



**ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA KULLANILAN BATARYA  
PAKETİNİN TERMAL MODELİ VE ANALİZİ**

**Mert Ali ÖZEL**



T.C.  
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA KULLANILAN BATARYA PAKETİNİN  
TERMAL MODELİ VE ANALİZİ**

**Mert Ali ÖZEL**

Dr.Öğr.Üyesi Gürsel ŞEFKAT  
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2019

## TEZ ONAYI

Mert Ali ÖZEL tarafından hazırlanan "ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA KULLANILAN BATARYA PAKETİNİN TERMAL MODELİ VE ANALİZİ" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

**Danışman** : Dr.Öğr.Üyesi Gürsel ŞEFKAT

**Başkan** : Dr.Öğr.Üyesi Gürsel ŞEFKAT  
Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik  
Fakültesi,  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

**Üye** : Prof. Dr. Osman KOPMAZ  
Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik  
Fakültesi,  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

**Üye** : Dr. Öğr. Üyesi Kemal Furkan SÖKMEN  
Bursa Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa  
Bilimleri Fakültesi,  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

İmza

İmza

İmza

Yukarıdaki sonucu onaylarım

Prof. Dr. Ali BAYRAM  
Enstitü Müdürü  
22.8.2019

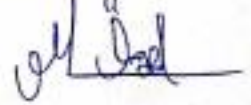
**U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;**

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

**beyan ederim.**

15.02.2019

**Mert Ali ÖZEL**



## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA KULLANILAN BATARYA PAKETİNİN TERMAL MODELİ VE ANALİZİ

**Mert Ali ÖZEL**

Bursa Uludağ Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

**Danışman:** Dr.Öğr.Üyesi Gürsel ŞEFKAT

Elektrikli araç sayılarının hızla arttığı günümüzde yapılan bilimsel çalışmalar da, aynı oranda bir ivme kazanmıştır. Elektrikli araç teknolojisinin yaygınlaşması adına en kritik alt sistemlerden biri olan batarya paketinin doğru analiz edilmesi, sürüş performansından menzile kadar kullanıcıyı doğrudan ilgilendiren önemli performans ölçütlerine etki etmektedir. Tez çalışması kapsamında, elektrikli aracın batarya paketinde kullanılacak lityum iyon pil hücrelerinin elektriksel ve termal matematik modelleri Matlab&Simulink programında oluşturulmuştur. Simülasyon çıktıları yapılan test değerleri ve Ansys programında yapılan termal analizler ile doğrulanmıştır. Oluşturulan pil modeliyle, Tesla Model S aracına ait batarya paketinin benzeri Matlab&Simulink ortamda modellenmiştir. Oluşturulan batarya paketi termal olarak Ansys programında yapılan analizler ile doğrulanmış ve elektriksel çıktıları araca ait katalog değerleriyle karşılaştırılmıştır. Araç üzerinde simülasyonlarının yapılabilmesi için, araca ait elektrik motoru ve taşıt dinamiği modelleriyle sürücü, yol şartları ve çevre şartları modelleri oluşturulmuştur. Sürüş performansını standart değerler ile karşılaştırma adına, yaygın kullanılan sürüş çevrimlerinden NEDC tercih edilmiştir. Yol şartları ve çevre şartları modellerinde, İstanbul ve Erzurum illerinde belirlenen güzergahlar ve her bir şehre ait mevsimsel sıcaklık değerleri altında günlük, bir yıllık ve sekiz yıllık süre zarfında simülasyonları yapılmıştır. Bataryanın elektriksel performansı, termal performansı ve yaşlanma faktörü gibi değerler, grafik haline getirilerek tartışılmaya hazır hale getirilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Batarya Paketi, Batarya Termal Yönetim Sistemi, Matematiksel Modelleme.

**2019, vii + 67 sayfa.**

## **ABSTRACT**

MSc/PhD Thesis

### **THERMAL MODELLING AND ANALYSIS OF ELECTRIC VEHICLE'S BATTERY PACKAGE**

**Mert Ali ÖZEL**

Bursa Uludağ University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Mechanical Engineering

**Supervisor:** Dr. Academic Member Gürsel ŞEFKAT

Nowadays, the number of electric vehicles has increased rapidly and also same growing for the scientific studies which about them. Accurate analysis of the battery pack, which is one of the most critical subsystems for the electric vehicle technology, influences important performance criteria that directly concern the user from driving performance to the range. In the scope of the study, electrical and thermal mathematical models of the lithium-ion battery cell to be used in the battery pack of the electric vehicle were created in Matlab & Simulink software. Simulation outputs were confirmed by the test values and thermal analyses performed in the Ansys software. The battery pack of the Tesla Model S is modeled in the Matlab & Simulink environment. The battery pack was thermally verified by the analyses performed in the Ansys software and the electrical outputs were compared with the vehicle's catalog specifications. In order to make simulations on the vehicle, electric motor and vehicle dynamics models of the vehicle and driver, road conditions and environmental conditions models were created. Also, in order to compare driving performance with standard values, NEDC was preferred from one of the standard driving cycles. In the road conditions and environmental conditions models, it is simulated daily, one-year and eight-year periods under the seasonal temperature values of each city and the routes determined in the provinces of Istanbul and Erzurum. The electrical performance, thermal performance and aging factor of the battery are made ready for discussion by graphs.

**Keywords:** Battery Package, Battery Thermal Management System, Mathematical Modelling

**2019, vii + 67 pages.**

## TEŞEKKÜR

Tez çalışmam kapsamında, desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen aileme ve danışmanım Dr.Öğr.Üyesi Gürsel ŞEFKAT'e vermiş olduğu değerli desteklerinden ötürü teşekkürlerimi sunarım. Tezimin deneysel olarak doğrulanmasında, gerekli olan deney teçhizatlarının bir kısmını temin ettiğim Uludağ Üniversitesi Makina Topluluğu ekibine teşekkürlerimi sunarım.

Mert Ali ÖZEL

.../.../.....



## İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	ix
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	3
2.1. Lityum İyon Batarya.....	5
2.2. Lityum-İyon Pilin Modellenmesi.....	7
2.3. Lityum-İyon Pilin Eşdeğer Devre Modeli.....	8
2.4. Lityum-İyon Pilin Termal Modeli.....	12
2.5. Sıvı Soğutmalı Termal Yönetim Sistemi.....	14
2.6. Faz Değiştiren Malzemeler Yardımıyla Termal Yönetim.....	16
2.7. Termoelektrik Termal Yönetim Sistemi.....	18
2.8. Hava Yardımıyla Termal Yönetim Sistemi.....	18
2.9. Termal Yönetim Sistemlerinin Karşılaştırılması.....	20
2.10. Lityum İyon Pillerin Geri Dönüşümü.....	21
2.11. Bataryalı Elektrikli Araçlar.....	22
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	24
3.1. Lityum İyon Pilin Dinamik Modeli.....	24
3.1.1. Polarizasyon Sabiti.....	25
3.1.2. Eksponansiyel Kapasite.....	25
3.1.3. Eksponansiyel Gerilim.....	26
3.1.4. Eğim Sabiti.....	27
3.1.5. İç Direnç Modeli.....	27
3.1.6. Bataryanın Sabit Gerilimi.....	28
3.1.7. Bataryanın Şarj Durumu (SOC).....	28
3.1.8. Bataryanın Deşarj Anı Dinamik Modeli.....	30
3.1.9. Bataryanın Şarj Anı Dinamik Modeli.....	30
3.1.10. Bataryanın Şarj/Deşarj Anı Dinamik Modeli.....	31
3.2. Bir Pil Hücresinin Termal Modeli.....	31
3.3. Bir Pil Hücresinin İç Termal Dağılım Modeli.....	32
3.4. Termal Yönetim Sistemi Modeli.....	34
3.5. Pil Hücresi ile Termal Yönetim Sistemi Arasındaki İlişki.....	38
3.6. Batarya Paketinin Elektrik Modeli.....	39
3.7. Elektrik Motorunun Elektriksel Modeli.....	40
3.8. Taşıt Dinamiği Modeli.....	42
3.9. Sürücü Modeli.....	43
3.10. Çevre Şartları Modeli.....	45
3.11. Batarya Elektrikli Araç Modeli.....	46
4. BULGULAR ve TARTIŞMA.....	48
4.1. Pil Hücresinin Doğrulanması.....	48
4.2. Termal Yönetim Sisteminin Doğrulanması.....	52
4.3. Batarya Paketinin Simülasyon Sonuçları.....	56



4.4. Elektrikli Aracın Belirlenen Çevrimde Batarya Paketinin Performansı .....	58
5. SONUÇ.....	62
KAYNAKLAR .....	64
EKLER.....	65
ÖZGEÇMİŞ .....	68



## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

<b>Simgeler</b>	<b>Açıklama</b>
$V_{OC}$	Açık Devre Gerilimi [V]
$R_n$	Dahili Direnç [ohm]
$C_n$	Dahili Kapasitans [F]
$V_c$	Kapasite Gerilimi [V]
$I$	Akımı [A]
$V$	Gerilim [V]
$C_n$	Nominal Kapasitans [F]
$T \frac{\partial V_{oc}}{\partial T}$	Tersinir Entropi [Joule/kg.K]
$Q_T$	Termal Yönetim Sistemi Isı Değeri [W]
$E_0$	Gerilim Sabiti [V]
$A$	Eksponansiyel Gerilim [V]
$B$	Eksponansiyel Kapasite [1/Ah]
$C$	Eğim Sabiti [V/Ah]
$R$	İç Direnç [ohm]
$Q_b$	Batarya Isı Değeri [W]
$Q_s$	Termal Yönetim Sistemi Isı Değeri [W]
$K_{Tref}$	Referans Polarizasyon Sabiti [V/Ah]
$K$	Polarizasyon Sabiti [V/Ah]
$Q$	Bataryanın Kapasitesi [Ah]
$T$	Batarya Sıcaklığı [K]
$T_y$	Yüzey Sıcaklığı [K]
$it$	Bataryanın Deşarj Anında Dışarıya Verdiği Kapasite [Ah]
$Re_D$	Reynolds Sayısı
$Nu$	Nusselt Sayısı
$\dot{m}_s$	Termal Sıvı Debisi [kg/s]
$Q_{ortam}$	Ortamdaki Isı Transferi [W]
$T_m$	Tahrik Torku [Nm]
$T_e$	Elektrik Motoru Torku [Nm]
$F_{aero}$	Aerodinamik Direnç Kuvveti [N]
$F_{eğim}$	Eğim Kuvveti [N]
$F_l$	Direnç Kuvvetleri Toplamı [N]
$T_l$	Direnç Momenti [N]

<b>Kısaltmalar</b>	<b>Açıklama</b>
SOC	Bataryanın Şarj Durumu
SOH	Bataryanın Sağlık Durumu
NEDC	Avrupa Standart Sürüş Çevrimi

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<b>Sayfa</b>
Şekil 2.1. Deşarj (boşalma) anındaki bir lityum iyon pil .....	5
Şekil 2.2. n. Dereceden bataryanın eşdeğer devre modeli .....	8
Şekil 2.3. Batarya iç direncinin SoC ve Sıcaklık ile değişimi. ....	11
Şekil 2.4. Termal model ile dinamik model arasındaki ilişkiyi gösteren algoritma .....	12
Şekil 2.5. Lityum iyon pile ait X-ray fotoğraf .....	13
Şekil 2.6. Lityum iyon pile ait ısı üretim bölgelerinin tanımlandığı şematik gösterim ..	13
Şekil 2.7. Tek Döngülü Sıvı Soğutma Sistemi.....	14
Şekil 2.8. Faz Değiştiren Malzemenin Hücre Sıcaklığı-Zaman Eğrisi .....	16
Şekil 2.9. Bataryanın termal yönetiminde kullanılan peltier eleman. ....	18
Şekil 2.10. Basit bir hava yardımıyla termal yönetim sistemi. ....	19
Şekil 2.11. Araç içi klima sistemine bütünleşmiş hava termal yönetimi. ....	19
Şekil 2.12. Soğutucu gaz yardımıyla, hava termal yönetimi.....	20
Şekil 3.1. Modelin oluşturulmasında kullanılacak bir lityum iyon pile ait kapasite-gerilim eğrisi üzerindeki eksponansiyel ve nominal bölge.....	24
Şekil 3.2. Polarizasyon sabitinin Simulink Modeli .....	25
Şekil 3.3. Eksponansiyel Kapasitenin Simulink Modeli .....	26
Şekil 3.4. Eksponansiyel Gerilimin Simulink Modeli.....	26
Şekil 3.5. Eğim Sabiti Simulink Modeli .....	27
Şekil 3.6. Bataryanın iç direncine ait Simulink modeli .....	28
Şekil 3.7. Bataryanın gerilim sabiti Simulink Modeli. ....	28
Şekil 3.8. Bataryanın Deşarj Şarj Durumu Simulink Modeli .....	29
Şekil 3.9. Bataryanın Şarj Şarj Durumu Simulink Modeli .....	29
Şekil 3.10. Batarya Deşarj Dinamik Modeli .....	30
Şekil 3.11. Bataryanın şarj dinamik modeli.....	30
Şekil 3.12. Bataryanın şarj/deşarj durumu. ....	31
Şekil 3.13. Bataryanın Ürettiği Isı Simulink Modeli .....	32
Şekil 3.14. Pil İç Sıcaklık Dağılımı (Ek-1) .....	33
Şekil 3.15. Bir Modülün Üstten Görünümü ve Termal Sıvının Hareket Yönü .....	34
Şekil 3.16. Bir Pil Hücresi ile Termal Yönetim Sisteminin Kesiti. ....	35
Şekil 3.17. Birinci ısı transferi doğrultusu. ....	35
Şekil 3.18. İkinci ısı transferi doğrultusu. ....	36
Şekil 3.19. Modül içerisindeki termal sıvının akış kanallarının şekli. ....	36
Şekil 3.20. Akış kanalının CAD Modeli. ....	37
Şekil 3.21. Akış kanalının Mesh Yapısı.....	37
Şekil 3.22. Akış kanalının Simulink Modeli.....	37
Şekil 3.23. Birinci ısı transferi doğrultusuna ait Simulink model.....	38
Şekil 3.24. İkinci ısı transferi doğrultusuna ait Simulink model.....	38
Şekil 3.25. Pil Hücresi ile Termal Yönetim Sistemi arasındaki ilişkinin Simulink modeli. ....	39
Şekil 3.26. Bir modül içerisindeki 74 hücreli 6 paralel grubun seri bağlantısını içeren Simulink Model.....	40
Şekil 3.27. 16 adet modülün seri bağlantısını içeren batarya paketinin Simulink Modeli. ....	40
Şekil 3.28. Elektrik Motoru Tork ve Verim Karakteristiği.....	41
Şekil 3.29. Elektrik Motoru Simulink Modeli. ....	42
Şekil 3.30. Taşıt modeline ait Simulink Modeli. ....	43

Şekil 3.31. NEDC sürüş çevrimi. ....	44
Şekil 3.32. İstanbul ili için Mecidiyeköy-Yenikapı güzergahı yol şartı. ....	45
Şekil 3.33. Erzurum ili için seçilen güzergahın yol durumu. ....	45
Şekil 3.34. İstanbul ve Erzurum illeri için mevsimsel sıcaklık değerleri. (Anonim,2019) .....	46
Şekil 3.35. Elektrikli Araca ait Simulink Model.....	47
Şekil 4.1. Farklı deşarj akım değerleri altında, pil hücresinin kapasite-gerilim eğrisi. ..	48
Şekil 4.2. Panasonic pil hücresi üzerindeki çalışma için oluşturulan test düzeneği. ....	49
Şekil 4.3. 3250 mA deşarj akımı altında test verilerinin, üretici firma ve simülasyon değerleriyle karşılaştırılması. ....	50
Şekil 4.4. 1500mA ve 3000 mA deşarj akımı altında simülasyon sonuçları. ....	50
Şekil 4.5. Farklı sıcaklık değerlerinde simülasyon sonuçlarının üretici firma değerleriyle kıyaslanması. ....	51
Şekil 4.6. 15°C sıcaklık değerinde simülasyon sonuçlarının test değerleriyle kıyaslanması. ....	51
Şekil 4.7. Akış kanalının, konuma bağlı sıcaklık eğrisi. ....	52
Şekil 4.8. Termal analizi yapılacak termal yönetim sisteminin sınır ve başlangıç şartları. .....	52
Şekil 4.9. Orta ve sık ağ yapısına sahip modellerin analiz sonuçları. ....	53
Şekil 4.10. Verilen kesitteki sıcaklık değerlerinin karşılaştırılması.....	53
Şekil 4.11. Pil hücresinin kesitinin modeli ve ağ yapısı. ....	54
Şekil 4.12. Pil hücresinin sınır şartları ve analiz sonucu.....	54
Şekil 4.13. Termal yönetim sistemine ait alüminyum parçanın ağ yapısı. ....	55
Şekil 4.14. Pil hücresi ve termal yönetim sistemin sınır şartları ve analiz sonucu. ....	55
Şekil 4.15. Pil hücresi ve termal yönetim sistemin belirtilen kesitteki Simulink ve Ansys program çıktıları. ....	56
Şekil 4.16. Batarya paketinin, 25 °C’de 312 mA deşarj anındaki kapasite- gerilim ilişkisi. .....	56
Şekil 4.17. Batarya paketinin, 0 °C’de 312 mA deşarj anındaki kapasite- gerilim ilişkisi. .....	57
Şekil 4.18. 0 °C’de başlangıç sıcaklığındaki pil hücresinin termal yönetim sistemi yardımıyla 22°C sıcaklığa ulaşma zamanı. ....	57
Şekil 4.19. İki şehir için belirlenen güzergah, NEDC sürüş çevrimi ve 20°C sıcaklıktaki elektrikli aracın bir günlük çevriminde kat ettiği mesafeye göre batarya paketinin şarj durumu. ....	58
Şekil 4.20. İki şehir için belirlenen güzergah, NEDC sürüş çevrimi ve iki şehrin Ocak ayı ortalama sıcaklık değerinde elektrikli aracın bir günlük çevrimde kat ettiği mesafeye göre batarya paketinin kapasite durumu. ....	59
Şekil 4.21. İki şehir için belirlenen güzergah, NEDC sürüş çevrimi ve iki şehrin sahip olduğu aylık ortalama sıcaklık değerlerinde elektrik aracın bir yıl çevrimde batarya paketinin kapasite durumu. ....	60
Şekil 4.22. İki şehir için belirlenen güzergah, NEDC sürüş çevrimi ve iki şehrin sahip olduğu aylık ortalama sıcaklık değerlerinde elektrik aracın 8 yıllık çevrimde batarya paketinin kapasite durumu. ....	61

## ÇİZELGELER DİZİNİ

### Sayfa

Çizelge 2.1. Lityum-İyon pil hücresinin avantaj ve dezavantajları. ....	7
Çizelge 2.2. Termal Yönetim Sistemlerinin Avantajları ve Dezavantajları.....	21



## 1. GİRİŞ

Otomotiv sektöründe, zararlı gaz salınımı olmadan ulaşımı sağlayacak araçların geliştirilmesi günümüz ve geleceğin en çok uğraş verdiği konuların başında gelmektedir. Bu anlamda ön plana çıkan bataryalı elektrikli araçlar üzerine yapılan çalışmalar yoğun bir şekilde devam etmektedir.

Çevreye zararı içten yanmalı araçlara göre daha az olan elektrikli araçların yaygınlaşabilmesi için çözülmesi gereken sorunları olduğu aşikardır. Bu sorunun temeli ise aracın en önemli alt bileşeni olan batarya ünitesi kaynaklıdır. (Rao ve ark, 2016) Bataryanın, şarj süresinin uzun olması ve depoladığı enerjiyle aracın kat edeceği menzilin içten yanmalı araçlara nazaran oldukça düşük olması bu problemlerin ana nedenidir. (Axsen ve ark., 2018)

Elektrikli aracın geliştirilmesinde, en önemli alt sistem olan bataryanın doğru bir şekilde analiz edilip kurgulanması aracın performansı açısından bir hayli önem arz etmektedir. Bu sebeple, pil hücrelerinin matematiksel modelleri tasarım aşamasında aracın performansı, ömrü vb. kritik bilgileri sunması nedeniyle otomotiv sektöründe tercih edilmektedir. Ayrıca, matematiksel modelleme sadece tasarım aşamasında kullanılmamakla birlikte aracın çalışma anında da özellikle batarya yönetim sistemi ile işbirliği halinde çalışması bataryaların ömrü açısından oldukça önem arz etmektedir. (Milpitas, 2001)

Birçok batarya türü arasından, otomotiv sektörü için günümüzün en avantajlı batarya türü lityum iyon olarak görülmektedir. Lityum-iyon bataryalar elektrikli ve hibrit araçlarda, yüksek özgül enerjileri, uzun ömürleri ve düşük kendi kendine deşarj oranı nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır. (Chaturverdi ve ark., 2010) Lityum-iyon pilleri bu tarz teknolojilerde uygun bir şekilde kullanılabilme adına düzgün tanımlanmış modeller kullanılmaktadır. (Geller ve ark, 2010) Doğru bir lityum-iyon pil modeli, yalnızca şarj durumunun (SOC) ve sağlık durumunun (SOH) tahminin yapılması, aracın reel testlerindeki sonuçlarına yaklaşmasını arttırmaktadır. Lityum-iyon batarya modellemesi, tasarım öncesi analizde çok önemli bir rol oynamaktadır. Doğruluğunu geliştirmek,

lityum-iyon pil modellerinin kararlılığı ve hızlılığı, çoğu bilim adamı tarafından halen daha çalışılmakta olan bir konudur. (Muratori,2009), (Gümüşsu, 2017)

Tez kapsamında eşdeğer devre modeli üzerinde durulacak olup, gerçek lityum iyon pil verilerine ulaşabilme adına akım yoğunluğu, sıcaklık, pilin yaşlanması gibi önemli parametrelerin etkisi göz önüne alınarak, model geliştirilecektir. Geliştirilen matematiksel modelin doğrulanmasında üretici firmanın paylaşmış olduğu pil karakteristikleri ile karşılaştırılacak aynı zamanda pil numunesi üzerinde yapılan akım yoğunluğu test sonuçlarıyla model çıktıları mukayese edilecektir. Sıcaklık dağılımlarının doğruluğu ve termal yönetim sistemi modelinin doğruluğunu test etme adına ise Ansys yazılımı kullanılacaktır. Modelin doğrulanmasının akabinde, oluşturulan sayısal elektrikli araç modeli yardımıyla belirlenen sürüş çevrimi ve çevre şartları altında aracın günlük, bir yıllık ve sekiz yıllık süre zarfında simülasyonları yapılacaktır.

## 2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI

Elektrikli araçlar ve özellikle batarya ile ilgili son dönemde, çok önemli çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmalar içerisinde elektrikli araçların alt sistemlerine odaklanan çalışmalara odaklanmak tezin içeriğine göre daha uygun olacaktır. Araçların tek şarjla gidebileceği menzil değerlerinin yükseltilmesi üzerine yapılan çalışmalarda batarya kutusu ve batarya yönetim sistemleri önemli rol oynamaktadır. Bataryanın verimli çalışma şartları göz önüne alındığında, kaynak araştırmasında incelenen çalışmalar ağırlıklı olarak elektrikli araç batarya teknolojileri, termal yönetim sistemi ve matematiksel modellenmesi üzerine olacaktır. Bu bölümde ağırlıklı olarak kuramsal temeller üzerinde durulacak olup, literatüre girmiş çalışmaların bazıları aşağıda özetlenmiştir.

İncelenen tez çalışmasında (Sayın, 2011), lityum-iyon bataryanın modellenmesi ve özellikle batarya yönetim sistemi ve özel olarak da dengeleme sistemi tasarım değerlerinin oluşturulması sağlanmıştır. Bu doğrultuda öncelikle var olan farklı elektrikli araç iç mimarileri ve alt sistemleri için incelemeler yapılmıştır. Bu alt sistemler arasında en önemlisi ve modellenmesi en zor olan bataryaların, karakteristikleri ile ilgili bilgileri içermektedir. Lityum-iyon bataryayı denetleyecek sistemin dinamik davranışının belirlenebilmesi için gerekli olan matematiksel model oluşturulmuştur. Bu model kullanılarak benzetimler yapılmış, elde edilen çıktılar ile batarya hücresi dengeleme stratejisi geliştirilmiştir.

Literatürde, çok sayıda lityum iyon pillerinin yaşlanmasına bağlı model bulunmaktadır. Ancak, genel olarak bu çalışmalar genelde tek ölçekli modellere odaklanmıştır. (Milpitas, 2001), (Chaturverdi ve ark., 2010). Bu durumda, pillerin mühendislik uygulamalarında gerçek verilerle olan hata paylarına neden olmaktadır. Aksen ve ark.(2008) yapmış oldukları çalışmalarında içten yanmalı motora sahip hibrit ve diğer hibrit elektrikli araçlar mimarilerinde kullanılabilecek batarya sistemlerinin geliştirilmesi ile ilgili konulardan olan; hibrit elektrikli araçların temel tasarımları, teknik beklentilerin karşılaştırılması, batarya tasarımındaki seçilen tasarım değişkenleri ve farklı batarya kimyalarını



incelemişlerdir. Çalışmada incelenen farklı batarya tipleri sırasıyla kurşun-asit, nikel-kadmiyum, nikel metal hidrat ve lityum-iyon'dur. Elektrikli araçlarda ve büyük ölçüde hibrit araç uygulamalarında özellikle lityum-iyon teknolojisinin güç, enerji, ömür, güvenlik ve maliyet kısıtları açısından değerlendirildiğinde diğer teknolojilere oranla daha büyük avantaj sağladığı sonucuna varmışlardır. Nikel metal hidratın söz konusu tarihte lityum-iyon'a oranla maliyeti çok daha düşük olsa da, lityum-iyon'un daha yüksek enerjini kapasitesine sahip olması nedeniyle önemli bir avantaj sağladığı ortaya konmuştur.

Araştırmacılar (Sayın ve Yüksel, 2011) bu çalışmasına malzemenen paket seviyesine kadar pil hücrelerini çok ölçekli olarak inceleyerek bu sorun üzerinde çalışmıştır. Oluşturulan her ölçek sonucunda, ana yaşlanma modeli sürekli olarak gerçek verilerle tartışmaya sunulmuştur. Çalışmanın sonunda, her bir ölçeğe ait çıktılar tablolar halinde sunularak tartışılmaya olanak sağlanmıştır.

İncelenen bir diğer çalışma olan, Hu ve ark. (2010) otomotiv uygulamaları için lityum-iyon bataryanın elektrik ve termal modelini geliştirmişlerdir. Dinamik model yapısına elektriksel eşdeğer devreyi uyarlamışlardır. Bu eşdeğer devre parametreleri ise şarj durumu, sıcaklık ve akımın yönüne bağlıdır. Randles eşdeğer devresini kullanarak modeli oluşturmuşlardır. Söz konusu devre bir kaynak ile kapasite ve dirençlerden meydana getirilmektedir.

Yapılan çalışmada (Milpitas, 2001) lityum-iyon batarya yönetim sistemi modellenmesinde, özellikle hücreler arasını dengesizliklerin ortaya konabilmesi açısından hücrelerin tek tek modellenmesi gerektiğini öne sürmüşlerdir. Bunun yanında, modelin en küçük alt sistemi olan hücrenin yüksek doğruluk seviyesinde sonuç verecek şekilde seçilmesi gerektiğinin önemini vurgulamışlardır.

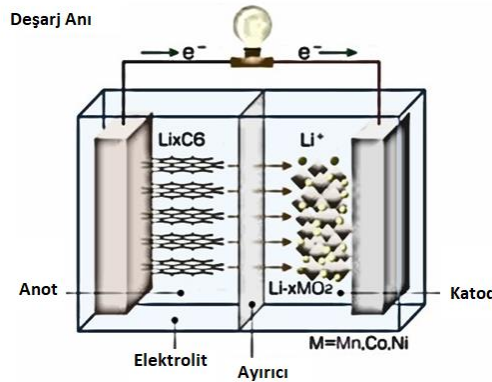
Chaturvedi ve ark.(2010) da birçok çalışmada belirtildiği üzere elektrikli araçlar için en uygun batarya kimyasının lityum-iyon olduğunu belirtmişlerdir. Bu teknoloji seçiminin ardından en önemli konulardan birinin bataryanın yönetim sistemi olduğunu, batarya ve otomobil üreticilerinin özellikle ilgisini çektiğini belirtmişlerdir. Bunun nedeni olarak da

enerji depolama sistemlerinin araç performansına verimine direkt etkisinin olduğunu göstermişlerdir.

## 2.1. Lityum İyon Batarya

Lityum iyon bataryalar, sahip oldukları yüksek enerji yoğunlukları sebebiyle ticari uygulamalarda ön plana çıkmaktadır. Ancak kullanım aşamasında, lityum iyon bataryaların yaşlanma faktörlerine bağlı olarak oluşacak hasarların olabildiğince en aza indirecek şekilde tasarımlarının yapılması gerekmektedir. Pil hücreleri arasında kontrolü sağlayacak bir batarya yönetim sistemine ihtiyaç duyulmaktadır. Batarya yönetim sisteminin doğru verileri okuyup hücreler arasında özellikle kapasite dengelemelerini yapması beklenmektedir. (Isaac, 2013)

Daha doğru bir kontrol için en önemli iki parametre olan hücrelerin şarj durumu (SOC) ve sağlık durumları (SOH) doğru bir şekilde analiz edilmelidir. Ancak bu iki önemli değeri doğru tahmin edebilmek bir hayli zordur. Lityum bataryanın modellenmesine başlanmadan önce temel çalışma prensipleri ve karakterizasyonun bilinmesi doğru bir model oluşturulması için önemlidir. Tipik bir lityum iyon temel hücre, metal negatif bir elektrottan oluşur (anot) ve elektrotlar arasında iyonik bir yol görevi gören bir elektrolit, pozitif elektrot (katot) ve bir polimerik ayırıcı bulunur. Şekil 2.1, boşaltma işlemi altındaki tipik bir Lityum-iyon temel hücreyi gösterir. Şarj sırasında lityum iyonlarının ve elektronların katottan (pozitif kutup) anoda (negatif) doğru hareket etmektedir.



Şekil 2.1. Deşarj (boşalma) anındaki bir lityum iyon pil

Elektrotlarda oldukça reaktif bir malzeme kullanılması istenir. Bunun nedeni, reaktifliği ne kadar yüksekse, hücrenin potansiyeli ve teorik enerji yoğunluğu o kadar yüksek olur. Ancak, bir malzeme ne kadar reaktif olursa, o kadar geri tepkimesiz olmaya eğilimlidir ve bu durum pillerde istenmemektedir. Lityum metalinin reaktivesinin yüksek olması, lityum esaslı piller için temel bir sorun teşkil eder. Bu yüzden elektrot yüzeylerinde koruyucu bir film kullanılması tavsiye edilir ki bu etki olabildiğince azaltılabilsin. (Muratori,2009)

Elektrikli araç uygulamaları için şarj edilebilir piller uzun kullanım ömrü olması beklenir. Kapasite başlangıçtaki değerinin % 80'in altına düşmeden önce 500 ila 1000 döngü içerisinde çalışması öngörölmelidir. Bunun mümkün olması için, elektrokimyasal reaksiyonların sorunsuz bir şekilde gerçekleşmesi gerekmektedir.

Lityum-iyon, düşük bakım gerektiren bir bataryadır. Ek olarak, kendiliğinden deşarj olması, nikel-kadmiyuma kıyasla yarıdan daha azdır ve lityum iyonun modern uygulamaları için uygun olmasını sağlar. Lityum-iyon hücreler çevreye atıldığında diğer pil çeşitlerine göre çok az zarar verirler.

Genel avantajlarına rağmen, lityum-iyonun sakıncaları vardır. Darbeye karşı hassastırlar ve güvenli çalışmayı sağlamak için bir koruma devresi gerektirir. Her pakette bulunan koruma devresi, şarj sırasında her bir hücrenin tepe voltajını sınırlandırır ve hücre voltajının boşalırken çok düşük düşmesini önler. Ek olarak, aşırı sıcaklıkları önlemek için hücre sıcaklığı sürekli olarak gözlemlenir. Çoğu paketdeki maksimum şarj ve deşarj akımı 1C ile 2C (C Rate) arasında sınırlandırılmıştır. Bu önlemlerin uygulanmasında, aşırı yüklenme nedeniyle ortaya çıkan metalik lityum kaplama olasılığı neredeyse tamamen ortadan kalkar. (Min ve ark., 2006)

Yaşlanma, çoğu lityum-iyon bataryanın genel sorunudur. Pil kullanımda olsun veya olmasın, bir yıl sonra kapasitede düşmeler gözlenir. Diğer kimyasalların da yaşa bağlı dejeneratif etkileri olduğu da bilinmesi gerekir. Bu, özellikle yüksek ortam sıcaklıklarına maruz kalması durumunda nikel-metal-hidrid için geçerlidir. Lityum pilleri avantaj ve dezavantajları, Çizelge 2.1'de tablo halinde sunulmuştur.

**Çizelge 2.1.** Lityum-İyon pil hücresinin avantaj ve dezavantajları.

Avantajları	Dezavantajları
Yüksek enerji yoğunluğu.	Gerilimi ve akımı güvenli sınırlar içinde tutmak için koruma devresi gerektirir.
Nispeten düşük kendiliğinden deşarj	Boşta durması, kapasitesinde düşmelere yol açar.
Düşük bakım gerekir	Üretimi pahalı.
Çok yüksek akım sağlayabilir.	Kullanılan malzeme rezervlerinin sınırlı olması.

## 2.2. Lityum-İyon Pilin Modellenmesi

Mevcut lityum-iyon akü modelleri temel olarak üç kategoriye ayrılır ve bunlar elektrokimyasal modeller, kara kutu (black box) modelleri ve eşdeğer devre modelleridir. Elektrokimyasal modellerin gerçeğe daha yakın sonuçlar vermesine rağmen karmaşık model yapısı, zor parametre tanımlanması ve çözüm süresinin uzun olması bu modelin dezavantajlarıdır. Bu yüzden, özellikle elektrikli araçlarda doğrudan kullanıma pek uygun değildirler. Buna rağmen yapılan geçmiş çalışmalarda, pilin tüm bölgelerin kimyasal olarak modellenmesi yerine kritik bölgelerin elektrokimyasal modeli oluşturulup, geri kalan kısımların ise basitleştirilmiş ampirik ifadeler ya da diferansiyel denklemler yardımıyla modellenmektedir.

Kara kutu modelinde ise pil üzerinde yapılan testler yardımıyla modelin eğitilmesine dayanmaktadır. Model içerisinde herhangi bir teorik denklem yer almamaktadır ve tamamen test verileriyle oluşturulmuş denklem takımları yer almaktadır. Modelin daha detaylı olabilmesi için, testlerden gelen verilerinde o kadar fazla olması gerekmektedir. Modelin çıktıları eğitilen denklemlerden olduğundan dolayı bu durum modelin kararlılığı kısmında bir takım şüpheler uyandırmaktadır.

Kara kutu modeli, yapay sinir ağları kullanılarak oluşturulması daha çok tercih edilmektedir. Yapay sinir ağlarıyla oluşturulan modeller genellikle girişi batarya çıkış

gücü ve bataryanın şarj durumu olmakta ve çıkış değişkenleri ise akım ve gerilim olmaktadır. Bu modellenmenin dezavantajı ise, modelin kurulumu yapay sinir ağlarının oluşturulmasında girilen verilere dayanmaktadır ve bu veriler dışındaki şartlar altında modelin verdiği sonuçlar hataya neden olmaktadır.

Pilin modellenmesinde ve özellikle otomotiv uygulamalarında eşdeğer devre modeli kullanılmaktadır. Batarya yönetim sistemi, şarj durumu (SOC) ve bataryanın ömür durumu (SOH) hakkında bilgi vermesi adına otomotive uygulanması oldukça kolaydır. Çünkü elektro-kimyasal modelde olduğu gibi karmaşık modellemeye ve çözümü uzun süren diferansiyel denklemlere ihtiyaç duyulmamaktadır. Ancak, verdiği sonuçlar elektrokimyasal modele nazaran gerçek değerden biraz daha uzaktır. Buna rağmen, geliştirilen yeni algoritmalar yardımıyla, eşdeğer modellemenin çıktıları, elektrokimyasal modelin vermiş olduğu sonuçlara yaklaşmaktadır. (Muratori,2009)

Tez kapsamında eşdeğer devre modeli üzerinde durulacağından dolayı, eşdeğer devre modelini ayrı başlık altında incelenmesi gerekmektedir. Yapılan çalışmada, eşdeğer devre modeli üzerinden gidilerek matematiksel model oluşturulacak ve bu oluşturulan model yardımıyla lityum iyon pilin karakteristikleri simülasyon yardımıyla sayısal olarak incelenebilecektir.

### **2.3. Lityum-İyon Pilin Eşdeğer Devre Modeli**

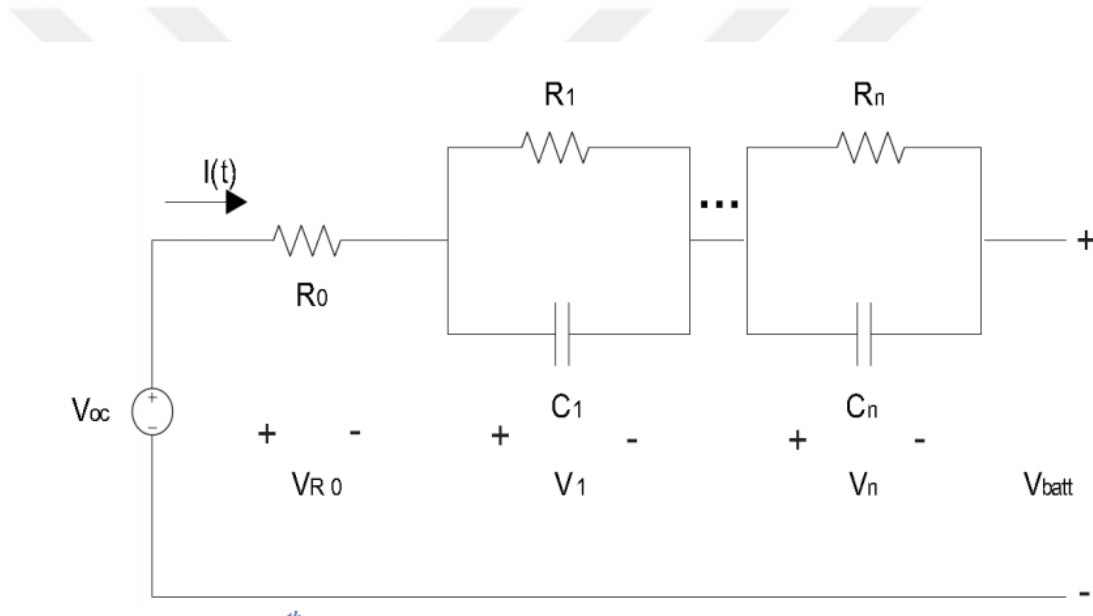
“Fenomenolojik” kelimesi, bir sistemin girdi-çıkı ilişkisinin sisteme ait temel fiziksel/kimyasal denklemlerine ihtiyaç duyulmadan modellenmesi olarak tanımlanabilir. Fenomenolojik modeller, düşük dereceli dinamik modellerdir. Lityum iyon pilin davranışını, kimyasal denklemleri kullanmaya gerek kalmadan, gerçek modelle benzer sonuçlar vermesi hedeflenmektedir. Fenomenolojik modellerin örneklerinden biri eşdeğer devre modelleridir.

Eşdeğer devre modeli basit bir yapıya sahiptir. Bu durum çözüm hızının arttırmakta ve otomotiv uygulamalarına kolayca adapte edilebilmektedir. Gerçek modele yaklaşabilmesi adına, matematiksel modele sıcaklık ve yaşlanma gibi faktörlerinde

eklenmesi gerekmektedir. Pilin davranışının, bu değişken parametreler altında incelemek önem teşkil etmektedir.

Birinci dereceden eşdeğer devre modelinde, sıcaklık ve yaşlanmanın etkisinde SOC değerinin hesabı mümkündür. Birinci dereceden model, kullanılarak karmaşıklıktan uzak bir modelleme geliştirilebilmektedir.

Şekil 2.2, elektrik eşdeğer devresini göstermektedir. Basit birinci dereceden model bataryanın gerilim-akım ilişkisini kolayca hesaplayabilmektedir. Burada, açık devre gerilimi  $V_{OC}$ , dahili direnç  $R_n$ ,  $C_n$  ise kapasitansı temsil etmektedir.



**Şekil 2.2.** n. Dereceden bataryanın eşdeğer devre modeli

Lityum iyon bataryada ayrıca, verim düşüşlerine neden olan kayıpları tanımlamak tasarım açısından önem arz etmektedir. Verim düşüşlerine neden olan kayıplar;

1. Aktivasyon kayıpları: Elektrotların yüzeyinde meydana gelen reaksiyonların yavaşlığından kaynaklanmaktadır. Üretilen voltajın elektronlarının bir kısmı elektrot içine veya elektrottan transfer eden kimyasal reaksiyonu yönlendirirken kaybolur. Bu voltaj düşüşü lineer olmayan bir davranış gösterir.

2.Omik kayıplar: Bu voltaj düşüşü, elektrotların malzemesi ve çeşitli ara bağlantıların elektrolit boyunca iyonların akışına karşı direncidir. Bu voltaj düşüşü esas olarak akım yoğunluğu ile orantılıdır ve doğrusaldır.

3.Konsantrasyon kayıpları: Bunlar, elektrotların yüzeyindeki reaktiflerin konsantrasyonundaki değişiklikten kaynaklanır. Lineer olmayan bir davranış gösterir. (Muratori,2009)

Birinci dereceden eşdeğer devre modele ait elektrik modelin kurulmasında, Denklem 2.1 ve Denklem 2.2 Kirchoff'un akım kanununun kullanılarak elde edilebilir.

$$\frac{dV_c}{dt} = -\frac{1}{R_0 C_0} V_c + \frac{1}{C_0} I \quad (2.1)$$

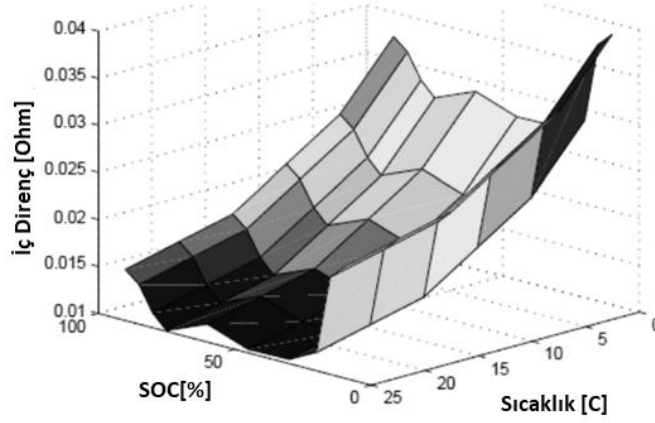
$$V = E_0 - IR - V_c \quad (2.2)$$

Burada, giriş akımı I, bataryanın çıkış gerilimini V temsil etmektedir. Batarya hücrelerinin şarj durumunun tayininde ise;

$$\frac{dSoC}{dt} = -\frac{I(t)}{C_n} \quad (2.3)$$

Burada, akımın I deşarj anında pozitif olduğu kabul edilebilir. C<sub>n</sub> ise nominal kapasite değerini temsil etmektedir.

Bataryanın iç direnci, açık devre voltajı ve kapasitesine birden fazla parametre doğrudan etki etmektedir. Bunlar SOC, sıcaklık ve akım değerleri olarak sıralanabilir. Bataryanın eşdeğer modelin yapılırken, bu üç parametrenin modele etkileri her zaman göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Batarya iç direncinin, SOC ve sıcaklık ile değişimini daha kolay algılayabilme adına Şekil 2.3 (Yurkovich,2010) kaynağından alınmıştır.



**Şekil 2.3.** Batarya iç direncinin SoC ve Sıcaklık ile değişimi.

Bir pil uzun süre boyunca dinlenmeye bırakılırsa, pilin sahip olduğu SoC ve iç direnç değerleri değişkenlik gösterir. Bu değişiklikleri hesaba katabilme adına, modelin yaşlanma, sıcaklık ve akım gibi değişikliklere karşı duyarlı olması gerekmektedir. Çünkü basit bir eşdeğer devre bu tür etkileri doğru bir şekilde cevap vermesi zordur.

2.dereceden eşdeğer devre modeli kullanıldığında, yaşlanmaya bağlı değişimlerden kaynaklı histerezis değişimleri de hesaba katılabilmektedir. 2.dereceden eşdeğer modeli Denklem 2.4 ve 2.5 gösterildiği şekilde verilebilir.

$$\frac{dV_i}{dt} = \frac{1}{R_i C_i} V_i + \frac{1}{C} I \quad (2.4)$$

$$V = E_0 - IR - V_i - V_h \quad (2.5)$$

Burada  $i$  değerleri 1 ve 2 olacağından Denklem 2.5'i aşağıdaki biçimde yazmak mümkündür.

$$V = E_0 - IR - V_1 - V_2 - V_h \quad (2.5 \text{ yeniden})$$

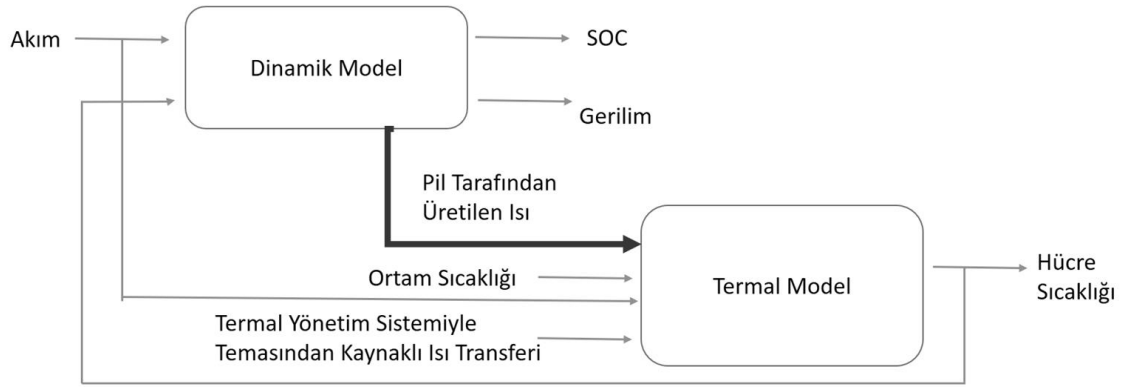
Tez kapsamında, mevcut ürün olan Panasonic NCR18650B pilinin matematiksel modeli oluşturulacaktır. Modellemede, eşdeğer devre modeli tercih edilecek ancak üretici firmanın vermiş olduğu bilgilerden yola çıkılarak tasarlanacağı için yukarıda bahsedilen



denklemlerde, üretici firmanın vermiş olduğu kataloglara göre değeri bilinmeyen parametreler bulunmalıdır. Tersine mühendislik yoluyla oluşturulacak modelde, üretici firmanın paylaşmış olduğu grafikler ve değerler yardımıyla, modelin çıktıları gerçek sonuca yaklaştırmaya çalışılacaktır.

#### 2.4. Lityum-İyon Pilin Termal Modeli

Bu bölümde, lityum iyon pilin termal modellenmesi üzerine durulacaktır. Lityum iyon pilin ısı üretim davranışı ve pil içerisindeki sıcaklık dağılımı üzerinde durulacaktır. Aynı zamanda termal model doğrudan dinamik model ile ilişkisi burada incelenecektir.



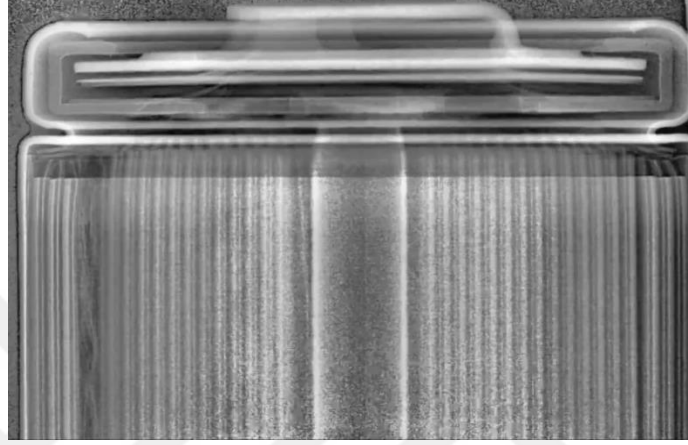
Şekil 2.4. Termal model ile dinamik model arasındaki ilişkiyi gösteren algoritma

Şekil 2.4.'te görüldüğü üzere, lityum iyon pile ait eşdeğer devre modeline (dinamik model) ait çıktı olan pil tarafından üretilen ısı Denklem 2.6.'da ifade edildiği gibi, hücre gerilimi ile pilin açık devre voltajı farkının entropi ifadesiyle çıkartılıp, çıkan sonucun akım değeriyle çarpımına eşittir.

$$Q_b = I(E_o - V - T \frac{\partial V_{oc}}{\partial T}) \quad (2.6)$$

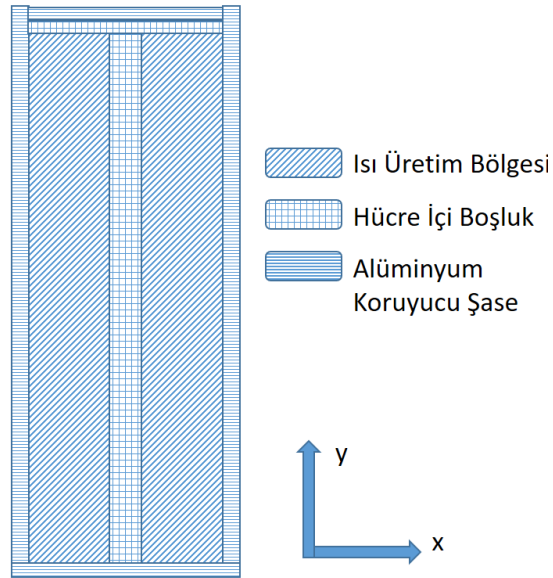
Burada,  $T \frac{\partial V_{oc}}{\partial T}$  ifadesi yardımıyla pil içerisinde ki entropi değişimini hesaplamak mümkündür. Entropi ifadesinin tersinir olduğu unutulmamalıdır.  $Q_b$ , toplam üretilen ısıyı  $T$  ise bataryanın sıcaklığını ifade etmektedir.

Denklem 2.6 yardımıyla, bataryanın ısı üretim noktasındaki sıcaklık değeri hesaplanabilmektedir. Batarya, termal yönetim ile doğrudan dış yüzeyiyle temas halinde olacağı için, bataryanın dış yüzey sıcaklık değerini hesaplamak önemlidir. Bu anlamda, Şekil 2.5'te görüldüğü gibi bataryanın X ışınları altında çekilmiş fotoğrafının incelenmesi gerekmektedir.



**Şekil 2.5.** Lityum iyon pile ait X-ray fotoğraf

Şekil 2.5. yardımıyla oluşturulan, batarya ya ait kesit şematik (Şekil 2.6.) ısı üretim noktalarının anlaşılmasında kolaylık sağlamaktadır. Burada, ısı üretim bölgesi ile x yönünde termal yönetim sistemi ile temas eden yüzey arasında bir ısı transferi oluşacaktır.



**Şekil 2.6.** Lityum iyon pile ait ısı üretim bölgelerinin tanımlandığı şematik gösterim

Isı üretimiyle, termal yönetim sistemiyle yapılan ısı transferi  $Q_T$  arasındaki ilişkiyi Denklem 2.7 kullanılarak hesaplamak mümkündür.

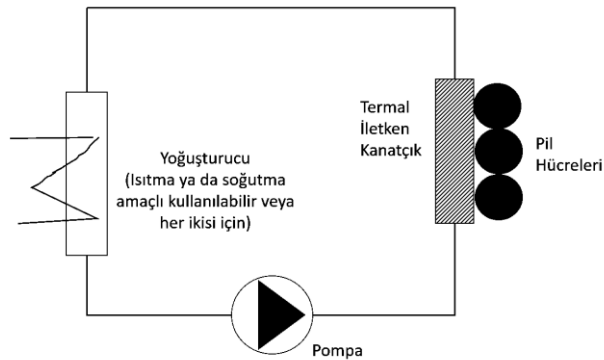
$$Q_b - Q_T = mC \frac{dT}{dt} \quad (2.7)$$

Burada  $C$  [W/kg], pilin termal ısı kapasitesinin,  $m$  [kg] ise bataryanın kütlesini temsil etmektedir.  $Q_T$  ifadesinin hesabında kullanılacak denklemler, üçüncü kısımda detaylı bir şekilde tanımlanacaktır.

Kuramsal tanımlamalara ek olarak termal yönetim sistemlerinin tanıtılması ve birbiri arasındaki avantajları ve dezavantajları tanıtılarak, modeli yapılacak batarya paketinin avantajları ve dezavantajları tartışılacaktır.

## 2.5. Sıvı Soğutmalı Termal Yönetim Sistemi

Sıvı soğutmalı termal yönetim sistemi, araç içerisinde farklı amaçlarla soğutması yapılacak alt sistemlere ait sıvı termal yönetim sistemi de entegre edilebilmektedir. Sisteme ait alt parçalar incelendiğinde, sistemde sıvının hareketini sağlayacak basıncı oluşturan pompa elemanı, sıvının sıcaklığını değiştirecek olan bir yoğuşturucu ve sıvının hareket edeceği kanallar olması gerekmektedir. Sistemi, elektronik olarak kontrol edilebilmesiyle birlikte pil ve ortam sıcaklığından alınan veriler yardımıyla daha doğru bir sıvı sıcaklığı ayarlanabilmektedir. Şekil 2.7’de tek döngülü sıvı soğutma sistemi görülmektedir. (Tremblay ve ark., 2007)



Şekil 2.7. Tek Döngülü Sıvı Soğutma Sistemi

Hücreler soğutucu sıvı ile doğrudan temas halinde değildir. Sıvı belirli bir kanal içinde hareket etmekte, sahip olduğu soğutma kapasitesini batarya hücresine ara eleman sayesinde iletmektedir. Bu ara eleman genellikle ısı performansı iyi olan alüminyum seçilmektedir. Alüminyumun sahip olduğu yoğunluk, çoğu metalden düşük olmasına rağmen batarya hücre sayısının artması kullanılan alüminyum termal iletkenin sayısını da arttıracığından, batarya paketinin toplam ağırlığını da arttırmaktadır. Bu sorun, elektrikli araçların genel sorunu arasında yer almakta çünkü aracın en ağır kısmı batarya paketi olmaktadır.

Sıvı soğutma, termal performans açısından diğer soğutma tiplerine göre oldukça iyi bir durumdadır. Sahip olduğu yüksek yoğunluklu kütle akışı sayesinde, pil hücrelerine sıcaklıklarını kolayca aktarabilmektedir.

Sıvı soğutma sistemleri, özellikle hızlı şarj uygulanan sistemlerde oldukça iyi performans göstermesi en büyük artılarından birisidir. Ayrıca, ısıtma amaçlı kullanıldığında, sahip olduğu ısıyı pile hızlıca aktarabilmesi sayesinde, elektrikli araçlara soğuk hava şartları altında hızlı başlangıç olanağı sağlamaktadır.

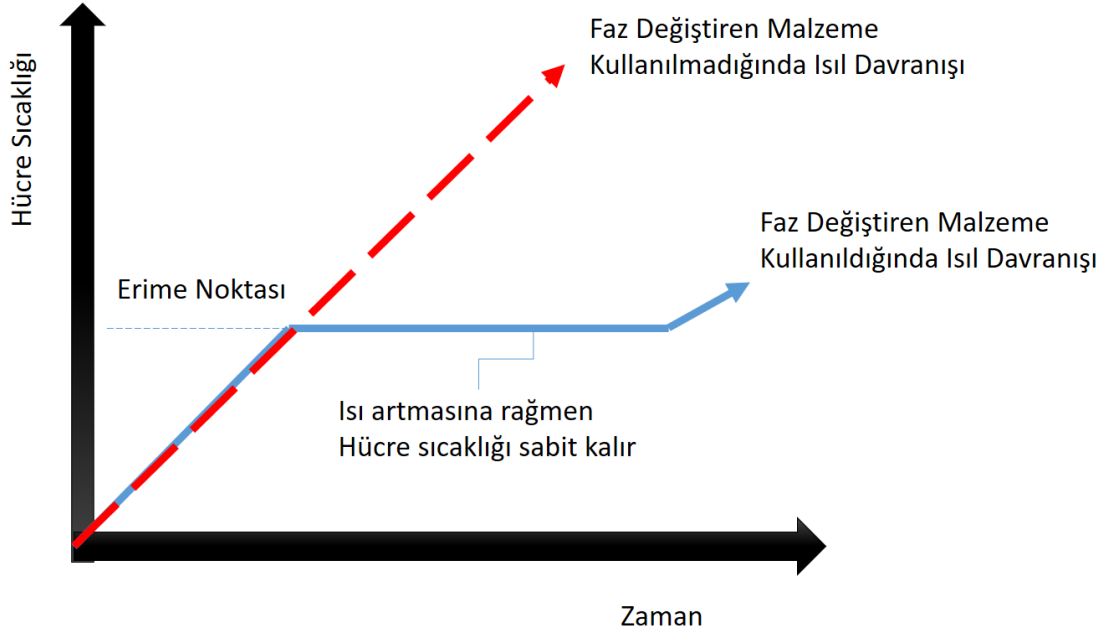
Avantajlarına rağmen sıvı soğutma sisteminin tasarımı, dikkatli yapılan analizler ve testler ile doğrulanması gerekmektedir. Ayrıca, sistemin yalıtımı çok iyi yapılmalı herhangi bir sıvı sızıntısı durumunda batarya paketinin güvenliğini doğrudan etkilemektedir. Bu yüzden, sıvı soğutmalı batarya paketlerinin araç çarpışma testleri sonuçları dikkatlice incelenip böyle bir duruma el verip vermediği analiz edilmelidir. Sıvı soğutma sistemi, araç üzerinde başka bir alt sistem için termal yönetimiyle ilişkilendirilebilir ancak bu kontrol açısından tasarımın karmaşık hale gelmesine neden olur.

Sıvı soğutma sisteminde özellikle sızıntıdan kaynaklı güvenlik endişelerinin önüne geçilmesi adına di-elektrik sıvı yardımıyla termal yönetim yapılabilir. Bu sistemi daha güvenilir hale getirmektedir ancak sistemin ağırlığını ve maliyetini arttırmaktadır ve aynı zamanda bakımının daha da zor hale getirilmesini sağlamaktadır.

## 2.6. Faz Değiştiren Malzemeler Yardımıyla Termal Yönetim

Faz değiştirci malzemeler yardımıyla termal yönetim, bir pasif soğutma sistemine örnektir. Sistem soğuk hava şartlarında, ısıtıcı olarak görev yapabilmesi için ek yeni sisteme ihtiyaç duymaktadır.

Bir faz değiştiren malzeme erime esnasında, pillerden açığa çıkan ısıyı absorbe eder ve faz değiştiren malzemenin sahip olduğu gizli ısı değerine ulaşıncaya kadar ısıyı absorbe etmeye devam etmektedir. şekil 2.8 faz değiştiren malzemelerin çalışmasını anlatmaktadır.



**şekil 2.8.** Faz Değiştiren Malzemenin Hücre Sıcaklığı-Zaman Eğrisi

Sıcaklık erime noktasına geldiğinde, malzeme ısıyı absorbe eder ve sıcaklığın bir süre boyunca sabit kalmasını sağlar. Bu sayede, faz değiştiren malzemeler batarya paketi için bir termal iletken ve ısıl iletken olarak kullanılır.

Pil sıcaklığını elektronik olarak yönetebilmek adına, faz değiştiren malzemeler hava soğutma sistemi veya sıvı soğutma sistemine entegre olabilir. Bu bütünleşik sistem

sayesinde, batarya paketi hem soğutma hem de ısıtma davranışı gösterebilmektedir. Faz değiştirici malzemeler özellikle 45 ile 50°C arasında en iyi performansı göstermektedir.

Bir batarya paketi, sayıları dört hanelere çıkacak kadar pil hücresi bulundurabilir. Her hücre ısı üreteceğinden ve bu ısı üretim değeri hücrenin durumuna bağlı olarak değişkenlik göstereceğinden hücreler arası ısı kaçaklarının oluşmasına olanak sağlamaktadır.

Faz değiştiren malzemeler bu noktada avantajlarını göstermektedirler. Isıl kaçak durumunda, kaçak olan ısıyı doğrudan kendi içerisinde absorbe eder ve bir başka pil hücresini ısıtmasına engel olmaktadır.

Ayrıca faz değiştiren malzemeler, metal termal iletkenlere nazaran daha düşük yoğunluk değerlerine sahip olmaları, batarya paketinin hafifletilmesine olanak sağlamaktadır. Faz değiştiren malzemelerin matematiksel modellenmesinde, Denklem 2.8 kullanılabilir.

$$C_p = \begin{cases} C_k, & T > T_k \\ (1 - \beta)C_s + \beta C_s + \frac{Q_{gizli}}{T_{gizli} - T_k}, & T < T_{gizli} \\ C_s, & T < T_s \end{cases} \quad (2.8)$$

Burada,  $C_p$  malzemenin ısı kapasitesidir. Isıl kapasite. Malzemenin sıcaklığını  $T$ , katı faz sıcaklığı  $T_k$ , gizli ısı sıcaklığı  $T_{gizli}$  ve sıvı fazı sıcaklığına  $T_s$  göre değişkenlik göstermektedir.  $C_s$  sıvı faz ısı kapasitesi ve  $C_k$  ise katı faz ısı kapasitesini temsil eder. Malzemenin sahip olduğu gizli ısı değeri  $Q_{gizli}$  ve sıvı fazdayken hacimsel değişim  $\beta$  değerine göre gizli sıcaklık fazındaki ısı kapasite değeri değişkenlik gösterir. Hacimsel değişim Denklem 2.9 yardımıyla hesaplanabilir. Bu denklem kullanılırken sıcaklık değerinin katı faz sıcaklığıyla gizli ısı sıcaklığı arasında olması gerektiğine dikkat edilmelidir.

$$\beta = \frac{T - T_k}{T_{gizli} - T_k} \quad (2.9)$$

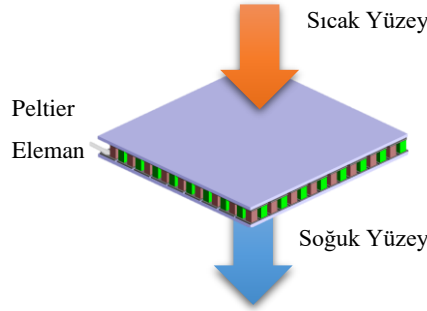
## 2.7. Termoelektrik Termal Yönetim Sistemi

Otomotiv sektöründe özellikle, koltuk ısıtması gibi alanlarda kullanılan Peltier elemanlar bataryanın termal yönetiminde de kullanılmaya olanak sağlamaktadır. Özellikle düşük güç gereksinimi duyan sistemlerde, Peltier elemanlar sıvı veya havayla yapılan termal yönetimlere alternatif olmaktadır.

Bakım gerektirmemeleri ve sıvı sisteme göre daha az ağırlığa sahip olmalarının yanında elektroniksel kontrolleri oldukça kolaydır. Bu da otomotiv sistemleri için kullanılmaya elverişli olmalarını sağlamaktadır. (Tremblay ve ark., 2007)

Peltier eleman sayesinde hem ısıtma hem de soğutma işlemi gerçekleştirilebildiği gibi, Peltier elemanın tersinir çalışma özelliği sayesinde hücreler arası sıcaklık farklılıklarından kaynaklı elektrik üretme potansiyeline sahiptirler.

Avantajlarına rağmen, Peltier elemanların (Şekil 2.9) düşük güç isteyen sistemler için avantajlı olması, enerji yoğunluğu ve güç yoğunluğunun yüksek olması otomotiv sektörü için pek uygun hale getirmemektedir.



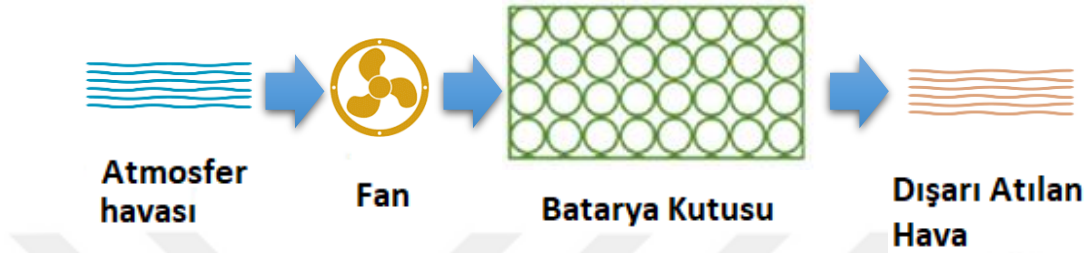
Şekil 2.9. Bataryanın termal yönetiminde kullanılan peltier eleman.

## 2.8. Hava Yardımıyla Termal Yönetim Sistemi

Hava soğutmalı sistemler (Şekil 2.10), batarya paketi içerisindeki havanın hızını değiştirerek pil hücrelerinin soğutulmasının ya da ısıtılmasını amaçlamaktadır. İçerideki

hava, bir ısıtıcı ya da soğutucu havadan hareket ettirilerek istenilen sıcaklığa getirilmeye amaçlanmaktadır. (Zhang H., 2007)

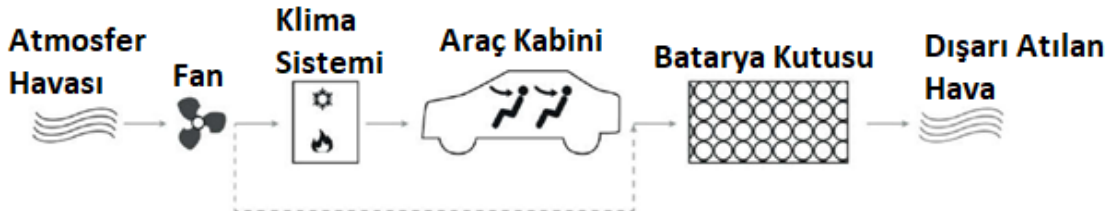
Hava ile pil hücreleri arasında herhangi bir izolasyona ihtiyaç duyulmadığından, bu sistem kolayca uyarlanabilmektedir. Sistemin bu avantaja sahip olması, basit bir yapıda olmasını sağlar ve böylece maliyeti ve ağırlığı düşüktür.



**Şekil 2.10.** Basit bir hava yardımıyla termal yönetim sistemi.

Avantajlarına rağmen, yüksek hacimli batarya paketlerinde, hücrelerin soğutma performansının iyileştirilmesi için daha fazla fana ve ısı değiştirici evaporatöre ihtiyaç duyulmaktadır. Bu durumun sonucunda, batarya paketinde oluşan gürültü miktarı artmaktadır ve sistem alt parça sayısı artmaya başlamaktadır. Ayrıca, atmosferden alınan havanın filtrelerden geçirmeli ve batarya paketi içerisine bu şekilde girişine izin verilmelidir. Aksi takdirde, havayla birlikte paketin içine gelen istenmeyen parçacıklar batarya paketine zarara yol açabilmektedir. (Min ve ark., 2006)

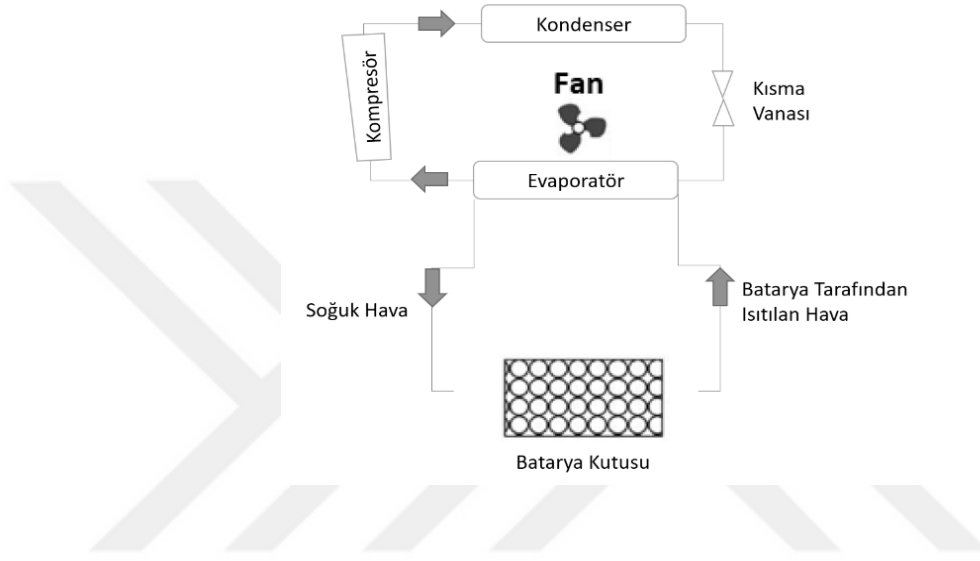
Hava yardımıyla termal yönetim sistemi, aracın sahip olduğu yolcu klima sistemiyle bütünleşik çalışabilmektedir. (Şekil 2.11) Bu durumda, ortak kullanılan alt sistemlerde azaltmaya gidilebilmektedir ve bu durum ağırlık ve maliyetten kazanç sağlamaktadır.



**Şekil 2.11.** Araç içi klima sistemine bütünleşmiş hava termal yönetimi.



Bunun yanında, ısıtma ve soğutma performansını iyileştirme adına, batarya paketine doğrudan bir soğutucu gaz sistemi bütünleşebilmektedir (Şekil 2.12). Sisteme ek eleman gelmesine rağmen, bu sistemlerin maliyetinin çok yüksek olmaması sistemi kullanabilir hale getirmektedir. İyi tanımlanmış bir sistem tasarımı yardımıyla, paket içerisinde eş sıcaklıklar elde edilebilmektedir.



Şekil 2.12. Soğutucu gaz yardımıyla, hava termal yönetimi.

## 2.9. Termal Yönetim Sistemlerinin Karşılaştırılması

Sistemlerin avantaj ve dezavantajlarının daha iyi incelenebilmesi adına, Çizelge 2.2 oluşturulmuş ve böylece kıyaslamak daha kolay hale getirilmiştir. Burada da görüleceği üzere, her bir sistemin belirli avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır. Birbirlerinin dezavantajlarını giderme adına, sistemler bütünleşik halde kullanılabilir ancak bu durum maliyeti ve ağırlığı arttırmaktadır. (Hu Y., 2011)

**Çizelge 2.2.** Termal Yönetim Sistemlerinin Avantajları ve Dezavantajları. (+: iyi, 0: nötr, -: kötü)

	Sıvı Termal Yönetimi	Faz Değiştirici Malzemeler	Hava Termal Yönetimi	Termoelektrik Termal Yönetimi	Dielektrik Termal Yönetimi
Kolay Kullanım	-	++	++	+	-
Ağırlık	-	0	+	+	--
Maliyet	0	+	++	0	-
Soğutma Gücü	+	-	-	-	+
Homojen Sıcaklık	+	++	-	++	+
Hızlı Şarj	++	+	-	--	+
Bakım Maliyeti	--	++	+	+	--
Yaşam Ömrü	0	++	+	+	0

## 2.10. Lityum İyon Pillerin Geri Dönüşümü

Lityum iyon piller, elektrikli taşıtlar, tüketici elektroniği ve enerji depolaması için artan talebe cevaben pazar payı kazanmaya devam etmektedir. Lityum iyon pillere olan talebin artması, üretimi için gerekli olan hammadde tedarik zincirindeki olası sorunları vurgulamaktadır. Pillerde kullanılan bazı kritik metaller, yani lityum, kobalt ve grafit şu anda az miktarda bulunmakta ve ticari politikalar sebebiyle birkaç ülkede çıkarılmaktadır.

Bu malzemelerin madenciliğinin çevresel ve sosyal etkileri, artan talebi karşılamak için üretim rampaları olarak dikkat çekmektedir. Ömrün sonunda geri dönüşümü yardımıyla tekrar kullanılabilir hale gelen malzemeler, yeni üretilecek pillerin için doğrudan hammadde olanağı sağlarlar. Ömür sonu bataryaları ile ilgili çevresel düzenlemeler tam olarak geliştirilmediğinden veya uygulanmadığından, bu bataryaların çoğu hali hazırda geri dönüşüm tesislerine gönderilen çok az sayıda boş batarya ile birlikte çöplüklere girmektedir. Bununla birlikte, pro-aktif düzenlemeler, artan pil tüketimi ve geri dönüşüm teknolojilerindeki yeniliklerle birlikte ömrü sona eren piller, yeni pillerin üretimi için gerekli malzemelerin önemli bir kısmını sağlayabilir.

Bu bağlamda, pillerin ömür durumlarının (SOH) tespiti doğru bir şekilde yapılabilir ve ömürlerinin sonunda doğru yaklaşan piller doğru bir şekilde toplanabilirse, ölü pillerin geri dönüşüm oranı artırılabilir ve bu durumda lityum iyon pillerin sürdürülebilir üretimi devam edebilmektedir.

## **2.11. Bataryalı Elektrikli Araçlar**

Tarihsel geçmişe baktığımızda, elektrikli araçlar 20.yy'dan bu yana var olmaktadır. Ancak içten yanmalı motora sahip araçların yapmış olduğu sıçramayla arka plana itilen elektrikli araçlar, ilk versiyonlarına göre günümüz elektrikli araç altyapısı oldukça karmaşık ve teknolojidir. Bu bağlamda, günümüz elektrikli araçları günümüzün içten yanmalı araçlarının sahip olduğu teknoloji yakalamaları gerekmektedir.

Dış görünüşleri, sürücü ve yolcu kabini vb. alt sistemlerinin benzer olmasına karşı, güç hattı ve tahrik organları içten yanmalı araçlara göre oldukça farklı olmaktadır. Bu bağlamda, tasarlanacak yeni modern elektrikli araçlar içten yanmalı araçların sahip olduğu araç mimarilerinden farklılık göstermektedir.

Elektrikli araçlarda, her biri kendine ait karakteristik özelliklere sahip elektrik motoru, güç dönüştürücü ve batarya gibi enerji kaynağını içeren bir alt yapıya sahiptirler. Bu altyapı, içten yanmalı araçlara nazaran çevreyi çok az kirletmektedirler ve bu durum artan küresel ısınma problemlerini azaltıcı yönde etkisi vardır. (Muratori,2009)

Elektrikli araç tahrik sistemi, içten yanmalı araçlara göre oldukça farklı olması, dünya genelinde yaygınlaşmış bakım ve tamir ağında endişelere neden olmaktadır. Bu bağlamda, elektrikli araçların yaygınlaşabilmesinde bu yaygınlaşmış ağın, elektrikli araç mimarisine de hakim hale gelmesi beklenmektedir.

Ayrıca, elektrikli araçların yaygınlaşmasında engelleyici unsurlardan bir tanesi de araç şarj istasyonlarının yetersizliğidir. Elektrikli araçlarda halen daha çözülmesi beklenen şarj

ve menzil sorununa, az sayıda olan şarj istasyon sayısı da eklenince müşteriler tarafından ön yargıyla bakılmaktadır.

Bu tarz sorunlara rağmen elektrikli araçlara dönüşüm hızlıca devam etmektedir. Bu bağlamda, elektrikli araçlara dönüşümde iki yol izlenebilir. Bunlardan ilki, mevcut içten yanmalı araçları bataryalı elektrikli araçlara dönüştürülmesidir. Ancak yukarıda belirtildiği gibi özellikle tahrik sisteminin oldukça farklı olması bu dönüşümü zorlaştıran ölçütlerden birisidir. Yapılan dönüşümün, mevcut içten yanmalı araç teknolojisiyle uyumu da bir hayli önemlidir.

Bir diğer yol ise, mevcut araçları dönüştürmekten ziyade elektrikli araç mimarisine uygun yeni araçların tasarlanması ve üretimidir. Üretici firmalar bu duruma daha sıcak bakmaktadır, çünkü dönüşümün yapıldığı araçlarda uyum bir hayli önem arz etmekte, en ufak bir olumsuzluk, daha büyük sorunlara tetikleyici olabilmektedir.

Elektrikli araç üreten firmaların sayıları günden güne artmakta ve sürücüsüz araç tasarımlarıyla beraber çok daha gelişmiş bir hale gelmektedir. Bu firmaların başında gelen Tesla Motors firmasına ait Tesla Model S aracı, bu çalışma kapsamında rol model seçilecek ve matematiksel modeli oluşturulan batarya hücresi ve paketiyle Model S aracının benzetimi yardımıyla belirlenen çevrim altındaki davranışı incelenecektir.

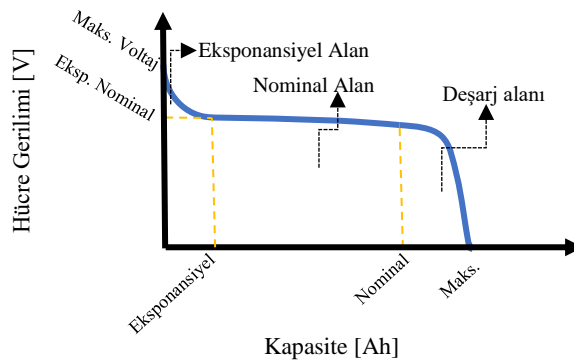
### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

Çalışmanın bu kısmında, tez kapsamında geliştirilen Matlab&Simulink ortamındaki matematiksel modeller ile Ansys programında oluşturulan hesaplamalı akışkanlar dinamiği modeli üzerinde durulacaktır. Oluşturulan modeller her biri ayrı başlıklar altında incelenecek olup, dördüncü bölümde çıktıları tartışılacaktır.

#### 3.1. Lityum İyon Pilin Dinamik Modeli

Bu kısımda, lityum iyon pile ait eşdeğer devre modeli üzerinden elektriksel dinamik modeli oluşturulacaktır. Eşdeğer devre modelinde, pilin bilinmeyen özellikleri üretici firmanın paylaşmış olduğu eğriler yardımıyla hesaplanmaya çalışılacak ve modelin çıktıları hem üretici firmanın değerleriyle hem de yapılan test çalışmasıyla doğrulanmaya çalışılacaktır.

İkinci bölümde tanıtılan eşdeğer devre modelini, bilinmeyen direnç ve kapasite değerlerinin hesabı için polarizasyon sabiti, eksponansiyel gerilim, eksponansiyel kapasite ve eğim sabiti değerlerinin referans sıcaklık ve akım değerlerine göre belirlenmesi ve sıcaklık ve akım değişimi altındaki davranışlarının incelenmesi gerekmektedir (Şekil 3.1). (Anonim, 2018)



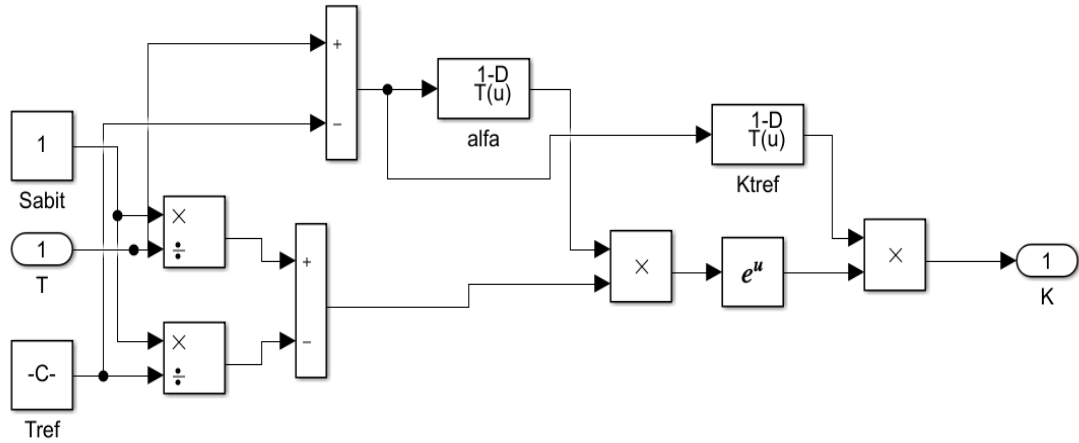
**Şekil 3.1.** Modelin oluşturulmasında kullanılacak bir lityum iyon pile ait kapasite-gerilim eğrisi üzerindeki eksponansiyel ve nominal bölge.

### 3.1.1. Polarizasyon Sabiti

Polarizasyon sabiti K, birimi V/Ah olarak tanımlanmaktadır ve polarizasyon kayıplarını temsil etmektedir. 25°C sıcaklık değeri ve 1,625 mA şarj ile 3,25 mA deşarj anındaki değeri referans değer  $K_{Tref}$  olarak alınacaktır. Sıcaklığa bağlı değişiminde, polarizasyon sabiti değerini hesaplamak için Deklem 3.1 kullanılabilir.

$$K(T) = K_{Tref} e^{\alpha(T^{-1}-T_{ref}^{-1})} \quad (3.1)$$

Burada,  $\alpha$  sıcaklığa bağlı Arrhenius sabiti,  $T_{ref}$  referans sıcaklık değeri olan 25°C olmaktadır. Şekil 3.2’de oluşturulan Simulink model görülmektedir.



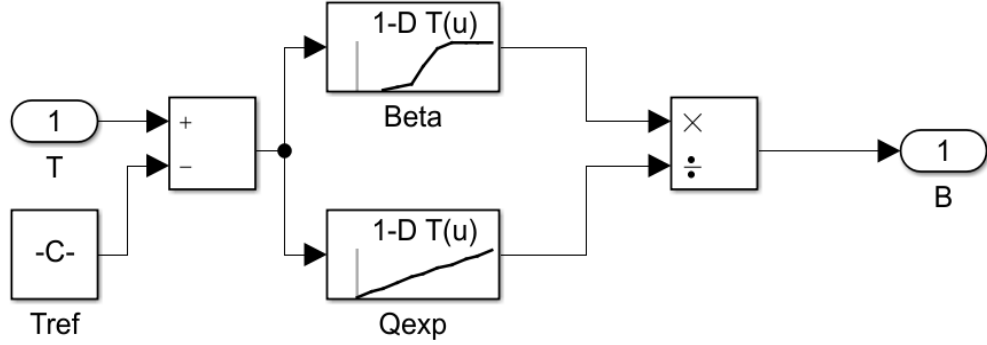
Şekil 3.2. Polarizasyon sabitinin Simulink Modeli

### 3.1.2. Eksponansiyel Kapasite

Eksponansiyel Kapasite B, birimi Ah<sup>-1</sup> olarak tanımlanmaktadır ve kapasite-gerilim eğrisindeki, başlangıçtaki eksponansiyel düşüşün kapasitesini temsil etmektedir. Değeri hesaplamak için, Denklem 3.2 kullanılabilir.

$$B = \frac{\beta(T)}{Q_{eksp(T,N)}} \quad (3.2)$$

Burada,  $Q_{eksp}$  değeri, referans eğrideki (Şekil 3.1) başlangıçta meydana gelen eksponansiyel düşmenin bittiği andaki kapasite değeri,  $\beta$  ise sıcaklığa bağlı Arrhenius sabitidir. Eksponansiyel gerilim değeri  $Q_{eksp}$ , sıcaklığa ve çevrim süresine ( $N$ ) bağlıdır.



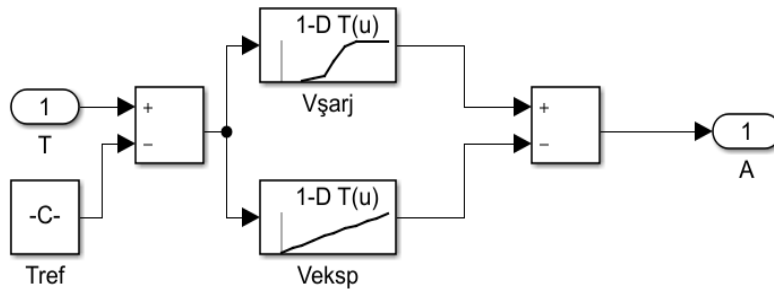
Şekil 3.3. Eksponansiyel Kapasitenin Simulink Modeli

### 3.1.3. Eksponansiyel Gerilim

Eksponansiyel gerilim  $A$ , birimi  $V$  olarak tanımlanmaktadır ve kapasite-gerilim eğrisindeki, başlangıçtaki eksponansiyel düşüşün gerilim değerini temsil etmektedir. Değerin hesaplanması için;

$$V = V_{şarj}(T) - V_{eksp}(T) \quad (3.3)$$

denklemini kullanılabilir. Burada  $V_{şarj}$ , tam dolu andaki bataryanın gerilimi,  $V_{eksp}$  ise referans eğrideki (Şekil 3.1) başlangıçta meydana gelen eksponansiyel düşmenin bittiği andaki gerilim değeridir.

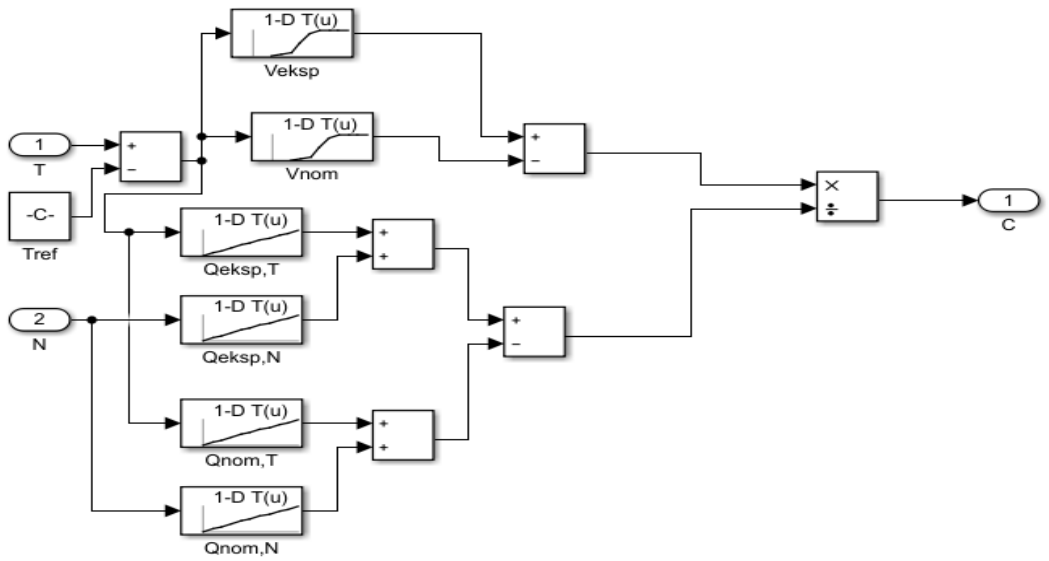


Şekil 3.4. Eksponansiyel Gerilimin Simulink Modeli

### 3.1.4. Eğim Sabiti

Eğim sabiti  $C$ , birimi  $V/Ah$  olarak tanımlanmakta ve deşarj anındaki lineer düşmenin modellenmesini sağlamaktadır. Burada, eksponansiyel kapasite ve nominal kapasite değerleri sıcaklık ve çevrim sayısına bağlıyken, eksponansiyel gerilim ve nominal gerilim değerleri ise sıcaklık faktörüne bağlıdır.

$$C = \frac{V_{eksp}(T) - V_{nom}(T)}{Q_{eksp}(T,N) - Q_{nom}(T,N)} \quad (3.4)$$



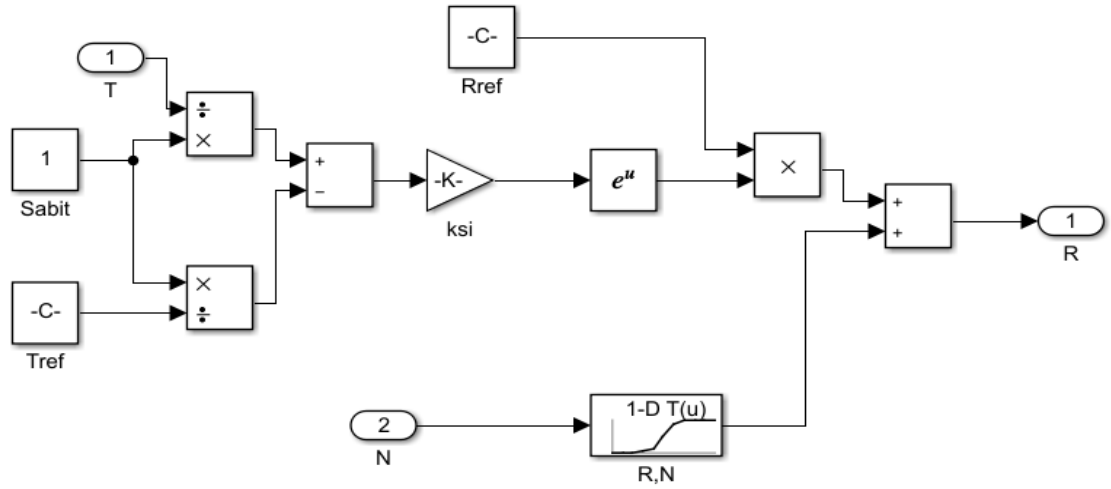
Şekil 3.5. Eğim Sabiti Simulink Modeli

### 3.1.5. İç Direnç Modeli

İç direnç  $R$ , ohm biriminde tanımlanmaktadır. Sıcaklık ve yaşlanma faktörüyle değişkenlik gösteren direnç değerinin hesaplanmasında, sıcaklık ile olan değişiminin modellenmesinde matematiksel yaklaşım, yaşlanmaya bağlı değişimi ise yapılan testler ve üretici firmanın paylaşmış olduğu değerler kullanılarak eğri şeklinde oluşturulmuştur.

$$R(T, N) = R_{Tref} e^{\alpha(T^{-1} - T_{ref}^{-1})} + R(N) \quad (3.5)$$

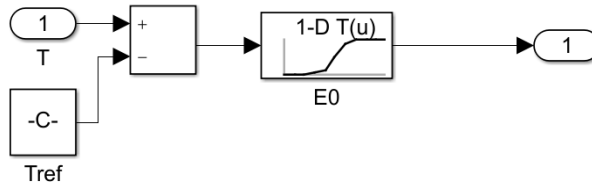




Şekil 3.6. Bataryanın iç direncine ait Simulink modeli

### 3.1.6. Bataryanın Sabit Gerilimi

Bataryanın sabit gerilimi  $E_0$ , V biriminde tanımlanmaktadır. Sabit gerilim değeri, sıcaklığa bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Şekil 3.1 yardımıyla, bu değişime ait eğri oluşturulacak ve Simulink modeli bu şekilde tanımlanacaktır. Ara değerler, enterpolasyon ile hesaplanacak ve doğruluğu testler ile doğrulanması sağlanacaktır.



Şekil 3.7. Bataryanın gerilim sabiti Simulink Modeli.

### 3.1.7. Bataryanın Şarj Durumu (SOC)

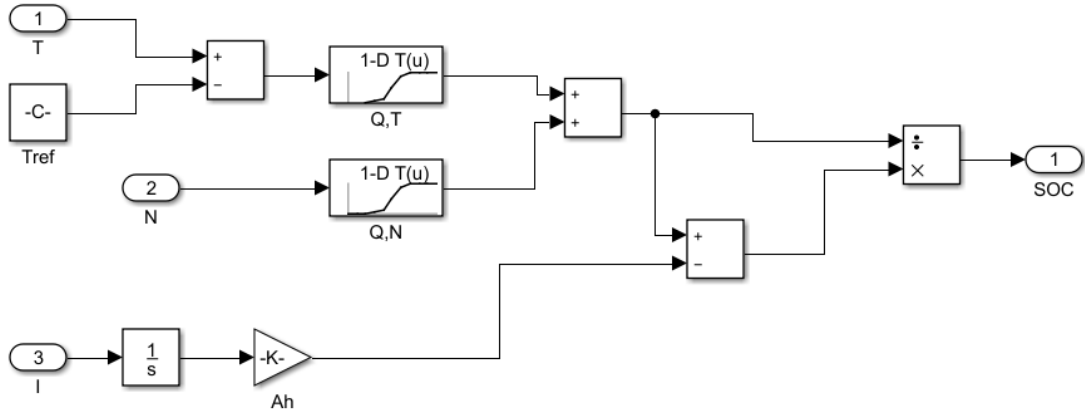
Batarya karakteristiğini ve dinamik modeli en iyi tanımlayan, SOC deşarj modelinin oluşturulmasında, Denklem 3.6 kullanılacaktır.

$$SOC_{deşarj} = \frac{Q(T,N) - it}{Q(T,N)} \quad (3.6)$$

Burada  $Q(T,N)$ , bataryanın sıcaklığa ve çevrim sayısına bağlı kapasite değeridir.  $it$  ise, bataryanın deşarj anında dışarıya verdiği kapasite değeri ve bu değerin hesaplanmasında;

$$it = \int I dt \quad (3.7)$$

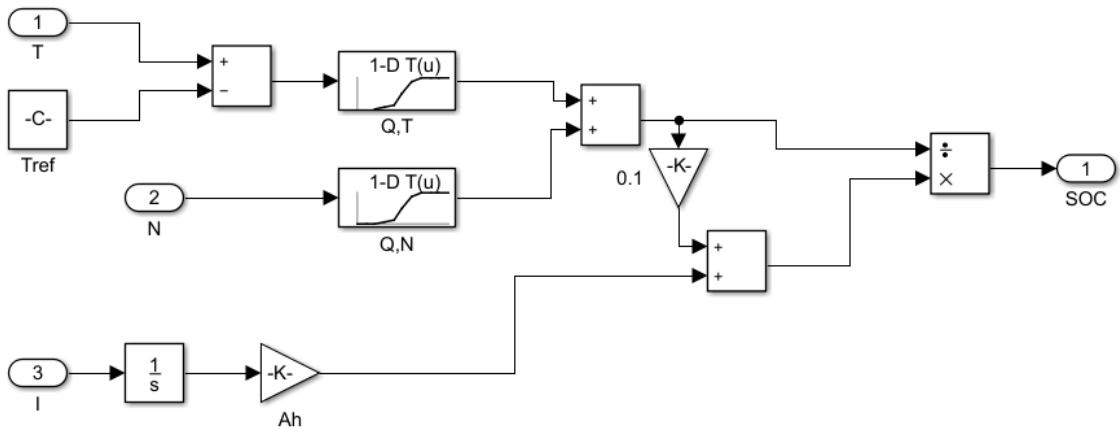
kullanılmaktadır.



**Şekil 3.8.** Bataryanın Deşarj Şarj Durumu Simulink Modeli

Şarj anı için SOC hesabında, Denklem 3.8 kullanılmaktadır.

$$SOC_{şarj} = \frac{0.1 \cdot Q(T,N) + |it|}{Q(T,N)} \quad (3.8)$$

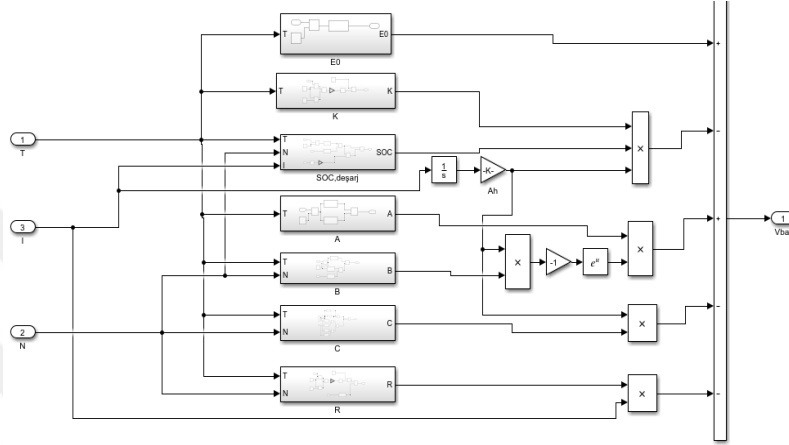


**Şekil 3.9.** Bataryanın Şarj Şarj Durumu Simulink Modeli

### 3.1.8. Bataryanın Deşarj Anı Dinamik Modeli

Bataryanın şarj ve deşarj anları ayırt edebilme adına iki farklı alt sistem oluşturulacaktır. Deşarj modeli için yukarıda tanımlanan parametreleri içeren Denklem 3.9 kullanılacaktır.

$$V_{bat} = E_0 - K.SOC_{deşarj}^{-1}.it + A.exp(-B.it) - C.it - R.I \quad (3.9)$$

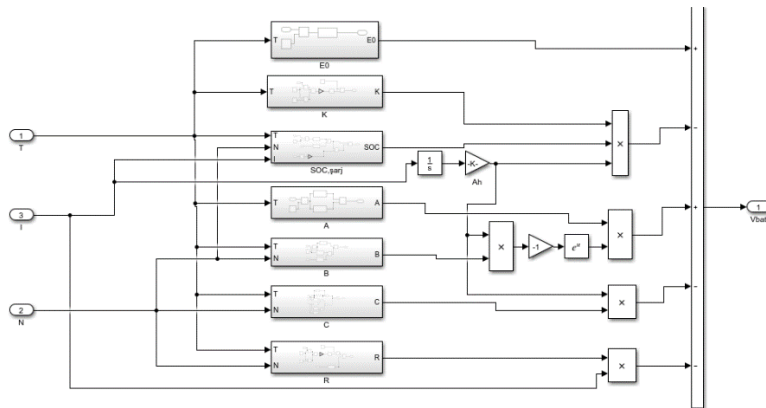


Şekil 3.10. Batarya Deşarj Dinamik Modeli

### 3.1.9. Bataryanın Şarj Anı Dinamik Modeli

Şarj modeli ise, Denklem 3.9'a göre tek farkı, SOC<sub>deşarj</sub> yerine SOC<sub>şarj</sub> modeli dahil edilecektir.

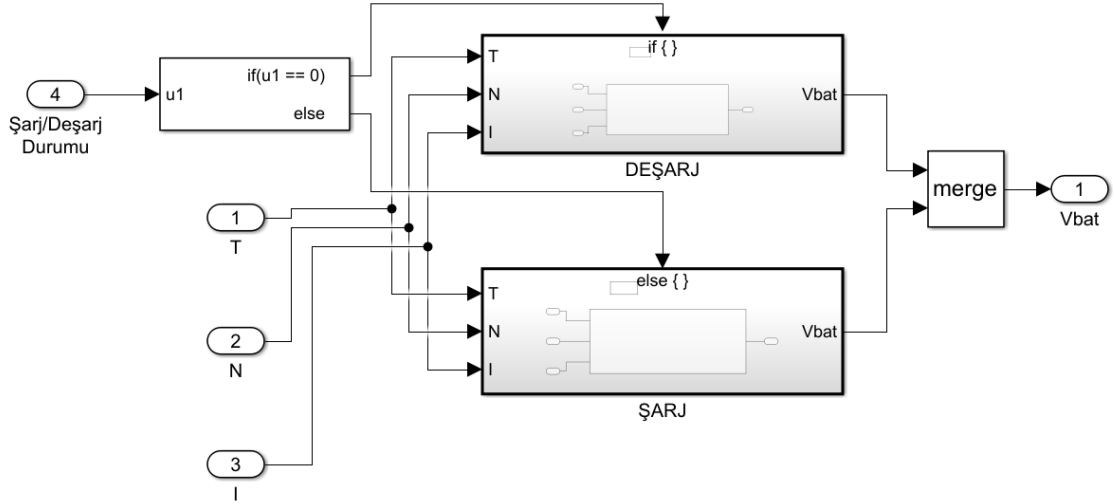
$$V_{bat} = E_0 - K.SOC_{şarj}^{-1}.it + A.exp(-B.it) - C.it - R.I \quad (3.10)$$



Şekil 3.11. Bataryanın şarj dinamik modeli.

### 3.1.10. Bataryanın Şarj/Deşarj Anı Dinamik Modeli

Şarj/Deşarj anının kararında kullanılacak dinamik model yardımıyla, şarj ve deşarj karakteristiklerine göre bataryanın performansı incelenebilir hale getirilecektir.



Şekil 3.12. Bataryanın şarj/deşarj durumu.

### 3.2. Bir Pil Hücresinin Termal Modeli

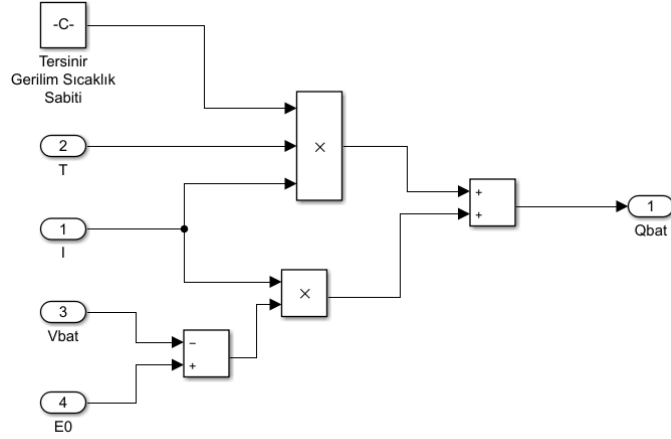
Çalışmanın bu kısmında, pil hücresinin termal modeli oluşturularak pilin sıcaklık değerleri hesaplanacaktır. Katot ile anot arasında oluşan tepkime sonucunda ortaya çıkan ısıyı modellemek için Denklem 3.11 kullanılacaktır. Bu matematiksel eşitlikten de görüleceği üzere, pilin akım ve gerilim değerine bağlı olarak üretilen ısı değeriyle, entropi değişiminden kaynaklı ısı değerinin toplamı, pilin toplam ısı değerini vermektedir.

$$Q_{bat} = I \cdot (E_0 - V_{bat}) + \frac{\partial E}{\partial T} \cdot I \cdot T \quad (3.11)$$

Burada,  $E_0$  değeri açık devre voltajı,  $T$  pilin sıcaklığı,  $\frac{\partial E}{\partial T}$  ise tersinir gerilim-sıcaklık sabitini temsil etmektedir.

Denklem 3.11 yardımıyla, pil hücresi tarafından üretilen ısı değeri hesaplanabilmektedir. Bu ısı değeri, termal yönetim sistemi ve ısı kaçaklardan kaynaklı dışarıya atılan ısı

değerinin çıkartılmasıyla, pil hücresinin sıcaklık soğutma veya ısıtma etkisi altındaki sıcaklık değeri hesaplanabilmektedir.

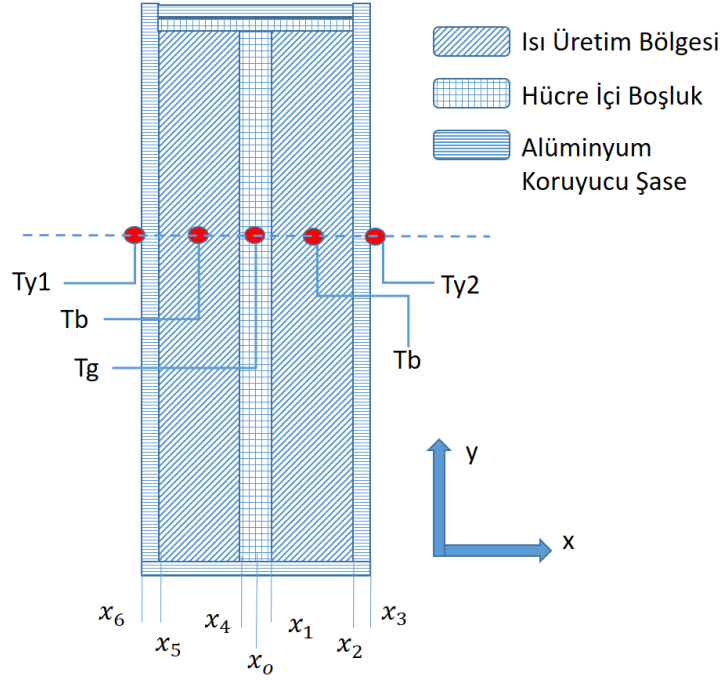


Şekil 3.13. Bataryanın Ürettiği Isı Simulink Modeli

### 3.3. Bir Pil Hücresinin İç Termal Dağılım Modeli

Bu kısımda, pil ile termal yönetim modeli arasındaki ilişkinin tanımlanacağı model için, pil yüzeyinin sahip olduğu sıcaklık değerinin hesabı yapılacaktır. Şekil 3.14’de görüleceği üzere, pilin ısı üretim bölgesindeki sıcaklık değeri alüminyum koruyucu kılıfından iletilerek, yüzey sıcaklığını oluşturmaktadır. Bu yüzey sıcaklığı, doğrudan termal yönetime sistemine temas ettirilecektir.

Şekil 3.14’deki şematik, ikinci kısımda gösterilen pil hücresinin iç yapısına ait X ray fotoğraf dikkate alınarak oluşturulmuştur. Burada ısı üretim bölgelerindeki sıcaklık doğrudan batarya sıcaklığını vermekte ve bataryanın bu sıcaklığının kılıflara iletilmesinin ardından oluşan yüzey sıcaklığının hesabı için bu model oluşturulacaktır.



**Şekil 3.14.** Pil İç Sıcaklık Dağılımı (Ek-1)

Burada, pilin sadece x yönündeki ısı transferi incelenecektir ve  $T_{y2}$  noktasından termal yönetim sistemine,  $T_{y1}$  noktasında ise batarya paketi içerisindeki termal sınıvının olmadığı alüminyum parçaya bağlandığı noktayı temsil etmektedir.

$$T(x) = \begin{cases} Q_b = kA \frac{(T_b - T_{y,2})}{\Delta X}, & x_2 < x < x_3 \\ Q_b = hA(T_b - T_g), & x_0 < x < x_1 \end{cases} \quad (3.12)$$

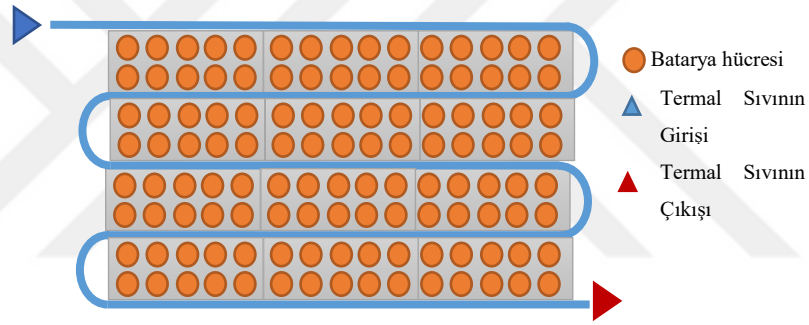
Denklem 3.12’de, batarya iç boşluğu sıcaklığı  $T_g$  ile bataryanın termal yönetim sisteminin akışkan olduğu tarafa bağlandığı nokta  $T_{y2}$  arasındaki ısı iletim denklemi yazılmıştır. Burada  $h$  taşınım katsayısı [ $W/m^2.K$ ],  $A$  [ $m^2$ ] ısı transferindeki yüzey alanıdır.

$$T(x) = \begin{cases} Q_b = kA \frac{(T_b - T_{y,1})}{\Delta X}, & x_5 < x < x_6 \\ Q_b = hA(T_b - T_g), & x_0 < x < x_4 \end{cases} \quad (3.13)$$

Denklem 3.13'te ise, batarya iç boşluğu sıcaklığı  $T_g$  ile pil hücresinin batarya paketi içerisindeki termal yönetim sisteminin akışkan olmayan kısma bağlandığı nokta  $T_{y1}$  arasındaki ısı iletim denklemi yazılmıştır.

### 3.4. Termal Yönetim Sistemi Modeli

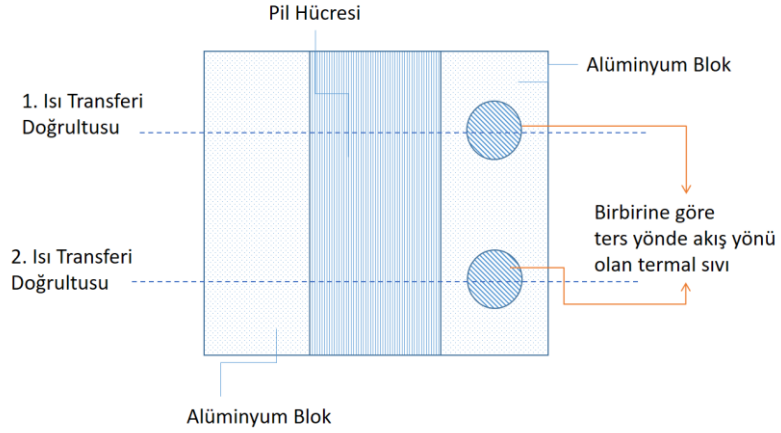
Çalışma kapsamında modellenecek termal yönetim sistemi, Tesla Model S aracına ait olup referans değerler olarak firmanın paylaştığı katalog değerleri alınacaktır. 16 modülden oluşan batarya paketini daha kolay inceleyebilme adına modüller ayrı ayrı incelenecektir. Bir modüle ait üstten görünümünü içeren şematik olarak resmedilmiş Şekil 3.15'te görüleceği üzere, iki katmanlı sıvı akışkan bir birine göre ters akış yönünde hareket ederek, hücreleri soğutmaya çalışmaktadır.



**Şekil 3.15.** Bir Modülün Üstten Görünümü ve Termal Sıvının Hareket Yönü

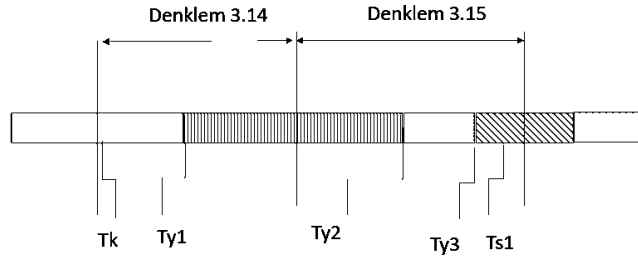
444 adet hücreyi içeren modülde, 74 paralel hücre ve 6 seri hücre bulunmaktadır. Çift soğutucu akış kanalı içeren termal yönetim sistemi ile bir hücrenin montaj görüntüsü Şekil 3.16'da görülmektedir.

Şekil 3.16'da termal yönetim sisteminin geometrisi görülmektedir. Tesla Motors firmasının almış olduğu patentte farklı akış geometrileri bulunmaktadır. Modelin sadeleştirme adına, birbirine ters akış hareketi yapan iki kanallı geometrinin modellemede kullanılması tercih edilmiştir.



**Şekil 3.16.** Bir Pil Hücresi ile Termal Yönetim Sisteminin Kesiti.

Burada, birinci ısı transferi doğrultusu ve ikinci ısı transferi doğrultusu için denklemler ayrı ayrı oluşturulacaktır. Denklemler yapı olarak benzer olmakla birlikte, akış yönünün değişmesiyle termal sıvının sıcaklık değişiminden dolayı iki ayrı kısımda incelenmesi gerekmektedir. Birinci ısı transferi doğrultusu denkleminin çıkartılmasını kolaylaştırmak için oluşturulan Şekil 3.17, denklemdeki değişkenleri tanımlamada kolaylık sağlamaktadır.

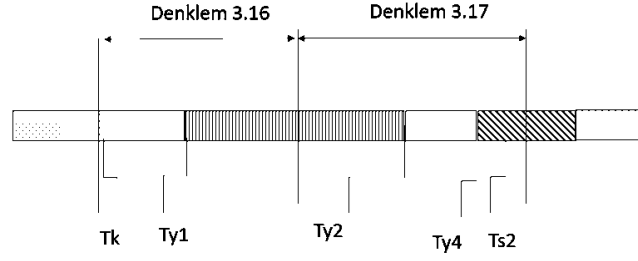


**Şekil 3.17.** Birinci ısı transferi doğrultusu.

$$Q_{i1} = \frac{(T_{y1} - T_k)A}{\frac{x}{k_{Al}}} \quad (3.14)$$

$$Q_{s1} = \frac{(T_{s1} - T_{y2})A}{\frac{1}{h_{i,1}} + \frac{x}{k_{Al}}} \quad (3.15)$$





Şekil 3.18. İkinci ısı transferi doğrultusu.

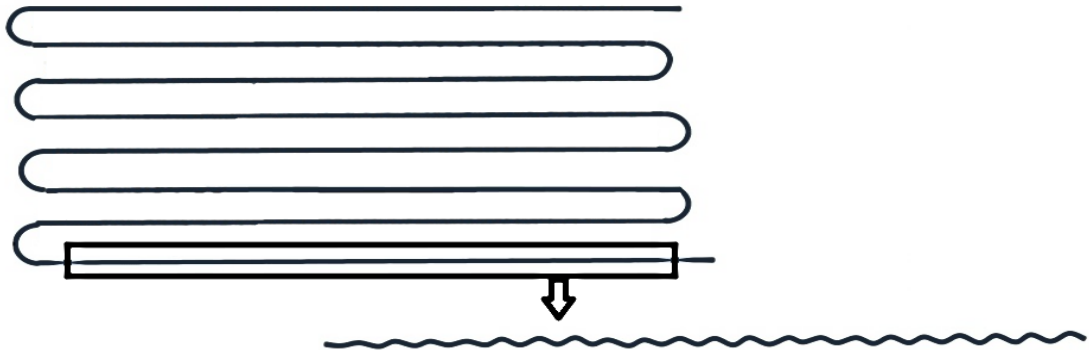
$$Q_{i2} = \frac{(T_{y1} - T_k)A}{\frac{x}{kA}} \quad (3.16)$$

$$Q_{s2} = \frac{(T_{s2} - T_{y2})A}{\frac{1}{h_{i,2}} + \frac{x}{kA}} \quad (3.17)$$

Termal sıvının sıcaklığının hesaplanmasında, her iki kanal içinde ayrı ayrı akış modelleri oluşturulacaktır. Bu modellerin oluşturulmasında, modül içerisindeki akış kanalının şekli ve pil sayısı hesaba katılacaktır.

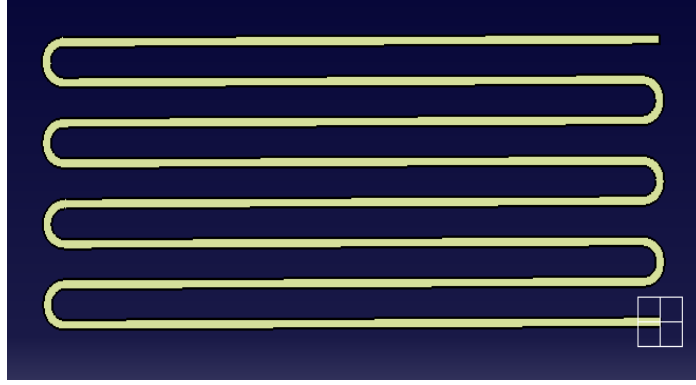
$$Re_D = \frac{4\dot{m}}{\pi D \mu} \quad (3.18)$$

$$Nu = \frac{h_i D}{k} \quad (3.19)$$

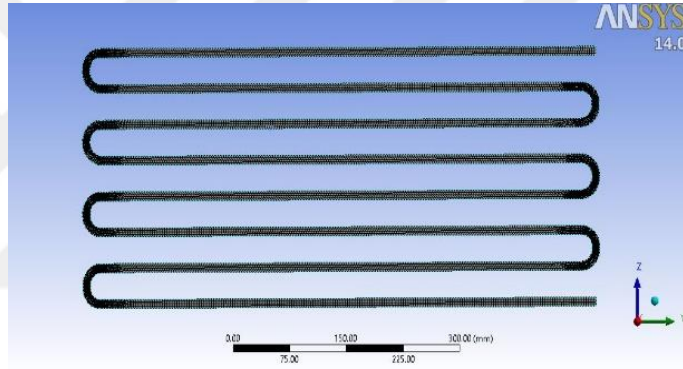


Şekil 3.19. Modül içerisindeki termal sıvının akış kanallarının şekli.

Bu şekil, ölçüler dikkate alınarak CAD modeli ve Ansys programında analizi için mesh yapısı oluşturulmuştur.



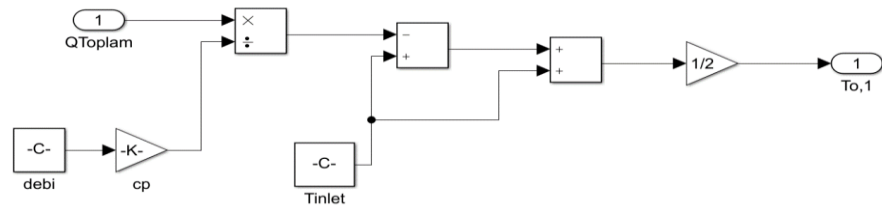
Şekil 3.20. Akış kanalının CAD Modeli.



Şekil 3.21. Akış kanalının Mesh Yapısı.

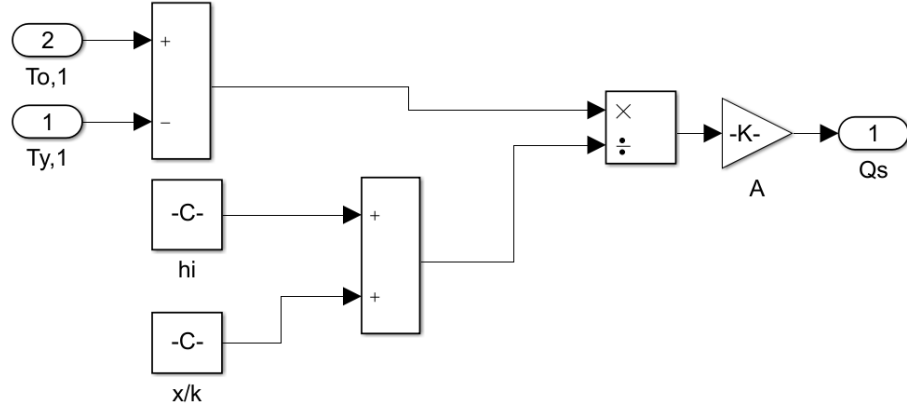
Denklem 3.20 yardımıyla matematiksel denklemini oluşturulan akış kanalının, Simulink modeli Şekil 3.22’de görülmektedir.

$$Q_{toplam} = \dot{m}_s c_p (T_{in} - T_{o,1}) \quad (3.20)$$



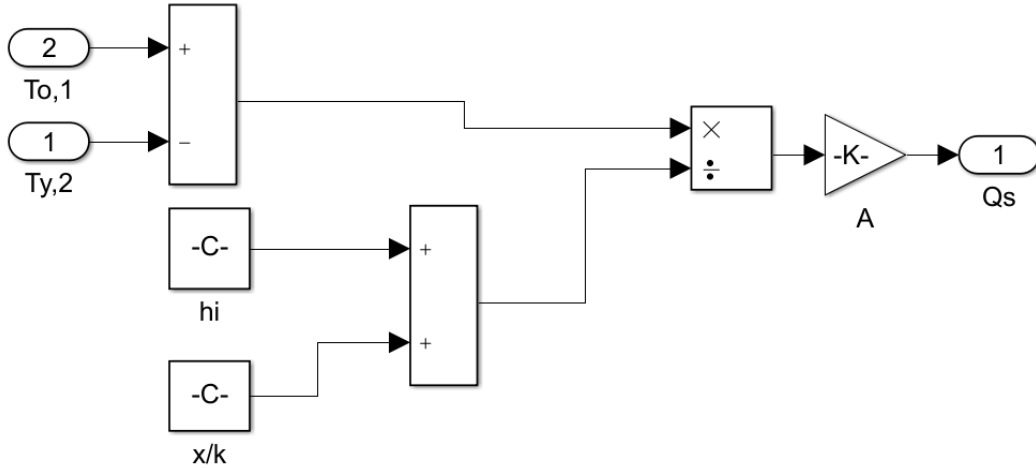
Şekil 3.22. Akış kanalının Simulink Modeli.

Denklem 3.14 ve 3.15 yardımıyla oluşturulan birinci ısı transferi doğrultusundaki Simulink modeli Şekil 3.23’de görülmektedir.



Şekil 3.23. Birinci ısı transferi doğrultusuna ait Simulink model.

Denklem 3.16 ve 3.17 yardımıyla oluşturulan ikinci ısı transferi doğrultusundaki Simulink modeli Şekil 3.24’de görülmektedir.



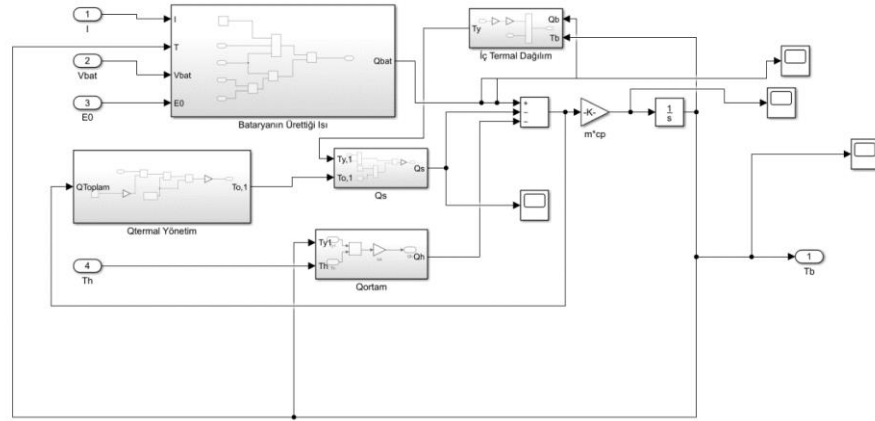
Şekil 3.24. İkinci ısı transferi doğrultusuna ait Simulink model.

### 3.5. Pil Hücresi ile Termal Yönetim Sistemi Arasındaki İlişki

Bir pil hücresinin ısı üretim modeli, pil hücresinin iç termal dağılım modeli ve termal yönetim sisteminin modeli oluşturulmuştur. Bu üç alt sistem, pil ve termal yönetim

sistemiyle arasındaki ilişkiyi tanımlayan bu kısımda ilişkilendirilecektir. Bu modelin oluşturulmasında Denklem 3.21 referans alınacaktır.

$$Q_b - Q_s - Q_{ortam} = m_b C_p \frac{dT}{dt} \quad (3.21)$$



**Şekil 3.25.** Pil Hücresi ile Termal Yönetim Sistemi arasındaki ilişkinin Simulink modeli.

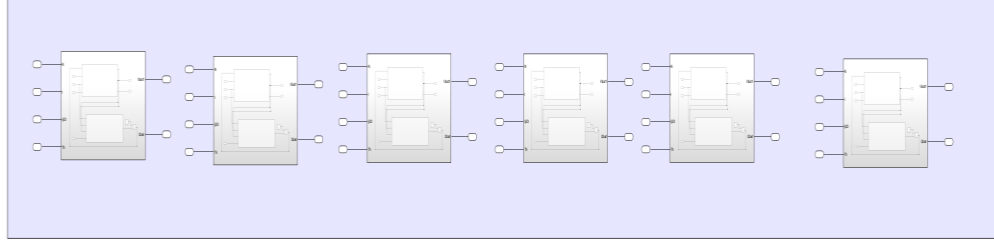
### 3.6. Batarya Paketinin Elektrik Modeli

Bu kısımda, oluşturulan pil hücresi modeli seri ve paralel bağlı hücreler haline getirilerek batarya paketi oluşturulacaktır. Bu kısım modellenirken, bağlantılardan kaynaklı elektriksel kayıplar ihmal edilecektir.

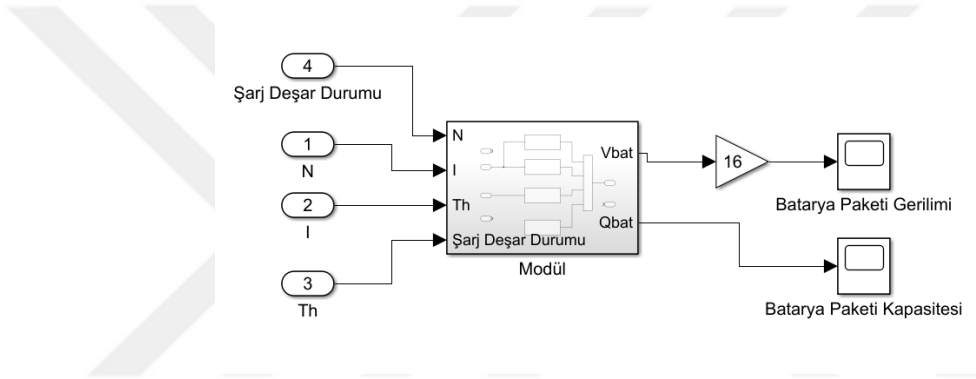
Modeli oluşturulacak batarya paketi Tesla Model S aracının sahip olduğu değerlere göre oluşturulacaktır. Bu doğrultuda, batarya paketinde 16 adet seri bağlı modül bulunmakta ve bu modüllerin içerisinde 74 paralel hücreye sahip 6 adet alt modül birbirine seri bağlanmıştır ve toplam bir modülde 444 adet hücre bulunmaktadır. Bir pil hücresinin nominal gerilim değeri 3,8 V alındığında bir modülün sahip olduğu nominal gerilim değeri 22.8 V ve tüm batarya paketinin gerilim değeri ise 364.8 V değerindedir.

Batarya paketinin kapasite değeri 233 Ah ve yaklaşık 85 kWh değerine sahip bir batarya enerjisine sahiptir. 7104 adet pil hücresi bu değerler dikkate alınarak, 16 adet modül ve

her modül içerisinde 6 adet, 74 tane pil hücreni bulunduran paralel grubun bağlantısıyla oluşmaktadır.



**Şekil 3.26.** Bir modül içerisindeki 74 hücreli 6 paralel grubun seri bağlantısını içeren Simulink Modeli.

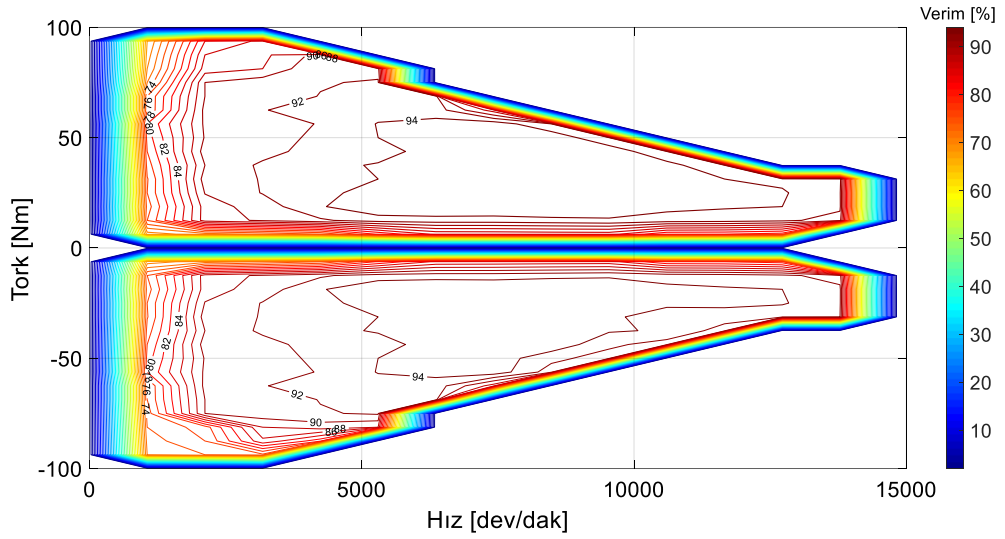


**Şekil 3.27.** 16 adet modülün seri bağlantısını içeren batarya paketinin Simulink Modeli.

### 3.7. Elektrik Motorunun Elektriksel Modeli

Bu kısımda, Tesla Model S aracına ait elektrik motorunun elektriksel olarak modellenmesi yapılacaktır. Modelde, manyetik etkiler incelenmeyecek olup sürüş performansına ve direnç kuvvetlerine dayalı motorun vermesi gerektiği performans değerleri için batarya paketinden çekeceği akım değerlerinin hesaplanması sağlanacaktır.

Kullanılan elektrik motorunun araç hızına bağlı tork-güç karakteristiğini içeren grafik Şekil 3.28’de gösterilmiştir ve oluşturulan modelin değerlerinin hesabında bu eğri dikkate alınacaktır.



Şekil 3.28. Elektrik Motoru Tork ve Verim Karakteristiği.

$$V_{motor} - V_{emk} = R_{sargı} \cdot I + L_{sargı} \cdot \frac{dI}{dt} \quad (3.22)$$

Burada,  $V_{emk}$  değeri zıt elektromotor gerilimi,  $R_{sargı}$  motorun sargı direnci,  $L_{sargı}$  motorun bobin indüktansını temsil etmektedir. Zıt elektromotor kuvvetinin hesabında Denklem 3.23 kullanılacaktır.

$$V_{emk} = K_e \cdot \omega_m \quad (3.23)$$

Burada,  $K_e$  [V.s] elektromotor sabiti,  $\omega_m$  [rad/s] ise motorun açısal hızıdır.

$$T_e = K_t \cdot I \quad (3.24)$$

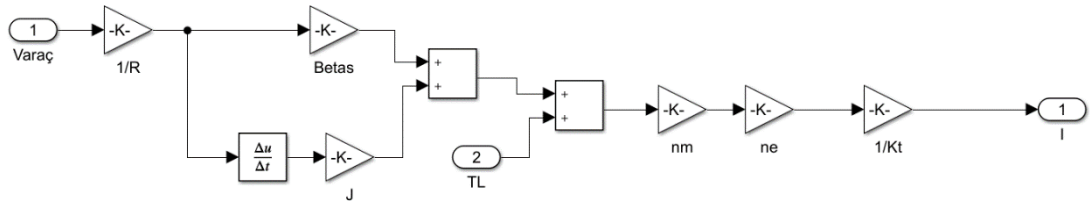
Denklem 3.24, akıma bağlı olarak elektrik motorunun ürettiği elektriksel tork değeri olan  $T_e$ 'yi temsil etmektedir.  $K_t$  tork sabiti olup, birimi [Nm/A] olarak tanımlanır.

$$T_m = T_e \cdot \eta_e[\omega, T_e] \cdot \eta_m \quad (3.25)$$

Motorun ürettiği elektriksel tork değerinin, mekanik bağlantılarla tekerleklere iletilen tork değerini temsil eden  $T_m$ , motorun verimiyle  $\eta_e$ , aktarma organlarının veriminin  $\eta_m$  çarpımıdır.

$$T_m - T_l = \beta_s \cdot \omega_m + J \cdot \frac{d\omega_m}{dt} \quad (3.26)$$

Denklem 3.26 yardımıyla, yoldan gelen direnç momentlerinin etkisinde  $T_l$ , motorun ürettiği torkun, açısal hız ile ilişkisini temsil etmektedir. Burada,  $\beta_s$  mekanik aksamdaki toplam sürtünme katsayısı, J ise motordan tekerleklere kadar olan dönen kütlelerin atalet değeridir.



Şekil 3.29. Elektrik Motoru Simulink Modeli.

### 3.8. Taşıt Dinamiği Modeli

Bu kısımda, elektrik modelinde ihtiyaç duyulan direnç moment değeri olan  $T_l$ 'ye ait denklemler çıkartılacaktır. Direnç momentlerinin hesabında, aerodinamik kuvvetler, eğim direnci, yuvarlanma direnci ve ivmelenme performansı hesaba katılacaktır.

$$F_{aero} = \rho \cdot c_d \cdot A \cdot \frac{v^2}{2} \quad (3.27)$$

Burada,  $\rho$  hava yoğunluğu,  $c_d$  sürüklenme katsayısı, A ön yüzey alanı, V ise aracın hızıdır.

$$F_{eğim} = M_t \cdot g \cdot \sin\alpha \quad (3.28)$$

$M_t$  aracın toplam kütlesi, g yerçekimi ivmesi ve  $\alpha$  yolun eğim açısıdır.

$$F_{yuvarlanma} = M_t \cdot g \cdot k_{yuvarlanma} \quad (3.29)$$

Burada  $k_{yuvarlanma}$ , lastiğin yuvarlanma direnci katsayısıdır.

$$F_{ivme} = M_t \cdot \frac{dV}{dt} \quad (3.30)$$

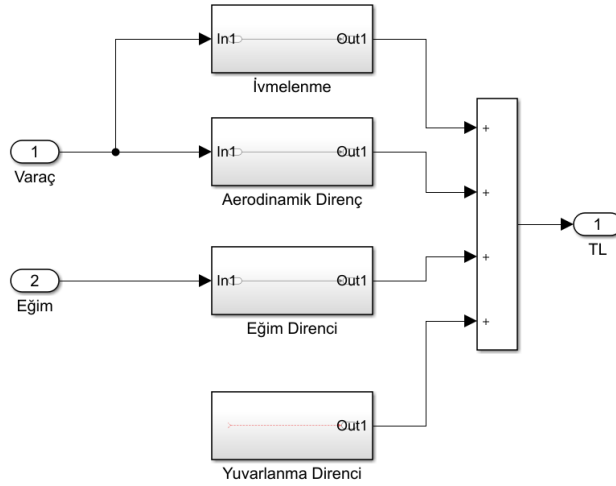
Denklem 3.27 yardımıyla, aracın ivmelenme performansı hesaplanabilmektedir.

$$F_l = F_{aero} + F_{eğim} + F_{yuvarlanma} + F_{ivme} \quad (3.31)$$

Denklem 3.31’de görüldüğü üzere, tüm direnç kuvvetleri ve ivmelenme performansı toplanarak yük kuvvetine eşitlenmektedir.

$$T_l = F_l \cdot R_t \quad (3.32)$$

Denklem 3.32’de yük kuvveti değeri tekerlek yarıçapı  $R_t$  ile çarpılarak hedeflenen yük moment değeri hesaplanmıştır.



Şekil 3.30. Taşıt modeline ait Simulink Modeli.

### 3.9. Sürücü Modeli

Bu kısımda, modellenen elektrikli aracın sürüş performansının belirleneceği sürücü modeli oluşturulacaktır. Bu bağlamda, sürüş performansının oluşturulmasında standart

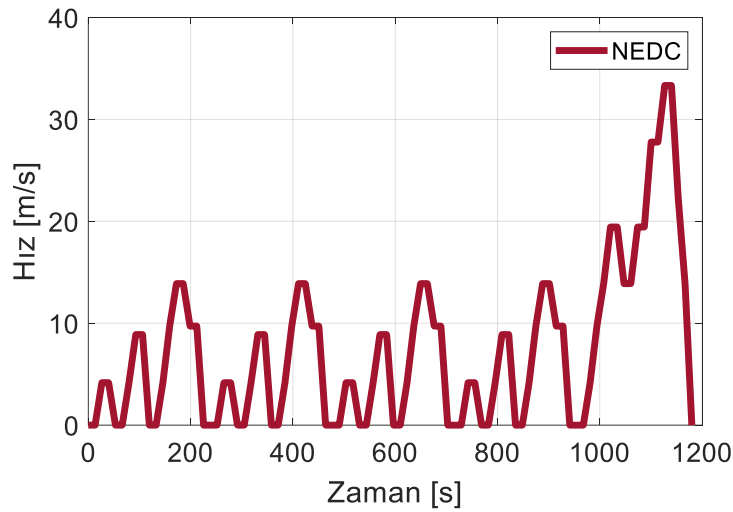


değerlerin kullanılması, çıktılarının kıyaslanabilir niteliği sağlayacağı düşüncesiyle tercih edilmiştir.

Genel olarak sürüş çevrimleri, araçların belirlenen hız ve ivmelerde çalıştırılmasını temsil eder. Araca ait yakıt tüketimi ve emisyon değerlerinin hesabı ve farklı araçların kıyaslanmasına olanak tanır.

Literatüre baktığımızda iki çeşit sürüş çevrimi olduğunu görülür. Bunlar standart ve standart olmayan çevrimlerdir. Standart çevrimler NEDC(Avrupa), Japonya 10-15 Mod vb. gibi örnekleri vardır. Standart çevrimler daha düz ivmelenme, hızlanma periyodlarına sahiptir. Araçların yakıt tüketimi standart çevrimlerle hesaplanır ancak bu gerçek tüketimi yansıtmaz. Standart olmayan çevrimler ise gerçek sürüş koşullarından elde edilen verilerle oluşturulmuş çevrimlerdir. Hong Kong, İstanbul Seyir Çevrimleri vb. gibi örnekler verilebilir. Çok farklı hız, ivme periyodlarını içermektedir. Ayrıca kırsal yollarda kullanımı da göz önüne almaktadır. Yerel bazda gerçek emisyon ve tüketim değerlerini belirlemede oldukça etkili olmaktadır.

Araçın sürüş çevrimlerinin gerçekleştirileceği lokasyon olarak İstanbul ve Erzurum illeri tercih edilmiş ve sürüş performansını standart uygun yapabilme adına NEDC çevrimi seçilmiştir.

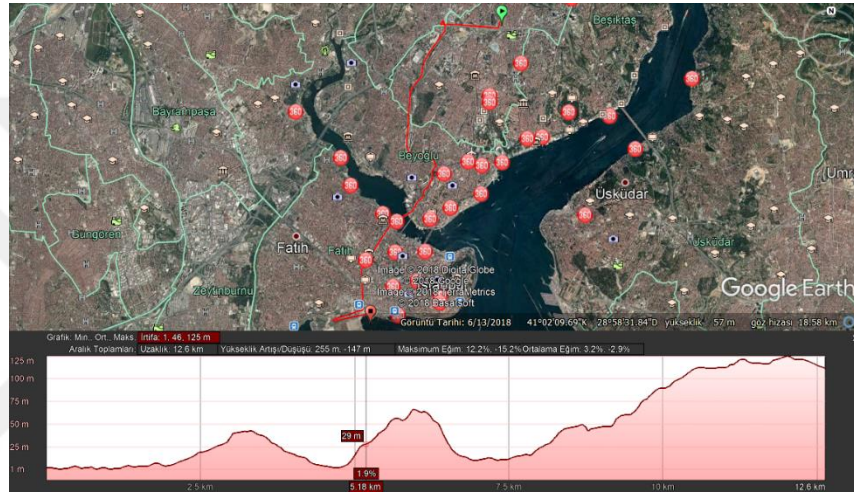


**Şekil 3.31.** NEDC sürüş çevrimi.

### 3.10. Çevre Şartları Modeli

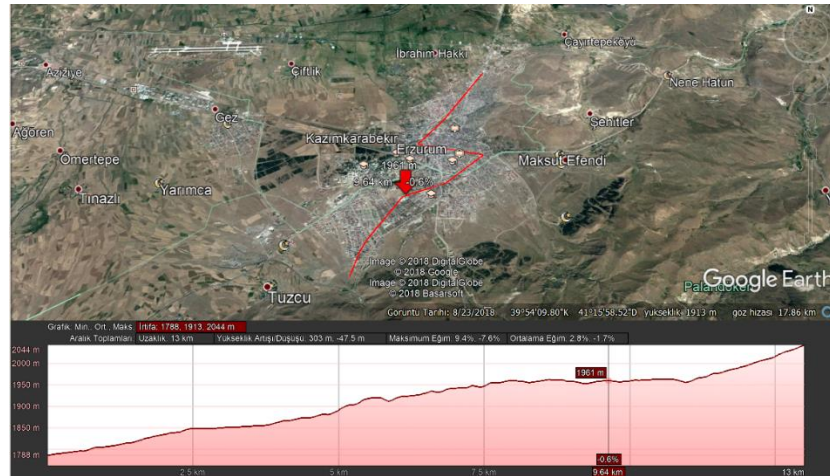
Bu kısımda, aracın sürüş çevrimlerinin yapılacağı İstanbul ve Erzurum illeri için yol şartları ve çevre sıcaklığı şartları incelenecektir.

Yol şartları için, Google Earth programı yardımıyla İstanbul ili için seçilen Mecidiyeköy-Yenikapı güzergahına ait ol eğim durumu çıkartılmıştır. Toplam 12.6 km uzunluğundaki yol için sürücü, haftanın yedi günü günde dört defa kullanacaktır.



Şekil 3.32. İstanbul ili için Mecidiyeköy-Yenikapı güzergahı yol şartı.

Erzurum ili için ise, yine 12.6 km uzunluğa sahip güzergah için, bölgeye göre eğim şartlarında araç, haftanın yedi günü günde dört defa bu yolu kullanacaktır.



Şekil 3.33. Erzurum ili için seçilen güzergahın yol durumu.

Seçilen yolların eğim değerleri, taşıt dinamiği modelinde kullanılacak ve eğim direncinin hesabında rol alacaktır. Aynı zamanda kat edilen yol, aracın batarya durumuna göre şarj durumunu belirleyecektir.

Bir yıllık çevrim içerisinde, her iki il içinde meteorolojiden alınan değerler yardımıyla mevsimsel ortalama sıcaklık eğrileri yardımıyla ortam sıcaklıkları hesaplanacak ve bu durum bataryanın termal performansının doğrudan etkileyecektir.

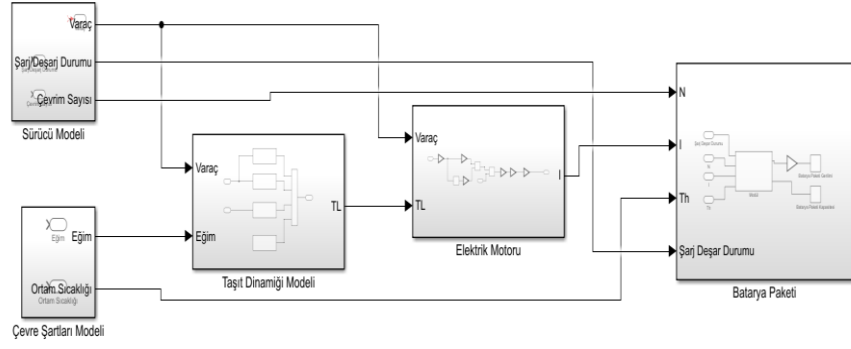
İSTANBUL	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık	Yıllık
Ölçüm Periyodu ( 1929 - 2017)													
Ortalama Sıcaklık (°C)	6.0	6.1	7.7	12.0	16.7	21.4	23.8	23.8	20.1	15.7	11.7	8.3	14.4
Ortalama En Yüksek Sıcaklık (°C)	8.4	9.0	10.9	15.4	20.0	24.6	26.6	26.8	23.7	19.1	14.8	10.8	17.5
Ortalama En Düşük Sıcaklık (°C)	3.1	3.1	4.2	7.6	12.1	16.5	19.4	20.1	16.8	12.9	8.9	5.5	10.8
Ortalama Güneşlenme Süresi (saat)	2.9	3.6	4.6	6.5	8.8	10.6	11.5	10.6	8.2	5.7	4.0	2.7	79.7
Ortalama Yağışlı Gün Sayısı	17.3	15.2	13.8	10.3	8.0	6.2	4.3	5.0	7.6	11.2	13.0	17.1	129.0
Aylık Toplam Yağış Miktarı Ortalaması (mm)	106.0	77.7	71.4	45.9	34.4	36.0	33.3	39.9	61.7	88.0	100.9	122.2	817.4
ERZURUM	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık	Yıllık
Ölçüm Periyodu ( 1929 - 2017)													
Ortalama Sıcaklık (°C)	-9.2	-7.7	-2.5	5.3	10.7	14.9	19.3	19.5	14.7	8.1	1.0	-6.0	5.7
Ortalama En Yüksek Sıcaklık (°C)	-4.0	-2.4	2.4	10.8	16.8	21.6	26.4	27.1	22.6	15.0	6.7	-1.0	11.8
Ortalama En Düşük Sıcaklık (°C)	-13.9	-12.6	-7.1	0.0	4.3	7.3	11.1	11.1	6.4	1.7	-3.7	-10.3	-0.5
Ortalama Güneşlenme Süresi (saat)	3.1	4.3	5.1	6.2	7.9	10.2	11.1	10.6	9.0	6.7	4.7	3.0	81.9
Ortalama Yağışlı Gün Sayısı	11.1	11.1	12.3	13.7	16.1	10.8	6.5	5.1	5.0	9.5	9.3	10.6	121.1
Aylık Toplam Yağış Miktarı Ortalaması (mm)	22.4	27.0	34.9	53.4	72.9	48.7	26.6	17.5	23.7	48.2	33.3	22.6	431.2

**Şekil 3.34.** İstanbul ve Erzurum illeri için mevsimsel sıcaklık değerleri. (Anonim,2019)

### 3.11. Batarya Elektrikli Araç Modeli

Önceki bölümlerde, elektrikli araca ait batarya paketinin elektriksel ve termal modeli, elektrik motoru ve taşıt dinamiği modelleri oluşturulmuş ve bu modellere ek olarak sürücü modeliyle, illere göre yol ve sıcaklık şartlarını içeren modeller eklenmişti.

Bu kısımda, tüm alt sistem modellere ait girdi ve çıktı değişkenleri tek bir modelde birleştirilerek yıllık çevrim içerisinde elektrikli aracın performansı incelenebilir hale getirilebilecektir.



**Şekil 3.35.** Elektrikli Araca ait Simulink Model



## 4. BULGULAR ve TARTIŞMA

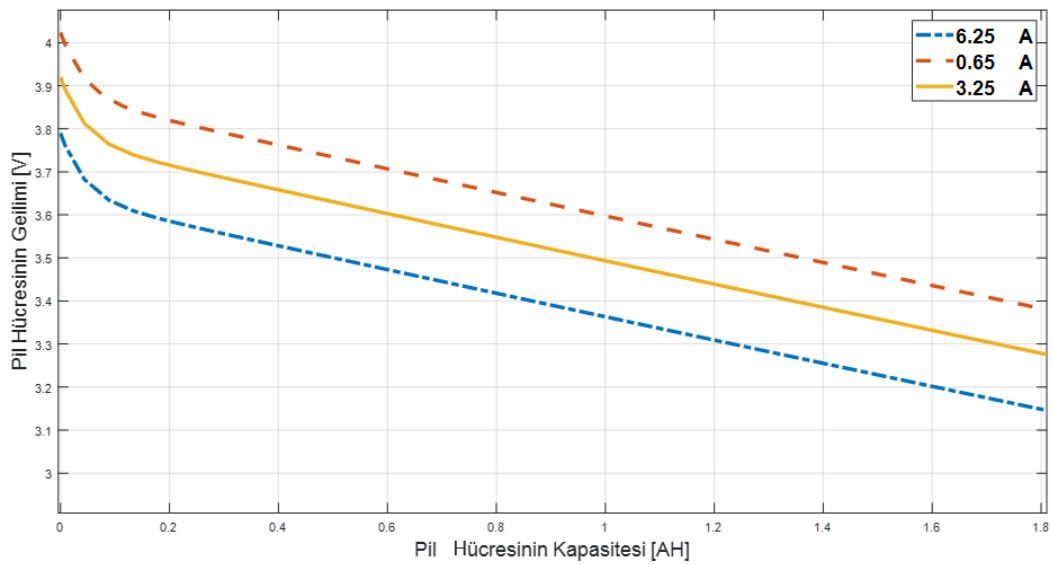
Bu bölüm içerisinde, ikinci bölümde kuramsal temelleri oluşturulan ve üçüncü bölümde dokuz farklı alt sistemden oluşan elektrikli araca ait bulgular, bataryaya ait performans değerleri, termal yönetim sisteminin performansı ve diğer sonuçlar burada ayrı ayrı incelenecektir.

### 4.1. Pil Hücresinin Doğrulanması

Bu alt başlık içerisinde, modeli oluşturulan Panasonic NCR18650B lityum iyon pilinin simülasyon çıktıları üretici firma verileri ve yapılan testlerin çıktılarıyla karşılaştırılarak doğrulanması yapılacaktır.

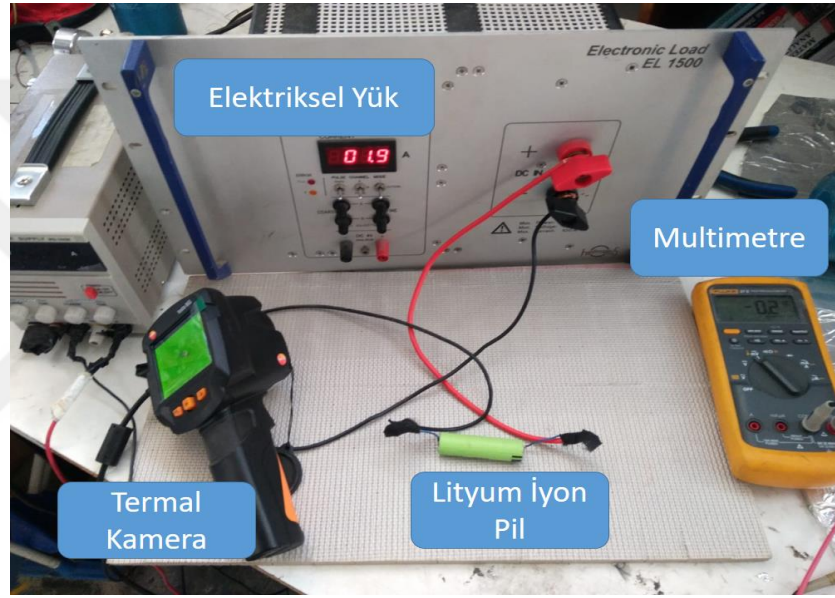
Deşarj anındaki kapasite gerilim grafiği için ilk olarak sıcaklık değeri 25°C’de sabit tutulacaktır. Deşarj akım değerleri, üretici firmanın katalog değerleriyle karşılaştırmak için sırasıyla 650mA, 3250mA ve 6500mA değerlerinde pilin boşaltılması sağlanacaktır. Pilin gerilim değeri, 2.5V değerine geldiğinde, akım değeri otomatik sıfırlanacak ve boşalma işlemi sona erdirilecektir.

Şekil 4.1’de görüldüğü gibi, farklı deşarj akım değerlerine sahip akım girdilerine karşı pil hücresinin kapasite-gerilim grafiği verilmiştir.



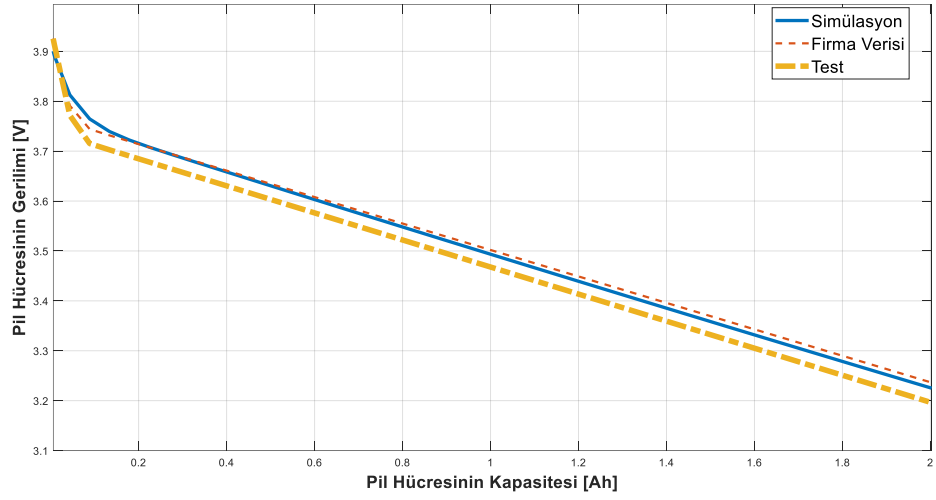
Şekil 4.1. Farklı deşarj akım değerleri altında, pil hücresinin kapasite-gerilim eğrisi.

Şekil 4.2’de görülen test düzeneği içerisinde, test edilecek Panasonic NCR18650B pil hücresi, sıcaklığı sabit tutmak adına peltier eleman üzerine konumlandırılmıştır. Pil hücresinin sıcaklığının kontrolü için, işlemci karta bağlı sıcaklık sensörü ve termal kamera yerleştirilmiştir. Pil hücresinin şarjı için güç kaynağı, deşarj anının testi için ise elektriksel yük kullanılacaktır. Şarj ve deşarj anında, akım ve gerilim değerleri güç kaynağı ve elektriksel yük üzerinden okunabilir olup, değerlerin doğrulanması adına test düzeneğine pens ampermetre ve multimetre de eklenmiştir.



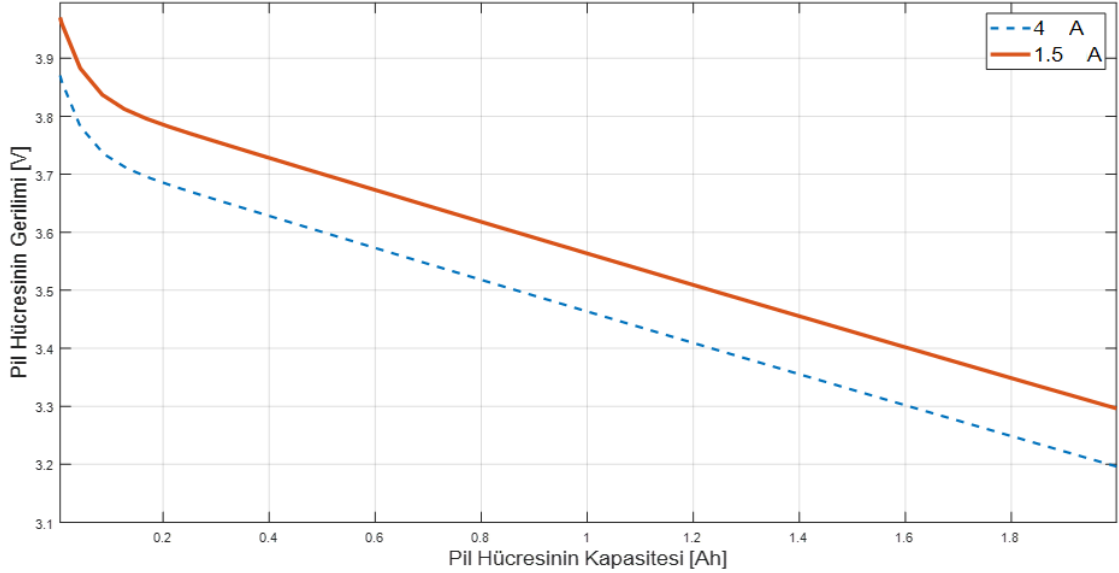
Şekil 4.2. Panasonic pil hücresi üzerindeki çalışma için oluşturulan test düzeneği.

Üretici firmanın paylaştığı değerler ile doğrulanan sonuçlar, Panasonic NCR18650B pil hücresi üzerinde yapılan test düzeneğinde de benzer sonuçlar vermesi beklenmektedir. İlk olarak test düzeneğinde, deşarj akım değeri üretici firmanın da verdiği eğrilerde bulunan 650 mA ve 3250 mA seçilerek, yapılan testin üretici firma verileriyle kıyaslayarak doğruluğu görülebilecektir.



**Şekil 4.3.** 3250 mA deşarj akımı altında test verilerinin, üretici firma ve simülasyon değerleriyle karşılaştırılması.

Şekil 4.3.'te çizilen eğri, test sonuçlarının simülasyon ve üretici firma değerleriyle yakın olduğunu göstermektedir. Test sonucunun yakın sonuçlar vermesiyle, üretici firma değerlerinde bulunmayan 1500 mA ve 4000 mA değerlerinde testler yapılmış ve aynı değerler altında simülasyon sonuçlarıyla karşılaştırılması yapılmıştır. (Şekil 4.4)

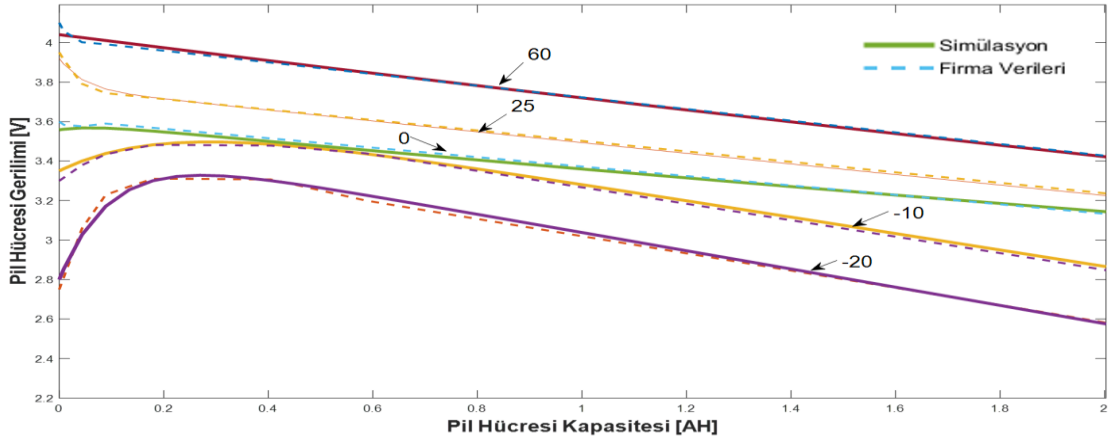


**Şekil 4.4.** 1500mA ve 4000 mA deşarj akımı altında simülasyon sonuçları.

Testlerde hataya zorlayan değerler, ölçüm aletlerinden kaynaklı ölçüm hataları ve deşarj anında pilin ısınmasından kaynaklı olarak sıcaklık değerinin 25°C'de sabit kalmamasıdır. Akım değişimine bağlı, modelin doğruluğu yapıldıktan sonra bu sefer sıcaklık değerleri

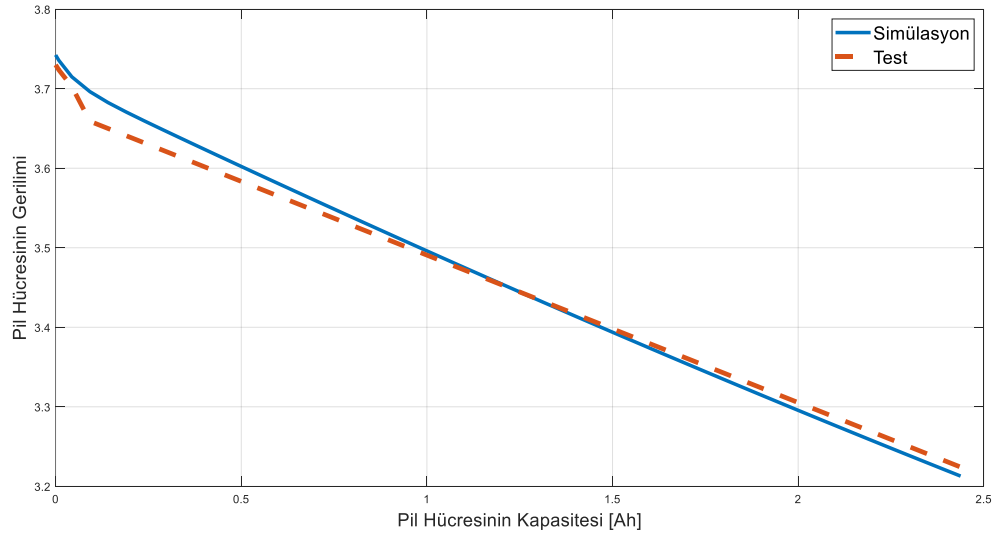


değiştirilecek ve deşarj akım değeri sabit tutulacaktır. 3250 mA deşarj akımı altında -10°C, 0°C, 10°C, 25°C, 45°C ve 60°C sıcaklıklarındaki simülasyon sonuçları üretici firma değerleriyle karşılaştırılacaktır. (Şekil 4.5) (Ek-2)



**Şekil 4.5.** Farklı sıcaklık değerlerinde simülasyon sonuçlarının üretici firma değerleriyle kıyaslanması.

Deşarj akımı değiştirilerek yapılan testlerde olduğu gibi, test düzeneğinde 15°C için yapılan testler, simülasyon sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. (Şekil 4.6)

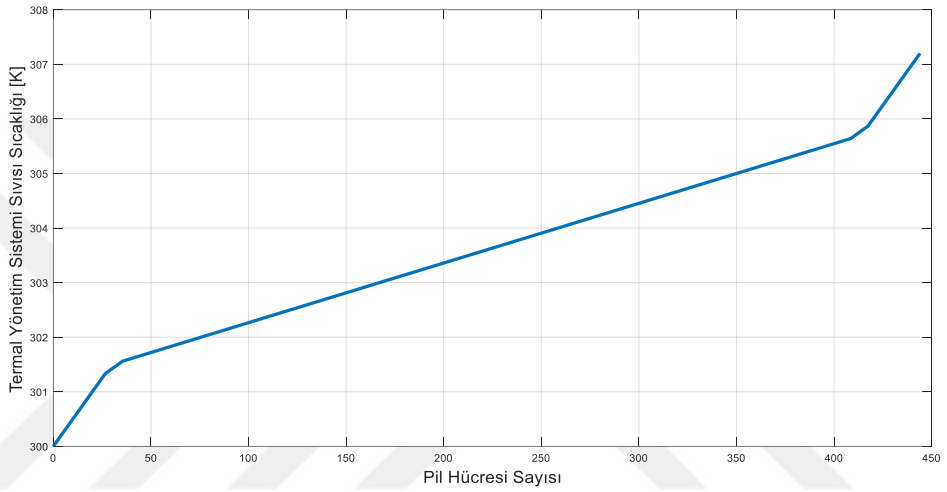


**Şekil 4.6.** 15°C sıcaklık değerinde simülasyon sonuçlarının test değerleriyle kıyaslanması.



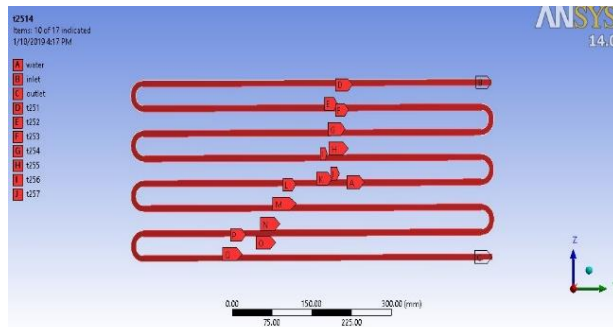
## 4.2. Termal Yönetim Sisteminin Doğrulanması

Pil hücresinin doğrulması yapıldıktan sonra, modeli oluşturulan termal yönetim sisteminin doğrulanması Ansys yazılımının çıktılarıyla karşılaştırılarak yapılacaktır. İlk olarak, termal sıvının kanallar içerisindeki ısınmasının Simulink modeli çıktısında, kanalın uzunluğuna bağlı olarak sıcaklık değerini gösteren grafik elde edilmiştir. (Şekil 4.7)



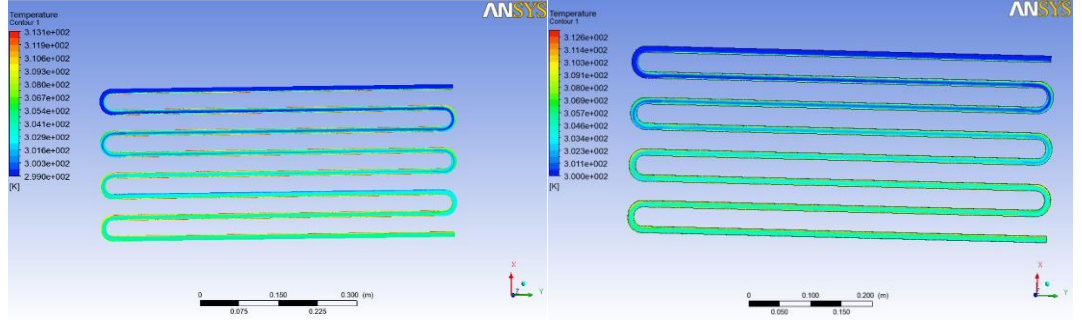
Şekil 4.7. Akış kanalının, konuma bağlı sıcaklık eğrisi.

Mesh modeli oluşturulan akış kanalı, Şekil 4.8 gösterildiği gibi sınır şartları altında analizi yapılacaktır. Sınır şartı değerleri, Simulink modelindeki değerlerle aynı değere sahiptirler.



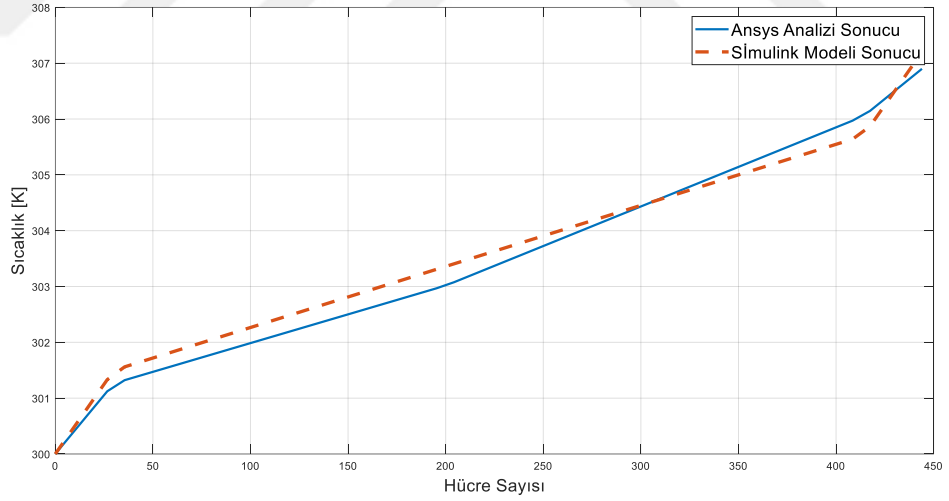
Şekil 4.8. Termal analizi yapılacak termal yönetim sisteminin sınır ve başlangıç şartları.

Ağdan bağımsızlık için, orta ve sık mesh yapısına sahip iki geometride analizi yukarıda belirtilen sınır şartlarında yapılmıştır. Değerler arasındaki yakınlık Şekil 4.9’da görülmektedir.



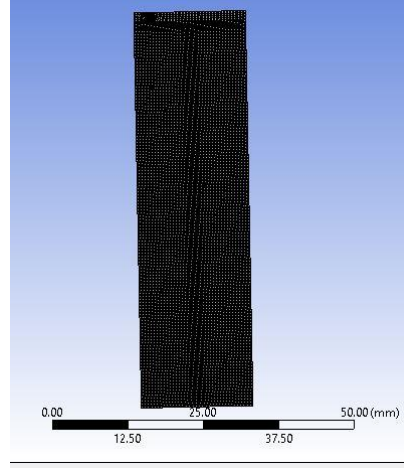
Şekil 4.9. Orta ve sık ağ yapısına sahip modellerin analiz sonuçları.

Ansys programında yapılan analiz sonuçları, Simulink modelle karşılaştırılarak matematiksel modelin doğruluğu sınanabilecektir. Şekil 4.10’da görüldüğü üzere yaklaşık %0.2 hata ile alınan kesitteki değerler ile Simulink çıktıları benzerlik göstermektedir.



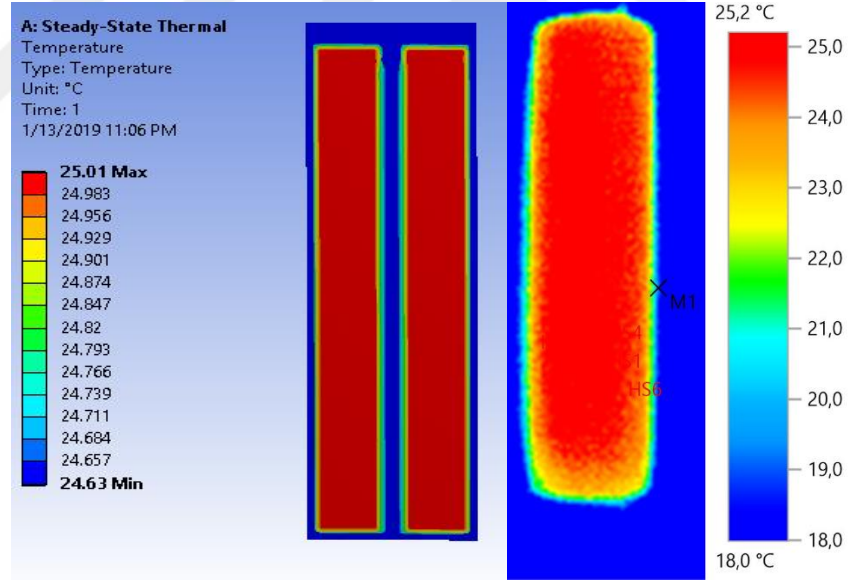
Şekil 4.10. Verilen kesitteki sıcaklık değerlerinin karşılaştırılması.

Termal sıvının doğrulanmasının ardından, bataryanın iç sıcaklık dağılımının analizi yapılarak oluşturulan modelin doğruluğu incelenecektir. Şekil 4.11’de bataryanın kesit modeli ve ağ yapısı görülmektedir.



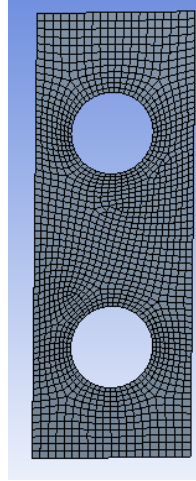
**Şekil 4.11.** Pil hücresinin kesitinin ağ yapısı.

Şekil 4.12 görüldüğü gibi sınır şartları, Simulink modelle aynı olacak şekilde analizi ve testi yapılarak belirtilen kesitteki sıcaklık değerleri Simulink değerleriyle karşılaştırılmıştır. Şekil 4.12 yardımıyla, pil hücresine ait ısı bölgeleri ve bu ısının pil yüzeyine dağılımı termal kamera ile yapılan test sonucunda açıkça görülmektedir.



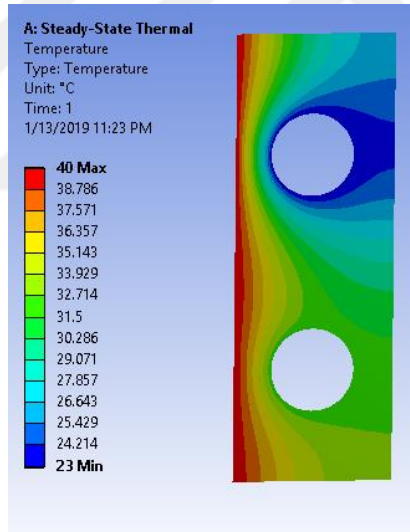
**Şekil 4.12.** Pil hücresinin iç sıcaklık dağılımının sonlu elemanlar analizi ve termal kamera sonucu.

Batarya iç sıcaklık dağılımının doğrulanmasının ardından, pil hücresiyle termal yönetim sistemi arasındaki termal ilişki modelinin doğruluğunun incelenebilmesi için Şekil 4.13 görülen model ve ağ yapısı oluşturulmuştur.



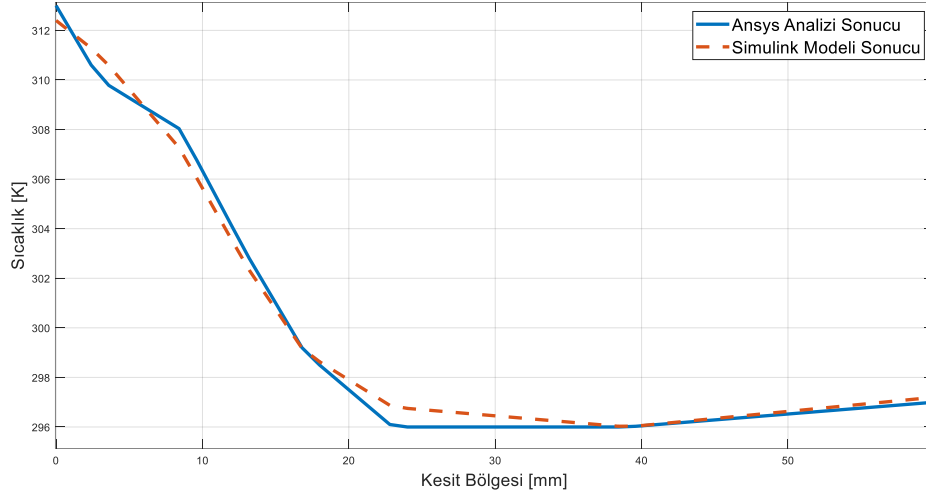
**Şekil 4.13.** Termal yönetim sistemine ait alüminyum parçanın ağ yapısı.

Sınır şartları Şekil 4.14’de gösterilen modelin, analiz sonuçları oluşturularak Simulink çıktılarıyla karşılaştırılabilir hale getirilmiştir.



**Şekil 4.14.** Pil hücresi ve termal yönetim sistemin sınır şartları ve analiz sonucu.

Belirtilen kesitteki (Şekil 3.16-Birinci ısı transferi doğrultusu), sıcaklık dağılımı hem Ansys programının çıktıları hem de Simulink modelinin çıktıları aynı grafik üzerinde çizdirilmiş ve yakın sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. (Şekil 4.15)

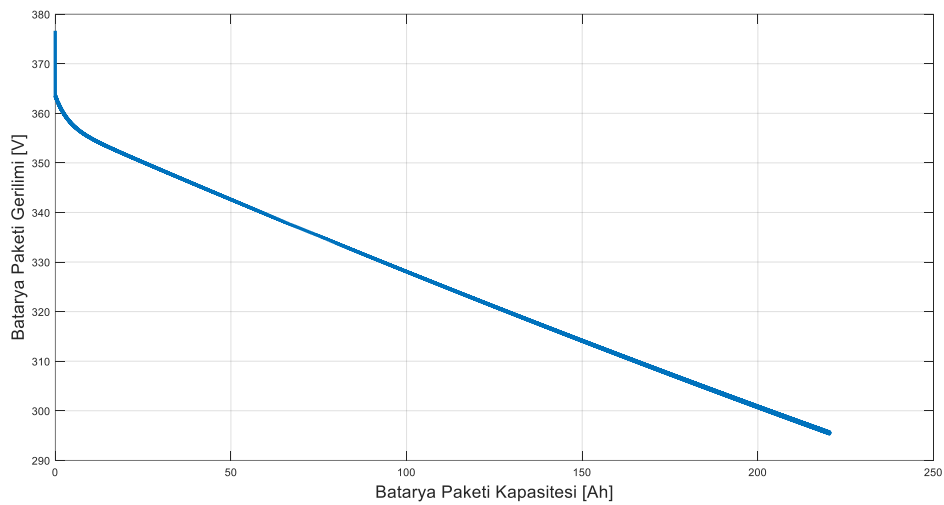


**Şekil 4.15.** Pil hücresi ve termal yönetim sistemin belirtilen kesitteki Simulink ve Ansys program çıktıları.

### 4.3. Batarya Paketinin Simülasyon Sonuçları

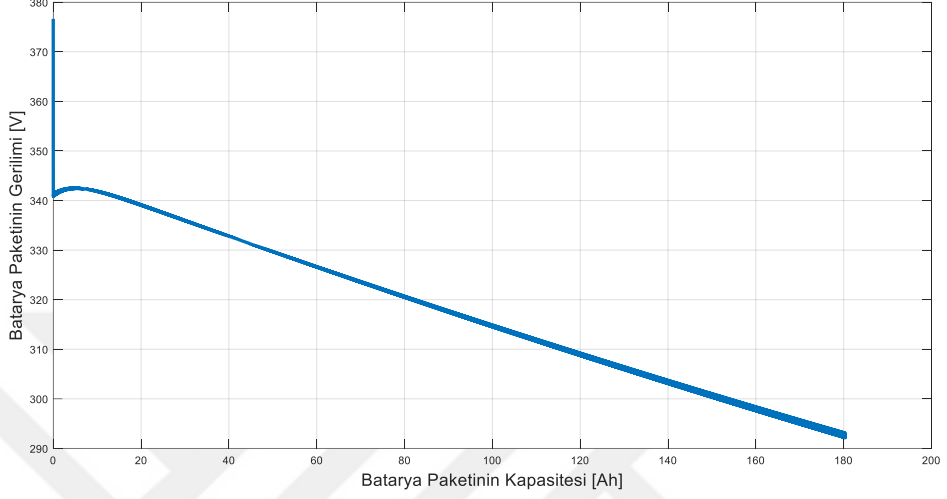
Pil hücresinin termal ve elektriksel doğrulanması ve termal yönetim sisteminin Ansys programıyla doğrulanmasının ardından, batarya paketine ait karakteristikler bu bölümde sunulacaktır.

Şekil 4.16'da batarya paketinin, 312 mA deşarj akımı ve 25 °C altındaki gerilim ve kapasite içeren eğri sunulmuştur. Simülasyon sırasında her bir pil hücresine akımın eşit dağıldığı kabul edilmiştir.



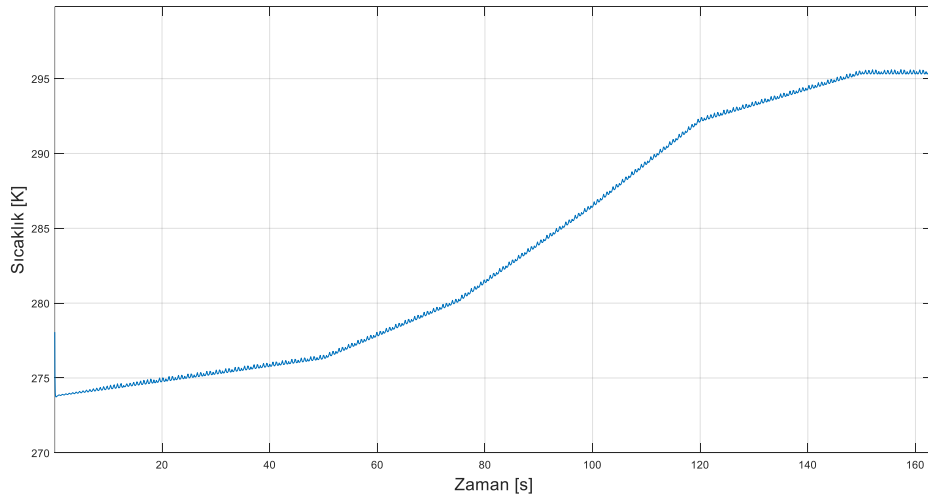
**Şekil 4.16.** Batarya paketinin, 25 °C'de 312 mA deşarj anındaki kapasite- gerilim ilişkisi.

Şekil 4.17’de batarya paketinin, 312 mA deşarj akımı ve 0 °C altındaki gerilim ve kapasite içeren eğri sunulmuştur. Yine pil hücrelerine akımın eşit dağıldığı kabul edilmiş ve sıcaklık değeri düşürülmüştür. Bu simülasyon esnasında, termal yönetim sisteminin ısıtma performansının etkisi göz ardı edilmiştir.



Şekil 4.17. Batarya paketinin, 0 °C’de 312 mA deşarj anındaki kapasite- gerilim ilişkisi.

Termal yönetim sisteminin, bir pil hücresi üzerinde ki etkisinin inceleme adına Şekil 4.18’de görülen eğri oluşturulmuştur. 0 °C sıcaklığa sahip çevre şartında bulunan pil hücresi, termal yönetim sistemi yardımıyla 22 °C sıcaklığa yaklaşık 3 dakikada ulaşmaktadır.

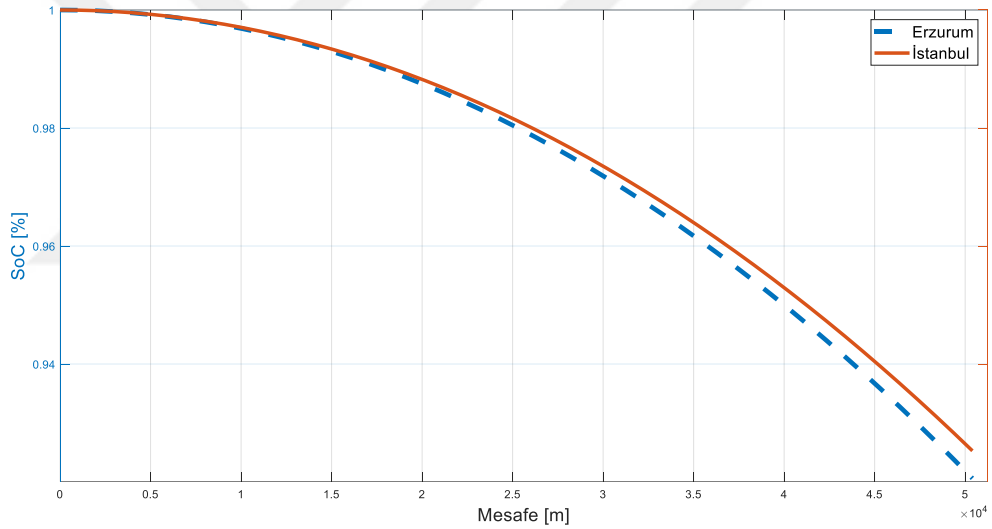


Şekil 4.18. 0 °C’de başlangıç sıcaklığındaki pil hücresinin termal yönetim sistemi yardımıyla 22°C sıcaklığa ulaşma zamanı.

#### 4.4. Elektrikli Aracın Belirlenen Çevrimde Batarya Paketinin Performansı

Bu alt başlık altında, elektrikli aracın üçüncü bölümde oluşturulan sürücü, yol ve çevre şartları altındaki performansı iki farklı şehir için incelenecektir. İlk olarak, 20°C sıcaklıkta yol şartları iki şehir için farklı olarak üçüncü bölümde belirlenen güzergahı günde dört defa kullandığı kabul edilmiştir. Günde yaklaşık 50.2 km yol yapan araç, farklı eğim koşulları altında aynı sürüş çevrimine sahip ve sıcaklık iki şehir içinde aynı olarak ayarlanarak simülasyon yapılmıştır.

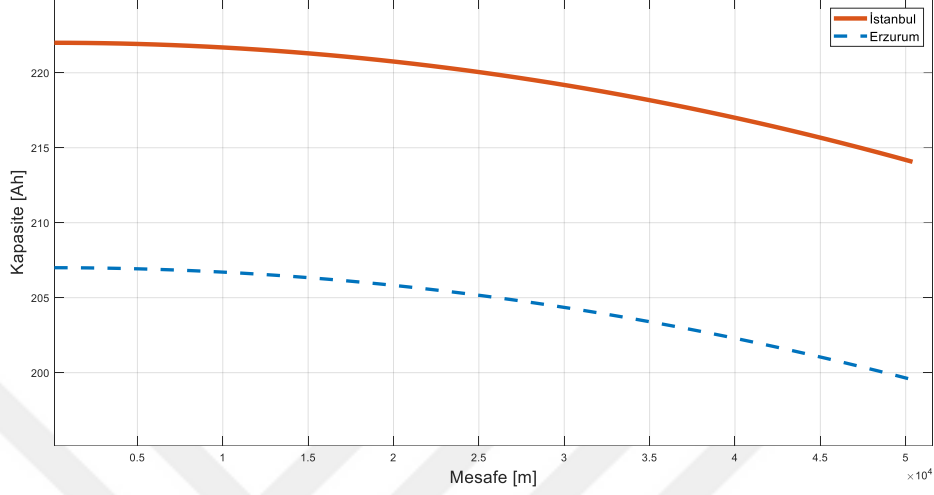
Yapılan simülasyon sonucunda, Şekil 4.19’da görüldüğü üzere, Erzurum ilinin sahip olduğu eğimi fazla yol güzergahı dolayısıyla, İstanbul iline nazaran yaklaşık %0.05 batarya şarjının az olduğu görülmektedir.



**Şekil 4.19.** İki şehir için belirlenen güzergah, NEDC sürüş çevrimi ve 20°C sıcaklıktaki elektrikli aracın bir günlük çevriminde kat ettiği mesafeye göre batarya paketinin şarj durumu.

Aynı sürüş tarzı ve yol iki şehrin sahip olduğu yol şartları altında bu sefer her iki şehrin Ocak ayı sıcaklık ortalamasına sahip değerinde (İstanbul için 6°C, Erzurum için 0°C) simülasyonu yapılmış ve Şekil 4.20’de görülen egride, aynı aracın iki şehir için batarya kapasiteleri karşılaştırılmıştır. Bu simülasyon yapılırken, termal yönetim sisteminin ısıtma performansı göz ardı edilmiştir.

Eğriden görüldüğü üzere soğuk iklim şartları altında, bataryanın kapasitesini doğrudan etkilemekte ve bu durum aracın sahip olduğu menzilin kısalmasına neden olmaktadır.



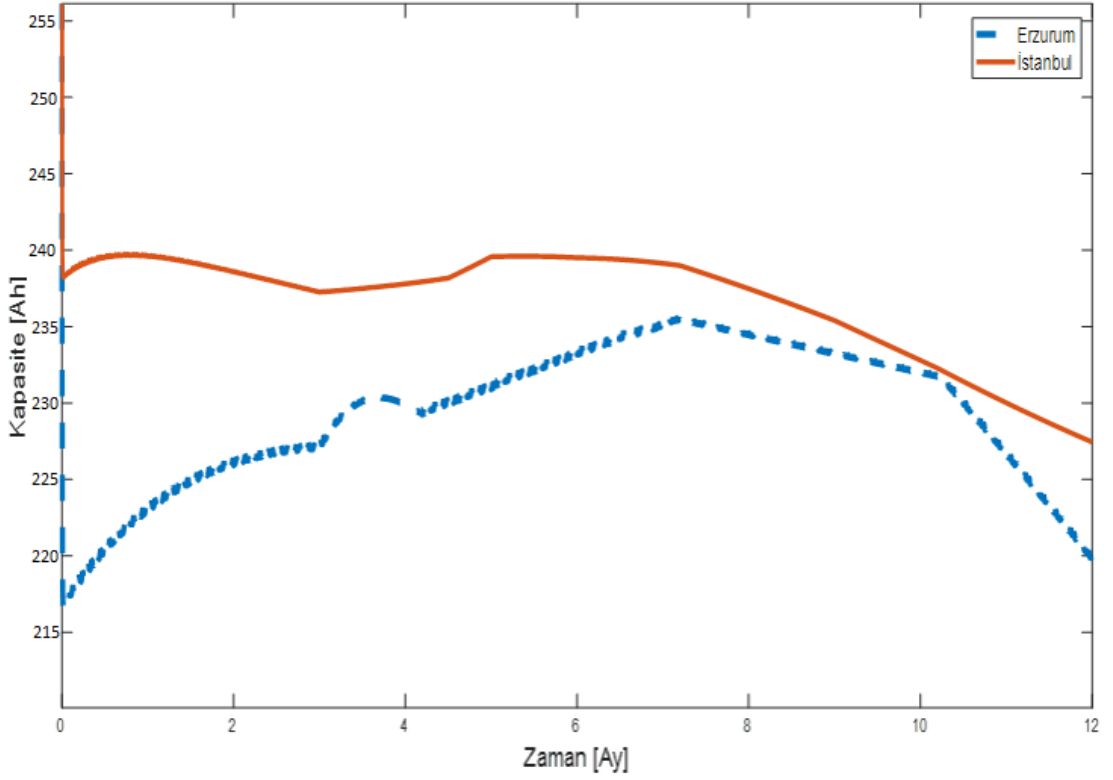
**Şekil 4.20.** İki şehir için belirlenen güzergah, NEDC sürüş çevrimi ve iki şehrin Ocak ayı ortalama sıcaklık değerinde elektrikli aracın bir günlük çevrimde kat ettiği mesafeye göre batarya paketinin kapasite durumu.

Elektrikli aracın, her il için belirlenen güzergahta günde 50.2 km mesafe kat etmesi ve 365 gün bu yol şartı altında çalıştığı kabul edildiğinde bir yıllık süre zarfında her iki şehir için toplam 18323 km yol kat edecektir. Bir yıllık süre zarfında, her şehre özgü aylık mevsimsel sıcaklık ortalaması değerlerinde aracın hareket ettiği ve batarya termal yönetim sisteminin aracın hareketi boyunca işlevini sürdürdüğü kabul edilecektir.

Aracın çalışmıyor olduğu anlarda, işlevini sürdürmeyen termal yönetim sistemi, bataryanın mevsimsel çevre sıcaklığı altında etkilenecek kapasitesinin düşmesine neden olmaktadır. Bu durum, mevsimsel sıcaklık değeri İstanbul'a göre daha düşük olan Erzurum ili için daha önem arz etmektedir.

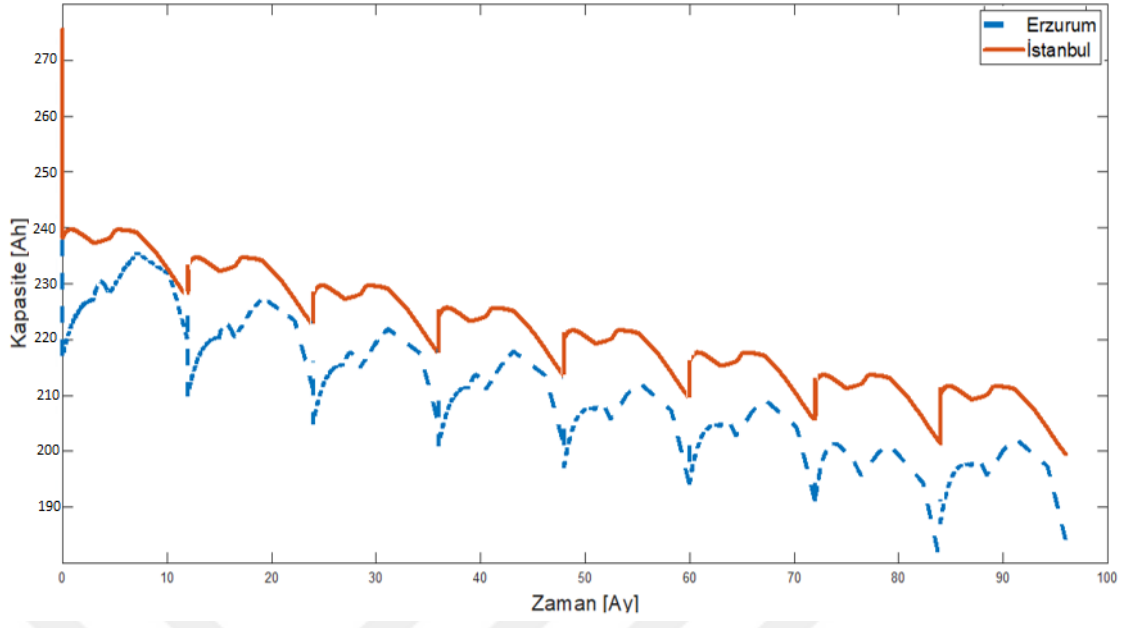
Şekil 4.21'de görüldüğü üzere, bir yıllık çevrim altında elektrikli aracın batarya paketinin kapasitesindeki değişim iki şehir için ayrı ayrı incelenmiştir.





**Şekil 4.21.** İki şehir için belirlenen güzergah, NEDC sürüş çevrimi ve iki şehrin sahip olduğu aylık ortalama sıcaklık değerlerinde elektrik aracın bir yıl çevrimde batarya paketinin kapasite durumu.

Yılda 18323 km yol yapan elektrikli araç, sekiz yıllık süre zarfında aynı şartlar altında incelendiğinde toplam yaklaşık 150000 km mesafe kat edecektir. 8 yıllık süre zarfında, hem mevsimsel sıcaklık farklarının etkisi hem de batarya paketinin yaşlanma faktörünün etkisiyle aracın batarya kapasitesindeki değişim Şekil 4.22’de görülmektedir. Aracın, batarya şarj durumu %30 değerine geldiğinde şarj olacağı ve bu değere yaklaşık 350 km’de bir şarj olacağı anlamına gelmektedir. Bu durumda elektrikli araç yaklaşık haftada bir kez kendini şarj etmekte ve yılda 52 kez şarj-deşarj çevrimi yapmaktadır. Sekiz yıllık süreçte bu sayı 416 olmaktadır.



**Şekil 4.22.** İki şehir için belirlenen güzergah, NEDC sürüş çevrimi ve iki şehrin sahip olduğu aylık ortalama sıcaklık değerlerinde elektrik aracın 8 yıllık çevrimde batarya paketinin kapasite durumu.

## 5. SONUÇ

Tez çalışması kapsamında, öncelikle Panasonic NCR18650B markalı lityum iyon pilin dinamik ve termal matematiksel modeli oluşturulmuştur. Bu matematiksel model, akım yoğunluğu, sıcaklık ve yaşlanma gibi önemli değişkenlere göre doğru sonuçlar verdiği dördüncü bölümde yapılan test ve analizler sonucunda doğrulanmıştır. Mevcut pil hücresi eş değer devre modellerine göre, sıcaklık, yaşlanma ve akım yoğunluğu değişimlerine göre daha hassas halde tasarlanması sebebiyle, gerçek sonuçlara yakınlığı daha az bir hatayla (en fazla hatanın gözlemlendiği yerdeki hata değeri yaklaşık %0.4) sağlanmıştır.

Bir pil hücresinin modellenmesinin ardından, Tesla Model S aracına ait batarya termal yönetim sistemi referans alınarak batarya paketinin termal yönetim sistemi modellenmiştir. Matematiksel modelin çıktıları, Ansys programında yapılan analizler ile yakın sonuçlar verdiği grafikler halinde sunulmuştur.

Termal ve elektriksel olarak doğrulanan batarya paketi, Tesla Model S aracının elektriksel karakteristiklerine göre seri bağlı 16 modül oluşturulmuş ve her modül içerisinde 6 adet seri bağlı 74 hücreye sahip paralel gruplar oluşturulmuştur.

Araç dinamiklerine göre daha uygun sonuçlar vermesi adına, aerodinamik direnç, yuvarlanma direnci, eğim direnci ve aracın ivmelenme performansını içeren taşıt dinamiği modeli oluşturulmuş ve bu model oluşturulan elektrik motorunun elektriksel modeliyle doğrudan bağlantılı hale getirilmiştir. Taşıt dinamiği modelindeki, ivmelenme performansını daha standart hale getirebilme adına NEDC Avrupa standart çevrimi kullanılmıştır.

Eğim direnci değerine, gerçeğe yakın değerler oluşturulması adına İstanbul ve Erzurum illerinde belirlenen güzergahın eğim grafiği Google Earth programı yardımıyla oluşturulmuştur. Termal modelleme de çevre sıcaklığı girdisinin daha gerçekçi sonuçlar verebilmesi adına, İstanbul ve Erzurum illerine ait mevsimsel sıcaklık değerleri Meteoroloji Genel Müdürlüğü tarafından alınmıştır. Oluşturulan bu alt modeller, üretici

firma verileri, Ansys programında yapılan analizler ve yapılan testle doğrulanması sağlanmıştır.

Yapılan doğrulama çalışmalarının sonucunda, matematiksel model çıktılarının test ve Ansys yazılımı sonuçları tatmin edecek derecede yakın sonuçlar vermiştir. Doğrulamanın ardından yapılan simülasyonlarda, batarya paketinin farklı sıcaklık şartları altında termal yönetim sisteminin etkisi olmadığı anlardaki gerilim ve kapasite değişimleri grafikler halinde sunulmuş ve çevre sıcaklığının batarya kapasitesine doğrudan etki ettiği açık bir şekilde gözlemlenmiştir.

Doğrulanması yapılan batarya paketinin termal yönetim sisteminin, 0°C çevre sıcaklığı altındaki batarya hücrelerinin ne kadar bir zamanda optimum sıcaklık değerine getirdiği dördüncü bölümde gösterilmiştir.

Doğrulanması yapılan elektrikli aracın, günlük, bir yıllık ve sekiz yıllık çevrimi altındaki simülasyonları yapılarak, sıcaklık ve yaşlanma faktörlerinin etkisi batarya kapasitesindeki değişim ile gözlemlenebilir bir hale getirilmiştir.

Oluşturulan simülasyon sonuçlarıyla, bataryanın soğuk iklim şartları altında özellikle termal yönetim sisteminin aktif olmadığı anlarda pil hücreleri doğrudan etkilenerek kapasitelerinde düşüşler yaşanmaktadır.

Sekiz yıllık simülasyon sonucunda ise, sıcaklık değişimi ve yaşlanmanın etkisiyle İstanbul ili için bataryanın mevcut kapasitesinde yaklaşık %11.67, Erzurum ili içinse yaklaşık %14.04 değerinde düşüş meydana gelmektedir.

İstanbul çevre şartlarında yaklaşık 150000 km mesafe kat eden aracın batarya kapasitesindeki %11.67'lük düşüş, Tesla Motors firmasının 160000 km sonunda batarya kapasitesinin yine de ilk haline göre yaklaşık %10'luk bir kapasite düşüklüğü vereceği öngörüsüyle yakın sonuçlar vermektedir. (Anonim 2, 2019)

## KAYNAKLAR

- Anonim, 2018.** Implement generic battery model. <https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/battery.html> (Erişim Tarihi: 20.11.2018).
- Anonim, 2019.** İllere ait mevsim normalleri. <https://www.mgm.gov.tr/veridegerlendirme/il-ve-ilceler-istatistik.aspx> (Erişim Tarihi: 01.01.2019).
- Anonim 2, 2019.** Tesla batarya kapasitesi düşümü öngörüsü. <https://www.tesla.com/> (Erişim tarihi: 02.01.2019).
- Axsen, J., Burke, A., Kurani, K. 2008.** Batteries for Plug-in Hybrid Electric Vehicles (PHEVs): Goals and the State of Technology circa 2008. Institute of Transportation Studies University of California.
- Carroll, J., Alzorgan, M., Page, C., and Mayyas, A., 2016.** "Active Battery Thermal Management within Electric and Plug-InHybrid Electric Vehicles," SAE Technical Paper 2016-01-2221, 2016, doi:10.4271/2016-01-2221.
- Chaturvedi, N. A., Klein, R., Christensen, J., Ahmed, J., Kojic, A. 2010.** Modeling, estimation, and control challenges for lithium-ion batteries. 2010 American Control Conference, June 30-July 02, 2010, Marriott Waterfront, Baltimore.
- Geller, B., Quinn, C., Bradley, T.H. 2010.** Analysis of design tradeoffs for plug-in hybrid vehicles. Electric and hybrid vehicles power sources, models, sustainability, infrastructure and the market, 2010: 159-191. 92
- Gümüştü, E., 2017.** "Thermal Modelling of Lithium Ion Batteries". Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü. Ankara.
- Hu Y., Yurkovich S., Guezennec Y., Yurkovich B.J. 2011.** Electro-thermal battery model identification for automotive applications. *J. Power Sources*. 449-457.
- Issac J., 2013.** Modeling and state of charge estimation of li-ion batteries for vehicular applications. *Master's thesis*, Purdue University.
- Kılıç M., Yiğit A., 2010.** Isı transferi. Uludağ Üniversitesi, Bursa, Türkiye, 489 s.
- Matteo Muratori, 2009.** Thermal characterization of lithium-ion battery cell. *Master's Thesis*. Politecnico Di Milano.
- Milpitas. Bergveld, H.J. 2001.** Battery management systems design by modeling. Ph.D. Thesis, Proefschrift Universiteit Twente.
- Min C., Rincon-Mora G., 2006.** Accurate electrical battery model capable of predicting runtime and i-v performance. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 504 – 511.
- Rao, Z., Qian Z., Kuang, Y., Li, Y. 2016,** "Thermal performance of liquid cooling based thermal managementsystem for cylindrical lithium-ion battery module withvariable contact surface". School of Electrical and Power Engineering, China University of Mining and Technology, XuZhou 221116, China.
- Sayın, A.A., Yüksel, İ. 2011.** Elektrikli Renault Fluence aracı, lityum-iyon bataryasının modellenmesi ve batarya yönetimi. *Yüksek Lisans Tezi*, Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Bursa, Türkiye.
- Tremblay O., Dessaint L.-A., Dekkiche A.-I., 2007.** A generic battery model for the dynamic simulation of hybrid electric vehicles. Vehicle Power and Propulsion Conference.
- Tremblay O., Dessaint L.A., 2009.** Experimental validation of a battery dynamic model for EV applications. *World Electric Vehicle Journal*, 289-298.
- Zhang H., Chow M.-Y., 2010.** Comprehensive dynamic battery modeling for phev applications. *IEEE Power and Energy Society General Meeting*.

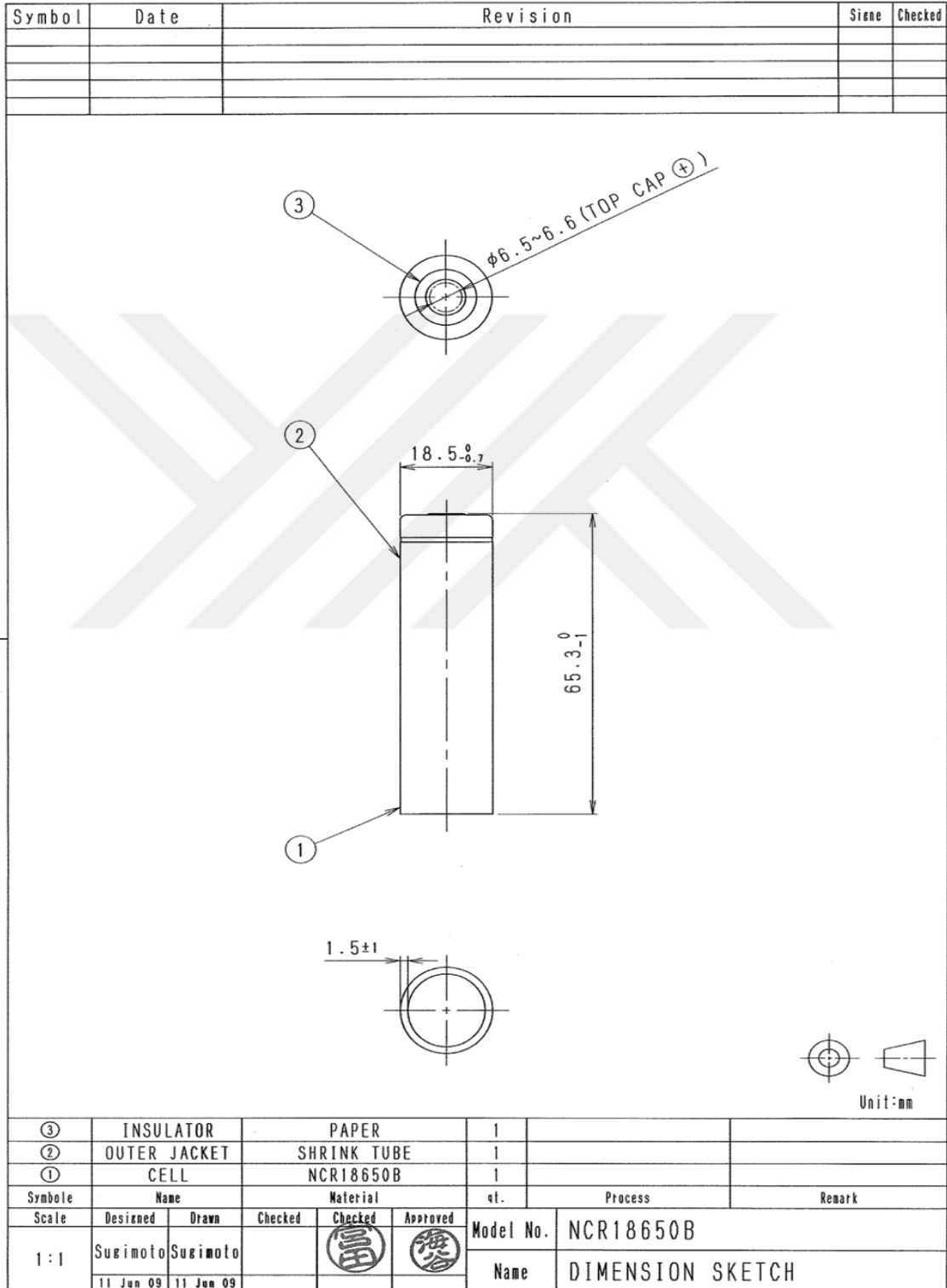
## **EKLER**

**EK 1** Lityum İyon Pil Hücresine Ait Teknik Resim

**EK 2** Lityum İyon Pil Hücresine Üretici Firma Verileri



## EK 1 Lityum İyon Pil Hücreesine Ait Teknik Resim




Panasonic Corporation Energy Company Unit:mm

## EK 2 Lityum İyon Pil Hücresine Üretici Firma Verileri

Lithium ion  
Rechargeable battery

### Cell Type NCR18650B

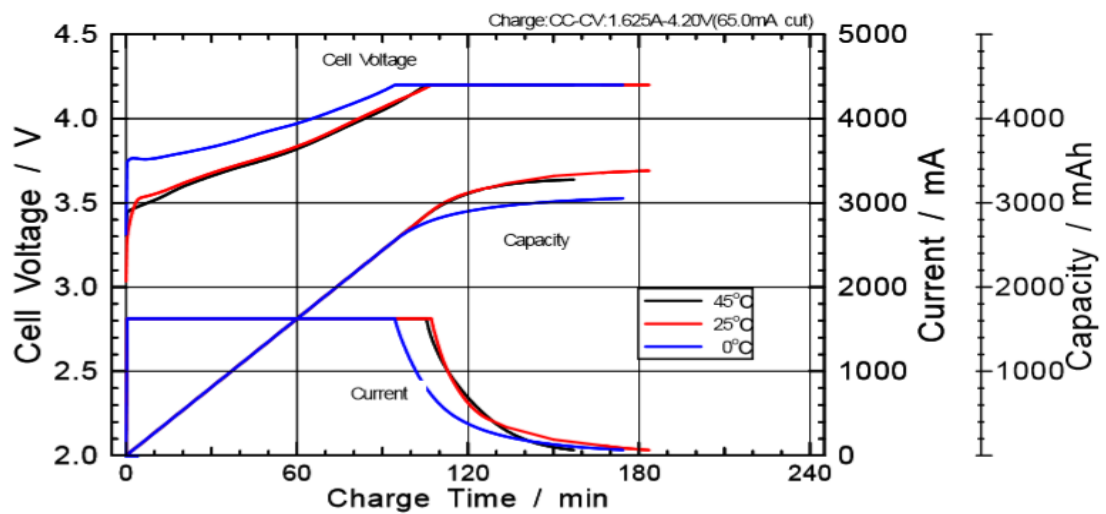
#### Specifications

	Rated Capacity (at 20°C)		Min.3200mAh
	Nominal Capacity (at 25°C)		Min.3250mAh
			Min.3350mAh
	Nominal Voltage		3.6V
Charging Method		Constant Current -Constant Voltage	
Charging Voltage		4.2V	
Charging Current		Std.1625mA	
Charging Time		4.0hrs.	
Ambient Temperature	Charge	+10~+45°C	
	Discharge	-20~+60°C	
	Storage	-20~+50°C	
Weight (Max.)		47.5g	
Dimensions (Typ.) of Bare Cell	H	64.93mm	Dimensions (Max.) Maximum size without tube
	D	18.2mm	
d	7.9mm	(D)	
Discharged State after Assembling		(H)	65.10mm
Volumetric Energy Density		676Wh/l	
Gravimetric Energy Density		243Wh/kg	

CYKU

Panasonic ideas for life

### Charge Characteristics for NCR18650B



CYKU

Panasonic ideas for life



## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Mert Ali ÖZEL  
Doğum Yeri ve Tarihi : Osmangazi-BURSA/ 19.07.1995  
Yabancı Dil : İngilizce (İyi), Fransızca(Başlangıç)

Eğitim Durumu  
Lise : Cumhuriyet Lisesi  
Lisans : Uludağ Üniversitesi Makine Mühendisliği  
Yüksek Lisans : Uludağ Üniversitesi Makine Mühendisliği

Çalıştığı Kurum/Kurumlar :

-Renault Technologie Roumanie (Haziran2017-Eylül2017) – Tasarım Mühendisi  
-Oyak-Renault (Eylül 2017-Mayıs 2018) -- Tasarım Mühendisi  
-Segula Technologies (Haziran 2017-Mayıs 2018) -- Tasarım Mühendisi  
-Uludağ Üniversitesi Makine Mühendisliği (Mayıs 2018-...)—Araştırma Görevlisi

İletişim (e-posta) : mertaliozel@outlook.com

Yayımları :

**Özel M.A., Şefkat G., 2018.** PEM Yakıt Pilinin Modellenmesi ve Analizi. UÜ Mühendislik Fakültesi Dergisi. 23 (3); 351-366.

**Özel M.A., Şefkat G., 2018.** Hidrojen Enerjili Elektrikli Araca Ait Yakıt Pilinin Simulink Ortamında İncelenmesi. OTEKON 2018.