

Lityum-İyon Pili'nin Farklı Deşarj Hızlarında Termal Davranışının Matematiksel  
Modellenmesi

Burçin ÇETİN

**YÜKSEK LİSANS**

Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı

Eylül 2023

Mathematical Modeling of Thermal Behavior of Lithium-Ion Battery at Different  
Discharge Rates

Burçin ÇETİN

**MASTER OF SCIENCE THESIS**

Department of Chemical Engineering

September 2023

Lityum-İyon Pilinin Farklı Deşarj Hızlarında Termal Davranışının Matematiksel  
Modellenmesi

Burçin ÇETİN

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği Uyarınca

Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı

Temel İşlemler ve Termodinamik Bilim Dalında

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Olarak Hazırlanmıştır.

Danışman: **Prof. Dr. Hakan DEMİRAL**

İkinci Danışman: **Doç. Dr. Uğur MORALI**

Eylül 2023

## ONAY

Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı Temel İşlemler ve Termodinamik Bilim Dalı Yüksek Lisans **Burçin Çetin**'nin YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı "Lityum-İyon Pilinin Farklı Deşarj Hızlarında Termal Davranışının Matematiksel Modellenmesi" başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek oybirliği ile kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. Hakan DEMİRAL

İkinci Danışman : Doç. Dr. Uğur MORALI

### **Yüksek Lisans Tez Savunma Jürisi:**

Üye: Prof. Dr. Hakan DEMİRAL

Üye: Doç. Dr. Belgin KARABACAKOĞLU

Üye: Dr. Öğr. Üye. Yunus Emre ŞİMŞEK

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun ..... tarih ve  
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr.  
Enstitü Müdürü

## ETİK BEYAN

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Prof. Dr. Hakan DEMİRAL ve Doç. Dr. Uğur MORALI danışmanlığında hazırlamış olduğum “Lityum-İyon Pili'nin Farklı Deşarj Hızlarında Termal Davranışının Matematiksel Modellenmesi” başlıklı YÜKSEK LİSANS tezimin özgün bir çalışma olduğunu; tez çalışmamın tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallarına uygun davrandığımı; tezimde verdiğim bilgileri, verileri akademik ve bilimsel ilke ve kurallara uygun olarak elde ettiğimi; tez çalışmamda yararlandığım eserlerin tümüne atıf yaptığımı ve kaynak gösterdiğimi ve bilgi, belge ve sonuçları bilimsel etik ilke ve kurallara göre sunduğumu beyan ederim.  
25/09/2023

Burçin ÇETİN

İmza

## ÖZET

Yapılan deneysel çalışmada ICR 26650 LiCoO<sub>2</sub> pilini farklı deşarj parametrelerinde maksimum pil sıcaklığı ve sıcaklık dağılımı dikkate alınmıştır. Deney tasarım yöntemlerinden biri olan Taguchi deney tasarım yöntemi ile L18 ortogonal dizimi esasına göre yapılmıştır. Bu dizilim ile deneyler tasarlanmış, 18 deney uygulanmış ve deney sonuçları analiz edilerek kararlaştırılan faktörlerin seviyeleri belirlenmiştir. Birbirinden farklı parametreler için C-hızı (2 C-hızı, 3 C-hızı, 4 C-hızı, 5 C-hızı, 6 C-hızı ve 7 C-hızı), ortam sıcaklığı (293 K, 303 K ve 313 K) ve ısı transfer katsayısına (10 Wm<sup>-2</sup> K<sup>-1</sup>, 20 Wm<sup>-2</sup> K<sup>-1</sup>, 30 Wm<sup>-2</sup> K<sup>-1</sup>) karar verilmiştir. ANSYS Fluent programında L18 ortogonal dizimi üzerine simülasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Maksimum pil sıcaklığı için C-hızı faktörü diğer faktörlere göre en etkili olmuştur. En az etkili olan faktör ise ısı transfer katsayısı olmuştur. 6 C-hızı, 293 K ve 30 Wm<sup>-2</sup> K<sup>-1</sup> seviyelerinde maksimum pil sıcaklığının en küçük en iyi olduğu değerler elde edilmiştir. Sıcaklık dağılımı üzerinde ise yine C-hızı faktörü en etkili olmuş, daha sonra ortam sıcaklığı ve en son ısı transfer katsayısı etkili olmuştur. 2 C-hızı, 313 K ve 10 Wm<sup>-2</sup> K<sup>-1</sup> seviyelerinde sıcaklık dağılımının minimum olduğu elde edilmiştir. Elde edilen ANOVA sonuçlarına göre %95 güven aralığı dikkate alındığında Tmax ve ΔTmax ile C-hızı arasında istatistiksel olarak uyumlu bir ilişki olduğu söz konusudur. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar lityum-iyon pillerin termal yönetim sistemlerinin tasarımında kullanılabilir.

**Anahtar Kelimeler:** 26650 Lityum-iyon pil, Taguchi deney tasarım yöntemi, Simülasyon, Maksimum pil sıcaklığı, ANSYS Fluent

## SUMMARY

In the experimental study, the maximum battery temperature and temperature distribution of the ICR 26650 LiCoO<sub>2</sub> battery in different discharge parameters were taken into account. The experiment was carried out according to the L18 orthogonal sequence with the Taguchi experiment design method, which is one of the experimental design methods. Experiments were designed with this sequence, 18 experiments were performed, and the levels of the factors decided by analyzing the experimental results were determined. The C-Rate (2 C-rate, 3 C-Rate, 4 C-Rate, 5 C-Rate, 6 C-Rate and 7 C-Rate), ambient temperature (293 K, 303 K and 313 K) and heat transfer coefficient (10 Wm<sup>-2</sup> K<sup>-1</sup>, 20 Wm<sup>-2</sup> K<sup>-1</sup>, 30 Wm<sup>-2</sup> K<sup>-1</sup>) were decided for different parameters. Simulation studies on L18 orthogonal sequence were carried out in ANSYS Fluent program. The C-Rate factor was the most effective for the maximum battery temperature compared to other factors. The least effective factor was the heat transfer coefficient. 6 C-Rate, 293 K and 30 Wm<sup>-2</sup> K<sup>-1</sup> levels have been obtained at the values where the maximum battery temperature is the smallest and the best. Again, the C-Rate factor was the most effective on the temperature distribution, then the ambient temperature and the last heat transfer coefficient were effective. It was found that the temperature distribution was minimal at the 2 C-Rate, 313 K and 10 Wm<sup>-2</sup> K<sup>-1</sup> levels. According to the obtained ANOVA results, when 95% of the confidence interval is taken into account, it is stated that there is a statistically compatible relationship between T<sub>max</sub> and ΔT<sub>max</sub> and C-rate. The results obtained from this study can be used in the design of thermal management systems of lithium-ion batteries.

**Keywords:** 26650 Lithium-ion battery, Taguchi design method, Simulation, Maximum battery temperature, ANSYS Fluent

## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalışma sürecimde her türlü konuda bilgileriyle bana yol gösteren ve yardımlarını hiç esirgemeyen danışman hocam sayın Prof. Dr. Hakan DEMİRAL'a; lisans ve yüksek lisans boyunca iyi ki öğrencisi olduğum ikinci tez danışman hocam sayın Doç. Dr. Uğur MORALI'ya bana her koşulda zamanını ayırıp, destek olduğu için teşekkürlerimi sunarım.

Bu süreçte bana koşulsuz destek olan ve varlığıyla beni her zaman mutlu, pozitif biri yapan canım anneme, babama ve hayatım boyunca beni destekleyen birbirinden değerli olan iki ablama sonsuz teşekkür ederim. Çalışmamda verdiği desteklerden ötürü bana her zaman güç veren ve her koşulda yanımda olan sevgili Murat SOLAK'a çok teşekkür ederim. Eğitim hayatım boyunca sürekli birlikte olduğum, her zorlukta yanımda olup bana cesaret veren canım dostum Burcu ÇANAK'a çok teşekkür ederim.

**İÇİNDEKİLER**

<b>ÖZET.....</b>	<b>vi</b>
<b>SUMMARY.....</b>	<b>vii</b>
<b>TEŞEKKÜR.....</b>	<b>viii</b>
<b>İÇİNDEKİLER.....</b>	<b>ix</b>
<b>ŞEKİLLER DİZİNİ.....</b>	<b>x</b>
<b>ÇİZELGELER DİZİNİ.....</b>	<b>xi</b>
<b>1. GİRİŞ VE AMAÇ.....</b>	<b>1</b>
<b>2. LİTYUM İYON PİLLER.....</b>	<b>3</b>
2.1 Lityum İyon Pil Çalışma Prensipleri.....	4
<b>3. DENEY TASARIMI.....</b>	<b>7</b>
3.1 Taguchi Metodu.....	9
3.2 Taguchi Ortogonal Diziler.....	10
3.3 Varyans Analizi.....	12
<b>4. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....</b>	<b>13</b>
<b>5. MATERYAL VE YÖNTEM.....</b>	<b>17</b>
5.1 Materyal.....	17
5.2 Metot.....	18
5.2.1. ANSYS Fluent.....	18
5.2.2. NTGK Modeli.....	19
5.2.3. Ağ Yapısının Oluşturulması.....	20
<b>6. BULGULAR VE TARTIŞMA.....</b>	<b>23</b>
6.1 Deneysel ve Simülasyon Sonuçları.....	23
6.2 Ortogonal Diziler.....	24
6.3 ANSYS Fluent İncelemeleri.....	26
6.4 Taguchi Deney Tasarımı Yöntemi.....	31
<b>7. SONUÇ VE ÖNERİLER.....</b>	<b>37</b>
<b>KAYNAKLAR DİZİNİ.....</b>	<b>38</b>

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sekil

### Sayfa

2.1. Lityum iyon pillerinde elektrokimyasal çalışma mekanizması (Linden ve Reddy, 2001)	5
3.1. Bir sistemin ya da sürecin yaygın gösterimi (Montgomery, 2005)	8
5.1. 26650 LiCoO <sub>2</sub> pilinin ANSYS Fluent ile genel görünümü	21
5.2. 26650 LiCoO <sub>2</sub> pilinin ağ görünümü	21
5.3. Element sayısı ile pil sıcaklığı arasındaki ilişki	22
6.1. 1 C-hızı için sıcaklık-zaman grafiği	23
6.2. 1 C-hızı pilin sıcaklık dağılımı	24
6.3. 293 K ortam sıcaklığında pil potansiyelinin zamanla değişimi	26
6.4. 293 K'de C-hızı ve ısı transfer katsayısına göre maksimum pil sıcaklığının değişimi	27
6.5. 303 K ortam sıcaklığında pil potansiyelinin zamanla değişimi	28
6.6. 303 K'de C-hızı ve ısı transfer katsayısına göre maksimum pil sıcaklığının değişimi	28
6.7. 313K ortam sıcaklığında pil potansiyelinin zamanla değişimi	29
6.8. 313 K'de C-hızı ve ısı transfer katsayısına göre maksimum pil sıcaklığının değişimi	30
6.9. 6 C-hızı ve 7 C-hızı için maksimum pil sıcaklığının zamanla değişimi	35
6.10. Sıcaklık dağılımının zamanla değişimi	35

## ÇİZELGELER DİZİNİ

### Cizelge

### Sayfa

5.1. ICR 26650 pilinin özellikleri .....	17
5.2. Pil bölgelerinin özellikleri .....	18
5.3. NTGK modeli için parametreler .....	20
6.1. Taguchi deney tasarımı için belirlenen faktör ve seviyeler .....	24
6.2. L18( $6^1 \times 3^2$ ) ortogonal dizi .....	25
6.3. Tmax ve $\Delta T_{max}$ değerleri .....	31
6.4. Tmax için sinyal/gürültü oranı cevap tablosu .....	32
6.5. Tmax için varyans analizi tablosu .....	33
6.6. $\Delta T_{max}$ için sinyal/gürültü oranı cevap tablosu .....	34
6.7. $\Delta T_{max}$ için varyans analizi tablosu .....	34

## 1. GİRİŞ VE AMAÇ

Gündelik hayatta birçok yerde karşılaşmakta olduğumuz piller, kimyasal enerjiden elektrik enerjisi üreten cihazlardır ve enerjiyi depo eden, taşınabilir bir şekilde olduğu için yararlanıp kullanmamızı sağlayan önemli güç kaynaklarıdır. Gün geçtikçe artmakta olan enerji isteğine rağmen enerjiyi depo ederek oldukça fazla kâr sağlayan piller, kimyasal özelliklerine göre birincil ve ikincil piller olmak üzere iki gruba ayrılmaktadırlar. Sırasıyla bahsedildiğinde birincil piller, şarj edilemeyen piller olarak kabul edilmektedir. Bir diğer ifadeyle içerisindeki kimyasal enerji tükenip bittiği zaman şarj edildiğinde pilin tekrar kullanılmadığını söylemek mümkündür (Kul, 2020).

İkincil (tekrar şarj edilebilen) lityum iyon piller üstüne yapılan araştırmalar özellikle yakın gelecekte elektrikli arabaların taşıma sektöründe gün geçtikçe azalan enerji kaynakları ile depolama ihtiyacının artmasıyla hızlı bir şekilde değer ve önem kazanmaktadır. Lityum iyon piller yüksek enerji yoğunluklarına sahip olmalarıyla ve toksik olmamaları nedeniyle düşük seviyede CO<sub>2</sub> gazı salınımı yaparlar. Böylelikle de yenilebilir enerji kaynaklarını ve çevre duyarlılığına sahip kişiler tarafından tercih edilip cep telefonu, bilgisayarlar ve küçük ev aletlerinde kullanılmaktadır. Yapılan birçok araştırmada ise gelecekte petrol kaynaklarının yeterli miktarda kalmaması nedeniyle sağlanan enerji ile çalışan pek çok araca gerekli (araba, ısıtıcı, vd.) enerjinin depolanıp korunmasında lityum iyon pillerin tercih edileceğini açığa çıkarmıştır (Polat ve Keleş, 2012).

Deney tasarımı metotları, en makul üretim faktörlerini kararlaştırmak için tercih edilen istatistiksel metotlardandır. Bir süreçte girdi kısmında değişiklik yapılarak çıktıların gözlemlenerek incelenmesini sağlamaktadır. Taguchi metodu, mümkün olduğunca az deney sayısı ile sonuca varan deney tasarımı metotlarından biridir. Taguchi seneler boyunca yaptığı çalışmalar sonucunda çok daha az deney ile iyi sonuç veren deney dizileri (ortogonal dizi) geliştirmiştir. Bunun devamında faktör seviyelerini tek tek değişiklik yapmak yerine aynı anda değişiklik yaparak ortogonal dizileri kullanmayı makul görmüştür. Böylelikle kalite maliyetlerinin önüne geçerek ve zamandan kazanarak deneysel tasarımın üretim sektöründe onaylanmıştır(Mercan, 2019).

Bu çalışmada tekrar şarj edilebilen 26650 LiCoO<sub>2</sub> pilini ANSYS Fluent Workbench programı ile simülasyonu yapılmıştır. Yapılan araştırmalar sonucunda pil sıcaklığı ve sıcaklık dağılımını etkileyen performans parametreleri C-hızı, ısı transfer katsayısı ve ortam sıcaklığı olarak belirlenmiştir. Bu parametrelerin pil sıcaklığı ve sıcaklık dağılımı üzerindeki etkileri Taguchi deney tasarım yöntemi kullanılarak istatistiksel olarak incelenmiştir.

## 2. LİTYUM İYON PİLLER

Lityum, en hafif ve en elektropozitif elementtir ve periyodik tabloda üçüncü sırada yer almaktadır. Bu sebeple yüksek enerji yoğunluklu lityum-iyon pillerine destek olurlar (Katiyar vd., 2009). Enerji yoğunluğu yüksek olması aynı zamanda diğer pillere göre avantaj sağlamaktadır. Bunun beraberinde öteki pillerle karşılaştırıldığında daha uzun ömürlü olduğu, aynı hacim ya da ağırlıkta enerji depolama kabiliyeti daha yüksek olduğu ve kolay bir şekilde bakım gerektirdiği bilinmektedir. Lityum iyon pilleri günlük hayatta cep telefonlarında, tablet veya dizüstü bilgisayar hatta küçük ev aletlerinde de kullanıldığı sık sık görülmektedir. Elektrikli arabalarda ve helikopterlerde kullanılabilir olmasının nedeni mevcut yapılarından dolayı fiziksel olarak daha dayanıklı olmasından kaynaklanmaktadır. Bu avantajların haricinde yüksek sıcaklıklarda bozunmaları gibi dezavantajları da olmaktadır (Kul, 2020). Aşağıda tekrar şarj edilebilir Lityum iyon pillerin avantaj ve dezavantajları belli başlı maddelerle sıralanmaktadır (Linden ve Reddy, 2002).

### Avantajlar

- Kapalı hücre, onarım ihtiyacı olmaması
- Uzun ömürlü
- Geniş ve rahat çalışma sıcaklık aralığı
- Uzun raf ömrü
- Hızlı şarj edilebilmesi
- Yüksek kuvvetli deşarj kapasitesi
- Yüksek enerji randımanı
- Yüksek spesifik enerji ve enerji yoğunluğu
- Hafıza etkisinin olmayışı

### Dezavantajlar

- Maliyeti
- Yüksek sıcaklıklarda bozunabilmesi
- Koruyucu devre gereksinimi olması
- Aşırı şarj sonucunda kapasite kaybı ya da termal bozunma

## 2.1. Lityum İyon Pil Çalışma Prensibi

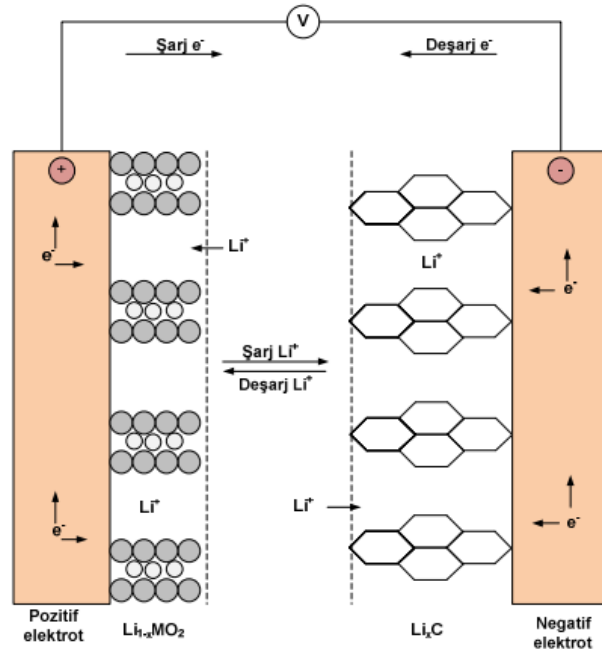
Tekrar şarj edilebilen lityum iyon pillerde hücreler enerji üretip ve depolamaktan sorumlu üç ana bileşenden meydana gelmiştir. Sırasıyla; pozitif elektrot (katot), negatif elektrot (anot) ve son olarak elektrolitten oluşmaktadır (Nazri ve Pistoia, 2008).

Lityum iyon pillerin çalışma mekanizmasının mantığı lityum iyonlarının kendine ev sahipliği yaptığı lityuma var olan elektrotların yapısına katılıp ve ayrışması ile oluşan prosestir. Lityum iyonlar şarj ve deşarj çevrimi süresi boyunca pozitif elektrot ve negatif elektrot arasında gerçekleşen hareketlere dayalı olarak bu proses yer değiştirme ya da topotaktik reaksiyon olarak da nitelenmektedir (Linden ve Reddy, 2001).

Bir lityum iyon hücre şarj edildiği zaman pozitif elektrotun oksitlendiği, negatif elektrotun da indirgendiği görülür. Prosesin aşamasında lityum iyonları pozitif elektrodun yapısından ayrıldığı görülmüş ve negatif elektrodun yapısına doğru girdiği belirlenmiştir. Bir başka proses olan deşarj aşamasında da bu işlemin aksi yönünde gerçekleşir. Lityum iyon pillerindeki şarj ve deşarj süreci aşağıda denklem 2.1 ve denklem 2.2’de gösterilen reaksiyonlar ile gerçekleşmektedir.



$\text{LiCoO}_2$  metal oksit olarak pozitif elektrot malzemesidir. Negatif elektrot olarak C ise grafitte benzeyen karbonlu bir malzemedir. Şekil 2.1’de lityum iyon pillerinde elektrokimyasal çalışma mekanizması şematize edilmiştir.



Şekil 2.1. Lityum iyon pillerinde elektrokimyasal çalışma mekanizması (Linden ve Reddy, 2001)

Tekrar şarj edilebilir lityum iyon pillerde verimi bulmak için kapasiteden yararlanılır. Hücrede aktif olduğu malzeme miktarı ile belirlenmiş kapasite tamamen şarj edilmiş bir pilden belirlenen deşarj koşulları içerisinde temin edilen toplam amper saat (Ah) ile tanımlanmaktadır. Ticari anlamda bir lityum pilden beklenen sadece güvenli olması değil hatta ömrünün uzun olması da değildir. Aynı zamanda yüksek kapasitelerde de işe yaraması istenmektedir (Polat ve Keleş, 2012).

C-hızı, bir hücrede maksimum kapasite miktarına göre şarj ya da deşarj olma hızının bir değeridir. Başka bir deyişle hücrenin 1 C-hızı oranında bir saatte, 2 C oranında 30 dakikada komple şarj ya da deşarj olduğu anlamı çıkarılmaktadır. C-hızı denklem 2.3'te verilmiştir. Burada gösterilen  $I$ ; şarj veya deşarj akımıdır. Bataryanın kapasitesi ise  $C_{\text{kapasite}}$  şeklinde ifade edilmiştir (Navgasın, 2022).

$$C_{\text{hızı}}(h^{-1}) = \frac{I (A)}{C_{\text{kapasite}} (Ah)} \quad (2.3)$$

Lityum iyon bataryalar için onaylanmış çalışma sıcaklığı aralığı  $-20^{\circ}\text{C}$  ile  $60^{\circ}\text{C}$  arasında olduğu bilinmektedir. Optimum performansını sürdürmek için  $15^{\circ}\text{C}$  ile  $30^{\circ}\text{C}$  arasında dar bir sıcaklık aralığı önerilmektedir (Tie ve Tan, 2013). Hücreler arası rastgele dağılmış sıcaklık haricinde bir hücre içerisindeki sıcaklık dengesizliği de dikkate değer bir husustur. Lityum-iyon hücresi içindeki ısı üretme oranı her durumda aynı değildir çünkü elektrokimyasal reaksiyonların büyük bir çoğunluğu elektrotlarda gerçekleşmektedir. Bir  $\text{LiCoO}_2$ 'in pozitif elektrot tarafının komple bataryanın dört katı derecede ısı ürettiği açıkça belirtilmektedir (Huang vd., 2006). Böylelikle hücrede sıcaklık artışı belirgin veya düzgün olmamaktadır. Bu husus tüm hücrede performans olarak negatif bir etki yaratıp bataryanın dejenere olmasına sebep olmaktadır.

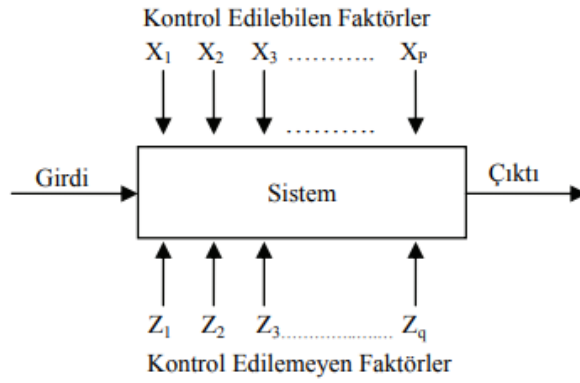
Özetlenecek olursa batarya paketinde hücrelerdeki sıcaklık eşitsizliği genel performans açısından bakıldığında olumsuz sonuçlar doğurmaktadır. Bu yüzden lityum-iyon bataryanın ısıl davranışını ve deşarj sırasında ısıl performansını irdeleyip bu konu üzerinde durmak çok daha önemli bir duruma gelmektedir. Bataryadaki istenilen çalışma aralığındaki düzensiz dağılımın ve sıcaklıkla beraber performansı etkilemektedir. Bununla birlikte sıcaklık düzeltilemez bir halde artışı mal ve can kaybına yol açmaktadır (Thakur vd., 2020).

### 3. DENEY TASARIMI

Deney, hipotezleştirilmiş bir fikri desteklemek ya da aksini iddia etmek veya ürün, proses ile ilgili güncel bilgileri meydana getirmek için yapılan plan ve programla inceleme metodu şeklinde ifade edilmektedir. Deneyle ilgili amaçlarından başka biri de geleceğe yönelik yanıtları önceden düşünüp tahminde bulunabilmek için ortaya matematiksel modelleme sunmaktır. Deneyi hazırlarken araştırmacının karşı karşıya gelebileceği sıkıntılar olarak bu model için en gerçek ve güvenilir sonuçlara ulaşabilirliğini doğrulamak üzere en olası birçok bilgiyi öğrenip gözlem sayısını da en aza indirmeyi hedefleyip belirlemektir. Gözlemler doğal olarak gözlemsel çıkarımlardan elde edilebildiği gibi sebep ve etki değişkenlerinin neticesinde ortaya koyabilecek deneylerden de erişilebilmektedir (Mitra, 1993).

Deney tasarımı, istatistik biliminde atası görülmüş İngiliz istatistikçi Sir Donald Fisher tarafından 1920'lerde tarım ile ilgili araştırmalar yaparken Deney Tasarımını bulmuştur. Tarım sektörünü büyütmek adına Amerika'da hemen uygulamaya geçilip yaygın bir şekilde kullanıma geçilmiştir. Tarım alanında kullanılan çeşitli gübreler ve dozların iklim şartları veya sulama dozajları gibi faktörlerin ürünler üzerindeki etkileri bu yöntem ile Amerika'nın bu alanda dünya sıralamasında birinci sırada yer almasını sağlamıştır.

Deney tasarımı sürecinde incelenmekte olan kalite karakteristiğine katkı sağlayan kontrol edilebilir değişkenlerin değerlerini sistematik bir düzende değiştirilerek süreç performansını etkiye uğratarak değişken değerlerini tanımlarken kullanılabilen bir yöntemdir (Montgomery, 2005). Deney tasarımında bir süreçte girdi değişkenlerinin istenildiği takdirde değişikliklerin yapılması üzerine cevap değişkeninde oluşan değişikliklerin gözlemlenmesi, elde edinilmesi gibi ve açıklanması olarak da ifade edilebilir (Besterfield vd., 1995). Bir deney tasarımında ulaşılmak istenilen sorunun sonucundan veya deneyin izleneceği yollardan bununla birlikte uygulanılacak analiz yöntemlerinden belirlenmesi gerekmektedir. Aynı zamanda incelenecek girdi ve çıktı değişkenlerinden ve düzeylerinden de bahsetmek gereklidir (Gürsakar, 2005).



Şekil 3.1. Bir sistemin ya da sürecin yaygın gösterimi (Montgomery, 2005)

Deneysel sistemin ya da sürecin ilerleyen aşamasında performansını ölçmede de işe yararmaktadır. Şekil 3.1'de bir sürecin yaygın gösterimi belirtilmiştir. Deneğin yapıldığı aşamada, deneyde kullanılacak parametreler; makine, donatım, yöntem, ekipmanlar ve insan kaynakları gibi farklı girdi türleri olabilmektedir. Kullanıcı tarafından şahsen kontrol edilebilen parametrelere örnek verilecek olursa karışım oranları, kullanılacak malzemelerin çeşitleri ve sıcaklık farklılıkları gibi parametreler deneye etki eder. Kontrol edilemeyen parametreler ise deneye etki eden diğer yöntemlerdir. Kullanıcının araya giremediği, karışamadığı çevre sıcaklığı olsun nem oranı veya sıcaklık değişimi dahi daha akla gelmeyen birden fazla sebepler görülmektedir. Kontrol edilemeyen parametreleri önceden düşünülüp hesaba katılarak bir deney tasarımı için mutlaka göz önünde tutulmalıdır (Gökçe ve Taşgetiren, 2009).

Deneysel hataları en aza indirmeyi amaç edinen istatistiksel olarak deney tasarımı metodları; tam faktöriyel, kesirli faktöriyel ve Taguchi metodu olarak üç grupta incelenmiştir (Gökçe ve Taşgetiren, 2009). Bu çalışmada Taguchi metodu kullanıldığından ötürü ilerleyen aşamada bu yöntem hakkında bilgi verilmiştir. Deney tasarımında kullanmakta olunan çoğu terimlerin burada açıklanması uygun olacaktır;

**Kalite Değişkeni (Yanıt Değişkeni) :** Deneyde ölçülmesi kararlaştırılan netice ya da çıktıdır. Y veya y harf ile gösterilmektedir.

**Faktör:** Deney kapsamında yanıt değişkenleri üzerinde etkisi olduğu farz edip düşünülen, inceleyen tarafından karar verilip kontrol edilebilen değişkenlerin her biri olup,

büyük harfler ile simgelenmektedir (A, B gibi). Faktörler nicel ve nitel kavramlar olabilmektedir. Nicel kavrama örnek verilecek olursa hız, sıcaklık ve basınç gibi sürekli büyüklüklerdir. Nitel kavramlar ise bir malzemenin cinsi veya bir cihazın türü gibi kesikli kavramlardan bahsedilebilir.

**Seviye :** Faktörlerin deneyde olması düşünülen değerlerinin karşılığı olabilecek her biridir. Deneyler duruma göre 2, 3 veya 4 seviyeli olabileceği gibi daha fazla da olabilir.

**Hata:** Aynı faktör kombinasyonlarda tekrarlanması vaziyetinde kalite değişkeninde gözükken sapmadır. Gösterimi “ $\epsilon$ ” şeklindedir.

**Gürültü:** Bir deneyde kontrol edilemeyen veya kontrol edilebilmesi zor gözükken ama kalite değişkeni üzerinde etkisi olan değişkenlere gürültü adı verilmektedir. Örneğin; ortamın nemi, ortamın sıcaklığı veya bir sistemdeki iletkenlerin direnci mühendislik alanında çok sık rastlanılan gürültü faktörleridir.

**Etki:** Bir faktörün kalite değişkeninde değişiklik yapabilme kabiliyetinin büyüklüğüdür (Erbaş ve Olmuş, 2006).

### 3.1. Taguchi Metodu

Taguchi metodunun amacı proses ve ürüne ait parametrelerin optimum seviyesini saptayarak çıktı değerleri için varyasyonu minimum değere indirgemeyi hedeflemiştir. Dr. Genichi Taguchi tarafından kalitenin sürekliliğinin sağlanabilmesi ürüne ve prosese ait parametrelerin iyileştirilmesi için gelişip ilerletilmiş bir yöntemdir. Kontrol edilemeyen faktörlere karşı kontrol edilebilen faktör düzeylerini, proses ve ürün için değişebilmesine neden olan bu metod optimize etmektedir. Bu nedenle ürün ve prosesdeki değişkenliği en aza indirgemeye faydalı olur.

Taguchi deneysel tasarım metodu amacına erişmek için yapılması icap eden deney sayısını azaltırken bir yandan da çalışmak için gereken zamanı ve gayreti de en aza indirerek çok tercih edilmiş bir yöntem olmuştur. Taguchi kaliteyi iyileştirmek için ürünün üretim aşamasından müşteriye teslim edilmeye kadarki sürede meydana gelmekte olan hatalar kalite kayıpları üzerinde durmuştur. Kusurlu veya hatalı ürün ve zedelenen güvenirliliğin müşterilerde yarattığı etkilerden dolayı oluşan kayıplar, pazar payının düşmesi ile üretim

yapan kişilerin yaşadığı kayıplar kalite kayıpları içerisinde değerlendirilmiştir. Böylelikle kayıp fonksiyonları ve bunların sürece etkileri şeklinde de ifade edilmektedir (Öktem, 2012).

Deney tasarımı yapılırken faktörleri ve seviyeleri doğru belirlemek adına incelenmiş ürünle ilgili çok yönden geniş bir bilgi sahibi olunması gerekmektedir. Taguchi'nin önemli olarak gördüğü başka bir konu ise seçilen faktörlerin incelenen çıktı üzerinde etkilerini tarif ederken konuyla ilgili herkesten çözüm üreten, parlak fikirler veya öneriler olarak bu konu üstünde tartışılmasıdır. Taguchi deney dizaynı gerçekleştirilirken;

- Kontrol edilebilecek faktör sayısı
- Kararlaştırılan tüm faktörler için seviye sayıları
- Yapılacak deneylerin tekrar sayısı
- Maliyeti, süresi, üretebilme gibi başka faktörler de göz önüne alınmalıdır (Şirvancı, 1997).

### 3.2. Taguchi Ortogonal Diziler

Taguchi metodunda ürün ve üretim sistemlerine ilişkin parametrelerin ve toleransların tasarımı, ortogonal dizilerden yararlanılarak oluşturulan deneylerin tasarımını ve sistemlerini ölçüp yorumlamak için kullanılan tüm metotları içermektedir. Eş zamanlı olarak kalite kayıp fonksiyonu, çevrimiçi ve çevrimdışı kalite kontrol olgularını da analiz edip inceleyen uygulamaları içermektedir (Taptık ve Keleş, 1998).

2k faktörlü bir deneysel tasarımında istenilen tam faktöriyel tasarım ise  $2^k$  sayısı kadar deney yapılması gerekir. Taguchi yönteminde eş zamanlı olarak birkaç faktörün basamakları değiştirilerek bu deneme sayısında azalma görülebilir. Örnek ile gösterildiğinde 2 seviyeli 7 faktör için tam faktöriyel tasarım gereği normalde 128 deney yapılması gerekmektedir. Oysa ki Taguchi bu deney sayısını 8'e düşürerek zaman ve maliyet açısından önemli derecede kazanç elde edilmektedir (Kamber, 2008).

Ortogonal dizilimler L harfinin yanına deney sayısı ilave edilerek gösterilmektedir. En sık kullanılan ortogonal dizilim ve seviyeleri şöyle belirtilmiştir:

- 2 seviyeli: L4, L8, L12, L16, L32, L64
- 3 seviyeli: L9, L18, L27
- 4 seviyeli: L16 ve L32 (Simpson, 1996).

Ortogonal deney tasarımını çok sayıdaki faktörü daha az sayıda kullanarak ve seviyelerini beraberinde aynı anda değiştirebilmek bu tasarımın en büyük avantajlarından biridir (Serencam ve Uçurum, 2019). Bu teknik sayesinde oluşan verileri sinyal/gürültü (S/N) oranına çevirir. S/N oranının kullanıldığı deneyin özelliğine bağlı olarak üç çeşidi vardır. Bunlar en büyük en iyi, en küçük en iyi, nominal en iyi şeklinde sıralanmaktadır (Yılmaz vd., 2019; Bayrak vd., 2015). Özellikle bu çalışmada en küçük en iyi yaklaşımı kullanılmıştır.

- 1) En büyük - en iyi: Kalite değişkeninin değerinin büyümesi durumunda problemler bu çeşit yaklaşımla incelenir. Kalite değişkenine bakıldığında bir üst limit olmadan değer büyüdükçe tasarımı iyileştirip, düzelmesidir.
- 2) En küçük - en iyi : Kalite değişkeninin değerinin küçük olmasının tercih edilmesi durumunda problemler bu çeşit yaklaşımda bulunulur. Değer küçüldükçe kalite değişkeninde bir alt limit olmamakla beraber bu teknik iyileşmektedir.
- 3) Nominal – en iyi: Sapma göstergelerin çift akışlı olarak değişebildiği genişliği, ölçüsü gibi nitelikler kalite değişkeni içeren sorunlarda kullanılmaktadır. Bu durumda kalite değişkeninin değerinin en başta kararlaştırılıp nominal değere yakın olması beklenmektedir (Öztop, 2007).

### 3.3. Varyans Analizi

Taguchi analizi yapıldıktan sonra ham verilerden yararlanılarak varyans analizi (ANOVA) yapılır. Buradaki hedef parametrelerin etkinliklerinin derecesini, performans kriterine en fazla etki eden parametreyi tayin etmektir. Fisher testi (F değeri) ve olasılık (P değeri) parametrenin önemini ve istatistiksel olarak elverişli oluşunu belirler. F değerinin etkin olabilmesi için hesaplanan F değerinin okunan F değerinden büyük olması gerekmektedir. Bu F değerinin büyüklüğü ise seçilen parametrenin performans karakteristiği üzerinde daha fazla bir etki yaptığını ispat etmektedir (Daneshvar vd., 2007; Bilici 2012).

Bir başka ANOVA sonucu olan olasılık değeri ya da P değeri de her bir faktörün değer seviyesinin saptamasında kullanılabilir. Eğer P değeri düşükse o faktörün deney çıktıları üzerinde yüksek olasılık değeri ile beraber etki yarattığını ifade etmektedir. Kısacası P değeri düşük çıkarsa o faktörün deney çıktıları üzerinde bir etkiye hakim olup olmadığının ve hakimse de ne derecede bir etkiye hakim olduğunu belirtmektedir (Qasim vd., 2015; Kacan, 2016).

#### 4. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Kök ve Alkaya bu çalışmada hibrit elektrikli araçlarda (HEV) ve elektrikli araçlarda kullanılan kese tipi lityum iyon pillerin termal davranışı ve performansını sayısal simülasyonlara dayanarak farklı deşarj oranlarında kıyaslamışlardır. Sayısal simülasyonda termal performansını incelemek ve pilin deşarj davranışını analiz etmek için çift potansiyel çok ölçekli çok boyutlu (MSMD) pil modelini tercih etmişlerdir. Batarya yükünün arttığında homojen olmayan termal dağılımının ve sıcaklığın arttığını gözlemlemişlerdir. Böylelikle düzgün olmayan sıcaklık dağılımını ortadan kaldırmak için çalışmalarını soğutma sistemine gereksinim duyarak devam ettirmişlerdir (Kök ve Alkaya, 2020).

Paccha-Herrera vd. LiCoO<sub>2</sub> 26650 lityum iyon pil kullanarak termal modelleme ve elektrotermal olayları analiz etmişlerdir. Sayısal yöntem olarak; termal toplu model, üç boyutlu hesaplamalı akışkanlar dinamiği modeli ve Newman, Tiedemann, Gu ve Kim (NTGK) elektrokimyasal modeli kullanmışlardır. Son iki yöntemi ANSYS Fluent programı kullanılarak simülasyonları sabit akım deşarjında ve bir otoyol sürüş döngüsü altında pil yüzey sıcaklığını deneysel ölçümlerle doğrulamışlardır. Bu üç modelin de gerçek sıcaklık ölçümleriyle tutarlı olduğunu gözlemlemişlerdir. Elektrokimyasal yöntem 0,5 C-hızında daha düşük hata verirken maksimum sıcaklık artışı (18,1°C) olduğu, 1,5 C-hızında ise daha yüksek hatayı (1,3°C) verdiği sonucu çıkarılmıştır. Bu çalışma çok çeşitli pil çalışma koşullarını simüle etmek için uygun olduğu görülmüştür (Paccha-Herrera vd., 2020).

Alston vd. yaptıkları bu çalışmada elektrikli bir feribota güç sağlamak için tasarlanmış bir lityum iyon pil modelinin termal modellemesini amaç edinmişlerdir. Pil enerji depolama sistemlerini 13 dk'da şarj ederek bu pilin 3,45 C-hızında aşırı ısı üretmesiyle ilgili bir termal sorun yaşamışlardır. Bu sorunu hafifletmek için pili uygulanan çeşitli soğutma yöntemleri olarak ANSYS Fluent programı kullanılarak analiz etmişlerdir. Bu analizin sonucunda bir hava soğutma sistemi kullanılarak bataryanın sıcaklığının optimum aralıkta tutulabileceğini ortaya koymuşlardır (Alston vd., 2018).

Miao vd. lityum iyon pillerin temel bileşenlerini karşılaştırmış ve pil yönetim sistemlerini, genel pil verimliliğini, kapasitesini ve ömrünü iyileştirmeye yönelik yaklaşımları incelemiştir. Malzeme ve termal özellikler, pil performansı için kritik olduğunu vurgulamışlardır. Yüksek enerji yoğunluklu piller üzerine güncel araştırmalar, pilleri yeniden kullanma ve geri dönüştürme fırsatları hakkında bir çalışma yapacaklarını söylemişlerdir (Miao vd., 2019).

Moralı yaptığı bu çalışmada matematiksel modelleme ve istatistiksel analizi birleştirerek 26650 lityum iyon pilin çok ölçekli çok boyutlu pil sıcaklığı davranışını sunmuştur. Maksimum pil sıcaklığı ve maksimum pil sıcaklık farkı üzerindeki deşarj akımı hızı, ısı transfer katsayısı ve ortam sıcaklığı karmaşık etkilerini görmek için termal model kullanılmıştır. Deşarj akım hızının en etkili faktör olduğu, ikinci en etkili faktör ise ortam sıcaklığı olduğu belirtilmiştir. Batarya sıcaklık artışını ölçmek ve farklı şarj/deşarj parametreleriyle ilişkilendirmek için daha istatistiksel yöntemler gerektiği yaklaşımında bulunmuştur (Moralı, 2022).

Uysal, lityum iyon piller ile çalışmalar gerçekleştirmiştir. Batarya paketleri içerisinde silindirik ve prizmatik lityum iyon piller olmak üzere iki farklı pil kimyasının batarya paketleri içerisindeki davranışları araştırılmıştır. Pillerin analizini ANSYS Fluent program ile gerçekleştirmiş sonrasında deneyler yapılarak pillerin performansları ve termal sonuçları incelenmiştir. Analiz sonuçları ile deney sonuçları karşılaştırılmış ve çalışmaların birbiri ile olan uyumluluğu ortaya koyulmuştur (Uysal, 2022).

Gaznevi ve Chen bu çalışmada lityum-kükürt (Li-S) pilinin matematiksel modelinin duyarlılık analizi ile bu modelin belirli bir süre içerisinde parametrelerin verdiği tepkiler araştırılmış olup katot ve deşarj akımının elektronik iletkenliğine etkileri incelenmiştir. Pili aktive etmek için minimum iletkenlik gerektiği açığa çıkmıştır. Bu makale deşarj gerilimi platolarına karşın farklı deney sonuçlarıyla elektrokimyasal yönlerini değerlendirmiştir bunun dışında kapasite performansı açısından önemli bir gelişme gözlemlenmemiştir (Gaznevi ve Chen, 2014).

Ramadass vd. lityum iyon hücreler için yarı ampirik bir yaklaşım seçerek kapasite azalması için iki farklı yaklaşımla bir model geliştirmişlerdir. Bunlardan ilki sadece aktif malzeme kaybını hesabını katarak film direncinin döngüsüyle değişimler için korelasyonlar kullanılmıştır. İkinci diğer yaklaşım ise oran kapasite kayıplarını ele alıp aynı amaç için kullanılmıştır. Sonuç olarak aktif malzeme kaybının sebebini sınırlayıcı elektrotun şarj durumu (SOC) açıklamış olmaktadır. Döngü sırasında da hız kapasite kayıplarını dikkate alındığında sebebi sınırlayıcı elektrodun difüzyon katsayısı olan parametre olduğu belirlenmiştir (Ramadass vd., 2003).

Barua vd. lityum iyon pilini çift potansiyel çok ölçekli çok boyutlu (MSMD) pil modellerini kullanıp piller üzerindeki elektrokimyasal davranışlarını ve değişim gösteren ortam sıcaklarının ulaşabileceği en yüksek sıcaklık değeri amaçlanmıştır. Lityum iyon pilinin sık kullanılan iki eş değer devre modeli ve NTGK modeli üzerinden doğal konveksiyona bağlı olmak üzere maksimum sıcaklık artış eğilimi için çeşitli C hız oranlarına ve çevre sıcaklıklarından dikkate alınmadan radyasyona bağlı maksimum sıcaklık artış eğiliminden daha büyük olduğu belirlenmiştir. NTGK modeli, ortam sıcaklığında ve ısı transferinin radyasyon etkisi için gelecek çalışmalar için öncü etkisi yaratmıştır (Barua vd., 2023).

Verma ve Rakshit bu çalışmada Lityum iyon pilini Newman, Tiedemann, Gu ve Kim (NTGK) yarı ampirik elektrokimyasal modelini zorlu ortam koşullarında pil simülasyonlarındaki gözenekli elektrot teorisi ve sıvı soğutma sisteminin sonuçlarını göstermişlerdir. Simülasyonları hızlandırmak sebebiyle azaltılmış dereceli model (ROM) ya da model sıralarını azaltma (MOR) tekniği tercih edilmiştir. Parametreler olarak ısı performans, ortam sıcaklığı ve sıvı türü ile birlikte sıvının hızı belirlenmiştir (Verma ve Rakshit, 2023).

Abbas vd. yaptıkları bu çalışmada lityum pilini kullanarak üç boyutlu modelleme yaklaşımı ile ANSYS Fluent yazılımı yardımıyla da bir pil için sıcaklığının değişimi incelenmiştir. Daha sonra birkaç pilden oluşan bir modüle genişletilip her türlü bu iki durumda da deşarj akımı arttığında sıcaklığın arttığı görülmüştür. Modülün içine farklı giriş hızlarında soğutma hava sistemi eklenmiş olup hızın artışıyla sıcaklığın düştüğü tespit edilmiştir (Abbas vd., 2022).

Srivastava vd. lityum iyon pillerin hücrelerinin yüzey sıcaklığını farklı şarj oranlarında ve güvenli çalışma sıcaklığı için deneysel ve sayısal bir çalışma yapılmıştır. Eikosan, Parafin mumu ve Kaprik asit olmak üzere üç farklı faz değişim malzemesi (PCM) kullanılmıştır ve çevrenin daha yüksek sıcaklıklarda önemli bir etkisi olup hücreye zarar verdiği tespit edilmiştir. Bu PCM'lerin kullanımı lityum iyon pillerin hücreye yüzey sıcaklıklarını düşürdüğü için kullanımı önerilmemiştir (Srivastava vd., 2022).

Chaudhary ve Majumder lityum iyon pil hücrelerinin sayısal analizi yapılarak faz değiştirmekte olup malzemenin termo-fiziksel özellikleri ile ısı transfer sürecini anlamak amacıyla akım yoğunluğunun dışında sıcaklıktaki değişimleri incelemişlerdir. Bununla birlikte PCM'li ve PCM'siz farklı deşarj hızlarında bataryadaki son sıcaklık artışını da anlamak için bu alana da yönelmişlerdir. Sonuç olarak bu çalışmada lityum iyon pilinin sıcaklık karakteristiği hakkında verimli termal yönetimi için olumlu bir gelişme yaratmıştır (Chaudhary ve Majumder, 2021).

Patil vd. bu çalışmada dielektrik sıvıya daldırılmalı soğutma (DFIC) teknolojisinden yararlanıp elektrikli araçlar için Li-iyon batarya ve batarya paketinin doğrudan soğutma performans özellikleri üzerine araştırma yapmıştır. Li-iyon kese hücrelerinin şerit soğutmayla desteklenmiş olup akan dielektrik sıvıya batırılmıştır ve doğal konveksiyona rağmen pozitif kısım maksimum sıcaklıkta 3C deşarj hızında %46,8 azalma gösterip daha iyi soğutma performansı göstermiştir. Newman, Tiedemann, Gu ve Kim (NTGK) modeli ile Çok Ölçekli Çok Boyutlu (MSMD) yaklaşımı da tercih edilmiştir. Sonuç olarak elektrikli araçlarda yüksek yoğunluklu ve yüksek kapasiteli lityum iyon pil uygulaması güvenli bulunmuştur. Termal yönetim teknolojisi olarak sekme soğutmayla desteklenen DFIC'yi kanıtlamıştır (Patil vd., 2021).

## 5. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada ICR 26650 LiCoO<sub>2</sub> pili kullanılmıştır. Analizler için ANSYS FLUENT 2023 R2 öğrenci versiyonundan yararlanılmıştır. Paket yazılım programında 3D modellenen ANSYS FLUENT yazılımı sayesinde pildeki maksimum pil sıcaklığı ve sıcaklık dağılımı için farklı parametreler sayısal yöntem kullanılarak analiz edilmiştir.

### 5.1. Materyal

Çalışmada kullanılan LiCoO<sub>2</sub> pil; 26 mm'lik çapa ve 65 mm'lik ise bir boya sahiptir. Sondaki 0 ise pilin biçimini simgeler yani 26650 pil modelinin silindir şeklinde bir pil olduğunu göstermektedir. Kullanılan pilin özelliklerine göre normal kapasitesi 4 Ah ve 3,7 V olmaktadır. Katot tarafı alüminyum, anot tarafı ise çelik seçilmiştir. Bir ICR 26650 pil özellikleri Çizelge 5.1'de verilmiştir. Pil bölgelerinin özellikleri ise Çizelge 5.2'de gösterilmiştir.

Çizelge 5.1. ICR 26650 pilinin özellikleri

Özellikler	Değer
Çap	26 mm
Yükseklik	65 mm
Kütle	0,008 kg
Katot	LiCoO <sub>2</sub>
Anot	Grafit
Nominal Kapasite	4 Ah
Test Edilen Kapasite	4,3 Ah
Nominal Gerilim	3,7 Ah
Gerilim Kesme	2,75 Ah
Şarj Limit	4,2 V
Maksimum Şarj Akımı	1 C
Maksimum Deşarj Akımı	2 C

Çizelge 5.2. Pil bölgelerinin özellikleri

Özellik	Aktif Bölge	Katot (Alüminyum)	Anot (çelik)
Yoğunluk ( $\text{kg m}^{-3}$ )	2226	2719	8030
Özgül Isı ( $\text{Jkg}^{-1} \text{K}^{-1}$ )	1197	871	502,48
Termal İletkenlik ( $\text{Wm}^{-1} \text{K}^{-1}$ )	27	202,4	16,27
Elektrik İletkenliği ( $\text{Sm}^{-1}$ )	0	$3,541 \times 10^7$	$8,33 \times 10^6$

## 5.2. Metot

### 5.2.1. ANSYS Fluent

ANSYS Fluent programı geometri oluşumundan elde edilen verilerin analizine dek modelleme işleminin bütününi içermektedir. Sorunu hızlı ve kolay bir şekilde çözmektedir. Sorunlara en elverişli çözücü tipini seçerek akış davranışını önceden tahmin etmektedir. Böylelikle tasarım için gereken bilgileri vermiş olmaktadır. Fluent programı, analizciler, akışkan akımı ile uğraşanlar, tasarımcılar gibi veya mühendisler için bolca fazla alanda kullanılmakta ve yarar sağladığı görülmüştür. Günümüzde ise teknolojideki gelişmelerden ötürü bilgisayar donanım alanında oldukça hızlı ve yüksek kapasitede bilgisayarlar üretilip kullanılabilir. Gelişmiş hızlı donanıma sahip bilgisayarlarda bile bazen programlarda zaman açısından yavaş, çözümlenelerde ise yetersiz, eksik olduğu olabilmektedir.

Fluent programı sayesinde sonuçlar bambaşka şekillerde görselleştirilerek aktarılmaktadır. Bu görsellerle renkli diyagramlarla birlikte çeşitli canlandırmalar da yapılabilmektedir. Bir problem olduğunda çözümü basınç, hız, yoğunluk hatta istenildiği takdirde türbülans etkileri, viskozite, ısı transferi, karışım oranları gibi pek çok fiziksel büyüklüğe sahip kullanıcıya sunulabilmektedir (Sevindir, 2007).

### 5.2.2. NTGK Modeli

NTGK modeli, Newman, Tiedemann, Gu ve Kim tarafından geliştirilen basit bir deneysel elektrokimyasal modeldir. Kwon tarafından önerilip başkaları tarafından kullanılmıştır. Model formülasyonunda, hacimsel akım transfer hızını potansiyel alanla ilişkilendirilen cebirsel denklem 5.1’de aşağıda gösterilmiştir:

$$j_{Ech} = \frac{Q_{nominal}}{Q_{ref}V_{ol}} Y [U - V] \quad (5.1)$$

Burada  $V_{ol}$ , tek bir pilin aktif bölgesinin hacmini belirtir.  $V$ , doğrudan devre ağı çözüm yönteminden elde edilen veya çok ölçekli çok boyutlu (MSMD) çözüm yönteminden  $\varphi_+$  ve  $\varphi_-$  olarak hesaplanan pil hücresi voltajıdır.  $Q_{nominal}$  amper saat cinsinden pilin toplam elektrik kapasitesidir ve  $Q_{ref}$ ,  $Y$  ve  $U$  model parametrelerini elde etmek için deneylerde kullanılan pil kapasitesidir.  $Y$  ve  $U$ , batarya deşarj derinliğinin (DoD) işlevleridir.

$$DoD = \frac{V_{ol}}{3600Q_{nominal}} \int_0^t j dt \quad (5.2)$$

Belirli bir pil için voltaj-akım tepki eğrisi deney yoluyla elde edilebilir. O zaman denklem 5.3 ve denklem 5.4’teki  $Y$  ve  $U$  teorik olarak yazılabilir.  $Y$  ve  $U$  işlevlerini belirtmek için iki yaklaşım vardır.  $Y$  ve  $U$  simülasyonlardan önce açıkça DoD ve sıcaklığın fonksiyonları olarak test verilerinden bulunabilir.  $Y/U$  ve DoD/sıcaklık arasındaki ilişki şu şekilde sağlanabilir:

Önerildiği gibi fonksiyon formları aracılığıyla;

$$U = (\sum_{n=0}^5 a_n DoD^n) - C_2(T - T_{ref}) \quad (5.3)$$

$$Y = (\sum_{n=0}^5 b_n (DoD)^n) \exp \left[ -C_1 \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right) \right] \quad (5.4)$$

Burada  $C_1$  ve  $C_2$ , bataryaya özgü NTGK model sabitleridir (Kwon vd., 2006). Ham test verilerinden gelen akım ve gerilim ilişkisi saklanır ve simülasyon sırasında Y ve U anında hesaplanır. Model parametreleri pile özeldir.  $Q_{ref}$  kapasiteli test edilmiş bir pilin Y ve U parametrelerini, pilin malzemesi aynı olduğu sürece farklı  $Q_{nominal}$  kapasiteli bir pil için kullanabilmektedir. Model parametreleri, simüle edilen benzer pilden geliyorsa kapasiteler  $Q_{ref}$  ve  $Q_{nominal}$  aynı olacaktır. Elektrokimyasal reaksiyon ısısı  $q_{ECh}$  şu şekilde hesaplanır.

$$q_{ECh} = j_{ECh} \left[ U - V - T \frac{dU}{dT} \right] \quad (5.5)$$

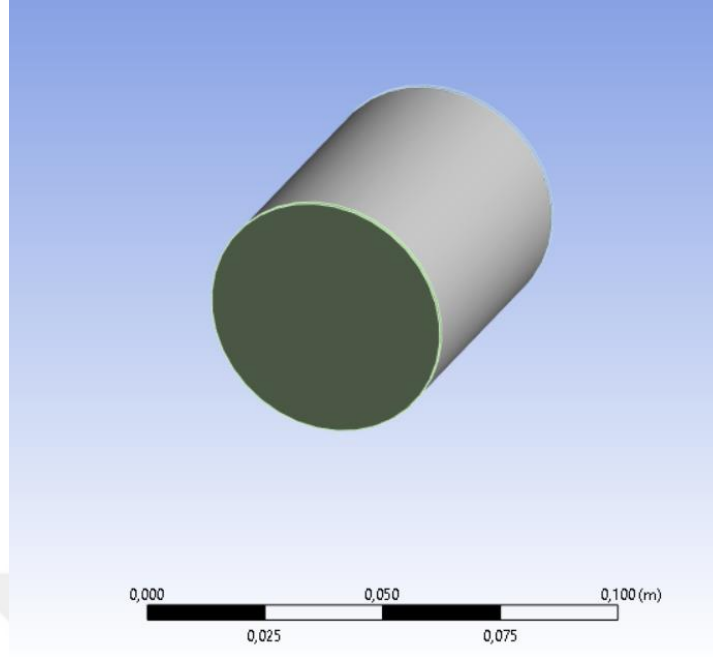
Elektrik yükünün fazla değişmediği koşullar için NTGK modeli pil şarj/deşarj döngüsünü simüle etmek için kullanılabilir. Bu çalışmada kullanılan NTGK modeli için parametreler Çizelge 5.3'te verilmiştir.

Çizelge 5.3. NTGK modeli için parametreler

Fonksiyon	Katsayılar					
<b>U</b>	<b>a<sub>0</sub></b>	<b>a<sub>1</sub></b>	<b>a<sub>2</sub></b>	<b>a<sub>3</sub></b>	<b>a<sub>4</sub></b>	<b>a<sub>5</sub></b>
	4,0682	-1,2669	-0,9072	3,7550	-2,3108	-0,1701
<b>Y</b>	<b>b<sub>0</sub></b>	<b>b<sub>1</sub></b>	<b>b<sub>2</sub></b>	<b>b<sub>3</sub></b>	<b>b<sub>4</sub></b>	<b>b<sub>5</sub></b>
	16,5066	-27,0367	237,3297	-632,6030	725,0825	-309,8760

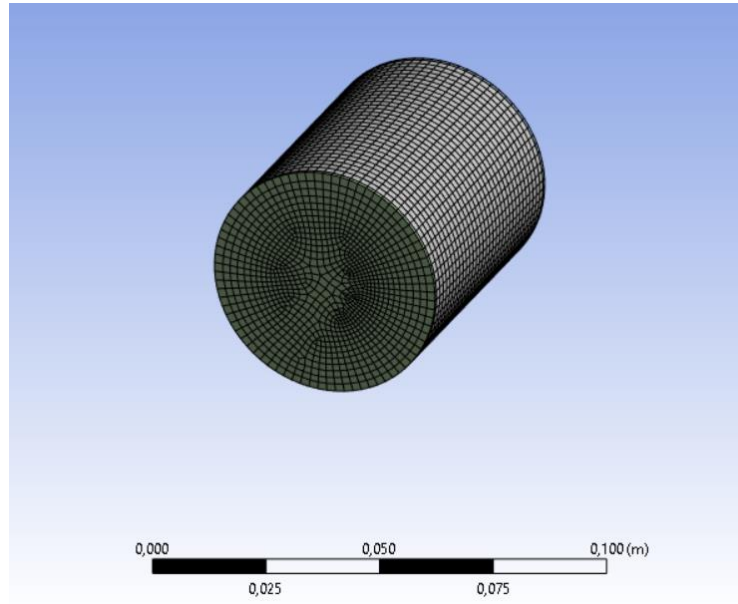
### 5.2.3. Ağ Yapısının Oluşturulması

Geometrinin bir hayli küçük öğelere bölünmesi için hesaplamaların yapılabilmesi gerekmektedir. Her bir elemanda hücrenin tüm bölgesinde homojen ağ elemanı kullanabilme imkanının mevcut olduğu görülmüştür (Navgasın, 2022). Çok ölçekli çok boyutlu bir tasarım uygulamak için ANSYS Fluent tarafından sağlanan NTGK modeli kullanılmıştır.



Şekil 5.1. 26650 LiCoO<sub>2</sub> pilinin ANSYS Fluent ile genel görünümü

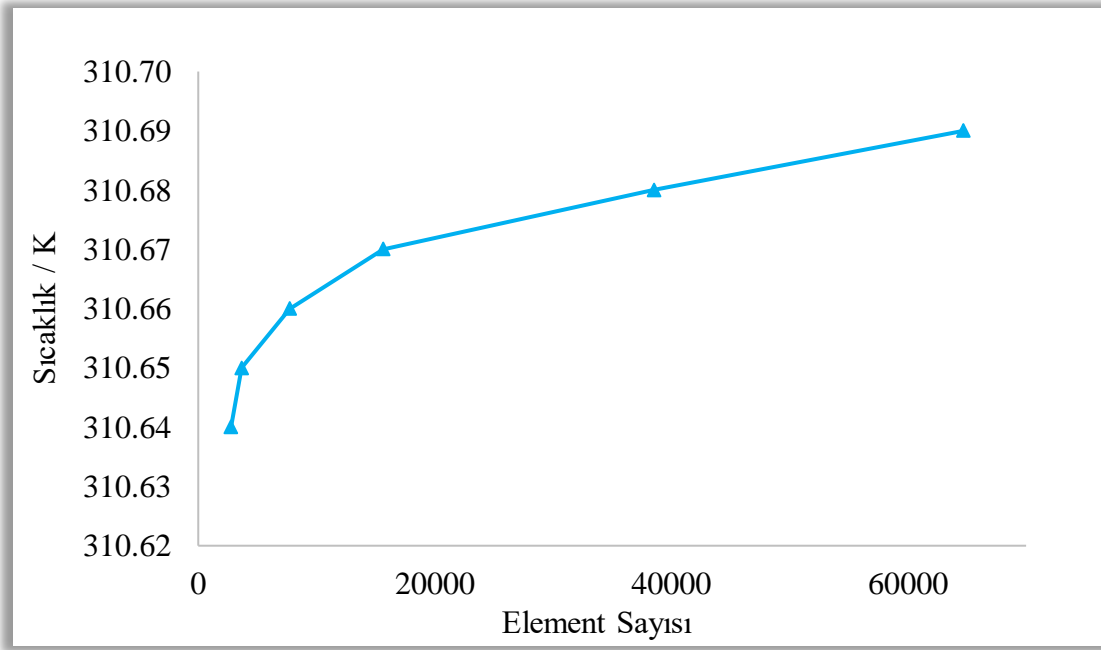
Şekil 5.1’de 26650 LiCoO<sub>2</sub> pilinin ANSYS Fluent ile simülasyon esnasında genel görünümü verilmiştir.



Şekil 5.2. 26650 LiCoO<sub>2</sub> pilinin ağ görünümü

Element sayısını bulabilmek için yapılan ağ çalışması sonucunda Şekil 5.2'deki ağ görünümü elde edilmiştir.

Bağımsızlık testine göre simülasyonları zaman açısından daha az sürede gerçekleştirmek için sonraki sayısal çözümlerde kullanılmak üzere 38456 eleman sayısına karar verilmiştir. Çalışmalar sonucu bulunan element sayısı ve simülasyon sonucu elde edilen sıcaklık arasındaki grafik Şekil 5.3'te gösterilmektedir.



Şekil 5.3. Element sayısı ile pil sıcaklığı arasındaki ilişki

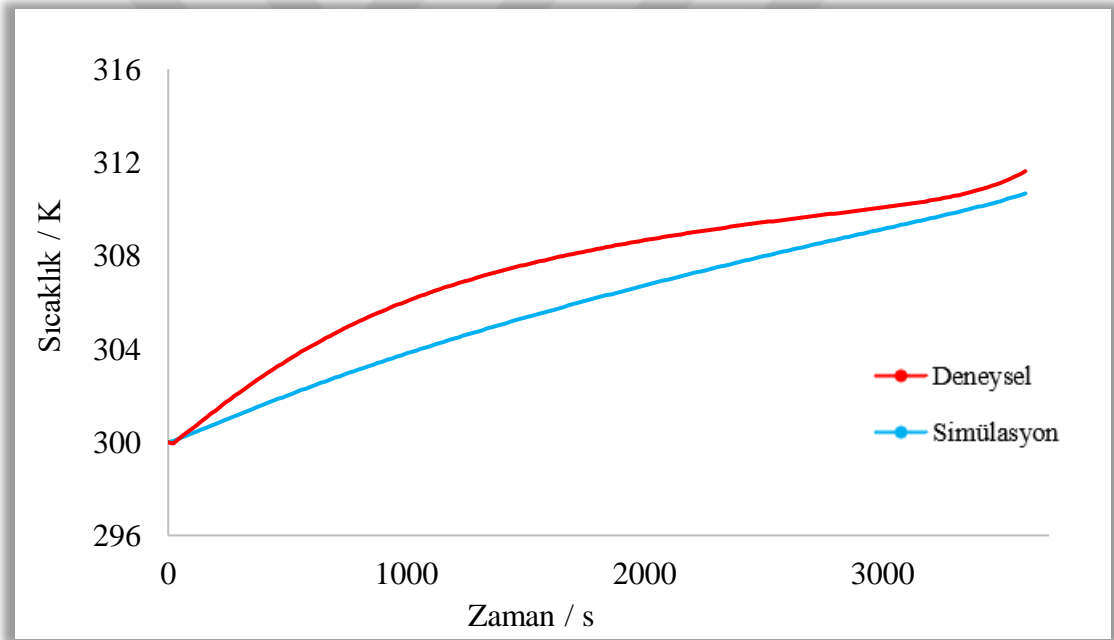
Şekil 5.3'te element sayısı arttıkça pil sıcaklığının da arttığı görülmüştür. Element sayısı 38456 iken sıcaklık değeri 310,68 K'dir. Element sayısı 64718 değerine ulaştığında ise son sıcaklık değeri 310,69 K olarak belirlenmiştir.

## 6. BULGULAR VE TARTIŞMA

Yapılan çalışmalar simülasyon ve deneysel olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Bu iki çalışmayı kendi aralarında karşılaştırılmıştır.

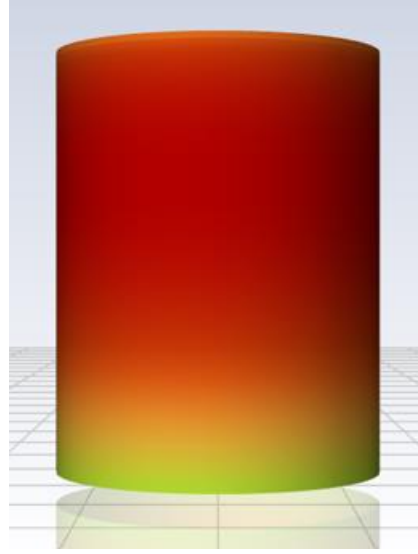
### 6.1. Deneysel ve Simülasyon Sonuçları

Yapılan çalışmalar sonucu deneysel ile simülasyon arasındaki sapmayı görmek için 1 C hızında sıcaklık-zaman grafiği oluşturulmuştur. Şekil 6.1'de deneysel olarak ölçülen sıcaklık değeri simülasyona göre daha yüksek olduğu görülmüştür.



Şekil 6.1. 1 C-hızı için sıcaklık-zaman grafiği

Simülasyon ile sıcaklığın pil üzerinde dağılımını da Şekil 6.2'de gösterilmiştir. 1 C-hızı için 0,0021 ağ sayısı 38456 eleman sayısı ile çalıştırılan pile ait sıcaklığın dağılımı verilmiştir. Batarya hücreesindeki sıcaklığın hücrenin merkezinde daha yoğun iken kutuplara doğru azaldığı görülmüştür.



Şekil 6.2 1 C-hızı pilin sıcaklık dağılımı

## 6.2. Ortogonal Diziler

26650 Lityum iyon pilini bu incelemede Minitab programında yer alan Taguchi Deneysel Tasarımı kullanılmıştır. Bunun sebebi daha sistematik ve daha pratik olması adına tercih edilmiştir. Bu deneyde faktör olarak C-hızı ( $h^{-1}$ ), ısı transfer katsayısı ( $Wm^{-2} K^{-1}$ ) ve ortam sıcaklığı (K) belirlenmiştir. Faktörlere ait seviyeler Çizelge 6.1’de verilmiştir.

Çizelge 6.1. Taguchi deney tasarımı için belirlenen faktör ve seviyeler

Seviye	C-Hızı, $h^{-1}$	$h$ , $Wm^{-2} K^{-1}$	Sıcaklık, K
1	2	10	293
2	3	20	303
3	4	30	313
4	5		
5	6		
6	7		

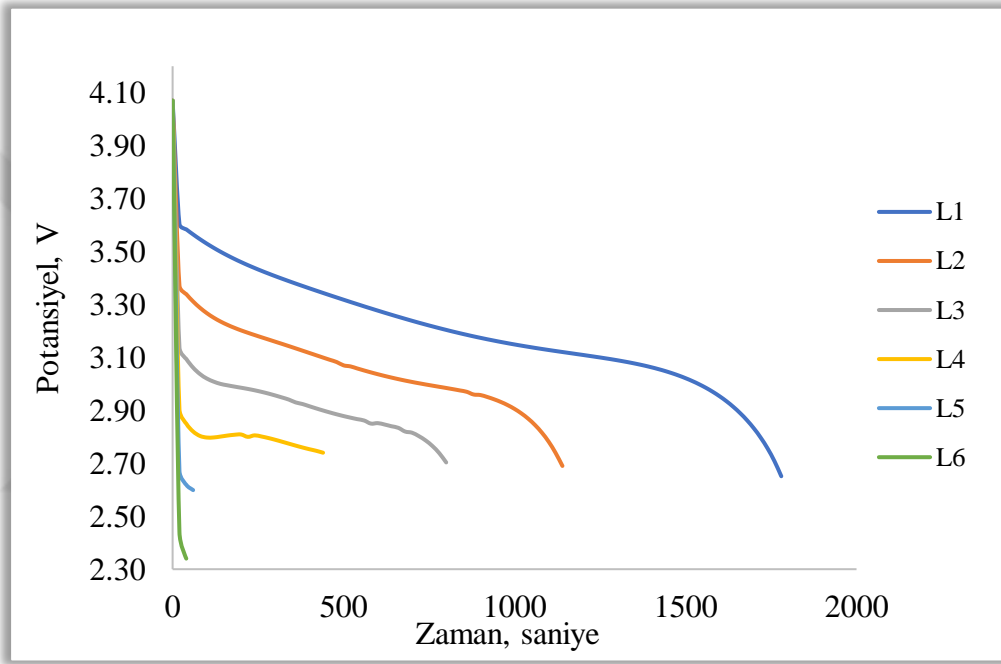
Minitab programına faktör ve seviyeler girilerek  $L18(6^1 \times 3^2)$  ortogonal diziliş elde edilmiştir. Bu programın bize verdiği faktörleri  $L18(6^1 \times 3^2)$  ortogonal diziliş Çizelge 6.2’de gösterilmiştir. Ortogonal dizide verilen deneyler ANSYS Fluent ile toplam 18 deney olacak şekilde sırayla yapıp sonuçlar incelenmiştir.

Çizelge 6.2.  $L18(6^1 \times 3^2)$  ortogonal dizi

Deney Sayısı	Sıcaklık, K	C-hızı, $h^{-1}$	$h, Wm^{-2} K^{-1}$
L1	293	2	10
L2	293	3	10
L3	293	4	20
L4	293	5	30
L5	293	6	20
L6	293	7	30
L7	303	2	20
L8	303	3	20
L9	303	4	30
L10	303	5	10
L11	303	6	30
L12	303	7	10
L13	313	2	30
L14	313	3	30
L15	313	4	10
L16	313	5	20
L17	313	6	10
L18	313	7	20

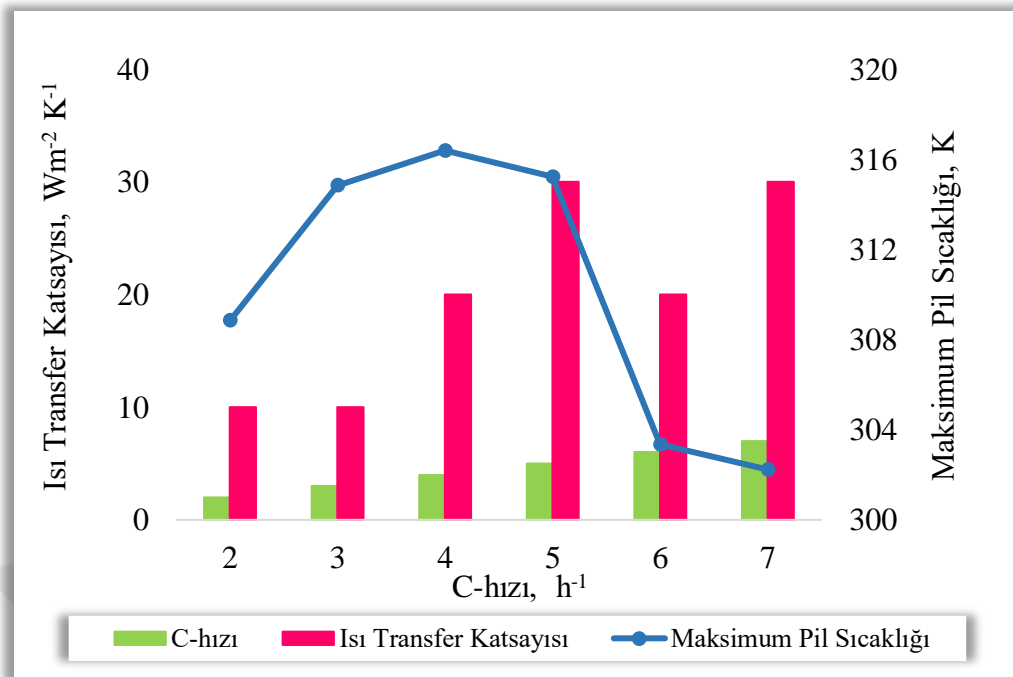
### 6.3. ANSYS Fluent İncelemeleri

Bu kısımda  $\text{LiCoO}_2$  piline uygulanan farklı deşarj koşullarında çok ölçekli çok boyutlu bir NTGK modeli uygulanmıştır. Burada yapılan çalışmalar Çizelge 6.2’de gösterilen  $L18(6^1 \times 3^2)$  ortogonal dizide elde edilenler ile simülasyonda çalıştırılmıştır. Simülasyon sonucunda maksimum pil sıcaklığı (Tmax) ve minimum pil sıcaklığı (Tmin) elde edilmiştir.



Şekil 6.3. 293 K ortam sıcaklığında pil potansiyelinin zamanla değişimi

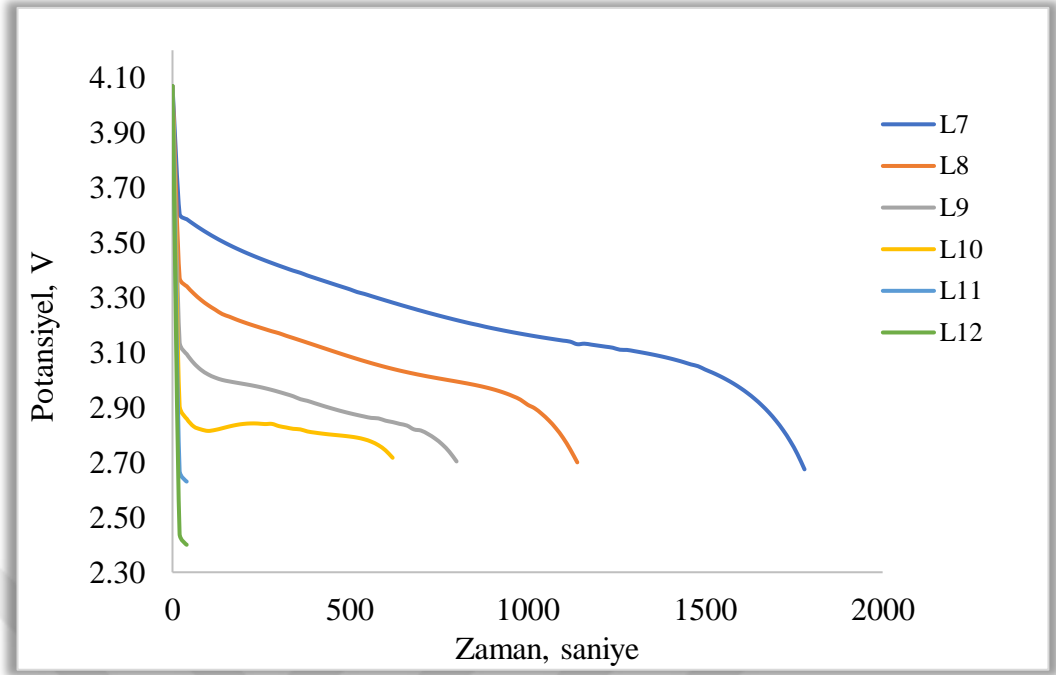
Yapılan çalışmada deşarj koşullarının pilin maksimum pil sıcaklığını etkilediği gözlemlenmiştir. Minitab programının bize verdiği sıcaklık faktörlerinden ilk olarak 293 K incelenmiştir. Şekil 6.3'te L1 dizilimi en uzun akış süresini gösterirken, L6 deşarj koşullarında en kısa akış süresi görülmektedir.



Şekil 6.4. 293 K'de C-hızı ve ısı transfer katsayısına göre maksimum pil sıcaklığının değişimi

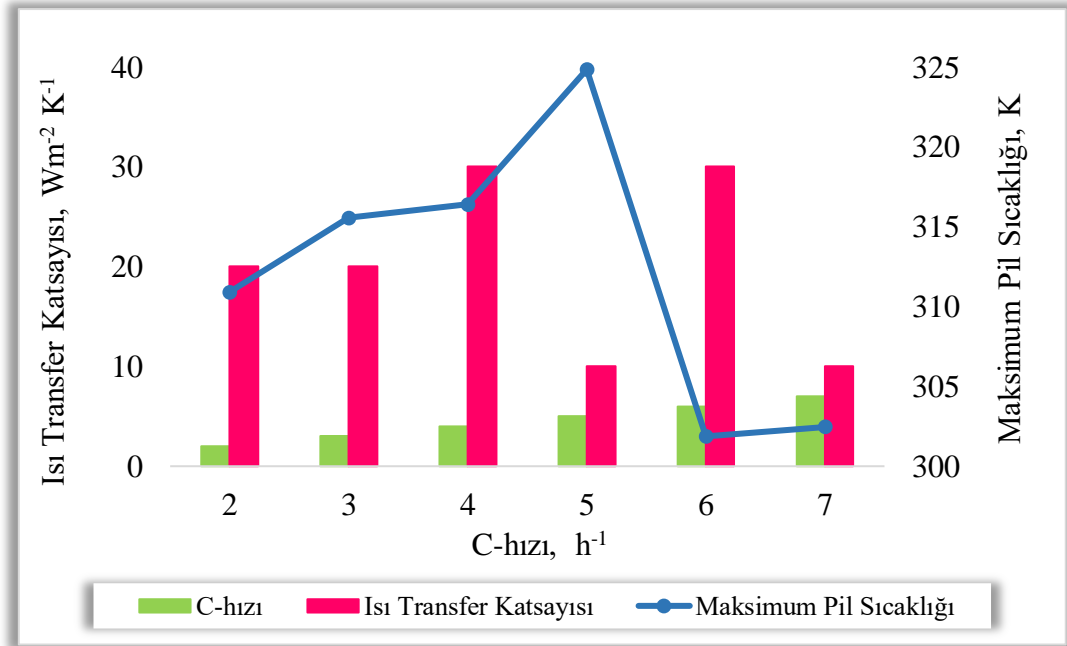
Şekil 6.4'te 293 K için ısı transfer katsayısı ve C-hızına karşılık olarak maksimum pil sıcaklığı gösterilmiştir. Değerlere bakıldığında 2 C-hızından 3 C-hızına geçildiğinde ısı transfer katsayıları aynı olsa dahi maksimum pil sıcaklığında 308,85 K'den 314,84 K'e bir artış görülmüştür. Isı transfer katsayısı  $30 \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-1}$  olduğunda ve 5 C-hızındayken sıcaklıkta 315,23 K'den 303,34 K'e ani bir değer düşüş görülmüştür.

Minitab programının bize verdiği sıcaklık faktörlerinden ikinci olarak 303 K incelenmiştir. Şekil 6.5'te L7-L12 için zamana karşı pil potansiyelinin değişimi gösterilmiştir.



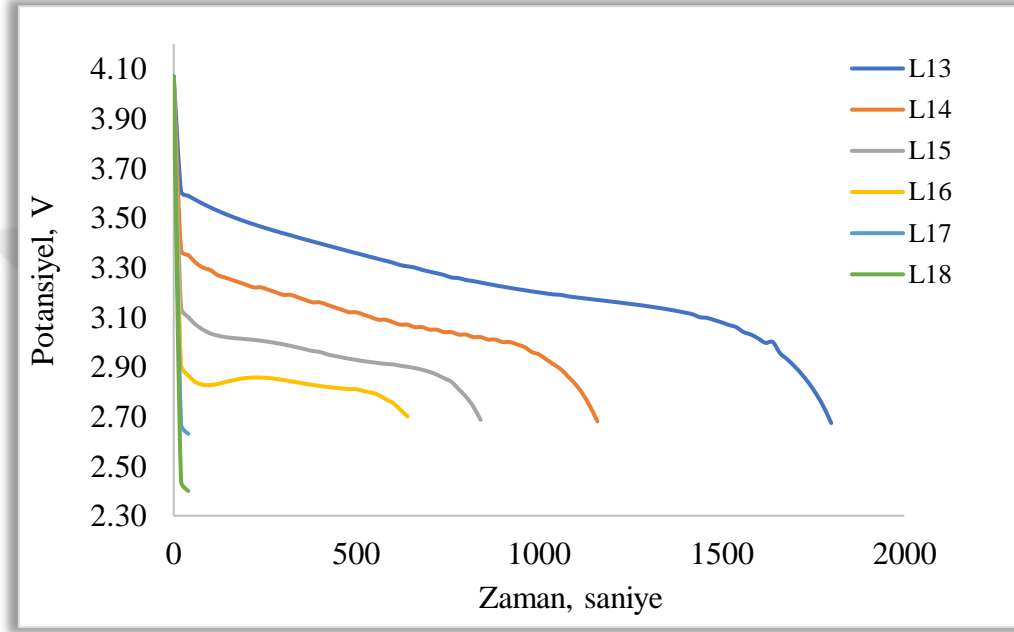
Şekil 6.5. 303 K ortam sıcaklığında pil potansiyelinin zamanla değişimi

Şekil 6.5'te ortam sıcaklığı 303 K olduğunda L7 dizilimi en uzun akış süresini göstermiştir. L12 deşarj koşullarında en kısa akış süresi olduğu görülmüştür.



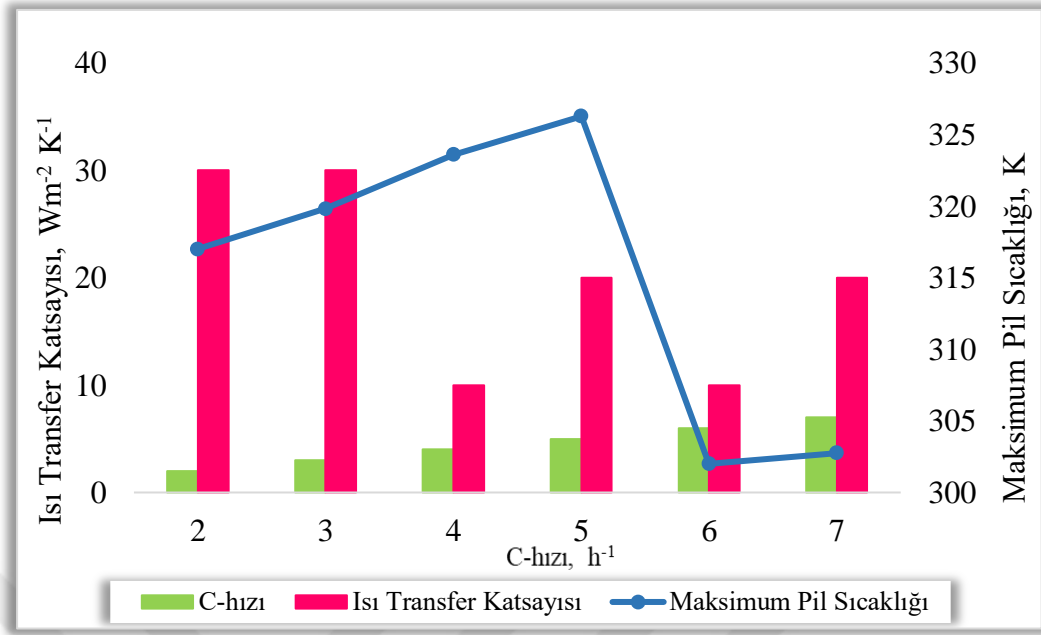
Şekil 6.6. 303 K'de C-hızı ve ısı transfer katsayısına göre maksimum pil sıcaklığının değişimi

Şekil 6.6’da 303 K için ısı transfer katsayısı ve C-hızına karşılık olarak maksimum pil sıcaklığı gösterilmektedir. Değerlere bakıldığında 4 C-hızından 5 C-hızına geçildiğinde ısı transfer katsayıları  $30 \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-1}$  değerinden  $10 \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-1}$  değerine düşüş gözlemlenmiştir. Buna bağlı olarak da maksimum pil sıcaklığı 316,40 K’den 324,84 K’de en yüksek değer görülmüştür.



Şekil 6.7. 313K ortam sıcaklığında pil potansiyelinin zamanla değişimi

Son olarak ortam sıcaklığı 313 K olduğu durumlar Şekil 6.7’de incelenmiştir. L13-L18 için 313 K ortam sıcaklığında pil potansiyelinin zamanla değişimini göstermektedir. Yapılan çalışmada deşarj koşullarının pilin termal davranışını ve maksimum pil sıcaklığını etkilediği gözlemlenmiştir. L13 dizilimi en uzun akış süresini gösterirken L18 deşarj koşullarında en kısa akış süresini göstermiştir.



Şekil 6.8. 313 K'de C-hızı ve ısı transfer katsayısına göre maksimum pil sıcaklığının değişimi

Şekil 6.8'te 313 K için ısı transfer katsayısı ve C-hızına karşılık olarak maksimum pil sıcaklığı gösterilmiştir. Değerlere bakıldığında 6 C-hızından 7 C-hızına geçildiğinde ısı transfer katsayıları ikisinin de  $10 \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-1}$  değerinde olduğu ve maksimum pil sıcaklığı 302 K'den 302,75 K'e az bir miktarda arttığı gözlemlenmiştir.

#### 6.4. Taguchi Deney Tasarımı Yöntemi

Taguchi deney tasarımının sağladığı yöntem ile ortogonal dizi bölümünde elde edilen L18( $6^1 \times 3^2$ ) diziye göre simülasyon yapılmıştır. Böylelikle T<sub>max</sub> ve ΔT<sub>max</sub> için değerler kaydedilmiştir. Bu aşamada cevap tablosu ve varyans analizi gerçekleştirilmiştir. Bunun ardından en uygun faktör belirlenmiştir. Bu faktörün hangi seviyesi T<sub>max</sub> ve ΔT<sub>max</sub> değerleri için en etkili olanına Çizelge 6.3'te karar verilmiştir.

Çizelge 6.3. T<sub>max</sub> ve ΔT<sub>max</sub> değerleri

Deney Sayısı	T <sub>max</sub>	ΔT <sub>max</sub>
L1	308,85	0,10
L2	314,84	0,15
L3	316,40	0,28
L4	315,23	0,41
L5	303,34	0,30
L6	302,23	0,33
L7	310,91	0,10
L8	315,56	0,16
L9	316,40	0,28
L10	324,84	0,21
L11	301,87	0,18
L12	302,47	0,23
L13	317,00	0,09
L14	319,82	0,14
L15	323,61	0,13
L16	326,28	0,22
L17	302,00	0,26
L18	302,75	0,32

### ***Maksimum pil sıcaklığı için (Tmax)***

Maksimum pil sıcaklığının en düşük olduğu durum göz önünde bulundurularak en küçük en iyi yöntemi ile optimum koşullar incelenmiştir.

Çizelge 6.4 için maksimum pil sıcaklığı elde edilen sinyal/gürültü oranı cevap tablosu verilmiştir. Cevap tablosundaki delta değerleri incelendiğinde en yüksek değeri 0,55 C-hızında elde edilirken ikinci en büyük delta değeri 0,14 olan ortam sıcaklığıdır. En düşük delta değeri ise ısı transfer katsayısı ile elde edilmiş olup bu değer 0,02'dir. Delta değerlerinin büyükten küçüğe sıralanması ile sıra değerleri elde edilmiştir. Sıra değerleri incelendiğinde Tmax üzerinde en etkili faktörün C-hızı olduğu ikinci faktörün ortam sıcaklığı ve üçüncü faktörün ısı transfer katsayısı olduğu görülmüştür.

Maksimum pil sıcaklığının en küçük en iyi olması için C-hızı sırasıyla 5. ve 6. Seviye (6 C-hızı ve 7 C-hızı), ortam sıcaklığı için 1. Seviyenin (293 K) ve ısı transfer katsayısı için de 3. Seviye ( $30 \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-1}$ ) en uygun koşullar olduğunu vermektedir.

Çizelge 6.4. Tmax için sinyal/gürültü oranı cevap tablosu

Seviye	C-hızı	Ortam Sıcaklığı	Isı Transfer Katsayısı
1	-49,89	<b>-49,83</b>	-49,90
2	-50,01	-49,88	-49,90
3	-50,07	-49,97	<b>-49,88</b>
4	-50,16		
5	<b>-49,61</b>		
6	<b>-49,61</b>		
Delta	0,55	0,14	0,02
Sıra	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>

Çizelge 6.5'te P değerinin Tmax için varyans analizi tablosunda %95 güven aralığı içinde denilebilecek tek faktör C-hızıdır.

Çizelge 6.5. Tmax için varyans analizi tablosu

Kaynak	DF	Adj SS	Adj MS	F-Değeri	P-değeri
C-hızı	5	1057,56	211,51	21,83	<b>0,00</b>
Ortam Sıcaklığı	2	79,77	39,88	4,12	0,06
Isı Transfer Katsayısı	2	1,42	0,71	0,07	0,93
Hata	8	77,51	9,69		
Toplam	17	1216,26			

### *Maksimum pil sıcaklık farkı ( $\Delta T_{max}$ )*

Maksimum pil sıcaklık farkının en düşük olması beklenildiği için en küçük en iyi yöntemi ile optimum koşullar incelenmiştir.

Çizelge 6.6'da görüldüğü gibi C-hızının  $\Delta T_{max}$  üzerindeki etkisi ortam sıcaklığının etkisinden daha büyüktür. Isı transfer katsayısının  $\Delta T_{max}$  üzerindeki etkisinin en küçük olduğu belirlenmiştir. Optimum koşullar en yüksek sinyal/gürültü oranının elde edildiği faktör seviyesi olarak seçilmiştir. Cevap tablosundaki delta değerleri incelendiğinde en yüksek değeri 9,54 C-hızında elde edilirken ikinci en büyük delta değeri 2,52 olan ortam sıcaklığı olarak görülmüştür. En düşük delta değeri ise ısı transfer katsayısı ile elde edilmiş olup bu değer 1,96 olarak kaydedilmiştir.

Maksimum pil sıcaklığının en düşük olabilmesi için C-hızının 1. Seviye (2 C-hızı), ortam sıcaklığı için 3. Seviyenin (313 K) ve son olarak ısı transfer katsayısı için 1. Seviye ( $10 \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-1}$ ) en uygun koşullar olduğunu vermektedir.

Çizelge 6.6.  $\Delta T_{max}$  için sinyal/gürültü oranı cevap tablosu

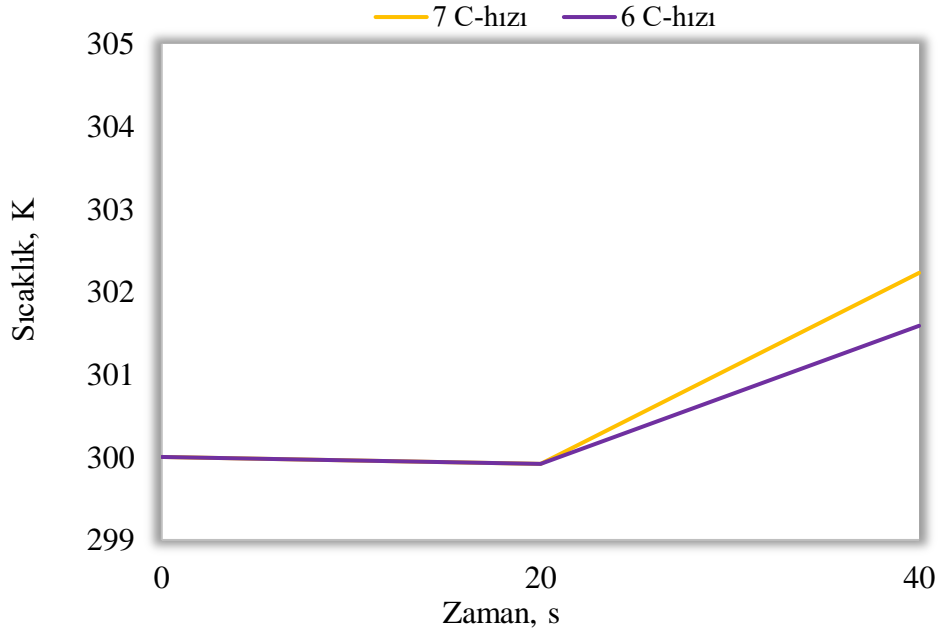
Seviye	C-hızı	Ortam Sıcaklığı	Isı Transfer Katsayısı
1	<b>20,31</b>	12,56	<b>15,37</b>
2	16,49	14,70	13,41
3	13,28	<b>15,08</b>	13,55
4	11,48		
5	12,35		
6	10,76		
Delta	9,54	2,52	1,96
<b>Sıra</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>

Çizelge 6.7’de  $\Delta T_{max}$  için varyans analizi tablosunda P değerinin %95 güven aralığı içinde denilebilecek tek faktör Tmax varyans analizinde olduğu gibi C-hızı istatistiksel olarak uygun bulunmuştur.

Çizelge 6.7.  $\Delta T_{max}$  için varyans analizi tablosu

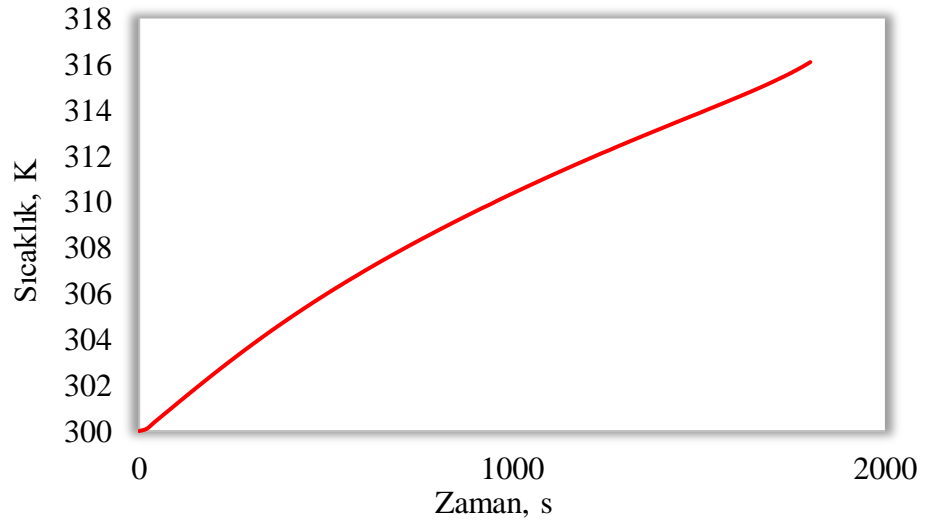
Kaynak	DF	Adj SS	Adj MS	F-Değeri	P-değeri
C-hızı	5	0,08943	0,017886	6,07	<b>0,013</b>
Ortam Sıcaklığı	2	0,01868	0,009339	3,17	0,097
Isı Transfer Katsayısı	2	0,01194	0,005972	2,03	0,194
Hata	8	0,02358	0,002947		
Toplam	17	0,14363			

Yukarıda elde edilen ve Tmax için optimum koşulları sağladığı düşünülen C-hızları 5. Seviye (6 C-hızı) ve 6. Seviye (7 C-hızı), ortam sıcaklığı için 1. Seviye (293 K) ve ısı transfer katsayısı için de 3. Seviye ( $30 \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-1}$ ) ANSYS Fluent programında tekrardan bir simülasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Simülasyon sonucu elde edilen veriler aşağıda gösterilmiştir.



Şekil 6.9. 6 C-hızı ve 7 C-hızı için maksimum pil sıcaklığının zamanla değişimi

Simülasyon sonucunda Şekil 6.9'da Tmax değerleri 6 C-hızı için 301,59 K, 7 C-hızı için ise 302,23 K bulunmuştur. Görüldüğü gibi en küçük değer 6 C-hızı 301,59 K ile optimum sonuca ulaşılmıştır.



Şekil 6.10. Sıcaklık dağılımının zamanla değişimi

Yapılan bir diğer çalışma Şekil 6.10'da  $\Delta T_{max}$  için optimum koşullar sağladığı düşünölen C-hızının 1. Seviye (2 C-hızı), ortam sıcaklığı 3.seviye (313 K) ve son olarak da ısı transfer katsayısının 1. Seviye ( $10 \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-1}$ ) olarak görölmektedir. ANSYS Fluent programında tekrar bir simölasyon işlemleri gerçekleştirilmiştir. Simölasyon sonucunda  $\Delta T_{max}$  değerleri 316,10 K olarak bulunmuştur. Sıcaklık dağılımı değerleri ise 16,1 olarak hesaplanmıştır.

Bu çalışmalar bizim belirlediğimiz faktör ve seviyelerden olduğu için bu sonuçlar elde edilmiştir. Eğer farklı C-hızları veya ısı transfer katsayılarının da seviyelerini arttırdığımızda daha farklı sonuçlar elde edilecektir. Göröldüğu üzere ısı transfer katsayısının baskın bir faktör olduğunu hem hücreye hem de çevreye olan etkisinin fazla olduğu görölmüştür. Düşük veya yüksek ısı transfer katsayıları doğrudan sıcaklıkla ilişkili olup sıcaklık artışını önlemede etkili bir yere sahiptir.

Buna karşın değişen deşarj hızlarında sıcaklık değerlerinin de önemli bir etkisi olduğunun sonucuna varılmıştır. Yüksek sıcaklıklarda lityum iyon pil hücresinde bozunma yaratmaması için dikkat edilmiştir. Bu gibi dezavantajların üstesinden gelmek için birçok çözümler önerisi geliştirilmektedir ve olası her türlü tehlikeyi arz eden örneğin termal kaçak gibi sorunların önüne geçilmesi gerekmektedir.

## 7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada 26650 LiCoO<sub>2</sub> pili için üç farklı faktörler olarak C-hızı, ortam sıcaklığı ve ısı transfer katsayısı kullanılarak maksimum pil sıcaklığı ve sıcaklık dağılımı üzerinde simülasyonlar ve deneyler yapılmıştır. Bu faktörlerin pil sıcaklığına olan etkilerini detaylı bir şekilde incelenmiştir.

Tmax için en etkili faktörün C-hızının olduğu görülmüştür. Minitab programı kullanımı ile 5. ve 6. Seviyenin (6 C-hızı ve 7 C-hızı), ortam sıcaklığı için 1. Seviyenin (293 K) ve ısı transfer katsayısı için 3. seviye (30 Wm<sup>-2</sup> K<sup>-1</sup>) en uygun koşullar olduğu bulunmuştur. Seviye olarak 5 ve 6'da C-hızlarında aynı değer bulunduğu için kendi aralarında maksimum pil sıcaklığının zamanla değişimi incelenmiştir. Simülasyonu gerçekleştirilen grafikten elde edilen sonuç ise 6 C-hızında 301,59 K olarak optimum sonuca ulaşılmıştır. Bu durum ΔTmax için de en etkili faktörün C-hızının olduğu görülmüştür. C-hızının 1. Seviyesi olan (2 C-hızı) ve ortam sıcaklığı 3. Seviye olan (313 K), son olarak da ısı transfer katsayısının 1. Seviye (10 Wm<sup>-2</sup> K<sup>-1</sup>) olarak bulunmuştur. Tekrar simülasyon işlemi gerçekleştirilen grafikte ΔTmax değeri 316,10 K bulunup sıcaklık dağılımı değeri ise 16,1 olarak en uygun optimum sonuçlara ulaşılmıştır.

Sonuç olarak bu çalışmada Deney tasarımı yöntemlerinden biri olan Taguchi metodu L18 ortogonal dizisi kullanılarak kısa sürede daha az deney ile daha doğru sonuçlara ulaşılmıştır. ANSYS Fluent programı bu tez çalışmasında özgün, yenilikçi ve diğer çalışmalar adına öncü olmuştur. Elektrikli araçlarda yaygın olarak kullanılan lityum iyon piller son yıllarda teknolojik açıdan önemli bir ilerleme kaydetmiştir. Birçok avantajını; uzun ömürlü olması, yüksek enerji kapasitesi gibi örnekleriyle bu çalışmada oldukça yararı görülmüştür. Dezavantajlarından bahsedilirse yüksek sıcaklıklarda bozunma veya maliyet açısından gibi çözüm yolları üretildiğinde birçok açıdan daha fazla yol alacak ve ilerleyecektir.

## KAYNAKLAR DİZİNİ

- Abbas, A., Rizoug, N., Trigui, R., Babin, A., Iglesias, R. E., Pelissier, S. (01-04 Kasım 2022).
- Alston, E., Jayasinghe, S., Baguley, C., Madawala U. (2018). *Thermal Management of an Electric Ferry Lithium-Ion Battery System*. IEEE 4th Southern Power Electronics Conference (SPEC), 978-1-5386-8257-9. 10.1109/SPEC.2018.8635922
- Barua, N., Rahman, A., Roşid, M. (2023). *Comparative analysis of electrochemical behaviors of lithium-ion batteries using the dual potential MSMD battery models: case studies on various thermal conditions*. Future Energy, 3(2). <https://fupubco.com/fuen/article/view/120>.
- Bayrak, B., Laçın, O., Saraç, H. (2015). *Ham Manyezit Cevherinin Glukonik Asit Çözeltilerinde Çözündürülmesinin Optimizasyonu*. Anadolu Üniversitesi Bilim Ve Teknoloji Dergisi A - Uygulamalı Bilimler ve Mühendislik, 16(2), 195-202. <https://doi.org/10.18038/btd-a.35162>
- Besterfield, D. H., Besterfield, C., Besterfield, G. H., Besterfield, M. (1995). *Total Quality Management*. Prentice Hall Inc.
- Bilici, M. K. (2012). *Application of Taguchi Approach To Optimize Friction Stir Spot Welding Parameters Of Polypropylene*, Materials & Design, 35, 113-119. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.08.033>
- Chaudhary, P., Majumder, A. (2021). *Numerical Investigation on the Thermal Management of 18650 Battery Module Using Phase Change Material* (pp 835–842). Recent Advances in Manufacturing, Automation, Design and Energy Technologies.

## KAYNAKLAR DİZİNİ

- Daneshvar, N., Ayazloo, M., Khataee, A. R., Pourhassan, M. (2007). *Biological Decolorization of Dye Solution Containing Malachite Green by Microalgae Cosmarium Sp.* *Bioresource Technology*, 98(6), 1176-1182. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.05.025>
- Erbaş, S. O., Olmuş, H. (2006). *Deney Düzenleri ve İstatistiksel Analizleri*. Gazi Kitabevi.
- Gaznevi, M., Chen, P. (2014). *Sensitivity analysis of a mathematical model of lithium–sulfur cells part I: Applied discharge current and cathode conductivity*. *Journal of Power Sources*, 257, 394-401. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.10.135>
- Gökçe, B., Taşgetiren, S. (2009). Kalite için Deney Tasarımı. *Electronic Journal of Machine Technologies*, Vol: 6, No: 1, (71-83). <https://www.researchgate.net/publication/260389787>
- Gürsakal, N. (2005). *Altı Sigma Müşteri Odaklı Yönetim*. 2. bs., Nobel Yayın.
- Huang Q., Yan M., Jiang Z. (2006). *Thermal Study on Single Electrodes in Lithium-Ion Battery*. *Journal of Power Sources*, 156(2), 541-546. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2005.05.083>
- Kacan, E. (2016). *Optimum BET Surface Areas for Activated Carbon Produced From Textile Sewage Sludges and Its Application As Dye Removal*. *Journal of Environmental Management*, 166, 116–123. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.09.044>
- Kamber, Ö. Ş. (2008). Plastik Enjeksiyon Kalıplarında Basınç ve Sıcaklık Parametrelerinin Ürün Kalitesine Etkileri ve Taguchi Yöntemi İle Optimizasyonu [Doktora Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü]. <https://www.proquest.com/openview/7ccfc02cbe9864117154499429857bf2/1?pq-origsite=gscholar&cbl=2026366&diss=y>

**KAYNAKLAR DİZİNİ**

- Katıyar, R. K., Singhal, R., Asmar, K., Valentin, R., Katıyar R. S. (2009). *Synthesis and Characterization of Cathode Materials for High Energy Density and High Rate Capability Lithium-Ion Rechargeable Batteries*. Journal of Power Sources, 194(1), 526-530. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour>.
- Kök, C., Alkaya, A. (2020). *Investigation of Thermal Behavior of Lithium-Ion Batteries under Different Loads*. European Mechanical Science, 4(3), 96-102. <https://doi.org/10.26701/ems.635707>
- Kul, B. (2020). *Geçmişten Günümüze Piller*. Takvim-i Vekayi, 8(1), 104-115. <https://dergipark.org.tr/en/pub/takvim/issue/55145/674402>
- Kwon, K. H., Shin, C. B., Kang, T. H., Kim, C. S. (2006). *A Two-Dimensional Modeling Of A Lithium-Polymer Battery*. Journal of Power Sources, 163. 151-157. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2006.03.012>
- Linden, D., Reddy, B. T. (2001). *Handbook of Batteries*. Third Edition.
- Mahesh Patil, S. M., Seo, H. J., Lee, Y. M. (2021). *A novel dielectric fluid immersion cooling technology for Li-ion battery thermal management*. Energy Conversion and Management, 229. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113715>
- Mercan, Ş. (2019). *Deney Tasarımı ve Yapay Zeka Tekniklerinden Yararlanarak Ürün Kalitesinin Geliştirilmesi* [ Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü]. <https://hdl.handle.net/20.500.12462/5602>
- Miao, Y., Hynan, P., Jouanne V. A., Yokochi, A. (2019). *Current Li-Ion Battery Technologies in Electric Vehicles and Opportunities for Advancements*. Energies, 12(6), 1074. <https://doi.org/10.3390/en12061074>

## KAYNAKLAR DİZİNİ

- Mitra, A. (1993). *Fundamentals of Quality Control and Improvement*, Macmillan Publishing Company.
- Montgomery, D. C. (2005). *Design and analysis of experiments*. 6, 3-10, John Wiley & Sons Inc.
- Moralı, U. (2022). *Computational Modeling and Statistical Evaluation of Thermal Behavior of Cylindrical Lithium-Ion Battery*. Journal of Energy Storage, Volume 55, Part A. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.105376>
- Navgasın, F. M. (2022). *Elektrikli Taşıtlarda Batarya Soğutma Sisteminin İyileştirme Yöntemlerinin Araştırılması* [Yüksek Lisans Tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü]. <https://www.proquest.com/openview/7fea250c951907e8ff372d4c6f34370a/1?pq-origsite=gscholar&cbl=2026366&diss=y>
- Nazri, G. A., Pistoia, G. (2008). *Lithium Batteries Science and Technology*. Springer Science
- Öktem, H. (2012). *Optimum Process Conditions on Shrinkage Of An Injected-Molded Part of DVD-ROM Cover Using Taguchi Robust Method*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 61(5-8), 519- 528. <https://doi.org/10.1007/s00170-011-3750-3>
- Öztop, M. (2007). *Taguchi Deney Tasarımı Yöntemi ile Alüminyum Ekstrüzyon Prosesinin İyileştirilmesi* [Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü]. <https://acikbilim.yok.gov.tr/handle/20.500.12812/500526>

**KAYNAKLAR DİZİNİ**

- Paccha-Herrera, E., Calderón-Muñoz, W.R., Orchard, M., Jaramillo, F., Medjaher, K. (2020). *Thermal Modeling Approaches for a LiCoO<sub>2</sub> Lithium-Ion Battery—A Comparative Study with Experimental Validation*. *Batteries*, 6(3), 40. <https://doi.org/10.3390/batteries6030040>
- Polat, B. D., Keleş, Ö. (2012). *Lityum İyon Pil Teknolojisi*. *Metalurji Dergisi*, [https://metalurji.org.tr/dergi/dergi162/d162\\_4248.pdf](https://metalurji.org.tr/dergi/dergi162/d162_4248.pdf)
- Qasim, A., Nisar, S., Shah, A., Khalid, M. S., Sheikh, M. A. (2015). *Optimization of Process Parameters for Machining of AISI-1045 Steel Using Taguchi Design and ANOVA*. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 59,36–51. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2015.08.004>
- Ramadass, P., Haran, B., Beyaz, R., Popov N. B. (2003). *Mathematical modeling of the capacity fade of Li-ion cells*. *Journal of Power Sources* , 123(2), 230-240. [https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(03\)00531-7](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(03)00531-7)
- Serencam, H., Uçurum, M. (2019). *Yeşil Bayburt Taşının Adsorban Olarak Kullanılabilirliğinin İstatistiksel Deney Tasarımı İle İncelenmesi*. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 8(1), 352- 36. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.517139>
- Sevindir, M. K. (2007). *Çapraz Akış İçerisinde Sıcak Jet Akışın Sayısal ve Deneysel İncelenmesi* [Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen bilimleri Enstitüsü].
- Simpson, J. R.. (1996). *Taguchi Techniques for Quality Engineering*, *Journal of Quality Technology*, 4, 28. <https://doi.org/10.1080/00224065.1996.11979713>

## KAYNAKLAR DİZİNİ

- Srivastava, G., Nandan, R., Das, K. M. (2022). *Thermal runaway management of Li ion battery using PCM: A parametric study*. Energy Conversion and Management: X, 16. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2022.100306>
- Şirvancı, M. (1997). *Kalite İçin Deney Tasarımı "Taguchi Yaklaşımı"*. Literatür Yayıncılık.
- Taptık, Y., Keleş, Ö. (1998). *Kalite Savaşı*. Kalder Yayınları.
- Thakur A. K., Prabakaran R., Elkadeem M. R., Sharshir S. W., Arıcı M., Wang C., Saidur R. (2020). *A State of Art Review and Future Viewpoint on Advance Cooling Techniques For Lithium–Ion Battery System of Electric Vehicles*. Journal of Energy Storage, 32, 101771. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101771>
- Thermal modeling of batteries for EV energy management*. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 1938-8756. [10.1109/VPPC55846.2022.10003306](https://doi.org/10.1109/VPPC55846.2022.10003306)
- Tie, S. F., Tan, C. W. (2013). *A Review of Energy Sources And Energy Management System in Electric Vehicles*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 20, 82-102. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.11.077>
- Uysal, R. (2022). *Numerical Analysis And Experimental Verification of Industrial Lithium-Ion Batteries* [Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü]. <https://katalog.marmara.edu.tr/veriler/cokluortam/cokluortam/A/A/D/C/D/62f4d3225d656.pdf>
- Verma, A., Rakshit, D. (2023). *Performance Analysis of Active Cooling System in Lithium-Ion Batteries Using Dual Potential Multi-Scale Multi-Dimensional Battery Model Approach in Extreme Environment* (pp. 311-320). Recent Advances in Thermal Sciences and Engineering.