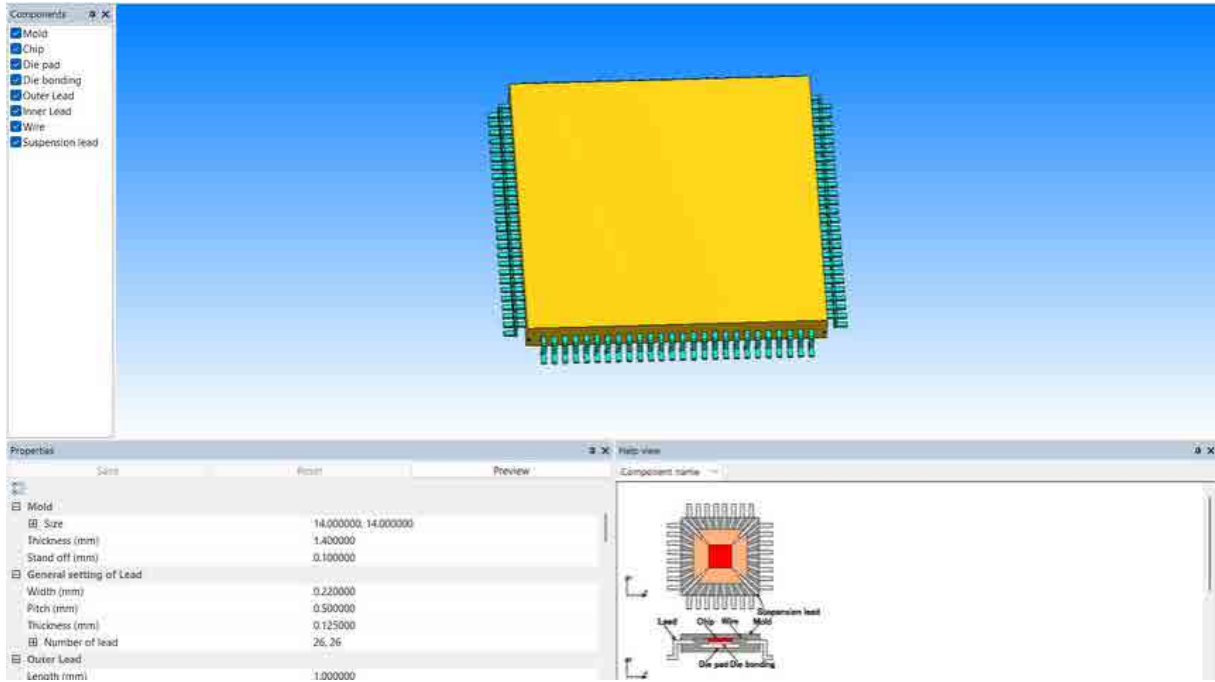


TEKNİK DOKÜMAN



Cradle CFD

Bu teknik dokümanda, elektronik bileşenlerin detaylı tasarımlarının gerçekleştirildiği “Electronic Parts Maker” aracı kullanılarak analiz modellerinin hazırlandığı ve sonrasında CRADLE-ScSTREAM ile parça sıcaklıklarının katalog verilerine göre doğrulandığı çalışmalar anlatılmaktadır. Ayrıca, doğal ve zorlanmış taşınım koşulları arasındaki farklar incelenmiş ve zorlanmış taşınımda farklı türbülans modellerinin etkileri araştırılmıştır.



Cradle ScSTREAM ile Elektronik Bileşenlerin Doğal ve Zorlanmış Taşınım Analizleri

Hazırlayan	ONAYLAYAN
Ege ERGEN CFD Stajyeri	Can OSSO CAE Takım Lideri

Tarih: 17/11/2025

1. Giriş

Bu çalışmanın temel amacı, baskılı devre kartı (PCB) üzerinde yer alan farklı türde elektronik bileşenlerin termal analizlerinde Cradle ScSTREAM yazılımının performansını incelemektir. Analiz sonuçları, her bir bileşen için kataloglarda belirtilen “junction-to-ambient thermal resistance” (R_{ja}) değerlerinden hesaplanmış sıcaklıklar ile karşılaştırılmıştır [1][2][3]. Açık alandaki analizlerle doğrulanan bu yöntem kullanılarak doğal ve zorlanmış taşınım koşullarında kutu içi analizler gerçekleştirilmiş ve her iki koşulun farkları incelenmiştir.

Termal performans değerlendirmelerinde yalnızca bileşenler değil, PCB tasarımı da etkili olmuştur. Bileşen dağılımı ve kart boyutları, bileşenlerden yayılan ısının PCB üzerinde nasıl dağıldığını belirlemiştir.

Test senaryosunda, LQFP100 paketinde 14×14 mm boyutlarında bir entegre devre, Cradle ScSTREAM içerisindeki Electronics Parts Maker (EPM) modülü kullanılarak modellenmiştir. LM2575T regülatör için ayrıntılı modelleme, IRL540NPbF MOSFET için ise sadeleştirilmiş “two-resistor” modeli tercih edilmiştir. Her bileşen için R_{ja} ve bağlantı noktası sıcaklıkları hesaplanmış, gerçek çalışma koşullarıyla karşılaştırmalar yapılmıştır.

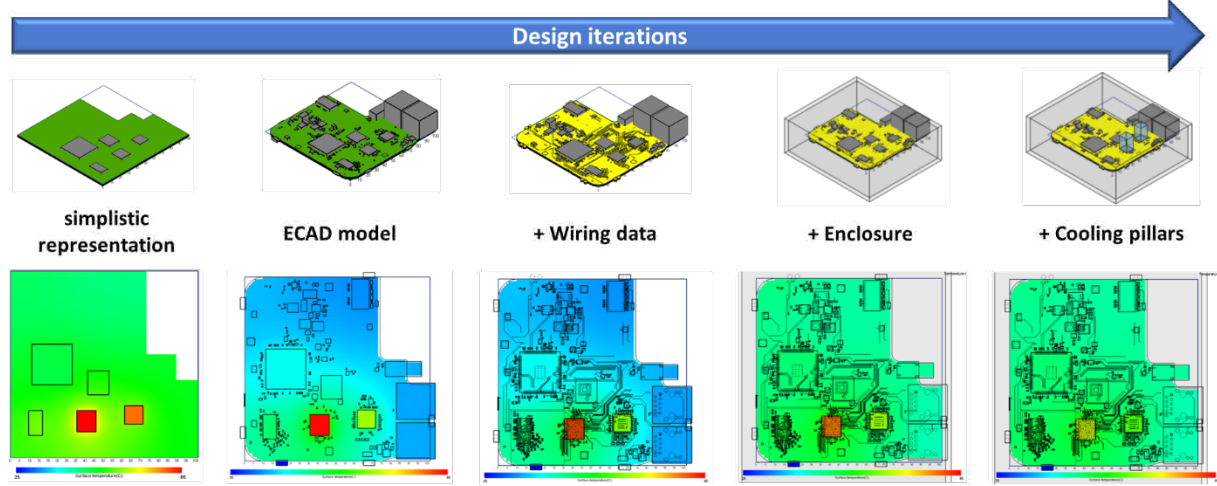
Bileşenlerin PCB üzerindeki dağılımının yanı sıra çevresel koşulların etkisi de değerlendirilmiştir. Bu kapsamda, PCB’nin uzunluğunun %10’u ve en yüksek komponent yüksekliğinin iki katı esas alınarak kart etrafında bir kutu hacim tanımlanmıştır. Kutunun üst kısmında 30 mm ve 10 mm açıklık bırakılmış, fan etkisini temsil etmek üzere $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ boyutlarında dikdörtgen bir açıklık eklenmiştir.

Analizler hem doğal taşınım hem de zorlanmış taşınım koşullarında gerçekleştirilmiştir. Zorlanmış taşınım durumunda fan için iki farklı debi ($1.08 \text{ m}^3/\text{h}$ ve $2.16 \text{ m}^3/\text{h}$) kullanılarak soğutma performansındaki değişim gözlemlenmiştir.

Elde edilen sonuçlar, bileşen sıcaklıklarının sadece R_{ja} değerleriyle değil, PCB yerleşimi ve çevresel soğutma koşullarıyla da ilişkili olduğunu göstermektedir. Bu sayede, Cradle ScSTREAM yazılımının farklı modelleme yöntemleri ve sınır koşulları altında sağladığı öngörüler değerlendirilebilmiş, elektronik sistemlerin termal tasarım süreçlerine yönelik önemli çıkarımlar elde edilmiştir.

2. Elektronik Bileşenlerin Termal Analiz Adımları

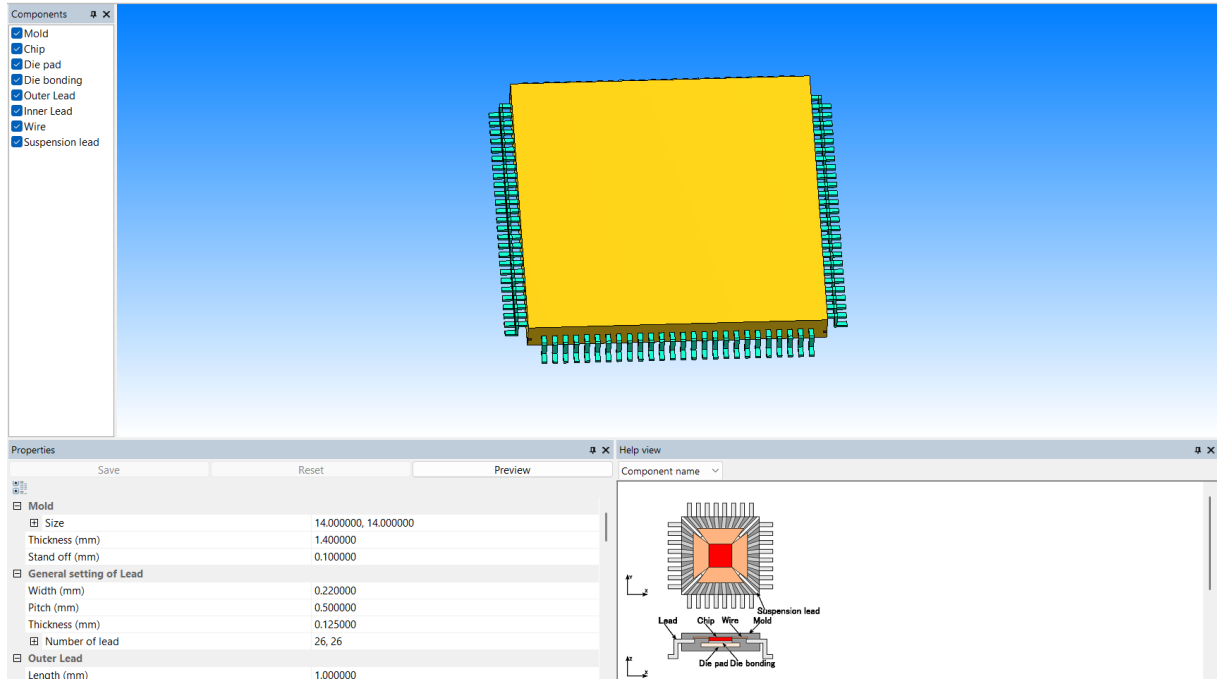
Elektronik bileşenlerin termal analizleri konusunda literatürde basitleştirilmiş modellerden başlayarak ECAD verisi, kablolama, kutu ve ek soğutma elemanlarıyla detaylanan farklı yaklaşımlar görülmektedir (Şekil 1). Bu çalışmada ise detaylı komponent geometrileri içeren ECAD modeli doğrudan kullanılmış, kablolama verisi eklenmemiştir. Böylece özellikle ısınma eğiliminde olan bileşenler daha gerçekçi bir şekilde temsil edilmiştir. Ayrıca aynı modelin kutu içerisine yerleştirilmiş versiyonu hem doğal taşınım hem de zorlanmış taşınım koşulları altında analiz edilerek sıcaklık dağılımları karşılaştırılmıştır.



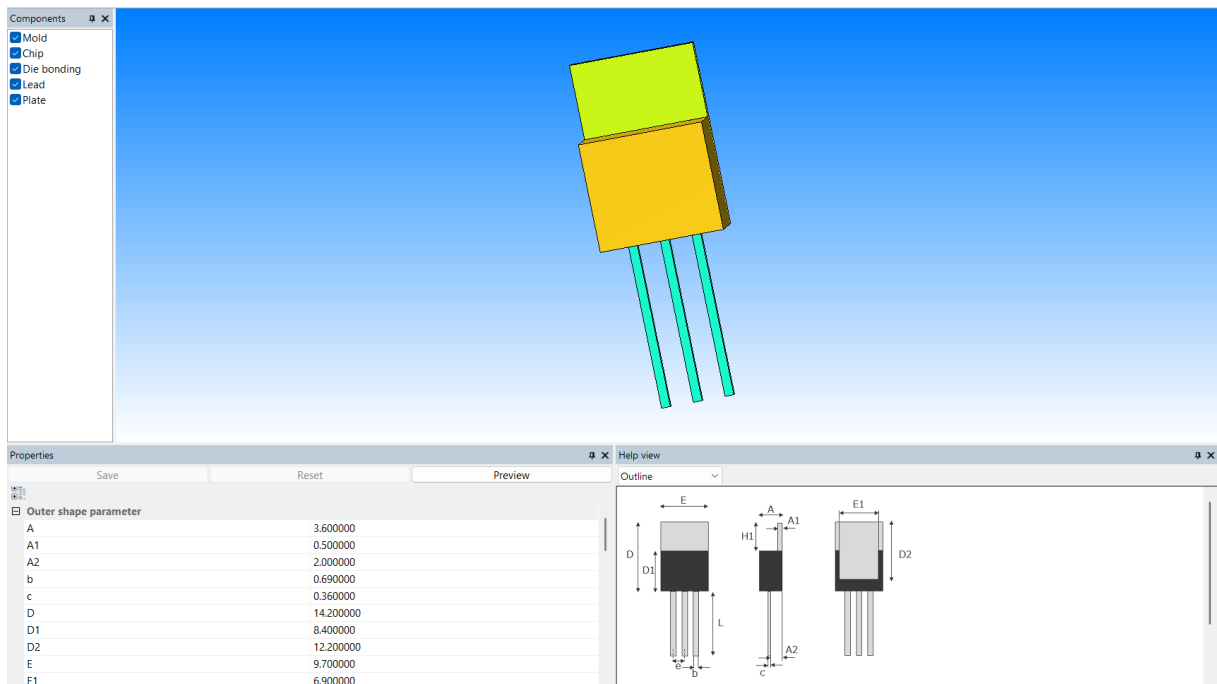
Şekil 1. Elektronik bileşenlerin termal analiz adımları

3. Cradle ScSTREAM ve Electronics Parts Maker Modülünde Komponent Oluşturma

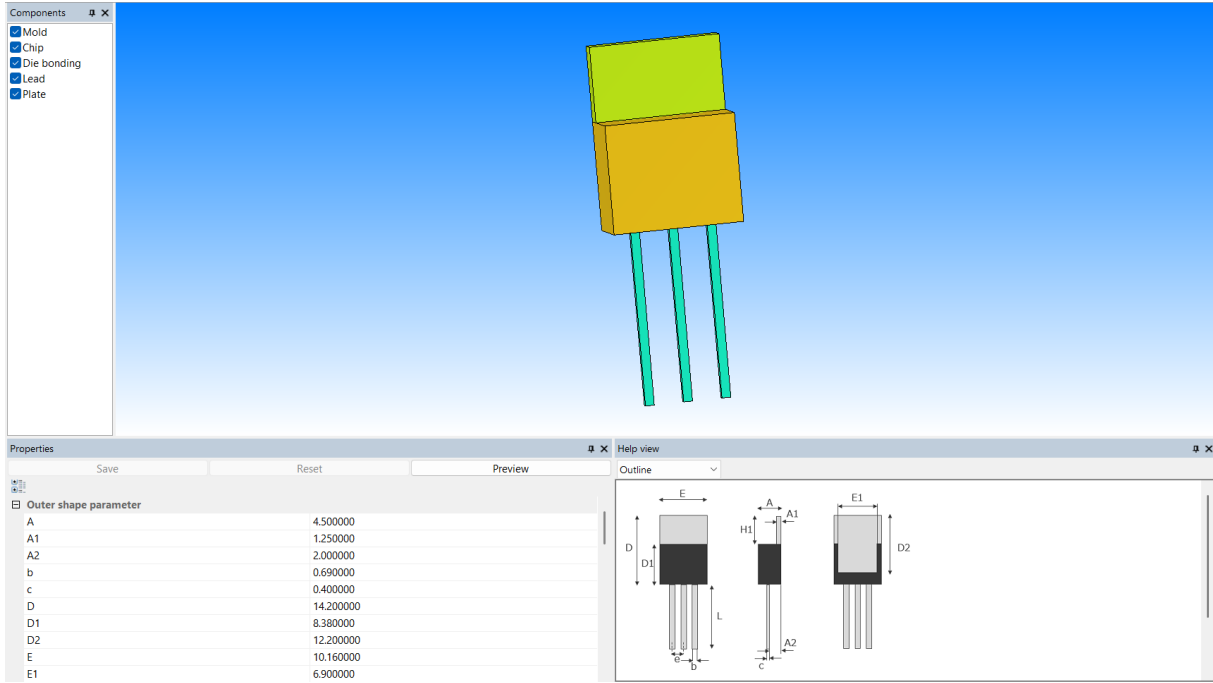
Cradle ScSTREAM, elektronik kartlarda yer alan bileşenlerin termal davranışlarını incelemek amacıyla kullanılan bir CFD yazılımıdır. Yazılımın Electronics Parts Maker (EPM) modülü, farklı paket türlerinin boyut, malzeme ve güç bilgileri girilerek analizlere dahil edilmesine imkan tanır. Bu çalışmada, LQFP100 entegre devresi için Quad Flat Package (QFP) tipi kullanılmış (Şekil 2), IRL540NPbF MOSFET (Şekil 3) ve LM2575T regülatör (Şekil 4) için ise TO-220 paketleri seçilmiştir. Böylece hem yüzey montajlı entegre devrelerin hem de delik montajlı güçlü yarı iletkenlerin termal performansı aynı ortamda değerlendirilmiş, farklı paket tiplerinin sıcaklık dağılımı üzerindeki etkileri gözlemlenmiştir.



Şekil 2. Electronics Parts LQFP100 Çip modellemesi



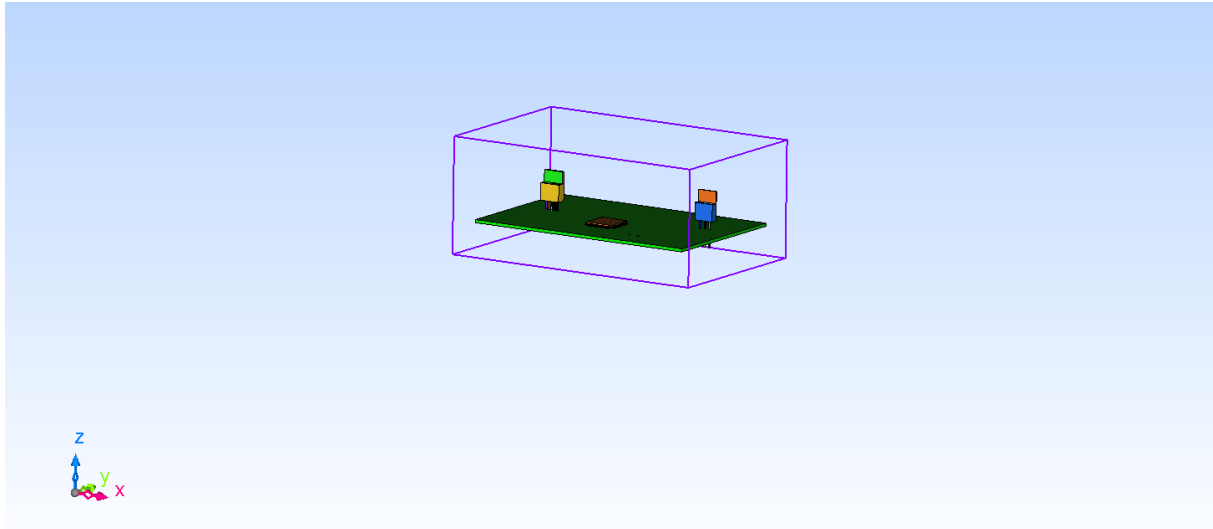
Şekil 3. Electronics Parts IRL540NPbF MOSFET modellemesi



Şekil 4. Electronics Parts LM2575T Regulator modellemesi

4. Doğal ve Zorlanmış Taşınım Senaryoları ile Termal Direnç Bazlı Doğrulama

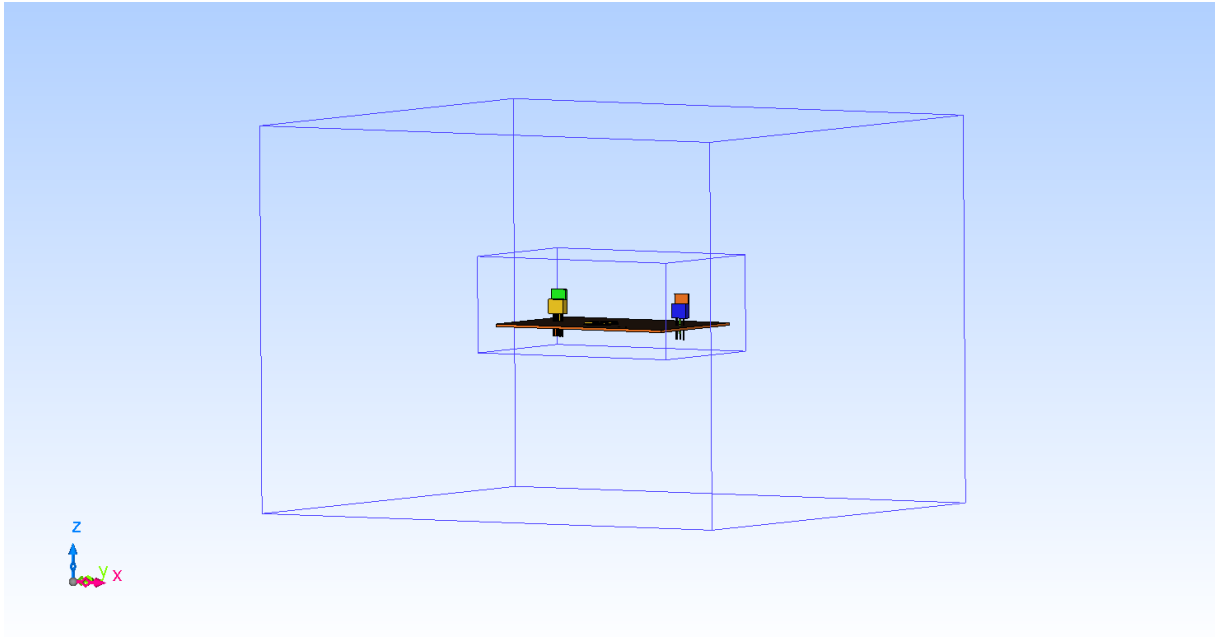
Doğal ve zorlanmış taşınımın inceleneceği modellerin doğruluğunu değerlendirmek amacıyla elektronik bileşenler, açık alanda analiz edilmiş ve katalog değerleriyle sonuçlar karşılaştırılmıştır (Şekil 5). MOSFET için two-resistor modeli, LM2575T regülatör ve LQFP100 çipi için ayrıntılı (detailed) bileşen modelleri oluşturulmuştur. PCB yerleşimi, çiplerden geçen ısının kart üzerinde yayılımının diğer bileşenleri etkilememesi ya da en az düzeyde etkilemesi için düzenlenmiştir. Tüm analizler 25 °C sabit dış ortam sıcaklığında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5. PCB üzerindeki komponentlerin izometrik görünümü

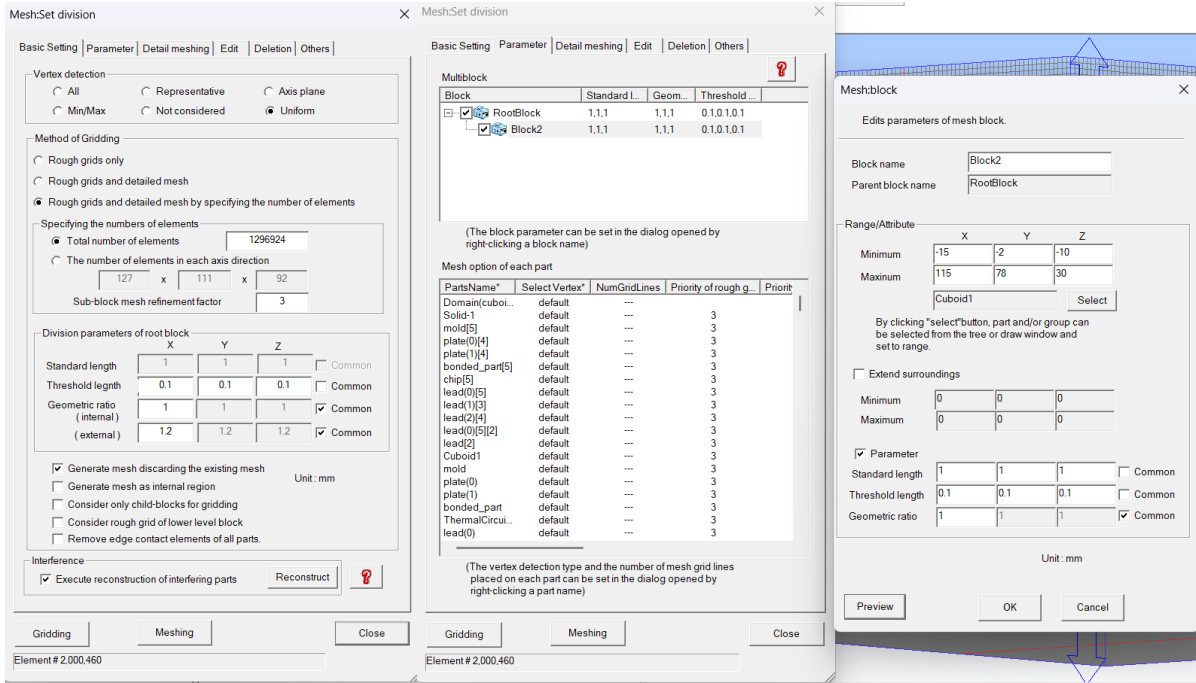
Modelleme ve analiz süreçlerinde izlenen adımlar aşağıdaki gibidir.

1. **Bileşen modellerinin oluşturulması:** LQFP100 boyutunda 14×14 mm mikroçip ve LM2575T regülatör ayrıntılı (detailed) olarak, IRL540NPbF MOSFET ise two-resistor modeli kullanılarak EPM modülü ile oluşturulmuş ve dışa aktarılmıştır.
2. **PCB ve komponent yerleşimi:** PCB ve diğer bileşenler öncelikle MSC APEX'te modellenmiş, ardından konumları belirlenerek bileşen dağılımları gerçekleştirilmiştir.
3. **Regülatör pin ayarları:** LM2575T regülatörünün toplam 5 pini bulunduğu için ScSTREAM içerisinde modelin doğruluğunu artırmak amacıyla ürün kataloğunda belirtilen uzunluk ve ölçülere uygun olarak aktif pin sayısı 3'ten 5'e çıkarılmıştır.
4. **Malzeme atamaları:** PCB ve bileşenlerin iç yapılarının malzemeleri, JEDEC standartlarına uygun olarak tanımlanmıştır [1][2][3].
5. **Hesaplama hacminin hazırlanması:** Oluşturulan model, ScSTREAM içerisine aktarılmış ve analiz için gerekli hesaplama hacmi oluşturulmuştur (Şekil 6).

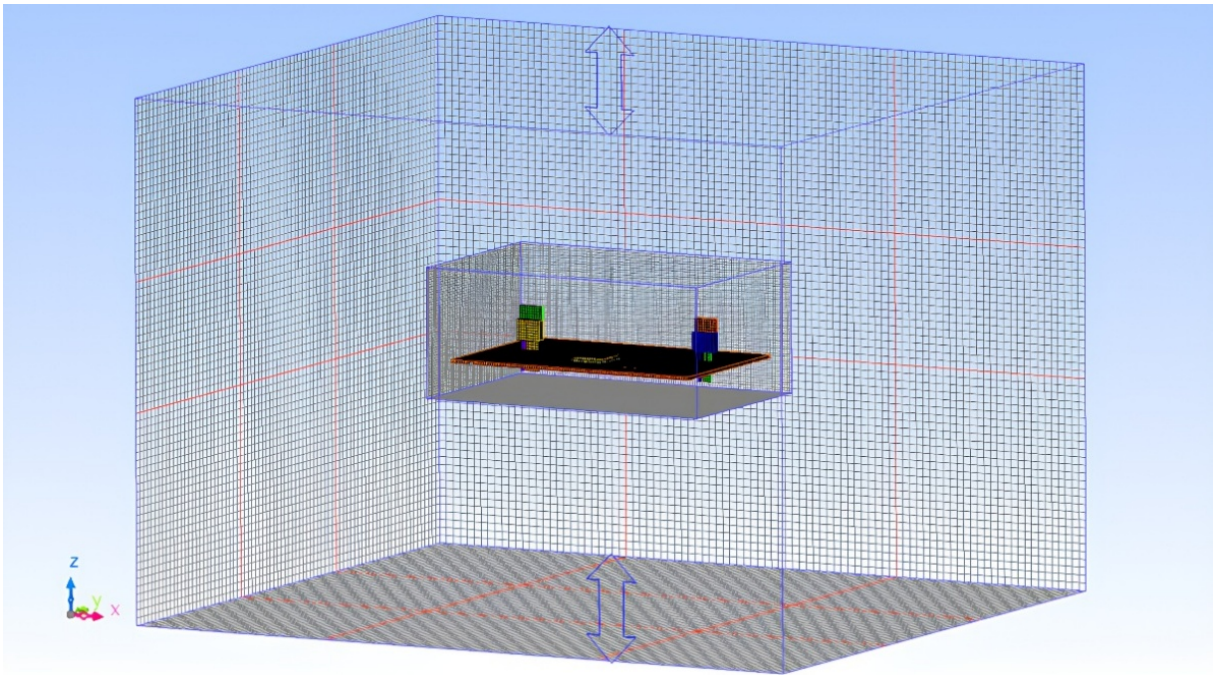


Şekil 6. Elektronik bileşenlerin konumlandırıldığı hesaplama hacmi

6. **Ağ yapısının hazırlanması:** PCB üzerindeki kritik bölgelerde akış ve sıcaklık dağılımı konusunda daha yüksek doğruluk elde etmek için PCB bölgesinde daha sık bir ağ kullanılmış ve bunun için alt blok (RootBlock) yöntemi uygulanmış olup iyileştirme (refinement) oranı 3 olarak belirlenmiştir (Şekil 7). Bu ayarlar sonrasında Şekil 8'de görülen 2 milyon elemanlı kartezyen hesaplama ağının oluşturulması 12 saniye sürmüştür.

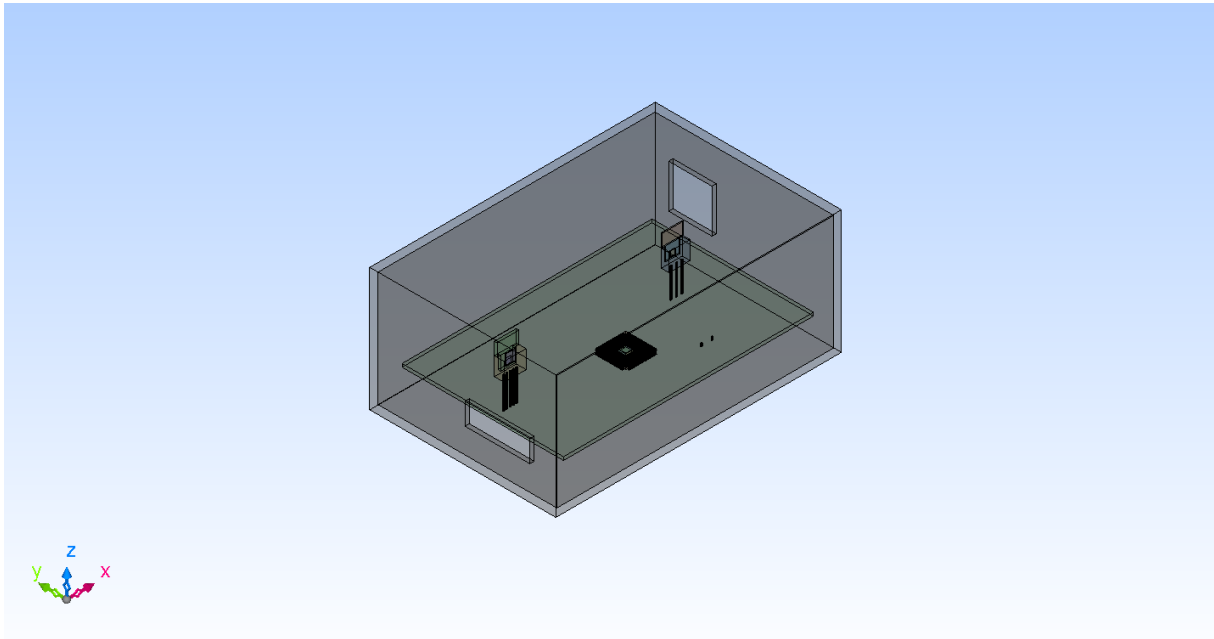


Şekil 7. ScSTREAM’de genel ağ ve alt blok ayarları



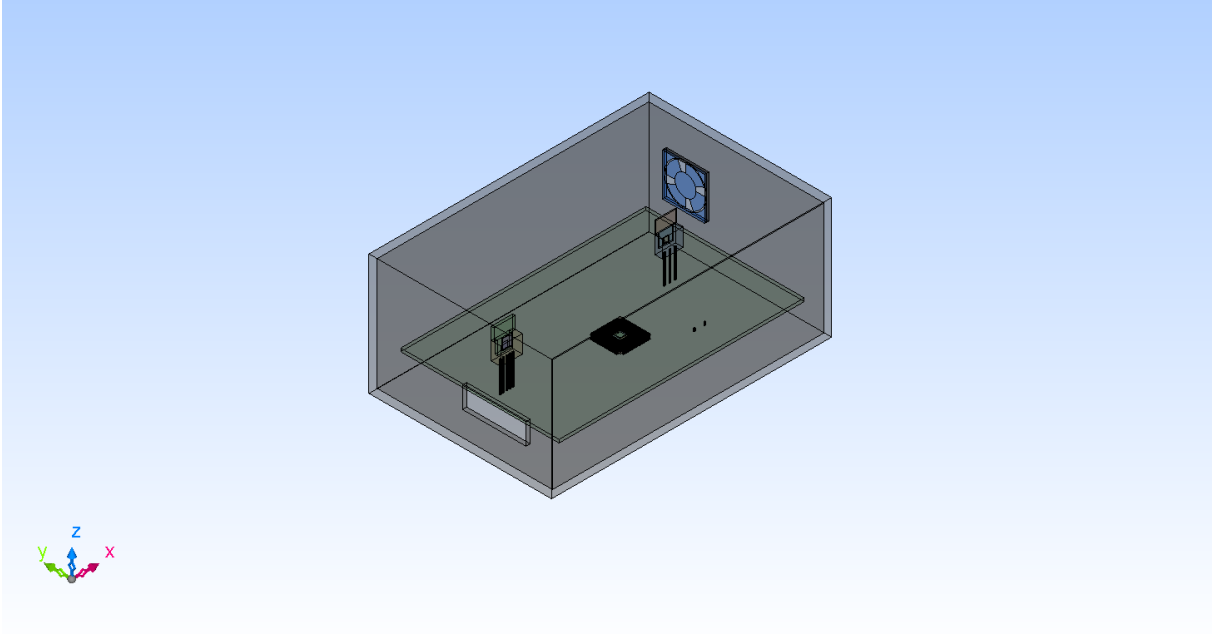
Şekil 8. Ağ yapısı

7. **Bileşenleri Isıl Güç Değerlerinin Girilmesi:** Kataloglarda belirtilen Rja ve dış ortam sıcaklığı değerlerine göre ısı güç değerleri hesaplanmıştır. Buna göre regülatör ve MOSFET için güç değeri 1 W olarak belirlenmiştir. LQFP100 mikroçipi için ise katalogda belirtilen maksimum güç tüketimi 0.434 W olmasına rağmen, PCB üzerinde ortada konumlanması ve ısı yayılımının etkin alanını sınırlama gerekliliği göz önünde bulundurularak analiz için 0.2 W güç atanmıştır.
8. Açık alan analizleriyle katalog verileri doğrulandıktan sonra PCB ve bileşenler AL7075 malzemeden üretilmiş kutu içerisine yerleştirilerek doğal taşınım analizi gerçekleştirilmiştir. Kutunun yan yüzeyleri ve PCB arasında PCB uzunluğunun %10'u kadar mesafe bırakılmış, kutu yüksekliği ise en yüksek bileşenin iki katı olarak belirlenmiştir. Kutu üzerinde boyutları 20 mm × 20 mm ve 30 mm x 10 mm olan iki adet açıklık oluşturulmuştur (Şekil 9).



Şekil 9. PCB ve bileşenlerin yerleştirildiği kutu ve üzerindeki açıklıklar

9. Doğal taşınım analizi gerçekleştirildikten sonra zorlanmış taşınım analizleri için ScSTREAM'de bulunan "Fan Aracı" yardımıyla 20 mm × 20 mm olan açıklığa fan yerleştirilmiş ve 30 mm x 10 mm olan açıklıktan hava emişi sağlanmıştır (Şekil 10). Bu analizlerde 1.08 m³/h ve 2.16 m³/h olmak üzere iki farklı fan debisinde sıcaklık dağılımı gözlemlenmiştir.



Şekil 10. Fan yerleşimi

5. Analiz Sonuçları

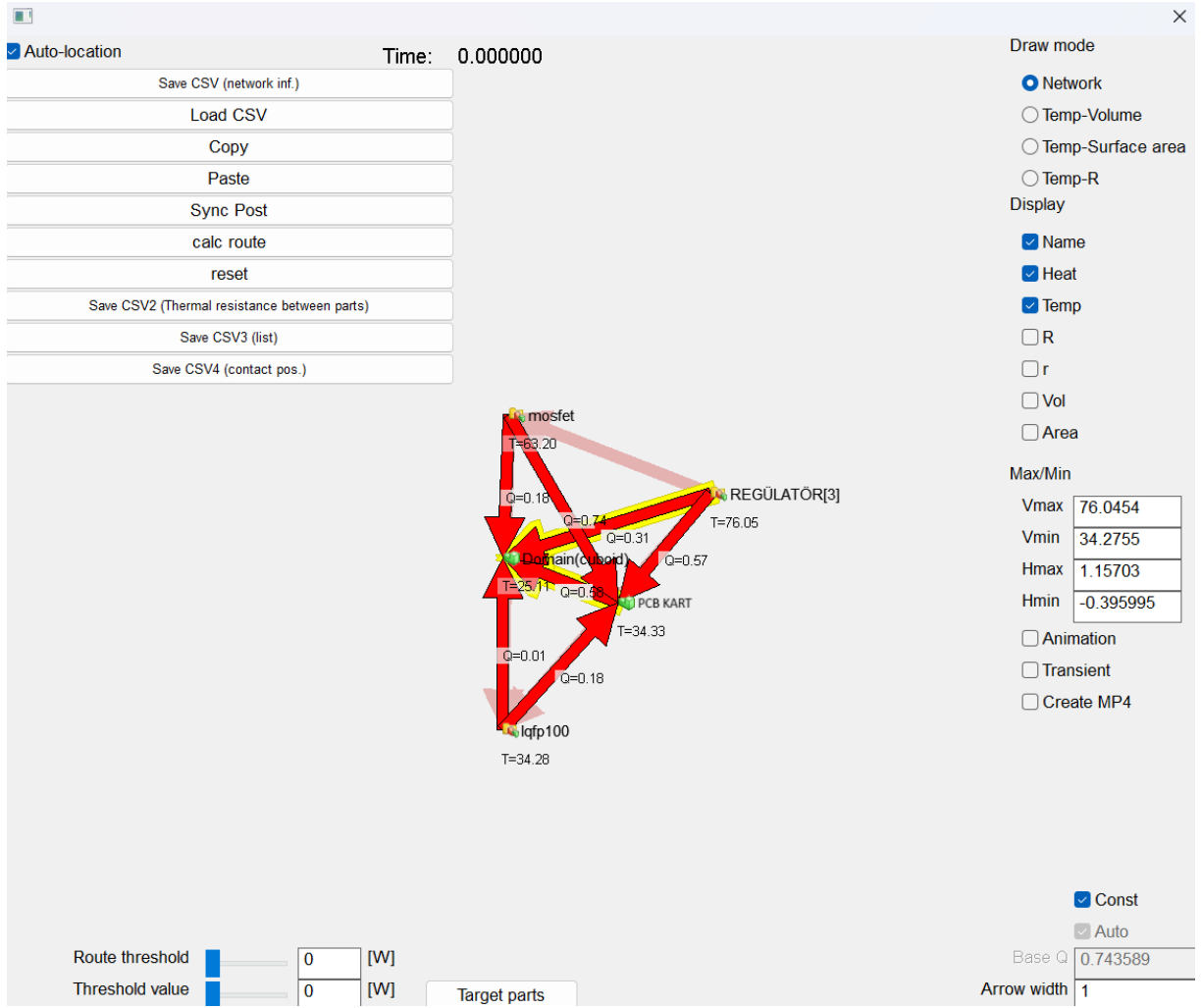
Analizler, Intel i5-10300H işlemci ile 4 çekirdek kullanılarak gerçekleştirilmiş olup 50 çevrim sonucunda ve 5 dakika 32 saniye çözüm süresinde 10^{-5} yakınsama değerine ulaşarak kararlı hale ulaşılmıştır. CFD sonuçları ile katalog verileri karşılaştırıldığında maksimum fark %4 seviyesinde (3.6°C) olduğu için ilgili problem doğrulanmıştır ve bu analiz koşullarıyla kutu içerisindeki analizlere devam edilebilir (Tablo 1). Bu değerler, hacim ortalamalı olarak ScPost yazılımında hesaplatılabildiği gibi HeatPathView aracında da görüntülenebilir (Şekil 11). Bu araç sayesinde bileşenler arası termal akış yolları da görüntülenerek bileşenlerin ısınma nedenleri ve alınacak önlemler daha iyi araştırılabilir (Şekil 12).

Tablo 1. Açık alan CFD sonuçlarının katalog verileriyle karşılaştırması

Bileşenler	Katalogdaki Sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$)	Açık Alan CFD Hacim Ortalamalı Sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$)	Sıcaklıktaki Fark (%)
LM2575T Regülatör	90.0	90.1	0.16
LQFP100 Mikroçip	34.2	34.4	0.58
IRL540NPBF Mosfet	87.0	90.6	4.15

Part name	No	Avg. temp.[C]
REGÜLATÖR[3]		
mold_group[5]		89.105
plate_group[4]		
plate(0)[4]	4	89.9269
plate(1)[4]	5	90.0722
chip_group[5]		
chip[5]	6	90.144
lead_group[4]		
lead(0)[5]	7	41.6116
lead(1)[3]	8	42.1156
lead(2)[4]	9	41.9037
lead(0)[5][2]	10	41.5985
lead[2]	11	42.0611
lqfp100		
mold_group[2]		
mold[2]	20	34.3669
bonded_part_group[2]		
bonded_part[2]	21	34.3175
chip_group[2]		
chip	22	34.3959
outer_lead_group[2]		34.2873
inner_lead_group[2]		34.3223
wire_left_right_group[2]		34.3482
wire_top_bottom_group[2]		34.3446
suspension_group[2]		34.3261
mosfet		
mold_group		
mold	12	82.2216
plate_group		
plate(0)	13	66.8003
plate(1)	14	66.9681
bonded_part_group		
bonded_part	15	67.1083
chip_group		
ThermalCircuitModel1	16	90.6053
lead_group		
lead(0)	17	48.1383
lead(1)[4]	18	48.5648
lead(2)	19	48.2804

Şekil 11. HeatPathView aracında açık alan CFD bileşen sıcaklıkları

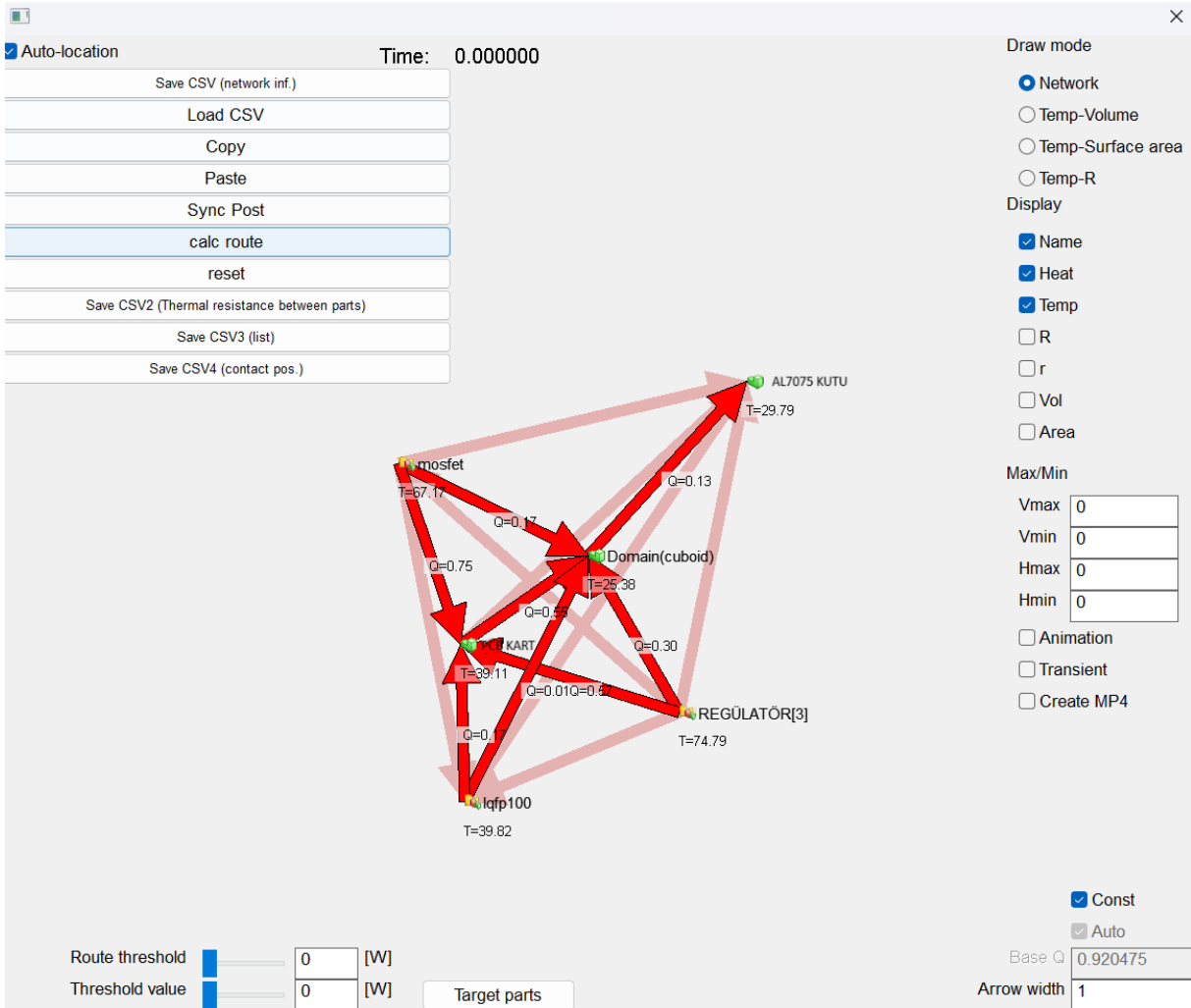


Şekil 12. HeatPathView aracında açık alan CFD ısı akış yolları

Kutu içerisinde gerçekleştirilen ve doğal taşınımın incelendiği fansız CFD analizinde ise Regülatör’de 1 °C, Çip ve MOSFET’te 6 °C sıcaklık artışı gerçekleşmiştir (Tablo 2). Şekil 13’teki ısı akış yolları incelendiğinde gövde yüzeyi ve diğer bileşenlere doğru ısının yayıldığı görülmektedir. Böylece kutu ortamında ısının dağılımı ve bileşenler arasındaki ısı etkileşimleri net bir şekilde ortaya konmuştur.

Tablo 2. Açık alan CFD sonuçlarının kutu içi fansız analizle karşılaştırması

Bileşenler	Açık Alandaki Sıcaklıklar (°C)	Kutu İçi Fansız Koşuldaki Sıcaklıklar (°C)
LM2575T Regülatör	90.1	91.1
LQFP100 Mikroçip	34.4	40.0
IRL540NPBF Mosfet	90.6	96.4



Şekil 13. HeatPathView aracında kutu içerisinde fansız CFD ısı akış yolları

Kutu içerisindeki fanlı analizlerde ise her iki fan debisinde de MP-AKN, Standart k-ε ve Low-Reynolds türbülans modelleri kullanılarak analizler gerçekleştirilmiş ve sıcaklıklar karşılaştırılmıştır. Buna göre 1.08 m³/h fan debisinde Regülatör, Çip ve Mosfet'te her üç türbülans modelinde de benzer sonuçlar elde edilirken (Tablo 3) 2.16 m³/h fan debisinde Reynolds sayısının artmasıyla özellikle Regülatör ve Mosfet'te Standart k-ε türbülans modelinde daha yüksek sıcaklıklar elde edilmiştir (Tablo 4). Bu fark, MP-AKN modelinde olduğu gibi Standart k-ε türbülans modelinde türbülans kinetik enerjisi üretiminde düzeltme faktörlerinin kullanılmamasından ve buna bağlı olarak hız ve sıcaklık gradientlerinin farklı hesaplanmasından kaynaklanmaktadır. Bunun dışında tüm modeller, 300 çevrimde 10⁻⁵ değerine yakınsamış olup MP-AKN modeli 17 dakika 25 saniye, Standart k-ε modeli 13 dakika 59 saniye ve Low-Reynolds Number türbülans modeli 14 dakika 40 saniye sürede çözümler gerçekleştirilmiştir.

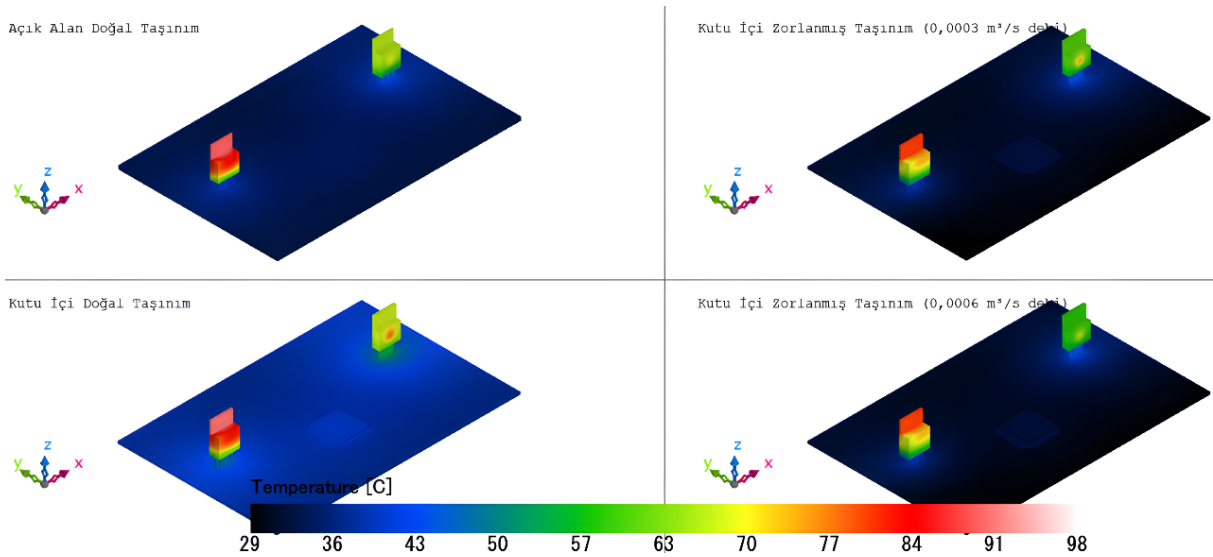
Tablo 3. 1.08 m³/h fan debisinde türbülans modellerinin karşılaştırması

Bileşenler	1.08 m ³ /h ve MP-AKN'deki Sıcaklık (°C)	1.08 m ³ /h ve Std. k-ε'daki Sıcaklık (°C)	1.08 m ³ /h ve Low-Re'taki Sıcaklık (°C)
LM2575T Regülatör	81.2	80.9	81.3
LQFP100 Mikroçip	32.4	32.3	32.5
IRL540NPBF Mosfet	86.6	86.7	86.5

Tablo 4. 2.16 m³/h fan debisinde türbülans modellerinin karşılaştırması

Bileşenler	2.16 m ³ /h ve MP-AKN'deki Sıcaklık (°C)	2.16 m ³ /h ve Std. k-ε'daki Sıcaklık (°C)	2.16 m ³ /h ve Low-Re'taki Sıcaklık (°C)
LM2575T Regülatör	75.6	77.1	75.5
LQFP100 Mikroçip	30.5	30.6	30.4
IRL540NPBF Mosfet	81.5	82.3	81.5

Açık alan, kutu içi fansız ve her iki debideki kutu içi fanlı analiz sonuçları ScPost'ta Şekil 15'teki görüntülenmiştir. Buna göre zorlanmış taşınımın bileşen ve PCB sıcaklıkları konusundaki faydası gözlemlenmektedir. Ayrıca fan debisini artırmak Mikroçip'te en az faydaya sebep olmuştur (Tablo 5).


Şekil 14. ScSTREAM Postprocess yüzey sıcaklık gradyanları

Tablo 5. Açık alan, fansız ve fanlı sonuçların karşılaştırması

Bileşenler	Açık Alan (°C)	Fansız (°C)	1.08 m ³ /h (°C)	2.16 m ³ /h (°C)
LM2575T Regülatör	90.1	91.1	81.2	75.6
LQFP100 Mikroçip	34.4	40.0	32.4	30.4
IRL540NPBF Mosfet	90.6	96.5	86.6	81.5

6. Sonuç ve Değerlendirme

Elektronik bileşenlerin termal yönetiminde doğal ve zorlanmış taşınım arasındaki farkların incelendiği bu çalışmada EPM aracı kullanılarak bileşenler tasarlanmış ve gerçekleştirilen açık alan CFD analizleriyle katalog verileri doğrulanmıştır. Bu analiz yöntemleri kullanılarak aynı PCB yapısı bir kutu içerisine yerleştirilmiş ve zorlanmış taşınımın tüm bileşenlerin sıcaklıklarında bir fayda sağladığı görülmüşse de debinin artmasıyla daha orta kısımlarda bulunan Mikroçip sıcaklığının diğer bileşenlere göre çok fazla değişmediği ortaya koyulmuştur.

7. Referanslar

- [1] Direnc.net, *LM2575T-3.3V 1A Voltaj Regülatörü (TO-220-5)*. [ evrimi i]. Erişim: <https://www.direnc.net/lm2575t-3-3v-1a-voltaj-regulatoru-to220-5>
- [2] STMicroelectronics, *STM32F103C8T6 Datasheet – 32-bit Microcontroller (LQFP-48)*, [PDF]. Eri im: <https://pdf.direnc.net/upload/htm32f103c8t6-smd-32-bit-72mhz-mikrodenetleyici-lqfp-48-datasheet.pdf>
- [3] Infineon, *IRL540NPBF Power MOSFET Datasheet*, [PDF]. Eri im: <https://pdf.direnc.net/upload/irl540npbf-datasheet.pdf>
- [4] Software Cradle, *ScSTREAM User’s Guide: Basics of CFD Analysis*, 10 Temmuz 2025.