Vitroseramik Ocaklarda Yay Optimizasyonu ile Termodinamik Verimin Artırılması

Muharrem Keyfoğlu

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Ocak 2026

Increasing Thermodynamic Efficiency On Vitroceramic Hobs By Spring Optimization

Muharrem Keyfoğlu

MASTER OF SCIENCE THESIS

Department of Mechanical Engineering

January 2026

Vitroseramik Ocaklarda Yay Optimizasyonu ile Termodinamik Verimin Artırılması

Muharrem Keyfoğlu

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği Uyarınca
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Enerji-Termodinamik Bilim Dalında
YÜKSEK LİSANS TEZİ
olarak hazırlanmıştır.

Danışman: Doç Dr. Nihal Uğurlubilek

Ocak 2026

ONAY

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans öğrencisi Muharrem Keyfoğlu'nun YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı "Vitroseramik Ocaklarda Yay Optimizasyonu ile Termodinamik Verimin Artırılması" başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek oybirliği ile kabul edilmiştir.

Danışman : Doç. Dr. Nihal Uğurlubilek

Yüksek Lisans Tez Savunma Jürisi:

Üye: Doç. Dr. Nihal Uğurlubilek

Üye: Prof. Dr. Özer Aydın

Üye: Doç. Dr. Zerrin Sert

Üye:

Üye:

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun ……..…….. tarih ve ……..……. sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. ....

Enstitü Müdürü

ETİK BEYAN

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Doç. Dr. Nihal UĞURLUBİLEK danışmanlığında hazırlamış olduğum "Vitroseramik Ocaklarda Yay Optimizasyonu İle Termodinamik Verimin Artırılması" başlıklı Yüksek Lisans tezimin özgün bir çalışma olduğunu; tez çalışmamın tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallarına uygun davrandığımı; tezimde verdiğim bilgileri, verileri akademik ve bilimsel ilke ve kurallara uygun olarak elde ettiğimi; tez çalışmamda yararlandığım eserlerin tümüne atıf yaptığımı ve kaynak gösterdiğimi ve bilgi, belge ve sonuçları bilimsel etik ilke ve kurallara göre sunduğumu beyan ederim.

15/01/2026

Muharrem KEYFOĞLU

İmza

T.C.
ESKİŞEHİR OSMANGAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ÜRETKEN YAPAY ZEKÂ KULLANIMI BEYAN FORMU

Bu tezi hazırlarken aşağıdaki Üretken Yapay Zekâ (ÜYZ) araçlarından destek aldığımı beyan ederim:

Aşağıdaki ÜYZ araçlarını kullandım. (Birden fazla seçenek işaretlenebilir)

☐ Claude
☐ ChatGPT
☐ DeepSeek
X Gemini
☐ Copilot
☐ Diğer (Belirtiniz): .....

ÜYZ araçlarını tezimin aşağıdaki aşamalarında ilgili amaçlar için kullandım. (Birden fazla seçenek işaretlenebilir**.**

☐ Metin oluşturma
X Literatür tarama
☐ Çeviri
☐ Düzenleme/dil kontrolü
X Veri işleme ve analizi
☐ Veri görselleştirme
☐ Görüntü üretme
X Kaynakça düzenleme
☐Diğer (Belirtiniz): ……

Bu çalışmada ÜYZ kullanımı ***Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Faaliyetlerinde Üretken Yapay Zekâ Kullanımına Dair Etik Rehber***'e ve akademik dürüstlük ilkelerine uygun şekilde gerçekleştirilmiş olup ÜYZ araçlarından alınan destek etik kurallar ve kaynak gösterme esaslarına uygun biçimde belirtilmiştir.

ÜYZ araçlarının sağladığı bilgilerin doğruluğunu kontrol ettiğimi, yanlış veya eksik bilgi bulunması halinde tüm sorumluluğun tarafıma ait olduğunu; ayrıca çalışmamla ilgili bu beyana aykırı bir durumun herhangi bir zamanda tespit edilmesi durumunda ortaya çıkabilecek akademik ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi beyan ederim.

Muharrem Keyfoğlu
11/02/2026

(İmza)

ÖZET

Ev tipi vitroseramik ocaklar, evlerde kullanılan temel pişirici cihazlardan biridir. Yemek pişirmek için kullanılan bu cihazlar elektrikle çalışmaktadır. Farklı güçlerdeki radyant ısıtıcılar, farklı şekillerde ve ölçülerde üretilebilmektedir. Vitroseramik ocaklar temel olarak radyant ısıtıcılar, radyant ısıtıcı yayları, lityum alüminyum silikat (LAS) cam seramik üst tabla, elektronik kontrol kartı, galvaniz kaplı çelik sac alt tabla, kablo kutusu ve çeşitli kablolardan oluşmaktadır. Vitroseramik ocaklar bir ızgara barındırmadığından tencere, tava gibi yemek pişirme ekipmanları direkt olarak üst tabla üzerinde radyant ısıtıcıların hizasına konumlandırılır ve ana ısı transferi mekanizması ışınımdır. Bu sebeple ısıl verimlilik göz önüne alındığında, radyant ısıtıcıların üst tabla ile arasındaki mesafe kritik önem taşımaktadır.

Vitroseramik ocakların içerisinde bulunan ve radyant ısıtıcıların sabitlenmesi ve konumlandırılmasında kullanılan yaprak yaylar, tasarımı itibariyle termodinamik verimi etkileyen faktörler arasındadır. Zira bu yayların tasarımı, radyant ısıtıcıların LAS cam seramik üst tabla ile arasındaki mesafeyi belirlemektedir.

Bu tez çalışmasında alt tablaya montajı yapılan üç farklı düz yay tasarımı SEA ile analiz edilmiştir. SEA analizinden alınan sonuçlar hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) analizine geometrik girdi olarak aktarılmıştır. SEA ve HAD analizi sonuçlarının deneysel verilerle korelasyonu incelenmiştir. Farklı yay tasarımlarının termodinamik verime etkisi ilgili radyant ısıtıcı bölgesindeki sıcaklıkların maksimum ortalaması üzerinden karşılaştırılmıştır. Yay tasarımına bağlı olarak en kötü ve en iyi durum arasında enerji tüketiminin %16,5 oranında azaltılabileceği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Vitroseramik Ocak, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği, Düz Yay, Sonlu Elemanlar Analizi, Lityum Alüminyum Silikat Cam Seramik, Radyant Isıtıcı

SUMMARY

Vitroceramic cooktops are one of the basic households. These devices that are using for cooking working on electricity. Different kind of radiant heaters are manufacturing in the sector. These radiant heaters are manufacturing in different sizes, powers, shapes and technologies. Vitroceramic hobs include radiant heaters, radiant heater flat springs, lithium aluminum silicate glass ceramic upper slab, electronic control unit, galvanised steel bottom tray, cable box and different cables for power and signal. There's no grids on vitroceramic hobs. So users are locating the pans for cooking directly on upper slab. Main heat transfer mechanism for vitroceramic hobs is radiative heat transfer. In regards of thermodynamic efficiency, the distance between radiant heater and upper slab is critical.

The flat springs that are using in vitroceramic hobs to locate and fix the radiant heaters, are one of the factors that effects thermodynamics efficiency because of their design. The design of this flat springs directly effecting the distance between upper slab and radiant heaters.

In this thesis, three different flat spring design that assembling to bottom tray is analyzed with finite element method. The results of the finite element analysis used as geometrical input for computational fluid dynamics analysis. Both finite element method and computational fluid dynamics analysis results compared with experimental test results and correlated. The effect of spring design on thermodynamics efficiency compared by the maximum temperatures on upper slab's upper surface. Depending on the flat spring design, there's a difference of %16,5 between best and the worst case in regards of energy efficiency.

Keywords: Vitroceramic cooktop, computational fluid Dynamics, flat springs, finite element analysis, lithium aluminum silicate glass ceramic, radiant heater

TEŞEKKÜR

Tez dönemimde elinden gelen tüm desteği veren kıymetli hocam Doç. Dr. Nihal Uğurlubilek'e, sevgili eşim Dilara Keyfoğlu'ya ve her konuda desteğini esirgemeyen Ayberk Salim Mayıl'a, tez çalışması kapsamında yaptığım çalışmalara destek veren laboratuvar ekibine, verdiği desteklerden dolayı Haier Europe firmasına ve sevgili aileme teşekkür ve minneti bir borç bilirim.

Muharrem Keyfoğlu

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET vii
SUMMARY viii
TEŞEKKÜR ix
ŞEKİLLER DİZİNİ xi
ÇİZELGELER DİZİNİ xii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ xiii
1. GİRİŞ ve AMAÇ 1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI 4
3. MATERYAL VE YÖNTEM 7
3.1. Sonlu Elemanlar Analizi (SEA) 9
3.1.1. SEA doğrulaması 11
3.1.2. Radyant ısıtıcıların alt tablaya montajlanması 15
3.1.3. Geri yaylanma etkisi 17
3.1.4. LAS cam seramik üst tabla montajı 17
3.1.5. LAS cam seramik üst tabla deformasyon kontrolü 18
3.2. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği 19
3.2.1. HAD Analiz modeli 22
3.2.2. Deneysel ölçümler 22
3.2.3. HAD analiz modeli doğrulaması 25
3.3. Belirsizlik analizi 30
4. BULGULAR VE TARTIŞMA 32
4.1. SEA Bulguları 32
4.1.1. Ön gerilme analizi bulguları 32
4.1.2. Geri yaylanma SEA bulguları 34
4.1.3. LAS cam seramik üst tabla montajı SEA Sonuçları 36
4.2. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Analiz Sonuçları 37
5. SONUÇ VE ÖNERİLER 47
KAYNAKLAR DİZİNİ 49

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil **Sayfa**

3.1. Soldan sağa: 1. yay, 2. yay, 3. Yay 7
3.2. Radyant ısıtıcılar, alt tabla, kullanıcı arayüzü ve çeşitli güç ve sinyal kabloları 7
3.3. Radyant ısıtıcı yay alt tırnak montaj delikleri 8
3.4. SEA Modeli. 10
3.5. CK60 Soğuk Çekme Malzemesi Gerilme-Gerinim Eğrisi 11
3.6. Radyant ısıtıcı yükseklik ölçüm noktaları şematik gösterimi 13
3.7. Yay sıkışma miktarı ölçümü 13
3.8. Doğrulama deneyi SEA modeli 14
3.9. Deneysel ölçümler ve nümerik sonuçlar karşılaştırması 14
3.10. Alt tabla yay tırnağı 15
3.11. Yaylara uygulanan yer değiştirme yüzeyi ve yön vektörü 16
3.12. Radyant ısıtıcılar ve yayların isimlendirmeleri 16
3.13. Üst tabla montaj braketleri ön tanımlı yer değiştirme tanımlanan düğümler 18
3.14. DIN EN 1288-5 (R45) standardına göre çift çember testi SEA modeli 19
3.15. Isıl Çiftlerin Yerleşimi 23
3.16. Sıcaklık Ölçümleri 24
3.17. Güç Ölçümü 24
3.18 Deney düzeneği 25
3.19. HAD Analiz modeli radyant ısıtıcı ve alt tabla geometrisi 25
3.20. Ağdan Bağımsızlık Çalışması Sonuçları 27
3.21. Ağ yapısı a) önden kesit görünüş b) üstten kesit görünüş 27
3.22. Sıcaklık Ölçüm Noktaları 28
4.1. 1 nolu yay için maksimum von-Mises gerilmeleri (MPa) 33
4.2. 2 nolu yay için maksimum von-Mises gerilmeleri (MPa) 33
4.3. 3 nolu yay için maksimum von-Mises gerilmeleri (MPa) 33
4.4. 1 nolu yay geri yaylanma sonrası von-Mises gerilme dağılımı (MPa) 35
4.5. 2 nolu yay geri yaylanma sonrası von-Mises gerilme dağılımı (MPa) 35
4.6. 3 nolu yay geri yaylanma sonrası von-Mises gerilme dağılımı (MPa) 35
4.7. LAS cam seramik üst tabla etkin gerinim dağılımı 36
4.8. a) 1 nolu, b) 2 nolu, c) 3 nolu yay ile üst tabla montajı SEA sonucu kesit görünümü 37
4.9. Üst tabla üst yüzey sıcaklıkları a)1 nolu, b) 2 nolu, c) 3 nolu yay durumu 38
4.10. Sıcaklık dağılımı a) 1 nolu, b) 2 nolu, c) 3 nolu yay durumu (Z ekseni 300mm'den kesit görünümleri) 39
4.11. Eş sıcaklık eğrileri a) 1 nolu, b) 2 nolu, c) 3 nolu yay durumu (Z ekseni 300mm'den kesit görünümleri) 40
4.12. Hız dağılımları a) 1 nolu yay, b) 2 nolu yay, c) 3 nolu yay durumu (Z ekseni 300mm'den kesit görünümleri) 41
4.13. 3B sıcaklık akım yörüngeleri a) 1 nolu yay, b) 2 nolu yay, c) 3 nolu yay durumu 42

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge **Sayfa**

3.1. Modelde kullanılan parça malzemeleri ve özellikleri 10
3.2. Deneysel ölçüm sonuçları 12
3.3. Yay tasarımına göre yer değiştirme miktarları 15
3.4. HAD analizi sınır koşulları 22
3.5. HAD analizi parçalar ve malzeme özelikleri 26
3.6. HAD analiz sıcaklık sonuçları 29
3.7. Tip-B belirsizlikleri 31
3.8. Belirsizlik analizi sonuçları 31
4.1. Yay tasarımlarının SEA sonuçları 32
4.2. Geri yaylanma adımı sonrası yayların von-Mises gerilme ve gerinim değerleri 34
4.3. Geri yaylanma analizi sonucunda maksimum gerilme azalması oranları 34
4.4. Yay tasarımına göre yapılan HAD analizi sonuçları-üst tabla ortalama sıcaklıkları ... 43
4.5. 1 nolu yay durumuna göre 2 ve 3 nolu yay tasarımlarının HAD analiz sonuçları 43

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	**Açıklama**
$\dot{Q}_{transfer}$	Isı debisi
E_{+14mm}	Radyant ısıtıcı ile üst tabla arası mesafe 14 mm iken enerji tüketimi
E_{+8mm}	Radyant ısıtıcı ile üst tabla arası mesafe 8 mm iken enerji tüketimi
E_{ref}	Referans enerji tüketimi
$E_{tuketim}$	Enerji tüketimi
E_{yeni}	Yeni enerji tüketimi
F_{1-2}	Şekil faktörü 1. yüzeyden 2. yüzeye
F_{2-1}	Şekil faktörü 2. yüzeyden 1. yüzeye
$P_{elektrik}$	Radyant ısıtıcının çektiği güç
R_{mesafe}	Yüzeyler arası mesafe
$T_{başlangıç}$	Su başlangıç sıcaklığı
$T_{bitiş}$	Su bitiş sıcaklığı
T_{cam}	LAS cam seramik üst tabla sıcaklığı
$T_{su_{ort}}$	Su ortalama sıcaklığı
q_{in}	Gelen ısı akısı
u_i, u_j	Hız vektörünün i ve j yönündeki bileşenleri
x_i, x_j	Koordinat eksenleri
A	Alan (m^2)
F	Kuvvet

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	**Açıklama**
K	Rijitlik
R	Özgül gaz sabiti $(J/(kg.K)$
T	Sıcaklık
U	Bileşke ısı geçiş katsayısı
s	Standart sapma
t	Zaman (saniye)
u	Yer değiştirme
u_a	Tip-A belirsizlik
u_b	Tip-B belirsizlik
u_{toplam}	Toplam belirsizlik
σ_{bB}	Eğilme dayanımı (MPa)
ϕ_1, ϕ_2	Yüzeylerin birbirine göre açısı
Γ	Isıl yayılım katsayısı
η	Dinamik viskozite $(N.s/m^2)$
μ	Laminer dinamik viskozite $(Pa.s)$
ρ	Yoğunluk (kg/m^3)
τ	Kayma gerilmesi (N/m^2)

Kısaltmalar	**Açıklama**
HAD	Hesaplamalı akışkanlar dinamiği
LAS	Lityum Alüminyum Silikat
SEA	Sonlu elemanlar analizi
UDF	Kullanıcı Tanımlı Fonksiyon

1.GİRİŞ ve AMAÇ

Dünya'daki enerji tüketiminin artışı, insanlığı yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımına ve yenilenebilir enerji üretimine teşvik etmektedir. Birleşmiş Milletler (2025)'in yayınladığı 2025 Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri raporuna göre 2023 yılı itibariyle Dünya genelinde yaklaşık 2,1 milyar insan hala temiz olmayan pişirme yakıtlarına muhtaç durumdadır. Aynı raporda belirtildiği üzere yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen enerji kullanımı dünya çapında 2015 yılında %15,6 iken 2022 yılında %17,9'a yükselmiştir. Yenilenebilir enerji kaynaklı tüketimde %30'luk payla elektrik sektörü öncü konumdadır.

Uluslararası Enerji Ajansı (2025)'nın yayınladığı 2025 Dünya Enerji Görünümü raporuna göre pişirme için temiz enerjiye ulaşan hanelerin %18'i elektrikle çalışan pişirme cihazlarını tercih etmektedir. Rapora göre enerji kaynaklarına göre elektrik ikinci sıradadır. Ayrıca 2040 yılına kadar temiz pişirme enerjilerine erişimin 1,5 katına çıkacağı öngörülmektedir. Bu durum, evlerde kullanılan elektrikli pişirici cihazların verimliliğinin artırılmasını kritik hale getirmektedir.

Vitroseramik ocaklar çalışma mantığı itibariyle elektriği ısıya dönüştüren cihazlardır. Şebekeden beslenen elektrik, radyant ısıtıcılarda bulunan şerit rezistanslarda yüksek dirençle karşılaşarak ısıya dönüşür. Ortaya çıkan ısı, ışınım ve konveksiyon ısı transferi ile tencere veya tava gibi pişirme kaplarına iletilir.

Işınım, radyant ısıtıcıların ana ısı transferi mekanizmasıdır. Radyant ısıtıcıların üzerinde bulunan şerit rezistanslar yaklaşık 1000°C'ye kadar ısınarak Wien Yasası'na göre 2,27μm dalga boyunda ışınlar üretir. Optik geçirgenliği 0,7-4,25 μm arasında %80'in üzerine ulaşan (Schott, t.y.) LAS cam seramik üst tabladan geçen ışınlar pişirici kap tarafından soğrulur. Pişirici kabın taban sıcaklığının artışıyla pişirme veya ısıtma gerçekleştirilir.

Vitroseramik ocaklarda kullanılan radyant ısıtıcıların sabitlenmesi ve pozisyonlanmasında düz yaylar kullanılmaktadır. Bu yaylar, radyant ısıtıcıların dikey eksende üst tablaya uzaklığını belirleyen veya temasını sağlayan mekanik elemanlardır. Yay tasarımı, vitroseramik ocaklarda verimi etkileyen başlıca faktörler arasındadır. Literatürde

araştırmacının bilgisi dahilinde radyant ısıtıcıların yay tasarımlarının incelendiği başka bir çalışma tespit edilmemiştir.

Yayların alt tablada montajlandığı tırnaklara oturtulabilmesi için ön gerilmeye tabi tutulması gerekmektedir. Dolayısıyla yalnızca geometrik tasarım etüdünün gerçekleştirilmesi yetersiz olup, yayların ön gerilmesinin bilinmesi önemlidir. Bu yüzden bu çalışmada sonlu elemanlar analizi (SEA) ile yayların ön gerilmeleri hesaplanmış, üst tabla braketleri ile alt tabla bağlantısı simüle edilmiştir. SEA modeli hazırlanırken yaylarda kullanılan CK60 yay çeliği malzemesinin doğrulaması yük-deformasyon deneyi ile doğrulanmıştır.

SEA'dan elde edilen sonuçlar, hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) modeline okutulmuştur. HAD simülasyonları ısı transferinin ve üst tablada oluşan sıcaklıkların hesaplanabilmesi için gerçekleştirilmiştir. HAD modeli, vitroseramik ocakta yapılan ısıtma deneylerinden elde edilen sıcaklık verileriyle doğrulanmıştır. HAD analizlerinden elde edilen sıcaklık dağılımları ve maksimum sıcaklık verileri üç yay için karşılaştırılmıştır.

HAD modelinin hata oranının tespiti amacıyla çeşitli sıcaklık ve güç ölçümleri gerçekleştirilmiştir. K tipi termokupllarla yapılan deneylerde, üst tablanın üst yüzeylerinde ve ısıtıcı hizasında çeşitli noktalarda sıcaklık ölçümleri yapılmıştır. Elde edilen sıcaklık artış eğrisi ile radyant ısıtıcı kontrol algoritması gözlemlenmiştir. Sıcaklık ölçüm deneylerinden elde edilen sonuçlara göre, radyant ısıtıcıların kararlı fazda aç-kapa algoritması ile çalıştığı görülmüştür. HAD modeli 1800W radyant ısıtıcı için hazırlanmış, deneyde kararlı fazda elde edilen sıcaklıkların maksimumu HAD analizi ile karşılaştırılmıştır.

HAD modelinin hazırlanmasında, hesaplama maliyetlerinin azaltılması amacıyla çeşitli basitleştirmeler yapılmıştır. Üç farklı yay tasarımından doğan radyant ısıtıcı-üst tabla mesafe farklarının üst tabla yüzeyinde oluşturduğu sıcaklıkların farklarının karşılaştırılması amacıyla yapılan bu çalışmada, HAD modelinde radyant ısıtıcıya, alt tablaya ve üst tablaya çeşitli geometrik basitleştirmeler uygulanmıştır. HAD modelinde bir adet radyant ısıtıcı kullanılmıştır. Ocak boyutuna göre model boyutu tüm ocak modelinin yaklaşık dörtte biri boyutundadır.

Tez çalışması şu şekilde düzenlenmiştir: Öncelikle, Bölüm 2'de literatür taraması ile literatürde aynı ısı transferi mekanizmalarını kullanan, benzer ısıtma cihazları ile yapılmış

çalışmalar ve tez çalışmasında kullanılan malzemeler ile ilgili yapılmış çalışmalara yer verilmiştir. Bölüm 3'te ise tez çalışmasında kullanılan malzemeler, yöntemler, kabuller ve bu yöntem ve malzemelerin kullanılma sebepleri açıklanmıştır. Bölüm 4'te deneysel ve nümerik analizlerden edinilen bulgular verilmiştir. Üst tabla üst yüzeyinde oluşan sıcaklıklar temel alınarak tüketilen enerji miktarları üç farklı yay için karşılaştırılmıştır. Bölüm 5'te deney ve nümerik sonuçların ocağın verimine etkisi değerlendirilmiştir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Kang vd. (2023) tarafından yapılan çalışmada 3,2 kW güce ve 22,86cm iç çapa sahip bir radyant ısıtıcının camda oluşturduğu sıcaklık dağılımının homojenleştirilmesi ele alınmıştır. Çalışmada deneysel sıcaklık ölçümleri yapılmış olup, nümerik analiz modeli bu verilerle doğrulanmıştır. Çalışmanın amacı radyant ısıtıcı içerisinde bulunan rezistansların yerleşim ve ölçülerini optimize ederek, cam seramikte oluşan sıcaklık dağılımının homojenize edilmesidir. Toplam 14 adet K tipi ısıl çift ve pirometre ile sıcaklık ölçümleri yapılmıştır. HAD modelinde şerit rezistanslara sabit ısı akısı tanımlanmış olup, kullanıcı tanımlı fonksiyon (UDF) ile aç-kapa algoritması taklit edilmiştir. Cam sıcaklıkları üzerinden yapılan karşılaştırmaya göre mutlak hata yüzdesi (MAPE) %4,1, rezistans sargıları üzerinden alınan sıcaklıklara göre ise %17,9 olarak hesaplanmıştır.

Brown vd. (2016) tarafından yapılan çalışmada kızılötesi ısıtıcıların gerçek radyant enerji verimini ve uzaysal ısı akısı dağılımını ölçmek üzere bir yöntem geliştirilmiştir. 6 eksenli bir robot kola bağlanan ısı akısı sensörü konuma bağlı ısı akısı ölçümlerini 50cmx50cmx50cm bir tarama hacmi için ölçülmüştür. Çalışma sonuçlarında mesafenin artmasıyla şekil faktörüne bağlı olarak ısı akısının azaldığı görülmektedir. Dolayısıyla radyant ısıtıcılarla ısıtılan objelerin, radyant ısıtıcıya olan mesafesinin önemi ortaya konmuştur.

Daneshvar vd. (2025) tarafından yapılan çalışmada görünür ışık spektrumunda, Planck Yasası'na daha iyi bir yaklaşım yapılabilmesi için Wien Yasası'nda matematiksel bir iyileştirme önermektedir. Yapılan çalışmada Wien Kanunu'nun 4000K (3726°C) altındaki sıcaklıklarda, Planck Kanunu'na iyi bir yaklaşım olduğu, hata oranının ihmal edilebilir şekilde düşük olduğu belirtilmiştir.

Choudhary vd. (2017) tarafından yapılan çalışmada, cam üretimi HAD analizleri ile simüle edilmiştir. Işınım ile ısı transferinin hesaplanabilmesi için Rosseland ve ayrık ordinatlar yaklaşımı uygulanmıştır. Sonuç olarak, yüksek optik kalınlığa sahip camlarda Rosseland yaklaşımının neredeyse tüm ticari camlar için uygulanabilir olduğu, ancak optik olarak ince camlarda ayrık ordinatlar yaklaşımının kullanılması gerektiği belirtilmiştir. LAS

cam seramikler dalga boyuna bağlı seçici geçirgen camlar olduğundan, Wien yasasına göre ilgili dalga boylarında ışınımın doğru modellenebilmesi için ayrık ordinatlar yaklaşımının kullanılmasına karar verilmiştir.

Venkateswaran vd. (2022) tarafından yapılan derleme çalışmasında, LAS cam seramiklerin keşfi, üretimi ve günümüzdeki genel durumu detaylıca açıklanmıştır. LAS seramik camlar içerisinde bulunan β-kuvars katı çözeltisi sayesinde negatif termal genleşme ile pozitif termal genleşmeyi nötrler. Bu da LAS cam seramiklerin termal şok dayanımını açıklamaktadır.

Niknamian (2020) tarafından yapılan çalışmada CK60 sınıfı yay çeliğinin soğuk çekme ile sertleştirilmesi üzerine çalışılmıştır. Boru formundaki CK60 yay çeliğinin çapı öncelikle %15,1 sonrasında %13,7 oranında küçültülerek 950 MPa akma dayanımına ve 1021 MPa kopma dayanamına sahip olması sağlanmıştır. Ayrıca yapılan malzeme analizlerinde malzeme yapısının homojen perlit ferrit olduğu görülmüştür.

Tong ve Nguyen (2018) tarafından yapılan çalışmada DP350 çeliğinin kalıplanmasında kullanılan malzeme modelleri değerlendirilmiş ve yeni, basitleştirilmiş izotropik-kinematik kombine bir malzeme modeli geliştirilmiştir. Standart U şeklinde bir bir geometrinin oluşturulması esnasında sadece izotropik, kinematik ve izotropik-kinematik kombine malzeme modelleri test edilmiştir. İzotropik malzeme modelinin bir yönde yüklenip daha sonra tam tersi yönde yüklenmesi halinde Bauschinger etkisini tam olarak tahmin edemediği, yükün ters çevrildikten sonra gerilmelerin gerçekte olduğundan daha yüksek olduğu görülmüştür. Ancak monotonik yüklemelerde izotropik sertleşme modelleri hesaplama maliyeti düşük olan ve endüstride sıkça kullanılan sertleşme modelleridir.

Fatola vd. (2009) tarafından yapılan çalışmada düz yayların SEA ve gerçek testlerinin karşılaştırması ele alınmıştır. Yapılan çalışmada, düz yayların üretimi esnasında oluşan geometrik farklılıkların orijinal tasarım üzerinden yapılan SEA sonuçlarından %20 ve üzerinde farklı davranabileceği gösterilmiştir. Bu farklılığın %10'un altına indirilebilmesi için, düz yayların kalıplama sürecinin de SEA yapılması ve bu analiz sonucunda ortaya çıkan geometri ile yay performansının değerlendirilmesi gerektiği vurgulanmıştır. SEA'da sertleşme modeli olarak izotropik sertleşme modeli kullanılmıştır.

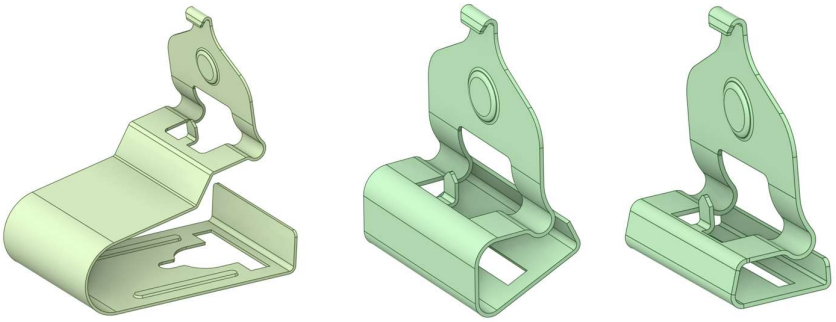
Hemmer vd. (2014) tarafından yapılan çalışmada bir radyant ısıtıcının üzerindeki IEC 60675 standardına göre erişilebilir kısımlarındaki sıcaklığın düşürülmesi üzerine çalışılmıştır. Işınım ile ısı transferinin modellenmesi için ayrık ordinatlar yöntemi kullanılmış ve ısıtıcının yönlendirildiği duvardaki sıcaklıklar farklı ısıtıcı güçlerinde ölçülmüştür. Nümerik model ve deneysel sonuçlar karşılaştırılmış, yaklaşık olarak %7 bağıl fark hesaplanmıştır. Buna göre düşük emisiviteye sahip komponentler kullanılarak erişilebilir parçalardaki sıcaklık %9 azaltılmıştır.

Ahanj vd. (2012) tarafından yapılan çalışmada, "U" şeklinde bir tüpün içerisinde yakılan doğalgazın ısı transferi analizi yapılmıştır. Yanma sonucu oluşan ısının ışınımla ısı transferini modellemek için ayrık ordinatlar metodu kullanılmıştır. Deneysel ve nümerik olarak 36 farklı noktadan ölçülen sıcaklıklar karşılaştırılmıştır. Hata oranı %5 olarak tespit edilmiştir.

Muneer vd. (2015) tarafından yapılan çalışmada ışınımla enerji değişiminde kullanılan şekil faktörünün sonlu hacimler analizi hesaplamalarında kullanılabilmesi için denklemler türetilmiştir. Burada radyasyonla ısı transferi miktarının hesaplanabilmesi için gereken şekil faktörünün sonlu hacimler yöntemine entegrasyonu ve teorik alt yapısı gösterilmektedir. Bu denklemlere göre şekil faktörü ışınımla ısı transferini lineer doğrusal etkileyen faktörlerden biridir. Ayrıca şekil faktörü formülünün içerisinde uzaklığın karesi paydada yer almaktadır. Bu teorik altyapı, ısıtıcı kaynak ile hedef yüzey arasındaki mesafenin şekil faktörünü etkileyerek ısı transferi miktarını değiştirdiğini göstermektedir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Tez konusu olarak belirlenen çalışma için 3 farklı yay tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu yay tasarımlarının izometrik görünümleri Şekil 3.1.'de gösterilmektedir.



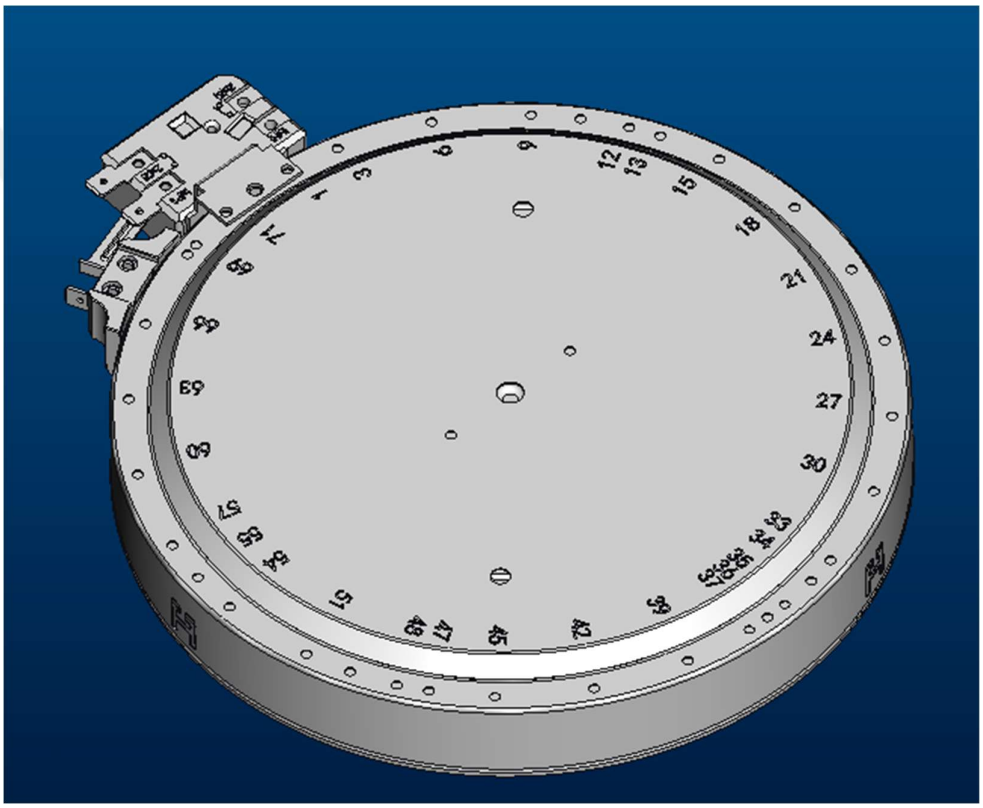
Şekil 3.1. Soldan sağa: 1. yay, 2. yay, 3. Yay

1 nolu yay için alınan numunelerle montajlanmış radyant ısıtıcı, alt tabla ve diğer komponentler Şekil 3.2.'de gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Radyant ısıtıcılar, alt tabla, kullanıcı arayüzü ve çeşitli güç ve sinyal kabloları

Yayların tasarımında radyant ısıtıcılara montajlanabilmesi için iki adet tırnak kullanılmıştır. Bu tırnaklardan biri radyant ısıtıcıların dış kısmında bulunan alüminyum kaplamalı çelik sac parçanın uç kısmına takılmıştır. Radyant ısıtıcıların alt kısmında ve referans çapı üzerinde farklı açılarda bulunan deliklere diğer tırnak montajı gerçekleştirilmiştir. Alt delikler Şekil 3.3.'te gösterilmektedir.



Şekil 3.3. Radyant ısıtıcı yay alt tırnak montaj delikleri

Bu delikler, montaj esnasında hangi deliğin kullanılması gerektiğinin anlaşılabilmesi için her biri farklı olmak üzere numaralandırılmaktadır.

Bu tez çalışmasında kullanılan ocak Hoover HH64BV modelidir. Bu modelde 3 adet 1800W ve 1 adet 1200W gücüne sahip toplam 4 adet radyant ısıtıcı kullanılmaktadır. Radyant ısıtıcıların yay tasarımına bağlı olarak üst tablaya mesafesinin belirlenebilmesi için elektronik parçalar hariç olmak üzere, radyant ısıtıcılar, radyant ısıtıcı yayları, alt tabla ve üst tabla nümerik çalışmalarda kullanılmıştır.

Yaylar, radyant ısıtıcılara montajından sonra alt tablaya montajlanmaktadır. Bu montaj esnasında yaylar ön gerilmeye tabi tutularak, alt tablada bulunan tırnaklara oturtulmaktadır. Bu ön gerilme esnasında yayların şekil değişimi radyant ısıtıcıların yüksekliğini direkt olarak etkilemektedir. Bu sebeple her bir yay tasarımı SEA ile incelenmiştir.

3.1. Sonlu Elemanlar Analizi (SEA)

SEA, karmaşık geometrilerin sonlu sayıda elemana bölünerek ifade edildiği ve yapısal analizlerde her bir elemanın birbiriyle bağlandığı düğümlerdeki rijitlik matrisi, yer değiştirme vektörü ve kuvvet vektörü denklemlerinin iteratif olarak çözümlendiği yöntemdir. SEA'nın temel denklemi (3.1)'de verilmiştir.

$$\{F\} = [K]\{u\} \tag{3.1}$$

Rijitlik matrisi, düğüme atanan malzeme özellikleri ve sınır koşullarına göre boyutu ve içeriği değişen bir yapıdadır. Yer değiştirme vektörü {u}, rijitlik matrisi [K] ile çarpılarak kuvvet {F} iteratif olarak hesaplanır. Yakınsama koşulları sağlandığında kuvvet hesaplanmış olur. Hesaplanmış olan sonuçlardan gerilme, gerinim, tepki kuvvetleri, hasar ve birçok çıkarım yapılarak analiz gerçekleştirilir.

Bu tez kapsamında yapılan tüm yapısal SEA çalışmaları, Ansys LS-Dyna ve Ansys Mechanical yazılımları ile gerçekleştirilmiştir. Ansys Mechanical, ağ yapısının hazırlanmasında, Ansys LS-Dyna ise malzeme ve sınır koşulları atamalarında, SEA denklemlerinin çözümlenmesinde ve sonuçların incelenmesinde kullanılmıştır.

SEA modelinde kullanılan ağ yapısı, bileşke eleman kalitesi metriklerine göre incelenmiştir. Ansys Mechanical tarafından hesaplanan bileşke eleman kalitesi, elemanların en-boy oranı, çarpıklığı, düğümleri arası açıları gibi farklı kriterlerle hesaplanmaktadır. Bileşke eleman kalitesi 0 ile 1 arasında olmak üzere, 0,75 ve üzerinde tutulmuştur. Buna göre yaylar için doğrulama deneyi gerçekleştirilmiştir.

SEA üç ana adıma ayrılmıştır. Bu adımlar yay ön gerilme hesaplama adımı, geri yaylanma hesaplama adımı ve son olarak cam montajı adımıdır. SEA modeli oluşturulurken kullanılan parçaların malzeme özellikleri ve kabul edilen model sırasıyla Çizelge 3.1 ve Şekil 3.4 ve gösterilmiştir.

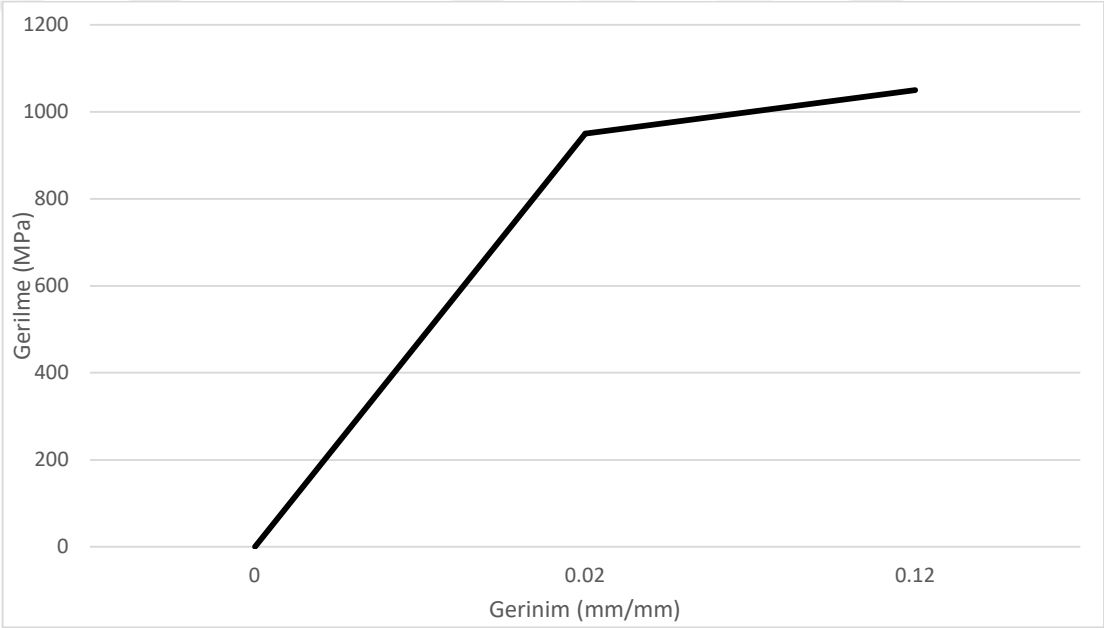
Çizelge 3.1. Modelde kullanılan parça malzemeleri ve özellikleri.

Parça adı	LS-Dyna malzeme modeli	Yoğunluk (Kg/m^3)	Elastisite modülü (MPa)
LAS cam seramik üst tabla	MAT_ELASTIC	2600	95000
Alt tabla ve cam montaj braketleri – DX51D	MAT_PIECEWISE_LINEAR PLASTICITY	7830	210000
Düz yay – CK60 (soğuk çekme)	MAT_PIECEWISE_LINEAR PLASTICITY	7850	210000
Radyant ısıtıcı	MAT_RIGID	848	210000



Şekil 3.4. SEA Modeli.

Livermore Software Technology (2024) tarafından yayınlanan kullanma kılavuzuna göre Ansys LS-Dyna yazılımında bulunan MAT_024, parçaların plastik bölge deformasyonlarını hesaplayabilen, izotropik sertleşme kurallarını içeren bir malzeme modelidir. Plastik bölge deformasyonlarının hesaplanabilmesi için malzeme kartında bulunan plastik bölge eğrisi girişi veya tanjant modülü girişi kullanılmaktadır. Şekil 3.5.'te yaylar için kullanılan CK60 Soğuk çekme malzemesinin gerilme-gerinim eğrisi gösterilmiştir.



Şekil 3.5. CK60 Soğuk Çekme Malzemesi Gerilme-Gerinim Eğrisi

CK60 Soğuk Çekme malzemesi için gerilme gerinim eğrisi tanjant modülü kullanılarak tanımlanmıştır.

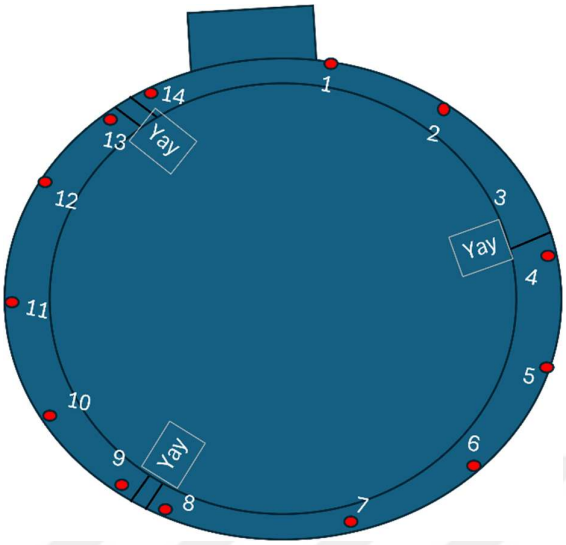
3.1.1. SEA doğrulaması

Yapılan doğrulama çalışmasında, aynı ölçülere sahip üç adet yay bir radyant ısıtıcı üzerine monte edilmiştir. Radyant ısıtıcı yayların üzerinde duracak şekilde düz yüzeye

yerleştirildikten sonra üzerine 2112 gram ağırlığa sahip içinde bir miktar su bulunan tencere yerleştirilmiştir. Deney düzeneği Şekil 3.7.'de gösterilmiştir. Dijital kumpas yardımıyla radyant ısıtıcı üst yüzeyi ile zemin arasındaki mesafe ölçülmüştür. Bu mesafe 14 farklı noktadan üç kez tekrar edilerek ölçülmüş ve ortalaması alınmıştır. Ölçülen mesafeler ve şematik gösterimi Çizelge 3.2.'de ve Şekil 3.6'da gösterilmiştir.

Çizelge 3.2. Deneysel ölçüm sonuçları

Ölçüm Noktası	Deneysel ölçüm 1 (mm)	Deneysel ölçüm 2 (mm)	Deneysel ölçüm 3 (mm)	SEA Sonucu (mm)
1	47,34	45,65	46,9	47,91
2	47,85	46,02	46,9	47,96
3	48,2	46,3	47	48,02
4	48,18	46,61	47,1	48,07
5	48,18	47,25	47	48,14
6	48,00	47,54	47,8	48,22
7	48,03	47,8	48,1	48,24
8	47,53	47,9	48,1	48,28
9	47,34	47,9	48,3	48,26
10	47,51	47,53	48	48,23
11	47,22	47	47,65	48,14
12	47,20	46,65	47,4	48,04
13	47,40	46,35	47,3	47,99
14	47,50	46,02	47,13	47,94

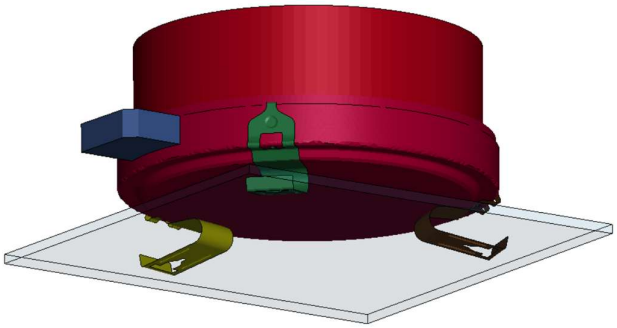


Şekil 3.6. Radyant ısıtıcı yükseklik ölçüm noktaları şematik gösterimi

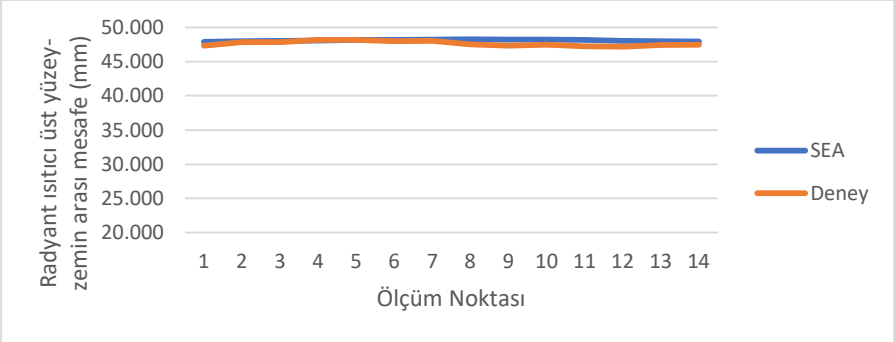


Şekil 3.7. Yay sıkışma miktarı ölçümü

Deney ile aynı koşullara sahip SEA modeli hazırlanıp hesaplanmıştır. Hazırlanan SEA modeli Şekil 3.8.'de gösterilmiştir. Deneysel olarak ölçülen noktalardan alınan radyant ısıtıcı üst yüzeyi ve rijit zemin arasındaki mesafeler, SEA sonuçlarından elde edilmiştir. SEA modelinde yayların kalınlığı matematiksel olarak tanımlanmıştır. Yaylar geometrik olarak yüzey şeklinde SEA modeline eklenmiştir. Deneysel ve nümerik sonuçlar karşılaştırılarak sonuçlar grafik halinde Şekil 3.9.'da gösterilmiştir.



Şekil 3.8. Doğrulama deneyi SEA modeli



Şekil 3.9. Deneysel ölçümler ve nümerik sonuçlar karşılaştırması

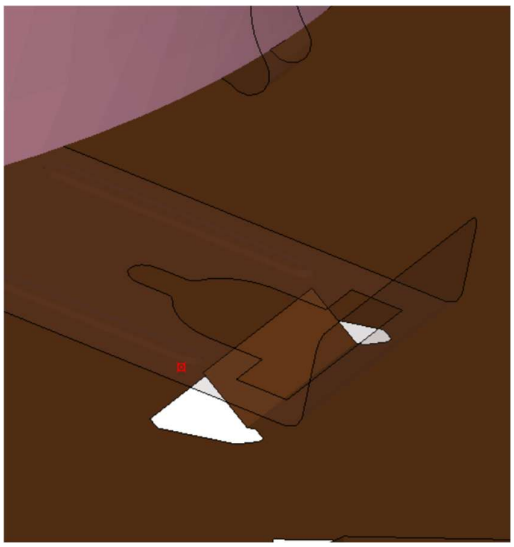
Yapılan mesafe ölçümlerinde deneysel ve nümerik yöntemle tespit edilen sonuçların ortalamaları karşılaştırıldığında %2,18 bağıl fark hesaplanmıştır.

3.1.2. Radyant ısıtıcıların alt tablaya montajlanması

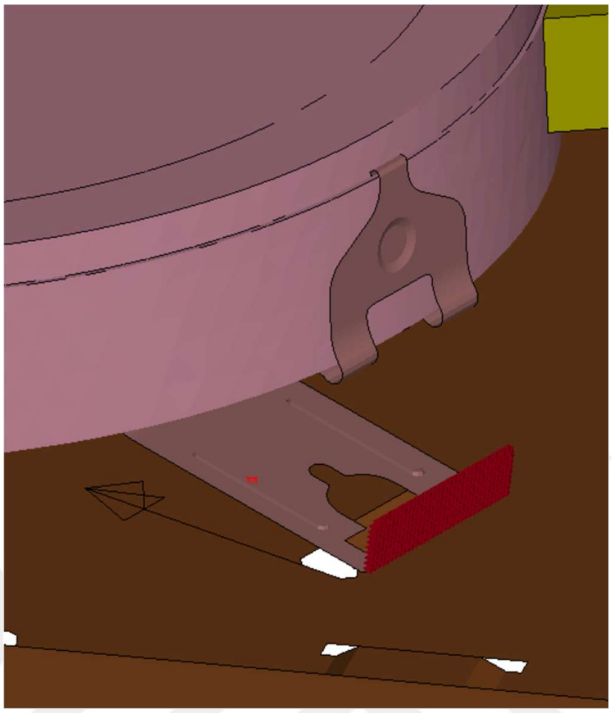
Yayların monte edildiği radyant ısıtıcıların alt tablaya montajlanmasında, yaylar ön gerilmeye tabi tutulmaktadır. Bunun için hazırlanan SEA modelinde, yayların Şekil 3.11'de gösterilen yüzeylerine ön tanımlı yer değiştirme sınır koşulu uygulanmıştır. Gerçekte yayların montajlanması esnasında bu yüzeylerden itilerek alt tabla üzerinde bulunan tırnağa oturması sağlanmaktadır. Alt tablada bulunan tırnakların ve montaj öncesi yayın pozisyonu Şekil 3.10'da gösterilmiştir. SEA modelinde bu durum benzer şekilde uygulanmaktadır. Yay tasarımına bağlı olarak değişen bu yer değiştirme miktarı, yay üzerinde bulunan açıklığın tırnağa denk geleceği kadar uygulanmaktadır. Çizelge 3.3.'te yay tasarımlarına göre uygulanan yer değiştirme miktarı ve yer değiştirme vektörü gösterilmiştir. Şekil 3.12.'de radyant ısıtıcı ve yayların isimlendirmeleri şemada gösterilmiştir.

Çizelge 3.3. Yay tasarımına göre yer değiştirme miktarları

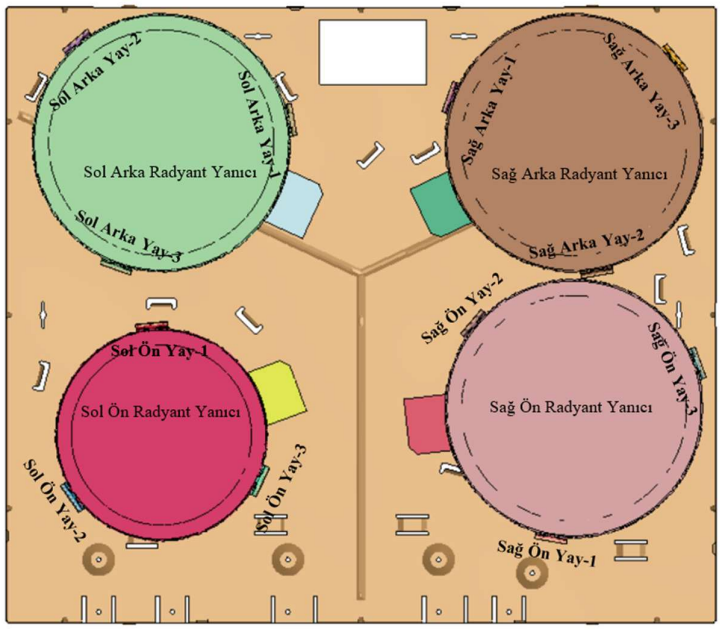
Yay No	Yer Değiştirme Miktarı (mm)
1	4
2	3,7
3	4,5



Şekil 3.10. Alt tabla yay tırnağı



Şekil 3.11. Yaylara uygulanan yer değiştirme yüzeyi ve yön vektörü



Şekil 3.12. Radyant ısıtıcılar ve yayların isimlendirmeleri

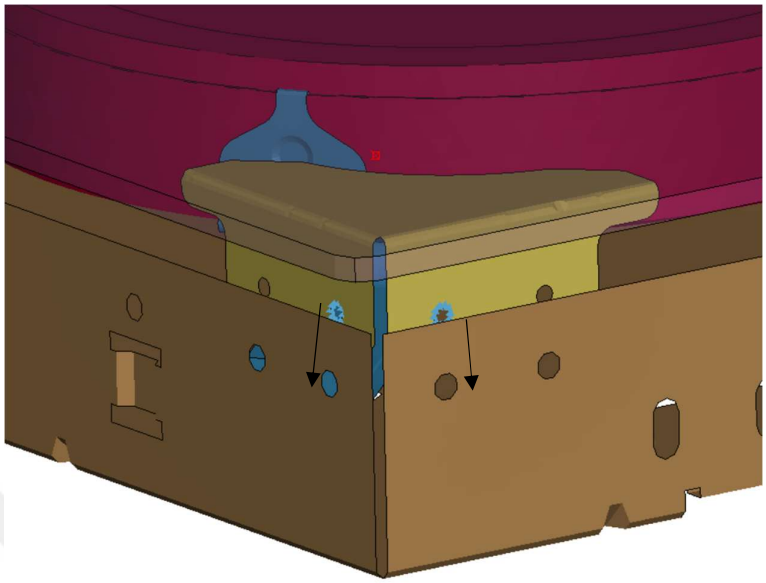
3.1.3. Geri yaylanma etkisi

Ön gerilmeye tabi tutulan yaylar, elastik bölgede kaldığı ölçüde ilk şekline geri dönmektedir. Ancak alt tablada bulunan tırnak yapısı sayesinde geri yaylanma sonrası üzerinde gerilme taşımaya devam etmektedir. Bu durum radyant ısıtıcıların olması gereken konumunda sabit kalmasına ve titreşim, darbe gibi etkiler altında dahi konumlarının bozulmamasına olanak sağlamaktadır.

Geri yaylanma durumunun gözlenebilmesi için ön gerilme SEA sonuçları kullanılmıştır. Ön gerilme analizlerinde yayların tırnaklara oturduğu andaki sonuçları alınıp, tüm sınır koşulları kaldırıldıktan sonra sahip olduğu enerji ile ne kadar geri yaylanabildiği hesaplanmıştır. Bu hesapların sonrasında yaydaki gerilmelerin azaldığı, dolayısıyla gerilme rahatlaması durumunun gerçekleştiği SEA sonuçlarında gözlenmiştir. Geri yaylanma SEA modelinde açık zaman entegrasyonu kullanılmıştır. Kapalı zaman entegrasyonunda, yayların gerilme rahatlaması durumunda ortaya çıkan çarpma ve yüksek frekanslı şok dalgaları yakınsamayı olumsuz şekilde etkilemektedir.

3.1.4. LAS cam seramik üst tabla montajı

Gerilme rahatlaması hesaplamaları tamamlanan radyant ısıtıcı-alt tabla montajının sonuçları üst tabla montajı SEA'ya girdi olarak tanımlanmıştır. SEA'da LAS cam seramik üst tablanın köşelerinde bulunan montaj braketlerinde bulunan montaj delikleri ile alt tablada bulunan montaj delikleri aynı hizaya getirilmiştir. Bunun için üst tabla montaj braketlerinde bulunan deliklerin düğümlerine ön tanımlı yer değiştirme tanımlanmıştır. Şekil 3.13.'te ön tanımlı yer değiştirme tanımlanan düğümler belirtilmiştir.



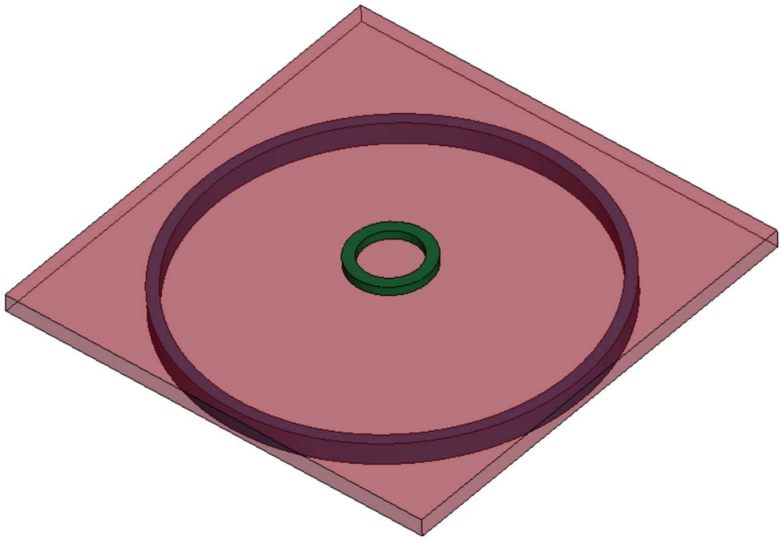
Şekil 3.13. Üst tabla montaj braketleri ön tanımlı yer değiştirme tanımlanan düğümler

SEA sonucunda radyant ısıtıcıların üst tablaya mesafesi tespit edilmiştir.

3.1.5. LAS cam seramik üst tabla deformasyon kontrolü

LAS Cam seramikler, düz camlara benzer şekilde gevrek malzeme davranışı sergilemektedir. Cam seramik üst tabla için uygulanan mekanik dayanım testi, çelikler için uygulanan basma-çekme testlerinden farklıdır. Camların dayanımının belirlenebilmesi için çift çember testi gerçekleştirilmektedir. Bu test Uluslararası Standardizasyon Organizasyonu. (2016) tarafından yayınlanan DIN EN 1288-5 (R45) standardında açıklanmıştır.

LAS cam seramik tedarikçisinden edinilen teknik dokümanda DIN EN 1288-5 (R45) standardında belirtilen çift çember testi sonucu σ_{bB}=110 MPa olarak verilmiştir. Cam seramiğin kırılma geriniminin tespiti için ilgili standartta belirtilen test SEA ile simüle edilmiştir. Şekil 3.14.'te standart testin SEA modeli gösterilmektedir.



Şekil 3.14. DIN EN 1288-5 (R45) standardına göre çift çember testi SEA modeli

SEA sonuçlarına göre LAS cam seramiğin kırılma gerinimi 0,0012 mm/mm olarak tespit edilmiştir. Bu kriter cam montajı SEA modelinde eleman erozyon kriteri olarak tanımlanmıştır. Eleman erozyonu ile cam seramikte oluşan gerinimler kontrol edilip, kırılma gerinimine ulaşan elemanların çözüm esnasında modelden silinmesi sağlanmıştır.

3.2. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD), ısı ve kütle transferinin bilgisayar destekli modellenmesi ve çözümlenmesi yöntemidir. Bu yöntemde göre verilen girdilere göre (sınır koşulları, malzeme özellikleri, ortam koşulları) korunum denklemleri kullanılarak iteratif çözümleme yapılmaktadır. Farklı fiziksel olaylar için farklı formüllerin kullanıldığı bu yöntemde, geometriler bilinen sayıda hacme bölünerek her bir kontrol hacmi için ilgili denklemler çözümlenir.

İletim, taşınım ve ışınım gibi ısı transferi mekanizmalarının modellenebildiği bu yöntemde tüm model için kurulan matrisler her bir düğüm ve zaman adımı için

çözümlenmektedir. HAD analizlerinde iki tip zaman entegrasyonu kullanılmaktadır. Bunlar sürekli durum ve zamana bağlı çözümlemelerdir. Zamana bağlı çözümlemelerde SEA'daki açık zaman entegrasyonuna benzer şekilde belirlenen her bir zaman adımı için çözüm yapılmaktadır. Kapalı zaman entegrasyonunda ise bir sonraki adım çözümlemesi, çözülen adımın denklemlerine dahil edilir. Bu sayede daha büyük zaman adımları ile yakınsama sağlanması mümkün hale gelmektedir.

HAD modelinde akış sıkıştırılamaz ve laminer kabul edilmiştir. Mentor Graphics Corporation. (2018) tarafından yayınlanan teknik referans dökümanına göre Favre ortalamalı Navier-Stokes denklemlerine göre enerji, momentum ve kütle korunum denklemleri şu şekildedir.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \tag{3.2}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\eta \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \overline{\rho u_i' u_j'}\right) \tag{3.3}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho T) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j T) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\Gamma \frac{\partial T}{\partial x_j} - \overline{\rho u_j' T'}\right) + q_{in} \tag{3.4}$$

Burada belirtilen Reynolds gerilmesi (3.5) denklemi ile tanımlanmıştır.

$$\overline{\rho u_i' u_j'} = \eta_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right) - \frac{2}{3}\left(\rho k + \eta_t \frac{\partial u_k}{\partial x_k}\right)\delta_{ij} \tag{3.5}$$

Işınımla ısı transferinin hesaplanabilmesi için ışınım yoğunluğunun açısal bağımlılığını veren klasik bir yaklaşım olan ayrık ordinatlar yöntemi kullanılmıştır (Chandrasekhar, 1950). Bu yöntemde sonlu sayıdaki yönlü ışınlar, ışınımla ısı transferi denklemleri kullanılarak hesaplanır. Işınımla ısı transferinin ana formülü (3.13) denkleminde verilmiştir.

$$Q_{ışınım} = \sigma(T_2^4 - T_1^4)A_2F_{2-1} = \sigma(T_1^4 - T_2^4)A_1F_{1-2} \quad (3.13)$$

Işınımla ısı transferi formülünde görüldüğü üzere konfigürasyon faktörü veya şekil faktörü, ısı transferini doğrusal olarak etkilemektedir. Şekil faktörü formülü (3.14) denkleminde verilmiştir.

$$F_{1-2} = \frac{1}{A_1}\int_{A_1}\int_{A_2}\frac{cos\phi_1 cos\phi_2}{\pi R^2}dA_2dA_1 \quad (3.14)$$

$$F_{2-1} = \frac{1}{A_2}\int_{A_2}\int_{A_1}\frac{cos\phi_1 cos\phi_2}{\pi R_{mesafe}^2}dA_1dA_2$$

Şekil faktörü formülünde görüldüğü üzere, şekil faktörü, iki nokta arasındaki mesafenin karesiyle ters orantılıdır. Bu durum, radyant ısıtıcının cam seramik üst tablanın alt yüzeyine olan mesafenin değişmesiyle transfer edilen ısı miktarının da değişmesi gerektiğinin teorik kanıtıdır.

Tez çalışması kapsamında HAD analizleri FloEFD yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Hesaplama maliyetinin azaltılması amacıyla HAD analiz modeli ocağın yalnızca bir adet 1800W radyant ısıtıcı gözünde gerçekleştirilmiştir. Yay tasarımına bağlı olarak değişen radyant ısıtıcı-cam seramik üst tabla arasındaki mesafe SEA sonuçlarından alınarak HAD analiz modeline uygulanmıştır. Cam seramik üst tablanın üst yüzeyinde oluşan sıcaklık dağılımları karşılaştırılmıştır.

Vitroseramik ocakların verimi Estonian Centre for Standardisation. (2018) tarafından yayınlanan EN 60350-2 standardına göre belirlenmektedir. Bu standart elektrikli ocakların verimlerinin ölçülmesinde kullanılan deneysel yöntemleri ve sonuçların hesaplanmasını içermektedir. Deney sonuçları ve bu sonuçların hesaplanması sonucunda Wh/kg cinsinden verim ortaya çıkar. Bu verim bir kilogramlık suyun verilen şartlarda ısıtılması için ocak gözünün saatte harcaması gereken enerji miktarını temsil eder. Bu değer ne kadar düşük çıkarsa ocağın o kadar verimli olduğu anlaşılmaktadır. Bu tez çalışmasında, tek değişkenin radyant ısıtıcı ile cam seramik üst tabla arasındaki mesafe olmasından dolayı, cam seramik

üst tablanın üst yüzeyinde oluşan ve yay tasarımına bağlı olarak değişen ortalama sıcaklıktaki farklılıklar ocağın verimini direkt olarak etkilemektedir.

3.2.1. HAD Analiz modeli

HAD analiz modelinin kalibre edilmesinde ocağın tek gözünde gerçekleştirilen sıcaklık deney sonuçları kullanılmıştır. Ocakta bulunan 1800W radyant ısıtıcıya sahip bir gözde, cam seramik üst tabla üzerine bağlanan ısıl çiftlerle sıcaklık ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Bu sıcaklıkların ortalaması alınarak, HAD analizi sonuçlarında bu ortalama sıcaklık değerine yaklaşılmıştır. Böylelikle cam seramik üst tabla üzerinde oluşan sıcaklık ortalaması ile HAD analizinden elde edilen sıcaklıkların ortalamaları arasındaki bağıl fark %7'nin altına düşürülmüştür. HAD analizi yazılımına girilen sınır koşulları Çizelge 3.4'te verilmiştir.

Çizelge 3.4. HAD analizi sınır koşulları

Koşul	Değer
Radyant ısıtıcı hariç tüm yüzeylerde konveksiyon sınır şartı	h= 5 $W/m^2.K$ T_∞ = 25°C
Radyant ısıtıcı yüzeyinde sabit ısı akısı	32000 W/m^2
Tüm yüzeylerde kaymama şartı	u=v=w=0
Akışkan tipi	Hava

HAD analiz modeline tanımlanan geometri 3 boyutludur ve analiz kapalı zaman entegrasyonu ile çözülmüştür.

3.2.2. Deneysel ölçümler

Deneysel sıcaklık ölçümlerinde toplam 13 adet K tipi ısıl çift kullanılmıştır. Isıl çiftlerin yerleşimi ve Şekil 3.15'te gösterilmiştir. Isıl çiftler üst tabla üzerine sodyum silikat

bazlı macun ile sabitlenmiştir. Isıl çiftlerin uç kısımları üst tablaya temas ettirildikten sonra macun uygulanmıştır. Macun, sıcaklıkla aktive olduktan sonra kuruyup üst tablaya tutunmuştur. Böylelikle ısıl çiftlerin ölçüm boyunca üst tabla ile temasının kesilmemesi ve sıcaklıkların doğru şekilde ölçülmesi sağlanmıştır.

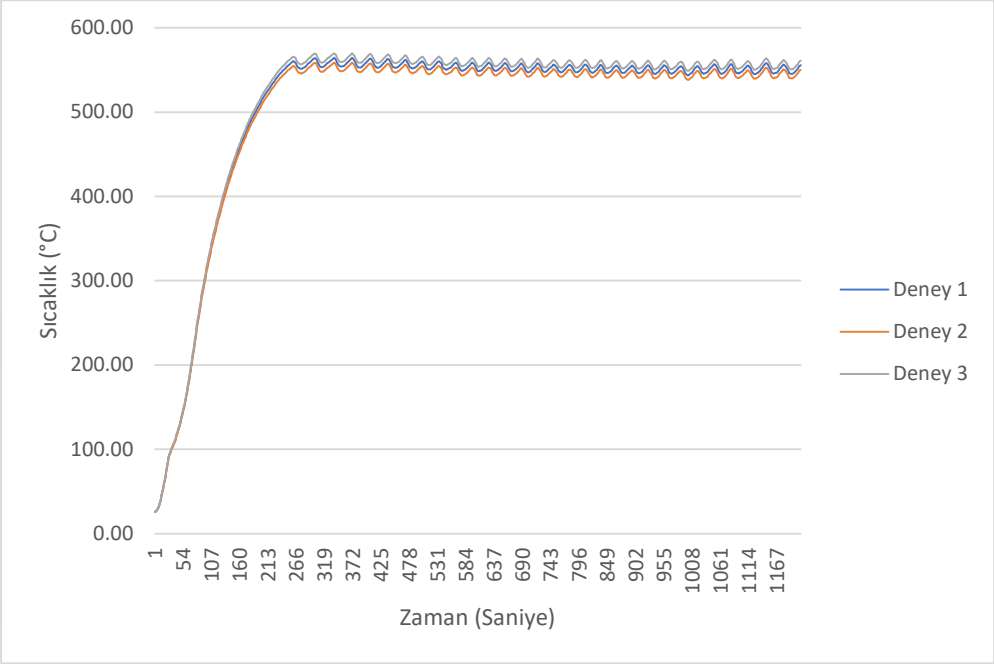


Şekil 3.15. Isıl Çiftlerin Yerleşimi

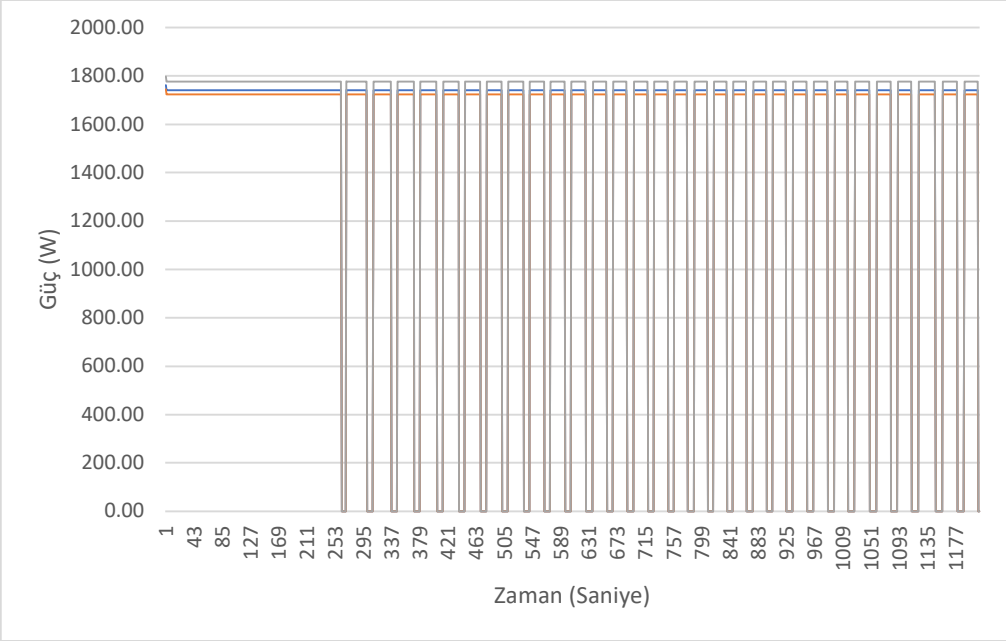
Radyant ısıtıcı üreticisinin paylaşmış olduğu teknik dokümanda radyant ısıtıcı merkezinde bulunan mekanik termostatın merkez noktasındaki sıcaklığın 660°C'ye ulaştığında gücün kesildiği bilgisi paylaşılmıştır. Bu durumda radyant ısıtıcı aç-kapa kontrol algoritmasına göre çalışmaktadır. Üst tabla üzerinde farklı 13 noktadan alınan sıcaklıkların (NI_cDAQ 9178) ortalamasında ve güç ölçümlerinde (Yokogawa WT300E) bu durum Şekil 3.16 ve Şekil 3.17'de bulunan grafiklerde gözlenmiştir. Deney düzeneği Şekil 3.18'de şematik olarak gösterilmiştir.

20 dakika boyunca 13 noktadan alınan sıcaklık ölçümlerinin ortalamasına göre en yüksek sıcaklık ortalaması 563,93°C olarak kaydedilmiştir. Güç ölçümlerine göre 1800W güce sahip radyant ısıtıcı test başlangıcından itibaren ilk 4,4 dakika boyunca ortalama

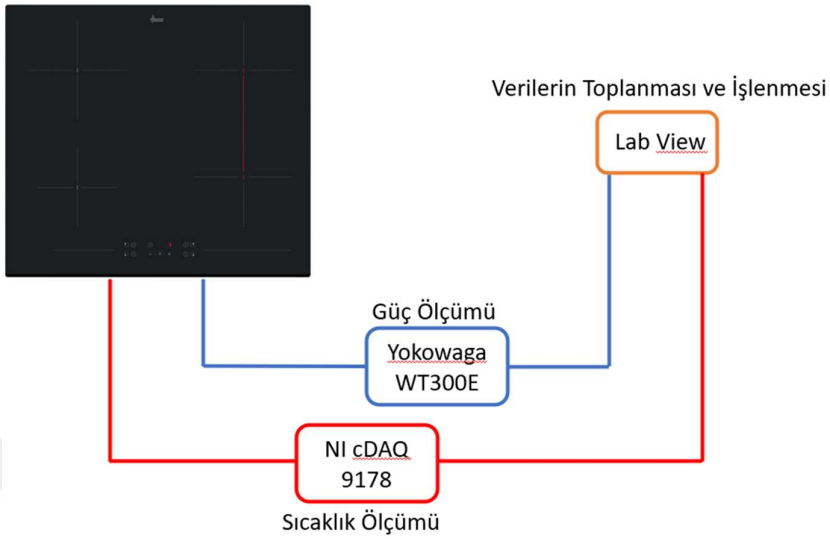
1741W güçle kesintisiz çalışmaktadır. 4,4 dakikadan sonra aç-kapa algoritması ile çalışmaya devam etmektedir.



Şekil 3.16. Sıcaklık Ölçümleri



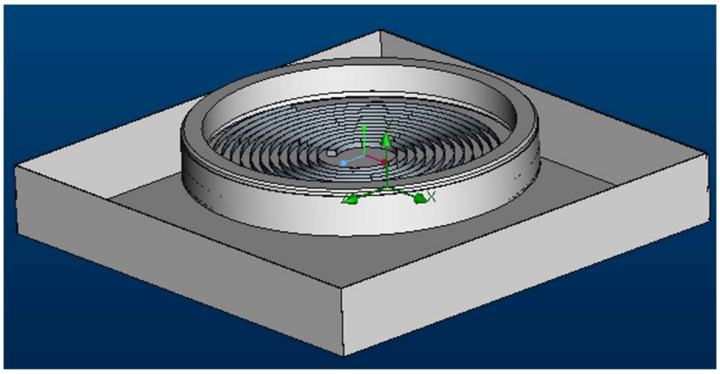
Şekil 3.17. Güç Ölçümü



Şekil 3.18 Deney düzeneği.

3.2.3. HAD analiz modeli doğrulaması

HAD analiz modelinde rezistans geometrisi hesaplama maliyetlerinin azaltılması amacıyla sadeleştirilmiştir. Şekil 3.18'de kullanılan rezistans geometrisi verilmiştir.



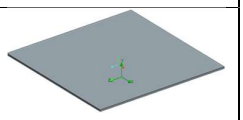
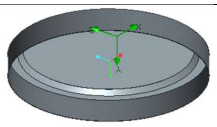
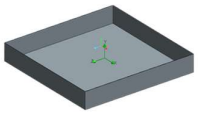
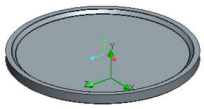
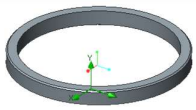
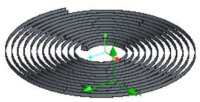
Şekil 3.19. HAD Analiz modeli radyant ısıtıcı ve alt tabla geometrisi

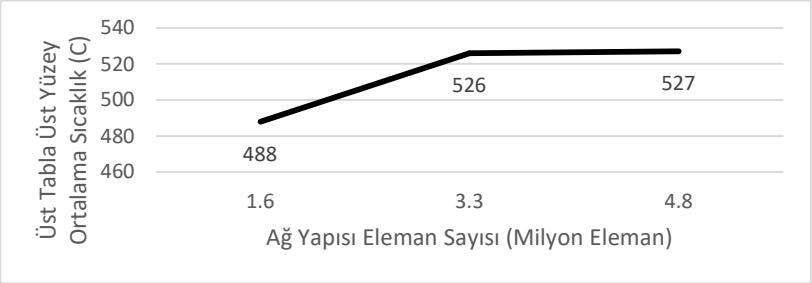
HAD analiz modelinde kullanılan komponentler ve özellikleri Çizelge 3.4'te gösterilmiştir.

Deneylerin gerçekleştirildiği numunede olduğu gibi, HAD analiz modelinde radyant ısıtıcı üst yüzeyi ile üst tabla alt yüzeyi temas etmektedir.

Ağ yapısından bağımsızlık çalışması için 1,6 milyon, 3,3 milyon ve 4.8 milyon kübik elemanlı ağ yapıları için gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.19'da ağ yapısından bağımsızlık çalışması sonuçları gösterilmiştir. Buna göre 3,3 milyon kübik elemanlı ağ yapısına karar verilmiştir. Kullanılan ağ yapısı Şekil 3.20'de verilmiştir.

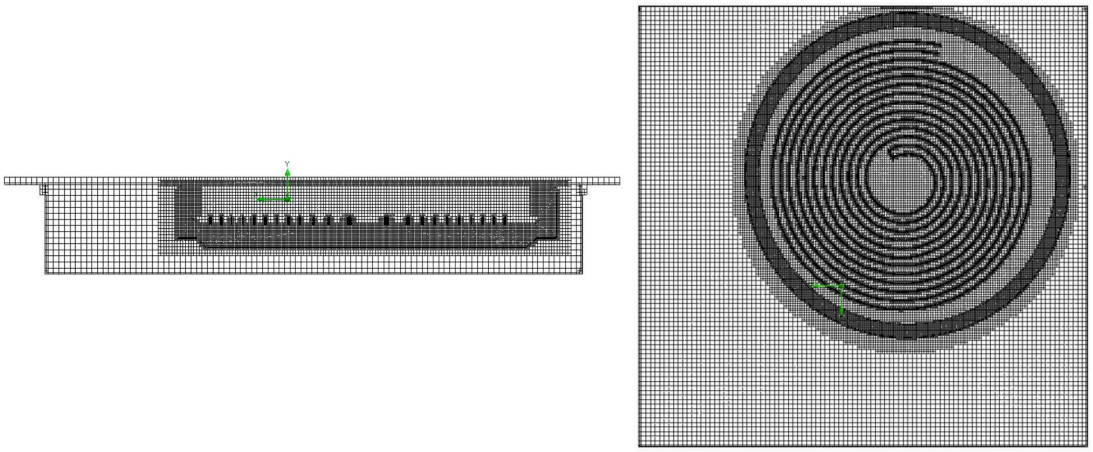
Çizelge 3.5. HAD analizi parçalar ve malzeme özelikleri

Parça Adı	Malzeme Adı	Yoğunluk (KG/m^3)	Özgül Isı (J/kg.K)	Isı İletim Katsayısı (W/m.K)	Parça Resmi
Üst tabla	LAS cam seramik	2600	800	1,6	
Radyant ısıtıcı alt koruma sacı	Alüminyum kaplamalı çelik	7500	466	65,652	
Alt Tabla	DX51D	7500	466	65,652	
Radyant ısıtıcı alt yalıtımı	Vermikülit	466 (Kang vd. (2023))	$0{,}0001T^3 - 0{,}0554T^2 + 9{,}777T + 455$ (Kang vd. (2023))	$5e-9T^3 - 3e-6T^2 + 0{,}0004T + 0{,}0208$ (Kang vd. (2023))	
Radyant ısıtıcı yalıtım çemberi	Seramik	833 (Kang vd. (2023))	$0{,}0035T^2 + 2{,}9763T + 567{,}1$ (Kang vd. (2023))	$-5e-7T^2 + 0{,}0004T + 0{,}1031$ (Kang vd. (2023))	
Şerit rezistans	FeCrAl Alaşımı	7150 (Kang vd. (2023))	$-0{,}0002T^2 - 0{,}5043T + 458{,}92$ (Kang vd. (2023))	$-3e-6T^2 + 0{,}0184T + 10{,}059$ (Kang vd. (2023))	



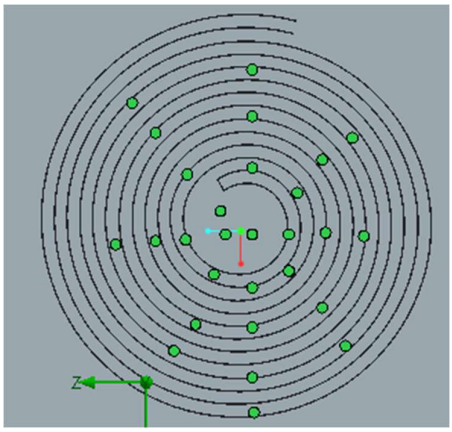
Şekil 3.20. Ağdan Bağımsızlık Çalışması Sonuçları

HAD analizinde üst tablanın üst yüzeyinde toplam 28 noktadan sıcaklık ölçümü gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.21'de sıcaklık ölçüm noktaları gösterilmiştir.



a) b)

Şekil 3.21. Ağ yapısı a) önden kesit görünüş b) üstten kesit görünüş



Şekil 3.22. Sıcaklık Ölçüm Noktaları

HAD analizine göre 28 noktadan alınan maksimum sıcaklıkların ortalaması 526°C'dir. Deneysel sıcaklık ölçümleri ile karşılaştırıldığında %6,72 bağıl fark hesaplanmıştır. HAD analizinde hesaplanan sıcaklıklar Çizelge 3.6'da verilmiştir.

Çizelge 3.6. HAD analiz sıcaklık sonuçları

HAD analizi ölçüm noktası	Ölçüm (°C)
1	526
2	542
3	541
4	517
5	537
6	535
7	505
8	449
9	534
10	536
11	523
12	525
13	535
14	539
15	532
16	526
17	542
18	539
19	515
20	541
21	535
22	512
23	537
24	529
25	493
26	535
27	536
28	518

3.3. Belirsizlik analizi

Deneysel çalışmalarda belirsizlik analizi ölçümlerin geçerliliğinin saptanmasında önemli bir çalışmadır. Mayil ve Timuralp (2025)'e göre belirsizlikler Tip-A (istatistiksel belirsizlik) ve Tip-B (ekipman belirsizliği) olarak ikiye ayrılır. Buna göre denklem (3.15) ile ölçümlerin ortalaması tespit edilir. Denklem (3.16)'da ortalama yerine konarak standart sapma hesaplanır. Denklem (3.17) ve denklem (3.18) Tip-A ve Tip-B belirsizlik formülüdür. Toplam belirsizlik ise denklem (3.19) ile hesaplanmaktadır.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^{n} x_i}{n} \tag{3.15}$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \tag{3.16}$$

$$u_a = \frac{s}{\sqrt{n}} \tag{3.17}$$

$$u_b = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + \ldots + u_n^2} \tag{3.18}$$

$$u_{toplam} = \sqrt{u_a^2 + u_b^2} \tag{3.19}$$

Buna göre hem yük altında radyant ısıtıcı üst yüzeyi yerden yükseklik ölçümü için hem de üst tabla üst yüzeyinden alınan sıcaklıklar için belirsizlik analizi gerçekleştirilmiştir. Yükseklik ölçümü için Tip-A belirsizlik, tekrarlı ölçüm sonuçlarına göre ve Tip-B belirsizlik, kumpas hassasiyetine göre belirlenmiştir. Sıcaklık ölçümleri için Tip-A belirsizlik tekrarlı ölçüm sonuçlarına göre ve Tip-B belirsizlik K tipi ısıl çiftlerin hassasiyetine göre gerçekleştirilmiştir. Güç ölçümü için Tip-A belirsizlik tekrarlı ölçüm sonuçlarına göre ve Tip-B belirsizlik, ölçümün yapıldığı güç ölçer hassasiyetine göre hesaplanmıştır. Ekipman belirsizlikleri Çizelge (3.7)'de ve ölçümlerin belirsizlik analizi sonuçları Çizelge (3.8)'de verilmiştir.

Çizelge 3.7. Tip-B belirsizlikleri

Cihaz	Model	Belirsizlik
K tipi ısıl çift	PT1000	±0,5°C
Güç ölçer	Yokogawa WT300E	±0,01W
Kumpas	Mitutoyo CD-15APX	±0,01mm

Çizelge 3.8. Belirsizlik analizi sonuçları

Ölçüm	Maksimum belirsizlik
Radyant ısıtıcı üst yüzey-zemin arası mesafe ölçümü	0,12mm
Üst tabla üst yüzey sıcaklık ölçümü	3,95°C
Güç ölçümü	18,42W

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. SEA Bulguları

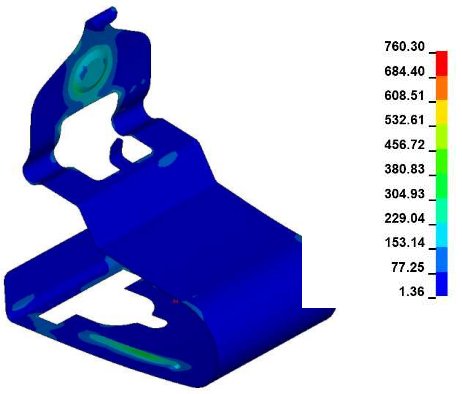
4.1.1. Ön gerilme analizi bulguları

Üç farklı yay tasarımı için gerçekleştirilen SEA'nın ilk adımı olan ön gerilme analizleri sonucunda ortaya çıkan maksimum von-Mises gerilmeleri ve gerinimleri Çizelge 4.1'de verilmiştir. 1, 2 ve 3 nolu yay tasarımlarında oluşan gerilme dağılımları Şekil 4.1-4.3'te gösterilmiştir.

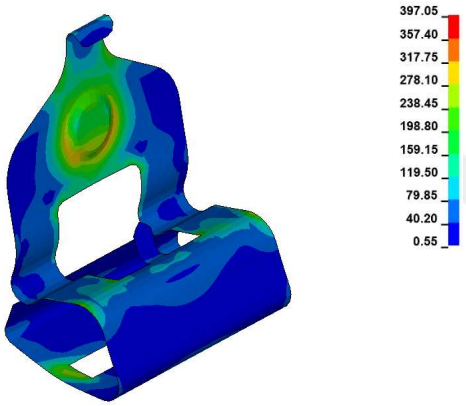
Çizelge 4.1. Yay tasarımlarının SEA sonuçları

Yay No	Maksimum von-Mises Gerilmesi (MPa)	Maksimum Efektif Gerinim (%)
1	760,3	0,46
2	397,05	0,17
3	728,44	0,65

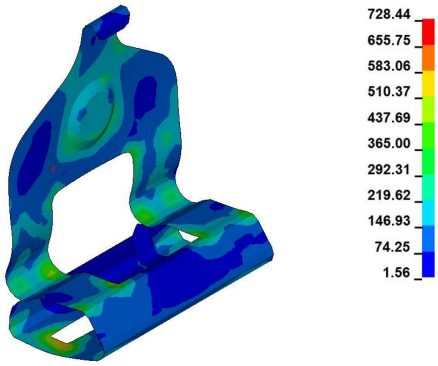
Ön gerilme sayısal sonuçlarına göre, 950 MPa akma dayanımına sahip CK60 malzeme tanımlı yaylar akma gerilmesine ulaşmadığından plastik deformasyon gözlenmemiştir.



Şekil 4.1. 1 nolu yay için maksimum von-Mises gerilmeleri (MPa)



Şekil 4.2. 2 nolu yay için maksimum von-Mises gerilmeleri (MPa)



Şekil 4.3. 3 nolu yay için maksimum von-Mises gerilmeleri (MPa)

4.1.2. Geri yaylanma SEA bulguları

Geri yaylanma analizlerinde, ilk adımda gerçekleştirilen ön gerilme analizlerinin sonuçları girdi olarak kullanılmıştır. Gerilmiş yaylar bu aşamada serbest bırakılarak alt tabla üzerinde bulunan tırnaklara oturması sağlanmıştır. Geri yaylanma analizi sonucunda von-Mises gerilmesi ve gerinim değerleri Çizelge 4.2'de verilmiştir. Yaylara göre geri yaylanma sonrası von-Mises gerilme dağılımları Şekil 4.4-4.6'de verilmiştir.

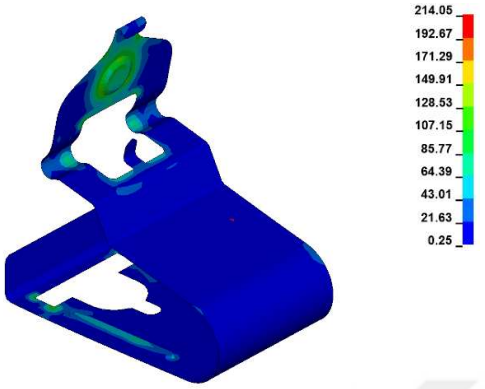
Çizelge 4.2. Geri yaylanma adımı sonrası yayların von-Mises gerilme ve gerinim değerleri

Yay No	Maksimum von-Mises Gerilmesi (MPa)	Efektif Gerinim (%)
1	214,05	0,25
2	292,63	0,14
3	480,63	0,53

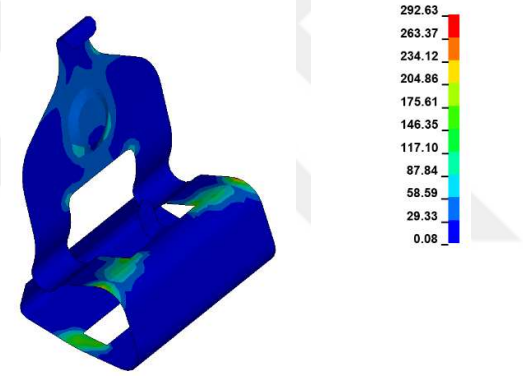
Geri yaylanma analizi sonuçlarında her bir yay için maksimum von-Mises gerilme azalma oranı Çizelge 4.3'te verilmiştir.

Çizelge 4.3. Geri yaylanma analizi sonucunda maksimum gerilme azalması oranları

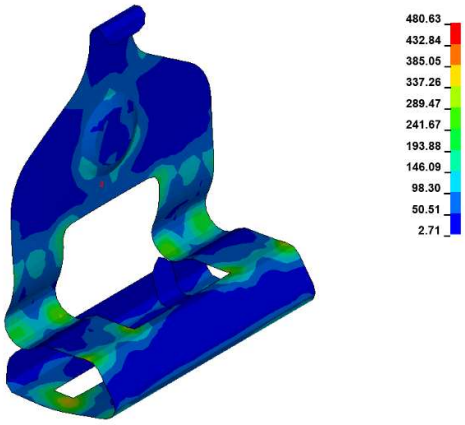
Yay No	Ön Gerilme-Geri Yaylanma Arasında von-Mises Gerilmesi Azalma Oranı (%)
1	71,85
2	26,3
3	34,02



Şekil 4.4. 1 nolu yay geri yaylanma sonrası von-Mises gerilme dağılımı (MPa)



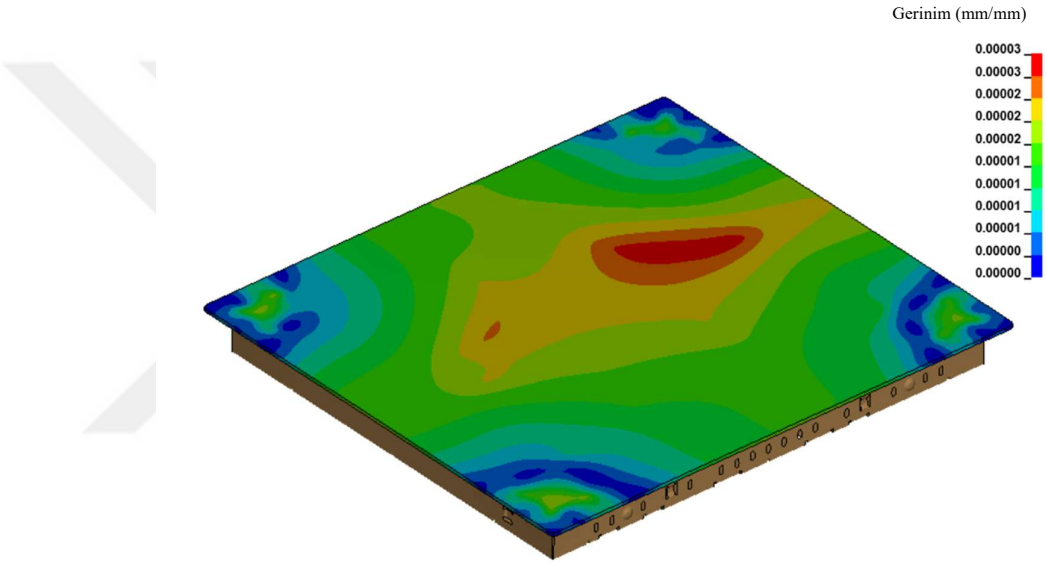
Şekil 4.5. 2 nolu yay geri yaylanma sonrası von-Mises gerilme dağılımı (MPa)



Şekil 4.6. 3 nolu yay geri yaylanma sonrası von-Mises gerilme dağılımı (MPa)

4.1.3. LAS cam seramik üst tabla montajı SEA Sonuçları

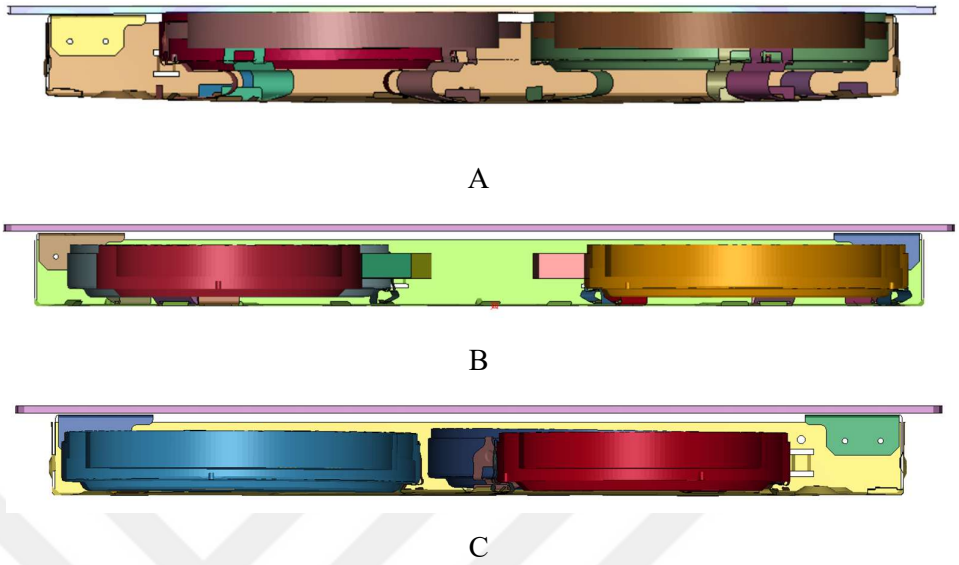
Üst tabla montajında yalnızca 1 nolu yay ile hazırlanan modelde üst tabla ile radyant ısıtıcı arasında temas hesaplanmıştır. LAS cam seramiğin belirlenen kırılma gerinimi için hasar kontrolü gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.7'de LAS cam seramik üst tabla gerinim dağılımı gösterilmiştir.



Şekil 4.7. LAS cam seramik üst tabla etkin gerinim dağılımı

LAS cam seramik üst tabla montaj sonrası gerinim sonuçlarına göre üst tablada oluşan maksimum gerinim 0,0012'nin altında olduğundan kırılma gözlenmemiştir.

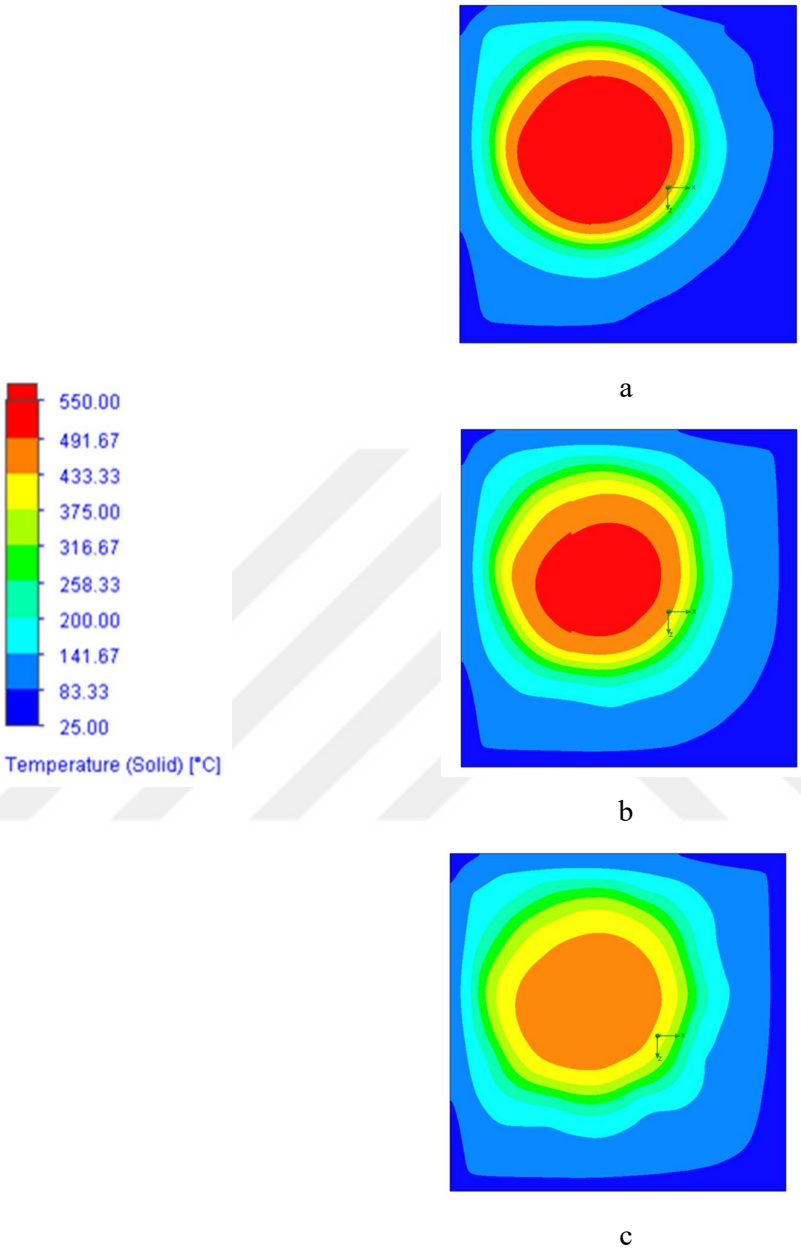
İncelenen yaylarla gerçekleştirilen üst tabla montajı SEA sonucu Şekil 4.8'de gösterilmiştir. 1 nolu yay ile gerçekleştirilen üst tabla montajı SEA sonuçlarına göre radyant ısıtıcılar üst tablanın alt yüzeyi ile temas etmektedir. Bu durum Şekil 4.8 (a)'da analiz sonuçlarının kesit görüntüsünde gösterilmiştir. 2 ve 3 nolu yaylar ile yapılan cam montajı SEA sonucunda, 2 nolu yay ile hazırlanan modelde 8 mm ve 3 nolu yay için hazırlanan modelde 14 mm radyant ısıtıcı-LAS cam seramik üst tabla boşluğu hesaplanmıştır.



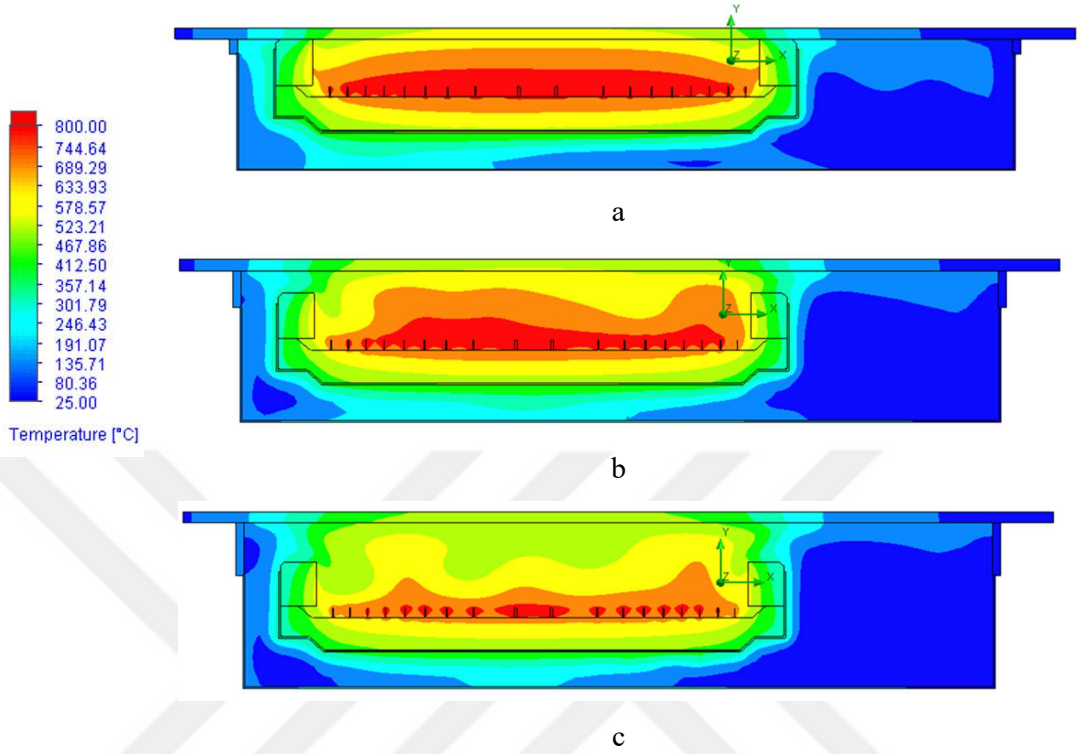
Şekil 4.8. a) 1 nolu, b) 2 nolu, c) 3 nolu yay ile üst tabla montajı SEA sonucu kesit görünümü

4.2. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Analiz Sonuçları

1 nolu yay LAS cam seramik üst tabla ile radyant ısıtıcı temasını sağlayan ve fiziksel numune ile sıcaklık ölçümlerinin gerçekleştirildiği tasarımdır. Şekil 4.9'da 3 yay durumu için gerçekleştirilen HAD analizi sonucunda oluşan LAS cam seramik üst tabla üst yüzey sıcaklık dağılımı gösterilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere en yüksek üst tabla üst yüzey sıcaklığı 1 nolu yay durumunda gerçekleşmiştir.

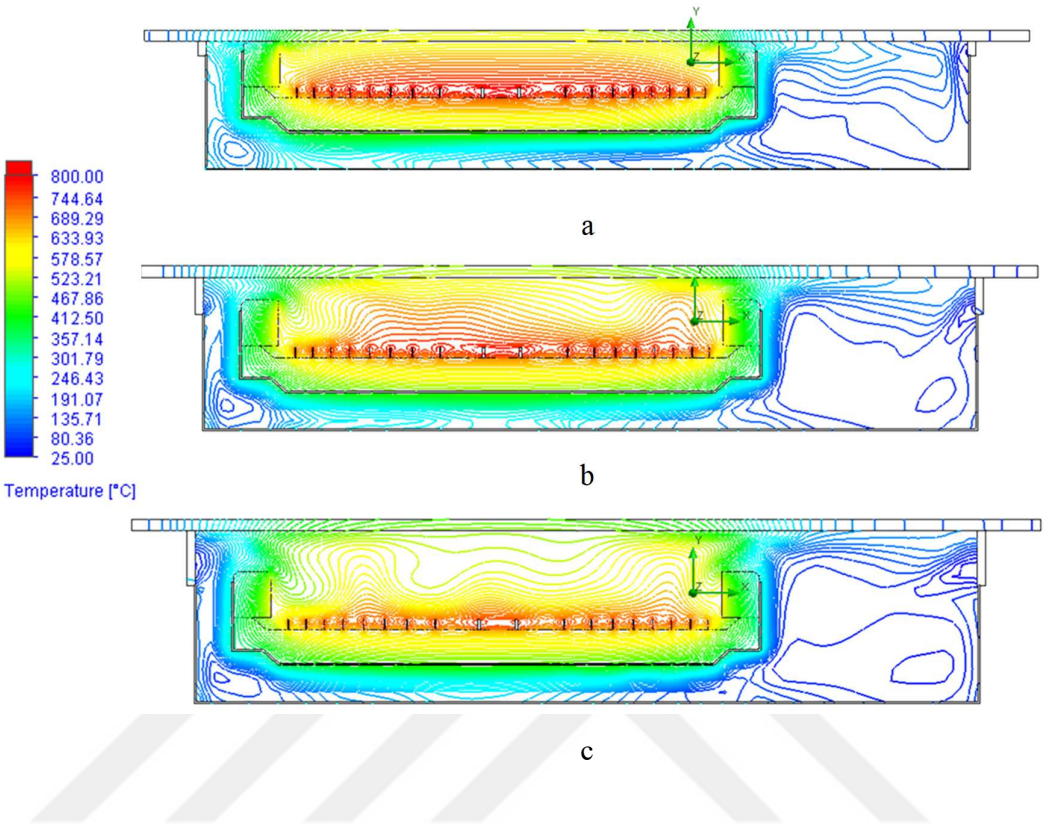


Şekil 4.9. Üst tabla üst yüzey sıcaklıkları a)1 nolu, b) 2 nolu, c) 3 nolu yay durumu

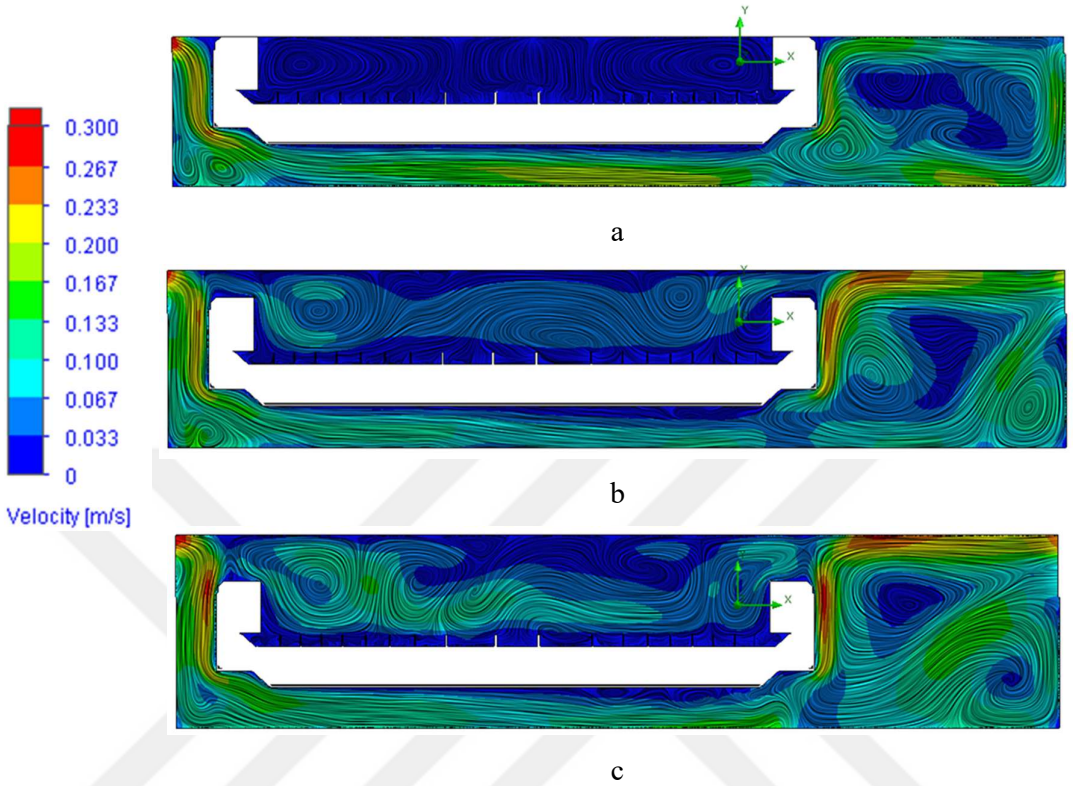


Şekil 4.10. Sıcaklık dağılımı a) 1 nolu, b) 2 nolu, c) 3 nolu yay durumu (Z ekseni 300mm'den kesit görünümleri)

Şekil 4.10- Şekil 4.12'de radyant ısıtıcı kesitinden alınan, incelenen yay durumlarına göre sırasıyla kesitte sıcaklık dağılımları, eş sıcaklık eğrileri ve akış çizgileri yöntemine göre hava hızı dağılımları verilmiştir. Mesafenin artmasıyla şekil faktörünün azaldığı ve buna bağlı olarak dikey eksende sıcaklığın azaldığı görülmektedir. Akış dağılımlarında hava hızının düşük olması sebebiyle laminer akış kabulü doğrulanmıştır.

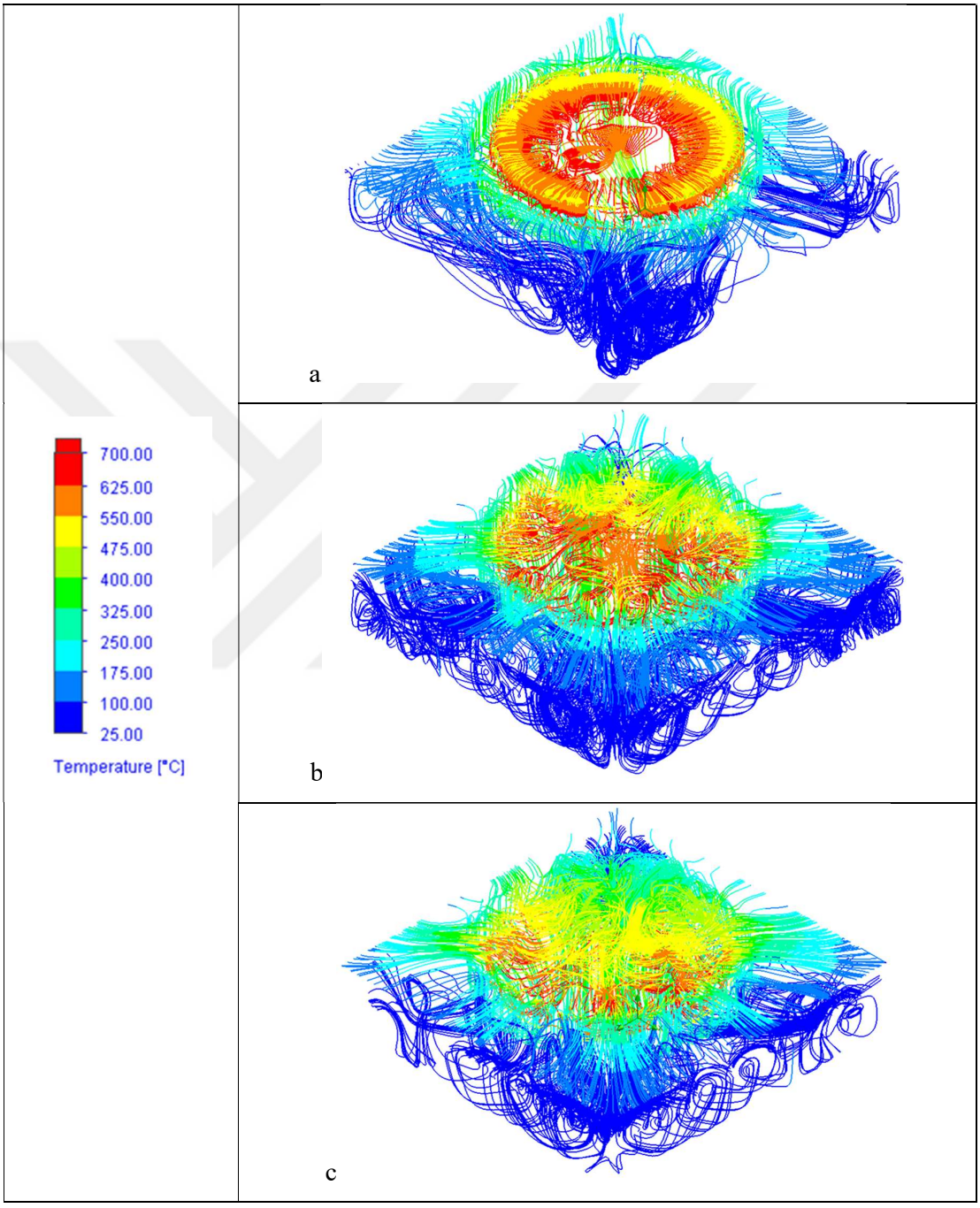


Şekil 4.11. Eş sıcaklık eğrileri a) 1 nolu, b) 2 nolu, c) 3 nolu yay durumu (Z ekseni 300mm'den kesit görünümleri)



Şekil 4.12. Hız dağılımları a) 1 nolu yay, b) 2 nolu yay, c) 3 nolu yay durumu (Z ekseni 300mm'den kesit görünümleri)

İncelenen yay durumları için üç boyutlu sıcaklık dağılımları Şekil 4.13'de gösterilmiştir. Üç boyutlu sıcaklık dağılımları incelendiğinde radyant ısıtıcı ve üst tabla arasındaki mesafenin artışıyla havanın sıcaklık dağılımının yayıldığı görülmektedir. 1 nolu yay durumunda havanın sıcaklığı radyant ısıtıcının iç kısmında yüksek ve çevresinde daha düşükken, 2 ve 3 nolu yay durumunda sıcaklık dağılımının da daha büyük bir alana yayıldığı görülmektedir.



Şekil 4.13. 3B sıcaklık akım yörüngeleri a) 1 nolu yay, b) 2 nolu yay, c) 3 nolu yay durumu

2 ve 3 nolu yay tasarımları ile gerçekleştirilen HAD analizi sonuçlarına göre sıcaklık dağılımı radyant ısıtıcı ile üst tabla arasındaki mesafenin artışıyla değişmektedir. Her HAD analiz modelinde 28 noktadan alınan sıcaklıkların analiz sonundaki ortalamaları Çizelge 4.4'te verilmiştir.

Çizelge 4.4. Yay tasarımına göre yapılan HAD analizi sonuçları-üst tabla ortalama sıcaklıkları

Yay no	Üst tabla sonuçları- sıcaklık ortalamaları (°C)
1	526
2	495
3	459

HAD analizi sonuçlarına göre üst tabla üst yüzey ortalama sıcaklıkları, radyant ısıtıcı ile üst tabla arasındaki mesafenin artışıyla azalmaktadır. Buna göre 2 ve 3 nolu yay tasarımlarında ortalama sıcaklıkların azalma oranı Çizelge 4.5'te gösterilmiştir.

Çizelge 4.5. 1 nolu yay durumuna göre 2 ve 3 nolu yay tasarımlarının HAD analiz sonuçları

Yay no	Üst tabla üst yüzeyinin ortalama sıcaklığındaki azalma oranı (%)	Radyant ısıtıcı -üst tabla arası mesafe
1	-	0
2	5,9	8
3	12,7	14

Yapılan deneysel ve nümerik çalışmalar sonucunda farklı yay tasarımlarının termodinamik verime etkisi değerlendirilmiştir. SEA ile yapısal olarak radyant ısıtıcı yüksekliğini direkt olarak etkileyen yay tasarımlarının, radyant ısıtıcıyı ne kadar yükseltebileceği hesaplanmıştır. Bu yükseklikler HAD analizi modelinde geometrik girdi

olarak kullanılmıştır. HAD analiz modelinde doğrulama ve ağdan bağımsızlık çalışmaları yapılmıştır. Mesafelere göre oluşan maksimum cam seramik üst tabla üst yüzey sıcaklığının yay tasarımlarına göre farklılıkları karşılaştırılmıştır.

Cam seramiğe temas eden 1 nolu yay ile yapılan montajda, cam seramiğin mekanik dayanımı kontrol edilmiştir ve kırılma gerinimine ulaşan eleman tespit edilmemiştir.

Vitroseramik ocakların standart performans değerlendirmesinin tarif edildiği EN-60350 standardında vitroseramik ocaklar laboratuvar koşullarında içerisinde su olan tencere ile yüklü halde test edilmektedir. Bu test esnasında su 70°C'ye kadar tam güçle ısıtılır, sonrasında önceden belirlenmiş bir seviyeye getirilerek suyun 90°C'ye ulaşması beklenir. Su 90°C'ye ulaştıktan sonra 20 dakika boyunca aynı güç seviyesinde ocak çalıştırılır.

Tüm bu durum takip edilirken ocağın harcadığı güç bir cihazla ölçülür. Bu değer 1000 gram su miktarına normalize edilerek ocağın tüketim değeri Wh/kg cinsinden tespit edilir.

Radyant ısıtıcılarla cam seramik üst tabla arasında kalan mesafenin diğer tüm etkenler sabit tutularak ısı geçişine etkisi hesaplanmıştır. Buna göre camdan suya geçen ısı miktarı sıcaklık ile doğru orantılıdır.

Buna göre harcanması gereken enerji hesabı ile sıcaklığın düşmesi ile gereken enerji miktarı karşılaştırılarak enerji verimliliği üzerindeki etkisi tahmin edilmiştir.

Standarda göre suyun 15°C'den başlayıp 90°C'e çıkması sağlanmaktadır. Bu süreçteki ısı transferinin tek denkleme indirgenebilmesi için ortalaması alınmıştır.

$$T_{su_{ort}} = \frac{T_{başlangıç} + T_{bitiş}}{2} \tag{5.1}$$

$$T_{su_{ort}} = \frac{15 + 90}{2} = 52{,}5°C \tag{5.2}$$

Cam seramik üst tabladan suya geçen ısı transferi hesabı denklem (5.3)'te verilmiştir.

$$\dot{Q_{transfer}} \approx U \cdot A \cdot \left(T_{cam} - T_{su_{ort}}\right) \tag{5.3}$$

Radyant ısıtıcının toplam ısı transferi katsayısı, alanı ve suyun başlangıç-bitiş sıcaklıklarının ortalaması sabit olduğundan cam sıcaklığı transfer edilen ısı debisini doğru orantılı etkilemektedir. Burada cam sıcaklığının azalması ısı debisini etkileyeceğinden süre (t) uzamaktadır. Bu durum denklem (5.4) ifade edilmiştir.

$$t \propto \frac{1}{\left(T_{cam} - T_{su_{ort}}\right)} \tag{5.4}$$

Süre enerji tüketimine olumsuz etki eder. Çünkü kullanılan güç aynıdır. Bu durumun enerji tüketimine etkisi denklem (5.5)'te ifade edilmiştir.

$$E_{tuketim} = P_{elektrik} \cdot t \tag{5.5}$$

Bu durumda tüketilecek enerji miktarının referans değere göre karşılaştırması (5.6) denklemi ile yapılmıştır.

$$\frac{E_{yeni}}{E_{ref}} = \frac{T_{ref} - T_{su_{ort}}}{T_{yeni} - T_{su_{ort}}} \tag{5.6}$$

Buna göre radyant ısıtıcı ile cam seramik üst tabla alt yüzeyi arasındaki mesafenin 8 mm olması durumu ile 0 mm olması durumu denklem (5.7)'te karşılaştırılmıştır.

$$\frac{E_{+8mm}}{E_{ref}} = \frac{526 - 52{,}5}{495 - 52{,}5} \approx 1{,}07 \tag{5.7}$$

Radyant ısıtıcı ile cam seramik üst tabla alt yüzeyi arasındaki mesafenin 14 mm olması durumu ile 0 mm olması durumu denklem (5.8)'te karşılaştırılmıştır.

$$\frac{E_{+14mm}}{E_{0mm}} = \frac{526 - 52{,}5}{459 - 52{,}5} \approx 1{,}165 \tag{5.8}$$

Radyant ısıtıcı ile cam seramik üst tabla arasındaki mesafenin 8mm olması durumunda en az %7, mesafenin 14mm olması durumunda en az %16,5 oranında enerji tüketiminin artacağı tahmin edilmektedir.

Enerji tüketimi 185 Wh/kg olan bir ocakta radyant ısıtıcı ile cam seramik üst tabla arasındaki mesafenin 8mm ve 14mm olması halinde tüketeceği enerji miktarı denklem (5.9) ve denklem (5.10)'da verilmiştir.

$$185Wh/kg.1{,}07 = 197{,}95Wh/kg \tag{5.9}$$

$$185Wh/kg.1{,}165 = 215{,}525Wh/kg \tag{5.10}$$

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada dört göze sahip bir vitroseramik ocakta bulunan radyant ısıtıcıların, üst tablaya mesafesine göre değişen üst tabla üst yüzey sıcaklıkları üzerinden ısıl verime olan etkisi hesaplanmıştır. Çalışma kapsamında üç farklı yay tasarımının alt tablaya ve radyant ısıtıcıya montajının simüle edilmesi amacıyla SEA gerçekleştirilmiştir. Buna göre 1, 2 ve 3 nolu yaylar için sırasıyla 0 mm, 8 mm ve 14 mm boşluk hesaplanmıştır. 1 nolu yay radyant ısıtıcıyı üst tablaya temas ettirdiğinden üst tablanın mekanik dayanımının kontrolü için sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilmiştir. Üst tablada sayısal olarak kırılma davranışı tespit edilmemiştir. HAD modelinde radyant ısıtıcının üst tablaya olan mesafesi SEA sonuçlarından alınıp tanımlanmıştır.

HAD modeline ocağın 1800W radyant ısıtıcıyı içeren çeyrek kısmı dahil edilmiştir. Deneysel olarak 13 noktadan alınan sıcaklık verileri HAD analiz sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Deneysel ve sayısal çalışmalar arasında bağıl fark %7'nin altında tespit edilmiştir.

Bu çalışmadan elde edilen bulgular aşağıda maddeler halinde listelenmiştir:

- Yay tasarımı vitroseramik ocakların verimini etkileyen faktörlerdendir.
- Radyant ısıtıcıların üst tablaya temas etmesi termodinamik verimi artırmaktadır. Ancak üst tabla mekanik dayanımı kontrol edilmelidir.
- SEA sonuçlarına göre LAS cam seramiğin kırılma gerinimi 0,0012 mm/mm olarak tespit edilmiştir.
- Radyant ısıtıcının üst tabladan uzaklaşması, üst tabla üst yüzey sıcaklık dağılımını etkilemektedir. Mesafenin artışı, şekil faktörü sebebiyle ısının daha geniş alana yayılmasına sebep olmaktadır.
- HAD analizi sonuçlarına göre en iyi ısıl verim 1 nolu yay durumunda gerçekleşmiştir.
- Bu tez kapsamında değerlendirilen üç farklı yay tasarımından radyant ısıtıcıyı üst tablaya temas ettiren 1 nolu yay referans alınarak radyant ısıtıcının üst tablaya mesafesi 8 mm olduğunda (2 nolu yay durumu) %7 ve 14 mm olduğunda (3 nolu yay durumu) %16,5 enerji tüketimi artışı hesaplanmıştır.

Tüm sonuçlar incelendiğinde vitroseramik ocaklarda kullanılan radyant ısıtıcılar için tasarlanacak yayların sistemle entegrasyonunun önemi ortaya konmuştur. Radyant ısıtıcı yayı tasarımı yapılırken birden fazla faktör göz önüne alınmalıdır.

KAYNAKLAR DİZİNİ

Ahanj, M. D., Rahimi, M., & Alsairafi, A. A. (2012). CFD modeling of a radiant tube heater. *International Communications in Heat and Mass Transfer, 39(4), 432–438.* https://doi.org/10.1016/j.ichmt.2012.01.018

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.* https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.10.027

Birleşmiş Milletler. (2025*). The Sustainable Development Goals report 2025.* United Nations.

Chandrasekhar S. (1950). *Radiative transfer*, Clarendon Press, Oxford.

Choudhary, M. K., Purnode, B., Lankhorst, A. M., & Habraken, A. F. J. A. (2017). Radiative heat transfer in processing of glass-forming melts. *International Journal of Applied Glass Science, 8(4), 398–409.* https://doi.org/10.1111/ijag.12286

Daneshvar, E., Finlayson, G., Brill, M. H., & Deeb, R. (2025). Introducing a temperature adjustment to make Wien's law a more accurate approximation of Planckian blackbody radiation in the visible range. *Optics Express, 33(5), 11956.* https://doi.org/10.1364/OE.544854

Estonian Centre for Standardisation. (2018). *Household electric cooking appliances - Part 2: Hobs - Methods for measuring performance* (EVS-EN Standard No. 60350-2:2018).

Fatola, B. O., Keogh, P., & Hicks, B. (2009). Modelling flat spring performance using FEA. *Journal of Physics: Conference Series, 181(1), 012011.* https://doi.org/10.1088/1742-6596/181/1/012011

Hemmer, C., Polidori, G., & Popa, C. (2014). Temperature optimization of an electric heater by emissivity variation of heating elements. *Case Studies in Thermal Engineering, 4, 187–192.* https://doi.org/10.1016/j.csite.2014.10.002

Hoover. *(t.y.). HH64BV.* 9 Ocak 2026 tarihinde https://www.hoover-home.com/de_CH/kochfelder/33801927/hh64bv/ adresinden erişildi.

Kang, Y. J., Pandey, S., Park, S. I., Kim, Y. S., Wie, J. H., Kim, D. H., & Ha, M. Y. (2023). Comprehensive analysis and design optimization of temperature distribution in radiant heaters for cooking applications. *Case Studies in Thermal Engineering, 52, 103687.* https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.103687

Livermore Software Technology. (2024). *LS-DYNA keyword user's manual: Volume II material models (R15).* Ansys.

Mayil, A. S., & Timuralp, C. (2025). *Numerical and experimental analysis of cooling system performance in induction hobs: A comparison of heatsink designs*. Applied Sciences, 15(11), 5995. https://doi.org/10.3390/app15115995

Mentor Graphics Corporation. (2018). *FloEFD technical reference* (Software Version 17).

Muneer, T., Ivanova, S., Kotak, Y., & Gul, M. (2015). Finite-element view-factor computations for radiant energy exchanges. *Journal of Renewable and Sustainable Energy, 7(3), 033108.* https://doi.org/10.1063/1.4921387

Niknamian, S. (2020). Investigation on the effect of cold drawing process on mechanical properties and structure of seamless steel (Ck60) tube. *Journal of Applied Science, Engineering, Technology, and Education, 1(1), 13–23.* https://doi.org/10.35877/454RLascil193

SCHOTT. (t.y.). *SCHOTT CERAN® technical details.* 9 Ocak 2026 tarihinde https://www.schott.com/en-gb/products/ceran-p1000315/technical-details adresinden erişildi.

Tong, V.-C., & Nguyen, D.-T. (2018). A study on spring-back in U-draw bending of DP350 high-strength steel sheets based on combined isotropic and kinematic hardening laws. *Advances in Mechanical Engineering, 10(9), 1–13.* https://doi.org/10.1177/1687814018797436

Uluslararası Enerji Ajansı. (2025). *World Energy Outlook 2025.*

Uluslararası Standardizasyon Organizasyonu. (2016). *Glass in building - Determination of the bending strength of glass - Part 5: Coaxial double ring test on flat specimens with small test surface areas* (ISO Standard No. 1288-5:2016).

Venkateswaran, C., Sreemoolanadhan, H., & Vaish, R. (2022). Lithium aluminosilicate (LAS) glass-ceramics: A review of recent progress. *International Materials Reviews, 67(6), 620–657.* https://doi.org/10.1080/09506608.2021.1994108