



**3D METAL EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMİ İLE YENİ NESİL PASİF ISI
EMİCİ TASARIMI, ANALİZİ VE ÜRETİMİ**

İbrahim ŞEKER

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ENDÜSTRİYEL TASARIM MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ARALIK 2024

ETİK BEYAN

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

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

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

İbrahim ŞEKER

27/12/2024

3D METAL EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMİ İLE YENİ NESİL PASİF ISI EMİCİ TASARIMI, ANALİZİ VE ÜRETİMİ

(Yüksek Lisans Tezi)

İbrahim ŞEKER

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Aralık 2024

ÖZET

Bu çalışmada, çeşitli kafes yapılarının pasif soğutma amaçlı ısı emici olarak kullanılması tartışılarak performansları değerlendirilmiştir. Rhinoceros 3D ve Grasshopper yazılımında parametrik olarak eşit hacme sahip kafes yapıda farklı ısı emici tasarımları geliştirilmiştir. Tasarımlar oluşturulurken doğal hava akışı dikkate alınarak yüzey alanı ile toplam hacim arasındaki oran değerlendirilmiştir. Böylece aynı hacimde daha fazla yüzey alanı elde edilerek daha etkili bir ısı transferi sağlanması hedeflenmiştir. Tasarım aşamasında kafes yapıların hacimleri sabit tutularak birim kafes hücrelerin boyutu, kafes çapı ve toplam hücre sayısı parametrelerinin değiştirilmesi ile modellerde daha fazla yüzey alanı hedeflenmiştir. SIMSOLID yazılımında gerçekleştirilen termal analizlerin sonucunda, aynı miktarda malzeme kullanılarak yüzey alanının hacme oranının artırılması ile daha iyi bir soğutma performansı elde edildiği gözlemlenmiştir. Ayrıca oluşturulan kafes yapılarda gradyan düşüş yöntemi uygulanarak daha düşük hacimlerde ısı emicilerin performansları değerlendirilmiştir. Yüzey alanının hacme oranı birim hücreler arasında farklılık göstermesi, ısı emicilerin toplam yüzey alanında da farklılık yaratmıştır. Eşit hacimlere sahip farklı kafes yapıda ısı emiciler arasından en iyi performans gösteren ısı emici seçildi. Bu ısı emicinin kafes yapısında, birim hücre boyutu ve kafes çapı küçültüldü, toplam hücre sayısı artırıldı. Böylece, hacmi artırılmadan yüzey alanı artırıldı ve yüzey alanının hacme oranı yükseltildi. Sonuç olarak, bu değişiklikler sayesinde yüzey alanının hacme oranının yükseltilmesi ile daha iyi bir soğutma performansı elde edildi.

Bilim Kodu : 91451

Anahtar Kelimeler : Metal Eklemeli İmalat, 3B Baskı, Isı Emici, Elektronik Soğutma, 3 Boyutlu Kafes Yapılar.

Sayfa Adedi : 63

Danışman : Prof. Dr. Hüdayim BAŞAK

DESIGN, ANALYSIS AND PRODUCTION OF NEW GENERATION PASSIVE HEAT
SINK WITH 3D METAL ADDITIVE MANUFACTURING

(M. Sc. Thesis)

İbrahim ŞEKER

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

December 2024

ABSTRACT

In this study, the use of various lattice structures as heat sinks for passive cooling purposes is discussed and their performances are evaluated. In Rhinoceros 3D and Grasshopper software, different heat sink designs were developed parametrically in lattice structure with equal volume. While creating the designs, the ratio between surface area and total volume was evaluated by considering the natural air flow. Thus, it is aimed to provide a more effective heat transfer by obtaining more surface area in the same volume. In the design phase, the volumes of the lattice structures were kept constant and the size of the unit lattice cells, the lattice diameter and the total number of cells were changed to achieve more surface area in the models. As a result of the thermal analysis performed in SIMSOLID software, it was observed that a better cooling performance was obtained by increasing the ratio of surface area to volume using the same amount of material. In addition, the performance of heat sinks at lower volumes was evaluated by applying the gradient decrease method in lattice structures. The difference in the ratio of surface area to volume between the unit cells caused a difference in the total surface area of the heat sinks. The best performing heat sink was selected among the heat sinks of different lattice structures with equal volumes. In the lattice structure of this heat sink, the unit cell size and lattice diameter were reduced and the total number of cells was increased. Thus, the surface area was increased without increasing the volume and the surface area to volume ratio was increased. As a result, thanks to these changes, a better cooling performance was achieved by increasing the surface area to volume ratio.

Science Code : 91451

Key Words : Metal Additive Manufacturing, 3D Printing, Heat Sink, Electronic Cooling, 3D Lattice Structures.

Page Number : 63

Supervisor : Prof. Dr. Hüdayim BAŞAK

TEŞEKKÜR

Bu tez Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Proje Koordinasyon Birimi tarafından FYL-2024-9108 no'lu proje olarak desteklenmiştir. Bu çalışmanın hazırlanması ve tezimin tamamlanması sürecinde, projeye teknik ve idari açıdan yön veren, bana önemli katkılar sağlayan saygıdeğer danışman hocam Prof. Dr. Hüdayim BAŞAK'a en içten teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca, ısı transferi alanında vermiş olduğu destekten dolayı kıymetli hocam Prof. Dr. Mustafa AKTAŞ'a teşekkür ederim. Bunun yanı sıra, tüm süreç boyunca bana koşulsuz destek veren ve her zaman yanımda olan sevgili eşim Kardelen ATASÖZ ŞEKER'e sonsuz minnettarlığımı iletmek isterim.



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
RESİMLERİN LİSTESİ	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiv
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI	5
2.1. Kafes Yapılar.....	5
2.2. Metal Eklemeli İmalat ve Kafes Yapılar.....	6
2.3. Yeni Nesil Isı Emiciler.....	7
3. MATERYAL ve METOD.....	11
3.1. Üretim Yöntemi.....	11
3.2. Malzeme	12
3.3. Tasarım ve Analiz Yazılımları.....	13
3.4. Deney Ekipmanları	15
4. KAFES YAPILARIN MODELLENMESİ.....	17
4.1. Kafes Yapılara Gradyan Uygulaması.....	24
5. ISI EMİCİLERİN TERMAL ANALİZİ	29
6. ISI EMİCİLERİN ÜRETİMİ.....	31

	Sayfa
7. BULGULAR	37
7.1. Bilgisayar Destekli Termal Analiz	37
7.2. Üretilen Isı Emicilerin Termal Analizi	52
8. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	55
KAYNAKLAR	57
ÖZGEÇMİŞ	63



ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. SLM 250HL makinesi ve özellikleri	12
Çizelge 3.2. Al-Alloy AlSi7Mg0,6 / EN AC-42200 malzeme özellikleri	13
Çizelge 4.1. 18 birim hücreli ve deneysel oluşturulan kafes yapıların fiziksel özellikleri.....	22
Çizelge 4.2. 48 birim hücreli Tesseract ve Octet kafes yapısının fiziksel özellikleri.....	23
Çizelge 4.3. D/2 oranlı gradyan uygulanmış kafes yapıların fiziksel özellikleri.....	25
Çizelge 4.4. Hacimleri birbirine eşitlenmiş gradyan kafes yapıların fiziksel özellikleri.....	26
Çizelge 4.5. 100 birim hücreli Octet Gradyan kafes yapının fiziksel özellikleri	27
Çizelge 6.1. 60% ölçekli üretilen olan kafes yapılı ısı emicilerin fiziksel özellikleri.....	33
Çizelge 6.2. Üretilen ısı emicilerin tasarımları ile arasındaki ağırlık farkları	35
Çizelge 7.1. Farklı sıcaklıkta ısı tablası uygulaması sonucu ısı emicilerin tepe noktasında ölçülen sıcaklık değerleri.	52

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 3.1. Isı tablası deney düzeneği.....	15
Şekil 4.1. birim hücreli ve deneysel oluşturulan kafes yapıların kafes çapları.....	22
Şekil 4.2. Eşit hacme sahip kafes yapıların yüzey alanları	23
Şekil 7.1. Tasarlanan kafes yapılı ısı emicilerin hacim ve sıcaklık verileri.....	51
Şekil 7.2. Üretilen kafes yapılı ısı emiciler tepe noktası ile ısı tablası arasındaki sıcaklık farkları.	53
Şekil 7.3. Üretilen gradyan kafes yapılı ısı emiciler tepe noktası ile ısı tablası arasındaki sıcaklık farkları.	53

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. Geleneksel, kanat yapılı ısı emici tasarımı.....	7
Resim 2.2. Kafes yapılı ısı emici tasarımı	8
Resim 3.1. SLM 250HL makinesi ve özellikleri	12
Resim 3.2. Grasshopper Çalışma alanında IntraLattice modülleri	14
Resim 3.3. Hacimli bir kafes yapı oluşturma örneği	14
Resim 3.4. Termal pedin üretilen ısı emiciye uygulaması.....	16
Resim 4.1. Alpha LPD50 ısı emici tasarımı	17
Resim 4.2. LPD50-35 ısı emicisinin kanatlarının fiziksel özellikleri.....	17
Resim 4.3. Intralattice modülü dahilinde olan birim hücreler	18
Resim 4.4. Birim hücrenin Grasshopper çalışma alanına eklenmesi	18
Resim 4.5. Birim hücreler ile kafes yapı oluşturulması.....	18
Resim 4.6. Kafes yapıya hacim kazandırılması	19
Resim 4.7. Kafes yapılı bir ısı emicinin nihai tasarımı.....	19
Resim 4.8. 50x50x35 mm ölçülerinde 18 birim hücre ile modellenen kafes yapılı ısı emiciler	20
Resim 4.9. Fusion360 yazılımında deneysel birim hücre oluşturulması	20
Resim 4.10. Deneysel tasarlanan birim hücre ile kafes yapılı ısı emici tasarımı.....	21
Resim 4.11. Deneysel kafes yapının fiziksel özellikleri	21
Resim 4.12. Kafes yapıya gradyan uygulaması	24
Resim 4.13. Gradyan kafes yapılı ısı emici tasarımı	24
Resim 4.14. 50x50x35 mm ölçülerinde 18 birim hücre ile modellenen gradyan kafes yapılı ısı emiciler	25
Resim 5.1. SIMSOLID yazılımında termal konveksiyon uygulaması	30
Resim 5.2. SIMSOLID yazılımında ısı akısı uygulaması.....	30

Resim	Sayfa
Resim 6.1. Deney için oluşturulan örnek ısı emici tasarımı	31
Resim 6.2. İlk üretim denemelerinden fotoğraflar	31
Resim 6.3. Üretim nihai ısı emicilerin fotoğrafları	32
Resim 6.4. Üretilen Octet (48) ve Octet (48) Gradyan kafes yapılı ısı emicinin ağırlık ölçümü	33
Resim 6.5. Üretilen Octet (18) ve Octet (18) Gradyan kafes yapılı ısı emicinin ağırlık ölçümü	34
Resim 6.6. Üretilen Tesseract (48) ve Tesseract (48) Gradyan kafes yapılı ısı emicinin ağırlık ölçümü.....	34
Resim 6.7. Üretilen Tesseract (18) ve Tesseract (18) Gradyan kafes yapılı ısı emicinin ağırlık ölçümü.....	34
Resim 6.8. Üretilen Deneysel ve Deneysel Gradyan kafes yapılı ısı emicinin ağırlık ölçümü	35
Resim 7.1. LPD50-35 referans modelin SIMSOLID analiz verileri	37
Resim 7.2. X (18) kafes yapılı ısı emicinin SIMSOLID analiz verileri	38
Resim 7.3. Star (18) kafes yapılı ısı emicinin SIMSOLID analiz verileri	38
Resim 7.4. Cross (18) kafes yapılı ısı emicinin SIMSOLID analiz verileri	39
Resim 7.5. Tesseract (18) kafes yapılı ısı emicinin SIMSOLID analiz verileri	39
Resim 7.6. Vintiles (18) kafes yapılı ısı emicinin SIMSOLID analiz verileri.....	40
Resim 7.7. Octet (18) kafes yapılı ısı emicinin SIMSOLID analiz verileri.....	40
Resim 7.8. Diamond (18) kafes yapılı ısı emicinin SIMSOLID analiz verileri	41
Resim 7.9. Deneysel kafes yapılı ısı emicinin SIMSOLID analiz verileri	41
Resim 7.10. Tesseract (48) kafes yapılı ısı emicinin SIMSOLID analiz verileri	42
Resim 7.11. Octet (48) kafes yapılı ısı emicinin SIMSOLID analiz verileri.....	43
Resim 7.12. X (18) Gradyan kafes yapılı ısı emicinin SIMSOLID analiz verileri.....	44
Resim 7.13. Star (18) Gradyan kafes yapılı ısı emicinin SIMSOLID analiz verileri	44
Resim 7.14. Cross (18) Gradyan kafes yapılı ısı emicinin SIMSOLID analiz verileri ..	45

Resim	Sayfa
Resim 7.15. Tesseract (18) Gradyan kafes yapılı ısı emicinin SIMSOLID analiz verileri.....	45
Resim 7.16. Vintiles (18) Gradyan kafes yapılı ısı emicinin SIMSOLID analiz verileri.....	46
Resim 7.17. Octet (18) Gradyan kafes yapılı ısı emicinin SIMSOLID analiz verileri.....	46
Resim 7.18. Diamond (18) Gradyan kafes yapılı ısı emicinin SIMSOLID analiz verileri.....	47
Resim 7.19. Deneysel Gradyan kafes yapılı ısı emicinin SIMSOLID analiz verileri.....	47
Resim 7.20. Tesseract (48) Gradyan kafes yapılı ısı emicinin SIMSOLID analiz verileri.....	48
Resim 7.21. Octet (48) Gradyan kafes yapılı ısı emicinin SIMSOLID analiz verileri.....	49
Resim 7.22. Octet (100) Gradyan kafes yapılı ısı emicinin SIMSOLID analiz verileri.....	50
Resim 7.23. 60, 80 ve 100°C ısı tablaları ile ısıtılan ısı emicilerin ölçüm örnekleri.....	52

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklamalar
μm	Micron
cm^3	Santimetreküp
D	Çap
g	gram
GPa	Gigapascal
h	Saat
J	Joule
K	Kelvin
kg	Kilogram
m	Metre
m^2	Metrekare
mm	Milimetre
mm^2	Milimetrekare
mm^3	Milimetreküp
MPa	Megapascal
r	Yarıçap
W	Watt

Kısaltmalar**Açıklamalar****3D**

3 Boyutlu

AlSi7Mg0,6

Aluminum Alloy with Silicon and Magnesium

BJ

Binder Jetting

DED

Directed Energy Deposition

DfAM

Design for Additive Manufacturing

EBM

Electron Beam Melting

LED

Light Emitting Diode

MJ

Material Jetting

PBF

Powder Bed Fusion

PCB

Printed Circuit Board

SLM

Selective Laser Melting

1. GİRİŞ

Günümüzde elektronik cihazların artan enerji yoğunluğu ve kompakt tasarım ihtiyaçları, termal yönetim sistemlerinin önemini her zamankinden daha fazla artırmıştır. Pasif ısı emiciler, doğal hava akışıyla soğutma sağlayarak cihazların sessiz ve verimli bir şekilde çalışmasına katkıda bulunur. Ancak geleneksel pin veya kanat yapılı ısı emiciler, yüzey alanı açısından sınırlı tasarım esnekliği nedeniyle performansları da kısıtlıdır. Metal eklemeli imalat teknolojileri, bu kısıtlamaları aşarak karmaşık geometrilerin üretilmesine olanak tanımaktadır. Bu bağlamda, kafes yapılar gibi inovatif tasarımlar, yüzey alanını artırarak ısı transferini optimize etme potansiyeline sahiptir. Bu çalışma, kafes yapılı pasif ısı emicilerin tasarımında eklemeli metal imalat teknolojilerinin sunduğu avantajları değerlendirirken, parametrik modelleme ve SIMSOLID yazılımında gerçekleştirilen termal simülasyon sonuçlarıyla tasarımların performansını analiz etmektedir.

Konunun tanımı

Elektronik cihazlar, sürekli artan performans talepleriyle birlikte daha fazla ısı üretmeye başlamış, bu durum cihazların termal yönetim sistemlerini kritik bir hale getirmiştir. Geleneksel ısı emiciler, yüzey alanını artırmaya yönelik sınırlı bir tasarım esnekliği sunmaktadır. Bu durum, özellikle kompakt ve yüksek performanslı elektronik cihazlarda termal yönetim için yetersiz kalabilmektedir. Kafes yapılar, bu problemi çözmek için önemli bir potansiyel sunmaktadır. Bu yapılar, yüksek yüzey alanı-hacim oranı ile etkili bir ısı transferi sağlarken, gözenekli yapıları sayesinde doğal hava akışını optimize eder.

Bu çalışmada, kafes yapılar kullanılarak tasarlanmış pasif ısı emiciler incelenmiştir. Çalışma, parametrik modelleme araçlarıyla tasarım sürecini kapsamış ve SIMSOLID yazılımında gerçekleştirilen termal analizlerle bu tasarımların soğutma performansı değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, yüzey alanını artırmaya yönelik stratejilerin, termal performansı iyileştirme üzerindeki etkisini göstermiştir. Eklemeli imalat teknolojilerinin sunduğu tasarım esnekliği, bu optimize edilmiş yapıların uygulanabilirliğini artırmıştır.

Araştırmanın amacı

Bu çalışmanın temel amacı, eklemeli metal imalat yöntemi kullanılarak tasarlanan kafes yapılı pasif ısı emicilerin soğutma performansını optimize etmektir. Kafes yapılar, yüksek yüzey alanı ile doğal hava akışını birleştirerek geleneksel tasarımlara göre üstün performans sağlamayı vaat etmektedir. Bu kapsamda, kafes yapılar, farklı geometrik parametreler ve optimizasyon stratejileriyle ele alınmış, yüzey alanını artırırken aynı zamanda ağırlığı azaltmayı hedefleyen tasarımlar geliştirilmiştir.

Bu hedef doğrultusunda, tasarımlar SIMSOLID yazılımında termal analizlerle değerlendirilmiş ve soğutma performanslarını artıran kritik parametreler belirlenmiştir. Ayrıca, bu tasarımlar SLM yöntemiyle üretilmiş ve deneysel testlerle performansları değerlendirilmiştir. Çalışma, hem teorik analizler hem de pratik uygulamalar açısından önemli katkılar sağlamayı amaçlamaktadır. Sonuçlar, elektronik cihazların termal yönetiminde yenilikçi çözümler geliştirilmesine ışık tutmaktadır.

Araştırmanın önemi

Elektronik cihazlarda termal yönetim, cihazların güvenilirliğini, enerji verimliliğini ve ömrünü doğrudan etkileyen kritik bir faktördür. Geleneksel ısı emiciler, sınırlı tasarım esnekliği ve malzeme kullanımından dolayı yüksek performanslı cihazlar için yeterli çözümler sunamayabilmektedir. Metal eklemeli imalat teknolojileri, tasarım özgürlüğünü artırarak, daha karmaşık ve optimize edilmiş geometrilerin üretimini mümkün kılmaktadır. Bu teknolojiler, malzeme kullanımını optimize etmesi ve çevre dostu çözümler sunması nedeniyle sürdürülebilirlik açısından da önem taşımaktadır.

Bu çalışmada, kafes yapılar gibi yenilikçi tasarımlar ele alınarak, ısı transferini optimize etmeye yönelik stratejiler incelenmiştir. SIMSOLID yazılımında gerçekleştirilen analizlerle, farklı kafes geometrilerinin termal performansa olan etkisi değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar hem literatüre katkı sunmakta hem de endüstriyel uygulamalarda kullanılabilecek pratik çözümler önermektedir. Bu nedenle, çalışma hem teorik hem de pratik açıdan önemli bir boşluğu doldurmaktadır.

Varsayımlar

Simülasyon ve deney süreçlerinde, çalışmanın doğruluğunu ve uygulanabilirliğini sağlamak için bazı varsayımlar yapılmıştır. İlk olarak, kullanılan malzemelerin termal ve mekanik özelliklerinin simülasyon sonuçlarına birebir yansıdığı kabul edilmiştir. Bu kabul, tasarım süreçlerinde kullanılan AlSi7Mg0,6 malzemesinin özelliklerinin hem termal analizlerde hem de üretim sırasında tutarlılık göstermesini sağlamaktadır.

Ayrıca, eklemeli imalat sırasında üretim hatalarının minimum düzeyde olduğu ve deneysel testlerin sabit çevresel koşullarda gerçekleştirildiği varsayılmıştır. Bu varsayımlar hem simülasyon sonuçlarının hem de deneysel testlerin karşılaştırılabilirliğini sağlamak açısından önemlidir. Ancak bu varsayımlar, çalışmanın doğruluğu üzerinde sınırlayıcı bir etkiye de sahip olabilmektedir.

Sınırlılıklar

Bu çalışma, belirli malzeme ve üretim yöntemleriyle sınırlı kalmıştır. Kullanılan AlSi7Mg0,6 malzemesi ve SLM üretim yöntemi, kafes yapıların tasarım ve üretim süreçlerinde öncelikli olarak tercih edilmiştir. Bununla birlikte, diğer malzemeler veya üretim yöntemleriyle kıyaslama yapılmamıştır. Bu durum, çalışmanın kapsamını daraltmakla birlikte, kullanılan malzeme ve yöntemin derinlemesine analizine olanak tanımıştır.

Çalışmanın bir diğer sınırlılığı, deneysel testlerin belirli sıcaklık ve basınç koşullarında gerçekleştirilmiş olmasıdır. Doğal çevresel faktörler veya farklı uygulama alanları bu çalışmanın dışında bırakılmıştır. Bu sınırlamalar, çalışmanın odaklanmış bir çerçevede ele alınmasını sağlamakla birlikte, genel uygulanabilirliği sınırlamaktadır.

Tanımlar

Eklemeli imalat, malzemenin katman katman eklenmesi suretiyle ürünlerin üretilmesini sağlayan çağdaş bir üretim teknolojisidir. Pasif ısı emici, harici bir enerji kaynağına gereksinim duymadan, iletim ve taşınım yoluyla ısıyı yayarak elektronik cihazların soğutulmasını sağlayan bir bileşendir. Kafes yapılar, hücre bazlı geometrik örüntüler ile

Üretilen, hafiflik ve mekanik dayanım sağlayan yapısal formlardır. Termal analiz, bir bileşenin veya sistemin sıcaklık dağılımını ve ısı transfer performansını incelemek amacıyla yapılan hesaplamalar ve simülasyonları içeren bir süreçtir. Doğal konveksiyon, bir sıvı veya gaz ortamda yoğunluk farklarına bağlı olarak oluşan ve harici bir mekanik etkiye gerek duymayan bir ısı transfer mekanizmasıdır. Bilgisayar destekli tasarım, endüstriyel tasarım süreçlerinde bilgisayar yazılımları kullanarak hassas ve özelleştirilebilir çizimler oluşturma yöntemidir. Sonlu eleman analizi ise karmaşık mühendislik problemlerini çözmek amacıyla kullanılan ve yapısal ile termal performans tahminleri için yaygın olarak uygulanan bir sayısal analiz tekniğidir.



2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI

2.1. Kafes Yapılar

Kafes yapılar, üç boyutlu uzayda birbirine bağlı birim hücrelerin periyodik düzenlemeleri olarak tanımlanır. Bu yapılar, benzersiz mekanik özellikleri ve geleneksel katı malzemelere göre avantajları nedeniyle başta malzeme bilimi ve mühendisliği olmak üzere çeşitli alanlarda büyük ilgi görmüştür. Kafes yapılar kavramı, kristalografi ve malzeme bilimindeki ilk gelişmelere kadar geri götürülebilir; burada atomların kristal bir kafes içindeki düzeni kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Bununla birlikte, kafes yapıların özellikle mühendislik ve imalat alanındaki modern uygulamaları, daha önce geleneksel yöntemlerle ulaşılamayan karmaşık geometrilerin oluşturulmasına olanak tanıyan eklemeli imalat teknolojilerinin ortaya çıkmasıyla önemli ölçüde ilerlemiştir (Rathore vd., 2021; Zhang vd., 2019).

Kafes yapıların ilk önemli uygulamaları, ağırlık azaltma ve mukavemet optimizasyonunun kritik öneme sahip olduğu havacılık ve otomotiv endüstrilerinde gözlemlenebilir. Örneğin, kafes yapıların hafif bileşenlerde kullanımı 2000'li yılların başından beri araştırılmaktadır ve son yirmi yılda eklemeli üretim teknolojileri olgunlaştıkça kayda değer gelişmeler yaşanmıştır (Özdemir ve Korkmaz, 2023). Karmaşık kafes tasarımları üretme yeteneği, mühendislerin yapısal bütünlüğü korurken malzeme kullanımını optimize etmelerini sağlayarak uçak bileşenlerinden tıbbi implantlara kadar çeşitli uygulamalarda yeniliklere yol açmıştır (Peto, 2024; Hedayati & Sadighi, 2016).

Kafes yapıların birincil avantajlarından biri, yüksek mukavemet-ağırlık oranları sağlama kabiliyetleridir. Bu özellik, performanstan ödün vermeden ağırlığı azaltmanın gerekli olduğu uygulamalarda özellikle faydalıdır. Örneğin, titanyum ve alüminyum gibi malzemelerden yapılan kafes yapılar, yüksek özgül mukavemet ve enerji emme yetenekleri de dahil olmak üzere dikkate değer mekanik özellikler sergiler (Yang, 2024). Bu özellikler onları, tasarruf edilen her bir gram ağırlığın yakıt verimliliği ve genel performansta önemli iyileştirmeler sağlayabileceği havacılık ve otomotiv sektörlerindeki uygulamalar için ideal hale getirmektedir (Wang vd., 2020).

Kafes yapıların bir diğer önemli avantajı da gelişmiş termal yönetim potansiyelidir. Kafes yapıların yüksek yüzey alanı-hacim oranı, verimli ısı transferini kolaylaştırarak onları ısı eşanjörleri ve termal yönetim sistemlerindeki uygulamalar için uygun hale getirir (Qian ve ark., 2021). Örneğin, kafes yapılar, benzersiz geometrilerinin yüksek termal yükler altında etkili ısı dağılımına izin verdiği mikro kanallı sıvı soğutmalı ısı eşanjörlerinde kullanılmıştır (Qian ve ark., 2021). Bu özellik, aşırı ısınmanın performans düşüşüne ve arızalara yol açabileceği elektronik ve otomotiv gibi sektörlerde özellikle önemlidir.

2.2. Metal Eklemeli İmalat ve Kafes Yapılar

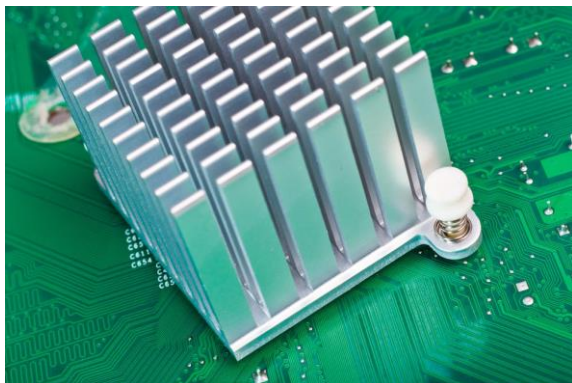
Metal eklemeli imalat ısı emiciler için alternatif kafes yapılar geliştirmek ve termal iletkenliklerini karşılaştırmak için kafes yapıların mekanik özelliklerini, enerji emme özelliklerini ve üretim sınırlamalarını dikkate almak önemlidir. Son araştırmalar, malzeme tasarrufu sağlamak ve termal iletim performansını optimize etmek için metal eklemeli üretime uygun kafes yapıları tasarlamaya odaklanmıştır. Zhang vd., 2021; Yi, 2021; Abdelaal vd., 2022; Caprio vd., 2019; Ma vd., 2021. Çalışmalarında, eklemeli imalata uygun kafes yapıların mekanik özelliklerini ve enerji emme özelliklerini geliştirmek için topoloji optimizasyonu, kompozit malzemeler ve kafes yapılar gibi çeşitli yöntemleri araştırmıştır. Ayrıca, Echeta vd., 2019; Yan vd., 2014; Mun vd., 2016. çalışmalarında eklemeli imalat süreçlerinde kafes yapıların üretim sınırları ve üretim kusurlarıyla ilgili zorluklar vurgulanmış ve bu sınırlamaların üstesinden gelmek için yenilikçi yaklaşımlara duyulan ihtiyaç vurgulanmıştır.

Metal eklemeli imalat teknolojisi, gelişmiş mekanik özelliklere sahip kafes yapılar üretme kabiliyeti nedeniyle büyük ilgi görmüştür. Yapının yoğunluğunu belirleme ve belirli uygulamalar için yüksek gözenekli kafes yapılar tasarlama yeteneği, metal eklemeli imalatın işlevsel ve verimli 3D kafes yapılar oluşturma potansiyelini göstermektedir. Eklemeli imalat teknolojileri ile birkaç milimetre kadar küçük ölçeklerde kafes yapıların imalatı gerçekleştirilebilmektedir. (Messner, 2016). Metal kafes yapıların mekanik ve enerji emme özellikleri araştırmacılar için ilgi çekici bir konu olmuştur. Ayrıca, kafes değişken yoğunluğu optimize edilmiş ve metal toz yatağı ergitme yöntemi kullanılarak kafes birim hücresinin ve optimum 3D yapının performansı deneysel olarak da doğrulanmıştır (Ueno vd., 2021).

Top, N., Şahin, İ., & Gökçe, H. (2023) çalışmalarında kafes yapıların eklemeli imalat ile endüstriyel uygulama olanaklarını belirlemeyi amaçlamaktadır. Çalışmalarında Gradyan kafes yapılar, auxetic birim hücreler kullanılarak tasarlanmış ve Material Jetting yöntemiyle fotopolimer reçinesi ile üretilmiştir. Yapılar deformasyon davranışı, yapısal mukavemet ve enerji emilimi açısından karşılaştırılmıştır. Ulusal ve uluslararası literatürde, 3D kafes yapıların mekanik özellikleri üzerine yoğun bir şekilde yapılmış yayınlar bulunmaktadır; ancak bu yapıların termal özelliklerini inceleyen araştırmalar oldukça sınırlıdır. 3D kafes yapıların mekanik özellikleri üzerindeki geniş literatür, bu yapıların dayanıklılığı, mukavemeti ve deformasyon özellikleri konularında sağlam bir temel oluşturmuştur. Ancak, aynı ölçüde dikkate değer olan ısı iletimi özellikleri üzerine yapılmış araştırmaların yeteri kadar olmaması, bu alandaki bilgi boşluğunu ortaya koymaktadır.

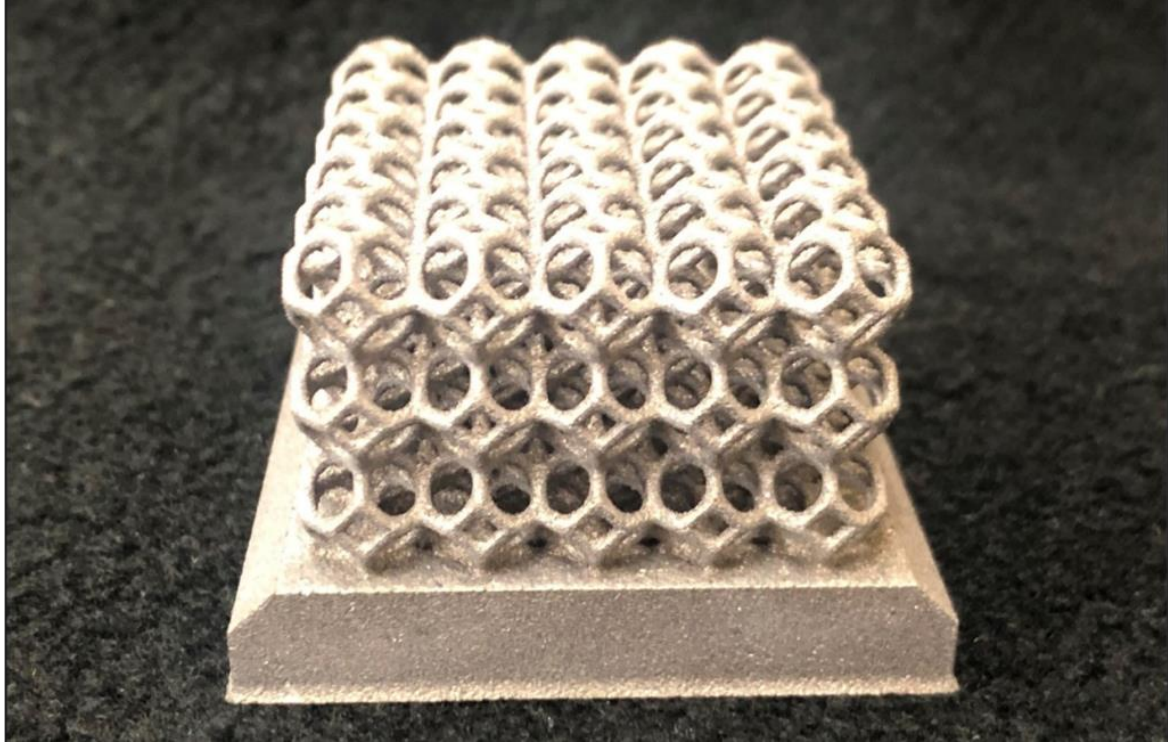
2.3. Yeni Nesil Isı Emiciler

Eklemeli imalat, geleneksel düzlemsel ve pin kanatlı ısı emicilerinin ötesinde yeni olanaklar sunarak elektronik tasarım ve soğutma alanını önemli ölçüde etkilemiştir. Eklemeli imalat teknolojilerinin yükselişi, termal kontrol alanlarında önemli bir büyümeye ve kapsamlı çalışmalara yol açarak bu alanlarda önemli değişikliklere neden olmuştur (Zhang & Yuan, 2022). Elektrikli cihazların termal tasarımında eklemeli imalatın kullanılması, son yıllarda dinamik bir şekilde gelişen yeni bir üretim teknolojisi yöntemi olarak kabul edilmektedir (Ghahfarokhi vd., 2021). Ek olarak, eklemeli imalatın, termal uygulamalar için mikro ve makro yapıları tasarlama potansiyeli sunan, gelişmiş performanslara sahip ısı transfer cihazlarının üretimi için umut verici bir teknik olduğu iddia edilmiştir (Fasano vd., 2016).



Resim 2.1. Geleneksel, kanat yapıları ısı emici tasarımı (Dreamstime).

Kafes yapı ile üretilen ısı emicileri, havanın geçmesi için yeterli alan ve etkili ısı transferi için geniş bir yüzey alanı sağlama yetenekleri nedeniyle dikkat çekmiştir. Bu yenilikçi yaklaşım sadece malzeme kullanımında tasarruf etmekle kalmaz, aynı zamanda iyi hava akışını kolaylaştırmak için gerekli olan yüzey alanını da en üst düzeye çıkarır. Eklemeli imalat teknolojileri, tasarım özgürlüğünü önemli ölçüde genişletmiş ve geometrik kısıtlamaları azaltarak karmaşık kafes yapıların üretimini ve ısı emicilerine entegrasyonunu mümkün kılmıştır (Silva vd., 2021; Collins vd., 2019). Eklemeli imalat teknolojilerinin geliştirilmesi, ısı emicilerdeki termal yayılımı artırmak için çok önemli olan karmaşık kafes yapıların imalatını basitleştirmiştir (Vaissier vd., 2019).



Resim 2.2. Kafes yapılu ısı emici tasarımı (Siemens, 2021).

Metal eklemeli imalat ısı emiciler için alternatif kafes yapıları tasarlamak ve termal iletkenliklerini karşılaştırmak üzere yeni bir yaklaşım geliştirmek için, Eklemeli İmalat için Tasarım (DfAM) fırsatlarını ve kısıtlamalarını dikkate almak önemlidir (Thompson vd., 2016). Kafes yapılarda kullanılan metallerin ve alaşımların termal iletkenliği, dikkate alınması gereken önemli bir faktördür (Klemens ve Williams, 1986). Ayrıca, kafes yapıların hem şeklini hem de dolgusunu optimize etmeye yönelik yaklaşımlar, verimliliklerinin artırılmasına katkıda bulunabilir (Xiao ve Cirak, 2021). Ayrıca, eklemeli olarak üretilen

kafes yapıların etkili termal iletkenlik ölçümü, termal performanslarını değerlendirmek için çok önemlidir (Nagano vd., 2022).

Sonuç olarak, bu referansların sentezi, metal eklemeli imalat yöntemiyle üretilen ısı emiciler için kafes yapılarının tasarımındaki son gelişmelerin detaylı bir biçimde anlaşılmasını sağlamaktadır. Bu çalışmalar, kafes tasarımlarını optimize etmenin, malzeme tasarrufu yaparak, üretim sınırlamalarını aşmanın ve termal iletim performansını artırmanın önemini vurgulamış; bu sayede metal eklemeli imalatta kafes yapı tasarımı için yeni yaklaşımların geliştirilmesine katkıda bulunmuştur. Fakat bu çalışmalar bir soğutma sistemi içerisinde farklı kafes yapıların birbiri ile karşılaştırılması ve değerlendirilmesi üzerine durmuştur. Bir kafes yapının soğutma performansının iyileştirilmesi ve soğutma performansını etkileyen parametreler üzerine araştırmalar oldukça kısıtlı olduğu gözlemlenmiştir.



3. MATERYAL ve METOD

Kafes yapıya sahip bir ısı emici tasarımında belirlenmesi gereken önemli parametreler bulunmaktadır. Bunlar; ısı emicinin boyutu, kafes yapının çapı, birim hücre şekli, hücre sayısı, yüzey alanı, yüzey alanının ortam ile temas açısı ve en önemlisi imalat türüne bağlı olarak malzeme seçimidir.

3.1. Üretim Yöntemi

Eklemeli metal imalat teknolojileri dört ayrı kategoride birbirinden ayrılmaktadır: Material Jetting (MJ), Binder Jetting (BJ), Powder Bed Fusion (PBF), Directed Energy Deposition (DED). Bu teknolojiler, tıp, havacılık ve otomotiv sektörleri de dahil olmak üzere çeşitli endüstrilerdeki potansiyel uygulamaları nedeniyle büyük ilgi görmüştür (Meteyer vd., 2014). Toz yatağı ergitme (PBF) ve yönlendirilmiş enerji biriktirme (DED), metalik malzemelerin eklemeli imalat için birincil yöntemler olarak kabul edilmektedir (Mohanty & Prashanth, 2023; Benack vd., 2018). Bağlayıcı püskürtme (BJ), parça oluşturmak için toz ve sıvı bağlayıcı madde kullanan bir diğer önemli eklemeli imalat teknolojisidir (Jang vd., 2020; Bai ve Williams, 2015). Malzeme püskürtme (MJ) de çok çeşitli malzemelerden karmaşık parçaların üretilmesi için ekonomik ve ölçeklenebilir bir yol sağlayan önemli bir yöntemdir (Bai vd., 2017).

MJ ve BJ teknolojileri metal malzemeyi ikinci bir yapıştırıcı malzeme ile birleştirdiğinden bu çalışma için uygun görülmemiştir. DED teknolojisi ise günümüzde henüz kafes yapıyı örme konusunda hassas bir imalat gerçekleştiremediği için PBF teknolojileri bu proje için tercih edilmiştir.

PBF teknolojilerinden Selective Laser Melting (SLM) veya Electron Beam Melting (EBM) imalat yöntemleri hem toz yatağı ile destek malzemesi olmadan hem de hassas yüzeyler edilmesinden dolayı bu projeye uygun görülmüştür. Bu projenin üretim aşamasında SLM 250HL model Selective Laser Melting makine kullanılmıştır, makine özellikleri Çizelge 3.1’de verilmiştir.



Resim 3.1. SLM 250HL makine görseli

Çizelge 3.1. SLM 250HL makinesi ve özellikleri (Uhlmann vd., 2016).

SLM 250 HL Makine özellikleri	
Üretim Alanı Hacmi:	250 mm x 250 mm x 350 mm
Lazer (cw):	400 W
Odak noktası çapı:	70-300 μm
Katman kalınlığı:	20-100 μm
Partikül boyutu:	10-65 μm
Üretim hızı:	5-20 cm^3/h
Tolerans:	$\pm 50 \mu\text{m}$ (x, y, z)

3.2. Malzeme

Kafes yapılar, genellikle mekanik olarak çalıştırılan ve 3D baskılarda dolgu geometrilerini oluşturan, eklemeli imalatın sıkça kullanıldığı yapı örnekleridir. Isı iletimi açısından malzemeleri değerlendirdiğimizde, alüminyum alaşımlı malzemeler, ısı iletkenliği alternatiflerine göre daha yüksek oldukları için tercih edilmektedir. Bu çalışmaya AlSi7Mg0,6 malzemesi uygun görülmüştür ve simülasyonda AlSi7Mg0,6 mekanik ve termal özellikleri kullanılmıştır.

AlSi7Mg0,6, Selective Laser Melting (SLM) ile üretilen ısı alıcılarında kullanılan bir alüminyum alaşımıdır ve bu malzemenin eklemeli metal imalatında kullanılmasının çeşitli avantajları vardır. AlSi7Mg0,6'nın yüksek termal iletkenliği ile etkili bir soğutma performansı sağlamaktadır. Ayrıca, SLM yöntemi ile üretilen AlSi7Mg0,6 ürünler, yüksek çözünürlükle birlikte yüksek mukavemet ve düşük ağırlık özellikleri sunar, bu da ürünlerin mekanik dayanıklılığını artırırken toplam ağırlığını azaltır. Bu çalışmada kullanılan AlSi7Mg0,6 alaşımın teknik özellikleri Çizelge 3.2'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.2. Al-Alloy AlSi7Mg0,6 / EN AC-42200 malzeme özellikleri (SLM Solutions).

Özellikler	Değer	Birim
Termal özellikleri		
Termal iletkenlik	150	W/m*K
Özgül ısı kapasitesi	960	J/kg*K
Mekanik özellikleri		
Elastikiyet modülü	59	GPa
Poisson oranı	0.33	-
Yoğunluk	2.68	g/cm ³
Nihai çekme gerilmesi	375	MPa
Çekme akma gerilmesi	211	MPa
Sıkıştırma akma gerilmesi	211	MPa
Termal genleşme katsayısı	0.000022	1/°C
Yapı özellikleri		
Katman kalınlığı	50	µm
Birikme oranı (max)	28.5	cm ³ /h
Yapı yoğunluğu	99	%

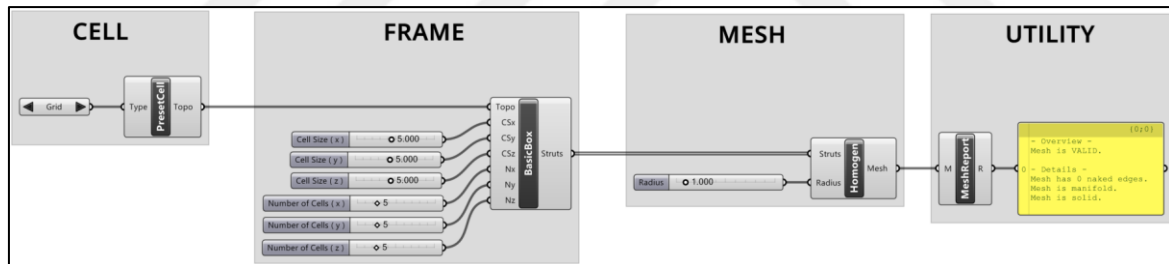
3.3. Tasarım ve Analiz Yazılımları

Tasarım ve analiz için Rhinoceros 3D, Grasshopper ve SIMSOLID yazılımları kullanılmıştır. Çok yönlü bir 3D modelleme yazılımı olan Rhinoceros 3D, mesh modelinin oluşturulması için temel sağlar. Yazılımın karmaşık geometri üretme yetenekleri ve parametrik tasarım için Grasshopper ile entegrasyonu, mesh modelleme için uygun bir platform haline getirmektedir. Rhinoceros 3D ve Grasshopper kombinasyonu, parametrik kafes tasarımı için güçlü bir platform sunarak çeşitli mühendislik alanlarında karmaşık kafes yapıların oluşturulmasını ve analizini sağlamaktadır. Bu çalışmada Rhinoceros 3D version 8 ve Grasshopper Build 1.0.0007 sürümleri kullanılarak kafes modeller oluşturulmuştur. Grasshopper'a kafes yapıların birim hücrelerini hazır olarak ekleyebileceğimiz IntraLattice eklentisi kurulmuştur.

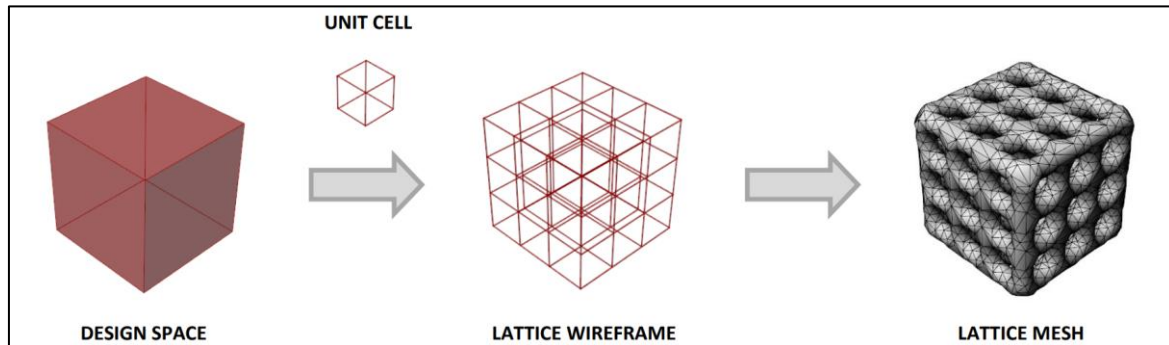
IntraLattice, Grasshopper için bir tasarım alanı içinde kafes yapılar oluşturmak için kullanılan bir C# eklentisidir. Açık kaynaklı bir alternatif olarak geliştirilmiştir. McGill'in Eklemeli İmalat ve Tasarım Laboratuvarı'nda (ADML) geliştirilen ve devam eden bir proje olarak, çok ölçekli tasarım ve optimizasyonda atılımlar için bir platform görevi gören değerli bir araştırma aracı olmuştur.

IntraLattice eklentisinin temelde dört adet modülden oluşmaktadır: CELL modülü birim hücreyi oluşturur. FRAME modülü bu birim hücreyi, bir tasarım alanını ve çeşitli kafes parametrelerini alır ve bir eğri (curve) listesi olarak kafesin bir tel kafesini çıkarır. MESH modülü daha sonra eğriler listesini alır ve herhangi bir standart formatta (STL, OBJ, PLY, vb.) işlenebilen tek bir katı mesh çıktısı verir. UTILITY modülü isteğe bağlıdır ve ön/son işleme için bir dizi araç içerir. Modüler bir iş akışının faydaları şunlardır:

- Esneklik: Her modül bağımsız olarak değiştirilebilir; çeşitli bileşenler kullanılabilir.
- Kademeli işlem: Kullanıcılar bir sonrakini işlemekten önce her modülü ön izleyebilir.
- Değiştirilebilirlik: Veriler, adımlar arasında düzenlenebilir.



Resim 3.2. Grasshopper Çalışma alanında IntraLattice modülleri.

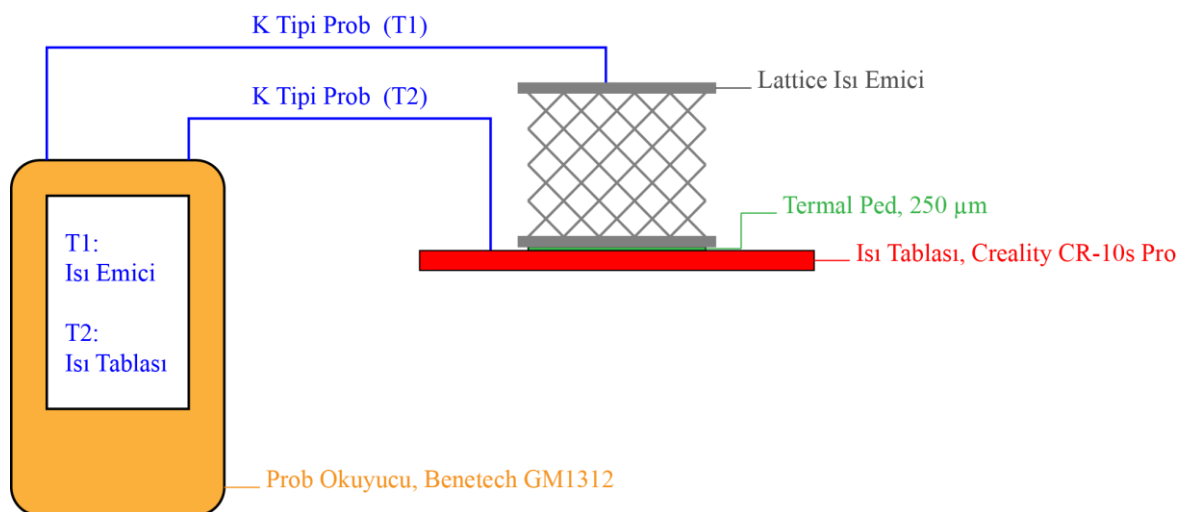


Resim 3.3. Hacimli bir kafes yapı oluşturma örneği.

SIMSOLID yazılımı, 3D baskı ve bilgisayar destekli tasarım (CAD) için yaygın olarak kullanılan STL (Stereolithography) dosyalarını doğrudan kullanan sonlu eleman analizi (FEA) için özel bir araçtır. SIMSOLID ve STL dosyaları arasındaki ilişki, öncelikle yazılımın STL dosyalarını analiz için karmaşık yapıların geometrik temsilleri olarak içe aktarma yeteneğine dayanmaktadır. Bu özellik, kullanıcıların geleneksel mesh modelleme sürecini atlamasına olanak tanıyarak tasarımdan analize daha akıcı bir iş akışı sağlar. STL dosyaları, karmaşık geometrileri SIMSOLID'e aktarmak için bir format görevi görerek, zaman alıcı ve hesaplama açısından yoğun olabilen geleneksel meshleme tekniklerine ihtiyaç duymadan verimli analiz yapılmasına olanak tanır (Fonfría vd., 2021; Zamzam, 2024). Bu meshsiz yaklaşım, özellikle geleneksel sonlu elemanlar yöntemlerinin (FEM) zorlanabileceği karmaşık tasarımlar için yazılımın kullanılabilirliğini ve performansını önemli ölçüde artırmaktadır (Fonfría vd., 2021; Rivera vd., 2020).

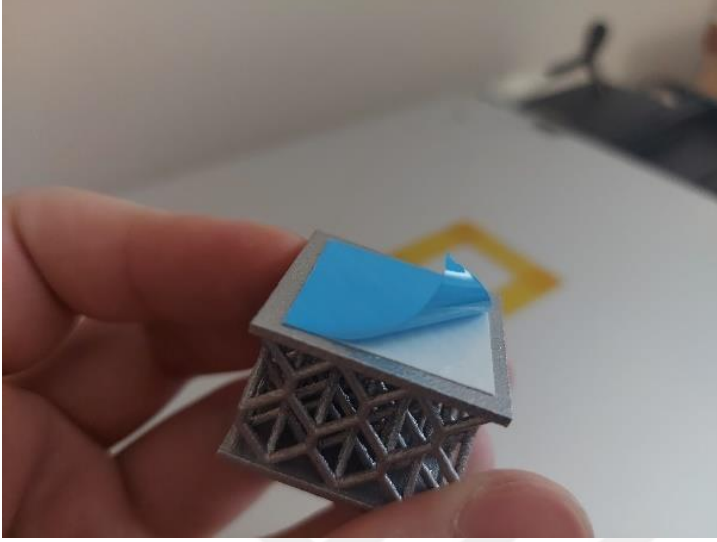
3.4. Deney Ekipmanları

Modellerin termal performanslarını gözlemleyebilmek için ısı tablası deney düzeneği kurulmuştur. Isı tablası olarak Creality üreticisinin CR-10s Pro ürünün dijital ısı tablası, ölçüm aleti olarak Benetech GM1312 Prob Okuyucu ve 2 adet K Tipi Prob kullanılmıştır. Isı tablasının yüzey ölçüsü 310x310 mm'dir. Ortam sıcaklığı ölçümü için TFA Dostmann 30.5027.01 sıcaklık ve nem ölçer cihazı kullanılmıştır.



Şekil 3.1. Isı tablası deney düzeneği.

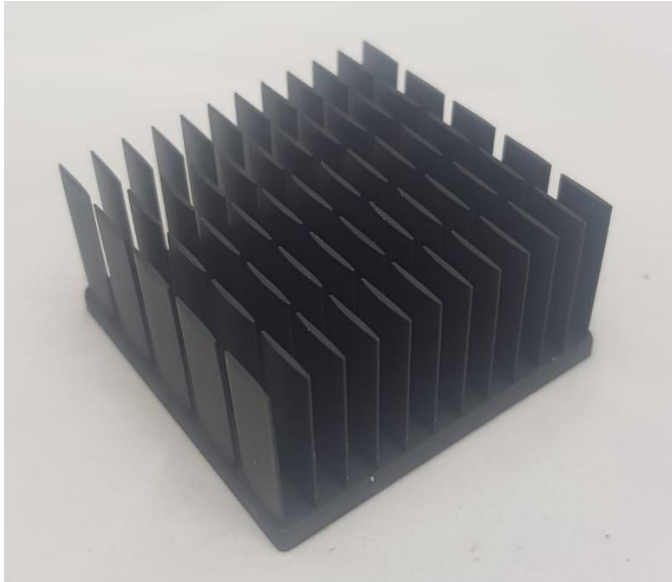
Isı emicinin üretimi sırasında oluşabilecek yüzey gözeneklerinin oluşturabileceği temassızlığı en aza indirebilmek adına ısı tablası ve ısı emici arasına çift taraflı bantlı 250 μm kalınlığında termal ped yapıştırılmıştır.



Resim 3.4. Termal pedin üretilen ısı emiciye uygulaması.

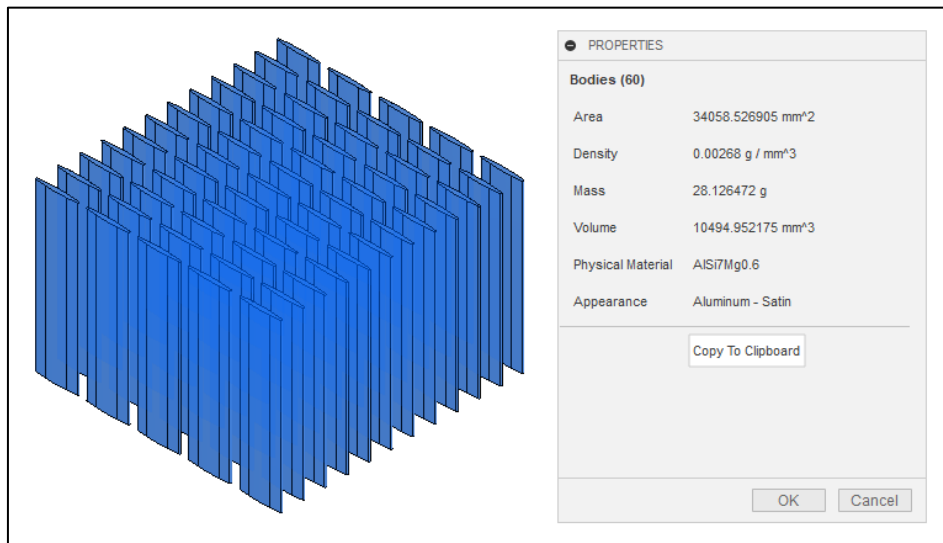
4. KAFES YAPILARIN MODELLENMESİ

Bu çalışmada boyut ve hacim parametreleri için Alpha LPD50-35 modelinden referans tasarım oluşturulmuştur.



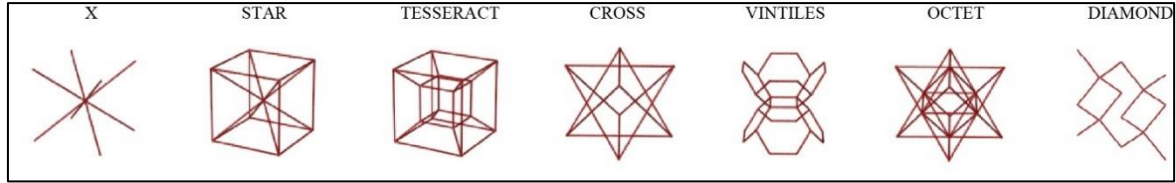
Resim 4.1. Alpha LPD50 ısı emici tasarımı (Shagal Technologies).

Ölçüleri 50 x 50 x 35 mm olan Alpha Novatech firması tarafından üretilen LPD50-35 ısı emici modeli ait step dosyası Fusion360 yazılımında ele alınmıştır, ısı emicinin kanatları tabanından ayrılmıştır ve AlSi7Mg0,6 malzemesi tanımlanarak ağırlık analizi yapılmıştır.

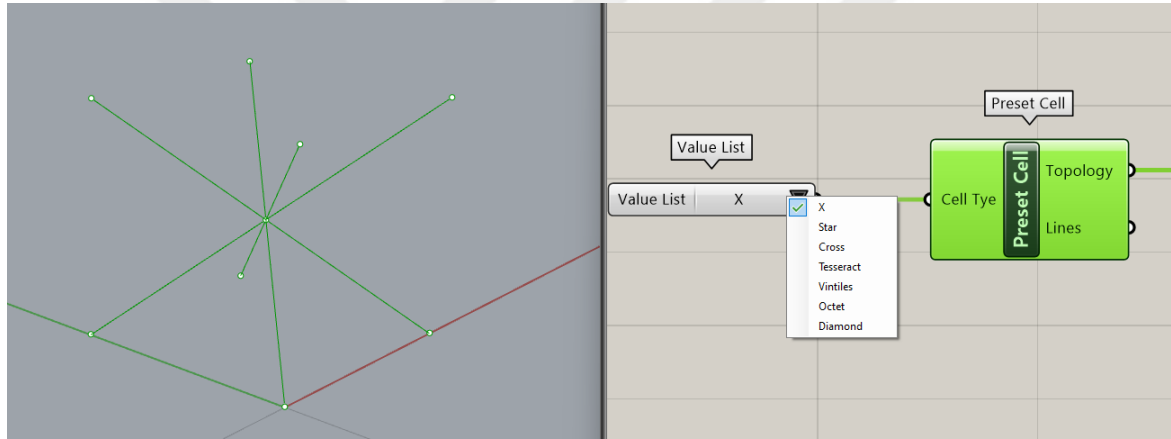


Resim 4.2. LPD50-35 ısı emicisinin kanatlarının fiziksel özellikleri.

Analiz sonucuna göre LPD50-35 ısı emici modelinin kanat yapısı 34058,53 mm² alana, 10494,95 mm³ hacme ve buna bağlı olarak 28,13 g ağırlığa sahiptir. Bu modelin hacmi ve kutu ölçüleri tasarlanacak olan kafes yapıların sınırlarını belirlemektedir. Bu sınırlar içerisinde kafes yapılar Rhinoceros, Grasshopper ve IntraLattice yazılımları ile modellenmeye başlanmıştır.

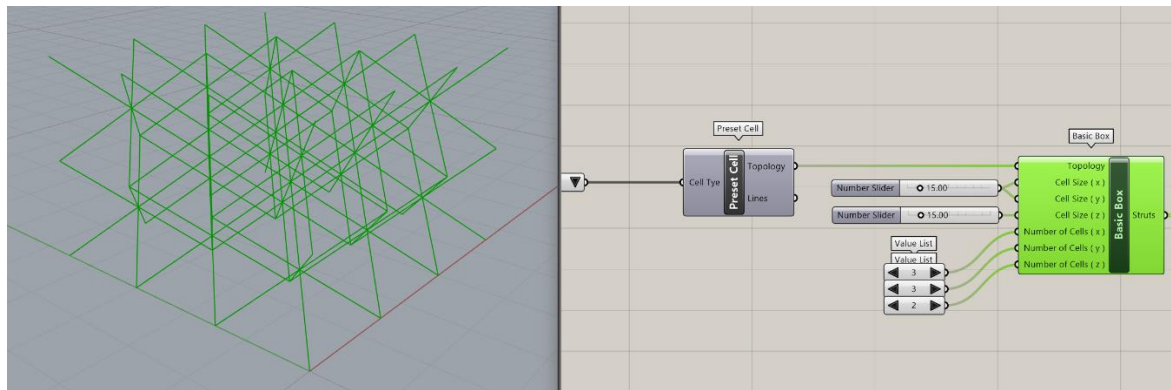


Resim 4.3. Intralattice modülü dahilinde olan birim hücreler.



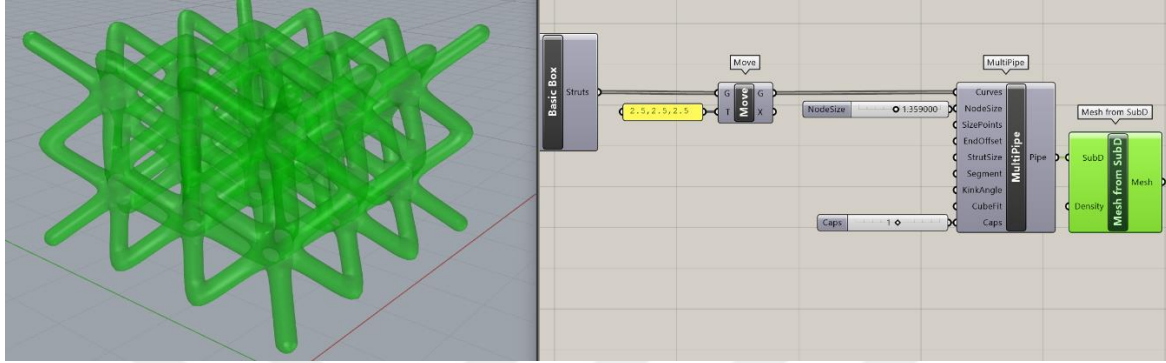
Resim 4.4. Birim hücrenin Grasshopper çalışma alanına eklenmesi.

Basic Box modülü ile birim hücre, hücre boyutu ve adeti parametreleri ile çoğaltılmıştır.



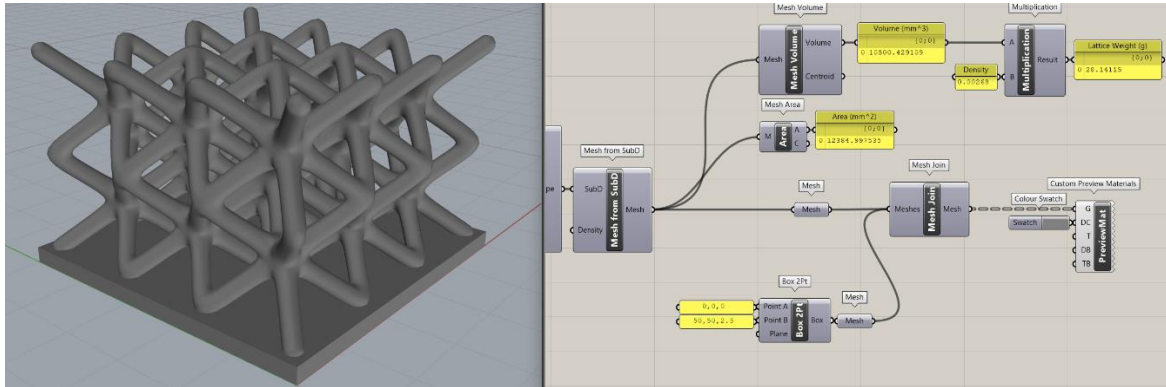
Resim 4.5. Birim hücreler ile kafes yapı oluşturulması.

Sonra oluşturacağımız, ölçüleri 50x50x2,5 mm olan ısı emicinin taban plakası için Move modülü ile tasarım ötelenmiştir. Birim hücrelerin oluşturduğu ağ yapısına MultiPipe modülü ile hacim kazandırılmıştır. Bu aşamada NodeSize kafes yarıçapını, Caps=1 komutu ise uç kısmı açıklıklarının yuvarlatılarak kapatılmasını temsil etmektedir.



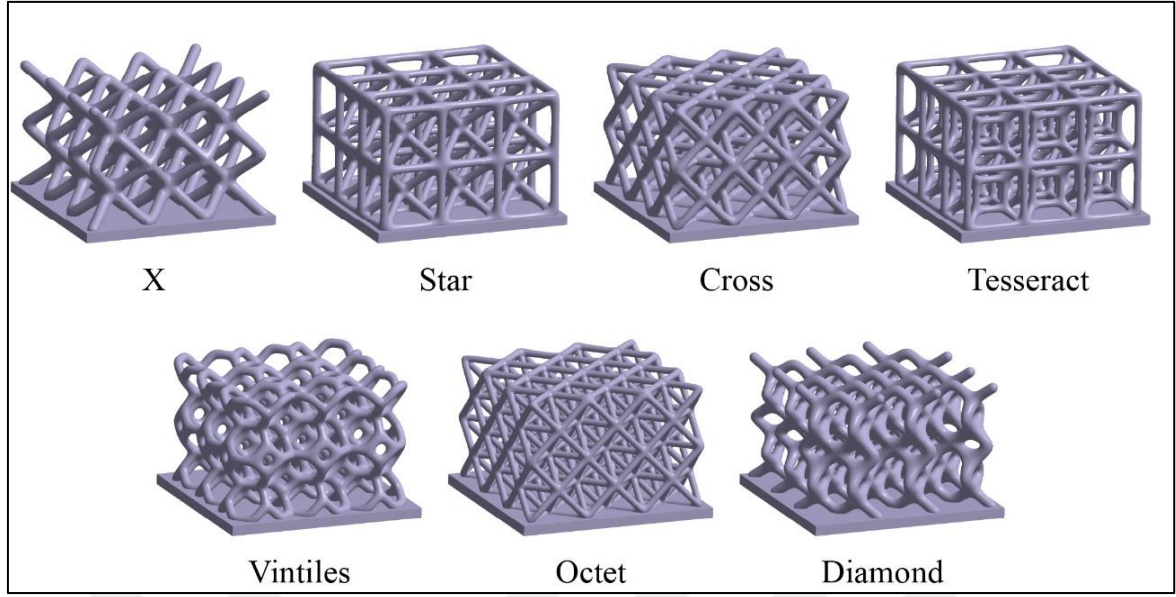
Resim 4.6. Kafes yapıya hacim kazandırılması.

Oluşturulan kafes mesh yapıların hacimleri referans modelin kanat yapısının hacmine ± 10 mm³ denk olacak şekilde kontrol edilerek düzenlenmiştir ve mesh yapılar birleştirilerek nihai tasarım elde edilmiştir.



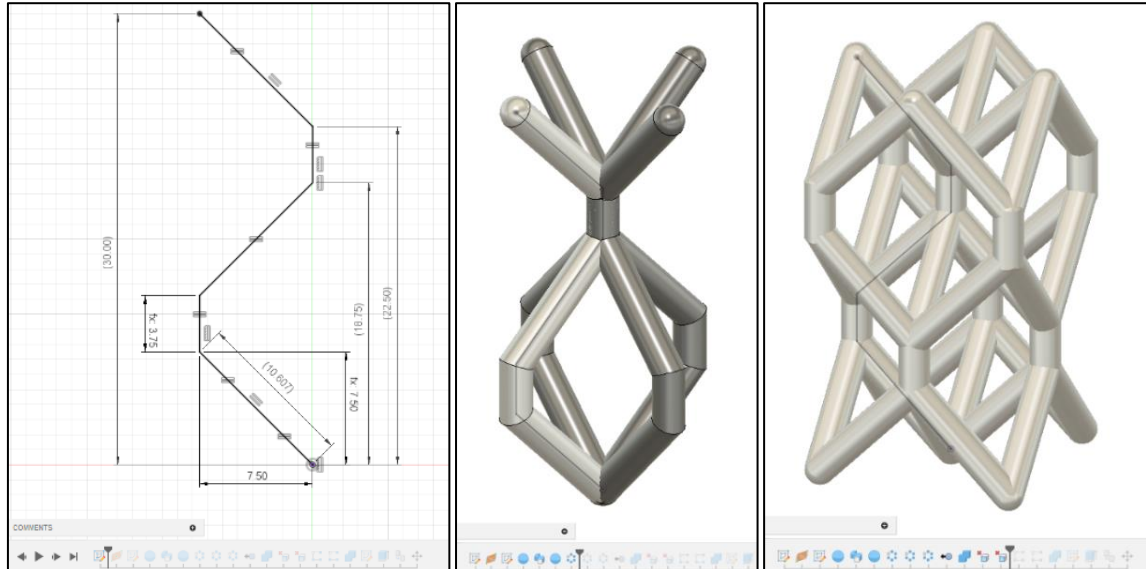
Resim 4.7. Kafes yapıyı bir ısı emicinin nihai tasarımı.

Ticari olarak satılan ve devre kartı bileşenlerinde pasif soğutma olarak kullanılan LPD50-35 modeli referans alınarak kafes yapıların boyutları 50x50 mm genişliğinde, yüksekliği 35 mm ve hacmi 10500 ± 10 mm³ olarak belirlenmiştir. Bu sınırlar içerisinde X, Star, Cross, Tesseract, Vintiles, Octet ve Diamond kafes yapıları eşit hacimde olacak şekilde Rhinoceros 3D ve Grasshopper yazılımında modellenmiştir.

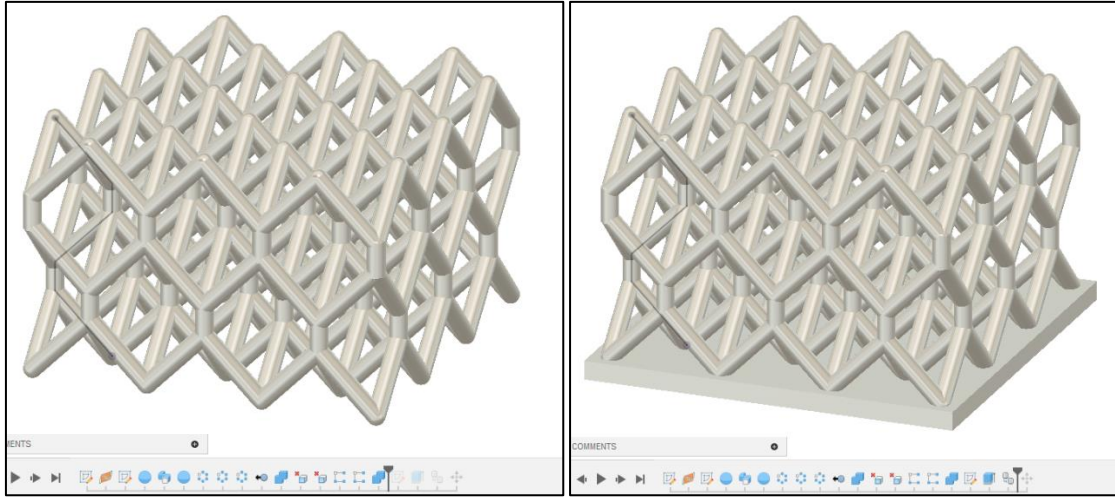


Resim 4.8. 50x50x35 mm ölçülerinde 18 birim hücre ile modellenen kafes yapıları ısı emiciler.

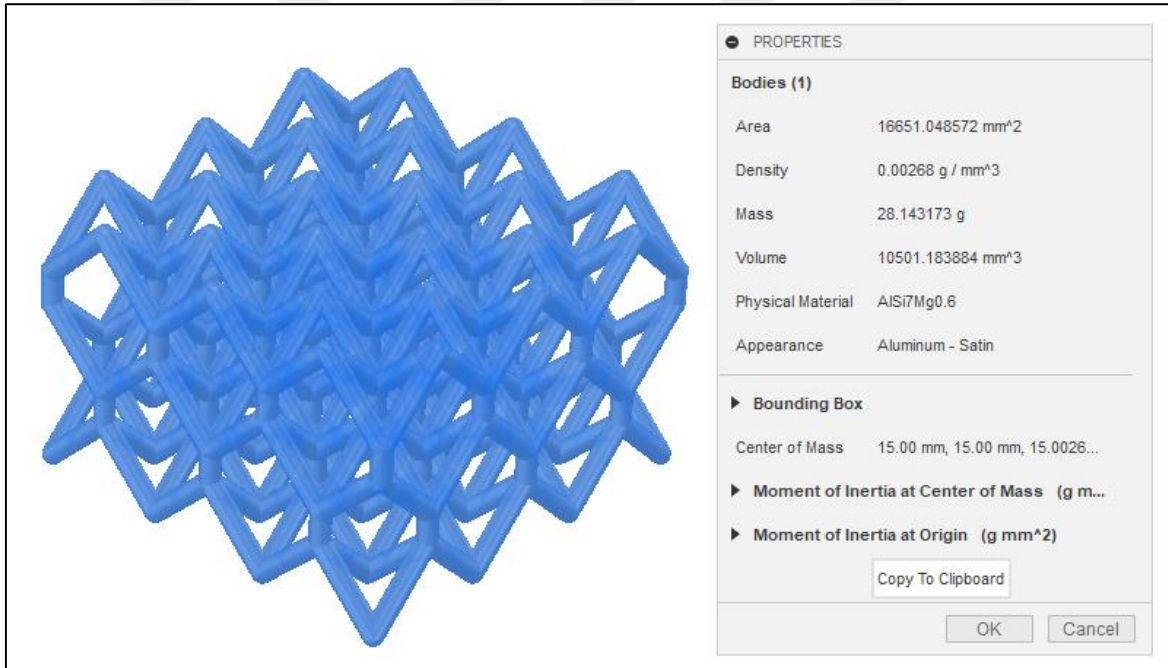
Ayrıca, bu kafes yapıları ek Fusion360 yazılımı kullanılarak olarak alternatif bir deneysel kafes yapı tasarlanmıştır. Böylece örüntü oluşturabilen bir birim hücrenin tasarlanması ve örüntünün kafes yapıya evrilmesi deneyimlenmiştir. Oluşturulan deneysel hücrenin parametreleri ve tasarım adımları Resim 4.9’da verilmiştir.



Resim 4.9. Fusion360 yazılımında deneysel birim hücre oluşturulması.



Resim 4.10. Deneysel tasarlanan birim hücre ile kafes yapılı ısı emici tasarımı.

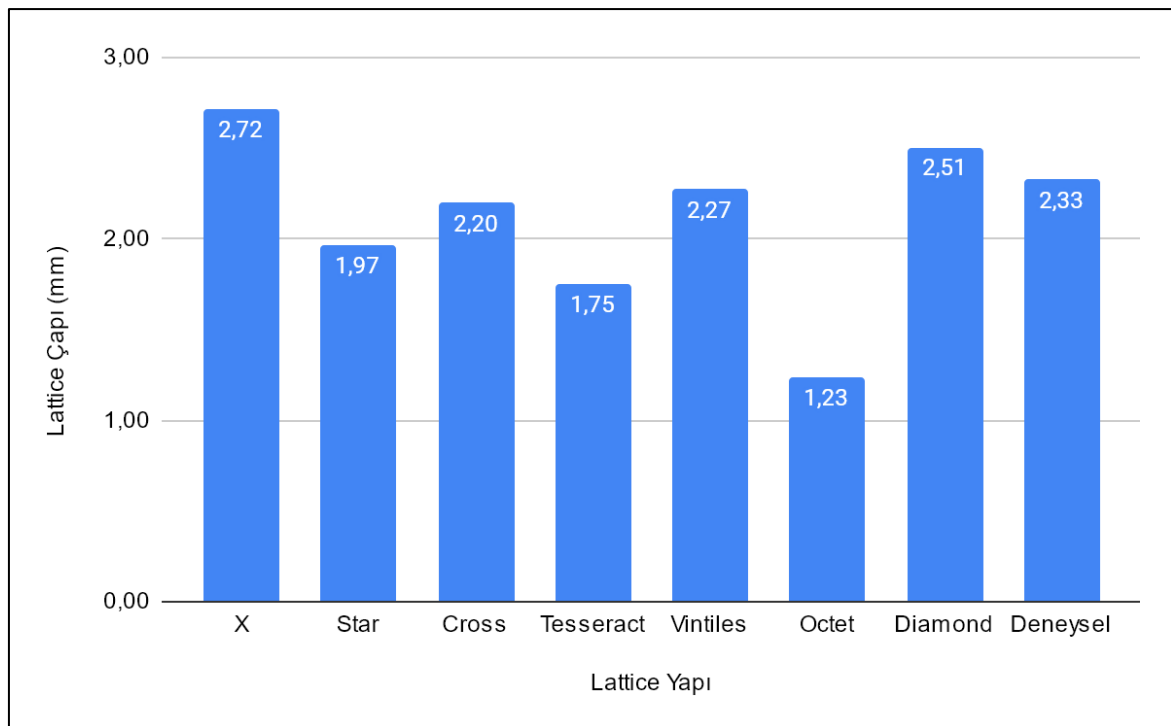


Resim 4.11. Deneysel kafes yapının fiziksel özellikleri.

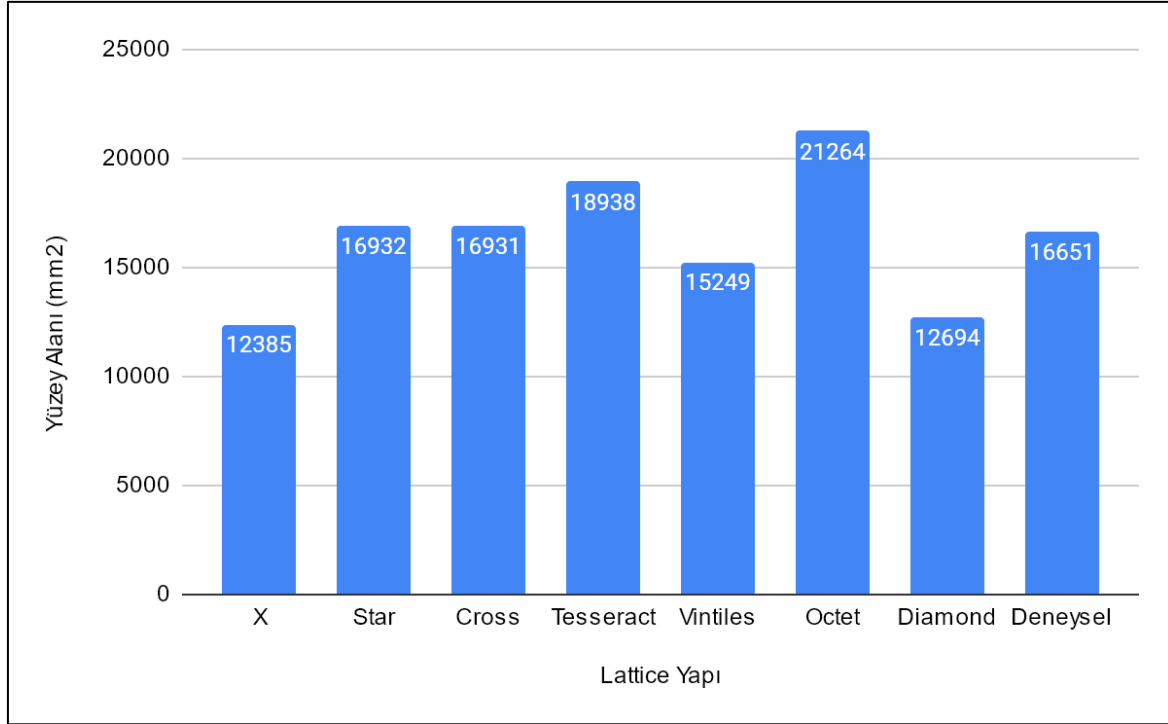
Referans ısı emici modelinin sınırları içerisinde, Rhinoceros ve Grasshopper yazılımda tasarlanan 18 birim hücreli kafes yapıların ve Fusion360 yazılımda tasarlanan deneysel kafes yapısının kafes yarıçapı, yüzey alanı, hacmi, kafes gövde ağırlığı ve alan/hacim oranı verileri Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. 18 birim hücreli ve deneysel oluşturulan kafes yapıların fiziksel özellikleri.

Yapı	NodeSize r(mm)	Alan (mm ²)	Hacim (mm ³)	Kafes Kütlesi (g)	Alan/Hacim
X (18)	1,359	12384,99	10500,42	28,14	1,18
Star (18)	0,983	16931,88	10507,01	28,16	1,61
Cross (18)	1,099	16930,81	10502,13	28,15	1,61
Tesseract (18)	0,876	18937,70	10503,70	28,15	1,80
Vintiles (18)	1,136	15248,98	10503,43	28,15	1,45
Octet (18)	0,834	21263,58	10496,05	28,13	2,03
Diamond (18)	1,253	12693,74	10507,69	28,16	1,21
Deneysel	1,163	16651,05	10501,18	28,14	1,59



Şekil 4.1. birim hücreli ve deneysel oluşturulan kafes yapıların kafes çapları.



Şekil 4.2. Eşit hacme sahip kafes yapıların yüzey alanları.

Yüksek yüzey alanı/hacim oranı, verimli soğutma süreçleri için önemlidir. Bu aşamada kafes yapıların yüzey alanı verileri pasif soğutma performansları hakkında bize bir öngörü sağlamaktadır.

Grafikleri incelediğimizde kafes çapının küçülmesi ve kafes yoğunluğunun artırılması yapının yüzey alanını artırdığı gözlemlenmiştir. Bu bağlamda yüzey alanının hacmine oranı en yüksek olan octet yapısı ve ikinci sırada olan Tesseract yapısının hacimleri $10500 \pm 10 \text{ mm}^3$ olarak sabit tutulması kaydı ile kafes hücre sayıları arttırılmış ve kafes çapları küçültülmüştür. 48 hücreli yeni Octet ve Tesseract yapının verileri Çizelge 4.2’te verilmiştir.

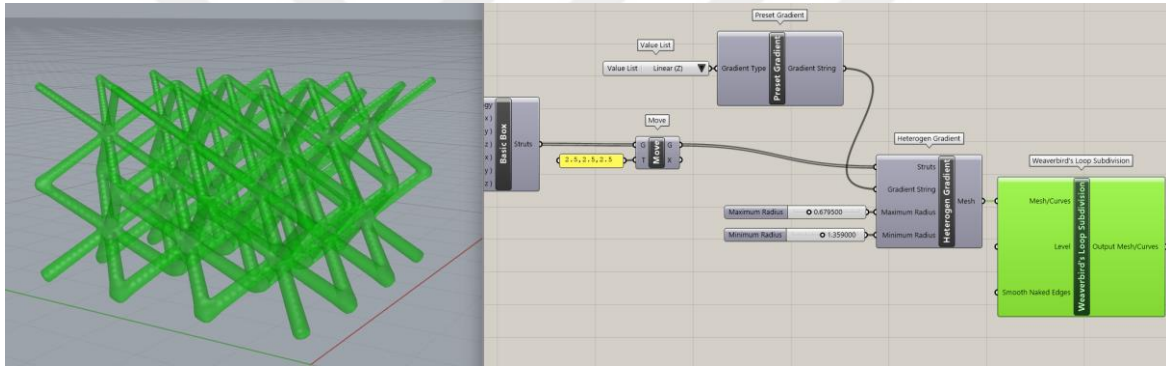
Çizelge 4.2. 48 birim hücreli Tesseract ve Octet kafes yapısının fiziksel özellikleri.

Yapı	NodeSize r(mm)	Alan (mm ²)	Hacim (mm ³)	Kafes Kütlesi (g)	Alan/Hacim
Tesseract (48)	0,651	25141,40	10494,80	28,13	2,40
Octet (48)	0,617	28353,53	10506,12	28,16	2,70

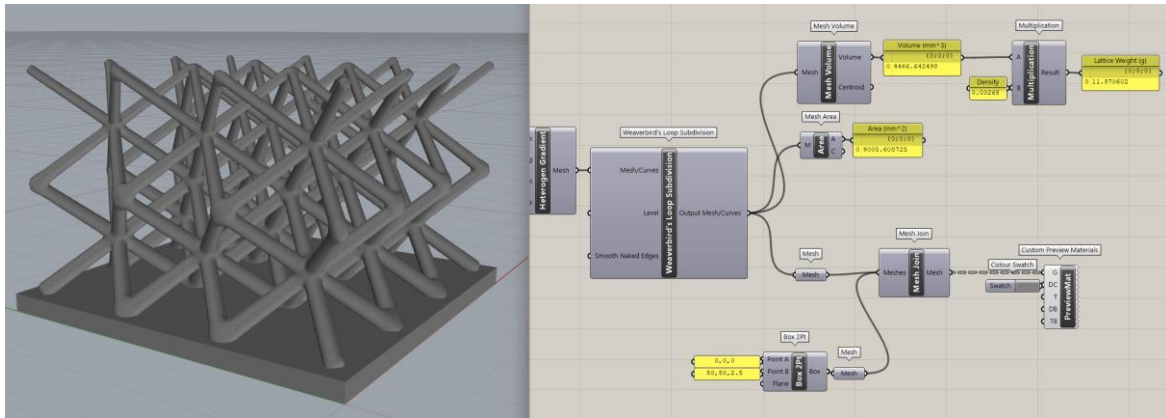
Aynı hacim içerisinde kafes hücre sayıları artırılması ve kafes çapları küçültülmesi yüzey alanında artış sağlamış, dolayısıyla yüzey alanının hacme olan oranını artırılmasında olumlu sonuç vermiştir. Tesseract yapısının yüzey alanı / hacim oranı 1,80'den 2,40'a, Octet yapısının yüzey alanı / hacim oranı 2,03'ten 2,70'e yükselmiştir.

4.1. Kafes Yapılara Gradyan Uygulaması

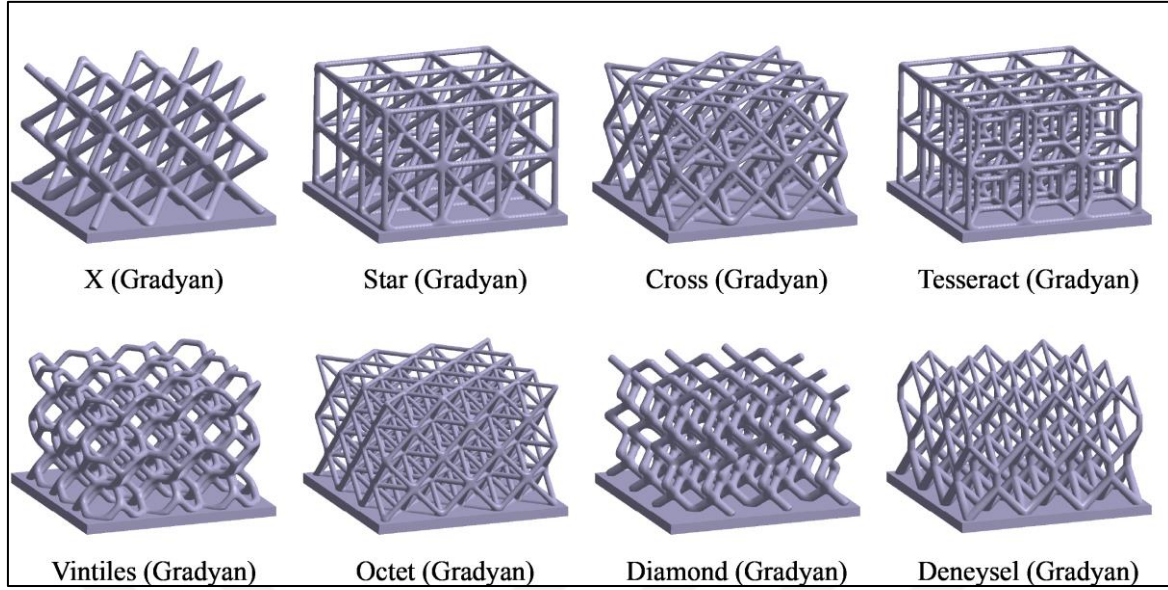
Oluşturulan kafes yapıların taban kafes çapı D ise üst çapı $D/2$ olacak biçimde Rhinoceros ve Fusion360 yazılımında modeller parametrik olarak düzenlenmiştir. Rhinoceros için bu düzenleme işlemlerinin bir örneği X kafes yapısı üzerinden aşağıda Resim 4.12'de verilmiştir.



Resim 4.12. Kafes yapıya gradyan uygulaması.



Resim 4.13. Gradyan kafes yapılı ısı emici tasarımı.



Resim 4.14. 50x50x35 mm ölçülerinde 18 birim hücre ile modellenen gradyan kafes yapıları ısı emiciler.

Oluşturulan 18 birim hücreli gradyan kafes yapıların taban kafes yarıçapı (NodeSize1), tepe kafes yarıçapı (NodeSize2), yüzey alanı, hacmi, kafes gövde ağırlığı ve alan/hacim oranı verileri Çizelge 4.3'te verilmiştir.

Çizelge 4.3. D/2 oranlı gradyan uygulanmış kafes yapıların fiziksel özellikleri.

Yapı	NodeSize1 r(mm)	NodeSize2 r(mm)	Alan (mm ²)	Hacim (mm ³)	Kafes Kütle (g)	A/H
X (18) Gradyan	1,359	0,6795	9005,60	4466,64	11,97	2,02
Star (18) Gradyan	0,983	0,4915	11912,95	4376,61	11,73	2,72
Cross (18) Gradyan	1,099	0,5495	12327,59	4976,74	13,34	2,48
Tesseract (18) Gradyan	0,876	0,4380	12900,36	4214,43	11,29	3,06
Vintiles (18) Gradyan	1,136	0,5680	11003,96	4667,71	12,51	2,36
Octet (18) Gradyan	0,834	0,4170	15676,35	4872,3	13,06	3,22
Diamond (18) Gradyan	1,253	0,6265	8471,64	3888,18	10,42	2,18
Deneysel Gradyan	1,163	0,5815	13088,38	6226,21	16,69	2,10

Oluşturulan gradyan yapılar arasından hacmi en büyük olan deneysel kafes yapısı referans olarak ele alınıp diğer kafes yapıların hacimleri de $6225 \pm 5 \text{ mm}^3$ 'e yükseltilmesi için tepe kafes yarıçapı parametresi yeniden düzenlenmiştir. Bu bağlamda yeniden oluşturulan 18 ve 48 birim hücreli gradyan kafes yapıların taban kafes yarıçapı (NodeSize1), tepe kafes yarıçapı (NodeSize2), yüzey alanı, hacmi, kafes gövde ağırlığı ve alan/hacim oranı verileri Çizelge 4.4'te verilmiştir.

Çizelge 4.4. Hacimleri birbirine eşitlenmiş gradyan kafes yapıların fiziksel özellikleri.

Yapı	NodeSize1 r(mm)	NodeSize2 r(mm)	Alan (mm ²)	Hacim (mm ³)	Kafes Kütle (g)	A/H
X (18) Gradyan	1,359	1,05677	12385,00	6225,53	16,68	1,99
Star (18) Gradyan	0,983	0,78766	14119,35	6223,63	16,68	2,27
Cross (18) Gradyan	1,099	0,75898	13803,83	6228,7	16,69	2,22
Tesseract (18) Gradyan	0,876	0,72697	15559,63	6226,52	16,69	2,50
Tesseract (48) Gradyan	0,876	0,72757	20668,27	6226,48	16,69	3,32
Vintiles (18) Gradyan	1,136	0,83776	12633,51	6227,9	16,69	2,03
Octet (18) Gradyan	0,834	0,58857	17615,24	6227,84	16,69	2,83
Octet (48) Gradyan	0,617	0,42788	23366,31	6226,57	16,69	3,75
Diamond Gradyan	1,253	1,11576	10540,87	6223,72	16,68	1,69

Gradyan uygulaması da yüzey alanının hacme olan oranını artırılmasında olumlu sonuç vermiştir. 48 hücreli Octet Gradyan yapısının yüzey alanı / hacim oranı 2,70'ten 3,75'e yükselmiştir. Daha önce soğutma performansının yüzey alanın hacme olan oranı ile doğru orantılı olduğundan bahsedildi. Oluşturulan gradyan yapılar arasından bu oranı en yüksek olan yapı 48 hücreli Octet Gradyan yapısı olmuştur.

Yüzey alanın hacme oranının daha yükseltilmesi adına Octet yapısı tekrardan ele alınmıştır ve 100 birim hücreli Octet Gradyan yapısı modellenmiştir. Birim hücre sayısı 5x5x4 olacak şekilde 100'e yükseltilen Octet Gradyan yapının hacmi korunması adına tepe kafes yarıçapı (NodeSize2) 0,20263 mm olacak şekilde inceltirilmiştir.

Çizelge 4.5. 100 birim hücreli Octet Gradyan kafes yapının fiziksel özellikleri.

Yapı	NodeSize1 r(mm)	NodeSize2 r(mm)	Alan (mm ²)	Hacim (mm ³)	Kafes Kütle (g)	A/H
Octet (100) Gradyan	0,617	0,20263	27946,59	6227,13	16,69	4,49

Oluşturulan 100 birim hücreli Octet Gradyan yapının yüzey alanı 4580,28 mm² artarak yüzey alanın hacme oranı 4,49'a yükselmiştir.





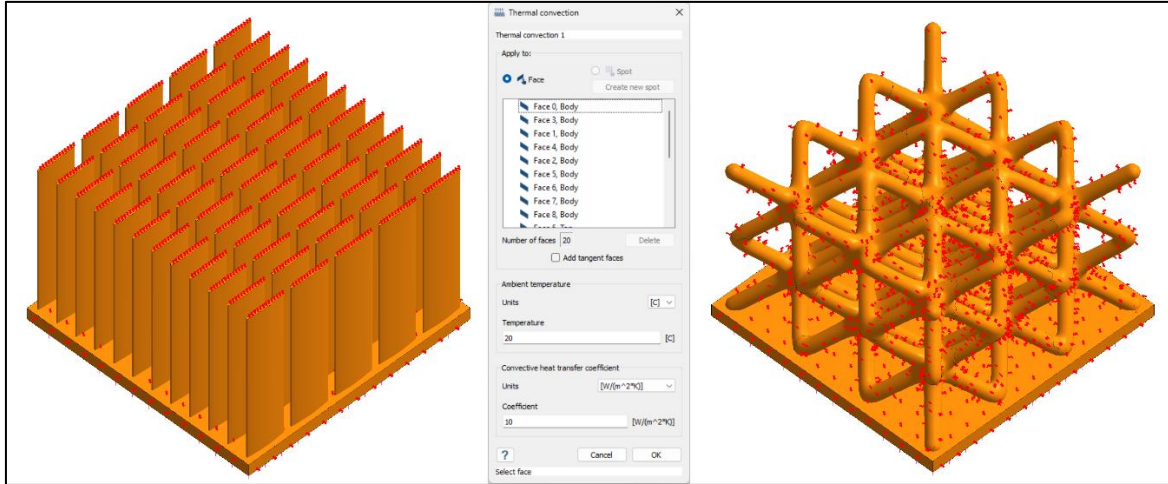
5. ISI EMİCİLERİN TERMAL ANALİZİ

Rhinoceros ve Fusion360 yazılımlarında oluşturulan bu mesh modeller, termal analiz için STL formatında Altair SIMSOLID yazılımına aktarılmış ve tüm modellere AlSi7Mg0,6 malzeme özellikleri tanımlanmıştır.

SIMSOLID, thermal steady-state (termal kararlı durum) analizi sağlayabilen bir yazılımdır. Doğru ve verimli termal simülasyonlar gerçekleştirmek için sonlu eleman analiz tekniği kullanır. Thermal steady-state analizini kullanarak ısı akışı, sıcaklık dağılımı ve zaman içinde sabit kalan ısı akış hızları gibi termal özellikleri belirleyebilir (J vd., 2021). Bu analizler malzemelerin termal iletkenliğini tahmin etmek (Jagueneau vd., 2019) ve farklı sistemlerde termal tasarımı optimize etmek (Hong vd., 2018; Su vd., 2012) gibi çeşitli uygulamalar için çok önemlidir. Altair SimSolid'in thermal steady-state analizi yapma kabiliyeti, malzeme bilimi, makine mühendisliği ve bilgisayar bilimi gibi çeşitli alanlarda termal simülasyonlara duyulan ihtiyaçla karşılaşmaktadır.

Termal kararlı durum, bir sistemdeki sıcaklığın zaman içinde sabit kaldığı ve ısı üretimi ile dağıtımı arasında bir denge olduğunu gösteren bir durumu ifade eder ("Power and Thermal Management Issues for Portable Processors", 2020). Soğutucuların test edilmesi bağlamında, ısıyı verimli bir şekilde dağıtmada bir soğutucunun etkinliğini değerlendirmek için termal kararlı duruma ulaşmak çok önemlidir. Termal kararlı durum testleri, ısı emicileri test etmek için yaygın bir yöntemdir, belirli uygulamalar için en uygun soğutucu tasarımının ve malzemelerinin ve tasarımlarının seçilmesine yardımcı olur.

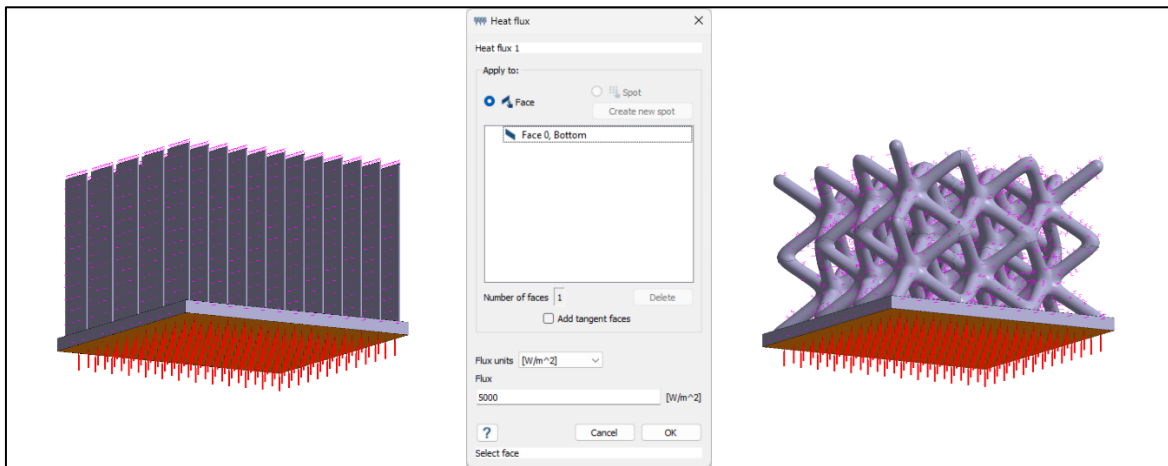
Normal şartlar altında havadaki ısı transfer katsayısı tipik olarak 5 ila 10 W/m²K arasında değişmektedir (Li vd., 2015). Bu çalışmada ortam sıcaklığı 20 °C, konvektif ısı transfer katsayısı (Convective heat transfer coefficient) 10 W/m²K olarak ele alınmıştır. Bu termal konveksiyon değerleri modellerin ortam ile temas eden tüm yüzeylerine tanımlanmıştır.



Resim 5.1. SIMSOLID yazılımında termal konveksiyon uygulaması.

Isı akısı (heat flux), tipik olarak metrekare başına watt (W/m^2) cinsinden ölçülen, birim alan başına ısı transferi oranını ifade eder. Belirli bir yüzey alanından belirli bir süre içinde geçen ısı enerjisi miktarını temsil eder. Soğutucuların test edilmesi bağlamında, ısı akısının anlaşılması, soğutucunun ısıyı verimli bir şekilde dağıtma yeteneğinin değerlendirilmesine yardımcı olur.

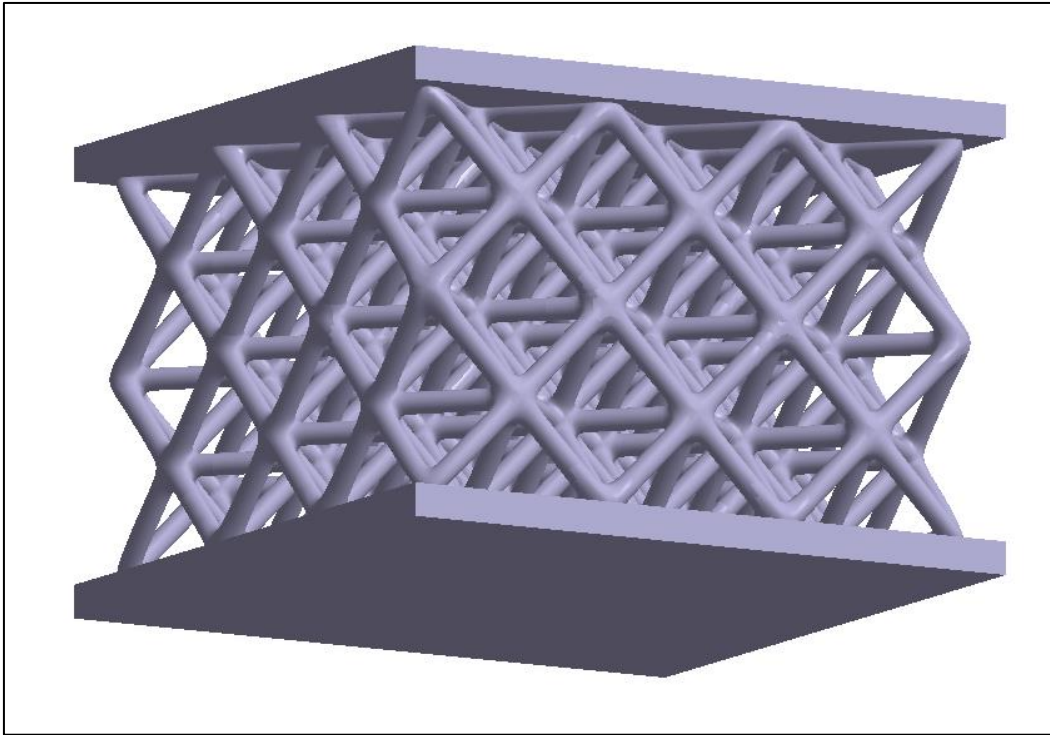
Mjallal vd. (2018) çalışmalarında, bir ısı emiciyi 1250 , 2500 ve $5000 \text{ W}/\text{m}^2$ olmak üzere üç farklı ısı akısı (heat flux) altında incelemiştir. $5000 \text{ W}/\text{m}^2$ ısı akısı ile ısı emicinin elektronik komponentin çalışması için maksimum izin verdiği sıcaklığa eriştiğini belirtmişlerdir. Bu çalışmada da $5000 \text{ W}/\text{m}^2$ ısı akısı referans olarak kullanılıp SIMSOLID yazılımında ısı emicilerin tabanlarına uygulanmıştır.



Resim 5.2. SIMSOLID yazılımında ısı akısı uygulaması.

6. ISI EMİCİLERİN ÜRETİMİ

Oluşturulan 18 ve 48 hücreli Octet yapı, 18 ve 48 hücreli Octet Gradyan yapı, 18 ve 48 hücreli Tesseract yapı, 18 ve 48 hücreli Tesseract Gradyan, Deneysel yapı ve Deneysel Gradyan yapı olmak üzere 10 model SLM yöntemi ile AlSi7Mg0,6 malzemesinden üretilmiştir. Üretilen modellerin termal performanslarını incelemek adına tepe noktalarından ölçüm gerekmektedir, bu sebeple ölçüme olanak sağlaması için ısı emicinin taban yapısı tepesine kopyalanmıştır.



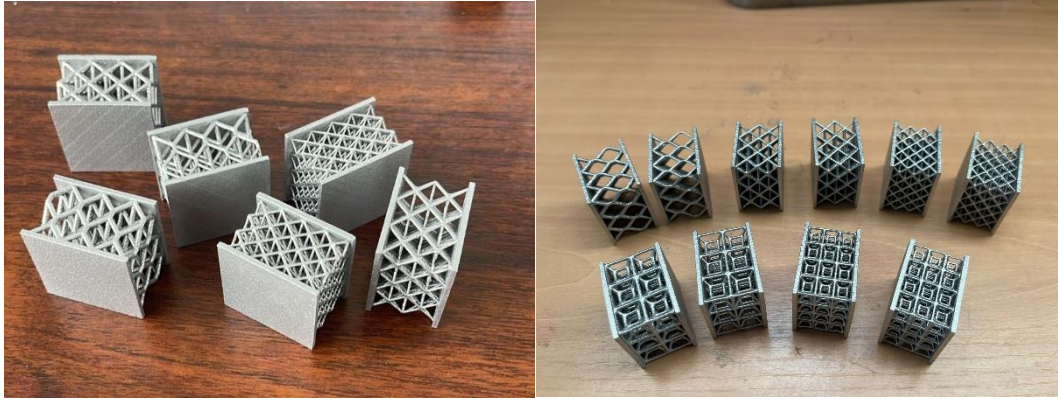
Resim 6.1. Deney için oluşturulan örnek ısı emici tasarımı.



Resim 6.2. İlk üretim denemelerinden fotoğraflar.

İlk üretimde toz yatağından kaynaklı parçaların desteklenememe problemi karşılaşıldı. Bu denemelerde voronoi gibi karmaşık kafes yapılı ısı emicilerde test edilmişti fakat voronoi yapısı hem rastgele eğrilerden ve eşit olmayan hücrelerden oluşmasından hem de bu eğrilerin bağlantı noktalarının karasız bir yapıda olmasından dolayı daha sonrasında tasarıma ve üretime dahil edilmemiştir.

Üretimde karşılaşılan kısıtlar nedeniyle oluşturulan modeller 0,6 ölçekte 30x30x21 mm boyutlarına küçültülmüştür ve üretim için ölçeklenen tasarlanan ısı emicilerin hacim bilgileri Çizelge 6.1’de verilmiştir.



Resim 6.3. Üretim nihai ısı emicilerin fotoğrafları.

Çizelge 6.1. 60% ölçekli üretilen olan kafes yapılı ısı emicilerin fiziksel özellikleri.

Yapı	NodeSize1 r(mm)	NodeSize2 r(mm)	Kafes Alan (mm ²)	Kafes Hacmi (mm ³)	Toplam Kütle (g)
Tesseract (18)	0,5256	0,5256	6817,57	2268,80	13,32
Tesseract 48	0,3906	0,3906	9050,90	2266,88	13,31
Octet (18)	0,5004	0,5004	7654,89	2267,15	13,31
Octet (48)	0,3702	0,3702	10207,27	2269,32	13,32
Deneyisel	0,6978	0,6990	5994,38	2268,25	13,31
Deneyisel Gradyan	0,6990	0,3495	4711,82	1344,86	10,84
Tesseract (18) Gradient	0,5256	0,4362	5601,47	1344,93	10,84
Tesseract (48) Gradyan	0,5256	0,4365	7440,58	1344,92	10,84
Octet (18) Gradyan	0,5004	0,3531	6341,49	1345,21	10,84
Octet (48) Gradyan	0,3702	0,2567	8411,87	1344,94	10,84

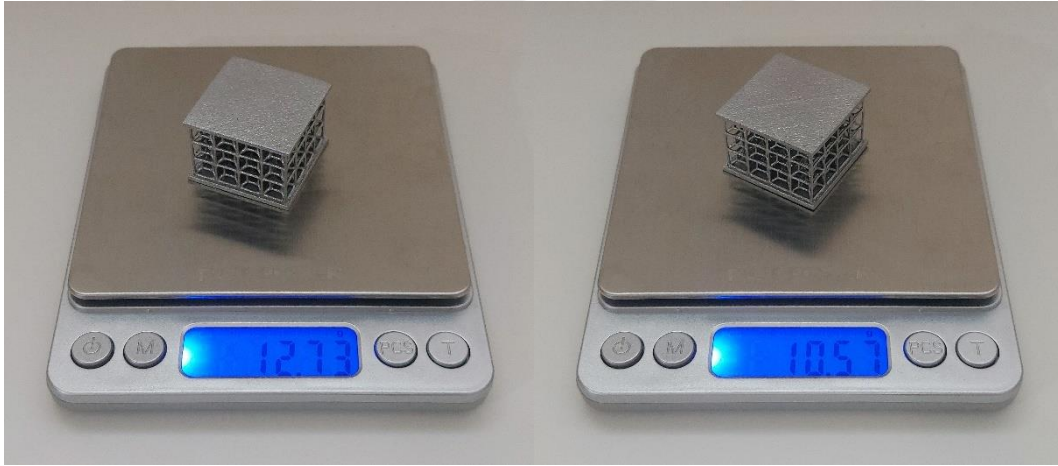
Üretilen ısı emiciler 0,01g hassasiyetli terazi ile ölçülmüştür, tasarlanan ve üretilen ısı emiciler arasındaki kayıplar gözlemlenmiştir.



Resim 6.4. Üretilen Octet (48) ve Octet (48) Gradyan kafes yapılı ısı emicinin ağırlık ölçümü.



Resim 6.5. Üretilen Octet (18) ve Octet (18) Gradyan kafes yapılı ısı emicinin ağırlık ölçümü.



Resim 6.6. Üretilen Tesseract (48) ve Tesseract (48) Gradyan kafes yapılı ısı emicinin ağırlık ölçümü.



Resim 6.7. Üretilen Tesseract (18) ve Tesseract (18) Gradyan kafes yapılı ısı emicinin ağırlık ölçümü.



Resim 6.8. Üretilen Deneysel ve Deneysel Gradyan kafes yapılı ısı emicinin ağırlık ölçümü.

Gözlemlenen ağırlık farkı Çizelge 6.2’de verilmiştir.

Çizelge 6.2. Üretilen ısı emicilerin tasarımları ile arasındaki ağırlık farkları.

Yapı	Tasarım ağırlık (g)	Üretim ağırlık (g)	Fark (g)	Fark (%)
Tesseract (18)	13,32	12,46	-0,86	-6,4
Tesseract (48)	13,31	12,73	-0,58	-4,4
Octet (18)	13,31	12,5	-0,81	-6,1
Octet (48)	13,32	12,83	-0,49	-3,7
Deneysel	13,31	12,92	-0,39	-3,0
Tesseract (18) Gradyan	10,84	10,26	-0,58	-5,4
Tesseract (48) Gradyan	10,84	10,57	-0,27	-2,5
Octet (18) Gradyan	10,84	10,4	-0,44	-4,1
Octet (48) Gradyan	10,84	10,62	-0,22	-2,0
Deneysel Gradyan	10,84	10,48	-0,36	-3,3

Burada gözlemlenen kütle kaybı, boyutsal hatalar ve yüzey kusurları literatürde sıklıkla belgelenmiştir. (Echeta vd., 2019) Oluşan kayıplar ve gözenekler genellikle sıkışmış gazlar ve erimemiş tozlar ve eriyik toz havuzun kararsızlıkları yoluyla oluşur. Malzeme yığılması çoğunlukla yatay eksenle olan yapılarda malzeme kaybı daha fazla olduğu gözlemlenmiştir.

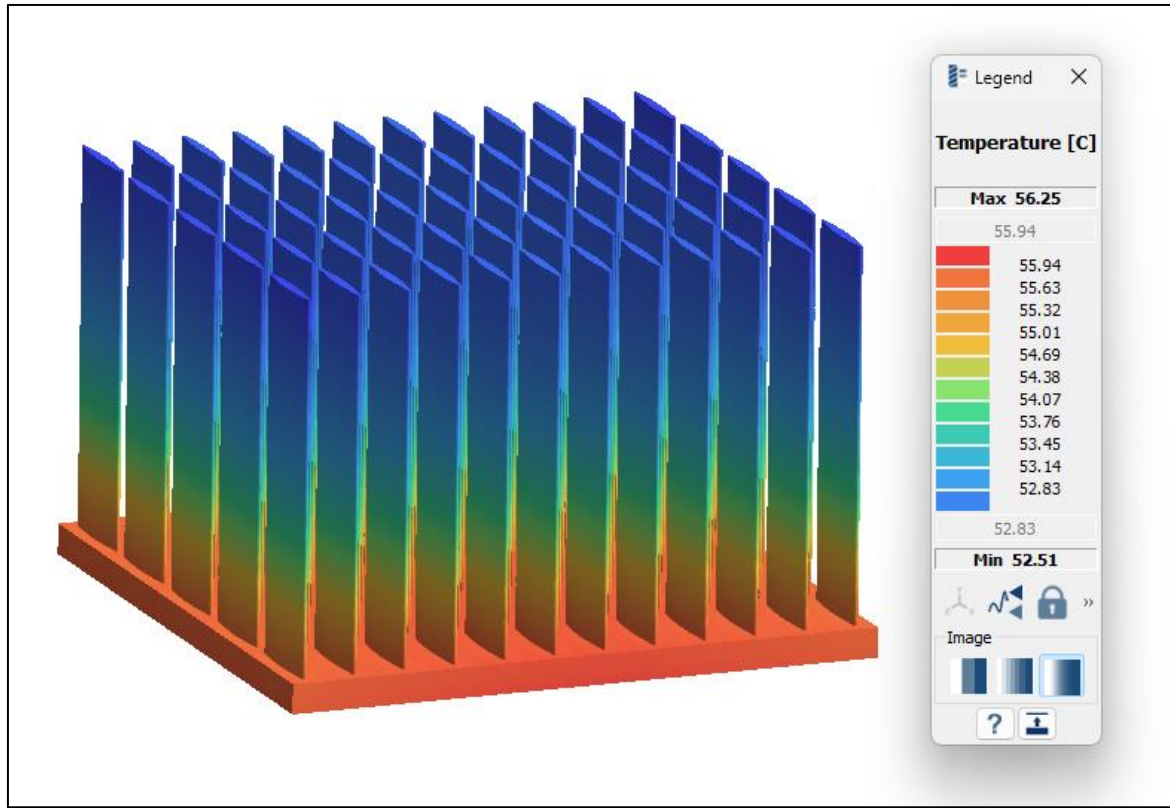
Yatay eksenle kaynama sırasında toz yatağında yapıya destek olması üretilen yapının doğruluğunu etkilemektedir.



7. BULGULAR

7.1. Bilgisayar Destekli Termal Analiz

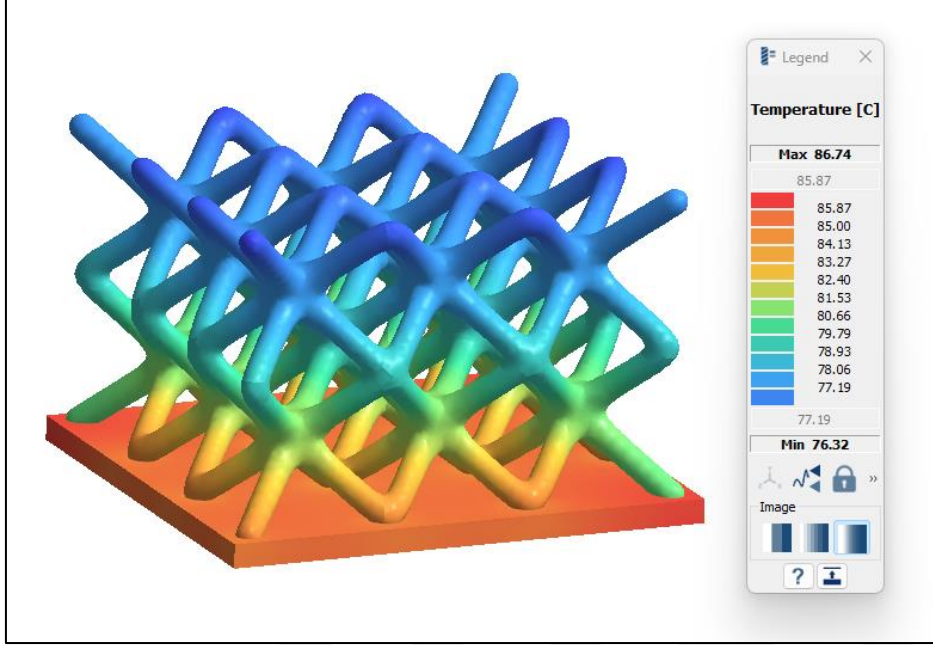
Başlangıçta referans model olarak ele aldığımız LPD50-35 ısı emicinin kanat yapıları $34058,53 \text{ mm}^2$ yüzey alanı ve $10494,95 \text{ mm}^3$ hacmi ile yüzey alanının hacmine oranı 3,25'tir. Tabanından 5000 W/m^2 ısı akısı verilen kanat yapılı ısı emicide ölçülen en yüksek sıcaklık $56,25 \text{ }^\circ\text{C}$ olmuştur.



Resim 7.1. LPD50-35 referans modelin SIMSOLID analiz verileri.

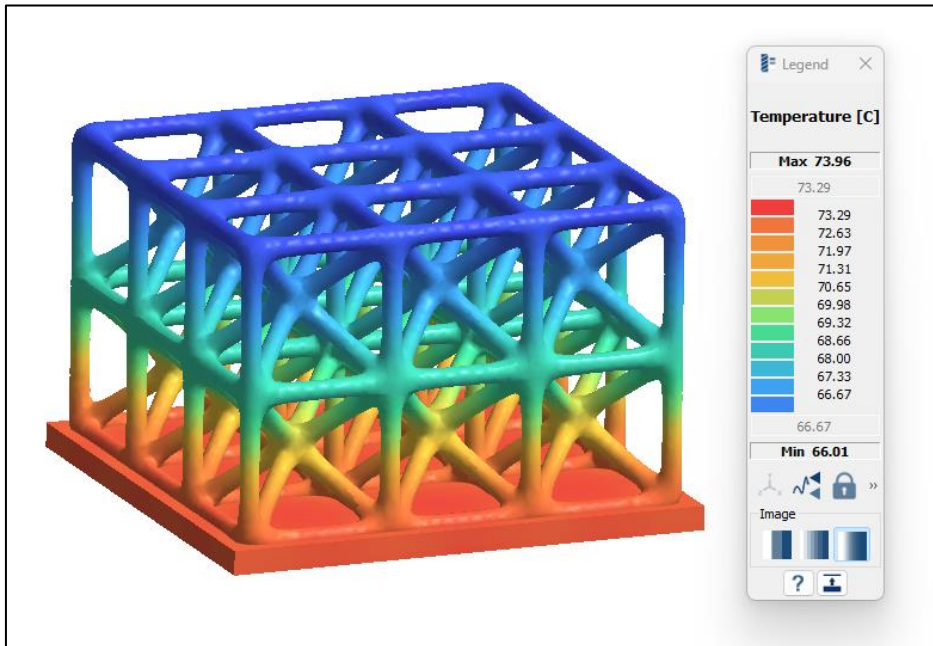
18 birim hücreli ve deneysel modellenmiş kafes yapılı ısı emicilerin SIMSOLID yazılımında simülasyon sonuçları Resim.7.2 - 7.9'da verilmiştir.

Yapılan simülasyon sonucunda 18 birim hücreli X kafes yapısına sahip ısı emici üzerinde sıcaklığın 86,74 °C'ye ulaştığı gözlemlenmiştir.



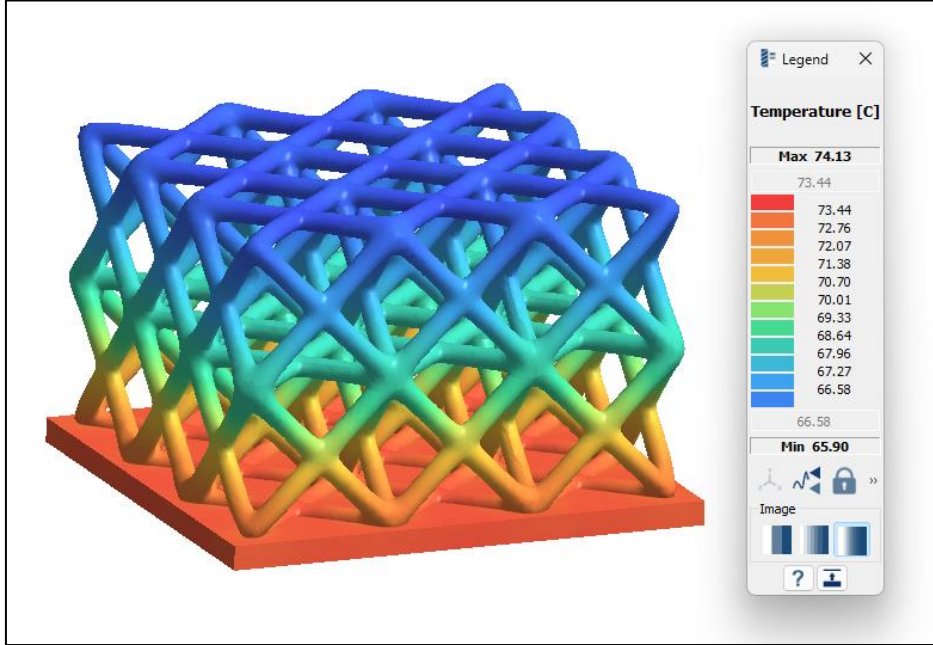
Resim 7.2. X (18) kafes yapılı ısı emicinin SIMSOLID analiz verileri.

18 birim hücreli Star kafes yapısına sahip ısı emicide ise en yüksek sıcaklık 73,96 °C'ye ulaşmıştır.



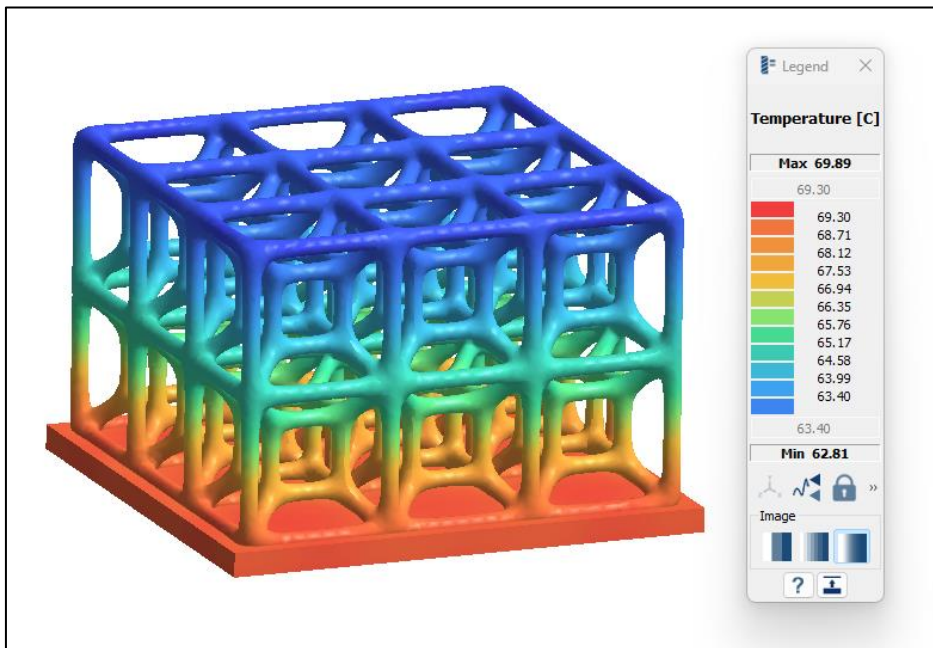
Resim 7.3. Star (18) kafes yapılı ısı emicinin SIMSOLID analiz verileri.

18 birim hücreli Cross kafes yapısına sahip ısı emicide ise en yüksek sıcaklık 74,13 °C'ye ulaşmıştır.



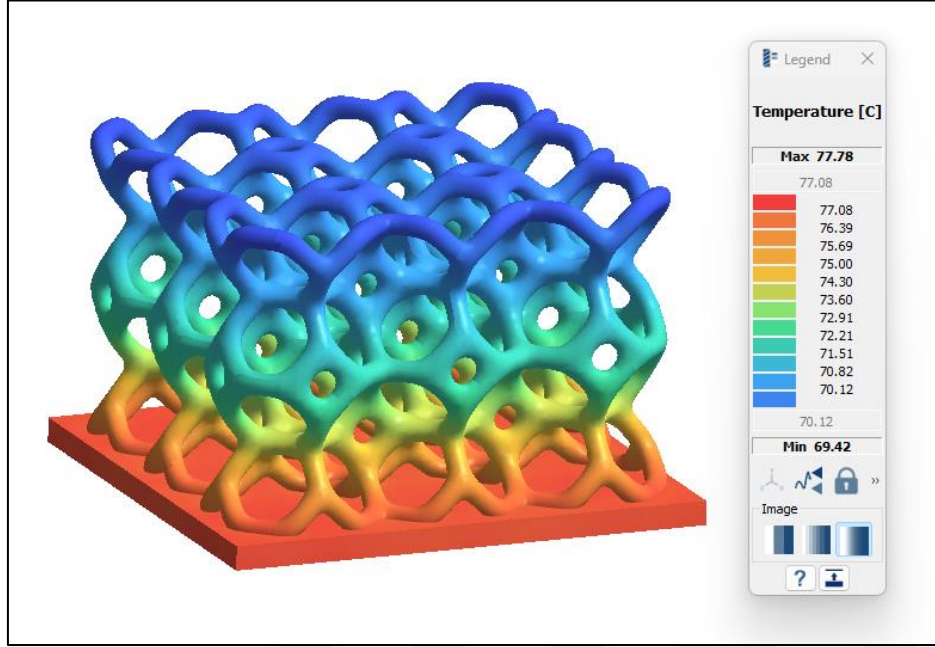
Resim 7.4. Cross (18) kafes yapılı ısı emicinin SIMSOLID analiz verileri.

18 birim hücreli Tesseract kafes yapısına sahip ısı emicide ise en yüksek sıcaklık 69,89 °C'ye ulaşmıştır.



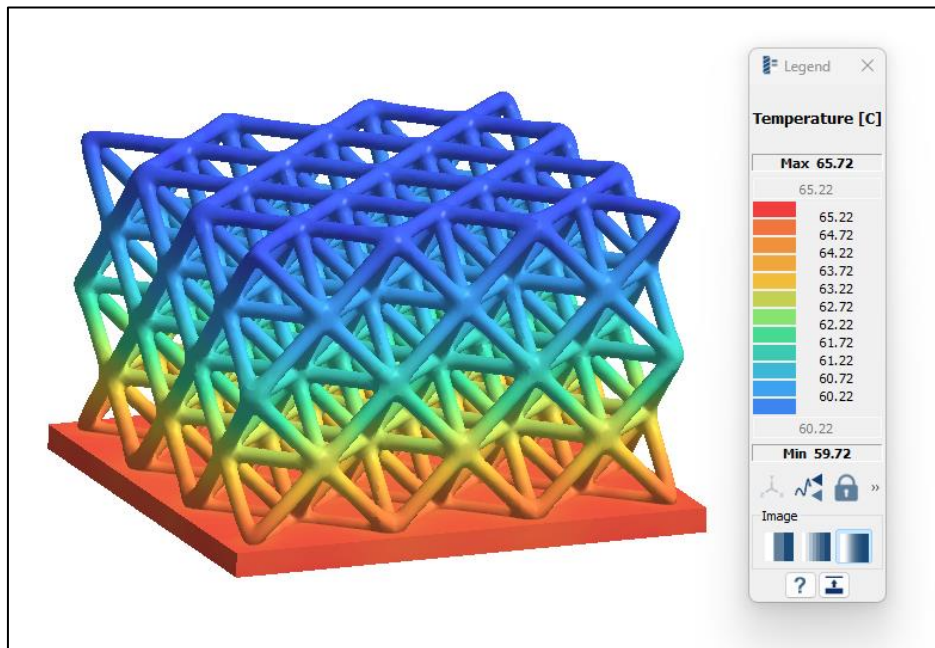
Resim 7.5. Tesseract (18) kafes yapılı ısı emicinin SIMSOLID analiz verileri.

18 birim hücreli Vintiles kafes yapısına sahip ısı emicide ise en yüksek sıcaklık 77,78 °C'ye ulaşmıştır.



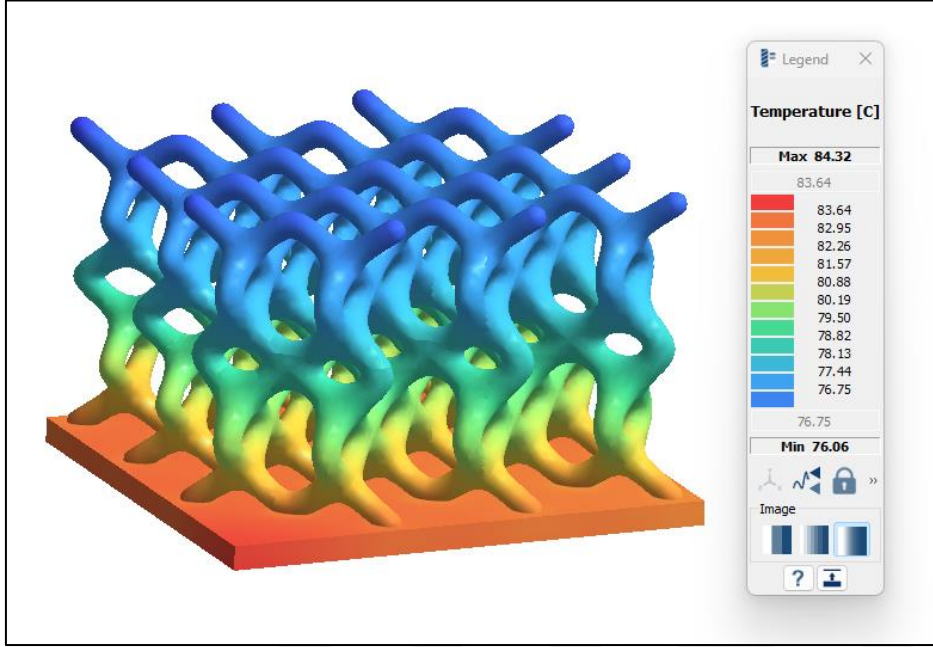
Resim 7.6. Vintiles (18) kafes yapılı ısı emicinin SIMSOLID analiz verileri.

18 birim hücreli Octet kafes yapısına sahip ısı emicide ise en yüksek sıcaklık 65,72 °C'ye ulaşmıştır.



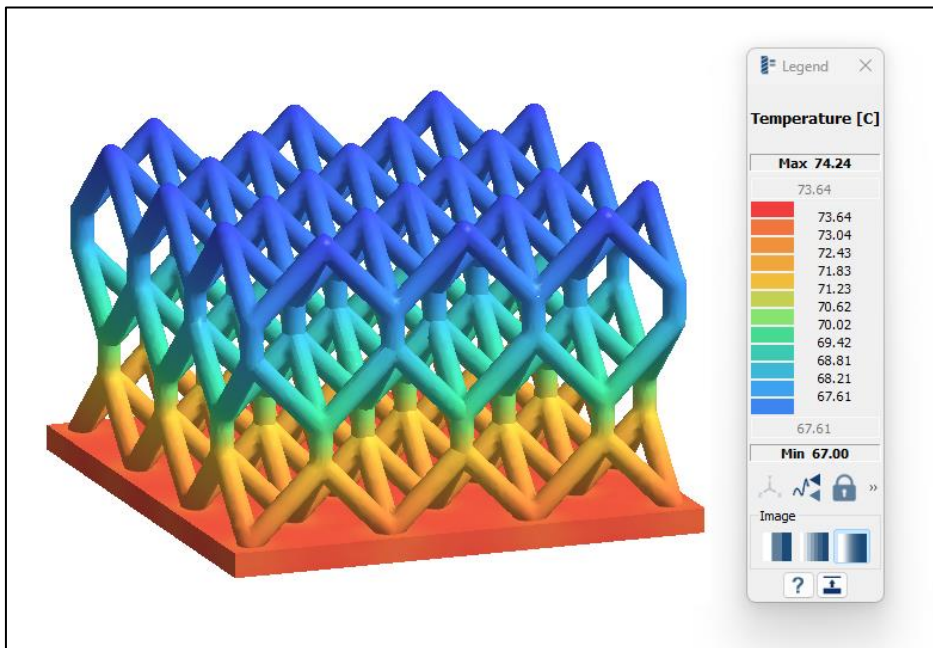
Resim 7.7. Octet (18) kafes yapılı ısı emicinin SIMSOLID analiz verileri.

18 birim hücreli Diamond kafes yapısına sahip ısı emicide ise en yüksek sıcaklık 84,32 °C'ye ulaşmıştır.



Resim 7.8. Diamond (18) kafes yapılı ısı emicinin SIMSOLID analiz verileri.

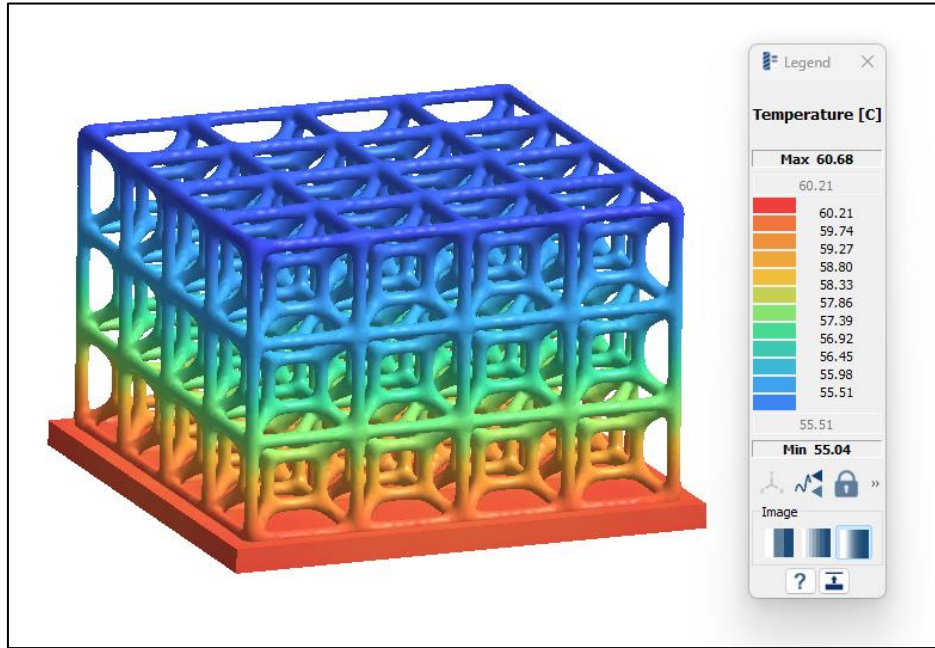
18 birim hücreli deneysel kafes yapısına sahip ısı emicide ise en yüksek sıcaklık 74,24 °C'ye ulaşmıştır.



Resim 7.9. Deneysel kafes yapılı ısı emicinin SIMSOLID analiz verileri.

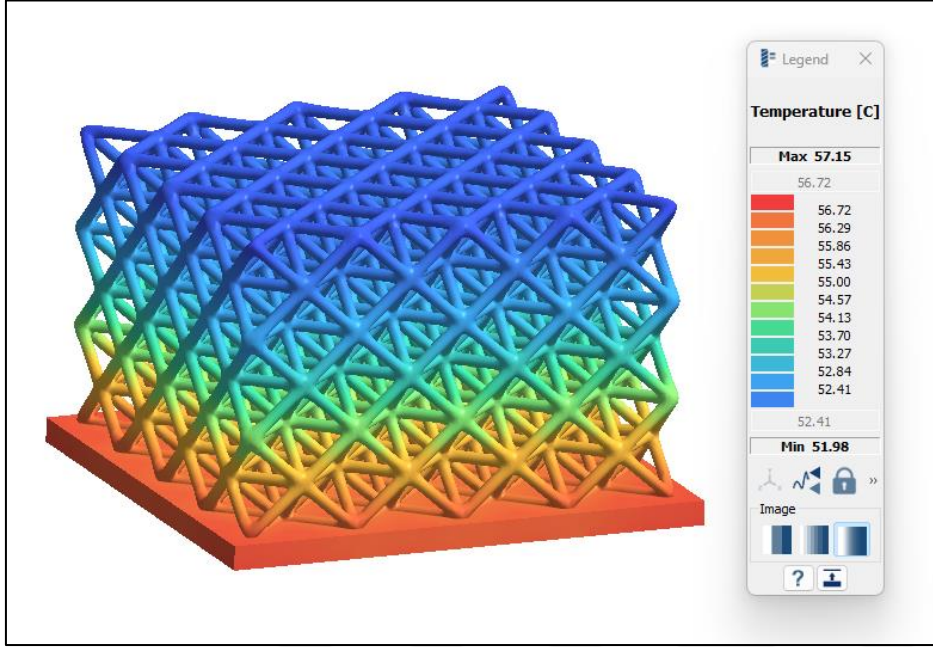
Yapılan analizlerde ölçülen en yüksek sıcaklık ne kadar düşük ise ısı emicinin soğutma performansı da yüksek demektir. Bu bağlamda kafes yapılar arasından en iyi performansını sergileyen Octet ve Tesseract yapısının 48 hücreli modelleri de simüle edilmiştir ve sonuçları Resim 7.10 ve Resim 7.11’de verilmiştir.

48 birim hücreli Tesseract kafes yapısına sahip ısı emicide ise en yüksek sıcaklık 60,68 °C’ye ulaşmıştır.



Resim 7.10. Tesseract (48) kafes yapılı ısı emicinin SIMSOLID analiz verileri.

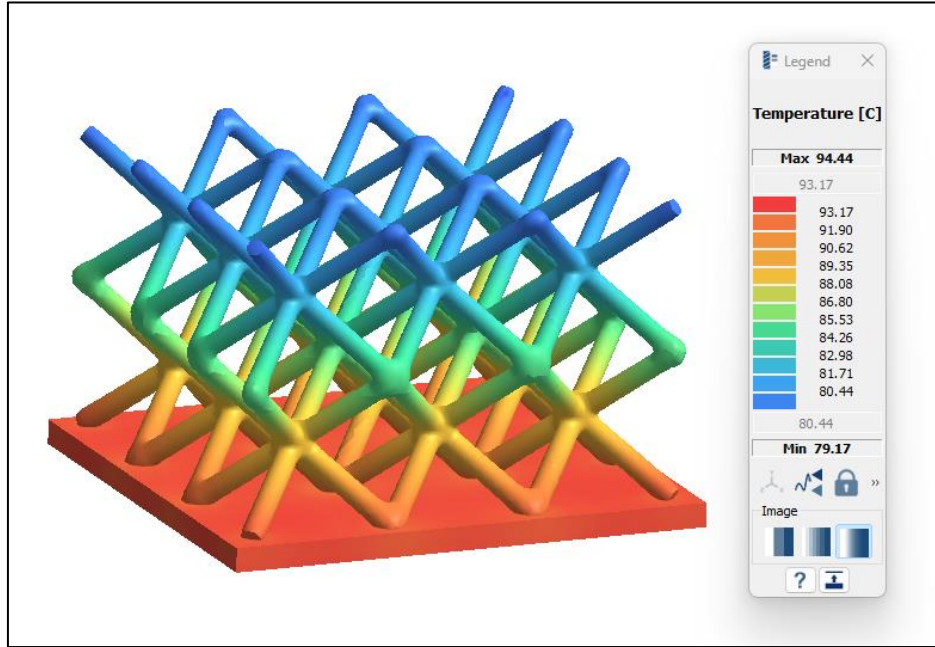
48 birim hücreli Octet kafes yapısına sahip ısı emicide ise en yüksek sıcaklık 57,15 °C'ye ulaşmıştır.



Resim 7.11. Octet (48) kafes yapılı ısı emicinin SIMSOLID analiz verileri.

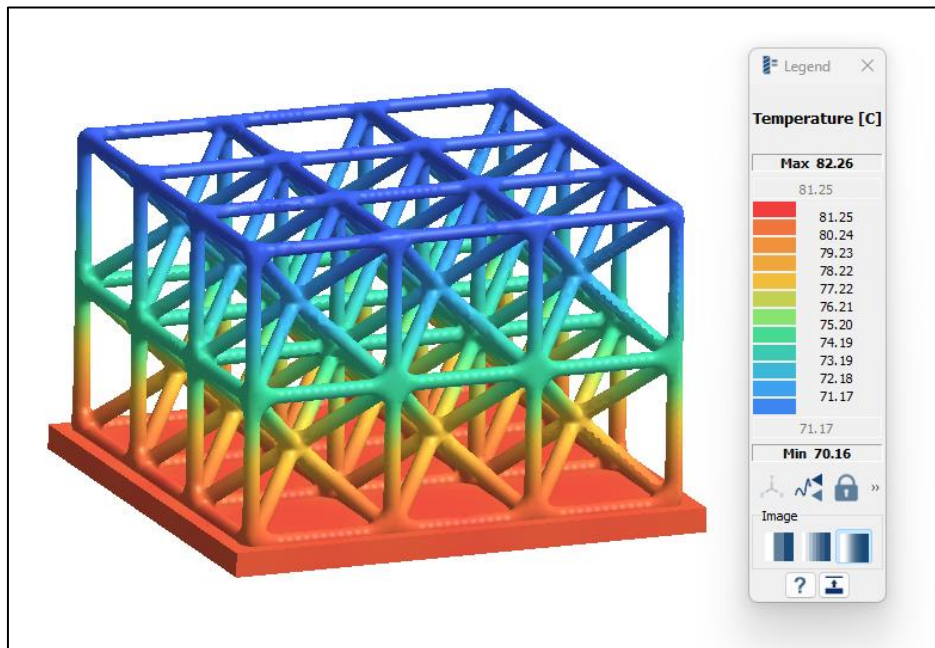
18 birim hücreli ve deneysel modellenmiş, gradyan metodu ile ağırlıkları azaltılmış kafes yapılı ısı emicilerin SIMSOLID yazılımında simülasyon sonuçları aşağıda Resim 7.12 - 7.19'da verilmiştir.

Gradyan uygulaması sonucunda 18 birim hücreli X kafes yapısına sahip ısı emici üzerinde sıcaklığın $94,44\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'ye yükseldiği gözlemlenmiştir.



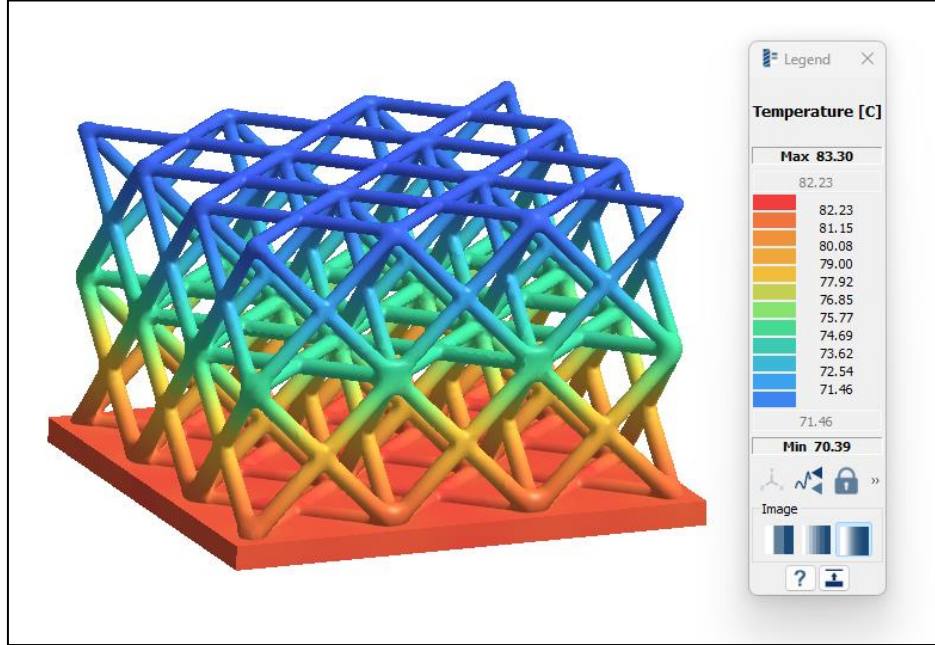
Resim 7.12. X (18) Gradyan kafes yapılı ısı emicinin SIMSOLID analiz verileri.

Gradyan uygulaması sonucunda 18 birim hücreli Star kafes yapısına sahip ısı emicinin tabanında sıcaklığın $82,26\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'ye yükseldiği gözlemlenmiştir.



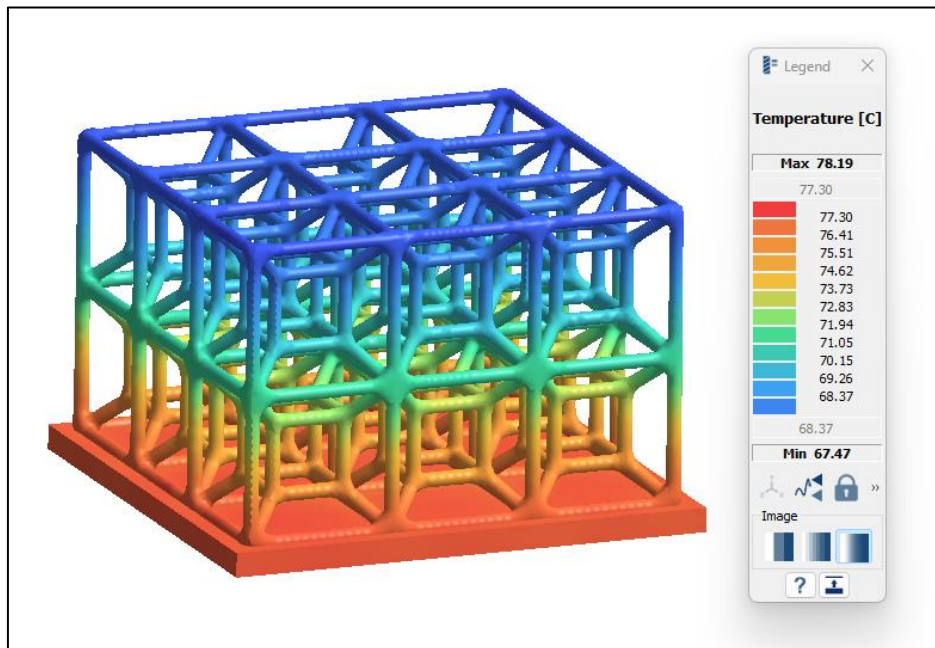
Resim 7.13. Star (18) Gradyan kafes yapılı ısı emicinin SIMSOLID analiz verileri.

Gradyan uygulaması sonucunda 18 birim hücreli Cross kafes yapısına sahip ısı emicinin tabanında sıcaklığın 83,30 °C'ye yükseldiği gözlemlenmiştir.



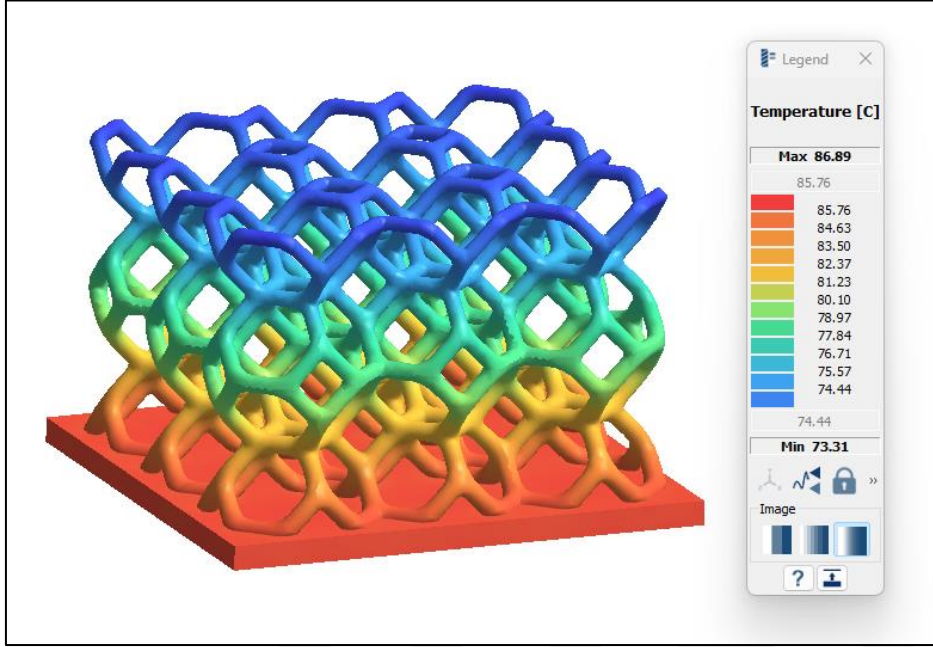
Resim 7.14. Cross (18) Gradyan kafes yapılı ısı emicinin SIMSOLID analiz verileri.

Gradyan uygulaması sonucunda 18 birim hücreli Tesseract kafes yapısına sahip ısı emicinin tabanında sıcaklığın 78,19 °C'ye yükseldiği gözlemlenmiştir.



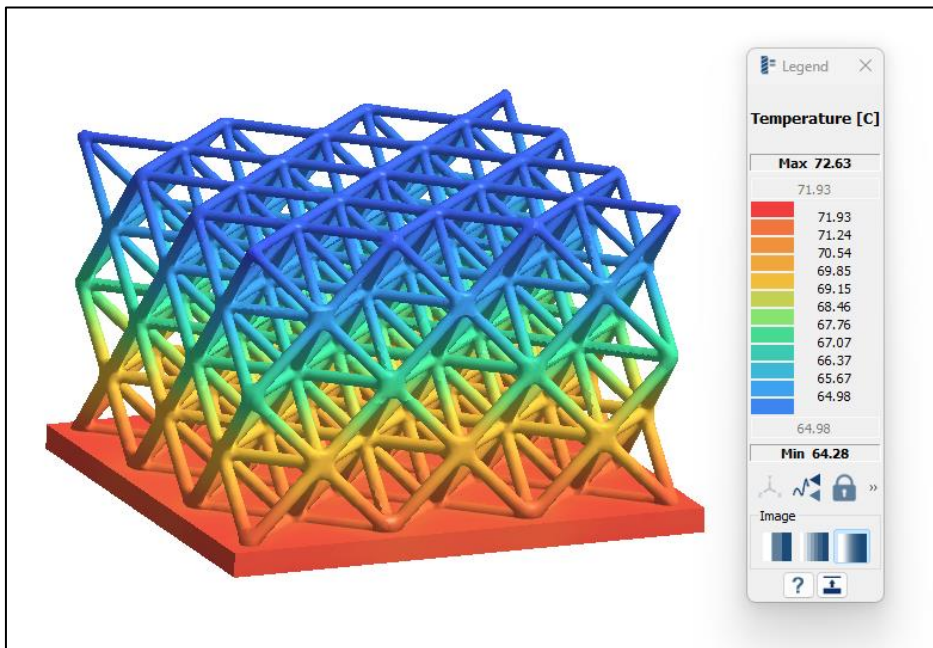
Resim 7.15. Tesseract (18) Gradyan kafes yapılı ısı emicinin SIMSOLID analiz verileri.

Gradyan uygulaması sonucunda 18 birim hücreli Vintiles kafes yapısına sahip ısı emicinin tabanında sıcaklığın 86,89 °C'ye yükseldiği gözlemlenmiştir.



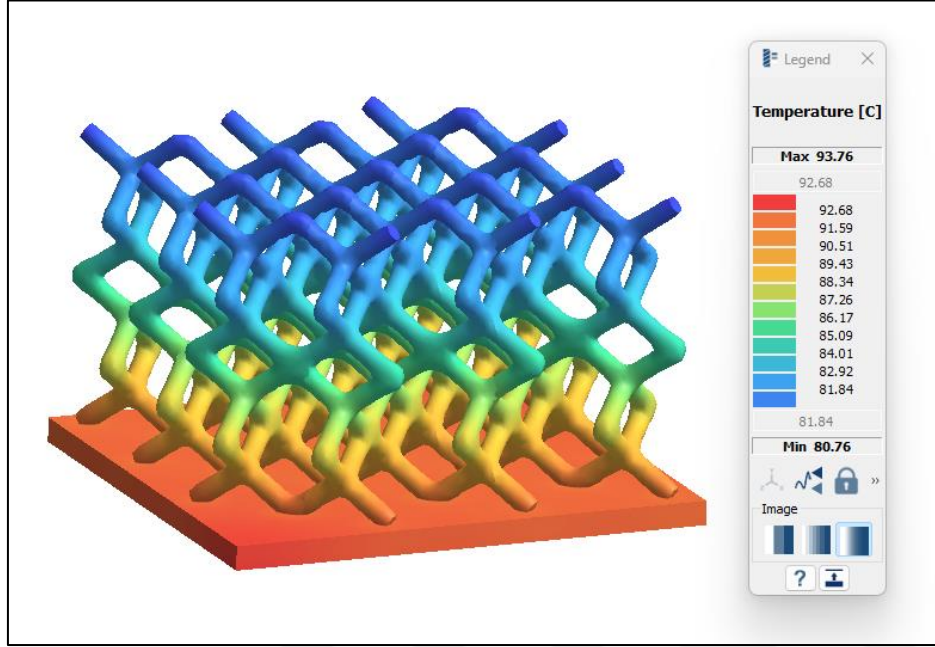
Resim 7.16. Vintiles (18) Gradyan kafes yapılı ısı emicinin SIMSOLID analiz verileri.

Gradyan uygulaması sonucunda 18 birim hücreli Octet kafes yapısına sahip ısı emicinin tabanında sıcaklığın 72,63 °C'ye yükseldiği gözlemlenmiştir.



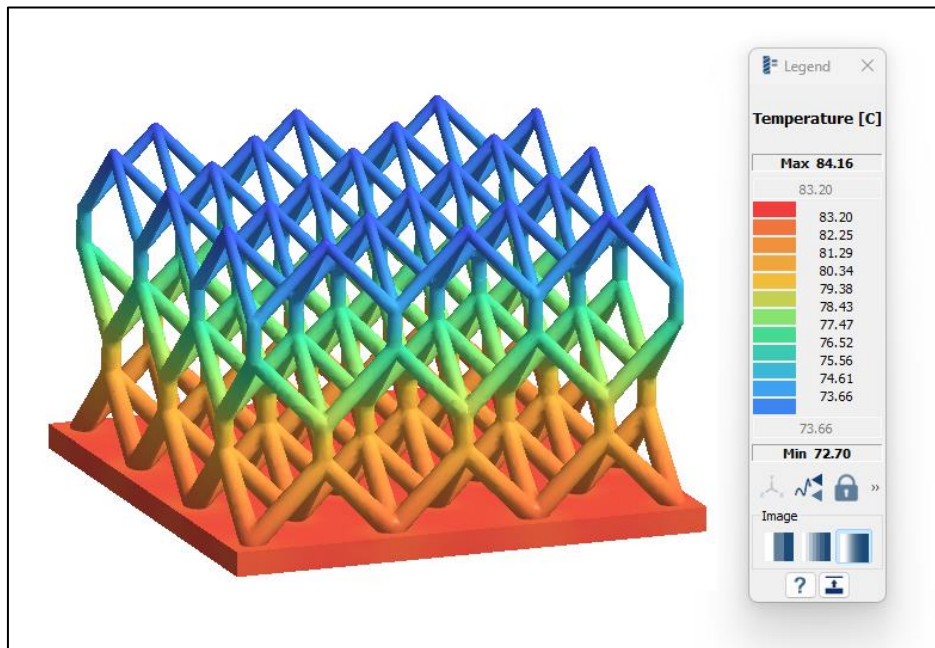
Resim 7.17. Octet (18) Gradyan kafes yapılı ısı emicinin SIMSOLID analiz verileri.

Gradyan uygulaması sonucunda 18 birim hücreli Diamond kafes yapısına sahip ısı emicinin tabanında sıcaklığın $93,76\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'ye yükseldiği gözlemlenmiştir.



Resim 7.18. Diamond (18) Gradyan kafes yapılı ısı emicinin SIMSOLID analiz verileri.

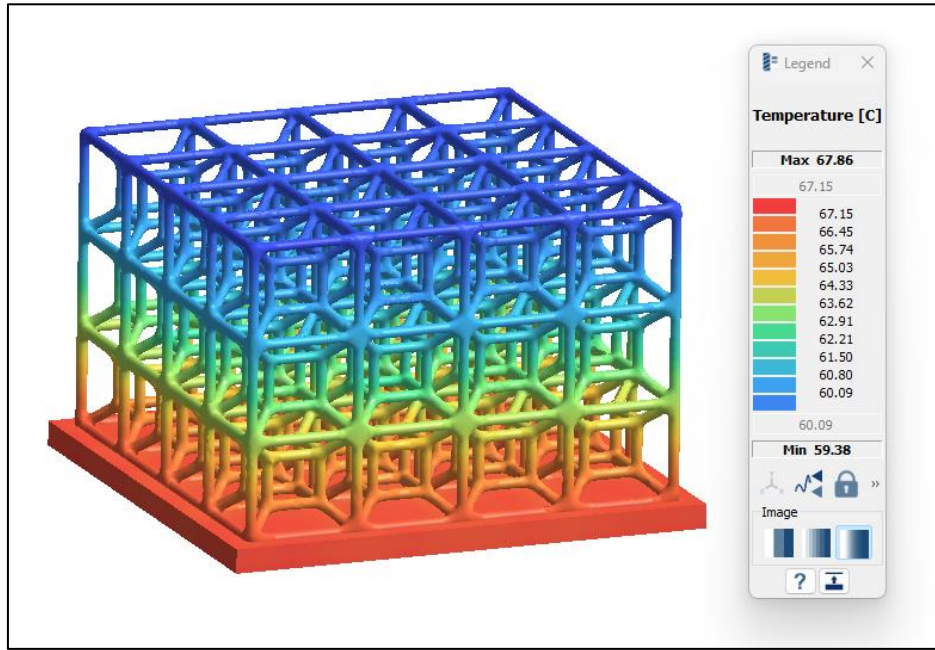
Gradyan uygulaması sonucunda 18 birim hücreli deneysel kafes yapısına sahip ısı emicinin tabanında sıcaklığın $84,16\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'ye yükseldiği gözlemlenmiştir.



Resim 7.19. Deneysel Gradyan kafes yapılı ısı emicinin SIMSOLID analiz verileri.

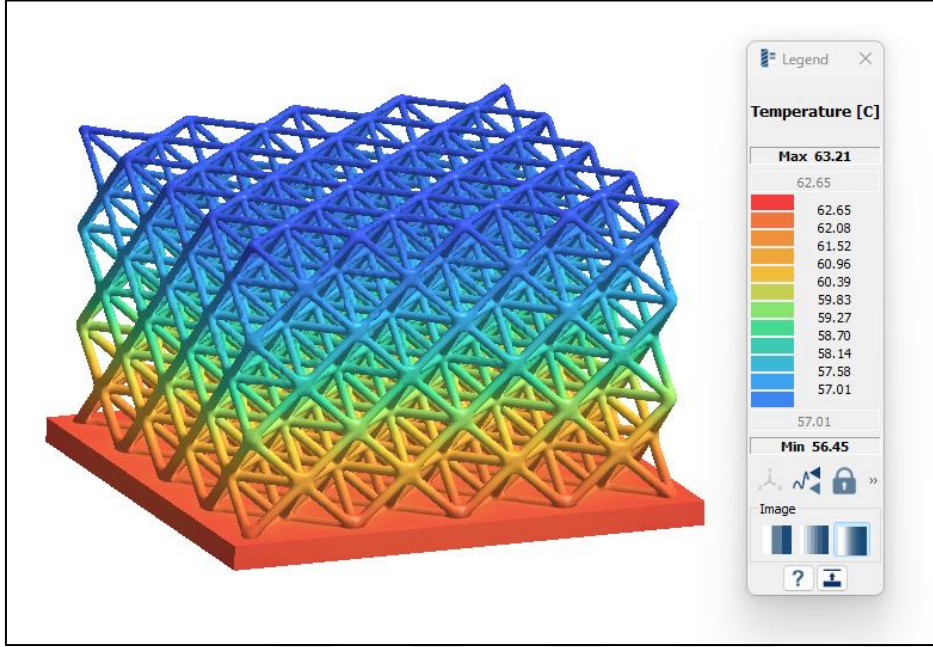
Gradyan metodu ile ağırlıkları düşürülmüş kafes yapılar arasından da en iyi performansını sergileyen Gradyan Octet ve Gradyan Tesseract yapısının 48 hücreli modelleri de simüle edilmiştir sonuç verileri Resim 7.20 ve 7.21’de verilmiştir.

Gradyan 48 birim hücreli Tesseract kafes yapısına sahip ısı emicinin tabanında sıcaklığın 67,86 °C’ye düştüğü gözlemlenmiştir.



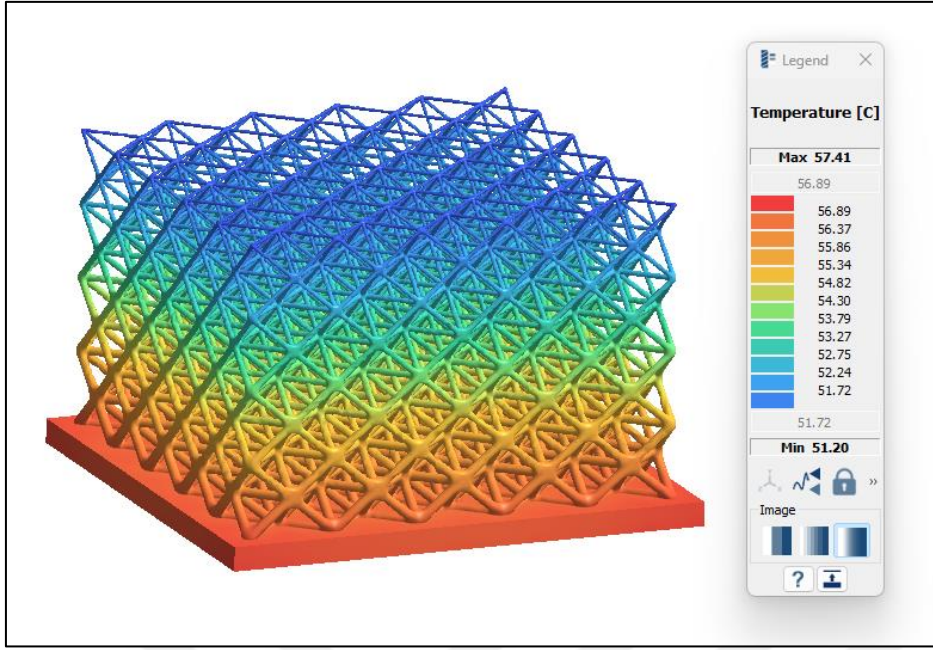
Resim 7.20. Tesseract (48) Gradyan kafes yapılı ısı emicinin SIMSOLID analiz verileri.

Gradyan 48 birim hücreli Octet kafes yapısına sahip ısı emicinin tabanında sıcaklığın 63,21 °C'ye düştüğü gözlemlenmiştir.



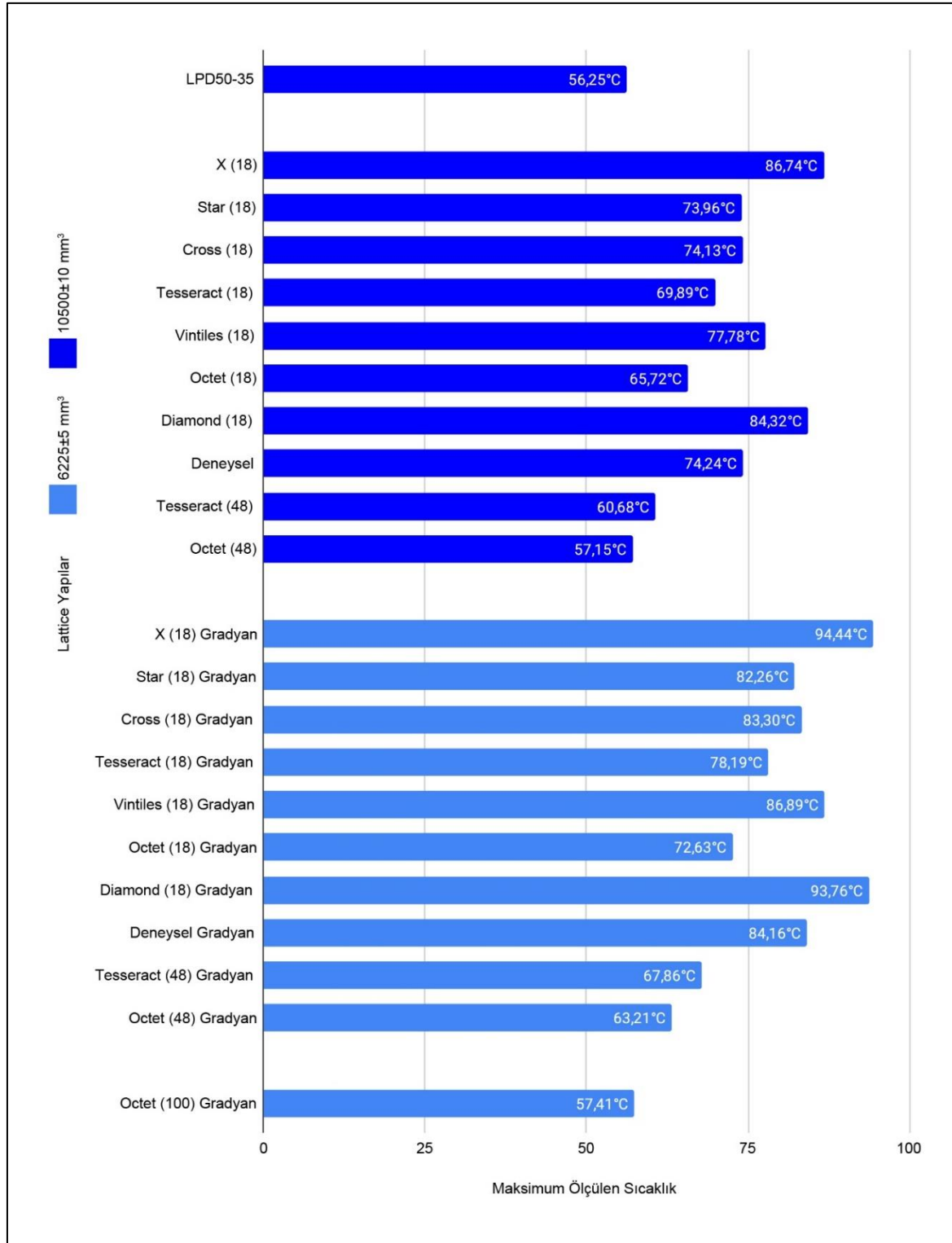
Resim 7.21. Octet (48) Gradyan kafes yapılı ısı emicinin SIMSOLID analiz verileri.

Octet yapısı hem eşit çaplı kafes yapıda hem çapı azalan gradyan yapıda en başarılı soğutma performansını sergileyen kafes yapı olmuştur. Yüzey alanının hacme oranını arttırarak soğutma performansının da artırılması hedeflenen 100 birim hücreli Octet Gradyan yapının simülasyon sonuçları Resim 7.22’de verilmiştir.



Resim 7.22. Octet (100) Gradyan kafes yapılı ısı emicinin SIMSOLID analiz verileri.

100 birim hücreli Octet Gradyan yapı 48 birim hücreli Octet Gradyan yapı ile aynı hacme sahip olmasına rağmen yüzey alanının artması ile soğutma performansı da artmış ve ölçülen maksimum sıcaklık 63,21 °C'den 57,41 °C'e düşmüştür.

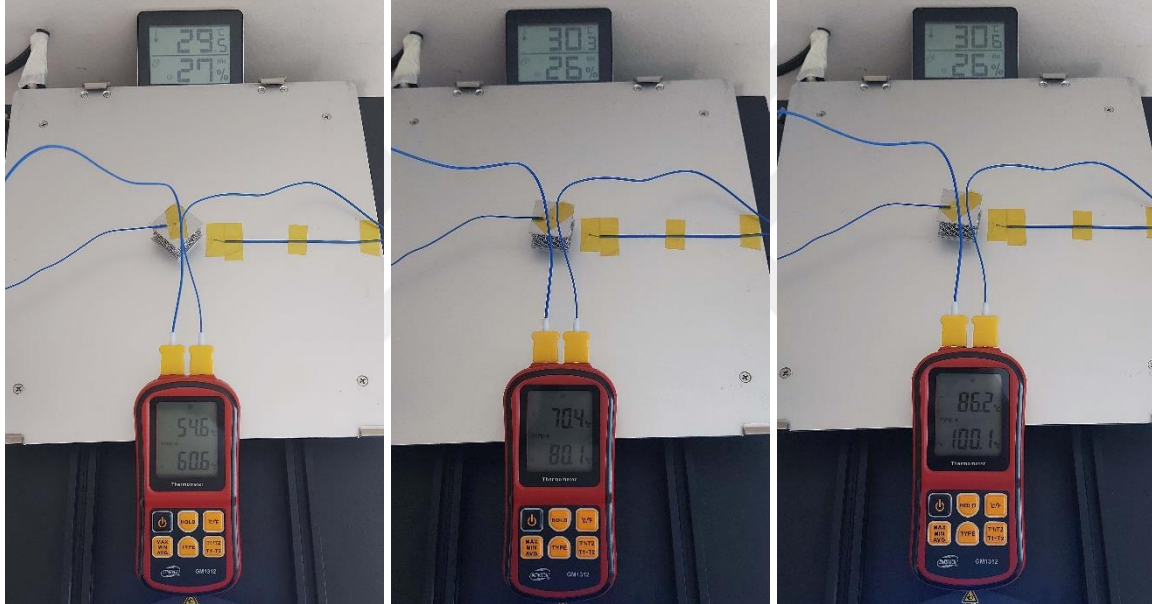


Şekil 7.1. Tasarlanan kafes yapılı ısı emicilerin hacim ve sıcaklık verileri.

7.2. Üretilen Isı Emicilerin Termal Analizi

Şekil 3.1’de verilen ısı tablası deney düzeneği ile ısı emicilerin termal performansları gözlemlenmiştir. Deney 30 °C ortam altında gerçekleştirilmiştir. Deneyde, doğal konveksiyon koşulları altında ölçümler yapılmıştır. Üç farklı sıcaklık seviyesinde (60, 80 ve 100 °C) testler yapılmıştır. Isı emici ile plaka arasındaki sıcaklık farkı ölçülmüştür.

30 °C ortam altında 60, 80 ve 100 °C ısı tablaları ile ısıtılan ısı emiciler kararlı duruma tepe sıcaklıkları Çizelge 7.1’de verilmiştir.

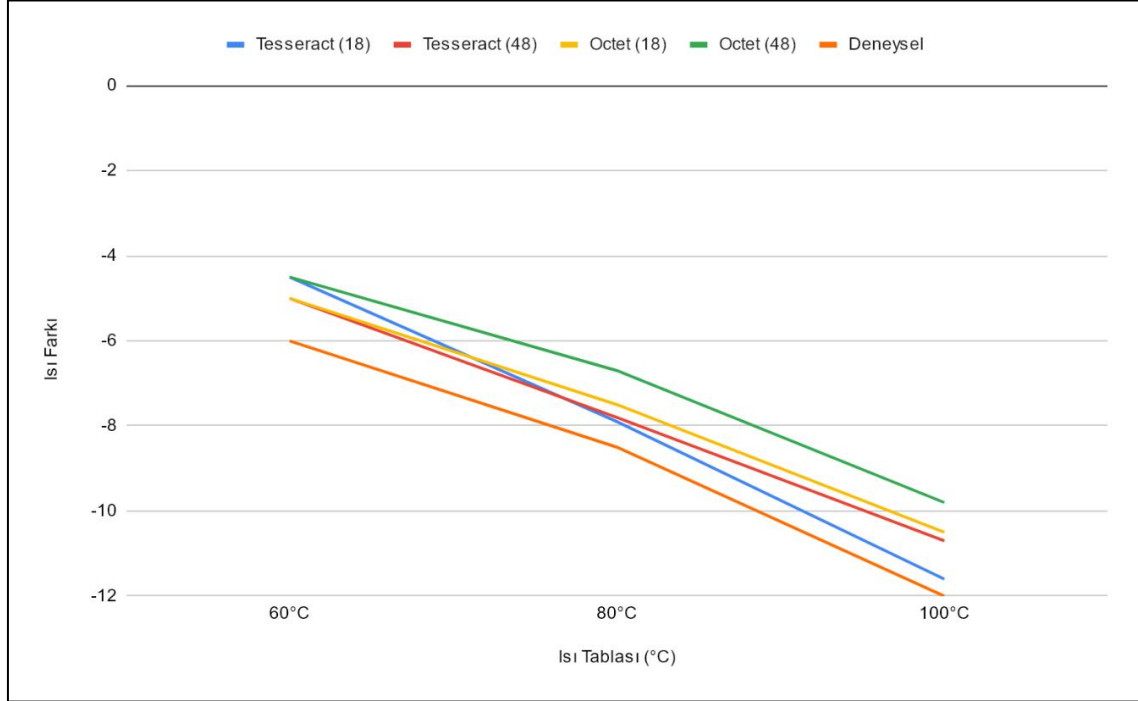


Resim 7.23. 60, 80 ve 100 °C ısı tablaları ile ısıtılan ısı emicilerin ölçüm örnekleri.

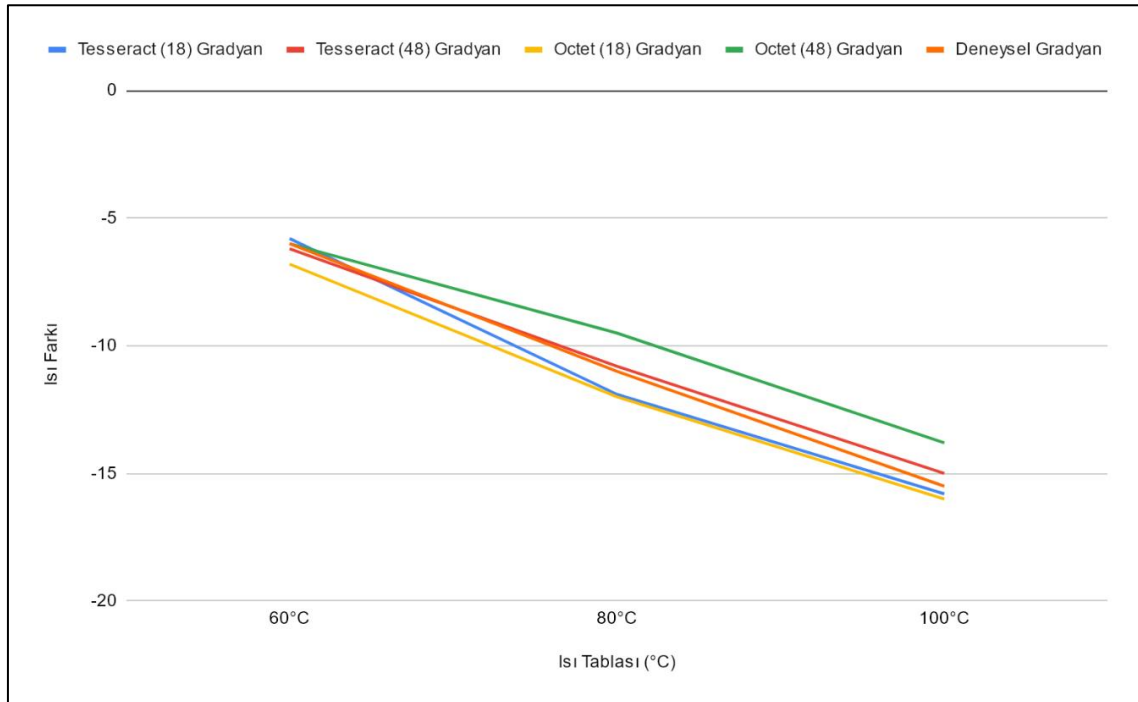
Çizelge 7.1. Farklı sıcaklıkta ısı tablası uygulaması sonucu ısı emicilerin tepe noktasında ölçülen sıcaklık değerleri.

Yapı	Tabla Sıcaklığı		
	60 °C	80 °C	100 °C
Tesseract (18)	55,5	72,1	88,4
Tesseract (48)	55	72,2	89,3
Octet (18)	55	72,5	89,5
Octet (48)	55,5	73,3	90,2
DeneySEL	54	71,5	88
Tesseract (18) Gradyan	54,2	68,1	84,2
Tesseract (48) Gradyan	53,8	69,2	85
Octet (18) Gradyan	53,2	68	84
Octet (48) Gradyan	54,5	70,4	86,2
DeneySEL Gradyan	54	69	84,5

30 °C ortam altında 60, 80 ve 100 °C ısı tablaları ile ısı emici arasında ölçülen sıcaklık farkları aşağıda Şekil 7.2 ve 7.3'te verilmiştir.



Şekil 7.2. Üretilen kafes yapıları ısı emiciler tepe noktası ile ısı tablası arasındaki sıcaklık farkları.



Şekil 7.3. Üretilen gradyan kafes yapıları ısı emiciler tepe noktası ile ısı tablası arasındaki sıcaklık farkları.



8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Araştırmada Alpha LPD50-35 ısı emicinin kanat yapıları referans alınmıştır, kanat yapısı toplamda $34058,53 \text{ mm}^2$ yüzey alanı ve $10494,95 \text{ mm}^3$ hacim ile 3,25 A/V oranına sahiptir. Termal analizler sonucunda tabanından 5000 W/m^2 ısı akısı uygulanan LPD50-35 modelinin maksimum sıcaklığı $56,25 \text{ }^\circ\text{C}$ ölçülmüştür. LPD50-35 ısı emicinin kanat yapılarının hacmine eşit kafes yapıda alternatifler geliştirilmiştir ve termal performansları değerlendirilmiştir.

İlk aşamada eşit hacimde geliştirilen 18 birim hücreli kafes yapılar içerisinde Octet yapısı en yüksek yüzey alanına sahip olmasıyla en iyi soğutma performansı sergileyen yapı olmuştur. $21263,58 \text{ mm}^2$ yüzey alanı ve $10496,05 \text{ mm}^3$ hacim ile 18 birim hücreli Octet kafes yapısı 2,03 A/V oranına sahip olmuştur ve aynı koşullar altında maksimum sıcaklığı $65,72 \text{ }^\circ\text{C}$ ölçülmüştür. (Bkz. Resim 7.7)

İkinci aşamada yapının hacmi $10500 \pm 10 \text{ mm}^3$ 'e sabit kalması kaydıyla hücre boyutları ve kafes çapları küçültülmüş toplam birim hücre sayısı artırılmıştır, bu uygulamalar ile birim hücre sayısı 48'e yükseltilen Octet kafes yapının yüzey alanı $28353,53 \text{ mm}^2$ 'ye yükselmiştir ve 2,70 A/V oranına sahip olmuştur. Termal analiz sonucunda maksimum sıcaklığı $57,15 \text{ }^\circ\text{C}$ ölçülmüştür. (Bkz. Resim 7.11)

Kafes yapılarda mevcut hacmi koruyarak birim hücrelerin boyutlarının küçültülmesi, kafes çapının inceltilmesi ve toplam birim hücre sayısının artırılması yüzey alanı artışında etkili olmuştur. Bu bağlamda aynı hacim üzerinde daha fazla yüzey alanı elde etmek yapının soğuma performansını olumlu etkilemiştir. Referans modelin soğutma performansına yaklaşmıştır.

Üçüncü aşamada her bir ısı emicinin soğutma performansını yakın değerlerde tutmaya çalışılarak ağırlık azaltılması hedeflenmiştir ve bu bağlamda gradyan metodu uygulanmıştır. 48 birim hücreli Octet kafes yapının kafes çapları tabandan tepeye doğru inceltilerek hacmi $6226,57 \text{ mm}^3$ 'e düşürülmüştür. Bunun sonucunda yüzey alanı $23366,31 \text{ mm}^2$ 'ye düşmüş, A/V oranı 3,75'e yükselmiştir. Fakat termal analiz sonucunda maksimum sıcaklığı $63,21 \text{ }^\circ\text{C}$ 'ye yükselmiştir. (Bkz. Resim 7.21)

Dördüncü aşamada, elde ettiğimiz 48 birim hücreli Octet Gradyan kafes yapıya ikinci aşamada uyguladığımız kafes yapının yüzey alanının arttırma metodu uygulanarak toplam birim hücre sayısı 100'e yükseltilmiştir. Bu aşamada birim hücre sayısı 100'e yükseltilen, $6227,13 \text{ mm}^3$ hacmindeki Octet Gradyan kafes yapının yüzey alanı $27946,59 \text{ mm}^2$ 'ye yükselmiştir ve 4,49 A/V oranına sahip olmuştur. 100 birim hücreli Octet Gradyan kafes yapıya sahip ısı emicinin termal analiz sonucunda maksimum sıcaklığı $57,41 \text{ }^\circ\text{C}$ ölçülmüştür. (Bkz. Resim 7.22) Sonuç olarak kanat yapılı referans tasarımdan yalnızca $1,16 \text{ }^\circ\text{C}$ daha sıcak çalışan fakat 40% daha hafif ısı emici tasarımı elde edilmiştir.

SLM yöntemi ile ölçekli üretilen kafes yapılı ısı emiciler $60 \text{ }^\circ\text{C}$, $80 \text{ }^\circ\text{C}$ ve $100 \text{ }^\circ\text{C}$ ısı tablası üzerinde test edilmiştir ve ısı akısı performansı gözlemlenmiştir. Isı tablası kendi yüzey sıcaklığını sürekli sabit bir sıcaklıkta tutarak çalışır. Isı akısı, sıcaklık farkına bağlıdır. Sabit sıcaklıktaki bir ortamda yüksek sıcaklıktaki bir malzemenin ısı akısı da yüksek olur. Isı tablasının sıcaklığı ile ısınan ısı emicilerin tepe noktasında sıcaklık ölçümleri gerçekleştirilmiştir ve gözlemlenen sıcaklık farkları Şekil 7.2 ve 7.3'te verilmiştir.

Bu çalışma, eklemeli metal imalat teknolojileri kullanılarak tasarlanan kafes yapılı ısı emicilerin termal performansının optimize edilmesi ve bu yapılar için gradyan uygulamalarıyla ağırlık azaltma stratejilerinin başarılı bir şekilde uygulanabilirliğini göstermiştir. Elde edilen sonuçlar herhangi bir kafes yapının ısı emici olarak kullanılması için soğutma performansının nasıl artırılabileceğini ortaya koymuştur. Farklı kafes yapılarına sahip ısı emicilerin soğutma performansları karşılaştırıldı ve en iyi soğutma performansı gösteren geometrinin diğerlerinden yüzey alanı / hacim oranının daha yüksek olması en önemli etken olduğu gözlemlenmiştir. Bu etken kafes yapının birim hücre sayısı ve kafesi oluşturan ağın inceliği ile doğrudan ilgilidir. Bu bulgular, akademik literatüre önemli katkılar sağlamakta ve pratik uygulamalarda yenilikçi çözümler sunmaktadır. Elektronik cihazlarda kullanılan ısı emicilerin tasarımında bu yeni yaklaşımlar, teknolojik gelişmeler ile git gide küçülen fakat işlem gücünün artması ile çalışma sıcaklığı artan işlemci gibi elektronik komponentlerin soğutulmasında çözüm sunma potansiyeline sahiptir. Bu araştırma, eklemeli imalatın sunduğu esneklik ve performans avantajlarını ortaya koyarak, gelecekteki çalışmalar için de bir referans niteliği taşımaktadır.

KAYNAKLAR

1. Zhang, H., Wang, X., Shi, Z., Xue, J., & Han, F. (2021). Compressive and energy absorption properties of pyramidal lattice structures by various preparation methods. *Materials*, 14(21), 6484.
2. Yi, B. (2021). Multicomponent topology optimization of functionally graded lattice structures with bulk solid interfaces. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 122(16), 4219-4249.
3. Echeta, I., Feng, X., Dutton, B., Leach, R., & Piano, S. (2019). Review of defects in lattice structures manufactured by powder bed fusion. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 106(5-6), 2649-2668.
4. Yan, C., Hao, L., Hussein, A., Young, P., & Raymont, D. (2014). Advanced lightweight 316L stainless steel cellular lattice structures fabricated via selective laser melting. *Materials & Design (1980-2015)*, 55, 533-541.
5. Ye, J., Zhao, L., Ding, R., Du, B., Yuan, Y., & Li, K. (2021). Study on the quasistatic compression performance of arch microstrut lattice structure by selective laser melting. *Advanced Engineering Materials*, 24(5). <https://doi.org/10.1002/adem.202101156>
6. Abdelaal, O., Hengsbach, F., Schaper, M., & Hoyer, K. (2022). Lpbf manufactured functionally graded lattice structures obtained by graded density and hybrid poisson's ratio. *Materials*, 15(12), 4072.
7. Caprio, F., Acanfora, V., Franchitti, S., Sellitto, A., & Riccio, A. (2019). Hybrid metal/composite lattice structures: design for additive manufacturing. *Aerospace*, 6(6), 71.
8. Ma, X., Zhang, Z., Zhao, M., Jiang, J., Luo, F., & Zhou, H. (2021). Mechanical and energy absorption properties of functionally graded lattice structures based on minimal curved surfaces. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 118(3-4), 995-1008.
9. Seharing, A., Azman, A., & Abdullah, S. (2020). A review on integration of lightweight gradient lattice structures in additive manufacturing parts. *Advances in Mechanical Engineering*, 12(6). <https://doi.org/10.1177/1687814020916951>
10. Mun, J., Ju, J., & Thurman, J. (2016). Indirect fabrication of lattice metals with thin sections using centrifugal casting. *Journal of Visualized Experiments*, (111). <https://doi.org/10.3791/53605>
11. Messner, M. (2016). Optimal lattice-structured materials. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 96, 162-183.
12. Ueno, A., Guo, H., Takezawa, A., Moritoyo, R., & Kitamura, M. (2021). Temperature distribution design based on variable lattice density optimization and metal additive manufacturing. *Symmetry*, 13(7), 1194.

13. Top, N., Şahin, İ., & Gökçe, H. (2023). The mechanical properties of functionally graded lattice structures derived using computer-aided design for additive manufacturing. *Applied Sciences*, 13(21), 11667.
14. Zhang, Z., Yuan, X. (2022). Applications and future of automated and additive manufacturing for power electronics components and converters. *Ieee Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 10(4), 4509-4525.
15. Ghahfarokhi, P., Podgornovs, A., Kallaste, A., Cardoso, A., Belahcen, A., Vaimann, T., & Asad, B. (2021). Opportunities and challenges of utilizing additive manufacturing approaches in thermal management of electrical machines. *Ieee Access*, 9, 36368-36381.
16. Fasano, M., Ventola, L., Calignano, F., Manfredi, D., Ambrosio, E., Chiavazzo, E., & Asinari, P. (2016). Passive heat transfer enhancement by 3d printed pitot tube based heat sink. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 74, 36-39.
17. Silva, E., Sampaio, Á., & Pontes, A. (2021). Evaluation of active heat sinks design under forced convection—effect of geometric and boundary parameters. *Materials*, 14(8), 2041.
18. Collins, I., Weibel, J., Pan, L., & Garimella, S. (2019). A permeable-membrane microchannel heat sink made by additive manufacturing. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 131, 1174-1183.
19. Vaissier, B., Pernot, J., Chougrani, L., & Veron, P. (2019). Parametric design of graded truss lattice structures for enhanced thermal dissipation. *Computer-Aided Design*, 115, 1-12.
20. Thompson, M., Moroni, G., Vaneker, T., Fadel, G., Campbell, R., Gibson, I., & Martina, F. (2016). Design for additive manufacturing: trends, opportunities, considerations, and constraints. *Cirp Annals*, 65(2), 737-760.
21. Klemens, P., Williams, R. (1986). Thermal conductivity of metals and alloys. *International Materials Reviews*, 31(1), 197-215.
22. Xiao, X., Cirak, F. (2021). Infill topology and shape optimization of lattice-skin structures. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 123(3), 664-682.
23. Nagano, H., Umemoto, R., Ueno, A., & Ogushi, T. (2022). Effective thermal conductivity measurement of additively manufactured lattice structures by application of modified temperature profile method. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4313766>
24. Meteyer, S., Xu, X., Perry, N., & Zhao, Y. (2014). Energy and material flow analysis of binder-jetting additive manufacturing processes. *Procedia Cirp*, 15, 19-25.
25. Mohanty, S., Prashanth, K. (2023). Metallic coatings through additive manufacturing: a review. *Materials*, 16(6), 2325.

26. Benack, N., Wang, T., Matthews, K., & Taheri, M. (2018). Additive manufacturing methods for soft magnetic composites (smcs). *Microscopy and Microanalysis*, 24(S1), 1066-1067.
27. Jang, T., Kim, D., Han, G., Yoon, C., & Jung, H. (2020). Powder based additive manufacturing for biomedical application of titanium and its alloys: a review. *Biomedical Engineering Letters*, 10(4), 505-516.
28. Bai, Y., Williams, C. (2015). An exploration of binder jetting of copper. *Rapid Prototyping Journal*, 21(2), 177-185.
29. Bai, Y., Wagner, G., & Williams, C. (2017). Effect of particle size distribution on powder packing and sintering in binder jetting additive manufacturing of metals. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 139(8). <https://doi.org/10.1115/1.4036640>
30. J, P., Kumar, P., & Rehman, S. (2021). Steady state thermal analysis to investigate total heat flux in a fiber metal laminate for variable thickness. *International Research Journal on Advanced Science Hub*, 3(7), 20-24.
31. Jagueneau, A., Jannot, Y., Degiovanni, A., & Ding, T. (2019). A steady-state method for the estimation of the thermal conductivity of a wire. *International Journal of Heat and Technology*, 37(1), 351-356.
32. Hong, G., Tian, W., Ding, X., & Duan, C. (2018). Multi-objective optimal design of electro-hydrostatic actuator driving motors for low temperature rise and high power weight ratio. *Energies*, 11(5), 1173.
33. Su, J., Cerqueira, D., & Wang, S. (2012). Thermal design of multi-layered composite pipelines for deep water oil and gas production. *International Journal of Computer Applications in Technology*, 43(3), 248.
34. Sulaiman, D. R. (2020). Power and thermal management issues for portable processors. *Zanco Journal of Pure and Applied Sciences*, 32(4), 75–81.
35. Li, M., Li, C., Wang, J., Xiao, X., & Yue, Y. (2015). Parallel measurement of conductive and convective thermal transport of micro/nanowires based on raman mapping. *Applied Physics Letters*, 106(25). <https://doi.org/10.1063/1.4923189>
36. Mjallal, I., Farhat, H., Hammoud, M., Ali, S., Shaer, A., & Assi, A. (2018). Cooling performance of heat sinks used in electronic devices. *Matec Web of Conferences*, 171, 02003.
37. Uhlmann, E., Tekkaya, A. E., Kashevko, V., Gies, S., Reimann, R., & John, P. (2016). Qualification of CuCr1Zr for the SLM process. <https://doi.org/10.17877/de290r-16984>
38. Fonfría, J., Berrospi, G., & Cook, V. (2021). Meshless numerical simulation of steel connections: application to the t-stub component. *Ce/Papers*, 4(2-4), 973-980.

39. Rivera, A., Magalhães, F., Moreno, A., & Rubio, J. (2020). Assessment of the highest stress concentration area generated on the mandibular structure using meshless finite elements analysis. *Bioengineering*, 7(4), 142.
40. Zamzam, O. (2024). Structural performance evaluation of an electric vehicle chassis. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-4258581/v1>
41. Hedayati, R., Sadighi, M. (2016). A micromechanical approach to numerical modeling of yielding of open-cell porous structures under compressive loads. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 769. <https://doi.org/10.15632/jtam-pl.54.3.769>
42. Peto, M. (2024). Review on structural optimization techniques for additively manufactured implantable medical devices. *Frontiers in Mechanical Engineering*, 10. <https://doi.org/10.3389/fmech.2024.1353108>
43. Qian, B., Fan, H., Liu, G., Zhang, J., & Li, P. (2021). Microchannel liquid-cooled heat exchanger based on a nonuniform lattice: study on structure calculation, formation process, and boiling heat transfer performance. *Materials*, 14(23), 7248.
44. Rathore, J., Mang, C., Vienne, C., Quinsat, Y., & Tournier, C. (2021). A methodology for computed tomography-based non-destructive geometrical evaluations of lattice structures by holistic strut measurement approach. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 143(5). <https://doi.org/10.1115/1.4049492>
45. Shi, X. (2024). Energy absorption capability of graded hybrid triply periodic minimal surface structures based on fracture zone controlling. *Advanced Engineering Materials*, 26(10). <https://doi.org/10.1002/adem.202301847>
46. Wang, X., Wang, C., Zhou, X., Wang, D., Zhang, M., Gao, Y., & Zhang, P. (2020). Evaluating lattice mechanical properties for lightweight heat-resistant load-bearing structure design. *Materials*, 13(21), 4786.
47. Wang, Y., Ramirez, B., Carpenter, K., Naify, C., Hofmann, D., & Daraio, C. (2019). Architected lattices with adaptive energy absorption. *Extreme Mechanics Letters*, 33, 100557.
48. Yang, S. (2024). Laser powder bed fusion of sinusoidal lattice structure using shape memory alloys. *Advanced Engineering Materials*, 26(10). <https://doi.org/10.1002/adem.202400177>
49. Zhang, X., Wang, Y., Ding, B., & Li, X. (2019). Design, fabrication, and mechanics of 3d micro-/nanolattices. *Small*, 16(15). <https://doi.org/10.1002/smll.201902842>
50. Özdemir, M., Korkmaz, M. (2023). A short and technical review on lattice structures produced by additive manufacturing. *Prabha Materials Science Letters*, 2(1), 48-61.
51. İnternet: Dreamstime, Timothy Hodgkinson's Profile. URL: https://www.dreamstime.com/timh222_info, Son Erişim Tarihi: 14.06.2024.

52. İnternet: Johnson, M., Thilakaratne, S., Arora, S. (August,2021). How to Design a Heat Sink for Additive Manufacturing. URL: <https://blogs.sw.siemens.com/simcenter/how-to-design-a-heat-sink-for-additive-manufacturing/>, Son Erişim Tarihi: 14.06.2024
53. İnternet: Shagal Technologies, Heat Sink LPD50-25B. URL: <https://www.shagal.solutions/items.asp?Qsearch=LPD50>, Son Erişim Tarihi: 01.07.2024
54. İnternet: SLM Solutions, AlSi7Mg0,6 Material Data Sheet. URL: https://www.slm-solutions.com/fileadmin/Content/Powder/MDS/MDS_Al-Alloy_AlSi7Mg0_6_0219_EN.pdf, Son Erişim Tarihi: 01.07.2024.







Gazili olmak ayrıcalıktır