

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**ALÜMİNYUM ISI ALICI TERMAL PERFORMANSININ EKLEMELİ
İMALATLA İYİLEŞTİRİLMESİ**

Gölsüm TEKAVİT

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

OCAK 2025

ANTALYA

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**ALÜMİNYUM ISI ALICI TERMAL PERFORMANSININ EKLEMELİ
İMALATLA İYİLEŞTİRİLMESİ**

Gölsüm TEKAVİT

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

OCAK 2025

ANTALYA

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ALÜMİNYUM ISI ALICI TERMAL PERFORMANSININ EKLEMELİ
İMALATLA İYİLEŞTİRİLMESİ**

**Gülsüm TEKAVİT
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Bu tez
Akdeniz Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından
FYL-2023-6429 nolu proje ile desteklenmiştir.**

OCAK 2025

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ALÜMİNYUM ISI ALICI TERMAL PERFORMANSININ EKLEMELİ
İMALATLA İYİLEŞTİRİLMESİ

Gölsüm TEKAVİT
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

Bu tez 06/01/2025 tarihinde jüri tarafından Oybirliği / Oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Tuğçe TEZEL (Danışman)

Prof. Dr. Volkan KOVAN

Dr. Öğretim Üyesi Murat ÖZENÇ

ÖZET

ALÜMİNYUM ISI ALICI THERMAL PERFORMANSININ EKLEMELİ İMALATLA İYİLEŞTİRİLMESİ

Gülsüm TEKAVİT

Yüksek Lisans Tezi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Tuğçe TEZEL

Ocak 2025; 50 sayfa

Isı alıcılar, elektronik cihazların termal güvenilirliğini sağlamak için kritik öneme sahiptir. Isı alıcıları, bu cihazlardan kaynaklanan ısının etkili bir şekilde dağılmasını sağlayarak cihazların aşırı ısınmasını engeller. Geleneksel ısı alıcı tasarımları genellikle basit geometrik şekillerle sınırlı kalırken, gelişen eklemeli imalat teknolojileri, karmaşık yapıların daha verimli ve kolay bir şekilde üretilmesini mümkün kılmaktadır. Bu durum, topoloji optimizasyonu gibi gelişmiş tasarım araçlarının kullanımını daha anlamlı hale getirmektedir. Topoloji optimizasyonu, malzemeyi hafifletmek suretiyle optimize ederek termal performansı artırmayı hedefler.

Çalışmada, ısı alıcılarının termal analizi ve topoloji optimizasyonu gerçekleştirilmiş ve eklemeli imalatla üretilen alüminyum alaşımı AlSi10Mg malzeme olarak seçilmiştir. İki boyutlu modeller üzerinden yapılan kararlı hal termal analizlerinde, sıcaklık değişimi ve ısının dağılımı gözlemlenmiştir. Elde edilen termal analiz sonuçları, topoloji optimizasyonu modülüne entegre edilerek farklı tasarımın hafifletilmesi ve soğutma performansının artması amaçlanmıştır. Optimizasyon sonucu elde edilen tasarımlar, hafifletmenin etkin bir şekilde sağlandığını ve termal performansın iyileştiğini göstermektedir. Bu analizler baz alınarak ısı alıcılar tasarlanıp nümerik analizlere tabi tutulmuştur. Sonuçlar, optimize edilmiş ısı alıcılarının termal performansını belirgin şekilde iyileştirdiğini ortaya koymuştur.

ANAHTAR KELİMELE: Alüminyum, Eklemeli imalat, Isı alıcı, Topoloji optimizasyonu

JÜRİ: Doç. Dr. Tuğçe TEZEL

Prof. Dr. Volkan KOVAN

Dr. Öğretim Üyesi Murat ÖZENÇ

ABSTRACT

IMPROVING ALUMINUM HEAT SINK THERMAL PERFORMANCE BY ADDITIVE MANUFACTURING

Gülsüm TEKAVİT

MSc Thesis in Mechanical Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Tugce TEZEL

January 2025; 50 pages

Heat sinks are critical to ensuring the thermal reliability of electronic devices. Heat sinks prevent devices from overheating by effectively dissipating the heat generated by these devices. While traditional heat sink designs are often limited to simple geometric shapes, developing additive manufacturing technologies make it possible to produce complex structures more efficiently and easily. This makes the use of advanced design tools such as topology optimization more meaningful. Topology optimization aims to increase thermal performance by optimizing the material by making it lighter.

In the study, thermal analysis and topology optimization of heat sinks were performed and the aluminum alloy AlSi10Mg produced by additive manufacturing was selected as the material. In the steady-state thermal analyzes performed on two-dimensional models, temperature change and heat distribution were observed. The obtained thermal analysis results were integrated into the topology optimization module and it was aimed to lighten the different design and increase the cooling performance. The designs obtained as a result of the optimization show that lightening is provided effectively and thermal performance is improved. Based on these analyses, heat sinks were designed and subjected to numerical analysis. The results showed that the optimized heat sinks significantly improved the thermal performance.

KEYWORDS: Additive manufacturing, Aluminum, Heat sink, Topology optimization.

COMMITTEE: Assoc. Prof. Dr. Tuğçe TEZEL

Prof. Dr. Volkan KOVAN

Asst. Prof. Dr. Murat ÖZENÇ

ÖNSÖZ

Tezimde amacım, ilgili alandaki bilimsel gelişmelere katkıda bulunmayı, aynı zamanda ilgili kesimlere, araştırmacılara ve uygulamacılara faydalı olmaktır. Çalışmanın, gelecekte yapılacak araştırmalar için bir temel oluşturması ve farklı bakış açıları sunması dileğiyle, elde edilen bulguların ve sonuçların literatüre katkı sağlayacağına inanıyorum.

Çalışmamın hazırlanmasında değerli desteğini ve zamanını esirgemeyen akademik danışmanım Doç. Dr. Tuğçe TEZEL'e, çalışma sürecinde karşılaştığım zorlukları aşabilmem için değerli bilgi ve tecrübelerinden faydalandığım Prof. Dr. Volkan KOVAN'a teşekkürlerimi ve minnetlerimi sunarım.

Tüm eğitim hayatım başta olmak üzere bu çalışmada maddi ve manevi bana destek olan aileme ve çalışma boyunca desteklerini esirgemeyen arkadaşlarıma teşekkürlerimi ve sevgilerimi sunarım.

Tezin hazırlanmasında sağladığı desteklerden ötürü Akdeniz Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimine de teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
ÖNSÖZ	iii
İÇİNDEKİLER	iv
AKADEMİK BEYAN	v
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK TARAMASI	6
3. MATERYAL VE METOT	12
3.1. Matematiksel Model.....	12
3.1.1 Topoloji Optimizasyonu.....	14
3.1.2 Isı Alıcının Topolojik Modellenmesi	16
3.1.3. Nümerik Analiz	16
3.1.4. Kullanılan Malzeme	17
3.1.5.Eklemeli İmalat	20
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	25
4.1. Isı Alıcının Nümerik Analizi.....	25
4.2. Isı Alıcının İmalatı.....	42
5. SONUÇLAR	44
6. KAYNAKLAR	46
ÖZGEÇMİŞ	

AKADEMİK BEYAN

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Alüminyum Isı Alıcı Termal Performansının Eklemeli İmalatla İyileştirilmesi” adlı bu çalışmanın, akademik kurallar ve etik değerlere uygun olarak yazıldığını belirtir, bu tez çalışmasında bana ait olmayan tüm bilgilerin kaynağını gösterdiğimi beyan ederim.

02/01/2025

Gülsüm Tekavit

İmzası

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

$^{\circ}\text{C}$	: Celsius
Al	: Alüminyum
F^m	: Dışarıdan uygulanan mekanik yük
F_{th}	: Termal yük vektörü
$K(x)$	: Sertlik matrisi
kg	: Kilogram
m	: Metre
Mg	: Magnezyum
mm	: Milimetre
Si	: Silisyum
U	: Yer değiştirme vektörü
W	: Watt
MPa	: Mega pascal
B_e	: Gerinim-yer değiştirme matrisi
C_e	: Elastiklik matrisi
ε_e^{th}	: Termal gerinim vektörü
$\alpha(x_e)$	: Termal genleşme katsayısı

Kısaltmalar

2B	: İki Boyutlu
3B	: Üç Boyutlu
ABS	: Akrilonitril Bütadien Stiren
CAD	: Bilgisayar Destekli Tasarım
CFD	: Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
DED	: Doğrudan Enerji Biriktirme

DMLS :Doğrudan Metal Lazer Ergitme
FDM : Ergiyik Biriktirme Tekniğı
LED : Işıık Yayan Diyot
LPBF : Lazer Toz Yataklı Füzyon
PCM : Faz Değışim Malzemesi
PBF : Toz Yataklı Füzyon
SAW : Basit Eklemeli Ağırlıklandırma
SIMP : Katı İzotropik Malzeme Cezalandırma
SLA : Stereolitografi
SLM : Seçici Lazer Ergitme
SLS : Seçici Lazer Sinterleme
TPMS : Üçlü Periyodik En düşük Yüzeyler

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1. 2B model.....	12
Şekil 3.2. Sınır koşulları	13
Şekil 3.3. Kararlı hal termal analiz sonucu	14
Şekil 3.4. SLM ile üretim süreci (Tezel, 2019).....	23
Şekil 4.1. Ağırlıkça %50 hafifletilmiş ısı alıcı geometrisi.....	25
Şekil 4.2. Ağırlıkça %55 hafifletilmiş ısı alıcı geometrisi.....	26
Şekil 4.3. Ağırlıkça %60 hafifletilmiş ısı alıcı geometrisi.....	27
Şekil 4.4. Ağırlıkça % 65 hafifletilmiş ısı alıcı geometrisi.....	27
Şekil 4.5. Ağırlıkça %70 hafifletilmiş ısı alıcı geometrisi.....	27
Şekil 4.6. Ağırlıkça %75 hafifletilmiş ısı alıcı geometrisi.....	28
Şekil 4.7. Ticari ısı alıcı geometrisi ve termal analizi	29
Şekil 4.8. Isı alıcı-1 geometrisi ve termal analizi.....	30
Şekil 4.9. Isı alıcı-2 geometrisi ve termal analizi.....	31
Şekil 4.10. Isı alıcı-3 geometrisi ve termal analizi.....	32
Şekil 4.11. Isı alıcı-4 geometrisi ve termal analizi.....	34
Şekil 4.12. Isı alıcı-5 geometrisi ve termal analizi.....	35
Şekil 4.13. Isı alıcı-6 geometrisi ve termal analizi.....	37
Şekil 4.14. Isı alıcı-7 geometrisi ve termal analizi.....	38
Şekil 4.15. Isı alıcı-8 geometrisi ve termal analizi.....	40
Şekil 4.16. Topolojisi optimize edilen ısı alıcıların termal analizlerinin karşılaştırması	41
Şekil 4.17. İmalatı gerçekleştirilen ısı alıcı geometrisi.....	42

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. AlSi10Mg termal özellikleri	13
--	----



1. GİRİŞ

Mühendislik ve üretim teknolojileri, enerji verimliliği, sürdürülebilirlik ve yüksek performans taleplerine yanıt verebilmek için sürekli bir gelişim ve dönüşüm süreci içindedir. Bu gelişim, yalnızca teknolojik yenilikler değil, aynı zamanda çevresel etkileri en aza indirerek enerji kaynaklarının daha etkin kullanımını sağlama gereksinimleriyle de şekillenmektedir. Bu durum, özellikle ısı alıcı sistemlerinin tasarımı ve üretiminde kendini çok daha belirgin bir şekilde göstermektedir. Modern mühendislik uygulamalarında, motorlar, jeneratörler, işlemciler, makineler ve elektrikli cihazlar gibi çeşitli sistemlerde ısı üretimi kaçınılmaz bir durumdur. Bu sistemlerde etkin bir soğutma mekanizması, üretim esnasında ortaya çıkan ısıнын etkili bir şekilde yönetilmesini ve uzaklaştırılmasını sağlayarak cihazların daha verimli, güvenli ve uzun ömürlü çalışmasına katkı sağlar. Aksi takdirde, biriken ısı cihaz verimliliğini düşürebilir, performans kaybına neden olabilir ve hatta sistem hasarına yol açabilir.

Yüksek sıcaklıklar, elektronik ve mekanik bileşenlerin zamanla aşınmasına ve bozulmasına sebep olabilir. Etkili bir soğutma sistemi, bu bileşenlerin ısı seviyelerini kontrol altında tutarak mekanik bozulmaları azaltır. Bu şekilde sistemlerin ömrü uzar, bakım ve onarım maliyetleri düşer ve cihazlar daha uzun süre sorunsuz bir şekilde çalışmaya devam eder. Ayrıca, ısı kontrolü, kritik çalışma koşullarına sahip endüstriyel ortamlarda operasyonel güvenilirliği artırır. Elektriksel ve mekanik sistemlerde aşırı ısınma, çok ciddi güvenlik risklerine neden olabilir. Örneğin, aşırı ısınan bir makine yangın veya patlama riskine yol açabilir. Soğutma sistemleri, bu tür tehlikeleri en aza indirerek, sistemlerin uzun ömürlü ve güvenli bir şekilde çalışmasını sağlar. Bunun yanında, etkili soğutma tasarımları, sistemlerin sıcaklık toleranslarını optimize ederek enerji verimliliği sağlar.

Isı alıcılar, özellikle metal ve plastik malzemelerdeki sıcaklık değişimlerinden kaynaklanan termal değişimleri azaltmada kritik bir rol oynar. Soğutma, bu tür sıcaklık dalgalanmalarını dengeleyerek malzemelerin yapısal bütünlüğünü korur ve sistemlerin dayanıklılığını artırır. Bu durum, hem ürünlerin uzun ömürlü olmasına hem de toplam çalışma maliyetlerinin azaltılmasına önemli katkılar sağlar. Soğutma sistemlerinin tasarımında çevresel faktörler de göz önünde bulundurulmalıdır. Verimli bir soğutma sistemi, enerji tüketimini azaltabilir ve karbon ayak izini en düşük seviyeye indirebilir. Yenilikçi ve sürdürülebilir soğutma çözümleri, doğal soğutucu maddeler veya modern teknolojiler kullanarak çevre dostu bir yaklaşım sergiler. Örneğin, yenilenebilir enerji kaynakları ile uyumlu soğutma sistemleri, gelecekte endüstriyel süreçlerin karbon ayak izini daha da azaltma potansiyeline sahiptir. Soğutma, mühendislik uygulamalarında sistemlerin verimli, güvenli ve uzun ömürlü çalışmasını sağlamak için kritik bir öneme sahiptir. İyi tasarlanmış bir soğutma sistemi, cihaz performansını optimize eder, enerji verimliliğini artırır ve güvenlik tehditlerini en aza indirir. Bu nedenle, soğutma sistemleri, otomotiv, havacılık, elektronik ve enerji gibi çok çeşitli endüstriyel uygulamalarda vazgeçilmez bir bileşen haline gelmiştir.

Bilgisayar sistemlerinde soğutmanın önemi, özellikle yüksek performanslı bilgisayarlar ve modern işlemciler için vazgeçilmez bir unsurdur. Her yeni nesil çip tasarımı, çiplerin çalışma sıcaklıklarını kontrol edebilmek için daha ileri düzeyde ısı alıcı çözümleri gerektirmektedir. Yıllar içinde yarı iletken aygıtların boyutlarının küçülmesi, ısı alıcı problemlerini daha karmaşık hale getirmiştir. Daha küçük elektronik boyutlar,

gücün artışına ve dolayısıyla soğutma gereksinimlerinin çoğalmasına neden olmuştur. Etkin bir soğutma tasarımı, sadece sistem performansını optimize etmekle kalmaz, aynı zamanda bileşenlerin ömrünü uzatır, enerji verimliliğini artırır ve güvenli bir çalışma ortamı sunar (Chu vd., 2004).

Geçmişte, soğutma teknolojileri daha çok ısıнын dağıtılması amacıyla geliştirilmiş ve maliyet faktörü genellikle ikinci planda tutulmuştur. Ancak teknolojinin ilerlemesiyle birlikte, soğutma çözümlerinin yalnızca işlevsel olması değil, aynı zamanda maliyet etkinliği ve sürdürülebilirlik gibi parametreleri de karşılaması zorunlu hale gelmiştir. Bu gereklilik, bilgisayar sistemlerindeki soğutma tasarımlarının sadece ısı transferi yetenekleriyle değil, aynı zamanda çevresel etkileri en aza indiren yaklaşımlarla çözüm sunmasını gerektirmektedir. Geleneksel hava soğutma sistemleri, modern yonga tasarımları ve yüksek performans gereksinimlerinin artmasıyla sınırlarına ulaşmış ve bu durum, sıvı soğutma gibi yenilikçi yöntemlerin öne çıkmasına olanak tanımıştır.

Sıvı soğutma sistemlerinin entegrasyonu, günümüz makinelerinin daha kompakt tasarımlara sahip olması nedeniyle giderek daha karmaşık hale gelmiştir. Bu sistemlerin yedeklilik, kesintisiz çalışma ve arızalara karşı dayanıklılık gibi kritik gereksinimleri karşılaması beklenmektedir. Bu gereklilikler, soğutma tasarımının sadece ısı transferine odaklanmakla kalmayıp, elektriksel, termal ve mekanik sistemleri birleştiren bütüncül bir yaklaşımla ele alınması gerektiğini ortaya koymaktadır. Örneğin, veri merkezlerinde yüksek performanslı bilgisayarlar için kullanılan soğutma sistemleri hem enerji verimliliği hem de çevresel etkileri minimize etme zorunluluğu ile tasarlanmaktadır. Bu noktada, modern soğutma teknolojilerinin kilit bileşenlerinden biri olan ısı alıcılar (heat sink), termal performansta hayati bir rol oynamaktadır. Isı alıcılar, yüksek sıcaklıkta çalışan bölgelerden aldıkları ısıyı daha soğuk bir ortama aktararak termal dengeyi sağlar. Bu bileşenler, genellikle alüminyum ve bakır gibi termal iletkenlik özelliği yüksek malzemelerden üretilmektedir.

Yüksek performanslı bilgisayar sistemleri ve veri merkezlerinde, ısı alıcıların tasarımı, termal iletkenlik özelliği yüksek malzemelerin kullanılmasını ve yüzey alanını en yüksek seviyeye çıkaracak geometrik çözümler sunmayı gerektirir. Bu kapsamda, kanatçıklı tasarımlar, hem konveksiyonel hem de radyasyon yoluyla etkin ısı transferi sağlayarak modern soğutma teknolojilerinde kritik bir rol oynamaktadır (Wilson, 2012). Sonuç olarak, modern termal yönetim sistemleri, enerji verimliliğini artırırken cihaz performansını optimize etmeyi ve çevresel etkileri en aza indirmeyi hedefler. Bu hedeflere ulaşabilmek için, ısı alıcıların ve sıvı soğutma sistemlerinin yenilikçi tasarımları, termal mühendislik alanında geleceğin teknolojilerini şekillendiren temel unsurlar olarak öne çıkmaktadır. Bu alanda yapılacak geliştirmeler, sadece cihazların ömrünü uzatmakla kalmayacak, aynı zamanda enerji tüketimindeki azalmayla birlikte çevre dostu bir geleceğe önemli bir katkı sağlayacaktır.

Havanın kanatçıklar etrafındaki hareketi, ısı alıcı sistemlerinin genel ısı dağılımında kritik bir rol oynamaktadır. Bu hareket, ısı transferinin etkinliğini büyük ölçüde etkileyebilir ve doğru tasarım ilkeleri ile optimize edilebilir. Havanın akış dinamiği, kanatçık tasarımı ve yerleşimi gibi faktörler, soğutma sistemlerinin verimliliğini belirlemede kritik bir öneme sahiptir. Isı alıcılarda pasif ve aktif soğutma yöntemleri ile ilgili ısı transfer mekanizmalarının ayrıntılı olarak ele alınması bu bağlamda gereklidir (Nair vd., 2024). Pasif soğutma, harici bir cihazın (fan veya üfle-yici

gibi) yardımcı olmaksızın, ısı alıcıdan ısının doğal yollarla dağılmasını sağlayan bir tekniktir. Bu yöntem, havanın yoğunluk farklarına dayanan doğal konveksiyon prensibiyle çalışır. Doğal konveksiyon sırasında, ısınan hava yoğunluğunu kaybeder ve yükseldikçe yerini daha soğuk hava alır. Bu hareketlilik, ısının yüzeyden uzaklaştırılması için etkili bir mekanizma sağlar. Ancak, doğal konveksiyonla sağlanan ısı transferi katsayısı, zorlanmış konveksiyon ile karşılaştırıldığında düşüktür. Bu nedenle, pasif soğutma genellikle orta düzeyde ısı yüklerine sahip uygulamalarla sınırlıdır. Daha yüksek ısı yükleri için pasif soğutma yeterli verimliliği sağlayamayabilir. Pasif soğutma sistemlerinin etkinliği, ısı alıcının tasarımı ve geometrisine doğrudan bağlıdır. Havanın alıcı yüzey etrafında düzenli bir şekilde dağılabilmesi için kanatçıklar ve yüzey yapıları özel olarak yerleştirilmelidir. Yüzey alanının artırılması, doğal konveksiyonla ısı dağılımını iyileştirir ve ısı alıcının genel performansını artırabilir. Bununla birlikte, pasif soğutma sistemlerinin verimliliği, hava akış hızına ve sıcaklık farklarına bağlıdır. Aktif soğutma, ısı alıcı yüzeyinde yeterli hava hızı veya kütle akışı sağlamak için harici cihazların (fanlar, pompalar veya sıvı soğutma sistemleri gibi) kullanılmasını gerektirir. Bu yöntem, zorlanmış konveksiyon mekanizması ile ısı transferini yüksek etkinlikle gerçekleştirir. Zorlanmış konveksiyon, hava hızının artmasıyla daha verimli hale gelir; çünkü, daha hızlı hava akışı, yüzeyden ısı transferini çok daha etkili bir şekilde gerçekleştirir. Ancak, hava hızındaki artış, basınç düşüşünü de beraberinde getirir. Bu nedenle, ısı alıcı tasarımında, hava hızını artırırken basınç kaybını en düşük seviyede tutacak bir optimizasyon hedeflenmelidir.

Kanatçıkların tasarımı ve yerleşimi, ısı alıcıların verimliliği üzerinde belirleyici bir etkiye sahiptir. Konveksiyonel ısı transferi, havanın ısı alıcı yüzeyi boyunca hareket etmesi ve bu hareket sırasında ısınması üzerine kuruludur. Isınan havanın yükseldiği ve yerini daha soğuk hava ile değiştirme hareketi, ısı alıcının verimliliğini artırır ve bu nedenle kanatçıkların dikey yerleşimi önemlidir. Buna karşın, kanatçıkların yatay yerleştirilmesi hava akışını sınırlar ve ısı transfer etkinliğini %30 oranında azaltabilir. Bu durum, sistem performansında ciddi bir kayba yol açabilir. İyi bir kanatçık tasarımı, sadece hava akışını optimize etmekle kalmaz, aynı zamanda enerji verimliliğini artırır ve termal yönetim sistemi maliyetlerini düşürerek genel performansı geliştirir.

Isı alıcıların soğutma verimliliği, boyutları ile doğrudan orantılı olarak artmaz. Verimliliğin boyutla doğrusal bir artış göstermemesinin iki temel nedeni vardır. İlk olarak, kanatçıkların yönü boyunca daha uzun olan ısı alıcılar, hava akışının yüzeyden ayrıldığı noktalarda düşük verimlilik sergiler; bu durum, ısınmış havanın yüzey boyunca ilerledikçe ısı kaybetmesinden kaynaklanır. İkinci olarak, metalin kütlesi boyunca, ısı kaynağından uzaklaştıkça termal direnç artar ve bu durum, ısı alıcının uzak uç kısımlarında sıcaklık gradyanlarının azalmasına yol açarak genel verimliliği düşürür. Bu nedenle, verimliliği artırmak amacıyla daha uzun ısı alıcıları yerine daha kısa ve geniş ısı alıcıları tasarlanabilir. Bu yaklaşım, termal dirençleri azaltarak ısı transfer verimliliğini önemli ölçüde artırabilir. Isı alıcı tasarımında, hava akışına dik yönde genişliğin artırılması çoğu zaman termal performansı optimize etmek için en etkili stratejidir. Buna karşın, akışa paralel yöndeki kanat uzunluğu performansa daha az katkı sağlar ve bu katkı genellikle uzunluğun karekök oranıyla artar. Ayrıca, ısı alıcının termal direnci, çevredeki hava ile yüzey arasındaki sıcaklık farkından büyük ölçüde etkilenir. Bu fark, artan radyasyon yoluyla ve sıcaklık farkı ile doğru orantılı olarak artan konveksiyonel türbülans etkisiyle daha belirgin hale gelir (Babar ve Zang, 2023).

Isı alıcıların üretiminde tercih edilen yöntemler, malzeme seçimi, tasarım gereklilikleri, kullanım amacı ve maliyet gibi birçok faktöre bağlı olarak farklılık gösterir. Basit geometriye sahip ısı alıcıların üretiminde ekstrüzyon, dövme ve döküm gibi geleneksel yöntemler yaygın olarak kullanılırken, daha karmaşık tasarımların hayata geçirilmesinde eklemeli imalat (3B yazıcı) teknolojileri tercih edilmektedir. Eklemeli imalat yöntemleri, özellikle karmaşık geometrilerin hassas bir şekilde üretilmesini sağlayarak, geleneksel üretim yöntemlerinin ötesine geçen çözümler sunar. Bu teknoloji, malzeme tasarrufu sağlaması ve hurda oranlarını azaltması nedeniyle ekonomik ve çevresel açıdan sürdürülebilir bir seçenek olarak da öne çıkmaktadır.

Eklemeli imalatın öne çıkan en önemli avantajlarından biri, son derece karmaşık yapıların kolayca üretilmesidir. Bu karmaşık yapılar, genellikle parçaların toplam ağırlığını azaltmak veya yapısal performansını iyileştirmek gibi spesifik mühendislik hedefleriyle tasarlanmaktadır. Bu tasarımları daha etkin ve verimli bir şekilde gerçekleştirmek için sıklıkla kullanılan topoloji optimizasyonu yöntemi, malzeme kullanımının en verimli hale getirilmesini sağlar. Topoloji optimizasyonu, parçanın yükleme koşulları, sınır koşulları ve çeşitli mühendislik parametreleri doğrultusunda malzeme dağılımını optimize eden karmaşık bir tasarım sürecidir. Bu yöntem, parçaların hem hafif hem de dayanıklı olmasını sağlarken, mekanik ve termal performansları iyileştirme potansiyeli sunar. Topoloji optimizasyonu ile tasarlanan yapılar, eklemeli imalat teknolojisinin sağladığı tasarım özgürlüğünü daha da genişleterek, üretim süreçlerinin daha etkili hale gelmesini sağlamaktadır.

Yüksek hacimlerde üretim gereksinimlerinde geleneksel üretim yöntemleri daha uygun bir seçenekken, yüksek özelleştirme ihtiyacı ve karmaşık geometri durumlarında eklemeli imalat çok daha avantajlı bir alternatif sunar. Eklemeli imalat, üreticilere esneklik kazandırarak yalın üretim için optimum tasarımlar oluşturma fırsatı verir ve bu suretle tedarik zincirinin basitleştirilmesine katkı sağlar. Bununla birlikte, eklemeli imalat makineleri, geleneksel üretim makinelerine kıyasla daha genellikle düşük hacimli veya küçük partili üretimler için daha maliyet etkin bir seçenek olarak kabul edilir. Eklemeli imalatın çevresel avantajları dikkate alınmaya değerdi. Bu teknoloji, malzeme israfını azaltır ve kaynak verimliliğini artırarak daha sürdürülebilir bir üretim süreci sunar. Ancak, eklemeli imalatın ticari pazarda daha yaygın hale gelebilmesi için işlem kararlılığının sağlanması, malzeme veritabanlarının oluşturulması, çevrimiçi kalite kontrol sistemlerinin devreye alınması ve sertifikasyon süreçlerinin etkinleştirilmesi gereklidir. Ayrıca, üreticilerin her eklemeli imalat parçası için gereken kalite kontrol seviyelerini doğru bir şekilde belirlemeleri kritik bir öneme sahiptir (Pereira vd., 2019).

Eklemeli imalat, üretim süreçlerini değiştirme potansiyeline sahip bir teknoloji olarak, düşük işçilik gereksinimleri ve daha az adımla üretimle daha maliyet etkin çözümler sunmayı vadetmektedir. Boyutsal doğruluk ve yüzey kalitesi gibi kısıtlamalar, yüksek toleranslı parçaların üretimini zorlaştırmakta ve özellikle metal eklemeli imalat süreçlerinde lazer kaynak teknolojilerine dayanan yüksek hassasiyet gereksinimleri nedeniyle belirli hız sınırlarını beraberinde getirmektedir. Eklemeli imalatın tasarım özgürlüğü sağladığı ifade edilse de, bu özgürlük belirli koşullarda sınırlı kalabilmektedir. Bu sınırlamalar, üretim sürecinde malzeme birikimindeki hassasiyet eksiklikleri veya yüzey düzgünlük sorunları gibi teknik zorluklardan kaynaklanabilir. Ayrıca, eklemeli imalat sistemlerinin inşa hacmi genellikle sınırlıdır ve bu da büyük boyutlu parçaların

üretimini daha da zorlaştırabilir. Geleneksel üretim yöntemlerine göre daha yavaş bir süreç olan eklemeli imalat teknolojileri, üretim hızının düşük olması nedeniyle makinelerin işletme maliyetlerini önemli ölçüde artırmaktadır.

Sonuç olarak, eklemeli imalat mevcut üretim yöntemlerini tamamlayıcı bir teknoloji olup gelecekte daha genç bir pazarda etkinliğini artırma potansiyeli taşımaktadır. Yüksek toleranslar ve yüzey kalitesi gereksinimlerini karşılamak için ek teknolojiler ve optimize edilmiş süreçler gereklidir. Eklemeli imalat teknolojisi, üretim hızını artırma, tasarım özgürlüğünü genişletme ve otomasyon seviyesini yükseltme gibi trendlerin odak noktası haline gelmiştir. Üretim hızını artırmak amacıyla çoklu lazer ve kaplama sistemleri kullanılmaktadır. Soğuk sprey teknolojisi gibi yeni teknolojiler, metal eklemeli imalatın üretim hızını çarpıcı bir şekilde artırmayı hedeflemektedir. Eklemeli imalatla metal parçaların son işlem aşamalarında da iyileştirmeler yapılmaktadır. Destek yapılarıyla ilgili sorunlar, otomatik olarak kaldırılacak sistemlerle çözülmekte, ancak bazı durumlarda bu yapılar hala gerekli olmaktadır. Kalite kontrol, eklemeli imalat süreçlerinde önemli bir gelişim alanı olarak dikkat çekmekte ve süreç izleme sistemleriyle hataları anında düzeltmeye yönelik çalışmalar sürmektedir. Gelecekte adaptif sistemlerin kullanılması, üretim sırasında ortaya çıkabilecek hataları ortadan kaldırma potansiyeline sahiptir (Collan ve Michelsen, 2020).

Eklemeli imalatın sağladığı tasarım serbestliği, mevcut piyasadaki birçok ürünün geliştirilmesine olanak sağlamıştır. Bunlardan biri de ısı alıcılar olup, topoloji optimizasyonu ile yeni mühendislik çözümleri sunabilir. Topoloji optimizasyonu, ısı alıcı tasarımlarında malzeme kullanımını optimize ederek daha verimli, hafif ve dayanıklı yapıların geliştirilmesine olanak tanır. Eklemeli imalatın karmaşık geometri oluşturma konusundaki esnekliği, bu optimizasyon yöntemiyle tasarlanmış ısı alıcıların üretiminde çok etkili bir araç olarak kullanılabilir. Bu çalışmanın temel amacı, toz yatağı teknolojisiyle çalışan Seçici Lazer Ergitme (SLM) tekniğini kullanılarak topolojisi optimize edilmiş ısı alıcılarının termal performansını ticari ısı alıcılara göre geliştirmektir.

Çalışmada, özellikle termal iletkenlik özellikleri nedeniyle tercih edilen alüminyum alaşımları kullanılmıştır. Alüminyum alaşımları, düşük ağırlık ve yüksek termal performans avantajları sunmaları nedeniyle ısı alıcı üretiminde yaygın bir tercih olarak öne çıkmaktadır. Bu tezin temel amacı, topoloji optimizasyonu yöntemiyle tasarlanan bir ısı alıcının, eklemeli imalat teknolojisi kullanılarak hafifletilmesi ve böylece daha iyi termal performans sağlaması için tasarımını geliştirmektir.

2. KAYNAK TARAMASI

Isı alıcıların modellenmesi ve analizi ile ilgili yapılan çalışmalarda başta alüminyum alaşımları olmak üzere çeşitli alaşımlar tercih edilmektedir. Bu modeller üzerinde termal analizler yapılmış ve topoloji optimizasyonu uygulanmıştır. Elde edilen tasarımlar, eklemeli imalat yöntemleriyle üretilmiş ve çeşitli deneysel testlere tabi tutulmuştur. Tez konusunun multidisipliner yapısına bağlı olarak, bu özgün değerin literatürdeki yerinin daha iyi kavranabilmesi için, topoloji optimizasyonu sonrası eklemeli imalatla üretilen çeşitli soğutuculara odaklanılmıştır.

Wang vd. (2024) tarafından, geleneksel Simple Additive Weighting (Basit Eklemeli Ağırlıklandırma-SAW) modelinin yerine geçecek bir mikrokanal ısı alıcıları için çok amaçlı bir topoloji optimizasyon modeli geliştirilmiştir. Bu çalışma, optimize edilen yapıların ısı transferi miktarı ile ısı transferi üniformluğu arasındaki ilişkiyi incelemiştir. Sonuçlar, geliştirilen algoritmanın SAW modeline kıyasla, yineleme süreci sırasında sayısal salınımı azaltarak daha kararlı ve hızlı hesaplama yakınsaması sağladığını göstermiştir. Böylelikle hesaplama verimliliği %40,4 oranında iyileştirilmiştir. Ayrıca, topoloji yapıları ve performans parametreleri, ağırlık katsayılarının artışıyla birlikte düzenli olarak değişim göstermiştir. Geliştirilen algoritma ile elde edilen optimize edilmiş yapı, SAW modelinden daha iyi performans sergilemiş ve en düşük akışkan kaybı ile en yüksek ısı transferine olanak sağlayan en kısa ısı transfer yolunu sunmuştur.

Boujelbene vd. (2024) tarafından, metal kanatların faz değişim malzemesi (PCM) ile entegrasyonunun elektronik cihazların ısı yönetimini nasıl iyileştirdiği ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir. Bu çalışma, özellikle optimize edilmiş ağaç şekilli ve levha kanatların, farklı metal hacimler (%20 ve %30) ile eğimli ısı alıcılardaki ısı davranışlarını değerlendirmiştir. Araştırma sonuçları, ağaç şekilli kanatların soğutmaya artırmada üstün bir performans sergilediğini ortaya koymuş, ancak erime sürelerinin eğim açısına bağlı olarak farklılıklar gösterdiği gözlemlenmiştir. En hızlı erime, 0° eğim açısında meydana gelmiştir. Nano katkı maddelerinin, levha-kanatçık ısı alıcılarında erime hızını artırdığı, ancak ağaç şekilli ısı alıcılarda belirgin bir etki yaratmadığı tespit edilmiştir. Ek olarak, levha-boru ısı alıcısının metal kütle fraksiyonu %30 olan PCM, en yüksek sıcaklıkta belirgin bir azalma sağlarken, ağaç şekilli tasarımda bu etki daha az belirgin olmuştur. Bu çalışma, nano katkı maddeleri ve metal hacim fraksiyonunun, ısı alıcıların performansını etkileyen kritik faktörler olduğunu ortaya koymaktadır.

Ozguc vd. (2024) ilk çalışmalarında, çeşitli ısı girişleri, topoloji optimizasyon modları kullanarak topolojisi optimize edilmiş ısı alıcıları araştırmak için bir algoritma geliştirmiş ve uygulamıştır. Tek fazlı ve iki fazlı akış için tasarlanmış topolojisi optimize edilmiş ısı alıcılar, nümerik analiz yoluyla karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, farklı termal, hidrolik ve buhar kalitelerine bağlı olarak değişen termal dirençler göstermiştir.

Ozguc vd. (2024) tarafından yukarıdaki çalışmaya eşlik eden ikinci araştırmalarında ise, modelin kalibrasyonu, üretimi ve deneysel olarak doğrulanması üzerine odaklanılmıştır. Sonuç olarak, model kalibrasyonunun deneysel ölçümlerle iyi bir uyum sağladığı belirlenmiştir. Bu bulgular, topoloji optimizasyonunun ısı alıcı tasarımında hem teorik hem de deneysel düzeyde önemli bir potansiyel sunduğunu ortaya koymaktadır.

Zhao vd. (2024) tarafından, ısı kaynağının sıcaklığını etkili bir şekilde en aza indirmek için soğutucu kanatçıkların tasarımında üç farklı amaç doğrultusunda topoloji optimizasyonu kullanılmıştır. Bu amaçlar, sıcaklık gradyanı minimizasyonu, ortalama sıcaklık minimizasyonu ve giriş geçiş dağılımı minimizasyonu olmak üzere üç tip kanatçık belirlemişlerdir. Farklı amaç fonksiyonlarına sahip optimize edilmiş kanatçıkların konfigürasyon özellikleri ve termal performansı karşılaştırıldığında, sıcaklık gradyanı minimizasyonu yapılan kanatçıkların diğer optimize edilmiş kanatçıklara göre üstün termal performans sergilediği görülmüştür. İlaveten, optimize edilmiş kanatçıklar AlSi10Mg malzemedan, sınır filtreleme optimizasyonlu (boundary filtering optimized) 3B baskı teknolojisi kullanılarak üretilmiştir.

Sun vd. (2024) tarafından ise bir ısı alıcının geometrisinin termo-hidrolik performans üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu çalışma, topoloji optimizasyonu, eklemeli imalat ve termo-hidrolik testlerin bütünleşmiş bir şekilde uygulandığı yenilikçi bir yaklaşım sunmuştur. Eklemeli imalat sürecinde bu tasarımların kendi kendini desteklediğinden emin olmak ve karşılaştırma yapabilmek için, dikdörtgen kanatlı ticari bir ısı alıcı temel alınmış ve bu ısı alıcının geometrisi optimize edilmiştir. Bu üç farklı ısı alıcı AlSi10Mg malzemedan LPBF (Lazer Toz Yatak Füzyon) tekniği ile üretilmiştir. Yapılan termo-hidrolik testler, hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) sonuçları ile güçlü bir uyum göstermiştir. Bu çalışma, ısı alıcı geometrisinin termo-hidrolik performans üzerindeki kritik etkisini deneysel ve sayısal olarak ortaya koymuştur.

Palumbo vd. (2024) tarafından, yüksek güçlü elektrik sistemlerindeki düzensiz ısı dağılımını araştırmak üzere elektrikli araç hızlı şarj sistemine odaklanılmıştır. Bu nedenle, elektrikli araç hızlı şarj sisteminin termal yönetimi için kullanılan ticari bir ısı alıcı üzerinde çalışılmıştır. Bu ısı alıcı, topolojik olarak optimize edilmiş ve ardından eklemeli imalat yöntemi olan tel ark eklemeli imalat tekniği ile üretilmiştir. Optimize edilmiş ısı alıcı, orijinal ısı alıcıya göre önemli hacim ve kütle azalmaları göstermiştir. Deneysel sonuçlar, genel termal dirençte %27 oranında azalma ve en yüksek ısı alıcı yüzey sıcaklık farkında %25 oranında bir azalma sağlandığını ortaya koymuştur.

Palumbo vd. (2023) çalışmasında, su soğutmalı mini kanallı ısı alıcıların termal performansı incelemiştir. Geleneksel mini kanallı ısı alıcıların üretim kısıtlamaları nedeniyle akış yolları paralel olmakta ve bu durum ısı dağılımının eşit olmamasına yol açmaktadır. Bu çalışmada, geleneksel mini kanallı ısı alıcıya yoğunluk tabanlı (density-based) topoloji optimizasyonu uygulanarak ısı dağılımındaki düzensizlikler giderilmiştir. Optimize edilmiş ısı alıcı, alüminyum alaşımından yeni bir eklemeli imalat yöntemiyle üretilmiştir. Deneysel sonuçlar, optimize edilmiş ısı alıcının tüm akış hızlarında daha düşük yüzey sıcaklıklarını koruduğunu ve yüzeyindeki sıcaklık dağılımındaki düzensizliğin azaldığını göstermiştir.

Al Ali vd. (2023) tarafından, hafif ve yüksek termal iletkenliğe sahip bir ısı alıcı elde etmek için yeni bir topoloji optimizasyon yöntemi önerilmiştir. Bunun yanı sıra, eklemeli imalatın üretilebilirliğini artırmak, termal yapılardaki ayrılmış malzemeleri ortadan kaldırmak, yapısal bütünlük sağlamak ve malzeme israfını en aza indirmek amacıyla bağlantı filtreleme yaklaşımı sunulmuştur. Sonuçlar, geliştirilen yöntemin ağırlık azaltma ve termal uyumluluğu en aza indirmede tutarlı bir performans sergilediğini göstermiştir. Ayrıca optimize edilmiş tasarımların eklemeli imalatla

üretilebilirliği ve uygunluğu, ABS (Akrilonitril Bütadien Stiren) malzemeden 3B baskı yoluyla üretilen numuneler üzerinde doğrulanmıştır.

Ozguc vd. (2023) tarafından, basınç düşüşünü ve termal direnci en aza indirme amacıyla homojenleştirme yaklaşımı kullanılarak topolojisi optimize edilen mikro kanallı ısı alıcı tasarımları üretilmiş ve deneysel olarak test edilmiştir. Elde edilen optimize edilmiş tasarımların değişik grid boyutlarıyla çeşitli geometrilere ve performanslara sahip olduğu bulunmuştur. Değişik grid hücresi boyutları ve kanat kalınlıklarına sahip olan bir dizi boru kanat dizisi AlSi10Mg malzemeden Doğrudan Metal Lazer Ergitme (DMLS) kullanılarak üretilmiştir. Üretilen ısı alıcıların basınç düşüşü ve termal direnci deneysel olarak karakterize edilmiştir

Ning vd. (2023) tarafından, yoğunluk tabanlı topoloji optimizasyonu ile dokuz tip ısı alıcı tasarlanmış ve alüminyum alaşımından LPBF tekniğiyle üretilmiştir. Çalışmada termal varyansın minimizasyonu, termal uyumluluk ve ısı kaynağı yüzeyi ile yan yüzey arasındaki sıcaklık farkı dahil olmak üzere üç farklı optimizasyon hedefi dikkate alınmıştır. Tasarımlar için ilk önce nümerik analiz, ardından da termal performansı test etmek amacıyla deneyler yapılmıştır. Sonuç olarak, topolojisi optimize edilmiş kanatçıkların ısı alıcının termal performansını önemli ölçüde artırdığı gözlemlenmiştir.

Wang vd. (2023) tarafından hem eklemeli imalatı hem de çıkarmalı sayısal kontrol işleme için topolojik olarak optimize edilmiş hava zorlamalı ısı alıcıların üretilebilirliği incelenmiştir. Topoloji optimizasyonu tasarımlarını üretirken sıklıkla karşılaşılan üretim zorluklarını azaltmak için iki farklı yaklaşım benimsenmiştir. Bunlar, eklemeli imalatla maliyetli ve kendi kendini desteklemeyen özelliklerin sayısını ve zorluklarını sınırlamak amacıyla standart optimizasyon formülasyonuna yansıtılan alt kesme çevresi üzerinden bir kısıtlama eklenmesi ve çok eksenli işleme tercih edilmesidir. Tüm topoloji optimizasyonu ve karşılık gelen paralel kanat tasarımları için nümerik analizler yapılmıştır. Sonuç olarak, optimize edilmiş ısı alıcıların termal performansı iyileşmiştir.

Modrek vd. (2023) tarafından, termal performans ve mekanik yapı bütünlüğünü iyileştirmek amacıyla katı izotropik malzeme cezalandırma (SIMP) yaklaşımına dayalı çok amaçlı bir topoloji optimizasyon yöntemi geliştirilmiştir. Bu yöntemin temel amacı, daha iyi bir ısı dağılımı sağlamak ve aynı zamanda yapıların mekanik dayanıklılığını artırmaktır. Çalışma kapsamında, üçlü periyodik en düşük yüzeyler (TPMS) yapılarına dayalı yeni nesil ısı alıcı tasarımları ele alınmıştır. Elde edilen ısı alıcı tasarımları hem termal hem de mekanik performans açısından üstün özellikler sergilemiştir. Özellikle, bu tür yapıların optimize edilmiş konfigürasyonlarının daha iyi bir termal performans sağladığı ve mekanik dayanıklılığı artırdığı görülmüştür. Çalışma, topoloji optimizasyonunun ve TPMS yapıların mühendislik uygulamalarındaki potansiyelini ortaya koyarak, bu alan için önemli bir katkı sunmuştur.

Palumbo vd. (2023) tarafından, elektrikli araç hızlı şarj cihazlarının soğutulması için geliştirilmiş bir termal yönetim sistemi ele alınmıştır. Bu bağlamda, yeni bir tel ark eklemeli imalat tekniği kullanılarak, topolojik olarak optimize edilmiş bir ısı alıcı üretilmiştir. Bu optimize edilmiş ısı alıcı, ticari bir ısı alıcı ile deneysel olarak karşılaştırılmış ve önemli avantajlar sunduğu görülmüştür. Deneysel sonuçlara göre, optimize edilmiş ısı alıcı, ticari muadiline kıyasla termal dirençte %27'lik bir azalma

sağlamış ve en yüksek yüzey sıcaklığında %25 oranında bir düşüş göstermiştir. Bu sonuçlar, optimize edilmiş ısı alıcıların termal performans ve enerji verimliliği açısından önemli iyileştirmeler sunduğunu göstermektedir.

Govindaraju vd. (2023) tarafından, manifold tasarım parametreleri ve ısı alıcı geometrilerinin çok jetli bir soğutma sistemi üzerindeki termal etkileri hem sayısal hem de deneysel yöntemlerle incelenmiştir. Termal verimliliği artırmak ve ısı transfer katsayısını iyileştirmek amacıyla, topoloji optimizasyonuna dayalı tasarımlar geliştirilmiş ve bu tasarımlar konvansiyonel tasarımlarla karşılaştırılmıştır. Çalışmada, konik pimli bir ısı alıcı geometrisinin, orijinal tasarıma kıyasla termal performans açısından daha üstün olduğu görülmüştür. Özellikle, bu optimize edilmiş ısı alıcı tasarımı, daha düşük termal direnç sunmuş ve ısı transfer katsayısını artırmıştır. Bu bulgular, topoloji optimizasyonunun termal performans aranan sistemlerde kullanılmasının önemini ve etkinliğini ortaya koymaktadır.

Huttunen vd. (2022) tarafından, topoloji optimizasyonu ile tasarlanmış ısı alıcıların üretimi ve performans analizi ele alınmıştır. Çalışmada, FDM (Fused Deposition Modeling, Ergiyik Biriktirme Tekniği) teknolojisi kullanılarak özel bir termal iletken plastik malzemeden ısı alıcılar üretilmiştir. Üretilen optimize edilmiş ısı alıcılar, düz kanatlı referans tasarımlarla karşılaştırılmıştır. Deneysel sonuçlar, üretim yönünün termal performans üzerinde önemli bir etkisi olduğunu göstermiştir. Üretim yönü dikey olan optimize edilmiş ısı alıcılar, termal dirençte bir azalma sağlarken; üretim yönü yatay olan optimize edilmiş ısı alıcılar, termal dirençte daha yüksek bir oranda iyileşme sunmuştur. Bu çalışma, üretim yönünün ve kullanılan malzemenin termal performans üzerindeki etkisini vurgulayarak, ısı alıcı tasarımlarında dikkate alınması gereken kritik faktörlere dikkat çekmiştir.

Shimoyama vd. (2022) tarafından, eklemeli imalat yöntemleriyle üretilebilen kafes yapılı bir ısı alıcının topolojisi optimize edilmiştir. Bu çalışmada, referans alınan pimli kanatçık yapısına sahip ısı alıcılar ile optimize edilmiş ısı alıcıların termal performansı ve maliyeti kapsamlı bir şekilde karşılaştırılmıştır. Yapılan analizler sonucunda, optimize edilmiş ısı alıcının, referans yapı ile kıyaslandığında termal performansta %26'lık bir iyileşme sağladığı ve kullanılan malzeme hacminde %61 oranında bir azalma kaydedildiği görülmüştür. Ancak, referans yapının üretim maliyetleri açısından optimize edilmiş ısı alıcıya göre daha uygun olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, eklemeli imalatın sağladığı tasarım esnekliğinin termal performansı artırmada etkili olduğunu, ancak maliyetlerin azaltılmasının tasarım sürecinde dikkate alınması gerektiğini göstermektedir.

Ozguc vd. (2021) tarafından, mikro kanallı bir ısı alıcının topolojisi, homojenleştirme yaklaşımı kullanılarak optimize edilmiştir. Çalışma, referans ısı alıcı ile optimize edilen ısı alıcının performansını karşılaştırmayı hedeflemiştir. Analizler ve deneyler sonucunda, optimize edilmiş ısı alıcının termal performansında önemli ölçüde iyileşmeler sağlandığı tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, homojenleştirme yaklaşımının mikro kanallı ısı alıcıların tasarımında etkin bir araç olarak kullanılabileceğini ortaya koymaktadır.

Dixit vd. (2021) tarafından, PolyJet teknolojisi kullanılarak VeroWhitePlus malzemeden üretilen ve farklı kafes yapılarına sahip ısı alıcıların ısı transferi ve basınç

düşüşleri incelenmiştir. Çalışma kapsamında, farklı geometrilere sahip kafes yapılarının performansları detaylı olarak değerlendirilmiştir. İncelemeler sonucunda, oktav yapıya sahip ısı alıcının, hacim merkezli kübik yapıya sahip ısı alıcıya göre %36 daha yüksek ısı transfer hızına sahip olduğu belirlenmiştir. Bu sonuçlar, farklı kafes yapı geometrilerinin ısı transferi üzerindeki etkisini vurgulamakta ve tasarım optimizasyonu sürecinde dikkate alınması gereken faktörlere ışık tutmaktadır.

Ho vd. (2021) tarafından, trapezoidal bir ısı alıcının termal performansını artırmak amacıyla, ağaç benzeri bir yapıya sahip yeni bir termal iletken yapı geliştirilmiştir. Çalışma kapsamında, topoloji optimizasyonu kullanılarak tasarlanan bu yeni yapı, düzlem yapılı ve kanatçık yapılı ısı alıcılarla termal performans açısından karşılaştırılmıştır. Optimize edilen bu yapı, AlSi10Mg alaşımından SLM yöntemi ile üretilmiş ve deneysel analizlere tabi tutulmuştur. Deney sonuçlarına göre, optimize edilmiş ısı alıcının, düzlem yapılı ısı alıcıya kıyasla yaklaşık sekiz kat; kanatçık yapılı ısı alıcıya kıyasla ise %13 oranında daha iyi termal performans gösterdiği belirlenmiştir. Bu çalışma, optimize edilmiş ağaç benzeri yapıların, termal performansı artırmada etkili bir çözüm sunduğunu ortaya koyarak, gelecekteki ısı alıcı tasarımları için yenilikçi bir yaklaşım önermektedir.

Vargas vd. (2020) tarafından, PCM entegre edilmiş ısı alıcılar için yeni bir soğutma şeması geliştirilmesi hedeflenmiştir. Bu amaçla, topoloji optimizasyonu ve eklemeli imalat teknolojileri bir arada kullanılmıştır. Çalışmada, kanatçıkları optimize edilmiş iki katmanlı bir ısı alıcı tasarlanmış ve bu tasarım, AlSi10Mg alaşımı kullanılarak DMLS yöntemiyle üretilmiştir. Deneysel analizlerde, üretilen ısı alıcılar farklı fan gücü koşulları altında değerlendirilmiştir. Deney sonuçları, optimize edilmiş kanatçıkların PCM'nin termal performansını önemli ölçüde artırdığını ortaya koymuştur. Bu durum, PCM ile ısı alıcıların entegre kullanımının soğutma etkinliğini artırabileceğini göstermiştir.

Constantin vd. (2020) tarafından, ticari bir bakır ısı alıcı referans alınarak, 3B yazıcı kullanılarak farklı geometrilere sahip ısı alıcılar üretilmiştir. Çalışma kapsamında, referans geometrisine ek olarak helisel ve tüp formunda tasarımlar oluşturulmuştur. Tüm ısı alıcılar, gerçek cihazlarda kullanım için tasarlanmış ve 200°C tabla sıcaklığında termal performansları değerlendirilmiştir. Deney sonuçları, 3B yazıcıda üretilen referans geometrili ısı alıcının soğutma performansında anlamlı bir fark yaratmadığını göstermiştir. Ancak, tüp formundaki ısı alıcının sıcaklık performansı önemli düzeyde iyileşmiş ve 50°C'ye varan sıcaklık azalmaları tespit edilmiştir. Bu bulgular, tüp formundaki tasarımın termal performansını artırdığını ve yenilikçi geometrilerin soğutma uygulamalarında potansiyel bir fayda sağlayabileceğini göstermektedir.

Iradukunda vd. (2020) tarafından, PCM ile birleştirilebilen hibrit ısı alıcılar geliştirilmiştir. Bu amaçla, topoloji optimizasyonu ile termal performansı artırılmış yapılar tasarlanmış ve DMLS eklemeli imalat tekniği kullanılarak AlSi10Mg alaşımından üretilmiştir. Optimize edilen tasarımlar, referans tasarımlarla karşılaştırıldığında PCM performansında kayda değer iyileşmeler sağlamıştır. Ayrıca, bu çalışma, topoloji optimizasyonu ve eklemeli imalatın birlikte kullanımının, iletimi, konveksiyon ve ısı transferi mekanizmalarını bir araya getirerek hibrit bir ısı alıcı oluşturma potansiyeline sahip olduğunu göstermiştir. Deneysel analizler, optimize edilen hibrit tasarımların termal verimliliği artırmada etkili bir çözüm sunduğunu kanıtlamıştır.

Hassan Ali vd. (2019) tarafından, üçlü periyodik minimal yüzeylere dayalı geometrik olarak karmaşık yapılar içeren üç farklı yeni ısı alıcı nümerik ve deneysel yöntemlerle kapsamlı bir şekilde analiz edilmiştir. Bu yenilikçi tasarımlar, alüminyum alaşımından SLM tekniği kullanılarak üretilmiştir. Çalışmada Reynolds sayısı ve ısı yük sabit tutularak iki farklı nümerik çalışma yürütülmüştür. Sonuçlar, ısı transferi performansının doğrudan ısı alıcıların geometrik yapısına bağlı olduğunu açıkça göstermektedir. Ayrıca, bu çalışma, kompleks geometrik yapılarla ısı transfer performansının iyileştirilebileceğine dair güçlü kanıtlar sunmaktadır.

Khazaka vd. (2019) tarafından, farklı geometrilere sahip AlSi7Mg0.6 alaşımından ısı alıcılar, SLM tekniği kullanılarak üretilmiş ve termal performansları incelenmiştir. nümerik analizleri ve deneysel çalışmalar, referans geometriyle karşılaştırıldığında diğer geometrilerin termal özelliklerinde önemli iyileşmeler sağladığını ortaya koymuştur. Bu durum, optimize edilmiş tasarımların sadece ısı transfer performansını artırmakla kalmayıp, aynı zamanda bu tür sistemlerde enerji verimliliği ve güvenilirliği de iyileştirme potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir.

Lazarov vd. (2018) tarafından, LED (ışık yayan diyot)'ler için topolojisi optimize edilmiş ısı alıcılar, alüminyum alaşımından eklemeli imalat yöntemleri kullanılarak üretilmiştir. Optimize edilmiş tasarımlar, hem nümerik analizler hem de deneysel çalışmalarla değerlendirilmiştir. Sonuçlar, optimize edilmiş ısı alıcıların malzeme kullanımında %17 azalma sağladığını, LED sıcaklıklarında ise %21 ile %23 arasında düşüş olduğunu göstermiştir. Ayrıca, optimize edilen tasarımların üretim maliyetlerinde kayda değer bir azalma sağlandığı tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, optimize edilmiş ısı alıcıların yalnızca termal performansı artırmakla kalmayıp, aynı zamanda üretim süreçlerini daha ekonomik hale getirebileceğini ortaya koymaktadır.

Han vd. (2018) tarafından, üniform olmayan kafes yapılarının tasarımı için yenilikçi bir topoloji optimizasyonu yaklaşımı önerilmiştir. Bu yaklaşım, ısı dağıtma verimliliği yüksek bir soğutucu tasarlamak amacıyla uygulanmış ve sonuç olarak üretilen ısı alıcıların kayda değer bir termal performans sergilediği tespit edilmiştir. Önerilen tasarım yöntemi, ısı transferi ve mekanik dayanıklılık açısından optimize edilmiş bir yapının nasıl elde edilebileceğine dair önemli bir yol haritası sunmaktadır. Ayrıca, bu yaklaşım, geleneksel tasarım yöntemlerine kıyasla daha hafif ve daha verimli soğutucu yapılar üretmeyi mümkün kılmaktadır.

Yapılan çalışmaların genel bir değerlendirmesi, mevcut literatürde bazı boşlukların bulunduğunu ve bu tez çalışmasının bu boşlukları doldurmayı hedeflediğini açıkça ortaya koymaktadır. Öncelikle, topoloji optimizasyonu ile eklemeli imalat yöntemlerinin entegrasyonu, karmaşık geometrilerin üretimi ve bu geometrilerin termal performanslarının değerlendirilmesi gibi alanlarda sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu çalışma, topoloji optimizasyonu ile tasarlanan bir ısı alıcının, termal performansının detaylı bir şekilde analiz edilmesiyle, literatürdeki bilgi birikimine anlamlı bir katkı sağlamayı hedeflemektedir. Özellikle, farklı tasarım kombinasyonlarının soğutma performansı üzerindeki etkilerini inceleyerek, termal yönetim sistemlerinin tasarımı için daha verimli çözümler geliştirilmesine yönelik yeni bir perspektif sunmaktadır. Bu yaklaşım hem akademik araştırmalar hem de endüstriyel uygulamalar için yenilikçi bir çerçeve sunarak, ısı alıcı tasarımında önemli bir adım olacaktır.

3. MATERYAL VE METOT

Bilgisayar ünitesindeki soğutma elemanı olarak kullanılan ısı alıcılarının performansını optimize etmek amacıyla farklı tasarım yaklaşımları ve modelleme teknikleri incelenmiştir.

3.1. Matematiksel Model

Çalışmada, bir bilgisayar ünitesindeki soğutma elemanı olarak kullanılan ısı alıcısı tasarımında üç farklı 2B model değerlendirilmiştir. Bu modeller, tasarım ve analiz süreçlerinin optimize edilmesi amacıyla tercih edilmiştir. 2B modeller, ANSYS yazılımının “Design Modeler” modülü kullanılarak tasarlanmış ve her biri 45×17.5 mm boyutlarında oluşturulmuştur (Şekil 3.1).



Şekil 3.1. 2B model

Modelleme yaklaşımı, termal ve yapısal performansın değerlendirilmesine olanak sağlayarak, tasarımlar arasındaki farklılıkları karşılaştırmak ve en uygun çözümü belirlemek için etkili bir temel oluşturmuştur. Tasarım süreci boyunca, her bir model üzerinde detaylı analizler yapılmış ve bu analiz sonuçlarına göre termal yönetim performansına en uygun olan yapı seçilmiştir. Modelleme sırasında, belirlenen ölçüler ve geometri, bilgisayar ünitesindeki fiziksel sınırlamalarla uyumlu olacak şekilde düzenlenmiştir.

Modellerin seçimi ve tasarımı, yalnızca ısı transfer verimliliğini artırmayı değil, aynı zamanda üretim süreçlerinde kullanılabilirliklerini de göz önünde bulundurmıştır. Ayrıca, kullanılan 2B modelleme, hesaplama süresini ve kaynak tüketimini azaltırken, analizlerin hızlı ve verimli bir şekilde tamamlanmasına olanak sağlamıştır. Bu yaklaşım, araştırmanın temelini oluşturan tasarım ve analiz süreçlerinde hem zaman hem de maliyet açısından avantaj sağlamıştır.

Çalışmada kullanılan modelin malzemesi, yüksek termal iletkenlik ve mekanik dayanıklılığıyla bilinen AlSi10Mg alaşımıdır. Bu alaşım, özellikle termal yönetim uygulamalarında yaygın olarak tercih edilen bir malzeme olup, eklemeli imalat teknikleriyle uyumlu olması nedeniyle bu çalışmada seçilmiştir. AlSi10Mg alaşımı, termal özellikleri sayesinde ısı transfer verimliliğini artırırken, mekanik stabiliteyi koruma yeteneği sunmaktadır.

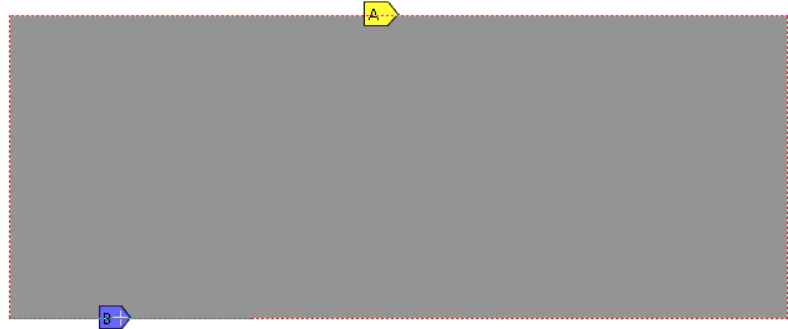
Modelin analizlerinde kullanılan malzemenin temel termal özellikleri, Çizelge 3.1'de sunulmuştur. Bu özellikler, ısı alıcı tasarımı ve performans değerlendirmesi sırasında dikkate alınarak, analizlerin gerçekçi ve doğru bir şekilde gerçekleştirilmesine olanak sağlamıştır. Bu malzeme özellikleri, çalışmada tasarlanan ısı alıcının termal performansını optimize etmek ve mekanik dayanıklılığını korumak için kritik bir öneme sahiptir. Özellikle yüksek termal iletkenlik, ısı transferi sürecinde etkin bir soğutma sağlamaktadır. Bunun yanı sıra, özel ısı kapasitesi ve genleşme katsayısı gibi özellikler, farklı sıcaklık koşullarında malzemenin stabilitesini ve verimliliğini artırmaktadır.

Çizelge 3.1. AlSi10Mg termal özellikleri

Termal İletkenlik	Özgül Isı	Yoğunluk
147 W/m·°C	951 J/kg·°C	2650 kg/m ³

Çalışmadaki analizler iki aşamada gerçekleştirilmiştir ve bu süreçte ANSYS Workbench Student yazılımı kullanılmıştır. Analizlerin ilk aşaması, kararlı hal termal analizidir. Bu analizde, modelin üzerinde zorlanmış konveksiyonla hava etkisi göz önünde bulundurularak konveksiyon sınır koşulları uygulanmıştır. Isı taşınım katsayısı, modelin üst kısmında 50 W/m² °C olarak tanımlanmış, bu da ısı transferinin yüzeyden çevreye etkili bir şekilde gerçekleşmesini sağlamıştır. Ayrıca, modelin alt kısmına, cihazdan kaynaklanan 50 W'lık bir ısı uygulanmıştır. Bu sınır koşulları, modelin gerçekçi bir şekilde soğutma performansını değerlendirmek amacıyla belirlenmiştir.

A Convection: 22, °C, 5,e-005 W/mm²·°C
B Heat Flow: 50, W



Şekil 3.2. Sınır koşulları

Şekil 3.2'de, söz konusu sınır koşulları görsel olarak sunulmaktadır. Şekil, analizde kullanılan model üzerindeki sınır koşullarının hangi bölgelerde ve nasıl tanımlandığını detaylı bir şekilde açıklamaktadır. Bu yaklaşım, ısı alıcı tasarımının termal performansını ve cihazın maruz kaldığı sıcaklık dağılımını etkili bir şekilde analiz etmeye olanak tanımaktadır. Kararlı hal termal analizinin sonuçları, modelin ısı transferi karakteristiklerini anlamak ve optimize etmek için temel bir adım sağlamaktadır.

Kararlı hal termal analizinin ardından, model üzerinde oluşan sıcaklık dağılımı detaylı bir şekilde değerlendirilmiş ve bu analiz sonuçları, çalışmanın sonraki adımlarını yönlendiren kritik bir veri seti sağlamıştır. Analiz sonuçlarına göre, modelin yüzeyindeki

sıcaklık değişiminin yaklaşık olarak 176 °C ile 185 °C aralığında olduğu tespit edilmiştir. Bu sıcaklık aralığı, modelin termal performansını ve ısı alıcının tasarımındaki potansiyel iyileştirme noktalarını belirlemek için önemli bir gösterge olmuştur. Elde edilen bu termal analiz sonuçları, çalışmanın temelini oluşturan topoloji optimizasyonu sürecine giriş yapılması için bir başlangıç noktası oluşturmıştır. Şekil 3.3, kararlı hal termal analizinde tespit edilen sıcaklık dağılımını görsel olarak sunmakta ve modelin farklı bölgelerindeki sıcaklık varyasyonlarını detaylı bir şekilde ortaya koymaktadır. Bu aşamada, analiz sonuçları topoloji optimizasyonu modülüne aktarılmış ve çalışmanın esas konusu olan topoloji optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Bu süreç, ısı alıcının performansını artırmak amacıyla malzeme kullanımını optimize etmek ve ısı transferini daha verimli hale getirmek için önemli bir adım olmuştur. Topoloji optimizasyonu sayesinde, modelin hem termal hem de yapısal performansı açısından en uygun tasarımın elde edilmesi hedeflenmiştir



Şekil 3.3. Kararlı hal termal analiz sonucu

3.1.1 Topoloji Optimizasyonu

Eklemeli imalat, karmaşık geometrik yapıların üretimini mümkün kılarak, tasarımcıların geleneksel yöntemlerle üretilemeyen hafif, yüksek performanslı ve yenilikçi yapılar oluşturmaya olanak tanır. Bu tür yapılar, tasarımın hafifletilmesi, dayanıklılığın artırılması veya yapısal verimliliğin iyileştirilmesi gibi hedeflerle optimize edilebilir. Karmaşık yapıların geliştirilmesinde çeşitli optimizasyon teknikleri kullanılmakta olup, bunların başında topoloji optimizasyonu gelmektedir.

Topoloji optimizasyonu, belirli yükler, kısıtlamalar ve sınır koşulları gibi mühendislik parametrelerini dikkate alarak, bilgisayar destekli yazılımlar yardımıyla bir yapının geometrisinin yeniden yapılandırılmasını sağlar. Bu süreçte, malzemenin yalnızca ihtiyaç duyulan bölgelerde yoğunlaştırılmasıyla optimum yapı konfigürasyonu elde edilir. Topoloji optimizasyonu, tasarım sürecinde malzeme dağılımını düzenleyerek, yapısal verimliliği artırırken gereksiz malzeme kullanımını da minimize eder. Boyutlandırma ve şekil optimizasyonu yöntemlerinden farklı olarak, topoloji optimizasyonu tasarımcıya daha geniş bir tasarım alanı sunar ve çok daha karmaşık yapıların geliştirilmesine imkan tanır (Zhu vd., 2021). Bu yöntem, yüksek performanslı, hafif ve çok işlevli yapılar geliştirilmesi amacıyla yaygın olarak kullanılmakta ve özellikle havacılık, otomotiv, mimarlık ve biyomedikal gibi disiplinlerde kendine önemli

bir yer edinmiştir. Mekanik avantajlarının yanı sıra, topoloji optimizasyonu aynı zamanda sistemlerin termal davranışlarını da iyileştirebilmekte, bu sayede daha verimli termal yönetim çözümleri sunabilmektedir.

Çalışmada, yoğunluk temelli (density-based) bir topoloji optimizasyon yöntemi tercih edilmiştir. Bu yöntem, modelin her bir elemanının yoğunluğunu dikkate alarak optimizasyon işlemi gerçekleştirilmektedir. Analizde, SIMP modeli kullanılmıştır. SIMP yöntemi, yoğunluk değerlerini sürekli olarak 0 ile 1 arasında bir aralık yerine, kesin değerlere (örneğin, 0 veya 1) yakınlıştırmaya zorlar. Böylece, malzeme varlığı ya da yokluğu net bir şekilde tanımlanır. Bu yaklaşım, optimize edilen yapıların üretilebilirliğini artırır ve daha gerçekçi tasarımlar elde edilmesini sağlar.

Sonuç olarak, yoğunluk temelli topoloji optimizasyonunun gerek yapısal gerekse termal performansı artırma potansiyeli bulunduğu görülmektedir. Çalışmanın bu yöntemi kullanarak gerçekleştirdiği tasarımlar, malzeme israfını azaltırken mühendislik gereksinimlerini karşılayacak optimum yapıların elde edilmesine olanak tanımaktadır.

Optimizasyon, aşağıdaki denkleme göre termal koşuldan etkilenir:

$$K(x)U = F^m + F^{th}(x) \quad (3.1)$$

Burada;

$K(x)$ = sertlik matrisi

U = yer değiştirme vektörü

F^m = dışarıdan uygulanan mekanik yük

$F^{th}(x)$ = termal yük vektörü.

Hem mekanik hem de termal yükleri içeren sonlu eleman sistemindeki doğrusal statik denge şöyle hesaplanır:

$$f_e^{th} = \int_{\Omega_e} B_e^T C_e \varepsilon_e^{th} d\Omega_e \quad (3.2)$$

Burada B_e eleman gerinim-yer değiştirme matrisi, C_e eleman elastiklik matrisi ve ε_e^{th} eleman için termal gerinim vektörüdür :

$$\varepsilon_e^{th} = \alpha(x_e) \Delta T_e \varnothing^T \quad (3.3)$$

Burada $\alpha(x_e)$ malzemenin termal genleşme katsayısıdır, eleman üzerindeki sıcaklık değişimidir ve üç boyut için $[1,1,1,0,0,0]$ ve iki boyut için $[1,1,0]$ 'dir (Structural Optimization Analysis Guide, 2024).

3.1.2 Isı Alıcının Topolojik Modellemesi

Bir ısı alıcısının ortalama termal performansı, hava akışının yönüne ve ısı alıcı geometrisinin optimize edilmesine büyük ölçüde bağlıdır. Genellikle hava akışına dik yönde genişliğin artırılması, termal performansı önemli ölçüde iyileştirir ve performans üzerinde doğrusal bir etkisi bulunur. Buna karşılık, akışa paralel olan kanat uzunluğu, performansı yalnızca uzunluğun kareköküyle orantılı olarak artırır. Bu, genişliğin ve uzunluğun performans üzerindeki etkilerinin farklı olduğunu ve ısı alıcı tasarımında bu parametrelerin ayrı ayrı ele alınması gerektiğini göstermektedir.

Temel bilgiler ışığında, çalışmada 2B topoloji optimizasyonu sonuçları değerlendirilmiş ve ticari bir ısı alıcı referans alınarak 3B ısı alıcı modellemeleri gerçekleştirilmiştir. 2B optimizasyon sonuçları, ısı alıcı geometrisinin, hem termal performans hem de malzeme kullanım verimliliği açısından nasıl optimize edilebileceğine dair önemli veriler sunmuştur. Referans alınan ticari ısı alıcıyla yapılan karşılaştırmalar, yeni modellemelerin performansını değerlendirmek ve tasarımları iyileştirmek için temel teşkil etmiştir.

Modellemeler sırasında, hava akışı koşulları ve ısı transferi katsayıları dikkate alınarak, hem termal performansı artıracak hem de malzeme kullanımını optimize edecek tasarımlar üzerinde çalışılmıştır. Böylelikle, hem ısı alıcının çalışma verimliliğini artırmak hem de üretim maliyetlerini düşürmek hedeflenmiştir. Bu modelleme süreci, tasarım ve optimizasyon stratejilerinin mühendislik uygulamalarındaki önemini bir kez daha vurgulamaktadır.

3.1.3. Nümerik Analiz

Çalışmada modellenen ısı alıcıların çalışma koşulları altında sergiledikleri termal performanslarının detaylı bir şekilde değerlendirilmesi amacıyla nümerik analizlere ihtiyaç duyulmuştur. Bu analizler, tasarlanan ısı alıcıların performansını doğrulamak ve optimize edilmiş geometrilerin gerçek uygulamadaki etkinliğini değerlendirmek için kritik bir role sahiptir. Bu amaçla, Ansys Workbench Student yazılımı kullanılarak sonlu elemanlar yöntemi ile çözümler gerçekleştirilmiştir.

Sonlu elemanlar yöntemi, karmaşık mühendislik problemlerini çözmek için kullanılan güçlü bir araçtır ve özellikle termal analizlerde yaygın olarak tercih edilmektedir. Bu yöntem, ısı alıcı modellerinin ayrıntılı bir şekilde incelenmesine olanak tanımış ve tasarım parametrelerinin termal performans üzerindeki etkilerini değerlendirmede önemli bir katkı sağlamıştır (Wulandana, 2024).

Ansys Workbench Student yazılımı aracılığıyla yapılan analizlerde, çalışma koşulları altında ısı alıcıların sıcaklık dağılımları, ısı iletim ve taşınım katsayıları ve en yüksek sıcaklık değerleri gibi kritik performans göstergeleri incelenmiştir. Bu analizler, yalnızca tasarımların doğruluğunu ve etkinliğini değerlendirmekle kalmamış, aynı zamanda gelecekteki iyileştirmeler için de önemli ipuçları sunmuştur.

Sonuç olarak, nümerik analizler, tasarım sürecinin vazgeçilmez bir parçası olarak, modellenen ısı alıcıların performansının optimize edilmesi ve tasarımların gerçekçi çalışma koşullarına uygun hale getirilmesi için temel bir araç olmuştur. Bu süreç, çalışmanın hem akademik hem de uygulamalı mühendislik açısından değerini artırmıştır.

3.1.4. Kullanılan Malzeme

Alüminyum, çelikten sonra kullanım alanı en yaygın olan metalik mühendislik malzemelerinden biridir ve hafifliği, dayanıklılığı, işlenebilirliği gibi özellikleriyle birçok sektörde tercih edilmektedir. Özellikle uçak ve uzay sanayisinde, hafif yapısı sayesinde önemli avantajlar sunar. Özgül dayanımı, yani birim ağırlık başına taşıma kapasitesi, çelikten daha yüksektir. Bu nedenle alüminyum, aynı yükü taşıyan bir yapı veya bileşen için daha hafif bir alternatif sunarak enerji tasarrufu sağlar. Elektrik ve ısı iletkenliği oldukça iyidir ve bu özellik, alüminyumun elektronik cihazlardan termal yönetim sistemlerine kadar birçok alanda kullanılmasını sağlar.

Alüminyum, gevrek-sünek geçiş sıcaklığına sahip olmaması nedeniyle düşük sıcaklıklarda bile güvenilir mekanik özelliklerini korur. Aniden çok düşük sıcaklıklara maruz kaldığında dahi gevrekleşme riski taşımaz. Bu, alüminyumun kutup bölgelerinde veya kriyojenik uygulamalarda güvenle kullanılmasını mümkün kılar. Ayrıca, alüminyum, oksidasyon ve korozyona karşı doğal olarak dirençlidir. Yüzeyinde oluşan ince oksit tabakası, malzemeyi çevresel etkilere korur ve bu tabaka hasar görse bile hızla yeniden oluşur. Oksit tabakasının bileşimi, yüzeyin estetik özelliklerini iyileştirmek veya renkli bir kaplama elde etmek amacıyla değiştirilebilir. Bu özellik, alüminyumun hem mühendislik hem de dekoratif uygulamalarda kullanılmasını destekler. Ancak alüminyumun sertliği ve aşınma dayanımı, birçok metalden düşüktür. Özellikle yüksek sıcaklıklarda mekanik özelliklerinin zayıflaması, malzemenin dayanıklılığını olumsuz etkileyebilir. Alüminyum alaşımlarının mekanik özelliklerini artırmak için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Bu yöntemlerden en etkili, çökeltme sertleşmesi (yaşlandırma) olarak bilinir. Çökeltme sertleşmesi, alüminyum alaşımlarının mukavemetini ve dayanıklılığını artıran bir ısı işlemi yöntemidir. Bu işlem, özellikle havacılık ve otomotiv endüstrisinde, yüksek performans gerektiren uygulamalarda sıklıkla kullanılır (Aran, 2008).

Alüminyum alaşımları genel olarak dövme ve döküm alaşımları olmak üzere iki ana kategoriye ayrılır. Bu kategoriler, mekanik özelliklerin iyileştirilmesinde kullanılan yöntemlere dayanarak daha alt sınıflara ayrılabilir. Birçok alüminyum alaşımı, faz çözünürlüklerine dayalı olarak ısı işlemlerinden etkilenir. Alüminyum alaşımlarının isimlendirilmesi için farklı sistemler kullanılır. Dövme ve döküm alaşımları, özelliklerine göre farklı isimlendirme yöntemlerine tabi tutulur. Amerika Birleşik Devletleri'nde yaygın olarak kullanılan Alüminyum Birliği sistemi, alaşımları dört haneli bir kodlama

ile sınıflandırır. Bu sistem, alaşımların kimyasal bileşimlerini ve özelliklerini tanımlamak için standardize edilmiş bir yöntem sunar. Döküm alaşımları için ise farklı bir sınıflandırma sistemi kullanılır ve bu sistem, alaşımları belirli özelliklere dayalı ailelere ayırır. Dövme alaşımları ise dört haneli bir sistemle sınıflandırılır.

- **1xxx:** Saf (kontrollü alaşımsız) alaşımlar, genellikle elektrik ve kimya endüstrilerinde kullanılır.
- **2xxx:** Bakırın ana alaşım elementi olduğu alaşımlar, ancak diğer elementler (özellikle magnezyum) de eklenebilir. Bu alaşımlar, yüksek mukavemetleri ile bilinir ve uçak sanayisinde yaygın olarak kullanılır.
- **3xxx:** Manganezin ana alaşım elementi olduğu, mimari ve genel amaçlı uygulamalarda kullanılan alaşımlar.
- **4xxx:** Silisyumun ana alaşım elementi olduğu alaşımlar, özellikle kaynak çubukları ve lehim levhaları için kullanılır.
- **5xxx:** Magnezyumun ana alaşım elementi olduğu, deniz ortamlarına maruz kalan ürünlerde (tekne gövdeleri, iskeleler vb.) kullanılan alaşımlar.
- **6xxx:** Magnezyum ve silisyumun ana alaşım elementi olduğu alaşımlar, mimari ekstrüzyonlar ve otomotiv bileşenleri için yaygın olarak kullanılır.
- **7xxx:** Çinkonun ana alaşım elementi olduğu alaşımlar, uçak yapısal bileşenleri ve yüksek mukavemetli diğer uygulamalar için kullanılır. Bu serideki alaşımlar, ≥ 500 MPa akma dayanımına sahip olan en güçlü alüminyum alaşımlarıdır.
- **8xxx:** Çeşitli bileşimleri karakterize eden alaşımlar. B u seride önemli miktarda kalay, lityum ve/veya demir içerebilir.
- **9xxx:** Gelecekteki kullanım için ayrılmıştır.

Isıl işlem uygulanabilir alüminyum alaşımları, çöktürme sertleştirilerek özellikleri iyileştirilebilen dövme alaşımlarını içerir. Bunlar arasında 2xxx, 6xxx, 7xxx ve bazı 8xxx alaşımları yer alır. Döküm alaşımları için ise aileler şu şekilde sıralanır:

- **1xx.x:** Özellikle rotor üretimi için kullanılan saf alaşımlar.
- **2xx.x:** Bakırın ana alaşım elementi olduğu alaşımlar, diğer elementler (örneğin magnezyum ve çinko) eklenebilir.
- **3xx.x:** Silisyumun ana alaşım elementi olduğu alaşımlar, bu grup döküm alüminyumlarının yaklaşık %90'ını kapsar.
- **4xx.x:** Silisyumun ana alaşım elementi olduğu alaşımlar.
- **5xx.x:** Magnezyumun ana alaşım elementi olduğu alaşımlar.
- **6xx.x:** Kullanılmamış.

- **7xx.x:** Çinkonun ana alaşım elementi olduğu alaşımlar, diğer elementler de eklenebilir.
- **8xx.x:** Kalayın ana alaşım elementi olduğu alaşımlar.
- **9xx.x:** Kullanılmamış.

Bu sınıflandırmalar, alüminyum alaşımlarının çeşitliliğini anlamının yanı sıra, her bir alaşımın özel bir uygulama veya kullanım amacına göre nasıl optimize edilebileceğini daha iyi kavramamıza olanak tanır. Alüminyum alaşımları, üstün termal ve mekanik özellikleri nedeniyle mühendislik ve endüstri uygulamalarında yaygın olarak kullanılan malzemeler arasında yer alır. Özellikle ısı alıcıları gibi termal yönetim gerektiren uygulamalarda alüminyum alaşımları sıklıkla tercih edilmektedir. Ancak bu alaşımların avantajları sadece termal özellikleriyle sınırlı değildir; yüksek dayanım/yoğunluk oranı, hafifletilmesi gereken yapılar ve tasarımlar için ideal bir malzeme seçeneği sunar.

Elektrik iletkenliği açısından alüminyum, yoğunluğuna oranla üstün performansı sayesinde tüm metal malzemeler arasında öne çıkar. Bu özellik, alüminyumun yüksek gerilim hatlarında bakırın yerine tercih edilmesini sağlamış ve enerji iletim sistemlerinde maliyet avantajı ile hafifliği bir arada sunmuştur. Bununla birlikte, alüminyumun havada ve diğer birçok ortamda korozyona karşı gösterdiği doğal direnç, bu malzemenin dekoratif uygulamalardan mimari tasarımlara kadar geniş bir kullanım alanında tercih edilmesini sağlamıştır. Alüminyumun dayanıklı oksit tabakası, koruyucu bir bariyer oluşturarak malzemenin uzun ömürlü olmasını sağlar ve yüzey estetiğini artırır. Bu özellikleri nedeniyle, alüminyum ev araçları üretiminden otomotiv ve uçak sanayisine kadar birçok alanda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Aluminum and Aluminum Alloys Introduction and Overview, 2001).

Çalışmada kullanılan AlSi10Mg alaşımı, alüminyum alaşımları arasında mekanik dayanım, termal iletkenlik ve döküm özellikleri açısından sıklıkla tercih edilen bir seçenektir. Alüminyum-silisyum alaşımlarının döküm süreçlerine uygunluğu, mekanik özelliklerini iyileştirme potansiyeli ile birleşerek bu malzemeyi mühendislik uygulamaları için vazgeçilmez kılmaktadır. AlSi10Mg alaşımı, sadece döküm süreçlerinde değil, aynı zamanda toz metalürjisi ve eklemeli imalat yöntemleriyle de kullanılabilen bir malzeme olarak dikkat çekmektedir. Eklemeli imalat yöntemlerinde kullanılan bu alaşım, karmaşık geometrilerin üretiminde yüksek verimlilik ve dayanıklılık sunar. Özellikle Al-Mg-Si alaşımlarında magnezyum ve silisyum kenarlarında oluşan Mg_2Si ara fazı, uygun bileşimlerde çökeltme sertleşmesi (yaşlandırma) gibi işlemlerin uygulanmasını mümkün kılar (Tezel, 2019).

Sonuç olarak, AlSi10Mg alaşımı gibi alüminyum alaşımları, hafiflik, dayanıklılık, korozyon direnci ve termal iletkenlik özellikleri ile termal uygulamalarda ön plana çıkmaktadır. Bu özellikler, bu tür malzemelerin mühendislik tasarımlarında ve termal sistemlerde yenilikçi çözümler sunmasını mümkün kılmaktadır.

3.1.5.Eklemeli İmalat

Eklemeli imalat, bilgisayar destekli tasarım (CAD) programlarında oluşturulan 3B parçaların, eklemeli imalat yazıcıları kullanılarak katman katman üretilmesi prensibine dayanan modern bir üretim yöntemidir. Bu üretim tekniği, geleneksel imalat yöntemlerinden temel farklarla ayrılmaktadır. Geleneksel yöntemlerde malzeme, kesilerek, tornalanarak ya da aşındırılarak şekillendirilirken, eklemeli imalatta şekil vermek için malzemeye deformasyon uygulanmaz veya parça üzerinde malzeme çıkarma işlemi gerçekleştirilmez. Bu özellik, eklemeli imalatı hem ekonomik hem de çevresel açıdan sürdürülebilir bir çözüm haline getirmiştir. Çünkü bu süreçte hurda malzeme üretimi en düşük düzeyde tutulur. Bu avantajlar, zamanla eklemeli imalatın cazibesini artırmış ve hem sanayi hem de akademik araştırmalar için vazgeçilmez bir araç haline gelmesini sağlamıştır (Zhou vd., 2024).

Geleneksel yöntemlerle üretimi mümkün olmayan karmaşık geometrik yapılara sahip parçaların üretilmesi, eklemeli imalatın sağladığı en önemli avantajlardan biridir. Bu yöntem, tasarımda özgürlük sunarak, mühendislik uygulamalarından sanata kadar geniş bir yelpazede kullanılmasını mümkün kılar. Eklemeli imalat, ilk olarak 1980’li yıllarda stereolitografi adı verilen bir yöntemle başlamış ve bu yöntemi toz yatak füzyonu, ergiyik biriktirme tekniği ve mürekkep püskürtmeli baskı gibi diğer teknikler izlemiştir (Khan Lodhi vd., 2024).

FDM, katman katman erimiş polimer filamentinin biriktirilmesi yoluyla 3B parçaların üretildiği bir eklemeli üretim teknolojisidir. Bu süreç, polimerlerin eriyik halde işlenmesini sağlayarak birçok termoplastik malzemenin kullanılmasına olanak tanır. FDM, hızlı prototipleme, özelleştirilmiş üretim ve endüstriyel uygulamalar için geniş bir kullanım alanına sahiptir. Elektronik, otomotiv, biyomedikal mühendislik ve tüketici ürünleri gibi sektörlerde önemli bir rol oynamaktadır. FDM, 3B tasarımların bilgisayar yazılımı ile (.stl formatında) oluşturulup, dilimleme yazılımı ile G-koduna dönüştürülmesi ve ardından yazıcıda materyalin katmanlar halinde dökülmesi ile çalışır. Bu süreç, hızla prototip üretmek ve düşük maliyetle özelleştirilmiş ürünler elde etmek için ideal bir yöntemdir. Ancak, FDM’nin de çeşitli sınırlamaları ve zorlukları vardır. Bunlar arasında düşük üretim hızı, yüzey kalitesinin sınırlı olması, mekanik dayanımın zayıflaması ve işlenebilir malzeme çeşitliliğinin kısıtlı olması sayılabilir. FDM teknolojisinin önemli zorluklarından biri, katmanlar arasındaki bağlanma zayıflığıdır. Molten (erimiş) malzeme, bir katmanın üzerine dökülerek bir sonraki katmanın üzerine eklenir, ancak bu süreç, katmanlar arasında zayıf bir bağlanmaya yol açar. Bu zayıf bağlanma, parçaların mekanik dayanımını azaltır. Ayrıca, katman katman malzeme eklenmesi, iç yapıda boşluklar ve hava ceplerinin oluşmasına neden olabilir, bu da parçaların dayanıklılığını olumsuz etkiler. Bu tür yapısal zayıflıklar, FDM ile üretilen parçaların mekanik özelliklerini, özellikle çekme dayanımını zayıflatır. Ayrıca, FDM’nin katmanlı yapısı, parçaların farklı yönlerdeki özelliklerinin farklı olmasına neden olan anizotropik bir davranış sergileyebilir. FDM’nin kullanılan malzeme türüne bağlı olarak mekanik özellikler değişkenlik gösterebilir. Polimerin moleküler ağırlığı, kristalinlik oranı ve moleküller arası bağlar, son ürünün mekanik özelliklerini doğrudan etkiler. Bu nedenle, bazen FDM ile üretilen parçaların mekanik özelliklerini iyileştirmek yerine, daha iyi mekanik özelliklere sahip alternatif malzemelere yönelmek daha akıllıca olabilir. FDM’nin avantajları arasında kolay kullanım, düşük maliyet, düşük atık, daha düşük işlem toksisitesi, esnek tasarım ve kitle özelleştirmesi gibi özellikler bulunur.

Ancak, hızın düşük olması, sınırlı yüzey kalitesi, malzeme çeşitliliğinin sınırlılığı ve yüksek çekme ve deformasyon olasılığı gibi bazı dezavantajları da vardır. Buna rağmen, FDM teknolojisi, daha iyi mekanik özelliklere sahip malzemelerin geliştirilmesi ve işleme yöntemlerinin iyileştirilmesi ile pek çok sektörde uygulanmaya devam etmektedir (Sapkota vd.,2024).

Toz yatak füzyon (PBF) teknolojisi, eklemeli imalat yöntemleri arasında yüksek hassasiyeti ve karmaşık geometrileri üretebilme yeteneği ile öne çıkan bir tekniktir. Bu yöntemde, üretim süreci bir platform üzerine ince bir tabaka halinde serilen tozların bir lazer ışını veya bağlayıcı yardımıyla birleştirilmesiyle başlar. İlk toz katmanının birleştirilmesinin ardından, bir sonraki toz katmanı eklenir ve bu işlem, hedef parçanın tam olarak inşası tamamlanana kadar tekrarlanır. Sürecin sonunda, üretim sırasında serilen fazla toz, genellikle bir vakum yardımıyla uzaklaştırılır. Gerekli durumlarda, üretilen parça üzerinde ileri işlemler, örneğin kaplama, sinterleme veya infiltrasyon uygulanarak nihai özellikler geliştirilir (Ngo vd., 2018).

Lazerli sinterleme, yalnızca düşük erime sıcaklıklarına sahip tozlar için uygun bir yöntemdir ve bu tozlar, lazer ışını tarafından kısmen eritilerek birleştirilir. Buna karşın, yüksek erime sıcaklıklarına sahip tozlar için sıvı bağlayıcılar kullanılır. Bu özellik, yöntemin farklı malzemelere uygulanabilirliğini belirler ve süreç seçimini etkiler. SLS (Seçici Lazer Sinterleme) ve SLM, toz yatak füzyon teknolojisinin iki farklı varyasyonudur.

SLS, günümüzde yaygın olarak kullanılan ve güçlü bir eklemeli imalat tekniğidir. Bu yöntem, yüksek enerjili lazerler kullanarak, ince toz tabakalarının seçici olarak sinterlenmesiyle katı, üç boyutlu nesnelerin üretilmesini sağlar. SLS, özellikle polimer tozları ile, özellikle de naylon bazlı materyallerle yapılan üretimlerde oldukça etkilidir. Süreç, CAD dosyasından alınan dijital verilerle yönlendirilerek, her bir katman için lazerle tarama işlemi gerçekleştirilir. Katmanlar arasında birleştirme işlemi yapıldıktan sonra, yeni bir toz tabakası eklenir ve bu işlem, nihai parça tamamlanana kadar devam eder. SLS süreci, temel olarak bir lazer ışını ile bir malzeme tozunun belirli bölgelerinin ısısı artırılarak sinterlenmesi (yani, toz tanelerinin birleştirilmesi) esasına dayanır. Lazer ışını, her bir katman için bilgisayar ortamında oluşturulan 3B modelin kesitine göre hareket eder. Lazerin yüksek enerjisi, toz partiküllerinin sadece lazer ışınının geçtiği bölgelerde sinterlenerek birbirine bağlanmasını sağlar. Sonraki katman, önceki katmanın üzerine serilen yeni bir ince toz tabakası ile başlar ve bu süreç, istenilen parça tamamen şekillendirilene kadar devam eder. SLS'nin birçok avantajı bulunmaktadır. İlk olarak, karmaşık geometrilere sahip parçaların üretimi mümkündür. Bu, geleneksel üretim yöntemlerinin çoğunda karşılaşılan zorlukların önüne geçer ve tasarımlar üzerinde büyük esneklik sağlar. Ayrıca, SLS, çoğu zaman destek yapıları gerektirmeyen bir üretim tekniğidir. Yani, parça, sadece sinterlenen tozla desteklenen bir yapıya sahip olur, bu da üretim maliyetlerini ve post-işlem ihtiyaçlarını önemli ölçüde azaltabilir. Bu yöntem, hızlı prototipleme ve düşük hacimli üretim gibi uygulamalar için oldukça uygundur. Bununla birlikte, SLS ile üretilen parçalar, genellikle yüksek mekanik dayanıklılık ve istenen fiziksel özelliklere sahip olabilir, bu da onları son kullanım ürünleri için uygun hale getirir. SLS'nin teknik özelliklerinden biri de, üretilen parçaların genellikle yüksek hassasiyet ve dayanıklılığa sahip olmasıdır. Bu, çok ince toz tanelerinin kullanılabilmesi ve lazerin hassas kontrolü sayesinde mümkündür. Bununla birlikte, bu üretim tekniğiyle üretilen parçaların yüzey pürüzlülüğü genellikle daha yüksektir. Yüzey pürüzlülüğü,

malzemenin toz biçimi, lazerin gücü, tarama hızı ve tarama hatları aralığı gibi birçok faktörden etkilenir. Ayrıca, üretim yönü ve toz tanelerinin kısmi füzyonu da bu pürüzlülük üzerinde önemli bir etkiye sahiptir (Singh vd., 2024).

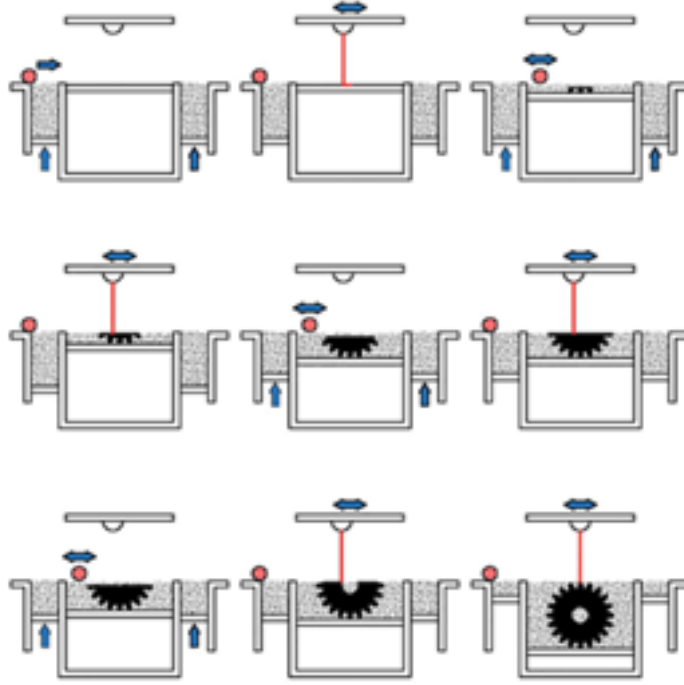
Yoğunluk ve yüzey pürüzlülüğü gibi önemli özellikler, malzeme özelliklerinden, toz tanelerinin boyutundan ve şekli gibi fiziksel faktörlerden büyük ölçüde etkilenmektedir. Bunun yanı sıra, lazerin gücü, tarama hızı, tarama hatları arasındaki mesafe ve sinterleme süresi gibi işleme parametreleri de bu özellikleri doğrudan etkileyebilir. Özellikle, lazerin gücü çok yüksek olduğunda, tozun erimesi ve daha fazla füzyon oluşması söz konusu olabilir, ancak bu durum, yüzey pürüzlülüğünün artmasına neden olabilir. Buna karşın, düşük lazer gücü, daha az sinterleme sağlar ve bu da zayıf bağlantılara ve düşük yoğunluklu parçalara yol açabilir. Bu yüzden SLS sürecinde, malzeme özellikleri ile işleme parametrelerinin birbirini nasıl etkilediğini anlamak oldukça önemlidir. Araştırmalar, bu faktörlerin parça kalitesi üzerindeki etkilerini daha iyi anlamak ve iyileştirme yapmak için gereklidir. Özellikle sinterlenmiş yoğunluk, yüzey pürüzlülüğü ve genel mekanik özellikler arasındaki dengeyi sağlamak için daha fazla araştırma yapılması gerekmektedir. Bu araştırmalar, SLS teknolojisinin daha verimli ve kontrollü bir şekilde uygulanmasını sağlayacak, aynı zamanda üretim maliyetlerini ve süresini azaltacaktır (Yehia vd., 2024).

SLM, yüksek güçlü bir lazer kullanarak metal tozu katmanlarını seçici bir şekilde eritir ve bu katmanları birbirine bağlayarak üç boyutlu bir parça oluşturur. Bu süreç, her bir metal toz katmanının lazerle eritilip katılaştırılması ve bir sonraki katmanın bu yüzey üzerine serilerek yeni bir katman oluşturulmasıyla devam eder. Bu işlem, parçanın tamamı oluşana kadar tekrarlanır (Şekil 3.4). SLM, metal parçaların üretimi için oldukça hassas ve detaylı bir yöntem sunar ve geleneksel üretim tekniklerine kıyasla daha karmaşık geometrilerin ve özelleştirilmiş parçaların üretimini mümkün kılar. Metal tozları genellikle paslanmaz çelik, titanyum alaşımları, alüminyum alaşımları ve nikel alaşımları gibi malzemelerden seçilir.

SLM'nin avantajlarından biri, karmaşık yapıların ve iç yapısal geometrilerin üretilmesidir. Bu, geleneksel yöntemlerde zor olan tasarımların gerçekleştirilmesini sağlar. Ayrıca, SLM, parça başına daha az malzeme israfı ile üretim yapma imkânı sunar, çünkü her katman sadece gereken bölgede tozu eritir. Bunun yanı sıra, SLM, destek yapıları gerektirmeyen üretim özellikleri sunabilir, ancak üretilen parçaların yüzey pürüzlülüğü genellikle daha yüksektir ve bu, ek işleme gereksinimlerini doğurabilir. Bu teknoloji, özellikle düşük hacimli üretimler, prototipler ve özel uygulamalar için tercih edilmektedir (Wawryniuk vd., 2024).

Mürekkep püskürtmeli baskı, fonksiyonel malzemelerin kontaminasyon riski olmaksızın sabitlenmesi için ideal bir non-kontakt yöntem olarak öne çıkmaktadır. Bu teknoloji, giriş sinyaline tepki olarak tekrarlanabilir hacimlerde pikolitre seviyesinde damlacıklar püskürterek, yüksek hassasiyetle malzeme birikimini sağlar. Dijital kontrol mekanizması, aynı makine tarafından basılan her desenin, birbiriyle benzer olabildiği kadar birbirinden farklı olabildiğini mümkün kılar. 1970'lerde ticari olarak kullanılmaya başlanan bu teknoloji, ilk olarak düşük çözünürlüklü metinlerin basılması amacıyla kullanılmıştır. Ancak, yıllar içinde önemli bir evrim geçiren mürekkep püskürtmeli baskı teknolojisi, günümüzde çok yüksek çözünürlükte desenler basabilen, yüksek doğruluk ve tekrarlanabilirlik sunan bir sistem haline gelmiştir. Bu olgunlaşmış teknoloji, fonksiyonel

malzemelerin hassas bir şekilde yerleştirilmesini sağlayarak, çeşitli endüstrilerde, özellikle elektronik, biyoteknoloji ve nano-teknoloji gibi alanlarda geniş uygulama potansiyeline sahiptir (Chivate ve Zhou, 2024).



Şekil 3.4. SLM ile üretim süreci (Tezel, 2019)

SLA, 3B baskı teknolojilerinde yaygın olarak kullanılan bir yöntem olup, fotoinisiyatorlü polimerizasyon ile sıvı reçinelerin katılaştırılmasını sağlar. SLA baskı işleminde, reçineyi kürlemek için özel dalga boylarına sahip lazer ışıkları kullanılır. Bu teknik, baskı yönüne göre iki farklı yöntemle uygulanabilir: yukarıdan aşağıya ve aşağıdan yukarıya. Yukarıdan aşağıya yaklaşımında, reçine banyosunun yüzeyi üzerine inşa platformu yükseltilirken, lazer ışığı reçinenin üst yüzeyine düşürülerek polimerizasyon başlatılır. Aşağıdan yukarıya yaklaşımında ise, lazer ışığı alt taraftan verilir ve katmanlar, yerçekimi etkisiyle reçineyle doldurularak oluşturulur. SLA baskı tekniği, yüksek çözünürlük ve hassasiyet sunarak eklemeli imalat teknolojileri arasında önemli bir yere sahiptir. Ancak, bu teknolojinin bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Ekipman maliyetlerinin yüksekliği, kimyasal atıkların oluşumu, baskı sonrası işlemlerin gerekliliği ve çözünürlük ile verimlilik arasında denge sağlanması gerektiği gibi zorluklar mevcuttur. Ayrıca, kullanılan fotoinisiyatorlerin ve monomerlerin sitotoksik etkiler yaratma riski bulunmaktadır. Bu nedenle, SLA teknolojisinin verimliliğini artırmak ve baskı hatalarını azaltmak için fotopolimer özelliklerinin daha iyi anlaşılması, kürleme kinetiği, ışığa duyarlılık ve derinlik penetrasyonu gibi faktörlerin dikkate alınması önemlidir (Kumar vd., 2024).

Stereolitografi sürecinde ortaya çıkabilecek hatalar, nihai ürünün kalitesini etkileyebilir. Bu hatalar arasında, sarkma parçalarında alt katmanla birleşme olmaması nedeniyle meydana gelen aşırı kürlenme ve tarama işlemi sırasında oluşan hatalar yer alır. Ayrıca, reçinenin yüksek viskoziteye sahip olması, katman kalınlıklarının değişkenlik göstermesine neden olabilir ve bu durum kenar pozisyonlarının kontrolünde hatalara yol

açar. Bazı parçaların, baskı sonrası elle yapılan yüzey işlemleri sırasında da kusurlar meydana gelebilir. Bununla birlikte, yüksek kaliteli ekipman ve gelişmiş yazılım kullanılarak bu tür hataların minimize edilmesi mümkündür. Bir başka önemli gelişme, “çoklu malzeme stereolitografisi” olarak adlandırılan ve bir baskı sırasında farklı malzemelerin kullanılmasına olanak tanıyan teknolojidir. Bu süreçte, mevcut reçine tamamen boşaltılır ve baskı sırasında malzeme değişikliği gerektiğinde yeni bir malzeme ile değiştirilir. Malzeme değişimi yapılırken, yeni katmanların ardışık olarak yazdırılabilmesi için yazılımın uygun şekilde planlama yapması gerekmektedir (Wong ve Hernandez, 2012). SLA, özellikle karmaşık geometrilere sahip nano kompozitlerin üretiminde etkili bir yöntem olarak öne çıkmaktadır. Bu teknolojinin sunduğu hassasiyet ve yüksek çözünürlük, mühendislik ve tıbbi uygulamalarda yaygın bir şekilde kullanılmasını sağlamaktadır. Bununla birlikte, malzeme çeşitliliğini artırmaya yönelik çalışmalar, SLA'nın endüstriyel uygulamalarını daha da genişletebilir.

Doğrudan Enerji Biriktirme (Direct Energy Deposition, DED), teknolojisi, son yıllarda büyük ilgi gören ve gelişen bir eklemeli imalat tekniğidir. Bu teknoloji, genellikle lazer ısıtma kaynağı, çok eksenli bir kontrol sistemi ve besleme sistemi içeren bir yapıya sahiptir. DED, lazer kullanarak aktif bir sıvı havuz oluşturur ve besleme sistemi, metal tozlarını bu havuza ileterek katman katman malzeme biriktirir. Bu süreçte inert gaz kullanılarak oksidasyonu önlemek için koruyucu bir gaz atmosferi sağlanır. DED'nin PBF teknolojisinden belirgin farkları bulunmaktadır. İlk olarak, DED büyük ölçekli parçaların üretimine olanak tanır, çünkü materyalin ekstrüzyon temelli birikintisi nedeniyle üretim odası boyutu üzerinde bir sınırlama yoktur. Ayrıca, DED, üretim süreci sırasında besleme malzemesinin değiştirilmesiyle fonksiyonel gradyanlı malzemelerin verimli bir şekilde üretilmesini sağlar. DED tekniği, çok eksenli nozüllerle çalışarak malzeme biriktirmede esneklik sunar ve bu da onu hasar görmüş parçaların onarımı için uygun hale getirir. Ancak, PBF sisteminden farklı olarak, DED sisteminde her katmanı üretmeden önce toz malzemenin düzleştirilmesini sağlayan bir yeniden kaplama sistemi bulunmaz. Bu eksiklik, katmanlar arasında üretim hatalarının birikmesine yol açabilir ve DED ile üretilen ürünlerin doğruluğunu PBF'ye kıyasla düşürebilir. Buna rağmen, DED, büyük ölçekli üretim ve onarım işlemleri için etkili bir yöntem olarak dikkat çekmektedir (Mavd., 2024).

Çalışmada kullanılan SLM tekniği, yüksek hassasiyetli ve karmaşık geometrilerin üretimine olanak tanıyan bir eklemeli imalat yöntemi olarak, özellikle AlSi10Mg gibi alüminyum alaşımlarının işlenmesinde oldukça uygundur. Bu çalışmada da, SLM tekniği kullanılarak üretilen AlSi10Mg parçalar tercih edilmiştir. Bu alaşım, yüksek termal iletkenlik, düşük yoğunluk ve iyi mekanik dayanım özellikleri ile ön plana çıkmaktadır. Ayrıca, AlSi10Mg'nin iyi döküm özellikleri ve ısıtma işlem uygulanabilirliği, karmaşık geometrilerin üretiminde bu malzemeyi ideal bir seçenek haline getirmiştir. SLM tekniği, toz halindeki AlSi10Mg malzemesini bir lazer ışını yardımıyla seçici olarak eritip katman katman birleştirerek hedeflenen parçanın yüksek hassasiyetle üretilmesini sağlar. Bu yöntemin sağladığı avantajlardan biri, geleneksel üretim yöntemleriyle üretilmesi zor veya imkânsız olan karmaşık tasarımların kolaylıkla oluşturulabilmesidir. Çalışmada kullanılan AlSi10Mg parçalar, topoloji optimizasyonu ile tasarlanan geometrilere sahip olup, bu malzemenin mükemmel termal ve mekanik özelliklerini optimize edilmiş yapılarla birleştirerek termal performansın artırılmasını hedeflemiştir. Bu bağlamda, SLM ile üretilen AlSi10Mg parçalar, çalışmanın temel malzemesi olarak seçilmiştir.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Isı Alıcının Nümerik Analizi

Topoloji optimizasyonu sürecinde kullanılan parametreler, her aşamanın performansını belirlemede önemli bir rol oynamaktadır. Topoloji optimizasyonunda, özellikle yoğunluk tabanlı yöntemler kullanıldığında, üye boyutu kısıtlaması, nihai tasarımda yer alan bağlı parçaların boyutlarını belirlemek için önemli bir parametredir. Bu kısıtlama, parçaların en düşük ve en yüksek kalınlıkları tanımlamak amacıyla kullanılabilir. En düşük boyut, program tarafından veya manuel olarak ayarlanabilir; varsayılan durumda, uygulama, ağ elemanının boyutunun 2,5 katı kadar bir minimum değer belirler. En yüksek boyut da benzer şekilde, üretim süreçlerine uygunluğu sağlamak amacıyla manuel olarak tanımlanabilir. Bu kısıtlamalar, yapısal optimizasyon çözümünün daha doğru ve uygulanabilir bir şekilde elde edilmesine olanak tanır, çünkü tasarımda kullanılan ağ boyutlarına dayalı olarak minimum ve maksimum sınırlar belirlenir. Bu sayede, tasarımın üretilebilirliği ve işlevselliği artırılır. Topoloji optimizasyonunda, penaltı faktör (sertlik), analiz sırasında yapısal sertlik matrisine uygulanan bir parametredir. Bu ceza faktörü, sertlik matrisinin psödodensite ile doğrusal olarak ölçeklenmesini engellemeye yöneliktir. Her iterasyonda, gerekli olduğu durumlarda sertlik, belirli bir formüle göre düzeltilir ve bu, optimizasyon sürecinin doğruluğunu artırır. Bu özellik, çözümün daha dengeli ve gerçekçi olmasını sağlarken, yapısal tasarımda daha verimli ve üretilebilir sonuçların elde edilmesine olanak tanır. Varsayılan ceza faktörü değeri 3 olup, bu değer, optimizasyonun istikrarlı bir şekilde ilerlemesine yardımcı olur (*Structural Optimization Analysis Guide*, 2024).

Çalışmada, mesh boyutu 0,85 mm, üye boyutu parametresi için 0,75-1 mm aralıkları tercih edilmiştir. Penaltı faktör olarak ise 3 ve 5 değerleri kullanılmıştır. Topoloji optimizasyonu sırasında ağırlık, sırasıyla %50, %45, %40, %35, %30 ve %25 oranlarında korunmuş, böylece farklı hacim kısıtlamalarındaki sonuçlar elde edilmiştir. Üye boyutu 0,75-1 mm ve penaltı faktörü 3 parametreleriyle yapılan optimizasyonun sonuçları, aşağıda detaylı bir şekilde gösterilmiştir. Bu koşullar altında elde edilen sonuçlar, başlangıç geometrisinin ağırlığındaki değişimin termal iyileşmeye yönelik etkilerini açıkça yansıtmaktadır.



Şekil 4.1. Ağırlıkça %50 hafifletilmiş ısı alıcı geometrisi

Şekil 4.1’de, topoloji optimizasyonunun sonucunda ağırlıkça %50 hafifletilmiş ısı alıcı geometrisine ait model yer almaktadır. Bu model, toplamda 126 iterasyon sonucunda elde edilmiştir. Yapılan optimizasyon sonucu, ısıнын uzaklaştırılmasına yardımcı olacak kanatçıklar tasarlanmış ve bu tasarım, termal verimliliğin artırılması amacıyla önemli bir çözüm sunmuştur. İlgili görseller, başlangıç geometrisinin ağırlığındaki değişimin termal iyileşme açısından nasıl bir etkisi olduğunu net bir şekilde ortaya koymaktadır.

Şekil 4.2’de, topoloji optimizasyonunun sonucunda ağırlıkça %55 hafifletilmiş ısı alıcı geometrisine ait model yer almaktadır. Analiz 153 iterasyon boyunca gerçekleştirilmiş ve sonuç olarak optimize edilmiş bir model ortaya çıkmıştır. Model, ısıyı etkili bir şekilde uzaklaştırabilmesi için optimize edilmiş kanatçık yapılarına sahiptir ve bu kanatçıklar belirli yönlerde düzenlenerek ısıнын transferini kolaylaştırmayı hedeflemektedir. Bu optimizasyon süreci, hem geometrik hem de termal açıdan verimli bir tasarım elde etmeyi amaçlamıştır.



Şekil 4.2. Ağırlıkça %55 hafifletilmiş ısı alıcı geometrisi

Şekil 4.3’te, belirlenen sınır koşulları altında gerçekleştirilen analiz sonucunda elde edilen optimize edilmiş bir model yer almaktadır. Modelin ağırlıkça %60’ına indirildiği görülmektedir. Topoloji optimizasyon süreci 124 iterasyon boyunca sürdürülmüş ve sonuç olarak, ısı transferini kolaylaştırmak amacıyla tasarlanmış kanatçık yapıları oluşmuştur. Elde edilen bu model, hem yapısal dayanımı hem de ısı verimliliği artıracak şekilde optimize edilmiştir.

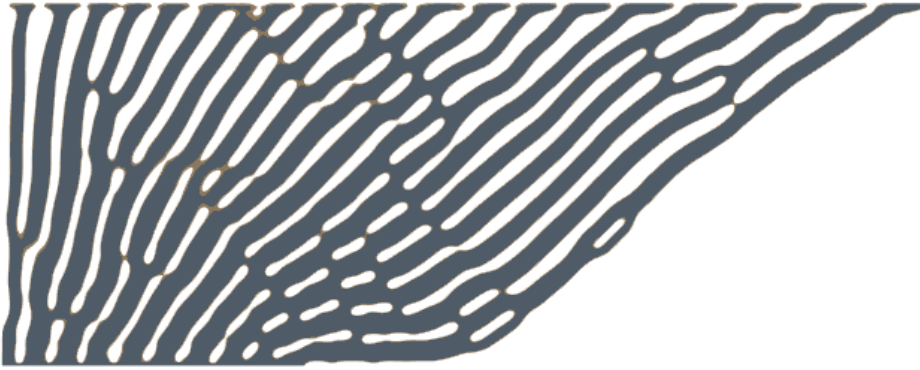
Şekil 4.4’te, belirlenen sınır koşullarına göre yapılan analiz sonucunda optimize edilmiş bir model yer almaktadır. Bu analizdeki modelin, başlangıç ağırlığına göre %65 ağırlıkça azaltılmıştır. Optimizasyon süreci 131 iterasyon sonunda tamamlanmış ve ısıнын etkili bir şekilde dağıtılmasını sağlayacak kanatçık yapıları elde edilmiştir. Bu sonuç, yapısal dayanıklılığı korurken termal performansı artırmak amacıyla gerçekleştirilen başarılı bir topoloji optimizasyonunu göstermektedir.

Şekil 4.5’te, belirli sınır koşulları altında gerçekleştirilen analiz sonucunda optimize edilmiş bir model sunulmaktadır. Bu analizde, başlangıç ağırlığına göre %70 azaltılması hedeflenmiştir. Analiz süreci 1474 iterasyon boyunca devam etmiş ve sonunda ısıнын etkili bir şekilde uzaklaştırılmasını sağlayacak kanatçık yapıları ortaya

ıkmıştır. Elde edilen bu model, termal yönetim ve yapısal verimlilik açısından optimize edilmiş bir tasarım rneęi olarak değerlendirilebilir.



şekil 4.3. Ağırlıkça %60 hafifletilmiş ısı alıcı geometrisi



şekil 4.4. Ağırlıkça % 65 hafifletilmiş ısı alıcı geometrisi



şekil 4.5. Ağırlıkça %70 hafifletilmiş ısı alıcı geometrisi

Şekil 4.6'da, belirlenen sınır koşulları altında gerçekleştirilen analiz sonucunda optimize edilmiş bir model yer almaktadır. Bu analizde, başlangıç ağırlığına göre %75 ağırlıkça azaltılacak şekilde tanımlanmıştır. Topoloji optimizasyonu, 181 iterasyon sonucunda tamamlanmış ve ısının etkin bir şekilde uzaklaştırılmasını sağlayacak şekilde tasarlanmış kanatçık yapıları elde edilmiştir. Bu model hem termal hem de yapısal performansı en üst düzeye çıkarmak için başarılı bir şekilde optimize edilmiştir.

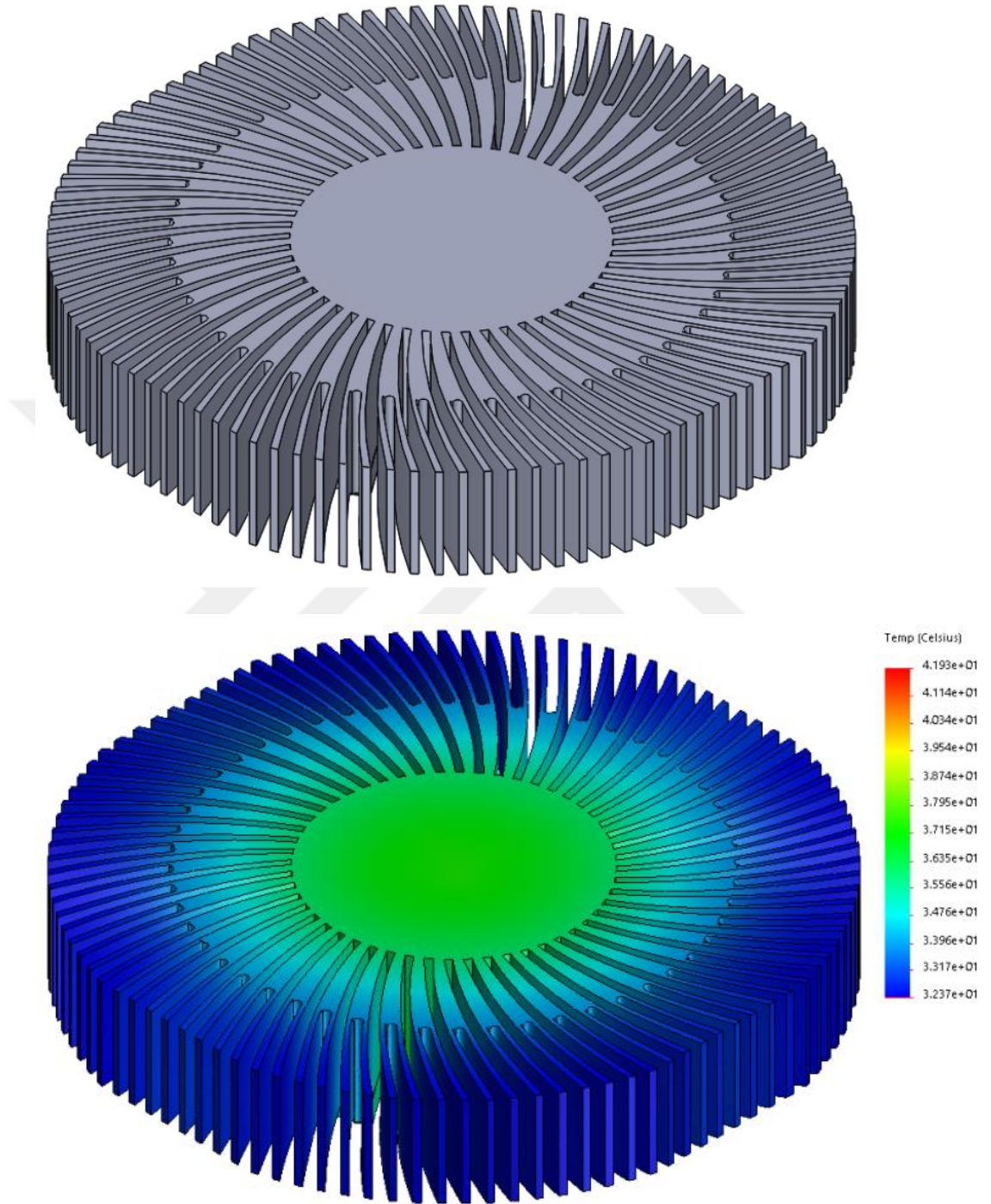


Şekil 4.6. Ağırlıkça %75 hafifletilmiş ısı alıcı geometrisi

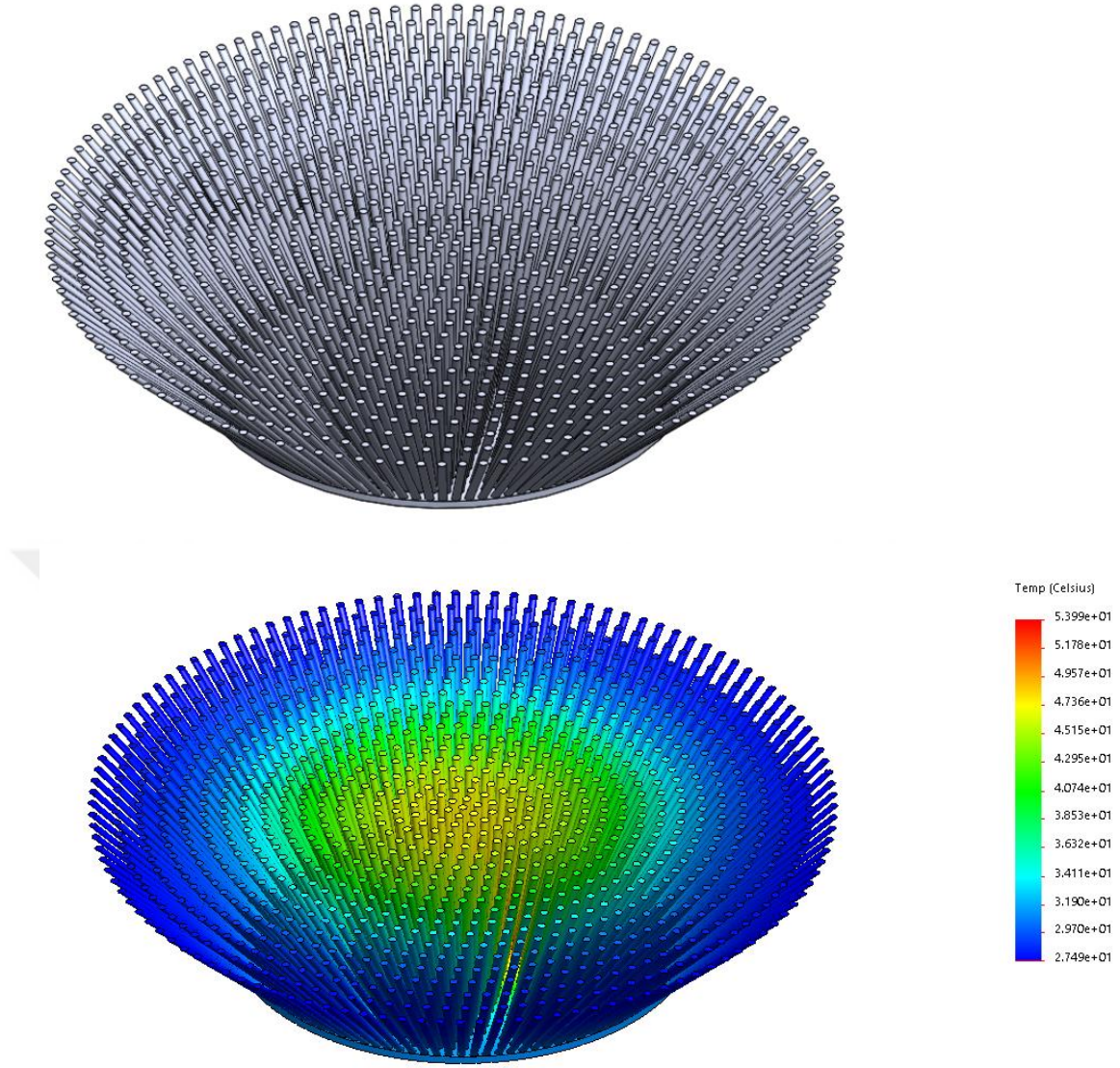
Çalışmada elde edilen topoloji optimizasyonu sonuçları baz alınarak modellenen ısı alıcılar ve referans ısı alıcı geometrileri nümerik analiz yöntemiyle karşılaştırılmıştır. Nümerik analiz ANSYS Workbench üzerinde kararlı hal termal analiz olarak yapılmıştır. Sınır koşulları konveksiyon $50 \text{ W/m}^2\cdot\text{C}$; ısı gücü ise 50 W olarak seçilmiştir. Görselde, sıcaklık dağılımı renk skalası ile belirtilmiş olup, yüksek sıcaklıklar kırmızı ve sarı tonlarında, düşük sıcaklıklar ise mavi ve yeşil tonlarında gösterilmiştir. Topoloji optimizasyonu sonuçları ile tasarlanan ısı alıcıların termal performansının artması hedeflenmiştir. Şekil 4.7'de referans ticari ısı alıcının termal sıcaklığının en yüksek değeri $41,9^\circ\text{C}$; en düşük değeri $32,3^\circ\text{C}$ 'dir.

Şekil 4.8'de yer alan ısı alıcı-1 geometrisinin termal analizi, en yüksek sıcaklık değerinin $53,9^\circ\text{C}$, en düşük sıcaklık değerinin ise $27,4^\circ\text{C}$ olduğunu göstermektedir. Bu geometri topolojik olarak optimize edilmiş geometrileri oldukça yakın bir geometrik tasarımdır. Bu sonuçlar, referans ısı alıcı ile karşılaştırıldığında önemli farklar ortaya koymaktadır; en yüksek sıcaklık değerinin artması, ısı alıcı-1'in ısıyı daha verimli bir şekilde toplama ve daha yüksek sıcaklık seviyelerine ulaşma kapasitesine sahip olduğunu göstermektedir. Aynı zamanda, en düşük sıcaklık değerindeki düşüş ise tasarımın ısıyı etkili bir şekilde dağıtarak daha iyi bir soğuma performansı sunduğunu ve bu sayede yüzeyde daha düşük sıcaklık seviyelerine ulaşıldığını ortaya koymaktadır. En yüksek sıcaklıktaki bu artış, ısı alıcı-1'in yüksek ısı toplama kapasitesini desteklerken, en düşük sıcaklıkta görülen düşüş, tasarımın soğutma stratejilerinin başarılı bir şekilde uygulandığını ve daha dengeli bir sıcaklık dağılımı sağladığını kanıtlamaktadır. Bu sonuçlar, topoloji optimizasyonu ile elde edilen tasarımın yalnızca termal verimliliği artırmakla kalmayıp, aynı zamanda ısı yönetimi ve dağılım performansını da iyileştirdiğini ortaya koymaktadır. Isı alıcı-1'in referans ısı alıcıya kıyasla hem daha verimli hem de daha dengeli bir termal performans sunduğu açıkça görülmektedir. Bu

analiz, topoloji optimizasyonunun termal tasarımlarda yenilikçi çözümler geliřtirmek için ne kadar etkili bir araç olduğunu bir kez daha göstermektedir.

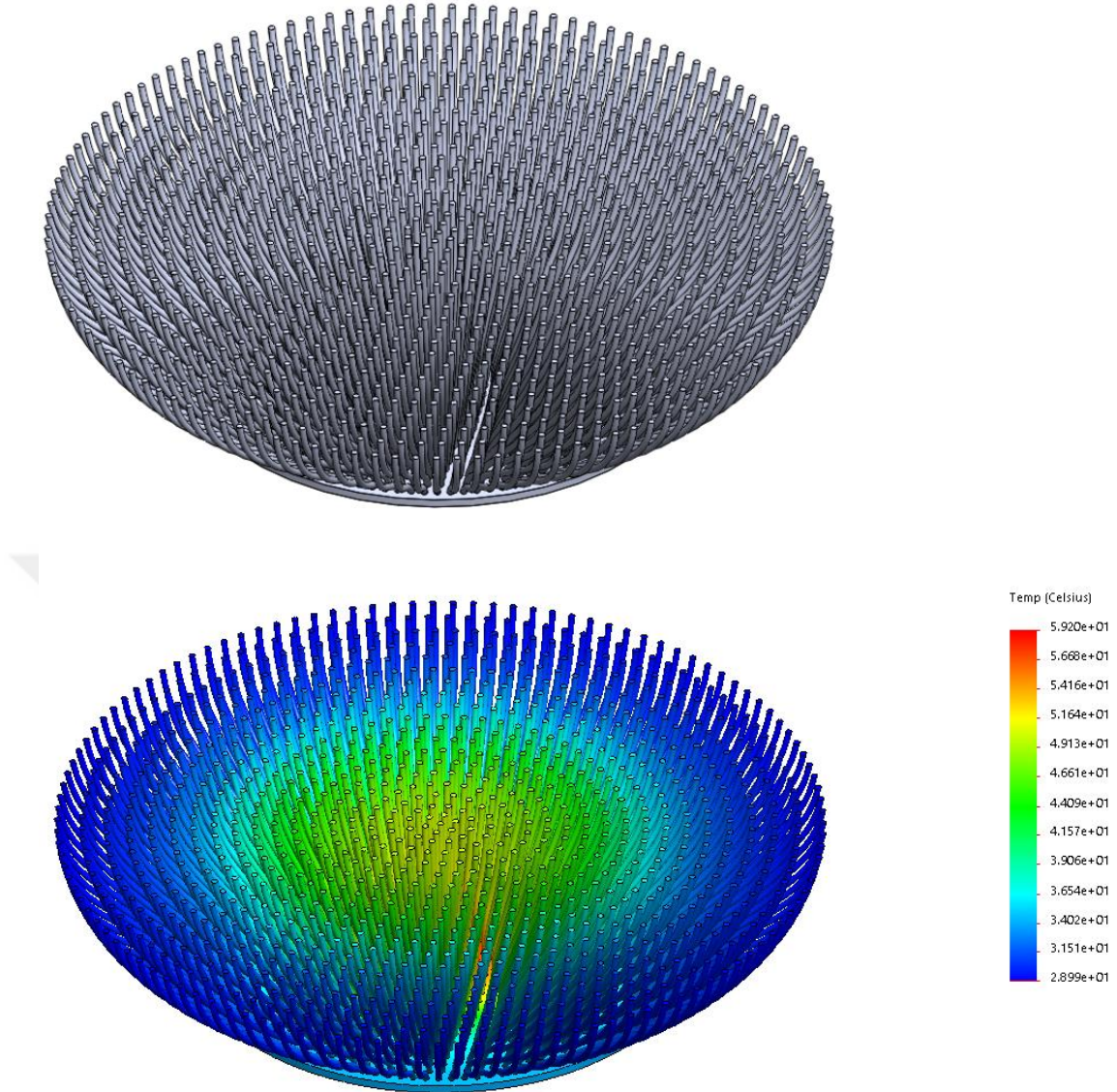


şekil 4.7. Ticari ısı alıcı geometrisi ve termal analizi



Şekil 4.8. Isı alıcı-1 geometrisi ve termal analizi

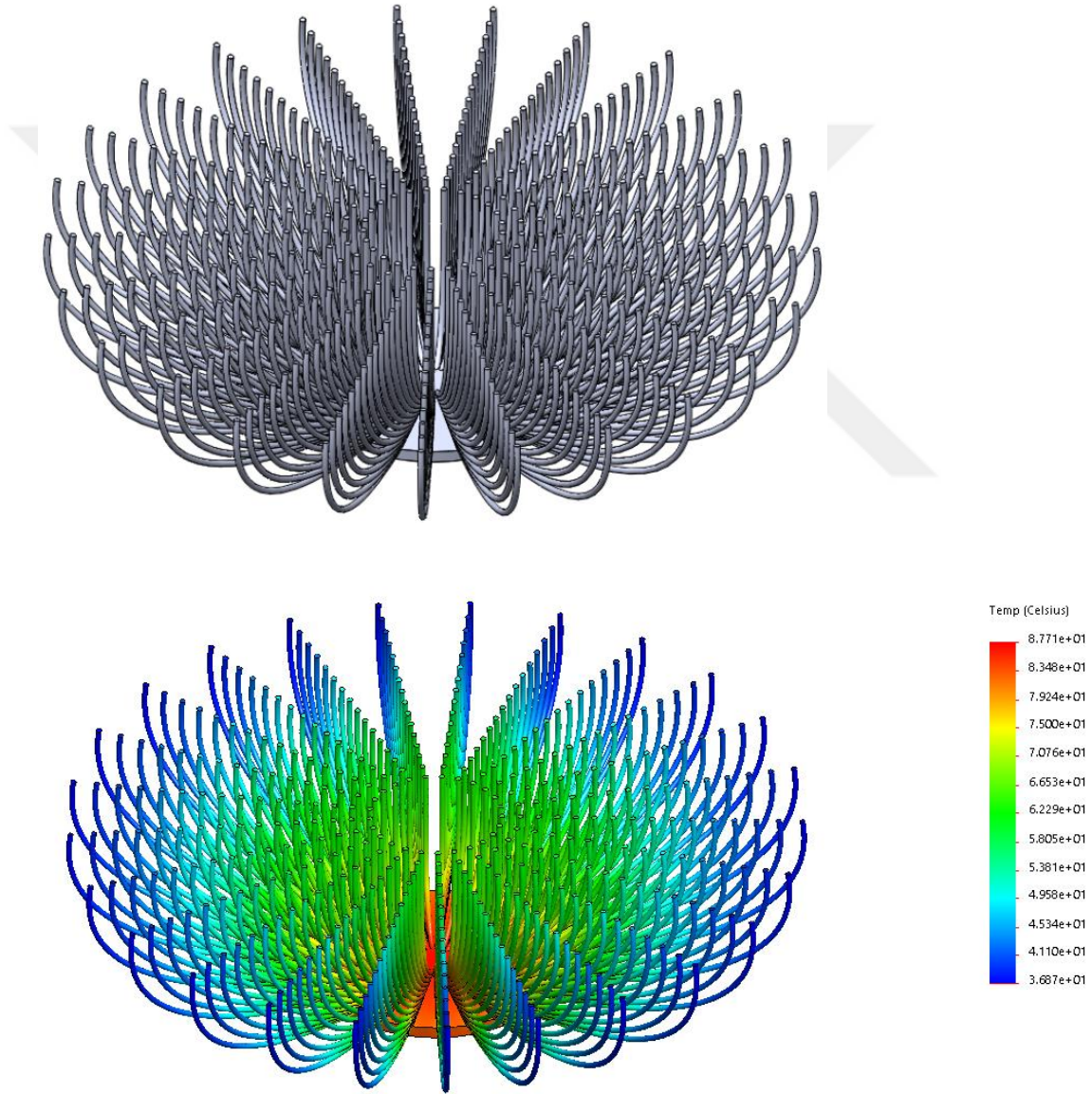
Şekil 4.9'da yer alan ısı alıcı-2 geometrisinin termal analizi sonucunda, en yüksek sıcaklık $59,2^{\circ}\text{C}$, en düşük sıcaklık ise 28°C olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlar, referans ısı alıcı ile karşılaştırıldığında dikkat çekici farklar sunmaktadır. En yüksek sıcaklığın daha yüksek olması, ısı alıcı-2'nin ısıyı daha etkin bir şekilde toplama ve daha yüksek sıcaklık seviyelerine ulaşma kapasitesine sahip olduğunu göstermektedir. Bu durum, ısı alıcı-2'nin enerji toplama ve depolama açısından oldukça etkili bir performans sergilediğini ortaya koymaktadır. Diğer yandan, en düşük sıcaklık değerindeki düşüş, tasarımın ısıyı daha iyi bir şekilde dağıtarak yüzey sıcaklığını dengelediğini ve daha düşük sıcaklıklarda çalışma imkânı sunduğunu göstermektedir. Bu durum, ısı kaybını azaltmaya yönelik bir iyileşmenin yanı sıra, ısı transfer etkinliğinin artışı da işaret etmektedir.



Şekil 4.9. Isı alıcı-2 geometrisi ve termal analizi

Isı alıcı-2'nin tasarımı, referans ısı alıcı ile karşılaştırıldığında hem yüksek sıcaklık seviyelerine ulaşma hem de daha düşük sıcaklıklarda çalışma performansı açısından belirgin bir üstünlük sağlamaktadır. En yüksek sıcaklığın artması, ısı toplama kapasitesinin ve enerji yoğunluğunun etkili bir şekilde artırıldığını ortaya koyarken, en düşük sıcaklıktaki düşüş, tasarımın ısıyı yüzey boyunca daha dengeli bir şekilde dağıtma kabiliyetini yansıtmaktadır. Bu tasarım, yalnızca termal verimlilik açısından değil, aynı zamanda yüzey sıcaklık dengesi ve ısı kaybını azaltma stratejileri bakımından da optimize edilmiş bir yapıya sahiptir. Elde edilen sonuçlar, topoloji optimizasyonu ile geliştirilen tasarımların mühendislik uygulamalarında ısı yönetimi sorunlarını çözme potansiyelini açıkça göstermektedir. Bu, ısı alıcı-2'nin termal performansının referans modele kıyasla daha verimli ve dengeli bir çözüm sunduğunu bir kez daha kanıtlamaktadır.

Şekil 4.10'da yer alan ısı alıcı-3 geometrisinin termal performansı incelendiğinde, en yüksek sıcaklık $87,7^{\circ}\text{C}$, en düşük sıcaklık ise $36,8^{\circ}\text{C}$ olarak belirlenmiştir. Bu veriler, referans ısı alıcıyla karşılaştırıldığında, hem en yüksek hem de en düşük sıcaklıkların daha yüksek olduğunu göstermektedir. En yüksek sıcaklık artışı, ısı alıcı-3'ün ısıyı daha verimli bir şekilde toplama kapasitesine sahip olmadığı ve daha yüksek sıcaklık seviyelerine ulaşmasının, ısı alıcısının aşırı ısınmaya neden olduğunu göstermektedir. Aynı şekilde, en düşük sıcaklık artışı, tasarımın daha etkili bir soğuma ve ısı dağılımı stratejisi uygulamaması nedeniyle, ısı alıcısının daha yüksek sıcaklıklarla çalışmasına ve potansiyel verimlilik kayıplarına yol açmaktadır. Bu durum, ısı alıcı-3'ün, referans ısı alıcıya kıyasla daha yüksek sıcaklık değerleriyle çalışmasının, termal performans açısından olumsuz sonuçlar doğurduğunu ortaya koymaktadır.

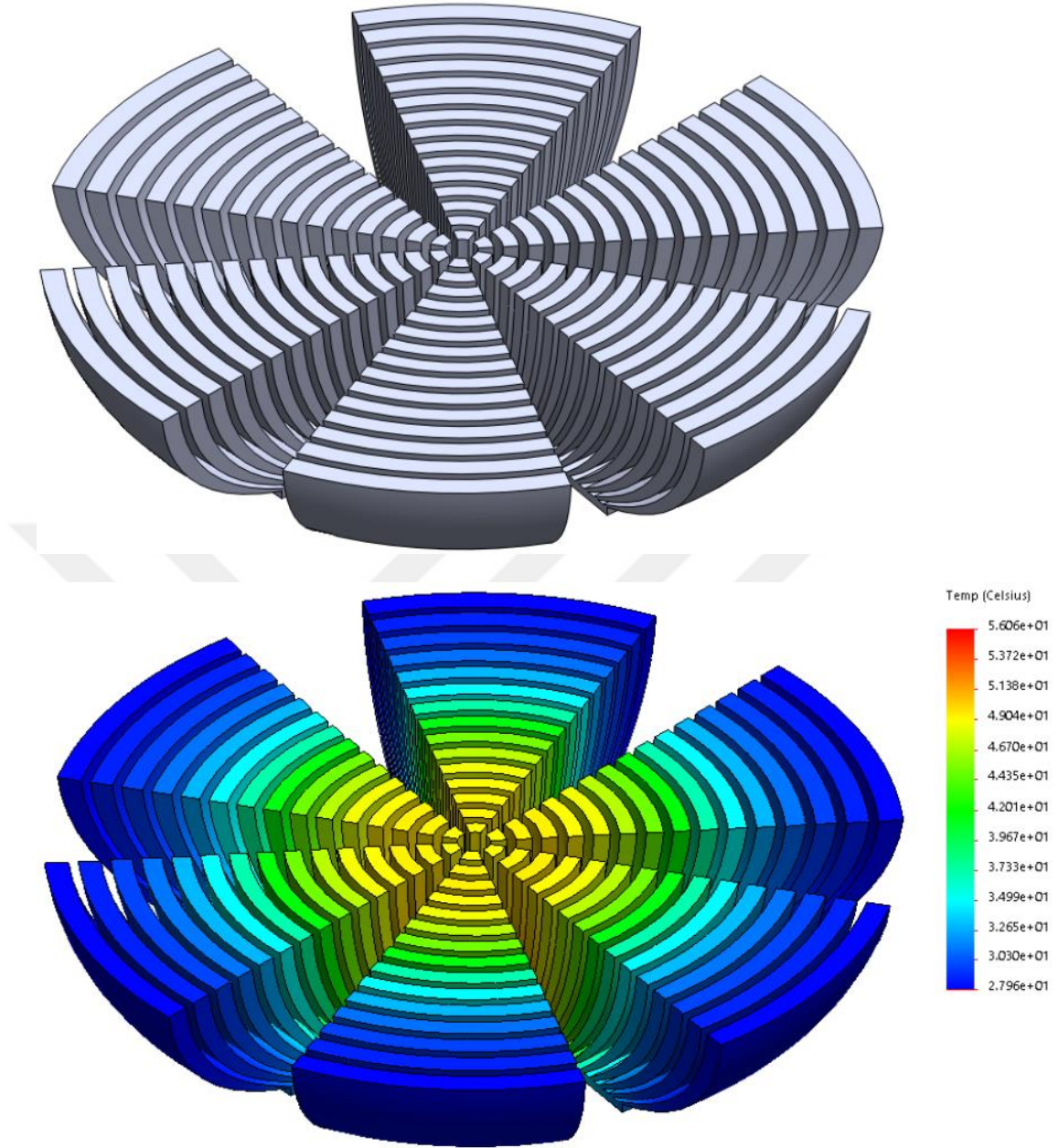


Şekil 4.10. Isı alıcı-3 geometrisi ve termal analizi

Şekil 4.10'da sunulan ısı alıcı-3 geometrisinin termal performans analizi, en yüksek sıcaklığın $87,7^{\circ}\text{C}$, en düşük sıcaklığın ise $36,8^{\circ}\text{C}$ olduğunu göstermektedir. Bu değerler, referans ısı alıcı ile karşılaştırıldığında hem en yüksek hem de en düşük sıcaklıkların belirgin şekilde daha yüksek olduğunu ortaya koymaktadır. En yüksek sıcaklıktaki bu artış, ısı alıcı-3'ün ısıyı verimli bir şekilde dağıtamadığını ve bu durumun ısı alıcısında aşırı ısınmaya neden olduğunu işaret etmektedir. Benzer şekilde, en düşük sıcaklık değerinin yükselmesi, tasarımın etkili bir soğuma mekanizması sağlayamaması nedeniyle ısı dağılımının yetersiz kaldığını göstermektedir. Bu sonuçlar, ısı alıcı-3'ün hem ısı toplama hem de dağıtma süreçlerinde önemli verimlilik kayıplarına yol açtığını ve termal performansının referans ısı alıcıya kıyasla daha düşük bir etkinlik sunduğunu ortaya koymaktadır. Isı alıcı-3'ün tasarımı, daha dengeli bir sıcaklık dağılımı ve aşırı ısınmayı önleyecek bir optimizasyon sürecine ihtiyaç duyduğunu göstermektedir.

Şekil 4.11'de gösterilen ısı alıcı-4 geometrisinin termal analiz sonuçları, en yüksek sıcaklık değerinin $56,0^{\circ}\text{C}$, en düşük sıcaklık değerinin ise $27,9^{\circ}\text{C}$ olduğunu ortaya koymaktadır. Bu değerler, referans ısı alıcıyla karşılaştırıldığında, en yüksek sıcaklığın daha yüksek, en düşük sıcaklığın ise daha düşük olduğunu göstermektedir. En yüksek sıcaklıktaki artış, ısı alıcı-4'ün tasarımının, ısıyı daha verimli bir şekilde toplama ve yüzey üzerinde daha yüksek enerji yoğunluğuna ulaşma kapasitesine sahip olduğunu kanıtlamaktadır. Bu özellik, ısı alıcının termal yönetim açısından güçlü bir toplama performansı sergilediğini ve sıcaklık artışının, tasarımın enerji verimliliğini artırmaya yönelik başarılı bir strateji izlediğini göstermektedir. Bununla birlikte, en düşük sıcaklık değerinin referans modele kıyasla daha düşük olması, ısı alıcı-4'ün yalnızca ısı toplama konusunda değil, aynı zamanda soğuma ve ısı dağılımı konularında da etkili olduğunu göstermektedir. Bu düşüş, ısı alıcının yüzey boyunca dengeli bir ısı dağılımı sağlayarak soğutma performansını optimize ettiğini ve termal yüklerin daha etkin bir şekilde yönetildiğini işaret etmektedir. Böyle bir tasarım, hem daha düşük yüzey sıcaklıklarında çalışabilmeyi hem de yüzeyde homojen bir sıcaklık profili sunmayı mümkün kılarak, ısı kaybını azaltan ve termal dengeyi sağlayan bir yapı sunmaktadır.

Isı alıcı-4'ün termal performansı, referans modelle kıyaslandığında, hem en yüksek sıcaklık artışıyla enerji toplama kapasitesinde bir gelişme sağlarken hem de en düşük sıcaklık düşüşüyle etkili bir soğutma ve termal dengeleme sürecini desteklemektedir. Bu, ısı alıcı-4'ün tasarımının, ısı transferinde verimliliği artırmak ve termal dengeyi optimize etmek için oldukça başarılı bir çözüm sunduğunu göstermektedir. Özetle, ısı alıcı-4, hem yüksek sıcaklık seviyelerinde enerji toplama kabiliyeti hem de düşük sıcaklıklarda termal performansı dengeleme kapasitesi ile dikkat çekmektedir. Bu sonuçlar, topoloji optimizasyonu ile elde edilen tasarımın, mühendislik uygulamalarında dengeli ve yüksek verimli bir çözüm sunduğunu kanıtlamaktadır ve gelecekteki termal yönetim uygulamaları için potansiyel bir referans noktası olarak değerlendirilebilir.

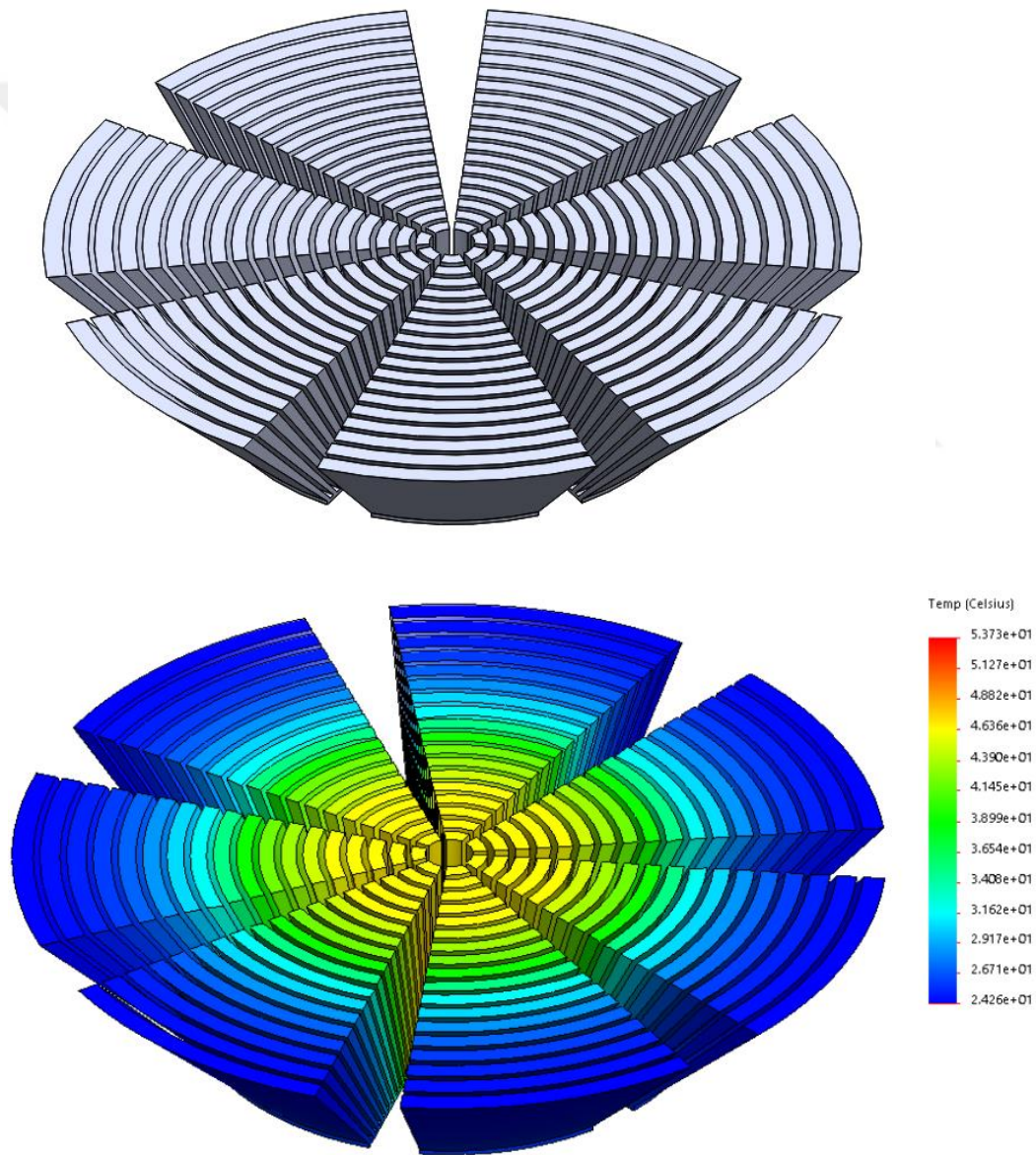


Şekil 4.11. Isı alıcı-4 geometrisi ve termal analizi

Şekil 4.12'de yer alan ısı alıcı-5 geometrisinin termal performansı incelendiğinde, en yüksek sıcaklık $53,7^{\circ}\text{C}$, en düşük sıcaklık ise $24,2^{\circ}\text{C}$ olarak belirlenmiştir. Bu veriler, referans ısı alıcıyla karşılaştırıldığında, en yüksek sıcaklığın daha yüksek olmasına rağmen en düşük sıcaklığın daha düşük olduğunu göstermektedir. En yüksek sıcaklık artışı, ısı alıcı-5'in tasarımının ısıyı daha etkin bir şekilde toplama ve depolama kapasitesine sahip olduğunu, dolayısıyla daha yüksek bir sıcaklık seviyesine ulaştığını göstermektedir. Buna karşılık, en düşük sıcaklık düşüşü, tasarımın daha verimli bir ısı dağılımı ve soğuma stratejisi uyguladığını, bu sayede daha düşük sıcaklıklarda çalışarak daha etkili bir termal dengeleme sağladığını işaret etmektedir. Bu farklılık, ısı alıcı-5'in, referans ısı alıcıya kıyasla daha yüksek verimlilikle ısı transferi sağlarken, aynı zamanda

daha düşük en düşük sıcaklık ile daha dengeli bir termal performans sergilediğini ortaya koymaktadır.

Şekil 4.12'de sunulan ısı alıcı-5 geometrisinin termal analiz sonuçlarına bakıldığında, en yüksek sıcaklık $53,7^{\circ}\text{C}$, en düşük sıcaklık ise $24,2^{\circ}\text{C}$ olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlar, referans ısı alıcı ile karşılaştırıldığında, en yüksek sıcaklığın arttığını ve en düşük sıcaklığın azaldığını göstermektedir. En yüksek sıcaklıktaki artış, ısı alıcı-5'in tasarımının, ısıyı daha verimli bir şekilde toplama ve yüzeyde enerji yoğunluğunu artırma kapasitesine sahip olduğunu göstermektedir. Bu, tasarımın enerji transferi açısından optimize edildiğini ve termal toplama performansını başarılı bir şekilde artırdığını kanıtlamaktadır.



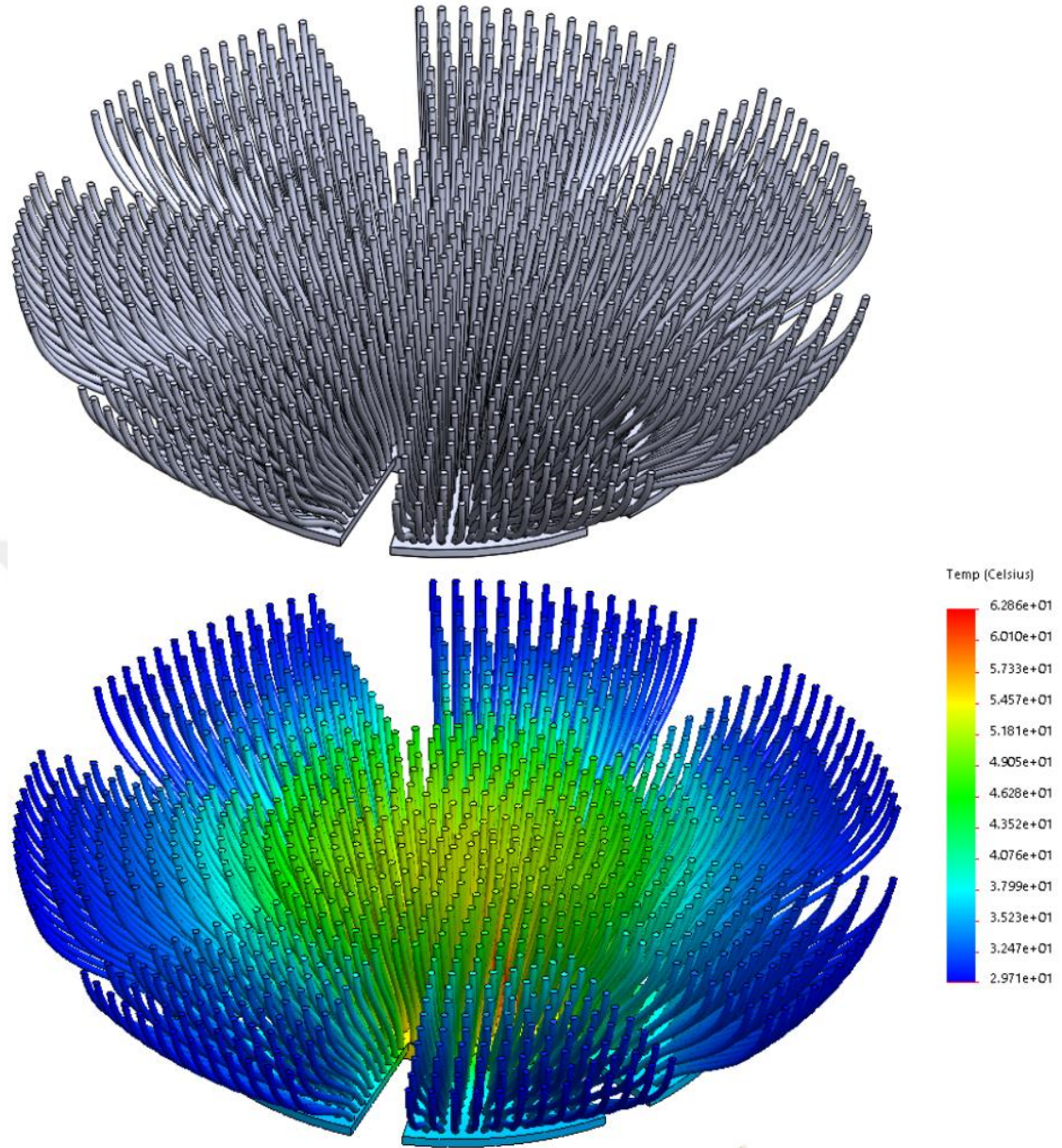
Şekil 4.12. Isı alıcı-5 geometrisi ve termal analizi

En düşük sıcaklıktaki düşüş ise, ısı alıcı-5'in daha etkili bir ısı dağılımı sağlayarak soğuma performansını optimize ettiğini göstermektedir. Bu durum, tasarımın sadece ısı toplama kabiliyetiyle değil, aynı zamanda termal dengeleme ve soğuma stratejilerindeki başarısıyla da öne çıktığını ortaya koymaktadır. Düşük sıcaklık değerleri, yüzey boyunca daha homojen bir sıcaklık dağılımına işaret ederken, bu homojenlik ısı kaybının azaltılması ve sistem verimliliğinin artırılması açısından kritik bir avantaj sağlamaktadır.

Isı alıcı-5, referans modelle kıyaslandığında, hem yüksek sıcaklık seviyelerine ulaşabilme kapasitesi hem de düşük sıcaklık değerlerini koruyarak termal dengeyi sağlama yeteneği ile dikkat çekmektedir. Bu, ısı alıcı-5'in tasarımının ısı transfer performansını artırmak için optimize edilmiş olduğunu ve mühendislik uygulamalarında daha etkili bir çözüm sunduğunu göstermektedir. Sonuç olarak, ısı alıcı-5'in tasarımı, termal yönetim performansı açısından dengeli ve verimli bir sistemin örneği olarak değerlendirilebilir. Hem yüksek enerji toplama kapasitesi hem de düşük sıcaklıklarla çalışarak sağladığı denge, ısı alıcı-5'i, referans ısı alıcıya kıyasla daha üstün bir termal çözüm haline getirmektedir.

Şekil 4.13'te gösterilen ısı alıcı-6 geometrisi üzerine yapılan termal analiz, en yüksek sıcaklık değerini 62,8°C, en düşük sıcaklık değerini ise 29,7°C olarak ortaya koymaktadır. Referans ısı alıcıyla karşılaştırıldığında, bu değerler en yüksek sıcaklığın daha yüksek, en düşük sıcaklığın ise daha düşük olduğunu göstermektedir. En yüksek sıcaklık seviyesinin artışı, ısı alıcı-6'nın tasarım özelliklerinin, ısıyı toplama ve depolama açısından oldukça etkili olduğunu ve bu sayede yüzeyde daha yüksek sıcaklık değerlerine ulaşıldığını göstermektedir. Bu durum, tasarımın enerji birikimi açısından önemli bir avantaj sunduğunu ifade etmektedir. Bunun yanı sıra, en düşük sıcaklık seviyesindeki düşüş, ısı alıcı-6'nın ısıyı etkin bir şekilde dağıtma yeteneğini ve yüzey boyunca dengeli bir sıcaklık profili sağladığını işaret etmektedir. Bu düşüş, aynı zamanda, tasarımın soğuma performansında bir iyileşme sağladığını ve ısı yönetimi stratejilerinin başarılı bir şekilde uygulandığını ortaya koymaktadır. Daha düşük sıcaklık değerleri, ısı kaybının en aza indirildiğini ve termal denge açısından daha verimli bir yapıya ulaşıldığını göstermektedir.

Isı alıcı-6, hem en yüksek hem de en düşük sıcaklık değerlerindeki bu farklılıklar sayesinde, termal yönetim ve ısı transferi açısından etkili bir performans sergilemektedir. Daha yüksek sıcaklık seviyelerinde enerji toplama kapasitesini artırırken, düşük sıcaklıklarla çalışarak ısı kayıplarını minimize etmekte ve sistemin genel verimliliğini yükseltmektedir. Bu analiz, ısı alıcı-6'nın, referans ısı alıcıyla karşılaştırıldığında, dengeli ve optimize edilmiş bir termal çözüm sunduğunu net bir şekilde göstermektedir. Tasarımın bu özellikleri, mühendislik uygulamalarında üstün performans sağlayan bir model olarak değerlendirilebileceğini ortaya koymaktadır.

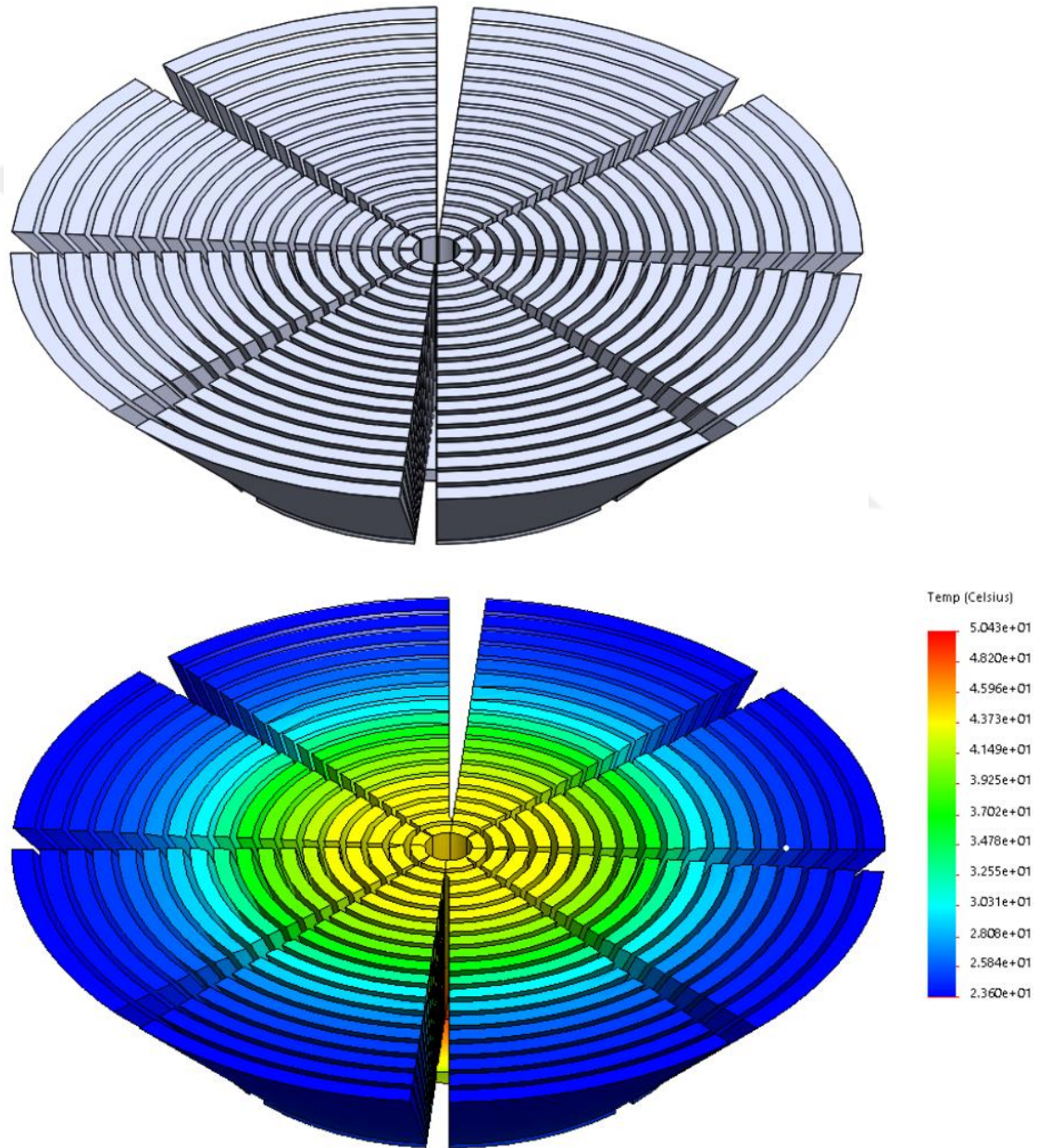


Şekil 4.13. Isı alıcı-6 geometrisi ve termal analizi

Şekil 4.14'te gösterilen ısı alıcı-7 geometrisinin termal analizi, en yüksek sıcaklık değerinin 50°C , en düşük sıcaklık değerinin ise $23,6^{\circ}\text{C}$ olduğunu ortaya koymaktadır. Bu sonuçlar, referans ısı alıcıyla kıyaslandığında, en yüksek sıcaklığın daha yüksek, en düşük sıcaklığın ise daha düşük olduğunu göstermektedir. En yüksek sıcaklıktaki bu artış, ısı alıcı-7'nin ısı toplama ve depolama kapasitesinin önemli ölçüde geliştirilmiş olduğunu ve tasarımın enerji yoğunluğunu artırarak daha yüksek sıcaklıklara ulaşabildiğini ifade etmektedir. En düşük sıcaklıkta gözlemlenen düşüş ise, ısı alıcı-7'nin daha etkili bir soğutma ve ısı dağılımı stratejisi benimsediğini ve böylece yüzeydeki sıcaklık dengesinin optimize edildiğini göstermektedir. Düşük sıcaklık seviyeleri, tasarımın ısı kayıplarını en aza indirirken aynı zamanda sistemin genel termal denge performansını artırdığını işaret etmektedir. Bu durum, ısı alıcı-7'nin hem yüksek sıcaklıklarda enerji toplama yeteneği

hem de düşük sıcaklıklarla çalışarak ısı dağılımını etkili bir şekilde gerçekleştirme becerisini vurgulamaktadır.

Genel olarak, ısı alıcı-7, referans modelle karşılaştırıldığında hem enerji toplama hem de ısı dağılımı açısından daha üstün bir performans sergilemektedir. Tasarım, en yüksek sıcaklık seviyelerindeki artışıyla enerji verimliliğini artırırken, en düşük sıcaklıktaki düşüş ile daha etkili bir soğutma sağlamakta ve termal yönetimi iyileştirmektedir. Bu sonuçlar, ısı alıcı-7'nin dengeli bir termal performans sunduğunu ve gelecekteki mühendislik uygulamaları için optimize edilmiş bir çözüm olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.14. Isı alıcı-7 geometrisi ve termal analizi

Şekil 4.15'te görülen ısı alıcı-8 geometrisinin termal analizi, en yüksek sıcaklığın 48,9°C, en düşük sıcaklığın ise 23,5°C olduğunu göstermektedir. Referans ısı alıcıyla yapılan karşılaştırma, en yüksek sıcaklık değerinin daha yüksek, en düşük sıcaklık değerinin ise daha düşük olduğunu ortaya koymaktadır. Bu durum, ısı alıcı-8'in termal performansında hem enerji toplama hem de ısı dağıtımını açısından dikkate değer bir iyileşme olduğunu işaret etmektedir. En yüksek sıcaklıktaki artış, tasarımın ısıyı toplama ve enerji birikimi sağlama kapasitesinin güçlendiğini ve termal verimliliğin artırılması yönünde başarılı bir iyileştirme yapıldığını göstermektedir. Bu artış, yüzeyde daha yüksek sıcaklık seviyelerine ulaşılmasına olanak tanırken, enerji biriktirme performansını desteklemektedir. Öte yandan, en düşük sıcaklık seviyesindeki düşüş, tasarımın daha etkin bir ısı dağılımı ve soğuma stratejisi uyguladığını göstermektedir. Bu düşüş, ısı transfer mekanizmalarının optimize edilmesiyle birlikte, yüzey sıcaklığında daha dengeli bir dağılımın sağlandığını ve ısı kayıplarının en aza indirildiğini işaret etmektedir.

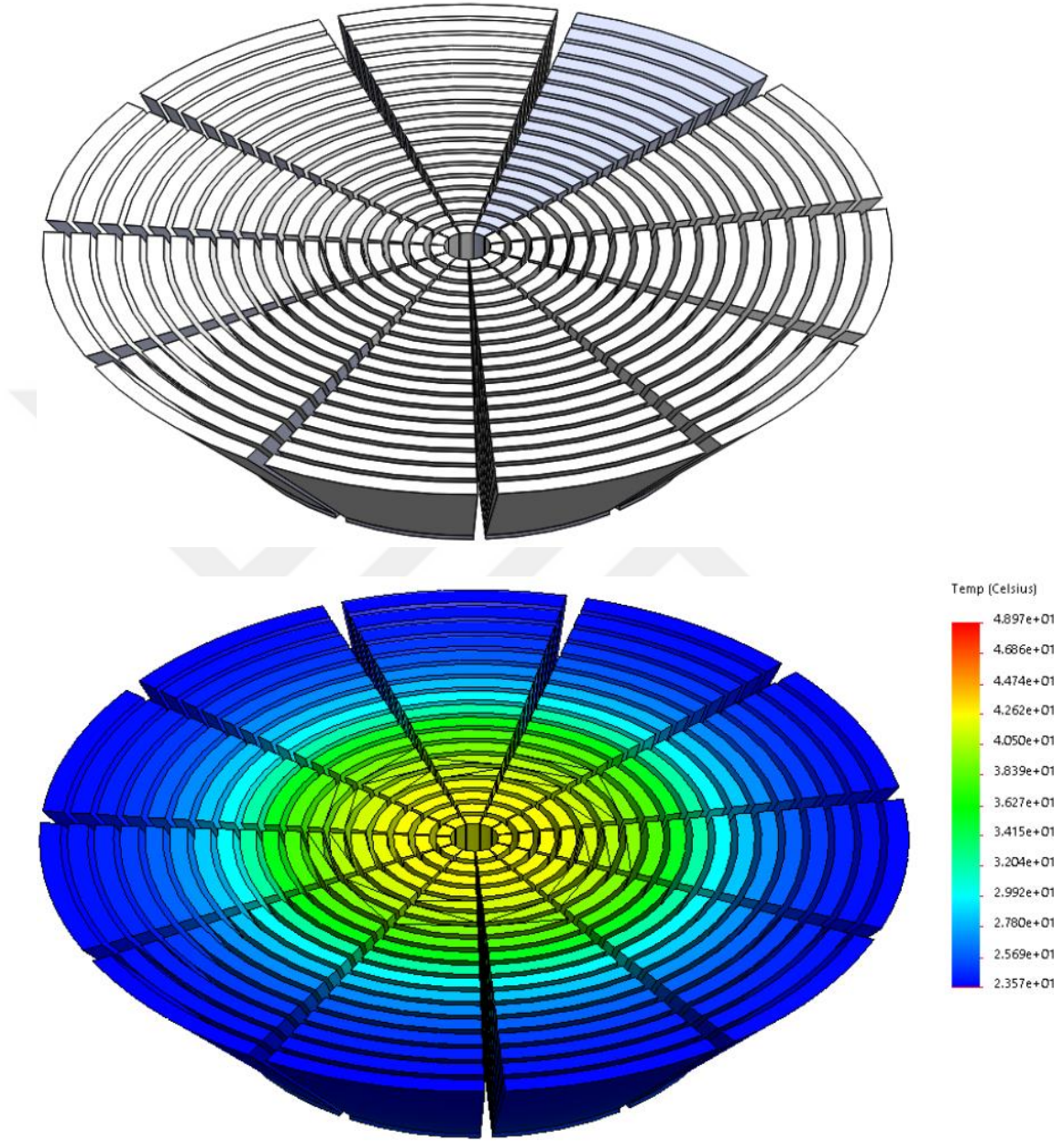
Isı alıcı-8'in tasarımı, hem en yüksek sıcaklık değerindeki artış hem de en düşük sıcaklık değerindeki azalma ile dikkat çekmektedir. Bu özellikler, tasarımın ısı toplama ve dağıtım süreçlerini dengeli bir şekilde optimize ettiğini göstermektedir. Sonuç olarak, ısı alıcı-8, referans ısı alıcıya kıyasla daha verimli bir termal performans sunarak, mühendislik uygulamalarında yüksek verimlilik sağlayan bir çözüm olarak değerlendirilmektedir. Tasarımın bu nitelikleri, ileriye dönük ısı yönetimi uygulamaları için önemli bir referans oluşturmaktadır.

Isı alıcı tasarımları, Boujelbene vd. (2024) ve Zhao vd. (2024) çalışmalarında önerilen yöntemlere benzer şekilde, topoloji optimizasyonu sonuçları dikkate alınarak geliştirilmiştir. Bu süreçte, tasarımlar doğadaki doğal formlardan, özellikle ağaç dallanma yapılarından ilham almıştır. Ağaçlar, doğada verimlilik, dayanıklılık ve kaynak kullanımını en aza indiren yapıların başında gelir. Bu özelliklerinden esinlenerek, ağaç şeklindeki geometriler, ısı transferinin optimize edilmesi ve sistemin termal performansının artırılması amacıyla tasarımlara entegre edilmiştir. Böyle bir tasarım yaklaşımı, ısı alıcıların yüzey alanını artırarak ısı transfer sürecini hızlandırmış ve enerji kaybını en düşük seviyeye indirmiştir.

Topoloji optimizasyonu, bu süreçte kilit bir rol oynamış ve malzeme dağılımını en verimli şekilde organize ederek hem ağırlığı azaltmış hem de termal performansı önemli ölçüde artırmıştır. Optimizasyon, belirli sınır koşulları ve termal yükler göz önüne alınarak malzemenin yalnızca gerektiği yerlerde bulunmasını sağlamış, böylece ısı transfer verimliliği artarken gereksiz malzeme kullanımı ortadan kaldırılmıştır. Bu süreç, hem tasarımın ekonomik yönünü geliştirmiş hem de mühendislik açısından çevre dostu bir çözüm sunmuştur. Ayrıca, doğal ağaç yapısından ilham alınan dallanma şekilleri, yalnızca termal performansı artırmakla kalmamış, aynı zamanda yapısal dayanıklılığı da güçlendirmiştir. Ağaç dalları, yük dağılımını optimize eden doğal bir tasarım olduğu için, bu özellik ısı alıcıların hem mekanik dayanıklılığını hem de uzun ömürlü olmasını sağlamıştır. Böylece tasarımlar, yüksek termal verimlilik sunmanın yanı sıra, zorlu çalışma koşullarına da uyum sağlayabilir hale gelmiştir.

Sonuç olarak, bu yenilikçi tasarım stratejileri, ısı alıcıların termal performansında belirgin iyileşmeler sağlamış ve aynı zamanda doğadan esinlenilen estetik bir yapı sunmuştur. Topoloji optimizasyonu ve biyomimetik tasarımın bir araya getirilmesi, mühendislik çözümlerinde yeni bir yaklaşım olarak dikkat çekmiş ve gelecekteki ısı

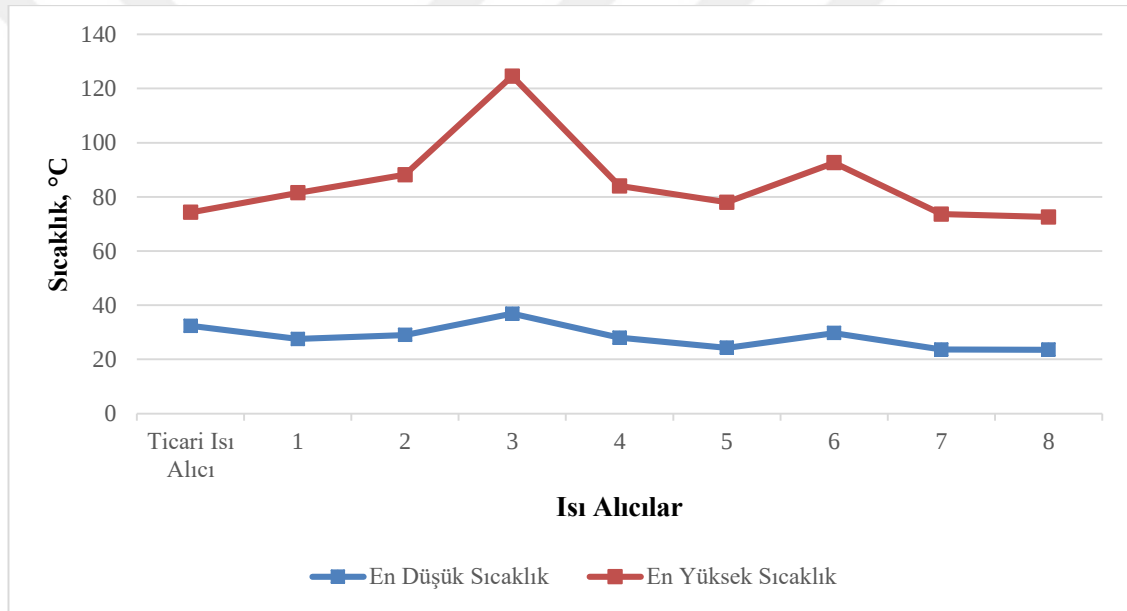
transfer uygulamaları için güçlü bir referans noktası oluşturmuştur. Bu tasarımlar, sadece mühendislik problemlerine çözüm sunmakla kalmayıp, doğadan öğrenmenin sürdürülebilirlik ve yenilik açısından ne kadar etkili olduğunu bir kez daha kanıtlamıştır.



Şekil 4.15. Isı alıcı-8 geometrisi ve termal analizi

Şekil 4.16, ticari bir ısı alıcı ile optimize edilmiş ısı alıcıların en yüksek ve en düşük sıcaklıklarının karşılaştırılmasını göstermektedir. Grafiğe göre, optimize edilen ısı alıcılar farklı termal performans sergilemektedir. Optimize edilmiş ısı alıcılar, referans olarak alınan ticari ısı alıcı ile karşılaştırıldığında, en yüksek sıcaklık değerlerinde gözlemlenen artışlar sırasıyla şu şekilde belirlenmiştir: ısı alıcı-1'de %12, ısı alıcı-2'de %17, ısı alıcı-3'te %45, ısı alıcı-4'te %14, ısı alıcı-5'te %12, ısı alıcı-6'da %21, ısı alıcı-7'de %8 ve ısı alıcı-8'de %7 artış kaydedilmiştir. Optimize edilmiş ısı alıcılarının, referans ticari ısı alıcı ile kıyaslandığında en düşük sıcaklık değerlerinde gözlemlenen

değişiklikler şu şekildedir: Isı alıcı-1'de %5, ısı alıcı-2'de %3,4; ısı alıcı-4'te %4,4; ısı alıcı-5'te %8; ısı alıcı-6'da %2,7; ısı alıcı-7'de %8,7 ve ısı alıcı-8'de %8,7 en düşük sıcaklıklarda azalma sağlanmıştır. En düşük sıcaklıklar kıyaslandığında ticari ısı alıcıya göre ısı alıcı-3'te %4,5 artış gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar, optimize edilmiş ısı alıcılarının, referans ticari ısı alıcısına kıyasla daha yüksek performans sağladığını göstermektedir. Özellikle, ısı alıcı-5, ısı alıcı-7 ve ısı alıcı-8'in en düşük sıcaklıklarının diğer optimize edilmiş ısı alıcıların çoğuna kıyasla daha düşük olduğu dikkat çekmektedir. Bu durum, bu tasarımların ısı dağılımı ve soğuma stratejilerinin daha etkili olduğunu ortaya koymaktadır. Daha düşük en düşük sıcaklık değerleri, yüzeyde daha dengeli bir sıcaklık dağılımını işaret ederek termal verimliliğin artışına ortaya koymaktadır. Diğer yandan, ısı alıcı-3, hem en yüksek hem de en düşük sıcaklık değerleri açısından en yüksek seviyelere ulaşmıştır. Bu durum, tasarımın ısıyı toplama kapasitesinin yüksek olduğunu, ancak etkili bir soğuma ve ısı dağılımı stratejisinden yoksun olduğunu göstermektedir. Bu tasarım, yüksek sıcaklık seviyeleri nedeniyle termal dengeyi sağlayamamakta ve daha az verimli bir performans sergilemektedir.



Şekil 4.16. Topoloji optimize edilen ısı alıcıların termal analizlerinin karşılaştırması

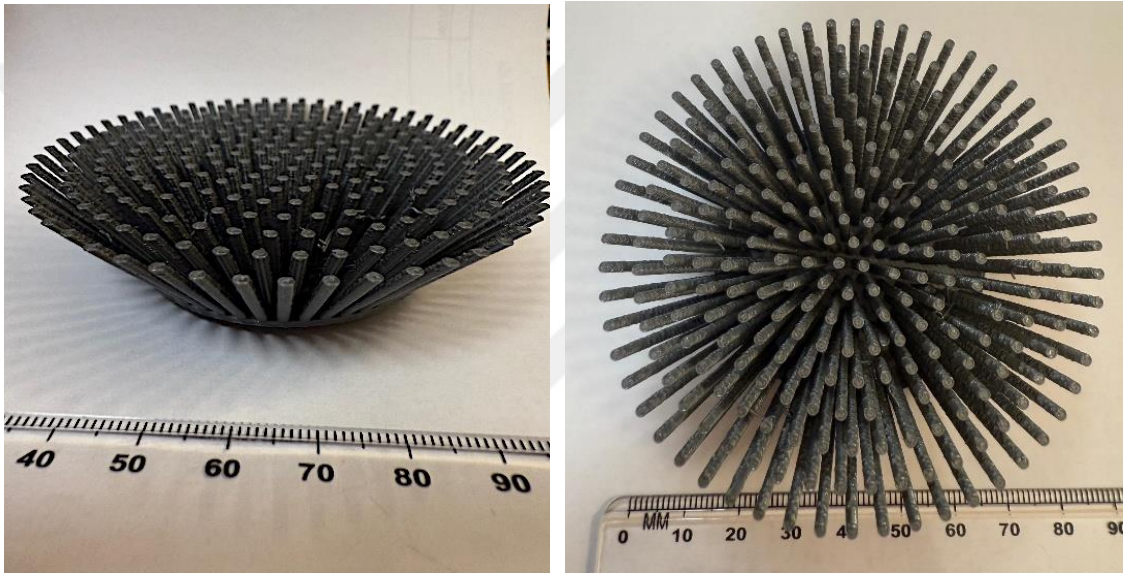
Şekil 4.16'da dikkat çeken bir diğer tasarım ise ısı alıcı-8'dir. Isı alıcı-8, kanatçıklarının geniş yüzey alanı ve daha az boşluk içeren yapısıyla diğer optimize edilmiş ısı alıcılardan ayrılmaktadır. Daha geniş yüzey alanı, ısı transfer sürecini hızlandırmakta ve daha etkili bir soğuma sağlamaktadır. Bu durum, ısı alıcı-8'in düşük en düşük sıcaklık ve dengeli en yüksek sıcaklık değerleriyle, termal performans açısından öne çıkmasını sağlamaktadır. Bu tasarımın sunduğu avantajlar, yüzey alanının artırılmasının ve boşlukların azaltılmasının termal verimlilik üzerindeki olumlu etkisini açıkça ortaya koymaktadır.

Genel olarak, optimize edilmiş ısı alıcıların tasarımlarındaki farklılıkların termal performansa olan etkisini net bir şekilde göstermektedir. Yüzey alanı genişliği, boşluk oranı ve ısı dağılımı stratejileri, en yüksek ve en düşük sıcaklıklar üzerinde önemli bir rol oynamaktadır. Isı alıcı-5, ısı alıcı-7 ve ısı alıcı-8, özellikle daha düşük en düşük sıcaklık

değerleriyle daha dengeli bir termal performans sunarken, ısı alıcı-3 yüksek sıcaklık değerleri nedeniyle termal yönetim açısından daha sınırlı bir çözüm sunmaktadır. Bu karşılaştırma, optimize edilmiş tasarımların ısı transfer süreçlerini iyileştirmek için nasıl farklı stratejiler kullanabileceğini göstermektedir.

4.2. Isı Alıcının İmalatı

Eklemeli imalat yöntemiyle üretilen ısı alıcıların tasarım ve üretim detaylarına dair bir inceleme yapılmıştır. İlgili ısı alıcı modellerinin görselleri Şekil 4.17’de sunulmaktadır. Bu tasarımların üretilebilirlik açısından uygunlukları değerlendirilmiş ve sonuç olarak ısı alıcı-1 modeli, üretim için en uygun seçenek olarak belirlenmiştir. Modelin tasarımı hem fonksiyonel hem de üretilebilirlik açısından önemli kriterler dikkate alınarak optimize edilmiştir.



Şekil 4.17. İmalatı gerçekleştirilen ısı alıcı geometrisi

Tasarımın geometrik boyutları detaylandırıldığında, ısı alıcısının eni 90 mm, boyu ise 18,5 mm olarak belirlenmiştir. Bu boyutlar, cihazın yer kaplama özellikleri ve ısı iletiminin verimliliği açısından kritik rol oynamaktadır. Isı alıcısının kanatçık yapıları, ısı transferini iyileştiren önemli bir bileşendir. Kanatçıkların çapı 1 mm, uzunlukları ise 16,5 mm olarak tasarlanmış olup, kanatçıklar arasındaki boşluk 0.5 mm olarak belirlenmiştir. Bu tasarım, ısıнын etkili bir şekilde dağıtılabilmesi ve alıcı yüzeyinin yeterince verimli olabilmesi için gereklidir.

Kanatçıkların geometrisi de tasarımın önemli bir parametresidir. Kanatçıklar, 90° ile 45° derece arasında değişen bir eğrilik açısına sahip olacak şekilde tasarlanmıştır. Bu eğrilik, ısıнын daha homojen bir şekilde yayılmasına yardımcı olur ve cihazın hava akışını optimize ederek ısı transferinin etkinliğini artırır. Bu tasarım detayları, eklemeli imalat sürecinin avantajlarını kullanarak, ısı alıcısının maksimum verimlilikle çalışmasını sağlayacak şekilde optimize edilmiştir.

Sonuç olarak, ısı alıcı-1 modeli, eklemeli imalatın sunduğu tasarım esnekliklerinden yararlanarak, üretilebilirlik ve verimlilik açısından ideal bir çözüm sunmaktadır. Tasarımın her bir parametresi, ısı alıcısının işlevsel performansını artırmak amacıyla dikkatlice seçilmiş ve optimize edilmiştir.



5. SONUÇLAR

Termal yönetim sistemleri, modern mühendislik uygulamalarında enerji verimliliği ve performansın artırılması açısından kritik bir öneme sahiptir. Isı alıcılar, bu sistemlerin temel bileşenlerinden biri olarak, ısı transferini optimize etmek ve cihazların çalışma sıcaklıklarını kontrol altında tutmak için tasarlanmaktadır. Bu bağlamda, ısı alıcıların performansını artırmak için yapılan analizler ve optimizasyon çalışmaları hem enerji verimliliğini artırmayı hem de malzeme kullanımını en aza indirerek çevresel sürdürülebilirliği desteklemeyi hedeflemektedir. Özellikle, topoloji optimizasyonu ve termal analiz gibi ileri mühendislik teknikleri, ısı alıcıların termal ve mekanik performanslarının iyileştirilmesinde önemli bir araç haline gelmiştir. Bu çalışma, modern mühendislik ihtiyaçlarına yanıt vermek amacıyla, ısı alıcıların tasarımında kullanılan yenilikçi yöntemleri inceleyerek, optimize edilmiş tasarımların potansiyel faydalarını ortaya koymayı amaçlamaktadır. Bu çalışma, termal yönetim sistemlerinde ısı alıcılarının performansını artırmaya yönelik yapılan termal analizlerin ve topoloji optimizasyonu süreçlerinin önemini vurgulamaktadır. Alüminyum alaşımı AlSi10Mg kullanılarak üretilen ısı alıcıları üzerinde gerçekleştirilen araştırmalar, bu malzemenin üstün termal iletkenlik özelliklerinden yararlanarak ısı alıcılarının verimliliğini artırmayı hedeflemiştir. Çalışma kapsamında, 2B modelleme teknikleri ve topoloji optimizasyonu olmak üzere iki temel yaklaşım benimsenmiş ve her iki yöntemin katkıları detaylı şekilde analiz edilmiştir.

AlSi10Mg alaşımının termal iletkenlik özellikleri dikkate alınarak yapılan analizler, ısı alıcılarının sıcaklık değişimlerini, sıcaklık dağılımını ve termal dengesizliklerini ortaya koymuştur. 2B modelleme tekniği ile gerçekleştirilen kararlı hal termal analizleri, ısı alıcılarının tasarımında sıcaklık farklarının optimize edilmesine yönelik önemli veriler sağlamıştır. Bu analizlerde, sıcaklık değişimlerinin 176 °C ile 185 °C arasında olduğu tespit edilmiştir. Bu tür analizler, ısı alıcılarının tasarım sürecinde termal denge ve performans hedeflerini belirlemek için kritik bilgiler sunmuştur.

Çalışmanın ikinci aşamasını oluşturan topoloji optimizasyonu, termal analizlerden elde edilen verilerin kullanılarak malzeme dağılımının en verimli hale getirilmesini amaçlamıştır. Bu süreçte, belirlenen ağırlık azaltımı oranları (%50, %55, %60, %65, %70 ve %75) ile yapılan optimizasyon çalışmaları hem malzeme kullanımında tasarruf sağlamış hem de ısı alıcılarının mekanik ve termal performansını önemli ölçüde iyileştirmiştir. Topoloji optimizasyonunun bir diğer önemli katkısı, tasarımların gereksiz malzeme yükünden kurtarılarak daha hafif, ekonomik ve çevre dostu yapılar oluşturmaktır.

Optimizasyon sürecinde elde edilen yeni tasarımlar, "member size" ve "penalty factor" gibi parametreler dikkate alınarak detaylı şekilde incelenmiştir. Bu incelemeler sonucunda, ticari bir ısı alıcının termal analiz sonuçlarıyla optimize edilmiş tasarımlar arasında belirgin farklar gözlemlenmiştir. Özellikle, optimize edilmiş tasarımların daha düşük sıcaklık farklarıyla çalıştığı, bunun da daha dengeli bir termal performans sağladığı tespit edilmiştir. Bununla birlikte, ısı alıcı-3 gibi bazı tasarımlar, daha düşük yüzey alanı ve geniş aralıklara sahip olması nedeniyle diğer optimize edilmiş tasarımlara kıyasla daha düşük verimlilik göstermiştir.

Çalışmadan elde edilen bulgular ışığında, gelecekteki araştırmaların aşağıdaki konulara odaklanması önerilmektedir:

- 2B yerine 3B modelleme tekniklerinin kullanılması, tasarımların daha gerçekçi ve hassas bir şekilde analiz edilmesini sağlayacaktır. Özellikle, karmaşık geometrilere sahip ısı alıcılarının performansını değerlendirmek için üç boyutlu analizler gereklidir.
- Tasarımların daha karmaşık termal ve mekanik yükler altında test edilmesi, endüstriyel uygulamalar açısından kritik bir gerekliliktir. Bu, ısı alıcılarının zorlu koşullara dayanıklılığını artıracak ve performanslarını optimize edecektir.
- AlSi10Mg alaşımının yanı sıra, yüksek sıcaklık dayanımı ve daha yüksek termal iletkenlik sağlayan alternatif malzemelerin değerlendirilmesi, ısı alıcılarının performansını artırabilir.
- Malzeme seçimlerinde çevresel sürdürülebilirlik dikkate alınmalıdır. Geri dönüştürülebilir alüminyum alaşımları ve çevre dostu üretim süreçlerinin benimsenmesi, hem çevresel etkileri azaltacak hem de daha sürdürülebilir tasarımlara olanak tanıyacaktır.
- Optimize edilen tasarımların endüstriyel uygulamalarda test edilmesi gerekmektedir. Otomotiv, elektronik ve enerji sektörleri gibi yüksek performans gerektiren alanlarda bu tasarımların kullanılması, pratik faydalarının anlaşılmasını sağlayabilir.
- Üretim maliyetlerini düşürmek amacıyla, özellikle topoloji optimizasyonu ve 3B baskı teknolojilerinin ekonomik değerlendirmeleri yapılmalıdır. Seri üretim için uygun maliyetli ve hızlı üretim teknikleri, geniş ölçekli uygulamalarda büyük faydalar sağlayabilir.

Sonuç olarak, bu çalışma, termal yönetim sistemlerinde ısı alıcılarının performansını artırmaya yönelik analiz ve optimizasyon süreçlerinin, mühendislik çözümlerinde nasıl önemli bir rol oynadığını ortaya koymuştur. Optimize edilmiş tasarımlar, yalnızca termal performansı artırmakla kalmamış, aynı zamanda malzeme kullanımını optimize ederek daha sürdürülebilir ve ekonomik çözümler sunmuştur. Bu tür yenilikçi yaklaşımlar, gelecekte endüstriyel üretim süreçlerinde daha verimli ve maliyet etkin çözümler sunarken, aynı zamanda termal yönetim performansını iyileştirme potansiyeli taşımaktadır. Gelecekte yapılacak daha karmaşık modelleme çalışmaları ve ileri testler ile bu tür çözümlerin, endüstriyel uygulamalarda daha geniş bir kullanım alanına sahip olacağı öngörülmektedir.

6. KAYNAKLAR

- Al Ali, M., Shimoda, M., Benaissa, B., & Kobayashi, M. (2023). Non-parametric optimization for lightweight and high heat conductive structures under convection using metaheuristic structure binary-distribution method. *Applied Thermal Engineering*, 233. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.121124>
- Aluminum and Aluminum Alloys Introduction and Overview*. (2001). <https://doi.org/10.1361/autb2001p351>
- Aran, A. (2008). Mal 201-Malzeme Bilgisi, 2007-2008 Bahar Ders Notları.
- Babar, H., Wu, H., & Zhang, W. (2023). Investigating the performance of conventional and hydrophobic surface heat sink in managing thermal challenges of high heat generating components. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 216. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2023.124604>
- Boujelbene, M., Sultan, H. S., Mehryan, S. A. M., Hussin, A. M., Alghawli, A. S., & Ghalambaz, M. (2024). Analyzing the melting process in a tilted heat sink filled with a phase change material equipped with the plate and optimized tree-shaped metal fins. *Journal of Energy Storage*, 92. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.111608>
- Chivate, A., & Zhou, C. (2024). Additive manufacturing of micropatterned functional surfaces: a review. *International Journal of Extreme Manufacturing*, 6(4). <https://doi.org/10.1088/2631-7990/ad4240>
- Chu, R. C., Simons, R. E., Ellsworth, M. J., Schmidt, R. R., & Cozzolino, V. (2004). Review of cooling technologies for computer products. *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*, 4(4), 568–585. <https://doi.org/10.1109/TDMR.2004.840855>
- Collan, M., & Michelsen, K.-E. (2020). *Technical, Economic and Societal Effects of Manufacturing 4.0 Automation, Adaption and Manufacturing in Finland and Beyond*.
- Constantin, L., Wu, Z., Li, N., Fan, L., Silvain, J. F., Lu, Y. F. (2020), Laser 3D printing of complex copper structures, *Additive Manufacturing*, 35, 101268.
- Dixit, T., Nithiarasu, P., Kumar, S., (2021), Numerical evaluation of additively manufactured lattice architectures for heat sink applications, *International Journal of Thermal Sciences*, 159, 106607.
- Govindaraju, P., Pundir, N., & Alvarado, J. (2023). Numerical and experimental investigation of multi jet impingement cooling system with optimized heat sinks. *InterSociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems, ITherm*, 2023-May. <https://doi.org/10.1109/ITherm55368.2023.10177498>
- Han, Y., Lu, W.F., (2018), A novel design method for nonuniform lattice structures based

- on topology optimization, *Journal of Mechanical Design*, Transactions of the ASME, 140 (9), art. no. 091403.
- Hassan Ali, M.I., Al-Ketan, O., Alhammadi, A., Khalil, M., Khan, K., Abu Al-Rub, R.K. 2019. Heat transfer characterization of 3D printable architected heat sinks, ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Proceedings IMECE, 8.
- Ho, J.Y., See, Y.S., Leong, K.C., Wong, T.N. (2021), An experimental investigation of a PCM-based heat sink enhanced with a topology-optimized tree-like structure, *Energy Conversion and Management*, 245, art. no. 114608.
- Huttunen, E., Nykänen, M.T., Alexandersen, J., (2022), Material extrusion additive manufacturing and experimental testing of topology-optimised passive heat sinks using a thermally-conductive plastic filament, *Additive Manufacturing*, 59, art. no. 103123.
- Iradukunda, A. C., Vargas, A., Huitink, D., Lohan, D., (2020), Transient thermal performance using phase change material integrated topology optimized heat sinks, *Applied Thermal Engineering*, 179, 115723.
- Khan Lodhi, S., Yousaf Gill, A., & Hussain, I. (2024). *International Journal of Multidisciplinary Sciences and Arts 3D Printing Techniques: Transforming Manufacturing with Precision and Sustainability*. 3(3). <https://doi.org/10.47709/ijmdsa>
- Khazaka, R., Martineau, D., Youssef, T., Le, T.E., Azzopardi, S., (2019), Direct printing of heat sinks, cases and power connectors on insulated substrate using selective laser melting techniques, *IEEE 69th Electronics Components and Technology Conference*, 2173-2179.
- Kumar, A., Kumar, D., Faisal, N., Sharma, A., Kumar Ansu, A., Goyal, A., Saxena, K. K., Prakash, C., & Kumar, D. (2024). Application of 3D printing technology for medical implants: a state-of-the-art review. *Advances in Materials and Processing Technologies*, 10(2), 357–372. <https://doi.org/10.1080/2374068X.2023.2193788>
- Lazarov, B. S., Sigmund, O., Meyer, K. E., & Alexandersen, J. (2018). Experimental validation of additively manufactured optimized shapes for passive cooling. *Applied Energy*, 226, 330–339. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2018.05.106>
- Ma, H. Y., Wang, J. C., Qin, P., Liu, Y. J., Chen, L. Y., Wang, L. Q., & Zhang, L. C. (2024). Advances in additively manufactured titanium alloys by powder bed fusion and directed energy deposition: Microstructure, defects, and mechanical behavior. *Journal of Materials Science & Technology*, 183, 32–62. <https://doi.org/10.1016/J.JMST.2023.11.003>
- Modrek, M., Viswanath, A., Khan, K. A., Hassan Ali, M. I., & Abu Al-Rub, R. K. (2023). Multi-objective topology optimization of passive heat sinks including self-weight

- based on triply periodic minimal surface lattices. *Case Studies in Thermal Engineering*, 42. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.102684>
- Nair, V., Baby, A., M.B., A., S., I., Murali, M., & Nair, M. B. (2024). A comprehensive review of air-cooled heat sinks for thermal management of electronic devices. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 159. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2024.108055>
- Ngo, T. D., Kashani, A., Imbalzano, G., Nguyen, K. T. Q., & Hui, D. (2018). Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B: Engineering*, 143, 172–196. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.02.012>
- Ning, J., Wang, X., Huang, H., Wang, S., & Yan, W. (2023). Topology optimized novel additively manufactured heat sink: Experiments and numerical simulations. *Energy Conversion and Management*, 286. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117024>
- Ozguc, S., Pan, L., Weibel, J.A., (2021), Topology optimization of microchannel heat sinks using a homogenization approach, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 169, art. no. 120896.
- Ozguc, S., Teague, T. F. G., Pan, L., & Weibel, J. A. (2023). Experimental study of topology optimized, additively manufactured microchannel heat sinks designed using a homogenization approach. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 209. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2023.124108>
- Ozguc, S., Pan, L., & Weibel, J. A. (2024). An approach for topology optimization of heat sinks for two-phase flow boiling: Part 1 – Model formulation and numerical implementation. *Applied Thermal Engineering*, 249. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.123337>
- Ozguc, S., Pan, L., & Weibel, J. A. (2024). An approach for topology optimization of heat sinks for two-phase flow boiling: Part 2 – Model calibration and experimental validation. *Applied Thermal Engineering*, 249. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.123338>
- Palumbo, J., Tayyara, O., Amon, C. H., & Chandra, S. (2023). Topologically optimized mini-channel heat sinks for reduced temperature non-uniformity. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 214. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2023.124421>
- Palumbo, J., Tayyara, O., Assadi, S. A., da Silva, C. M., Trescases, O., Amon, C. H., & Chandra, S. (2023). Implementation of a Topologically Optimized Heat Sink for Non-Uniform Heat Fluxes in an Electric-Vehicle Fast-Charger. *InterSociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems, ITherm*, 2023-May. <https://doi.org/10.1109/ITherm55368.2023.10177542>

- Palumbo, J., Tayyara, O., Assadi, S. A., Silva, C. M. D., Trescases, O., Amon, C. H., & Chandra, S. (2024). Thermal Management of Nonuniform Heat Fluxes in an Electric-Vehicle Fast-Charger: Experimental and Numerical Analysis. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 14(4), 573–584. <https://doi.org/10.1109/TCPMT.2024.3376993>
- Pereira, T., Kennedy, J. v., & Potgieter, J. (2019). A comparison of traditional manufacturing vs additive manufacturing, the best method for the job. *Procedia Manufacturing*, 30, 11–18. <https://doi.org/10.1016/J.PROMFG.2019.02.003>
- Sapkota, A., Ghimire, S. K., & Adanur, S. (2024). A review on fused deposition modeling (FDM)-based additive manufacturing (AM) methods, materials and applications for flexible fabric structures. *Journal of Industrial Textiles*, 54. <https://doi.org/10.1177/15280837241282110>
- Shimoyama, K., Komiya, A., (2022), Multi-objective Bayesian topology optimization of a lattice-structured heat sink in natural convection, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 65 (1), art. no. 1.
- Singh, S., Kaur, D., Singh, M., Balu, R., Mehta, A., & Vasudev, H. (2024). Challenges and issues in manufacturing of components using polymer-based selective laser sintering (SLS): a review. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*. <https://doi.org/10.1007/s12008-024-02049-w>
- Structural Optimization Analysis Guide*. (2024). <http://www.ansys.com>
- Sun, S., Rankouhi, B., Thoma, D. J., Cheadle, M. J., Maples, G. D., Anderson, M. H., Nellis, G., & Qian, X. (2024). Topology optimization, additive manufacturing and thermohydraulic testing of heat sinks. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 224. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2024.125281>
- Tezel, T., (2019), An Experimental Investigation of the Use of Three Dimensional Metal Printed Gears In Place Of Conventional Method, PhD Thesis, Antalya, Turkey.
- Vargas, A., Huitink, D., Iradukunda, A.-C., Eddy, C., (2020), Topology Optimized Phase Change Material Integrated Heat sinks and Validation InterSociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems, ITherm, 703-707.
- Wang, J., Melideo, D., Liu, X., & Desideri, U. (2024). Comparative study on topology optimization of microchannel heat sink by using different multi-objective algorithms and objective functions. *Applied Thermal Engineering*, 252. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.123606>
- Wang, T., Gasick, J., Sun, S., & Qian, X. (2023). A comparison of manufacturing constraints in 3D topologically optimized heat sinks for forced air cooling. *Engineering with Computers*, 39(3), 1711–1733. <https://doi.org/10.1007/s00366-023-01786-y>
- Wawryniuk, Z., Brancewicz-Steinmetz, E., & Sawicki, J. (2024). Revolutionizing

- transportation: an overview of 3D printing in aviation, automotive, and space industries. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 134(7–8), 3083–3105. <https://doi.org/10.1007/s00170-024-14226-y>
- Wilson, P. (2012). General product design. *The Circuit Designer's Companion*, 367–401. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-097138-4.00009-4>
- Sun, S.S. and McDonough, W.F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. In: Saunders, A.D. and Norry, M.J. (Eds.), *Magmatism in the Ocean Basins*. Geol. Soc. Spec. Publ. 42, pp. 313-345.
- Wong, K. v., & Hernandez, A. (2012). A Review of Additive Manufacturing. *ISRN Mechanical Engineering*, 2012, 1–10. <https://doi.org/10.5402/2012/208760>
- Wulandana, R. (2024). *Balancing Theory, Programming, and Practical Application for Teaching of Finite Element Analysis Courses*.
- Yehia, H. M., Hamada, A., Sebaey, T. A., & Abd-Elaziem, W. (2024). Selective Laser Sintering of Polymers: Process Parameters, Machine Learning Approaches, and Future Directions. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 8(5). <https://doi.org/10.3390/jmmp8050197>
- Zhao, Y., Mou, X., Chen, Z., Hao, M., Chen, L., & Xu, B. (2024). Topology optimization and bionic analysis of heat sink fin configuration based on additive manufacturing technology. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 155. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2024.107544>
- Zhou, L., Miller, J., Vezza, J., Mayster, M., Raffay, M., Justice, Q., al Tamimi, Z., Hansotte, G., Sunkara, L. D., & Bernat, J. (2024). Additive Manufacturing: A Comprehensive Review. In *Sensors* (Vol. 24, Issue 9). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/s24092668>
- Zhu, J., Zhou, H., Wang, C., Zhou, L., Yuan, S., & Zhang, W. (2021). A review of topology optimization for additive manufacturing: Status and challenges. *Chinese Journal of Aeronautics*, 34(1), 91–110. <https://doi.org/10.1016/J.CJA.2020.09.020>

ÖZGEÇMİŞ

Gölsüm TEKAVİT

ÖĞRENİM BİLGİLERİ

Yüksek Lisans	Akdeniz Üniversitesi
2022-2025	Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Antalya
Lisans	Aydın Adnan Menderes Üniversitesi
2016-2021	Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, Antalya

ESERLER

Ulusal bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitaplarında basılan bildiriler

- 1- Tekavit G., TEZEL T., KOVAN V., (2024) Topoloji Optimizasyonu ile Eklemeli İmalat Süreçlerinin Geliştirilmesi, *International Conference On Health, Engineering And Applied Sciences*, Belgrade, Sırbistan, 17- 20 Ekim 2024, ss.225-231
- 2- Tekavit G., TEZEL T., KOVAN V. (2024) Isı Transferi Performansının Artırılması İçin Alüminyum Alaşımlı Isı Alıcılarında Topoloji Optimizasyonu, *International Conference On Health, Engineering And Applied Sciences*, Belgrade, Sırbistan, 17 - 20 Ekim 2024, ss.218-224
- 3-Tekavit G., Tezel T., Kovan V. (2023) Otomobil Pistonlarının Eklemeli İmalatta Kullanılabilirliğinin Nümerik Analizi, *Ege 2nd International Congress on Innovation Technologies &Engineering*, İzmir, Türkiye, 12 Haziran 2023, ss.426-431
- 4-Tekavit G., Tezel T., Kovan V. (2023) Talaşlı İmalatta Nanoparçacık Takviyeli Kesme Sıvılarının Kullanımı, *BilLtek-VII International Symposium On Current Developments In Science, Technology And Social Science*, Ankara, Türkiye, 26 Mayıs 2023, ss.1130-1137
- 5- Tekavit G., Tezel T., Kovan V. (2023) Otomobil Pistonunda Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Hasar Analizi, *Biltek-VII International Symposium On Current Developments In Science, Technology And Social Science*, Ankara, Türkiye, 26 Mayıs 2023, ss.1138-1147