



**KIZILÖTESİ ISITICILARIN ISIL KARAKTERİSTİĞİNİN SAYISAL VE
DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ**

Atakan KARABATAK

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

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

OCAK 2025

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.

Atakan KARABATAK

09/01/2025

KIZILÖTESİ ISITICILARIN ISIL KARAKTERİSTİĞİNİN SAYISAL VE DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Atakan KARABATAK

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ocak 2025

ÖZET

Günümüzde pek çok farklı kullanım alanı bulunan kuvars kızılötesi ısıtıcıların, ısı karakteristiklerinin incelenmesi, bu ısıtıcılardan istenilen ısıtma gücünün en verimli şekilde elde edebilmek açısından büyük önem taşımaktadır. Yüksek çalışma sıcaklıkları, karmaşık geometrik yapıları ve baskın ışıyım ile ısı yayma özellikleri gibi nedenler, bu lambaların çalışma prensiplerine dair analitik hesaplamaların gerçekleştirilmesini oldukça zorlaştırmaktadır. Bu tez çalışması kapsamında, dört adet dikey yerleştirilmiş, kuvars kızılötesi ısıtıcının ısıl performansı, farklı parametreler altında deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Güç, mesafe, konum ve açı parametrelerinin hassas bir şekilde incelenmesi için bir ısı test düzeneği ve bir sayısal model oluşturulmuştur. Sayısal model içerisindeki sınır şartlarının tanımlanması için gerekli olan değerleri elde edebilmek için bu konu üzerine yapılmış mevcut çalışmalar incelenip ısıtıcıların kuvars ve filament sıcaklıklarını hesaplayabilmek için, net radyasyon metodu kullanılarak oluşturulmuş, iki adet eşitlik kullanılmıştır. Bu eşitliklerden elde edilen değerler, ANSYS yazılımının Steady State Thermal modülü yardımıyla oluşturulan sayısal modele tanımlanmış ve farklı parametreler için incelemeler yapılmıştır. Öncelikle sayısal model, sayısal veriler ve deneysel veriler arasındaki uyum sayesinde doğrulanmıştır. Konum, mesafe, açı ve güç parametreleri için elde edilen sayısal ve deneysel veriler arasındaki ortalama yüzdesel fark değerleri sırasıyla %5,1, %3,7, %6,4 ve %3,2 olarak hesaplanmıştır. Kuvars kızılötesi ısıtıcıların vakum ortamındaki performansları ve ayrıca arka yüzeylerinde bulunan seramik kaplamanın değişen emisivite değerlerinin ısıtıcıların ısıtma performansına etkileri doğrulan sayısal model yardımıyla incelenmiştir.

Bilim Kodu : 91412

Anahtar Kelimeler : Kuvars kızılötesi ısıtıcı, ısıl performans, ısı akısı, ışıyım ile ısı transferi, doğal taşınım ile ısı transferi, ısı akısı sensörü

Sayfa Adedi : 81

Danışman : Doç. Dr. Tamer ÇALIŞIR

NUMERICAL AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE THERMAL CHARACTERISTICS OF INFRARED HEATERS

(M. Sc. Thesis)

Atakan KARABATAK

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

January 2025

ABSTRACT

Examining the thermal performance of quartz infrared heaters that are used in many different applications is very important to ensure that the desired heating power can be obtained in the most efficient way. Reasons such as high operating temperatures, complex geometric structures and dominant radiative heat dissipation properties make it very difficult to carry out analytical calculations about their working principles. This study focuses on experimentally and numerically investigating the thermal performance of four vertically mounted quartz infrared heaters under different parameters. To analyze the effects of power, distance, position, and angle with precision, a thermal test setup and a numerical model were developed. To define the boundary conditions required for the numerical model, existing studies were reviewed, and two equations based on the net radiation method were utilized to calculate the quartz and filament temperatures of the heaters. These values were incorporated into the numerical model developed using the Steady State Thermal module of ANSYS software, allowing for analyses under various conditions. The numerical model was validated by comparing its results with experimental data, showing average percentage differences of 5.1% for position, 3.7% for distance, 6.4% for angle, and 3.2% for power parameters. Additionally, the validated numerical model was used to investigate the performance of quartz infrared heaters in a vacuum environment and to evaluate how varying emissivity value of the ceramic coating on their rear surfaces influence heating performance.

Science Code : 91412

Key Words : Quartz infrared heater, thermal performance, heat flux, radiative heat transfer, natural convection heat transfer, heat flux sensor

Page Number : 81

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Tamer ÇALIŞIR

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışması boyunca tüm süreçlerde bana yardımcı olurken sahip olduğu bilgi birikimi ve tecrübe ile bu çalışmanın çok daha değerli olmasını sağladığı için tez danışmanım Hocam Sayın Doç. Dr. Tamer ÇALIŞIR’a teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca, yüksek lisans çalışmalarım sırasında sahip oldukları tecrübeyi benden esirgemeyen meslektaşlarım Toygan ER ve Osman Furkan MURATOĞLU’na teşekkür ederim.

Son olarak, her zaman yanımda olan, hayatımın neşe ve huzur dolu olmasını sağlayan saygıdeğer ve sevgili eşim Ayseli ALGEÇ KARABATAK’a bu süreçte gösterdiği sabır ve destek için çok teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xi
RESİMLERİN LİSTESİ	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiv
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	5
3. YÖNTEM	13
3.1. Isıl Test Düzeneği ve Yardımcı Ekipmanlar	13
3.2. Isıl Sayısal Model ve Analiz Parametreleri	18
3.2.1. Isıl sayısal model	18
3.2.2. Net radyasyon metodu	31
4. DENEYSEL VERİLER	39
4.1. X-Y Düzlemi Üzerindeki Isı Akısı Dağılımı.....	39
4.2. Z Eksen Üzerindeki Isı Akısı Değişimi	43
4.3. IAS Açısının Isı Akısına Etkisi	45
4.4. KKI Güç Değerinin Isı Akısına Etkisi.....	46
5. SAYISAL SONUÇLAR	49
5.1. X-Y Düzlemi Üzerindeki Isı Akısı Dağılımı.....	49
5.2. Z Eksen Üzerindeki Isı Akısı Değişimi	53

	Sayfa
5.3. IAS Açısının Isı Akısına Etkisi	55
5.4. KKI Güç Değerinin Isı Akısına Etkisi.....	57
5.5. Vakum Ortamının Isı Akısına Etkisi	58
5.6. Seramik Kaplı Kuvvars Camın Emisivite Değerinin Isı Akısına Etkisi.....	60
5.7. Parametrik Analizler.....	61
6. DENEYSEL VE SAYISAL VERİLERİN KARŞILAŞTIRILMASI.....	63
6.1. X-Y Düzlemi Üzerindeki Isı Akısı Dağılımı İçin Elde Edilen Verilerin Karşılaştırılması.....	63
6.2. Z Eksen Üzerindeki Isı Akısı Dağılımı İçin Elde Edilen Verilerin Karşılaştırılması	65
6.3. IAS Açısının Isı Akısına Etkisi İçin Elde Edilen Verilerin Karşılaştırılması.....	66
6.4. KKI Güç Değerlerinin Isı Akısına Etkisi İçin Elde Edilen Verilerin Karşılaştırılması	68
7. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	71
KAYNAKLAR	77
EKLER.....	79
EK-1. Tez çalışması kapsamında elde edilen sayısal ve deneysel ısı akısı değerleri	80
ÖZGEÇMİŞ	81

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. Çizelge 3.1. Er ve ark. tarafından sayısal hesaplamalar sırasında kullanılan değişken değerleri	25
Çizelge 3.2. Güvenilirlik çalışması kapsamında elde edilen sonuçlar ile Er ve ark. tarafından verilen sayısal sonuçların karşılaştırması	26
Çizelge 3.3. Hücre boyutu ve toplam hücre sayısı değerlerine göre elde edilen ısı akısı değerleri	27
Çizelge 3.4. Değişen yarım küp çözünürlüğü değerlerine göre elde edilen ısı akısı değerleri	28
Çizelge 3.5. Tüm KKI güç değerleri için MATLAB kodunda ortak olarak kullanılan değişken değerleri	31
Çizelge 3.6. Tungstenin emisivite değerinin sıcaklığa göre değişimi.....	32
Çizelge 3.7. 579,6 K sıcaklığındaki ve 1 atm basınçtaki havanın özellikleri	33
Çizelge 3.8. Tüm KKI güç değerleri için hesaplanan sıcaklık değerleri	37
Çizelge 3.9. Vakum ortamındaki KKI'ların güç değerleri için hesaplanan sıcaklık değerleri	37
Çizelge 3.10. Farklı ϵ_k değerlerinde, KKI'ların güç değerleri için hesaplanan sıcaklık değerleri	37
Çizelge 4.1. X-Y düzlemi ısı akısı dağılımı ölçümlerinde KKI'lardan ölçülen güç değerleri.....	41
Çizelge 4.2. KKI'lar 500W, uzaklık 500 mm ve açı 0 iken X-Y düzlemi üzerinde ölçülen ısı akısı, sensör sıcaklığı ve ortalama ortam sıcaklığı değerleri.....	42
Çizelge 4.3. Z eksen ısı akısı değişimi ölçümleri sırasında KKI'lardan ölçülen güç değerleri.....	44
Çizelge 4.4. KKI'lar 500W, x ile y koordinatları ve açı 0 iken Z eksen boyunca ölçülen ısı akısı, sensör sıcaklığı ve ortalama ortam sıcaklığı değerleri.....	44
Çizelge 4.5. IAS'nin farklı açıları için alınan ısı akısı ölçümleri sırasında KKI'lardan ölçülen güç değerleri	45
Çizelge 4.6. KKI'lar 500W, x ile y koordinatları 0 ve uzaklık 500 mm iken IAS'nin farklı açılarda yerleşimi sırasında ölçülen ısı akısı, sensör sıcaklığı ve ortalama ortam sıcaklığı değerleri	46

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.7. KKI'ların farklı güç değerleri için alınan ısı akısı ölçümleri sırasında KKI'lardan ölçülen güç değerleri	47
Çizelge 4.8. Uzaklık 500 mm, x ile y koordinatları ve açı 0 iken KKI'ların farklı güç değerleri için ölçülen ısı akısı, sensör sıcaklığı ve ortalama ortam sıcaklığı değerleri	48
Çizelge 5.1. KKI'lar 500W, uzaklık 500 mm ve açı 0 iken X-Y düzlemi üzerindeki ısı akısı dağılımı için hesaplanan ısı akısı değerleri.....	52
Çizelge 5.2. KKI'lar 500W, x ile y koordinatları ve açı 0 iken z eksenini üzerindeki ısı akısı dağılımı için hesaplanan ısı akısı değerleri.....	54
Çizelge 5.3. KKI'lar 500W, x ile y koordinatları 0 ve uzaklık 500 mm iken IAS açısının ısı akısına etkisi için hesaplanan ısı akısı değerleri	56
Çizelge 5.4. Uzaklık 500 mm, x ile y koordinatları ve açı 0 iken KKI güç değerinin ısı akısına etkisi için hesaplanan ısı akısı değerleri	58
Çizelge 5.5. KKI'lar 500W, uzaklık 500 mm, x ile y koordinatları ve açı 0 iken ortam koşullarının ısı akısına etkisi için hesaplanan ısı akısı değerleri	59
Çizelge 5.6. KKI'lar 500W, uzaklık 500 mm, x ile y koordinatları ve açı 0 iken kuvars cam kılıfın farklı emisivite değerleri için hesaplanan ısı akısı değerleri	60
Çizelge 5.7. Parametrik analiz çalışmaları kapsamında hesaplanan ısı akısı değerleri ..	62
Çizelge 6.1. X-Y düzlemi üzerindeki ısı akısı dağılımı için elde edilen deneysel, sayısal veriler ve ısı akısı değerleri arasındaki yüzdesel farklar.....	64
Çizelge 6.2. Z eksenini üzerindeki ısı akısı dağılımı için elde edilen deneysel, sayısal veriler ve ısı akısı değerleri arasındaki yüzdesel farklar.....	65
Çizelge 6.3. IAS açısının ısı akısına etkisi için elde edilen deneysel, sayısal veriler ve ısı akısı değerleri arasındaki yüzdesel farklar.....	67
Çizelge 6.4. KKI güç değerlerinin ısı akısına etkisi için elde edilen deneysel, sayısal veriler ve ısı akısı değerleri arasındaki yüzdesel farklar.....	69

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. KKI'yı kullanımı sırasında kurulan elektrik devresi ve KKI bileşenlerinin şematiği	2
Şekil 3.1. ITD şematik gösterimi	14
Şekil 3.2. ITD ve yardımcı sistemlerin şematik gösterimi.....	17
Şekil 3.3. SM için tasarlanan KKI'ların görseli.....	19
Şekil 3.4. SM için tasarlanan IAS'ın görseli.....	20
Şekil 3.5. SM bileşenlerinin görseli.....	20
Şekil 3.6. IAS'ın 5 numaralı konumdaki ısı akısı hesabı için oluşturulan SM'in görseli	21
Şekil 3.7. KKI'nın hücre yapısının görseli	21
Şekil 3.8. IAS'ın hücre yapısının görseli	22
Şekil 3.9. KKI'lara ait sınır şartlarının görseli.....	23
Şekil 3.10. IAS'a ait sınır şartlarının görseli.....	23
Şekil 3.11. Güvenilirlik çalışması kapsamında oluşturulan SM'in görseli.....	25
Şekil 3.12. Isı akısı değerinin toplam hücre sayısına bağlı değişim grafiği	27
Şekil 3.13. Isı akısı değerinin yarım küp çözünürlüğüne bağlı değişim grafiği	29
Şekil 3.14. Argonun yüksek sıcaklıklardaki ısı iletkenlik değeri	35
Şekil 4.1. KKI'lar 500W, uzaklık 500 mm ve aç 0 iken IAS'dan alınan ısı akısı ölçümünün zamana bağlı değişim grafiği	39
Şekil 4.2. IAS ölçüm noktaları.....	40
Şekil 4.3. KKI'lar 500W, uzaklık 500 mm ve aç 0 iken X-Y düzlemi boyunca ısı akısı dağılımı grafiği	41
Şekil 5.1. X-Y düzlemi üzerindeki ısı akısı dağılımı için oluşturulan SM'in görseli.....	50
Şekil 5.2. SM bileşenlerinin numaraları	50

Şekil	Sayfa
Şekil 5.3. KKI'lar 500W, uzaklık 500 mm ve açı 0 iken X-Y düzlemi üzerindeki ısı akılarının ölçüm noktasına bağlı değişim grafiği.....	52
Şekil 5.4. Z eksenı üzerindeki ısı akısı dağılımı için oluşturulan SM'in görseli	53
Şekil 5.5. KKI'lar 500W, x ile y koordinatları ve açı 0 iken ısı akısı değerin z eksenı üzerindeki uzaklığa bağlı değişim grafiği.....	54
Şekil 5.6. IAS'ın açsının 120° olduğu durum için oluşturulan SM'in görseli.....	55
Şekil 5.7. KKI güçlerinin 500 W olduğu durum için oluşturulan SM'in görseli ve sınır şartları.....	57
Şekil 6.1. X-Y düzlemi üzerindeki ısı akısı dağılımı için elde edilen deneysel ve sayısal ısı akısı değlerinin grafiği.....	64
Şekil 6.2. Z eksenı üzerindeki ısı akısı dağılımı için elde edilen deneysel ve sayısal ısı akısı değlerinin grafiği	66
Şekil 6.3. IAS açsının ısı akısına etkisi için elde edilen deneysel ve sayısal ısı akısı değlerinin grafiği	67
Şekil 6.4. KKI güç değerin ısı akısına etkisi için elde edilen deneysel ve sayısal ısı akısı değlerinin grafiği	69

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 1.1. Kuvars kızılötesi ısıtıcı lamba.....	2
Resim 3.1. IVTS görseli	13
Resim 3.2. ITD'nin IVTS içerisindeki yerleşimi.....	15
Resim 3.3. IAS'ın KKI'larla olan açısını değiştirmek için kullanılan parçaların görseli.....	16
Resim 3.4. IAS ve KKI'lar karşısındaki açısal yerleşimi	17
Resim 4.1. Z eksenli ısı akısı değişimi ölçümleri sırasında çekilen ITD görseli	43
Resim 4.2. IAS'ın KKI'ların karşısına farklı açılardaki yerleşiminin görseli	45
Resim 4.3. KKI'ların 500 Watt'taki ısı akısı ölçümleri sırasında kaydedilen görsel	47

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler

Açıklamalar

d_k	Kuvars tüpün çapı (m)
d_f	Tungsten filamentin çapı (m)
g	Yerçekimi ivmesi (m/s^2)
h	Isı transfer katsayısı (W/m^2K)
k_{Ar}	Argonun ısı iletkenlik katsayısı (W/mK)
k_H	Havanın ısı iletkenlik katsayısı (W/mK)
L_k	Kuvars tüpün uzunluğu (m)
Nu_H	Nusselt sayısı
P	Elektriksel güç (W)
Pr	Prandtl sayısı
Ra_H	Rayleigh sayısı
S_f	Tungsten filamentin yüzey alanı (m^2)
S_k	Kuvars tüpün yüzey alanı (m^2)
T^*	Ortalama sıcaklık (K)
T_f	Tungsten filamentin sıcaklığı (K)
T_k	Kuvars tüpün sıcaklığı (K)
T_∞	Ortam sıcaklığı (K)
ν	Kinematik viskozite (m^2/s)
α_k	Kuvars tüpün absorptivitesi
β	Isıl genleşme katsayısı (K^{-1})
ϵ_f	Tungsten filamentin emisivitesi
ϵ_k	Kuvars tüpün emisivitesi
η	Elektriksel verim
σ	Stefan-Boltzmann sabiti

Kısaltmalar**Açıklamalar****IAS**

Isı akısı sensörü

ITD

Isıl test düzeneği

KÖİ

Kızılötesi ısıtıcı

KKI

Kuvars kızılötesi ısıtıcı

SM

Sayısal model

VTs

Veri toplama sistemi

1. GİRİŞ

Kızılötesi ısıtma teknolojisi, günümüzde açık ve kapalı alan ısıtması, endüstride yüksek ısıtma ihtiyacı olan üretim yöntemleri ve uzay araçlarının kalifikasyon testlerinde güneş ve dünya kaynaklı dış ısı akılarının benzetimi gibi birçok farklı kullanım alanına sahiptir. Kızılötesi ısıtıcıların (KÖİ) sahip oldukları yüksek ısıtma kapasiteleri ışıyım ile ısı transferi vasıtasıyla istenen yüzeylerde oldukça hızlı ve etkili bir ısıtma yapılabilmesine olanak sağlamaktadır. Sade tasarımları, kolay kullanımları, uygun maliyetli olmalarının yanında yüksek ısıtma kapasiteleri ve ürün çeşitliliği gibi avantajlara sahip olmaları KÖİ'lerin yaygın kullanılan ürünler olmasını sağlamaktadır.

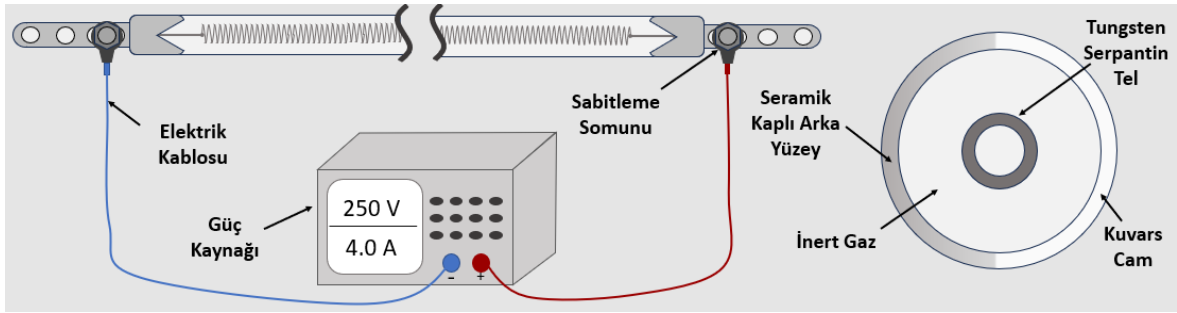
Kullanım alanları ve amaçlarının farklılık göstermesi nedeniyle pek çok farklı tipte KÖİ tipi mevcuttur. Yayıdıkları ısıyın dalga boyuna göre kuvars kızılötesi ısıtıcılar (KKI) kendi aralarında kısa dalga, orta dalga ve uzak dalga kızılötesi ısıtıcılar olarak üç tipe ayrılmaktadırlar. Sıcaklık ne kadar yüksek olursa, dalga boyu o kadar kısa ve kızılötesi radyasyonun yoğunluğu da o kadar yüksek olur. Sıcaklık daha düşük olduğunda ise daha uzun dalga boyları ve daha düşük bir yoğunluk gözlenir [1]. KKI'lar, görünür spektruma en yakın olan ve dalga boyu 0,7 ila 1,4 μm arasında değişen kızılötesi ışıyınlar yayarlar. Bu sayede, sıcaklığı 1300-2600 K civarında olan parlak beyaz bir görünüme sahip olurlar. Bu tip KÖİ'lar genellikle en güçlü tip olarak kabul edilir. Çünkü 130 kW/m^2 'ye kadar veya daha yüksek güç yoğunluklarına ayrıca birkaç saniye içinde maksimum sıcaklığa ulaşabilirler [2]. Sahip oldukları yapısal özelliklere göre pek çok farklı boyut, güç ve verime sahip KÖİ'lar (KKI, seramik KÖİ, radyant ısıtıcı, vb.), gündelik ve endüstriyel amaçlarda yaygın olarak kullanılmaktadır.

Özellikle uzay araçlarının çalışma ömrü boyunca maruz kaldığı güneş akısı (1400 W/m^2) ve dünyadan yansıyan albedo akılarının (700 W/m^2) dünya şartlarında benzetiminin yapılabilmesi için yoğun radyasyonla ısıtma gücüne sahip ve kısa dalga ışıyım yapan KKI'lar kullanılmaktadır. Resim 1.1.'de bir KKI'nın bir görseli paylaşılmıştır. Şekil 1.1.'de ise bir KKI'nın kullanımı sırasında kurulan elektrik devresinin basit gösterimi ve KKI'yı oluşturan bileşenlerin gösterildiği bir şematik yer almaktadır. Basitçe bir KKI elektrik enerjisinin ısı enerjisine dönüştüren bir tungsten serpantin telden, kuvars camdan imal

edilmiş (arka yüzeyi seramik bileşen ile kaplanmış) bir tüpten ve serpantin tel ile kuvars tüp arasını dolduran inert gazdan meydana gelmektedir.



Resim 1.1. Kuvars kızılötesi ısıtıcı lamba [3]



Şekil 1.1. KKI'yı kullanımı sırasında kurulan elektrik devresi ve KKI bileşenlerinin şematiği

Yüksek yoğunluklu kısa dalga ışıyım yapan KKI'ların içerisindeki direnç elemanları, cam bir zarfla çevrili ve 2200-2800 K'de çalışan bir filament olan spiral bir tungsten bobindir. Lamba camı kuvars olup optik ve termomekanik özellikleri nedeniyle kullanılmaktadır. Tungsten 3500 K'nin daha üzerinde erime noktasına sahip olmasına rağmen oksijen içeren bir atmosferde hızla oksitlenir ve yanar. Bu nedenle, kuvars zarfın tungsten filaman ile oksijen arasındaki teması engelleyecek şekilde sızdırmaz olması gerekir. Bu tür lambaların içerisinde ya vakum ya da daha yaygın olarak nitrojen, neon ya da argon gibi bazı soy gazlardan oluşan inert bir atmosfer bulunur. Yüksek sıcaklıklarda katı tungsten üzerindeki tungsten buharının kısmi basıncı oldukça yüksek olduğu için lamba içerisindeki tungstenin süblimleşmesini engellemek için az miktarda halojen (brom) veya halojen bileşiği de bu atmosfere eklenmektedir [4].

KKI'ların çalışma prensipleri incelendiğinde, ısıtma performanslarını etkileyen pek çok etken olduğu görülmektedir. Bu çalışmada, farklı güç değerlerinde çalıştırılan KKI'ların, karşılına yerleştirilen yüzey, farklı uzaklık, koordinat ve açılara sahip iken sağladıkları ısıtma gücünün sayısal ve deneysel olarak incelenmesi amaçlanmaktadır. Güç, uzaklık, koordinat ve açı parametrelerine ek olarak, KKI'ların vakum ortamında çalıştıkları ve kızılötesi ısıtıcıların seramik kaplı arka yüzeylerinin farklı yayılım değerlerine sahip olduğu senaryolar içinde sayısal çalışmalar yürütülmüştür. Elde edilen bilgiler ile KKI'ların kontrolünün daha kolay ve hassas bir şekilde yapılıp kullanımı sırasında oluşan zaman kayıpları ile KKI'nın yayacağı yoğun ısıtmanın ısıtılan ürün üzerindeki olumsuz etkilerinin önüne geçmek hedeflenmektedir. Bununla birlikte, bir sayısal model oluşturularak yoğun deneysel çalışmaların önüne geçilmesi hedeflenmiştir. Oluşturulan sayısal modelin (SM) doğrulanması ile bir ısıtma düzeneğinin tasarımı için yapılacak denemelerin sayısı ciddi oranda azaltılabilecektir. Böylece, KKI'lar ile karşılılarında duran herhangi bir yüzey üzerinde istenen üniform ısı akısı oluşturulabilmektedir. Bu çalışmada kullanılan KKI'ların çapı 0,011 m ve uzunlukları ise 0,295 m'dir. KKI'lar karşısında yer alan x-y düzlemi üzerindeki ısı akısı dağılımını elde etmek için gerçekleştirilecek faaliyetler sırasında hem x hem y ekseninde simetrik noktalardan ölçümler alınabilmesi için 4 adet KKI'nın düşey olarak ve aralarındaki uzaklık ise 100 mm olacak şekilde yerleştirilmesine karar verilmiştir. KKI'ların sayısı ve yerleşimleri diğer sayısal ve deneysel çalışmalar sırasında da aynı tutulmuştur.

Bu çalışma, KKI'lar hakkında genel bilgi toplayarak karakteristikleri hakkında bilgi birikimi sağlamayı, KKI'lar ile ilgili literatürde yapılan çalışmaların incelenmesini ve bir grup KKI'nın sayısal modelinin oluşturularak çözümlenmesini kapsamaktadır. Ayrıca, tasarlanan ısı test düzeneği (ITD) ile bu KKI'ların birçok farklı parametre için alınacak ısı akısı ölçümlerini, elde edilen deneysel veriler ile sayısal modelden elde edilen verilerin kıyaslanmasını ve sonuçların değerlendirilmesini içermektedir.

Bu tezde, tasarlanan ITD ve oluşturulan SM yardımıyla hem deneysel hem de sayısal bir çalışma yöntemi izlenmiştir. Sayısal hesaplamalar, Ansys yazılımının Steady State Thermal modülü yardımıyla çözümlenmiştir. Sıcaklık ve nem kontrollü bir oda içerisinde, tek bir eksen boyunca hareket edebilen (z eksen) dikey oryantasyonda yerleştirilmiş dört adet KKI'dan ve karşısına yerleştirilmiş, 2 ekseninde hareket edebilen (x ve y eksen) bir ısı akısı sensöründen (IAS) oluşan ITD ile KKI'nın farklı güç değerlerine, IAS'ın farklı uzaklık,

konum ve açılara sahip olduğu durumlar için ısı akısı ölçümleri alınmıştır. Bu ölçümler, KKI'ların elektriksel güçleri 100 W ile 500 W aralığındayken, IAS'ın ölçüm noktaları x ve y eksenlerinde -18 cm ile +18 cm, z ekseninde 25 cm ile 75 cm aralığında ve IAS'ın açısı ise 0° ile 150° aralığında iken alınmıştır. Ölçüm sonuçları, oluşturulan SM ile kıyaslanmış ve SM doğrulanmıştır. Doğrulan SM yardımıyla KKI'ların vakum ortamında çalıştıkları ve seramik kaplı arka yüzeylerinin yayınım değerlerinin (ϵ) 0,3, 0,5 ve 0,7 olduğu senaryolar için de SM'ler oluşturulup çözümlenmiştir. Elde edilen tüm bu veriler ışığında KKI'ların farklı parametreler altında sergiledikleri ısı performans hakkında bilgi edinilmiş ve gelecek çalışmalara ışık tutacak deneysel ve sayısal verilere ulaşılmıştır.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Bu başlık altında yürütülen literatür araştırmasında, KKI'ların, pek çok farklı alanda ve çeşitli parametreler etkisi altında çalıştıkları durumlar için gerçekleştirilmiş sayısal ve/veya deneysel çalışmalar ile bu konuya paralel ve teorik bilgiyi pekiştirecek çalışmalar incelenmiş ve özetlenmiştir.

Forsythe ve ark., [5] tungsten ve tungsten lambalarının radyasyon karakteristiklerini inceleyerek önceki çalışmalardaki hesaplama hatalarını düzeltmeyi amaçlamıştır. Çalışma, tungstenin radyasyon yoğunluğunun sıcaklıkla olan ilişkisini detaylı bir şekilde incelenmiş ve spektral radyasyonun dalga boyuna bağlı dağılımını incelemiştir. Forsythe ve ark., Planck'ın radyasyon yasasını kullanarak tungstenin farklı sıcaklıklardaki spectral radyasyon yoğunluğunu yeniden hesaplamış ve deneysel verilerle uyumlu hale getirmiştir. Sonuçlara göre, tungsten yüzeyindeki radyasyon yoğunluğu, 2000 K sıcaklıkta yaklaşık $1,5 \times 10^6 \text{ W/m}^2$ değerine ulaşırken, bu değer 3000 K sıcaklıkta $7,0 \times 10^6 \text{ W/m}^2$ seviyesine çıkmıştır. Ayrıca, hesaplanan maksimum radyasyon yoğunluğuna tekabül eden dalga boyu değerinin, sıcaklık artışıyla beraber azaldığı gözlemlenmiştir. Örneğin, 3000 K sıcaklıkta hesaplanan maksimum radyasyon yoğunluğuna 966 nm dalga boyunda ulaşılırken, 4000 K sıcaklıkta bu dalga boyu 725 nm'ye, 5000 K sıcaklıkta ise 580 nm'ye kaymaktadır. Başka bir deyişle, sıcaklığın artışıyla beraber elde edilen radyasyon enerjisinin büyük bir bölümünün daha küçük dalga boyu değerlerinde ulaşıldığını göstermektedir. Bu bulgular, yüksek sıcaklıkta çalışan tungsten lambalarının radyasyon verimliliğinin sıcaklığa ve dalga boyuna bağlı olarak nasıl değiştiğine dair önemli bilgiler sağlamıştır. Çalışma, özellikle yüksek sıcaklık uygulamalarında tungstenin radyasyon özelliklerinin doğru şekilde modellenmesine önemli katkı sunmaktadır.

Hoshino ve ark., [6] argon ve azot gazlarının termal iletkenliklerini geniş bir sıcaklık aralığında belirlemek amacıyla çalışmalar gerçekleştirmiştir. Bu kapsamda, argon ve azot gazlarının ısı iletkenlik değerleri, deneysel veriler ve literatür bilgileri yardımıyla geniş bir sıcaklık aralık aralığı için hesaplanmıştır. Argon için 300 K ile 1000 K arasındaki sıcaklık değerleri için ısı iletkenlik değerleri 0,017 W/m.K ile 0,037 W/m.K aralığında ve aynı sıcaklık aralığı azot için ise bu değerleri 0,020 W/m.K ile 0,040 W/m.K aralığında olduğu belirtilmiştir. Ayrıca, argon ve azotun termal iletkenliklerinin sıcaklıkla nasıl değiştiği ve

her iki gazın da bu sıcaklık aralığında doğrusal olmayan bir eğilim gösterdiği bulunmuştur. Bu çalışma, özellikle KKI'ların içerisinde yer alan argonun termal iletkenlik özelliklerinin anlaşılabilmesi ve bu verilerin sayısal ve teorik hesaplamalarda kullanılabilmesi için önemli bir kaynak teşkil etmektedir.

Pan ve ark., [2] “Infrared Heating for Food and Agricultural Processing” isimli kitabında, kızılötesi ısıtma teknolojisinin gıda ve tarım ürünlerinin işlenmesindeki yenilikçi ve sürdürülebilir uygulamalarını ele almaktadır. Kızılötesi ısıtma, yüzeyden başlayan hızlı ısınma özelliği sayesinde kurutma, dezenfeksiyon, mikrobiyal kontrol, kavurma ve pişirme gibi işlemlerde enerji verimliliği ve ürün kalitesinde önemli avantajlar sağladığı belirtilmiştir. Ayrıca, kızılötesi ısıtmaya maruz bırakılan tarım ürünleri üzerinde gerçekleştirilen deneylerle elde edilen, ürünlerin, belirli sıcaklık ve nem hedeflerine ulaşma süreleri ve işlem sırasındaki enerji tüketimi verileri göz önüne alınarak, kızılötesi ısıtma teknolojisinin geleneksel yöntemlere kıyasla %20-%50 daha az enerji tükettiği ve işlem sürelerini kısalttığına değinilmiştir. Bunun yanında, kızılötesi ısıtma teknolojisinin, mikrobiyal kontrollerde ve gıda güvenliğini artırmada etkili olduğu belirtilmiştir. Bu bulgular, kızılötesi ısıtmanın gıda ve tarım sektöründe hem enerji tasarrufu hem de işlem kalitesini optimize etmek için güçlü bir alternatif olduğunu vurgulamaktadır.

Pettersson [4] yaptığı tez çalışmasında, kızılötesi kurutma teknolojisini kağıt üretim işlemi sırasında kullanılan geleneksel kağıt kurutma yöntemleriyle kıyaslamaktadır. Bu geleneksel yöntemler arasında konvektif kurutma (sıcak havanın kağıt yüzeyine üflendiği) ve kondenserli kurutma (hava ile nemin kondensasyonu sağlanarak kurutma) gibi yaygın yöntemler yer almaktadır. Pettersson, kızılötesi kurutma teknolojisinin bu geleneksel yöntemlere göre daha hızlı ve enerji verimli olduğunu bulmuştur. Özellikle, kızılötesi ısıtma teknolojisinin kağıdın nem içeriğini daha kısa sürede ve daha az enerji harcayarak düşürebildiği gösterilmiştir. Tezdeki sonuçlara göre, kızılötesi kurutma sistemi geleneksel konvektif kurutmaya göre %30-40 daha az enerji tüketmektedir. Ayrıca, geleneksel bir sistemde kağıdın nem içeriğini %10'dan %1'e düşürmek için geçen süre 10 dakika iken, IR kurutma sisteminde bu süre 7 dakikaya inmiştir. Ayrıca, IR kurutma sistemi, enerji tüketimini %25 oranında azaltarak geleneksel sistemlere göre daha verimli sonuçlar elde etmiştir. Pettersson'ın deneysel ölçümleri, IR kurutmanın aynı kurutma süresi ile geleneksel yöntemlere kıyasla %20 daha yüksek bir su buharlaşma hızı sağladığını da göstermektedir.

Bu bulgular, kızılötesi teknolojisinin enerji tasarrufu sağlama ve daha kısa kurutma süreleri elde etme potansiyeline sahip olduğunu vurgular niteliktedir.

Slavov ve ark. [1] bir KKI için kullanılan alüminyum yansıtıcının (reflektör) yüzey özelliklerinin (yüzey pürüzlülüğü ve deseni), KKI'nın ısıtma performansı üzerindeki etkisini deneysel çalışmalar ile incelemiştir. Çalışmada, CNC freze tezgâhı kullanılarak bilye bileyleme (BB) yöntemiyle işlenen yansıtıcılar ile KKI'nın ısıtma performansı artırılmaya çalışılmıştır. Deneysel çalışmalarda dört farklı yansıtıcı test edilmiş ve sonuçlar FLIR marka bir termografik kamera kullanılarak alınan görüntüler ile değerlendirilmiştir. Bu görüntüler, ImageJ yazılımı kullanılarak işlenmiş ve analiz edilmiştir. Deney sonuçlarına göre, BB yöntemiyle işlenen yansıtıcıların ısıtma sağladığı yüzey alanı, düz cilalı yansıtıcıya kıyasla %25'e kadar artmıştır. En büyük ısıtma alanı %48,51 ile küçük hücre yüzey desenine sahip yansıtıcıda gözlenmiştir. Buna karşılık, düz cilalı yansıtıcının üzerinde görülen en yüksek yüzey sıcaklığı 33 °C iken, BB ile işlenmiş yüzeylerdeki maksimum sıcaklık değerlerinin ortalama %16 daha düşük olduğu görülmüştür. Yüzey pürüzlülüğü ve yüzey deseni gibi yüzey parametrelerinin KKI'nın ısıtma kabiliyeti üzerindeki etkisinin sınırlı olduğu görülmüştür. Sonuç olarak, BB yöntemi ile farklı yüzey desenlerinin oluşturulmasının, yansıtıcıların saçılma özelliklerini optimize ederek KKI'ların verimliliğini artırabileceği gösterilmiştir.

Kunze ve ark. [7], yaptıkları çalışmada, plazma ile temas eden bileşenlerin yüksek ısı akısı altında nasıl davrandığını incelemek için SIRHEX adında bir deney düzeneği tasarlamışlardır. Isıtma yöntemleri üzerine yapılan çeşitli incelemelerin ardından, tungsten filamentli içeren ve kuvars cam tüp içinde bir tarafı yansıtıcı kaplamalı KKI'ların kullanılmasına karar vermişlerdir. Isıtılan yüzey alanının görece büyük olması (0,34 m²) nedeniyle, homojen bir ısı dağılımı sağlamak için birden fazla KKI kullanılması gerektiğini gözlemlemişlerdir. Bu KKI'lar ile yapılan deneyler, bu KKI'ların, 500 kW/m²'ye kadar ısı akısı üretme ve homojen ısı akısı sağlama kapasitesine sahip olduklarını göstermektedir. Çalışmada, KKI'ların, sabit ısı akısı testlerinin yanı sıra geçici ve fasılalı ısı yüklerini de simüle edebilme yeteneğine sahip olduğunu belirtmişlerdir.

Kunze ve ark. [8] tarafından yapılan bir diğer çalışmada ise, SIRHEX deney düzeneği ile gerçekleştirilen testlerde kullanılan KKI'ların ısı akısı dağılımını optimize etmek için sayısal ve deneysel çalışmalar yürütülmüştür. Çalışmada, özellikle KKI'ların test düzeneğindeki

yerleşimleri, hedef yüzeye olan uzaklıkları, eğim açıları ve hedef yüzey geometrisi gibi kritik parametreler detaylı bir şekilde incelenmiştir. Bu parametrelerin ısı transferi üzerindeki etkileri, hem sayısal hem de deneysel olarak değerlendirilmiştir ve önemli bilgiler elde edilmiştir. Örneğin, hedef yüzey üzerindeki ısı akısı homojenliği %90'ın üzerine çıkarılmış ve enerji kayıpları önemli ölçüde azaltılmıştır. Özellikle, KKI'ların eğim açılarının optimize edilmesiyle, belirli yüzey bölgelerinde aşırı ısınma veya soğuma gibi istenmeyen etkiler minimize edilmiştir. Ayrıca, hedef yüzey ile KKI'lar arasındaki mesafe optimize edildiğinde, toplam ısı transfer verimliliğinde %15'e varan iyileşmeler gözlemlenmiştir. SM'i oluştururken ANSYS Fluent yazılımından yardım alınmış ve yüzeyden yüzeye ısıtım modeli kullanılmıştır. Çalışmanın sonucu olarak Kunze ve ark., optimize edilmiş bir KKI konfigürasyonu ile hedef yüzey üzerinde homojen bir ısı akısı dağılımı elde etmeyi başarmışlardır.

Monteix ve ark. [9] gerçekleştirdiği çalışmada, polipropilen ve polikarbonat gibi termoplastik polimerlerin, kızılötesi ısıtmaya maruz kaldığı durumları deneysel ve sayısal olarak incelemiştir. Çalışmada, kızılötesi ısıtma altında malzeme yüzeyindeki sıcaklığın homojenliği ve kullanılan KKI'nın ısı verimliliği analiz edilmiştir. Deneysel sonuçlar, kızılötesi ısıtıcıların 1000-2000 W/m² radyasyon yoğunluğu altında çalıştırıldığında, malzeme yüzey sıcaklığını 15 saniye içinde 150 °C'ye, 30 saniye içinde ise 250 °C'ye çıkardığını göstermiştir. Sayısal analizlerde, ANSYS Fluent yazılımı kullanılarak kızılötesi radyasyonun bu malzemeler üzerindeki etkisi sonlu elemanlar yöntemiyle modellenmiştir. Bu model, malzemelerin termal iletkenliği, özgül ısı ve optik özelliklerini (emilim, yansımaya) dikkate almıştır. Simülasyonlar, yüzey sıcaklık profillerinin deneysel verilerle uyumlu olduğunu ve kızılötesi ısıtmanın işlem süresini %30 oranında kısalttığını ortaya koymuştur. Analiz sonuçları, sıcaklık dağılımının homojenliği için malzemenin optik özelliklerinin kritik olduğunu vurgulamış ve radyasyon emilimi yüksek malzemelerde %20 daha hızlı ısınma gözlemlenmiştir. Bu çalışma, kızılötesi radyatif ısıtmanın hızlı ve enerji verimli bir yöntem olduğunu ve malzeme şekillendirme uygulamalarında geleneksel ısıtma yöntemlerine güçlü bir alternatif sunduğunu göstermiştir.

Schmidt ve ark. [10], P.E.T. şişelerin KKI'lar yardımıyla ön ısıtması işlemi sırasında gerçekleşen ısı transferinin simüle etmek için bir SM oluşturmuş ve sonuçları deneysel veriler ile kıyaslamışlardır. SM ile KKI içindeki filamentin sıcaklığının, sağlanan elektrik

gücünün etkisiyle nasıl değiştiğini hesaplamışlardır. Kızılötesi ısıtmaya tabi tutulan numuneler üzerinden alınan sıcaklık ölçümleri ile sayısal sonuçlar kıyaslanmış ve aralarında %10'luk bir fark olduğu gözlemlenmiştir.

Bu alanda yapılan bir diğer çalışmada, Le ve ark. [11], (Toshiba 1000 W-235 V) KKI'ların geri dönüştürülmüş ve ön işleminden geçmiş P.E.T. numunelerin ısı davranışları üzerindeki etkilerini incelemeyi amaçlamıştır. Bu numuneleri ısıtmak için tasarlanan düzenek yatay olarak yerleştirilmiş ve arkalarına bir seramik reflektör levha yerleştirilen 6 adet KKI'dan oluşmaktadır. Deneyisel çalışmalar sırasında oluşan sıcaklık dağılımını gözlemleyebilmek için bir kızılötesi kamera kullanmışlardır. SM, özel olarak geliştirilmiş bir yazılım olan RAYHEAT kullanılarak ışın izleme (ray tracing) metoduyla modellenmiş ve elde edilen sayısal veriler, numunelerin sıcaklık dağılımını simüle etmek amacıyla ticari bir yazılım olan COMSOL Multiphysics ile analiz etmişlerdir.

Ali ve Mahmood'un [12] yaptığı çalışmada, havalandırılan bir açıklık içinde konumlandırılan silindirik cisim ve etrafındaki hava ile gerçekleştirdiği ısı transferi sırasında silindirin yayıcılık katsayısının (ϵ) artmasıyla radyasyonla ısı transferi miktarının taşınım ile olan ısı transferi miktarına baskın hale geldiğini gözlemlenmiştir. KÖİ'lerin yüksek radyasyonla ısı transferi kapasitesine sahip olduğu bilindiğinden ve ayrıca KKI'ların silindirik bir dış yüzeye sahip olması nedeniyle, bu çalışma bir KKI'nın çalışması sırasında etrafındaki ortam ile arasındaki ısı transferi mekanizmasını anlaşılmasına katkı sağlamaktadır.

Brown ve ark. [13] bir KÖİ'nin karakterizasyonu amacıyla yaptıkları çalışmada, endüstriyel bir KÖİ'nin gücünü 600 W'a kadar çıkararak ısıtıcının verimini hesaplamış ve bir IAS'ı ısıtıcının önünde 50 cm $\times$ 50 cm $\times$ 50 cm ebatlarında bir hacim içerisinde 3 eksen boyunca hareket ettirerek alınan ölçümler ışığında bir ısı akısı haritası elde etmişlerdir. Benzer bir çalışma olarak, Butturini ve Ngo [14] bir IAS yardımıyla ısıtıcıların karşısından aldıkları ölçümlerle 4 farklı tip KÖİ'nin ısı haritasını çıkarmışlardır. Yaptıkları çalışma bir rapor niteliğinde olup matematiksel bir model içermemektedir.

Dangerskog [15] yaptığı çalışmada, ısıtma ekipmanı olarak iki farklı tip KÖİ kullanmıştır. Bunlardan biri, 220V değerinde filament sıcaklığı 2340°C olan ve yakın kızılötesi bölgede 1,24 μ m'lik dalga boyunda ışıma yapan KKI (PHILIPS 1 kW, tip 13915X). Diğeri ise 220

V'de 680°C sıcaklığa ulaşan ve uzak kızılötesi bölgede 3,0 μm 'lik dalga boyunda ısıtma yapan boru şeklinde metal kılıflı elektrikli ısıtıcılardır (Backer 500 W, tip 9N5.5). Bu çalışmada, radyasyonun dalga boyu azaldıkça penetrasyon kapasitesinin arttığını gözlemlemiştir. Bu da, kısa dalga radyasyonun uzun dalga radyasyona göre daha yüksek nüfuz etme kapasitesine sahip olduğunu göstermektedir.

Chandrakar ve ark. [16] yaptıkları çalışmada, dikey bir boş silindirde iletim, doğal konveksiyon ve radyasyon süreçlerinin bir arada nasıl gerçekleştiğini ve bu süreçlerin ısı transferine olan etkilerini incelemiştir. Araştırmada, silindirin kalınlığı, sıcaklık farkı ve yüzey özellikleri gibi parametrelerin ısı transferi üzerindeki etkileri ANSYS Fluent yazılımı yardımıyla sayısal yöntemler kullanılarak analiz etmişlerdir. Sonuçlar, yüzey emisivitesindeki artışın toplam ısı transferini %20-30 oranında artırabileceğini ve büyük sıcaklık farklarında radyasyonun baskın bir mekanizma haline geldiğini göstermektedir.

Er ve ark. [17] yaptıkları çalışmada, yatay olarak yerleştirilmiş bir KKI'nın ısı performansını analiz etmek amacıyla hem deneysel hem de sayısal çalışmalar gerçekleştirmiştir. Sayısal çalışmalar için geliştirilen SM, kuvars tüp ve tungsten filamentin geometrik, ısı ve optik özelliklerini dikkate alarak ANSYS yazılımı yardımıyla oluşturmuşlardır. Deneysel çalışmalarda, bir ısı akısı sensörü kullanılarak, bu sensörün farklı pozisyon (0 – 40 cm) ve KKI'nın farklı güç seviyelerindeki (250 W, 500 W ve 750 W) ısı akısı değerleri ölçülmüştür. Veriler arasındaki hata oranlarının en düşük %0,3 ile en yüksek %6,3 olarak hesaplanmasıyla deneysel veriler ile sayısal veriler arasında güçlü bir uyum gözlemlemişler ve SM'in doğruluğunu kanıtlamışlardır.

Ash [18], KKI'lar kullanılarak oluşturulan bir ısıtma sisteminin ısı performansının incelediği bir çalışma gerçekleştirmiştir. Bu sistem, özellikle uzay araçlarının Dünya'ya dönüşü sırasında karşılaştığı yüksek sıcaklık koşullarını simüle etmek için tasarlanmıştır. Bu sistemde 45 adet tungsten filamentli KKI, 1,27 cm aralıklarla yerleştirilmiştir ve arkalarına, su soğutmalı bir alüminyum reflektör konumlandırılmıştır. Deneysel ölçümlerde, 50 mm $\times$ 50 mm'lik bir alan üzerinde yaklaşık 50 kW/m²'lik bir ısı akısı değerine ulaşmışlardır. Sayısal çalışmalar sırasında kullanılmak için bir Fortran kodu oluşturulmuştur. Deneysel veriler, özel olarak kalibre edilmiş sensörlerle toplanmış ve sayısal verilerle büyük ölçüde uyum sağlamıştır. Özetle bu çalışma, lambaların arasındaki mesafenin, reflektörün

geometrisinin ve sistem tasarımının bir yüzeyin ısı dağılımını nasıl etkilediğini göstermişlerdir.

Bu çalışmanın devamı niteliğinde Ash ve Turner [19] tarafından yapılan bir diğer çalışmada, tungsten filamentli, kuvars tüple kaplanmış ve reflektörlerle desteklenmiş KKI'ların ısıtım karakteristiklerini incelemek için daha önceki çalışmada oluşturulan Fortran kodu kullanılmıştır. Ayrıca, bu kodun KKI'ların sadece vakum koşullarında çalıştıkları senaryolar kullanılabilir olduğu görülmektedir. Sistem tasarımı sırasında reflektörlerin etkisini, lambalar arası etkileşimleri ve ortamın optik özelliklerinin termal radyasyonu nasıl etkilediğini detaylı şekilde incelenmiştir. Örneğin, yansıtıcı elemanların radyasyon yoğunluğunu artırdığı ve daha homojen bir ısı akısı sağladığı belirtilmiştir. Altı KKI'lı sistemlerde, KKI'ların birbirleriyle etkileşimlerinin, toplam ısı akısının homojenliğini nasıl etkilediği detaylı şekilde analiz edilmiştir. Sayısal ve deneysel veriler, lambalar arasındaki mesafenin ısı akısı yoğunluğunu belirgin şekilde değiştirdiğini göstermişlerdir. Kuvars cam kılıfların, radyasyon enerjisinin %10-15'lik bir kısmını absorbe ettiği ve sistemin genel verimliliğini düşürdüğü tespit edilmiştir. Ayrıca, reflektörlerle desteklenen sistemlerde, KKI'nın orta kısımlarındaki ısı akısının yoğunluğunu, %20 oranla daha yüksek olduğunu tespit etmişlerdir. Bu da yansıtıcıların kritik bir tasarım unsuru olduğunu ortaya koymuştur.

Xing ve ark. [20] çalışmalarında, kuvars lambalardan oluşan bir ısıtma sisteminin düz bir yüzey üzerindeki ısı akısının dağılımını incelemiş ve KKI'ların kullanımına yönelik öneriler sunmuştur. Monte Carlo Metodu ile geliştirilen model, deneysel verilerle kıyaslanmış ve farkları %0,69 ile %6,75 mertebelerinde olduğunu gözlemlemişlerdir. KKI'lar arasındaki mesafenin 5 cm'den az tutulmasının, ilgili yüzeyde yoğun bir ısı akısı dağılımı elde edilmesini sağladığı bulunmuştur. Ayrıca, KKI'lar arasındaki mesafenin 10 cm olduğu durum için elde edilen ısı akısı dağılımının oldukça homojen olduğu görülmektedir. KKI'ların arkasına reflektör eklenmesi, radyasyon enerjisinin daha verimli yönlendirilmesine olanak tanımış, böylece sistem performansı önemli ölçüde artırılmıştır. Bununla birlikte, filament uçlarına 10 cm'den yakın bölgelerde, kenar etkileri nedeniyle ısı akısında düşüşler olduğunu tespit etmişlerdir.

Miller ve ark. [21] çalışmalarında, bir uzay aracının ısı denge testlerini gerçekleştirmek için bir KKI test düzeneği tasarımı yapmışlar ve performansını analiz etmişlerdir. Thermal Desktop yazılımını kullanarak sayısal modeli oluşturulan ve toplamda 84 KKI'dan oluşan

ve $2,3 \text{ m} \times 4,8 \text{ m}$ boyutlarındaki bu düzenek, uzay aracının yüzeyine gelen ve 1000 W/m^2 'ye kadar ulaşan solar ısı akısını yüksek doğrulukla sağlayabilmiştir. Sayısal veriler ile deneysel verilerin kıyaslanmasıyla, ısıtılan yüzeyin merkezinde %10 hata payıyla istenen ısı akısı değerine ulaşılabilirdiği ve bu ısı akısını %5 kararlılıkla sağlanabildiği görmüşlerdir.

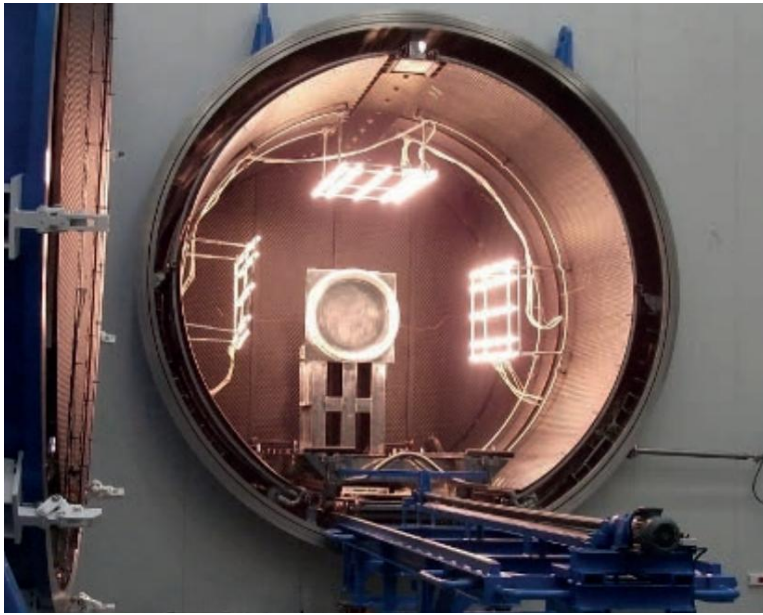
Buraya kadar bu tezin kapsamında yapılan çalışma ile alakalı olan akademik çalışmalar özetlenmiştir. Bu çalışmada yukarıda bahsi geçen çalışmalardan farklı olarak ANSYS Steady State Thermal modülü ve yüzeyden yüzeye ışıınım modeli kullanılarak bir SM oluşturulup 4 adet dikey yerleştirilmiş (PHILIPS marka 13195X/98 model) KKI'nın performanslarını etkileyen 6 parametre üzerine deneysel ve sayısal çalışmalar yürütülmüştür. Özellikle bu çalışmada kullanılan ITD ve SM, bu 6 parametrenin IAS üzerinden ölçülen ısı akısı değerine etkilerinin en belirgin şekilde görülebilmesine olanak sağlayacak şekilde tasarlanmıştır. Ayrıca sayısal ve deneysel veriler arasındaki uyum sayesinde literatüre doğruluğundan emin olunan bir SM kazandırmıştır.

3. YÖNTEM

Bu başlık altında, ilgili parametrelerin incelenmesi sırasında kullanılan ITD tasarımı, bileşenleri ve çalışma prensibini içeren bilgilerin yanında, oluşturulan SM'in tasarımı, belirlenen sınır şartları ve modelin çözümü sırasında kullanılan yöntemler detaylı şekilde açıklanmıştır.

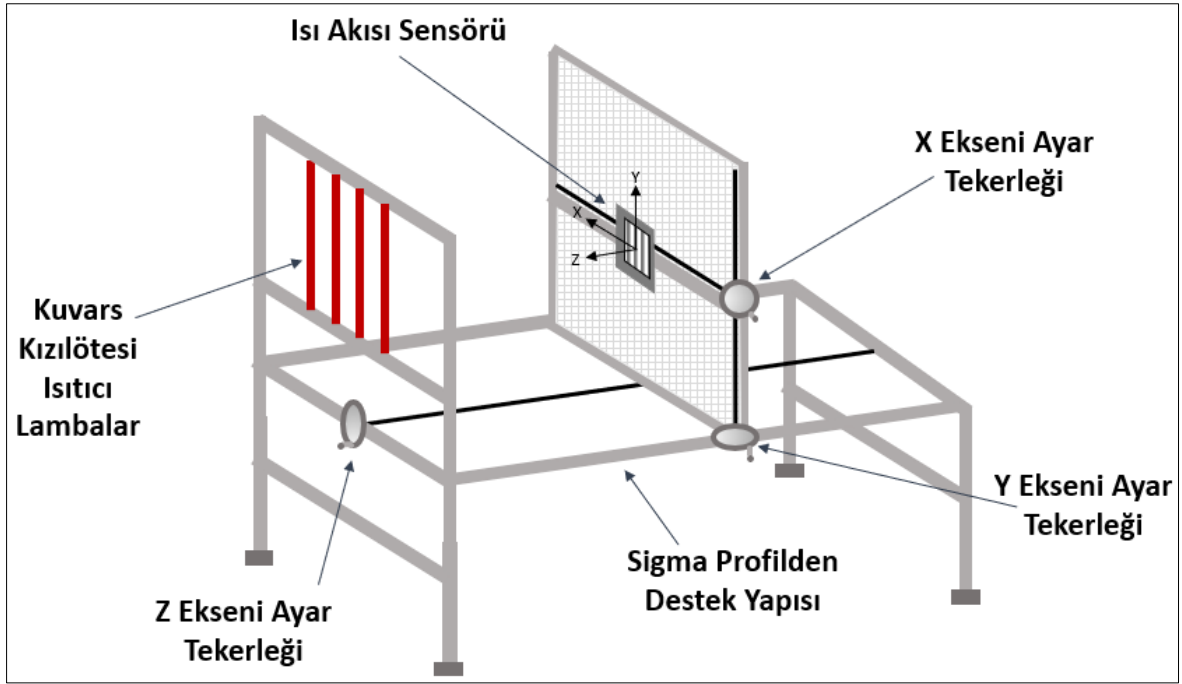
3.1. Isıl Test Düzeneği ve Yardımcı Ekipmanlar

Deneyisel çalışmalar, sıcaklık ve nem kontrollü bir ortam sağlayan, ISO-8 sınıfı temiz odada bulunan ısı vakum test sistemi (IVTS) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deneyisel çalışmalar sırasında kontrollü bir ortam sağlamak amacıyla kullanılan IVTS'nin görüntüsü Resim 3.1.'de verilmiştir.



Resim 3.1. IVTS görseli [22]

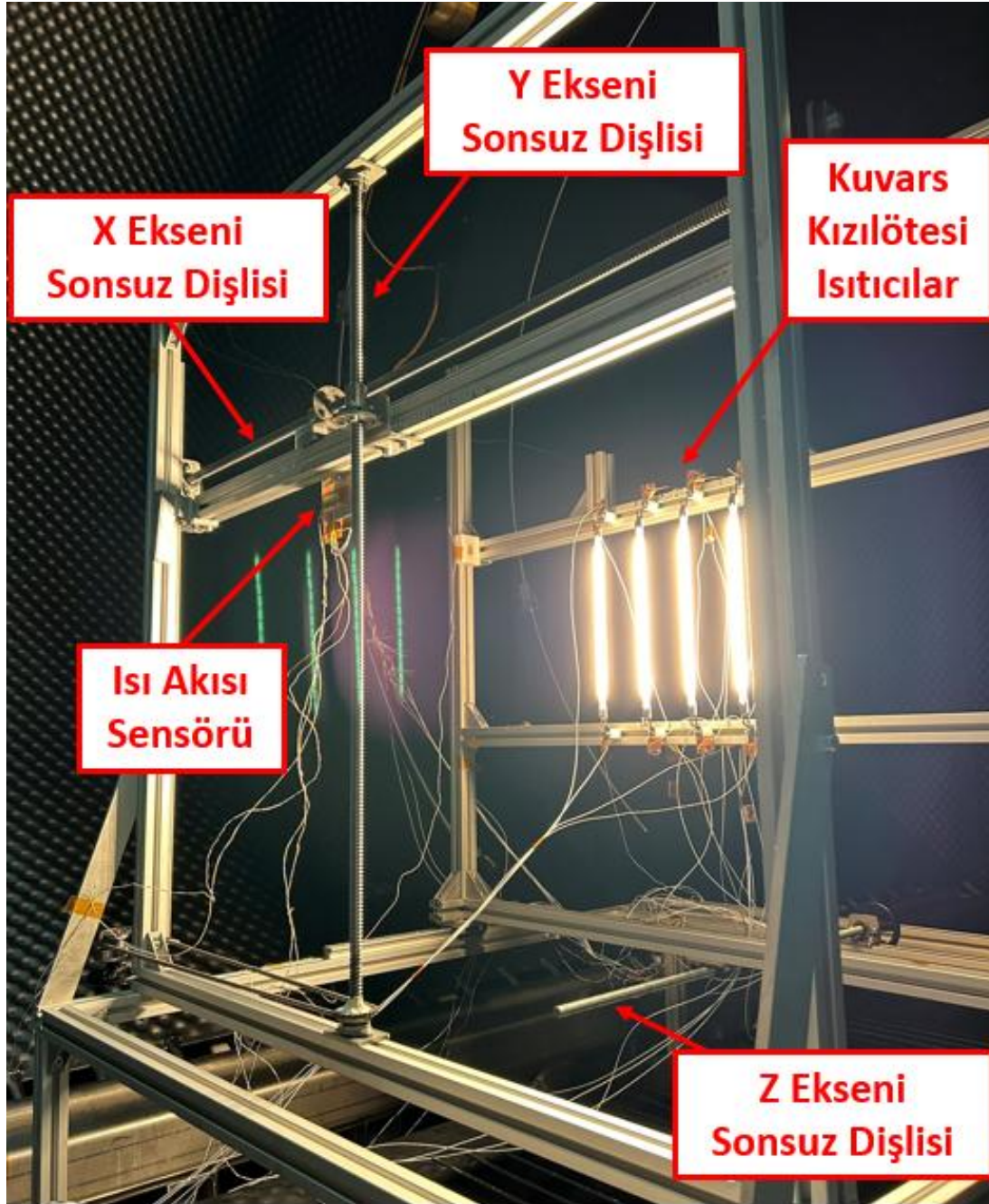
Bu çalışma için oluşturulmuş olan ITD, tüm yapıyı bir arada tutan sigma profil yapısından, dört adet düşey şekilde yerleştirilmiş KKI'dan, ısı akısını ölçebilmek için üç ekseninde ayrı hareket ettirilebilen bir IAS'dan ve test kablağından oluşmaktadır. ITD'yi oluşturan komponentlerin detaylı olarak gösterildiği şematik çizim Şekil 3.1.'de verilmiştir.



Şekil 3.1. ITD şematik gösterimi

ITD üzerinde yer alan KKI'ların ısındıkça değişen direnç değerlerinin birbirlerinin güç değerlerini etkilememesi için her bir KKI farklı birer güç kaynağına (GK) bağlanmıştır. ITD bir IVTS içerisine konumlandırıldığı için güç kaynakları ile kızılötesi lambalar arasında yaklaşık 20'şer metre uzunluğunda güç kablosu kullanılması ihtiyacı doğmuştur. Bu güç kabloları sahip oldukları direnç dolayısıyla, kullanımları sırasında, bir miktar enerjinin KKI'lara ulaşmadan yok olmasına neden olmaktadır. Bundan dolayı, deneysel çalışmalar sırasında KKI'lar üzerine düşen net gücü ölçebilmek için her birinin iki ucuna paralel birer kablo hattı eklenmiştir. Bu sayede GK'dan sağlanan elektrik gücü değil KKI'lar üzerine düşen net voltaj ve akım değerleri kalibrasyonlu bir multimetre (Fluke 289/IMSK) ile ölçülebilmektedir.

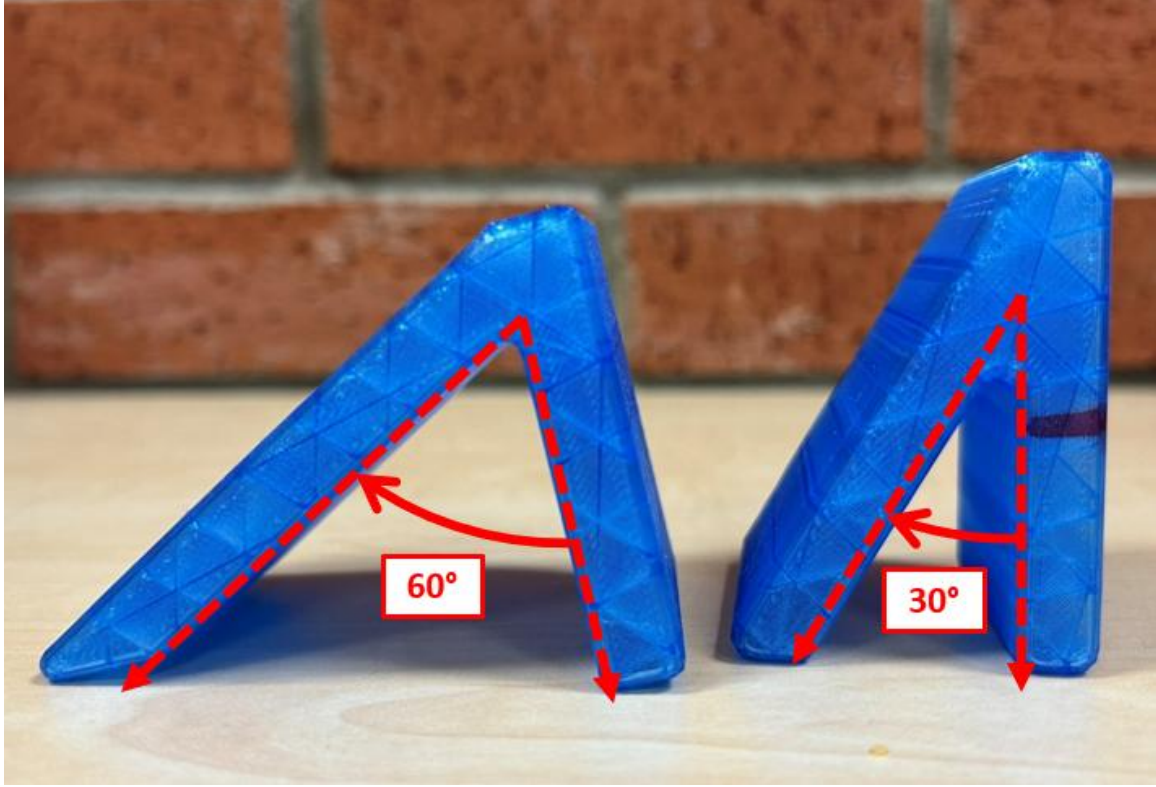
Resim 3.2.'de görseli verilmiş olan ITD, IAS'ın iki eksen (x ve y eksen) bağımsız olarak hareket edebilmesini ve KKI'ların bağlandığı çerçevenin ise tek eksen (z eksen) hareketini sağlayacak şekilde tasarlanmıştır. Bu üç eksen doğrultusundaki hareketi sağlayabilmek için dönme hareketini lineer harekete dönüştürebilen sonsuz dişli vida ve somun bağlantısı kullanılmıştır. Bu sonsuz dişlilerin döndürülmesini sağlayabilmek için her birinin ucuna birer döndürme tekerleği eklenmiştir.



Resim 3.2. ITD'nin IVTS içerisindeki yerleşimi

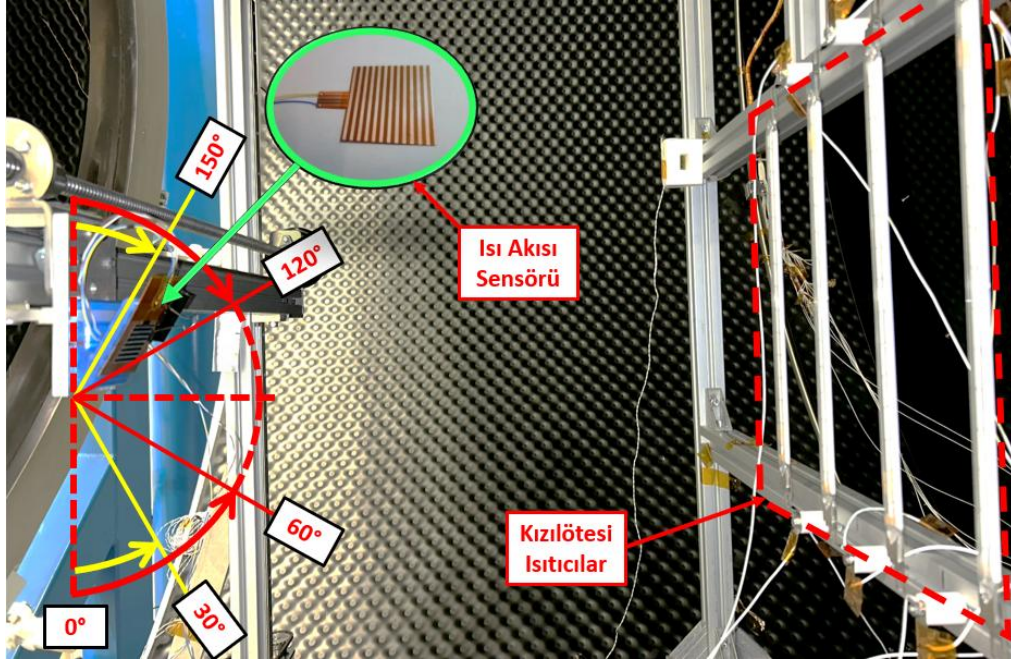
IAS'ın farklı açılarda aldığı ölçümleri gerçekleştirebilmek amacıyla farklı açi değerlerine sahip iki adet parça tasarlanmıştır. Resim 3.3.'te görselleri verilen bu parçalar üç boyutlu yazıcı ile PLA filament kullanılarak basılmıştır. IAS bu parçalar sayesinde 30° , 60° , 120° ve 150° eğimlerde de ITD'ye yerleştirilebilmiştir. Bu parçalar yerleştirildiklerinde yere göre dik konumda duran kısa kenarlarından, ITD'nin bir parçası olan ve x-y eksenini üzerinde hareket ettirilebilen düz metal parçaya çift taraflı bant ile yapıştırılıp IAS ise uzun olan kenar

üzerine bir metal kısıkaç ile tutturulmuştur. Resim 3.4.'te IAS'ın yerleştirildiği açılar ve KKI'lar karşısındaki yerleşimi gösterilmiştir.



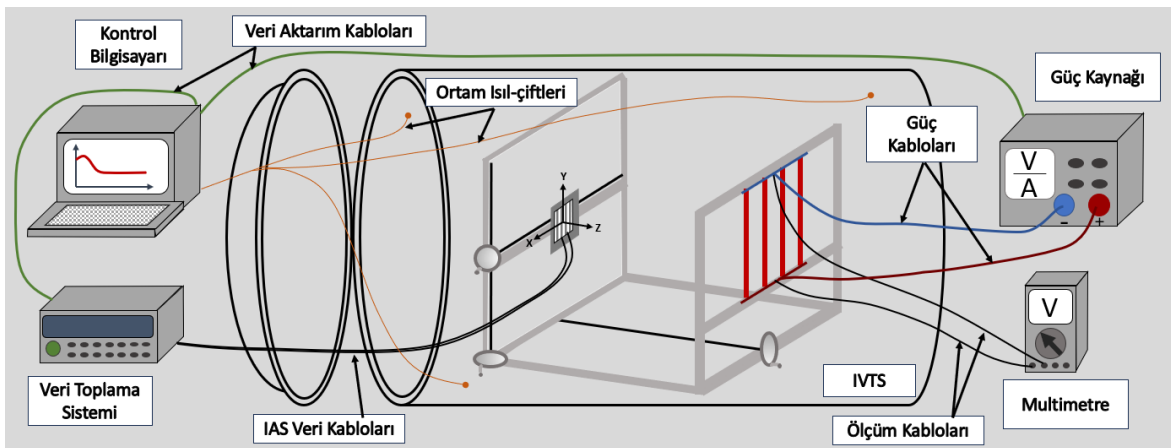
Resim 3.3. IAS'ın KKI'larla olan açısını değiştirmek için kullanılan parçaların görseli

Resim 3.4.'te görseli verilen ve ısı akısı ölçümleri sırasında kullanılan IAS Captec firmasının ürettiği standard bir radiant IAS'dır. Bu IAS'ın boyutları 30 mm × 30 mm, hassaslık değeri $4,9 \mu\text{V/W/m}^2$ ve çalışma sıcaklık aralığı $-200 / +250 \text{ }^\circ\text{C}$ 'dir [23]. IAS pasif bir sensör olup aynı anda iki adet ayrı ölçüme imkân sağlamaktadır. Bu ölçümlerden birisi IAS'ın üzerine düşen net ısı akısına karşılık gelen μV mertebesindeki voltaj değeri ve diğeri ise sensörün sıcaklığına karşılık gelen mV mertebesindeki voltaj değeridir. Net ısı akısı değerini hesaplayabilmek için IAS'dan alınan μV mertebesindeki voltaj değeri sensörün hassaslık değerine bölünür. Sensörün sıcaklığını ölçebilmek için ise veri toplama sistemi (VTS) üzerinden sensörün bağlı olduğu kanalları T tipi ısıl-çift olarak tanımlayıp veri toplama işlemi yapılmıştır.



Resim 3.4. IAS ve KKI'lar karşısındaki açısal yerleşimi

IAS'dan elde edilen ısı akısı ve sensor sıcaklığı verileri Keysight firmasının 34970A model VTS'si ve 34901A model numaralı 20 kanallı çoklayıcı (multiplexer) kartı yardımıyla toplanmıştır. Isı akısı ölçüm testleri sırasında test sisteminin kapısı kapatılıp temiz oda iklimlendirme sisteminin ITD üzerinde zorlanmış taşınım etkileri oluşturması engellenmiştir. ITD etrafındaki sıcaklık dağılımının (ortam sıcaklığı) gözlemleyebilmek için IVTS'nin içerisini tamamen saran ısıl çeper yapısının üzerinde yer alan ısıl-çiftlerden yardım alınmıştır. ITD üzerindeki KKI'lar aralarındaki uzaklık 100 mm olacak şekilde ITD üzerine yerleştirilmiştir. ITD ve yardımcı sistemlerin altyapısının şematığı Şekil 3.2'de verilmiştir.



Şekil 3.2. ITD ve yardımcı sistemlerin şematik gösterimi

3.2. Isıl Sayısal Model ve Analiz Parametreleri

Bu bölüm altında, bu tez çalışması kapsamında tasarlanan SM'i oluşturan unsurlar, bu unsurların geometrik özellikleri, yerleşimleri, atanan sınır şartları ve ANSYS tarafından arka planda kullanılan eşitlikleri hakkında bilgi verilmiştir. Bunlara ek olarak, sınır şartlarını tanımlamak için gerekli olan tüm T_f , T_k , ve ϵ_f gibi önemli parametrelerin değerlerinin elde edilmiş yöntemleri detaylıca açıklanmıştır.

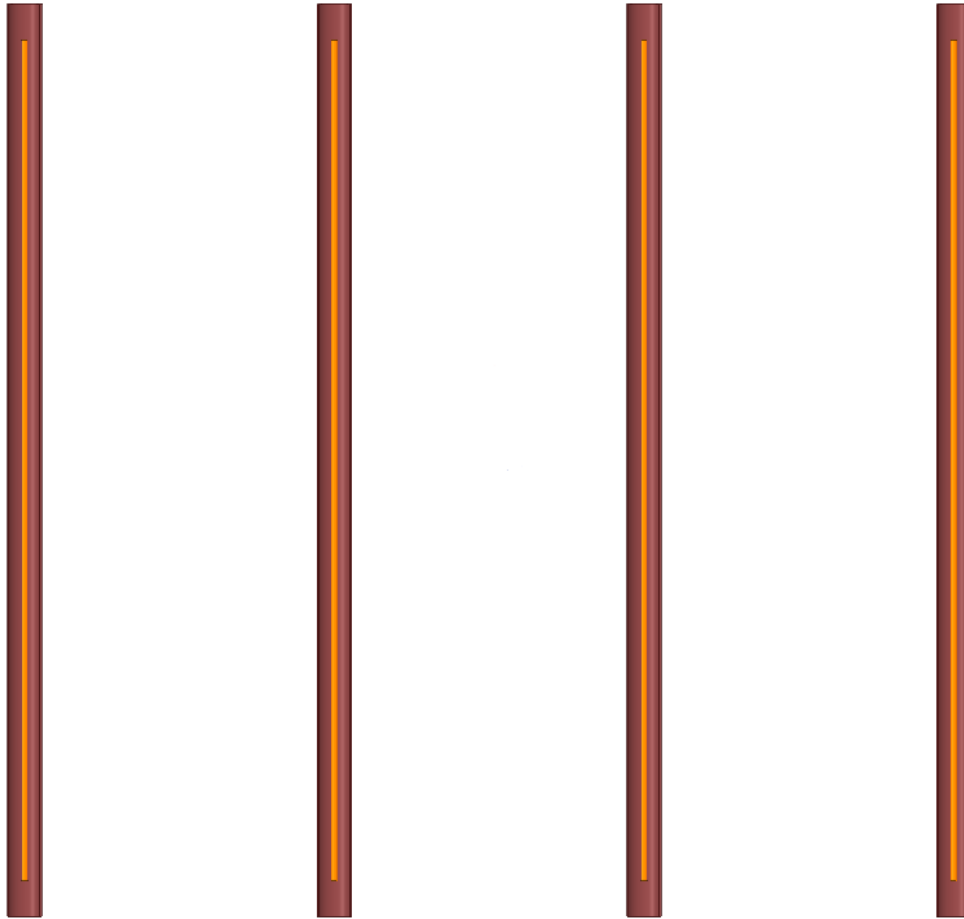
3.2.1. Isıl sayısal model

SM, ticari bir termal analiz yazılım olan Ansys yazılımının Steady State Thermal modülü kullanılarak oluşturulmuş ve yüzeyden yüzeye (surface to surface) ışıınım modeli kullanarak çözülmüştür. SM oluşturulurken, modellenenecek olan KKI sayısının dört adet olması ve IAS'ın konumunun üç eksen üzerinde de hareket ettirilmesi gerektiği için üç boyutlu bir SM oluşturulmasına karar verilmiştir.

SM içerisinde KKI'lar ve IAS sahip oldukları geometrik boyutlara sadık kalınarak modellenmiştir. KKI'ların katı modeli oluşturulurken çözüm sırasında ihtiyaç duyulan hücre sayısını makul tutabilmek ve sınır şartlarının doğru tanımlanabilmesi için geometri üzerinde basitleştirme yoluna gidilmiştir. Bu kapsamda, KKI'nın dışındaki silindirik kuvars cam kılıf, sadece seramik kaplı olan arka kısmını temsil edecek şekilde ve içi boş yarım bir silindir olarak tasarlanmıştır. Tasarlanan bu yarım silindirin çapı ve uzunluğu gerçek boyutlara sadık kalınarak (d_k ve L_k) sırasıyla 0,011 m ve 0,295 m olarak alınmıştır. KKI'ların dışındaki cam kılıfın ön bölümünde bulunan kısmın şeffaf olması ve bu yüzden ışıınım ile ısı transferi açısından ihmal edilebilir olmasından dolayı şeffaf ön kısım modellenmemiştir. Şeffaf ön kısmın aksine, kuvars cam kılıfın arka bölümünde yer alan seramik kaplı kısmın emisivite değerinin ve KKI'nın çalışması sırasında ulaştığı sıcaklık değerlerinin oldukça yüksek olması nedeniyle ışıınım ile ısı transferine etkisi oldukça büyüktür.

KKI'nın bir diğer bileşeni olan filamentin modellenmesi sırasında da mevcut geometriyi basitleştirme yoluna gidilmiştir. Normal şartlarda tungsten filament, birim uzunluktaki direnci arttırabilmek için sıkı ve spiral şeklinde sarılmış bir tel iken, SM'i oluştururken tasarlanan filament ise gerçek uzunluğu (0,272 m) ve çapına (2×10^{-3} m) sadık kalınarak oluşturulan bir silindirden ibarettir. Tungsten filamentin çevresiyle olan ısı transferi ilişkisi

incelendiğinde, spiral olarak sarılan ve aslında içinde oldukça küçük ve silindirik bir boşluğa sahip olmasına rağmen, etrafını saran diğer bileşenler ile gerçekleştirdiği ısı transferi filamentin dış yüzeyinden gerçekleşmektedir. Ayrıca, aslında filamentin dış yüzeyi incelendiğinde bir telin sıkıca spiral şekilde sarılmasıyla meydana gelmesinden dolayı girinti ve çıkıntılardan oluşmaktadır. Ancak filamenti oluşturan tungsten telin çapının oldukça küçük olması nedeniyle SM için oluşturulan filament modelinde bu girinti ve çıkıntılar ihmal edilip dış yüzey pürüzsüz olarak tasarlanmıştır. KKI'ların SM içerisindeki yerleşimi, KKI'ların ITD üzerindeki yerleşimleri referans alınarak, y eksenine paralel şekilde düşey oryantasyonda ve her birinin merkezi arasındaki uzaklık 100 mm olacak şekilde yapılmıştır. SM için tasarlanan KKI'ların görseli Şekil 3.3.'te verilmiştir.



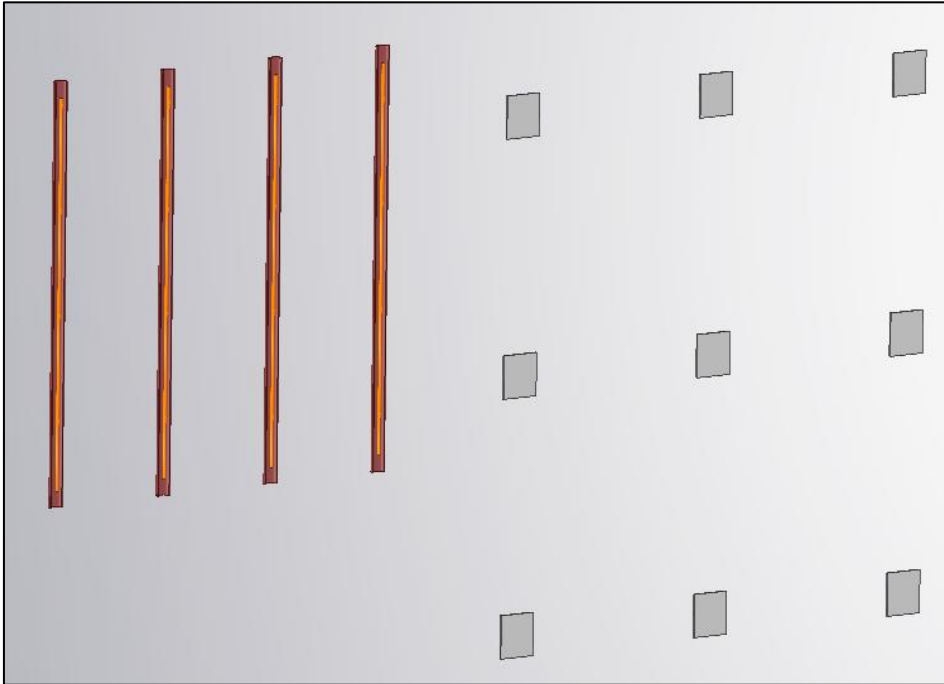
Şekil 3.3. SM için tasarlanan KKI'ların görseli

SM'in bir diğer bileşeni olan IAS'ın modellenmesi sırasında ise basitleştirilmeye gidilmemiş ve IAS tüm kenar uzunlukları eşit 3×10^{-2} m ve kalınlığı 1×10^{-3} m olan bir dikdörtgen prizma olarak tasarlanmıştır. IAS'a ait SM tasarımı Şekil 3.4.'te verilmiştir. ITD'nin geriye kalan parçaları, ihmal edilebilir termal iletkenlikleri nedeniyle SM'e eklenmemiştir.

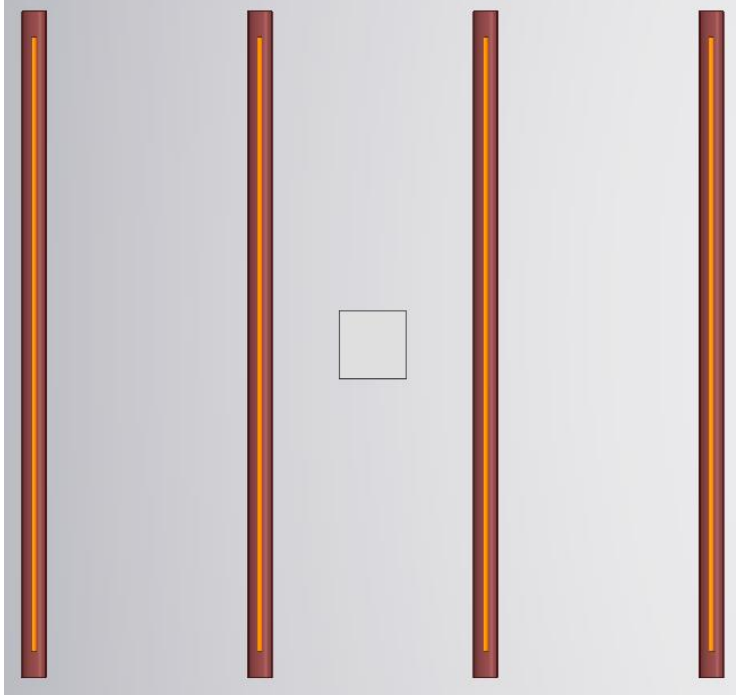


Şekil 3.4. SM için tasarlanan IAS'ın görseli

SM içerisinde 4 adet KKI ve 8'i $360 \text{ mm} \times 360 \text{ mm}$ boyutlarında kare bir düzlemin kenarlarında ve biri ise bu düzlemin merkezinde konumlandırılmış şekilde toplam 9 adet IAS yer almaktadır. Oluşturulan SM'in tüm bileşenlerinin yerleşimlerini gösteren görsel Şekil 3.5.'de verilmiştir. SM'in hangi parametre için çalıştırılacağına göre bu 9 IAS'dan çözüm için gerekli olmayanları suppress komutu ile çözüm dışı bırakılmıştır. Örneğin x-y düzlemi üzerindeki, 5 numaralı sensör konumundaki (Bkz. Şekil 4.2.) ısı akısını hesaplamak için çalıştırılacak SM'i oluştururken bu noktada yer alan IAS hariç diğer IAS'lar suppress komutu ile çözüm dışı bırakılmıştır ve ayrıca bu işlem yapıldıktan sonraki SM'in görseli Şekil 3.6.'da verilmiştir. Bu sayede çözüm için harcanan bekleme süresi büyük ölçüde azaltılmıştır.

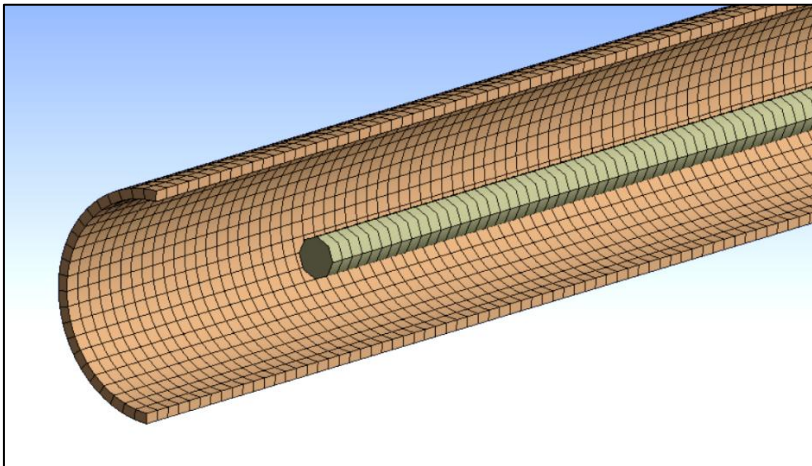


Şekil 3.5. SM bileşenlerinin görseli

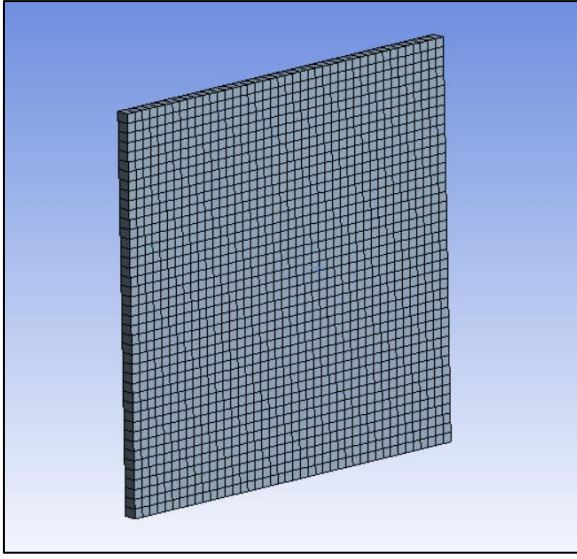


Şekil 3.6. IAS'ın 5 numaralı konumdaki ısı akısı hesabı için oluşturulan SM'in görseli

Geometrinin basitleştirilmesi sonrası SM için yürütülen bir diğer çalışma ise SM'i oluşturan bileşenlerin hücelere ayrılması (meshing) idi. Bunun için, KKI'nın filamentine, kuvars cam kılıfına ve IAS'a ayrı ayrı hücelere ayırma metotları uygulanmıştır. Bu 3 farklı geometrik yapıya sahip bileşenlere ayrı ayrı hücre yapısı tanımlanabilmesi, ilerleyen çalışmalarda bileşen bazlı hücre sayısı değişikliği yapılabilmesine olanak sağlamıştır. KKI'nın filamenti için uygulanan hücelere ayırma metodu süpürme (sweep), kuvars cam kılıf ve IAS'ı hücelere ayırmak için ise boyutlandırma (sizing) metodu kullanılmıştır. KKI'nın ve IAS'ın hücre yapılarının görselleri sırasıyla Şekil 3.7. ve Şekil 3.8.'de verilmiştir.



Şekil 3.7. KKI'nın hücre yapısının görseli



Şekil 3.8. IAS'ın hücre yapısının görseli

Hücre yapısını oluşturmak için uygun metotlar belirlendikten sonra SM'in sınır şartlarının belirlenmesi adımına geçilmiştir. Yüzeyden yüzeye ışıınım modelinin kullanılabilmesi için SM bileşenlerine yapılacak ışıınım sınır şartı tanımlamasının yanında tüm bileşenlere sabit birer sıcaklık sınır şartı ataması yapılması gereklidir. Bundan dolayı, SM içerisinde yer alan 4 adet KKI'nın, filamentlerinin ve kuvars cam kılıflarının her birine ayrı ayrı sabit sıcaklık sınır şartı tanımlanmıştır. Böylece KKI'lar için toplam 8 adet sabit sıcaklık sınır şartı tanımlanmış oldu. Her bir filament ve kuvars cam kılıfa ayrı ayrı sabit sıcaklık sınır şartı atanmasının nedeni ise, KKI'ların deneysel çalışmalar sırasında farklı güç kaynaklarına bağlı olmaları, bu güç kaynaklarının farklı elektriksel karakteristiklere sahip olması ve istenen elektriksel güç değerlerini birbirlerine yakın ancak bir miktar farkla sağlayabilmeleri kaynaklıdır. KKI'lar üzerindeki elektriksel güç değerlerinin filament ve kuvars cam kılıf sıcaklıklarını yüksek oranda etkilemesinden dolayı, SM içerisindeki bu bileşenlerin yüzey sıcaklıkları her bir KKI için ayrı girilmiştir. Benzer şekilde, deneysel çalışmalar sırasında kayıt altına alınan IAS'ın sıcaklığının, KKI'ların güç değerleri, KKI'lara olan uzaklık, ölçümlerinin farklı x ve y koordinatlarında alınması, vb. koşullara bağlı olarak değişmesinden dolayı IAS'a da sabit sıcaklık sınır şartı tanımlaması yapılmıştır.

Bir diğer sınır şartı olan ışıınım ile ısı transferi sınır şartı tanımlaması yapılırken aynı sabit sıcaklık sınır şartı tanımlamasında olduğu gibi bu sınır şartı da SM'i oluşturan her bir bileşenin ilgili yüzeylerine tanımlanmıştır. Filament ve kuvars cam kılıfın tüm yüzeylerine tanımlanan ışıınım sınır şartından farklı olarak IAS üzerine tanımlanan sınır şartı, sensörün

Ansys Steady State Thermal modülü içerisinde bir bileşene sabit sıcaklık sınır şartı ataması yapıldıktan sonra sınır şartının “definition” kısmında, “magnitude” satırına bileşenin sıcaklık değeri tanımlanabilmektedir. Bir diğer sınır şartı olan ışıyım sınır şartı için ise, tanımlamanın yapılacağı yüzeyin seçiminden sonra sınır şartının “definition” kısmında, “correlation” satırında kullanılacak ışıyım modeli seçilerek (bu tez içerisindeki tüm sayısal analizlerde bu satırda “surface to surface” seçeneği seçildi), “emissivity” satırında ilgili yüzey/yüzeylerin emisivite değeri ve “ambient temperature” satırında ortam sıcaklığı değeri girilerek sınır şartı tanımlaması tamamlanmaktadır.

Sınır şartı tanımlaması sırasında iletim veya taşınım ısı transferi için sınır şartı tanımlaması yapılmamıştır. Çünkü KKI içerisinde ve çevresinde olan iletim ve taşınım ile olan ısı transferleri halihazırda net radyasyon metodu ile oluşturulmuş olan Eş. 3.6 ve 3.7 içerisinde yer almaktadır. Bu eşitlikler yardımıyla hesaplanan filament (T_f) ve kuvars cam kılıf (T_k) sıcaklıkları SM’in çözülmesi için birer sınır şartı olarak tanımlandığı için, iletim veya taşınım ile olan ısı transferi özelinde bir sınır şartı tanımlamasına gerek kalmamıştır. Bu duruma ek olarak, IAS’ın deneysel ölçümler sırasında ulaştığı sıcaklık değerleri ile ortam sıcaklığı arasındaki farkın oldukça düşük olması nedeniyle IAS için de taşınım sınır şartı tanımlamasına gerek duyulmamıştır.

IAS’ın KKI’lara bakan yüzeyi üzerine gelen (incident), yayılan (emitted) ve net radyasyon değerlerinin elde edilebilmesi için bu yüzeye bir radyasyon probu atanmıştır. Analizi gerçekleştirilen senaryo kararlı durum için yapıldığı ve ayrıca SM içerisindeki her yüzeye sabit yüzey sıcaklığı sınır şartı atandığı için herhangi bir yüzeye sıcaklık probu ataması yapılmamıştır.

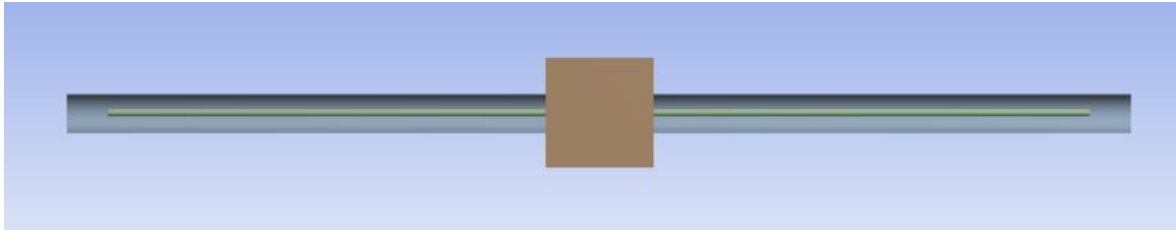
SM’in oluşturulması ve sınır şartlarının tanımlanmasının ardından, elde edilen sayısal sonuçların güvenilirliğini doğrulamak için bir çalışma yapılmıştır. Bu amaçla, Er ve ark. [17] gerçekleştirdiği bir çalışma referans alınmıştır. Bu çalışmada, x eksenine paralel yatay bir konumda yerleştirilen ve 500 W güce sahip bir KKI (tezde kullanılanlarla aynı marka ve modelde) kullanılmıştır. KKI’dan z ekseni üzerinde 50 cm uzaklıkta yer alan IAS üzerindeki net ısı akısının, sensörün x ekseni üzerindeki hareketine bağlı olarak nasıl değiştiği incelenmiştir. İlgili çalışmada, KKI’nın güç değeri 500W değerinde tutulurken, IAS’ın x ekseni üzerinde koordinatı sırasıyla 0 cm, 10 cm, 20 cm, 30 cm ve 40 cm değerlerine

ayarlanarak sayısal sonuçlar alınmıştır. Er ve ark. tarafından yapılan sayısal hesaplamalar sırasında kullanılan değişken değerleri Çizelge 3.1.'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Er ve ark. tarafından sayısal hesaplamalar sırasında kullanılan değişken değerleri [17]

Değişken Adı	Değişken Değeri
Filament Sıcaklığı (K)	2182,1
Filament Emisivitesi	0,276
Kuvars Cam Kılıfın Sıcaklığı (K)	862,1
Kuvars Cam Kılıfın Emisivitesi	0,9
Isı Akısı Sensörünün Sıcaklığı (K)	301,05
Isı Akısı Sensörünün Emisivitesi	1
Ortam Sıcaklığı (K)	295,15

Bu tez kapsamında oluşturulan SM, Er'in [17] çalışmasındaki SM'e dönüştürülerek, bir adet KKI, x eksenine paralel olacak şekilde yatay olarak yerleştirilip karşısına da z ekseninde 50 cm uzaklıkta ve x ile y eksenini üzerinde 0 konumlarında bulunan bir IAS yerleştirilmiştir. Bu kapsamda oluşturulan SM'e ait görsel Şekil 3.11.'de verilmiştir. Oluşturulan SM'in içerisinde yer alan IAS'ın x eksenindeki konumu sırasıyla 0 cm, 10 cm, 20 cm, 30 cm ve 40 cm değerlerine ayarlanarak toplamda 5 ayrı konum değeri için sayısal sonuçlar alınmıştır. Gerçekleştirilen analizler sırasında ihtiyaç duyulan sınır şartı değişken değerleri Çizelge 3.1.'den alınmıştır.



Şekil 3.11. Güvenilirlik çalışması kapsamında oluşturulan SM'in görseli

Beş farklı x koordinatı için elde edilen sayısal veriler ve referans çalışmada elde edilen sayısal net ısı akısı değerleri ile aralarındaki fark Çizelge 3.2.'de paylaşılmıştır. Çizelge 3.2.'de görüldüğü üzere, güvenilirlik çalışması kapsamında elde edilen ve referans alınan çalışmada sunulan sayısal veriler arasındaki yüzdesel fark değerleri en fazla %3,8 olarak

hesaplanmıştır. Yüzdesel fark değerlerinin kabul edilebilir seviyede düşük olması sayesinde bu tez kapsamında oluşturulan SM'in güvenilirliği doğrulanmıştır.

Çizelge 3.2. Güvenilirlik çalışması kapsamında elde edilen sonuçlar ile Er ve ark. tarafından verilen sayısal sonuçların karşılaştırması

X eksen Konumu (cm)	Elde Edilen Isı Akısı (W/m ²)	Er ve ark. [17] Tarafından Verilen Isı Akısı (W/m ²)	Yüzdesel Hata (%)
0	304,5	313,6	3,0
10	284,6	293,4	3,1
20	232,3	240,0	3,3
30	171,0	177,5	3,8
40	115,4	119,7	3,7

SM'in referans bir çalışma ile doğrulanmasının ardından bu modelden elde edilen sayısal sonuçları doğrudan etkileyen iki parametre üzerine çalışmalar yapılmaya başlanmıştır. Yüzeyden yüzeye ışıınım modelinin çalışma şekli göz önüne alınarak yapılan teorik araştırma neticesinde, bu parametrelerin, hücre sayısı ve yarım küp çözünürlüğü (hemicube resolution) olduğu belirlenmiştir. Bu iki parametrenin sayısal modelden elde edilen ısı akısı değerine etkisini ve hangi değerden sonra çözümün bu parametrelerden bağımsız olduğunu bulabilmek için bir çalışma yürütülmüştür.

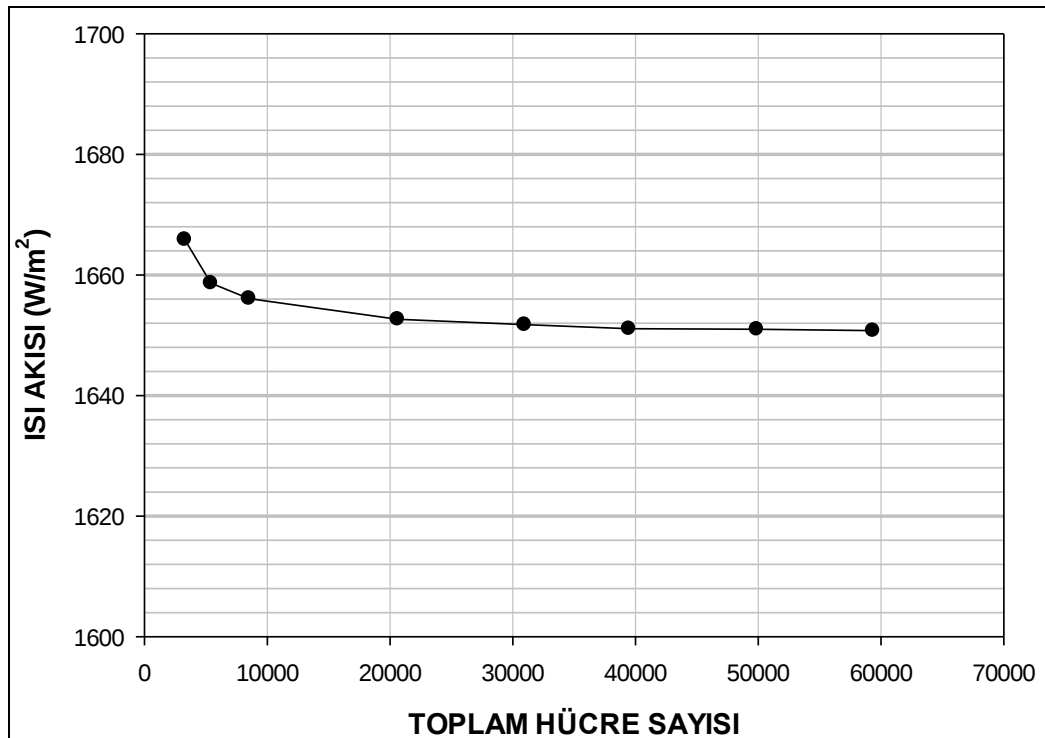
Isı akısı değerinin her iki parametreden de bağımsızlığını gözlemleyebilmek için SM, IAS'ın $x=0$, $y=0$ konumlarında (Şekil 4.2.'de verilen 5 numaralı sensör konumunda), KKI'lar ile arasındaki uzaklık 500 mm ($z = 500$ mm) ve KKI'lara verilen güç değeri 500 W iken bu parametreler kademeli şekilde arttırılarak çözdürülmüştür. KKI'ların bu senaryodaki T_f ve T_k sıcaklık değerleri, Çizelge 4.1.'de 5 numaralı sensör noktası için dört KKI'dan alınan güç değeri ölçümleri baz alınıp Çizelge 3.8.'de bu güçlere karşılık gelen sıcaklıklar değerleri bulunarak elde edilmiştir ve SM'e girilmiştir. Ayrıca IAS sıcaklığı ve ortam sıcaklığı değerleri ise Çizelge 4.2.'deki deneysel veriler ışığında girilmiştir.

Hücre sayısının ısı akısı değerine olan etkisini gözlemlemek için yapılan çalışmada yukarıda sınır şartları verilen SM kullanılarak, filament, kuvars ve IAS unsurlarının hücre boyutları kademeli olarak azaltılarak pek çok analiz gerçekleştirilmiştir. Bu analizler sırasında kullanılan hücre boyutu, toplam hücre sayısı değerleri ve bu değerler için SM'den elde edilen

ısı akıları Çizelge 3.3.'de verilmiştir. Toplam hücre sayısı değerinin elde edilen ısı akısı değerleri ile ilişkisi Şekil 3.12.'de gösterilmiştir. Çizelge 3.3. ve Şekil 3.12.'de de görüldüğü üzere 39454 toplam hücre sayısı değerinden sonra ısı akısı değerindeki değişim oldukça azdır. Bundan dolayı bu hücre sayısı değeri, yapılan tüm analiz senaryoları için sabit tutulmuştur.

Çizelge 3.3. Hücre boyutu ve toplam hücre sayısı değerlerine göre elde edilen ısı akısı değerleri

Filament Hücre Boyutu (m)	Kuvars Hücre Boyutu (m)	IAS Hücre Boyutu (m)	Toplam Hücre Sayısı	Isı Akısı (W/m^2)
$2,5 \times 10^{-3}$	$2,5 \times 10^{-3}$	$2,5 \times 10^{-3}$	3268	1665,9
$2,0 \times 10^{-3}$	$2,0 \times 10^{-3}$	$2,0 \times 10^{-3}$	5404	1658,7
$1,5 \times 10^{-3}$	$1,5 \times 10^{-3}$	$1,5 \times 10^{-3}$	8488	1656,1
$1,0 \times 10^{-3}$	$1,0 \times 10^{-3}$	$1,0 \times 10^{-3}$	20601	1652,7
$8,0 \times 10^{-4}$	$8,0 \times 10^{-4}$	$8,0 \times 10^{-4}$	30929	1651,8
$6,9 \times 10^{-4}$	$6,9 \times 10^{-4}$	$6,9 \times 10^{-4}$	39454	1651,1
$6,15 \times 10^{-4}$	$6,15 \times 10^{-4}$	$6,15 \times 10^{-4}$	49868	1651,0
$6,0 \times 10^{-4}$	$6,0 \times 10^{-4}$	$6,0 \times 10^{-4}$	59343	1650,8

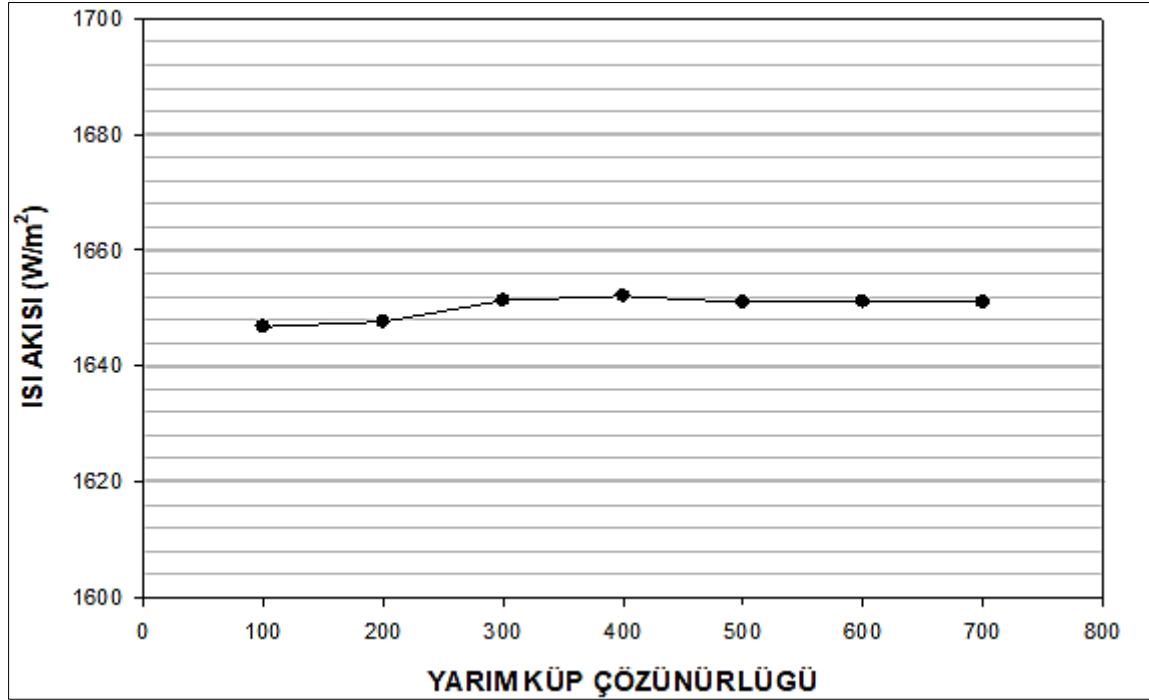


Şekil 3.12. Isı akısı değerinin toplam hücre sayısına bağlı değişim grafiği

Bilindiği üzere, yarım küp çözünürlüğü değeri yüzeyden yüzeye ışıınım modeli çözümlemesinde hücreden hücreye olan görüş faktörü hesaplaması sırasında kullanılan ve görüş faktörü değeri üzerine doğrudan etkisi olan bir parametredir. Bundan dolayı, yarım küp çözünürlüğünün ısı akısı üzerine etkisini gözlemlemek için bir çalışma yürütülmüş ve bu çalışmada da hücre sayısı değeri için kullanılan SM kullanılmıştır. Sınır şartlarının hepsi aynı tutularak sadece hesaplama sırasında kullanılacak yarım küp çözünürlüğü değeri kademeli olarak arttırılmıştır. Yapılan analizler sırasında kullanılan yarım küp çözünürlüğü değerleri ve bu değerler ile elde edilen ısı akısı değerleri Çizelge 3.4.'te verilmiştir. Bu ısı akısı değerlerinin yarım küp çözünürlüğü değeri ile ilişkisini gösteren grafik ise Şekil 3.13.'de verilmiştir. Çizelge 3.4. ve Şekil 3.13.'de de görüldüğü üzere yarım küp çözünürlüğü değeri 500'e ulaştıktan sonra ısı akısı değerindeki değişim oldukça azdır. Bundan dolayı yarım küp çözünürlüğü değeri, yapılan tüm analiz senaryoları için 500 olarak kabul edilmiştir.

Çizelge 3.4. Değişen yarım küp çözünürlüğü değerlerine göre elde edilen ısı akısı değerleri

Yarım Küp Çözünürlüğü	Isı Akısı (W/m^2)
100	1646,8
200	1647,7
300	1651,3
400	1652,1
500	1651,0
600	1651,1
700	1651,0
800	1651,6



Şekil 3.13. Isı akısı değerinin yarım küp çözünürlüğüne bağlı değişim grafiği

Hücre sayısından ve yarım küp çözünürlüğü değerleri için yapılan çalışmanın bir benzeri iterasyon sayısı için de yürütülmüştür. ANSYS Mechanical altyapısını kullanan Steady State Thermal modülü incelendiğinde, modül üzerinden yalnızca çözüm sırasında kullanılabilecek maksimum iterasyon sayısı belirlenebildiği görülmektedir. Maksimum iterasyon sayısı sırasıyla 10, 50 ve 80'e ayarlanarak çözümler alınmaya çalışılmış ancak üçünde de hata alınıp çözüme ulaşılamamıştır. Daha sonra, ANSYS'in oluşturduğu sonuç kütüğü incelendiğinde çözümleme sırasında kullandığı en yüksek iterasyon sayısının 100 olduğu ve maksimum iterasyon sayısı 100'den daha büyük bir değer girildiğinde dahi kullanılan iterasyon sayısının değişmediği görülmüştür. Bu durumdan dolayı tüm analiz senaryoları için maksimum iterasyon değeri 100 olarak kabul edilmiştir.

Yüzeyden yüzeye ısıtım metodu

ANSYS yazılımı içerisinde yer alan, yüzeyden yüzeye ısıtım modeli, gri ve difüz (gray-diffuse) yüzeylerden oluşan kapalı bir hacimdeki ısıtım ile olan ısı transferini hesaplayabilmek için kullanılmaktadır. İki yüzey arasında gerçekleşebilecek bu ısı transferi, yüzeylerin boyutlarına, aralarındaki mesafeye ve yönelimlerine bağlı olup bu faktörler, görüş faktörü olarak bilinen geometrik bir fonksiyon yardımıyla tanımlanmaktadır.

Bu modelde, yayılan ışıının soğurulması, yayılması veya saçılması durumları ihmal edilmektedir. Bu nedenle, bu modelde yalnızca bir yüzeyden diğerine olan ışıının dikkate alınmaktadır.

Bu yöntemde, bir yüzeyden ışıının ile çevresine aktarılan ısı akısı, bu yüzeyden yayılan (emitted) ve yansıyan (reflected) ısı akısının toplamından meydana geldiği kabul edilmektedir. Böylece, k isimli bir yüzeyden ışıının ile çevresine aktarılan ısı akısı ($q_{a,k}$) Eş. 3.1’de verilen eşitlik ile ifade edilebilmektedir.

$$q_{a,k} = \epsilon_k \cdot \sigma \cdot T_k^4 + \rho_k \cdot q_{g,k} \quad (3.1)$$

Burada, ϵ_k yüzeyin emisivite değerini, σ Stefan-Boltzmann sabitini ($5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}$), T_k yüzeyin sıcaklığını (K), ρ_k yüzeyin yansıtma katsayısını ve $q_{g,k}$ çevreden gelen ısı akısını temsil etmektedir.

Bir yüzeyden başka bir yüzeye gelen ısı akısı miktarı, yüzeyler arasındaki görüş faktörünün (F_{jk}) bir fonksiyonudur. Görüş faktörü F_{jk} , k yüzeyinden yayılan ısı akısının j yüzeyine ulaşan kısmını ifade etmektedir ve k yüzeyine gelen ısı akısı olan $q_{g,k}$, diğer tüm yüzeylerden yayılan akıları cinsinden Eş. 3.2’de verildiği şekilde ifade edilebilir.

$$A_k \cdot q_{g,k} = \sum_{j=1}^N A_j \cdot q_{a,j} \cdot F_{jk} \quad (3.2)$$

Burada, A_k k yüzeyinin alanını, F_{jk} k yüzeyi ile j yüzeyi arasındaki görüş faktörünü temsil etmektedir. A_k ve A_j yüzey alanlarının birim hücre boyutlarında olduğu ve birbirlerine eşit oldukları kabul edilir ise, Eş. 3.2, aşağıda Eş. 3.3’te verildiği şekilde ifade edilebilmektedir.

$$q_{g,k} = \sum_{j=1}^N F_{jk} \cdot q_{a,j} \quad (3.3)$$

Ardından, Eş. 3.3, Eş. 3.1’deki ilgili kısma yazılır ise Eş. 3.4 elde edilmiş olur. Ayrıca, k yüzeyi ile j yüzeyi arasındaki görüş faktörünü belirten F_{jk} , Eş. 3.5’te verildiği şekilde ifade edilmektedir.

$$q_{a,k} = \varepsilon_k \cdot \sigma \cdot T_k^4 + \rho_k \cdot \sum_{j=1}^N F_{jk} \cdot q_{a,j} \quad (3.4)$$

$$F_{jk} = \frac{1}{A_k} \int_{A_k} \int_{A_j} \frac{\cos \theta_k \cos \theta_j}{\pi r^2} \delta_{kj} dA_k dA_j \quad (3.5)$$

Burada, δ_{kj} , dA_j 'nin dA_k tarafından görünürlüğünü ifade etmektedir. Eğer dA_j dA_k tarafından görünür ise $\delta_{kj} = 1$ aksi durumda 0 olarak kabul edilmektedir.

3.2.2. Net radyasyon metodu

Er ve ark. [17] yaptıkları çalışmada, 500 W ile beslenen bir KKI içerisinde yer alan tungsten filamentin ve onu saran kuvars cam kılıfın sıcaklıklarının sırasıyla 2189 K ve 859 K mertebelerine ulaşabildiğini hesaplamıştır. Bu sıcaklıkların deneysel olarak ölçülmesi hem filamentin kuvars cam içerisinde yer alması hem de ilgili sıcaklık değerlerinin oldukça yüksek olması nedeniyle zordur. Bu kısıtlardan dolayı bu iki sıcaklık değerini elde edebilmek için, Er ve ark. [17] ve Schmidt ve ark. [9] net radyasyon metodunu kullanmışlardır. Net radyasyon metodu kullanılarak oluşturulan eşitlikler Eş. 3.6 ve Eş. 3.7'de sunulmuştur.

$$P\eta - \varepsilon_f(T_f)S_f\sigma T_f^4 - 2\pi L_k k_{Ar}(T^*) \frac{T_f - T_k}{\ln\left(\frac{d_k}{d_f}\right)} = 0 \quad (3.6)$$

$$\alpha_k \varepsilon_f(T_f)S_f\sigma T_f^4 + 2\pi L_k k_{Ar}(T^*) \frac{T_f - T_k}{\ln\left(\frac{d_k}{d_f}\right)} - \varepsilon_k S_k \sigma T_k^4 - h S_k (T_k - T_\infty) = 0 \quad (3.7)$$

Eş. 3.6 ve Eş. 3.7, Newton-Raphson methodu kullanılarak oluşturulan bir MATLAB kodu yardımıyla iteratif olarak çözümlenmiştir. Bu sayede, tungsten filamentin sıcaklığı (T_f) ve kuvars cam kılıfın sıcaklıkları (T_k) elde edilebilmiştir.

T_f ve T_k sıcaklık değerlerinin hesaplanmasında tüm güç değerleri için ortak olarak kullanılan parametreler Çizelge 3.5.'de listelenmiştir. Bu çalışmada kullanılan PHILIPS marka 13195X/98 model KKI'ların kullanıcı bilgi notunda [24] belirtildiği üzere, KKI'lar tarafından tüketilen enerjinin %85'inden fazlası IR ısıya dönüşmektedir. Bu nedenle IR lambaların verimliliği (η) tüm güç değerleri için %85 olarak kabul edilmiştir. Kunze ve ark. [8] ve Er ve ark. [17]'in gerçekleştirdiği sayısal çalışmalarda, KKI'nın kuvars tüpünün

emisivite değerini (ϵ_k) 0,9 olarak kullandıkları görülmektedir. Bu bilgiye dayanarak bu çalışma içinde, ϵ_k değeri tüm güç değerleri için 0,9 olarak kabul edilmiştir. Forsythe ve ark. [5], gerçekleştirdikleri deneysel çalışmada tungstenin emisivite değerini, 1100K – 3700K sıcaklık aralığı için elde etmiş ve bir grafik üzerinde bu değerleri vermiştir. Er ve ark. [17] ise bu grafiği bir tablo haline getirmiştir ve kendi çalışmalarında kullanmıştır. İlgili tablo, Çizelge 3.6.’da verilmiştir [17].

Çizelge 3.5. Tüm KKI güç değerleri için MATLAB kodunda ortak olarak kullanılan değişken değerleri

Değişkenler	Değerler	Değişkenler	Değerler
η	0,85	$S_k(m^2)$	$5,1 \times 10^{-3}$
ϵ_k	0,9	$L_k(m)$	0,295
$d_k(m)$	$1,1 \times 10^{-2}$	α_k	0,9
$S_f(m^2)$	$1,18 \times 10^{-3}$	$h(W/m^2K)$	11,2
$d_f(m)$	$2,4 \times 10^{-4}$	$k(mW/m.K)$	55

Çizelge 3.6. Tungstenin emisivite değerinin sıcaklığa göre değişimi [17]

Sıcaklık (K)	Emisivite
1500	0,192
1800	0,236
2000	0,259
2200	0,278

Filamentin emisivite değeri (ϵ_f), MATLAB yardımıyla hesaplanan filament sıcaklığının Çizelge 3.6.’deki değerler üzerinden enterpolasyon yapılmasıyla elde edilmiştir.

Er ve ark. [17] tarafından yapılan çalışmada PHILIPS marka 13195X/98 model bir KKI için d_k , S_f , d_f , S_k ve L_k değişkenlerinin değerleri detaylı bir çalışma ile ölçülerek ve hesaplanarak elde edilmiştir. Elde edilen değerler sahip olunan KKI’ların fiziksel ölçüleri ile uyumluluk içerisinde olduğu için bu değişkenler doğrulandıktan sonra yürütülen sayısal hesaplamalara girdi olarak kullanılmıştır.

Taşınım ısı transfer katsayısının (h), hesaplanabilmesi için ise bir literatür çalışması yürütülmüş ancak hem KKI’ların boyunun çapına oranla oldukça uzun olması ($L_k/d_k \approx 26,82$), ITS üzerinde düşey olarak yerleştirilmeleri nedeniyle bu çalışma için kullanılmaya tamamiyle uygun teorik veya ampirik bir yöntemle ulaşılamamıştır. Ancak, Bejan [25]

tarafından sunulan çalışmada, KKI'lar üzerindeki taşınım ile ısı transferi katsayısına ulaşmada yol gösterici olabilecek bir eşitliğe ulaşılmıştır. İlgili eşitliğin kullanılabilmesi için $Pr \geq 1$ olduğu ve Eş. 3.8 ile hesaplanacak Rayleigh sayısının Eş. 3.9'daki koşulu sağladığı durumlar için Eş. 3.10 kullanılarak Nusselt sayısının hesaplanabileceği ifade edilmektedir.

$$Ra_H = \frac{g\beta(T_k - T_\infty)L_k^3 \cdot Pr}{\nu^2} \quad (3.8)$$

$$\frac{d_k}{L_k} > Ra_H^{-1/4} \quad (3.9)$$

$$Nu_H = \frac{4}{3} \left[\frac{7Ra_H \cdot Pr}{5(20 + 21 \cdot Pr)} \right]^{1/4} + \frac{4(272 + 315 \cdot Pr)L_k}{35(64 + 63 \cdot Pr)d_k} \quad (3.10)$$

$$h = \frac{Nu_H \cdot k_H}{L_k} \quad (3.11)$$

Er. ve ark. [17] çalışmaları sayesinde 500W güç değerindeki bir KKI'nın yüzeyindeki ortalama film sıcaklığının 579,6 K olduğu bilinmektedir. Film sıcaklığının 579,6 K olduğu kabul edilerek, yukarıdaki eşitliklerde kullanılacak olan değişken 1 atm basınçtaki havanın özelliklerini gösteren değerler Çizelge 3.7.'de verilmiştir [26]. Ek olarak, ısıl genleşme katsayısı da (β) film sıcaklığı değerine bölümüyle 0,001725253 (K^{-1}) olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 3.7.'de görüldüğü üzere çalışılan film sıcaklığında Pr değeri 1'den büyük veya eşit olmadığı için aslında Eş. 3.10'dan elde edilecek Nu_H değeri bu çalışma için kullanılabilir değil ancak elde edilecek h değeri teorik çalışmalara mantıksal bir dayanak oluşturabileceği için bu denklemler çözümlenmiştir.

Çizelge 3.7. 579,6 K sıcaklığındaki ve 1 atm basınçtaki havanın özellikleri

Değişken	Değer
k_H (W/m.K)	4,4574E-02
ν (m^2/s)	4,8573E-05
Pr	0,6935

Değişken değerleri, Eş. 3.8'de yerine konarak çözümlenip Ra_H değeri 7,22E+07 olarak hesaplanılmıştır. Hesaplama sırasında kullanılan değişken değerleri aşağıdaki gibidir.

$$g=9,81 \text{ m/s}^2, \beta=1/579,6 \text{ K}^{-1}, T_k=862,1 \text{ K}, T_\infty=297,15 \text{ K}, L_k=0,295 \text{ m}, \\ Pr=0,6935, \nu=4,8573\text{E-}05 \text{ m}^2/\text{s} \quad (3.7)$$

Eş. 3.9'daki koşul, d_k ile L_k değerleri Çizelge 3.5.'deki değerler alınarak ve Ra_H değeri ise hesaplandığı gibi $7,22\text{E}+07$ olarak alınarak sağlanılmıştır. Daha sonra, hesaplanan Ra_H değeri, Çizelge 3.5. ve 3.7.'deki değişken değerleri Eş. 3.10'da yerine konularak Nu_H değeri $64,27$ olarak hesaplanılmıştır. Son olarak, hesaplanan Nu_H , Çizelge 3.7.'de verilen k_H ve Çizelge 3.5.'te verilen L_k değerleri Eş. 3.11'de yerine konularak taşınım ısı transfer katsayısı (h) $9,71 \text{ W/m}^2\text{K}$ olarak bulunmuştur.

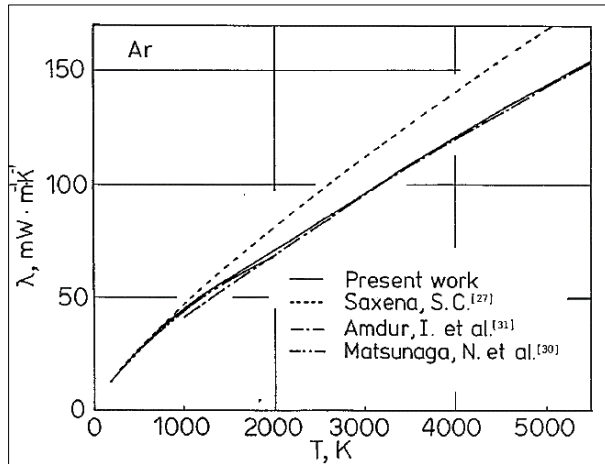
Chandrakar ve ark. [16] tarafından yapılan bir başka sayısal çalışmada ise doğal taşınım ısı transferi etkisi altında ve düşey olarak yerleştirilmiş bir silindir için $5,7\text{E}+03 < Ra_H < 5,7\text{E}+07$ ve $0,5 < L/D < 20$ koşullarının sağlanması durumunda Eş. 3.12'de verilen ampirik formülün h hesaplanması için kullanılabileceği sonucuna varılmıştır. KKI'ların ITD üzerine yerleştirilme şekilleri ve deneysel çalışmaların havalandırmasız kapalı bir hacim içinde yapılmasından dolayı KKI'lar üzerinde etkili olan doğal taşınım ile olan ısı transferi katsayısı, ilgili çalışmada verilen ampirik formül ile hesaplanıp bu çalışma için kullanılabilir gibi görünse de Eş. 3.8'den elde edilen Ra_H değerinin ve KKI'ların L_k/d_k oranlarının istenilen koşulları sağlamaması nedeniyle taşınım ısı transferi katsayısı (h) hesaplamasında Eş. 3.12 kullanılamamıştır.

$$Nu_H = 5,4848xRa^{0,1536} + 1,8501x(L_k/d_k)^{0,3727} + 44,456x\epsilon^{0,9049} - 26,8955 \quad (3.12)$$

Yukarıda detaylı anlatıldığı üzere yürütülen literatür araştırması sonucunda, h hesaplaması için bu çalışmada kullanılmaya uygun bir yöntem bulunamamasından dolayı, KKI ile aynı geometrik özelliklere sahip dikey olarak yerleştirilmiş silindirik bir cismin yüzeyindeki h değerinin bir HAD analizi ile elde edilmesi kararı alınmıştır. Bu nedenle, KKI ile aynı geometrik özelliklere sahip silindirik bir cisim geniş ve küp şeklindeki bir kontrol hacmi içerisine yerleştirilerek bir SM oluşturularak kontrol hacminin her köşesine doğal taşınım ile hacim içerisine hava akışına izin verecek şekilde sınır şartı tanımlamaları yapılmıştır. KKI'nın yüzey sıcaklığı, homojen kabul edilerek, 859 K ve kontrol hacmini dolduran havanın sıcaklığı ise $297,15 \text{ K}$ olarak tanımlanmış ve SM FloEFD yazılımı yardımıyla çözülmüştür. Analizden elde edilen taşınım ile olan ısı transferi değeri KKI'nın yüzey alanına (S_k) bölünerek taşınım ile ısı transferi katsayısı değeri $11,2 \text{ W/m}^2\text{K}$ olarak

hesaplanmıştır. Sayısal yöntem ve Eş. 3.10 yardımı ile elde edilen h değerleri arasındaki farkın makul seviyede olması ve Eş. 3.7’de taşınım ile olan ısı transferi miktarının ışıınım ile olan ısı transferi miktarına oranla düşük bir paya sahip olması nedeniyle analitik hesaplarda kullanılacak olan h değeri $11,2 \text{ W/m}^2\text{K}$ olarak kabul edilmiştir. Ayrıca, Er ve ark. [17] tarafından yapılan çalışmada, KKI’nın 250W, 500W ve 750W güç değerleri için, kuvars sıcaklığının (T_k), güç değerinin artışıyla oldukça artmasına rağmen hesaplanan h değerleri arasındaki farkın oldukça düşük olduğu görülmektedir, bu nedenle h değeri tüm güç değerleri için aynı kabul edilmiştir.

Hoshino ve ark. [6], çalışmalarında yüksek saflıktaki argon gazının ısı iletkenliğini ölçmüşlerdir. Bu ölçümleri 300 K – 4500 K sıcaklık aralığında 37 adet ölçüm olarak gerçekleştirmiş ve bunları benzer çalışmalar ile karşılaştırılan bir grafik halinde sunmuşlardır (Şekil 3.14.). Er ve ark. [17] çalışmalarından bilindiği üzere, 500W güçle çalıştırılan bir KKI’nın ortalama sıcaklık değerinin ($T^* = (T_k + T_f)/2$) yaklaşık 1500K olduğu görülmektedir. Şekil 3.14.’deki grafik üzerinde 1500K sıcaklık değerine karşılık gelen argon ısı iletkenlik değerinin (k_{Ar}) 55 mW/m.K olduğu bulunmuştur. Bu değerin KKI’nın 100 W güç değerinde sahip olduğu 1000 K ortalama sıcaklık değerinde de benzer seviyede olduğu görüldüğünden argonun ısı iletkenlik değeri tüm güç değerleri için 55 mW/m.K olarak kabul edilmiştir.



Şekil 3.14. Argonun yüksek sıcaklıklardaki ısı iletkenlik değeri [6]

Yukarıda nasıl elde edildikleri detaylı şekilde verilen değişken değerleri kullanılarak, KKI’ların deneysel çalışmalar sırasında ölçülen güç değerine göre ve Eş. 3.6 ve 3.7’nin

çözümü için oluşturulan MATLAB kodu yardımıyla ayrı ayrı hesaplanan T_f ve T_k sıcaklık değerleri Çizelge 3.8.'de verilmiştir.

Çizelge 3.8.'de verilen T_f ve T_k sıcaklık değerleri, ITD'nin, dolayısıyla KKI'ların, atmosferik (1 atm) basınç altında olduğu durum için hesaplanmıştır. Ancak, bu çalışmada bu duruma ek olarak KKI'ların vakum ortamında çalıştıkları durum içinde bir sayısal çalışma yürütülmüştür. Vakum ortamındaki KKI'ların T_f ve T_k sıcaklık değerleri, diğer tüm değişkenlerin değerleri atmosferik basınç altındaki durum ile aynı tutularak, Eş. 3.7'deki h değeri (vakum koşulunda hava olmadığı için) sıfır kabul edilerek tekrar hesaplanmıştır. Vakum ortamında bulunan KKI'ların, değişen güç değerlerinde sahip oldukları T_f ve T_k sıcaklık değerleri Çizelge 3.9.'da verilmiştir. Isı akısı hesabı için yürütülen bir diğer sayısal çalışma olan KKI'nın kuvars cam kılıfının emisivite değerinin (ϵ_k) 0,3, 0,5 ve 0,7 olduğu durumlar için IAS üzerindeki ısı akısı değerleri elde edilmiş olup bu çalışmalar sırasında kullanılan T_f ve T_k sıcaklık değerleri ise Çizelge 3.10.'da verilmiştir.

Çizelge 3.8. Tüm KKI güç değerleri için hesaplanan sıcaklık değerleri

P (W)	T_f (K)	T_k (K)
95	1460,9	540
99	1474,8	545
100	1479,1	547
289	1897	737,5
292	1901,3	739,5
293	1903,1	740,5
295	1905,5	741,5
479	2128,4	854,2
480	2130,2	854,6
481	2130,7	855,1
482	2131,4	855,5
484	2133,5	856,7
485	2134,5	857
486	2135,7	857,7
487	2139,5	858,4
488	2137,7	858,7
493	2142,6	861,4
494	2143,6	861,8

Çizelge 3.9. Vakum ortamındaki KKI'ların güç değerleri için hesaplanan sıcaklık değerleri

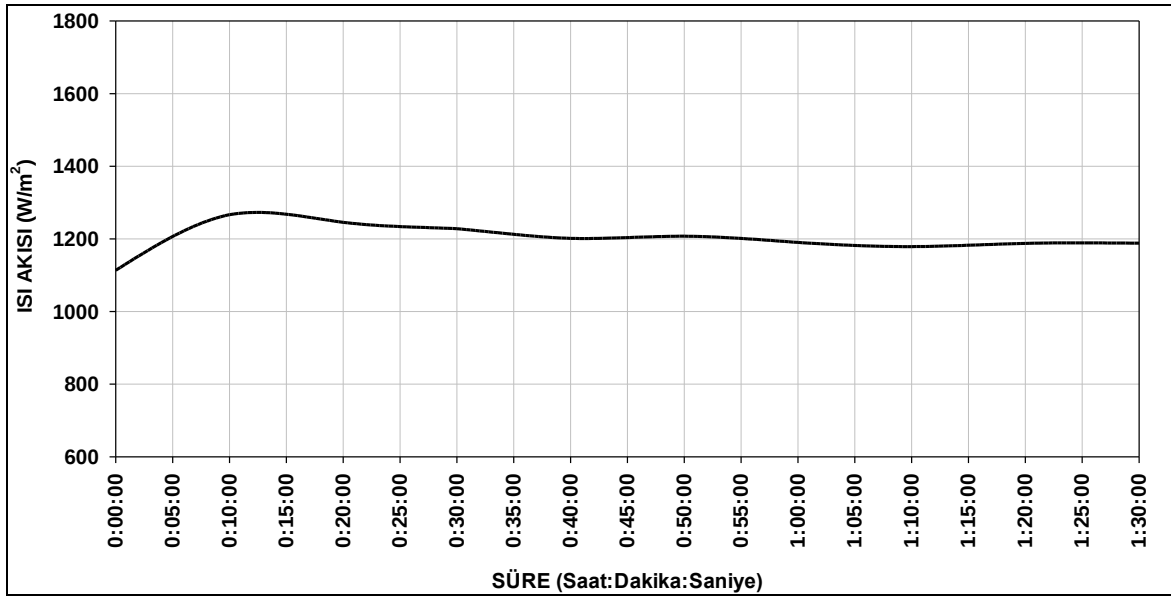
P (W)	T_f (K)	T_k (K)
95	1474,1	657
99	1487,1	662
100	1490,8	663,5
289	1901,6	834,5
292	1906,1	836,5
293	1907,5	837
295	1910,5	838,4
480	2132,2	937,5
486	2138,2	940,3
488	2140,2	941,2
494	2146,1	943,9

Çizelge 3.10. Farklı ϵ_k değerlerinde, KKI'ların güç değerleri için hesaplanan sıcaklık değerleri

	$\epsilon_k = 0,3$		$\epsilon_k = 0,5$		$\epsilon_k = 0,7$	
P (W)	T_f (K)	T_k (K)	T_f (K)	T_k (K)	T_f (K)	T_k (K)
480	2127,8	795,5	2128,8	827,5	2129,3	844,3
486	2133,8	798,5	2134,8	830,5	2135,4	847,4
488	2135,8	799,5	2136,8	831,3	2137,3	848,4
494	2141,8	802,5	2142,8	834,5	2143,3	851,4

4. DENEYSEL VERİLER

Isı akısı ölçümlerine başlanılmadan önce KKI'ların yaydıkları ısı akısının zaman içerisindeki değişiminin gözlemlenebilmesi için IAS $x=0$, $y=0$ konumunda, KKI'lar ile arasındaki uzaklık 500 mm ($z = 500$ mm) ve GK'den KKI'lara verilen güç 500 W iken zamana bağlı ölçüm alınmıştır. Bu ölçümler sonucunda KKI'lara güç sağlanmasından yaklaşık 1 saat sonra IAS üzerinden ölçülen ısı akısı değerinin yaklaşık olarak sabitlendiği gözlemlenmiştir. Bu bilgiden hareketle deneysel çalışmalar sırasında ısı akısı ölçümlerini almak için KKI'lara güç verdikten sonra yaklaşık 1 saat beklenmiştir. Şekil 4.1.'de bu ölçüm sırasında toplanan verilerin grafiği verilmiştir.

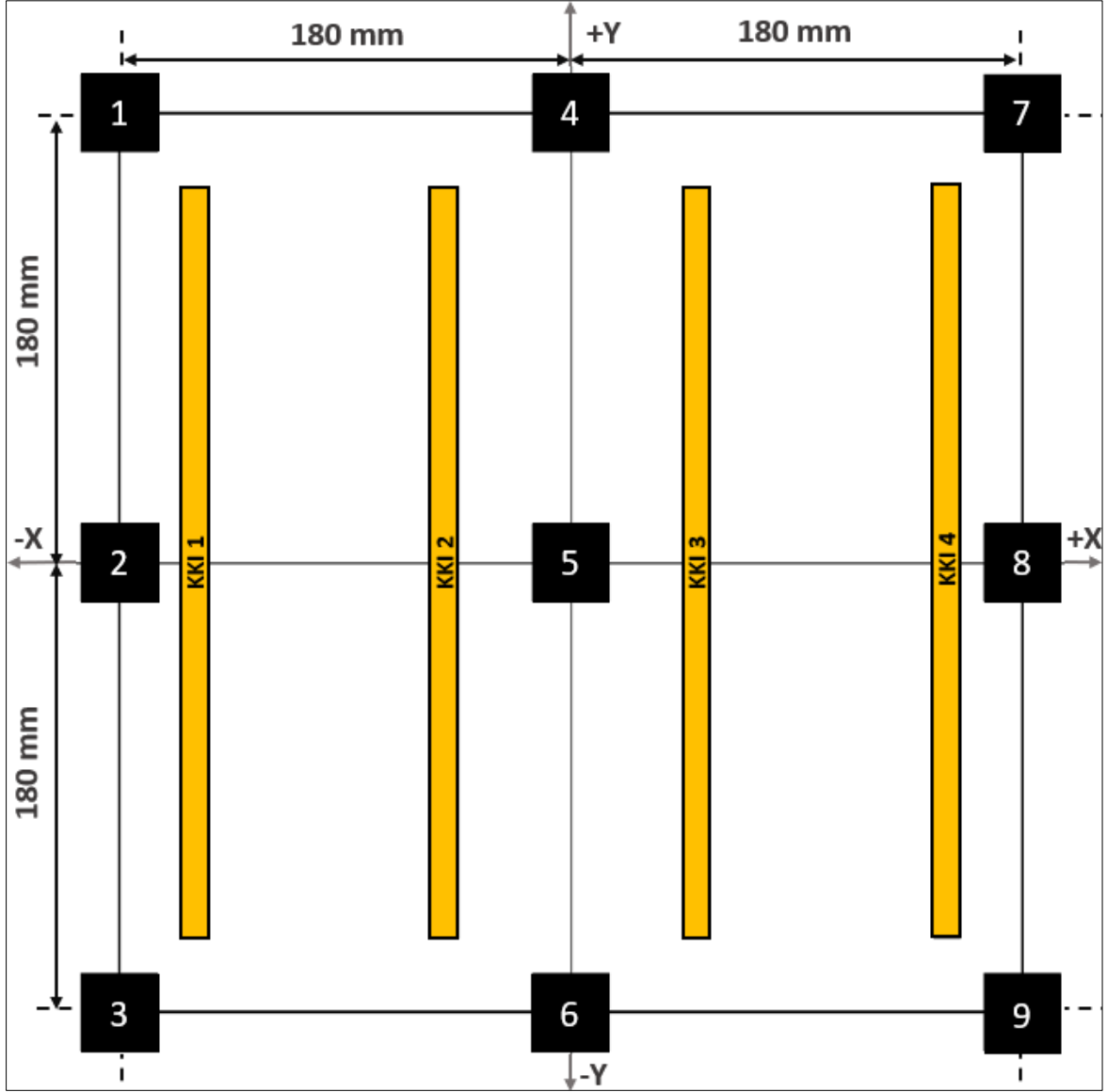


Şekil 4.1. KKI'lar 500W, uzaklık 500 mm ve açı 0 iken IAS'dan alınan ısı akısı ölçümünün zamana bağlı değişim grafiği

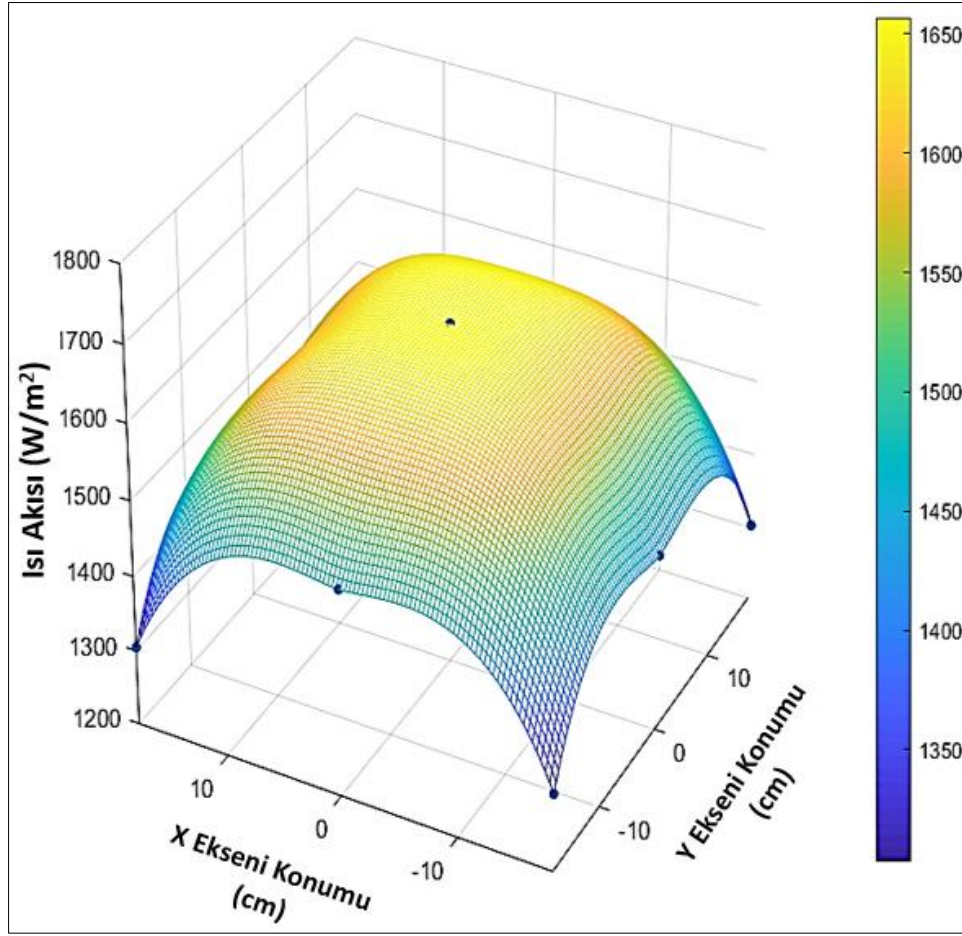
4.1. X-Y Düzlemi Üzerindeki Isı Akısı Dağılımı

İlk ısı akısı ölçümü, KKI'ların karşısında bulunan ayrıca x ve y eksenlerine paralel olan x-y düzlemi üzerindeki ısı akısı dağılımını ölçmeyi amaçlamaktadır. Isı akısı dağılımını elde etmek için 9 ölçüm noktası belirlendi. Bu 9 noktadan 8'i 360 mm × 360 mm boyutlarında kare bir düzlemin kenarlarında iken son nokta ise x-y düzleminin merkezinde ($x=0$, $y=0$) yer almaktadır. Bu 9 ölçüm noktasının koordinatları Şekil 4.2.'de ve ölçülen ısı akısı değerlerinin x-y düzlemi üzerindeki dağılımının grafiği ise Şekil 4.3.'te gösterilmektedir. Bu ölçümler sırasında, IAS'ın açısı sıfır dereceye ayarlanmıştır (açısal yerleşim için Resim

3.4.'e bakınız). KKI'ların her birine sağlanan elektrik gücü, 500 Watt'a ve IAS ile KKI'lar arasındaki z eksenindeki mesafe 500 mm'ye ayarlanmıştır. Bu ölçümler sırasında 1, 2, 3 ve 4 numaralı KKI'lar üzerine düşen net güç değerleri Çizelge 4.1.'de, x-y düzlemi ısı akısı dağılımı ölçümlerinde elde edilen veriler ise Çizelge 4.2.'de sunulmuştur.



Şekil 4.2. IAS ölçüm noktaları



Şekil 4.3. KKI'lar 500W, uzaklık 500 mm ve açı 0 iken X-Y düzlemi boyunca ısı akısı dağılımı grafiği

Çizelge 4.1. X-Y düzlemi ısı akısı dağılımı ölçümlerinde KKI'lardan ölçülen güç değerleri

Ölçüm Noktası	KKI 1 Güç Değeri (Watt)	KKI 2 Güç Değeri (Watt)	KKI 3 Güç Değeri (Watt)	KKI 4 Güç Değeri (Watt)
1	479	488	488	493
2	479	488	488	484
3	479	488	488	484
4	479	488	488	484
5	480	486	488	494
6	479	488	488	493
7	479	488	488	493
8	479	487	488	493
9	479	487	488	484

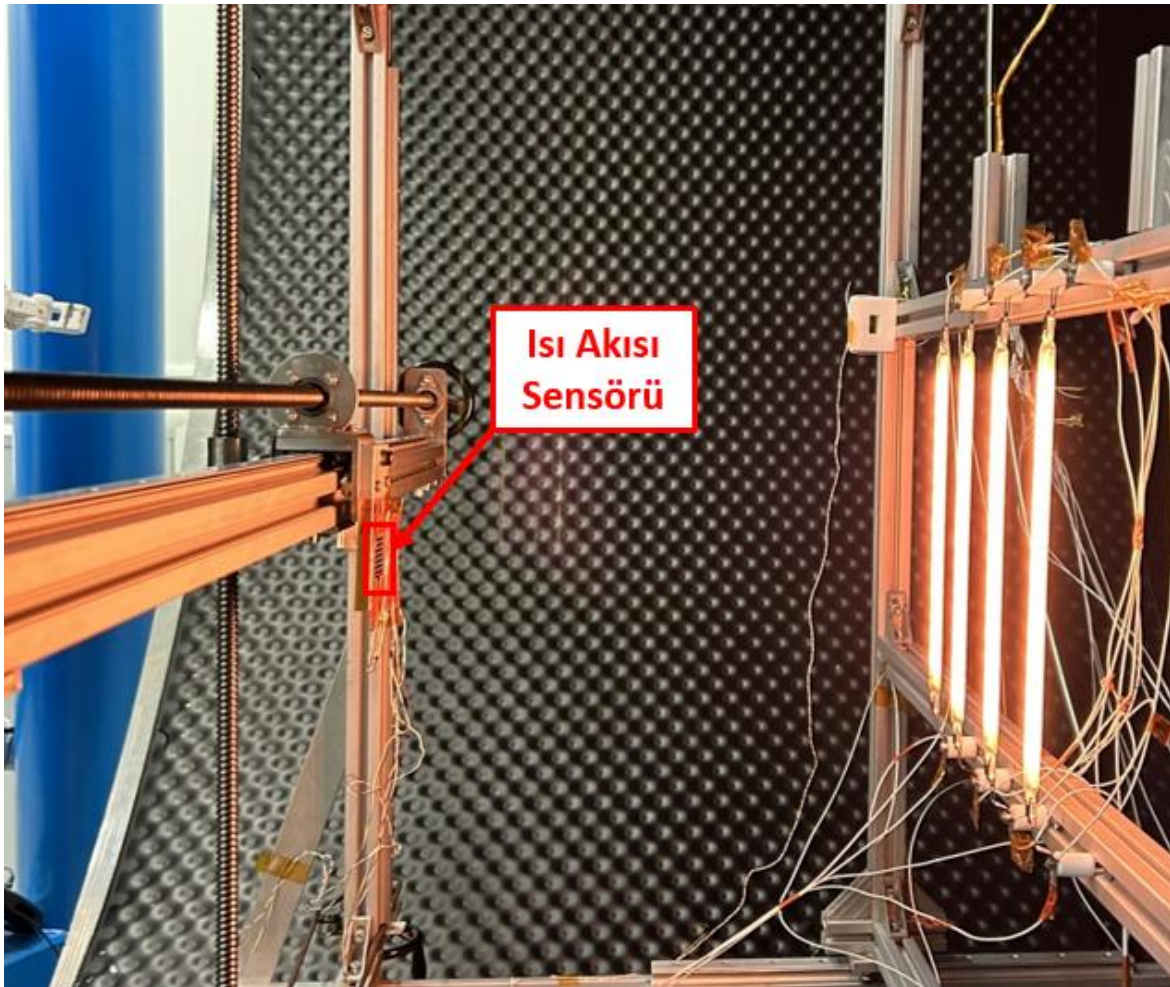
X-Y düzlemi üzerindeki ısı akısı dağılımını elde etmek için alınan ve Çizelge 4.2.'de verilen ısı akısı değerleri incelendiğinde, en yüksek ısı akısı değerinin düzlemin tam ortasında yer alan 5 numaralı konumda ölçüldüğü görülmektedir. Bu noktanın tüm KKI'lar ile olan görüş faktörünün yüksek olmasından kaynaklı en yüksek ısı akısı değerinin bu noktada ölçülmüş olması halihazırda beklenen bir durumdur. Y eksenine göre simetrik olan 2 ve 8 numaralı sensör konumlarında tahmin edilebildiği gibi 5 numaralı noktaya oranla düşük ve benzer ısı akısı değerleri ölçülmüştür. Ancak x eksenine göre simetrik olan 1, 4, 7 ve 3, 6, 9 numaralı sensör konumlarındaki ölçümler incelendiğinde değerlerin birbirine benzer olmadığı ve 1, 4, 7 numaralı konumlardaki ısı akısı değerlerinin 3, 6, 9 numaralı konumlardakilere göre yüksek olduğu görülmektedir. Değerlendirme sonucunda, KKI'ların yüzey sıcaklıklarının homojen olmadığı ve yüzeylerinde gerçekleşen doğal taşınım nedeniyle KKI'ların alt kısımlarının üst kısımlarına oranla daha düşük sıcaklıklara sahip olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Çizelge 4.2. KKI'lar 500W, uzaklık 500 mm ve açı 0 iken X-Y düzlemi üzerinde ölçülen ısı akısı, sensör sıcaklığı ve ortalama ortam sıcaklığı değerleri

Ölçüm Noktası	X Eksen Koordinatı (mm)	Y Eksen Koordinatı (mm)	Isı Akısı (W/m^2)	IAS Sıcaklığı (K)	Ortalama Ortam Sıcaklığı (K)
1	-180	+180	1269,7	312,15	299,45
2	-180	0	1395,4	312,65	299,45
3	-180	-180	1221,3	313,45	299,95
4	0	+180	1407,5	314,65	299,95
5	0	0	1559	315,25	299,95
6	0	-180	1343,3	313,95	299,95
7	+180	+180	1285,9	312,55	299,45
8	+180	0	1397	314,15	299,45
9	+180	-180	1224,9	312,95	299,45

4.2. Z Eksenine Üzerindeki Isı Akısı Değişimi

Deneyisel çalışmaların bir sonraki adımında IAS ve KKI'lar arasındaki mesafenin ölçülen ısı akısı değeri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu amaçla, KKI'lar ile IAS arasındaki (z eksenine üzerindeki) mesafe 250 mm, 500 mm ve 750 mm değerlerine getirilmiş ve IAS 5 numaralı ölçüm noktasında (Bkz. Şekil 4.2.) konumlandırılarak ısı akısı ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Bu ölçümler sırasında IAS'ın açısı sıfır dereceye (açısal yerleşim için Resim 3.4.'e bakınız) ve KKI'ların her birine sağlanan elektrik gücü 500 W'a ayarlanmıştır. Z eksenine üzerindeki mesafe 500 mm'ye ayarlı iken alınan ölçüm sırasında çekilen, ITD görseli Resim 4.1.'de sunulmuştur. Bu ölçümler sırasında 1, 2, 3 ve 4 numaralı KKI'lar üzerine düşen net güç değerleri Çizelge 4.3.'te ve bu ölçümler sırasında elde edilen veriler ise Çizelge 4.4.'te gösterilmiştir.



Resim 4.1. Z eksenine ısı akısı değeri ölçümleri sırasında çekilen ITD görseli

Çizelge 4.3. Z eksenine ısı akısı değişimi ölçümleri sırasında KKI'lerden ölçülen güç değerleri

Z Eksenine Mesafesi (mm)	KKI 1 Güç Değeri (Watt)	KKI 2 Güç Değeri (Watt)	KKI 3 Güç Değeri (Watt)	KKI 4 Güç Değeri (Watt)
250	481	488	488	484
500	480	486	488	494
750	480	486	488	485

Çizelge 4.4. KKI'lar 500W, x ile y koordinatları ve açı 0 iken Z eksenine boyunca ölçülen ısı akısı, sensör sıcaklığı ve ortalama ortam sıcaklığı değerleri

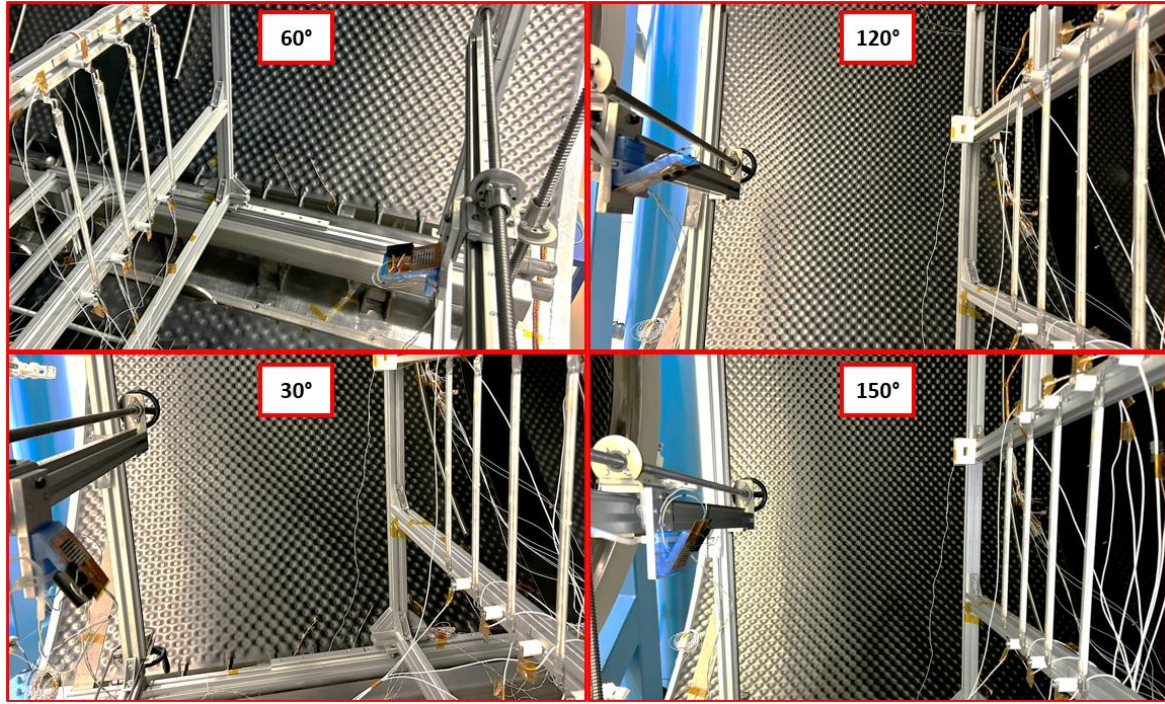
Z Eksenine Mesafesi (mm)	Isı Akısı (W/m^2)	IAS Sıcaklığı (K)	Ortalama Ortam Sıcaklığı (K)
250	3966,3	344,25	298,5
500	1559	315,25	299,95
750	979,2	305,75	299,05

Z eksenine üzerinde KKI'lerden farklı uzaklıklarda alınan ve Çizelge 4.4.'te ısı akısı ölçümleri incelendiğinde, beklenildiği gibi, KKI'lar ile IAS arasındaki mesafenin azalmasıyla ölçülen ısı akısı değerinin arttığı gözlemlenmiştir. Ölçülen ısı akısı değerlerinin arasında lineer değil eksponansiyel bir ilişki olduğu görülmektedir. Bunun nedeninin, IAS ile KKI'lar arasındaki görüş faktörünün de mesafenin lineer olarak azalmasına oranla eksponansiyel olarak artması kaynaklı olduğu düşünülmektedir.

4.3. IAS Açısının Isı Akısına Etkisi

Deneysel çalışmalara IAS'ın KKI'ların karşısına farklı açılarda yerleştirildiği ölçümler ile devam edilmiştir. Bu ölçümler sırasında IAS 5 numaralı ölçüm noktasında (Bkz. Şekil 4.2.) konumlandırılmış iken, IAS'ın açısı, tasarlanan iki adet plastik parça yardımıyla, sırasıyla 0° , 30° , 60° , 120° ve 150° 'ye (Bkz. Resim 3.4.) ayarlanarak ısı akısı ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Resim 4.2.'de, IAS'ın KKI'ların karşısına dört farklı açı değerinde yerleşimi sırasında çekilen görselleri verilmiştir. Bu ölçümler sırasında, KKI'ların her birine sağlanan elektrik gücü, 500 W'a ve IAS ile KKI'lar arasındaki z eksenine üzerindeki mesafe

500 mm'ye ayarlanmıştır. Bu ölçümler sırasında 1, 2, 3 ve 4 numaralı KKI'lar üzerine düşen net güç değerleri Çizelge 4.5.'te ve bu ölçümler sırasında elde edilen veriler ise Çizelge 4.6.'da gösterilmiştir.



Resim 4.2. IAS'ın KKI'ların karşısına farklı açılardaki yerleşiminin görseli

Çizelge 4.5. IAS'nin farklı açıları için alınan ısı akısı ölçümleri sırasında KKI'lardan ölçülen güç değerleri

IAS Açısı (Derece)	KKI 1 Güç Değeri (Watt)	KKI 2 Güç Değeri (Watt)	KKI 3 Güç Değeri (Watt)	KKI 4 Güç Değeri (Watt)
0°	480	486	488	494
30°	479	488	488	494
60°	479	487	488	493
120°	479	488	488	485
150°	482	486	488	484

IAS'ın farklı açılarında alınan ve Çizelge 4.6.'da verilen ısı akısı değerleri incelendiğinde, en yüksek ısı akısı değerinin IAS açısı 0° derece iken ve en düşük ısı akısı değerinin ise IAS açısı 120° iken ölçüldüğü görülmektedir. Dar açılar ile geniş açılarda ölçülen ısı akısı

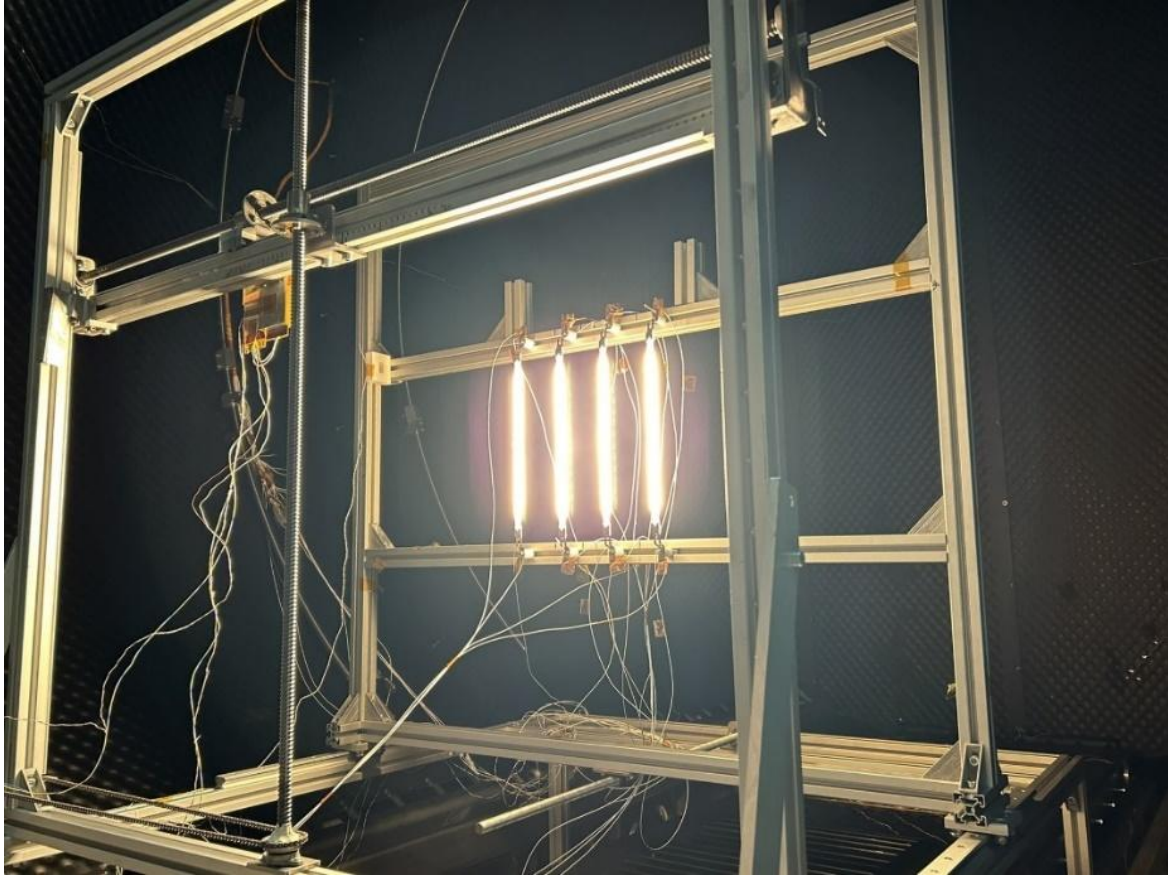
değerleri karşılaştırıldığında, dar açılarda geniş açılara oranla daha yüksek ortalama ısı akısı değeri elde edilmiştir. Dar açılarda daha yüksek bir ortalama ısı akısı değerlerinin gözlemlenmesinin, x-y eksenindeki ısı akısı dağılımı ölçümlerinde de olduğu gibi KKI'ların yüzey sıcaklıklarının homojen olmayıp yüzeyde gerçekleşen doğal taşınım nedeniyle KKI'ların üst kısımlarının alt kısımlarına oranla daha yüksek sıcaklıklara sahip olması nedeniyle olduğu düşünülmektedir.

Çizelge 4.6. KKI'lar 500W, x ile y koordinatları 0 ve uzaklık 500 mm iken IAS'nin farklı açılarda yerleşimi sırasında ölçülen ısı akısı, sensör sıcaklığı ve ortalama ortam sıcaklığı değerleri

IAS Açısı (Derece)	Isı Akısı (W/m^2)	IAS Sıcaklığı (K)	Ortalama Ortam Sıcaklığı (K)
0	1559,0	315,25	299,95
30	1446,2	316,15	298,85
60	1037,3	316,85	298,85
120	909,0	319,75	299,10
150	1384,6	318,85	298,38

4.4. KKI Güç Değerinin Isı Akısına Etkisi

Son olarak, KKI'ların farklı elektriksel güç değerlerine göre ısı akısı değerlerini ölçmek için deneysel çalışmalar yapılmıştır. Elektriksel güç değerleri sırasıyla 100, 300 ve 500 Watt olarak ayarlanmış ve IAS 5 numaralı ölçüm noktasında (Bkz. Şekil 4.2.) konumlandırılmış iken ısı akısı ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Resim 4.3.'te KKI'ların güç değerleri 500 Watt iken gerçekleştirilen ısı akısı ölçümü sırasında çekilen görsel verilmiştir. Bu ölçümler sırasında IAS'ın açısı sıfır derece (açısal yerleşim için Resim 3.4.'e bakınız) ve IAS ile KKI'lar arasındaki z eksenindeki mesafe 500 mm olarak ayarlanmıştır. Bu ölçümler sırasında 1, 2, 3 ve 4 numaralı KKI'lar üzerine düşen net güç değerleri Çizelge 4.7.'de ve bu ölçümler sırasında elde edilen veriler ise Çizelge 4.8.'de gösterilmiştir.



Resim 4.3. KKI'ların 500 Watt'taki ısı akısı ölçümleri sırasında kaydedilen görsel

Çizelge 4.7. KKI'ların farklı güç değerleri için alınan ısı akısı ölçümleri sırasında KKI'lardan ölçülen güç değerleri

Güç Değeri (Watt)	KKI 1 Güç Değeri (Watt)	KKI 2 Güç Değeri (Watt)	KKI 3 Güç Değeri (Watt)	KKI 4 Güç Değeri (Watt)
100	95	100	95	99
300	295	292	289	293
500	480	486	488	494

KKI'ların farklı güç değerleri için alınan ve Çizelge 4.8.'de verilen ısı akısı ölçümleri incelendiğinde, ölçülen ısı akısı değerlerinin KKI'ların güç değerlerinin artışıyla doğru orantılı olduğu görülmektedir. Alınan ölçümler sırasında IAS'ın konumu sabit tutulduğu için KKI'lar ile olan görüş faktörü sabit kalmıştır ve ölçülen ısı akısı değerleri ile KKI'ların güç değerleri arasında lineer bir ilişki olduğu gözlemlenmiştir.

Çizelge 4.8. Uzaklık 500 mm, x ile y koordinatları ve açı 0 iken KKI'ların farklı güç değerleri için ölçülen ısı akısı, sensör sıcaklığı ve ortalama ortam sıcaklığı değerleri

Güç Değeri (Watt)	Isı Akısı (W/m^2)	IAS Sıcaklığı (K)	Ortalama Ortam Sıcaklığı (K)
100	615,3	299,35	295,35
300	1087	309,05	295,35
500	1559	315,25	299,95

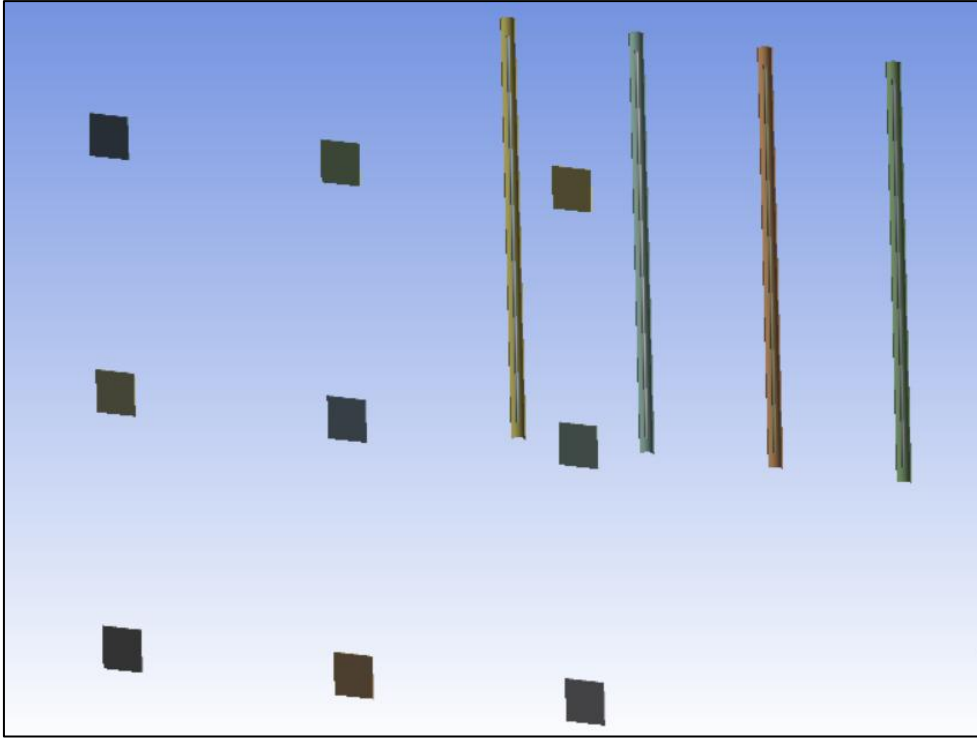
5. SAYISAL SONUÇLAR

KKI'ların farklı güç değerine, IAS'ın farklı uzaklık, konum ve açı değerlerine sahip olduğu senaryolar için ayrıca KKI'ların vakum ortamında çalıştıkları ve kuvars cam kılıflarının farklı emisivite değerlerine sahip olduğu senaryolar içinde yürütülen sayısal çalışmalar ile bu çalışmalardan elde edilen veriler bu başlık altında sunulmuştur.

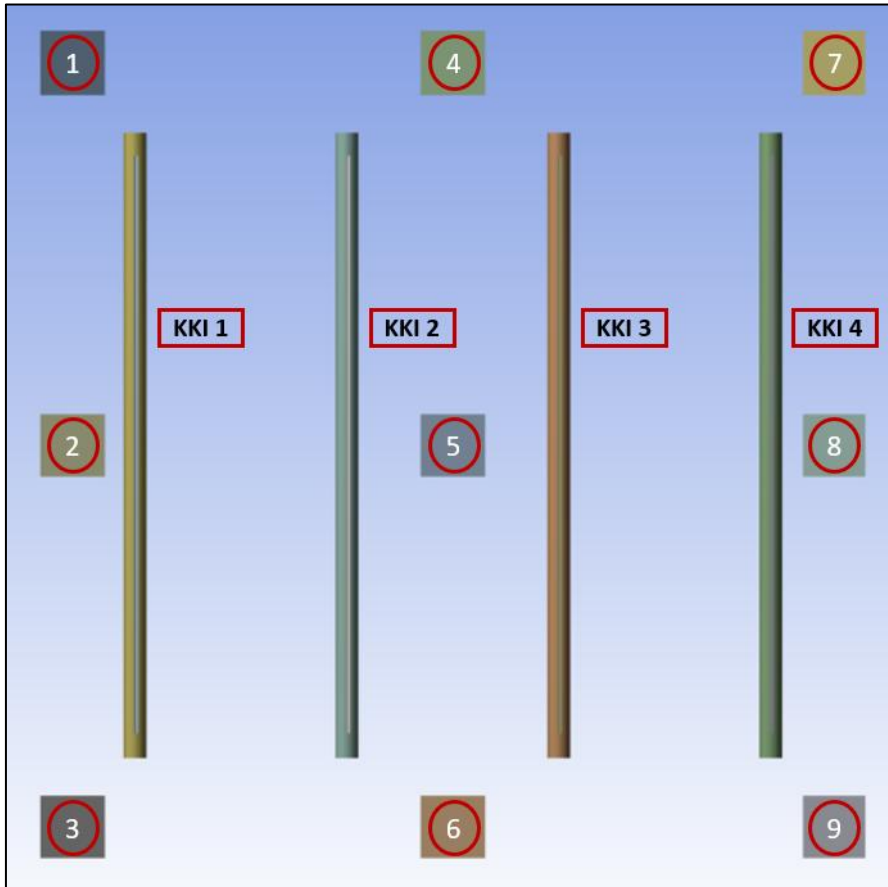
Deneysel veriler ile sayısal verilerin kıyaslanabilmesi için, incelenecek parametre hariç, diğer tüm parametreler sabit tutulup konum, uzaklık, açı, güç, vakum ve emisivite değerleri değiştirilerek sayısal çalışmalar yürütülmüştür. Bu çalışmalara ek olarak, bu parametrelerin IAS üzerindeki ısı akısı değerine etkilerinin daha detaylı incelenebilmesi için parametrik analizler gerçekleştirilmiştir. İlgili sayısal çalışmaya ait detaylı bilgi ve parametrik analizler ışığında elde edilen veriler bölüm 5.7. altında sunulmuştur.

5.1. X-Y Düzlemi Üzerindeki Isı Akısı Dağılımı

SM için kullanılacak olan yarım küp çözünürlüğü, hücre sayısı ve maksimum iterasyon sayısının belirlenmesi ile ilk olarak x-y düzlemi üzerindeki ısı akısı dağılımını hesaplamak üzerine bir çalışma yürütülmüştür. SM'in çözümülenmesi öncesi IAS'ın konumlandırılması işlemi sırasında, bu düzlem üzerindeki ısı akısı dağılımını ölçmek için yapılan deneysel çalışmada kullanılan ve 1'den 9'a numaralandırılan sensör noktalarına (Bkz. Şekil 4.2.) sadık kalınmıştır. IAS'ın y eksenini (düşey eksen) ile yaptığı açının sıfır derece olmasına (açısal yerleşim için Resim 3.4.'e bakınız) ve IAS'ın KKI'lardan olan uzaklığının (z eksenini koordinatının) 500 mm olmasına dikkat edilmiştir. X-Y düzlemi üzerindeki ısı akısını hesaplamak için oluşturulan SM'in izometrik görseli Şekil 5.1.'de ve SM bileşenlerinin isimlendirmelerini içeren görsel ise Şekil 5.2.'de verilmiştir.



Şekil 5.1. X-Y düzlemi üzerindeki ısı akısı dağılımı için oluşturulan SM'in görseli



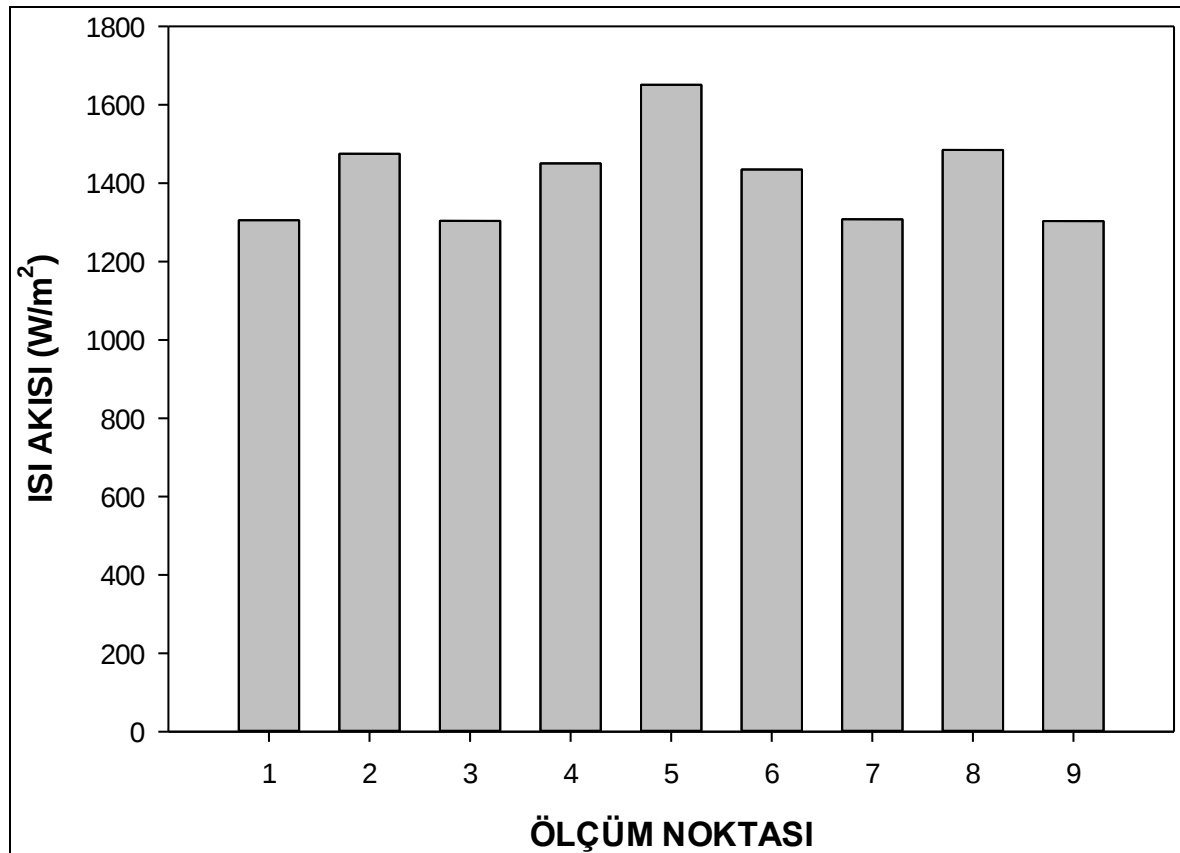
Şekil 5.2. SM bileşenlerinin numaraları

Şekil 5.2.'de yerleşim ve isimlendirmeleri verilen her bir sensör ölçüm noktası için ayrı ayrı senaryolar için simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Bundan dolayı her bir ölçüm noktası için farklı sınır şartları tanımlanmıştır. Çizelge 4.1'de de görüldüğü üzere deneysel ölçümler sırasında her ölçüm noktasındaki KKI güçlerinin değişiklik göstermesinden dolayı bu şekilde bir tanımlamaya gidilmiştir. Değişen KKI güç değerleri ise filament sıcaklığı, kuvars sıcaklığı ve filament emisivite değerini etkilemektedir. Sınır şartları belirlenirken hangi sensör ölçüm noktası için senaryo incelenecek ise, Çizelge 4.1.'de bu nokta için verilen KKI güçleri ve Çizelge 3.8.'de bu güç değerleri için hesaplanan T_f ve T_k sıcaklıkları kullanılmıştır. Bu sensör ölçüm noktalarındaki IAS ve ortalama ortam sıcaklığı değerleri için ise Çizelge 4.2.'de verilen değerler kullanılmıştır. IAS emisivite değeri çalışma şekli gereği 1, kuvars emisivite değeri Kunze [8] ve Er [17]'in gerçekleştirdiği sayısal çalışmalarda kabul edildiği üzere 0,9 olarak ve tungsten filament emisivitesi ise Çizelge 3.6.'da ilgili filament sıcaklığına tekabül eden emisivite değeri hesaplanarak sınır şartları olarak tanımlanmıştır. X-Y düzlemi üzerindeki 9 adet IAS konumunun koordinatları ve bu noktalar için elde edilen ısı akısı değerleri Çizelge 5.1.'de verilmiştir. Bu ısı akısı değerlerinin ölçüm noktası ile olan ilişkisinin gösterildiği grafik ise Şekil 5.3.'te verilmiştir.

X-Y düzlemi üzerindeki ısı akısı dağılımının hesaplatıldığı ve Çizelge 5.1.'de verilen ısı akısı değerleri incelendiğinde, en yüksek ısı akısı değerine, $1651,2 \text{ W/m}^2$ ile düzlemin tam ortasında yer alan ve KKI'lar ile olan görüş faktörünün yüksek olduğu 5 numaralı sensör konumunda ulaşıldığı görülmektedir. X ve Y eksenine göre birbirlerine simetrik olan 1, 3, 7 ve 9 numaralı sensör konumlarında birbirlerine oldukça yakın ısı akısı değerleri gözlemlenmiştir. Çözümlenen senaryolarda KKI 1'in ortalama güç değerinin 479 W ve KKI 4'ün ortalama güç değerinin 489 W olmasından kaynaklı 8 numaralı konumda 2 numaralı konuma oranla daha yüksek bir ısı akısı değeri hesaplanılmıştır.

Çizelge 5.1. KKI'lar 500W, uzaklık 500 mm ve açı 0 iken X-Y düzlemi üzerindeki ısı akısı dağılımı için hesaplanan ısı akısı değerleri

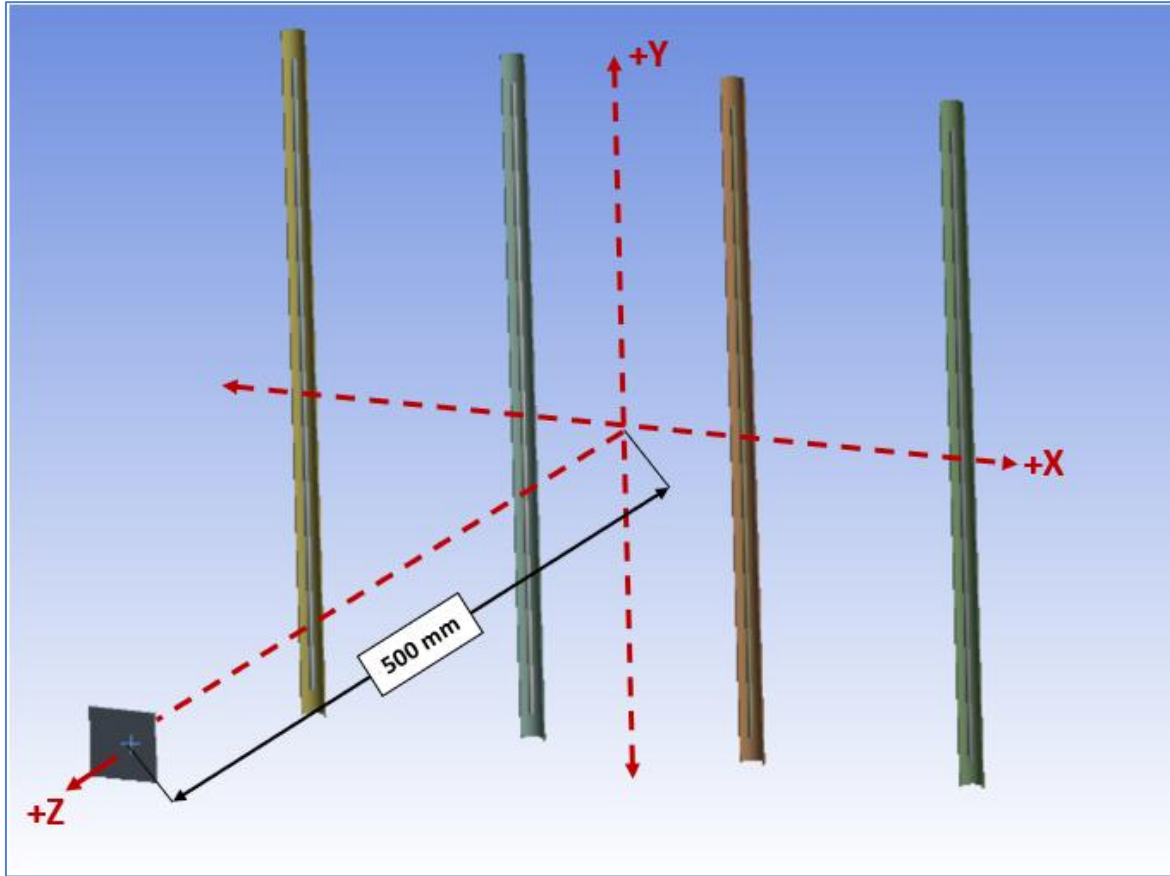
Ölçüm No.	X Eksen Koordinatı (mm)	Y Eksen Koordinatı (mm)	Isı Akısı (W/m^2)
1	-180	+180	1305,3
2	-180	0	1475,1
3	-180	-180	1304,0
4	0	+180	1430,6
5	0	0	1651,2
6	0	-180	1435,1
7	+180	+180	1308,1
8	+180	0	1485,1
9	+180	-180	1303,2



Şekil 5.3. KKI'lar 500W, uzaklık 500 mm ve açı 0 iken X-Y düzlemi üzerindeki ısı akılarının ölçüm noktasına bağlı değişim grafiği

5.2. Z Eksenine Üzerindeki Isı Akısı Dağılımı

İkinci olarak, z eksenine üzerindeki ısı akısı dağılımının hesaplanması üzerine bir sayısal çalışma yürütülmüştür. SM'in çözümlenmesi öncesi IAS'ın konumunun Şekil 4.2.'de x-y düzlemi üzerindeki koordinatları verilen 5 numaralı ölçüm noktası ile aynı olmasına ve IAS'ın y eksenine ile yaptığı açının sıfır derece olmasına (açısal yerleşim için Resim 3.4.'e bakınız) dikkat edilmiştir. IAS'ın KKI'lardan olan uzaklığı (z eksenine koordinatı) sırasıyla 250 mm, 500 mm ve 750 mm'ye ayarlanarak oluşturulan SM çözdürülmüştür. IAS ile KKI'lar arasındaki mesafenin 500 mm olduğu durumdaki ısı akısını hesaplamak için kullanılan SM'in görseli Şekil 5.4.'te verilmiştir.



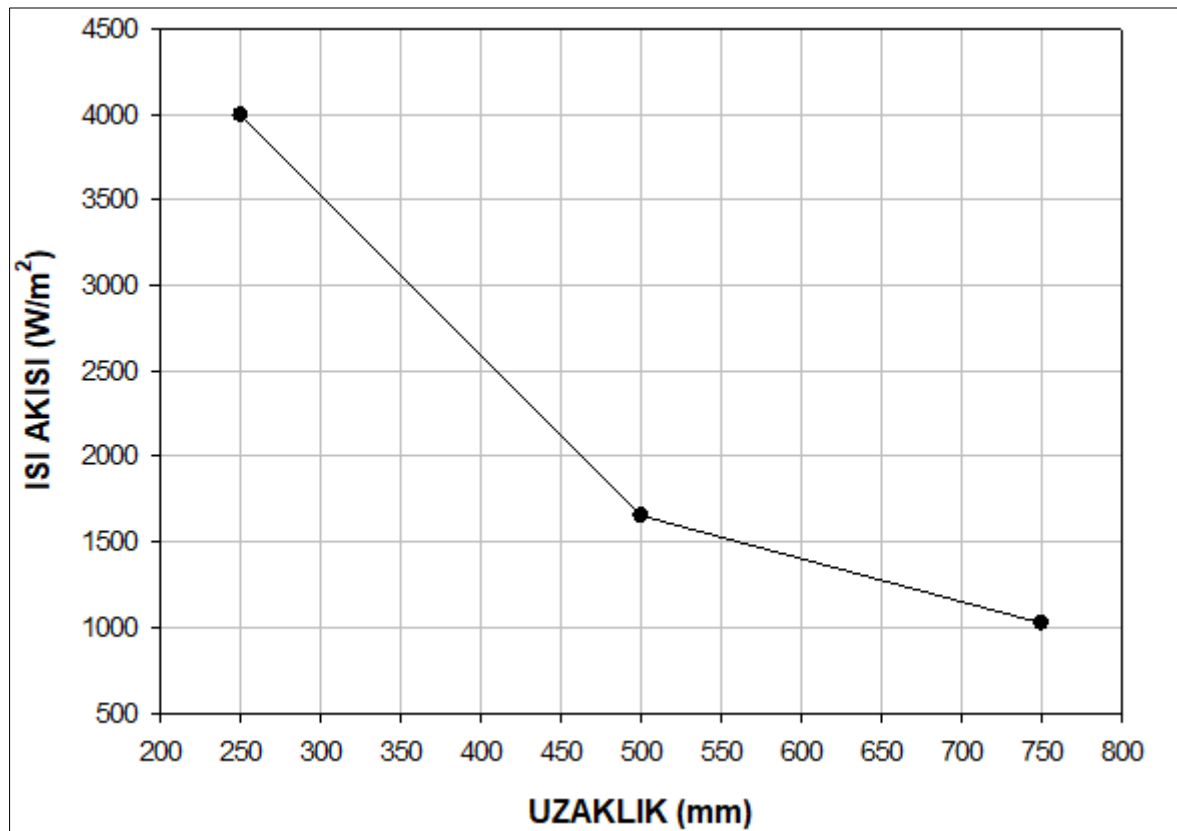
Şekil 5.4. Z eksenine üzerindeki ısı akısı dağılımı için oluşturulan SM'in görseli

Sayısal çalışmalar sırasında IAS ile KKI'lar arasındaki mesafenin 250 mm, 500 mm ve 750 mm olduğu durumlar için ayrı ayrı senaryolar ele alınmıştır. Ayrıca her bir uzaklık değeri için farklı sınır şartları tanımlanmıştır. Sınır şartları belirlenirken hangi uzaklık değeri için senaryo incelenecek ise, Çizelge 4.3.'de bu uzaklık için verilen KKI güçleri ve Çizelge

3.8.'de bu güç değerleri için hesaplanan T_f ve T_k sıcaklıkları kullanılmıştır. Ayrıca, IAS ve ortalama ortam sıcaklığı değerleri için ise Çizelge 4.4.'de verilen değerler kullanılmıştır. IAS emisivite değeri çalışma şekli gereği 1, kuvars emisivite değeri Kunze [8] ve Er [17]'in gerçekleştirdiği sayısal çalışmalarda kabul edildiği üzere 0,9 olarak ve tungsten filament emisivitesi ise Çizelge 3.6.'da ilgili filament sıcaklığına tekabül eden emisivite değeri hesaplanarak sınır şartlarına tanımlanmıştır. IAS'ın KKI'lardan olan uzaklık değerleri ve bu uzaklık değerleri için hesaplatılan ısı akısı değerleri Çizelge 5.2.'de verilmiştir. Ayrıca, ısı akısı değerleri ile uzaklık değerinin ilişkisini gösteren grafik Şekil 5.5.'de verilmiştir.

Çizelge 5.2. KKI'lar 500W, x ile y koordinatları ve açı 0 iken z eksenı üzerindeki ısı akısı dağılımı için hesaplanan ısı akısı değerleri

Uzaklık (mm)	Isı Akısı (W/m^2)
250	3992,4
500	1651,2
750	1023,4

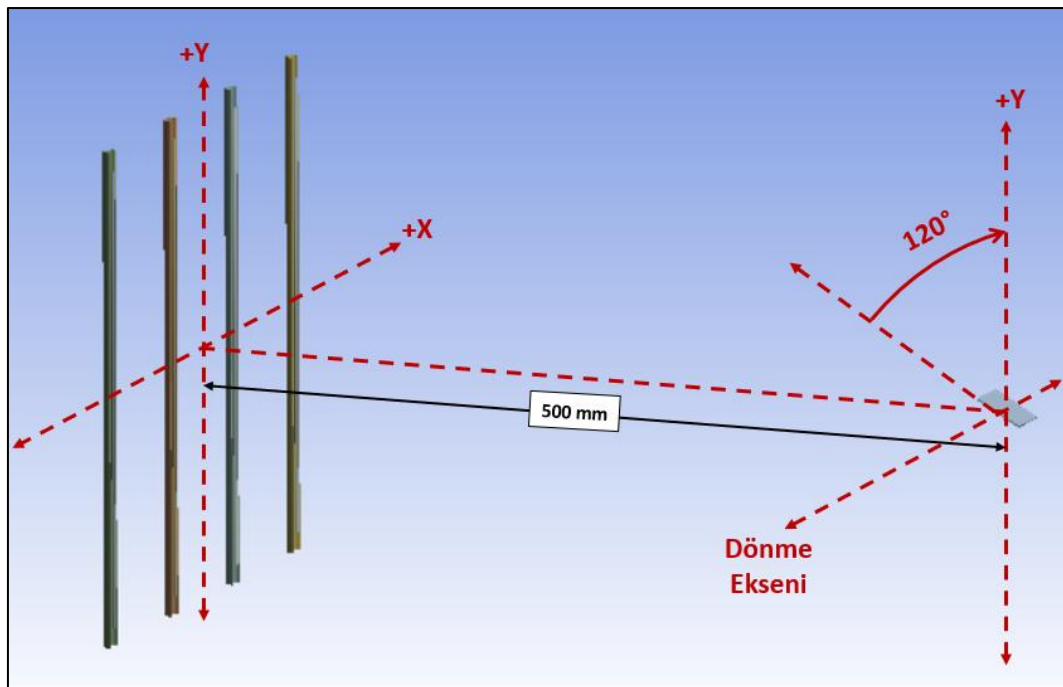


Şekil 5.5. KKI'lar 500W, x ile y koordinatları ve açı 0 iken ısı akısı değerinin z eksenı üzerindeki uzaklığa bağlı değişim grafiğı

Z eksenine üzerindeki ısı akısı dağılımının hesaplatıldığı ve Çizelge 5.2.'de verilen ısı akısı değerleri incelendiğinde, en yüksek ısı akısı değerinin IAS'ın KKI'lara en yakın olduğu 250 mm uzaklıkta ve en düşük ısı akısı değerinin ise 750 mm uzaklıkta iken hesaplandığı görülmektedir. Bu durum, beklenen bir durum olmakla birlikte, özellikle Şekil 5.5'teki grafik üzerinde de görüldüğü üzere, IAS ile KKI'lar arasındaki uzaklığın lineer değişimine karşın ısı akısı değerlerinin eksponansiyel olarak değişmektedir.

5.3. IAS Açısının Isı Akısına Etkisi

Sayısal çalışmalara IAS'ın farklı açı değerleri için gerçekleştirilen hesaplamalar ile devam edilmiştir. SM'in çözümlenmesi öncesi IAS'ın konumunun Şekil 4.2.'de x-y düzlemi üzerindeki koordinatları verilen 5 numaralı ölçüm noktasına ayarlanmıştır. Daha sonra IAS, KKI'lara bakan yüzünün ortasından geçen ve x eksenine paralel olan dönme eksenine etrafında döndürülerek, y eksenine yaptığı açılar sırasıyla 0° , 30° , 60° , 120° ve 150° olacak şekilde beş ayrı açıda konumlandırılmıştır. IAS'ın 30° , 60° , 120° ve 150° açılarındaki KKI'lara göre yerleşimi Resim 4.2.'de gösterildiği gibidir. Ayrıca, IAS'ın KKI'lara bakan yüzünün ortasından KKI'lara olan uzaklık tüm açılar için 500 mm'ye ayarlanarak dört ayrı senaryo için oluşturulan SM çözdürülmüştür. IAS'ın açısının 120° 'ye ayarlandığı ve KKI'lar arasındaki mesafenin 500 mm olduğu durumdaki SM'in görseli Şekil 5.6.'da verilmiştir.



Şekil 5.6. IAS'ın açısının 120° olduğu durum için oluşturulan SM'in görseli

Sayısal çalışmalar sırasında IAS'ın açısının 0° , 30° , 60° , 120° ve 150° olduğu durumlar için ayrı ayrı senaryolar koşulmuştur. Ayrıca her bir açı değeri için farklı sınır şartları tanımlanmıştır. Sınır şartları belirlenirken hangi açı değeri için senaryo koşulacak ise, Çizelge 4.5.'de bu açı değeri için verilen KKI güçleri ve Çizelge 3.8.'de bu güç değerleri için hesaplanan T_f ve T_k sıcaklıkları kullanılmıştır. Ayrıca, IAS ve ortalama ortam sıcaklığı değerleri için ise Çizelge 4.6.'da verilen değerler kullanılmıştır. IAS emisivite değeri çalışma şekli gereği 1, kuvars emisivite değeri Kunze [8] ve Er [17]'in gerçekleştirdiği sayısal çalışmalarda kabul edildiği üzere 0,9 olarak ve tungsten filament emisivitesi ise Çizelge 3.6.'da ilgili filament sıcaklığına tekabül eden emisivite değeri hesaplanarak sınır şartlarına tanımlanmıştır. IAS'ın açı değerleri ve bu açı değerleri için hesaplatılan ısı akısı değerleri Çizelge 5.3.'te verilmiştir.

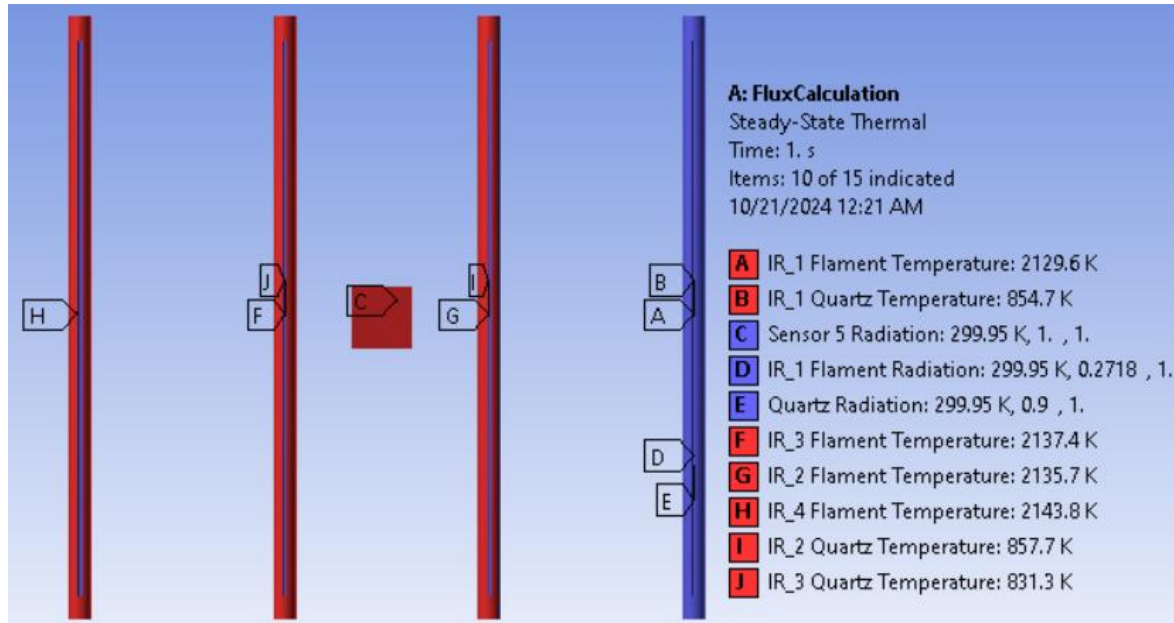
IAS açısının ısı akısına olan etkisini gözlemlemek için hesaplanan ve Çizelge 5.3.'te verilen ısı akısı değerleri incelendiğinde, birbirinin bütünleri olan açılarda (30° ile 150° ve 60° ile 120°) yapılan hesaplamalarda bütün açılar arasındaki ısı akısı farkların ihmal edilebilir seviyede küçük olduğu ayrıca, 30° ile 150° 'de hesaplanan ısı akısı değerlerinin 60° ile 120° 'dekilere oranla yaklaşık %41 daha yüksek olduğu görülmektedir. Bütünler açılar için hesaplanan ısı akısı değerleri arasında neredeyse fark olmayıp hatta simetrik olmaları beklenen bir durum olmakla birlikte, SM içerisinde, KKI'ların T_f ve T_k sıcaklıklarının homojen olarak tanımlanmasından kaynaklı olduğu düşünülmektedir.

Çizelge 5.3. KKI'lar 500W, x ile y koordinatları 0 ve uzaklık 500 mm iken IAS açısının ısı akısına etkisi için hesaplanan ısı akısı değerleri

IAS Açısı (Derece)	Isı Akısı (W/m^2)
0°	1651,2
30°	1482,4
60°	1048,9
120°	1045,8
150°	1481,6

5.4. KKI Güç Değerinin Isı Akısına Etkisi

Sayısal çalışmaların bir sonraki adımında, IAS üzerine düşen ısı akısı değerini etkileyen bir diğer değişken olan KKI güç değerleri üzerine çalışılmıştır. SM'in çözülmesi öncesi IAS'ın konumunun Şekil 4.2.'de x-y düzlemi üzerindeki koordinatları verilen 5 numaralı ölçüm noktasına ayarlanılmış ve IAS'ın y eksenine ile yaptığı açının sıfır derece olmasına (açısal yerleşim için Resim 3.4.'e bakınız) dikkat edilmiştir. Ayrıca, IAS ile KKI'lar arasındaki uzaklık 500 mm'ye ayarlanarak KKI güçlerinin 100 W, 300 W ve 500 W olduğu üç ayrı senaryo için oluşturulan SM çözdürülmüştür. KKI güçlerinin 500 W olduğu durum için oluşturulan SM'in görseli ve sınır şartları Şekil 5.7.'de sunulmuştur.



Şekil 5.7. KKI güçlerinin 500 W olduğu durum için oluşturulan SM'in görseli ve sınır şartları

Sayısal çalışmalar sırasında KKI'ların güç değerlerinin 100 W, 300 W ve 500 W olduğu durumlar için ayrı ayrı senaryolar incelenmiştir. Dolayısıyla her bir güç değeri için farklı sınır şartları tanımlanmıştır. Sınır şartları belirlenirken hangi güç değeri için senaryo ele alındı ise, Çizelge 4.7.'de bu güce karşılık KKI'lardan okunan net güç değerleri ve Çizelge 3.8.'te bu güç değerleri için hesaplanan T_f ve T_k sıcaklıkları kullanılmıştır. Ayrıca, IAS ve ortalama ortam sıcaklığı değerleri için ise Çizelge 4.8.'de verilen değerler kullanılmıştır. IAS emisivite değeri çalışma şekli gereği 1, kuvars emisivite değeri Kunze [8] ve Er [17]'in gerçekleştirdiği sayısal çalışmalarda kabul edildiği üzere 0,9 olarak ve tungsten filament

emisivitesi ise Çizelge 3.6.'da ilgili filament sıcaklığına tekabül eden emisivite değeri hesaplanarak sınır şartlarına tanımlanmıştır. KKI'ların güç değerleri ve bu güç değerleri için hesaplatılan ısı akısı değerleri Çizelge 5.4.'te verilmiştir.

Çizelge 5.4. Uzaklık 500 mm, x ile y koordinatları ve açı 0 iken KKI güç değerinin ısı akısına etkisi için hesaplanan ısı akısı değerleri

KKI Güç Değeri (Watt)	Isı Akısı (W/m^2)
100	614,4
300	1125,4
500	1651,2

KKI güç değerinin ısı akısına olan etkisini gözlemlemek için hesaplanan ve Çizelge 5.4.'te verilen ısı akısı değerleri incelendiğinde, 100 W güç değerinden 500 W güç değerine artırıldığında hesaplanan ısı akısı değerinin de arttığı gözlemlenmiştir. Hesaplanan ısı akısı değerlerinin, 100 W'dan 300 W'a $511 W/m^2$, 300 W'dan 500 W'a ise $526 W/m^2$ artarak KKI güç değerleri ile hesaplanan ısı akısı değerleri arasında lineer bir ilişki olduğunu göstermektedir.

KKI'nın farklı güç değerlerine, IAS'ın farklı uzaklık, konum ve açılara sahip olduğu durumlar için oluşturulan SM ve bu çalışmalar sayesinde elde edilen veriler yardımıyla KKI'ların vakum ortamında çalıştıkları ve seramik kaplı arka yüzeylerinin yayınım değerlerinin (ϵ) 0,3, 0,5 ve 0,7 olduğu senaryolar için de sayısal çalışmalar yürütülmüştür. Bu sayede daha önce çalışılan 4 adet parametreye ek olarak sonraki bölümlerde 2 adet daha parametrenin IAS üzerindeki ısı akısı değerine etkisi incelenmiştir.

5.5. Vakum Ortamının Isı Akısına Etkisi

Bu başlık altında yürütülen sayısal çalışmalarda, ITS'nin atmosferik ortamda değil vakum ortamında çalıştığı kabul edilmiş ve bundan dolayı KKI'lar üzerindeki doğal taşınım ile ısı transferi etkisi ihmal edilmiştir. Bu senaryo için oluşturulan SM'in çözümlenmesi öncesi IAS'ın konumunun Şekil 4.2.'de x-y düzlemi üzerindeki koordinatları verilen 5 numaralı ölçüm noktasına ayarlanılmış ve IAS'ın y eksenini ile yaptığı açının sıfır derece olmasına (açısal yerleşim için Resim 3.4.'e bakınız) dikkat edilmiştir. Ayrıca, IAS ile KKI'lar

arasındaki uzaklık 500 mm'ye ayarlanarak vakum ortamında, KKI güçlerinin 500 W olduğu bir senaryo için oluşturulan SM çözdürülmüştür.

Sayısal çalışma sırasında KKI'ların güç değerlerinin 500 W olduğu ve vakum ortamında bulundukları bir senaryo tasarlanmıştır. Dolayısıyla önceki sayısal çalışmalarda kullanılan T_f ve T_k sıcaklıklarının hesaplanmasında görev alan eşitliklerden olan Eş. 3.7 tekrardan düzenlenmiştir. Vakum ortamında basınç değerinin, havanın viskoz akış hareketlerini gerçekleştiremeyeceği seviyede düşük olmasının bir sonucu olarak hacim içerisindeki taşınım ile ısı transferi etkisi ihmal edilmektedir. Eş. 3.7'nin bir bileşeni olan ve kuvars cam kılıfın çevresi ile olan taşınım ısı transferini temsil eden kısmı h değerinin sıfıra eşit olması kaynaklı eşitlik içerisinde etkisiz hale gelmiştir. SM'de, Çizelge 3.9.'da verilen ve değişen Eş. 3.7 kullanılarak, KKI'ların sahip olduğu net güç değerleri sırasıyla 480 W, 486 W, 488 W ve 496 W kabul edilerek hesaplanan T_f ve T_k sıcaklıkları kullanılmıştır. Ayrıca, IAS ve ortalama ortam sıcaklığı değerleri için ise Çizelge 4.7.'de KKI'ların 500 W değeri için verilen değerler kullanılmıştır. IAS emisivite değeri çalışma şekli gereği 1, kuvars emisivite değeri Kunze [8] ve Er [17]'in gerçekleştirdiği sayısal çalışmalarda kabul edildiği üzere 0,9 olarak ve tungsten filament emisivitesi ise Çizelge 3.6.'da ilgili filament sıcaklığına tekabül eden emisivite değeri hesaplanarak sınır şartlarına tanımlanmıştır. KKI'ların vakum ortamında çalıştıkları senaryo için oluşturulan SM yukarıda açıklanan sınır şartları tanımlamalarının yapılması ardından elde edilmiştir. KKI'ların vakum ortamında çalıştıkları senaryo için hesaplatılan ısı akısı değerleri Çizelge 5.5.'te verilmiştir. Vakum ortamının ısı akısına olan etkisini gözlemlemek için hesaplanan ve Çizelge 5.5.'te verilen ısı akısı değerleri incelendiğinde ve vakum koşulunda IAS üzerindeki ısı akısı değeri 1810,9 W/m² olarak hesaplanılmıştır. Atmosferik basınç altında IAS üzerindeki ısı akısı değeri ise, KKI'ların aynı güç değerlerinde çalıştıkları, IAS'ın konumunun ve açısının aynı olduğu bir diğer senaryo için 1651,2 W/m² olarak hesaplatılmıştı. Bu sayısal veriler ışığında, KKI'ların vakum ortamındaki ısıtma güçlerinin atmosferik basınç altındaki duruma oranla daha yüksek olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Çizelge 5.5. KKI'lar 500W, uzaklık 500 mm, x ile y koordinatları ve açı 0 iken ortam koşullarının ısı akısına etkisi için hesaplanan ısı akısı değerleri

Senaryo	Isı Akısı (W/m ²)
Atmosferik Koşul	1651,2
Vakum Koşulu	1810,9

5.6. Seramik Kaplı Kuvars Camın Emisivite Değerinin Isı Akısına Etkisi

Sayısal çalışmaların en son adımı olarak, KKI'nın kuvars cam kılıfının seramik kaplı arka yüzeyinin emisivite değerinin IAS üzerine düşen ısı akısı değerine etkisini tespit edebilmek için bir çalışma yürütülmüştür. Bu çalışmada, diğer parametreler için gerçekleştirilen sayısal çalışmalar sırasında 0,9 olarak kabul edilen seramik kaplı kuvars camın emisivite değerinin (ϵ_k) sırasıyla 0,3, 0,5 ve 0,7 olduğu varsayılarak bu üç farklı durum için IAS üzerine düşen ısı akısı değerleri hesaplatılmıştır. Bu senaryo için oluşturulan SM'in çözülmesi öncesi IAS'ın konumunun Şekil 4.2.'de x-y düzlemi üzerindeki koordinatları verilen 5 numaralı ölçüm noktasına ayarlanılmış ve IAS'ın y eksenine ile yaptığı açının sıfır derece olmasına (açısal yerleşim için Resim 3.4.'e bakınız) dikkat edilmiştir. Ayrıca, IAS ile KKI'lar arasındaki uzaklığın 500 mm'ye ayarlandığı ve KKI güçlerinin 500 W olduğu durum için oluşturulan SM, ϵ_k 'nın üç farklı değeri için çözdürülmüştür.

Bu sayısal çalışma sırasında KKI'nın seramik kaplı kuvars cam kılıfının emisivite değerinin 0,3, 0,5 ve 0,7 olduğu durumlar için ayrı ayrı senaryolar için simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Dolayısıyla her bir güç değeri için farklı sınır şartları tanımlanmıştır. Sınır şartları belirlenirken hangi emisivite değeri için senaryo incelenecek ise, Çizelge 3.10.'da bu değer için verilen ve KKI'ların sahip olduğu net güç değerleri sırasıyla 480 W, 486 W, 488 W ve 496 W kabul edilerek hesaplanan T_f ve T_k sıcaklıkları kullanılmıştır. Ayrıca, IAS ve ortalama ortam sıcaklığı değerleri için ise Çizelge 4.7.'de KKI'ların 500 W değeri için verilen değerler kullanılmıştır. IAS emisivite değeri çalışma şekli gereği 1 ve tungsten filament emisivitesi ise Çizelge 3.6.'de ilgili filament sıcaklığına tekabül eden emisivite değeri hesaplanarak sınır şartlarına tanımlanmıştır. KKI'nın seramik kaplı kuvars cam kılıfının farklı ϵ_k değerleri için hesaplatılan ısı akısı değerleri Çizelge 5.6.'da verilmiştir.

Çizelge 5.6. KKI'lar 500W, uzaklık 500 mm, x ile y koordinatları ve açı 0 iken kuvars cam kılıfın farklı emisivite değerleri için hesaplanan ısı akısı değerleri

ϵ_k	Isı Akısı (W/m^2)
0,3	1989,1
0,5	1842,8
0,7	1734,6

KKI'ın seramik kaplı kuvars cam kılıfının emisivite değeri 1500 W/m² ısı akısına olan etkisini gözlemlemek için hesaplanan ve Çizelge 5.6.'da verilen 1500 W/m² ısı akısı değeri incelendiğinde, emisivite değeri artışıyla IAS üzerine düşen 1500 W/m² ısı akısı değeri arasında ters bir ilişki olduğu görülmektedir. Elde edilen 1500 W/m² ısı akısı değeri artan kuvars emisivitesi karşısında azalmasının nedeninin, kuvars cam kılıfın, azalan emisivite değeri, yansıtıcılık (reflectivity) değeri arttırarak, tungsten filament tarafından etrafına yayılan (emitted) 1500 W/m² enerjisinin eskisinden daha yüksek bir miktarını IAS'a yansıtması kaynaklı olduğu sonucuna varılmıştır.

5.7. Parametrik Analizler

Bölüm 5. Sayısal Sonuçlar başlığı altında yer alan diğer alt başlıklarda, KKI'ların farklı güç değerlerine, IAS'ın farklı uzaklık, konum ve açılara sahip olduğu senaryolar için gerçekleştirilen sayısal çalışmalar ve bu çalışmalardan elde edilen veriler detaylı olarak sunulmuştur. Ayrıca bu senaryolar için elde edilen sayısal veriler, Bölüm 6. Deneysel ve Sayısal Verilerin Karşılaştırılması başlığı altında deneysel veriler ile kıyaslanarak aralarındaki uyum değerlendirilmiştir. Değerlendirme ışığında, SM'in gerçek durumdaki 1500 W/m² akılarını simüle edebilmek için kullanıma oldukça uygun olduğu sonucuna varılmıştır.

Sayısal ve deneysel verilerin karşılaştırılmasının ardından, SM, güç, uzaklık, konum ve açı parametrelerine ek olarak, vakum koşulu ve kuvars cam kılıfın farklı emisivite değeri senaryoları içinde düzenlenmiş ve sayısal veriler elde edilmiştir. Bu sayede, her bir parametrenin, IAS üzerine gelen 1500 W/m² ısı akısı değeri nasıl bir etkisi olduğu gözlemlenmiş oldu. Gerçekleştirilen parametrik analizler sayesinde ise bu parametrelerin bir veya birden fazlasının değişiminin IAS üzerine gelen 1500 W/m² ısı akısı değeri etkisi üzerine daha detaylı bilgiler elde edilmiştir.

Parametrik analizler sırasında, KKI'ların güç değerlerinin 100W, 300W ve 500W varsayıldığı senaryolarda, KKI'lar üzerindeki net güç değeri Çizelge 4.7.'de verilen değerler ile aynı kabul edilmiştir. Ayrıca bu güç değerlerindeki, IAS sıcaklığı ve ortam sıcaklığı değerleri için ise Çizelge 4.8.'de verilen değerlerden yararlanılmıştır.

Bu bölüm içerisinde incelenen parametrik analizlerden bir kısmı atmosferik ortam diğer kısmı ise vakum ortamı için gerçekleştirilmiştir. KKI'lar aynı güç değeri sahip olsa dahi, taşınım ısı transferinin vakum ortamında etkisiz hale gelmesi nedeniyle, bu iki ortam

koşulu için Eş. 3.6 ve Eş. 3.7'den elde edilen T_f ve T_k sıcaklıkları farklılık göstermektedir. Bundan dolayı, atmosferik ortam için gerçekleştirilen sayısal çalışmalarda KKI'lar üzerindeki net güç değerleri için hesaplanan T_f ve T_k sıcaklıkları Çizelge 3.8.'de ve vakum ortamında aynı net güç değerleri için hesaplanan T_f ve T_k sıcaklıkları ise Çizelge 3.9.'da verilmiştir. IAS emisivite değeri çalışma şekli gereği 1, kuvars emisivite değeri Kunze [8] ve Er [17]'in gerçekleştirdiği sayısal çalışmalarda kabul edildiği üzere 0,9 olarak ve tungsten filament emisivitesi ise Çizelge 3.6.'da ilgili filament sıcaklığına tekabül eden emisivite değeri hesaplanarak sınır şartlarına tanımlanmıştır.

Çizelge 5.7. Parametrik analiz çalışmaları kapsamında hesaplanan ısı akısı değerleri

Güç (W)	X Ekseni Kon. (mm)	Y Ekseni Kon. (mm)	Mesafe (mm)	Açı (Derece)	Ortam Koşulu	Say. Isı Ak. (W/m ²)
100	0	0	500	30	Atmosferik Ortam	595,2
100	0	0	500	60	Atmosferik Ortam	528,5
100	0	0	500	120	Atmosferik Ortam	528,5
100	0	0	500	150	Atmosferik Ortam	595,2
500	0	0	1500	30	Atmosferik Ortam	595,8
500	0	0	1500	60	Atmosferik Ortam	540,7
500	0	0	1500	120	Atmosferik Ortam	540,7
500	0	0	1500	150	Atmosferik Ortam	595,8
500	0	0	1000	0	Atmosferik Ortam	797,3
500	0	0	1500	0	Atmosferik Ortam	614,9
100	0	0	500	0	Vakum Ortamı	692,8
300	0	0	500	0	Vakum Ortamı	1243,3
500	0	0	250	0	Vakum Ortamı	4406,3
500	0	0	1500	0	Vakum Ortamı	636,3

6. DENEYSEL VE SAYISAL VERİLERİN KARŞILAŞTIRILMASI

Bu başlık altında, bölüm 4. Deneysel Veriler ve bölüm 5. Sayısal Veriler başlıkları altında detaylı incelenen, KKI'ların farklı güç değerlerine, IAS'ın farklı uzaklık, konum ve açılara sahip olduğu senaryolar için, deneysel ve sayısal çalışmalar neticesinde, elde edilen ısı akısı değerleri birbirleri ile kıyaslanacaktır.

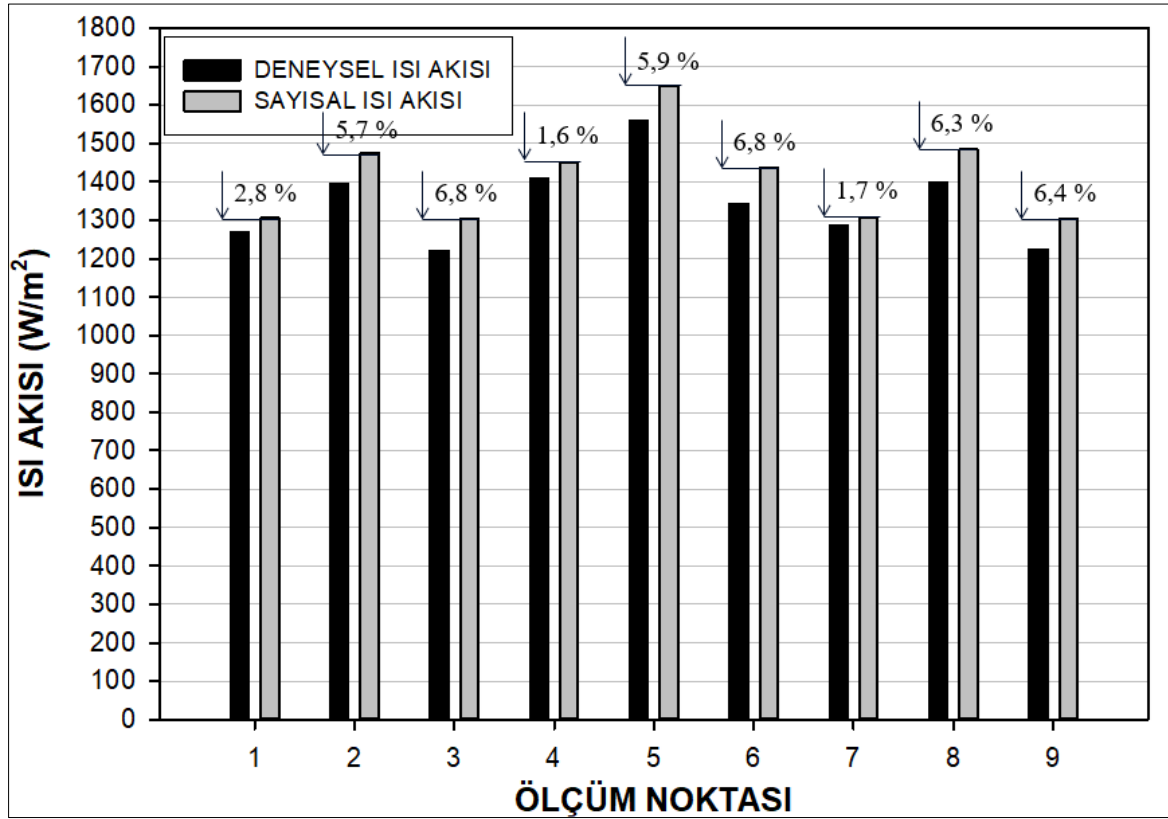
6.1. X-Y Düzlemi Üzerindeki Isı Akısı Dağılımı İçin Elde Edilen Verilerin Karşılaştırılması

Bölüm 4.1. ve Bölüm 5.1.'de X-Y Düzlemi Üzerindeki Isı Akısı Dağılımı başlıkları altında, $360 \text{ mm} \times 360 \text{ mm}$ boyutlarındaki, x ile y eksenlerine paralel olan bir düzlem üzerinde yer alan ve koordinatları Şekil 4.2.'de gösterilen 9 ölçüm noktası için IAS üzerine düşen ısı akısı değerleri hem deneysel hem de sayısal yöntemler ile elde edilmiştir. Çizelge 6.1.'de bu 9 ısı akısı ölçüm noktası için elde edilen sayısal, deneysel veriler ve bu değerler arasındaki yüzdesel farklar verilmiştir. Yüzdesel fark değerleri hesaplanırken sayısal ısı akısı değeri ile deneysel ısı akısı arasındaki fark deneysel ısı akısı değerine oranlanmıştır. Şekil 6.1.'de, x-y düzlemi üzerindeki ısı akısı dağılımı için elde edilen deneysel ve sayısal ısı akısı değerleri, aralarındaki ilişkinin daha rahat görülebilmesi için sütun grafiği olarak verilmiştir.

Çizelge 6.1.'de verilen sayısal, deneysel ısı akısı değerleri ve aralarındaki yüzdesel fark değerleri incelendiğinde, veriler arasındaki en yüksek farkın %6,8 ile 3 ve 6 numaralı ölçüm noktalarında, veriler arasındaki en düşük farkın %1,6 ile 4 numaralı ölçüm noktasında ve bu 9 noktanın ortalama yüzdesel fark değeri ise %4,9 olarak hesaplandığı görülmektedir. Y ekseninin pozitif kısmında yer alan 1, 4 ve 7 numaralı ölçüm noktalarında hesaplanan yüzdesel farkların diğer noktalara oranla oldukça düşük iken Y ekseninin negatif kısmında yer alan 3, 6 ve 9 numaralı ölçüm noktalarında hesaplanan yüzdesel farkların diğer noktalara oranla yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Bunun nedeninin, deneysel ölçümler sırasında, KKI'ların yüzey sıcaklıklarının homojen olmadığı ve yüzeylerinde gerçekleşen doğal taşınım nedeniyle KKI'ların alt kısımlarının üst kısımlarına oranla daha düşük sıcaklıklara sahip olmasına rağmen sayısal modelleme sırasında, KKI'ların yüzey sıcaklığı sınır şartlarının homojen kabul edilerek KKI'ların dış yüzeyine sabit sıcaklık değeri atanmasından kaynaklı olduğu değerlendirilmiştir.

Çizelge 6.1. X-Y düzlemi üzerindeki ısı akısı dağılımı için elde edilen deneysel, sayısal veriler ve ısı akısı değerleri arasındaki yüzdesel farklar

Ölç. No.	X Kon. (mm)	Y Kon. (mm)	IAS Sıc. (K)	Ortam Sıc. (K)	Den. Isı Ak. (W/m^2)	Say. Isı Ak. (W/m^2)	Yüz. Fark (%)
1	-180	+180	312,15	299,45	1269,7	1305,3	2,8
2	-180	0	312,65	299,45	1395,4	1475,1	5,7
3	-180	-180	313,45	299,95	1221,3	1304,0	6,8
4	0	+180	314,65	299,95	1407,5	1430,6	1,6
5	0	0	315,25	299,95	1559,0	1651,2	5,9
6	0	-180	313,95	299,95	1343,3	1435,1	6,8
7	+180	+180	312,55	299,45	1285,9	1308,1	1,7
8	+180	0	314,15	299,45	1397,0	1485,1	6,3
9	+180	-180	312,95	299,45	1224,9	1303,2	6,4



Şekil 6.1. X-Y düzlemi üzerindeki ısı akısı dağılımı için elde edilen deneysel ve sayısal ısı akısı değerlerinin grafiği

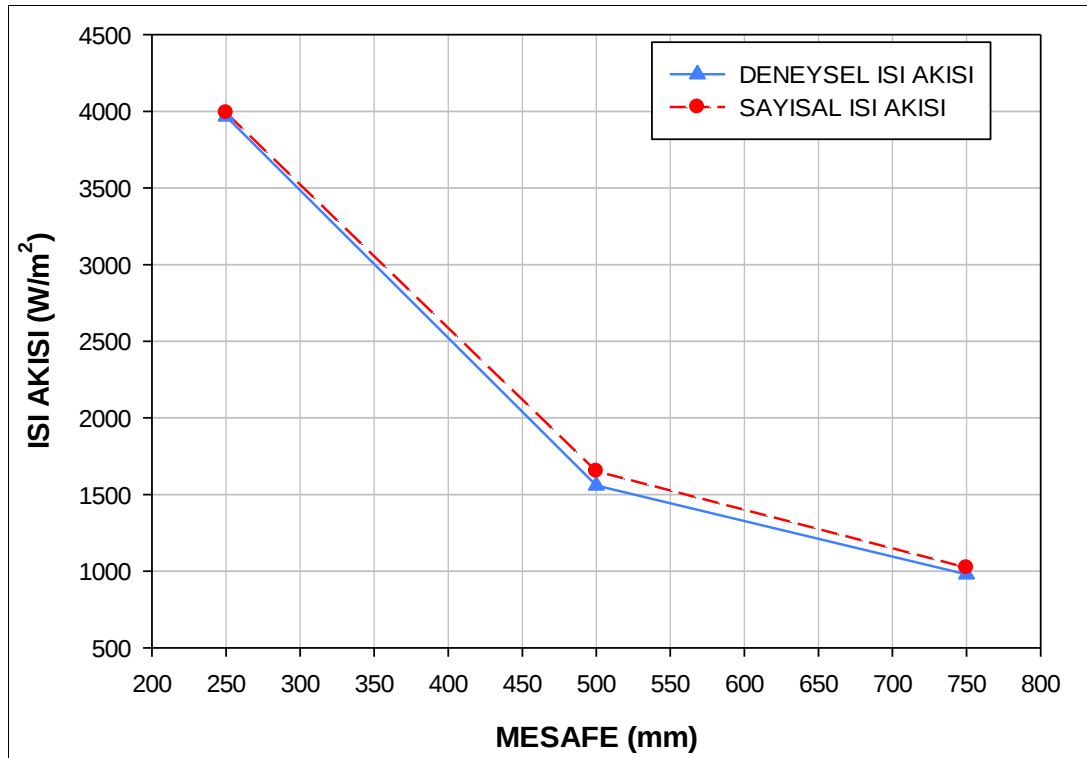
6.2. Z Eksen Üzerindeki Isı Akısı Dağılımı İçin Elde Edilen Verilerin Karşılaştırması

Bölüm 4.2. ve Bölüm 5.2.'de Z Eksen Üzerindeki Isı Akısı Dağılımı başlıkları altında, KKI'lar ile IAS arasındaki (z eksen üzerindeki) mesafenin 250 mm, 500 mm ve 750 mm ve IAS'ın konumunun Şekil 4.2.'de gösterilen 5 numaralı ölçüm noktası olduğu durumlar için IAS üzerine düşen ısı akısı değerleri hem deneysel hem de sayısal yöntemler ile elde edilmiştir. Çizelge 6.2.'de z eksen üzerindeki bu 3 ölçüm noktası için elde edilen sayısal, deneysel veriler ve bu değerler arasındaki yüzdesel farklar verilmiştir. Şekil 6.2.'de, z eksen üzerindeki ısı akısı dağılımı için elde edilen deneysel ve sayısal ısı akısı değerleri, aralarındaki ilişkinin daha rahat görülebilmesi için grafik olarak verilmiştir.

Çizelge 6.2.'de verilen sayısal, deneysel ısı akısı değerleri ve aralarındaki yüzdesel fark değerleri incelendiğinde, veriler arasındaki en yüksek farkın %5,9 ile mesafenin 500 mm olduğu ve veriler arasındaki en düşük farkın ise %0,7 ile mesafenin 250 mm olduğu durum için hesaplandığı görülmektedir. Bu veriler ışığında, oluşturulan SM'in, dolayısıyla SM oluşturulurken yapılan kabullerin, IAS ile KKI'lar arasındaki mesafenin azalmasıyla gerçek durumlara daha uyumlu hale geldiği sonucuna varılmaktadır. IAS'ın, KKI'lara olan yakınlığının artması, KKI'lar ile arasında olan görüş faktörünü oldukça artırıp KKI'ların IAS ile olan ısı transferinin IAS'ın ortam ile olan ısı transferine oranla baskın hale gelmesini sağlamıştır.

Çizelge 6.2. Z eksen üzerindeki ısı akısı dağılımı için elde edilen deneysel, sayısal veriler ve ısı akısı değerleri arasındaki yüzdesel farklar

Mesafe (mm)	IAS Sıc. (K)	Ortam Sıc. (K)	Den. Isı Ak. (W/m ²)	Say. Isı Ak. (W/m ²)	Yüz. Fark (%)
250	344,25	298,5	3966,3	3992,44	0,7
500	315,25	299,95	1559	1651,22	5,9
750	305,75	299,05	979,2	1023,37	4,5



Şekil 6.2. Z eksenindeki ısı akısı dağılımı için elde edilen deneysel ve sayısal ısı akısı değerlerinin grafiği

6.3. IAS Açısının Isı Akısına Etkisi İçin Elde Edilen Verilerin Karşılaştırılması

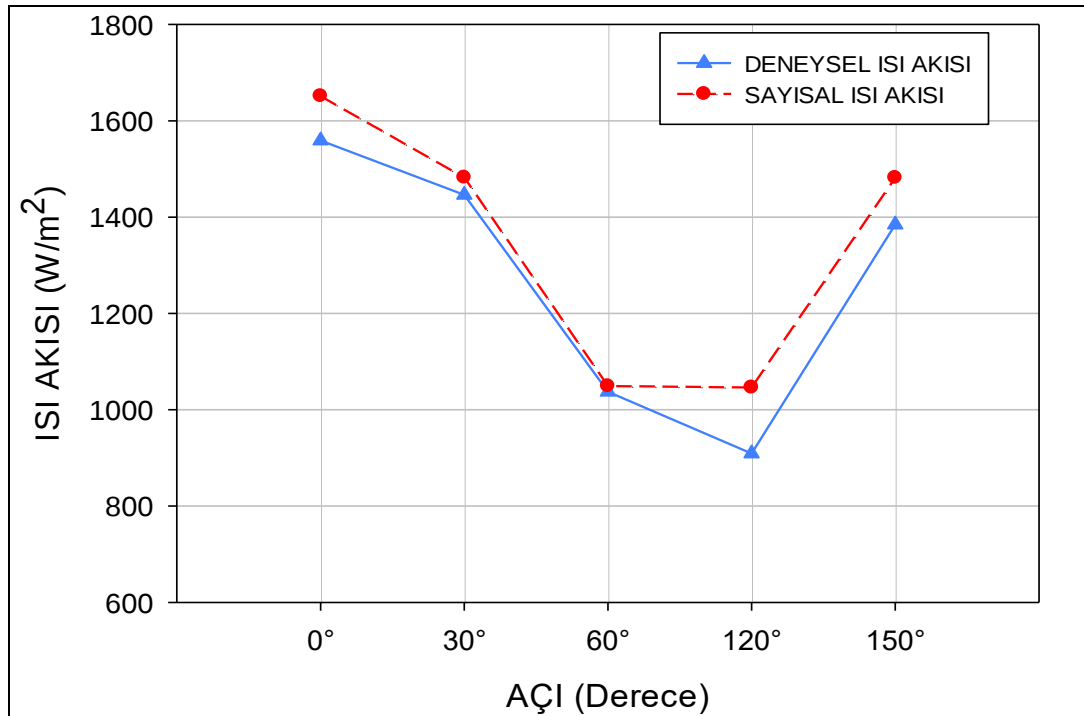
Bölüm 4.3. ve 5.3. IAS Açısının Isı Akısına Etkisi başlıkları altında, IAS'ın düşey eksen olan y eksenini ile arasındaki açının 0° , 30° , 60° , 120° ve 150° olduğu, IAS'ın KKI'lara bakan yüzünün ortasından KKI'lara olan dikey uzaklığın 500 mm olduğu ve IAS'ın konumunun Şekil 4.2.'de gösterilen 5 numaralı ölçüm noktası olduğu durumlar için IAS üzerine düşen ısı akısı değerleri hem deneysel hem de sayısal yöntemler ile elde edilmiştir. Çizelge 6.3.'te IAS'ın bu 5 açı değeri için elde edilen sayısal, deneysel veriler ve bu değerler arasındaki yüzdesel farklar verilmiştir. Yüzdesel fark değerleri hesaplanırken sayısal ısı akısı değeri ile deneysel ısı akısı arasındaki fark deneysel ısı akısı değerine oranlanmıştır. Şekil 6.3.'de, IAS açısının ısı akısına etkisi için elde edilen deneysel ve sayısal ısı akısı değerleri, aralarındaki ilişkinin daha rahat görülebilmesi için grafik olarak verilmiştir.

Çizelge 6.3.'te verilen sayısal, deneysel ısı akısı değerleri ve aralarındaki yüzdesel fark değerleri incelendiğinde, veriler arasındaki en yüksek farkın %15 ile IAS'ın açısının 120° olduğu ve veriler arasındaki en düşük farkın ise %1,1 ile IAS'ın açısının 60° olduğu olduğu durum için hesaplandığı görülmektedir. Genel olarak, veriler arasındaki yüzdesel farkın

IAS'ın dar açılardaki yerleşimi için düşük ve geniş açılardaki yerleşimi için ise yüksek olduğu tespit edilmiştir. Dar ve geniş açılar arasındaki bu farkın nedeninin, SM içerisinde KKI'ların yüzey sıcaklıklarının homojen olarak kabul edilerek dış yüzeylerine sabit sıcaklık değeri tanımlanmasına rağmen gerçekte KKI'ların dış yüzeyinde gerçekleşen doğal taşınım nedeniyle KKI'ların dış yüzeylerinin üst kısımlarının alt kısımlarına oranla daha yüksek sıcaklıklara sahip olması olduğu tespit edilmiştir. Bu bilgiler ışığında. SM'in, IAS'ın dar açı değerleri için kullanımı sonucunda daha gerçekçi ısı akısı değerleri elde edilebileceği sonucuna varılmıştır.

Çizelge 6.3. IAS açısının ısı akısına etkisi için elde edilen deneysel, sayısal veriler ve ısı akısı değerleri arasındaki yüzdesel farklar

Açı (Derece)	IAS Sıc. (K)	Ortam Sıc. (K)	Den. Isı Ak. (W/m^2)	Say. Isı Ak. (W/m^2)	Yüz. Fark (%)
0°	315,25	299,95	1559	1651,2	5,9
30°	316,15	298,85	1446,2	1482,44	2,5
60°	316,85	298,85	1037,3	1048,86	1,1
120°	319,75	299,1	909	1045,78	15,0
150°	318,85	298,38	1384,6	1481,56	7,0



Şekil 6.3. IAS açısının ısı akısına etkisi için elde edilen deneysel ve sayısal ısı akısı değerlerinin grafiği

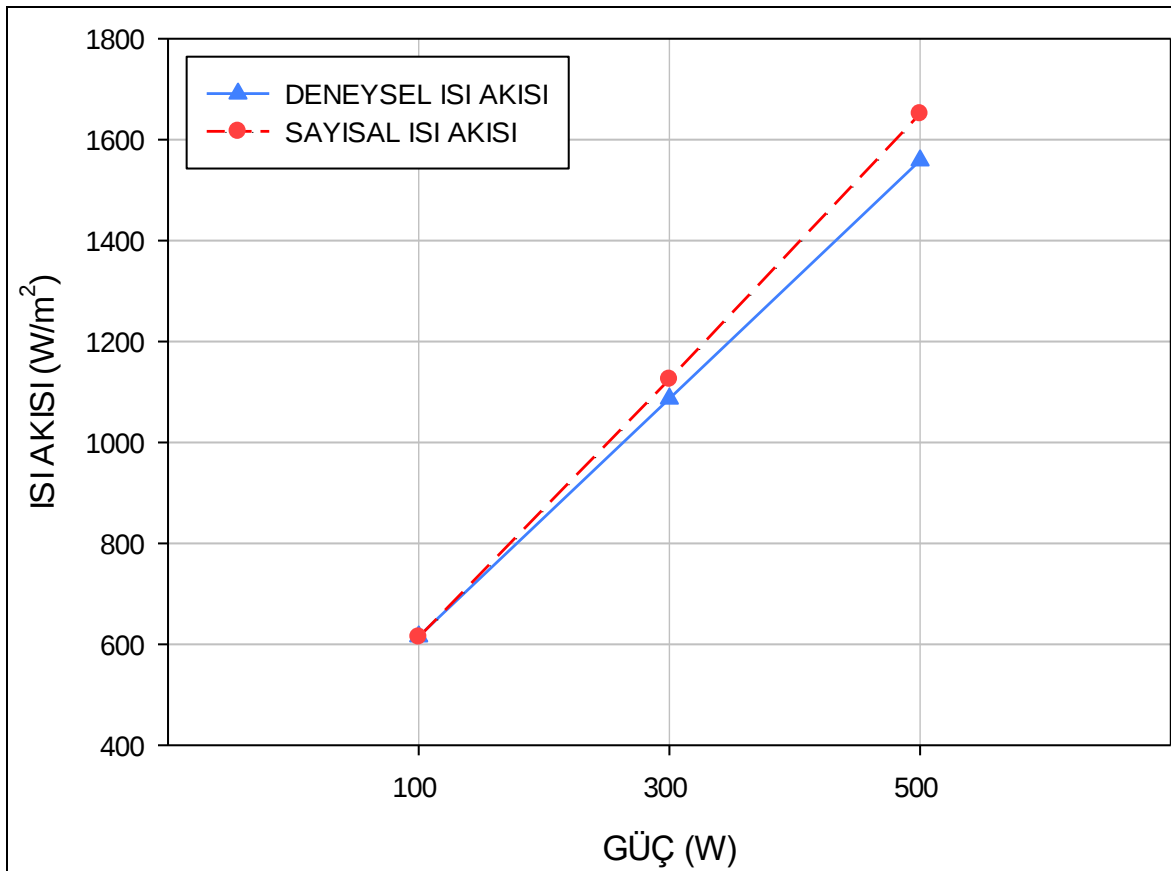
6.4. KKI Güç Değerlerinin Isı Akısına Etkisi İçin Elde Edilen Verilerin Karşılaştırılması

Bölüm 4.4. ve Bölüm 5.4.'te KKI Güç Değerlerinin Isı Akısına Etkisi başlıkları altında, KKI'ların güç değerlerinin 100 W, 300 W ve 500 W olduğu, IAS'ın KKI'lara bakan yüzünün ortasından KKI'lara olan dikey uzaklığın 500 mm olduğu ve IAS'ın konumunun Şekil 4.2.'de gösterilen 5 numaralı ölçüm noktası olduğu durumlar için IAS üzerine düşen ısı akısı değerleri hem deneysel hem de sayısal yöntemler ile elde edilmiştir. Çizelge 6.4.'te, KKI'ların bu 3 güç değeri için elde edilen sayısal, deneysel veriler ve bu değerler arasındaki yüzdesel farklar verilmiştir. Şekil 6.4.'de, KKI güç değerlerinin ısı akısına etkisi için elde edilen deneysel ve sayısal ısı akısı değerleri, aralarındaki ilişkinin daha rahat görülebilmesi için grafik olarak verilmiştir.

Çizelge 6.4.'de verilen sayısal, deneysel ısı akısı değerleri ve aralarındaki yüzdesel fark değerleri incelendiğinde, veriler arasındaki en yüksek farkın %5,9 ile güç değerinin 500 W olduğu ve veriler arasındaki en düşük farkın ise %0,1 ile güç değerinin 100 W olduğu durum için hesaplandığı görülmektedir. Ayrıca, KKI güç değerlerinin bu üç değer için lineer değişiminin hem sayısal hem de deneysel veriler üzerinde de lineer değişime neden olmaktadır. IAS açısının değişimi üzerine yapılan çalışmaya benzer olarak, oluşturulan SM'in, dolayısıyla SM oluşturulurken yapılan kabullerin, KKI'ların güç değerlerinin azalmasıyla, gerçek durumlara daha uyumlu hale geldikleri sonucuna varılmaktadır. Ayrıca, Çizelge 3.4.'de görüldüğü üzere, KKI güç değerinin azalmasının Eş. 3.6 ve Eş. 3.7 içerisinde yer alan parametreler arasındaki T_f ve T_k sıcaklıkları üzerinde oldukça etkili ve düşük güç değerleri için elde edilen yüzdesel farkların daha düşük olmasının sonucu olarak, Eş. 3.6 ve Eş. 3.7'nin düşük güç değerleri için kullanılmaya daha elverişli olduğu şeklinde yorumlanmıştır.

Çizelge 6.4. KKI güç değerlerinin ısı akısına etkisi için elde edilen deneysel, sayısal veriler ve ısı akısı değerleri arasındaki yüzdesel farklar

Güç (W)	IAS Sıc. (K)	Ortam Sıc. (K)	Den. Isı Ak. (W/m ²)	Say. Isı Ak. (W/m ²)	Yüz. Fark (%)
100	299,35	295,35	615,3	614,40	0,1
300	309,05	295,35	1087	1125,40	3,5
500	315,25	299,95	1559	1651,22	5,9



Şekil 6.4. KKI güç değerlerinin ısı akısına etkisi için elde edilen deneysel ve sayısal ısı akısı değerlerinin grafiği

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Kızılötesi ısıtma uygulamaları, belirli bir yüzey üzerinde yoğun ve hızlı ısıtma ihtiyacı duyulan alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle KKI'lar, kullanım kolaylıkları, ihtiyaca özel geniş ürün çeşitlilikleri, bakım gerektirmeyen uzun süreli kullanım ömürleri ve verimli ısıtma kapasitesi gibi özellikleriyle uzay, plastik işleme ve gıda sektörü gibi pek çok farklı alanlarda kullanımlarına rastlanmaktadır. Özellikle uzay sektörü gibi vakum ortamında da sorunsuz çalışma isteri olan uygulamalarda da kullanımının olması KKI'ları ve onlar üzerine yapılan araştırmaları değerli kılmaktadır.

KKI'ların, bir ürünü ısıtabilme kapasitesini doğrudan etkileyen pek çok parametre olduğu bilinmektedir. Bu tez kapsamında, bu parametreler arasında yer alan, ürünün KKI'ya göre yerleşimi, uzaklığı, açısı, KKI güç değeri, vakum koşulunda çalışma ve kuvars cam kılıfının emisivite değeri olmak üzere toplam 6 farklı parametre için deneysel ve sayısal çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalar, KKI'ların elektriksel güçleri 100 W ile 500 W, IAS'ın ölçüm noktaları x ve y eksenlerinde -18 cm ile +18 cm, z ekseninde üzerindeki uzaklık 25 cm ile 75 cm, IAS'ın açısının 0° ile 150° olduğu senaryolar için gerçekleştirilmiştir. Sayısal çalışmalar ise, KKI'ların elektriksel güçleri 100 W ile 500 W, IAS'ın ölçüm noktaları x ve y eksenlerinde -18 cm ile +18 cm, z ekseninde üzerindeki uzaklık 25 cm ile 150 cm, IAS'ın açısının 0° ile 150° ve kuvars emisivitesinin 0,3 ile 0,9 aralığında olduğu senaryolar için gerçekleştirilmiştir.

Deneysel ölçümlerin gerçekleştirilebilmesi için her bir KKI'ya ayrı güç değerleri sağlanabildiği, IAS'ın KKI'lara göre olan konumunun x, y ve z ekseninde istenen aralıklarda ayarlanabildiği, çevre sıcaklığı, KKI'ların çalıştığı net güç değeri, IAS ısı akısı ve sıcaklığı değerlerinin sağlıklı bir şekilde ölçülüp kayıt edilebildiği bir ITD oluşturulmuştur.

Sayısal çalışmalar sırasında, farklı senaryolar için simülasyonların gerçekleştirilebilmesi için, ANSYS yazılımının Steady State modülü kullanılarak, ITD'nin basitleştirilmiş modelini içeren, gerçeğe en yakın sonuçların elde edilebilmesi amacıyla birçok sınır şartı tanımlaması yapılan, hücre sayısı ve yarım küp çözünürlüğü (hemicube resolution) parametrelerinden bağımsız sonuçların elde edilebildiği bir SM oluşturulmuştur. Oluşturulan SM'in doğruluğundan emin olunması için referans bir sayısal çalışma ile

kıyaslanılmış ve referans çalışma ile aradaki yüzdesel farkların %3,0 ile %3,8 aralığında olduğu hesaplanmıştır. Referans bir çalışma yardımıyla doğrulanan SM'den elde edilen sayısal sonuçlar üzerinde önemli etkisi bulunan filament (T_f) ve kuvars cam kılıfın (T_k) sıcaklık değerlerini elde edebilmek için Eş. 3.6 ve Eş. 3.7 bir MATLAB kodu yardımıyla çözdürülmüştür.

İlk olarak IAS'ın x-y eksenini üzerinde bulunduğu konumun, IAS üzerine gelen ısı akısına etkisi incelenmiştir. Bu çalışma kapsamında elde edilen deneysel ve sayısal verilerin tümü sunulmuştur. Deneysel çalışmalarda, KKI'ların güç değerleri 500 W ve IAS'ın açısı sıfır derece iken x ve y eksenlerine paralel olan 360 mm $\times$ 360 mm boyutlarındaki ölçüm düzlemi üzerinden 9 adet ölçüm alınmıştır. Sayısal çalışmalarda ise bu deneysel çalışmalarda elde edilen verilerin bir bölümü SM'e sınır şartı tanımlaması yapılırken kullanılıp bu 9 ölçüm noktası için ayrı simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Sayısal ve deneysel verilerin kıyaslanmasıyla, veriler arasındaki en yüksek farkların negatif y ekseninde bulunan ölçüm noktalarında, en düşük farkların ise pozitif y ekseninde bulunan ölçüm noktalarında olduğu görülmektedir. Ayrıca, IAS'ın y eksenini üzerindeki yer değişiminin, veriler arasındaki farklara olan etkisinin, x eksenini üzerindeki orana oldukça yüksek olduğu gözlemlenmiştir. İncelemenin ardından, negatif y ekseninde elde edilen sayısal veriler ile deneysel veriler arasındaki farkın pozitif y eksenindekilere oranla yüksek olmasının nedeninin, SM içerisinde yapılan KKI sabit yüzey sıcaklığı sınır şartı tanımlamasının, gerçekte KKI'lar üzerinde olan sıcaklık dağılımını simüle etmekteki başarısının sınırlı olması kaynaklı olduğu saptanmıştır. Bu 9 ölçüm noktasında hesaplanan yüzdesel farkların ortalamasının %5'in altında bir değere sahip olmasıyla oluşturulan SM'in, IAS'ın x-y düzlemi üzerindeki farklı koordinatlardaki ısı akısı hesaplamaları sırasında kullanıma oldukça uygun olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca ulaşılan veriler ışığında, x-y düzlemi üzerinde kenarlara yaklaşıldıkça KKI'ların IAS üzerinde yarattığı ısı akısının etkisinin azaldığı görülmüştür. Bu durumda, KKI'ların karşısında yer alan bir yüzey üzerinde homojen bir ısı akısı dağılımı sağlanmak isteniyorsa, KKI yerleşimlerinin ısıtılacak yüzeyin boyutlarından daha geniş bir alana sahip olması gerektiği sonucuna varılmıştır.

Çalışma kapsamında incelenen bir diğer parametre olan IAS'ın KKI'lara olan uzaklığının (z eksenini üzerindeki) IAS üzerine gelen ısı akısına etkisi, yürütülen sayısal ve deneysel faaliyetler ile incelenmiştir. Deneysel çalışmalarda, KKI'ların güç değerleri 500 W, IAS

konumunun x ve y eksenlerinde sıfır koordinatlarında ve IAS'ın açısı sıfır derece iken IAS'ın KKI'lara mesafesi 250 mm, 500 mm ve 750 mm'ye ayarlanarak bu üç ayrı mesafede ölçümler gerçekleştirilmiştir. Sayısal çalışmalarda ise, oluşturulan SM'de, KKI'ların konum ve oryantasyonları değiştirilmeden, IAS'ın z eksenini üzerindeki konumları sırasıyla belirlenen mesafelere ayarlanarak 3 ayrı senaryo için simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sayısal ve deneysel ısı akısı değerleri ile aralarındaki yüzdesel fark değerleri incelendiğinde, sayısal verilerin deneysel verilere en yakın sonucu verdiği durumunun %0,7 ile 250 mm uzaklıktaki nokta için hesaplandığı, diğer iki noktada gözlemlenen farkların ortalamasının %5,2 olmasıyla ise uzaklık değerinin artışının daha yüksek yüzdesel fark değerlerine sebep olduğu gözlemlenmiştir. 250 mm'deki fark değerinin düşük olmasının nedeni olarak, SM'in, IAS'ın KKI'lara olan yakınlığının artmasıyla, KKI'lar ile IAS arasında olan görüş faktörü hesaplamasını ve yapılan sınır şartı tanımlamalarının gerçek duruma uyumunun daha yüksek olduğu sonucuna varılmıştır. Bu çalışmalara ek olarak gerçekleştirilen parametrik analizler sırasında z eksenini üzerindeki mesafenin 1000 mm ve 1500 mm olduğu senaryolar üzerine de sayısal çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalar ışığında, 1000 mm ile 1500 mm mesafelerindeki ısı akısı değerleri arasındaki değişimin artık oldukça düşük olduğu ve daha küçük mesafelerdeki ısı akısı değerleri de göz önünde bulundurularak, bir yüzey üzerinde etkili bir ısıtma gerçekleştirilebilmesi için KKI ile arasındaki mesafenin en fazla 750 mm olmasının uygun olduğu sonucuna varılmıştır.

Üçüncü parametre olarak, IAS'ın düşey eksen olan y eksenini ile arasındaki açının 0° , 30° , 60° , 120° ve 150° olduğu senaryolar için deneysel ve sayısal çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalarda, IAS'ın KKI'lara olan dikey uzaklığının 500 mm olduğu, IAS konumunun x ve y eksenlerinde sıfır koordinatlarında ve KKI'ların güç değerlerinin 500 W olduğu koşullar altında IAS'ın dört açı değeri için ölçümler alınmıştır. Sayısal çalışmalar sırasında ise, bu koşullara sadık kalınarak IAS, dört farklı açı değerine ayarlanarak simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Deneysel ve sayısal veriler ile aralarındaki yüzdesel farklar incelendiğinde, 30° ve 60° gibi IAS'ın dar açı değerlerinde hesaplanan yüzdesel farkların ortalamasının %1,8 ile oldukça düşük iken 120° ve 150° gibi geniş açı değerlerindeki farkların ortalamasının %11 ile dar açılara oranla yüksek olduğu görülmüştür. IAS'ın x-y eksenini üzerinde bulunduğu konumun parametresinde varılan sonuca benzer olarak deneysel çalışmalar sırasında KKI'ların çevrelerine doğal taşınım ile ısı kaybederken alt kısımlarının üst kısımlarına oranla daha düşük sıcaklığa sahip olması nedeniyle özellikle dar açılarda elde edilen deneysel ısı akısı değerlerinin sayısal verilere oranla düşük olduğu

saptanmıştır. Bu ifadeyi destekleyen bir diğer tespit ise, 120° deki yüzdesel farkın %15 ile 150° 'de hesaplanan farktan neredeyse iki katı fazla olmasıdır.

Bir diğer önemli parametre olan, KKI güç değerlerinin ısı akısına etkisini incelemek için deneysel ve sayısal çalışmalar yürütülmüştür. Bu çalışmalar sırasında KKI güç değerlerinin 100 W, 300 W ve 500 W olduğu durumlar için, IAS'ın KKI'lara olan dikey uzaklığının 500 mm olduğu, IAS konumunun x ve y eksenlerinde sıfır koordinatlarında ve IAS açısının sıfır olduğu senaryolar için deneysel ölçümler alınıp oluşturulan SM'de bu üç güç değeri için simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sayısal veriler, deneysel veriler ve aralarındaki yüzdesel farklar incelendiğinde, sayısal veriler ile deneysel veriler arasındaki farkın 100 W, 300 W ve 500 W değerleri için sırasıyla %0,1, %3,5 ve %5,9 olarak hesaplandığı görülmektedir. 100 W için elde edilen farkın oldukça az olması SM'in bu şart için oldukça yüksek doğrulukta çalıştığını gösterirken, lineer olarak artan güç değeri karşısında hesaplanan yüzdesel farklarında lineer olarak değiştiği verilerin uyumluluğunu destekler niteliktedir. Elde edilen üç yüzdesel fark değeri de kabul edilebilir seviyelerde olmasıyla SM'in bu üç KKI güç değeri için kullanıma oldukça elverişli olduğu sonucuna varılmıştır.

Bu noktaya kadar üzerine çalışılan 4 adet parametre için elde edilen sayısal ve deneysel veriler arasında farkların kabul edilebilir seviyelerde olması nedeniyle KKI'ların vakum ortamında çalışmasının ve kuvars cam emisivitesinin farklı değere sahip olmasının ısı akısına etkisini incelemek için diğer parametrelerin sayısal çalışmalarında oluşturulan SM'in kullanılması uygun bulunmuştur. Bu kapsamda, KKI'ların vakum ortamında çalışmasının ısı akısına etkisini gözlemleyebilmek için Eş. 3.7. içerisinde yer alan ve taşınım ısı transferi etkisini temsil eden kısım h değeri sıfır kabul edilerek ihmal edilip T_f ve T_k sıcaklıkları tekrardan hesaplanmıştır. Değişen sınır şartı değerlerinin düzenlenmesinin ardından SM çözülmüş ve vakum ortamında IAS üzerine gelen ısı akısı değerinin atmosferik ortamdakine oranla yaklaşık %10 daha yüksek olduğu görülmüştür. Vakum koşulları için hesaplanan T_f ve T_k sıcaklıklarının atmosferik ortam için hesaplananlara göre daha yüksek değerlere sahip olduğu göz önünde bulundurulduğunda elde edilen sonucun makul olduğu sonucuna varılmıştır.

KKI'ların kuvars cam kılıflarının farklı emisivite değerlerine sahip olmasının ısı akısı üzerine etkisinin incelendiği sayısal çalışmalar sırasında, ϵ_k değerinin sırasıyla 0,3, 0,5 ve 0,7 olduğu kabul edildiği senaryolar için simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Eş 3.1 ve 3.2 ϵ_k 'nın sahip olduğu bu üç farklı değer için ayrıca çözülerek her bir emisivite değerine karşılık gelen T_f ve T_k sıcaklıkları hesaplanmıştır. Elde edilen sayısal ısı akısı değerleri incelendiğinde emisivite değerinin artışının IAS üzerine gelen ısı akısı değerinin azalmasına neden olduğu görülmüştür. Kuvars cam kılıfın emisivite değerinin azalmasının, kuvarsın yansıtıcılık değerinin artmasına, dolayısıyla filament tarafından kuvars cam kılıfa yayılan ve kuvars cam tarafından da IAS'a yansıtılan ısı akısı oranının da artmasını sağladığı sonucuna varılmıştır.

Sayısal çalışmalar sırasında elde edilen bilgiler ışığında, güç, konum, mesafe, açı, ortam koşulu ve kuvars camın emisivite değeri parametrelerinin IAS üzerine gelen ısı akısı değeri üzerindeki etkisini daha detaylı incelenebilmesi için parametrik analizler gerçekleştirilmiştir.

Gerçekleştirilen sayısal ve deneysel verilerin uyumu göz önüne alındığında oluşturulan SM'in ilerleyen çalışmalarda kullanılmaya uygun olduğu değerlendirilmiştir. Bu sayede, oluşturulan SM, KKI'ların üretim ve test gibi faaliyetleri sırasında kullanımından önce istenen yüzeyde hedeflenen ısı akısı değerine ulaşılmasının mümkün olup olmadığını veya hedeflenen ısı akısına ulaşmak için KKI'ların nasıl yerleştirilmesi gerektiğini belirlemede kullanılabilecektir. Tez çalışması kapsamında elde edilen sayısal ve deneysel ısı akısı değerleri EK-1'de yer alan çizelgede sunulmuştur.

Öneriler

Bu çalışmada, KKI'ların ısıtma performanslarının, farklı güç değerlerine, vakum ortamında çalıştıkları, kuvars cam kılıfının farklı emisivite değerine sahip olduğu ve IAS'ın farklı uzaklık, konum ve açılara sahip olduğu senaryolara bağlı değişimi deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Bu çalışmada elde edilen bilgiler ışığında ise gelecek çalışmalara yönelik öneriler aşağıda sunulmuştur.

- Bu çalışmada incelenen tipteki KKI'ların ısıtma performanslarının, arkalarına yerleştirilecek farklı şekil ve emisivite değerlerine sahip reflektörlerin etkisiyle değişimi üzerine sayısal ve deneysel çalışmalar yapılabilir.
- KKI'ların, geniş yüzeyli bir ürünün örneğin bir uydunun bir yüzünde homojen ve sabit yüzey akısı oluşturulması için sayısal çalışmalar yürütülebilir. Hatta belirlenen boyutlardaki bir yüzeyin üzerinde, istenen ısı akısını istenen mesafede sağlayabilmek için nasıl bir yerleşim yapılması gerektiğini hesaplayabilen bir kod oluşturulabilir.
- Bu çalışmada incelenen parametrelerin, KKI'ların vakum koşullarında çalıştığı durumdaki, ısıtma performanslarına olan etkileri üzerine sayısal ve deneysel çalışmalar gerçekleştirilebilir.
- Bu çalışmada tasarlanan ITD'nin üzerinde yer alan IAS'ın sıcaklığı deneysel çalışmalar sırasında sürekli takip ve kayıt edilmiştir. Eğer IAS'ın sıcaklığını sabit ve bilinen sıcaklıkta tutacak bir ısıtma regülasyon düzeneği geliştirilebilir ise (örneğin sıvı soğutma sistemi veya termostatlı peltier ısıtıcı gibi) gerçek veriler ile daha uyumlu ısıtma simülasyon sonuçları alınacaktır. Ayrıca IAS'ın sıcaklığının sabit olmasıyla IAS üzerinden yayılan ısı akısı değeri de sabit olacaktır ve böylece incelenen parametrelerin KKI'ların ısıtma performanslarına etkisi daha net görülebilecektir.

KAYNAKLAR

1. Slavov, S., Dimitrov, D., Zlateva, P. (2019). Investigation the Influence of Surface Topography on Scattering Ability of Aluminium Reflectors from Infrared Quartz Heater. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 564, 012006.
2. Pan, Z., Atungulu, G. G. (2010). *Infrared Heating for Food and Agricultural Processing*. America: CRC Press, 200-250.
3. İnternet: Industrial 13195X/98 1000W 235V - Dr. Fischer Europe Technical Sheet. URL: https://www.dr-fischer-europe.com/catalogue/ir-en/onde_courte-en/industrielle-13195x-98-1000w-235v/?lang=en, Son Erişim Tarihi: 21.03.2024.
4. Pettersson, M. (1999). *Heat Transfer and Energy Efficiency in Infrared Paper Dryers*. PhD. Thesis, Lund University, Lund.
5. Forsythe, W. E., Adams, E. Q. (1945). Radiating Characteristics of Tungsten and Tungsten Lamps. A Correction. *Journal of the Optical Society of America*, 35(4), 306.
6. Hoshino, T., Mito, K., Nagashima, A., Miyata, M. (1986). Determination of the Thermal Conductivity of Argon and Nitrogen Over a Wide Temperature Range Through Data Evaluation and Shock-Tube Experiments. *International Journal of Thermophysics*, 7, 647-662.
7. Kunze, A., Ghidersa, B. E., Bonelli, F. (2015). SIRHEX - A New Experimental Facility for High Heat Flux Testing of Plasma Facing Components. *Fusion Engineering and Design*, 98-99, 1345-1348.
8. Kunze, A., Ghidersa, B. E. (2017) Model-Based Optimization of the Heat Flux Distribution of IR-Heaters for High Heat Flux Testing. *Fusion Engineering and Design*, 124, 215-219.
9. Monteix, S., Schmidt, F., Le Maoult, Y., Ben Yedder, R., Diraddo, R. W., Laroche, D. (2001). Experimental Study and Numerical Simulation of Preform or Sheet Exposed to Infrared Radiative Heating. *Journal of Materials Processing Technology*, 119(1), 90-97.
10. Schmidt, F., Monteix, S., Le Maoult, Y., Denis, G., Vigny, M. (2001). *Recent Issues in Preform Radiative Heating Modelling*. International Conference of Polymer Processing Society, Vittel.
11. Le, A. D., Gilblas, R., Lucin, V., Maoult, Y. L., Schmidt, F. (2022). Infrared Heating Modeling of Recycled PET Preforms in Injection Stretch Blow Molding Process. *International Journal of Thermal Sciences*, 181, 107762.
12. Ali, O., Mahmood, R. (2020). Effect of Radiation on Natural Convection Heat Transfer from Heated Horizontal Cylinder in Vented Enclosure. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Duhok, 978, 012030.
13. Brown, K. J., Farrelly, R., O'Shaughnessy, S. M., Robinson, A. J. (2016). Energy Efficiency of Electrical Infrared Heating Elements. *Applied Energy*, 162, 581-588.

14. Butturini, R., Ngo, M. (2008). Flux Mapping of Radiant Electric Heaters: Repeatability Considerations. *U.S. Consumer Product Safety Commission*.
15. Dagerskog, M. (1979). Infra-red Radiation for Food Processing.: 2. Calculation of Heat Penetration During Infra-red Frying of Meat Products. *Lebensmittel-Wissenschaft und Technologie*, 12(4), 252-257.
16. Chandrakar, V., Senapati, J. R., Mohanty, A. (2021). Conjugate Heat Transfer Due to Conduction, Natural Convection and Radiation from a Vertical Hollow Cylinder with Finite Thickness. *Numerical Heat Transfer*, 79(6), 463-487.
17. Er, T., Işık, H., Muratoğlu, O. F., Karabatak, A. (2023). *Numerical and Experimental Investigations on Radiative Heat Flux Characteristics of an Infrared Quartz Lamp*. 10th International Conference on Recent Advances in Air and Space Technologies (RAST), 1-6.
18. Ash, R. (1972). Analysis of the Radiation Field Produced by a Bank of Quartz Lamps NASA TR 72-73 June 1972. *NASA Technical Paper*, Virginia.
19. Turner, T. L., Ash, R. (1994). Numerical and Experimental Analyses of the Radiant Heat Flux Produced by Quartz Heating Systems. *NASA Technical Paper*, Virginia.
20. Xing, H. J., Zhang, L. F., Liang, Y., Liu, B., Zhou, Z. F., Chen, B. (2023). Distribution of Radiation Heat Flux on a Plane Receiver Produced by a Multi-Quartz Lamps Heating System for Thermal Structural Tests. *Case Studies in Thermal Engineering*, 49, 103314.
21. Miller, J. R., Emis, N., Forgette, D. (2015). *Development of an Infrared Lamp Array for the SMAP Spacecraft Thermal Balance Test*. 45th International Conference on Environmental Systems, Washington, 42.
22. Er, T., Ekici, Ö. (2022). *Evaluation of Multilayer Insulation Performance Equations Available in the Literature*, MSc. Thesis, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
23. İnternet: Captec Scientific Catalog. URL: <http://www.techno-office.com/file/captec-scientific-catalog.pdf>, Son Erişim Tarihi: 21.03.2024.
24. İnternet: 13195X/98 1000W 235V REFL Technical Specifications. URL: <https://www.proflamps.com/datasheets/PH13195X.pdf>, Son Erişim Tarihi: 21.03.2024.
25. Bejan, A. (2013). *Convection Heat Transfer* (Fourth edition). New Jersey: John Wiley & Sons, 210-211.
26. Çengel, Y. A., Boles, M. A. (2004). *Thermodynamics, An Engineering Approach (Fifth edition)*. New York: McGraw-Hill, 948.

EKLER

EK-1. Tez çalışması kapsamında elde edilen sayısal ve deneysel ısı akısı değerleri

Güç (W)	X Ekseni Kon. (mm)	Y Ekseni Kon. (mm)	Mesafe (mm)	Açı (Derece)	Kuvars Emisivite Değeri	Ortam Koşulu	Den. Isı Ak. (W/m ²)	Say. Isı Ak. (W/m ²)
100	0	0	500	0	0,9	Atmosferik	615,3	614,4
300	0	0	500	0	0,9	Atmosferik	1087	1125,4
500	0	0	500	0	0,9	Atmosferik	1559	1651,2
500	0	0	500	30	0,9	Atmosferik	1446,2	1482,4
500	0	0	500	60	0,9	Atmosferik	1037,3	1048,9
500	0	0	500	120	0,9	Atmosferik	909	1045,8
500	0	0	500	150	0,9	Atmosferik	1384,6	1481,6
100	0	0	500	30	0,9	Atmosferik		595,2
100	0	0	500	60	0,9	Atmosferik		528,5
100	0	0	500	120	0,9	Atmosferik		528,5
100	0	0	500	150	0,9	Atmosferik		595,2
500	0	0	1500	30	0,9	Atmosferik		595,8
500	0	0	1500	60	0,9	Atmosferik		540,7
500	0	0	1500	120	0,9	Atmosferik		540,7
500	0	0	1500	150	0,9	Atmosferik		595,8
500	0	0	250	0	0,9	Atmosferik	3966,3	3992,4
500	0	0	750	0	0,9	Atmosferik	979,2	1023,4
500	0	0	1000	0	0,9	Atmosferik		797,3
500	0	0	1500	0	0,9	Atmosferik		614,9
500	-180	180	500	0	0,9	Atmosferik	1269,7	1305,3
500	-180	0	500	0	0,9	Atmosferik	1395,4	1475,1
500	-180	-180	500	0	0,9	Atmosferik	1221,3	1304
500	0	180	500	0	0,9	Atmosferik	1407,5	1430,6
500	0	-180	500	0	0,9	Atmosferik	1343,3	1435,1
500	180	180	500	0	0,9	Atmosferik	1285,9	1308,1
500	180	0	500	0	0,9	Atmosferik	1397	1485,1
500	180	-180	500	0	0,9	Atmosferik	1224,9	1303,2
500	0	0	500	0	0,3	Atmosferik		1989,1
500	0	0	500	0	0,5	Atmosferik		1842,8
500	0	0	500	0	0,7	Atmosferik		1734,6
100	0	0	500	0	0,9	Vakum		692,8
300	0	0	500	0	0,9	Vakum		1243,3
500	0	0	250	0	0,9	Vakum		4406,3
500	0	0	500	0	0,9	Vakum		1810,9
500	0	0	1500	0	0,9	Vakum		636,3



Gazili olmak ayrıcalıktır