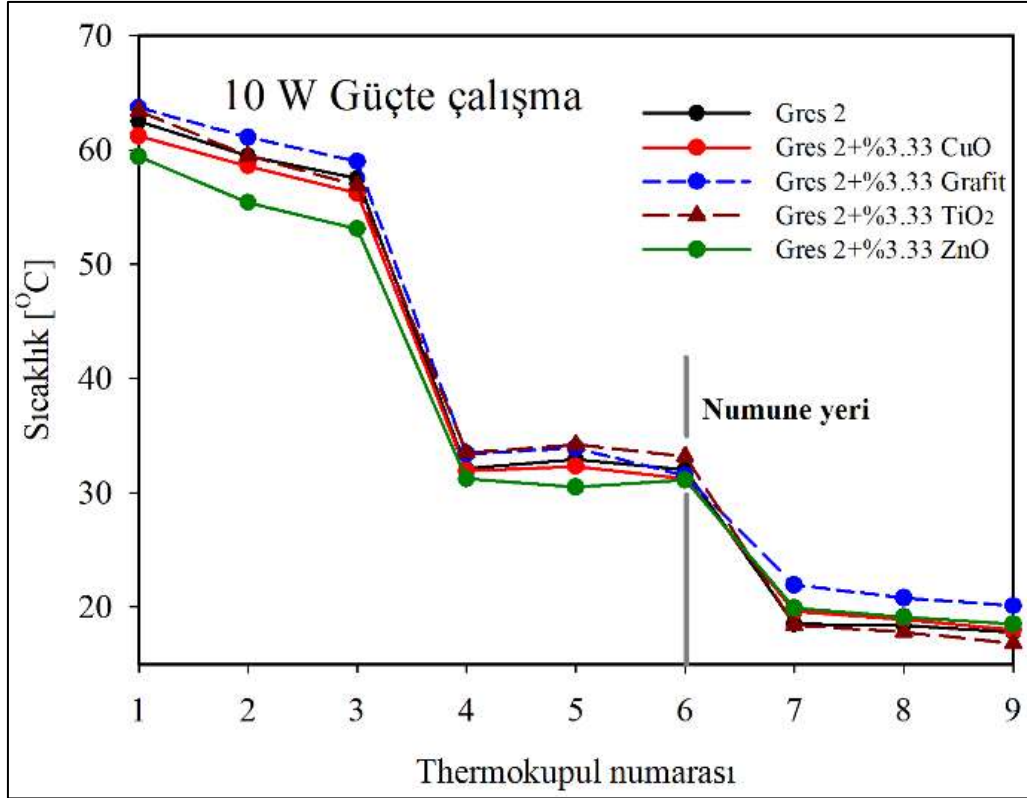
Şekil 4.5. 10W güçte çalışmada katkısız ve katkılı Gres 1 numunelerinin sıcaklık ölçümleri



Şekil 4.6. 5W güçte çalışmada katkısız ve katkılı Gres 2 numunelerinin sıcaklık ölçümleri

Önceki deneysel çalışmalarda, az katkı maddesi ilave edildiğinde, gres içindeki katkı malzemelerinin etrafında yüksek ısı direnç oluştuğu ve bunun sonucunda, katı maddelerinin birbirleriyle temas oluşturmamaları görülmüştür. Bu nedenle, az katkılı greslerin ısı iletim

özellikleri çok yavaş artmaktadır. Miktar olarak daha fazla katkı maddeleri eklendiğinde, gres içindeki parçacıkların etrafındaki ısı direnç, parçacıkların birbirlerine daha yakın olması sebebiyle kolayca aşılabilmektedir. Dolayısıyla bu durumdaki karışımın ısı iletim özelliklerinin daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Deneysel sonuçlarımız, Verma ve diğerleri (2014) ile Christensen ve diğerleri'nin (2020) deneysel sonuçlarını teyit etmektedir.



Şekil 4.7. 10W güçte çalışmada katkısız ve katkılı Gres 2 numunelerinin sıcaklık ölçümleri

4.4. Isıl Performans Test Düzenegi ile Sıcaklık ve Moment Ölçümleri

Hazırlanan test düzeneginde yapılan sıcaklık ve moment ölçümlerinin sonuçları ilerleyen kısımlarda grafikler halinde sunulmaktadır. Katkı maddesinin sıcaklık ve moment üzerine etkilerini belirlemek için minimum ağırlıkça %0,02 ve maksimum miktar olarak ağırlıkça %3,33 oranında katkı maddesi ile karıştırılmıştır. Sıcaklık ve moment değişimleri için 100 gr grese 20 mg ve 3,33 gr mikro parçacıklar (CuO, grafit, TiO₂ ve ZnO) ilave edilmiştir. Yani ağırlıkça karışım oranları %0,02 ve 3,33 olan gresler hazırlanmıştır. Isıl performans test cihazının çalışma koşulları ve deneylerin (60 dakikalık sürelerde daha fazla malzeme ile) birkaç kez tekrarlanması nedeniyle daha fazla miktarlarda numunelere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu yüzden ağırlıkça %10 katkılı greslerin soğurma özellikleri ölçülebilmis,

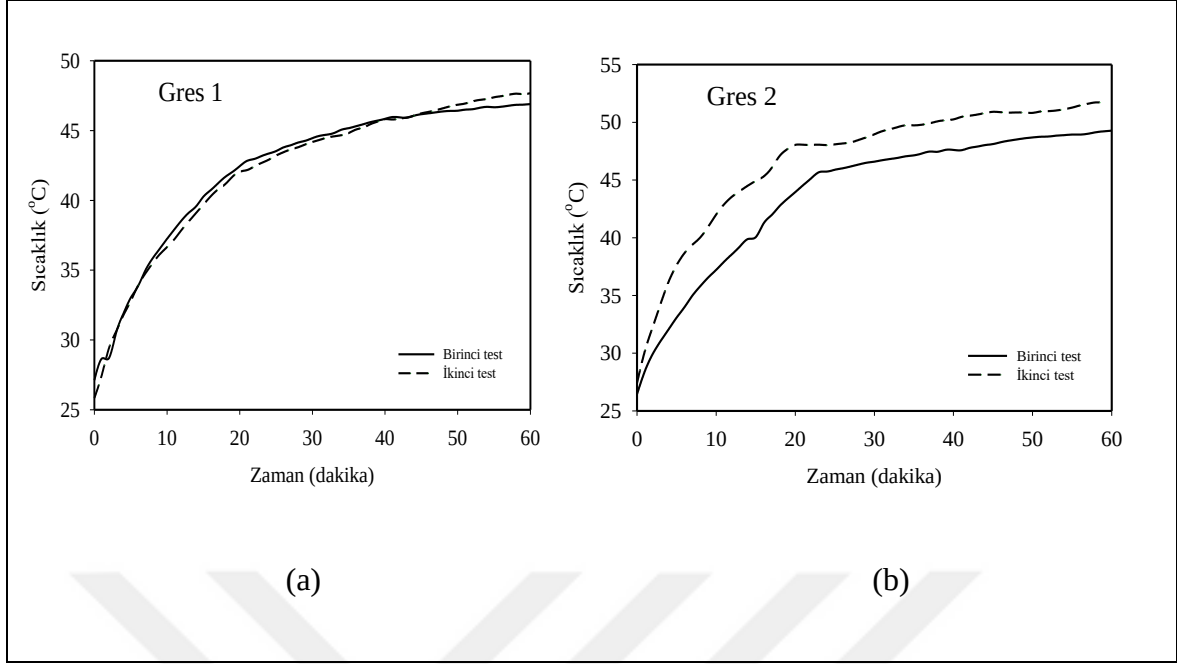
fakat test cihazında sıcaklık ve moment dağılımlarını tespit edebilmek için deneyler yapılamamıştır.

Katkısız greslerin bir saatlik çalışma sürecindeki sıcaklık değişimleri Şekil 4.8’de ve moment değişimleri de Şekil 4.9’da verilmektedir. Deneysel çalışmalar birkaç kez tekrarlanmış ve kararlı sonuçlar elde edilmiştir. Deney tekrarı ile cihazın ve sonuçların kararlılığı gösterilmek ve deney ölçümü esnasında kullanıcı kaynaklı hataları minimize etmek istenmiştir. Test düzeneği ile yapılan ölçümlerin kararlılığı ayrıca deneysel hata analizi yöntemlerinden olan “Belirsizlik Analizi” yöntemi ile de analiz edilmiştir. Yapılan analiz sonucunda, deney sonuçlarının kararlılığı teyit edilmiştir. Ölçüm sonuçları için yapılan belirsizlik analizine ilişkin detaylı bilgiler EK-1. ve EK-2’de verilmiştir.

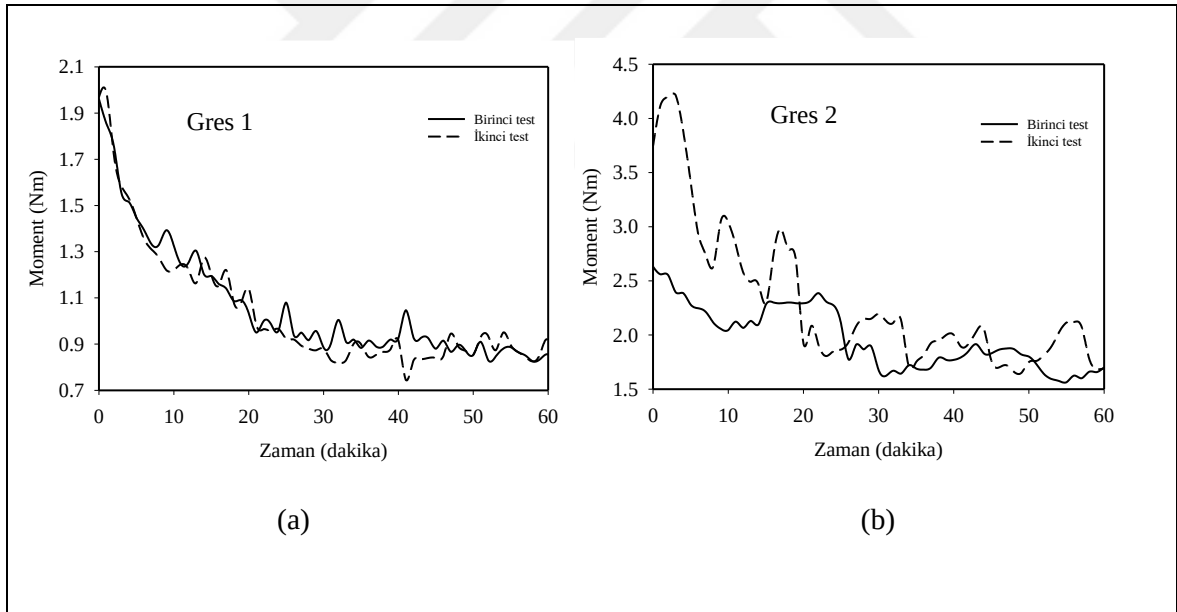
Resim 4.1’de gösterilen metal mikroparçacık katkılı numunelerin resimlerinde, açık kahverengi renkli numuneler katkılı Gres 1 ve koyu renkli olanlar katkılı Gres 2 numuneleridir (Başka bir ifadeyle, üst sıradaki numuneler katkılı Gres 1, alt sıradaki numuneler katkılı Gres 2 numuneleridir).



Resim 4.1. Greslere mikroparçacıkların katılmış halleri



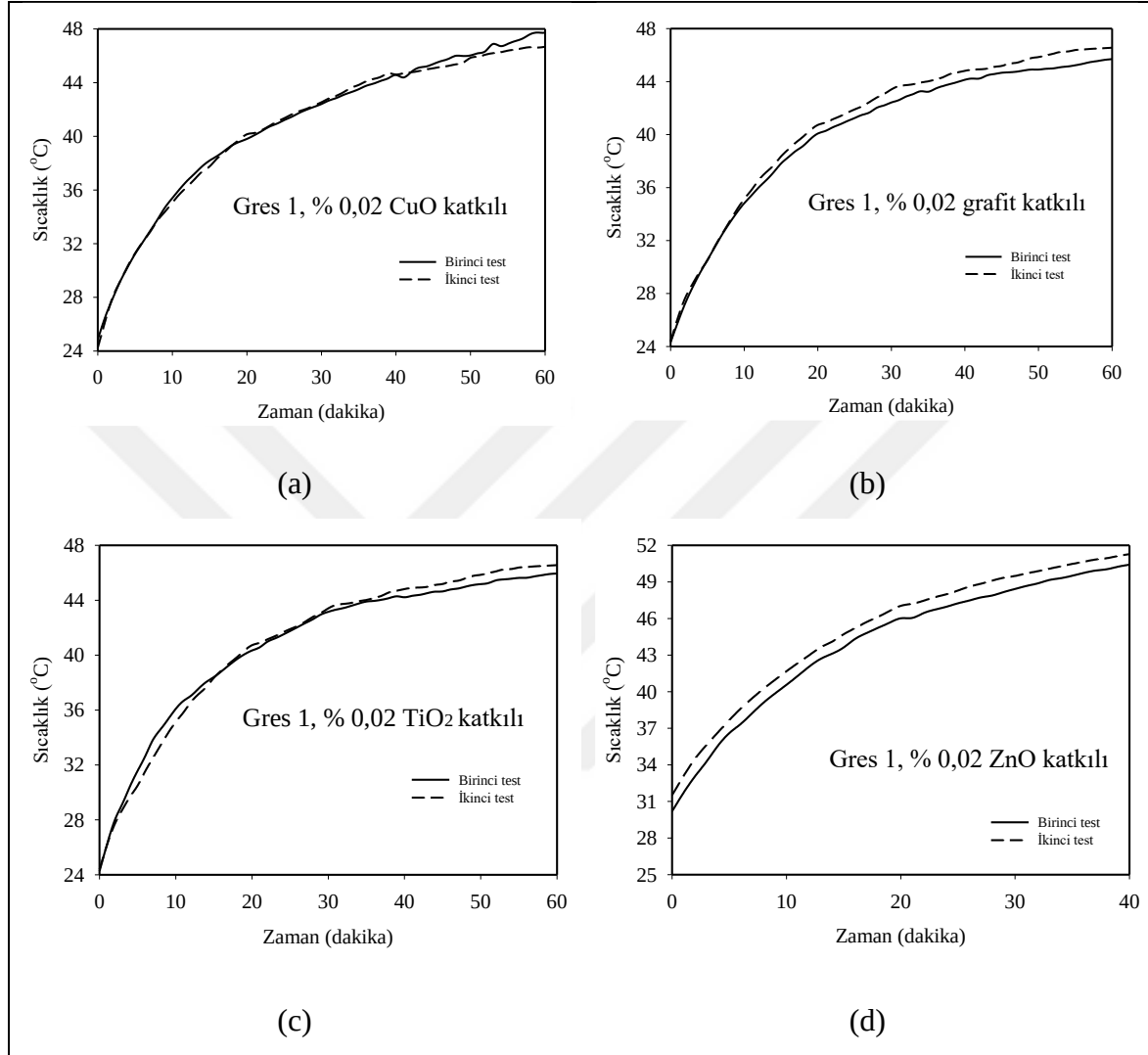
Şekil 4.8. Katkısız greslerin sıcaklık değişimleri (a) Gres 1 ve (b) Gres 2



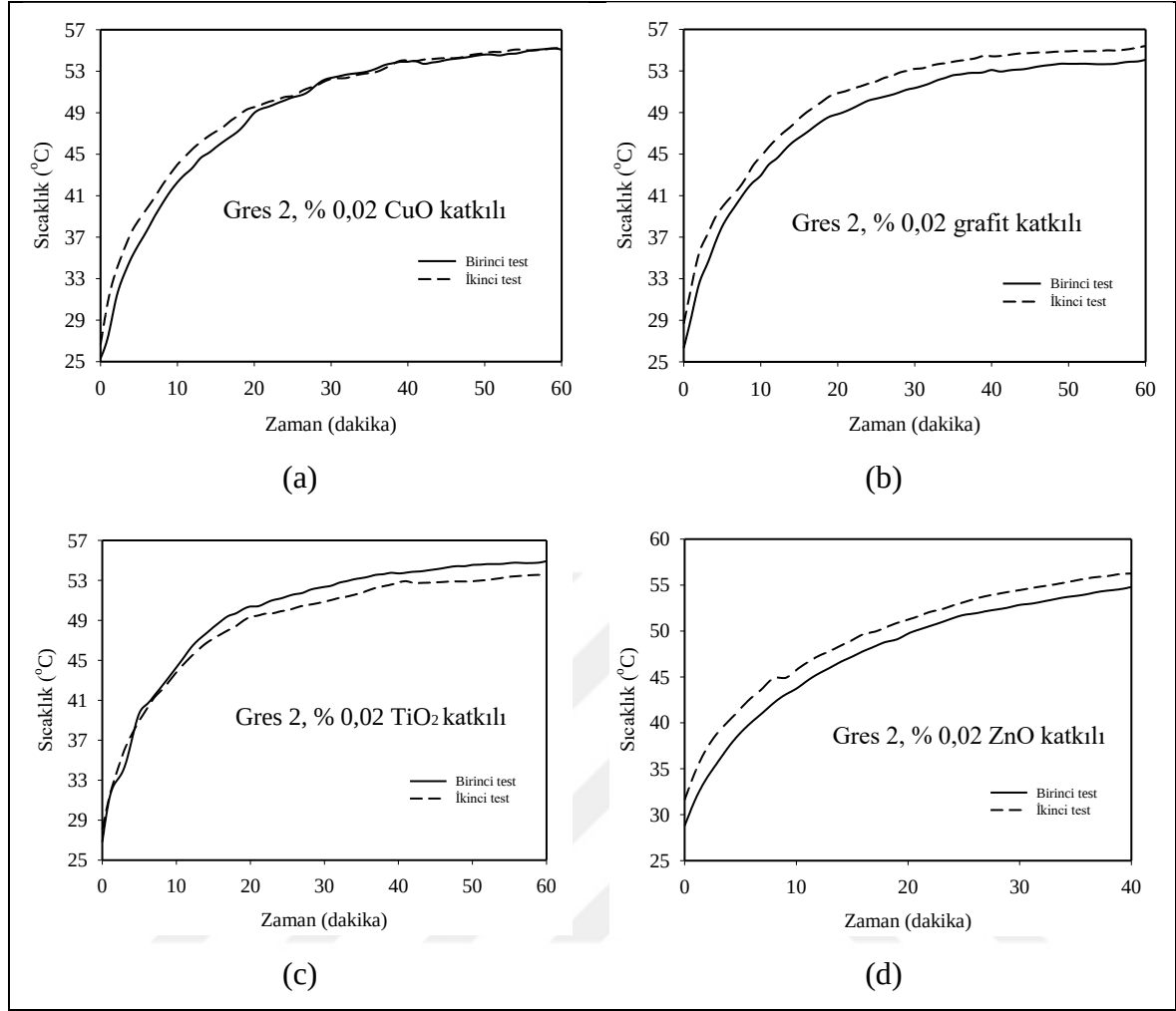
Şekil 4.9. Katkısız greslerin moment değişimleri (a) Gres 1 ve (b) Gres 2

% 0,02 CuO, TiO₂, grafit ve ZnO katkılı Gres 1'in sıcaklık değişimleri Şekil 4.10'da ve aynı katkı oranında, aynı katkı maddelerini içeren Gres 2 numunelerinin sıcaklık değişimleri de Şekil 4.11'de sırasıyla verilmektedir. Her iki deney sonuçları birbiri ile uyumludur. Benzer işlemler %3,33 katkılı CuO, TiO₂, grafit ve ZnO karıştırılan Gres 1 ve Gres 2 numuneleri için de aynı şekilde yapılmıştır. Ancak, bu grafikler test düzeneği ile yapılan ölçümlerin

kararlılığını göstermek amacıyla verildiğinden dolayı, tezin yazımında daha fazla yer tutmaması için %3,33 katkılı numunelerin sonuçlarına ait grafikler verilmemiştir.

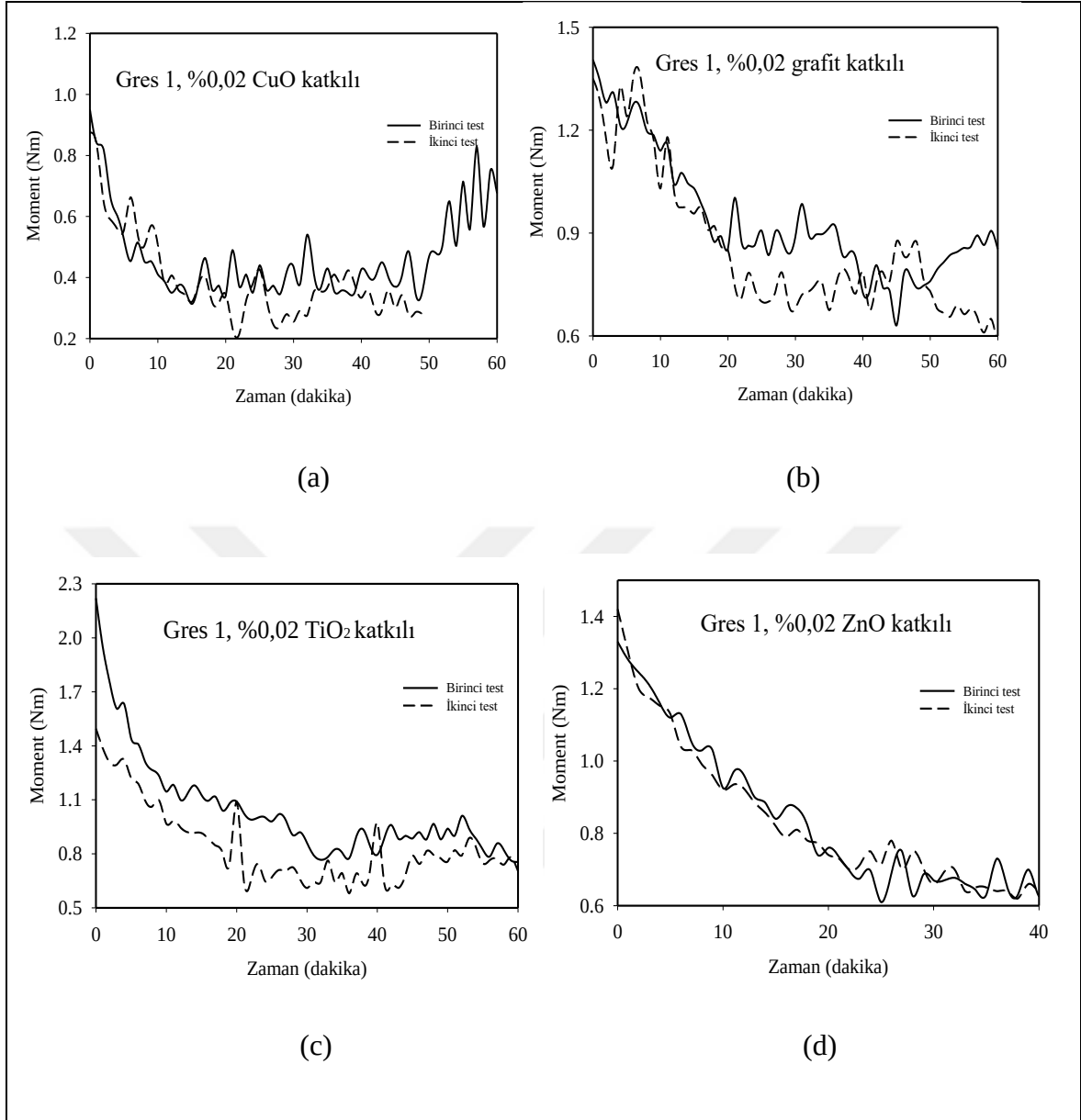


Şekil 4.10. %0,02 katkılı Gres 1 numunelerinin sıcaklık değişimleri (a) CuO, (b) Grafit, (c) TiO₂ ve (d) ZnO katkılı durumlar

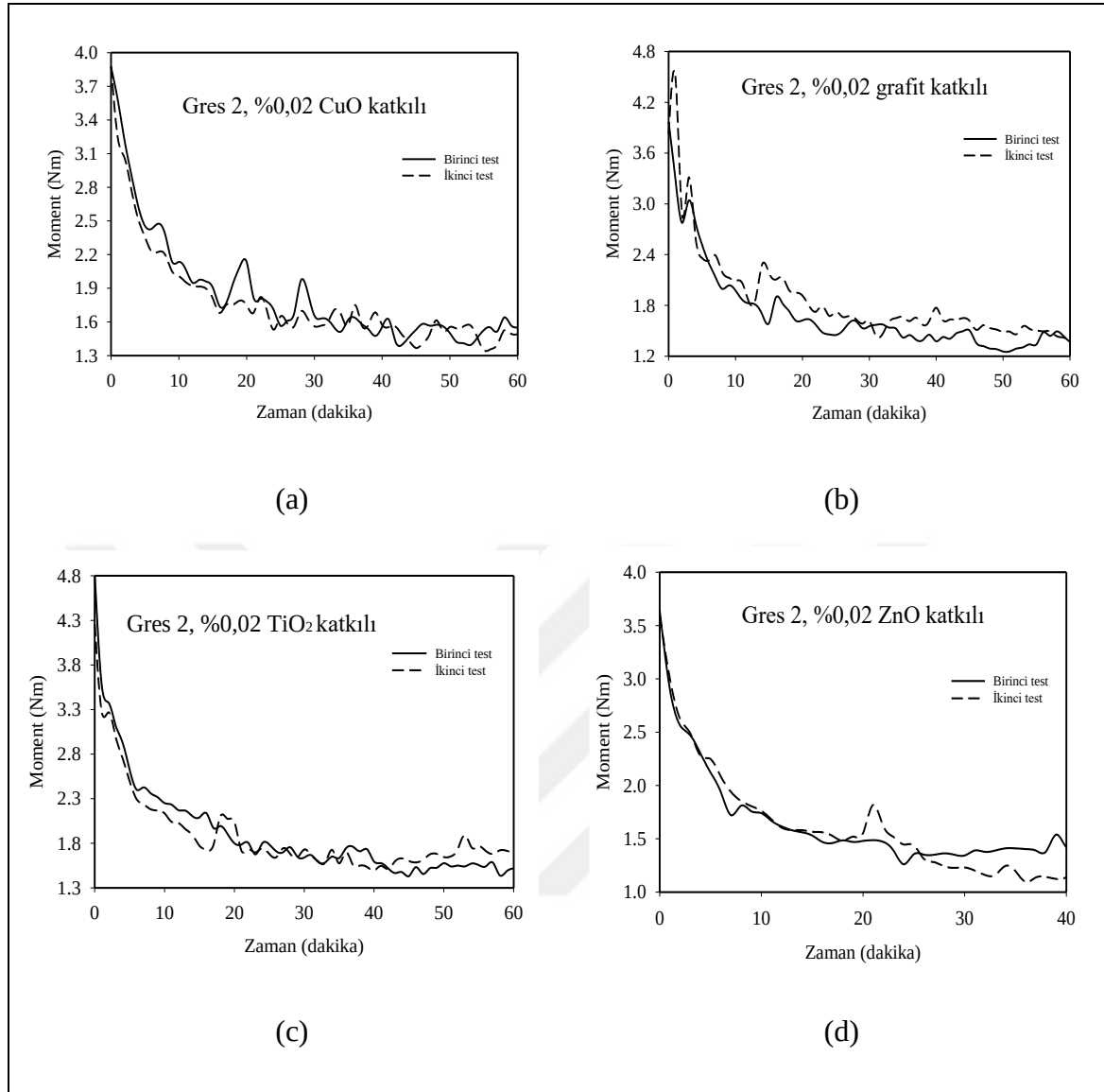


Şekil 4.11. %0,02 katkılı Gres 2 numunelerinin sıcaklık değişimleri (a) CuO, (b) Grafit, (c) TiO₂ ve (d) ZnO katkılı durumlar

Deneysel çalışmalarda sıcaklıkların yanında aynı zamanda ölçülen moment (sürtünmeden kaynaklı direnç) değişimleri incelendiğinde, % 0,02 CuO, TiO₂, grafit ve ZnO katkılı Gres 1 numunelerinin sonuçları Şekil 4.12’de verilmektedir. % 0,02 katkı oranında, aynı katkı maddeleri karıştırılmış Gres 2 numunelerinin moment değişimleri Şekil 4.13’de sunulmaktadır. Her iki deney sonuçları birbiri ile uyumludur.

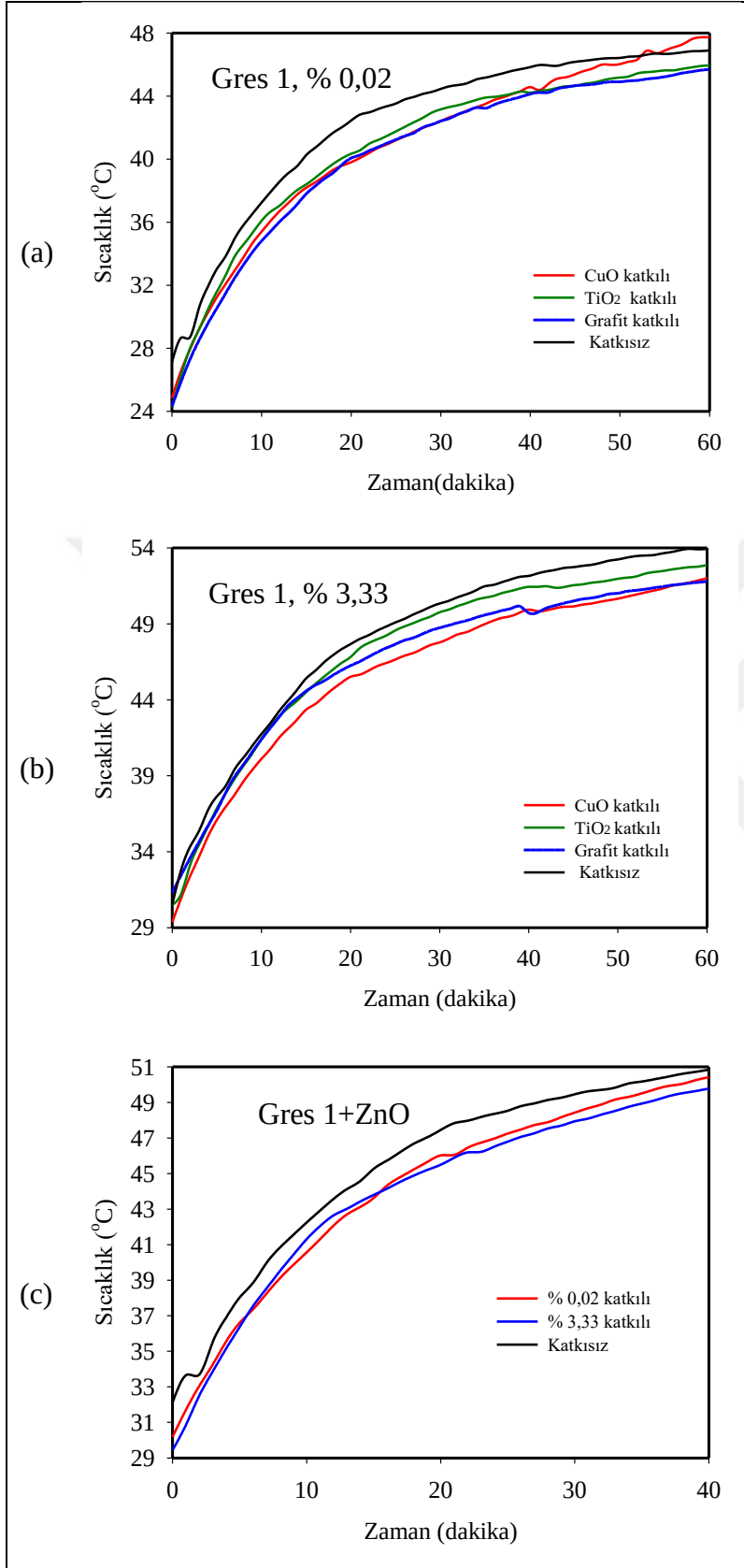


Şekil 4.12. %0,02 katkılı Gres 1 numunelerinin moment değişimleri (a) CuO, (b) Grafit, (c) TiO₂ ve (d) ZnO katkılı

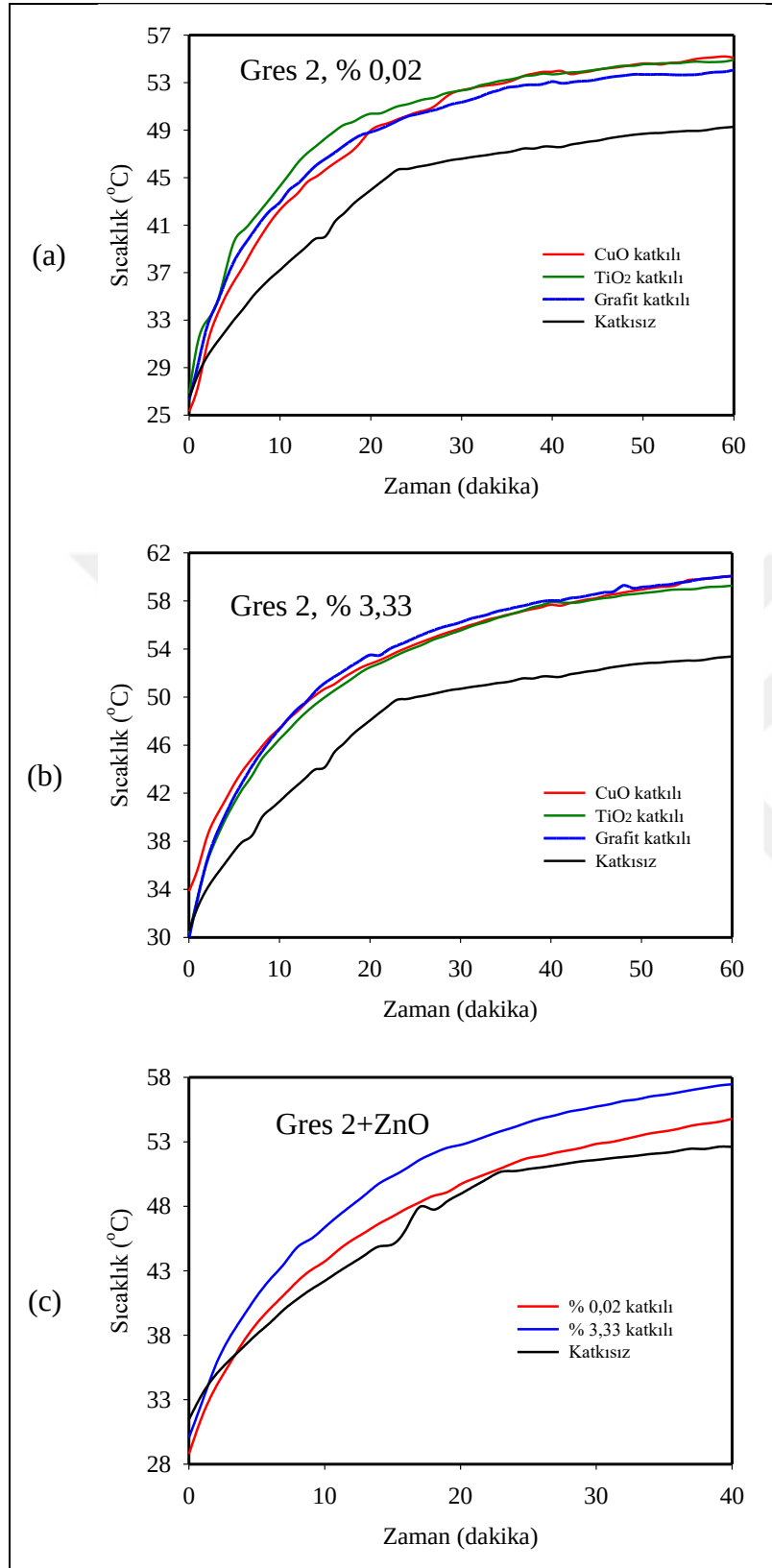


Şekil 4.13. %0,02 katkılı Gres 2 numunelerinin moment değişimleri (a) CuO, (b) Grafit, (c) TiO₂ ve (d) ZnO katkılı

Katkısız ve % 0,02 ile % 3,33 katkılı Gres 1 ve Gres 2 numunelerinin Şekil 3.3’de gösterilen test düzeneğindeki sıcaklık ölçümleri, karşılaştırma amacıyla Gres 1 için Şekil 4.14’de ve Gres 2 için Şekil 4.15’de sırasıyla verilmiştir.



Şekil 4.14. Katkısız ve katkılı Gres 1 numunelerinin sıcaklık değişim eğrileri (a) %0,02 (b) % 3,33 ve (c) ZnO katkılı



Şekil 4.15. Katkısız ve katkılı Gres 2 numunelerinin sıcaklık değişim eğrileri (a) %0,02 (b) %3,33 ve (c) ZnO katkılı

Yukarıda verilen grafikler incelendiğinde, her iki gresin sıcaklık dağılımları ilk yirmi dakikalık test süresinde hızlı artış göstermiştir. Devamındaki test sürecinde, sıcaklıktaki artış fazla olmamıştır. Sıcaklıklardaki bu değişiklik, Prasad, Rathod, Yadav ve Modi'nin (2010) deneysel sonuçlarıyla uyumludur. Gres 2'nin katkılı ve katkısız sıcaklık dağılımları Gres 1'e göre daha yüksektir. Çizelge 3.2'de verilen katkı maddelerinin ısı iletkenliklerine göre bakıldığında, TiO_2 en düşük ısı iletkenliğe ve grafit en yüksek ısı iletkenliğe sahip olduğu görülür. Ayrıca, CuO 'nun ısı iletkenliği, TiO_2 'den üç veya dört kat daha yüksektir. Şekil 4.14 ve Şekil 4.15'den görüldüğü gibi, metalik katkı maddelerinin ısı iletkenlikleri bariz bir şekilde farklı olmasına rağmen, katkılı greslerin sıcaklık dağılımları, ağırlıkça katkı oranlarına bağlı olarak, birbirine yakın şekilde değişmektedir.

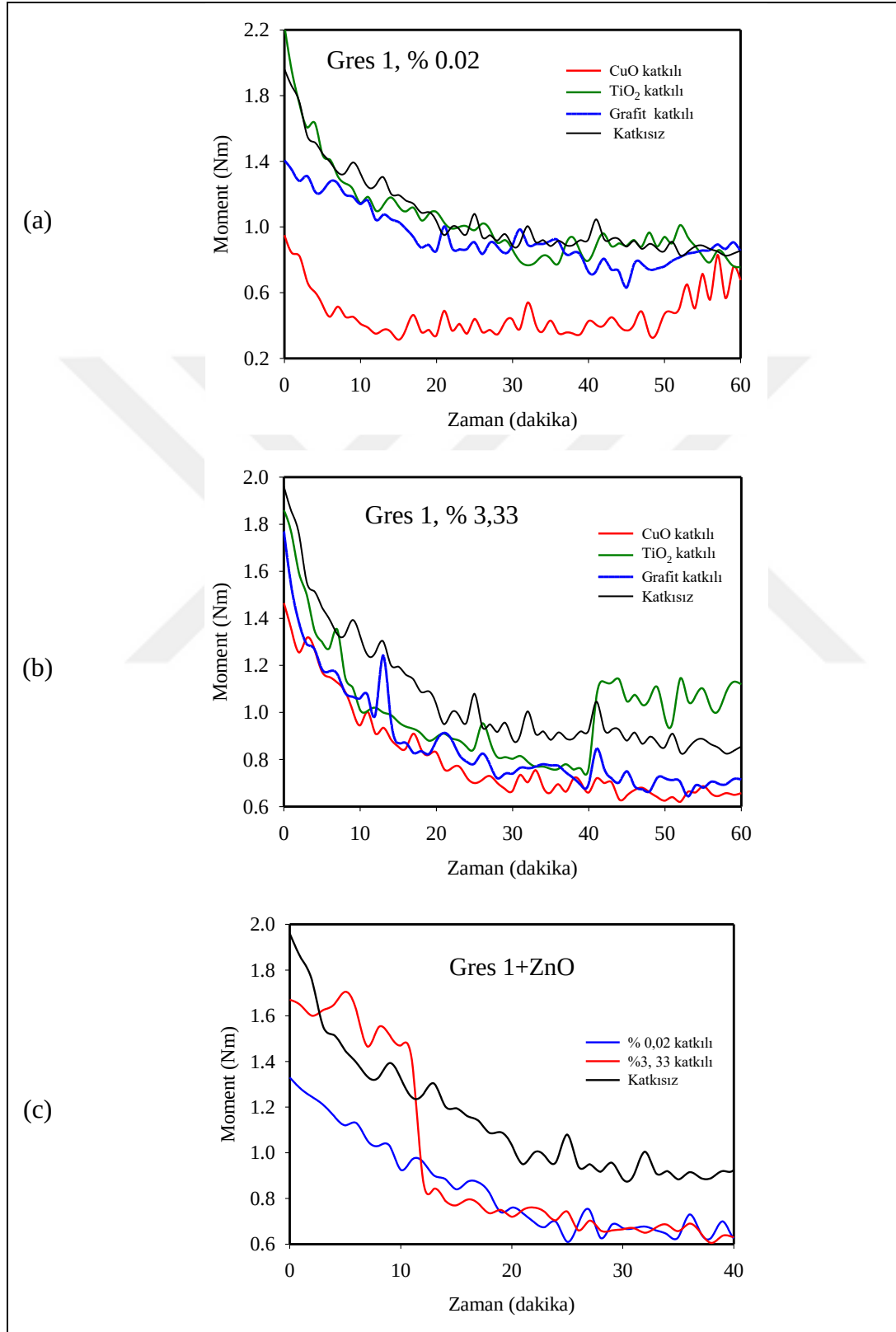
Katkısız Gres 1'in sıcaklık değerleri ZnO +Gres 1'in sıcaklık değerlerine göre bir miktar yüksektir. Katkısız Gres 2'nin sıcaklık değerleri ZnO +Gres 2'nin değerlerine göre küçüktür.

Ağırlıkça %0,02 katkılı durum için, ilk 20 dakikada katkılı Gres 1'in sıcaklıkları, katkı maddesi içermeyen Gres 1'den ~%5–6 daha düşüktür. 40 dakika sonra aralarındaki fark %2'ye kadar düşer. Ayrıca bu durumda, testlerin ilk 40 dakikası için katkılı Gres 1'in sıcaklık değişim eğrileri birbirine yakın iken; bu süreden sonra, CuO 'lu Gres 1'in sıcaklıkları hızla yükselmektedir.

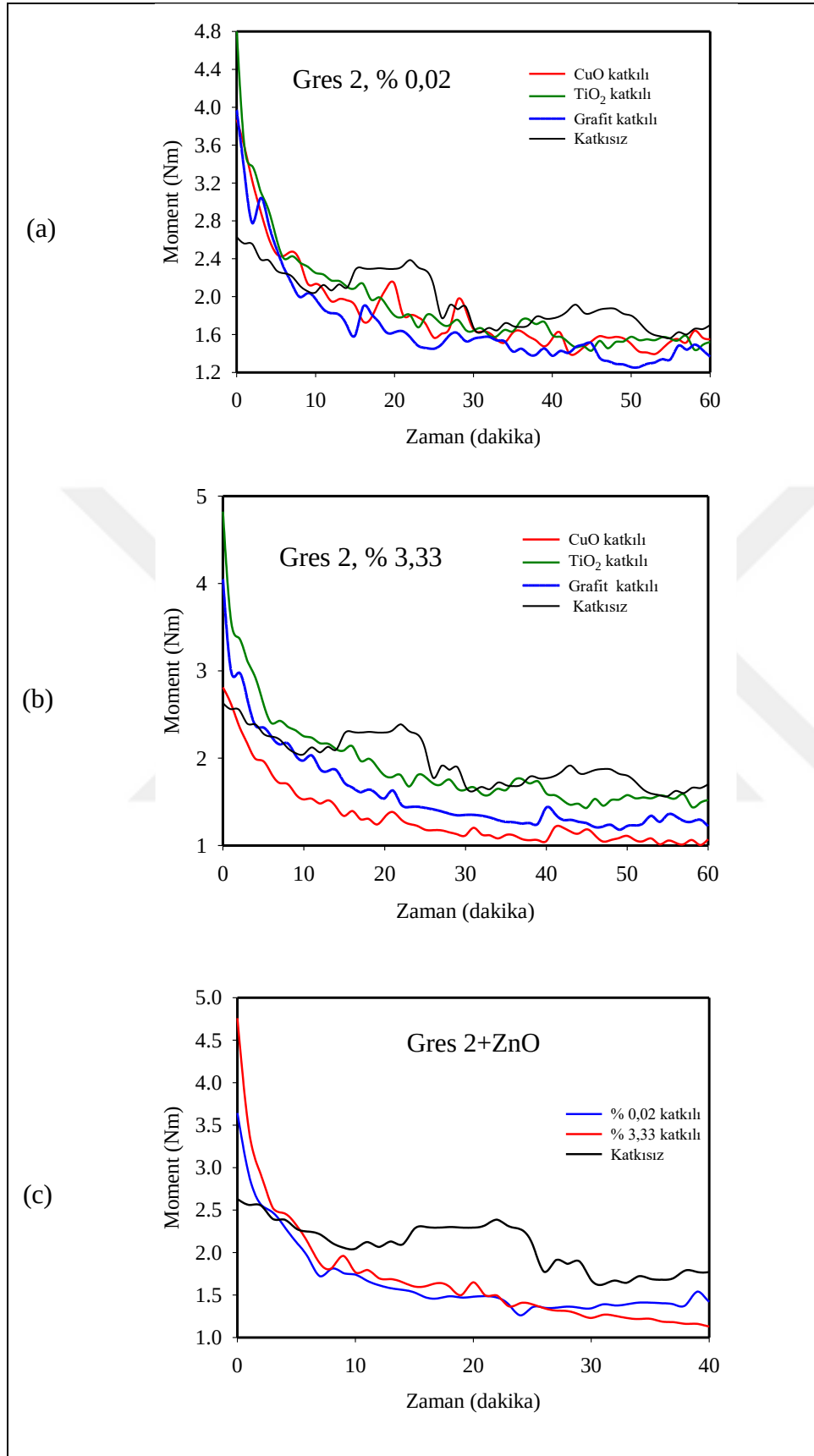
Gres 2 için, ilk 20 dakikada katkılı numunenin sıcaklıkları, katkı maddesi içermeyen Gres 2'den ~%10 daha yüksektir. Testin son 40 dakika sürecinde aralarındaki fark ~%11'dir.

Ayrıca deneyler sonunda incelenen tüm numunelerde sıvılaşma-yumuşama gibi yapısal değişimler gözlenmiştir.

Katkısız ve katkılı Gres 1 ve Gres 2'nin Şekil 3.3'de gösterilen test düzeneğinde yapılan moment ölçümleri Şekil 4.16 ve Şekil 4.17'de verilmiştir.



Şekil 4.16. Katkısız ve katkılı Gres 1 numunelerinin moment değişim eğrileri (a) %0,02 (b) %3,33 ve (c) ZnO katkılı



Şekil 4.17. Katkısız ve katkılı Gres 2 numunelerinin moment değişim eğrileri (a) %0,02 (b) %3,33 ve (c) ZnO katkılı

Şekillerin (a) şikkında ağırlıkça %0,02 katkı gres numunelerinin, (b) şikkında ağırlıkça %3,33 katkı greslerin, (c) şikkında ise ZnO katkı gres numunelerinin moment değışimleri sunulmuştur. İlk 10 dakikalık testlerden sonra sıcaklık artışından dolayı, Gres 2'nin moment değeri Gres 1'in moment değeriinden daha yüksektir. Şekil 4.16'daki moment sonuçlarından, CuO+Gres 1'in moment değeriinin, ağırlıkça %0,02'lik katkı oranlı tüm numuneler içinde en düşük moment değeriine sahip olduğu görölmektedir. Ayrıca Gres 1 numunelerinde, moment değeri ağırlıkça katkı miktarı artıkça artmıştır. Gres 2'nin %3,33 katkı CuO ve grafit katkı numunelerin moment değeri, %0,02'lik katkı numunelerin moment değeriinden daha küçük olduğu görölmüştür. ZnO katkı gresler için moment değışimlerini veren grafikler incelendiğinde ZnO katkı Gres 1 ve Gres 2'nin moment değeriinin, katkısız her iki gres numunesinin moment değeriinde daha düşük olduğu tespit edilmektedir. ZnO+Gres 1'in moment değeri, ZnO+Gres 2'nin değeriinden daha azdır. ZnO+Gres 1'in moment değeri, ilk çalışma periyodu hariç, 1 Nm değeriinin altına inerken, ZnO+Gres 2'nin moment değeri 2 Nm'nin altındadır. Yani, ZnO+Gres 2, yatak içinde daha zor hareket kabiliyetine sahip iken, ZnO+Gres 1 daha kolay hareket kabiliyetine sahiptir. Gres 1 ve Gres 2'nin sıcaklık ve momentlerindeki önemli farklılıkların, kendi yapısal özellikleri ve kalınlaştırıcı malzemelerinden kaynaklandığı düşünölmektedir. Bu sonuçlar, metalik katkı maddelerinin kullanılmasının, yataklardaki sürtünme mekanizmalarının iyileştirilmesine yardımcı olduğunu göstermektedir.

5. SAYISAL ANALİZ VE YORUMLAR

5.1. Soğurma ve Saçılma Etkenliklerinin Sayısal Hesabı

Bu kısımda katkısız, CuO, TiO₂, ZnO ve grafit katkılı numunelerin deneysel sonuçları, Ayrık Dipol Yaklaşımı (DDA) yöntemiyle soğurma, saçılma verimlilik faktörleri bakımından değerlendirilmiştir. Hesaplamalarda açık kod olarak ulaşılabilen, fortran programlama dilinde yazılmış ve DDSCAT olarak adlandırılan program kullanılmıştır.

Soğurma, geçirgenlik ve yansımanın deneysel sonuçlarına dayanarak karakterize edilebilen ve dalga boyuna göre değişen bir özelliktir. Malzemelerin optik özelliklerini tanımlayan bir diğer özellik ise, iki parametreden oluşan kompleks sayı ile tanımlanan kırılma indisidir ($m = n + ki$). (n) Gerçek kısım, (k) ise hayali (sanal) kısımdır. Bu iki parametre dalga boyuna göre soğurma-saçılma davranışını belirlemede daha önemli hale gelmektedir (Doner, Pargan, Aygahoglu, Liu ve Şen, 2019). Ayrıca, ışınım katı parçacıkların bulunduğu ortama nüfuz ettiğinde, ortamdaki parçacıklar tarafından emilir veya yansıtılır. Bu nedenle, ışınım ortamdan geçerken absorpsiyon (soğurma) nedeniyle ışınım şiddetinde azalma gerçekleşir. Işınım şiddetindeki kayıp Eş. 5.1’de tanımlanan Beer-Lambert yasası ile tanımlanır (Howell ve diğerleri, 2010):

$$\frac{I}{I_0} = e^{-L\kappa_{toplamlam}} \quad (5.1)$$

Burada L ortamın derinliği (cm), I_0 ve I sırasıyla başlangıç ve ortamın gelen ışınım şiddetini, $\kappa_{toplamlam}$ ($\kappa_{toplamlam} = \kappa_{par} + \kappa_{gres}$) toplam soğurma katsayısını ifade etmektedir. κ_{par} mikroparçacığın soğurma katsayısını, κ_{gres} ise gresin soğurma katsayısını tanımlamaktadır.

UV-görünür spektrumdaki soğurma ölçümleri, organik ve inorganik maddelerin miktarını belirlemek için kullanılır. Moleküler absorpsiyon spektroskopisi, λ dalga boyunda bir ışın yolu olan şeffaf bir kap içindeki bir çözeltinin geçirgenliğinin (T) veya absorbansının (A) ölçülmesine dayanır.

$$A = -\log T = \log \frac{I_0}{I_\lambda} = \varepsilon \lambda c \quad (5.2)$$

Bu denklemdeki I_λ λ dalgaboyundaki ışınım şiddeti, ε molar soğurma katsayısı ve c molar konsantrasyondur. Metallerin m indeksleri, elektriksel öz dirençleri (r_e) küçük ve uzun dalga boylarında ışınım sözkonusu olduğunda ($\lambda_0 > 5 \mu\text{m}$), dalga boyuna bağlı olarak belirgin bir şekilde etkilenmektedir ve yayınım özelliği (ε) Hagen-Rubens bağıntısı ile Eş. 5.3 ile hesaplanır. Dolayısıyla, Kirchhoff kanunu ve karşılıklılık ilkesine dayanarak, soğurma özelliği $1-\varepsilon$ olarak hesaplanabilir (Howell ve diğerleri, 2010).

$$\varepsilon_\lambda = \frac{2}{\sqrt{0.003}} \left(\frac{r_e}{\lambda_0} \right)^{1/2} - \frac{2}{0.003} \frac{r_e}{\lambda_0} \quad (5.3)$$

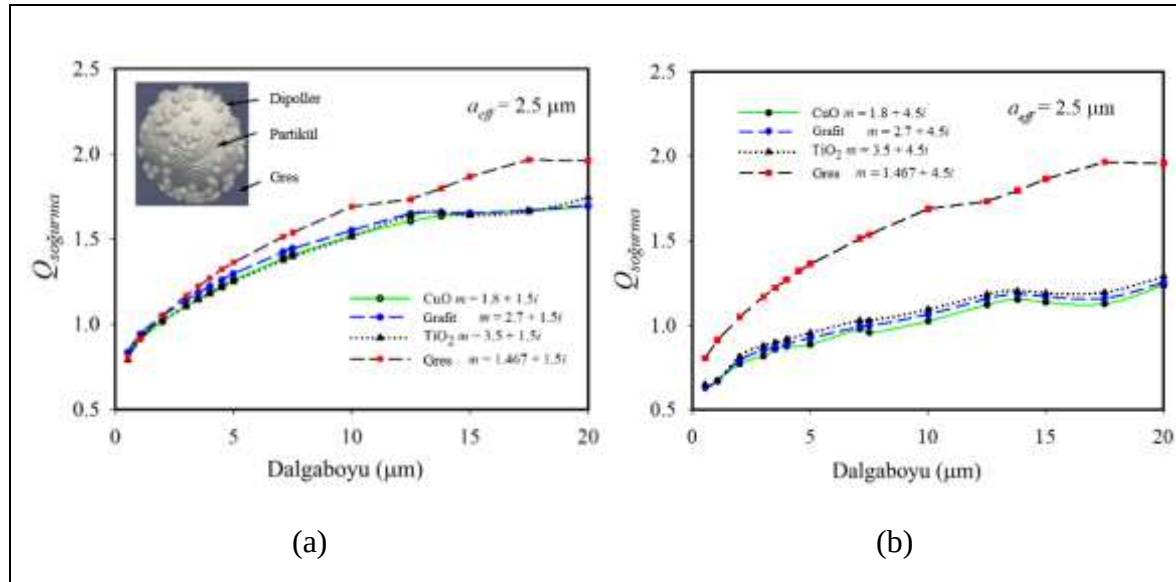
Ayrık Dipol Yaklaşım (DDA) yöntemi bir ortamdaki ışınım saçılmasının modellenmesini sağlar (Draine ve Flatau, 1994). Bu sayısal yöntemin hesaplama doğruluğu, birçok çalışmada çeşitli büyüklük ve geometrilerdeki parçacıklar ve topaklanmalar için test edilmiş ve yüksek hassasiyette sonuçlar verdiği görülmüştür (Döner ve diğerleri, 2019; Ayrancı, Vaillon ve Selçuk, 2007). Bir parçacık üzerine gelen ışınımın etkileri yansıma, kırılma ve soğurmadan oluşur. Dolayısıyla, bu yöntem ile bir parçacığın ışınım özellikleri olan yok olma, saçılma ve soğurma etkenliklerini tanımlayan Q terimleri (birimsiz) hesaplanır.

Açık kod olarak ulaşılabilen, fortran programlama dilinde yazılmış ve DDSCAT olarak adlandırılan programda yansıtma indeksi, dalga boyu ve efektif yarıçap ($\alpha_{\text{efektif}} = N^{1/3} \alpha$) veri olarak kullanılır (Draine ve Flatau, 2004). Efektif yarıçap formülündeki, N parçacık sayısı, α ise parçacık yarıçapıdır (Döner vd., 2019). Bir parçacığın kesit alanındaki soğurma, saçılma ve yok olma katsayısı $C_i = Q_i \pi \alpha_{\text{efektif}}^2$ şeklinde tanımlanır. Burada i alt indisi yok olma, soğurma ve saçılmayı ifade etmektedir ($C_{\text{yok_olma}} = C_{\text{soğurma}} + C_{\text{saçılma}}$). DDA yönteminin hassasiyeti dipol olarak isimlendirilen uç hesaplama noktalarının sayısı ile oldukça alakalıdır. Dipol nokta sayısı (N) yüksek değerlerde olduğunda ve $|m|kd < 1$ kriteri sağlandığında DDA sonuçlarının doğru olduğu kabul edilir. Burada d kafes uzunluğu, m yansıtma indeksi, k ise dalga sayısıdır ($2\pi/\lambda$). Çalışmada kullanılan mikro parçacıklara ait literatürde verilen kırılma indisleri Çizelge 5.1’de verilmiştir. Yöntem ile ilgili daha fazla ayrıntılı Türkçe bilgilere Kaynakça (Döner, 2017)’den ulaşılabilir.

Çizelge 5.1. Mikroparçacıkların ışınım özellikleri

Mikroparçacıklar	Işınım özellikleri
	$m = n + ki$
CuO	$m = 1,8 + 1,5i$ (Usha, Kalyanaraman, Thangavel ve Vettumperumal, 2015)
Grafit	$m = 2,7 + 1,5i$ (McNeil ve French, 2000)
TiO ₂	$m = 3,5 + 1,5i$ (Ma ve diğerleri, 2017)
ZnO	$m = 2,0 + 0,5i$ (Yoshikawa ve Adachi, 1997)

Bir malzeme içinde (gömülü halde) olan metalik parçacıkların yansıtma indeksinin sanal kısmını tanımlayan k parametresinin, soğurma ve saçılma özelliklerini çok daha fazla etkilediği ve bu parametrenin bilinen değerlerinden çok daha büyük olması gerektiği Dombrovsky'nin (2010) deneysel ve modelleme çalışması ile tespit edilmiştir. Bu çalışmaya dayanarak, DDA analizlerimizde ikinci yansıtma indeksi $k=4,5$ kullanılarak soğurma özelliklerinin değişimi incelenmiştir. Şekil 5.1'de CuO, TiO₂ ve grafit katkılı ve katkısız greslerin farklı saçılma indekslerinin ($k=1,5$ ve $4,5$) soğurma verimi üzerine etkisi verilmiştir.



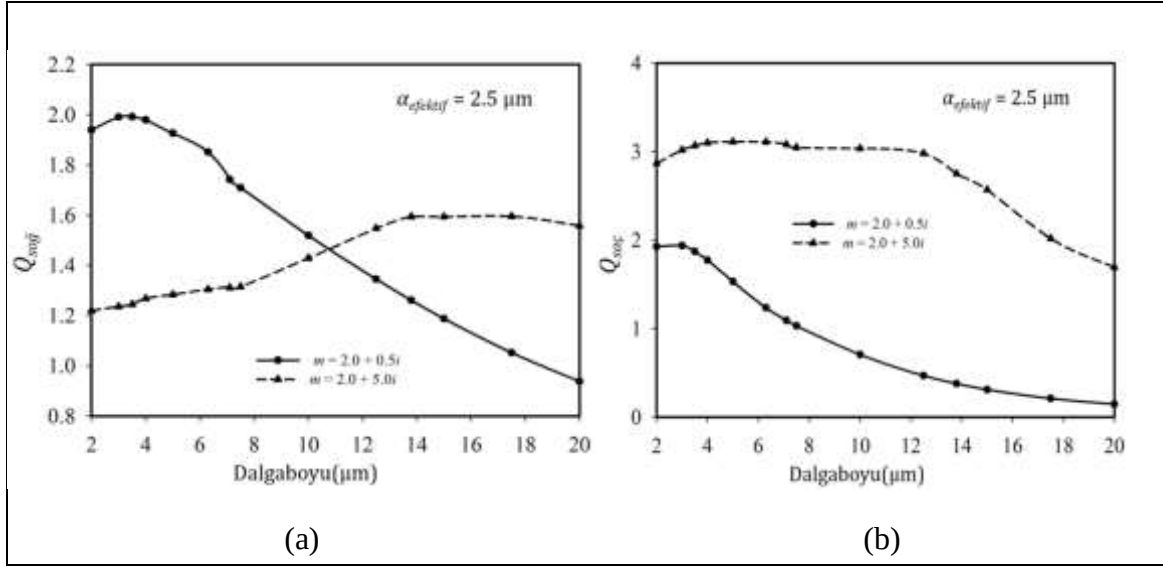
Şekil 5.1. Katkılı ve katkısız greslerin farklı saçılma indekslerinin soğurma etkenliği üzerine etkisi: (a) $k = 1,5$; (b) $k = 4,5$

ZnO katkılı gresler için yapılan hesaplamalarda ise ZnO'nin kararlı haldeki şeklinin hegzagonal yapıda olması ve deneylerde kullanılan ZnO'nin %99 saflıkta olması nedeniyle, DDA

yönteminde mikroparçacıkların şekli hegzagonal olarak kabul edilmiştir. Bunlara ek olarak; ZnO mikroparçacığının yansıtma indeksi $m = 2 + 0,5i$ (Yoshikawa ve Adachi, 1997) olarak alınmıştır.

Gres içindeki bir tek ZnO mikroparçacığının ışınım soğurma ve saçılma etkenlikleri, $a_{\text{efektif}} = 2,5 \mu\text{m}$ efektif yarıçap için, $10 \times 10 \times 10$ ortalama açısal dağılım ve $N = 170688$ dipol sayısı kullanılarak hesaplanmıştır. Parçacık şekli hegzagonal olduğu için üç adet şekil parametresi tanımlanır. Bunlar hegzagonal parçacığının uzunluğu a_1 ve alt kenar genişliği a_2 ve ışınım saçılma doğrultuları şeklinde olup, dalga boyu aralığı $2-20 \mu\text{m}$ için analizler yapılmıştır. DDA yöntemi ile hegzagonal ZnO nanoparçacıkların UV dalga boyundaki ışınım özelliklerinin incelendiği Al-Hilli ve Willander (2006) tarafından yapılan çalışmada, hegzagonal şekilli parçacıkların farklı büyüklük oranlarındaki ışınım özellikleri arasında çok küçük farklar olduğu, esas önemli özelliğin efektif yarıçap olduğu belirtilmiştir. Bu nedenle, ZnO parçacığının farklı geometrik özellikleri için analizler yapılmamıştır. Bir malzeme içinde (gömülü halde) olan metalik parçacıkların yansıtma indeksinin sanal kısmını tanımlayan k parametresinin, soğurma ve saçılma özelliklerini çok daha fazla etkilediği ve bu parametrenin bilinen değerlerinden çok daha büyük olması gerektiği Dombrovsky'nin (2010) deneysel ve modelleme çalışması ile tespit edilmiştir. Bu çalışmaya dayanarak, DDA analizlerimizde ikinci yansıtma indeksi $m = 2 + 5,0i$ kullanılarak soğurma ve saçılma özelliklerinin değişimi incelenmiştir.

DDA ile gres içindeki bir tek ZnO parçacığının yakın-kızılötesi ($2,5-20 \mu\text{m}$) dalga boyu aralığında hesaplanan $Q_{\text{soğ}}$ ve $Q_{\text{saç}}$ değerleri, iki yansıtma indeksi için Şekil 5.2'de verilmektedir. Sanal indeksin büyük olduğu durumda ($k=5$) elde edilen $Q_{\text{soğ}}$ değerleri, deneysel ölçüm sonuçlarına benzer şekilde, dalga boyu ile artış göstermektedir. Deneysel sonuçlara ilişkin Şekil 4.2 (d) ve Şekil 4.3 (d)'de verilen grafiklerde görülen, soğurma değerlerinin 7 ve $14 \mu\text{m}$ civarındaki pikleri, Şekil 5.2. (a)'daki değişim eğrisinde de hafifçe gözlenmektedir. Hesaplamalar tek parçacık için yapıldığından, $Q_{\text{soğ}}$ değerlerinde bu değişimler çok belirgin değildir. Deneysel soğurma sonuçlarında belirgin piklerin oluşması, karışımda daha fazla mikroparçacık bulunmasından kaynaklanmaktadır. Sanal indeksin küçük ($k=0,5$) değeri için hesaplanan $Q_{\text{soğ}}$ deneysel sonuçların aksine dalga boyu artıkça belirgin bir şekilde azalmaktadır.



Şekil 5.2. Gres içindeki tek ZnO parçacığın DDA ile hesaplanan (a) soğurma ve (b) saçılma etkenlikleri

5.2. Isıl İletkenlik Ölçüm Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Bu bölümde, katkısız ve %3,33 oranında grafit, TiO_2 , CuO ve ZnO katkılı Gres 1 ve Gres 2 numunelerinin ısı iletim katsayısı ölçüm test cihazında yapılan test sonuçlarının Eş. 3.5 ve Eş. 3.6 formüllerine göre yapılan hesapları Çizelge 5.2’de ve Çizelge 5.3’de verilmiştir.

Çizelge 5.2. Deney sonuçlarına göre Eş. 3.5 ile hesaplanan ısı iletim katsayıları

	Gres 1		Gres 2	
Isıtıcı Gücü: 5 W				
	Isı iletim katsayısı (W/mk)		Isı iletim katsayısı(W/mk)	
Katkılar	k _{son deney}	k _{ortalama}	k _{son deney}	k _{ortalama}
Katkısız	2,91	2,95	2,23	2,50
CuO	2,55	2,73	2,78	3,10
TiO ₂	2,55	2,82	1,94	2,16
Grafit	2,38	2,69	2,78	3,13
ZnO	2,51	2,96	3,61	4,02
Isıtıcı Gücü: 10 W				
Katkılar	k _{son deney}	k _{ortalama}	k _{son deney}	k _{ortalama}
Katkısız	2,82	3,18	2,36	2,56
CuO	2,99	3,39	2,87	3,12
TiO ₂	2,46	2,67	2,19	2,37
Grafit	2,49	2,88	3,01	3,35
ZnO	2,55	2,80	3,97	4,27

5 W güçteki deneylerde, katkısız ve katkılı greslerin sıcaklıkları 25°C civarında iken, 10 W güçte çalışma durumunda, sıcaklıkların 30-35°C arasında olduğu görülmektedir. Fourier formülüne göre hesaplanan ısı iletim katsayıları Çizelge 5.2’de verilmektedir. Katkı maddeleri içindeki en yüksek ısı iletim özelliğine sahip grafitin Gres 1 ve Gres 2 ile karıştırıldığında, ısı iletim özelliklerinin beklenildiği kadar etkilenmediği görülmektedir. En küçük ısı iletim katsayısına sahip TiO_2 ’in Gres 2 ile karıştırıldığında, karışımın ısı iletim özelliğinin değiştiği ve en küçük ısı iletim değerlerine sahip olduğu tespit edilmektedir. Katkısız Gres 1’in katkısız Gres 2’den daha yüksek ısı iletim özelliğinin olduğu Çizelge 5.2.’den görülmektedir. 45 dakikalık deneylerin ortalama k değerlerinin her iki gresin katkılı ve katkısız durumları için daha yüksek değerler aldığı da çizelgeden tespit edilmektedir. Uzun çalışma periyodu sonuçlarına göre, Gres 2’nin ısı iletkenliğinin CuO katkısı ile %21,9, grafit katkısı ile %30,9 ve ZnO katkısı ile % 66,8 arttığı görülmüştür. ZnO katkılı Gres 2 karışımlarının, her iki çalışma periyodunda, yüksek ısı iletim katsayılarına ulaşmaktadır. Bu durumun ZnO’nun hekzagonal prizma yapısından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Çizelge 5.3. Deney sonuçlarına göre Eş. 3.6 ile hesaplanan ısı iletim katsayıları

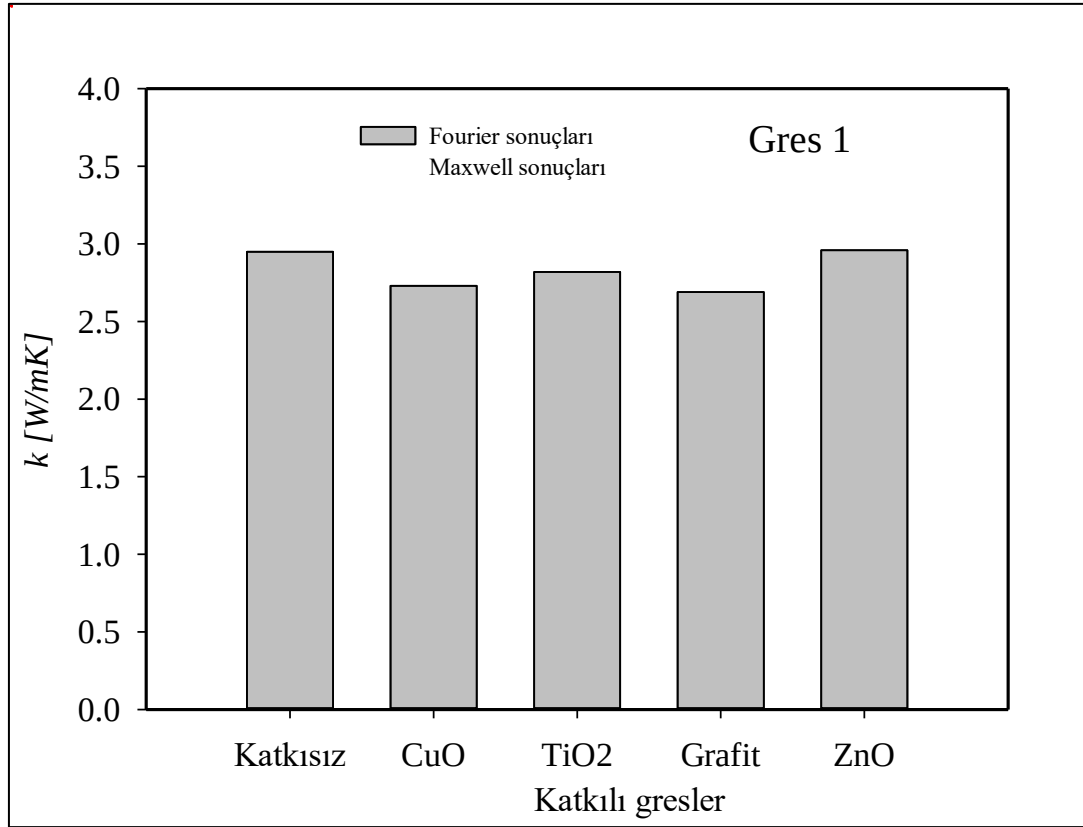
	Gres 1		Gres 2	
Isıtıcı Gücü: 5 W				
	Isı iletim katsayısı (W/mk)		Isı iletim katsayısı(W/mk)	
Katkılar	k _{son deney}	k _{ortalama}	k _{son deney}	k _{ortalama}
Katkısız	0,79	0,79	0,73	0,76
CuO	0,77	0,76	0,74	0,76
TiO ₂	0,73	0,76	0,70	0,73
Grafit	0,75	0,78	0,72	0,74
ZnO	0,73	0,75	0,76	0,77
Isıtıcı Gücü: 10 W				
Katkılar	k _{son deney}	k _{ortalama}	k _{son deney}	k _{ortalama}
Katkısız	1,20	1,27	1,09	1,13
CuO	1,24	1,31	1,16	1,20
TiO ₂	1,09	1,13	1,07	1,11
Grafit	1,15	1,18	1,15	1,20

ZnO	1,12	1,16	1,16	1,19
-----	------	------	------	------

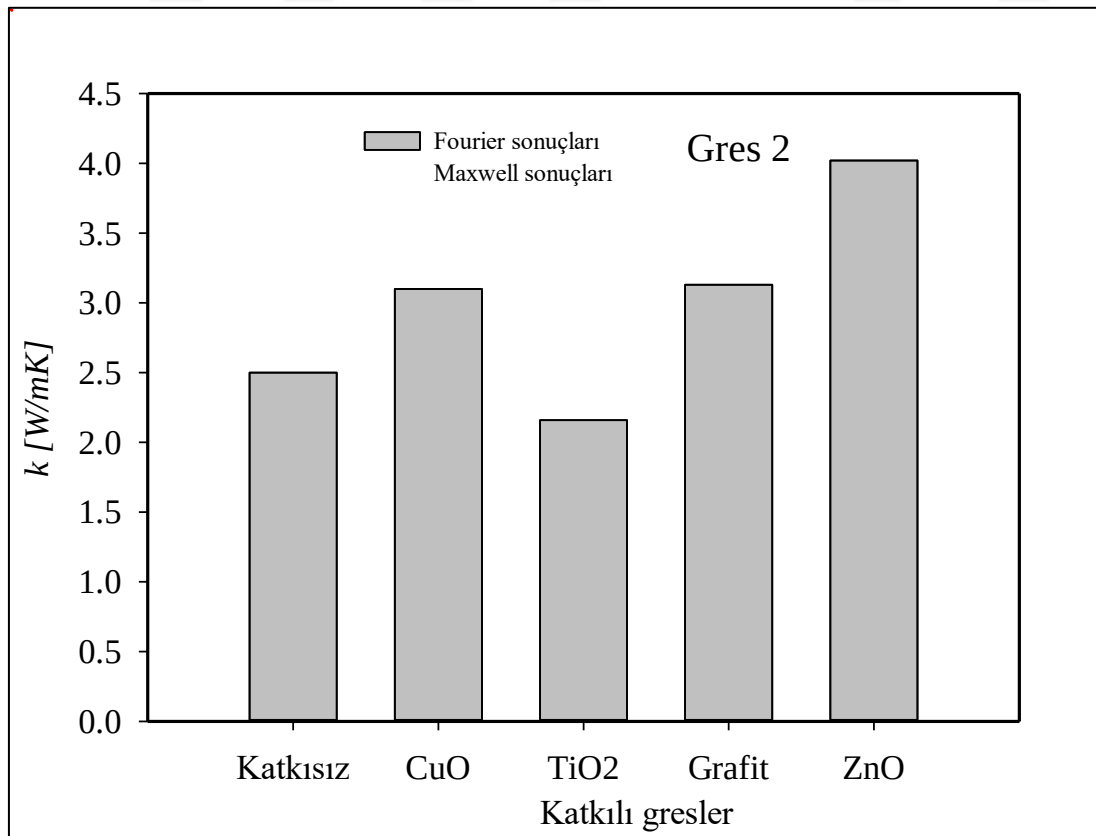
Çizelge 5.3. sonuçlarına göre, katkısız Gres 1'in ısı iletim katsayısı, 5 W ve 10 W çalışma durumlarında (CuO katkılı numune hariç), katkılı numunelerin ısı iletim katsayısı değerlerinden yüksektir. Bu durum Gres 1 için hem son deney hem de ortalama k değerleri için aynıdır. Gres 2 sonuçlarına baktığımızda, katkısız Gres 2'nin ısı iletim katsayısı son deney sonuçlarına (yani en az 45 dakika çalışma durumuna) göre, her iki güçteki çalışma için, katkılı Gres 2'nin ısı iletim katsayılarından (TiO₂+Gres 2 sonucu hariç) daha küçük olduğu Çizelge 5.3.'den görülmektedir. Gres 2'nin ortalama deney sonuçlarına göre, 5 W lık çalışma durumunda, değerler birbirine yakındır.

Daha önce bahsedilen yorumlarla birlikte, katkısız Gres 1'in ısı iletim özelliği, katkı maddeleri ile iyileştirilerek, yatak yada hareketli aksamalarda gresin çalışma periyodundaki sıcaklık artışı önlenmiş olmaktadır. Gres 2'de ise, katılan mikroparçacıklar sayesinde, çalışma esnasında katkısız Gres 2'nin sıcaklığına göre, daha yüksek sıcaklıklara ulaşılmaktadır. Böylece makina parçalarındaki yatak ile çevre elemanlar arasındaki ısı yayılımı hızlı bir şekilde gerçekleşecek ve sonuç olarak, yatak bölgesi istenilen sıcaklıklarda tutulabilecektir. Gres 2'de ısı iletim özelliklerinde TiO₂ katkı maddesinin ilave edilmesinin ısı iletim özelliğini çok arttırmadığı, hatta %7,4 azalttığı görülmektedir.

Fourier (Eş. 3.6) ile Maxwell (Eş.3.2) denklemlerinin sonuçları karşılaştırıldığında, Gres 1 için Şekil 5.3 ve Gres 2 için Şekil 5.4 grafikleri elde edilmektedir. Gres 1'in Maxwell modelleme sonuçlarının Gres 2'nin sonuçlarına göre, Fourier denklemi sonuçlarına daha yakın olduğu grafiklerden görülmektedir.



Şekil 5.3. Gres 1 için k değerlerinin karşılaştırılması



Şekil 5.4. Gres 2 için k değerlerinin karşılaştırılması

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Dış ortamlardaki büyük iş makinalarının hareketli aksamalarının yatak kısımlarında kullanılan greslerin ısı özellikleri incelenmiştir. Tez kapsamında en yaygın kullanılan iki tip gresin (kalsiyumve lityum esaslı) katkısız ve mikroparçacık katkılı durumdaki özellikleri, hazırlanan bir test düzeneği yardımıyla araştırılmıştır. Mikroparçacık olarak küresel şekilli, parçacık büyüklüğü 5 μm 'den küçük olan CuO, grafit, TiO_2 ve hegzagonal şekilli ZnO metal oksit parçacıkları ilave edilmiştir. Deneysel çalışma sonuçlarına göre, sıcaklık dağılımında mikroparçacık katkılı Gres 1'in katkısız durumdaki sıcaklık değerlerinden daha az olduğu; bu durumun Gres 2 de tam ters olarak gerçekleştiği görülmektedir.

Moment değişimlerinde, mikroparçacık katkılı Gres 1 moment değerlerinin katkılı ve katkısız Gres 2'nin moment değerlerinden daha küçük olduğu görülmektedir. CuO katkılı Gres 1'in moment değerleri en küçüktür. Katkısız ve katkılı Gres 2 numunelerinin ilk çalışma anındaki moment değerleri yüksektir. Moment değerlerinin küçük olması, sürtünme katsayısı veya kuvvetinin düşük olduğu anlamına geldiğinden, gres kullanımının esas amacı olan sürtünmenin bertaraf edilmesi konusunda olumlu katkı sağlandığı düşünülmektedir. Katkı maddeleri arasında sürtünmeye en olumlu katkı CuO mikro parçacıkların ilave edilmesi durumunda sağlanmıştır.

Görünür dalga boyu aralığındaki soğurma ölçümlerinde özellikle 0,3 μm de, katkısız Gres 2'nin katkısız Gres 1'den büyük olduğu tespit edilmiştir.

Yakın kızılötesi dalga boyu aralığında mikro parçacık katkı oranı ağırlıkça %3,33 durumunda, her iki tip greste, katkısız gresler, CuO, grafit, TiO_2 ve ZnO katkılı gres numunelerinden daha fazla soğurma değerlerine sahiptir. Aynı dalga boyu aralığında, katkı oranı ağırlıkça %10 olduğunda, Gres 1 için sadece grafit katkılı olan numunelerin soğurma değerleri diğer tüm numunelerden daha fazla olduğu görülmüştür. Gres 2'nin %10 katkılı durumundaki numunelerinde, TiO_2 katkılı numunenin soğurma değerleri 12,5 μm 'den sonraki dalga boylarında diğerlerine göre daha yüksek değerler almaktadır.

Kompleks kırılma indisindeki soğurma (sanal) indeksi k doğru tanımlanarak, DDA yöntemi ile yapılan analizlere göre, soğurma ölçüm sonuçlarındaki gibi, bir metal parçacığın gres içindeki soğurma özelliğinin yakın kızılötesi dalga boyu aralığında arttığı belirlenmiştir.

Isı iletim katsayısı test deneyleri sonucunda, katkısız Gres 1'in ısı iletim özelliği, katkılı numunelere göre yüksek olduğu görülmüştür. Uzun çalışma durumunda, CuO katkılı Gres 1'in ısı özelliğinin en yüksek olduğu görülmektedir. Gres 2'de metal mikroparçacık katkılı numunelerin ısı özellikleri katkısız Gres 2'ye göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Gres 2 numunelerinde, TiO₂ katkılı en düşük ısı iletim özelliğine, ZnO katkılı en yüksek ısı iletim özelliğine sahip olduğu tespit edilmiştir. Yataklarda sürtünme nedeniyle oluşan ısının mikroparçacık katkılı gresler ile çevreye iletimi gerçekleştirilerek, ısı probleminin aşılması sağlanmaktadır.

Katkısız ve katkılı gresler için hesaplanacak yoğunluk, özgül ısı ve iç ısı üretim değerlerinin de incelenmesinin ve elde edilen bu sonuçlarla birlikte değerlendirilmesinin daha faydalı olacağı düşünülmektedir.

Sonuç olarak, dış ortamlarda çalışan makinelerde kullanım için hem sıcaklık hem de soğurma ölçümlerinde katkılı greslerin ısı transfer özelliklerinin katkısız greslere göre daha iyi olduğu tespit edilmiştir. Bu sayede yataklarda sürtünme nedeniyle oluşan ısının, mikro parçacık katkılı gresler ile yağlama ortamından, çevresine doğru iletilerek yatakların ve yağlayıcıların maruz kaldığı ısı etkileri azaltılabilecektir.

KAYNAKLAR

- Afanasov, I.M., Savhenko, D.V., Ionov, S.G., Rusakov, D.A., Seleznev, A.N., Avdeev, V.V.(2009). Thermal conductivity and mechanical properties of Expanded Graphite, *Inorganic Materials*, 45 (5) 486-490.
- Al-Hilli, S.M. and Willander, M. (2006). Optical properties of zinc oxide nano-particles embedded in dielectric medium for UV region: Numerical simulation. *Journal of Nanoparticle Research*, 8, 79–97.
- Amber, I. and Donovan, T. S. (2018). Natural convection induced by the absorption of solar radiation: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82 (3), 3526-3545.
- Ayranci, I., Vaillon, R. and Selçuk, N. (2007). Performance of discrete dipole approximation for prediction of amplitude and phase of electromagnetic scattering by particles. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 103, 83-101.
- Babalık, F. C. ve Çavdar, K., (2018). *Makine Elemanları ve Konstrüksiyon Örnekleri*. Bursa: Dora Basım ve Yayın Dağıtım, 1-841.
- Christensen, G., Younes, H., Hong, G., Lou, D., Hong, H., Widener, C., Bailey, C. and Hrabe, R. (2020). Hydrogen bonding enhanced thermally conductive carbon nano grease. *Synthetic Metals*, 259, 116213.
- Das, D., Roy, M. and Basak, T. (2017). Studies on natural convection within enclosures of various (non-square) shapes – A review. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 106, 356-406.
- Dombrovsky, L. A. (2010). Radiative properties of metal particles in infrared and microwave spectral ranges. *Thermopedia*.
- Doner, N., Pargan, A.R., Aygahoglu, A., Liu, F. and Sen, F. (2019). Radiative properties of hematite particles in the UV-visible spectrum. *International Journal of Thermal Sciences*, 139, 79-87.
- Döner, N. (2017). İs (siyah karbon) topaklanmalarında yapısal durumların ışıınım özelliklerine etkileri. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 22(1), Sayı 1, 125-137.
- Draine, B. T. and Flatau, P. J. (1994). Discrete-Dipole Approximation For Scattering Calculations. *Journal of the Optical Society of America. Part A, Optics and Image Science*, 1491-1499.
- Fikry, R.M., El-Adly, R.A., Ismail, N.A., El-Tabei, A.S. and Al-Aidy, H. (2013). Some azine and azole derivatives as antioxidant additives for lithium lubricating grease. *Egyptian Journal of Petroleum*, 22, 61–71.
- Fu, H., Yan, G., Li, M., Wang, H., Chen, Y., Yan, C., Lin, C.-T., Jiang, N. and Yu, J. (2019). Grapheneas a nanofiller for enhancing the tribological properties and thermal conductivity of base grease. *Royal Society of Chemistry Advances*, 9, 42481-42488.

- Goyal, D., Dang, R. K., Dhimi, S. S. and Chauhan, A. (2017). Effect of nanoparticles based lubricants on static thermal behaviour of journal bearings: A review. *Research Journal of Engineering and Technology*, 8, 149-153.
- Haddad, Z., Oztop, H. F., Abu-Nada, E. and Mataoui, A. (2012). A review on natural convective heat transfer of nanofluids. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16 (7), 5363-78.
- Hamilton, R.L. and Crosser, O. (1962). Thermal conductivity of heterogeneous two-component systems. *Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals*, 1 (3) 187-191.
- He, X. and Wang, Y. (2019). Synergistic effects on the enhancement of thermal conductive properties of thermal greases. *Journal of Applied Polymer Science*, 136 (27), 47726.
- He, Y., Jin, Y., Chen, H., Ding, Y., Cang, D. and Lu, H. (2007). Heat transfer and flow behaviour of aqueous suspensions of TiO₂ nanoparticles (nanofluids) flowing upward through a vertical pipe. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 50, 2272–2281.
- Heidary, H. and Kermani, M. J. (2010). Effect of nano-particles on forced convection in sinusoidal-wall channel. *Internaitional Communications in Heat and Mass Transfer*, 37 (10), 1520-27.
- Holmberg, K. and Erdemir, A. (2017). Influence of tribology on global energy consumption, costs and emissions. *Friction*, 5 (3), 263–284.
- Holmberg, K., Kivikytö-Reponen, P., Härkisaari, P., Valtonen, K. and Erdemir, A. (2017). Global energy consumption due to friction and wear in the mining industry. *Tribology International*, 115, 116–139.
- Hong, H., Waynick, A. and Roy, W. (2007). Heat transfer nanolubricant and nanogrease based on carbon nanotubes. *ECS Transactions*, 2 (12), 133–138.
- Hong, H., Thomas, D., Waynick, A., Yu, W., Smith, P. and Roy, W. (2010). Carbon nanotube grease with enhanced thermal and electrical conductivities. *Journal of Nanoparticle Research*, 12, 529-535.
- Howell, J. R., Siegel, R., Mengüç, M. P. (2010). *Thermal Radiation Heat Transfer*. (Fifth Edition). New York: CRC Press, Taylor & Francis Group, 32, 98.
- Hwang, Y., Lee, J. K., Lee, C. H., Jung Y. M., Cheong, S. I., Lee, C. G., Ku, B. C. and Jang, S. P. (2007). Stability and thermal conductivity characteristics of nanofluids. *Thermochimica Acta*, 455 (1-2), 70-74.
- Incropera, F. P., Dewitt, D. P., Theodore, L. B., Lavine, A. S. (2015). *Isı ve Külle Geçişinin Temelleri*. İstanbul: Palme Yayınevi.
- İleri, H. (1972). *Makine Elemanları Hesabı– Cilt II*. İstanbul: İstanbul Teknik Üniversite Matbaası, 453-983.

- Kamel, B. M., Mohamed, A., El Sherbiny, M. and Abed, K.A. (2016). Rheology and thermal conductivity of Calcium grease containing multi-walled carbon nanotube. *Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures*, 24 (4), 260-265.
- Kanazawa, Y., Sayles, R. S. and Kadiric, A. (2017). Film formation and friction in grease lubricated rolling-sliding non-conformal contacts. *Tribology International*, 109, 505-518.
- Kaneta, M., Ogata, T., Takubo, Y. and Naka, M. (2000). Effects of a thickener structure on grease elastohydrodynamic lubrication films. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 214 (4), 327-36.
- Karakaya, U., Gürü, M., Sözen, A., Aydın, D. Y. ve Bilici, İ. (2019). Nano mineralojik akışkanların termofiziksel özelliklerinin deneysel olarak incelenmesi. *Politeknik Dergisi*, 22 (3), 619-26.
- Kim, S. H., Choi, S. R. and Kim, D. (2006). Thermal conductivity of metal-oxide nanofluids: Particle size dependence and effect of laser irradiation. *Journal of Heat Transfer*, 129 (3), 298-307.
- Lee, C.-G., Hwang, Y.-J., Choi, Y.-M., Lee, J.-K., Choi, C. and Oh, J.-M. (2009). A study on the tribological characteristics of graphite nanolubricants. *Internaitonal Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 10, 85-90.
- Lide, D. R.(2008). *Handbook of Chemistry and Physics*. (84th Edition). Boca Raton: CRC Press.
- Lugt, P. M. (2012). *Grease Lubrication in Rolling Bearings*. John Wiley & Sons Ltd,
- Ma, L. X., Tan, J. Y., Zhao, J. M., Wang, F. Q., Wang, C. A. and Wang, Y. Y. (2017). Dependent scattering and absorption by densely packed discrete spherical particles: Effects of complex refractive index. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 196, 94-102.
- Maheshwary, P.B., Handa, C.C. and Nemade, K.R. (2017). A comprehensive study of effect of concentration, particle size and particle shape on thermal conductivity of titania/water based nanofluid. *Applied Thermal Engineering*, 119, 79-88.
- Maxwell, J.C. (1881). *A Treatise on Electricity and Magnetism*, Clarendonpress.
- McNeil, L. E., French, R.H. (2000). Multiple scattering from rutile TiO₂ particles. *Acta Materialia*, 48 (18-19), 4571-4576.
- Nicoletti, R. (2014). The Importance of the Heat Capacity of Lubricants with Nanoparticles in the Static Behavior of Journal Bearings. *ASME Journal of Tribology*, 044502-1.
- Peña-Parás, L., Taha-Tijerina, J., García, A., Maldonado, D., Nájera, A., Cantú, P. and Ortiz, D. (2015). Thermal transport and tribological properties of nanogreases for metal-mechanic applications. *Wear*, 1322-1326.

- Peña-Parás, L., García-Pineda, P., Maldonado-Cortés, D., Garza, G. T. and Taha-Tijerina, J. (2017). Temperature dependence of the extreme-pressure behavior of CuO and TiO₂ nanoparticle additives in metal-forming polymeric lubricants. *Industrial Lubrication and Tribology*, 69(5), 730–737.
- Prasad, B. K., Rathod, S., Yadav, M. S. and Modi, O. P. (2010). Effects of Some Solid Lubricants Suspended in Oil Toward Controlling the Wear Performance of a Cast Iron. *ASME Journal of Tribology*, 132(4), 041602.
- Pryazhnikov, M.I., Minakov, A.V., Rudyak, V. Ya. and Guzei D.V. (2017). Thermal conductivity measurements of nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 104, 1275-1282.
- Qiang, H., Anling, L., Yangming, Z., Liu, S. and Yachen, G. (2017). Experimental study of tribological properties of lithium-based grease with Cu nanoparticle additive. *Tribology - Materials, Surfaces & Interfaces*, 11(2), 75-82.
- Rao, M. S. E., Sreeramulu, D., Rao, C. J. and Ramana, M. V. (2017). Experimental investigation on forced convective heat transfer coefficient of a nano fluid. *Materials Today: Proceedings*, 4 (8), 8717-23.
- Safari, A., Saffar-Avval, M. and Amani, E. (2018). Numerical investigation of turbulent forced convection flow of nano fluid in curved and helical pipe using four-equation model. *Powder Technology*, 328, 47-53.
- Sánchez, M. C., Franco, J.M., Valencia, C., Gallegos, C., Urquiola, F., Urchegui, R. (2011). Atomic force microscopy and thermo-rheological characterisation of lubricating greases. *Tribology Letters*, 41 463–470.
- Scherge, M., Böttcher, R., Kürten, D. and Linsler, D. (2016). Multi-Phase friction and wear reduction by copper nanoparticles, *Lubricants*, 4-36.
- Sert, Z. ve Timuralp, Ç. (2015). Cidarına ısıtıcı yerleştirilmiş kapalı kutu içindeki su bazlı nanoakışkanların laminar doğal taşınım ile ısı transferi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 15 (2), 1-12.
- Şahin, F. ve Namlı, L. (2018). Nanoakışkanlarda kararlılığın ısı transferini iyileştirme açısından önemi. *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 7 (2), 880-98.
- Tawfik, M. M. (2017). Experimental studies of nanofluid thermal conductivity enhancement and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 75, 1239-1253.
- Uflyand, I. E., Zhinzhiro, V. A., Burlakova, V. E. (2019). Metal-containing nanomaterials as lubricant additives: State-of-the-art and future development. *Friction*, 7 (2), 93–116.
- Usha, V., Kalyanaraman, S., Thangavel, R., Vettumperumal, R. (2015). Effect of catalysts on the synthesis of CuO nanoparticles: Structural and optical properties by sol-gel method. *Superlattices and Microstructures*, 86, 203-210.

- Verma, K., Dabas, M., Upadhyay, A. and Singh, R. (2014). Effective thermal conductivity of lithium multipurpose grease filled with metal particles. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 33 (19), 1794-1801.
- Wang, J., Guo, X., He, Y., Jiang, M. and Sun, R. (2017). The synthesis and tribological characteristics of triangular copper nanoplates as a grease additive. *RSC Advances*, 7, 40249-40254.
- Wang, X. L., Yin, Y. L., Zhang, G. N., Wang, W. Y. and Zhao, K. K. (2013). Study on antiwear and repairing performances about mass of nano-copper lubricating additives to 45 Steel. *Physics Procedia*, 50, 466-472.
- Xi, X. and Chung, D. D. L. (2021). Pyropermittivity and pyroelectret behavior of graphite, *Carbon*, 174, 357-367.
- Yang, L., Ji, W., Huang, J., Xu, G. (2019). An updated review on the influential parameters on thermal conductivity of nano-fluids. *Journal of Molecular Liquids*, 296, 111780.
- Ye, C. M., Shentu, B.Q. and Weng, Z. X. (2006). Thermal Conductivity of High Density Polyethylene Filled with Graphite. *Journal of Applied Polymer Science*, 101, 3806-3810.
- Yoshikawa, H. and Adachi, S. (1997). Optical Constants of ZnO. *Japanese Journal of Applied Physics*, 36, 6237-6243.
- Yu, W., Zhao, J., Wang, M., Hu, Y., Chen, L. and Xie, H. (2015). Thermal conductivity enhancement in thermal grease containing different CuO structures, *Nanoscale Research Letters*, 10, 113.
- Zhang, Y., Xu, Y., Yang, Y., Zhang, S., Zhang, P. and Zhang, Z. (2015). Synthesis and tribological porperties of oil-soluble copper nanoparticles as environmentally friendly lubricating oil additivies. *Industrial Lubrication and Tribology*, 67, 2227-232.
- Zhou, Y., Bosman, R. and Lugt, P. M. (2018). A model for Shear Degradation of Lithium Soap Grease at Ambient Temperature. *Tribology Transactions*, 61(1), 61-70.





EK-1. Deneysel ölçümlerin hata analizi

1. Deneysel Hata Analizi

Çeşitli deneyler yapan ve bu deneyler neticesinde elde ettiği sonuçları kullanan araştırmacılar buldukları sonuçların geçerliliğini bilmek ister. Deneyler yapılırken ne kadar dikkat edilse de yine de sonuçlarda hatalar veya uyuşmazlıklar olabilmektedir. Bir değer defalarca ölçülse bile her defasında ölçüm sonucunun tam olarak aynı olması neredeyse mümkün değildir. Bunun yerine çok sayıda ölçüm alarak, ölçüm sonuçlarının nasıl bir dağılım gösterdiğine ve en çok hangi değer etrafında toplandığına bakılabilir.

Ölçülen bir büyüklüğün gerçek değeri ile ölçülen değeri arasındaki farka, ölçüm hatası denir. Deney sonuçlarındaki ölçüm hataları ne derece düşük ise sonuçlarının güvenilirliği o derece yüksektir. Bu sebeple, ölçüm hatalarının sıfıra indirilmesi mümkün olmadığından, tespit edilerek en az seviyeye indirilmesi veya belirli bir aralık içinde tutulması gerekir. Ölçüm sonuçlarının bu hata oranları ile birlikte verilmesi daha anlamlı olacaktır.

Genel olarak ölçme hatalarının kaynakları şu şekilde sıralanabilir:

- **Ölçen kişiden gelen hatalar :** Bu hatalar, ölçümü yapan kişinin tecrübesi, eğitimi, bilgisi, dikkati vb. kişisel özelliklerine bağlı olarak ortaya çıkmaktadır. Bu hatalar kolayca tespit edilerek daha tecrübeli bir kişi tarafından ölçüm yapılarak bertaraf edilebilir.
- **Ölçülen özellikten gelen hatalar:** Bu hatalar, ölçülmek istenen özelliğin tam olarak belirlenememesi veya ölçülmesinin mümkün olmamasından kaynaklanmaktadır.
- **Ölçme aracından gelen hatalar:** Ölçmede kullanılan ölçü aletinin arızalı olması, kalibrasyonunun olmaması, ölçülmek istenen büyüklüğe uygun olmaması veya ölçüm şartlarının ölçme cihazına uygun olmamasından kaynaklı hatalardır. Bu hataların tespit edilmesi veya giderilmesi her zaman mümkün olmayabilir.

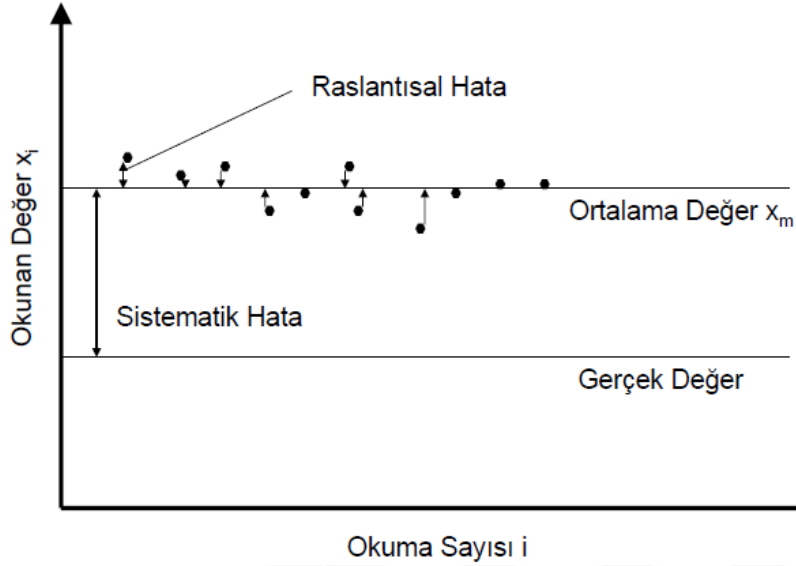
EK-1. (devam) Deneysel ölçümlerin hata analizi

Deneysel çalışmaların hemen hemen tamamı çeşitli nedenlerden dolayı hatalı sonuçlar içerir. Deneysel çalışmalarda yapılan bu ölçüm hataları genel olarak üç grupta toplanabilir. Bunlar;

- **Dikkatsizlik ve tecrübesizlikten kaynaklanan hatalar :** Yanlış ölçme, cihaz seçiminden ya da yanlış ölçme sistemi uygulamasından kaynaklanan hatalardır. Bu hatalar genellikle ölçülebilen diğer parametrelerden farklı olduğundan, tecrübeli bir araştırmacı tarafından tespit edilerek, değerlendirme dışı bırakılabilir.
- **Sabit ve sistematik hatalar:** Her ölçümde daima ve öngörülebilir miktarda karşılaşılan ölçüm hataları olarak tanımlanır. Bu hatalar ölçüyü aynı yönde ve aynı miktarda etkileyen küçük hatalardır. Ölçüler ne kadar tekrar edilirse sistematik hata aynı kalır. Ölçüm cihazının yanlış kalibrasyonu, ortam şartlarından etkileniyor olması veya ölçüm hassasiyetinin yeterli olmamasından kaynaklı olarak gerçek değerleri yansıtamaması bu hatalara yol açmaktadır. Bu hatalar çoğunlukla giderilemeyen hatalardır.
- **Rastgele hatalar :** Ölçüm sırasında öngörülemeyen ve kontrol edilemeyen parametrelerden kaynaklanan hatalardır. Ölçüm ortamındaki titreşim, nem değişiklikleri, elektrik enerjisindeki dalgalanmalar, ölçümü yapanların dikkat ve konsantrasyonlarının bozulması, ölçme aletinin ısınmasından kaynaklı hatalardan meydana gelmektedir. Hatanın yönü ve miktarı değişken olduğu için sonuçlar açısından en tehlikeli hata türü olup her hangi bir düzeltme katsayısı ile düzeltilmesi mümkün değildir.

EK-1. (devam) Deneysel ölçümlerin hata analizi

Deneysel sonuçlarda meydana gelecek hata türlerine ilişkin grafik Şekil 4.19'da verilmiştir.



Şekil 1.1. Deneysel hata türleri

2. Hata Analizi Yöntemleri

Deneysel sonuçların doğruluğu ve geçerliliğinin belirlenebilmesi için mutlaka bir hata analizi yapmak gerekmektedir. Hata analizi yapmak üzere bazı analiz metodları geliştirilmiştir. Ancak bu metodlar içinde en çok kullanılanları şunlardır:

a) Akılcı Yaklaşım :

Bu yaklaşımda, ölçümü etkileyen parametrelere ait tespit edilen en yüksek hata oranları geçerli kabul edilerek toplam hata miktarı tespit edilir. En yüksek hata oranı belirlenirken hatanın + veya - yönde meydana gelmesinin önemi yoktur. Tüm bileşenlerin azami hata miktarları toplanır ve sonuç bu duruma göre değerlendirilir.

b) Belirsizlik Analizi :

İlk olarak Kline ve McClintock tarafından ortaya atılan bu yöntem diğerlerine göre daha hassas ve avantajlı olduğu için daha çok tercih edilmektedir.

EK-1. (devam) Deneysel ölçümlerin hata analizi

Belirsizlik analizi sonuçların hassasiyeti hakkında yöntemsel bir yaklaşım sunar. Bu yaklaşım ile olası hatalar için bir aralık belirlenmektedir. Belirsizlik analizi diğer analizlere göre belirgin bir üstünlüğü, burada en büyük hataya neden olan değişkenin hemen tespit edilebilmesidir. İki çeşit belirsizlik analizi yöntemi kullanılmaktadır. Bunlar :

- ANSI/ASME International's PTC 19.1 Test Uncertainty ,
- ISO "Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement" (ISO GUM)

Belirsizlik analizi hesabı aşağıdaki şekilde yapılır:

n adet bağımsız değişkeni olan bir ölçmede;

R : Ölçülecek boyut

x1, x2, x3,...., xn : ölçümü etkileyen değişkenler

w1, w2, w3,...., wn : bağımsız değişkenle ilgili hata oranı ise

Toplam hata oranı WR ;

$$W_R = \left[\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} w_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} w_2 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_3} w_3 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} w_n \right)^2 \right]^{1/2}$$

veya

$$\frac{W_R}{R} = \left[\left(\frac{w_{x_1}}{x_1} \right)^2 + \left(\frac{w_{x_2}}{x_2} \right)^2 + \left(\frac{w_{x_3}}{x_3} \right)^2 + \dots + \left(\frac{w_{x_n}}{x_n} \right)^2 \right]^{1/2}$$

Şeklinde hesaplanır.

Bu çalışmada greslerin her çeşidi için ısı performans test düzeneği ile yapılan sıcaklık ve moment ölçümleri, doğruluğu teyit etmek için her bir çeşit için en az 2 kez yapılmıştır. Yapılan ölçümlere ait sonuçlardan oluşturulan grafikler önceki bölümlerde verilmişti. Sonuçların tutarlılığı bu grafiklerden görülecektir. Ayrıca, elde edilen sonuçlarla bu bölümde anlatılan Belirsizlik Analizi Metodu ile de karşılaştırma yapılmış, yapılan analize ait program çıktıları EK-2'de verilmiştir.

EK-1. (devam) Deneysel ölçümlerin hata analizi

Bu analiz aşağıda anlatıldığı şekilde yapılmıştır: Gres 1, Gres 2 ve katkı numuneleri için ortalama sıcaklık, tork ve soğurma ölçümleri arasında fark olup olmadığını araştırmak için SPSS 17.0 (Statistical Package for Social Sciences) yazılımı kullanılarak belirsizlik analizi yapılmıştır. Sıcaklık, tork ve absorbands değerleri bağımlı değişkenler, gres türleri bağımsız değişkenler olarak ele alınmış ve tek yönlü ANOVA testleri yapılmıştır. Varyansların eşitliği sağlanamadığı için Brown-Forsythe ve Welch seçenekleri seçilerek ve Robust Equality of Means Eşitliği Testlerine bakıldığında sıcaklık, tork ve absorbands arasındaki ortalama farklar 0.05 düzeyinde anlamlı bulunmuştur. Varyansların eşitliği sağlanamadığından, 0,05 anlamlılık düzeyinde ortalama farklılıkların Post Hoc Multiple karşılaştırması için Tamhane T2 testi kullanılmıştır. Sıcaklık, tork ve absorbandstaki ortalama farklılıkların 0,05 düzeyinde önemli olduğu bulunmuştur. Tüm numuneler için sıcaklık ve tork değişkenleri arasındaki korelasyon 0,01 düzeyinde (iki kuyruklu) önemliydi. Bu, korelasyonun güçlü ve negatif olduğu yani, birisi arttıkça diğeri azaldığı anlamına gelmektedir. Katkısız greslerin ortalama sıcaklık değişimlerinin benzer olduğu görülmüştür. Ağırlıkça %0,02'lik katkı maddeleri içeren Gres 1 için ortalama sıcaklık değerleri arasında fark olmadığı ve bunların en düşük ortalama sıcaklıklara sahip olduğu görülmüştür. Ağırlıkça %0,02 CuO içeren Gres 1 numunesinin en düşük ortalama torka sahip olduğu görülmüştür.

Sıcaklık ölçümü deneylerindeki standart sapma değerleri, katkısız gresler için 5,40 olup, ZnO+Gres 1 için 5,25 olarak bulunmuştur. Aynı şekilde ZnO+Gres 2 için 5,55 olarak bulunmuştur.

Moment ölçümlerindeki standart sapma değerleri katkısız Gres 1 ve Gres 2 için 1,22 ve 1,78 olup ZnO+Gres 1 için 1,35 olarak bulunmuştur. Aynı şekilde ZnO+Gres 2 için 2,12 olarak bulunmuştur.

Standart sapma değerlerinin yeteri kadar küçük olması, sonuçların güvenilirliğini teyit etmektedir.

EK-2. Belirsizlik analizi program çıktıları

```
GET FILE='C:\Users\hp\Desktop\nimeti hc\sogurma.sav'. ONEWAY Absorbance
BY Greases /STATISTICS DESCRIPTIVES EFFECTS HOMOGENEITY BROWNFORSYTHE
WELCH /PLOT MEANS /MISSING ANALYSIS /POSTHOC=T2 ALPHA(0.05).
```

Oneway

Notes		
Input	Output Created	29-Haz-2021 22:35:15
	Comments	
	Data	C:\Users\hp\Desktop nimeti hc\sogurma.sav
	Active Dataset	DataSet1
	Filter	<none>
	Weight	<none>
	Split File	<none>
	N of Rows in Working Data File	70020
Missing Value Handling	Definition of Missing	User-defined missing values are treated as missing.
	Cases Used	Statistics for each analysis are based on cases with no missing data for any variable in the analysis.
	Syntax	ONEWAY Absorbance BY Greases /STATISTICS DESCRIPTIVES EFFECTS HOMOGENEITY BROWNFORSYTHE WELCH /PLOT MEANS /MISSING ANALYSIS /POSTHOC=T2 ALPHA(0.05).
Resources	Processor Time	0:00:00.797
	Elapsed Time	0:00:02.583

EK-2.(devam) Belirsizlik analizi program çıktıları

[DataSet1] C:\Users\hp\Desktop\nimeti hc\sogurma.sav

Descriptives

Absorbance

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error
1	3501	,04927671	,035748180	,000604168
2	3501	,01695901	,026533535	,000448435
3	3501	,02491770	,031211590	,000527497
4	3501	,01993738	,029142605	,000492530
5	3501	,01937818	,026947940	,000455438
6	3501	,03450285	,033217088	,000561391
7	3501	,02896679	,048237550	,000815247
8	3501	,00849917	,025311916	,000427788
9	3501	,03562548	,032715020	,000552906
10	3501	,02310350	,017549557	,000296599
11	3501	,04515940	,032430941	,000548105
12	3501	,02414333	,026914548	,000454874
13	3501	,01375229	,027572205	,000465989
14	3501	,02190056	,029410534	,000497058
15	3501	,01960568	,027814527	,000470084
16	3501	,00736367	,026492186	,000447736
17	3501	,03749589	,044473433	,000751631
18	3501	,03828420	,030210242	,000510573
19	3501	,02578111	,027824598	,000470254
20	3501	,10588195	,042280799	,000714574
Total	70020	,03002674	,037923536	,000143317
Model	Fixed Effects		,031866961	,000120429
	Random Effects			,004718167

EK-2.(devam) Belirsizlik analizi program çıktıları

Descriptives

Absorbance

	95% Confidence Interval for Mean				
	Lower Bound	Upper Bound	Minimum	Maximum	Between-Component Variance
1	,04809216	,05046127	,004189	,249569	
2	,01607979	,01783823	,002100	,232100	
3	,02388346	,02595193	,003663	,250341	
4	,01897170	,02090305	,000000	,224681	
5	,01848523	,02027113	,000600	,234100	
6	,03340216	,03560353	,004189	,239955	
7	,02736838	,03056520	,001959	,257275	
8	,00766043	,00933791	,000000	,223800	
9	,03454143	,03670953	,008154	,249183	
10	,02252197	,02368502	,007137	,111877	
11	,04408477	,04623404	,009572	,241921	
12	,02325149	,02503518	,008500	,248200	
13	,01283865	,01466593	,000739	,241467	
14	,02092601	,02287511	,002002	,241315	
15	,01868402	,02052735	,001900	,239800	
16	,00648582	,00824152	,000000	,237697	
17	,03602222	,03896957	,010817	,269218	
18	,03728315	,03928526	,010300	,251400	
19	,02485911	,02670311	,005375	,213320	
20	,10448092	,10728297	,063084	,299123	
Total	,02974584	,03030764	,000000	,299123	
Model Fixed Effects	,02979070	,03026278			
Random Effects	,02015151	,03990198			,000444932

EK-2.(devam) Belirsizlik analizi program çıktıları

Test of Homogeneity of Variances

Absorbance

Levene Statistic	df1	df2	Sig.
334,870	19	70000	,000

ANOVA

Absorbance

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	29,616	19	1,559	1534,926	,000
Within Groups	71,085	70000	,001		
Total	100,701	70019			

Robust Tests of Equality of Means

Absorbance

	Statistic ^a	df1	df2	Sig.
Welch	1146,315	19	25773,301	,000
Brown-Forsythe	1534,926	19	57297,666	,000

a. Asymptotically F distributed.

EK-2.(devam) Belirsizlik analizi program çıktıları

Post Hoc Tests

Multiple Comparisons

Absorbance

Tamhane

(I) Grease s	(J) Grease s				95% Confidence Interval	
		Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	Lower Bound	Upper Bound
1	2	,032317701*	,000752405	,000	,02957550	,03505990
	3	,024359018*	,000802042	,000	,02143600	,02728203
	4	,029339334*	,000779490	,000	,02649848	,03218019
	5	,029898535*	,000756600	,000	,02714106	,03265602
	6	,014773865*	,000824730	,000	,01176819	,01777954
	7	,020309921*	,001014715	,000	,01661170	,02400814
	8	,040777541*	,000740285	,000	,03807947	,04347561
	9	,013651236*	,000818977	,000	,01066652	,01663595
	10	,026173214*	,000673046	,000	,02371988	,02862655
	11	,004117309*	,000815744	,000	,00114437	,00709024
	12	,025133383*	,000756260	,000	,02237714	,02788963
	13	,035524424*	,000762997	,000	,03274364	,03830520
	14	,027376154*	,000782359	,000	,02452485	,03022746
	15	,029671029*	,000765505	,000	,02688111	,03246094
	16	,041913039*	,000751988	,000	,03917235	,04465372
	17	,011780819*	,000964349	,000	,00826624	,01529540
	18	,010992509*	,000791015	,000	,00810967	,01387535
	19	,023495606*	,000765610	,000	,02070531	,02628590
	20	-,056605232*	,000935754	,000	-,06001557	-,05319490

EK-2.(devam) Belirsizlik analizi program çıktıları

2	1	-,032317701*	,000752405	,000	-,03505990	-,02957550
	3	-,007958683*	,000692348	,000	-,01048193	-,00543544
	4	-,002978367*	,000666092	,001	-,00540590	-,00055083
	5	-,002419166*	,000639154	,029	-,00474852	-,00008982
	6	-,017543836*	,000718508	,000	-,02016245	-,01492522
	7	-,012007780*	,000930441	,000	-,01539920	-,00861636
	8	,008459840*	,000619755	,000	,00620118	,01071850
	9	-,018666466*	,000711898	,000	-,02126098	-,01607195
	10	-,006144488*	,000537647	,000	-,00810406	-,00418492
	11	-,028200392*	,000708175	,000	-,03078134	-,02561945
	12	-,007184319*	,000638752	,000	-,00951220	-,00485643
	13	,003206723*	,000646714	,000	,00084982	,00556363
	14	-,004941547*	,000669448	,000	-,00738131	-,00250178
	15	-,002646672*	,000649671	,009	-,00501436	-,00027899
	16	,009595338*	,000633688	,000	,00728591	,01190477
	17	-,020536883*	,000875239	,000	-,02372699	-,01734677
	18	-,021325193*	,000679543	,000	-,02380176	-,01884863
	19	-,008822095*	,000649794	,000	-,01119023	-,00645396
	20	-,088922933*	,000843629	,000	-,09199777	-,08584809

EK-2.(devam) Belirsizlik analizi program çıktıları

3	1	-,024359018*	,000802042	,000	-,02728203	-,02143600
	2	,007958683*	,000692348	,000	,00543544	,01048193
	4	,004980316*	,000721691	,000	,00235016	,00761047
	5	,005539517*	,000696905	,000	,00299967	,00807937
	6	-,009585153*	,000770333	,000	-,01239258	-,00677772
	7	-,004049097*	,000971020	,006	-,00758821	-,00050998
	8	,016418523*	,000679158	,000	,01394333	,01889372
	9	-,010707782*	,000764171	,000	-,01349275	-,00792281
	10	,001814196	,000605164	,405	-,00039159	,00401998
	11	-,020241709*	,000760705	,000	-,02301404	-,01746937
	12	,000774365	,000696537	1,000	-,00176414	,00331287
	13	,011165406*	,000703845	,000	,00860027	,01373054
	14	,003017136*	,000724789	,006	,00037569	,00565858
	15	,005312011*	,000706564	,000	,00273697	,00788705
	16	,017554021*	,000691896	,000	,01503242	,02007562
	17	-,012578199*	,000918260	,000	-,01592493	-,00923147
	18	-,013366510*	,000734124	,000	-,01604197	-,01069105
	19	-,000863412	,000706677	1,000	-,00343886	,00171204
	20	-,080964250*	,000888183	,000	-,08420131	-,07772719

EK-2.(devam) Belirsizlik analizi program çıktıları

4	1	-,029339334*	,000779490	,000	-,03218019	-,02649848
	2	,002978367*	,000666092	,001	,00055083	,00540590
	3	-,004980316*	,000721691	,000	-,00761047	-,00235016
	5	,000559201	,000670827	1,000	-,00188559	,00300399
	6	-,014565469*	,000746823	,000	-,01728724	-,01184370
	7	-,009029413*	,000952477	,000	-,01250103	-,00555779
	8	,011438207*	,000652371	,000	,00906066	,01381575
	9	-,015688099*	,000740466	,000	-,01838669	-,01298950
	10	-,003166121*	,000574940	,000	-,00526168	-,00107056
	11	-,025222025*	,000736888	,000	-,02790758	-,02253647
	12	-,004205952*	,000670444	,000	-,00664935	-,00176256
	13	,006185090*	,000678035	,000	,00371404	,00865614
	14	-,001963180	,000699751	,617	-,00451337	,00058701
	15	,000331695	,000680856	1,000	-,00214964	,00281303
	16	,012573705*	,000665622	,000	,01014788	,01499953
	17	-,017558516*	,000898629	,000	-,02083377	-,01428326
	18	-,018346826*	,000709416	,000	-,02093224	-,01576141
	19	-,005843728*	,000680973	,000	-,00832549	-,00336197
	20	-,085944566*	,000867872	,000	-,08910767	-,08278147

EK-2.(devam) Belirsizlik analizi program çıktıları

5	1	-,029898535*	,000756600	,000	-,03265602	-,02714106
	2	,002419166*	,000639154	,029	,00008982	,00474852
	3	-,005539517*	,000696905	,000	-,00807937	-,00299967
	4	-,000559201	,000670827	1,000	-,00300399	,00188559
	6	-,015124670*	,000722900	,000	-,01775928	-,01249006
	7	-,009588614*	,000933837	,000	-,01299239	-,00618484
	8	,010879006*	,000624841	,000	,00860181	,01315620
	9	-,016247300*	,000716330	,000	-,01885796	-,01363664
	10	-,003725322*	,000543503	,000	-,00570624	-,00174440
	11	-,025781227*	,000712631	,000	-,02837840	-,02318405
	12	-,004765153*	,000643688	,000	-,00711103	-,00241928
	13	,005625889*	,000651590	,000	,00325122	,00800056
	14	-,002522381*	,000674159	,034	-,00497932	-,00006545
	15	-,000227506	,000654525	1,000	-,00261288	,00215786
	16	,012014504*	,000638664	,000	,00968694	,01434207
	17	-,018117717*	,000878848	,000	-,02132096	-,01491447
	18	-,018906027*	,000684185	,000	-,02139951	-,01641255
	19	-,006402929*	,000654647	,000	-,00878875	-,00401711
	20	-,086503767*	,000847372	,000	-,08959224	-,08341530

EK-2.(devam) Belirsizlik analizi program çıktıları

6	1	-,014773865*	,000824730	,000	-,01777954	-,01176819
	2	,017543836*	,000718508	,000	,01492522	,02016245
	3	,009585153*	,000770333	,000	,00677772	,01239258
	4	,014565469*	,000746823	,000	,01184370	,01728724
	5	,015124670*	,000722900	,000	,01249006	,01775928
	7	,005536056*	,000989842	,000	,00192841	,00914370
	8	,026003676*	,000705807	,000	,02343132	,02857603
	9	-,001122630	,000787950	1,000	-,00399426	,00174900
	10	,011399349*	,000634926	,000	,00908503	,01371367
	11	-,010656556*	,000784588	,000	-,01351593	-,00779718
	12	,010359517*	,000722544	,000	,00772620	,01299284
	13	,020750559*	,000729593	,000	,01809156	,02340955
	14	,012602289*	,000749818	,000	,00986961	,01533497
	15	,014897164*	,000732215	,000	,01222862	,01756571
	16	,027139174*	,000718072	,000	,02452215	,02975620
	17	-,002993047	,000938141	,238	-,00641218	,00042608
	18	-,003781357*	,000758845	,000	-,00654692	-,00101579
	19	,008721741*	,000732324	,000	,00605279	,01139069
	20	-,071379097*	,000908722	,000	-,07469096	-,06806723

EK-2.(devam) Belirsizlik analizi program çıktıları

7	1	-,020309921*	,001014715	,000	-,02400814	-,01661170
	2	,012007780*	,000930441	,000	,00861636	,01539920
	3	,004049097*	,000971020	,006	,00050998	,00758821
	4	,009029413*	,000952477	,000	,00555779	,01250103
	5	,009588614*	,000933837	,000	,00618484	,01299239
	6	-,005536056*	,000989842	,000	-,00914370	-,00192841
	8	,020467620*	,000920669	,000	,01711176	,02382348
	9	-,006658686*	,000985055	,000	-,01024890	-,00306847
	10	,005863293*	,000867524	,000	,00270072	,00902587
	11	-,016192612*	,000982368	,000	-,01977304	-,01261218
	12	,004823461*	,000933562	,000	,00142068	,00822624
	13	,015214503*	,000939028	,000	,01179183	,01863717
	14	,007066233*	,000954827	,000	,00358606	,01054640
	15	,009361108*	,000941067	,000	,00593102	,01279120
	16	,021603118*	,000930105	,000	,01821292	,02499332
	17	-,008529103*	,001108863	,000	-,01257029	-,00448792
	18	-,009317413*	,000961932	,000	-,01282344	-,00581138
	19	,003185685	,000941152	,127	-,00024471	,00661608
	20	-,076915153*	,001084086	,000	-,08086606	-,07296424

EK-2.(devam) Belirsizlik analizi program çıktıları

8	1	-,040777541*	,000740285	,000	-,04347561	-,03807947
	2	-,008459840*	,000619755	,000	-,01071850	-,00620118
	3	-,016418523*	,000679158	,000	-,01889372	-,01394333
	4	-,011438207*	,000652371	,000	-,01381575	-,00906066
	5	-,010879006*	,000624841	,000	-,01315620	-,00860181
	6	-,026003676*	,000705807	,000	-,02857603	-,02343132
	7	-,020467620*	,000920669	,000	-,02382348	-,01711176
	9	-,027126306*	,000699076	,000	-,02967412	-,02457849
	10	-,014604328*	,000520552	,000	-,01650156	-,01270710
	11	-,036660232*	,000695285	,000	-,03919423	-,03412624
	12	-,015644159*	,000624430	,000	-,01791985	-,01336846
	13	-,005253117*	,000632573	,000	-,00755849	-,00294774
	14	-,013401387*	,000655797	,000	-,01579142	-,01101136
	15	-,011106512*	,000635596	,000	-,01342291	-,00879012
	16	,001135498	,000619250	1,000	-,00112132	,00339231
	17	-,028996723*	,000864842	,000	-,03214900	-,02584445
	18	-,029785033*	,000666099	,000	-,03221262	-,02735744
	19	-,017281935*	,000635722	,000	-,01959879	-,01496508
	20	-,097382773*	,000832838	,000	-,10041834	-,09434721

EK-2.(devam) Belirsizlik analizi program çıktıları

9	1	-,013651236*	,000818977	,000	-,01663595	-,01066652
	2	,018666466*	,000711898	,000	,01607195	,02126098
	3	,010707782*	,000764171	,000	,00792281	,01349275
	4	,015688099*	,000740466	,000	,01298950	,01838669
	5	,016247300*	,000716330	,000	,01363664	,01885796
	6	,001122630	,000787950	1,000	-,00174900	,00399426
	7	,006658686*	,000985055	,000	,00306847	,01024890
	8	,027126306*	,000699076	,000	,02457849	,02967412
	10	,012521978*	,000627436	,000	,01023498	,01480898
	11	-,009533927*	,000778539	,000	-,01237126	-,00669660
	12	,011482147*	,000715971	,000	,00887279	,01409150
	13	,021873189*	,000723084	,000	,01923792	,02450845
	14	,013724918*	,000743486	,000	,01101532	,01643451
	15	,016019793*	,000725730	,000	,01337489	,01866470
	16	,028261803*	,000711458	,000	,02566889	,03085472
	17	-,001870417	,000933088	1,000	-,00527114	,00153031
	18	-,002658727	,000752589	,076	-,00540149	,00008404
	19	,009844370*	,000725840	,000	,00719906	,01248968
	20	-,070256468*	,000903505	,000	-,07354933	-,06696360

EK-2.(devam) Belirsizlik analizi program çıktıları

10	1	-,026173214*	,000673046	,000	-,02862655	-,02371988
	2	,006144488*	,000537647	,000	,00418492	,00810406
	3	-,001814196	,000605164	,405	-,00401998	,00039159
	4	,003166121*	,000574940	,000	,00107056	,00526168
	5	,003725322*	,000543503	,000	,00174440	,00570624
	6	-,011399349*	,000634926	,000	-,01371367	-,00908503
	7	-,005863293*	,000867524	,000	-,00902587	-,00270072
	8	,014604328*	,000520552	,000	,01270710	,01650156
	9	-,012521978*	,000627436	,000	-,01480898	-,01023498
	11	-,022055905*	,000623209	,000	-,02432749	-,01978432
	12	-,001039831	,000543030	1,000	-,00301903	,00093937
	13	,009351210*	,000552374	,000	,00733794	,01136448
	14	,001202940	,000578824	,999	-,00090679	,00331267
	15	,003497815*	,000555833	,000	,00147193	,00552370
	16	,015739825*	,000537065	,000	,01378238	,01769727
	17	-,014392395*	,000808035	,000	-,01733802	-,01144677
	18	-,015180705*	,000590471	,000	-,01733290	-,01302851
	19	-,002677608*	,000555977	,000	-,00470402	-,00065120
	20	-,082778446*	,000773684	,000	-,08559880	-,07995809

EK-2.(devam) Belirsizlik analizi program çıktıları

11	1	-,004117309*	,000815744	,000	-,00709024	-,00114437
	2	,028200392*	,000708175	,000	,02561945	,03078134
	3	,020241709*	,000760705	,000	,01746937	,02301404
	4	,025222025*	,000736888	,000	,02253647	,02790758
	5	,025781227*	,000712631	,000	,02318405	,02837840
	6	,010656556*	,000784588	,000	,00779718	,01351593
	7	,016192612*	,000982368	,000	,01261218	,01977304
	8	,036660232*	,000695285	,000	,03412624	,03919423
	9	,009533927*	,000778539	,000	,00669660	,01237126
	10	,022055905*	,000623209	,000	,01978432	,02432749
	12	,021016074*	,000712270	,000	,01842021	,02361194
	13	,031407115*	,000719419	,000	,02878521	,03402902
	14	,023258845*	,000739922	,000	,02056224	,02595545
	15	,025553720*	,000722079	,000	,02292212	,02818532
	16	,037795730*	,000707733	,000	,03521640	,04037506
	17	,007663510*	,000930251	,000	,00427311	,01105391
	18	,006875200*	,000749069	,000	,00414527	,00960513
	19	,019378297*	,000722190	,000	,01674630	,02201030
	20	-,060722541*	,000900575	,000	-,06400473	-,05744035

EK-2.(devam) Belirsizlik analizi program çıktıları

12	1	-,025133383*	,000756260	,000	-,02788963	-,02237714
	2	,007184319*	,000638752	,000	,00485643	,00951220
	3	-,000774365	,000696537	1,000	-,00331287	,00176414
	4	,004205952*	,000670444	,000	,00176256	,00664935
	5	,004765153*	,000643688	,000	,00241928	,00711103
	6	-,010359517*	,000722544	,000	-,01299284	-,00772620
	7	-,004823461*	,000933562	,000	-,00822624	-,00142068
	8	,015644159*	,000624430	,000	,01336846	,01791985
	9	-,011482147*	,000715971	,000	-,01409150	-,00887279
	10	,001039831	,000543030	1,000	-,00093937	,00301903
	11	-,021016074*	,000712270	,000	-,02361194	-,01842021
	13	,010391042*	,000651196	,000	,00801780	,01276428
	14	,002242771	,000673778	,154	-,00021277	,00469832
	15	,004537646*	,000654133	,000	,00215371	,00692159
	16	,016779656*	,000638261	,000	,01445356	,01910575
	17	-,013352564*	,000878555	,000	-,01655475	-,01015038
	18	-,014140874*	,000683810	,000	-,01663299	-,01164876
	19	-,001637777	,000654255	,905	-,00402216	,00074661
	20	-,081738615*	,000847069	,000	-,08482598	-,07865125

EK-2.(devam) Belirsizlik analizi program çıktıları

13	1	-,035524424*	,000762997	,000	-,03830520	-,03274364
	2	-,003206723*	,000646714	,000	-,00556363	-,00084982
	3	-,011165406*	,000703845	,000	-,01373054	-,00860027
	4	-,006185090*	,000678035	,000	-,00865614	-,00371404
	5	-,005625889*	,000651590	,000	-,00800056	-,00325122
	6	-,020750559*	,000729593	,000	-,02340955	-,01809156
	7	-,015214503*	,000939028	,000	-,01863717	-,01179183
	8	,005253117*	,000632573	,000	,00294774	,00755849
	9	-,021873189*	,000723084	,000	-,02450845	-,01923792
	10	-,009351210*	,000552374	,000	-,01136448	-,00733794
	11	-,031407115*	,000719419	,000	-,03402902	-,02878521
	12	-,010391042*	,000651196	,000	-,01276428	-,00801780
	14	-,008148270*	,000681331	,000	-,01063134	-,00566520
	15	-,005853395*	,000661910	,000	-,00826568	-,00344111
	16	,006388615*	,000646230	,000	,00403348	,00874375
	17	-,023743606*	,000884361	,000	-,02696692	-,02052029
	18	-,024531916*	,000691253	,000	-,02705115	-,02201268
	19	-,012028818*	,000662031	,000	-,01444154	-,00961609
	20	-,092129656*	,000853089	,000	-,09523894	-,08902038

EK-2.(devam) Belirsizlik analizi program çıktıları

14	1	-,027376154*	,000782359	,000	-,03022746	-,02452485
	2	,004941547*	,000669448	,000	,00250178	,00738131
	3	-,003017136*	,000724789	,006	-,00565858	-,00037569
	4	,001963180	,000699751	,617	-,00058701	,00451337
	5	,002522381*	,000674159	,034	,00006545	,00497932
	6	-,012602289*	,000749818	,000	-,01533497	-,00986961
	7	-,007066233*	,000954827	,000	-,01054640	-,00358606
	8	,013401387*	,000655797	,000	,01101136	,01579142
	9	-,013724918*	,000743486	,000	-,01643451	-,01101532
	10	-,001202940	,000578824	,999	-,00331267	,00090679
	11	-,023258845*	,000739922	,000	-,02595545	-,02056224
	12	-,002242771	,000673778	,154	-,00469832	,00021277
	13	,008148270*	,000681331	,000	,00566520	,01063134
	15	,002294875	,000684139	,141	-,00019842	,00478817
	16	,014536885*	,000668980	,000	,01209882	,01697495
	17	-,015595335*	,000901119	,000	-,01887966	-,01231102
	18	-,016383645*	,000712567	,000	-,01898055	-,01378675
	19	-,003880548*	,000684256	,000	-,00637427	-,00138682
	20	-,083981386*	,000870449	,000	-,08715387	-,08080890

EK-2.(devam) Belirsizlik analizi program çıktıları

15	1	-,029671029*	,000765505	,000	-,03246094	-,02688111
	2	,002646672*	,000649671	,009	,00027899	,00501436
	3	-,005312011*	,000706564	,000	-,00788705	-,00273697
	4	-,000331695	,000680856	1,000	-,00281303	,00214964
	5	,000227506	,000654525	1,000	-,00215786	,00261288
	6	-,014897164*	,000732215	,000	-,01756571	-,01222862
	7	-,009361108*	,000941067	,000	-,01279120	-,00593102
	8	,011106512*	,000635596	,000	,00879012	,01342291
	9	-,016019793*	,000725730	,000	-,01866470	-,01337489
	10	-,003497815*	,000555833	,000	-,00552370	-,00147193
	11	-,025553720*	,000722079	,000	-,02818532	-,02292212
	12	-,004537646*	,000654133	,000	-,00692159	-,00215371
	13	,005853395*	,000661910	,000	,00344111	,00826568
	14	-,002294875	,000684139	,141	-,00478817	,00019842
	16	,012242010*	,000649189	,000	,00987608	,01460794
	17	-,017890210*	,000886526	,000	-,02112141	-,01465902
	18	-,018678520*	,000694020	,000	-,02120784	-,01614920
	19	-,006175423*	,000664920	,000	-,00859868	-,00375217
	20	-,086276261*	,000855333	,000	-,08939371	-,08315881

EK-2.(devam) Belirsizlik analizi program çıktıları

16	1	-,041913039*	,000751988	,000	-,04465372	-,03917235
	2	-,009595338*	,000633688	,000	-,01190477	-,00728591
	3	-,017554021*	,000691896	,000	-,02007562	-,01503242
	4	-,012573705*	,000665622	,000	-,01499953	-,01014788
	5	-,012014504*	,000638664	,000	-,01434207	-,00968694
	6	-,027139174*	,000718072	,000	-,02975620	-,02452215
	7	-,021603118*	,000930105	,000	-,02499332	-,01821292
	8	-,001135498	,000619250	1,000	-,00339231	,00112132
	9	-,028261803*	,000711458	,000	-,03085472	-,02566889
	10	-,015739825*	,000537065	,000	-,01769727	-,01378238
	11	-,037795730*	,000707733	,000	-,04037506	-,03521640
	12	-,016779656*	,000638261	,000	-,01910575	-,01445356
	13	-,006388615*	,000646230	,000	-,00874375	-,00403348
	14	-,014536885*	,000668980	,000	-,01697495	-,01209882
	15	-,012242010*	,000649189	,000	-,01460794	-,00987608
	17	-,030132220*	,000874881	,000	-,03332103	-,02694341
	18	-,030920530*	,000679082	,000	-,03339542	-,02844564
	19	-,018417433*	,000649312	,000	-,02078381	-,01605106
	20	-,098518271*	,000843257	,000	-,10159176	-,09544478

EK-2.(devam) Belirsizlik analizi program çıktıları

17	1	-,011780819*	,000964349	,000	-,01529540	-,00826624
	2	,020536883*	,000875239	,000	,01734677	,02372699
	3	,012578199*	,000918260	,000	,00923147	,01592493
	4	,017558516*	,000898629	,000	,01428326	,02083377
	5	,018117717*	,000878848	,000	,01491447	,02132096
	6	,002993047	,000938141	,238	-,00042608	,00641218
	7	,008529103*	,001108863	,000	,00448792	,01257029
	8	,028996723*	,000864842	,000	,02584445	,03214900
	9	,001870417	,000933088	1,000	-,00153031	,00527114
	10	,014392395*	,000808035	,000	,01144677	,01733802
	11	-,007663510*	,000930251	,000	-,01105391	-,00427311
	12	,013352564*	,000878555	,000	,01015038	,01655475
	13	,023743606*	,000884361	,000	,02052029	,02696692
	14	,015595335*	,000901119	,000	,01231102	,01887966
	15	,017890210*	,000886526	,000	,01465902	,02112141
	16	,030132220*	,000874881	,000	,02694341	,03332103
	18	-,000788310	,000908644	1,000	-,00410003	,00252341
	19	,011714787*	,000886616	,000	,00848326	,01494631
	20	-,068386051*	,001037094	,000	-,07216567	-,06460643

EK-2.(devam) Belirsizlik analizi program çıktıları

18	1	-,010992509*	,000791015	,000	-,01387535	-,00810967
	2	,021325193*	,000679543	,000	,01884863	,02380176
	3	,013366510*	,000734124	,000	,01069105	,01604197
	4	,018346826*	,000709416	,000	,01576141	,02093224
	5	,018906027*	,000684185	,000	,01641255	,02139951
	6	,003781357*	,000758845	,000	,00101579	,00654692
	7	,009317413*	,000961932	,000	,00581138	,01282344
	8	,029785033*	,000666099	,000	,02735744	,03221262
	9	,002658727	,000752589	,076	-,00008404	,00540149
	10	,015180705*	,000590471	,000	,01302851	,01733290
	11	-,006875200*	,000749069	,000	-,00960513	-,00414527
	12	,014140874*	,000683810	,000	,01164876	,01663299
	13	,024531916*	,000691253	,000	,02201268	,02705115
	14	,016383645*	,000712567	,000	,01378675	,01898055
	15	,018678520*	,000694020	,000	,01614920	,02120784
	16	,030920530*	,000679082	,000	,02844564	,03339542
	17	,000788310	,000908644	1,000	-,00252341	,00410003
	19	,012503097*	,000694136	,000	,00997336	,01503283
	20	-,067597741*	,000878237	,000	-,07079859	-,06439690

EK-2.(devam) Belirsizlik analizi program çıktıları

19	1	-,023495606*	,000765610	,000	-,02628590	-,02070531
	2	,008822095*	,000649794	,000	,00645396	,01119023
	3	,000863412	,000706677	1,000	-,00171204	,00343886
	4	,005843728*	,000680973	,000	,00336197	,00832549
	5	,006402929*	,000654647	,000	,00401711	,00878875
	6	-,008721741*	,000732324	,000	-,01139069	-,00605279
	7	-,003185685	,000941152	,127	-,00661608	,00024471
	8	,017281935*	,000635722	,000	,01496508	,01959879
	9	-,009844370*	,000725840	,000	-,01248968	-,00719906
	10	,002677608*	,000555977	,000	,00065120	,00470402
	11	-,019378297*	,000722190	,000	-,02201030	-,01674630
	12	,001637777	,000654255	,905	-,00074661	,00402216
	13	,012028818*	,000662031	,000	,00961609	,01444154
	14	,003880548*	,000684256	,000	,00138682	,00637427
	15	,006175423*	,000664920	,000	,00375217	,00859868
	16	,018417433*	,000649312	,000	,01605106	,02078381
	17	-,011714787*	,000886616	,000	-,01494631	-,00848326
	18	-,012503097*	,000694136	,000	-,01503283	-,00997336
	20	-,080100838*	,000855427	,000	-,08321863	-,07698305

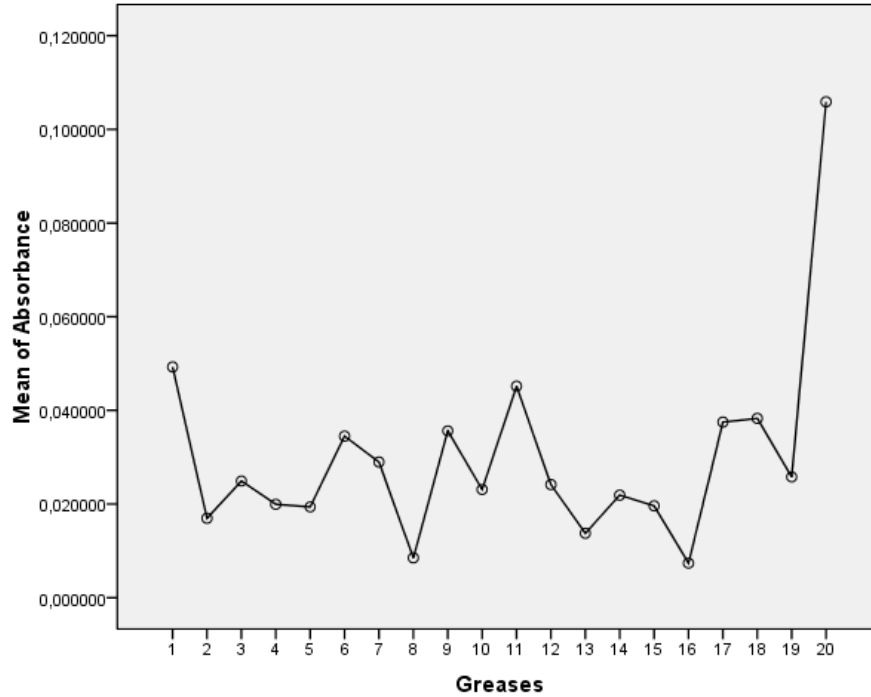
EK-2.(devam) Belirsizlik analizi program çıktıları

20	1	,056605232*	,000935754	,000	,05319490	,06001557
	2	,088922933*	,000843629	,000	,08584809	,09199777
	3	,080964250*	,000888183	,000	,07772719	,08420131
	4	,085944566*	,000867872	,000	,08278147	,08910767
	5	,086503767*	,000847372	,000	,08341530	,08959224
	6	,071379097*	,000908722	,000	,06806723	,07469096
	7	,076915153*	,001084086	,000	,07296424	,08086606
	8	,097382773*	,000832838	,000	,09434721	,10041834
	9	,070256468*	,000903505	,000	,06696360	,07354933
	10	,082778446*	,000773684	,000	,07995809	,08559880
	11	,060722541*	,000900575	,000	,05744035	,06400473
	12	,081738615*	,000847069	,000	,07865125	,08482598
	13	,092129656*	,000853089	,000	,08902038	,09523894
	14	,083981386*	,000870449	,000	,08080890	,08715387
	15	,086276261*	,000855333	,000	,08315881	,08939371
	16	,098518271*	,000843257	,000	,09544478	,10159176
	17	,068386051*	,001037094	,000	,06460643	,07216567
	18	,067597741*	,000878237	,000	,06439690	,07079859
	19	,080100838*	,000855427	,000	,07698305	,08321863

*. The mean difference is significant at the 0.05 level.

EK-2.(devam) Belirsizlik analizi program çıktıları

Means Plots



```
GET FILE='C:\Users\hp\Desktop\nimeti hc\sic mom.sav'. NONPAR CORR
/VARIABLES=temp14 torq14 /PRINT=SPEARMAN TWOTAIL NOSIG
/MISSING=LISTWISE.
```

Nonparametric Correlations

[DataSet2] C:\Users\hp\Desktop\nimeti hc\sic mom.sav

Correlations^a

			temp14	torq14
Spearman's rho	temp14	Correlation Coefficient	1,000	-,890**
		Sig. (2-tailed)	.	,000
	torq14	Correlation Coefficient	-,890**	1,000
		Sig. (2-tailed)	,000	.

****.** Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

a. Listwise N = 156



GAZİ GELECEKTİR...