

**BİR ISIL PİL MODÜLÜNÜN MODELLENMESİ
VE SİMÜLASYONU**

Gamzepelin AKSOY

Yüksek Lisans Tezi

Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Ahmet KOCA

ARALIK-2015

T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BİR ISIL PİL MODÜLÜNÜN MODELLENMESİ VE SİMÜLASYONU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Gamzepelin AKSOY

(122134111)

Anabilim Dalı: Mekatronik Mühendisliği

Programı: Mekanik Sistemler

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 08.12.2015

Tezin Savunulduğu Tarih: 28.12.2015

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Ahmet KOCA (F.Ü.)

Diğer Jüri Üyeleri: Yrd. Doç Dr. Aydın DİKİCİ (F.Ü.)

Yrd. Doç Dr. Mehmet ÜSTÜNDAĞ (B.Ü.)

ARALIK-2015

ÖNSÖZ

Yüksek lisans ve proje çalışmalarım sürecinde maddi ve manevi destek sağlayan kurum ve kişilere teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim.

Çalışmam boyunca bilgi ve tecrübelerini paylaşıp bana yol gösteren danışman hocam Doç. Dr. Ahmet KOCA' ya teşekkür ederim. Çalışmanın gerçekleştirilmesinde emeği geçen Prof. Dr. Yasin VAROL ve Prof. Dr. Hakan Fehmi ÖZTOP'a teşekkür ederim.

Yüksek lisans eğitimim boyunca her türlü sorumu yılmadan cevaplayan ve hiçbir yardımını esirgemeyen arkadaşım, abim Mert GÜRTÜRK ve Ali TAŞKIRAN'a her daim yanımda oldukları için çok teşekkür ederim. Proje çalışmasının her aşamasında emeği geçen arkadaşım Mehmet Cem MENTEŞ'e teşekkür ederim. Çalışma sürecinde sabrı ve hoşgörüsüyle bana destek veren arkadaşım Seda YETKİN'e kıymetli fikirleri için teşekkür ederim. Aynı zamanda Teknoloji Fakültesi Enerji Laboratuvarında beraber çalıştığım tüm arkadaşlarıma manevi destekleri için teşekkür ederim.

Hayatımın her anında maddi ve manevi desteğini benden esirgemeyen, sabır ile eğitim hayatımda bana yol gösteren canım kardeşim Gonca Pervin AKSOY'a ve aileme sonsuz teşekkürler.

Bu tez çalışmada, TÜRKİYE BİLİMSEL ve TEKNOLOJİK ARAŞTIRMA KURUMU (TÜBİTAK) tarafından 112M411 nolu proje ile desteklenmiştir. Desteklerinden dolayı tüm çalışanlara teşekkür ederim

Gamzepelin AKSOY

ELAĞIĞ – 2015

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	I
İÇİNDEKİLER.....	II
ÖZET	IV
SUMMARY	V
ŞEKİLLER LİSTESİ	VI
TABLolar LİSTESİ	IX
SEMBOLLER LİSTESİ	X
KISALTMALAR LİSTESİ	XI
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Elektrokimyasal Sistemlerin Tanıtılması	1
1.1.1. Anot Malzemeleri	2
1.1.2. Katot Malzemeleri	3
1.1.3. Elektrolit Malzemeleri	3
1.1.4. Piroteknik Isı Kaynakları	4
1.1.4.1. Aktivasyon Metodu.....	5
1.1.5. Yalıtım Malzemeleri	5
2. MATERYAL VE METOT	11
2.1. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği	12
2.2. Sonlu Hacimler Metodu	13
2.3. Isı Transfer Yöntemleri.....	14
2.3.1. İletim ile Isı Transferi	14
2.3.2. Taşınım ile Isı Transferi.....	15
2.3.3. Işınım ile Isı Transferi.....	15
2.4. Sayısal Ağ Modeli Oluşumu	15
2.5. PHOENİCS Paket Programı	16
2.6. Yakınsama Kriterleri	17
2.7. Matematiksel Model	18
2.8. Sayısal Modelin Literatürdeki Model İle Karşılaştırması	19
2.9. Sayısal Modelin Oluşturulması.....	24
2.10. Isıl Pilin Sayısal Modellemesinde Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri ..	27
2.11. Isıl Pil Modelinin Ağ Yapısı	29

3. BULGULAR	31
3.1. Zamana Bağlı Sıcaklık Haritaları	31
3.1.1. 1. Modül İçin Isıl Pilin Zamana Bağlı Sıcaklık Haritaları.....	31
3.1.2. 2. Modül İçin Zamana Bağlı Sıcaklık Haritaları.....	38
3.1.3. 3. Modül İçin Zamana Bağlı Sıcaklık Haritaları	44
3.1.4. 4. Modül İçin Sabit Sıcaklık Haritaları	47
3.1.5. 5. Modül İçin Sabit Sıcaklık Haritaları	53
3.1.6. 6. Modül İçin Sabit Sıcaklık Haritaları	59
3.1.7. 7. Modül İçin Sabit Sıcaklık Haritaları	65
3.2. Modüllerdeki Elektrolitlerin Zamana Bağlı Sıcaklık Grafikleri	71
3.3. Yapılan Sayısal Çalışmanın Deneysel Çalışma ile Kıyaslanması	77
4. SONUÇLAR ve TARTIŞMA	78
5. ÖNERİLER.....	79
ÖZGEÇMİŞ	84

ÖZET

Piller kimyasal enerjinin depolanması mantığı ile çalışan ve depolanan enerjiyi elektrik enerjisine dönüştüren aygıtlardır. Isıl piller ise elektrolit olarak organik elektrolit tuzları kullanan ve ısıyla aktifleşen bataryalardır. Normal pillerden farklı olarak ısıl piller daha güçlü ve dayanıklıdır. Bu özellikleri sebebiyle savunma sanayisinde ve askeri amaçlı olarak kullanılır.

Bu tez kapsamında, bir ısıl pil modeli PHOENİCS paket programı kullanılarak tasarlanmıştır. Hazırlanan modelde orta güç ölçekli ısıl pillerde kullanılabilecek farklı elektrolit malzemeleri kullanılmıştır. Bu elektrolit malzemelerin bir kısmı saf organik tuzlar olmakla birlikte bir kısmı ötektik karışımlardır. Hazırlanan ötektik karışıma %1 SiO₂ nano parçacık katkısı yapılarak elde edilen termofiziksel özellikler kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir.

Termofiziksel özellikleri belirlenen kimyasal malzemeler kullanılarak 7 farklı ısıl pil modülü hazırlanmıştır. PHOENİCS paket programında yapılan bu analizler göstermiştir ki, elektrolit olarak kullanılan C₁₆H₃₆BrN kimyasalı düşük erime noktası sebebiyle ve ötektik karışımların kullanıldığı ısıl pil modüllerinde ise yapılan nano katkısı pilin aktif ömrünü uzatmıştır.

Anahtar Kelimeler: Isıl Pil, Ötektik Karışım, Nano Parçacık, PHOENİCS.

SUMMARY

MODELLING AND SIMULATION OF A THERMAL BATTERY MODUL

Batteries store the chemical energy and convert to electrical energy from chemical energy. But thermal batteries which used in organic electrolyte salt are active with heat. Thermal batteries are stronger and more durable than other batteries. Because of these properties, they are used in military applications.

In this thesis, a thermal battery model is designed by used PHOENICS packet program. Different electrolyte materials are used in the prepared model and these materials can be selected for medium-sized power. Some of these materials are pure organic salt and others are eutectic mixture. %1 SiO_2 was participated into eutectic mixture and thermophysical properties of obtained new mixture were used in the analysis.

7 different thermal batteries modules were prepared by using chemical materials which are determined thermophysical properties. The obtained results from PHOENICS packet program shows that working time of the thermal battery is extended by using $\text{C}_{16}\text{H}_{36}\text{BrN}$ and nano-additive.

Key Words: Thermal Battery, Eutectic Mixture, Nanoparticle, PHOENICS.

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. 3 boyutlu ağ yapısı	16
Şekil 2.2. PHOENİCS işletim sistemi [39]	17
Tablo 2. 1. Anot ve elektrolit kimyasal malzemelerinin termofiziksel özellikleri [40].	20
Şekil 2.3. PHOENİCS programında hazırlanan simülasyon modeli	21
Şekil 2.4. a) Modelin y eksenindeki ağ yapısı, b) Modelin x eksenindeki ağ yapısı, c) Modelin z eksenindeki ağ yapısı	21
Şekil 2.5. Elektrolit sıcaklıklarının $t=0.48\text{sn}$ için literatürle karşılaştırılması (Solda Referans alınan makale [21], sağda proje kapsamında hazırlanan sonuçlar)	22
Şekil 2.6. Elektrolit sıcaklıklarının $t=0.80\text{sn}$ için literatürle karşılaştırılması (Solda Referans alınan makale [21], sağda proje kapsamında hazırlanan sonuçlar)	23
Şekil 2.7. Elektrolit sıcaklıklarının $t=1.20\text{sn}$ için literatürle karşılaştırılması (Solda Referans alınan makale [21], sağda proje kapsamında hazırlanan sonuçlar)	23
Şekil 2.8. Isıtıcı	24
Şekil 2.9. Modelde kullanılan akım kolektörleri	25
Tablo 2. 2. Modelde kullanılan malzemelerin boyutları	25
Şekil 2.10. Isıl pil modeli	26
Şekil 2.11. Ölçüm noktalarının model üzerinde gösterimi	26
Şekil 2.12. a) Modelin y eksenindeki ağ yapısı, b) Modelin x eksenindeki ağ yapısı, c) Modelin z eksenindeki ağ yapısı	29
Şekil 2.13. Ağ yapısının model üzerindeki görünümü	29
Şekil 3.1. 1. Modülün 2.sn deki sıcaklık dağılımı	33
Şekil 3.2. 1. Modüldeki elektrolitlerin 2.sn deki sıcaklık dağılımı	33
Şekil 3.3. 1. Modülün 248.sn deki sıcaklık dağılımı	34
Şekil 3.4. 1. Modüldeki elektrolitlerin 248.sn deki sıcaklık dağılımı	34
Şekil 3.5. 1. Modülün 730.sn deki sıcaklık dağılımı	35
Şekil 3.6. 1. Modüldeki elektrolitlerin 730.sn deki sıcaklık dağılımı	35
Şekil 3.7. 1. Modülün 2105.sn deki sıcaklık dağılımı	36
Şekil 3.8. 1. Modüldeki elektrolitlerin 2105.sn deki sıcaklık dağılımı	36
Şekil 3.9. 1. Modülün 4000.sn deki sıcaklık dağılımı	37
Şekil 3.10. 1. Modüldeki elektrolitlerin 4000.sn deki sıcaklık dağılımı	37
Şekil 3.11. 2. Modülün 2.sn deki sıcaklık dağılımı	39

Şekil 3.12. 2. Modüldeki elektrolitlerin 2.sn deki sıcaklık dağılımı	39
Şekil 3.13. 2. Modülün 209.sn deki sıcaklık dağılımı	40
Şekil 3.14. 2. Modüldeki elektrolitlerin 209.sn deki sıcaklık dağılımı	40
Şekil 3.15. 2. Modülün 817.sn deki sıcaklık dağılımı	41
Şekil 3.16. 2. Modüldeki elektrolitlerin 817.sn deki sıcaklık dağılımı	41
Şekil 3.17. 2. Modülün 2665.sn deki sıcaklık dağılımı	42
Şekil 3.18. 2. Modüldeki elektrolitlerin 2665.sn deki sıcaklık dağılımı	42
Şekil 3.19. 2. Modülün 4000.sn deki sıcaklık dağılımı	43
Şekil 3.20. 2. Modüldeki elektrolitlerin 4000.sn deki sıcaklık dağılımı	43
Şekil 3.21. 3. Modülün 2.sn deki sıcaklık dağılımı	44
Şekil 3.22. 3. Modüldeki elektrolitlerin 2.sn deki sıcaklık dağılımı	45
Şekil 3.23. 3. Modülün 777.sn deki sıcaklık dağılımı	45
Şekil 3.24. 3. Modüldeki elektrolitlerin 777.sn deki sıcaklık dağılımı	46
Şekil 3.25. 3. Modülün 4000.sn deki sıcaklık dağılımı	46
Şekil 3.26. 3. Modüldeki elektrolitlerin 4000.sn deki sıcaklık dağılımı	47
Şekil 3.27. 4. Modülün 2.sn deki sıcaklık dağılımı	48
Şekil 3.28. 4. Modüldeki elektrolitlerin 2.sn deki sıcaklık dağılımı	49
Şekil 3.29. 4. Modülün 103.sn deki sıcaklık dağılımı	49
Şekil 3.30. 4. Modüldeki elektrolitlerin 103.sn deki sıcaklık dağılımı	50
Şekil 3.31. 4. Modülün 725.sn deki sıcaklık dağılımı	50
Şekil 3.32. 4. Modüldeki elektrolitlerin 725.sn deki sıcaklık dağılımı	51
Şekil 3.33. 4. Modülün 3235.sn deki sıcaklık dağılımı	51
Şekil 3.34. 4. Modüldeki elektrolitlerin 3235.sn deki sıcaklık dağılımı	52
Şekil 3.35. 4. Modülün 4000.sn deki sıcaklık dağılımı	52
Şekil 3.36. 4. Modüldeki elektrolitlerin 4000.sn deki sıcaklık dağılımı	53
Şekil 3.37. 5. Modülün 2. sn deki sıcaklık dağılımı	54
Şekil 3.38. 5. Modüldeki elektrolitlerin 2.sn deki sıcaklık dağılımı	55
Şekil 3.39. 5. Modülün 596.sn deki sıcaklık dağılımı	55
Şekil 3.40. 5. Modüldeki elektrolitlerin 596.sn deki sıcaklık dağılımı	56
Şekil 3.41. 5. Modülün 722.sn deki sıcaklık dağılımı	56
Şekil 3.42. 5. Modüldeki elektrolitlerin 722.sn deki sıcaklık dağılımı	57
Şekil 3.43. 5. Modülün 975.sn deki sıcaklık dağılımı	57
Şekil 3.44. 5. Modüldeki elektrolitlerin 975.sn deki sıcaklık dağılımı	58

Şekil 3.45. 5. Modülün 4000.sn deki sıcaklık dağılımı	58
Şekil 3.46. 5. Modüldeki elektrolitlerin 4000.sn deki sıcaklık dağılımı	59
Şekil 3.42. 6. Modülün 2.sn deki sıcaklık dağılımı	60
Şekil 3.43. 6. Modüldeki elektrolitlerin 2.sn deki sıcaklık dağılımı	61
Şekil 3.44. 6. Modülün 265.sn deki sıcaklık dağılımı	61
Şekil 3.45. 6. Modüldeki elektrolitlerin 265.sn deki sıcaklık dağılımı	62
Şekil 3.46. 6. Modülün 755.sn deki sıcaklık dağılımı	62
Şekil 3.47. 6. Modüldeki elektrolitlerin 755.sn deki sıcaklık dağılımı	63
Şekil 3.48. 6. Modülün 2127.sn deki sıcaklık dağılımı	63
Şekil 3.49. 6. Modüldeki elektrolitlerin 2127.sn deki sıcaklık dağılımı	64
Şekil 3.50. 6. Modülün 4000.sn deki sıcaklık dağılımı	64
Şekil 3.51. 6. Modüldeki elektrolitlerin 4000.sn deki sıcaklık dağılımı	65
Şekil 3.52. 7. Modülün 2.sn deki sıcaklık dağılımı	66
Şekil 3.53. 7. Modüldeki elektrolitlerin 2.sn deki sıcaklık dağılımı	67
Şekil 3.54. 7. Modülün 255.sn deki sıcaklık dağılımı	67
Şekil 3.55. 7. Modüldeki elektrolitlerin 255.sn deki sıcaklık dağılımı	68
Şekil 3.56. 7. Modülün 720.sn deki sıcaklık dağılımı	68
Şekil 3.57. 7. Modüldeki elektrolitlerin 720.sn deki sıcaklık dağılımı	69
Şekil 3.58. 7. Modülün 2171.sn deki sıcaklık dağılımı	69
Şekil 3.59. 7. Modüldeki elektrolitlerin 2171.sn deki sıcaklık dağılımı	70
Şekil 3.60. 7. Modülün 4000.sn deki sıcaklık dağılımı	70
Şekil 3.61. 7. Modüldeki elektrolitlerin 4000.sn deki sıcaklık dağılımı	71
Şekil 3.62. 1. Modüldeki elektrolitlerin zamana bağlı sıcaklık grafiği	73
Şekil 3.63. 2. Modüldeki elektrolitlerin zamana bağlı sıcaklık grafiği	74
Şekil 3.64. 3. Modüldeki elektrolitlerin zamana bağlı sıcaklık grafiği	74
Şekil 3.65. 4. Modüldeki elektrolitlerin zamana bağlı sıcaklık grafiği	75
Şekil 3.66. 5. Modüldeki elektrolitlerin zamana bağlı sıcaklık grafiği	75
Şekil 3.67. 6. Modüldeki elektrolitlerin zamana bağlı sıcaklık grafiği	76
Şekil 3.68. 7. Modüldeki elektrolitlerin zamana bağlı sıcaklık grafiği	76
Şekil 3.69. Sayısal ve Deneysel Sonuçların Karşılaştırılması	77

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 2. 1. Anot ve elektrolit kimyasal malzemelerinin termofiziksel özellikleri [40].	20
Tablo 2. 2. Modelde kullanılan malzemelerin boyutları	25
Tablo 2. 3. Anot kimyasal malzemesi ve termofiziksel özellikleri [41].....	27
Tablo 2. 4. Katot kimyasal malzemesi ve termofiziksel özellikleri [41].....	27
Tablo 2.5. Elektrolit olarak kullanılan kimyasal malzemeler ve termofiziksel özellikleri [41]	28
Tablo 2. 6. Elektrolit olarak kullanılan karışımlar ve termofiziksel özellikleri [41].....	28
Tablo 2. 7. Modüllerde kullanılan kimyasal malzemeler	28
Tablo 2. 8. Ağ yapısının genel özellikleri	30

SEMBOLLER LİSTESİ

k	: Isıl iletim katsayısı (W/mK)
A	: Yüzey alanı
ΔT	: Sıcaklık farkı (°C)
Δx	: Malzeme kalınlığı
h	: Taşınım katsayısı
T_s	: Yüzey sıcaklığı
T_∞	: Akışkan sıcaklığı
ε	: Yüzey yayıcılığı
σ	: Stefan-Boltzmann sabiti
C_p	: Sabit basınçta özgül ısı kapasitesi (kJ/kgK)
T_e	: Erime sıcaklığı (°C)
ρ	: Yoğunluk (kg/m ³)
t	: Zaman (s)
h	: Entalpi (kJ/kg)
h_{ref}	: Referans entalpi (kJ/kg)
T_{ref}	: Referans sıcaklık (°C)
C_v	: Hacimsel özgül ısı (MJm ⁻³ K ⁻¹)

KISALTMALAR LİSTESİ

HAD	: Hesaplamalı akışkanlar dinamiği
Mg	: Magnezyum
FeS₂	: Demir disülfid
KSCN	: Potasyum tiosiyanat
C₁₆H₃₆IN	: Tetrabutilamonyum iyodür
C₄H₁₂IN	: Tetrametilamonyum iyodür
C₁₆H₃₆BrN	: Tetrabutilamonyum bromit
C₁₆H₃₆F₆NP	: Tetrabutilamonyum heksafluorofosfat
SiO₂	: Silikon dioksit

1. GİRİŞ

Isıl piller, elektrolit olarak erimiş tuzların kullanıldığı ve ısıyla aktif hale getirilen pillerdir. İlk olarak II. Dünya savaşında Alman bilim adamları tarafından V2 roketlerinde kullanmak için tasarlanan bu pillerde, roketlerin egzoz ısısı kullanılarak piller aktif hale getirilirler. Isıl piller birçok askeri uygulama için kullanılmaktadır. Özellikle mühimmat cihazlarında, güdümlü füzelerde, proximity füzelerde, bazı torpido ve güdümlü bombalar da güç kaynağı olarak kullanılmaktadır. Uzay uçuşlarında elektronik cihazların güç kaynağı olarak ve askeri uçaklarda hidrolik sistemler için acil yedek güç kaynağı olarak tercih edilmektedir. Ayrıca radarlar ve nükleer silahların elektronik paketleri için birincil güç kaynağı olarak kullanılmaktadır. Isıl piller farklı boyutlarda ve silindirik olarak üretilmektedir. Ancak yarım ay şeklinde tasarlanmış olanları da mevcuttur [1].

Isıl pillerin genel özellikleri arasında çok güvenilir, sağlam ve dayanıklı güç kaynakları olmaları sayılabilir. Yüksek şoklardan etkilenmezler ve hava geçirmediikleri için bozulma olmadan 25 yıl ve üzerinde silah sistemlerinde kullanılabilirler. Pil malzemelerinin nem ve oksijenle reaksiyona girmesi sonucu pillerde bozulmalar oluşur. Aktif hale getirilen ısı piller elektrokimyasal enerji tükenmediği ve elektrolitlerde donma meydana gelmediği sürece çalışır [1].

Isıl pillerde anot, katot, elektrolit ve piroteknik ısı kaynakları olarak kullanılan kimyasal malzemeler, elektrokimyasal sistemlerin tanıtılması başlığı altında detaylı olarak incelenmiştir.

1.1. Elektrokimyasal Sistemlerin Tanıtılması

Isıl pillerde bir dizi elektrokimyasal sistem kullanılmaktadır. Tüm ısı piller bir alkali anot, bir ergimiş tuz olan elektroliti ve bir metal tuzu olan katotu kullanır. Ayrıca her bir hücre arasına yerleştirilen ve pilin aktif olmasını sağlayan piroteknik malzemeler kullanılmaktadır.

1.1.1. Anot Malzemeleri

Isıl pil tasarımcıları ve üreticileri pil performansının gereksinimlerine bağlı olarak bir dizi anot malzeme geliştirmiştir. Bu malzemelerden bir kısmı saf kimyasal malzemeler bir kısmı da ikili ve üçlü kimyasal sistemler olarak ısıl pil tasarımlarında kullanılmıştır.

1980'lere kadar ısıl pil tasarımlarında genellikle Kalsiyum (Ca) metali kullanılan anotlar yer almıştır. Bu anotlar Bimetal malzemeler üzerine kalsiyumun püskürtülmesi ile hazırlanırlar. Burada, kalsiyum anot kalınlığı genellikle 0,03 ile 0,25 mm arasında değişmektedir. Ca anot olarak kullanıldığı ısıl pillerde katot malzemesi olarak WO_3 , V_2O_5 ve $CaCrO_4$ tercih edilmiştir. Ca/ $CaCrO_4$ ile ilgili yapılan deneysel çalışmalarda herhangi bir ayırıcı olmadığı için Ca anotu $CaCrO_4$ katot malzemesi ile LiCl- KCl erimiş tuzunun içinde fiziksel temas halinde bulunmaktadır. Bunun sonucu olarak kimyasal reaksiyonlar gerçekleşmektedir. Ekzotermik olan bu reaksiyonlar pillerde ısınmaya sebebiyet verdiği için deşarj sırasında kontrol edilebilmelidir [2].

Alüminyum (Al) kimyasalı, Pirit (FeS_2) katot malzemesiyle birlikte kullanılan bir anot malzemesidir. Ancak sınırlı kullanıma sahiptir. Magnezyum (Mg) metali yaygın olarak kullanılan diğer bir anot materyalidir. Mg anotu ve Pirit (FeS_2) katotu kullanılarak tasarlanan pillerde Ca/ $CaCrO_4$ piline göre daha iyi sonuçlar elde edilmiştir [2].

1970'lerin sonlarına doğru Lityum en yaygın olarak kullanılan anot malzemesi haline gelmiştir. Lityum anot olarak saf halde ya da alaşımları halinde kullanılmaktadır. En sık olarak kullanılan alaşımları kütlece %20 lük Lityum oranıyla Lityum Alüminyum (LiAl) ve %44 lük Li oranı ile Lityum Silisyum (LiSi)'dur. Bu alaşımlar 0.75 ile 2.0 mm kalınlığında preslenerek hazırlanırlar ve alaşım, pelet haline getirilmiş bir demir, paslanmaz çelik veya nikel akım toplayıcı ile desteklenir. Isıl pillerde kullanılan bu katı anotlar erime sıcaklıklarından (180 °C) daha düşük sıcaklık değerlerinde tutulmalıdır. Erime sıcaklıklarından yüksek sıcaklıklarda kullanılan anot malzemeleri katot malzemesiyle ekzotermik reaksiyon gerçekleştirerek hücrede kısa devre meydana getirir. Kullanılan lityum alaşımının eriyerek hücrenin dışına akmasını ve kısa devre olmasını önlemek için bu metal tozu yüksek yüzey alanlı bir bağlayıcı ya da metal köpük ile birleştirilir. Böylece bu anotlar 700 °C' de çalışma sıcaklığında kullanılabilir [3].

1.1.2. Katot Malzemeleri

Çeşitli katot malzemeler ısıl pil sistemleri için kullanılmıştır. Bunlar Kalsiyum Kromat (CaCrO_4), Potasyum Dikromat ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$), Potasyum Kromat (K_2CrO_4), Kurşun Kromat (PbCrO_4), Metal Oksitler (V_2O_5 , WO_3) ve Sülfidler (CuS , FeS_2 , CoS_2)' dir.

Katot seçiminde önemli olan parametreler şu şekilde sıralanabilir;

- Kullanılan anota karşı yüksek gerilim,
- Eriyen elektrolite uyumluluk,
- Yaklaşık 600 °C'de termal kararlılık.

Kalsiyum kromatlar yüksek potansiyelleri sebebiyle kalsiyum anotlar ile birlikte kullanılmıştır [4]. İlk olarak 1978'de kullanılan FeS_2 , en çok kullanılan katot malzemelerinden biridir. FeS_2 genellikle Lityum tabanlı anotlar ile tercih edilmektedir [3].

Kobalt Disülfür (CoS_2) düşük bir çözünürlüğe ve yüksek bir elektronik iletkenliğe sahiptir. Yüksek bir ısıl kararlılığa sahip olduğu için katot malzemesi olarak FeS_2 kullanılan ısıl pillere göre daha uzun süreli bir kullanım sağlar. CoS_2 'nin sentezlenmesinin FeS_2 'ye göre daha yüksek maliyete sahip olması, bu katot kimyasalı için önemli bir dezavantaj oluşturmaktadır [5].

1.1.3. Elektrolit Malzemeleri

En önemli termal pil tasarımların da, elektrolit olarak erimiş ötektik Lityum Klorür ve Potasyum Klorür (LiCl-KCl) karışımı kullanılmıştır. Kütlece %45 LiCl ve %55 KCl olarak hazırlanan bu ötektik karışımda erime noktası 352 °C'dir. Lityum halid ihtiva eden bu karışımlar için yüksek iletkenlikteki anot ve katot kimyasalları, kimyasal uyumluluk için tercih edilmiştir. Halid karışımları düşük erime noktasına sahip olan oksijen ihtiva eden tuzlar ile karşılaştırıldığında termal ayrışmaya veya diğer yan reaksiyonlar yolu ile gaz üretmeye daha az duyarlıdır. Lityum halid bazlı karışımlar özellikle düşük erime noktalarına, düşük buhar basıncına ve yüksek iyonik iletkenliğe sahiptirler [3].

Isıl pillerde daha düşük bir erime noktasına ulaşarak pilin ömrünü uzatmak ve iç direnci azaltarak akımı yükseltmek için Bromür (Br) içeren daha yeni elektrolit çeşitleri kullanılmıştır. Bunlar LiBr-KBr-LiF (320 °C), LiCl-LiBr-KBr (321 °C) ve LiCl-LiBr-LiF (430 °C) [3].

Pil çalışma sıcaklıklarında, erimiş tuz elektrolitlerin viskozitesi çok düşüktür. Elektrolitlerin viskozitelerini azaltmak için birleşik oluştururken bağlayıcı ilave edilir.

Bağlayıcı olarak en çok tercih edilen malzeme Magnezyum Oksit (MgO)'tir. Bunun yanı sıra Silikon Dioksit (SiO₂)'nin de bağlayıcı olarak kullanımı söz konusudur [6].

1.1.4. Piroteknik Isı Kaynakları

Isıl pillerde, ısıl kağıt ve ısı peleti olmak üzere iki çeşit temel ısı kaynağı vardır. Isıl kağıt, Zirkonyum (Zr) ve Baryum Kromat (BaCrO₄) tozlarının kullanıldığı inorganik bir fiber yüzey ile desteklenen kağıt benzeri bir bileşimdir. Isıl pelletler, demir tozu (Fe) ve potasyum perklorat (KClO₄) karışımından oluşan preslenmiş tabletler veya peletlerdir.

Isıl pil teknolojilerinden olan kupa kapak teknolojisinde, hücreler ince metaller ile birbirine bağlanmış ve her bir hücre metal kapak ile kapatılmıştır. Bu teknolojiye, Zr/BaCrO₄ (Zirkonyum/Baryum Kromat) ısıl kağıt kullanılarak aktivasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Isıl kağıtlar, seramik ve cam lifler gibi inorganik lifleri bir yapı olarak kullanır. Karışım, su ile birlikte bir kağıt-halinde oluşturulmaktadır ya da bir kalıp kullanılarak ayrı ayrı tabakalar halinde bir kağıt gibi hazırlanmaktadır. Elde edilen levhalar parçalar halinde kesilir ve kurutulur. Kurutulmuş malzemenin çok dikkatli bir şekilde ele alınması gerekir. Çünkü statik şarj ve sürtünme ile ateşlemeye karşı son derece hassastır. Isıl kağıt 10 ile 300 cm/s'lik bir yanma hızına ve yaklaşık 1675 J/g (400 cal/g) bir enerjiye sahiptir. Isıl kağıt yandığında elektriksel direnç oluşturur ve bir inorganik kül bırakır. Bu piroteknik malzeme hücreler arasına yerleştirilirse, son derece iletken hücreler arası konektörler ile birlikte kullanılmalıdır. Bu uygulamalarda, dielektrik özellikleri artırmak için sadece baz tabaka olarak bilinen seramik fiberler, ek bir katman olarak kullanılabilir. Isıl kağıtları ateşlemek için kontak kullanılır [3].

Isıl pil teknolojilerinden bir diğeri ise pelet teknolojisidir. Pelet teknolojisinde, elektrolitleri bağlama yöntemi uygulanmaktadır. Bunun için bir dizi seramik malzeme kullanılmaktadır [1]. Pelet teknolojisinde, piroteknik kaynak olarak ısı peletleri kullanılmıştır. Isı peletleri ince demir tozu (1 ile 10 mikron) ve potasyum perklorat karışımının, preslenmesi ile imal edilmektedir. Bu karışımlar da kütlece %80-%88 oranında Fe tozu kullanılır. Isı peletlerinin ateşlenmesi için gerekli olan enerji miktarı ısıl kâğıtlardan daha fazladır ve daha yavaş bir yanma gerçekleşmektedir. Bu sebeple ısı peletlerinin pil üretimi sırasında kazara ateşlenme olasılığı çok daha düşüktür. Yine de ısıl pil üretiminde bu peletler son derece dikkatle hazırlanmalıdır ve potansiyel ateşleme kaynaklarından korunmalıdır. Isı peletleri fiziksel şeklini korur ve (örneğin şok titreşim ve dönüş gibi) dinamik ortamlarda kararlı halde bulunur.

Bu peletler, pil tasarımlarının genel sağlamlığına büyük ölçüde katkıda bulunmaktadır. Isı peletlerinin bir diğer önemli avantajı ise kimyasal reaksiyondaki entalpi değerinin ısı kağıt külündekinden çok daha yüksek olmasıdır. Böylece, daha büyük ısı kütleye sahip olan ısı peletlerinin yanması sonucu önemli ısı tutma özelliği sayesinde pilin aktif ömrünü uzatmaktadır [3].

1.1.4.1. Aktivasyon Metodu

Isıl piller, dahili bir başlatma cihazı ile harici bir sinyal uygulanarak aktive edilir. Aktivasyon için kullanılan dört genel yöntem vardır. Bunlar aşağıdaki şekilde sıralanabilir;

- Elektrikli ateşleyici ile verilen elektrik sinyali,
- Mekanik bir darbe,
- Ataletleri harekete geçirmek için mekanik şok,
- Optik enerji (lazer) sinyalidir [3].

1.1.5. Yalıtım Malzemeleri

Seramik elyaf, cam elyaf, yüksek sıcaklık polimerler ve bunların kombinasyonları, yalıtım malzemesi olarak kullanılmaktadır. Uzun ömürlü pillerde genellikle Min-K veya Micro Therm gibi yüksek verimli ısı yalıtım malzemeleri kullanılmıştır. Pil tasarımlarında hala yaygın olarak 1980'lerden önce kullanılan asbest, yalıtım olarak da kullanılmaktadır. Isı yalıtımı pil çevresi etrafında ve hücre yığınının her iki ucunda yer alır. Harici kirlenmeye karşı korunması koşuluyla, bir ısıl battaniyede kullanılabilir. Kullanılan bu ısıl battaniye pil çevresine sarılır ve ısıl pilin etkinleştirilmesi sırasında pil içinde üretilen sıcak gazlar nüfuz edemez. Çünkü iç yalıtım daha etkilidir. Dış yalıtım, montaj yöntemleri ve çevredeki ortam sıcaklığı, tüm ısıl pil tasarımında göz önüne alınması gereken önemli bir etkindir [3].

Literatürde, ısıl pillerde farklı kimyasal malzemeler anot, katot ve elektrolit olarak kullanılmıştır. Bu çalışmaların genel amacı, kimyasal malzemelerin ısıl pillerde kullanım için uygun olup olmadığını belirleyebilmektir. Hazırlanan farklı pil modülleri için ısıl ve gerilim testleri gerçekleştirerek pil performansları belirlenmiştir. Yapılan deneysel çalışmaların bir kısmı aşağıda tartışılmıştır.

Fujiwara vd. [7] simülasyon sistemi kullanarak, ısı pillerde elektrolit olarak kullanılan LiCl-LiBr ve LiF-LiBr ikili sistemlerine dayanan yeni üçlü veya dörtlü ergimiş tuz sistemlerini geliştirmişlerdir.

Butler vd. [8] çalışmalarında, yüksek güç uygulamalarında kullanmak için bir ısı pil geliştirmişlerdir. Çalışmanın temel amacı, güç gereksinimini karşılamak için seri ve paralel kombinasyonlar kullanarak, bir ısı pil modülü geliştirmektir. Bu pilde katot olarak CoS₂, anot olarak LiSi ve elektrolit olarak Li tuzu kullanılmıştır.

Zimmerschied ve Gahl [9] çalışmalarında, ısı pillerde kullanılacak olan bir yüksek güç test standı modülü geliştirmişlerdir. Isıl piller yüksek özgül enerjileriyle kompakt darbeli güç uygulamalarında kullanılmaktadır. Lityum-polimerinin kullanıldığı bu çalışmada özel enerji ve güç değerleri belgelenmiş değerlerle benzerlik göstermiştir.

Guidotti vd. [10] çalışmalarında, 5 dk çalışma ömrü ile 180 kW gücünde bir ısı pil tasarlamışlardır. Kullanılan prototipin çıkış gücü sınırlıdır. Prototip, 12 inç boyunda, 4 inç çapında ve 4.792 kg ağırlığındadır. Prototipte 4 hücre seri olarak bağlanmıştır. Testleri yapılan pilin, 43 kW'lık güçle 60 sn ve 37 kW'lık güç ile 300 sn çalıştığını belirtmişlerdir.

Fujiwara vd. [11] çalışmalarında, erime noktaları yüksek olan tuz sistemlerinden, LiF-LiBr-LiI, LiF-NaBr-LiI ve LiF-LiCl-LiBr-LiI gibi iyodür tabanlı ergimiş tuz sistemlerini incelemişlerdir. Çalışmanın sonucunda bu sistemlerin termofiziksel özelliklerini vermişlerdir.

Guidotti vd. [12], petrol ve doğal gaz arama kuyularında kullanılan sondaj takımlarına güç sağlamak için çalışma sıcaklığı 200 °C'nin altında olan bir ısı pil tasarımı gerçekleştirmişler.

Kauffman ve Chagnon [13], 1990'da savaş uçaklarının elektronik paketlerine acil güç sağlamada kullanılan, anot olarak LiAl katot olarak FeS₂'nin kullanıldığı, 853 Wh güce sahip bir ısı pil tasarlamışlardır.

Guibert vd. [14] yaptıkları çalışmada, ısı piller için vanadyum pentoksit ve karbon içeren yeni bir katodik bileşiği geliştirmiştir. Malzemenin sentezi incelenmiştir. LiAl anodunun deşarj verimliliğini analiz etmek için tek bir hücre geliştirilmiştir. Bu bileşiğin deşarj performansının 1 A /cm² daha iyi olduğunu belirtmişlerdir. Hazırlanan pil potansiyeli hakkında bilgi edinebilmek için daha sonra çeşitli şekillerde test edilmiştir.

Kubota vd. [15] yaptıkları çalışmada, ısı pillerde kullanılan, alkali amid olarak bilinen LiFSA-NaFSA-KFSA, LiFSA-NaFSA-CsFSA, LiFSA-KFSA-CsFSA ve

NaFSA–KFSA–CsFSA’yı incelemiştir. Bu üçlü sistemlerin, tek bir erime noktasına sahip oldukları için ötektik özellik gösterdiğini belirtmişlerdir.

Masset vd. [16] bu çalışmalarında, ısı pillerde kullanılan ergimiş tuz elektrolitleri hazırlanırken bir bağlayıcı madde (MgO gibi) kullanılması gerektiğini belirtmişlerdir. Bağlayıcı olarak kullanılacak Magnezyum Oksit’in miktarı belirlenirken hacimsel oranların (%27-%30) daha önemli olduğuna dikkat çekmişlerdir.

Swift [17], ısı pillerde kullanılan anot olarak kullanılan Li alaşımlarının (Li-Si, Li-Al) termofiziksel özelliklerini termal modelleme ve simülasyonda kullanabilmek için incelemiştir. Li alaşımlarının lazer flaş yöntemiyle, özgül ısı, ısı yayılma ve ısı iletkenlik gibi özelliklerini belirlemiştir.

Wells vd. [18] çalışmalarında bir ısı pil tasarlayıp Phoenix füzelerinde kullanmak için geliştirmişlerdir. Oluşturulan ısı pili tahribatlı ve tahribatsız sistemler için bir takım testlerden geçirmişlerdir.

Butler vd. [19] en az bir saatlik çalışma süresine sahip, dört farklı voltaj seçeneği bulunan, minimum ağırlıklı ve hacimli ısı pil teknolojisini geliştirmeye çalışmışlardır.

Masset [20] çalışmasında ısı pil performanslarını iyileştirmek için iyodür tabanlı tuzları incelemiştir. Düşük erime noktasına sahip olan bu tuzların ısı pillerde kullanımının uygun olduğunu belirtmiştir.

Isı pillerle ilgili olarak yapılan literatür çalışmasının sonucunda farklı kimyasal malzemelerin pil tasarımlarında kullanıldığı görülmüştür. Bu malzemeler saf olabildiği gibi birçok malzemenin karışımından hazırlanan ötektik karışımlar olarak da görülmektedir. Referans çalışmalardan faydalanılarak hazırlanan ısı pil modelinde kullanılacak olan kimyasal malzemeler belirlenmiştir.

Bu çalışmada kullanılacak olan PHOENİCS paket programının birçok alanda kullanımı söz konusudur. Isı pillerin sayısal modellemesiyle ilgili olarak literatürde tek bir çalışma bulunmuştur. Yapılan bu çalışmada PHOENİCS paket programı kullanılmıştır. Isı pil ile ilgili yapılan bu çalışma ve bu paket program kullanılarak hazırlanan diğer çalışmalar aşağıda incelenmiştir.

Freitas vd.[21], bir CFD yazılımı olan PHOENİCS paket programını kullanarak bir yüksek güç ölçekli ısı pil modülü oluşturmuşlardır. Yapmış oldukları çalışmada sonlu hacimler yöntemini uygulamışlardır. Bu çalışmada 2 boyutlu taşınım denklemleri kullanılmıştır. Elektrolit olarak kullanılan LiCl-KCl ötektiğinin erimesinin anlık bir süreç olduğunu (5sn) gözlemlemişlerdir. Isı pil modülünün ve elektrolit kimyasal

malzemelerinin zamana bağılı sıcaklık profilleri verilmiştir. Elde edilen sonuçların deneysel sonuçlar ile uyumlu olduğunu belirtmişlerdir.

Simisiroglou vd. [22] PHOENİCS paket programını kullanarak rüzgar türbinlerinin sayısal modelini oluşturmuşlardır. Lillgrund eyaletinde bulunan açık deniz rüzgar türbinlerinde yaptıkları deneylerle, hesaplamalı akışkanlar dinamiğinin Windsim aracından elde edilen sonuçları doğrulamışlardır. Windsim kütle ivme ve RANS yöntemini kullanarak enerji korunumu denklemleriyle çözüm sağlayan bir program modülüdür. Farklı parametrelerin seçiminin, sonuçlar üzerine etkisini araştırmış ve deneysel sonuçlarla kıyaslamalar yapmışlardır.

Castellani vd. [23] Hollanda'nın kuzeyinde yer alan 18 rüzgar türbininin bulunduğu bir alanda çalışılmıştır. PHOENİCS paket programı ile yaptıkları simülasyon modelinde tek bir girdap üzerine çalışılmıştır. Aynı zamanda çift girdap durumlarında da modelin etkin bir şekilde çalıştığı gösterilmiştir. Daha önce yapılmış olan deneysel çalışmalarla sayısal çalışmanın sonuçlarının benzer olduğunu belirtmişlerdir.

Castellani ve Vignaroli [24], rüzgar türbini için aktüatör disk modelinin sayısal çalışmasını yapmışlardır. Bir aktüatör disk modelini rüzgar çiftliği simüle etmek için kullanılmıştır. Bu modelde, bir kartezyen grid ile çalışan CFD kodu PHOENİCS içinde kullanılmıştır. Model Finlandiya'nın batı kıyı bölgesinde faaliyet gösteren küçük bir rüzgar çiftliğinin gerçek üretim verileri kullanılarak doğrulanmıştır. Sayısal rüzgar hızı profilleri, türbinlerin yakınındaki yer direklerinden gelen anemometre verileriyle kıyaslanmıştır. Sonuçlar basit olmasına rağmen, aktüatör disk modelinin kıyı bölgelerinde rüzgar çiftliği geliştirilirken çok yararlı bilgiler verebildiğini göstermiştir.

Albayrak [25] yaptığı çalışmada, eşkenar üçgen şeklinde yerleştirilmiş içinde ısı üretimi olan üç silindirin çevresindeki zorlanmış taşınımı sayısal olarak incelemiştir. Bu çalışmada PHOENİCS 3.2. paket programını kullanarak iletim ve taşınım ile ısı transferini yani birleşik ısı transferini incelenmiştir.

Jing ve Qing-qing [26], PHOENİCS paket programını kullanarak klimalı ortamdaki sıcaklık çevrimlerini incelemek için 3 boyutlu bir model üzerinde çalışmışlardır. Bu çalışmada, ortamdaki hava hızı ve sıcaklık gibi parametreler incelenmiştir. Yapılan sayısal çalışmalar deneysel çalışmalar ile paralellik göstermiştir.

Wen-li ve Dong [27] geniş bir alanda oluşan yangındaki duman dağılımını incelemiştir. Çalışmada sıcaklık, basınç ve dumanın ortamdaki dağılımı PHOENİCS paket programı kullanarak modellenmiştir.

Dan ve Wen-lei [28] yaptıkları çalışmada, bir site içerisinde meydana gelen yangın durumunu CFD analiz yöntemiyle PHOENİCS paket programında incelemişlerdir. Nadiren de olsa dış ortamdaki hava akışının binanın içindeki dumana etkisi olabileceğini belirtmişlerdir. Ancak bu ihmal edilebilecek düzeyde görülmüştür. Dış çevrede oluşan hava hızının 3 m/s ve çevre sıcaklığının 20 °C olduğu kabul edilerek logaritmik çözümler yapılmıştır.

Castellani vd. [29] yaptıkları çalışmada hibrit ve sinir ağı yaklaşımıyla bir tepenin farklı noktalarına konan rüzgar türbinlerinin rüzgara karşı göstermiş olduğu direnci PHOENİCS paket programını kullanarak incelemişlerdir. Yapılan analizde 12 farklı türbin modellenmiştir.

Kuas ve Başkaya [30] yaptıkları çalışmada, bir çalışma odası içine verilen soğuk havanın oda içerisindeki dağılımını sonlu hacimler metodu kullanarak PHOENİCS programında sayısal olarak incelemişlerdir. Analiz sonuçları belirli kesitlerdeki hız vektörleri ve sıcaklık profilleri ile gösterilmiştir.

Çalışkan vd.[31] çalışmalarında bir soğutma kabininin sayısal analizini yapmışlardır. Bu çalışma için PHOENİCS programından yararlanılmıştır. Farklı ortam sıcaklıklarında tek jet, iki ve üç jet kullanılarak yapılan modellemede elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Üçlü jet soğutma sistemlerinde ortamda ürünlerin muhafazası için homojen bir sıcaklık dağılımı olduğu için bu sistemin en uygun sistem olduğunu ifade etmişlerdir.

Doğan vd. [32] çalışmalarında, bir duvarı ısıtılmış modelde belirli oranlarda açık hacimler oluşturarak doğal taşınım ile ısı transferini incelemişlerdir. Farklı eğim açılarında ve açıklıkta çalıştırdıkları modelin sınır şartlarını belirleyerek PHOENİCS paket programında analizleri gerçekleştirmişlerdir. Analiz sonuçlarına göre model eğiminin -10° ve açıklık oranının 0.75 olduğu durumda ısı transferinin en iyi şekilde gerçekleştiğini belirtmişlerdir.

Başkaya ve Alpay [33], duvarlarında ısı kaynakları bulunan kapalı yatay bir ortamda, sürekli şartlarda, laminar doğal taşınım akış özellikleri sayısal olarak incelemiştir. PHOENİCS programında sonlu hacimler yöntemini kullanarak hesaplamalı akışkanlar dinamiği kodu ile çözmüşlerdir. Analizlerde sıcaklık değerleri sabit tutularak ısı kaynaklarının konumu değiştirilmiş ve bu şekilde altı farklı analiz gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizler sonucunda, ayrık ısı kaynaklarının konumlarının doğal taşınımı önemli derecede etkilediğini belirtmişlerdir.

Mat vd. [34], bir alaşımın kalıpta katılaşmasını 2 boyutlu olarak PHOENİCS programında incelemişlerdir. Katılaşma sırasında oluşan lapa b6lgeyi Newtonyen olmayan sıvı ve belirli bir orandan sonrasını ise g6zenekli b6lge olarak modellenmişlerdir. Oluşturulan bu model ile karmaşık bir sıvı-katı, sıvı ara y6zeyi elde etmişlerdir.

Ergen [35], d6ř6k plaka aralıklarında çarpan hava jetinin ısı transferi 6zelliklerini, PHOENİCS paket programı kullanarak sayısal olarak incelemiştir. Plakalar arasındaki akışkanın etkilerinin ve hava akımının y6ksek ısı transferine sebebiyet verdiğini belirtmişlerdir.

6zsunar vd [36], en ve y6kseklik oranı 10 olan dikd6rtgen bir kanalda karışık konveksiyonda ısı transferini HAD kullanarak incelemişlerdir. Hazırladıkları modelin alt y6zeyine sabit ısı akısı vermişlerdir. Kanalların yan y6zeyleri yalıtılmış ve 6st y6zey dışarıdan etki eden akışkana maruz bırakılmışlardır. Kanal içindeki sıcaklık ve kontur grafiklerini ayrıntılı olarak sunmuşlardır.

Bu çalışmanın temel amacı, elektrolit olarak erimiş organik tuzun kullanıldığı bir ısıl pil mod6l6 oluşturmaktır. Isıl piller 6zerine yapılan çalışmaların bir6đ6 deneysel metotlar ile gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmada 7 farklı ısıl pil mod6l6 oluşturuldu. Belirlenen farklı elektrolit kimyasal malzemeleri kullanarak hazırlanan pil mod6llerinde zamana bağlı sıcaklık analizleri gerçekleştirildi. Elde edilen veriler doğrultusunda pil mod6llerinin zamana bağlı sıcaklık haritaları ve elektrolit kimyasallarının zamana bağlı sıcaklık grafikleri incelendi.

2. MATERYAL VE METOT

Dünya genelinde savunma sanayisi için yapılan yatırımlar gün geçtikçe artmaktadır. Silah sistemleri, nükleer sistemler ve radar sistemleri bu yatırımların başında gelmektedir. Bu tür sistemlerin elektronik kaynaklarına güç sağlamak amacıyla ısı piller sıklıkla kullanılmaktadır. Isıl pillerin bu tür sistemlerde kullanılma amacı, bir piroteknik ısı kaynağı ile aktiveleştirilen pillerin sistemlere 5-30 dk'lık güç sağlayabilmesidir. Aynı zamanda oldukça güvenilir olması ve silah sistemlerinde uzun yıllar bozulmadan kalabilmesi tercih edilmesinde önemli rol oynamaktadır. Isıl piller üzerine yapılan çalışmaların çoğu deneyseldir. Ancak bu sistemlerin deneysel olarak hazırlanması ve kullanılması oldukça maliyetlidir. Sayısal çalışmaların yapılması ile deneysel çalışmalara göre zaman ve maliyet açısından avantaj sağlanabilir. Böylece deneysel olarak uygulanması zor olan pil sistemlerinin incelenmesini sağlanabilir.

Isıl pillerde kullanımı uygun bulunan kimyasal malzemeler ve termofiziksel özellikleri yapılan literatür araştırmaları sonucunda belirlenmiştir. Şu zamana kadar bu alanda yapılan tek sayısal çalışma referans alınarak çalışmada kullanılmıştır ve yapılan analizlerin doğruluğu açısından test edilmiştir.

Isıl piller ile ilgili deneysel olarak pek çok çalışma yapılmıştır. Ancak ısı pillerin deneysel olarak yapımı oldukça maliyetli ve risklidir. Yapılan deneysel çalışmalarda çevre koşullarının etkisi oldukça fazladır. Elektrolit olarak kullanılan inorganik tuzlar ortamdan nem çekebilmektedir ve ısı kağıtların hazırlanması ve pil düzeneğine yerleştirilmesi sırasında sorunlar yaşanabilmektedir. Bütün bu zorluklardan dolayı sayısal çalışmaların önem kazanması gerekmektedir. HAD yazılımları bu noktada önem kazanmaktadır. Bu yazılımlar C+, C#, Fortran gibi kodlar olabildiği gibi, Mercure (EdF), FLACS (GexCon), Ansys Fluent, PHOENİCS, Star-CD, Fluidyn gibi ticari amaçlı paket programlar da olabilmektedir. Isıl pillerle ilgili yapılan literatürdeki simülasyon çalışması incelendiğinde yapılan çalışmanın PHOENİCS paket programı ile yapıldığı görülmüştür. Kullanım alanı geniş olan ve kullanıcının kendi Fortran kodunu yazmasına izin veren Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) programlarından PHOENİCS paket programı yapılan çalışma için uygun görülmüştür.

2.1. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği

Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD), basit ve karmaşık akımların sayısal çözümlemesinde sonlu elemanlar, sonlu farklar veya sonlu hacimler yöntemlerinin uygulanmasıyla akışkan davranışlarının fizik temelinde ve sayısal yöntemlerle benzeşiminin yapılmasıdır. Akışkanlar dinamiği ve ısı transferi alanında olan problemlerinin analizinin yapılmasında ve değerlendirilmesinde kullanılmaktadır.

Genel olarak bir akışı çözmek için süreklilik denklemi, momentum denklemi ve yardımcı denklemlerin aynı anda çözümü gerekmektedir. Akış üç boyutlu ise çözülecek denklem sayısı artmaktadır. Sistemde sıkıştırılabilirlik ya da ısı transferi varsa, enerji denklemine ihtiyaç duyulur. Ayrıca akışın türbülanslı olduğu durumlarda denklem sistemine türbülans modeli de eklenir. Tüm durumlar göz önüne alındığında sayısal olarak modellenmek istenen akışın şartlarına göre denklem sistemi ortaya koyulur. Daha sonra bu denklemlerin her biri ayrı ayrı sayısallaştırılıp çözümlenerek sonuca ulaşılabilir. Akış, sınır koşulları dâhilinde bir, iki ya da üç boyutta değişebilir. Bir ve iki boyutlu çözümlerde üç boyutlu çözümlere göre daha kısa zamanda sonuçlar elde edilebilir. Üç boyutlu hassas çözümler, hızlı ve bellek kapasitesi yüksek günümüz bilgisayarları yardımıyla yeni mümkün olabilmektedir. Hatta bazı problemlerin sayısal çözümlemesi için sadece bir bilgisayar yeterli olmayıp, işlemci ve bellek kapasitesini arttırmak için birden fazla bilgisayarın paralel çalıştırıldığı sistemler gerekebilmektedir.

HAD günümüzde farklı problemlere çözüm bulmada kullanılmaktadır. HAD analizlerinin kullanım alanları şu şekilde sıralanabilir.

- Enerji santrallerinde
- Elektrik-elektronik mühendisliği uygulamalarında
- Kimya mühendisliği uygulamalarında
- Binaların iç ve dış ısıtma-havalandırma sistemlerinde
- Çevre mühendisliği uygulamalarında
- Meteoroloji uygulamalarında
- Biyomedikal sistemlerinde, kan akışı incelemelerinde

Son yıllarda yapılan çalışmaların çoğunda HAD kullanılmaktadır. Bunun sebebi olarak birçok avantaj sıralanabilir. Bunlardan bazıları aşağıdaki gibidir [37].

- HAD yazılımları ile yapılan çalışmalarda deneyin sanal ortamı hazırlanmış olur. Farklı parametrelerin incelenmesi gerektiği durumlarda modelde yapılacak küçük değişiklikler ile sonuca ulaşılabilir. Ancak deneysel çalışmalarda yapılacak düzenlemeler daha zahmetli ve zaman alıcıdır.
- Deneysel çalışmalarda kullanılacak ekipmanların temin edilmesi maliyeti arttırmaktadır ve süreci uzatmaktadır. Ancak sayısal analizlerde bu sıkıntılar yaşanmamaktadır. Farklı deneysel ekipmanlar sanal ortamda kullanılarak analizler gerçekleştirilmektedir.
- Sayısal modelleme ile yapılan analizlerde ekipmanların hassasiyeti ve çalışmalardaki olumsuz etkileri önlenebilmektedir. Her bir ağ elemanı bir ölçüm noktasıdır ve deneysel çalışmalarda kullanılan ölçüm ekipmanlarına gerek kalmamaktadır. Bu da cihazların olumsuz etkilerini ortadan kaldırmaktadır.
- HAD analizlerinin bir diğer avantajı ise ölçüm yapılmasının zor olduğu noktalardaki akışkan davranışlarının incelenmesine olanak tanımasıdır.
- HAD yazılımları bilgisayar tabanlı sanal laboratuvar olarak tanımlanabilir. Tasarım ve analiz yapılması gerekli olan durumlarda tasarımcının sayısal model oluşturmasına ve bu modeller üzerinde çalışmalar yapmasına imkan tanır.
- Yapılacak çalışmalarda HAD yazılımlarının kullanılması kullanıcıya zaman kazandırmaktadır ve deneysel çalışmalara göre maliyeti büyük ölçüde azaltmaktadır.

2.2. Sonlu Hacimler Metodu

PHOENİCS programı sonlu hacimler fonksiyonunu kullanmaktadır. Modelde kullanılacak olan denklemleri matematiksel denklemlere dönüştürerek yapılan analizin sonuçlarının daha hızlı bir şekilde elde edilmesine olanak tanır.

Sonlu hacimler yöntemi diferansiyel formdaki denklem sistemlerini çözümlemede kullanılan metotların en yaygın olanlarındanıdır. Sonlu hacim metodunda, ilk olarak model içinde birim hacim tanımlanır. Daha sonra diferansiyel formdaki denklem sistemi kontrol hacmi ile bütünleştirilir. Elde edilen denklem sistemindeki hacim integralleri kullanılarak yüzey integralleri cinsinden yazılır. Bu terimler ayrıştırılarak her bir sonlu hacim yüzeyindeki akı olarak hesaplanır. Sistemin tamamını hesaplamak için, her bir birim hacim yüzeyinde çözüm gerçekleştirilir.

Sonlu hacim metodu ile yapılan çözümlemede değişkenlerin akıları hesaplandığından, bu metot oldukça tutarlıdır. Çünkü bir birim hacim yüzeyinden çıkan akı diğer birim hacim yüzeyinden girmektedir.

Sonlu hacim yöntemi çözümü yapılacak geometriyi parçalara bölen, daha sonra bu parçaların her biri için ayrı ayrı çözüm yaparak yapılan bu çözümleri birleştiren bir çözüm yöntemi olarak ifade edilebilir.

2.3. Isı Transfer Yöntemleri

Isı, bir sistem ve çevresi arasındaki sıcaklık farklılığı sebebi ile sistem sınırından geçen enerji olarak tanımlanabilir. Isı transferi her zaman yüksek sıcaklıktan düşük sıcaklığa doğru meydana gelmektedir. İki ortamdaki sıcaklık değerleri eşitlendiği durumda ise ısı aktarımı durmaktadır.

Isı transferi üç farklı yöntem ile gerçekleşir. Bu yöntemler aşağıdaki gibidir [38].

- İletim ile ısı transferi
- Taşınım ile ısı transferi
- Işınım ile ısı transferi

Problemlerin türüne göre bu transfer yöntemleri tek başına meydana gelebildiği gibi bir den fazla yöntemin aynı anda gerçekleştiği durumlarda gözlenmiştir.

2.3.1. İletim ile Isı Transferi

Katı, sıvı veya gaz halindeki maddelerin birbiri ile etkileşimleri sonucu, yüksek enerjili parçacıklardan düşük enerjili olanlara enerji aktarmasıdır. İletim ile ısı transferinde hesaplamalar Fourier'in ısı iletim denklemine göre yapılır [38].

Fourier'in ısı iletim denklemi;

$$Q_{\text{iletim}} = -k A \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (1)$$

Bu denklemde k ısı iletim katsayısını, A etki eden yüzey alanını, ΔT sıcaklık farkını, Δx ise malzemenin kalınlığını ifade etmektedir. Denklemde de görüldüğü gibi iletim ile ısı transferi yüzey alanı ve sıcaklık farkı ile doğru orantılı, malzemenin kalınlığı ile ters orantılı olarak gerçekleşmektedir.

2.3.2. Taşınım ile Isı Transferi

Katı bir yüzey ile akışkan bir yüzey arasında meydana gelen enerji aktarımıdır. Taşınım ile ısı transfer yöntemleri iki şekilde incelenmektedir. Eğer akışkanın hareketi bir pompa ya da fan yardımıyla gerçekleştiriliyorsa zorlanmış taşınım, akışkan hareketi yoğunluk farkı sebebi ile oluşuyorsa doğal taşınım olarak adlandırılır. Taşınım ile ısı transferinde hesaplamalar Newton'un soğutma yasasına göre yapılır [38].

Newton'un soğutma yasası;

$$Q_{\text{taşınım}} = h A_s (T_s - T_{\infty}) \quad (2)$$

Bu denklemde h taşınım ile ısı transfer katsayısını, A_s etki eden yüzey alanını, T_s yüzey sıcaklığını, T_{∞} ise akışkan sıcaklığını ifade etmektedir.

2.3.3. Işınım ile Isı Transferi

Isı enerjisinin elektromanyetik dalgalar yardımı ileildiği ısı transferi mekanizmalarından biridir. Isının iletilmesinde elektromanyetik alan kullanıldığı için bu yöntemde iletim ve taşınımından farklı olarak bir dış ortam gerekmez. Işınım ile ısı transferinde hesaplamalar Stefan-Boltzmann'ın kanununa göre yapılır [38].

Stefan-Boltzmann'ın kanunu;

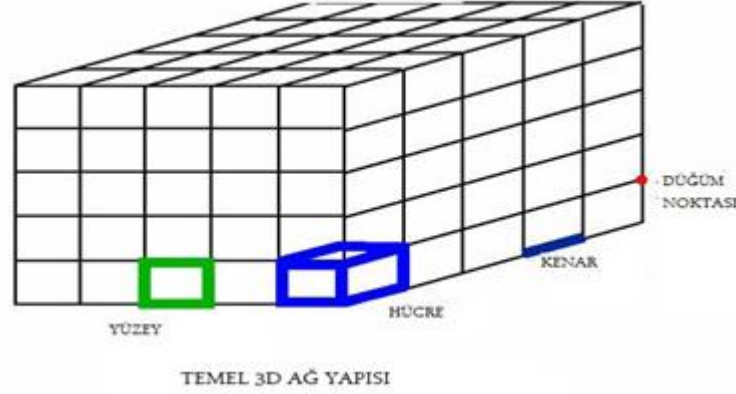
$$Q_{\text{ışınım}} = \varepsilon \cdot \sigma A_s (T_s^4 - T_{\text{çevre}}^4) \quad (3)$$

Bu denklemde ε yüzeyin yayıcılığını, σ Stefan-Boltzmann sabiti ($5.670 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$), A_s etki eden yüzey alanını, T_s yüzey sıcaklığını, $T_{\text{çevre}}$ ise çevre sıcaklığını ifade etmektedir.

2.4. Sayısal Ağ Modeli Oluşumu

Ağ yapısı, HAD çalışmalarında hesaplama alanının küçük alt hesap alanlarına bölünmesiyle oluşturulur. Bu işlem ile diferansiyel denklemler sayısal olarak çözülebilmektedir. Ancak analiz içindeki her noktada bu hesaplamaların yapılması mümkün değildir. Bu sebeple hacim alanı içinde belirlenen sayıda noktada bu cebirsel işlemler gerçekleştirilir. Ağ yapısı problemin geometrisine uygun olarak koordinatlarda düzenlenebilmektedir. Oluşturulan ağ yapı modelin geometrisi ile bütünleştirilir. Küçük alt

hesap alanlarının her birine hücre adı verilir. Her hücrede oluşan hücre sınırları, düğümler ve hücrenin merkezi belirleyici faktörlerdir.



Şekil 2.1. 3 boyutlu ağ yapısı

Ağ yapıları 2 boyutlu ve 3 boyutlu çalışmalarda sıkıştırılmış ağ ya da düzensiz ağ yapısı kullanılarak tanımlanabilir. Bu yapılar hassas çözümler elde edilmesine olanak tanır. Şekil 2.1.'de 3 boyutlu ağ yapısı verilmiştir.

Ağ yapısının kalitesi çözümün doğruluğu ve uygunluğu için önemli bir parametredir. Düğüm noktalarındaki dağılımın düzgün olması ve sıklığı ağ kalitesini belirlemektedir. Çalışmadaki geometrinin boyutu ne olursa olsun karmaşık bölgelerdeki ağ kalitesi çözümü etkiler [37].

Problem çözümünde ağ düzenekleri hassas ve doğru sonuçlar elde edebilmek için geometriye uygun şekilde hazırlanmalıdır. Sonuçların doğruluğu açısından belirlenecek olan ağ sayısı ancak sayısal denemeler ile bulunabilir.

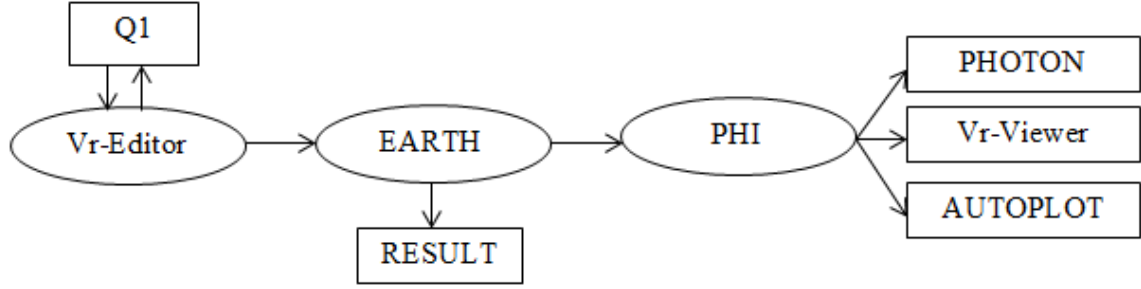
2.5. PHOENİCS Paket Programı

Parabolik, Hiperbolik veya Eliptik Sayısal Entegrasyon Kod Serisinin kısaltması olan PHOENİCS, HAD tekniklerini kullanan genel amaçlı bir yazılım programıdır. Buradaki parabolik, hiperbolik ve eliptik ifadeleri matematikçilerin denklemleri ayırt etmede kullandığı ifadelerdir. Ancak bu denklemlerin matematikçiler için tasarlandığı anlamına gelmez.

Bu program çeşitli alanlarda kullanılmaktadır. Bunlar aşağıdaki gibidir.

- Bilim adamlarının deneysel gözlemlerini yorumlamalarında,
- Mühendislerin uçak ve diğer araçları tasarlamalarında,
- Mimarların bina tasarımlarında,

- Çevre uzmanlarının çevresel etkiler ve olası tehlikelerin kontrolü için incelemelerinde,
- Öğretmen ve öğrencilerin akışkanlar dinamiği, ısı transferi, yanma ve ilgili disiplinlerde çalışmalarında kullanılır [39].



Şekil 2.2. PHOENİCS işletim sistemi [39]

PHOENİCS işletim sistemi Şekil 2.2’de görülmektedir. PHOENİCS paket programı Satellite (VR-Editor), EARTH ve PHI modülleri ve yan modüllerden oluşur. Vr-Editor ön işlemcidir. Problemin geometrisinin oluşturulması, denklem takımlarının ve nesnelerin seçimi için kullanılır. EARTH ana işlemcidir ve çözücü modülü olarak bilinir. PHI ise sonuçların kullanıcıya sunulduğu modüldür. Bu modülde kullanıcıya hız, sıcaklık ve basınç parametrelerine göre sonuçlar verilir. Yapılacak olan analizlerde PHOENİCS’in ana modüllerinin hepsi kullanılmaktadır.

2.6. Yakınsama Kriterleri

HAD analizleri kullanılarak birçok problemin çözümünü kısa sürede elde etmek mümkündür. Yapılan çözümlemelerin gerçek fiziksel olay ve fizik kurallarına uygun olması gereklidir. PHOENİCS programı kullanılarak yapılan analizlerde sonuçların geçerliliğinin kontrolü için gerekli olan beş parametre mevcuttur [32].

a. Elde edilen çözümde yakınsaklık sağlandı mı?

Yapılan analizler sonucu elde edilen RESULT modülünde iterasyon sayısına bağlı olarak kalıntılar grafik halinde verilir. Analizin yakınsadığının anlaşılabilmesi için kalıntıların tekdüze olması veya bir azalma göstermesi gerekmektedir. Bu değerler sıfıra yaklaştıkça istenen çözüme ulaşıldığı kabul edilir.

b. Çözüm iterasyon sayısına bağımlı mı?

İterasyon sayısı çözüm ile ilgili bir parametredir. Problemin zorluk derecesine göre iterasyon sayısında değişiklikler oluşmaktadır. Yapılan çözümlerde iterasyon sayısı ile yakınsamanın değişimi sürekli olarak gözlenir. Böylece iterasyon sayısının arttırılması ile yakınsamış problemlerde yakınsamanın devam edip etmediği gözlemlenebilir.

c. Korunum denklemleri sağlandı mı?

Çözüm için uygun iterasyon sayısının verilmesinin ve yakınsamanın sağlanmasından sonra, problemin çözümü için kullanılan momentum, enerjinin korunumu ve diğer denklemlerin sağlanıp sağlanmadığı incelenir. Bu değerlere RESULT kütüğünden ulaşmak mümkündür.

d. Yapılan çözümleme hücreden bağımsız mı?

Çözümlemelerde hacim alanı içerisindeki hücre sayısı ve dağılımının uygun olması gereklidir. Analizi gerçekleştirilecek olan modeldeki hücre dağılımının homojen olması gereklidir. Hücre yapısına bağımlı olan bir çözümde elde edilen sonuçlar doğru olmayabilir. Bu sebeple hücre yapısının ve dağılımının, sonuçlar üzerindeki değişimi minimuma indirgenmelidir.

e. Sayısal çalışmadan elde edilen sonuçlar deneysel çalışmalar ile uyumlu mu?

Sayısal çalışmalar ile elde edilen sonuçların literatürde yer alan deneysel çalışmalar ile ya da farklı sayısal çalışmalar ile uyumlu olup olmadığı incelenir. Elde edilen çözüm ile diğer çalışmaların paralellik göstermesi yapılan çalışmanın doğruluğunun ispatı için önemlidir.

2.7. Matematiksel Model

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği uygulamalarında süreklilik, enerjinin korunumu ve momentum denklemleri kullanılmaktadır. Fizik kurallarına göre bu denklemler farklı biçimlerde türetilmektedir. Yapılan analizlerde aşağıdaki denklem takımlarından faydalanılmıştır.

Süreklilik denklemi aşağıdaki gibi ifade edilmiştir.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V) = 0 \quad (4)$$

Burada; ρ yoğunluğu, V hız vektörünü (u,v) , t zamanı ifade etmektedir.

Enerjinin korunumu genel halde yazılmıştır;

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho H) + \nabla(\rho \vec{v} H) = \nabla(k \nabla T) \quad (5)$$

$$H = h + \Delta H \quad (6)$$

$$h = h_{ref} + \int_{T_{ref}}^T c_p dT \quad (7)$$

Burada; H maddenin entalpisi, ρ yoğunluk, $\vec{v}$ hız vektörünü, k ısı iletim katsayısını temsil etmektedir. Aşağıda momentum denklemi genel halde yazılmıştır.

$$\rho \frac{D\vec{V}}{Dt} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{V} + \rho \vec{g} + \vec{S} \quad (8)$$

$$T < T_{katılma} \quad \text{ise} \quad \beta = 0 \quad (9)$$

$$T < T_{sıvılaşma} \quad \text{ise} \quad \beta = 1 \quad (10)$$

$$T_{katılma} < T < T_{sıvılaşma} \quad \text{ise} \quad \beta = \frac{T - T_{katılma}}{T_{sıvılaşma} - T_{katılma}} \quad (11)$$

$$A_{lapa} = \frac{(1 - \beta)^2 C}{(\beta^3 + \varepsilon)} \quad S = A_{lapa} \vec{v} \quad (12)$$

Burada β sıvı hacim oranıdır, ε sıfır ile bölünmesini engellemek için 0.001'den küçük bir sayıdır, $\vec{v}$ hız vektörü, A_{lapa} porozite fonksiyonu ve C lapa bölge sabitidir [37].

2.8. Sayısal Modelin Literatürdeki Model İle Karşılaştırması

Sayısal modelin doğruluğunun kontrolü amacıyla literatürde yer alan çalışma [21] ile benzer bir ısıl pil modeli oluşturulmuş ve elde edilen sonuç değerleri karşılaştırılmıştır.

Çalışmada ısıl pilin geometrik modeli PHOENİCS-VR modülünde Core modeli seçilerek hazırlanmıştır. Hazırlanan domainde pil yapısına uygun olarak silindirik koordinat sistem kullanılmıştır. Domain malzemesi olarak PHOENİCS VR modülünden domaini hazırlamak için core modeli seçilmiştir. Domain malzemesi olarak, ticari amaçlı yalıtım malzemesi olan fiberglass kullanılmıştır. Çözümlemelerde zamana bağlı sıcaklık profilleri belirlenmeye çalışıldığı için zaman adımları belirlenmiştir.

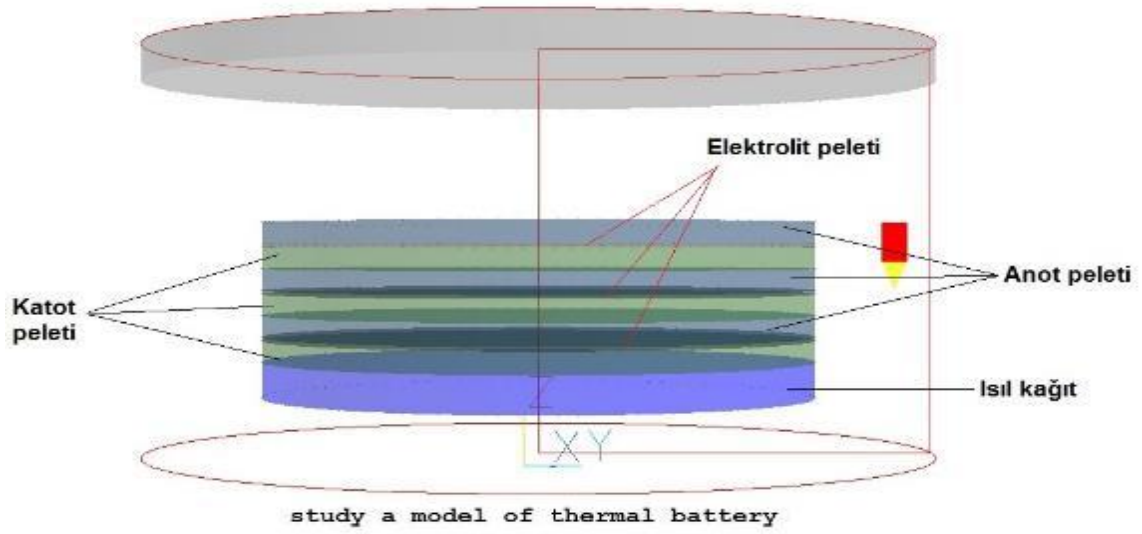
Isıl pil modelinin geometrik yapısı belirlendikten sonra oluşturulan modelin tek fazda gerçekleştirileceği ve enerji denklemleri programa tanıtılmıştır. Hazırlanan modelde elektrolit kimyasal malzemesinin kalınlığı 0.01 mm olarak verildiği için elektrolit malzemesinin erimesi göz ardı edilmiştir. Literatürde yer alan çalışmada da aynı durum söz konusudur [21].

Domain hazırlandıktan sonra ısıtıcı kağıt, anot, elektrolit ve katot oluşturulmuştur. Bu analizde ısıtıcı olarak kullanılan ve her hücre arasına yerleştirilen ısıtıcı kağıt kullanılmıştır. Kullanılan ısıtıcı kağıtta sabit ısı akısı 2.42×10^5 J/s olarak tanımlanmıştır. Katot malzemesi olarak 27 °C saf Nikel (Ni) PHOENICS kütüphanesinden seçilmiştir. Anot materyal olarak metalik kalsiyum, elektrolit olarak LiCl-KCl ötektiği kullanılmıştır. Anot ve elektrolit malzeme PHOENICS kütüphanesinde bulunmadığı için programa yeni kimyasal malzeme olarak tanıtılmıştır. Programa yeni malzeme olarak tanıtılan Ca ve LiCl-KCl kimyasal malzemelerin sıcaklık, entalpi, yoğunluk, ısı iletkenlik ve özgül ısı gibi özellikleri girilmiştir. Kullanılan malzemeler ve özellikleri Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 2. 1. Anot ve elektrolit kimyasal malzemelerinin termofiziksel özellikleri [40].

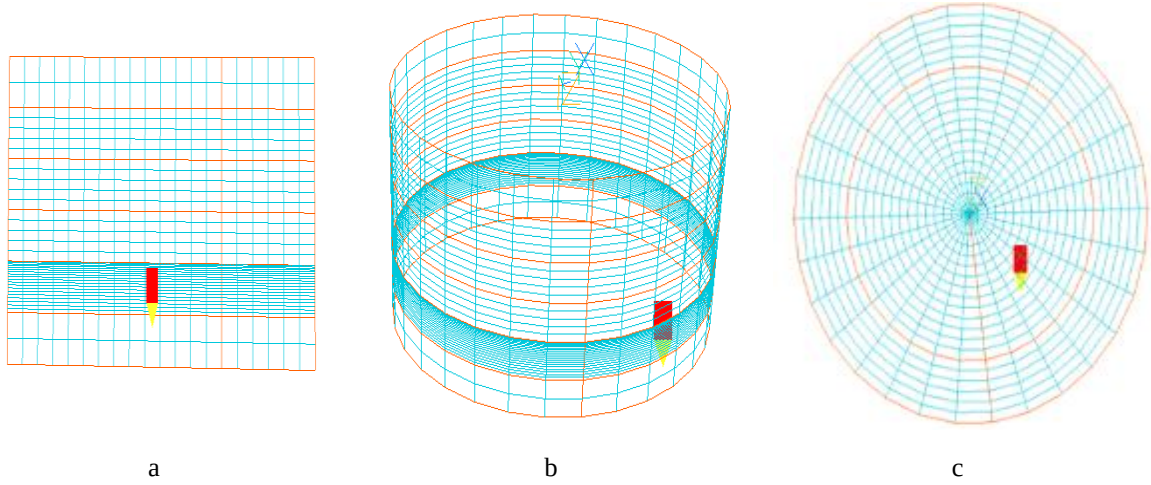
Kimyasalın Adı	LiCl-KCl	Ca
Erime Noktası (°C)	355	850
Entalpi (kJ/kg)	244	1.134
Katı Halde Isı Depolama Kapasitesi (J/kgK)	1197.4	631
Isıl İletkenlik (W/mK)	0.42	201
Katı Halde Sabit Yoğunluk (g/cm ³)	1.52	1.55

Pil elemanları oluşturulduktan sonra pil çevresi paslanmaz çelik malzeme ile sarılmıştır. Bu malzeme PHOENICS kütüphanesinden seçilmiştir. PHOENICS paket programında hazırlanan 3 hücreli sayısal model Şekil 2.3’te gösterilmiştir. Bu model oluşturulurken referans makaleden faydalanılmıştır.



Şekil 2.3. PHOENICS programında hazırlanan simülasyon modeli

Şekil 2.4' te ise sayısal çalışmada kullanılan ağ yapısı x, y, z koordinatları için gösterilmiştir.



Şekil 2.4. a) Modelin y eksenindeki ağ yapısı, b) Modelin x eksenindeki ağ yapısı, c) Modelin z eksenindeki ağ yapısı

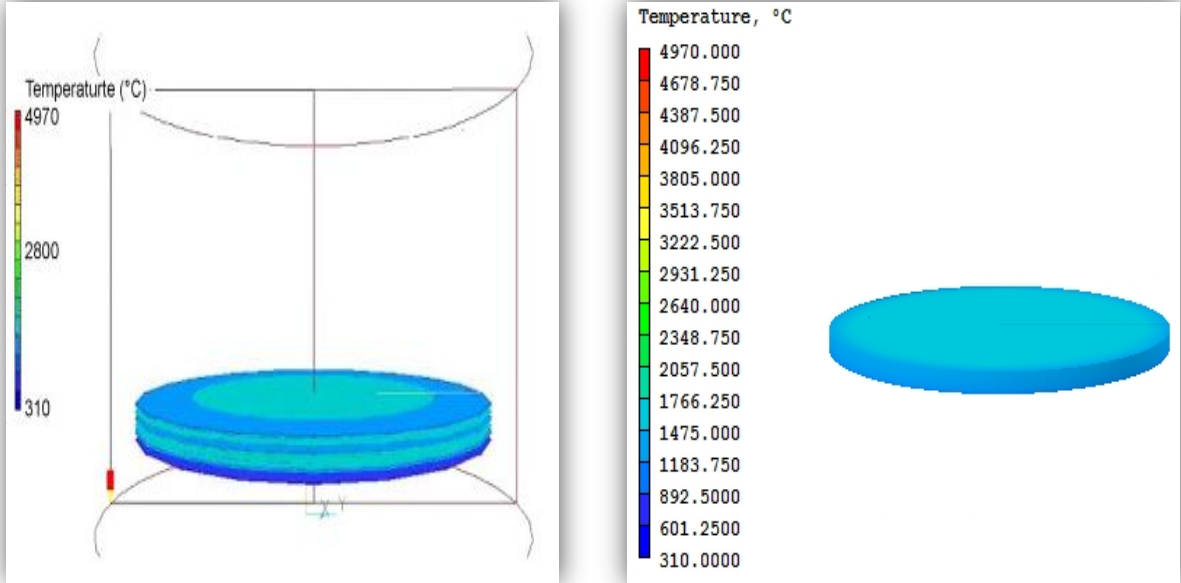
Zamana bağlı olarak yapılan bu çalışmada, literatürde bulunan bir ısıl pil ile karşılaştırmak amacıyla sayısal simülasyonunun aynısı modellenmeye çalışılmıştır. Farklı zaman değerlerindeki elektrolitin sıcaklık dağılımı incelenmiştir. Analiz sonuçlarından alınan elektrolitlerin zamana bağlı sıcaklık dağılımlarında kıyaslama yapabilmek için, zaman adımları 0.48, 0.80 ve 1.20 sn için alınmıştır.

Zaman dilimi $t=0.48$ sn için elektrolitin sıcaklık dağılımı, referans çalışma ve yaptığımız çalışmadan alınan sonuç Şekil 2.5'te gösterilmiştir. Isıl kağıt kullanılarak hazırlanan bu modelde görüldüğü gibi elektrolit kimyasal malzemesinin erime noktası

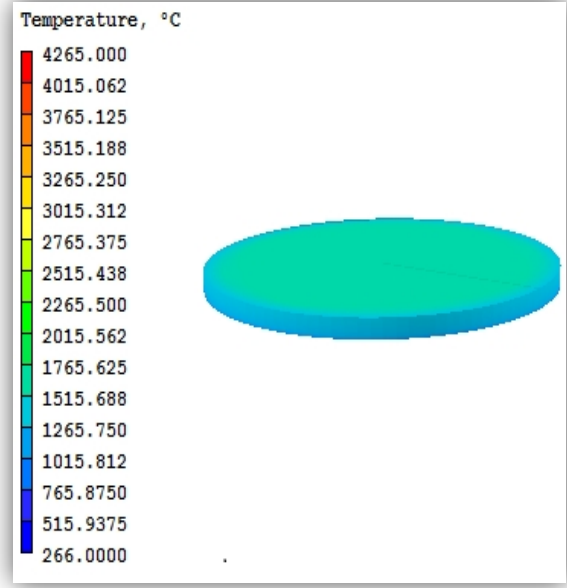
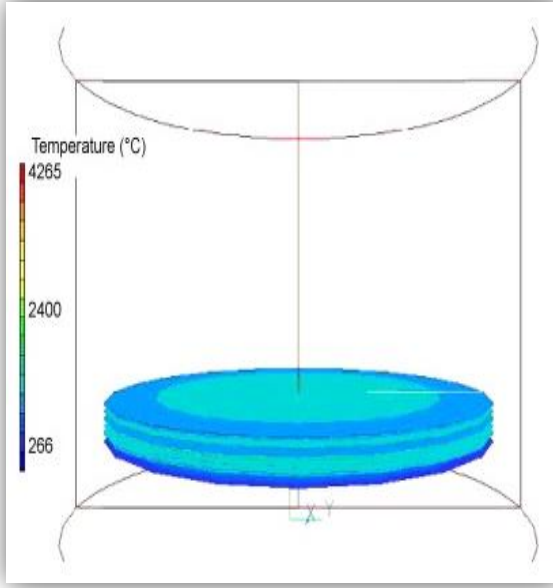
anlık bir süreçtir ve pil elektrolit malzemesinin erimesinden itibaren aktifleşmektedir. Bu karşılaştırmada sıcaklık gradyen değerlerinin referans çalışmayla aynı değerler seçildiğinde benzer sonuçlar elde edilmiştir.

Şekil 2.6'da referans çalışmadan ve yaptığımız çalışmadan alınan 0.80 sn deki elektrolitlerin sıcaklık dağılımı gösterilmiştir. Elektrolit olarak kullanılan ötektiğin bu zaman adımıda sıcaklık değerinin 1515 - 2265 °C arasında bir dağılım gösterdiği görülmektedir.

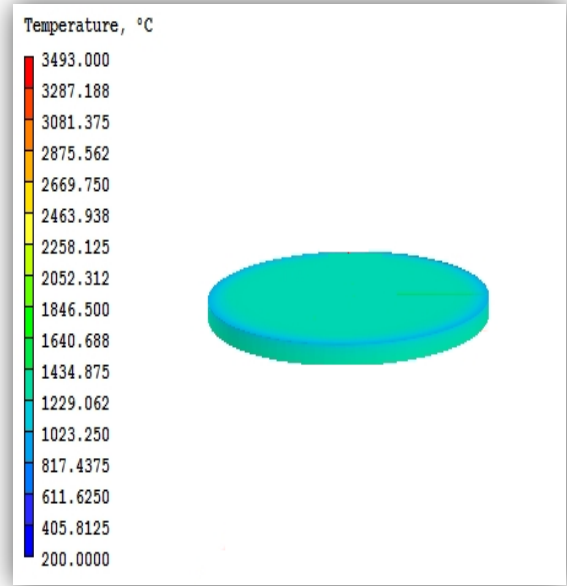
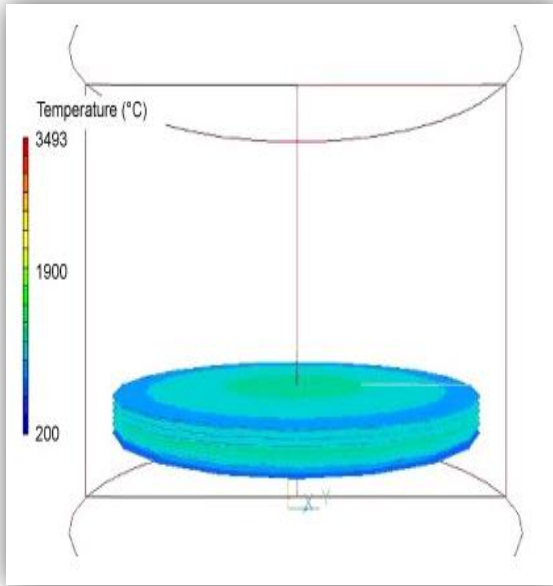
$t = 1.20$ sn değeri için, referans çalışma ve yaptığımız çalışmadan alınan sonuç Şekil 2.7'de verilmiştir. Yapılan farklı zamanlardaki sıcaklık dağılımları karşılaştırıldığında literatür ile uyumlu değerlerin elde edildiği görülmüştür. Aynı zamanda sayısal çözümden elde edilen sonuçlarda pil sıcaklığının yaklaşık 550 °C olduğu gözlemlenmiştir. Sonuç olarak PHOENICS'te hazırlanan sayısal modelin doğru çalıştığı teyit edilmiştir.



Şekil 2.5. Elektrolit sıcaklıklarının $t=0.48$ sn için literatürle karşılaştırılması (Solda Referans alınan makale [21], sağda çalışma kapsamında hazırlanan sonuçlar)



Şekil 2.6. Elektrolit sıcaklıklarının $t=0.80$ sn için literatürle karşılaştırılması (Solda Referans alınan makale [21], sağda çalışma kapsamında hazırlanan sonuçlar)



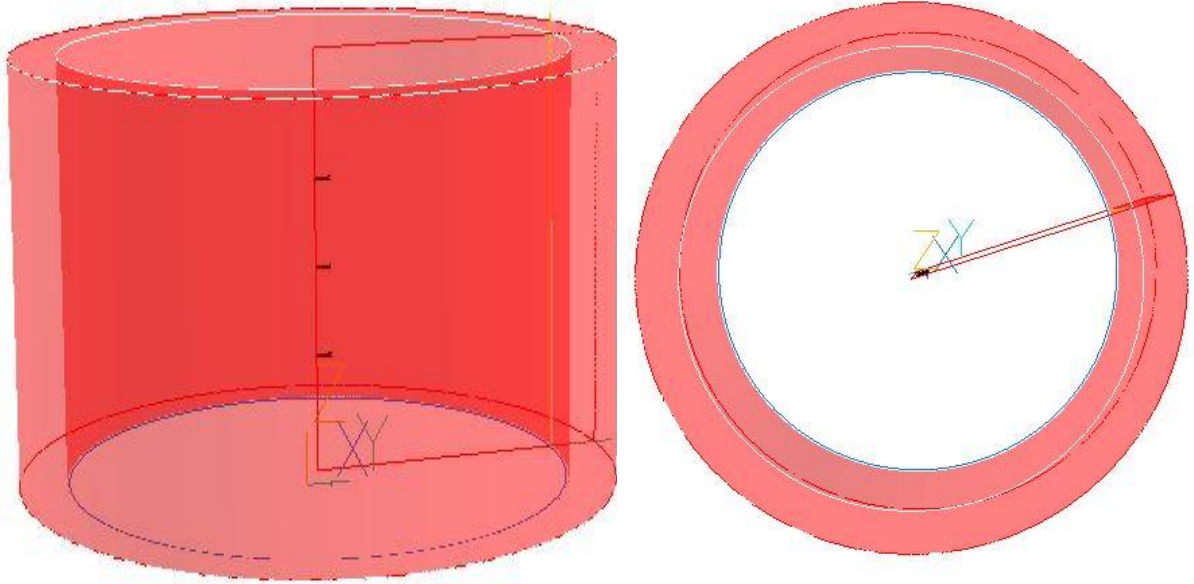
Şekil 2.7. Elektrolit sıcaklıklarının $t=1.20$ sn için literatürle karşılaştırılması (Solda Referans alınan makale [21], sağda çalışma kapsamında hazırlanan sonuçlar)

2.9. Sayısal Modelin Oluşturulması

Isıl pillerin zamana bağlı sıcaklık dağılımlarının incelenmesi amacıyla PHOENİCS paket programı kullanılarak bir model oluşturulmuştur. Isıl pilin geometrik modeli PHOENİCS-VR modülünde hazırlanmıştır. Pil modelleri silindirik olarak oluşturulduğu için koordinat sistemi silindirik polar olarak seçilmiştir. Yapılan analizlerde zamana bağlı olarak ısıl pildeki sıcaklık dağılımı incelendiği için zamana bağımlılık fonksiyonu (transient) belirlenmiştir.

Domain malzemesi olarak erime noktası 1121 °C olan fiberglass kullanılmıştır. Hazırlanan ısıl pil modelinde elektrolit 0.006 m kalınlığında, 0.065 m çapında seçildiği için elektrolitin erimesi göz ardı edilmiştir. Literatürde verilen çalışmada da elektrolit boyutu çok küçük olduğu için erimesi dikkate alınmamıştır [21]. Bu sebeple yapılan çalışma tek fazda gerçekleştirilmiştir.

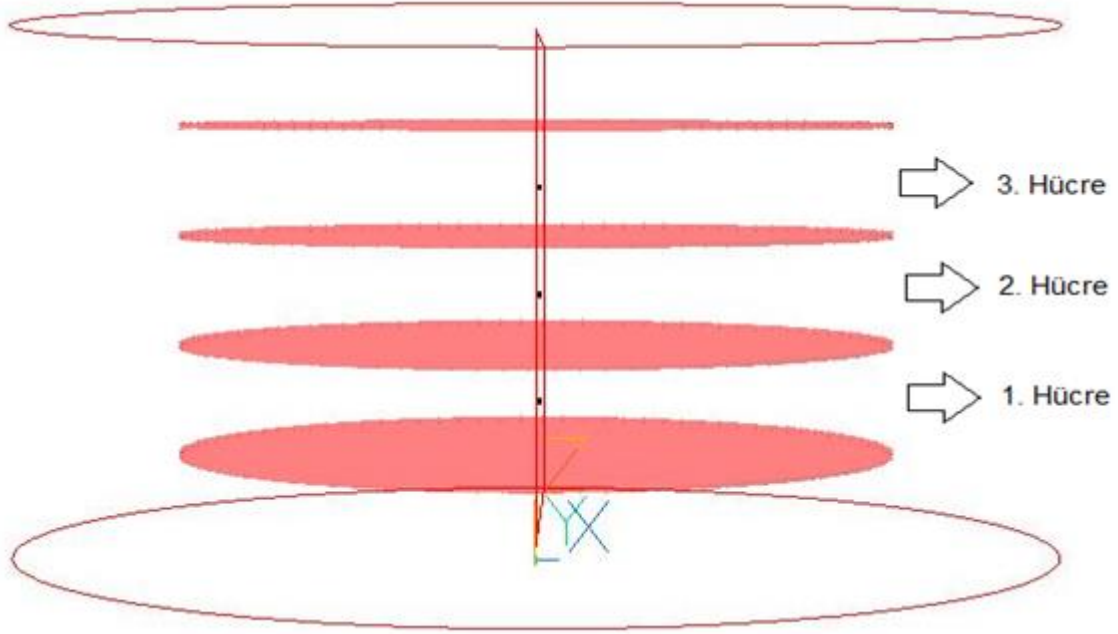
Referans makaleden farklı olarak bu çalışmada ısıl kağıt kullanılmamıştır. Isıtma işlemi pilin dış kabuğuna sarılan bir ısıtıcı yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Isıtıcı yüzeye verilen sıcaklık değeri zamana bağlı olarak azaltılarak analizler gerçekleştirilmiştir. Şekil 2.8’de modelde kullanılan ısıtıcı gösterilmiştir.



Şekil 2.8. Isıtıcı

Isıl piller anot, katot, elektrolit ve ısıtma kütesinin birleşiminden seri veya paralel olarak oluşturulmaktadırlar. Akım kolektörleri ise her anot, katot ve elektrolitten oluşan hücrenin arasında yer almaktadır. Sayısal çalışmada 3 hücreli modüller oluşturulmuştur. Bu sebeple 4 adet akım kolektörü kullanılmıştır. Akım kolektörü olarak kullanılan çelik

malzeme PHOENİCS kütüphanesinden seçilmiştir. Şekil 2.9’da akım kolektörlerinin modülde ki görünümü verilmiştir.



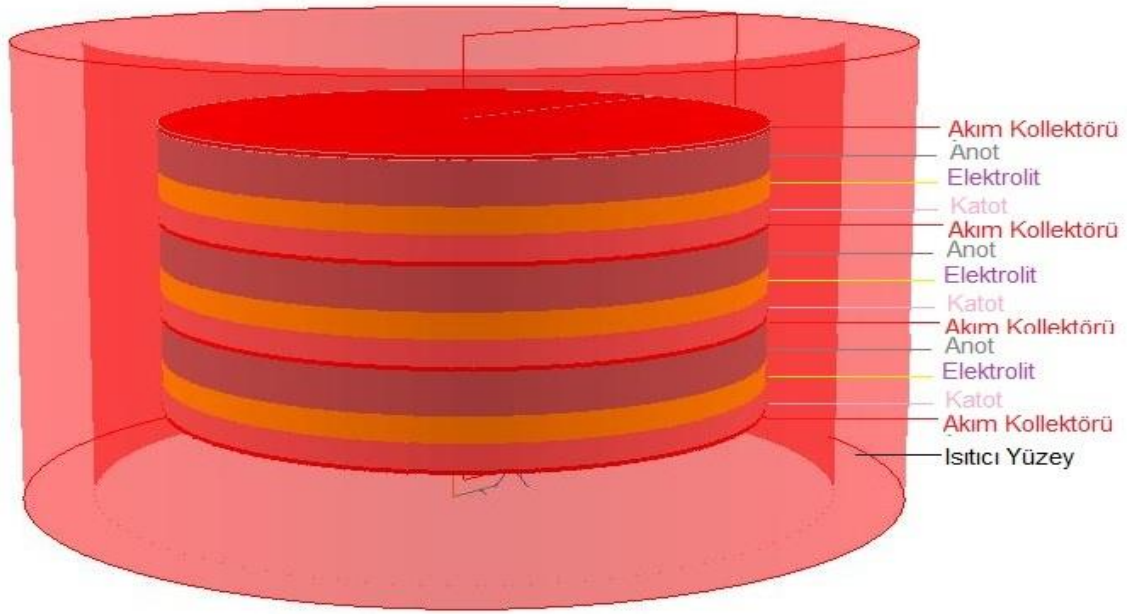
Şekil 2.9. Modelde kullanılan akım kolektörleri

Oluşturulan modelde kullanılacak olan malzemelerin boyutları belirlenirken literatürdeki malzeme boyutları dikkate alınmıştır [3]. Yüksekliği ve çapı belirlenen kimyasal malzemeler PHOENİCS kütüphanesinde yer almadığı için daha önce belirlediğimiz sıcaklık, entalpi, yoğunluk, ısı iletkenlik, hacimsel ısı kapasitesi gibi termofiziksel özellikleri girilerek programa tanımlanmışlardır. Kimyasal malzemelerin boyutları Tablo 2.2’de verilmiştir.

PHOENİCS programında hazırlanan ısı pili modeli Şekil 10’da gösterilmiştir. Modelde 3 hücre mevcuttur. Bu hücrelerden her birinde sırasıyla akım kolektörü, katot, elektrolit ve anot bulunmaktadır.

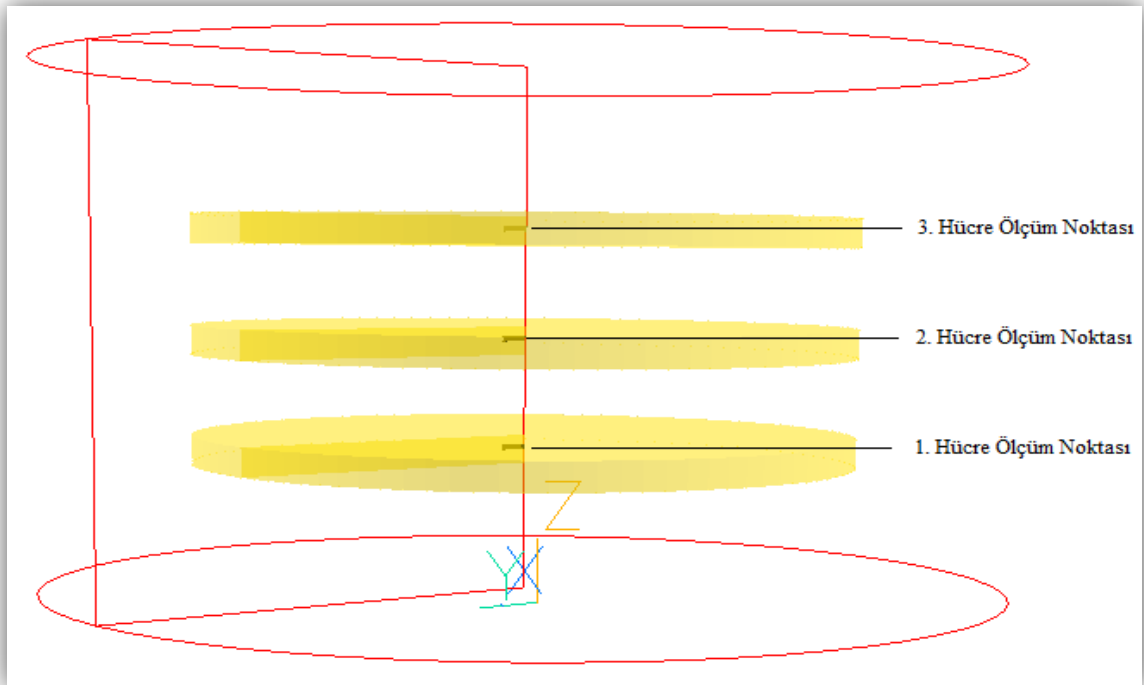
Tablo 2. 2. Modelde kullanılan malzemelerin boyutları

	X eksenindeki boyutu (m)	Y eksenindeki boyutu, r (m)	Z eksenindeki boyutu, h (m)
Katot	6.283185	0.065	0.0006
Anot	6.283185	0.065	0.0006
Elektrolit	6.283185	0.065	0.0010
Akım kolektörü	6.283185	0.065	0.0001



Şekil 2.10. Isıl pil modeli

Modüllerde kullanılan her bir elektrolit kimyasalının orta noktasından zamana bağlı olarak sıcaklık değerleri alınmıştır. Ölçüm noktaları Şekil 2.11’de gösterilmiştir.



Şekil 2.11. Ölçüm noktalarının model üzerinde gösterimi

2.10. Isıl Pilin Sayısal Modellemesinde Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri

Çalışmada 3 hücreli bir ısıl pil modülü oluşturuldu. Bu hücrelerden her birinde sırasıyla akım kollektörü, anot, katot ve elektrolit bulunmaktadır. Yapılan analizler farklı elektrolit kimyasal malzemeler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Modülde anot malzemesi olarak Mg kimyasal malzemesi kullanılmıştır. Kullanılan bu malzemenin termofiziksel özellikleri Tablo 2.3’de verilmiştir.

Tablo 2. 3. Anot kimyasal malzemesi ve termofiziksel özellikleri [41]

Kimyasal Formülü	d (g/cm ³)	T(°C)	k(W/mK)	C _v (mj/m ³ K)	h(mj/mg)
Mg	1.738	650	0.108	0.553	304.14

Literatür araştırmalarında anot olarak Mg ve katot olarak FeS₂’nin kullanılmasının kimyasal olarak uygun olduğu görülmüştür. Kullanılan bu malzeme ve termofiziksel özellikleri Tablo 2.4’de verilmiştir.

Tablo 2. 4. Katot kimyasal malzemesi ve termofiziksel özellikleri [41]

Kimyasal Formülü	d (g/cm ³)	T(°C)	k(W/mK)	C _v (mj/m ³ K)	h(mj/mg)
FeS ₂	4.7	1193	0.098	0.654	1429

Elektrolitler pillerde elektrik iletimini gerçekleştirmektedir. Isıl pillerde kullanılan elektrolit eriyerek iyon değişiminin gerçekleşmesini sağlar. Böylece hücre içindeki güç açığa çıkar. Hazırlanan ısıl pil modülünde elektrolit olarak farklı kimyasal malzemeler kullanılmıştır. Elektrolit malzemelerin bir kısmını saf kimyasal malzemelerden oluşturmaktadır. Bunlar Tablo 2.5’te termofiziksel özellikleriyle birlikte verilmiştir. Bir kısmı ise ikili karışım ve nano katkılı karışımlardır. Elektrolit olarak kullanılan ikili kimyasal karışım ve nano katkılı karışım Tablo 2.6’da verilmiştir.

Tablo 2.5. Elektrolit olarak kullanılan kimyasal malzemeler ve termofiziksel özellikleri [41]

Kimyasal Formülü	d (g/cm ³)	T(°C)	k(W/mK)	C _v (mj/m ³ K)	h(mj/mg)
KSCN	1.886	173.2	0.147	1.054	137
C ₁₆ H ₃₆ IN	1.027	143	0.093	1.012	71
C ₄ H ₁₂ IN	1.84	300	0.135	1.084	89.3
C ₁₆ H ₃₆ BrN	1.148	103	0.159	0.8183	47.9
C ₁₆ H ₃₆ F ₆ NP	3.58	246	0.269	1.97	51.97

Tablo 2. 6. Elektrolit olarak kullanılan karışımlar ve termofiziksel özellikleri [41]

Kimyasal Formülü	d (g/cm ³)	T(°C)	k(W/mK)	C _v (mj/m ³ K)	h(mj/mg)
KSCN+ C ₄ H ₁₂ IN	1.8707	173.2	0.098	0.702	77.1
KSCN+ C ₄ H ₁₂ IN+ SiO ₂	1.8772	169	0.182	0.551	53.5

Geometrik yapısı hazırlanan, ağ yapısı ve ölçüm noktaları belirlenen modellerde farklı kimyasal malzemeler hazırlanarak 7 farklı modül oluşturulmuştur. Bu modüllerde kullanılan kimyasal malzemeler Tablo 2.7’de verilmiştir.

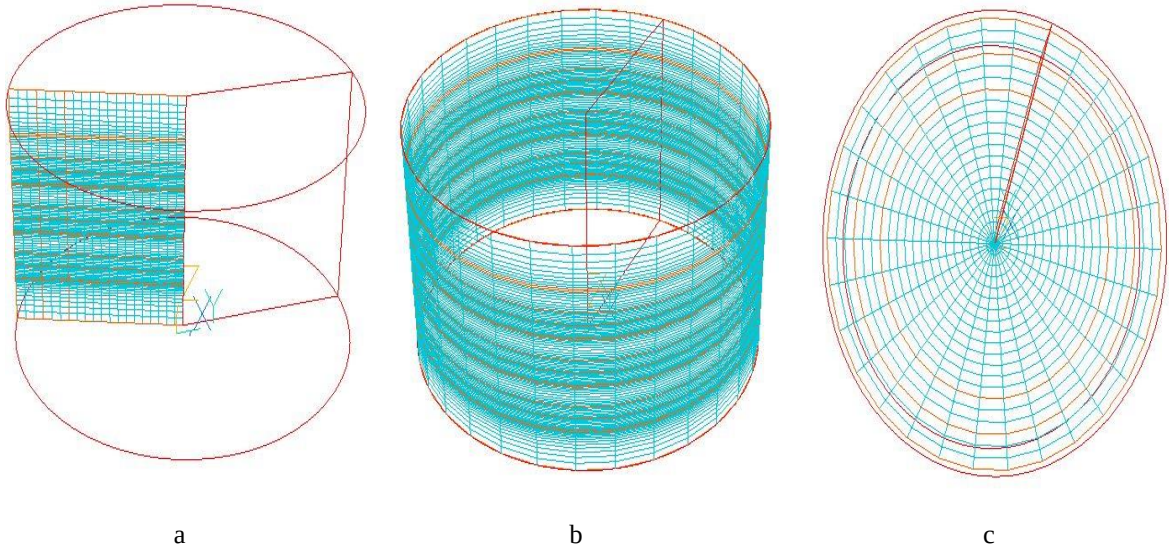
Tablo 2. 7. Modüllerde kullanılan kimyasal malzemeler

Hazırlanan modüller	Anot olarak kullanılan kimyasal malzeme	Katot olarak kullanılan kimyasal malzeme	Elektrolit olarak kullanılan kimyasal malzeme
1. Modül	Mg	FeS ₂	KSCN
2. Modül	Mg	FeS ₂	C ₁₆ H ₃₆ IN
3. Modül	Mg	FeS ₂	C ₄ H ₁₂ IN
4. Modül	Mg	FeS ₂	C ₁₆ H ₃₆ BrN
5. Modül	Mg	FeS ₂	C ₁₆ H ₃₆ F ₆ NP
6. Modül	Mg	FeS ₂	KSCN+C ₄ H ₁₂ IN
7. Modül	Mg	FeS ₂	KSCN+C ₄ H ₁₂ IN+SiO ₂

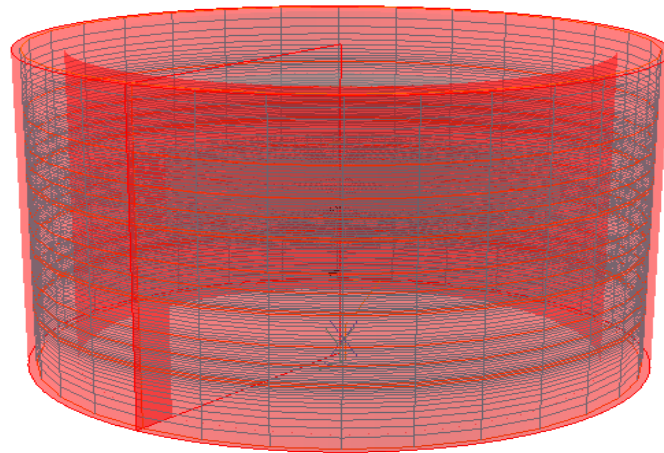
2.11. Isıl Pil Modelinin Ağ Yapısı

Ağ yapısı çözümlemenin doğruluğu açısından önemli bir parametredir. Sayısal ağ yapısı bölümünde de ağ yapısının öneminden bahsedilmiştir.

Bu çalışmada hazırlanan ısıl pil modülünün ağ yapısı Şekil 2.12’de verilmiştir. Ağ yapısının neden olabileceği hataları önleyebilmek için yapının model üzerine doğru bir şekilde atanması oldukça önemlidir. Yapılan çalışma da ağ yapısı model üzerinde düzgün bir dağılım göstermektedir. Ölçüm noktaları olarak elektrolit malzemelerinin orta noktaları dikkate alındığı için bu bölgelere atılan ağ sayısı arttırılmıştır. Bu model üzerinde kare ağ yapısı kullanılmıştır. Şekil 2.13’de ağ yapısının model üzerindeki görünümü gösterilmiştir. Tablo 2.8’de ağ yapısının genel özellikleri verilmiştir.



Şekil 2.12. a) Modelin y eksenindeki ağ yapısı, b) Modelin x eksenindeki ağ yapısı, c) Modelin z eksenindeki ağ yapısı



Şekil 2.13. Ağ yapısının model üzerindeki görünümü

Tablo 2. 8. Ağ yapısının genel özellikleri

Node sayısı	Eleman sayısı	Tolerans
6600	5400	1.000E-3

Modüllerin geometrik yapısı oluşturulduktan sonra analizlerde kullanılacak denklem takımları belirlenmiştir. Kullanılacak olan malzemelerin bir kısmı PHOENİCS kütüphanesinden seçildi. Bir kısmı ise programa yeni malzeme olarak tanıtıldı. Mesh yapısı ve iterasyon sayısı belirlenen modüller yaklaşık 18 saatlik çalıştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar Bulgular kısmında detaylı olarak incelenmiştir.

3. BULGULAR

Çalışmanın temel konusu olan ısı pillerin sayısal modellemesi ve simülasyonu için 7 adet çalışma modülü oluşturulmuştur. Bu modüllerde anot ve katot kimyasal malzemeleri aynı seçilmiştir. Elektrolit kimyasal malzemeleri değiştirilerek zamana bağlı ısı pil simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Modüllerin simülasyonundan elde edilen zamana bağlı sıcaklık haritaları ve zamana bağlı sıcaklık grafikleri bu bölümde verilmiştir.

Isıl pil modeli oluşturulduktan sonra farklı kimyasal malzemeler kullanılarak zamana bağlı sıcaklık analizleri yapılmıştır. Zamana bağlı lineer azalan sıcaklık değeri için zaman adımı belirlenmiştir. Her bir zaman adımı için 50 iterasyon yapılmıştır.

Yapılan analizlerin zamana bağlı sıcaklık dağılım haritaları hazırlanırken şu parametreler dikkate alınmıştır.

- Analizin başlangıç zamanındaki sıcaklık dağılımı,
- Elektrolit kimyasalının erime noktasına ulaştığı zaman dilimindeki sıcaklık dağılımı,
- Pilin içinde soğumanın başladığı zamandaki sıcaklık dağılımı,
- Elektrolit malzemesinin sıcaklığının erime noktasının altına düştüğü zamandaki sıcaklık dağılımı,
- Analizin tamamlandığı zamandaki sıcaklık dağılımı

3.1. Zamana Bağlı Sıcaklık Haritaları

3.1.1. 1. Modül için Isıl Pilin Zamana Bağlı Sıcaklık Haritaları

Yapılan çalışmada anot malzemesi olarak Magnezyum, katot malzemesi olarak Pirit ve elektrolit malzemesi olarak Potasyum Tiyosiyanat (KSCN) kullanılmıştır. Elektrolit olarak kullanılan saf KSCN kimyasal malzemesinin erime noktası 173,2 °C dir. Isıtıcının sıcaklık değeri 300 °C’dir. Yapılan analiz 4000 sn için gerçekleştirilmiştir.

Şekil 3.1’de görüldüğü gibi yapılan analizin başlangıç zamanında, modelin ortalama sıcaklığı 59.9 °C’dir. Şekil 3.2.’de elektrolit malzemelerinin sıcaklıkları 19-20 °C aralığında olduğu görülmektedir.

Analizin 248.sn’de ısıtıcı yüzey sıcaklığı 289 °C iken pil içerisindeki sıcaklık arttığı görülmektedir. Modelin ortalama sıcaklığı ise 222.99 °C olmuştur. Bu zaman adımı

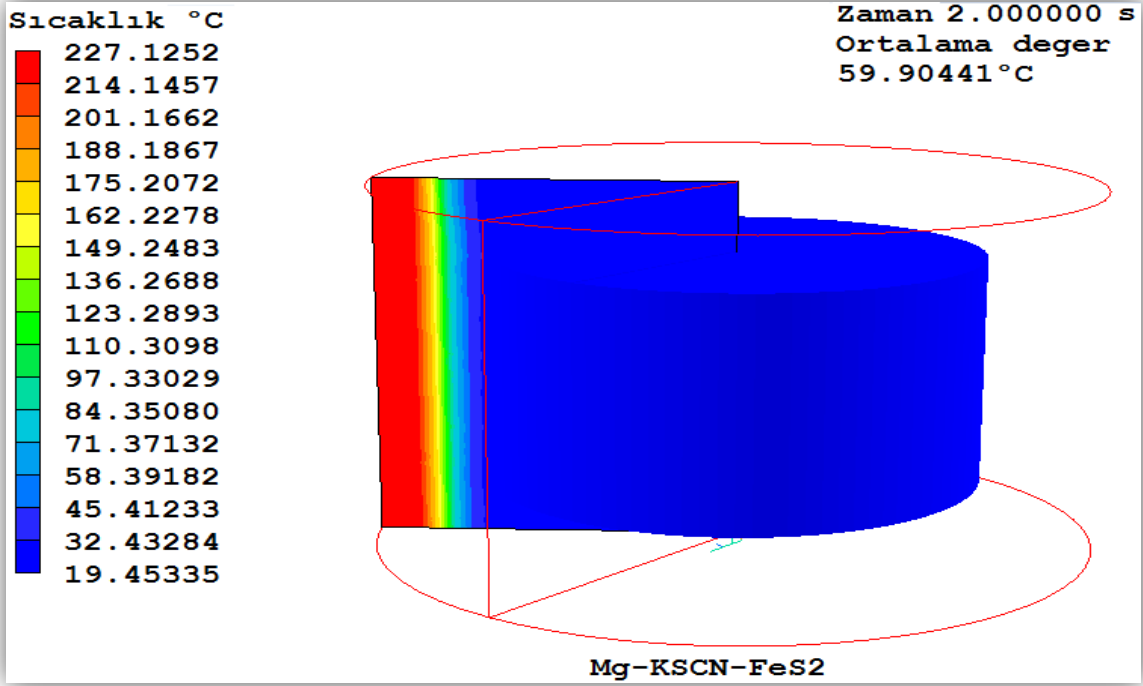
elektrolitler, erime noktası olan 173.2 °C'ye ulaşmıştır. Bu sebeple 248.sn'de pil aktif hale gelmiştir (Şekil 3.3)

Şekil 3.4.'de verilen, elektrolitlerin zamana bağlı sıcaklık haritaları incelendiğinde 3. hücrede yer alan elektrolitteki sıcaklık dağılımı ile 1.hücrede yer alan elektrolit kimyasal malzemesinin sıcaklık dağılımı arasında farklılıklar görülmektedir. Bu farklılık pil modülü içerisindeki kimyasal malzemelerin dizilişi sebebiyle oluşmaktadır. Modülünün en alt kısmında katot malzemesi ve en üst kısmında anot malzemesi yer almaktadır. Anot malzemesi, katot kimyasal malzemesinden daha kalın ve daha iyi ısı iletkenliğe sahip olduğu için ısı iletimi 3.hücrede daha hızlı gerçekleşmektedir.

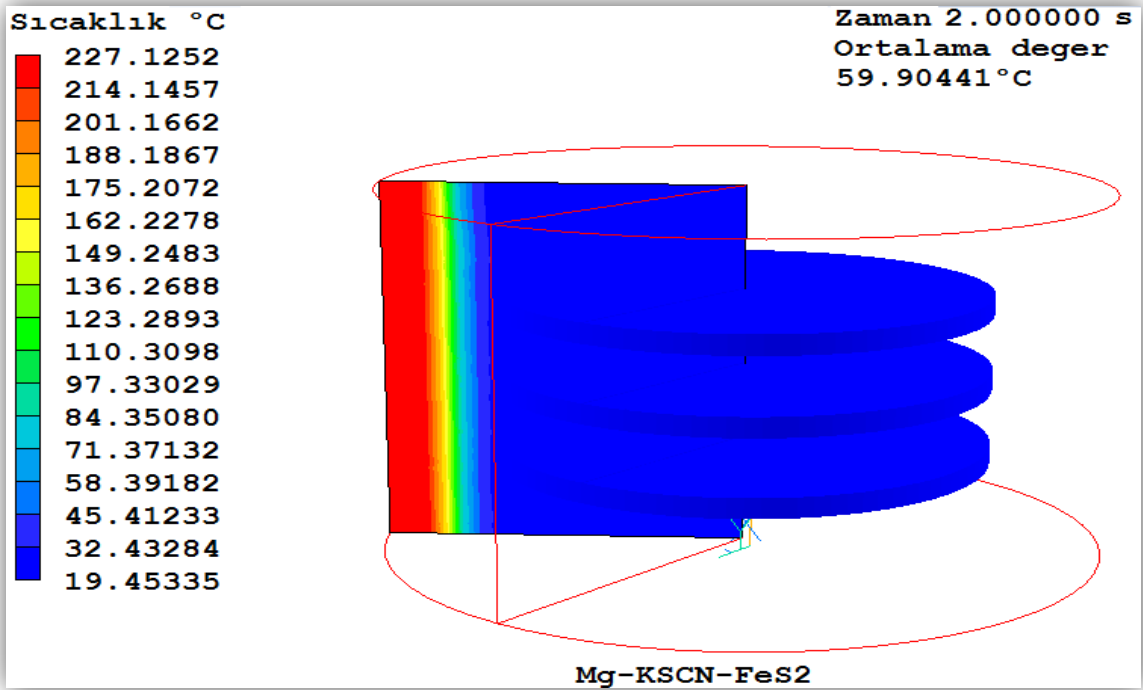
730.sn'de pil maksimum sıcaklık değerine ulaşmıştır. Şekil 3.5 ve 3.6'da görüldüğü gibi bu zaman adımıyla pildeki ortalama sıcaklık değeri 251.03 °C olmuştur. Elektrolit kimyasallarının sıcaklığı 250-253 °C aralığındadır.

Şekil 3.8'de verilen sıcaklık haritasına göre elektrolit kimyasal malzemelerinin sıcaklık değeri erime noktasındaki sıcaklık değerinin altına düşmektedir. 2105.sn' den itibaren elektrolit kimyasalları soğumaya başlamıştır.

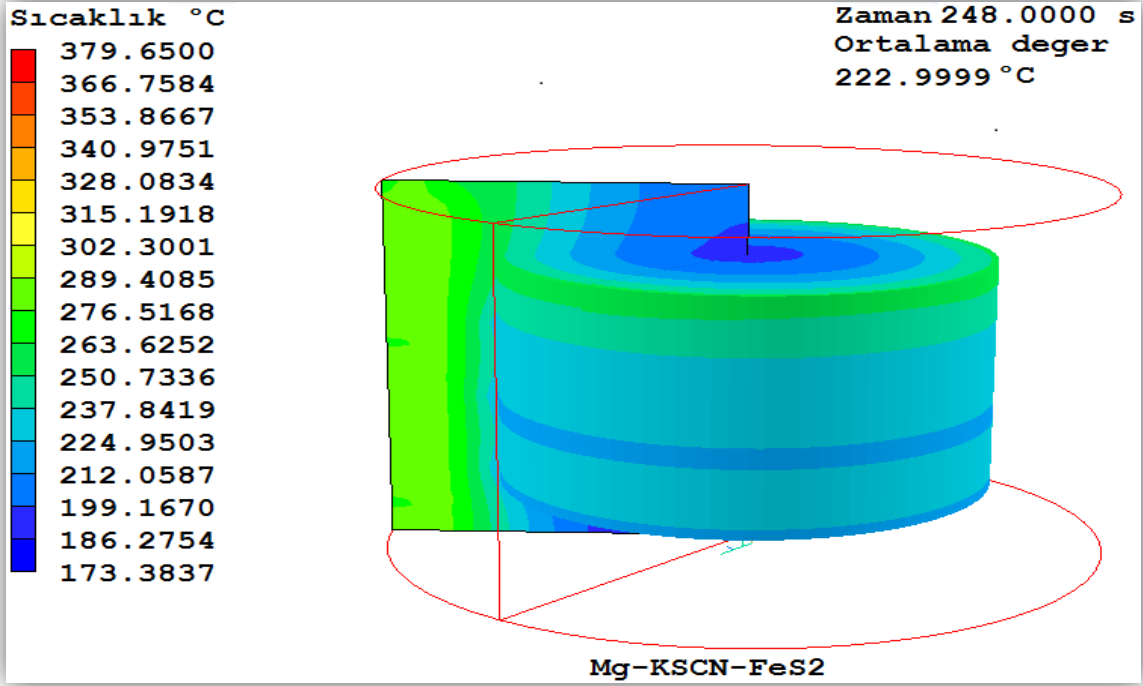
4000.sn analizin bitiş zamanıdır. Şekil 3.9'da analizin bitiminde ısı pil modülündeki sıcaklık değeri, Şekil 3.10'da elektrolit kimyasallarının sıcaklık dağılımı görülmektedir. Analiz sonunda ısıtıcı sıcaklığı oda sıcaklığı olan 20 °C'ye ulaşmıştır. Elektrolit kimyasal malzemelerinin sıcaklık değerleri ise 38-40 °C aralığında olmuştur.



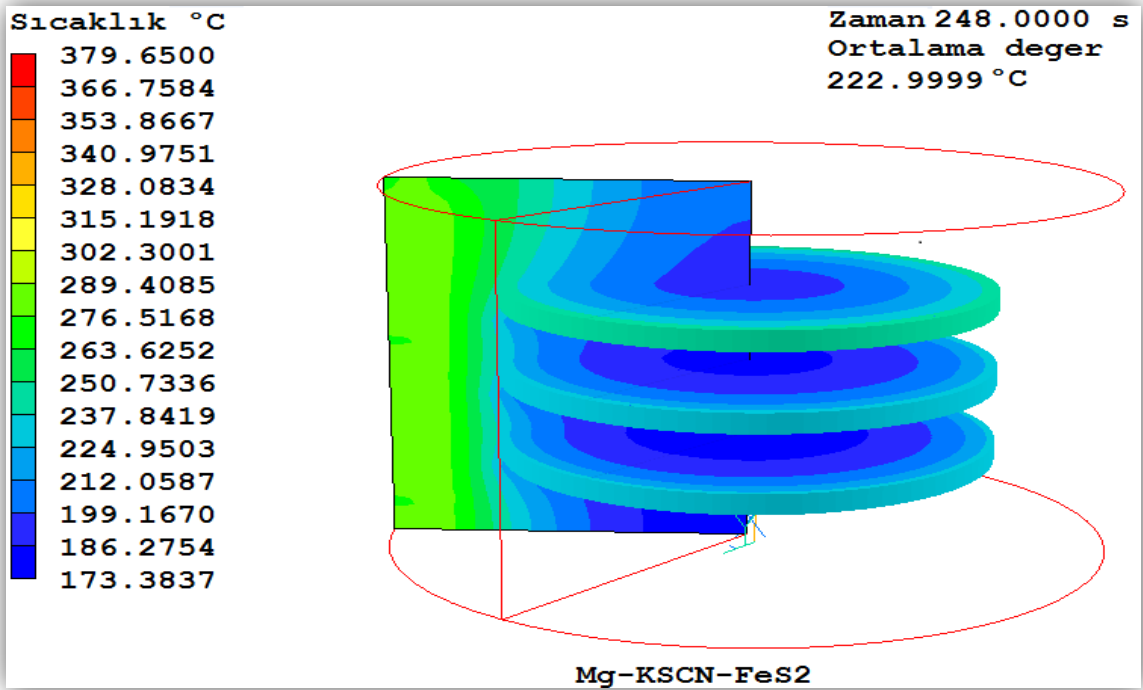
Şekil 3.1. 1. Modülün 2.sn deki sıcaklık dağılımı



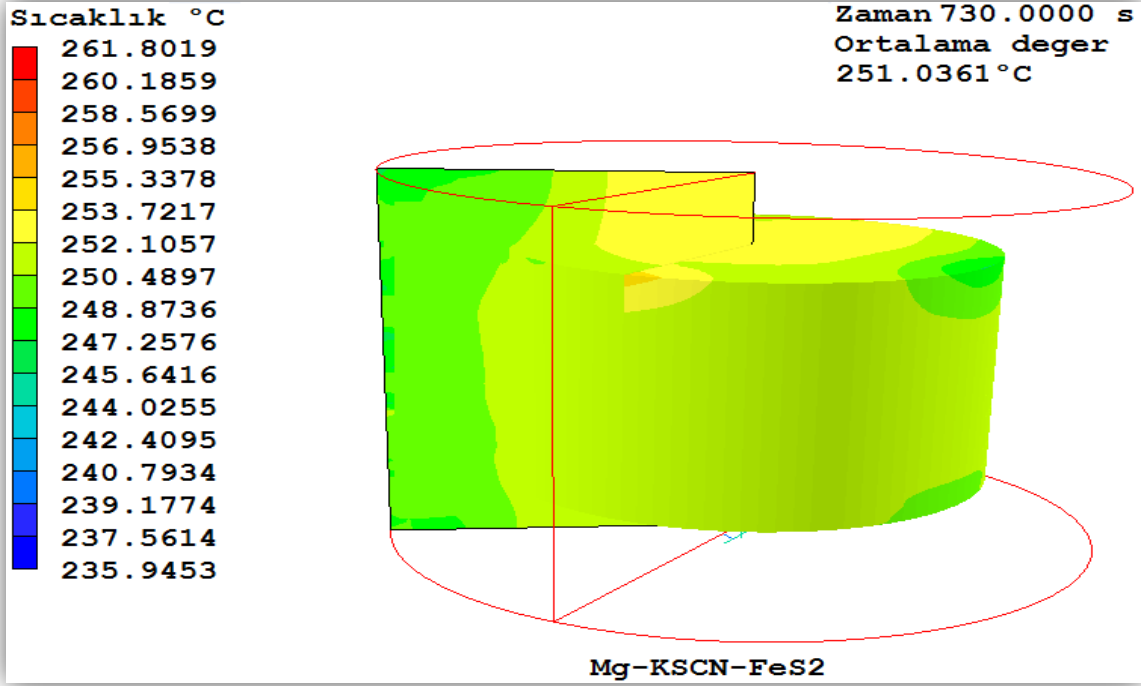
Şekil 3.2. 1. Modüldeki elektrolitlerin 2.sn deki sıcaklık dağılımı



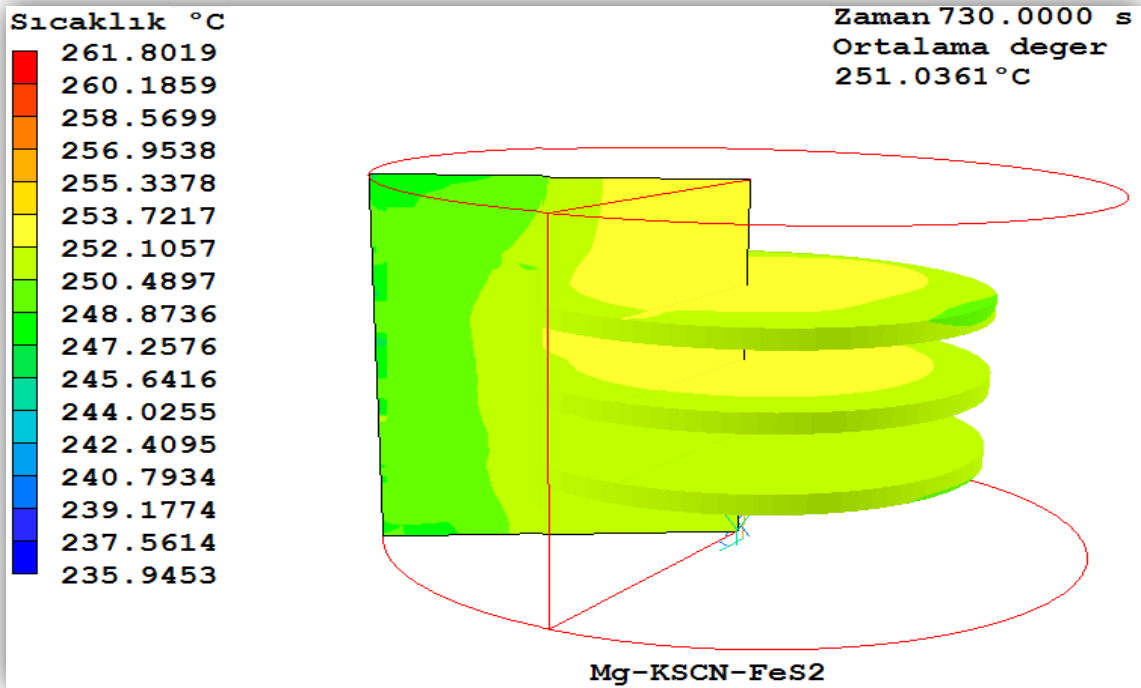
Şekil 3.3. 1. Modülün 248.sn deki sıcaklık dağılımı



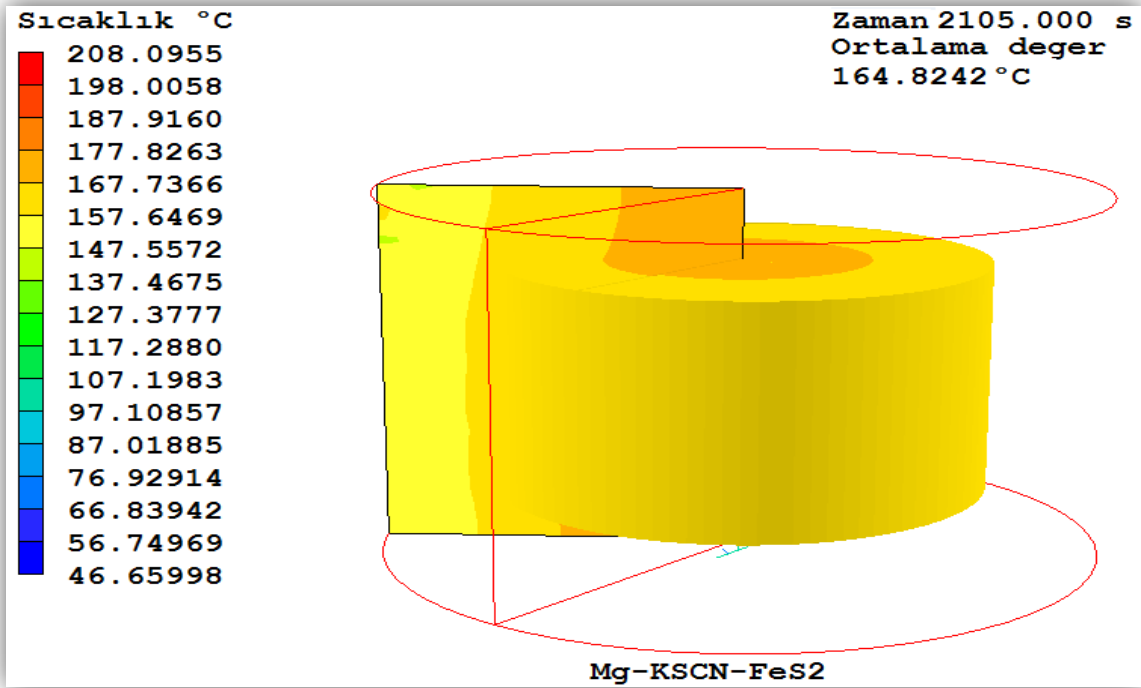
Şekil 3.4. 1. Modüldeki elektrolitlerin 248.sn deki sıcaklık dağılımı



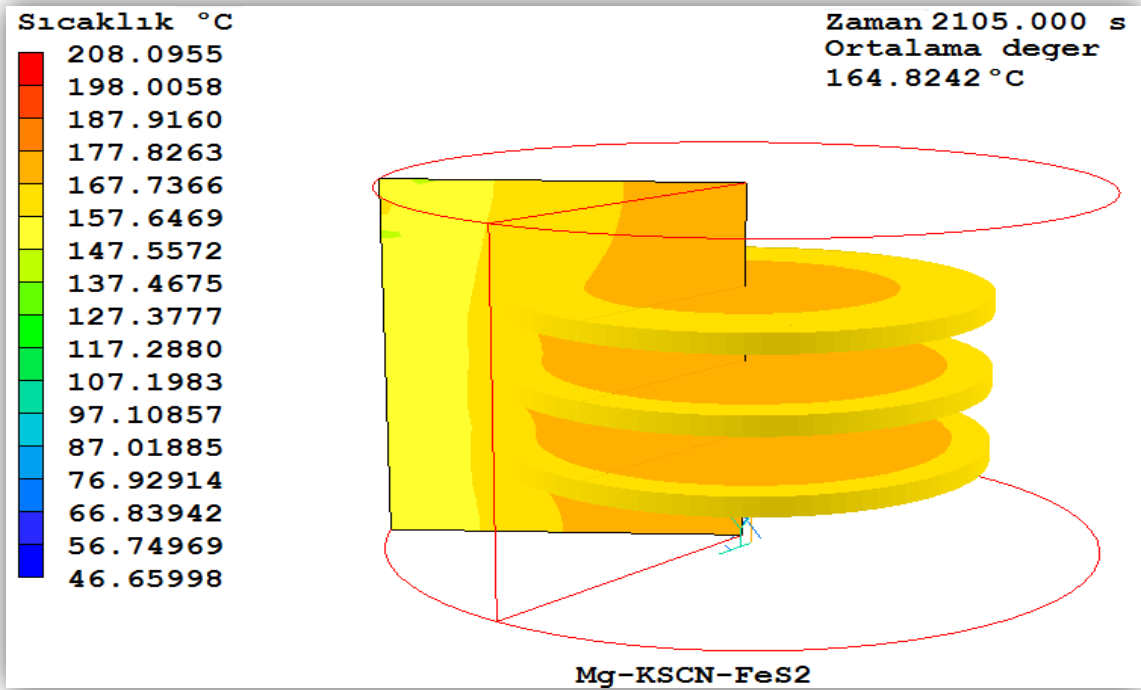
Şekil 3.5. 1. Modülün 730.sn deki sıcaklık dağılımı



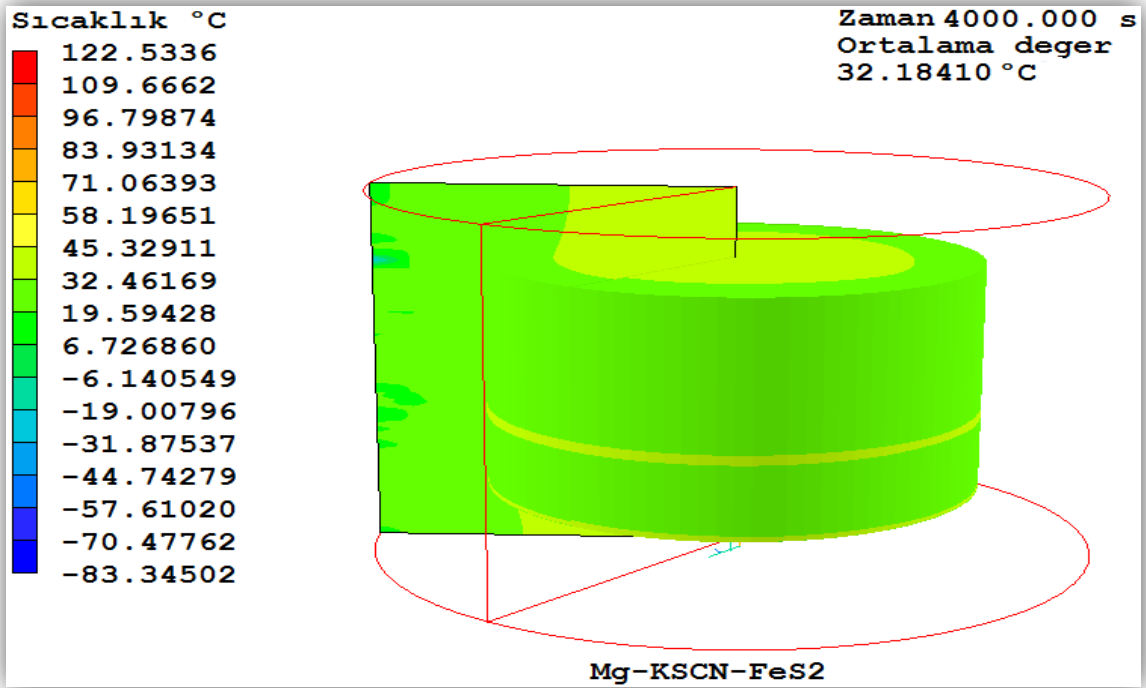
Şekil 3.6. 1. Modüldeki elektrolitlerin 730.sn deki sıcaklık dağılımı



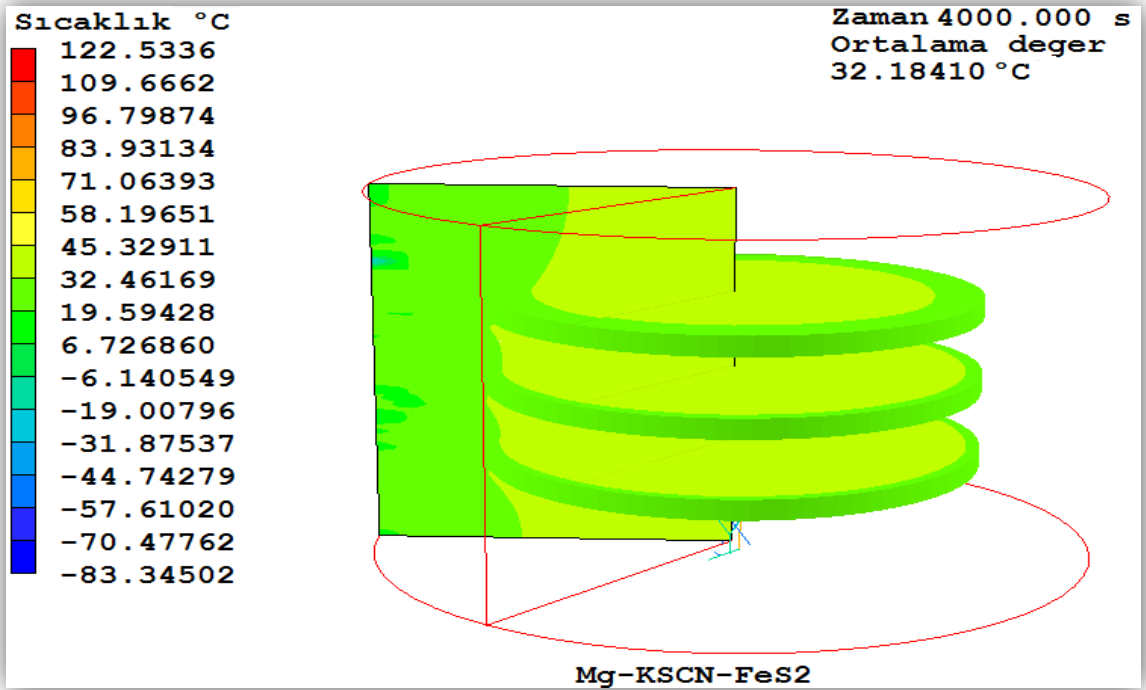
Şekil 3.7. 1. Modülün 2105.sn deki sıcaklık dağılımı



Şekil 3.8. 1. Modüldeki elektrolitlerin 2105.sn deki sıcaklık dağılımı



Şekil 3.9. 1. Modülün 4000.sn deki sıcaklık dağılımı



Şekil 3.10. 1. Modüldeki elektrolitlerin 4000.sn deki sıcaklık dağılımı

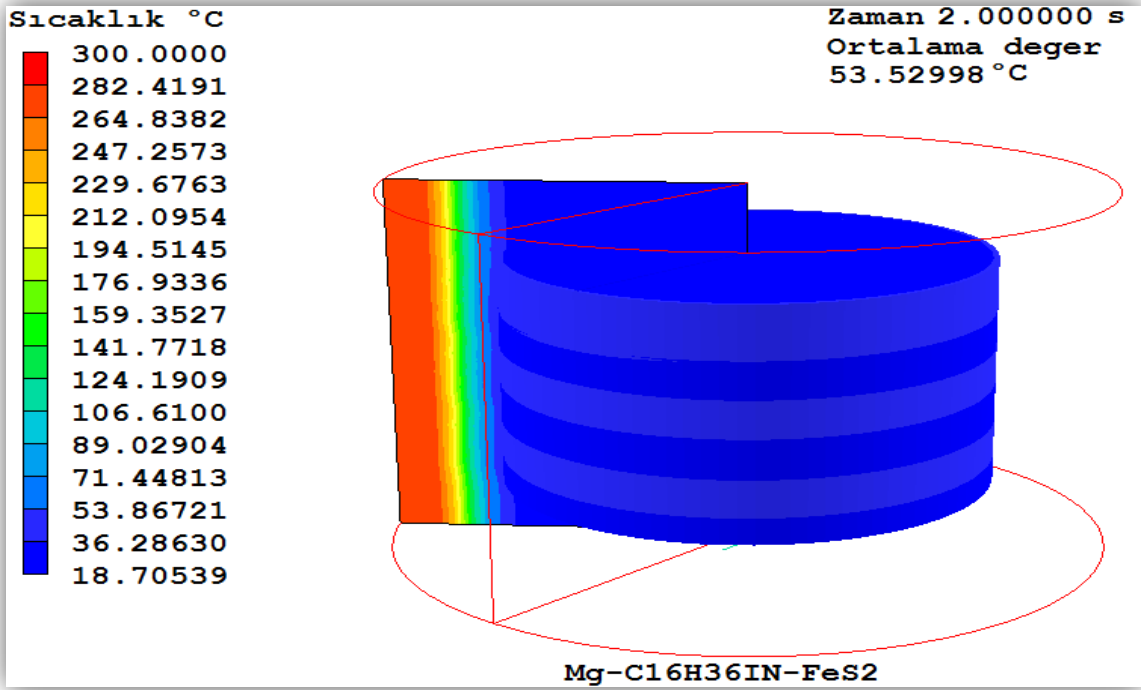
3.1.2. 2. Modül için Isıl Pilin Zamana Bağlı Sıcaklık Haritaları

2. modül analizi için oluşturulan bu modelde anot malzemesi olarak Magnezyum, katot malzemesi olarak Pirit ve elektrolit malzemesi olarak Tetrabütülamonyum İyodür ($C_{12}H_{36}IN$) kullanılmıştır. Sistemin başlangıç sıcaklık değeri $20^{\circ}C$ olarak belirlenmiştir. Isıl pilin dış kabuğu etrafına sarılan ısıtıcı, $300^{\circ}C$ sıcaklık değerinden $20^{\circ}C$ sıcaklığına 4000 sn'de lineer olarak azaltılarak getirilmiştir. Elektrolit olarak kullanılan $C_{16}H_{36}IN$ inorganik tuzu erime noktasındaki sıcaklık değeri $143^{\circ}C$ 'dir. Kullanılan elektrolit malzemesinin boyutları çok küçük seçildiği için meydana gelen erime durumu ihmal edilmiştir. Yapılan analizde iletim ve taşınım ile ısı transferi durumu söz konusudur. Ancak meydana gelen taşınım ile ısı transferi ihmal edilmiştir. Yapılan diğer analizlerde olduğu gibi bu inorganik tuzun kullanıldığı analizde de başlangıç anından itibaren belirli zaman adımlarında tüm pilde ve elektrolitlerde meydana gelen sıcaklık dağılımı incelenmiştir (Şekil 3.11-3.20).

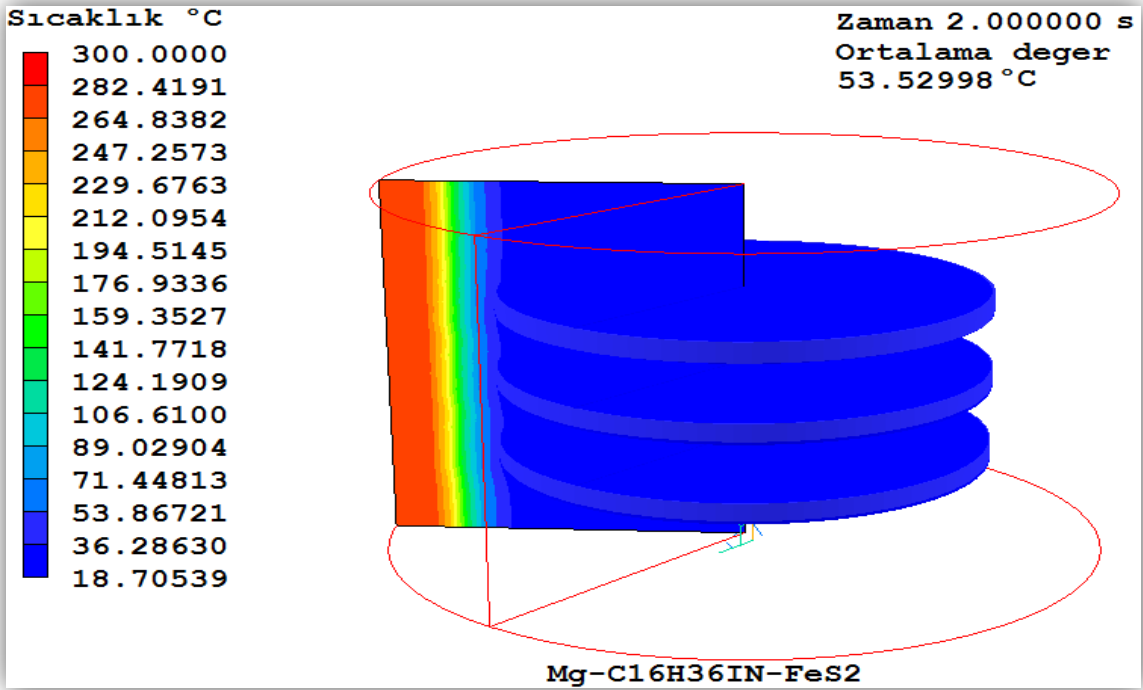
Analiz başlangıcında ($t=2sn$, $T=300^{\circ}C$) elektrolit katı halde bulunmaktadır. Şekil 3.11'de görüldüğü gibi 2.sn'de pil modülü $53.52^{\circ}C$ 'dir. Elektrolit kimyasalları ise oda sıcaklığı olan $20^{\circ}C$ 'dir.

Bu analizde elektrolit kimyasalı erime noktası olan $143^{\circ}C$ 'ye 209.sn'de ulaşmaktadır. Daha öncede belirtildiği gibi pilin hücreleri arasında pil malzemelerinin dizilişi sebebi ile hücreler arasında farklı sıcaklık dağılımları görülmektedir. Şekil 3.13-3.14'te görüldüğü gibi pil maksimum sıcaklık değerine 817.sn de ulaşmaktadır. Pilin ortalama sıcaklık değeri bu zaman adımıyla $248.1363^{\circ}C$ 'dir. 2665.sn'den itibaren elektrolit malzemelerin sıcaklığı erime noktası olan $143^{\circ}C$ 'nin altına düşmüştür. Isıtıcı ve pil içindeki ortalama sıcaklık $131.09^{\circ}C$ 'dir..

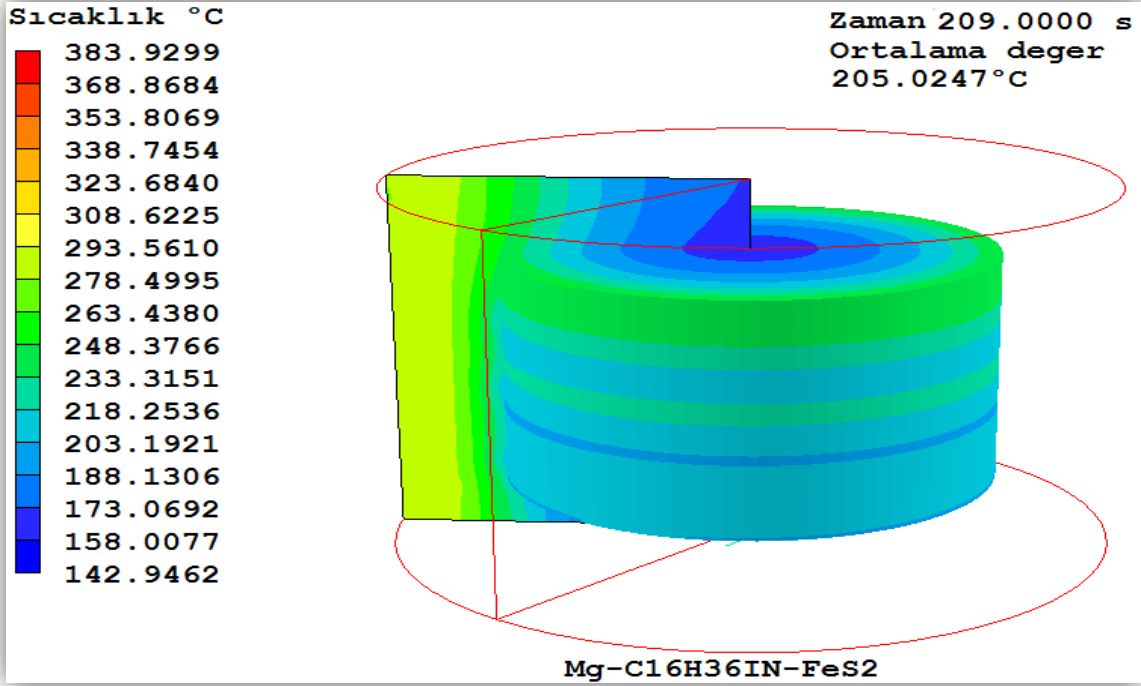
Yapılan analiz 4000.sn'de sonlanmıştır. Şekil 3.19-3.20'de görüldüğü gibi pil sıcaklığı $37^{\circ}C$ 'ye düşmüştür. Isıtıcı yüzey $20^{\circ}C$ 'dir. Analiz bitiminde elektrolitlerdeki sıcaklık değerleri sırasıyla $49.95^{\circ}C$, $49.12^{\circ}C$ ve $46,18^{\circ}C$ olmuştur.



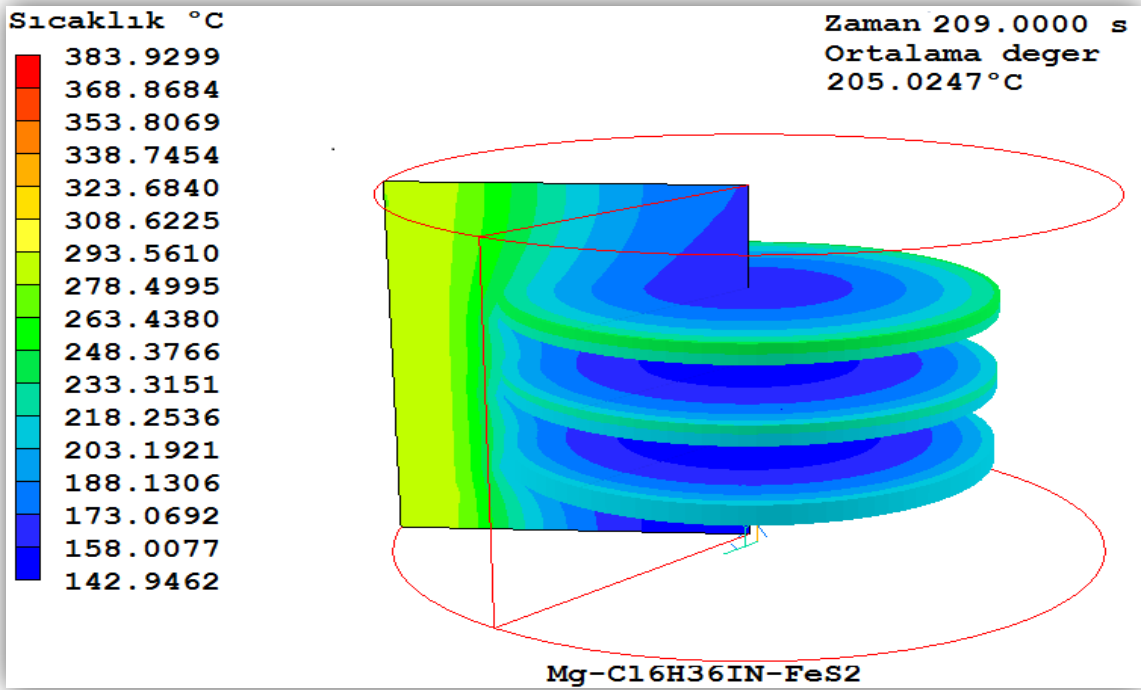
Şekil 3.11. 2. Modülün 2.sn deki sıcaklık dağılımı



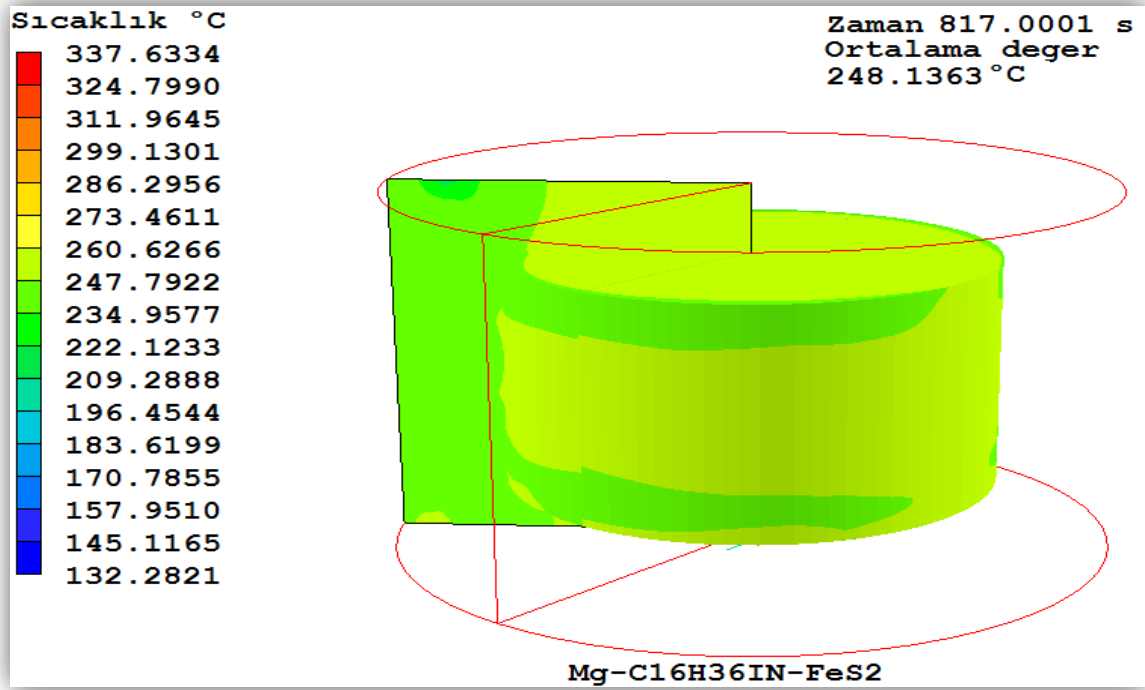
Şekil 3.12. 2. Modüldeki elektrolitlerin 2.sn deki sıcaklık dağılımı



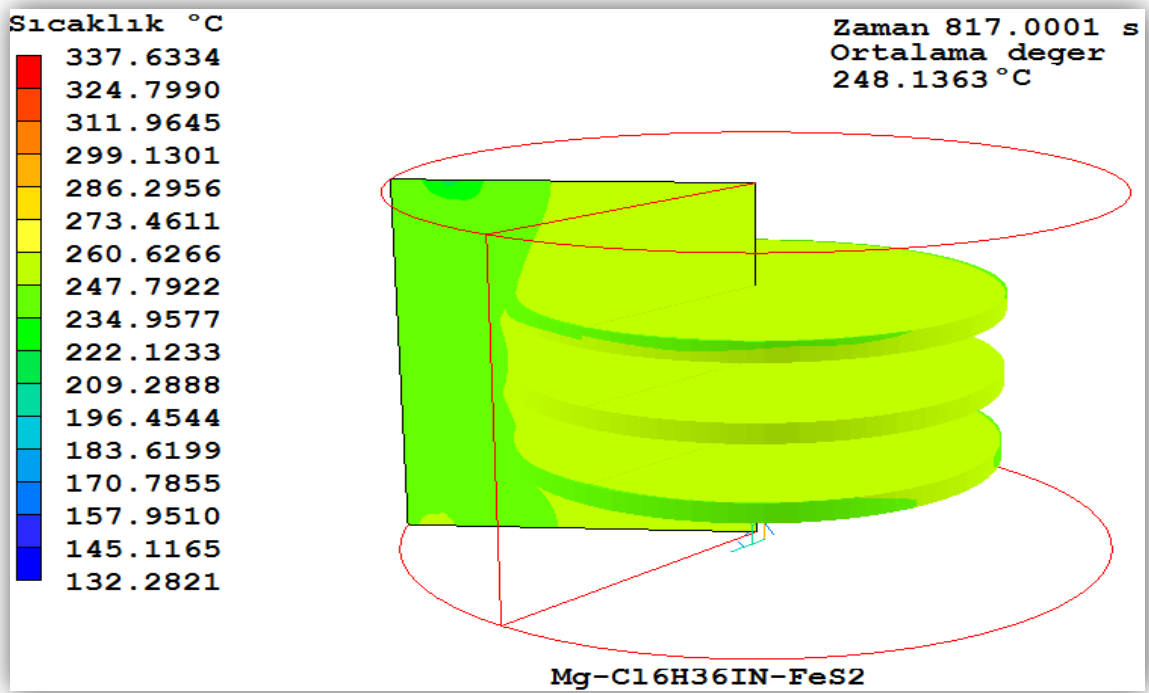
Şekil 3.13. 2. Modülün 209.sn deki sıcaklık dağılımı



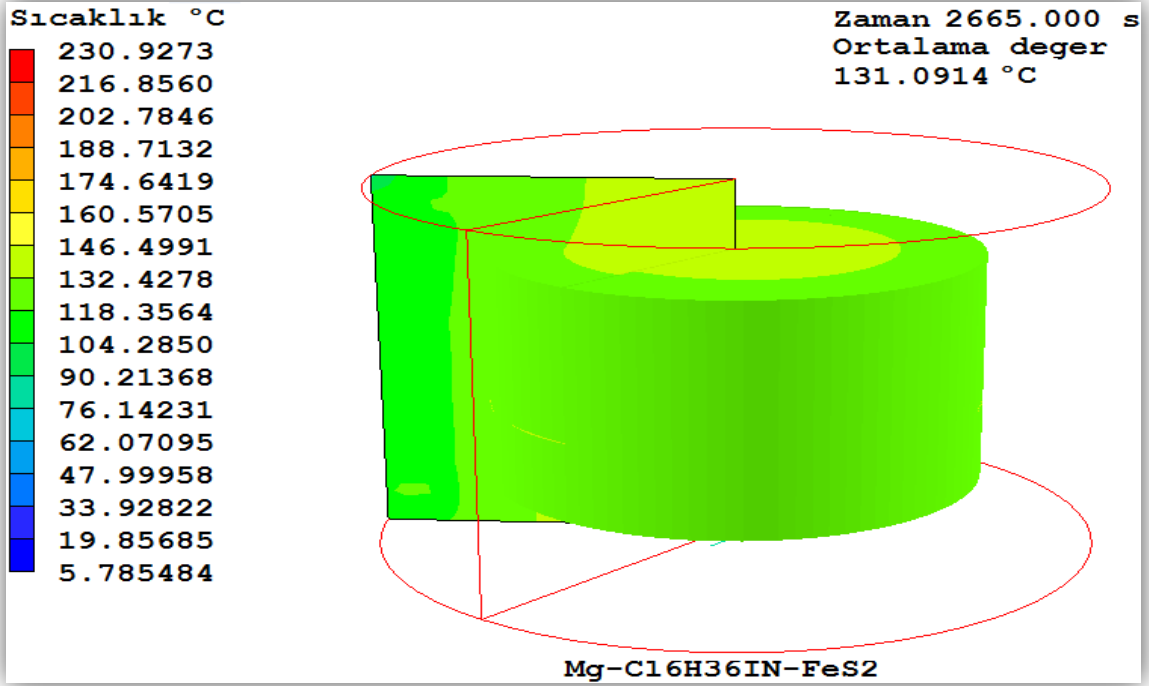
Şekil 3.14. 2. Modüldeki elektrolitlerin 209.sn deki sıcaklık dağılımı



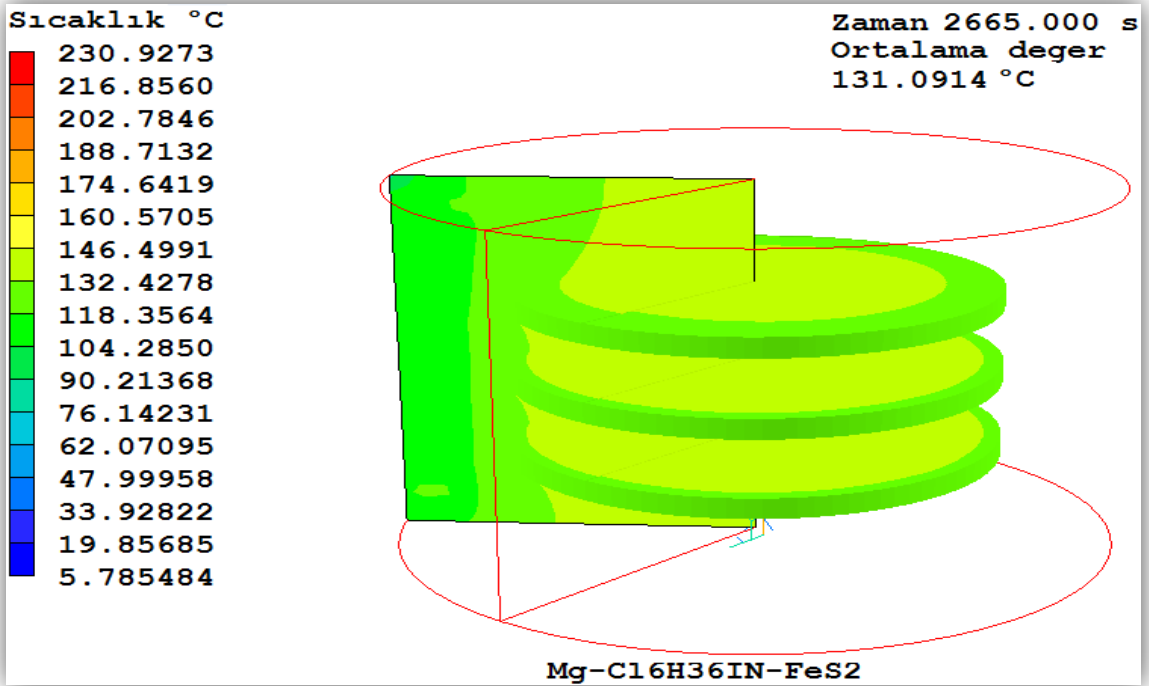
Şekil 3.15. 2. Modülün 817.sn deki sıcaklık dağılımı



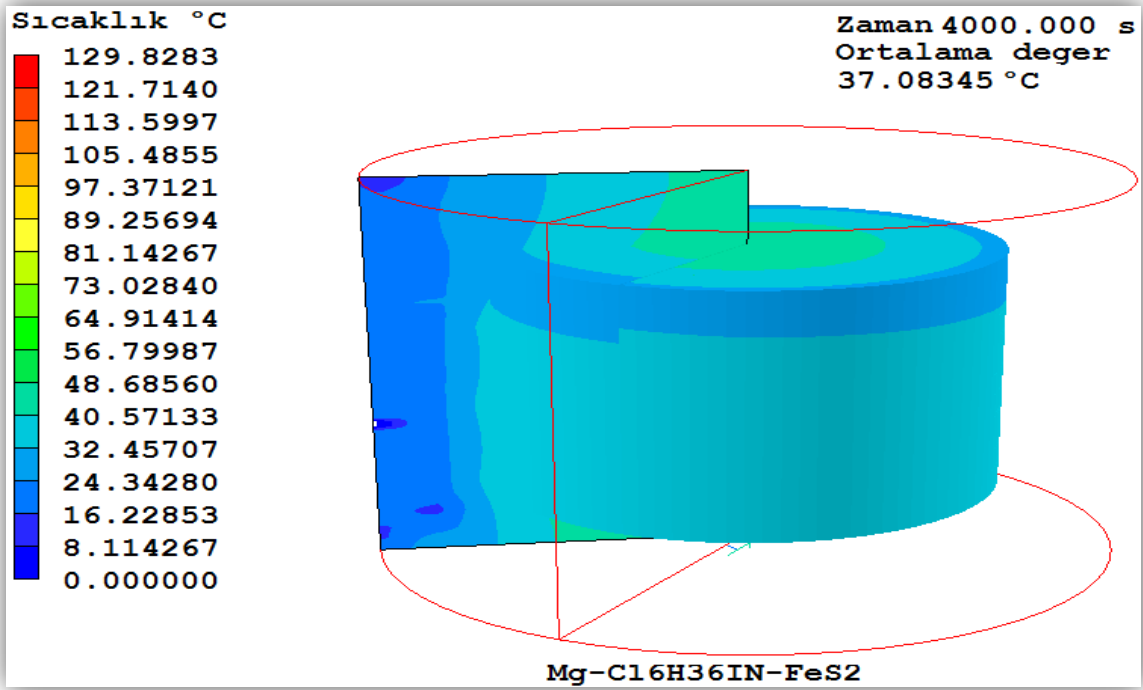
Şekil 3.16. 2. Modüldeki elektrolitlerin 817.sn deki sıcaklık dağılımı



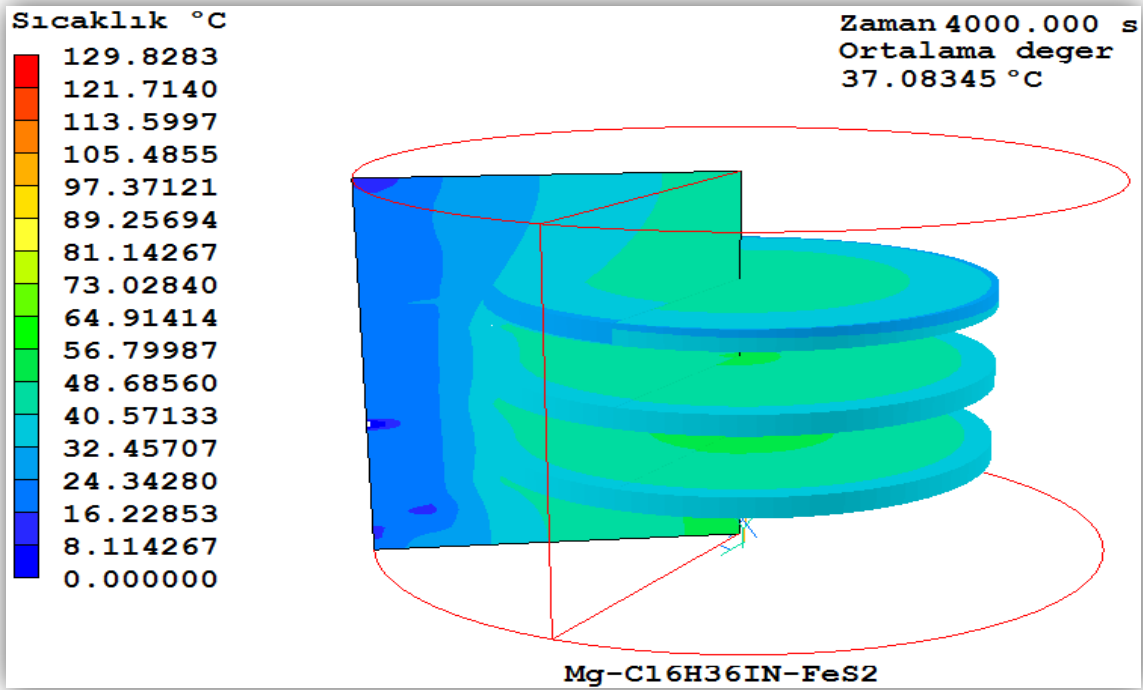
Şekil 3.17. 2. Modülün 2665.sn deki sıcaklık dağılımı



Şekil 3.18. 2. Modüldeki elektrolitlerin 2665.sn deki sıcaklık dağılımı



Şekil 3.19. 2. Modülün 4000.sn deki sıcaklık dağılımı



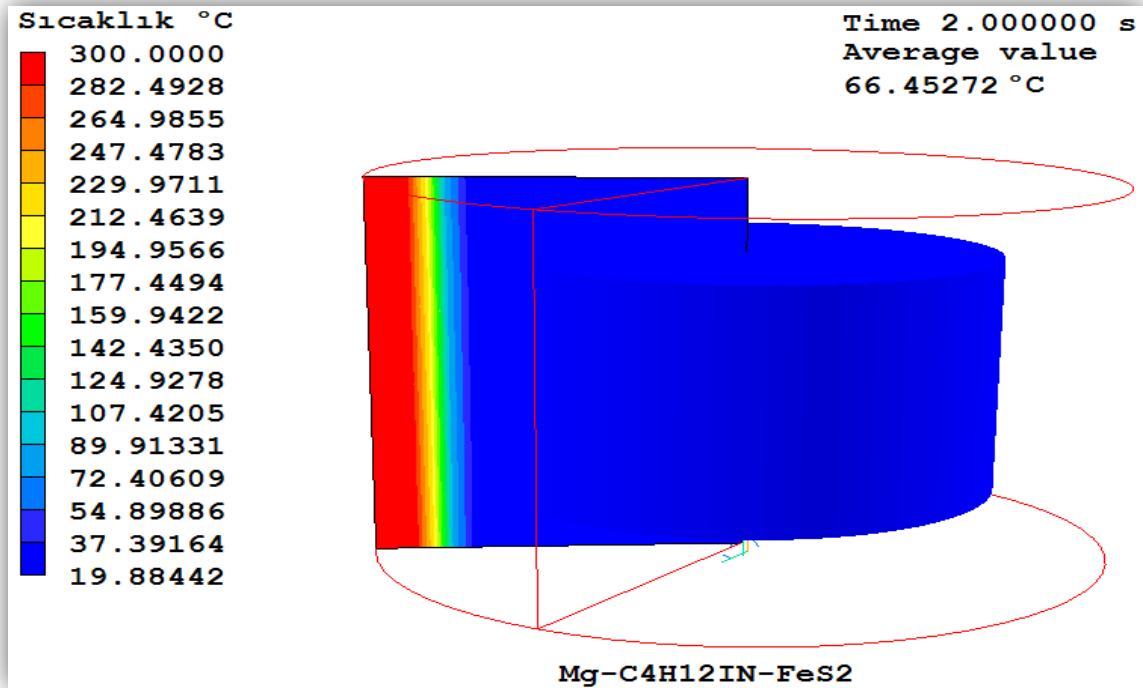
Şekil 3.20. 2. Modüldeki elektrolitlerin 4000.sn deki sıcaklık dağılımı

3.1.3. 3. Modül için Isıl Pilin Zamana Bağlı Sıcaklık Haritaları

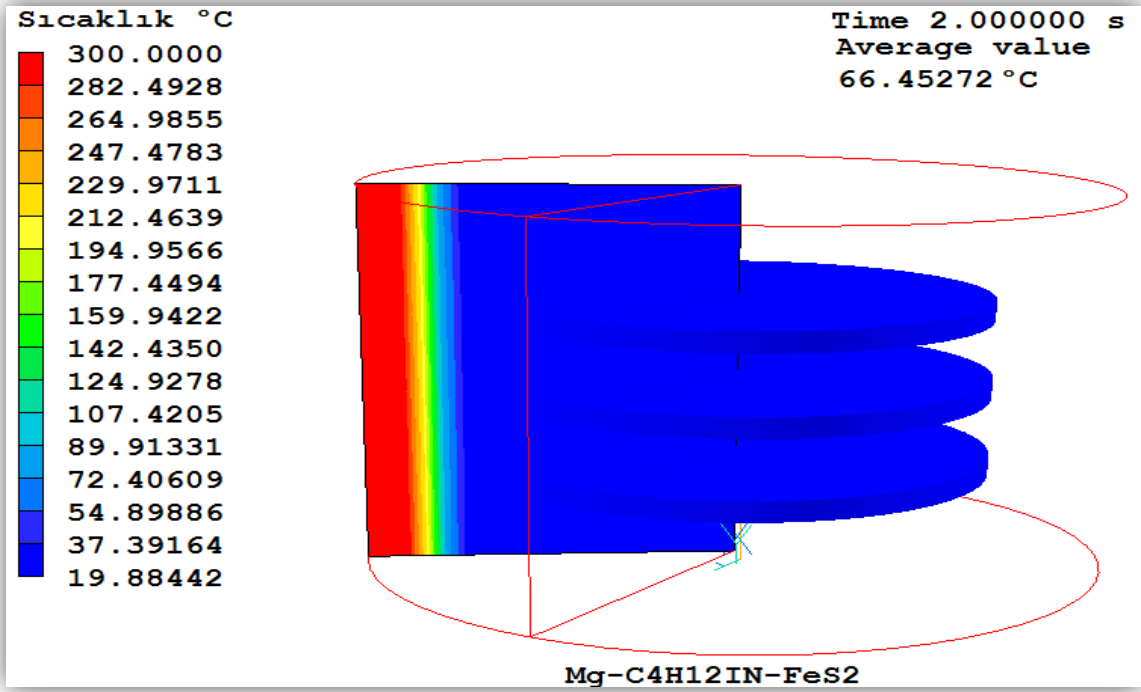
Bu çalışmada anot malzemesi olarak Magnezyum (Mg), katot malzemesi olarak Pirit (FeS_2) ve elektrolit malzemesi olarak Tetrametilamonyum iyodür ($\text{C}_4\text{H}_{12}\text{IN}$) kullanılmıştır. Isıtıcıya lineer azalan sıcaklık değeri verilerek modülün sıcaklık dağılımı incelenmiştir. Modülün başlangıç sıcaklığı $20\text{ }^\circ\text{C}$ 'dir. Isıtıcı sıcaklığı $300\text{ }^\circ\text{C}$ 'den $20\text{ }^\circ\text{C}$ 'ye lineer olarak azaltılmıştır.

Elektrolit olarak kullanılan kimyasalın erime noktası $300\text{ }^\circ\text{C}$ 'dir. Analiz başlangıcında ısıtıcı sıcaklığı $300\text{ }^\circ\text{C}$ olmasına rağmen zamanla sıcaklık değeri azaltıldığı için malzeme erime noktasındaki sıcaklık değerine ulaşamamıştır. Bu sebeple analizin başlangıç anı, pil modülünün maksimum sıcaklık anı ve analizin bitiş anı dikkate alınarak sıcaklık haritaları verilmiştir.

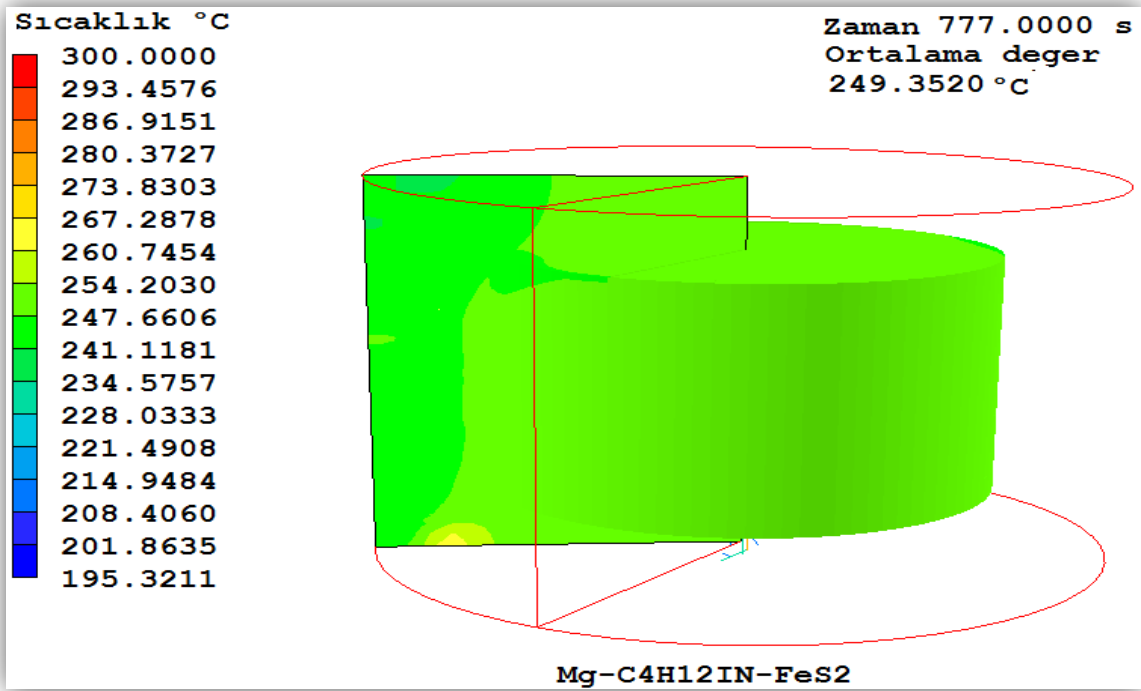
Pil modülünün ve elektrolit kimyasallarının başlangıç sanındaki sıcaklıkları sırasıyla $66.45\text{ }^\circ\text{C}$ ve $20\text{ }^\circ\text{C}$ 'dir. Şekil 3.23'de verilen analizin 777.sn'de pil maksimum sıcaklık değeri olan $249.35\text{ }^\circ\text{C}$ 'ye ulaşmıştır. Bu zaman adımında elektrolitlerin sıcaklıkları sırasıyla $251\text{ }^\circ\text{C}$, $251.3\text{ }^\circ\text{C}$ ve $251.7\text{ }^\circ\text{C}$ olmuştur. 777.sn'den itibaren pil içerisinde ısıtıcı malzemenin sıcaklığına bağlı olarak sıcaklık değerleri düşmektedir. Analizin sonuç adımı olan 4000.sn'de, pil sıcaklığı $32,46\text{ }^\circ\text{C}$ 'dir.



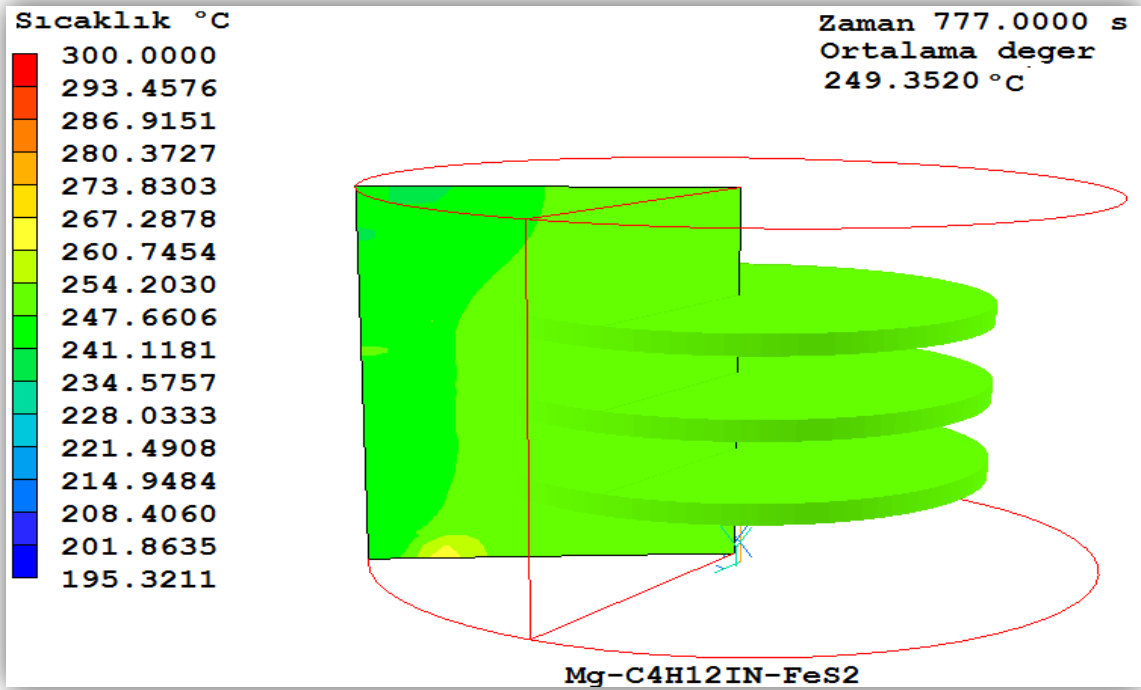
Şekil 3.21. 3. Modülün 2.sn deki sıcaklık dağılımı



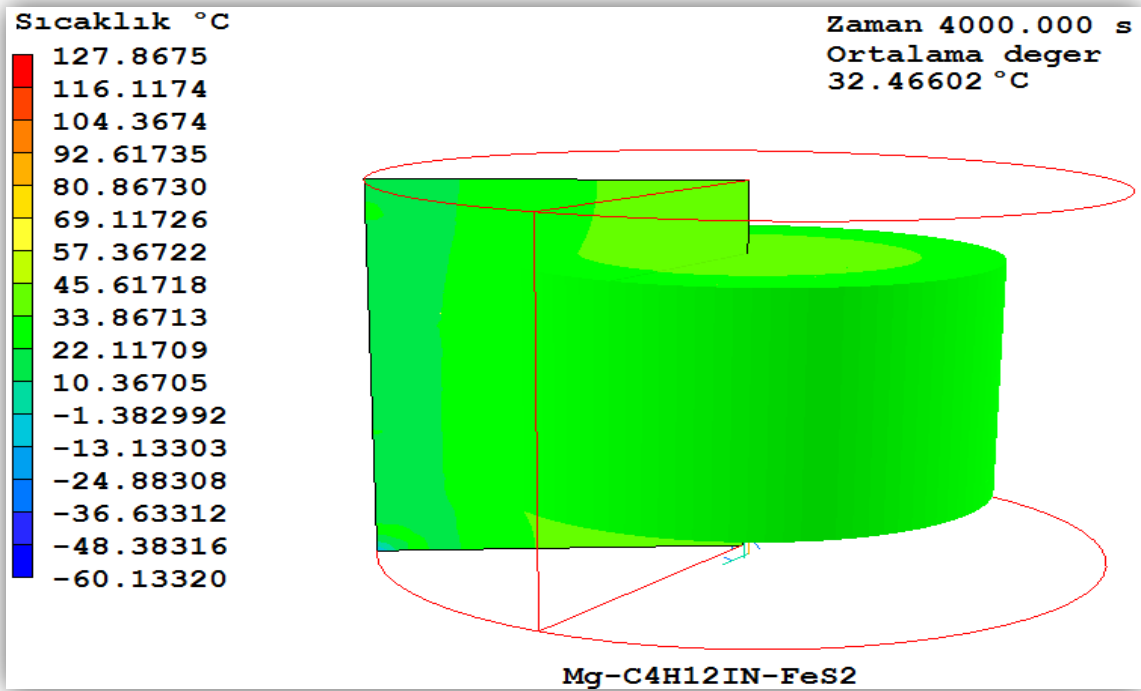
Şekil 3.22. 3. Modüldeki elektrolitlerin 2.sn deki sıcaklık dağılımı



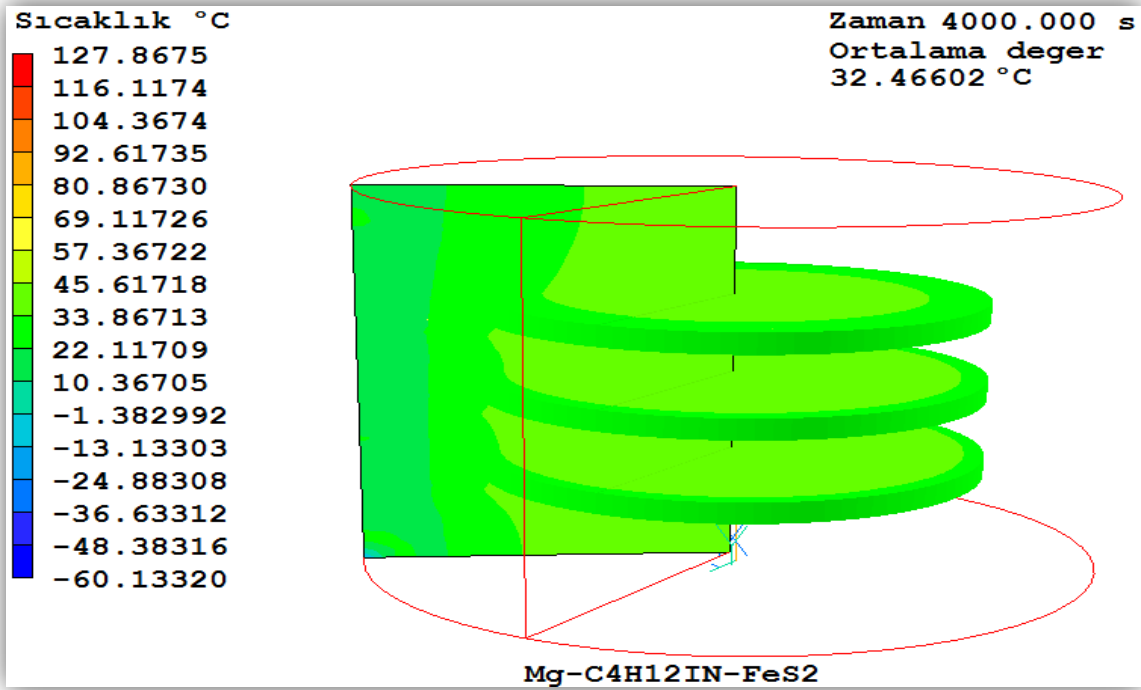
Şekil 3.23. 3. Modülün 777.sn deki sıcaklık dağılımı



Şekil 3.24. 3. Modüldeki elektrolitlerin 777.sn deki sıcaklık dağılımı



Şekil 3.25. 3. Modülün 4000.sn deki sıcaklık dağılımı



Şekil 3.26. 3. Modüldeki elektrolitlerin 4000.sn deki sıcaklık dağılımı

3.1.4. 4. Modül için Isıl Pilin Zamana Bağlı Sıcaklık Haritaları

4. Modül için yapılan bu çalışmada anot malzemesi olarak Magnezyum (Mg), katot malzemesi olarak Pirit (FeS_2) ve elektrolit malzemesi olarak Tetrabutylamonyum Bromit ($\text{C}_{16}\text{H}_{36}\text{BrN}$) kullanılmıştır. Elektrolit olarak kullanılan $\text{C}_{16}\text{H}_{36}\text{BrN}$ kimyasalının erime noktası $103\text{ }^\circ\text{C}$ 'dir. Sistemin başlangıç sıcaklığı $20\text{ }^\circ\text{C}$ 'dir. Isıtıcı $300\text{ }^\circ\text{C}$ 'den oda sıcaklığına ulaşana kadar 4000 sn zamana bağlı olarak soğutulmuştur.

$\text{C}_{16}\text{H}_{36}\text{BrN}$ elektrolit kimyasal malzemesi için hazırlanan bu modülde analiz başlangıcında ısıtıcı sıcaklığı $300\text{ }^\circ\text{C}$ 'dir. Modülün ortalama sıcaklık değeri $53.52\text{ }^\circ\text{C}$ dir. Şekil 3.28'de analiz 2.sn de elektrolitlerin sıcaklık dağılım haritası verilmiştir. Analizin başlangıç anında elektrolit kimyasal malzemelerinin sıcaklık değerleri $20\text{ }^\circ\text{C}$ 'dir.

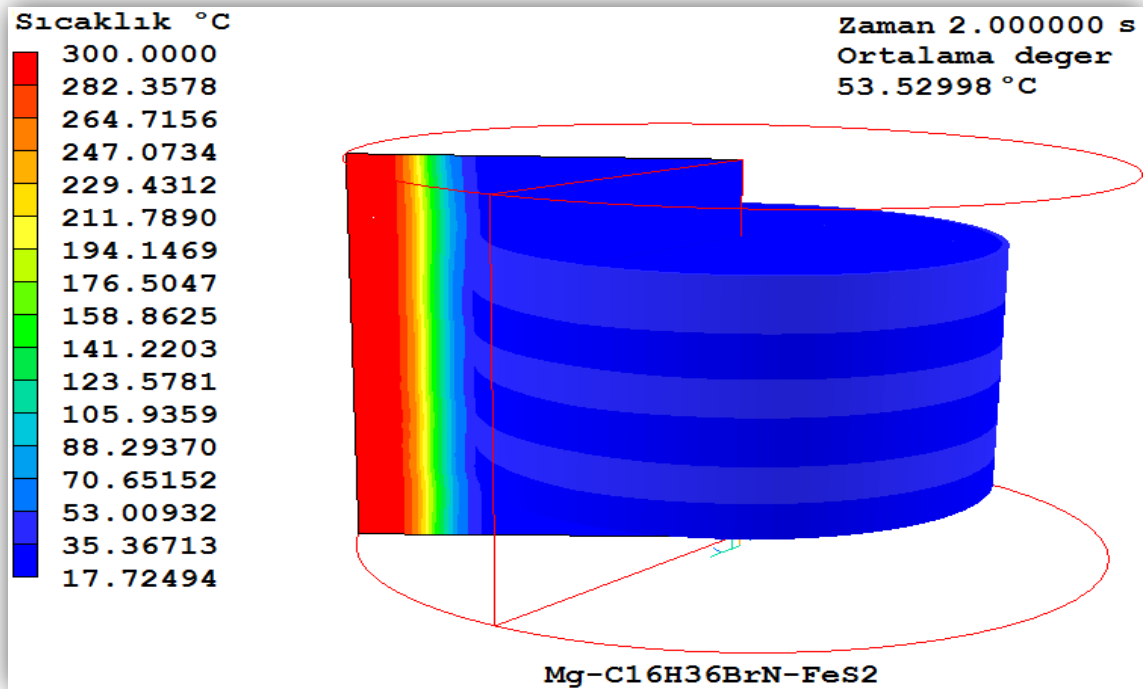
103.sn de ısıtıcı sıcaklığı 300°C 'den 275°C 'ye düşmüştür. Pil modülünün ortalama sıcaklık değeri 159.11°C olmuştur. Şekil 3.29'da görüldüğü gibi, ısıtıcı malzeme dış kabuğun etrafında olduğu için pilin dış kabuğuna yakın olan yüzeylerinden iç kısma doğru sıcaklık değerleri azalmaktadır.

Bu analiz için pilin iç sıcaklık değerinin azamaya başladığı zaman adımı 725.sn'dir. 1.hücrenin elektrolit kimyasalı 725.sn'de $250.51\text{ }^\circ\text{C}$ iken 2.hücrede $251.6\text{ }^\circ\text{C}$ ve 3.hücrede

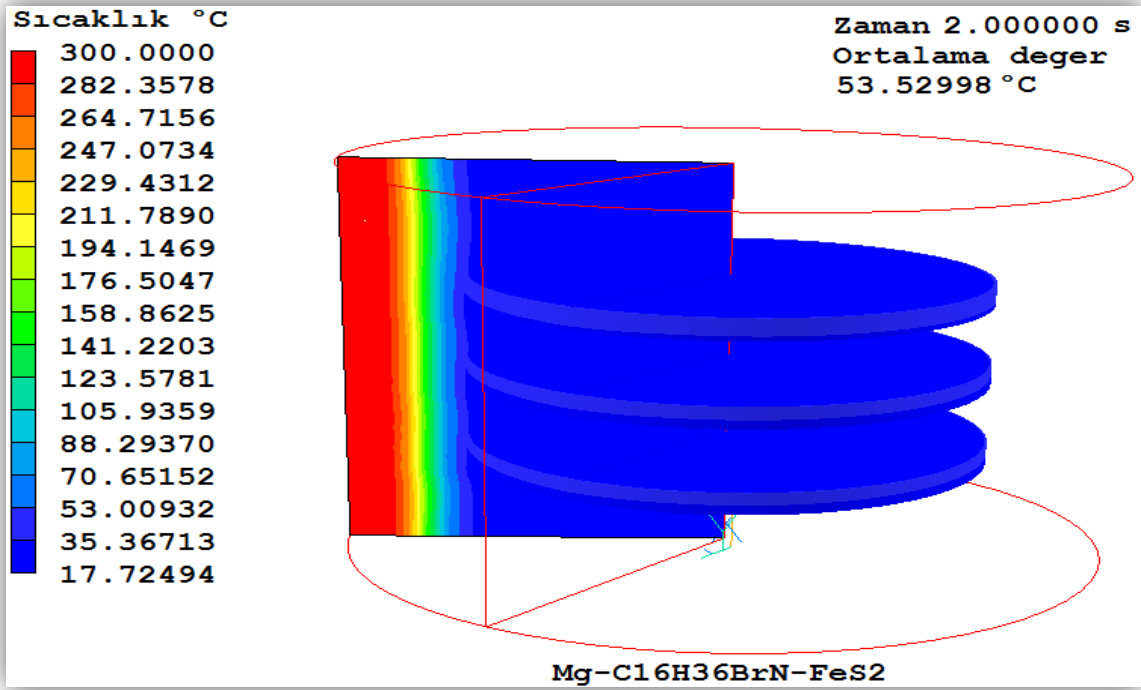
252.59 °C olmuştur. Isıtıcı 253 °C'ye düşmüştür ve pil maksimum sıcaklık değerine ulaşmıştır.

3235.sn de elektrolit kimyasal malzemesi olan $C_{16}H_{36}BrN$ peleti erime noktasındaki sıcaklık değeri olan 103 °C'nin altına düşmüştür. Pil modelinde kullanılan her 3 elektrolitinde bu zaman adımında sıcaklık değeri yaklaşık 149 °C olmuştur.

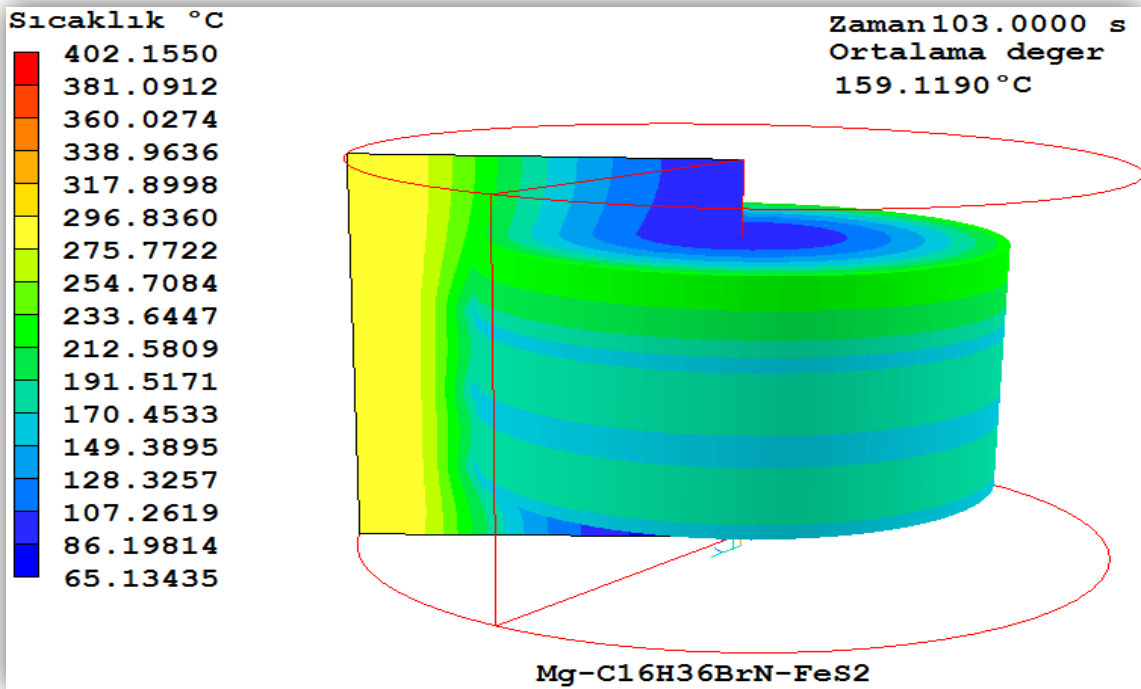
4000.sn için pil modülünün sıcaklık dağılımı Şekil 3.36'da elektrolitlerin sıcaklık dağılımı Şekil 3.37'de verilmiştir. Pil dış kabuğuna sarılan ısıtıcı yüzeyin sıcaklığı 20 °C'ye düşerken modeldeki ortalama sıcaklık değeri 37 °C olmuştur. Pilin dış kabuğuna yakın olan kısımlarda ise soğumanın daha iyi gerçekleştiği ve sıcaklığın yaklaşık 25 °C'ye düştüğü görülmektedir.



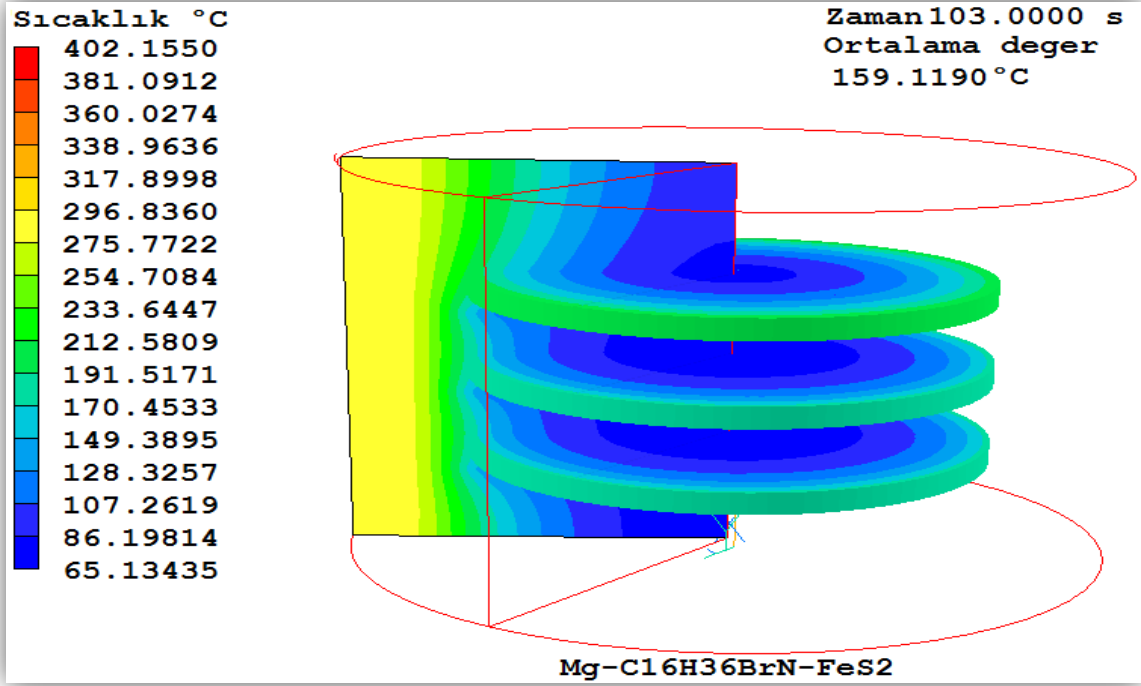
Şekil 3.27. 4. Modülün 2.sn deki sıcaklık dağılımı



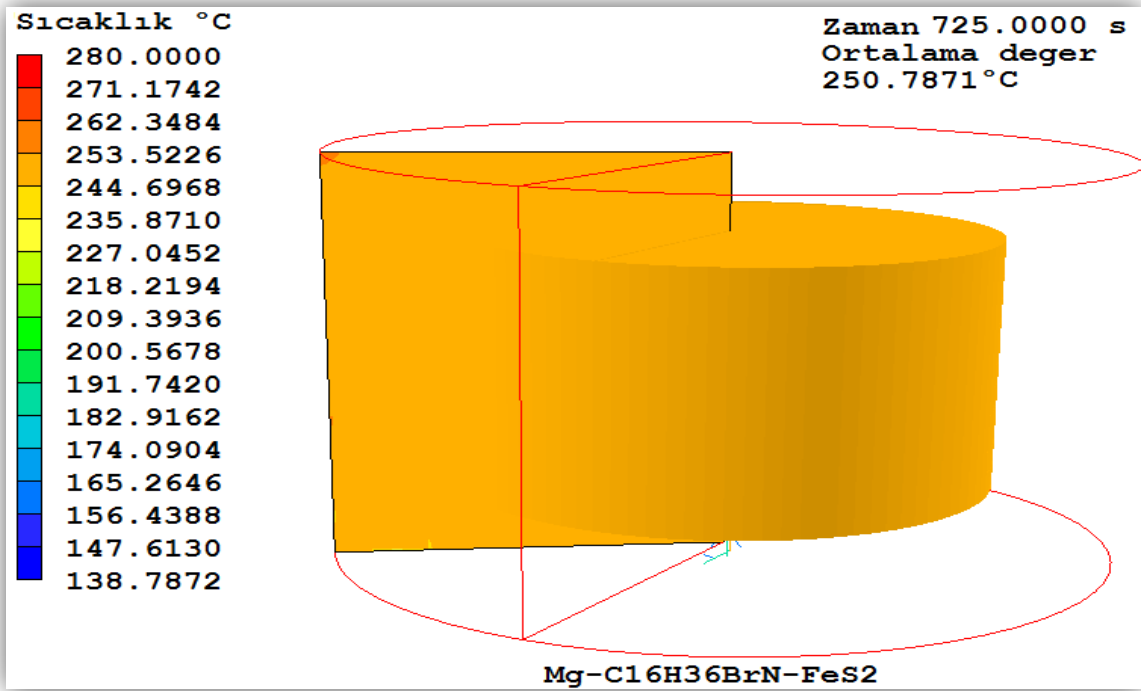
Şekil 3.28. 4. Modüldeki elektrolitlerin 2.sn deki sıcaklık dağılımı



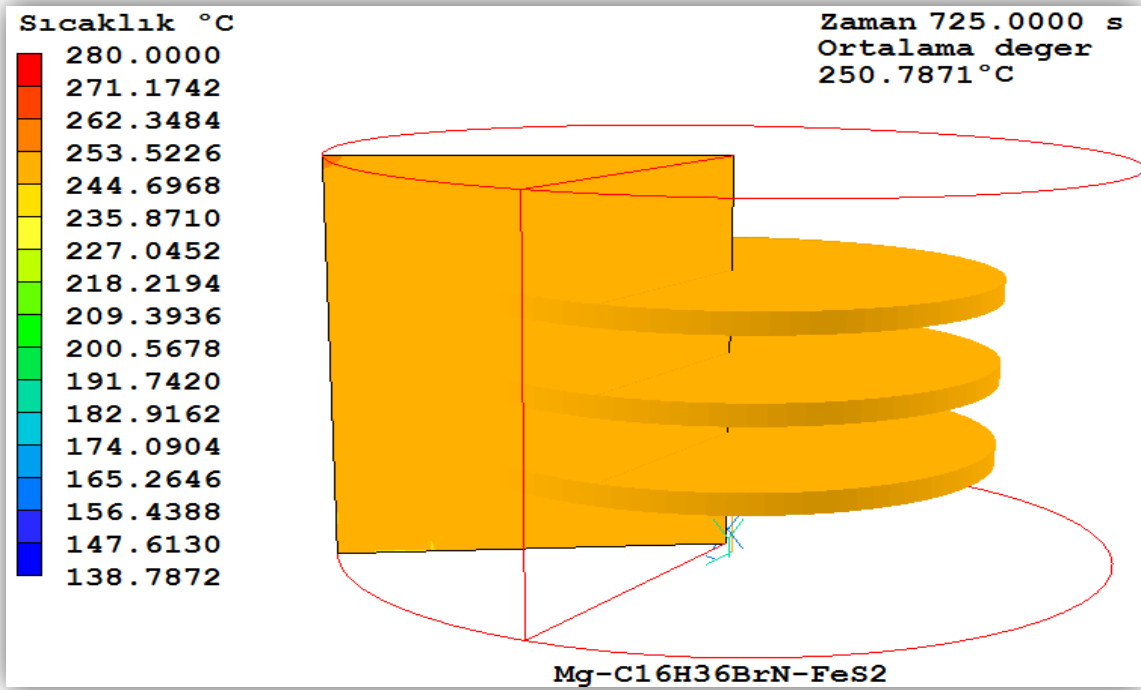
Şekil 3.29. 4. Modülün 103.sn deki sıcaklık dağılımı



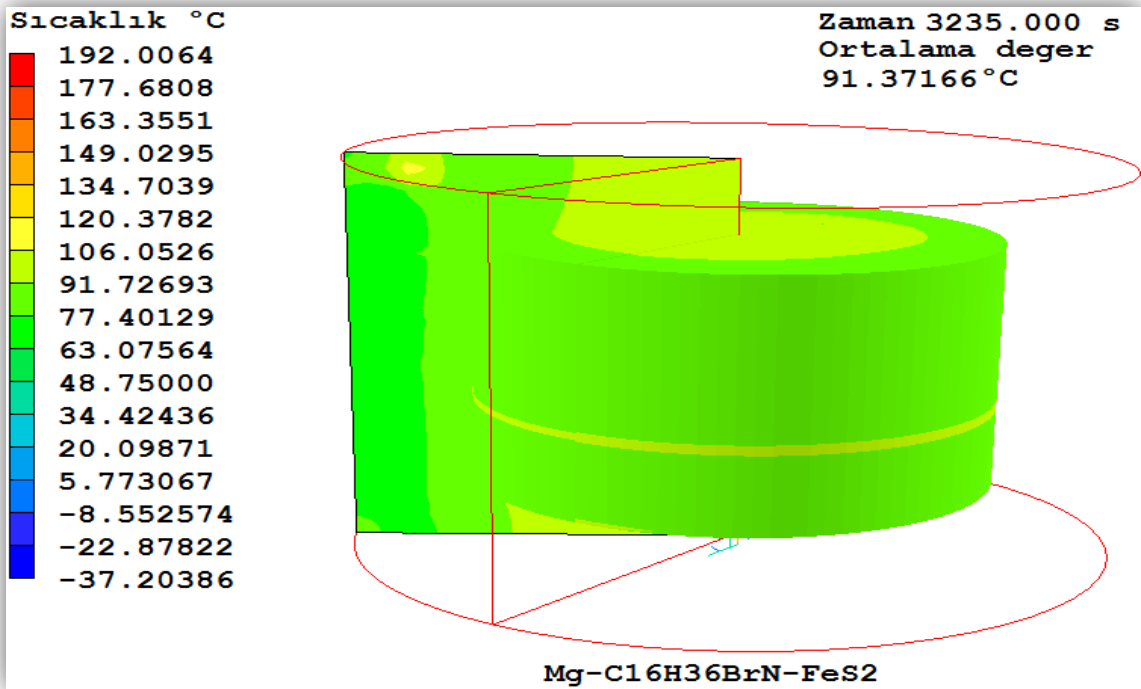
Şekil 3.30. 4. Modüldeki elektrolitlerin 103.sn deki sıcaklık dağılımı



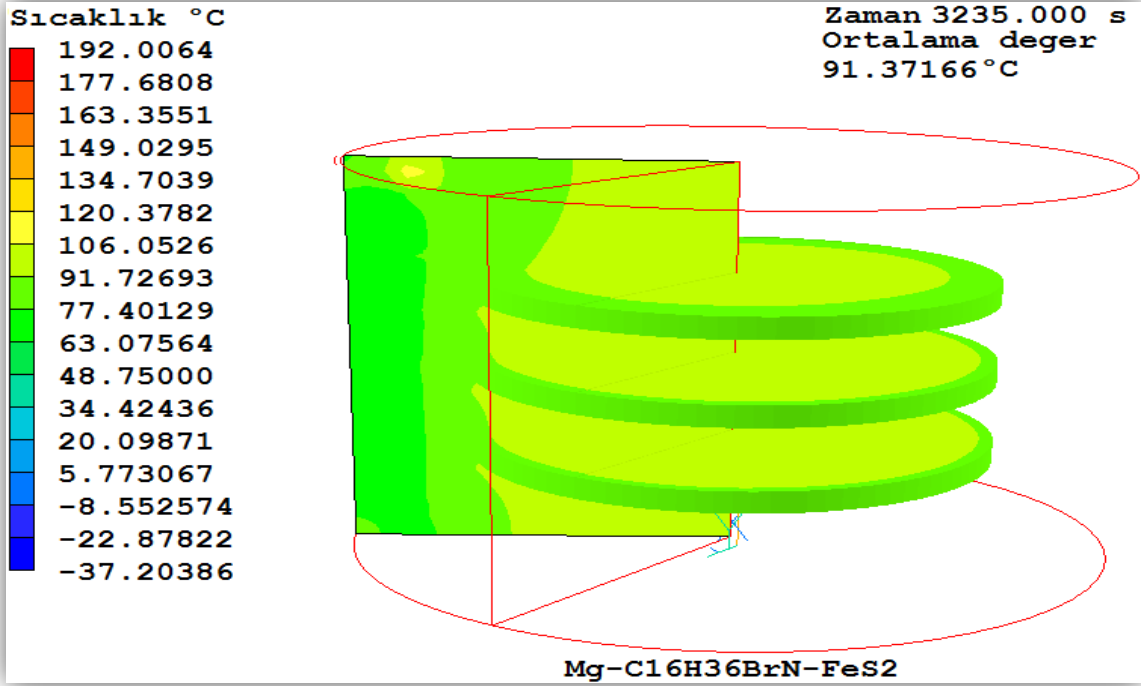
Şekil 3.31. 4. Modülün 725.sn deki sıcaklık dağılımı



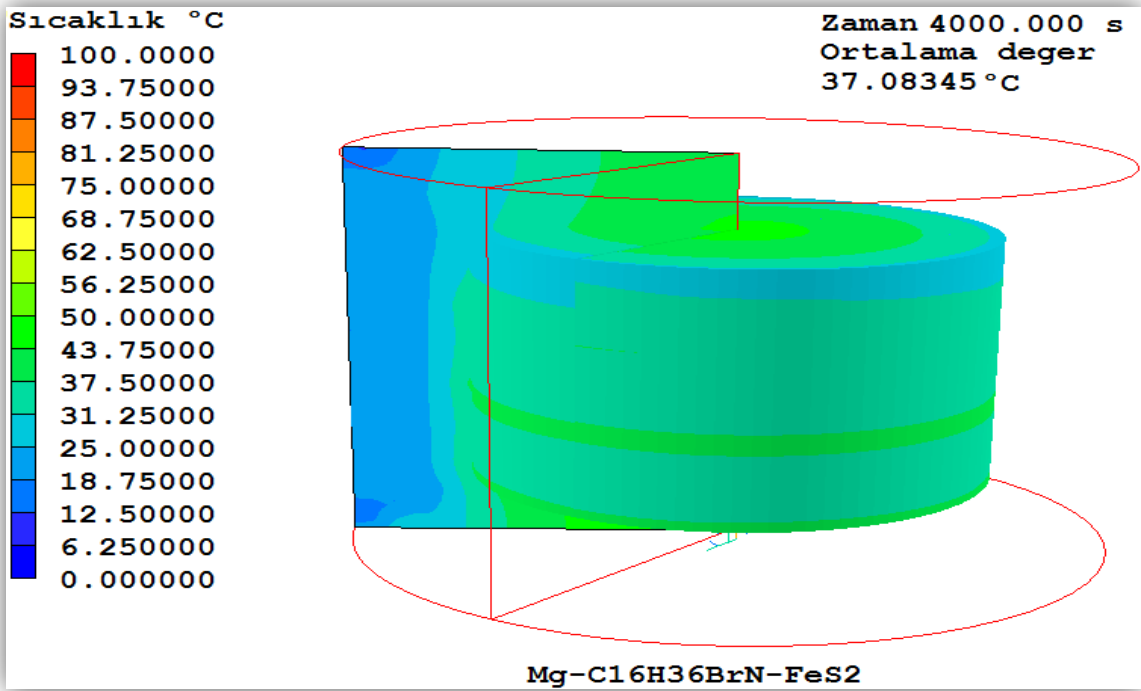
Şekil 3.32. 4. Modüldeki elektrolitlerin 725.sn deki sıcaklık dağılımı



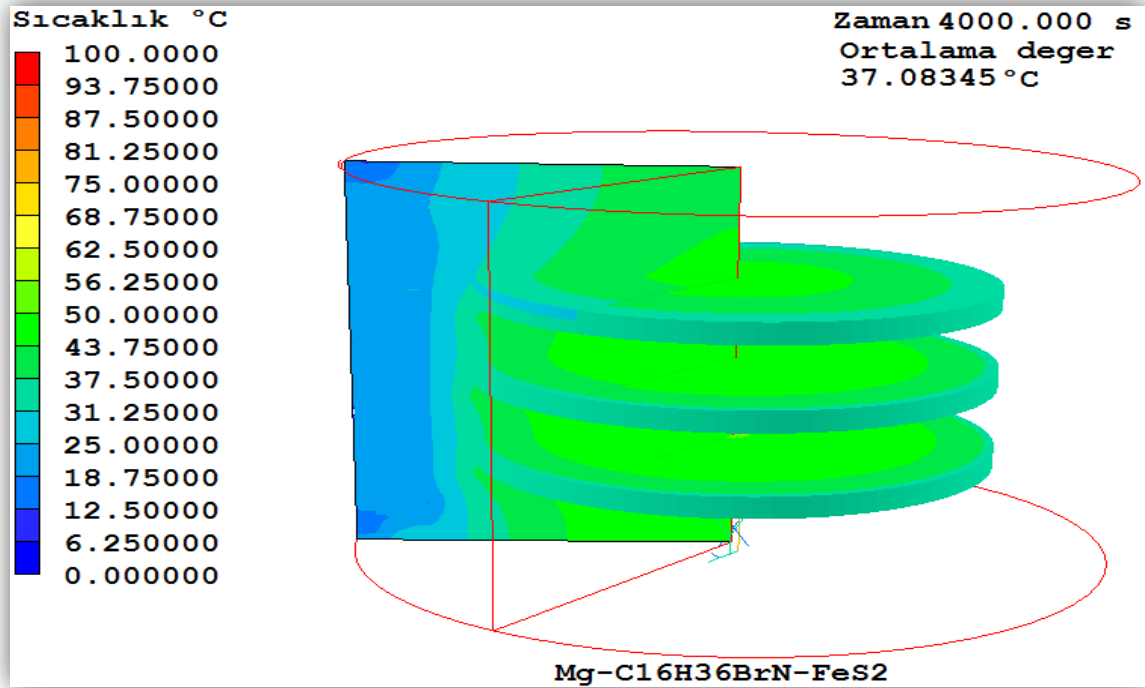
Şekil 3.33. 4. Modülün 3235.sn deki sıcaklık dağılımı



Şekil 3.34. 4. Modüldeki elektrolitlerin 3235.sn deki sıcaklık dağılımı



Şekil 3.35. 4. Modülün 4000.sn deki sıcaklık dağılımı



Şekil 3.36. 4. Modüldeki elektrolitlerin 4000.sn deki sıcaklık dağılımı

3.1.5. 5. Modül için Isıl Pilin Zamana Bağlı Sıcaklık Haritaları

Bu modülde anot malzemesi olarak Magnezyum (Mg), katot malzemesi olarak Pirit (FeS_2) ve elektrolit malzemesi olarak Tetrabutylamonyum heksaflorofosfat ($\text{C}_{16}\text{H}_{36}\text{F}_6\text{NP}$) kullanılmıştır. Elektrolit olarak kullanılan $\text{C}_{16}\text{H}_{36}\text{F}_6\text{NP}$ kimyasalının erime noktası 246°C 'dir. Isıtıcı analiz başlangıcında 300°C 'dir.

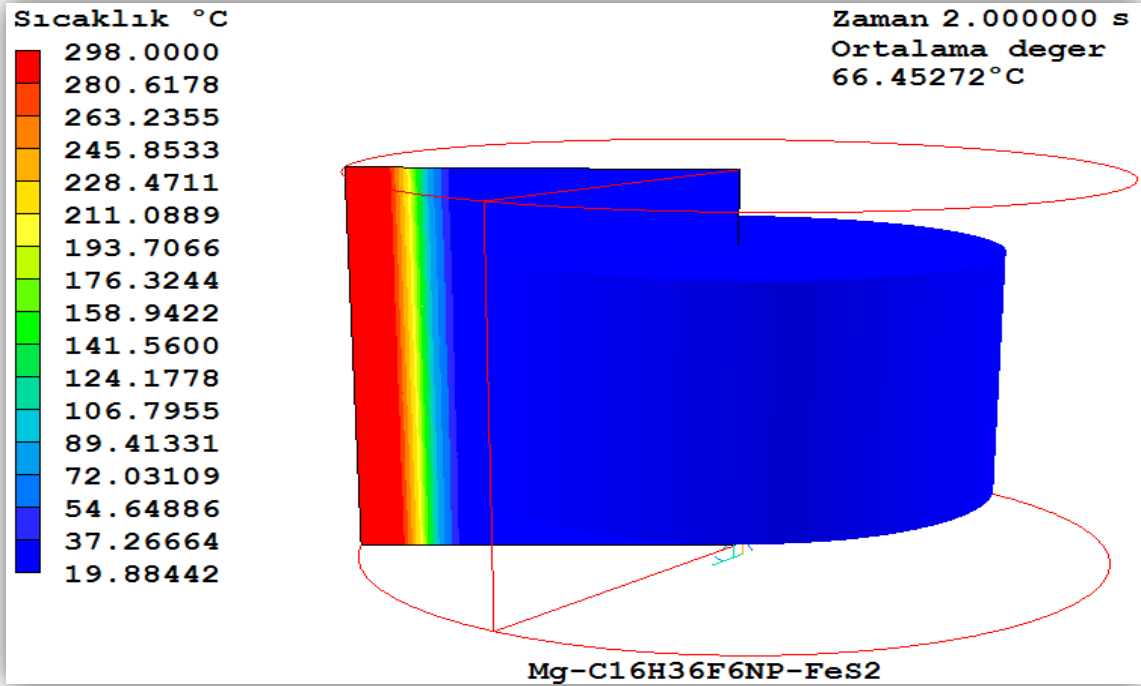
Şekil 3.37'de Mg- $\text{C}_{16}\text{H}_{36}\text{F}_6\text{NP}$ - FeS_2 ısıl pil modülünün 2.sn deki sıcaklık dağılımı verilmiştir. Isıtıcı yüzeyinin sıcaklığı 300°C iken modülün ortalama sıcaklığın 66.45°C olduğu görülmüştür. Bu zaman adımıyla elektrolit kimyasalları 20°C 'dir.

596 sn'de ısıtıcı sıcaklığı 300°C 'den 257°C 'ye düşmüştür. Şekil 3.38 ve Şekil 3.39'da görüldüğü gibi pil modülünün ortalama sıcaklığı 252.3°C 'ye yükselmiştir. 596.sn'de pil modülü, elektrolitlerin erimesi ve iyon değişiminin gerçekleşmesi için gerekli olan sıcaklık değerine ulaşmıştır.

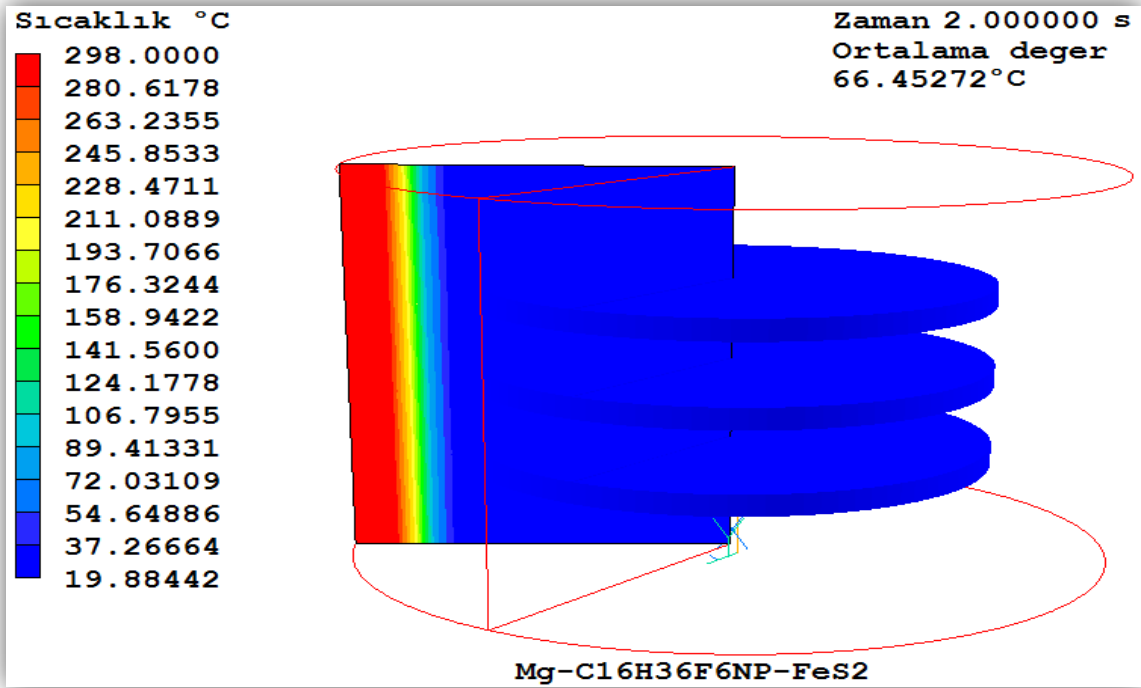
Bu analiz için pilin sıcaklık değerinin azalmaya başladığı zaman adımı 722.sn'dir. Pil modülü ısıtıcı yüzeyinin sıcaklığındaki azalma sebebi ile 250.6°C 'dir. Elektrolit kimyasal malzemeleri ise sırasıyla 250.8°C , 251.43°C ve 252°C sıcaklığa sahip olmuşlardır.

Şekil 3.41 ve 3.42’de görüldüğü gibi pil modülünde meydana gelen sıcaklık azalışı sebebi ile 975.sn’de elektrolit olarak kullanılan $C_{16}H_{36}F_6NP$ kimyasalı erime noktasındaki sıcaklık değeri olan $246^{\circ}C$ ’nin altına düşmektedir. Modülün ortalama sıcaklık değeri $240.4^{\circ}C$ ’dir. Ortalama sıcaklık değerinin, elektrolit kimyasalının sıcaklık değerinden daha az olmasının sebebi ısıtıcının sıcaklık değişiminin malzemelerin ısı iletkenlik değerleri sebebi ile elektrolitlerin orta noktalarına aynı zamanda etki edememesinden kaynaklanmaktadır.

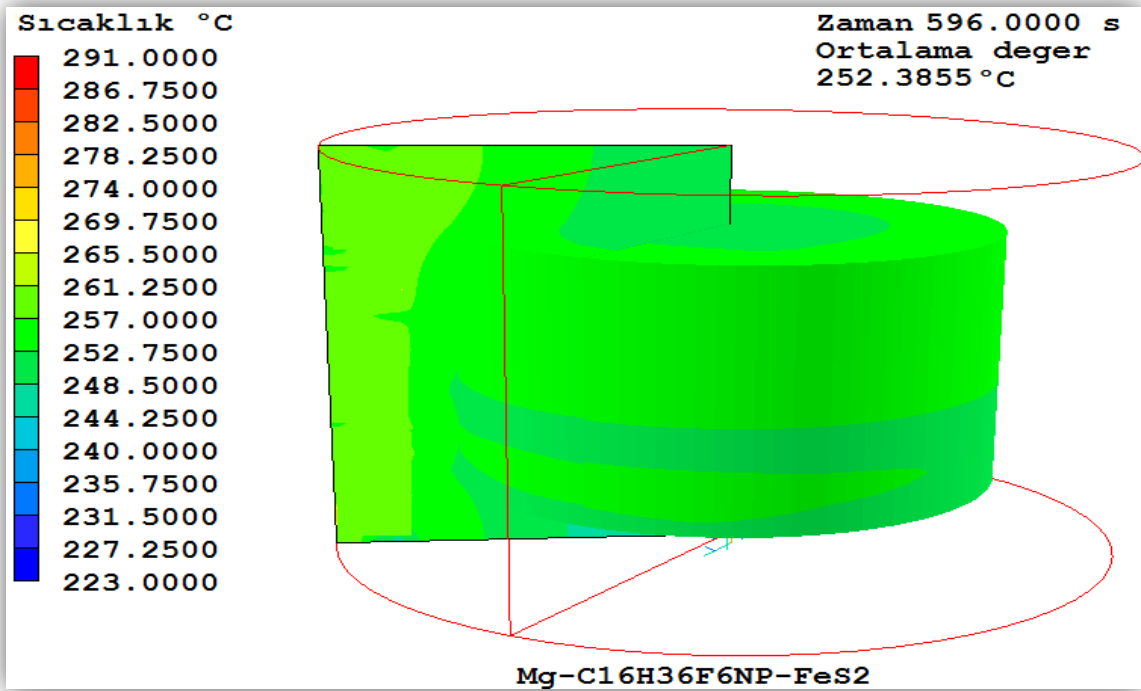
Isıtıcının $300^{\circ}C$ ’den $20^{\circ}C$ ’ye 4000sn zaman adımında lineer olarak soğutulduğu modülde, analiz sonunda pilin ortalama sıcaklığı $32.4^{\circ}C$ olmuştur.



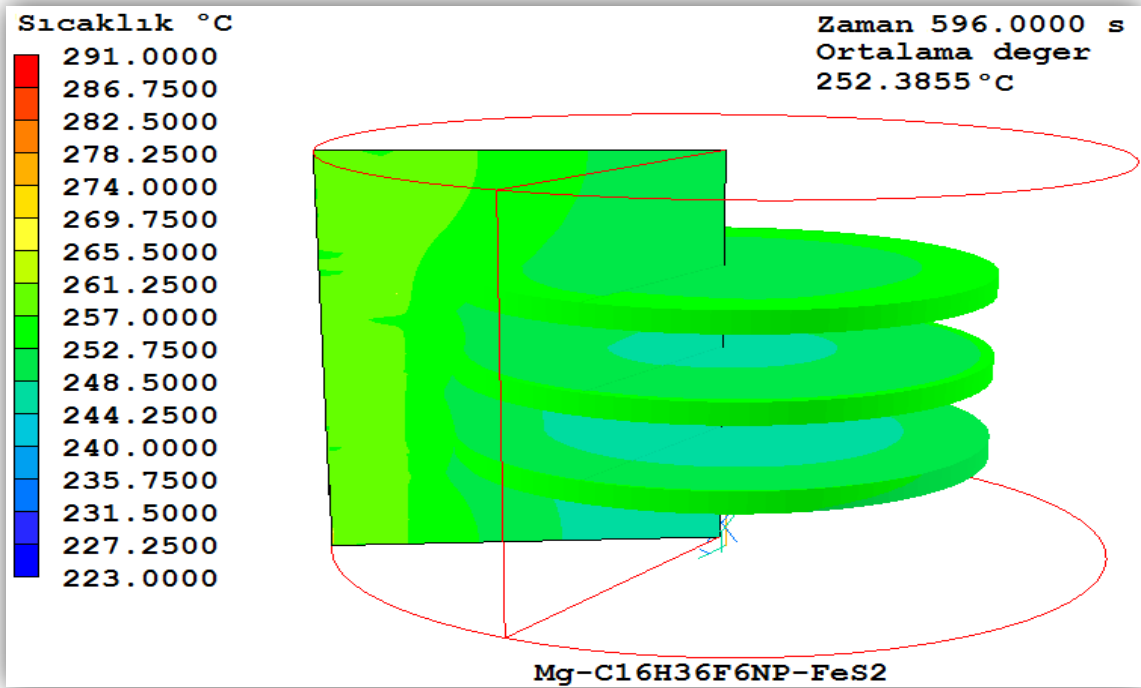
Şekil 3.37. 5. Modülün 2. sn deki sıcaklık dağılımı



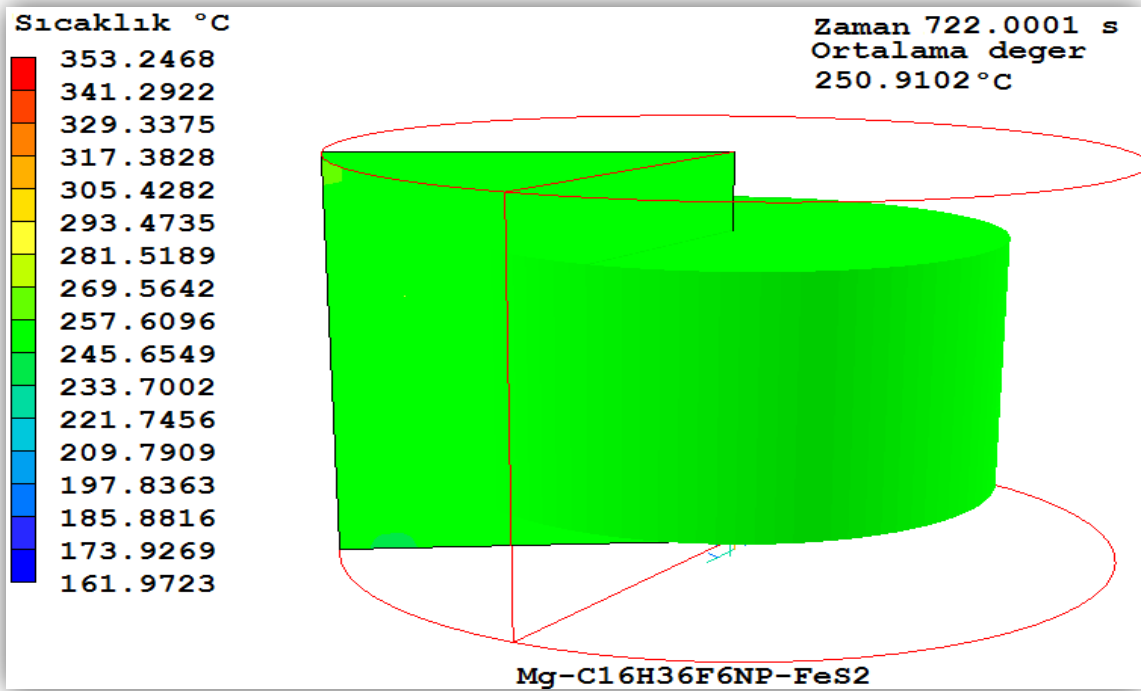
Şekil 3.38. 5. Modüldeki elektrolitlerin 2.sn deki sıcaklık dağılımı



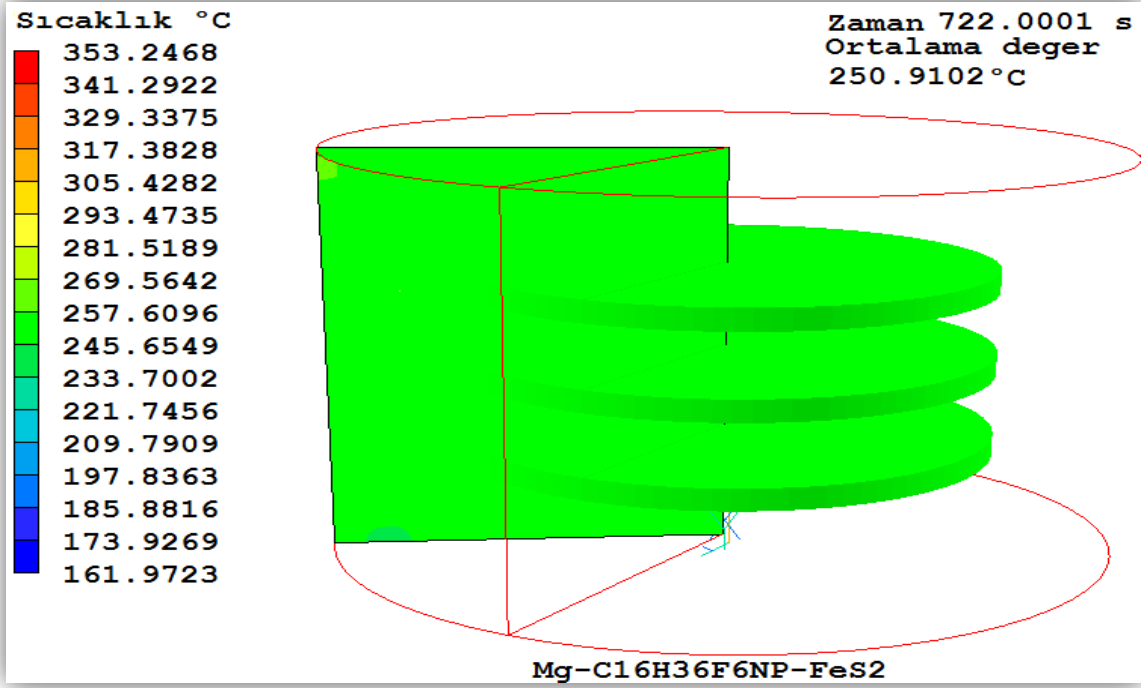
Şekil 3.39. 5. Modülün 596.sn deki sıcaklık dağılımı



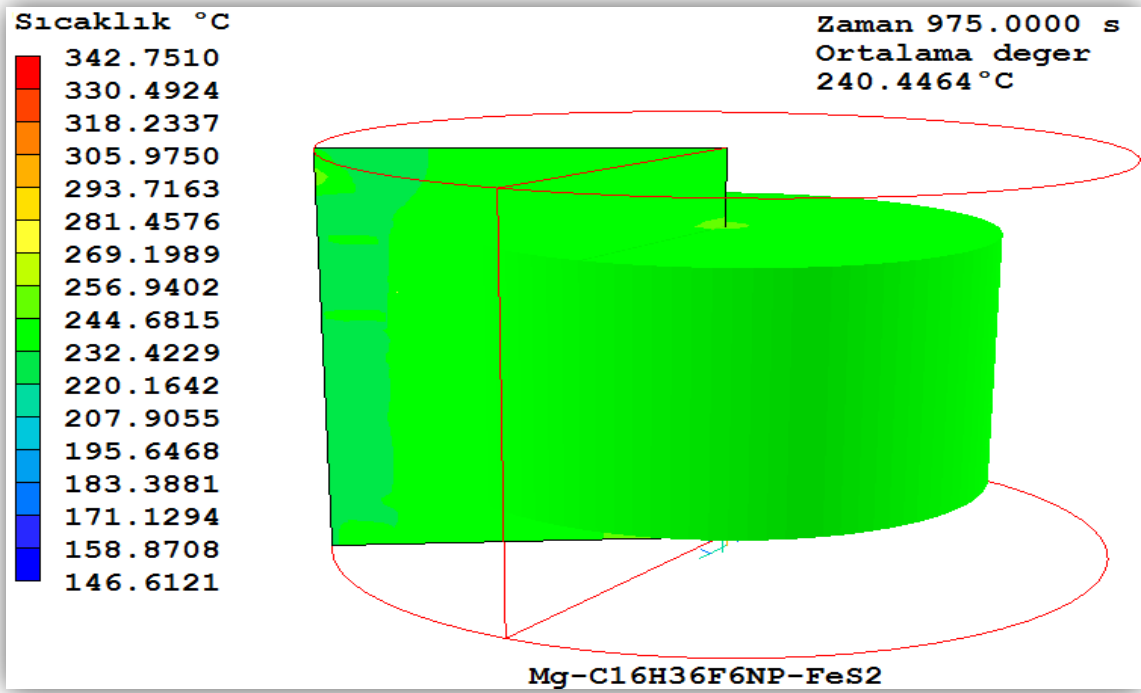
Şekil 3.40. 5. Modüldeki elektrolitlerin 596.sn deki sıcaklık dağılımı



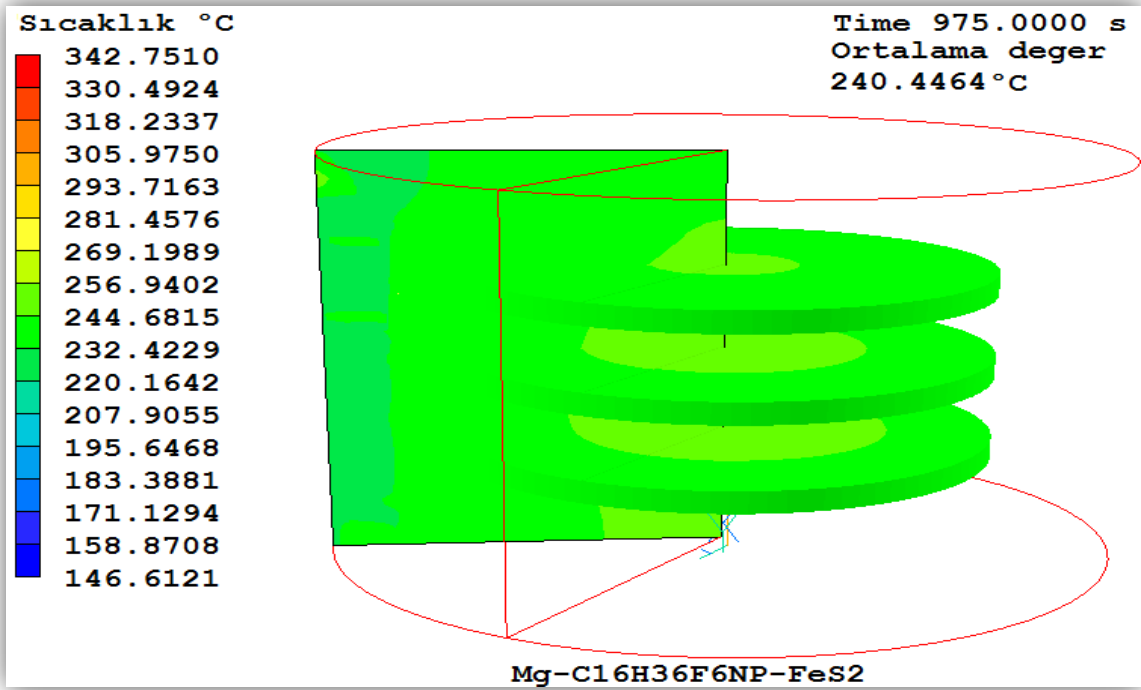
Şekil 3.41. 5. Modülün 722.sn deki sıcaklık dağılımı



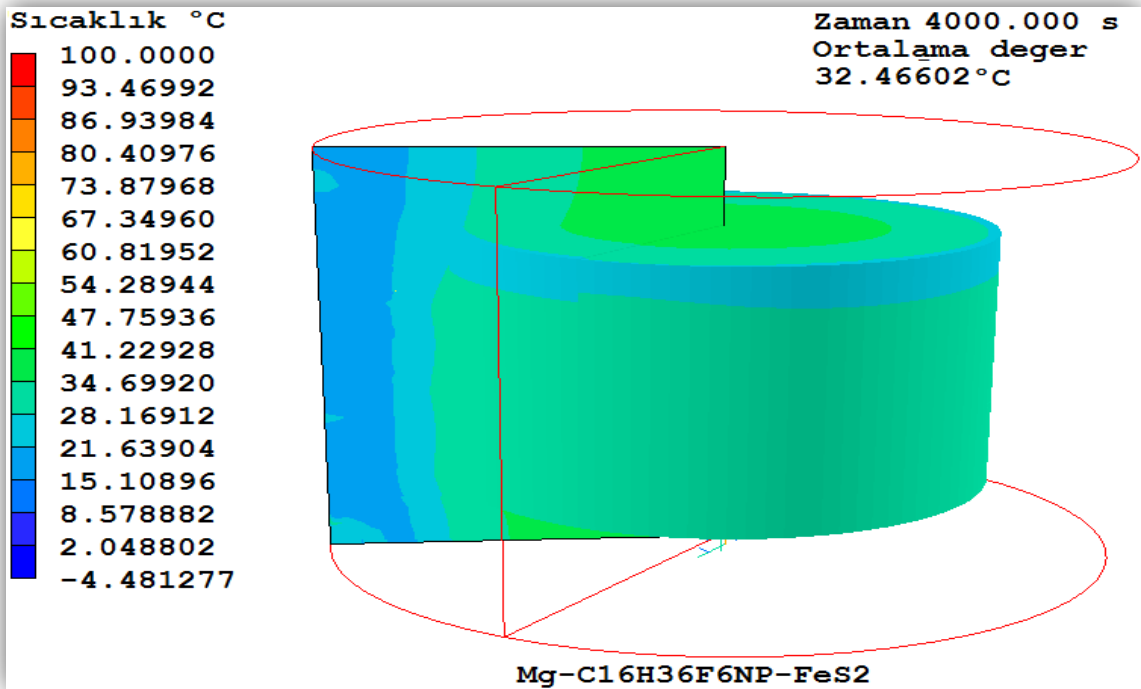
Şekil 3.42. 5. Modüldeki elektrolitlerin 722.sn deki sıcaklık dağılımı



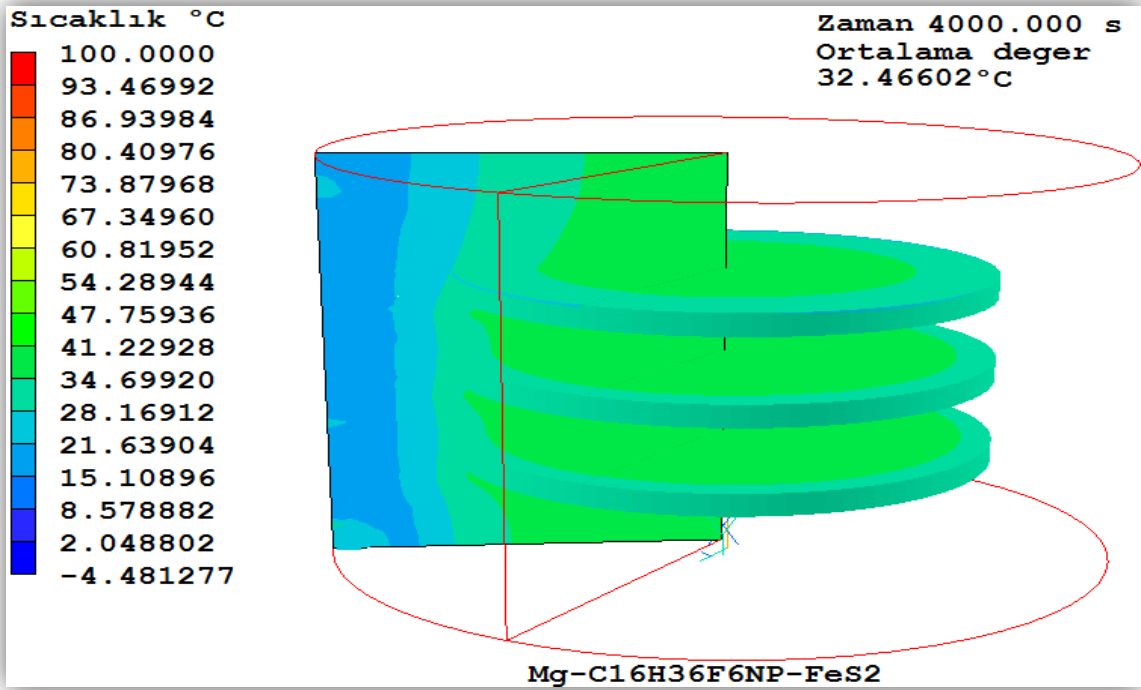
Şekil 3.43. 5. Modülün 975.sn deki sıcaklık dağılımı



Şekil 3.44. 5. Modüldeki elektrolitlerin 975.sn deki sıcaklık dağılımı



Şekil 3.45. 5. Modülün 4000.sn deki sıcaklık dağılımı



Şekil 3.46. 5. Modüldeki elektrolitlerin 4000.sn deki sıcaklık dağılımı

3.1.6. 6. Modül için Zamana Bağlı Sıcaklık Haritaları

Yapılan çalışmada anot malzemesi olarak Magnezyum (Mg), katot malzemesi olarak Pirit (FeS_2) ve elektrolit malzemesi olarak Potasyum tiyasonat+ Tetrametilamanyum iyodür ($\text{KSCN} + \text{C}_4\text{H}_{12}\text{IN}$) ötektiği kullanılmıştır. Elektrolit olarak kullanılan $\text{KSCN} + \text{C}_4\text{H}_{12}\text{IN}$ kimyasalının erime noktası $173.4\text{ }^\circ\text{C}$ 'dir. Bu elektrolit karışımının ısıl pil modülde de diğer modüllerde olduğu gibi ısıtıcının sıcaklık değeri olarak $300\text{ }^\circ\text{C}$ verilmiştir. Analiz 4000 sn'lik zaman adımında çalıştırılmıştır.

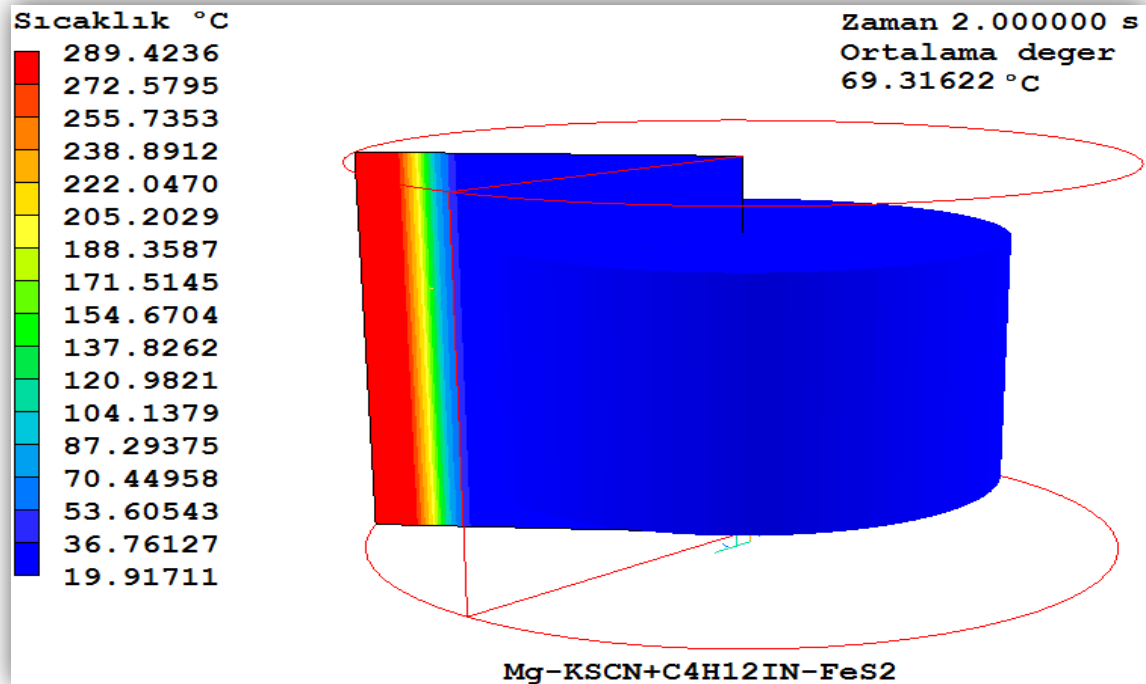
Şekil 3.42'de 2.sn de pil modülünüm sıcaklık dağılımları verilmiştir. Başlangıç zamanında ısıtıcı sıcaklığı yaklaşık $300\text{ }^\circ\text{C}$ 'dir. Isıtıcı ve pil modülün ortalama sıcaklığı $69.3\text{ }^\circ\text{C}$ 'dir. Şekil 3.42'de 3 hücreli ısıl pil modülündeki elektrolitlerin başlangıç anındaki sıcaklıkları verilmiştir. Elektrolitlerin başlangıç anındaki sıcaklığı yaklaşık $20\text{ }^\circ\text{C}$ 'dir.

265.sn de ısıtıcının sıcaklık değerinin $300\text{ }^\circ\text{C}$ den $284\text{ }^\circ\text{C}$ 'ye düştüğü görülmektedir. İletim ile ısı geçişinin gerçekleşmesi sonucu modül sıcaklığı $221\text{ }^\circ\text{C}$ olmuştur. Elektrolit malzemeleri pilin dış kabuğuna yakın kısımlarda daha çabuk ısınmaktadır. Ancak modülün orta noktasından ölçülen değerlere göre 265.snde elektrolitlerin tümünde sıcaklık erime noktasındaki sıcaklık değerlerine ulaşmıştır.

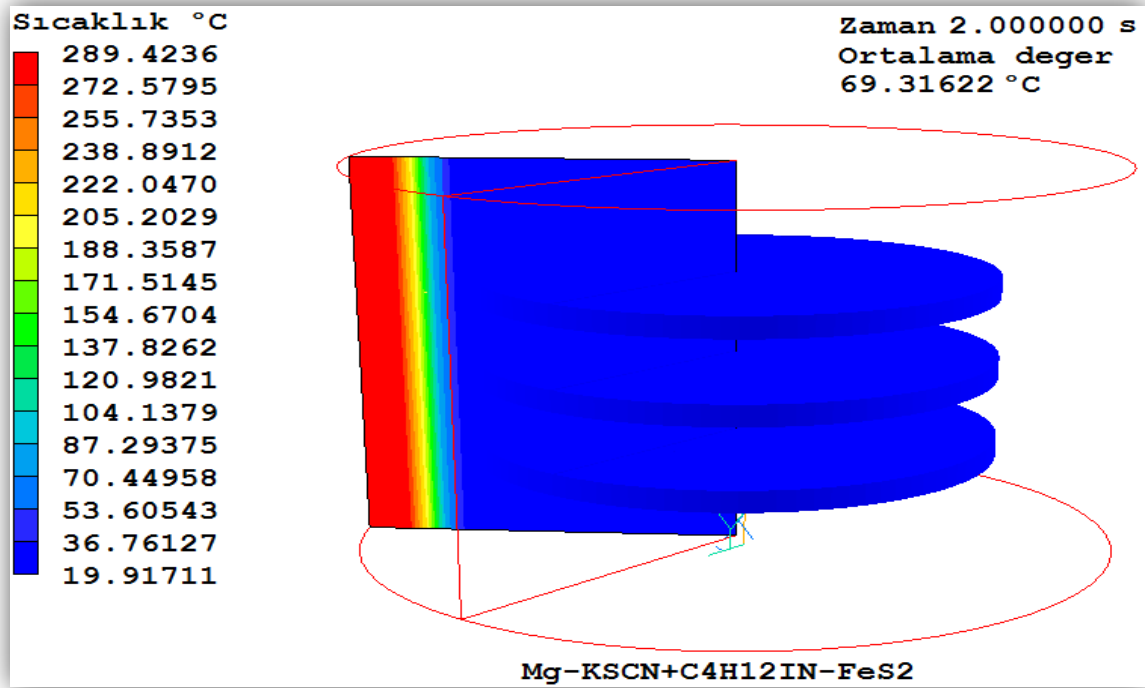
Şekil 3.46 ve 3.47’de 755.sn’de modülün analizi sonucu elde edilen sıcaklık haritaları verilmiştir. Bu zaman adımında pilde kullanılan ısıtıcı ve diğer pil malzemeleri birbirine yakın sıcaklık değerlerine ulaşmıştır. Böylece modülde meydana gelen sıcaklık geçişi sonlanmıştır ve 755.sn’den itibaren ısıtıcının sıcaklık değeriyle birlikte pil malzemelerinin de sıcaklık değerleri azalmıştır. Elektrolit kimyasalları sırasıyla 250,6 °C, 251,2 °C ve 251.8 °C olmuştur.

Analizin 2127.sn’inde Şekil 3.48 ve 3.49’da görüldüğü gibi ısıtıcı yüzey sıcaklığı diğer elektrokimyasal pil malzemelerinin sıcaklığından daha düşük bir sıcaklık değerine sahiptir. Isıtıcı 153 °C’dir. Pil içindeki sıcaklık 166-278 °C aralığında değişmektedir.

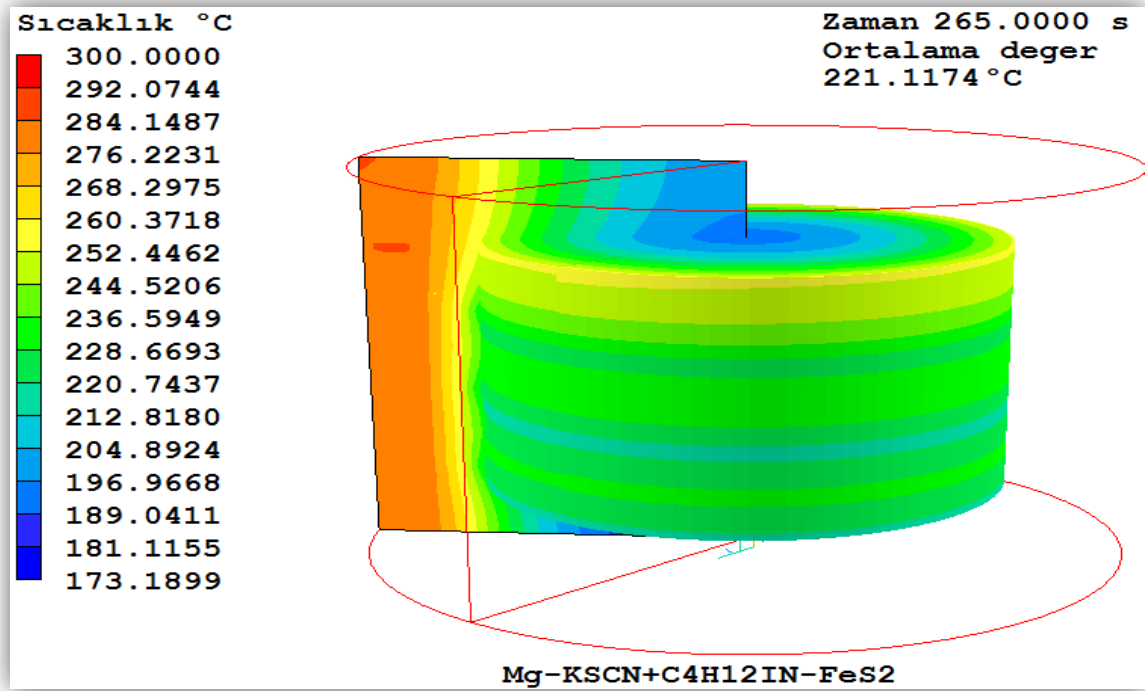
Analizde ısıtıcının sıcaklığı 300 °C den 20 °C’ ye düşürülmüştür. Sıcaklık zamana bağlı olarak lineer azaltılmış ve sıcaklığın pil içerisindeki dağılımı incelenmiştir. Bu işlem için 4000sn zaman değeri girilmiştir. Şekil 3.50 ’de analizin bitiş zamanında pil modelinin tamamındaki sıcaklık dağılımı görülmektedir. Isıtıcı 20 °C sıcaklığa sahip iken modülün ortalama sıcaklığı 32 °C olmuştur. Elektrolit kimyasalları bu zaman adımında 40 °C’dir.



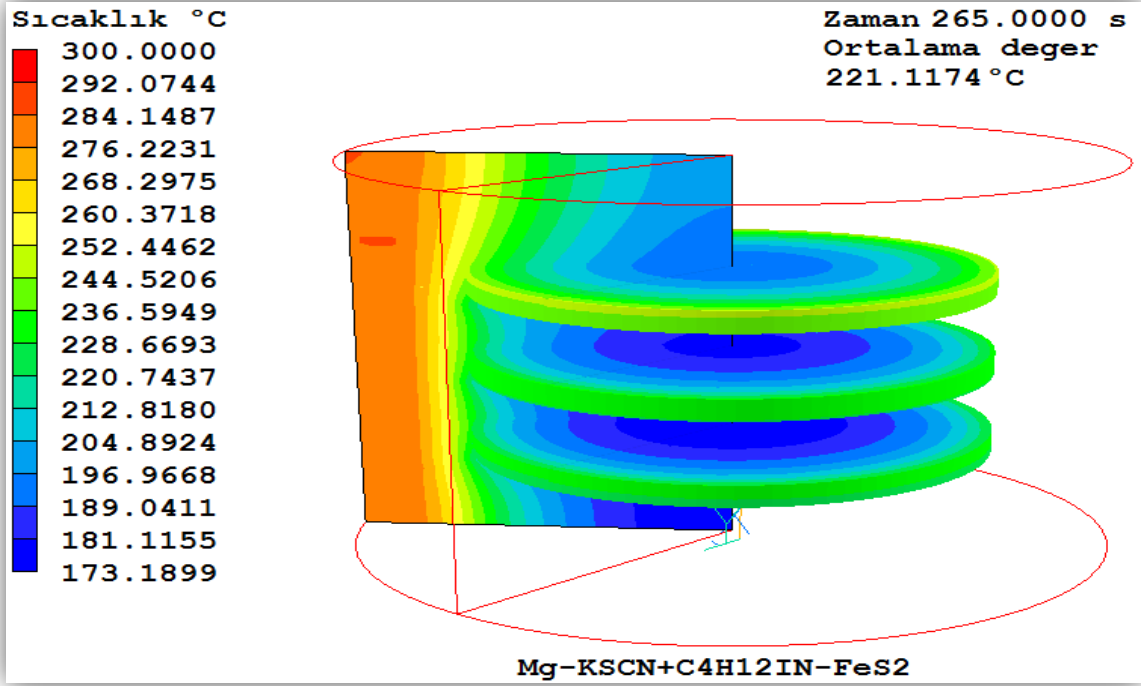
Şekil 3.42. 6. Modülün 2.sn’deki sıcaklık dağılımı



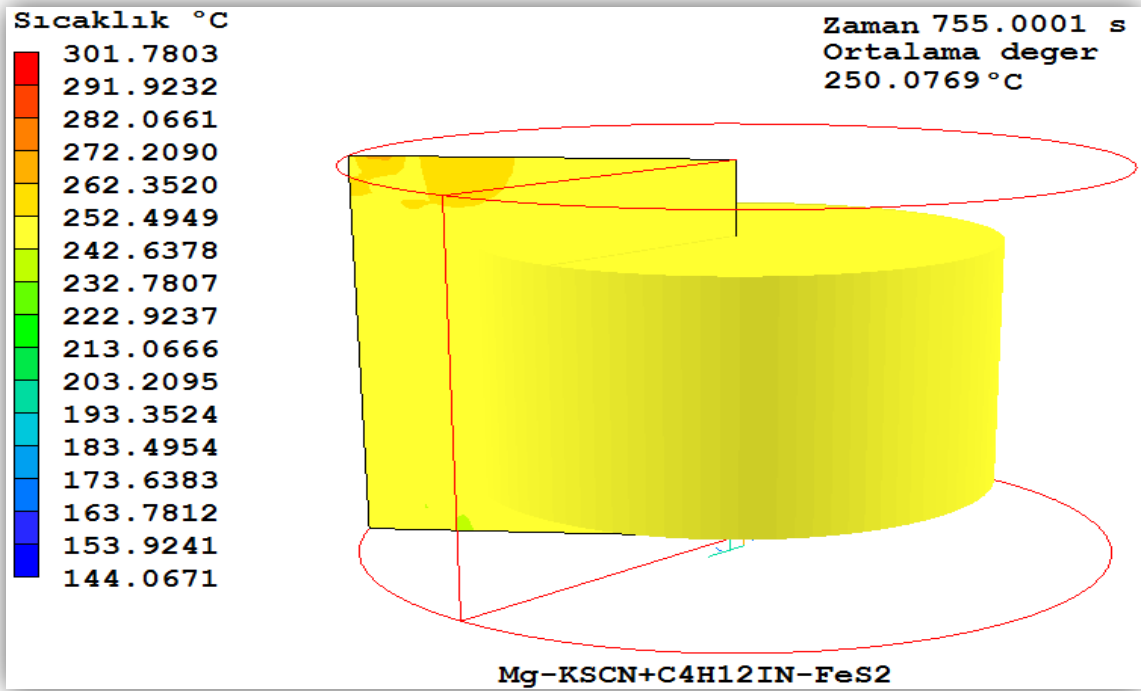
Şekil 3.43. 6. Modüldeki elektrolitlerin 2.sn deki sıcaklık dağılımı



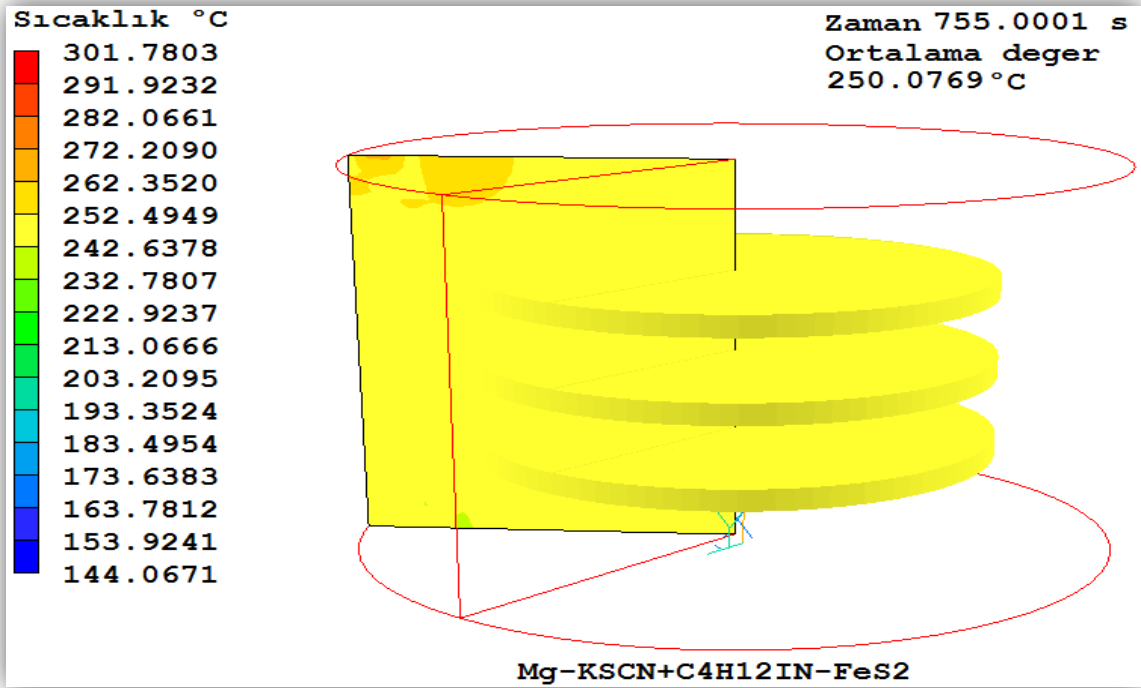
Şekil 3.44. 6. Modülün 265.sn deki sıcaklık dağılımı



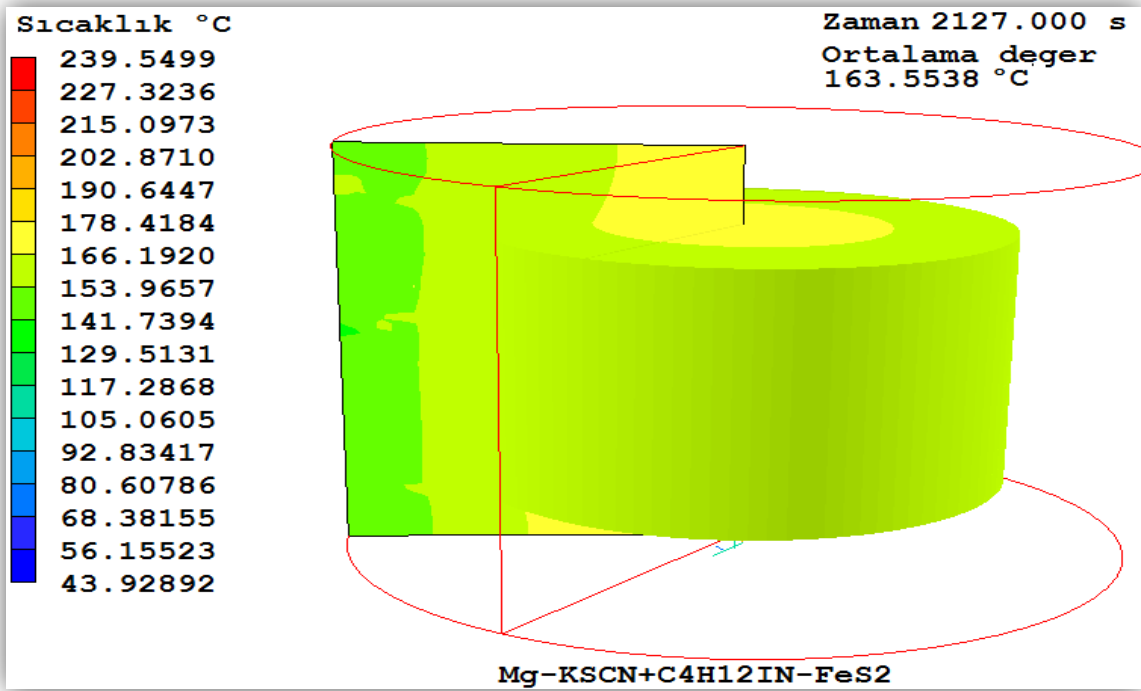
Şekil 3.45. 6. Modüldeki elektrolitlerin 265.sn deki sıcaklık dağılımı



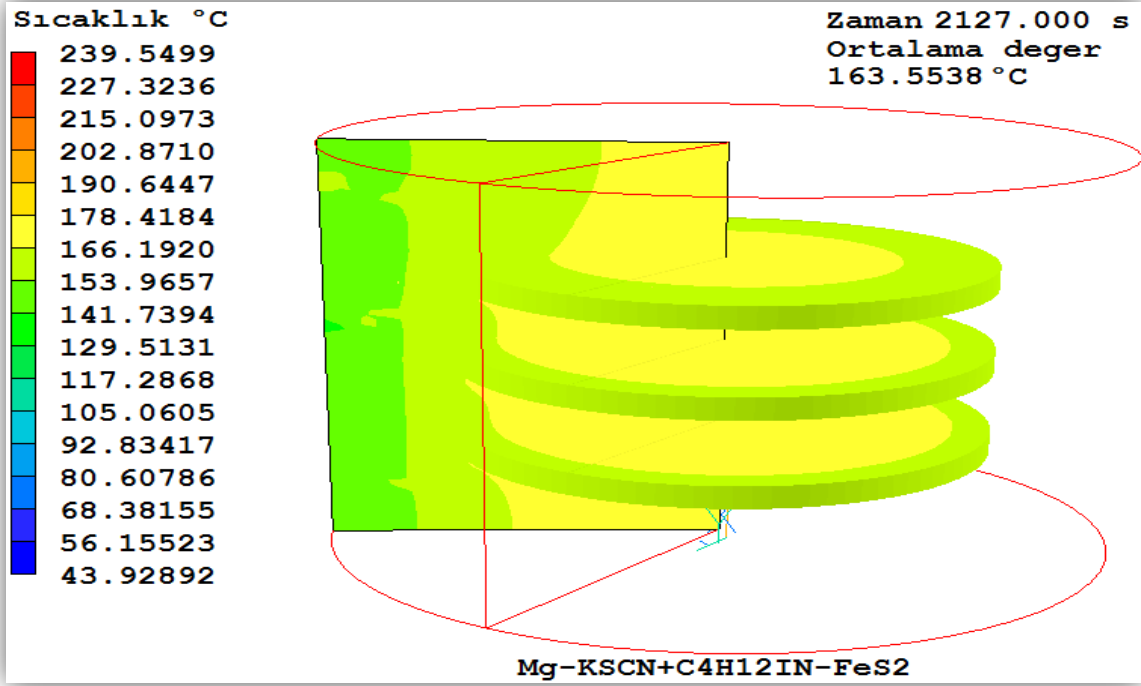
Şekil 3.46. 6. Modülün 755.sn deki sıcaklık dağılımı



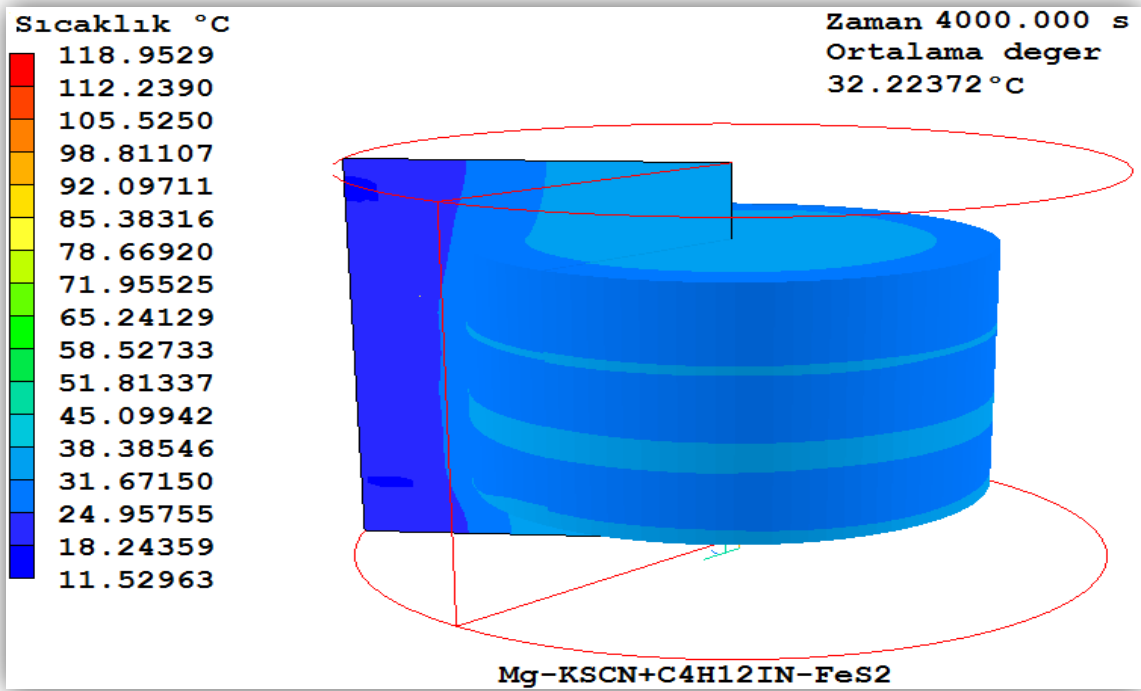
Şekil 3.47. 6. Modüldeki elektrolitlerin 755.sn deki sıcaklık dağılımı



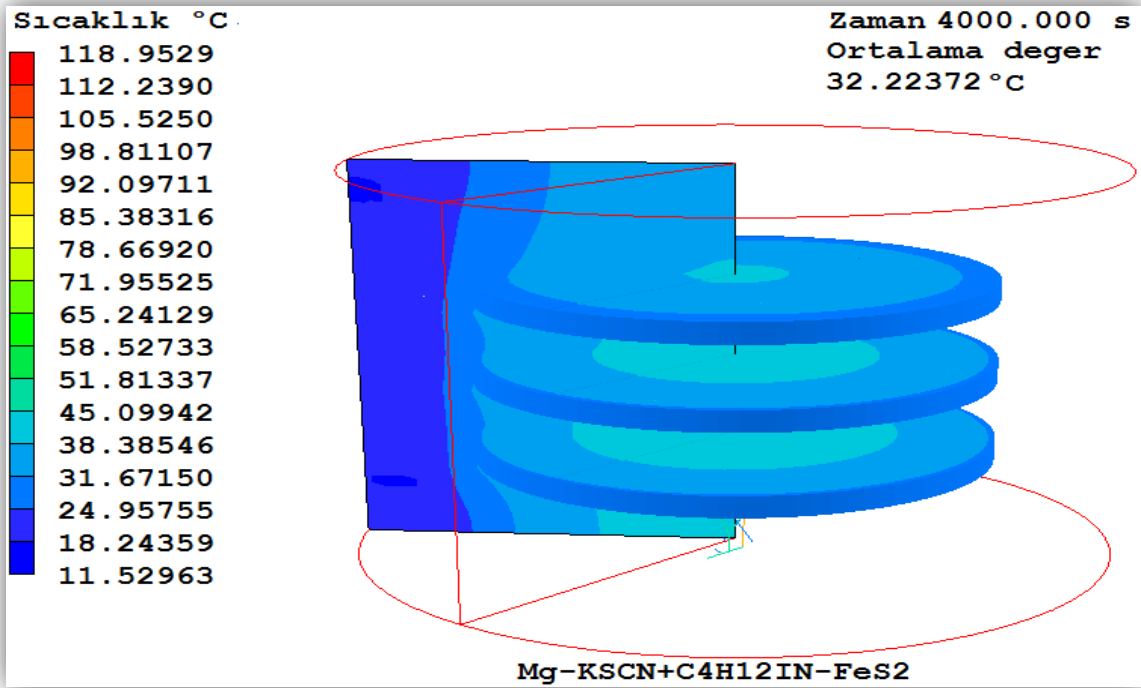
Şekil 3.48. 6. Modülün 2127.sn deki sıcaklık dağılımı



Şekil 3.49. 6. Modüldeki elektrolitlerin 2127.sn deki sıcaklık dağılımı



Şekil 3.50. 6. Modülün 4000.sn deki sıcaklık dağılımı



Şekil 3.51. 6. Modüldeki elektrolitlerin 4000.sn deki sıcaklık dağılımı

3.1.7. 7. Modül için Zamana Bağlı Sıcaklık Haritaları

Hazırlanan bu modülde anot malzemesi olarak Magnezyum (Mg), katot malzemesi olarak Pirit (FeS_2) ve elektrolit malzemesi olarak Potasyum tiyosiyanat + Tetrametilamonyum iyodür+ Silikon dioksit ($\text{KSCN} + \text{C}_4\text{H}_{12}\text{IN} + \text{SiO}_2$) kullanılmıştır. Bu ötektikte %1 oranında SiO_2 nano parçacığı kullanılmıştır. Elektrolit olarak kullanılan nano katkılı ötektik erime noktası $169\text{ }^\circ\text{C}$ 'dir. Isıtıcı malzemenin sıcaklığı $300\text{ }^\circ\text{C}$ olarak belirlenmiştir. Isıtıcı $300\text{ }^\circ\text{C}$ den $20\text{ }^\circ\text{C}$ ulaşana kadar 4000 sn zamana bağlı olarak soğutulmuştur.

Şekil 3.52'de pil modülünün 2.sn deki sıcaklık dağılımı verilmiştir. Isıtıcı yüzeyinin sıcaklığı $300\text{ }^\circ\text{C}$ iken modüldeki ortalama sıcaklığının $66.4\text{ }^\circ\text{C}$ olduğu görülmektedir. Pildeki sıcaklık değeri ise yaklaşık $18\text{--}37^\circ\text{C}$ aralığında olmuştur. Elektrolitin sıcaklık değeri $20\text{ }^\circ\text{C}$ 'dir.

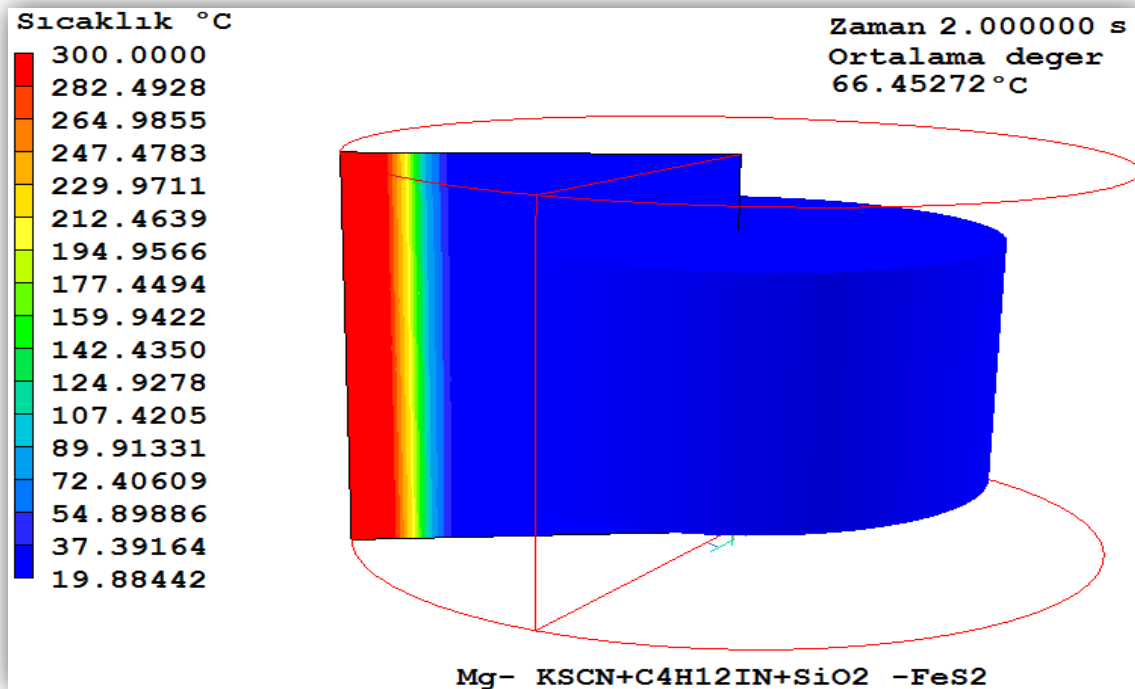
7. modülün 255.sn deki sıcaklık dağılımı Şekil 3.54'de verilmiştir. Isıtıcı yüzeyinin sıcaklığı $281.06\text{ }^\circ\text{C}$ iken hazırlanan modülün ortalama sıcaklığı $219.2\text{ }^\circ\text{C}$ 'dir. Elektrolit olarak kullanılan nano katkılı ötektik kimyasal malzeme $169\text{ }^\circ\text{C}$ de erimektedir. Bu sebeple pilin 255.sn'de aktif olduğu söylenebilir. Isıtma işlemi pilin dış yüzeyinde gerçekleştiği

için sıcaklık dağılımı dış yüzeyden elektrolitin iç noktalarına doğru farklılık göstermektedir. Elektrolitin iç noktalarında sıcaklık değeri 169 °C iken orta noktadan ısı pilin dış kabuğuna doğru sıcaklık değerinin 197 °C ve 239 °C olduğu görülmektedir.

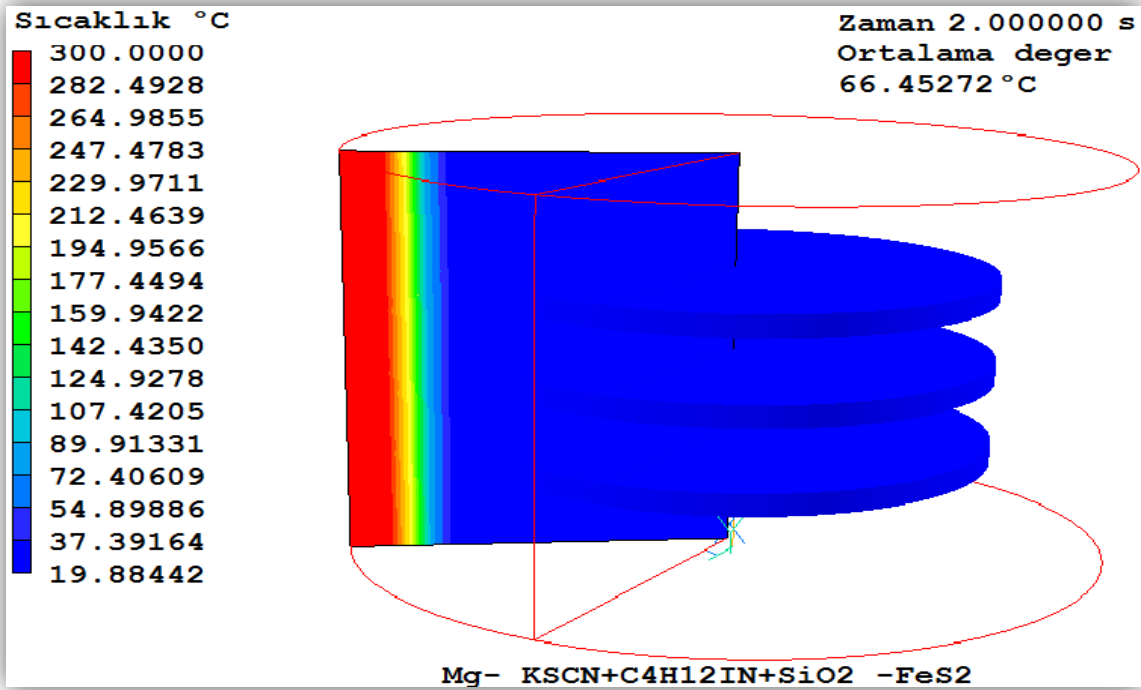
Şekil 3.56'da ısı pilin 720.sn deki sıcaklık dağılımı verilmiştir. Isıtıcı yüzeyinde sıcaklık değeri 248 °C'dir. Modülün ortalama sıcaklık değeri 250.4 °C'dir. Isıtıcı yüzeyindeki ve pildeki sıcaklık değerleri birbirine eşitlendiği için 720.sn den itibaren pilin iç yüzeyinde soğuma başlamıştır.

Şekil 3.58'de ısı pilin 2171.sn deki sabit sıcaklık dağılımı verilmiştir. Isıtıcı yüzeyinde sıcaklık 159 °C dir. Isıl pil modelindeki ortalama sıcaklık 160.3 °C iken, anot, katot ve elektrolit malzemelerinin sıcaklık değerleri 159 °C ile 172 °C arasında değişmektedir. Bu zaman değerinde elektrolit kimyasal malzemelerinin sıcaklık değeri 169° C'nin altına düştüğü için nano katkılı ötektik katılaşmaya başlamıştır. Elektrolitlerin 2171.sn'deki sıcaklık haritaları Şekil 3.59'da verilmiştir.

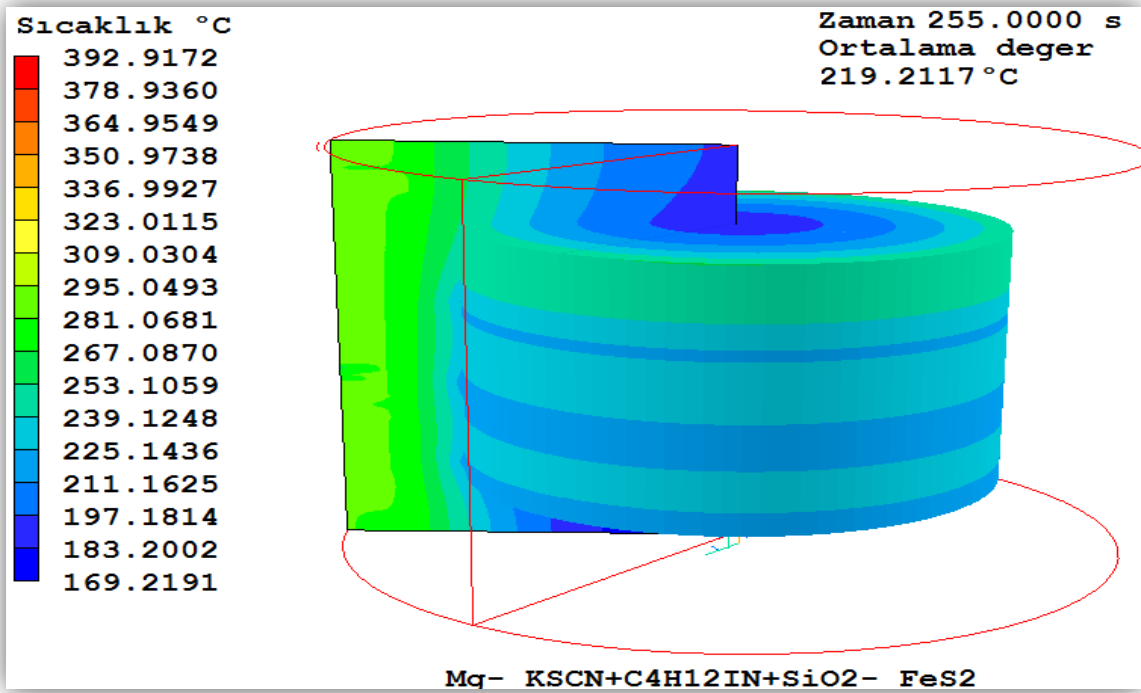
Analizin 4000.sn modülün tamamında ortalama sıcaklık 32.46 °C olmuştur. Şekil 3.61'de verilen sıcaklık dağılımı pilin dış kabuğuna yakın kısımlarında soğumanın daha iyi gerçekleştiği ve sıcaklığın merkeze yakın noktalarda daha yüksek olduğu görülmektedir.



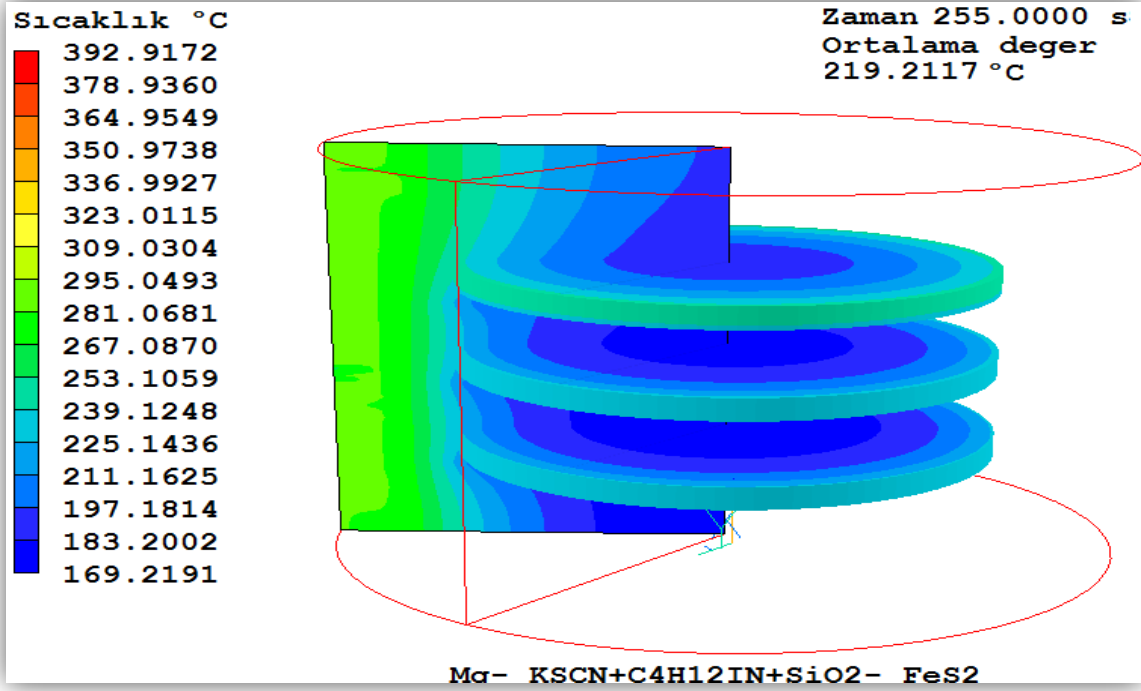
Şekil 3.52. 7. Modülün 2.sn deki sıcaklık dağılımı



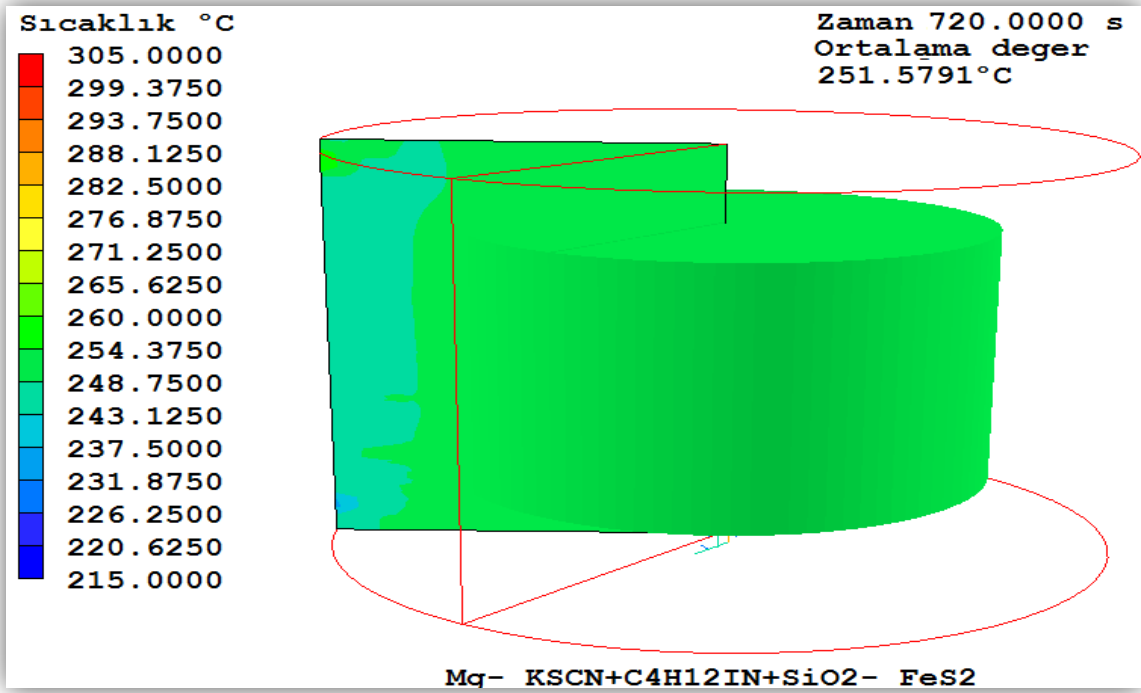
Şekil 3.53. 7. Modüldeki elektrolitlerin 2.sn deki sıcaklık dağılımı



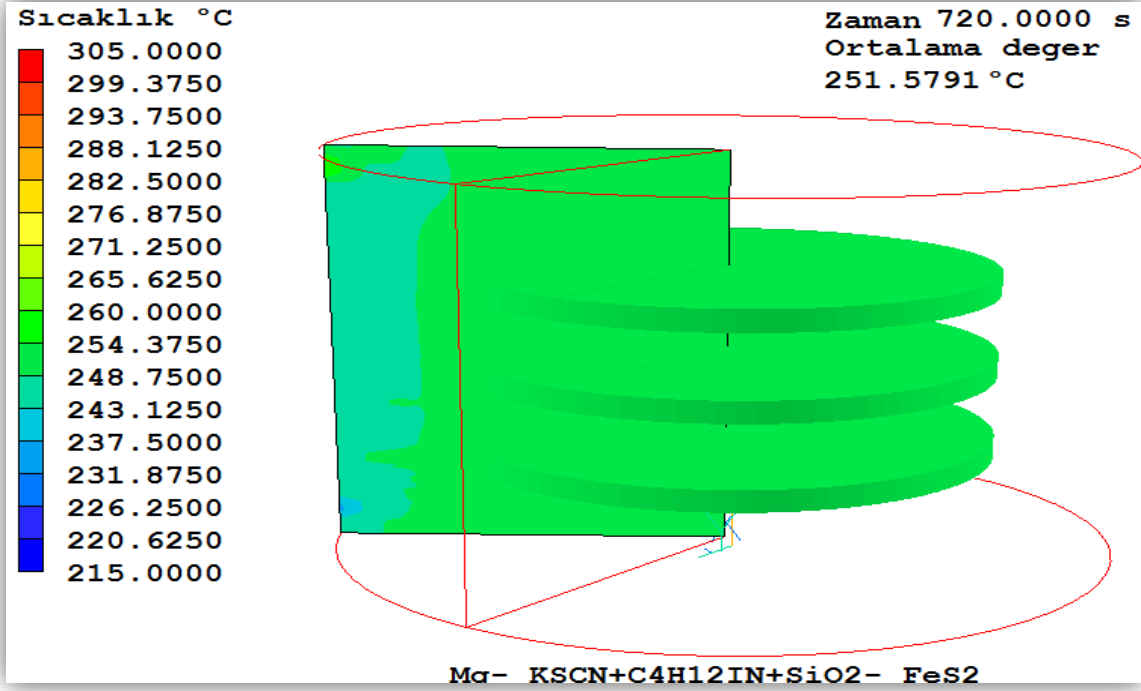
Şekil 3.54. 7. Modülün 255.sn deki sıcaklık dağılımı



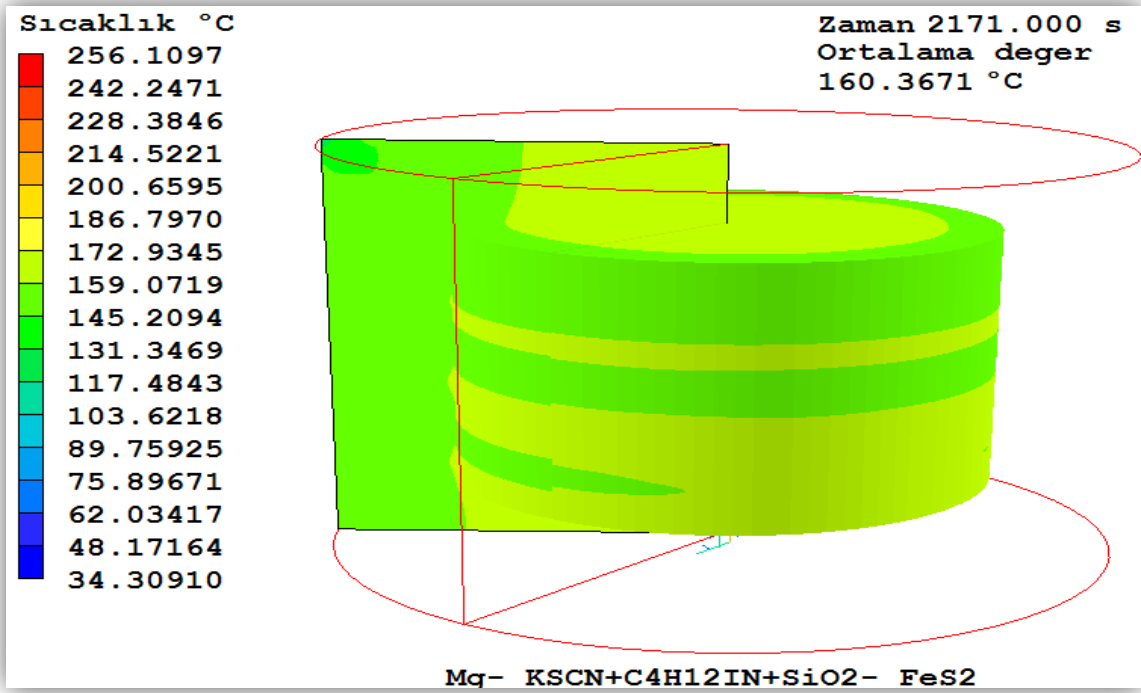
Şekil 3.55. 7. Modüldeki elektrolitlerin 255.sn deki sıcaklık dağılımı



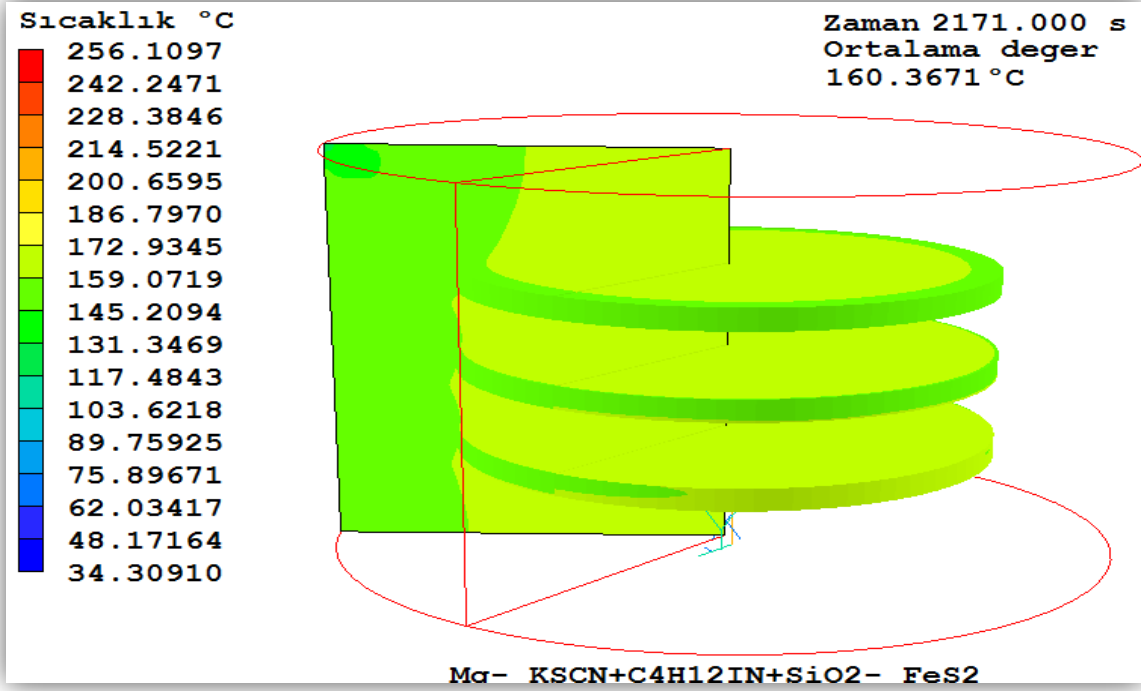
Şekil 3.56. 7. Modülün 720.sn deki sıcaklık dağılımı



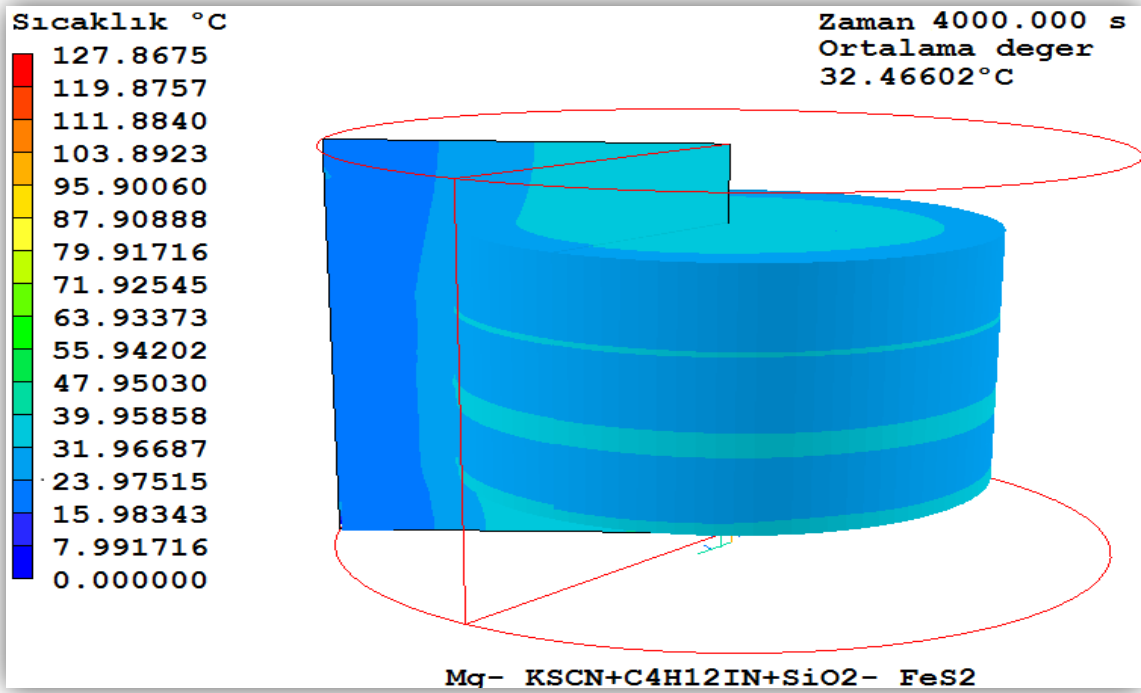
Şekil 3.57. 7. Modüldeki elektrolitlerin 720.sn deki sıcaklık dağılımı



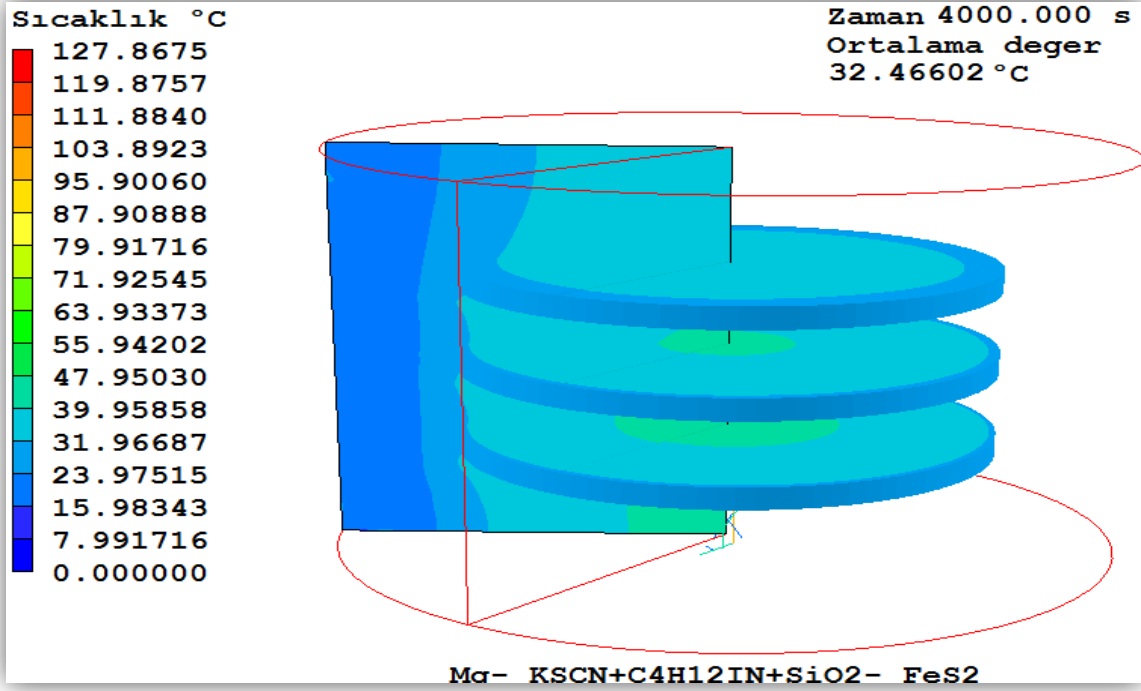
Şekil 3.58. 7. Modülün 2171.sn deki sıcaklık dağılımı



Şekil 3.59. 7. Modüldeki elektrolitlerin 2171.sn deki sıcaklık dağılımı



Şekil 3.60. 7. Modülün 4000.sn deki sıcaklık dağılımı



Şekil 3.61. 7. Modüldeki elektrolitlerin 4000.sn deki sıcaklık dağılımı

3.2. Modüllerdeki Elektrolitlerin Zamana Bağlı Sıcaklık Grafikleri

Yapılan 7 modülde de elektrolit kimyasal malzemesi değiştirilerek diğer parametreler sabit tutulmuştur. Bu analizlerde ısıtıcıya 300 °C sıcaklık değeri verilerek 4000 sn'de 20 °C ye kadar soğutulmuştur. Aşağıda verilen grafiklerin tümünde TMP1 ile gösterilen değerler 1. hücrede bulunan elektrolitin sıcaklığını, TMP2 ile gösterilen değerler 2. hücrede bulunan elektrolitin sıcaklığını ve TMP3 ile gösterilen değerler 3. hücredeki elektrolitin sıcaklığını, E.N ile gösterilen değerler ise her model için kullanılan elektrolit malzemelerinin erime sıcaklığını göstermektedir. Modüllerin grafiklerinde de görüldüğü gibi elektrolitlerin başlangıç anındaki sıcaklıklarının 20 °C'dir. Elektrolit kimyasallarının boyutları çok küçük seçildiği için erime durumları incelenmemiştir.

1.modülün analizinden elde edilen sıcaklık grafiği Şekil 3.62'de verilmiştir. Erime noktasındaki sıcaklık değeri olan 173.2 °C'ye 248.sn'de ulaşmıştır. 730.sn de ısıtıcının sıcaklığı sebebi ile pil içinde meydana gelen sıcaklığın artması sonlanmıştır. Bu zaman adımıında elektrolit sıcaklık değerleri sırasıyla 251.52 °C, 252.24 °C ve 252.91 °C olmuştur. 2105.sn'de elektrolit kimyasalları 173.2 °C'den daha düşük sıcaklık değerlerine ulaşmıştır. Analiz bitiminde ise elektrolitlerin sıcaklık değerlerinin ise 40.41 °C, 39.95 °C ve 38.49 °C olduğu görülmüştür. Grafiklerde E.N. ile belirtilen erime noktasının üzerinde kalan

sıcaklık süresi pilin aktif olarak gerilim ürettiği süredir. Bu modülde 1857 sn boyunca pil aktiftir.

2. modülün analizinden elde edilen sıcaklık grafiği Şekil 3.63’de verilmiştir. Bu modülde elektrolit olarak $C_{16}H_{36}IN$ elektroliti kullanılmıştır. Analizde 209.sn’de pilin gerilim üretmesi için gerekli olan sıcaklık değerine ulaşıldığı görülmüştür. 817.sn ‘de elektrolit peletlerinin sıcaklığı yaklaşık $251\text{ }^{\circ}C$ ’dir. Bu zaman adımı grafikte pik noktası olarak görülmektedir. 2665.sn’de elektrolit sıcaklığı erime sıcaklığının altına düşmüştür. Bu modül için pil 2456 sn aktif olmuştur.

3. modül analizinden elde edilen elektrolitlerin zamana bağlı sıcaklık grafiği Şekil 3.64’te görülmektedir. Modülde $C_4H_{12}IN$ elektrolit olarak kullanılmıştır. Analizde elektrolit kimyasallarının erime noktasındaki sıcaklık değeri olan $300\text{ }^{\circ}C$ ’ye ulaşamamıştır. Bu sebeple ısıtıcı değeri $300\text{ }^{\circ}C$ ’den $20\text{ }^{\circ}C$ ’ye düşürüldüğü zaman pilin aktif olmadığı görülmektedir.

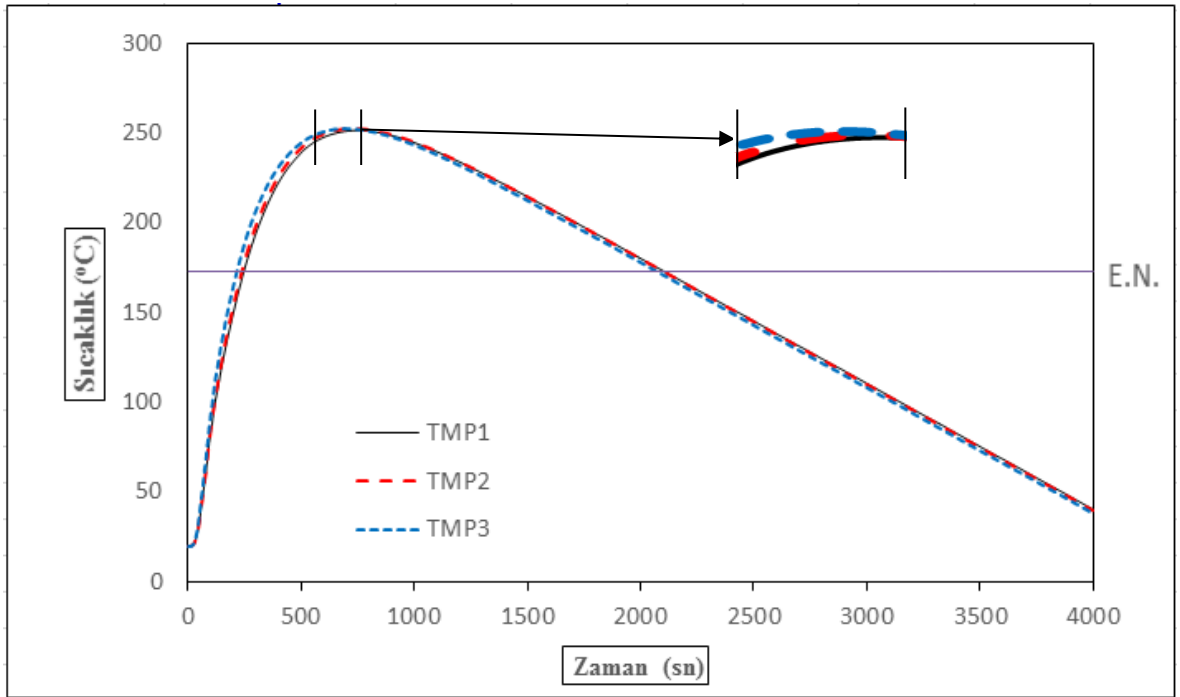
4. modül analizinden elde edilen zamana bağlı sıcaklık değerleri Şekil 3.65’te verilmiştir. Modülde elektrolit olarak $C_{16}H_{36}BrN$ kullanılmıştır. Bu kimyasal malzeme analizde en yüksek sıcaklık değeri olarak $252.59\text{ }^{\circ}C$ ’ye 725.sn’de ulaşmış ve bu zamandan itibaren zamanla sıcaklık değeri lineer olarak azalmıştır. Pil bu modülde 3132 sn aktif haldedir.

5. modül analizinden elde edilen zamana bağlı sıcaklık değerleri Şekil 3.66’da görülmektedir. Modülde $C_{16}H_{36}F_6NP$ elektrolit kimyasalı kullanılmıştır ve bu kimyasalın erime noktasındaki sıcaklık değeri $246\text{ }^{\circ}C$ ’dir. Grafikte de görüldüğü gibi erime sıcaklığının yüksek olması sebebi ile bu malzeme pil modülünün aktif olarak çalıştığı süreyi kısaltmıştır. Modülde elektrolitler maksimum sıcaklık değerine 741sn’de ulaşmıştır ve bu zaman adımı en yüksek elektrolit sıcaklığının $252.18\text{ }^{\circ}C$ olduğu görülmüştür. Pil 199 sn aktif olarak çalışmıştır.

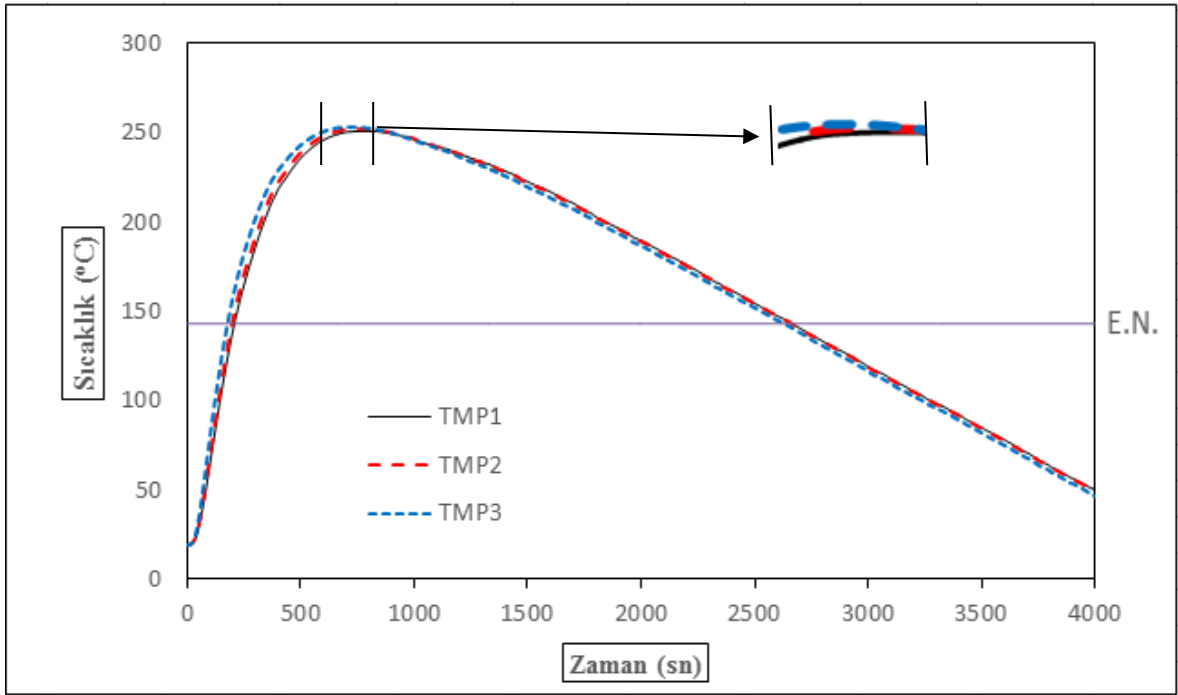
6. modül analizinden elde edilen zamana bağlı sıcaklık grafiği Şekil 3.67’de verilmiştir. Modülde elektrolit olarak kullanılan KSCN ve $C_4H_{12}IN$ kimyasallarının kütlece %50 oranında karıştırılması sonucu elde edilen termofiziksel özellikleri kullanılmıştır. Analizin 755.sn de elektrolit malzemesinin sıcaklık değeri $250.6\text{ }^{\circ}C$ ’dir. Elektrolit kimyasalının erime sıcaklığı olan $173.2\text{ }^{\circ}C$ ’den daha yüksek sıcaklık değerleri 265.sn’den itibaren görülmeye başlanmıştır ve bu artış 2127.sn’de sonlanmıştır. Bu modül 1862 sn aktiftir.

7. modülde 6. modülde kullanılan elektrolit malzemesine %1 oranında nano malzeme olan SiO_2 katılarak elde edilen yeni karışımın termofiziksel özellikleri sisteme tanıtılmıştır. Modülde 2.sn'den 720.sn'ye kadar sıcaklık değeri artmıştır. 251.93°C elektrolitlerin en yüksek sıcaklık değeri olmuştur. 720.sn'den 4000.sn'ye kadar ise elektrolit malzemelerinin sıcaklık değerleri azalmıştır. Analiz sonunda elektrolit kimyasallarının sırasıyla 41.15 °C, 40.62 °C ve 39.19 °C olmuştur. Pil 1916 sn boyunca aktiftir.

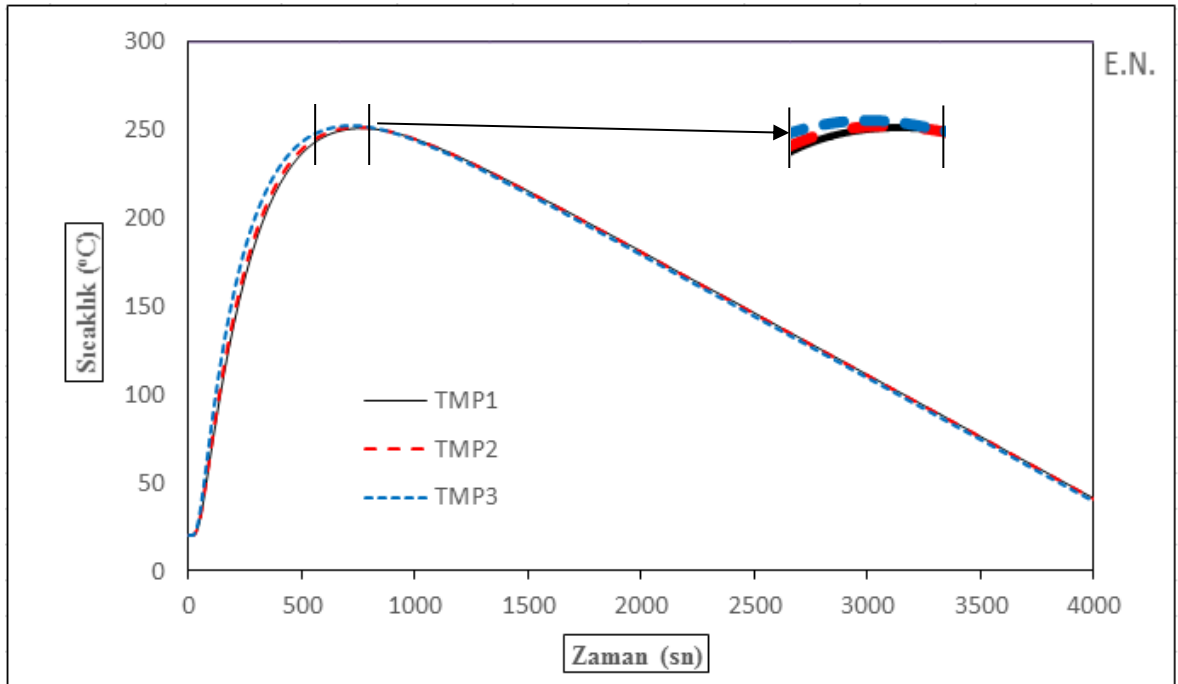
Taşıyım ile meydana gelen ısı geçişi ihmal edildiği için elektrolit kimyasal malzemelerinin faz değişimi incelenmemiştir. Aynı zamanda kimyasal malzemelerin ısı iletkenlik değerleri birbirine çok yakındır. Bu sebeple grafikler incelendiği zaman elde edilen eğrilerin birbirine benzer olduğu görülmektedir. Ancak çalışmada önemli olan pillerin aktif olarak kullanılabileceği süre olduğu için grafiklerde her elektrolit kimyasal malzemesinin erime noktası dikkate alınarak aktif çalışma süreleri hesaplanmıştır. 4. modülde kullanılan $\text{C}_{16}\text{H}_{36}\text{BrN}$ kimyasalının düşük erime sıcaklığı sebebi ile analizler içinde en uzun süre olan 3132 sn pili aktif hale getirdiği görülmüştür.



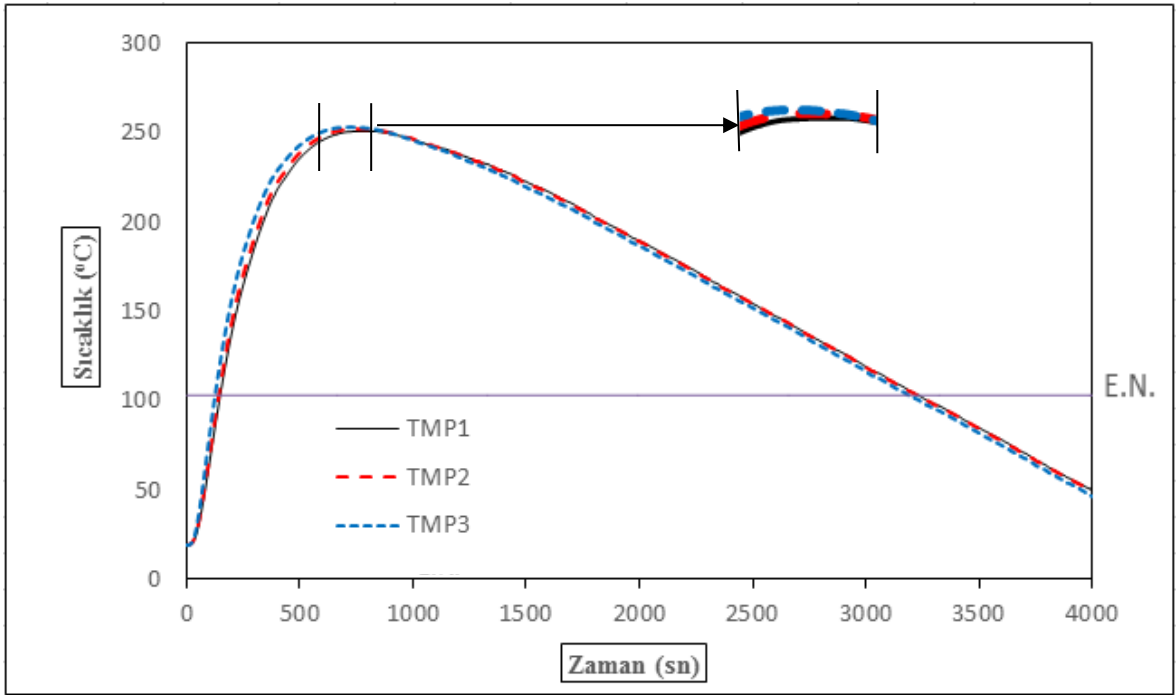
Şekil 3.62. 1. Modüldeki elektrolitlerin zamana bağlı sıcaklık grafiği



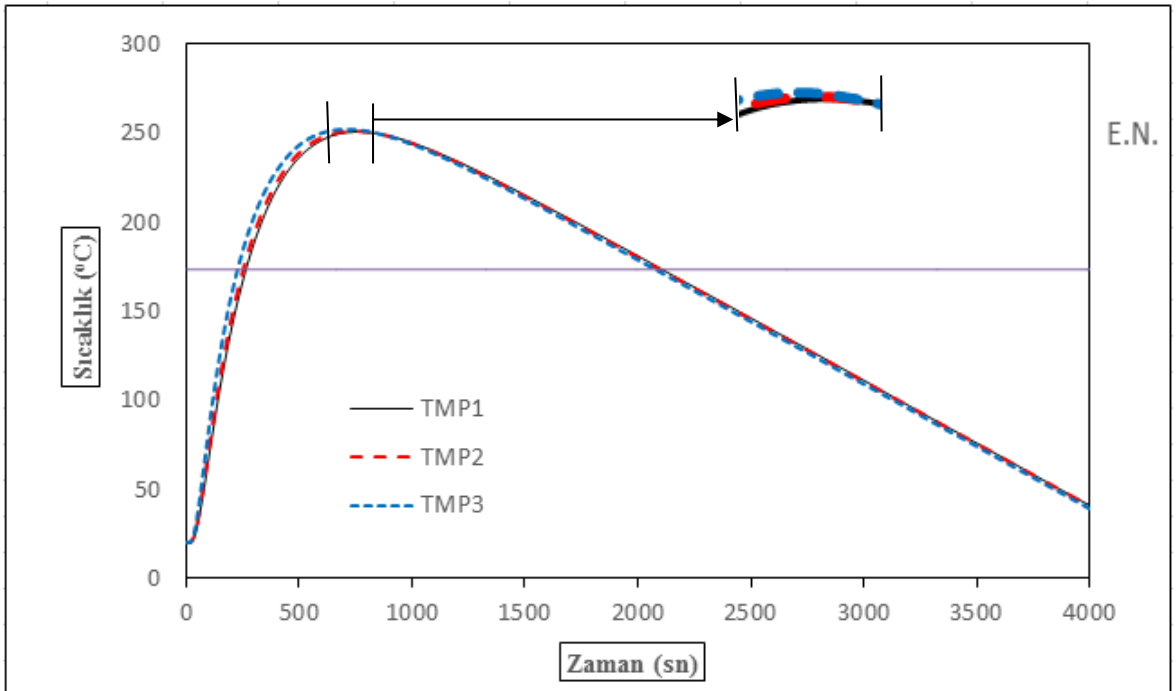
Şekil 3.63. 2. Modüldeki elektrolitlerin zamana bağlı sıcaklık grafiği



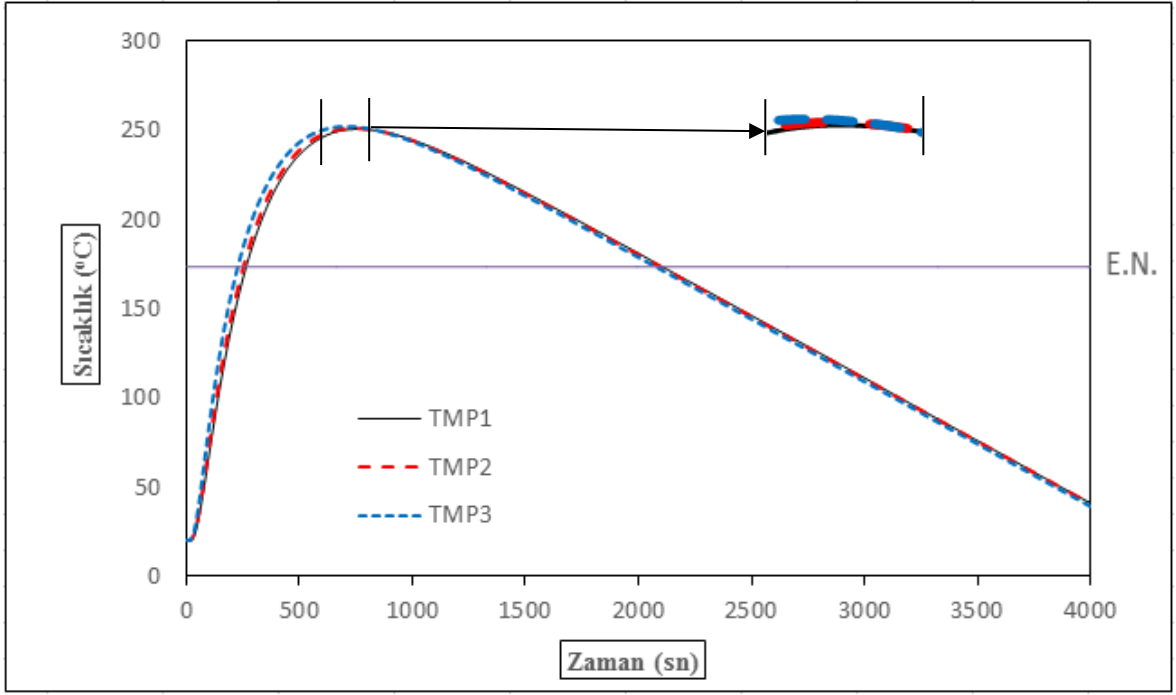
Şekil 3.64. 3. Modüldeki elektrolitlerin zamana bağlı sıcaklık grafiği



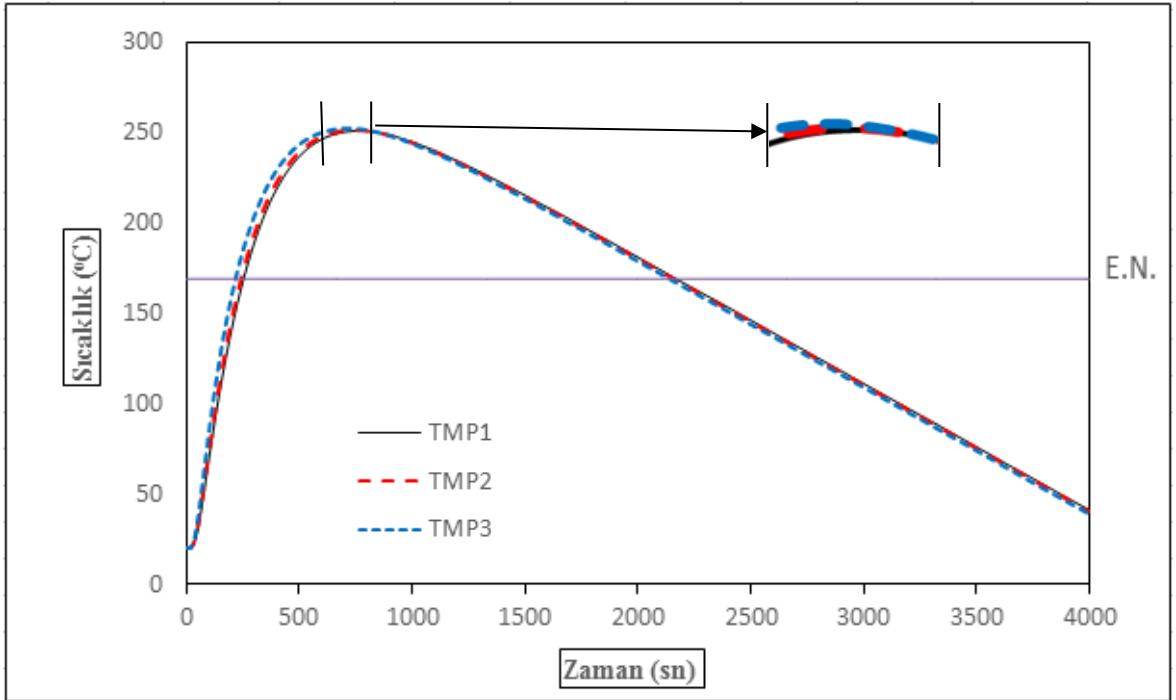
Şekil 3.65. 4. Modüldeki elektrolitlerin zamana bağlı sıcaklık grafiği



Şekil 3.66. 5. Modüldeki elektrolitlerin zamana bağlı sıcaklık grafiği



Şekil 3.67. 6. Modüldeki elektrolitlerin zamana bağlı sıcaklık grafiği

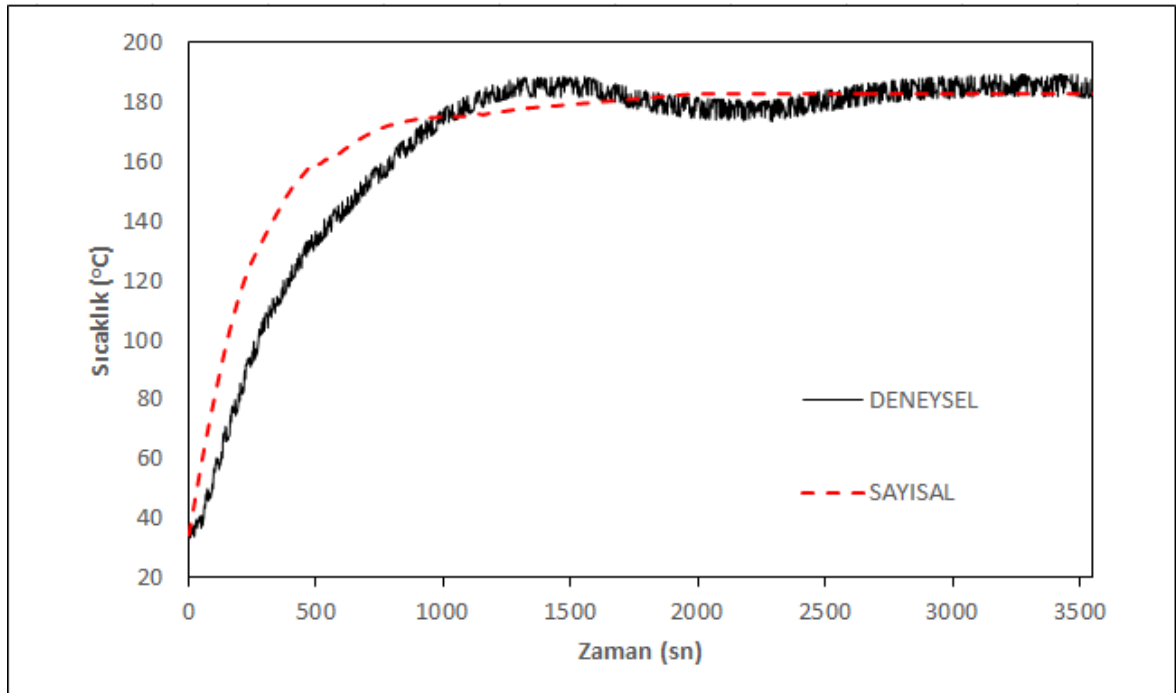


Şekil 3.68. 7. Modüldeki elektrolitlerin zamana bağlı sıcaklık grafiği

3.3. Yapılan Sayısal Çalışmanın Deneysel Çalışma ile Kıyaslanması

Yapılan bu çalışma 112M411 numaralı TÜBİTAK projesi kapsamında hazırlanmıştır. bu projede çalışma deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Bu karşılaştırma grafiği anot olarak Mg, katot olarak FeS₂ ve elektrolit olarak KSCN+ C₄H₁₂IN ötektik karışımın kullanıldığı bir modülden elde edilmiştir. Modelin doğruluğunu incelemek için yapılan bu çalışmada ölçülen değerler 2. hücrede bulunan elektrolitten alınmıştır.

Şekil 3.69’da Sayısal ve deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlar grafik halinde verilmiştir. Sayısal olarak oluşturulan modelde ısıtıcıya 180 °C sabit sıcaklık verilerek aşağıdaki grafikte belirtilen sayısal sonuç elde edilmiştir. Ancak yapılan deneysel çalışmada ısıtıcı kontrolü bir AC potansiyometre ile yapılmıştır ve grafikte deneysel olarak verilen eğri elde edilmiştir [41]. Bu eğride sıcaklık değerlerinde ani azalma ve artışlar gözlenmiştir. Sayısal çalışmada ise bu tür parametreler etkili olmadığı ve çevre etkisi göz ardı edildiği için sıcaklık değerlerinde ani değişiklikler meydana gelmemiştir. Yapılan çalışmanın sayısal ve deneysel verilerinde elektrolit sıcaklığında 1000.sn’ye kadar sürekli bir artışın olduğu bu zaman adımımdan sonra ise elektrolit sıcaklığın ısıtıcının sıcaklık değerine ulaştığı ve aynı sıcaklıkta kaldığı gözlenmiştir. Yapılan incelemeler sonucunda sayısal çalışmanın deneysel çalışma ile paralel olduğu görülmüştür.



Şekil 3.69. Sayısal ve Deneysel Sonuçların Karşılaştırılması

4. SONUÇLAR ve TARTIŞMA

Sayısal çalışmalar kapsamında ısıl pillerde elektrolit olarak kullanılan saf kimyasallar ve ötektik karışımların pil içerisindeki sıcaklık dağılımına etkisi PHOENİCS paket programı yardımı ile incelenmiştir. Bu amaçla 7 farklı modül oluşturulmuştur. Oluşturulan bu modüllerin hepsinde anot malzemesi olarak Mg ve katot malzemesi olarak FeS₂ kullanılmıştır. Yapılan ilk 5 analizde saf kimyasallar kullanılırken, son 2 analizde ötektik karışım ve nano katkılı ötektik karışım tercih edilmiştir.

Yapılan çalışmada orta güç ölçekli ısıl pillerde elektrolit olarak kullanılan kimyasalların erime noktalarındaki sıcaklık değerleri dikkate alınarak ısıtıcıya ilk sıcaklık değeri olarak 300 °C verilerek analizler gerçekleştirilmiştir. Isıl pillerin aktif oldukları maksimum süre dikkate alınarak 4000sn zaman adımı belirlenmiştir. Isıtıcı bu zaman adımında lineer olarak soğutularak oda sıcaklığına getirilmiştir.

1.modülde KSCN, 2. Modülde C₁₆H₃₆IN, 4. modülde C₁₆H₃₆BrN ve 5. modülde C₁₆H₃₆F₆NP saf kimyasalları, 6. Modülde KSCN+ C₄H₁₂IN ötektik karışımı ve 7. Modülde KSCN+C₄H₁₂IN +SiO₂ nano katkılı ötektik karışımı elektrolit olarak kullanılmıştır. Kullanılan tüm elektrolitlerin erime noktalarına göre pilin aktif ömrü belirlenmiştir. Belirlenen bu değerler sırasıyla 1857 sn, 2456 sn, 3132 sn, 199 sn, 1862 sn ve 1916 sn'dir.

Elektrolit olarak C₄H₁₂IN kimyasalının kullanıldığı 3. modülde kimyasalın erime noktasındaki sıcaklık değeri 300 °C'dir. Analiz başlangıcında ısıtıcı olmasına rağmen zamanla sıcaklık değeri azaltıldığı için malzeme erime noktasındaki sıcaklık değerine ulaşamamıştır. Bu sebeple pilin aktif ömrü bu modül için belirlenememiştir. Isıtıcı yüzeye verilen sıcaklık değeri, analiz süresince sabit tutulursa veya sıcaklığın ilk değeri 300 °C'den daha fazla olursa, bu kimyasalında erime noktasındaki sıcaklık değerine ulaşılabilir. Bu analizde pillin aktif ömrü hesaplanamamış olmasına rağmen kimyasal malzemenin KSCN ile karışımı sonucunda (6.modül) pilin çalışma süresi belirlenmiştir.

6.modül ve 7.modül için elde edilen sonuçlar incelendiğinde 7.modülde elektrolit olarak kullanılan ötektiğe yapılan nano katkısının kimyasalın termofiziksel özelliklerini iyileştirdiği için pilin aktif olarak çalıştığı süreyi uzattığı görülmüştür.

Ötektik karışımın kullanıldığı 6.modülde ısıtıcıya sabit sıcaklık değeri vererek elde edilen sonuçlar incelenip deneysel çalışma ile kıyaslandı. Sonuçların birbiri ile paralellik gösterdiği bulundu. Sayısal incelemeler ışığında 7 farklı modül arasında en iyi çalışma süresinin 4.modülde (Mg-C₁₆H₃₆BrN-FeS₂) elde edildiği görüldü.

5. ÖNERİLER

Bu çalışma kapsamında farklı elektrolit kimyasalları kullanılarak PHOENİCS paket programında orta güç ölçekli modüllerin analizleri gerçekleştirildi. Bu çalışmalara ek olarak

- Farklı anot ve katot çiftleri kullanılarak yeni sayısal çalışmalar yapılabilir.
- Bu çalışmada PHOENİCS paket programı tercih edildi. Farklı paket programları kullanılarak analizler gerçekleştirilebilir.
- Yüksek güç ölçekli piller için zamana bağlı sıcaklık değerleri incelenebilir.
- Isıtıcı olarak tercih edilen malzeme ve ısıtma yöntemi değiştirilerek farklı analizler yapılabilir.
- Analizlerde kullanılan saf kimyasallardan ikili ve üçlü ötektik karışımlar hazırlanarak, bu karışımların termofiziksel özelliklerinin kullanıldığı sayısal çalışmalar yapılabilir.
- Farklı oranlarda yapılan nano katkısının pilin çalışma süresindeki etkisi incelenebilir.

KAYNAKLAR

- [1] **Guidotti, R.A. and Masset, P.**, 2006. Thermally activated (“thermal”) battery technology Part I: An overview, *Journal of Power Sources* **161**, 1443–1449.
- [2] **Guidotti, R.A. and Masset, P.J.**, 2008. Thermally activated (“thermal”) battery technology Part IV. Anode materials, *Journal of Power Sources* **183**, 388–398.
- [3] **Linden D. and Reddy T.B.**, 2002. Handbook of Batteries, McGraw-Hill Companies, New York.
- [4] **Masset, P.J. and Guidotti, R.A.**, 2008. Thermal activated (“thermal”) battery technology Part IIIa: FeS₂ cathode material, *Journal of Power Sources* **177**, 595–609.
- [5] **Masset, P.J. and Guidotti, R.A.**, 2008. Thermal activated (“thermal”) battery technology Part IIIb: Sulfur and oxide-based cathode materials, *Journal of Power Sources* **178**, 456–466.
- [6] **Masset, P. and Guidotti, R.A.**, 2007. Thermal activated (thermal) battery technology Part II: Molten salt electrolytes, *Journal of Power Sources* **164**, 397–414.
- [7] **Fujiwara, S., Inaba, M. and Tasaka, A.**, 2011. New molten salt systems for high temperature molten salt batteries: Ternary and quaternary molten salt systems based on LiF–LiCl, LiF–LiBr, and LiCl–LiBr, *Journal of Power Sources*, **196**, 4012–4018.
- [8] **Butler, P., Guidotti, R.A., Moya, L., Reinhardt, F. and Peterkin, F.**, 2002. High power thermal battery development, *IEEE*., 0-7803-7540-8/02
- [9] **Zimmerschied, K. and Gahl, J.**, 2010. Modulated high power thermal battery test stand, *IEEE*., 978 -1-4244-7129-4/10,
- [10] **Guidotti, R.A., Scharrer, G.L., Binasiewicz, E. and Reinhardt, F.W.**, 1998. Feasibility of a 8kW/kg, 5 minute thermal battery, *IEEE*., 0-7803-4245-5/98/

- [11] **Fujiwara, S., Kato, F., Watanabe, S., Inaba, M. and Tasaka, A.,** 2009. New iodide-based molten salt systems for high temperature molten salt batteries, *Journal of Power Sources* **194**, 1180–1183.
- [12] **Guidotti, R.A., Reinhardt, F.W. and Odinek, J.,** 2004. Overview of high-temperature batteries for geothermal and oil/gas borehole power sources, *Journal of Power Sources*, **136**, 257–262.
- [13] **Kauffmann, S. and Chagnon, G.,** 1992. Thermal battery for aircraft emergency power, *IEEE*, 0-7803-0552-3/92.
- [14] **Guibert, A. de., Crepy, G., Buchel, J.P., Dane1, V. and Geard J.,** 1990. Thermal battery based on a new, High-Voltage Cathodic Material, *IEEE*, 90CH2863-9/90/0000-0145.
- [15] **Kubota, K., Nohira, T. And Hagiwara, R.,** 2012. New inorganic ionic liquids possessing low melting temperatures and wide, electrochemical windows: ternary mixtures of alkali bis(fluorosulfonyl)amides, *Electrochimica Acta*, **66**, 320– 324.
- [16] **Masset, P., Schoeffert, S., Poinso, J.Y. and Poignet J.C.,** 2005 Retained molten salt electrolytes in thermal batteries, *Journal of Power Sources*, **139**, 356-365.
- [17] **Swift, G. A.,** 2011. Thermophysical Properties of Lithium Alloys for Thermal Batteries, *Int J Thermophys*, **32**, 2102–2111.
- [18] **Wells, J., Saltat, R., Lamb, C.M. and Fiechtl, M.D.,** 1992. Unintentional Thermal Battery Activation Due To Missile System Power Application To Battery Outputs; Cause And Corrective Actions, *IEEE*, 0-7803-0552-3/92.
- [19] **Butler, P., Wagner, C., Guidotti, R. and Francis, I.,** 2004. Long-life, multi-tap thermal battery development, *Journal of Power Sources*, **136**, 240–245.
- [20] **Masset, P.,** 2006. Iodide-based electrolytes: A promising alternative for thermal batteries, *Journal of Power Sources*, **160**, 688–697.
- [21] **Freitas, G.C.S., Peixoto, F. C. and Vianna Jr. A. S.,** 2008. Simulation of a thermal battery using PHOENICS, *Journal of Power Sources*, **179**, 424–429.

- [22] **Simisiroglou N., Breton S., Crasto G., Hansen K.S., Ivanell S.** 2014. Numerical CFD comparison of Lillgrund employing RANS, *Journal of Power Sources, Energy Procedia*, **53**, 342-351.
- [23] **Castellani F., Gravdahl A., Crasto G., Piccioni E., Vignaroli A.** 2013. A practical approach in the CFD simulation of off-shore wind farms through the actuator disc technique, *Energy Procedia*, **53**, 342-351.
- [24] **Castellani F., Vignaroli A.** 2013. An application of the actuator disc model for wind turbine wakes calculations, *Applied Energy*, **101**, 432-440.
- [25] **Albayrak B.** 2005. İç ısı üretimli silindirik çubuklarda birleşik ısı transferinin sayısal analizi, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, **21**, 140-153.
- [26] **Jing L., Quing P., S.** 2013. Numerical simulation and experiment study of indoors thermal environment in summer air-conditioned room, *Procedia Engineering*, **52**, 230–235.
- [27] **Wen-li D., Dong L.** 2013. Simulation of the atrium fire smoke flow and research about control studies, *Procedia Engineering*, **52**, 92 – 96.
- [28] **Dan X., Wen-lei Z.** 2011. The effect of natural wind to the atrium building smoke migration, *Procedia Engineering*, **11**, 560–565.
- [29] **Castellani F., Burlando M., Taghizadeh S., Astolfi D. and Piccioni E.** 2014. Wind energy forecast in complex sites with a hybrid neural network and CFD based method., *Energy Procedia*, **45**, 188-197.
- [30] **Kuas G., Başkaya Ş.** 2002. Havalandırılan bir ofis odasında hava hareketinin sayısal analizi, *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.*, **17**, 35-52.
- [31] **Çalışkan S., Altunok T., Güngüneş H.M. ve Başkaya Ş.** 2010. Hava perdeli bir ticari soğutma kabininin sayısal analizi, *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.*, **26**, 415-425.
- [32] **Doğan A.** 2003. Alt ve üst yüzeylerine ayrık ısıtıcılar yerleştirilmiş dikdörtgen kesitli bir kanalda karışık konveksiyonla ısı transferinin incelenmesi, *Doktora Tezi*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

- [33] **Başkaya Ş. ve Alpay E.**, 2003. Yatay kapalı bir ortamda ayrik ısı kaynaklarından olan doğal taşınım akışın sayısal incelenmesi, *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.*, **18**, 49-62.
- [34] **Mat D. M., Aydemir G. ve Kaplan Y.**, 1999. Yapısal degisken modelinin alaşımlarının katılaşmasında katı-sıvı bölgeye uygulanması, *Turkish Journal Of Engineering & Environmental Sciences* **25**, 179-189.
- [35] **Ergen H.**, 2007. Düşük lüle plaka mesafelerinde çarpan hava jetinin oluşturduğu ısı transferinin sayısal olarak incelenmesi, *Yüksek lisans tezi* .
- [36] **Özsunar A. Başkaya Ş. ve Sivrioğlu M.**, 2000. Dikdörtgen kesitli bir kanalda laminar karışık konveksiyon şartlarındaki akışın sayısal olarak incelenmesi, *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.*, **15**, 71-86.
- [37] **Fırat, M.**, 2010. Yeni nesil yanma odalarında akış ve ısı transferinin sayısal olarak modellenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [38] **Çengel Y.**, 2014. Isı ve Kütle Transferi, Güven Bilimsel Yayıncılık.
- [39] **Concentration Heat And Momentum Limited,,** 2013. POLIS, the PHOENICS On-Line Information System.
- [40] **Williams D. F.**, 2006. Assessment of Candidate Molten Salt Coolants for the NGNP/NHI Heat-Transfer Loop, *Nuclear Science and Technology Division*. **69**.
- [41] **Menteş M.C.**, 2015. Nano parçacık katkılı elektrolitin kullanıldığı yeni bir ısıl pilin geliştirilmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.

ÖZGEÇMİŞ

Gamzepelin AKSOY, 28 Kasım 1988 yılında Niğde’de doğmuştur. Ortaöğrenimini Elazığ Merkez Anadolu Lisesinde tamamlayarak, 2007 yılında Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Elektronik Bilgisayar Eğitimi bölümü Bilgisayar Öğretmenliği programına başlamıştır ve 2011 yılında mezun olmuştur. 2013 yılında Anadolu Üniversitesi Çalışma Ekonomisi ve Endüstriyel İlişkiler programından mezun olmuştur. 2013 yılında Fırat Üniversitesi Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı Mekanik Sistemler programında yüksek lisansa başlamıştır. Şubat 2013’ten Haziran 2015’e kadar, 112M411 nolu “Ötektik Organik Tuzun Kullanıldığı Yeni Bir Isıl Pilin Geliştirilmesi” konulu 1001 projesinde bursiyer olarak görev almıştır. 2014 yılında Mühendislik Tamamlama Programı ile Teknoloji Fakültesi Yazılım Mühendisliğine yerleştirilmiş ve 2015 yılında mezun olmuştur. 2015 yılında başladığı Fırat Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Yazılım Mühendisliği Anabilim Dalındaki yüksek lisansına devam etmektedir.