



**T.C.
YALOVA ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ BİLİM DALI**

**GİZLİ ISIL ENERJİ DEPOLAMA YÖNTEMİ İLE LİTYUM-İYON
BATARYALARIN ISIL YÖNETİMİ İÇİN KOMPOZİT FAZ DEĞİŞTİREN
MALZEMELERİN GELİŞTİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

EMRE BOZER

DANIŞMAN: DOÇ. DR. MEHMET SELÇUK MERT

**YALOVA
EKİM 2024**



T.C.
YALOVA ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ BİLİM DALI

GİZLİ ISIL ENERJİ DEPOLAMA YÖNTEMİ İLE LİTYUM-İYON BATARYALARIN
ISIL YÖNETİMİ İÇİN KOMPOZİT FAZ DEĞİŞTİREN MALZEMELERİN
GELİŞTİRİLMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

EMRE BOZER
218107012

DANIŞMAN: DOÇ. DR. MEHMET SELÇUK MERT

YALOVA
EKİM 2024

ETİK BEYAN

Yalova Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım “GİZLİ ISIL ENERJİ DEPOLAMA YÖNTEMİ İLE LİTYUM-İYON BATARYALARIN ISIL YÖNETİMİ İÇİN KOMPOZİT FAZ DEĞİŞTİREN MALZEMELERİN GELİŞTİRİLMESİ” başlıklı bu tez çalışmasında; tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi, tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu, tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi, kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı, bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu bildirir, aksinin tespiti halinde doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi taahhüt ve beyan ederim.

İmza

Emre BOZER





ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimim boyunca benden yardımlarını esirgemeyen, akademik anlamda bana her zaman destek olan ve doğru yolu gösteren danışman hocam sayın Doç. Dr. Mehmet Selçuk MERT'e teşekkür ederim. Tezimi yazarken yanımda olan, her anımda destekleyen aileme ve eşime en içten teşekkürlerimi sunuyorum. Ayrıca, oğlum Arda BOZER'in bilimin ışığında büyüyerek, merak dolu bir dünyayı keşfetmesini ve her zaman sorgulayan, öğrenmeye açık bir birey olmasını temenni ediyorum.

Bu tez çalışmasının desteklenmesine olanak sağlayan Yalova Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Koordinasyon Birimine (2022/YL/0010) teşekkür ederim.

Ekim- 2024

Emre BOZER





İÇİNDEKİLER

ETİK BEYAN	i
ÖNSÖZ.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	v
KISALTMALAR LİSTESİ.....	vii
TABLolar LİSTESİ	ix
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	xi
ÖZET.....	xiii
ABSTRACT	xv
1. GİRİŞ	1
2. BİRİNCİL VE İKİNCİL ENERJİ KAYNAKLARI	3
3. ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMLERİ	5
3.1. Mekanik Enerji Depolama	6
3.1.1. Volan enerji depolama sistemleri	6
3.1.2. Pompaj depolamalı hidroelektrik enerji sistemleri.....	6
3.1.3. Yerçekimi enerji depolama sistemleri	7
3.1.5. Sıvı piston enerji depolama	8
3.2. Kimyasal Enerji Depolama	9
3.2.1. Hidrojen enerji depolama	9
3.3. Elektrokimyasal Enerji Depolama	10
3.3.2. Batarya enerji depolama	10
3.4. Süperiletken ile Enerji Depolama	11
3.5. Kriyojenik Enerji Depolama	11
3.5.1. Sıvı hava enerji depolama	11
3.6. Isıl Enerji Depolama	12
3.6.1. Duyulur ısı depolama	13
3.6.2. Termokimyasal ısı depolama.....	13
3.6.3. Gizli ısı depolama.....	14
4. ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA LİTYUM İYON BATARYA KULLANIMI	15
4.1. Elektrikli Araç Çeşitleri	15
4.2.1. Elektrikli araç bataryalarının güç ve enerji kapasitesi.....	15
4.3. Lityum İyon Bataryalar.....	17

4.4. Lityum İyon Bataryalar ile İlgili Karşılaşılan Problemler	18
4.4.1. Kapasite düşüşü	18
4.4.2. Güvenlik sorunları	19
4.4.2.1. Aşırı şarj	19
4.4.2.2. Aşırı deşarj	20
4.4.2.3. Isıl Kaçak	21
4.4.2.4. Lityum dentrit oluşumu	22
4.4.2.5. Gaz oluşumu	22
5. ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA BATARYA ISIL YÖNETİM SİSTEMLERİ	23
5.1. Hava Soğutmalı Batarya Yönetim Sistemleri	23
5.2. Sıvı Soğutmalı Batarya Yönetim Sistemleri	24
5.3. Faz Değiştiren Malzemeler ile Batarya Isıl Yönetim Sistemleri	25
5.4. Faz Değiştiren Malzemeler için Performans İyileştirme Stratejileri	26
5.4.1. Isı transfer hızının artırılması	27
5.4.1.1. FDM'nin ısı iletkenliğinin artırılması	27
5.4.1.2. Isı transfer yüzeyinin artırılması (Ah)	28
5.4.2. Isıl depolama kapasitesinin yenilenmesi	28
5.4.3. FDM'nin soğutma yükünün azaltılması	29
5.5. Faz Değiştiren Malzemeler Üzerine Yapılan Çalışmalar	30
6. DENEYSEL ÇALIŞMA ve BULGULAR	33
6.1. Deneysel Çalışmada Kullanılan Kimyasallar ve Deneysel Yöntem	33
7. SENTEZLENEN KOMPOZİT FDM İLE BATARYA ISIL YÖNETİM UYGULAMASI	39
7.1. Kompozit Faz Değiştiren Malzeme ile Isıl Yönetim Testleri	43
8. SONUÇ ve ÖNERİLER	53
KAYNAKLAR	55
ÖZGEÇMİŞ	59

KISALTMALAR LİSTESİ

AlN	: Alüminyum Nitrit
BMS	: Battery Management System
BIYS	: Batarya Isıl Yönetim Sistemi
LHS	: Latent Heat Storage
LiB	: Lityum İyon Batarya
PDHES	: Pompaj Depolamalı Hidroelektrik Santrali
SHS	: Sensible Heat Storage





TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 4.1. Farklı batarya tiplerinin teknik özelliklerinin karşılaştırılması [20]	16
Tablo 5.1. Soğutucu ortam akışkanlarının termofiziksel özellikleri	23
Tablo 5.2. Aktif ve pasif batarya yönetim sistemlerinin avantaj ve dezavantajları [31].....	25
Tablo 5.3. 10-30°C aralığında bazı faz değiştiren malzemeler ve özellikleri [32].	26
Tablo 6.1. Kompozit FDM'lerin hazırlanması reçetesi	33
Tablo 6.2. Sentezlenen kompozit FDM'lere ait özellikler.....	37
Tablo 7.1. Aspilsan INR18650A28 teknik özellikler.....	41
Tablo 7.2. Deneyde kullanılan ekipman ve cihazların listesi.....	43
Tablo 7.3. Batarya C değerleri ve karşılıklı gelen akım değerleri	44
Tablo 7.4. FDM'li ve FMD'siz C değerleri	44



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Birincil ve ikincil enerji kaynakları [7]	3
Şekil 2.2. Birincil enerji kaynaklarının çoğunlukla kullanıldığı sektörler [8].	4
Şekil 3.1. Enerji depolama teknolojileri [9]	5
Şekil 3.2. Volan enerji akümülatörü [10]	6
Şekil 3.3. Pompaj depolamalı hidroelektrik santrali şeması [11]	7
Şekil 3.4. Yerçekimi enerji depolama sistemi çalışma prensibi [12]	7
Şekil 3.5. Sıkıştırılmış hava depolama sistemi [13]	8
Şekil 3.6. Sıvı piston enerji depolama sistemi [14]	9
Şekil 3.7. Farklı enerji depolama sistemlerinin karşılaştırılması [15]	10
Şekil 3.8. Sistemin tek hat şeması [16].	11
Şekil 3.9. Sıvı hava depolama proses şeması [9]	12
Şekil 3.10. Duyulur ısı depolama diyagramı [17]	13
Şekil 3.11. Duyulur (SHS) ve gizli ısı (LHS) sistemlerinin ısı kapasitesi yönünden karşılaştırılması [18]	14
Şekil 4.1. Çeşitli elektrikli araç türleri için batarya gücü ve batarya kapasitesi karşılaştırması [20]	16
Şekil 4.2. Elektrikli araç bataryası üretim süreçleri [20]	17
Şekil 4.3. Elektrikli araçlarda genel yerleşim planı [22]	18
Şekil 4.4. Lityum-iyon hücrelerin standart konfigürasyonu [20]	18
Şekil 4.5. Lityum-iyon çalışma voltaj-sıcaklık aralığı [24]	20
Şekil 4.6. Lityum-ion bataryalar için sıcaklık ve ömür karşılaştırması [25]	21
Şekil 5.1. Seri hücre soğutma konfigürasyonu, (a) Basit kanal, (b) Daralan kanal, (c) Karşılıklı akışlı kanal [26]	24
Şekil 5.2. Batarya paketlerinin genel soğutma çevrimi şeması [29]	24
Şekil 5.3. Faz değiştiren malzemelerin geliştirilme stratejileri [33]	27
Şekil 5.4. Silindirik bir batarya çevresinin kaplayan FDM içerisine kanat uygulaması [33] ..	28
Şekil 5.5.4. Farklı soğutma sisteminin FDM ile birlikte kullanımı. A:FDM ve zorlanmış akışlı hava soğutma. B:FDM ve sıvı soğutma. C:FDM ve ısı boruları. D:FDM ve termoelektrik soğutma [33]	29
Şekil 5.6. Tipik bir hibrit sıvı ve FDM soğutmalı batarya ısı yönetim sistemi [33]	30
Şekil 6.1. Sentezlenen malzemelere ait dijital kamera görüntüleri (a) Boş köpük malzeme, (b) kompozit FDM (c)	33
Şekil 6.2. Sentezlenen malzemelere ait FT-IR spektrumları (a) Boş köpük malzeme, (b) saf FDM, (c) kompozit FDM (d) grafit katkılı kompozit FDM	34
Şekil 6.3. Boş köpük SEM görüntüsü.	35

Şekil 6.4. Kompozit FDM'nin SEM görüntüsü.	35
Şekil 6.5. Grafit katkılı kompozit FDM'nin SEM görüntüsü.	35
Şekil 6.6. Sentezlenen kompozit FDM'ye ait DSC eğrileri.	36
Şekil 6.7. Sentezlenen grafit katkılı kompozit FDM'ye ait DSC eğrileri.	37
Şekil 7.1. Sentezlenen FDM'nin Lityum Hücreler Üzerindeki etkisinin analizi için hazırlanan deney seti.	39
Şekil 7.2. Aspilsan INR18650A28 Batarya Hücreleri	40
Şekil 7.3 a) Liitokala 500 şarj cihazı b) Kapasite kontrol cihazı	41
Şekil 7.4. Üretici Firma Aspilsan tarafından sağlanan batarya özellikleri.	42
Şekil 7.5. Puntalanmış ve ısı sensörü eklenmiş batarya paketi	42
Şekil 7.6. Batarya paketi ve termokupl deney düzeneği	44
Şekil 7.7. Farklı C değerleri için deşarj süreleri.....	45
Şekil 7.8. 3C Deşarj Değerinde FDM'siz Deşarj Testi	46
Şekil 7.9. FDM'siz ve kompozit FDM'li batarya paketi	46
Şekil 7.10. 3C'de FDM ilaveli deşarj testi	47
Şekil 7.11. 0,5C'de FDM'siz ve kompozit FDM'li deşarj testi karşılaştırması.....	48
Şekil 7.12. 1C'de FDM'siz ve kompozit FDM'li deşarj testi karşılaştırması.....	48
Şekil 7.13. 1,5C'de FDM'siz ve kompozit FDM'li deşarj testi karşılaştırması.....	49
Şekil 7.14. 2C'de FDM'siz ve kompozit FDM'li deşarj testi karşılaştırması.....	49
Şekil 7.15. 2,5C'de FDM'siz ve kompozit FDM'li deşarj testi karşılaştırması.....	50
Şekil 7.16. 3C'de FDM'siz ve kompozit FDM'li deşarj testi karşılaştırması.....	50
Şekil 7.17. FDM'siz ve kompozit FDM'li deşarj testleri karşılaştırması	51

GİZLİ ISIL ENERJİ DEPOLAMA YÖNTEMİ İLE LİTYUM İYON BATARYALARIN ISIL YÖNETİMİ İÇİN KOMPOZİT FAZ DEĞİŞTİREN MALZEMELERİN GELİŞTİRİLMESİ

ÖZET

Uzun yıllardır birincil enerji kaynağı olarak kullanılan fosil yakıtlar, günümüzde çok büyük çevre kirliliğine neden olmaktadır. Bu kirliliğin en büyük etkisi küresel ısınma olarak karşımıza çıkmakta ve gezegenimize geri dönülmez zararlar vermektedir. Bu çevre kirliliği birçok büyük dünya ülkesi tarafından ciddi bir sorun olarak tanınmakta ve karbon emisyonlarının azaltılması konusunda diğer tüm dünya ülkelerine baskı yapmaktadır. Birçok ülke önümüzdeki 10-20 yıl içerisinde karbon ayak izlerini düşürmek için çalışmalar yürütmektedir. Karbon salınımının azaltılması için en etkili yöntem yenilenebilir enerji kaynaklarının çoğalması ve enerjinin en etkili ve verimli biçimde kullanılmasıdır. Bu bağlamda, dünya genelinde yenilenebilir enerji kaynaklarının kurulu gücü hızla artmaktadır.

Yenilenebilir enerji kaynaklarının yaygınlaşması ile elektrik depolama teknolojilerinin gelişimi ve kullanımı gittikçe yaygınlaşmaktadır. Özellikle karbon salınımının düşürülmesi konusunda fosil kaynaklı araçlar yerine elektrikli araçların kullanımının artması elektrik depolamada kullanılan lityum bataryaların üretiminin artmasına sebep olmuştur. Lityum bataryalar elektrik depolama konusunda yüksek kapasite, hızlı şarj, anlık yüksek akım gibi konularda birçok avantaja sahiptir. Ancak lityum bataryaların hassas kimyası, detaylı bir elektrikselsel ve ısı yönetim ihtiyacı doğurmaktadır. Lityum bataryalar elektrikselsel ve ısı olarak iyi yönetilmediklerinde, kapasite kaybı, pil şarjdeşarj çevrim sayısında azalma ve daha ciddi sorun olarak büyük ve söndürülmesi zor yangınlara sebep olmaktadır. Özellikle elektrik ile çalışan araçlarda bu sorunlar hayati risklere sebep olacağından batarya yönetim sistemleri çok daha önemli bir konu haline gelmektedir.

Lityum bataryaların elektrikselsel yönetiminde, Batarya Yönetim Sistemi (BMS) devreleri ve algoritmaları kullanılmaktadır. Bataryaların ısı yönetiminde ise aktif ve pasif soğutma sistemleri sıkça tercih edilmektedir. Alüminyum, bakır gibi ısı iletimi yüksek malzemeler ve gizli ısı depolama teknikleri, pillerde oluşan ısıyı dağıtması amacı ile pasif sistemler olarak kullanılmaktadır. Su ve hava soğutmalı aktif sistemler veya aktif ve pasif sistemlerin hibrit bir şekilde çalıştığı yöntemler batarya depolama sistemlerinde ısı yönetimi sağlamak için kullanılan en yaygın yöntemlerdir.

Bu çalışmada, elektrikli araçlarda kullanılan batarya paketlerinin, piyasada ticari olarak bulunan lityum hücrelerinden küçük ölçekte seri ve paralel bağlantı şekilleri ile oluşturulması ve ısı yönetiminin yapılması için faz değıştiren maddelerin kullanılması konusu incelenmiştir. Bu amaçla, parafin esaslı kompozit faz değıştiren malzemelerin hazırlanması ve karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak, elde edilen kompozit FDM'lerin sahip olduğu erime gizli ısıları ve uygun faz geçiş sıcaklıkları temel alındığında lityum iyon bataryaların ısı yönetim süreçlerinde kullanılabilme potansiyellerinin olduğu değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Batarya Isı Yönetimi, Faz Değıştiren Malzemeler, Gizli Isı Enerji Depolama, Lityum-İyon Batarya



DEVELOPMENT OF COMPOSITE PHASE CHANGE MATERIALS FOR THERMAL MANAGEMENT OF LITHIUM-ION BATTERIES WITH LATEST THERMAL ENERGY STORAGE METHOD

ABSTRACT

Our primal energy source of fossil fuels has been used for a long time thus caused a big environmental pollution problem nowadays. We are now facing huge global warming problems because of this pollution, and it damages our planet with irreversible. This environmental pollution is recognized as a serious problem by many major world countries and puts pressure on all other world countries to reduce carbon emissions. Many countries are working to reduce their carbon footprint in the next 10-20 years. The most effective method to reduce carbon emissions is to increase renewable energy sources and use energy in the most effective and efficient way. In this context, the installed capacity of renewable energy resources is increasing rapidly around the world.

With the spread of renewable energy sources, the development and use of electricity storage technologies is becoming increasingly widespread. The increase in the use of electric vehicles instead of fossil-based vehicles, especially in reducing carbon emissions, has led to an increase in the production of lithium batteries used in electricity storage. Lithium batteries have many advantages in terms of electrical storage, such as high capacity, fast charging, and instantaneous high current. However, the delicate chemistry of lithium batteries requires detailed electrical and thermal management. When lithium batteries are not well managed electrically and thermally, they cause capacity loss, a decrease in the number of battery charge-discharge cycles, and more seriously it can lead hard-to-extinguish fires. Since these problems will cause life-threatening risks, especially in electric-powered vehicles, battery management systems become a much more important issue.

Battery Management System [BMS] circuits and algorithms are used in the electrical management of lithium batteries. Active and passive cooling systems are frequently preferred in the thermal management of batteries. Materials with high heat conduction such as aluminum and copper and latent heat storage techniques are used as passive systems to dissipate the heat generated in batteries. Water and air-cooled active systems or hybrid active and passive systems are the most common methods used to provide thermal management in battery storage systems.

In this thesis, the creation of battery packs used in electric vehicles from commercially available lithium cells with series and parallel connections on a small scale and the use of phase change materials for thermal management were examined. For this purpose, the preparation and characterization of paraffin-based composite phase change materials were carried out. As a result, it was evaluated that the obtained composite PCMs have the potential to be used in thermal management processes of lithium-ion batteries, based on their latent heat of melting and appropriate phase transition temperatures.

Keywords: Thermal Management of Battery Packs, Phase Change Material, Latent Heat Storage, Lithium-Ion Batteries



1. GİRİŞ

Gelişen teknoloji ve insan hayatını kolaylaştırmaya yönelik icatlar, enerjiye olan ihtiyacı her geçen gün arttırmıştır [1]. Bu enerji ihtiyacının büyük kısmı yakın tarihimizden beri öncelikli olarak fosil yakıtlardan sağlanmıştır. Fosil yakıtların büyük ölçeklerde kullanımı atmosferdeki sera gazı emisyonunun artmasına dolayısıyla küresel ısınma problemine neden olmuştur [2]. Büyük ölçüde artan bu çevre kirliliği ve küresel ısınma problemi, gelişmiş dünya ülkelerinin gündeminde önemli bir yer tutmakta ve çözüm arayışı için tüm ülkeler üzerinde büyük baskı oluşturmaktadır. Bu ciddi çevre sorununun çözümü için birçok ülke bu yüzyılın ortasına kadar karbon emisyonlarını azaltarak karbon sıfır hedeflerine ulaşacağını vaat etmiştir [3]. Karbon sıfır hedefine ulaşmanın yolu enerji ihtiyacı için fosil kaynaklı yakıtların kullanımının azaltılarak, enerji ihtiyacının büyük bir kısmının ya da tamamının yenilenebilir enerji kaynaklarından sağlanmasıdır. Bu nedenle, dünya enerji tüketimine bakıldığında yenilenebilir enerji kaynaklarının kurulumu ve kullanımı artış göstermektedir [4].

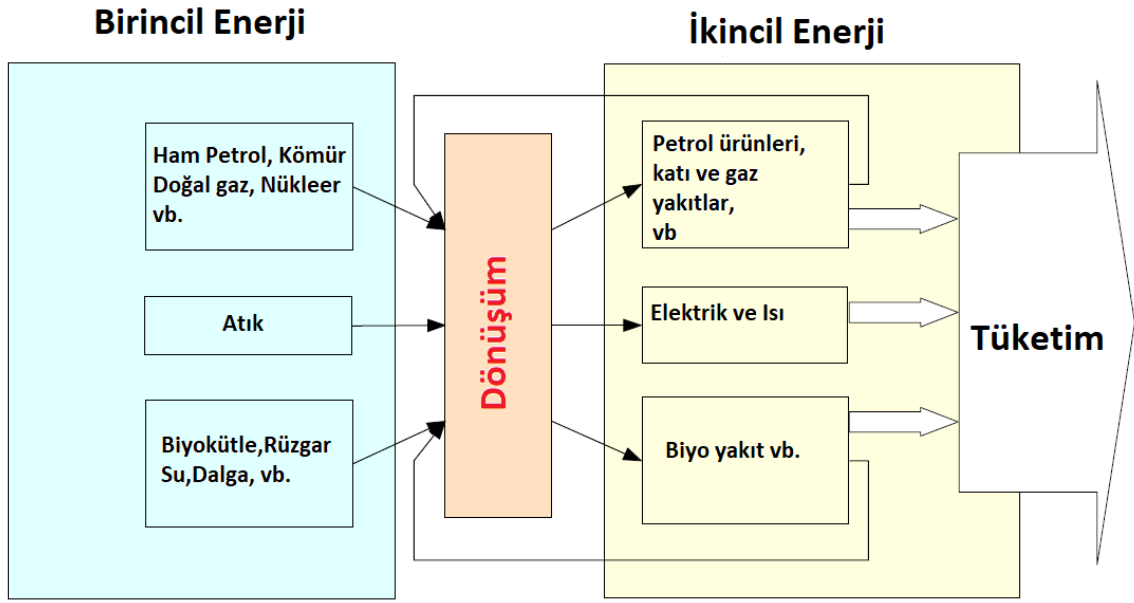
Ulaşım sektörü karbon salınımlarının yaklaşık olarak %27'sini oluşturmaktadır [5]. Bu nedenle, ulaşım sektöründe elektrikli araçların tercih edilmesi, karbon salınımının azaltılmasında büyük önem taşımaktadır. Elektrikli araçlarda çoğunlukla Lityum-iyon bataryalar (Lib) tercih edilmektedir. Lityum iyon bataryalar tüm avantajlarına rağmen çalışma sıcaklığı konusunda çok hassas olmaktadır. Lityum bataryaların kullanım ömrünün uzatılması ve yangın gibi risklerin ortadan kaldırılması konusunda, ısı yönetim sistemlerinin kullanılması büyük bir öneme sahiptir.

Bu tez çalışmasında, uygun ısı depolama kapasitesine sahip organik bir kompozit faz değiştiren malzemenin tasarlanması ve üretilmesi hedeflenmiştir. Sonraki aşamada üretilen kompozit faz değiştiren malzemenin morfolojik, kimyasal ve ısı karakterizasyonları belirlenerek laboratuvar ortamında uygun ekipmanlar ile ticari bir batarya paketi üzerinde deneysel bir sistemde testi gerçekleştirilmiştir.



2. BİRİNCİL VE İKİNCİL ENERJİ KAYNAKLARI

Enerji, hangi formda olursa olsun insanlık için her zaman önemli bir ihtiyaç olmuştur. Enerji, küresel ölçekte en yaygın olarak kullanılan ortak bir ihtiyaçtır. Enerji, temel olarak iki ana başlıkta toplanmaktadır. Bunlar, birincil ve ikincil enerji kaynaklarıdır. Birincil enerji, herhangi bir dönüşüm işlemine uğramamış, toplanarak ya da çıkartılarak elde edilen enerjidir. İkincil enerji ise birincil enerjinin dönüştürülerek elde edildiği enerji olarak bilinmektedir [6]. Şekil 2.1’de birincil ve ikincil enerji kaynakları görülmektedir.

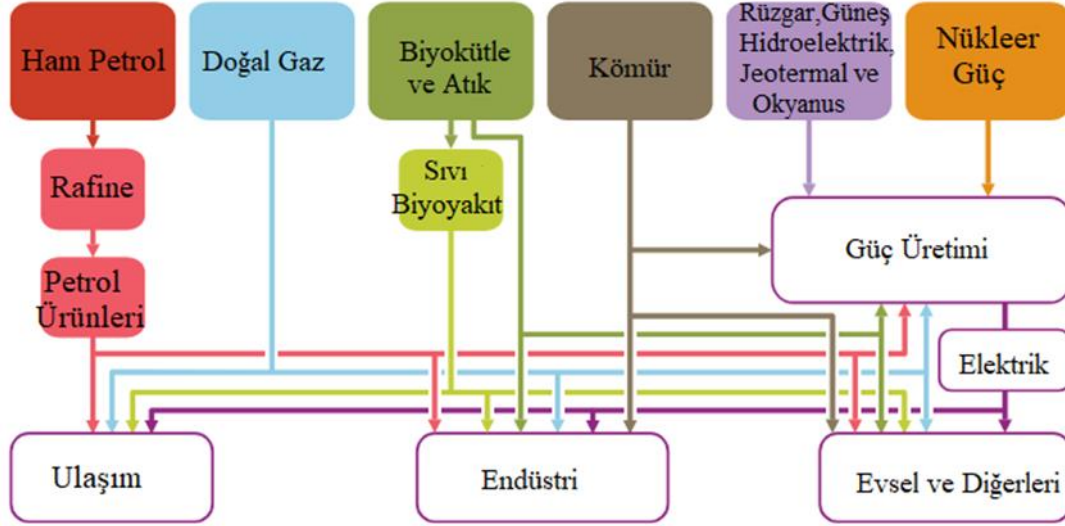


Şekil 2.1. Birincil ve ikincil enerji kaynakları [7]

Birincil enerji kaynaklarında belirleyici unsur, kaynağın çıkartılarak ya da toplanarak elde edilebilir olmasıdır. Birincil enerji kaynaktan direkt olarak elde edilir. Bu elde etme neticesinde, enerjinin fiziksel ya da kimyasal karakteristiğinde herhangi bir değişim olmaz. Bu duruma örnek olarak kömür verilebilir. Kömür yeraltından çıkarıldığında sadece temizlenir ve taş kaya gibi enerji içeriği olmayan diğer materyallerden arındırılır. Fakat kömür yer altından çıkarıldığında enerji potansiyelinin fiziksel veya kimyasal şekli değişmemiştir. Birleşmiş milletlerdeki tanıma bakıldığında temizleme, ayıklama, sınıflandırma bir enerji dönüşüm prosesi olarak tanımlanmamıştır. Bu tanıma göre de kömür ikincil enerji grubunda sayılmamaktadır.

İkincil enerji kaynaklarının belirleyici unsuru ise dönüşümdür. Enerji dönüşümü diğer bir formda bulunan enerji kaynağından başka bir tür enerji elde edilmesidir. Birincil enerji kaynaklarından olan fosil yakıtlar, güneş radyasyonu ya da nükleer enerji gibi kaynaklar

elektrik, ısı gibi bizim için önemli olan diğer kaynaklara dönüştürülebilir. İnsanlar tarafından bir enerji kaynağından başka bir enerji kaynağına dönüştürülmüş tüm enerji ikincil enerji olarak adlandırılmaktadır. Enerji kaynaklarının toplanması, çıkartılması ve dönüştürülmesindeki yegâne amaç, enerjinin ticaret ve ihtiyaçların karşılanması içindir.



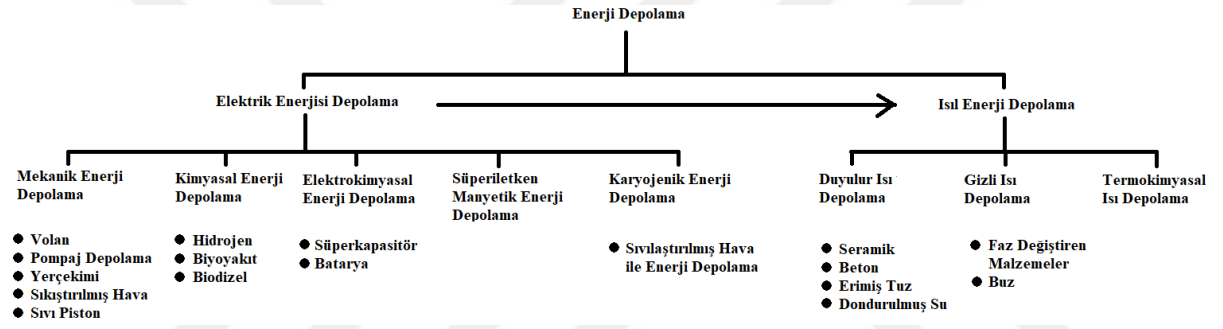
Şekil 2.2. Birincil enerji kaynaklarının çoğunlukla kullanıldığı sektörler [8].

Yukarıdaki şekilde ham petrol, doğal gaz, biyokütle, kömür, yenilenebilir enerji kaynakları, nükleer güç gibi birincil enerji kaynaklarının kullanıldığı prosesler ve ikincil enerji kaynaklarına dönüştürüldükten sonra kullanıldığı sektörler gösterilmiştir. Petrol ürünleri çoğunlukla ulaşım sektöründe kullanılırken, diğer birincil enerji kaynakları endüstrinin ve evsel ihtiyaçların karşılanması için güç üretim tesislerinde ikincil enerji kaynağı olan elektriğe dönüştürülmektedir.

3. ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMLERİ

Termodinamik olarak hiçbir sistem %100 verim ile çalışmamaktadır. Her zaman bir kayıp mevcuttur. Genellikle bu kayıp ısınma yolu ile olur ve atık ısı olarak sistemin bulunduğu çevreye verilir. Ancak, bu atık ısı depolanıp başka proseslerde tekrar kullanılırsa önemli bir enerji kaynağı haline gelebilir. Günümüzde, özellikle birçok dünya ülkesi karbon salınımını azaltmayı hedeflediğinden, enerji depolama sistemleri ayrıca daha önemli bir konu haline gelmektedir.

Günümüzde birçok farklı teknoloji enerji depolama amacı ile kullanılmaktadır. Bu teknolojiler enerjinin depolanma amacına göre geniş bir yelpazede incelenebilmektedir. Genellikle enerji depolama elektriksel ve ısı depolama şeklinde olmaktadır. Şekil 3.1’de farklı enerji depolama sistemleri bir şema halinde gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Enerji depolama teknolojileri [9]

Enerji depolama sistemlerini elektriksel enerji depolama ve ısı depolama şeklinde iki başlık altında incelenebilir. Elektriksel enerji depolama kendi içinde, mekanik enerji depolama, kimyasal enerji depolama, elektrokimyasal enerji depolama, süperiletken enerji depolama ve kriyojenik enerji depolama olarak sınıflandırılabilir. Isıl depolama ise, duyulur ısı depolama, gizli ısı depolama ve termokimyasal ısı depolama şeklinde sınıflandırılabilir.

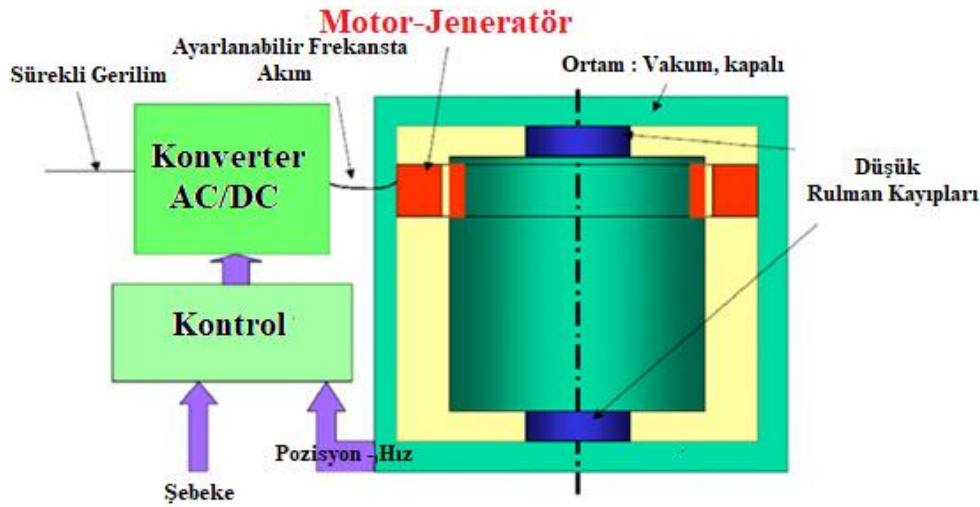
Özellikle enerji ihtiyacının anlık olarak değişken olması ve yenilenebilir enerji kaynaklarının üretkenliğinin çevresel faktörlerden etkilenecek anlık büyük değişiklikler göstermesi, güç hatlarının dengelenmesini zorlaştırmaktadır. Bu nedenle, enerji depolama sistemlerinin kullanılarak enerji arz-talep dengesinin kurulması neredeyse bir zorunluluk haline gelmiştir [9]. Enerji depolama sistemlerinde genel konsept, enerjinin belirli bir zamanda üretilerek depolanması ve ihtiyaç olan başka bir zamanda hızlıca kullanılması üzerinedir. Enerji depolama sistemlerinin birçok faydası mevcuttur. Bunların en başında enerji yönetimini kolaylaştırması, atık enerjiyi azaltması ve enerji sistemlerinde verim artışı sağlaması örnek olarak gösterilebilir.

3.1. Mekanik Enerji Depolama

Mekanik enerji depolama sistemleri, elektrik enerjisini kolayca depolamaya imkân veren elektromekanik sistemlerdir. Volan, sıkıştırılmış hava, su depolamalı sistemler, yer çekimi güç modülleri gibi sistemler bu tip depolamaya örnek olarak gösterilebilir.

3.1.1. Volan enerji depolama sistemleri

Volan enerji depolama sistemleri kapalı ve sürtünmeyi azaltmak için vakumlu bir ortamda bulunan volan adı verilen döner kütlelere sahip sistemlerdir. Bu sistemlerde bir motor-jeneratör ortak sistemi döner bit kütleyle bağlı şekilde çalışır. Şarj esnasında motor, rotoruna bağlı kütleyi döndürür kinetik enerji kazanan rotor enerji ihtiyacı olduğunda yani deşarj durumunda motoru geri döndürerek kütlede kazandığı kinetik enerjisi elektrik enerjisine çevirir. Bu sistemlerde kayıpları en aza indirmek için döner kütle düşük basınçlı ortamda tutulur. Şekil 3.2’de örnek bir volan enerji akümülatörü gösterilmektedir. Bu sistemlerin çevrim sayısı yaklaşık 10000 ile 100000 çevrim arasındadır ve sistem verimi yaklaşık olarak % 85’dir [10].



Şekil 3.2. Volan enerji akümülatörü [10]

3.1.2. Pompaj depolamalı hidroelektrik enerji sistemleri

Pompaj depolamalı hidroelektrik santralleri (PDHES) yer çekimini kullanarak enerji depolamayı sağlayan sistemlerdir. Bu sistemlerde bir üst rezervuar ve alt rezervuar bulunur. Enerji üretiminin yüksek olduğu saatlerde su pompalar yardımı ile üst rezervuara pompalanır ve burada depolanır. Enerji üretiminin az ve enerji ihtiyacının yüksek olduğu saatlerde depolanmış su hidroelektrik santralinin jeneratörlerinden geçirilerek elektrik enerjisinin üretimi sağlanır. Şekil 3.3’te tipik bir pompaj depolamalı hidroelektrik santrali (PDHES) şeması

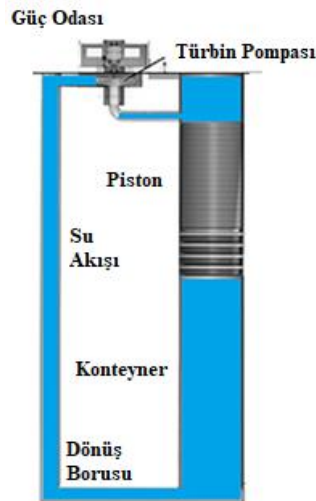
gösterilmiştir. Pompaj depolamalı sistemler bilinen en eski enerji depolama sistemlerinden birisidir. Bu depolama sistemlerinde verim yaklaşık %70-85 arasında değişmektedir [10].



Şekil 3.3. Pompaj depolamalı hidroelektrik santrali şeması [11]

3.1.3. Yerçekimi enerji depolama sistemleri

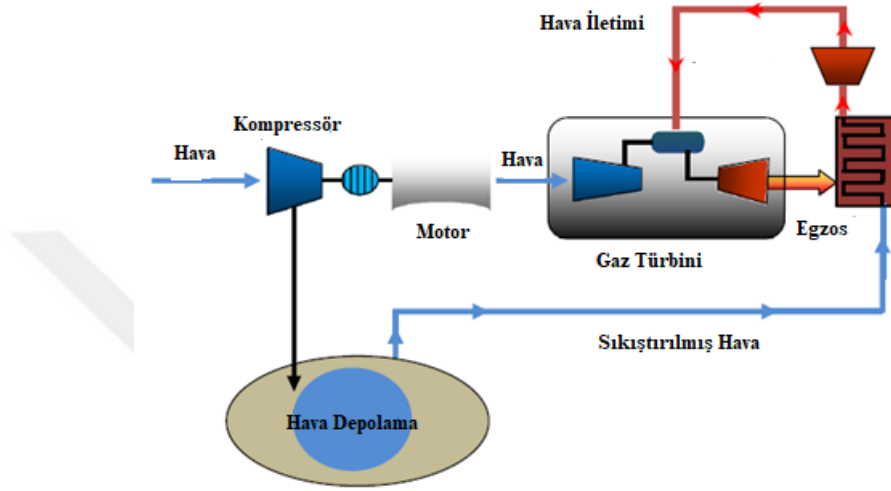
Jeolojik oluşumlar bazı bölgelerde PDHES kullanımını zorlaştırmaktadır. Bu gibi durumlara alternatif olarak birçok sistem geliştirilmiştir. Bu sistemlerin ortak özelliği yer çekimidir. Bir yer çekimi güç modülü Şekil 3.4'te gösterilmiştir. Bu sistemlerde büyük bir silindir içerisinde bir piston ve su sistemi bulunur. Bu sistemde şarj esnasında pistonun alt kısmına su pompalanır ve pistonun yukarı çıkması sağlanır. Deşarj esnasında ise piston aşağı bırakılır ve pistonun ağırlığı ile önündeki su geri dönüş borusu üzerinden bir türbin jeneratör sistemine basınçlı bir şekilde itilir. Dönen jeneratör sistemi elektrik üreterek şebekeye iletimini sağlar. Bu sistemde, sistem içerisine su ilk seferde doldurulur ve kapalı çevrimde aynı su dönüşümlü olarak kullanılır.



Şekil 3.4. Yerçekimi enerji depolama sistemi çalışma prensibi [12]

3.1.4. Sıkıştırılmış hava enerji depolama sistemleri

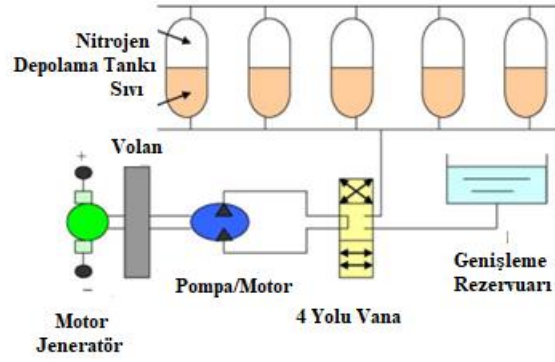
Sıkıştırılmış hava enerji depolama sistemlerinde, enerji üretiminin tepe yaptığı zamanlarda, hava kompresörler ile sıkıştırılarak bir rezervuara depolanır. Bu rezervuarlar, yer altında mağaralar, yer üstünde boru hatları ya da hava tankları olabilmektedir. Enerji ihtiyacı olduğunda sıkıştırılmış ve depolanmış hava, türbin-jeneratör grubundan geçirilerek enerji üretimi sağlanır. Şekil 3.5'te sistemin çalışma prensibi gösterilmiştir. Bu tip sistemlerde, verim %70 civarındadır ve sistemin kullanım ömrü yaklaşık 40 yıl kadardır [13].



Şekil 3.5. Sıkıştırılmış hava depolama sistemi [13]

3.1.5. Sıvı piston enerji depolama

Sıvı piston enerji depolama sisteminde bir pompa-motor grubu, 4 yollu vana sistemi, genişleme rezervuarı ve sıvı depolama tankı bulunur. Sistemin çalışma prensibi Şekil 3.6'da şematik olarak gösterilmiştir. Bu sistemde, akışkan olarak genellikle azot kullanılır. Şarj esnasında bir pompa azotu sıkıştırır ve sıkıştırılmış azot dört yollu vana ile depolama tanklarına yönlendirir. Bu sistemde basınç 100-250 bar arasında olmaktadır. Depolama tankında azot sıvı ve gaz halinde bulunur. Enerji ihtiyacı olduğunda sıkıştırılmış azot dört yollu vana ile pompaya yönlendirilir ve pompa basıncın etkisi ile dönerek şaftına bağlı olan motor ile enerji üretir. Bu sistemler de verim yaklaşık olarak %73'tür [14].



Şekil 3.6. Sıvı piston enerji depolama sistemi [14]

3.2. Kimyasal Enerji Depolama

Kimyasal enerji depolama, enerjinin depolanması ve geri kullanımı için elektrik enerjisi kullanarak kimyasal bileşiklerin üretildiği tüm sistemleri kapsamaktadır. Genellikle, enerji depolama için kullanılan kimyasal bileşiklerin enerji yoğunluğu diğer enerji depolama teknolojilerinden olan pompaj hidroelektrik depolama, basınçlı hava depolama gibi sistemlerden daha fazla olmaktadır. Bu sebeple, kimyasal enerji depolama sistemleri daha ideal depolama sistemleri olarak kullanılmaktadır. Ayrıca, günümüzde hidrojen, metan, hidrokarbonlar, metanol, bütanol ve etanol enerji depolama uygulamalarında kendilerine yer bulmaktadır. Ancak, bütanol ve etanol çoğunlukla biyokütlenin fermantasyonu sonucunda elde edildiğinden elektrik depolama teknikleri olarak kabul edilmemektedir. Bu sayılan maddelerin içerisinde hidrojen, elektrik depolama ve tekrar kullanma konusunda en hızlı çözüm olarak görülmektedir.

3.2.1. Hidrojen enerji depolama

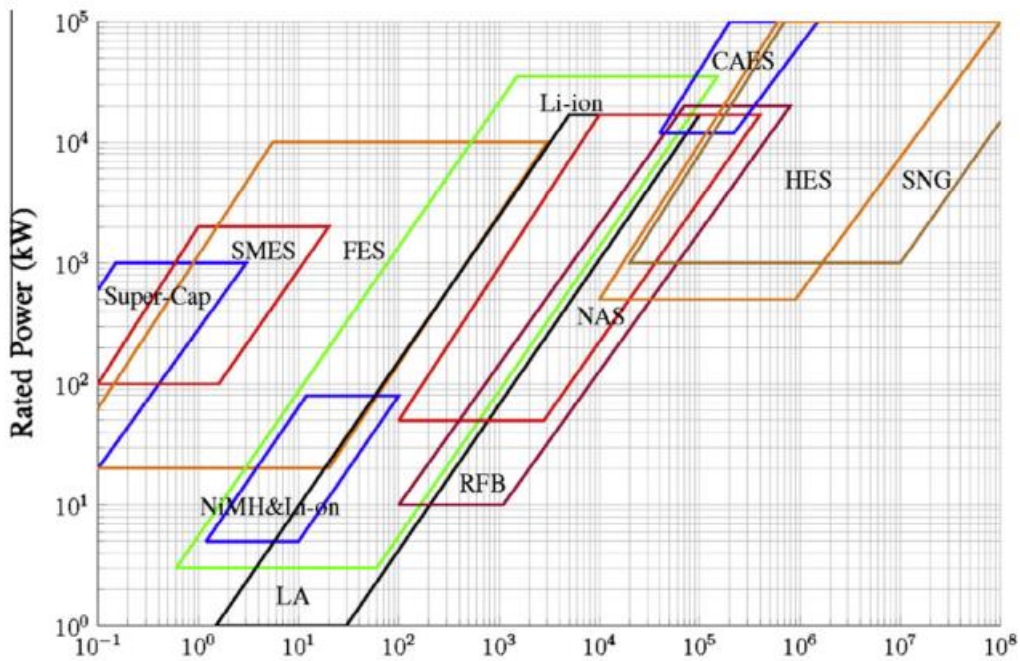
Hidrojen enerji depolama sistemleri en popüler kimyasal enerji depolama sistemleri arasındadır. Hidrojen, depolaması ve taşınması kolay, verimli, çok yönlü temiz bir enerji taşıyıcısıdır [14]. Ayrıca, hidrojen yüksek enerji yoğunluğuna sahiptir. Hidrojen, sıkıştırılmış gaz, sıvılaştırılmış gaz, metal hibrit ya da karbon nano yapılar içerisinde depolanabilmektedir. Deşarj fazında hidrojen, yakıt hücrelerinde ya da direk yakılarak elektrik eldesi için kullanılabilir. Hidrojen ile depolamanın en büyük dezavantajı verim kaybının büyük olmasıdır. Örneğin, elektroliz aşamasında yaklaşık %60, taşıma ve depolama sırasında da yaklaşık %10 verim kaybı yaşanmaktadır.

3.3. Elektrokimyasal Enerji Depolama

Elektrokimyasal enerji depolamayı aşağıdaki üç başlıkta inceleyebiliriz. Bunlar,

3.3.1. Süper kondansatör enerji depolama

Elektrokimyasal kondansatör olarak da bilinen süper kapasitörler yakın zamana kadar pek ilgi çekmemektedir. Ancak, günümüzde hızlı şarj ve deşarj konusunun önem kazanmasıyla birlikte süper kondansatörler ilgi çekici bir konu haline geldi. Süper kapasitörler lityum iyon bataryalara alternatif olabilmesi için geliştirilmektedir. Normal kapasitörlerin üretiminde kullanılan elektrodlar arasındaki katı yalıtkan malzemeler yerine elektrolit solüsyonları kullanılarak kapasitörlerde çok ciddi kapasite artışı sağlanmıştır. Böylece, kapasitörlerin enerji yoğunluğu artırılmış ve daha kompakt bir yapı haline gelmiştir. Süper kapasitörler çok büyük enerji yoğunluklarının depolanmasına imkân sağlamakta ve güç ihtiyacındaki değişimlere saniyenin yüzde biri kadar bir gecikme ile cevap verebilmektedir [15].



Şekil 3.7. Farklı enerji depolama sistemlerinin karşılaştırılması [15]

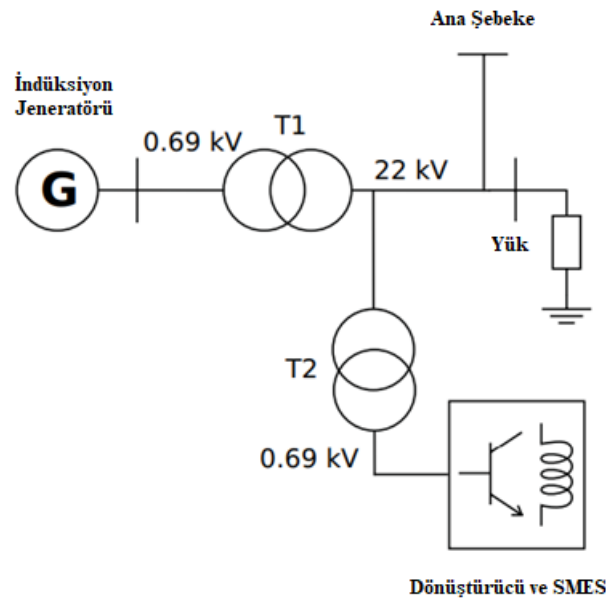
3.3.2. Batarya enerji depolama

Batarya ile enerji depolama sistemleri bilinen en eski kimyasal enerji depolama sistemlerindendir. Elektrokimyasal bir cihaz olan bataryalar, elektrik enerjisini elektrokimyasal reaksiyonlar ile bünyesinde tutma ve ihtiyaç anında sisteme geri verebilme yeteneğine sahiptir. Elektrokimyasına ve çevrim operasyonuna bağlı olarak bataryaların verimi yaklaşık %60–80 aralığındadır. Günümüzde, güç uygulamalarında batarya sistemleri kendine geniş bir kullanım

alanı bulmuştur. Sodyum sülfür, sodyum nikel klorit, çinko-hava, kurşun asit, ve lityum iyon gibi birçok elektrokimyasal batarya çeşidi bulunmaktadır.

3.4. Süperiletken ile Enerji Depolama

Süper iletken enerji depolama sistemleri, kriyojenik olarak soğulmuş süperiletken malzemelerde manyetik alanı kullanarak enerji depolama imkânı veren sistemlerdir. Bu sistemlerde, enerji depolama, neredeyse $-270\text{ }^{\circ}\text{C}$ ye soğutulmuş, iç direnci sıfıra yakın olan süper iletken kabloları uygulanan doğru akım (DC) ile görülmektedir. Süper iletken enerji depolama sistemleri temel olarak üç kısımdan oluşmaktadır. Bunlar, süperiletken bobin, güç düzenleme sistemi ve kriyojenik soğutma ünitesidir. Kriyojenik durumun korunması zor olduğundan ve rölelerin kendi iç direncinin olması büyük enerji kayıplarına yol açmaktadır [16]. Bu durum sistemin toplam verimini düşürmektedir.



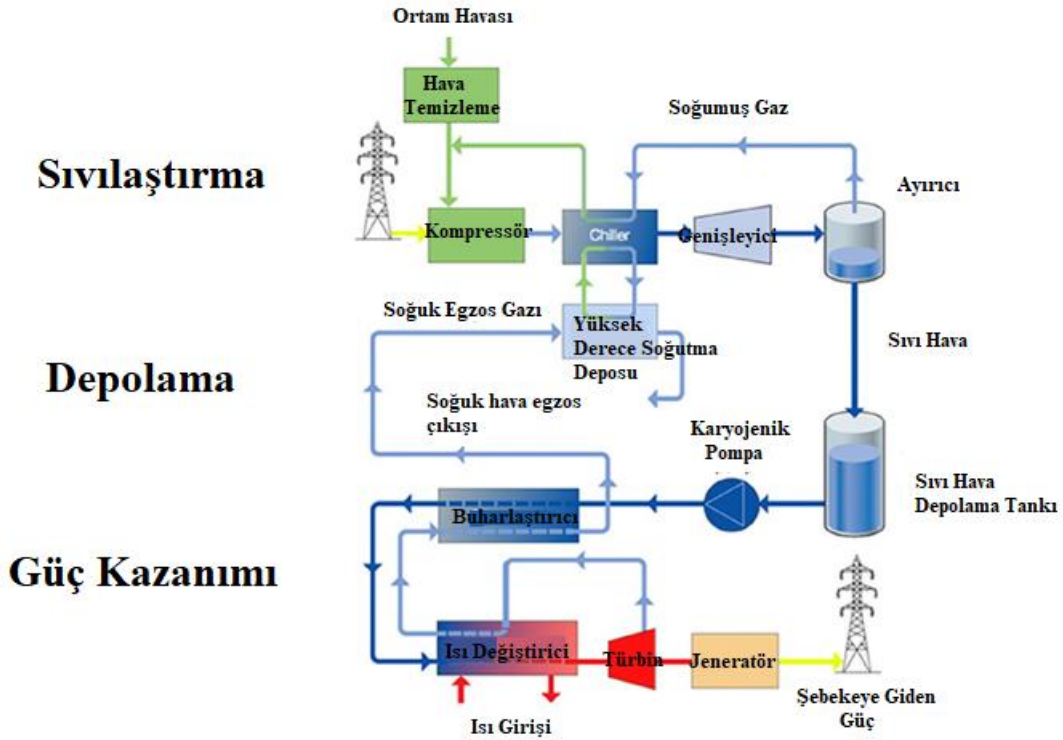
Şekil 3.8. Sistemin tek hat şeması [16].

3.5. Kriyojenik Enerji Depolama

3.5.1. Sıvı hava enerji depolama

Sıvı hava enerji depolama sistemi, adından da anlaşılacağı üzere enerjiyi sıvılaştırılmış hava formunda depolayan sistemlerdir. Bu sistem, kriyojenik enerji depolama sistemi olarak da adlandırılır. Sıvı hava enerji depolama sistemlerinin çalışmasında 3 temel aşamada bulunmaktadır. Bunlar; depolama, saklama ve deşarjdır (Şekil 3.9). Hava sıvılaştırıldığında gaz

fazına göre 1/700 oranında sıkıştırılabilmektedir. Bu da depolama açısından büyük avantaj sağlamaktadır. Enerji üretiminin yoğun olduğu zamanlarda elektrik enerjisi havayı sıkıştırarak kompresörlere güç vermek için kullanılır. Sıkıştırılan hava tanklarda depolanır. İhtiyaç anında depolanmış sıvı hava, direkt olarak soğutma ve iklimlendirme sistemlerinde kullanılabildiği gibi, elektrik üretmek içinde de kullanılabilir. Isı değiştiricilerden geçirilen sıvı hava ortamdan ısı alarak genişler ve türbinler aracılığı ile elektrik enerjisine dönüştürülebilir. Bu sistemlerde verim yaklaşık olarak 40-70 % arasındadır.



Şekil 3.9. Sıvı hava depolama proses şeması [9]

3.6. Isıl Enerji Depolama

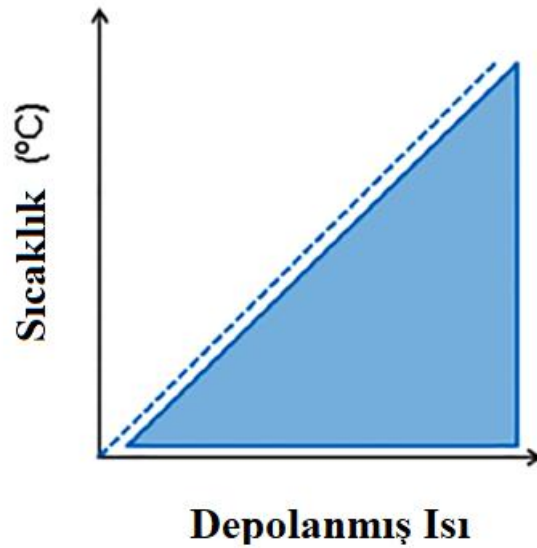
Isıl enerji depolama, enerji depolamanın en çok uygulanan teknolojilerinden birisidir. Isıl enerji depolama sistemleri, elektriği veya atık ısıyı bünyelerinde depolamasına imkân sağlayan donanımlara sahip sistemlerdir. Bu sistemlerde depolanan ısıl enerji gerektiğinde kullanılmak üzere bekletilir. Isıl enerji depolamayı 3 başlık altında inceleyebiliriz. Bunlar,

- Duyulur ısı depolama
- Termokimyasal ısı depolama
- Gizli ısı depolamadır.

Kullanılacak olan ısı enerji depolama sisteminin seçimi bazı faktörlere göre değişiklik göstermektedir. Bu faktörler depolama sıcaklık aralığı, özel uygulama alanı ve depolama ortamıdır [9]

3.6.1. Duyulur ısı depolama

Bu enerji depolama yönteminde istenilen sıcaklık aralığında herhangi bir faz değişimi görülmez. Duyulur ısı depolama en basit ve sıklıkla kullanılan ısı depolama sistemidir. Beton, su, kum, taş yatağı, yağ, toprak ve eriyik tuz, yüksek sıcaklık depolama için sıklıkla kullanılan malzemelerdir. Eriyik tuz, yoğunlaştırılmış güneş enerjisi depolama sistemlerinde kullanılmaktadır. Bu depolama sistemlerinin en büyük dezavantajı yaklaşık 100 °C gibi yüksek donma sıcaklığına sahip olmalarıdır. Bu yüksek donma noktası enerji kayıplarına sebep olmaktadır [17].



Şekil 3.10. Duyulur ısı depolama diyagramı [17]

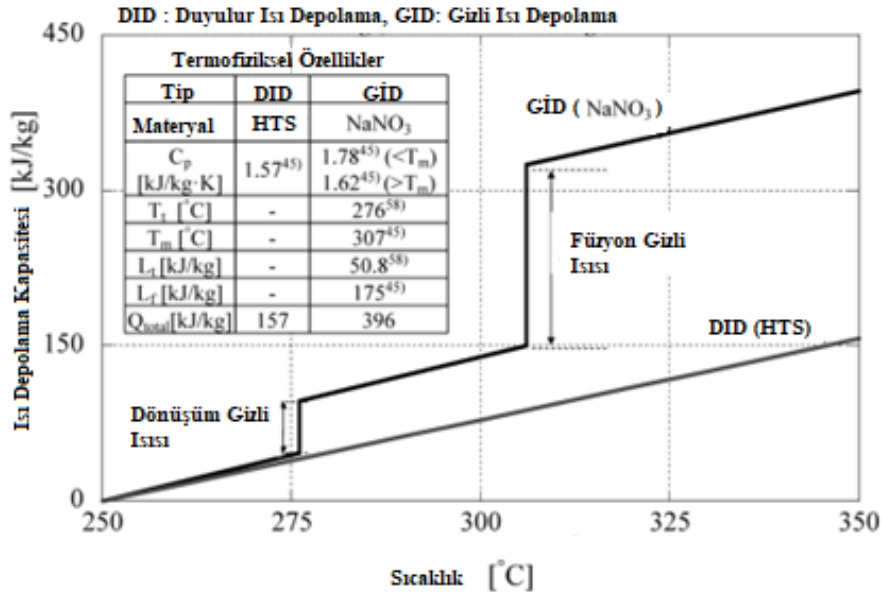
3.6.2. Termokimyasal ısı depolama

Termokimyasal ısı depolama prensibi geri çevrilebilir bir kimyasal reaksiyona dayanır. Bu reaksiyonda bir termokimyasal materyal, enerjiyi absorbe ederek iki kimyasal komponente dönüştürür. Bu iki kimyasal komponent ayrıca depolanıp saklanabilir. Daha sonra ihtiyaç anında bu iki kimyasal materyal karıştırıldığında tersine bir kimyasal reaksiyon başlar ve reaksiyon öncesindeki termokimyasal materyal tekrar oluşur. Bu reaksiyon sonucunda depolanmış olan ısı ortama tekrardan verilir. Bu reaksiyonun denklemi, $C + Isı \rightleftharpoons A + B$

şeklinde ifade edilebilir. Burada C, termokimyasal materyali, A ve B tepkime sonrası komponentleri ifade etmektedir. A maddesi hidroksit, hidrat, karbonat, amonit vb. olabilirken, B maddesi su, karbonmonoksit, amonyum, hidrojen gibi maddeler olabilmektedir. Genellikle C, katı ya da sıvı formada olurken A ve B maddeleri herhangi bir fazda olabilmektedir. Genel olarak, termokimyasal ısı depolama 3 fazda gerçekleşmektedir. Bu fazlar; şarj, depolama ve deşarjdır.

3.6.3. Gizli ısı depolama

Gizli ısı depolama teknolojisi, faz değiştiren malzemelerin katıdan sıvıya, katıdan katıya veya bunların tam tersi şeklinde gerçekleşen faz değişimi sırasında ısının depolanması veya salınması prensibine dayanmaktadır. Şekil 3.11’de duyulur ve gizli ısı depolama sistemlerinin 250–350 °C aralığında kümülatif ısı depolama kapasitelerinin karşılaştırılması verilmiştir.



Şekil 3.11. Duyulur (SHS) ve gizli ısı (LHS) sistemlerinin ısı kapasitesi yönünden karşılaştırılması [18]

Burada; KNO₃, NaNO₂, NaNO₃ duyulur ısı depolama sistemi (HTS) olarak seçilmiştir. NaNO₃ ise gizli ısı depolama sistemi olarak seçilmiştir. Bu örnekte ısı depolama kapasiteleri, LHS ve SHS için 396 ve 157 kJ/kg’dır [18].

4. ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA LİTYUM İYON BATARYA KULLANIMI

Elektrikli araçların tarihine bakıldığında, ilk elektrikli araçların 19. Yüzyılın başlarına kadar uzandığı görülmektedir. 1888 yılında Alman bilim adamı Andreas Flocken elektrik ile çalışan ilk arabayı yaptığı düşünülmektedir [19]. İlk dönem elektrikli araçlarda kurşun asit bataryalar kullanılmaktaydı. İlk elektrikli araçları takip eden yıllarda içten yanmalı motorların gelişmesi, yakıt fiyatlarının ucuz olması ilgiyi içten yanmalı motorlu araçlara kaydırmıştı. Ayrıca, elektrikli araçların o dönemlerde batarya kapasitesinin düşük olması dolayısı ile sürüş menzilinın kısa olması ve batarya fiyatlarının fosil yakıtlara oranla çok yüksek olması, elektrikli araçların tercih edilmemesine neden oldu. 20. Yüzyıla gelindiğinde, gelişen batarya depolama teknolojileri, yüksek enerji depolama kapasitelerine ulaşmış ve ucuzlayarak birçok teknolojik cihazda kendine kullanım alanı bulmuştur. Lityum iyon bataryalardaki gelişmeler elektrikli araçların tekrar gündeme gelmesine yol açmıştır. Lityum iyon bataryalar, yüksek enerji yoğunluğu, hızlı şarj ve deşarj, ucuz maliyet gibi özellikleri ile ön plana çıkmıştır.

4.1. Elektrikli Araç Çeşitleri

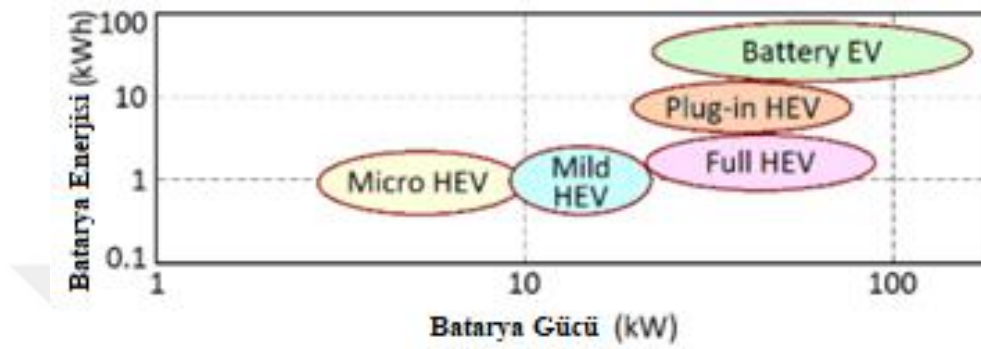
Günümüzde elektrikli araçlar, sıfır karbon emisyonu, düşük bakım ve işletim ücreti, sık sık dur-kalk özelliği, hızlı ve temiz hızlanma, düşük hızlarda bile yüksek tork, rejeneratif frenleme, sessiz sürüş, üstün güvenlik özellikleri, içten yanmalı motorlu araçlara göre daha az mekanik aksam gibi birçok üstün özelliği sebebi ile popülaritesi artmakta ve her geçen gün daha ucuza mal edilebilir olmaktadır. Genel olarak, elektrikli araçlar aşağıdaki şekillerde sınıflandırılabilir [20]:

- Bataryalı elektrikli araçlar
- Hibrit elektrikli araçlar
- Şebeke bağlantılı hibrit elektrikli araçlar
- Yakıt hücreli elektrikli araçlar

4.2.1. Elektrikli araç bataryalarının güç ve enerji kapasitesi

Elektrikli araç bataryalarının belirli hacim ve ağırlıklarda yüksek enerji çıkış gücüne ve yüksek kapasiteye sahip olması beklenmektedir. Hibrit elektrikli araçlarda, aracın hareketi ve iç enerji ihtiyacının yalnızca belirli bir kısmı bataryadan gelmektedir. Tamamen bataryalı elektrikli araçlarda ise, itiş gücünün ve iç enerji ihtiyacının tamamı bataryalardan sağlanmaktadır. Bu bakımdan, tamamen bataryalı elektrikli araçlarda batarya hacmi en büyük olmaktadır. Hibrit elektrikli araçlarda bataryaların şarj olması için gereken enerji içten yanmalı motora bağlı bir

jeneratör tarafından sağlanmaktadır. Bu araçlar, harici bir güç kaynağından şarj olamazlar. Bir elektrikli aracın güç ihtiyacı birçok faktöre bağlı olarak değişmektedir. Bu faktörler araç ağırlığı, aracın boyu, aracın şekli, sürüş yapılan yolun durumu, sürücünün sürüş alışkanlıkları, klima, müzik sistemi, aydınlatma gibi araç içi donanımlardır. Ortalama bir elektrikli aracın güç tüketimi yaklaşık olarak 160-200 Wh/km olmaktadır. Aşağıdaki şekilde çeşitli elektrikli araç türleri için yaklaşık güç ihtiyacı karşılaştırılması verilmiştir [20].



Şekil 4.1. Çeşitli elektrikli araç türleri için batarya gücü ve batarya kapasitesi karşılaştırması [20]

1350 kg ağırlığındaki ortalama bir elektrikli aracın 0'dan 95 km/h hıza 10 sn'de çıkması için gerekli olan enerji yaklaşık 61 kW'tır. Aynı aracın, 95km/h hızdan 5 saniye de durması esnasında frenleme gücü 185 kW'tır. Buradan, anlık frenleme esnasındaki gücün daha yüksek olduğu anlaşılmaktadır. Elektrikli araç bataryalarının kısa sürelerde bu denli yüksek güçleri şarj ve deşarj esnasında karşılayabilmesi beklenmektedir. Aşağıdaki tabloda sıklıkla kullanılan batarya teknolojilerinin karşılaştırılması verilmiştir.

Tablo 4.1. Farklı batarya tiplerinin teknik özelliklerinin karşılaştırılması [20]

Batarya Tipi	Nominal Voltaj (V)	Spesifik Enerji (Wh/kg)	Enerji Yoğunluğu (Wh/L)	Spesifik Güç (W/kg)	Çevrim Ömrü
Pb-Acid	2.1	30-40	100	180	500
Ni-Cd	1.2	50-80	300	200	200
Ni-MH	1.2	60-120	180-220	200-300	<3000
Zebra	2.6	90-120	160	155	>1200
Li-ion	3.6	120-250	200-600	200-430	2000
LiPo	3.7	130-225	200-250	260-450	>1200

*Pb-Acid : Kurşun- Asit Batarya, Ni-Cd : Nikel Kadmiyum Batarya, Ni-MH : Nikel metal hidrür batarya, Zebra : Sıfır emisyon batarya araştırma aktivitesi, Li-ion: Lityum iyon batarya, Li-Po: Lityum polimer batarya

4.3. Lityum İyon Bataryalar

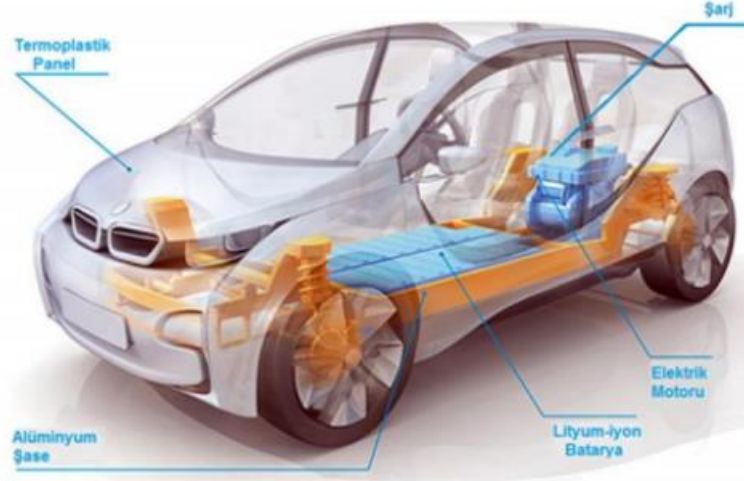
Lityum elementi atom numarası 3 olan periyodik tablodaki metaller arasında 6,941 g/mol moleküler ağırlığı ile en hafif metal elementidir. Lityum -3,05 V ile en yüksek elektrokimyasal potansiyele sahip elementtir. Bu özelliği lityum elementini en reaktif metallerden birisi yapmaktadır. Lityum temelli bataryalar iki tipte bulunmaktadır. Bunlar; Lityum ve Lityum iyondur. Saf lityum batarya hücreleri birincil batarya hücreleridir ve tekrar şarj edilemezler. Lityum iyon batarya hücreleri ile ikincil hücrelerdir ve tekrar şarj edilebilirler. Lityum bataryalar lityum metalini anot olarak kullanır ve lityum iyon bataryalara göre daha yüksek enerji kapasitesine sahiptirler. Lityum birincil bataryalara genellikle savunma sanayi, saatler, kalp pilleri, uzaktan kumanda ve oyuncaklarda kullanılır. Lityum iyon bataryaların kullanımı cep telefonu, laptoplar, tabletler, şarjlı el aletleri, elektrikli araçlar ve yenilenebilir enerji depolama sistemi gibi düşük ve yüksek güçte enerji ihtiyacı olan uygulamalarda artış göstermektedir. Bir lityum iyon hücrenin temel elemanları katot da pozitif, anotta negatif elektrod, sıvı elektrolit ve bir ayırıcıdır. Katot genellikle lityum metal oksit ya da fosfat olabilmektedir. Anot tarafında ise, grafit genellikle standart olarak kullanılmaktadır. Elektrolit sıvısı ise genellikle lityum tuzlarının karışımı şeklinde imal edilmektedir [21].

Lityum iyon bataryalar, gerekli güç değerinin elde edilmesi amacıyla seri ve paralel bağlantılar yapılarak, koruyucu bir paket içerisinde elektrikli araçlara monte edilirler. Aşağıdaki şekilde bir elektrikli aracın temel yapısı görülmektedir.

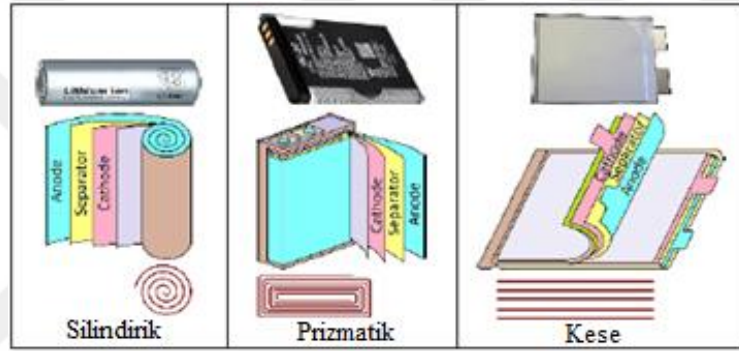


Şekil 4.2. Elektrikli araç bataryası üretim süreçleri [20]

Lityum iyon bataryalar üretilirken çoğunlukla silindirik, prizmatik ve torba şeklinde üretilir. Genellikle, elektrikli araçlarda prizmatik ve torba lityum bataryalar kullanılmıştır. Ancak, günümüzde silindirik hücrelerin kullanımı yaygınlaşmıştır. Şekil 4.4'te lityum iyon hücrelerinin standart konfigürasyonları görülmektedir.



Şekil 4.3. Elektrikli araçlarda genel yerleşim planı [22]



Şekil 4.4. Lityum-iyon hücrelerin standart konfigürasyonu [20]

4.4. Lityum İyon Bataryalar ile İlgili Karşılaşılan Problemler

Elektrikli araçlarda kullanılan lityum batarya paketlerinin en verimli şekilde kullanılabilmesi için bazı teknik sorunların ve güvenlik problemlerinin dikkatle ele alınması gerekmektedir. Bu sorunların başında kapasite azalması, belirli bir çevrim ömrüne sahip olması, şarj ve deşarj oranları ve şarj yöntemleri gelmektedir. Bunlara ek olarak, lityum bataryaların pahalı olması, çevreye olan etkisi ve geri dönüşümü gibi konularda mevcuttur.

4.4.1. Kapasite düşüşü

Şarj edilebilir lityum bataryaların kapasite düşüşü, kullanıma ve zamana bağlı olarak bataryanın kullanılabilir enerji ve kapasitesinde geri döndürülemez kayıplar olarak tanımlanabilir. Bataryanın enerji kapasitesindeki düşüş elektrikli aracın menzilin de düşmesine, güç kapasitesindeki düşüş ise aracın hızlanmasında ve rejeneratif frenlemede batarya performansının düşmesine neden olur. Bu performans kaybının nedeni batarya hücrelerini oluşturan anot, katot, elektrolit, ayırıcı ve akım toplayıcılardaki bozulma ile alakalıdır. Bir

batarya genellikle başlangıç kapasitesinin %80'ine kadar kullanılabilir sayılmaktadır. Genellikle, bu sorunun 5 ile 10 yıl arasında olan batarya ömrü sürecinde ortaya çıkmaması için batarya paketlerinin kapasiteleri belirli oranda büyük imal edilir. Böylece, kapasite de düşüş olduğunda araç için taahhüt edilen 5-10 yıl arası menzil, sınırlar dahilinde kalır.

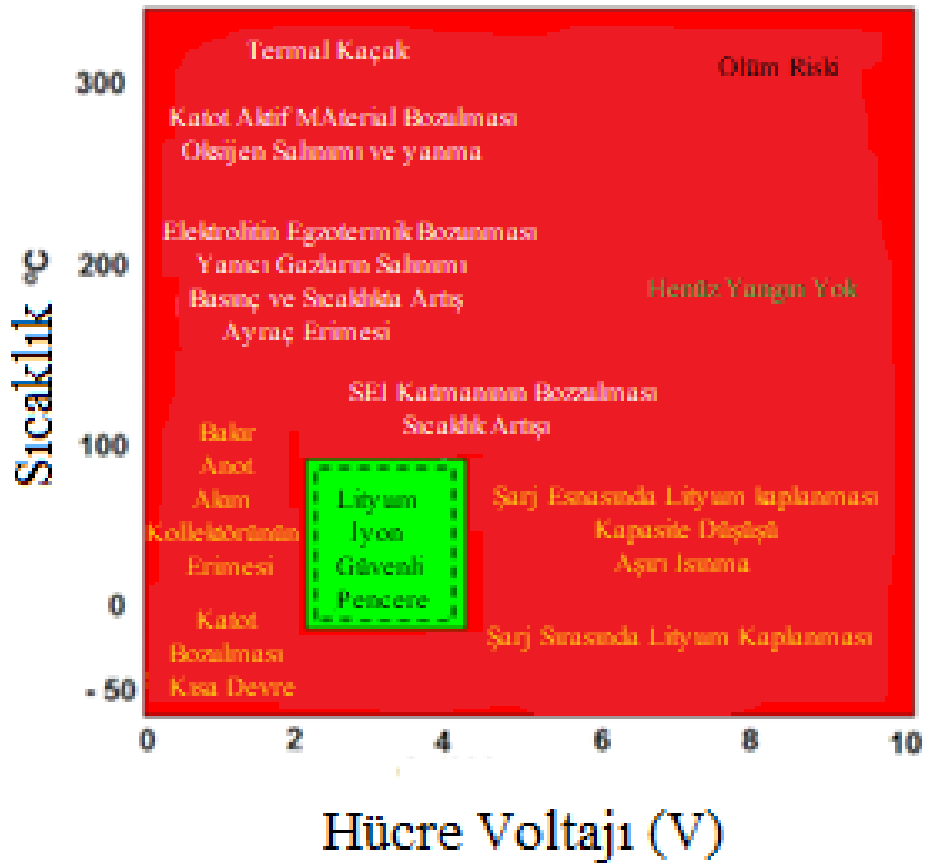
4.4.2. Güvenlik sorunları

Literatüre bakıldığında lityum iyon bataryalar ile ilgili olarak 1990 yıllarının başlarından beri raporlanan birçok olayın olduğu görülmektedir. Bu raporlanan olaylar arasında cep telefonu, dizüstü bilgisayarlar, hava taşıtları ve elektrikli araçlar gibi ekipmanlar da vardır. Lityum iyon bataryalar, küçük hacimlerde büyük enerji yoğunluğuna sahiptirler. Cep telefonu ya da elektrikli araçlar gibi ekipmanların güç ihtiyacının karşılanmasında, lityum iyon bataryalardan kontrollü bir şekilde güç aktarımı gerçekleşir. Ancak, aracın ya da ekipmanın hasar aldığı durumlarda kısa devre gibi durumlar oluştuğunda, enerji, kontrolsüz ve yoğun bir şekilde akar. Bu durumda, lityum iyon pil hücreleri ya patlar ya da yangın meydana gelir. Lityum iyon bataryalar ile ilgili en büyük sorunların başında, yanmakta olan batarya hücreleri yangın söndürücü ile söndürülse bile diğer hücreler aşırı ısındığından tekrar yangın başlatma riski ile karşı karşıyadır. Lityum bataryalar ile ilgili güvenlik endişeleri arasında aşırı şarj, aşırı deşarj, termal kaçak, dentrit ve gaz oluşumu vardır [23].

4.4.2.1. Aşırı şarj

Lityum iyon bataryaların çok dar bir çalışma voltaj aralığı vardır. Lityum iyon bataryaların çalışma voltaj aralığı 2,3–4,2 volt arasında kullanıma göre değişkenlik göstermektedir. 2,3 voltun aşağısındaki voltajlar aşırı deşarj bölgesidir. Hücre voltajının, bu voltaj değerinin aşağısına düşmesi hücrenin bir daha kullanılamamasına sebep olmaktadır. 4,2 volt üzerine çıkıldığında ise hücrelerde aşırı ısınma durumu gerçekleşmektedir [24]. Lityum iyon bataryaların şarj edilmesi 3 adımda gerçekleşir. Bunlar sabit akım, sabit gerilim ve damlama şarjdır. Şarj esnasında belirli bir voltaj gerilimine ulaşana kadar pile kapasitesi ölçüsünde sabit bir akım uygulanır. Daha sonra, akımdan bağımsız olarak hücreye sabit gerilim uygulanır. Lityum hücre voltajı 4,2 volta ulaştığında %100 dolu olduğu anlamına gelir. Hücreler dolduktan sonra kendiliğinden deşarj olabilmektedir. Kullanım anında bataryaların tam kapasite olması için bataryalara şamandıra şarjı denilen küçük güçlerde aralıklı enerji verilmeye devam edilir. Hücreler tam doluluğa ulaştıktan sonra şarj edilmeye zorlanması durumuna aşırı şarj denir ve hücre sağlığı için tehlikeli bir durumdur. Lityum pil hücreleri aşırı şarjı tutamazlar ve bu durumun devam etmesi hücre voltajında artışa neden olur. Eğer, hücre voltajı 4,7 volta ulaşırsa

hücre içindeki elektrolit ve çözücülerin yapısı bozulmaya uğrayarak yanıcı gazlar meydana getirir. Bu durum, hücrelerde şişmelere ve aşırı ısınmaya neden olur ve yangın veya patlamaya yol açar. Aşırı şarjın diğer bir etkisi ise lityum kaplanmasıdır. Hücre tam dolduktan sonra hücreye uygulanan aşırı akım sırasında, lityum iyonları yeterince hızlı bir şekilde karbon katmanlarını geçemez ve bunun bir sonucu olarak anotta toplanarak anodun lityum ile kaplanmasına neden olur. Bu durum, kapasite kaybına ve dentrit oluşumuna neden olur. Aşırı şarj, hücre voltajı tam şarja ulaştığında kesilerek önlenabilir. Şarj cihazı kapatıldığında hücre voltajı düşmeye başlar ve 3,7–3,9 volt arasında sabitlenir.



Şekil 4.5. Lityum-iyon çalışma voltaj-sıcaklık aralığı [24]

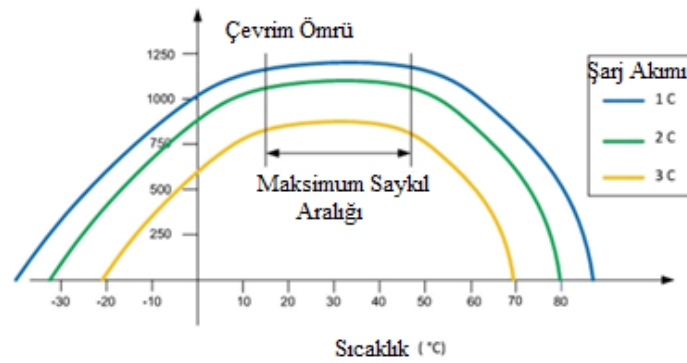
4.4.2.2. Aşırı deşarj

Lityum hücreler daha önce de bahsedildiği üzere 2,5–4,2 volt aralığında çalışmaktadır. Bir lityum batarya hücresinin voltajının 2,5 volt altına düşmesi durumuna aşırı deşarj denilmektedir. Lityum hücreleri, lityum batarya paketleri içerisinde ihtiyaç duyulan güç aralığının sağlanması için seri ve paralel konfigürasyonlarda oluşturularak kullanılır. Ancak paket içerisindeki tüm hücrelerin kapasite ve karakteristikleri aynı olamamaktadır. Bazı

hücrelerin kapasiteleri diğerlerine göre daha düşük kalmaktadır. Ancak deşarj sırasında tüm hücreler aynı gücü aktarmaktadırlar. Bu durumda kapasitesi düşük olan hücrenin hücre voltajı diğerlerine göre daha hızlı bir şekilde düşmektedir. Bu durum aşırı deşarja sebep olmaktadır. Aşırı deşarj bir lityum hücrenin bakır akım toplayıcılarının anotta çözülmesine neden olmaktadır. Çözünen bakır hücre içerisindeki diğer komponentlerde zamanla birikerek kısa devrelere yol açmakta bu durumda hücre de kalıcı kapasite düşüşüne ya da hücrenin tamamen bozulmasına neden olmaktadır.

4.4.2.3. Isıl Kaçak

Lityum iyon bataryalar için güvenilir çalışma aralığı aşağıdaki tabloda görüldüğü üzere 15–50 °C aralığındadır. 15 °C altında ve 50 °C üzerindeki çalışma sıcaklıklarında, lityum bataryaların çevrim ömrü ciddi oranda azalmaktadır. 60 °C üzerindeki sıcaklıklarda ise, çevrim sayısının aşırı derecede azalmasının yanında ısıl kaçak görülme riski oluşmaktadır.



Şekil 4.6. Lityum-ion bataryalar için sıcaklık ve ömür karşılaştırması [25]

Lityum iyon hücrelerinin iç direnci yaklaşık olarak 80–100 mΩ'dur. Şarj-deşarj sırasında hücre içindeki bazı kimyasal reaksiyonlar ve hücrenin iç direnci, ısıya neden olur. Şarj – deşarj esnasında hücre 5–8 °C arasında ısınabilir. Eğer herhangi bir nedenden dolayı hücre sıcaklığı 60 °C'yi aşarsa, hücre içindeki SEI katmanı bozulmaya uğrayarak anotta birikmeye başlar. Bu bozulma, diğer başka yan reaksiyonları tetikleyerek hücre sıcaklığının daha fazla artmasına yol açan zincirleme bir reaksiyona dönüşür. Bu olaya ısıl kaçak adı verilir. Bu gibi durumda hücre voltajı hızlı bir şekilde 300–400 °C veya daha yüksek sıcaklığa ulaşabilir. Bu yüksek sıcaklıklar hücre yapısındaki komponentleri buharlaştırmakta ya da eritebilmektedir. Lityum iyon hücre hızlıca yanabilmekte ya da patlayabilmektedir. Şimdiye kadar raporlanmış elektrikli araç yangınlarının büyük çoğunluğunun sebebi ısıl kaçak olarak bildirilmektedir. Isıl kaçığın önlenmesinde bataryaların ısıl yönetimi konusu büyük önem arz etmektedir [25].

4.4.2.4. Lityum dentrit oluşumu

Lityum iyon bataryalarda diğer bir önemli teknik problem lityum dentrit oluşumudur. Bu konu, bilim insanlarınca hala tartışılıyor olsa da, lityum dentrit oluşumunu genel anlamda şu şekilde açıklanabilir. Lityum iyon bataryaların şarjı esnasında lityum, anot tarafında homojen düz bir tabaka oluşturmaz. Bunun yerine, sakallanma şeklinde düzgün olmayan bir yapı oluşturur. Bu sakallı yapılara dentrit denir. Birkaç şarj deşarj çevrimi sonrasında sakallanmış dentritler anoda doğru birikmeye devam eder. Zamanla, uzayan dentritler ince ayırıcı membranı delerek katoda temas eder. Bu temas, hücre içinde kısa devreye yol açar. Lityum dentrit oluşumu zamanla pil hücresinin ömrünü kısaltmanın yanında kısa devrelere neden olarak yanma patlama gibi riskleri oluşturur.

4.4.2.5. Gaz oluşumu

Lityum iyon hücrelerinde gaz oluşumu genellikle elektrolitin bozularak hücre içindeki pozitif ve negatif elektrotlar ile reaksiyon göstermesi sonucu gerçekleşir. Oluşan gaz miktarı bataryanın bulunduğu duruma göre değişiklik gösterebilir. Normal şarj ve deşarj çevrim durumunda gaz salınımı herhangi bir probleme yol açmayacak kadar azdır. Ancak, aşırı şarj deşarj ve termal kaçak gibi anormal durumlarda gaz oluşumu hızlanır ve iç basıncı arttırarak patlamaya yol açar. Bu sebeple, bazı yüksek güç uygulamalarında lityum iyon batarya sistemlerinde güvenlik valfi bulunur.

5. ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA BATARYA ISIL YÖNETİM SİSTEMLERİ

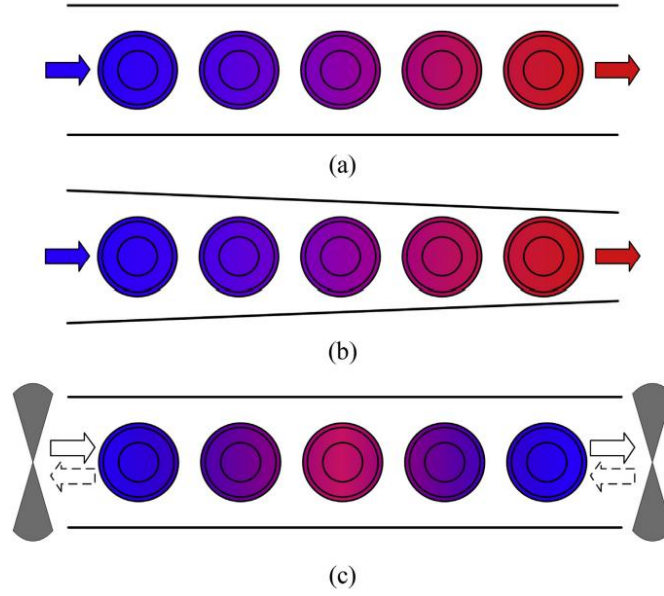
Elektrikli araç bataryalarının, yüksek verimde kullanılabilmesi için optimum sıcaklık aralığında çalışması gerekmektedir. İyi tasarlanmış bir batarya paketi, batarya sıcaklığının istenilen aralıkta sınırlandırılmasını sağlayacak (+15 – +35 °C) kapasitede olmalı ve hücreler arası sıcaklık farkını en aza indirebilmelidir [26]. Bu kriterleri sağlama konusunda ilk akla gelen ısı yönetim sistemi olan aktif soğutma sistemlerinin yanında, günümüzde faz değiştiren malzemeler ile pasif soğutma yöntemleri de popülerlik kazanmaktadır. Batarya paketlerinde soğutma ortamı olarak genellikle hava, bazı sıvılar ve faz değiştiren malzemeler kullanılmaktadır. Bu malzemelere ilişkin karşılaştırma tablosu aşağıda verilmiştir.

Tablo 5.1. Soğutucu ortam akışkanlarının termofiziksel özellikleri

Özellik	Hava	Mineral Yağı	Silikon Yağı	Su/Glikol	FDM-Kompozit	Novec 7000
Yoğunluk (kg.m ⁻³)	1,225	924,1	920	1,069	866	1,400
Spesifik ısı kapasitesi (J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)	1006	1,900	1,370	3,323	1.980	1,300
Isıl İletkenlik (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	0,0242	0,13	0,15	0,3892	45,459	0,075
Kinematik Viskozite (m ² .s ⁻¹)	1,46x10 ⁻⁵	5,60x10 ⁻⁵	-	2,58x10 ⁻⁶	-	3,2x10 ⁻⁷

5.1. Hava Soğutmalı Batarya Yönetim Sistemleri

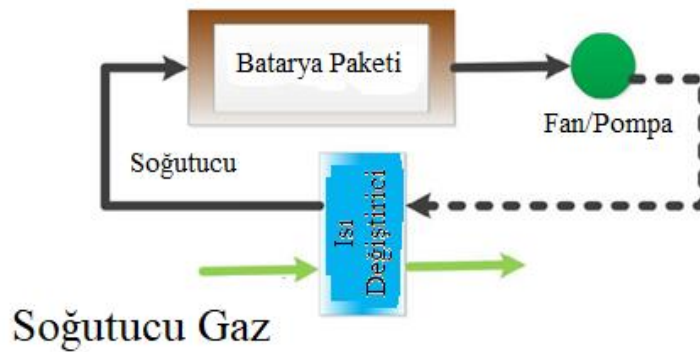
Elektrikli araç batarya paketlerinde, düşük ısı iletkenliği ve düşük ısı kapasitesi nedeniyle hava soğutmalı sistemler uygun soğutma sistemleri olarak görülememektedir. Ancak, düşük maliyet ve kolay kullanımı nedeni ile bazı araç modellerinin batarya paketlerinin soğutulmasında kullanılmaktadır. Bazı Çin ve Japon üretimi olan BYD E6, Toyota Prius, Nissan leaf gibi elektrikli araçların batarya paketi soğutulmasında fan ile soğutma sistemi kullanılmıştır. Şekil 5.1’de farklı hava akış konfigürasyonlarının hücre sıcaklığına etkisi görülmektedir [27].



Şekil 5.1. Seri hücre soğutma konfigürasyonu, (a) Basit kanal, (b) Daralan kanal, (c) Karşılıklı akışlı kanal [26]

5.2. Sıvı Soğutmalı Batarya Yönetim Sistemleri

Bazı araştırmacılar, büyük kapasiteli batarya paketlerinin yüksek C değerlerinde deşarjı esnasında, doğal ya da zorlanmış akışlı hava soğutma sistemlerinin performans olarak sınır değerlerde soğutma ihtiyacını karşıladığına dikkat çekmektedir. Sıvı soğutmalı sistemler, hava soğutmalı sistemler ile karşılaştırıldığında yaklaşık olarak 3500 kat daha fazla performans göstermektedir [28]. Ayrıca, sıvı soğutma sistemleri, gürültüyü de belli bir ölçekte engelleyebilmektedir. Sıvı soğutma sistemli batarya paketleri, ısı verimi düşürmeden daha kompakt bir paket oluşturulmasına da izin vermektedir. Ancak, tüm olumlu faydalarının yanında sıvı soğutmalı sistemlerin pahalı, yapılarının kompleks olması ve sızıntı riski oluşturması gibi sebeplerden ötürü üreticilerin bu sistemleri kullanmasında tereddütte düşmesine neden olmaktadır [29].



Şekil 5.2. Batarya paketlerinin genel soğutma çevrimi şeması [29]

5.3. Faz Değiştiren Malzemeler ile Batarya Isıl Yönetim Sistemleri

Isıl enerji, gizli ısı, kimyasal enerji ve duyulur ısı formunda 3 farklı şekilde depolanabilir. Bu üç ısı enerjisi depolama sistemi arasında gizli ısı en yüksek enerji depolama kapasitesine sahip olan yöntemdir [30]. Isıl enerjiyi, gizli ısı ve duyulur ısı formunda depolayarak, tersinir bir proseste ortama geri verebilen maddelere faz değiştiren maddeler (FDM) denir. Faz değiştiren maddeler, sıcaklık artışı esnasında ortamdan ısı enerjisi alır ve eriyerek faz değişimi gerçekleştirir, ortam ısısı düşerken, bünyesinde barındırdığı enerjiyi ortama vererek tekrar başlangıçtaki katı haline geri döner. FDM'ler organik, inorganik ve farklı faz değişim sıcaklık aralığına sahip ötektik malzemeler olabilmektedir.

Elektrikli araçlarda batarya ısıl yönetimi aktif ve pasif sistemler ile yapılabilmektedir. Tablo 5.2' de aktif ve pasif ısıl yönetim sistemlerinin avantaj ve dezavantajları verilmiştir.

Tablo 5.2. Aktif ve pasif batarya yönetim sistemlerinin avantaj ve dezavantajları [31]

Batarya Yönetim Sistemi	Tür	Avantaj	Dezavantaj
Pasif Sistem	FDM	1.Ucuz 2.Güvenilir ve Uzun ömür 3.Üniform sıcaklık dağılımı 4.Yüksek gizli ısı kapasitesi 5.Yüksek Verim 6.Aşırı koşullarda kullanım	1.Düşük Termal Isıl İletkenlik 2.Sızıntı Riski
	Doğal Taşınım	1.Direk Temas 2.Hafiflik 3.Basit yapılandırma 4. Düşük yatırım maliyeti 5.Düşük işletme maliyeti 6.Bakım kolaylığı	1.Düşük özgül ısı 2.Üniform hava akışının sağlanmasının zorluğu 3. Düşük Verim
	Sıvı Soğutma	1.Düşük yatırım maliyeti 2.Kolay ve ucuz bakım maliyeti	1.Yüksek sızıntı riski
	Isı Borusu	1.Yüksek Isıl iletkenlik 2.Yüksek verim	1.Pahalı 2.Karmaşık yapıda olması 3.Yüksek yatırım maliyeti 4.Sızıntı riski
Aktif Sistem	Zorlamalı Akış	1.Direk Temas 2.Hafiflik 3.Basit yapılandırma 4.Bakım kolaylığı	1.Yüksek maliyet 2.Ek olarak fan gerektirir 3.Düşük özgül ısı 4.Üniform hava akışının sağlanmasının zorluğu 5.Düşük verim
	Sıvı Soğutma (Pompalı)	1.Yüksek özgül ısı kapasitesi 2.Direk Temas 3.Yüksek Verim	1.Karmaşık yapıdadır 2.Pahalı 3.Kısa kullanım ömrü 4.Sızıntı riski
	Termoelektrik Soğutucu	1.Sabit yapılı cihaz kullanılır. 2.Kimyasal reaksiyon yoktur. 3.Çalışma esnasında ses yoktur. 4.Güvenilir ve uzun ömürlüdür. 5.Zararlı gaz emisyonu yoktur. 6.Minimum bakım maliyeti	1.Düşük verimlidir 2.Ek güç tüketimi

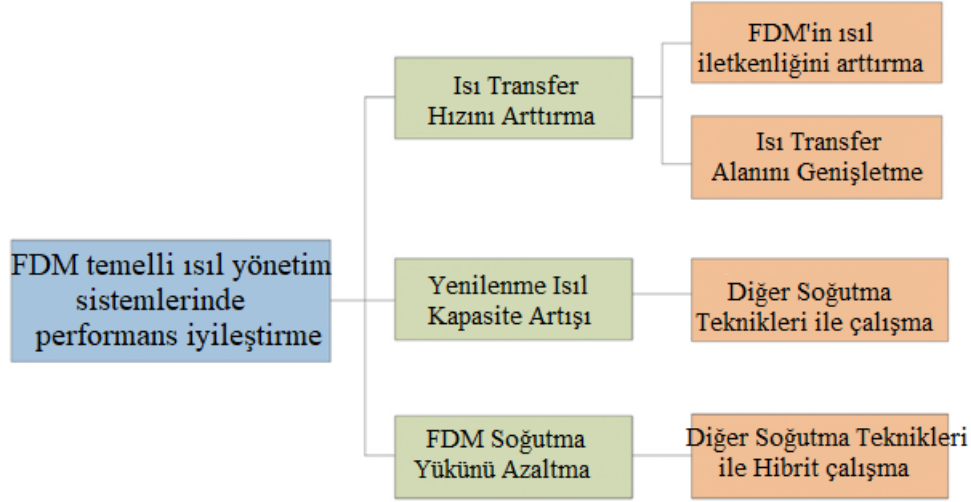
İdeal bir ısı yönetim sistemi batarya paketini mümkün olan en küçük hacimde optimum çalışma sıcaklık aralığında tutmalı, ucuz olmalı ve hafif olmalıdır. FDM bu şartları sağlamada diğer yöntemlere göre daha avantajlı olduğundan günümüzde BIYS'lerinde kullanımı ve araştırılması popülerliğini arttırmaktadır. Tablo 5.3'de 10–30 °C sıcaklık aralığında erime sıcaklığı olan bazı faz değiştiren malzemeler verilmiştir.

Tablo 5.3. 10-30°C aralığında bazı faz değiştiren malzemeler ve özellikleri [32].

İsim	Formül	Erime Sıcaklığı	Gizli Füzyon Isısı
Çinko Klörür	ZnCl ₂ , 3H ₂ O	10	
Pentadekan	C ₁₅ H ₃₂	10	205
Sülfürük Asit	H ₂ SO ₄	10.4	100
Trietil Ortoasetat + Su + Üre (38.5: 31.5: 30)	C ₈ H ₁₈ O ₃ + H ₂ O + N ₂ H ₄ CO	13.4	160
Dipotasyum Fosfat	K ₂ HPO ₄ , 6H ₂ O	14	109
Kalsiyum Klorür + Kalsiyum Brömür (45: 55)	CaCl ₂ , 6H ₂ O + CaBr ₂ , 6H ₂ O	14.7	140
Sodyum Hidroksit	NaOH, 3/2 H ₂ O	15	
Propil Polimit		16–19	186
Oktanoik asit (veya kaprilik asit)	C ₈ H ₁₆ O ₂	16.3	149
Dimetil Sülfoksit	C ₂ H ₆ OS	16.5	85.7
Heksadekan	C ₁₆ H ₃₄	16.7	237.1
Kükürt Trioksit	SO ₃	16.9	108
Emerest 2325 (bütil stearat + bütil palmitat)(49: 48)	C ₂₂ H ₄₄ O ₂ + C ₂₀ H ₄₀ O ₂	17–21	138–140
Gliserol	C ₃ H ₈ O ₃	17.9	198.7
Emerest 2325 (bütil stearat + bütil palmitat)(50: 48)	C ₂₂ H ₄₄ O ₂ + C ₂₀ H ₄₀ O ₂	18–22	140
Potasyum florür	KF, 4H ₂ O	18.5	231
Butil stearat	C ₂₂ H ₄₄ O ₂	19	140
Propil palmitat	C ₁₉ H ₃₈ O ₂	19	186
Heptadekan	C ₁₇ H ₃₆	19	240
Kaprik + Laurik(61.5: 38.5)	C ₁₀ H ₂₀ O ₂ + C ₁₂ H ₂₄ O ₂	19.1	132
Kaprik + Laurik(82: 18)	C ₁₀ H ₂₀ O ₂ + C ₁₂ H ₂₄ O ₂	19.1–20.4	147
Polietilen glikol	C _{2n} H _{4n} +2O _n +1	20–25	146
Demir bromür	FeBr ₃ , 6H ₂ O	21	105
Dimetil sebakat	C ₁₂ H ₂₂ O ₄	21	120–135
Kaprik + Laurik(45:55)	C ₁₀ H ₂₀ O ₂ + C ₁₂ H ₂₄ O ₂	21	143
Kaprik + Miristik(73.5: 26.5)	C ₁₀ H ₂₀ O ₂ + C ₁₄ H ₂₈ O ₂	21.4	152
Kaprik + Palmitat(75.2: 24.8)	C ₁₀ H ₂₀ O ₂ + C ₁₆ H ₃₂ O ₂	22.1	153
Tetradekanoik asit + dekanok asit (34: 66)	C ₁₄ H ₂₈ O ₂ + C ₁₀ H ₂₀ O ₂	24	147.7
Kalsiyum klorür + Magnezyum klorür (50: 50)	CaCl ₂ + MgCl ₂ , 6H ₂ O	25	95
Fosforik Asit	H ₃ PO ₄	26	147
Asetamid + üre (50:50)	C ₂ H ₅ ON + N ₂ H ₄ CO	27	163
Galyum	Ga	29.8	80
Lityum Nitrat	LiNO ₃ , 2H ₂ O	30	296.8

5.4. Faz Değiştiren Malzemeler için Performans İyileştirme Stratejileri

Faz değiştiren malzemelerin, elektrikli araç bataryalarının termal yönetimi için kullanılmasındaki en büyük iki dezavantaj düşük ısıl iletkenlik ve düşük ısıl kapasitedir. Bu dezavantajların giderilmesi için bazı stratejiler geliştirilmiştir. Isı transfer hızının artırılması, ısıl kapasitesinin tekrar kullanılması ve FDM soğutma yükünün azaltılması, FDM'lerin performansının artırılmasında kullanılan üç önemli stratejidir. Bu stratejiler, Şekil 5.1'de detaylı olarak gösterilmiştir [33].



Şekil 5.3. Faz değiştiren malzemelerin geliştirilme stratejileri [33]

5.4.1. Isı transfer hızının arttırılması

Faz değiştiren malzemeler, bataryaların ısıl yönetiminde kullanılırken, bataryalar ile direkt temas halindedir. Bataryalar ve FDM arasındaki ısı transferi (Q), aşağıdaki denklem şeklinde genellenebilir.

$$Q = kA_h(T_{\text{Batarya}} - T_{\text{FDM}}) \quad (5.1)$$

Burada k , ısı transfer katsayısını, T_{FDM} faz değiştiren malzemenin sıcaklığını, A_h ısı transfer alanını belirtmektedir. Denklem (1)'e göre bataryadan olan ısı transfer hızını etkileyen üç temel değişken vardır. Bunlar; k , A_h ve T_{FDM} 'dir. Batarya ısıl yönetim sistemlerinde, ısıl direnç, genellikle FDM tarafından domine edilmektedir. Bu bağlamda, sistemin ısıl performansını arttırmak için şu iki parametre önem kazanmaktadır. Bunlar; λ_{FDM} 'i ve A_h 'yi arttırmaktır[34].

5.4.1.1. FDM'nin ısıl iletkenliğinin arttırılması

Yüksek ısıl iletkenliğe sahip malzemelerin FDM'e katlandırılarak ısıl iletkenliğin (λ_{FDM}) arttırılması yöntemi literatürde benimsenmiştir. Bu yöntem, gözenekli ortamların, metal örgü ağlarının ve nano parçacıkların kullanımını kapsamaktadır.

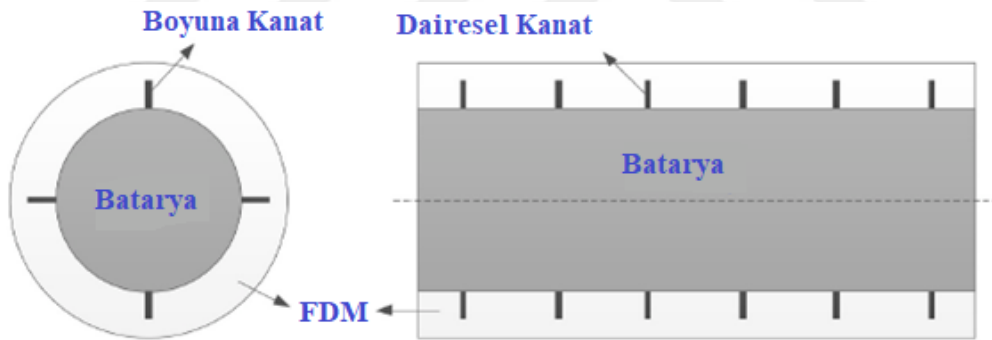
Gözenekli yapılar ve metal örgü ağlar: Faz değiştiren malzemeler, gözenekli yapıdaki ya da metal örgü ağ şeklindeki ortamlara gömülerek, kompozit faz değiştiren malzemeler oluşturulur. λ_{FDM} 'in arttırılması için gözenekli yapıdaki malzemeler ile metal örgü ağlar yüksek ısıl iletkenliğe sahip malzemelerden yapılmalıdır. Ayrıca, birim kütle başına yüksek ısıl enerji

depolamayı sağlaması için düşük yoğunluğa ve FDM'nin yeterinde emilebilmesi için yüksek gözenekli bir yapıya sahip olması gerekir. Köpük alüminyum, köpük nikel, köpük bakır, genişletilmiş grafit ve alüminyum örgü ağlar çoğunlukla kullanılan malzemelerdir.

Nano materyal katkıları: Nano materyal katkı malzemeleri, FDM içerisine düzgün ve eşit olacak şekilde dağıtılarak, nano katkılı FDM'ler üretilebilmektedir. λ_{FDM} 'in artırılması için nanokatıların, yüksek ısı iletkenliğe sahip malzemelerden seçilmesi gerekmektedir. Üretilen nano katkılı FDM'nin stabil olması için, kullanılan nano katkı malzemelerinin de yüksek kimyasal stabiliteye sahip olması gerekmektedir. Metal nano parçacıkları ve karbon nano tüpler, grafen gibi karbon malzemeler katkı maddesi olarak çoğunlukla kullanılmaktadır.

5.4.1.2. Isı transfer yüzeyinin artırılması (A_h)

FDM içerisine metal kanatların yerleştirilmesi ile ısı transfer yüzeyinin artırılması (A_h) yöntemi sıklıkla kullanılmaktadır. Şekil 5.2'de silindirik batarya üzerinde ısı transfer alanının artırılması amacıyla bataryanın eksenlerine doğru dik metal kanatlar eklenmiştir. Kanat malzemesi, yüksek ısı iletkenliğe, yüksek öz ısı kapasitesine ve düşük yoğunluğa sahip olması gerekmektedir. Bakır ve alüminyum kanatlar genellikle en sık kullanılan kanat malzemeleridir.

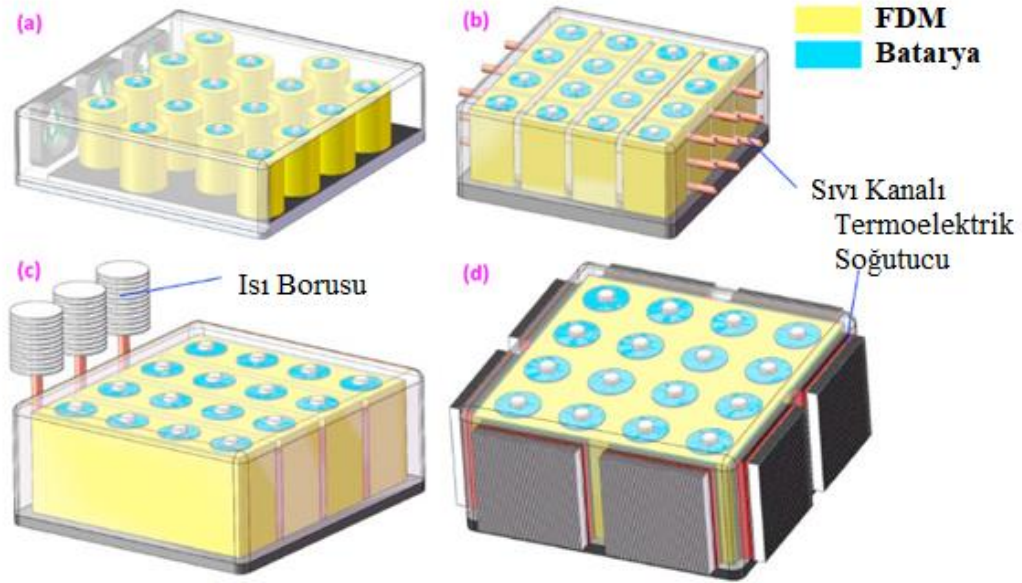


Şekil 5.4. Silindirik bir batarya çevresinin kaplayan FDM içerisine kanat uygulaması [33]

5.4.2. Isıl depolama kapasitesinin yenilenmesi

Şarj ve deşarj çevrimi sırasında FDM bataryalardan ısı emmektedir. FDM ısı emdikçe sıvı faza geçer ve ısıya maruz kalma süresi uzadıkça sıvı fraksiyonu artmaya devam eder. FDM tamamen erimediği sürece $T_{Batarya}$ sabit kalır. Bunun sebebi, faz değişim süreci boyunca neredeyse sıcaklık değişimi olmamasıdır. Batarya paketi içerisinde bulunan FDM'nin belirli bir hacimde olması nedeni ile, uzun süreli şarj deşarj döngüsü içerisinde FDM tamamen eriyerek sıvı faza geçer. FDM tamamen sıvı faza geçtiğinde $T_{Batarya}$ artış göstermeye başlar. Güvenli sıcaklık değerlerinin aşılması durumunda, ısı kaçak durumu gözlenir. Isıl depolama

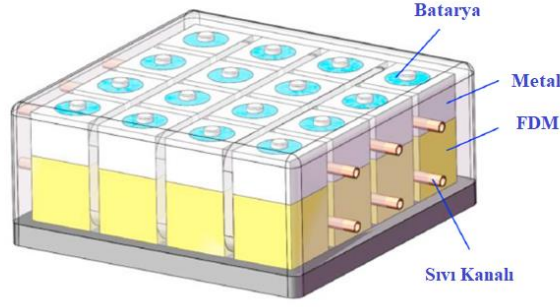
kapasitesinin yenilenmesi hem ısı kaçığının önlenmesi, hem de efektif çalışma süresinin uzatılması için bir yöntem olarak önerilmektedir [33]. Isıl depolama kapasitesinin yenilenmesi için önerilen bir yöntem, diğer soğutma sistemlerinin FDM'lerin fazla ısınıpını almak için hibrit bir şekilde kullanılmasıdır. Bu hibrit yöntemde kullanılan soğutma sistemleri zorlanmış hava soğutma, sıvı soğutma, ısı boruları ile soğutma ve termoelektrik soğutmadır. Şekil 5.5'te bu soğutma sistemlerinin şematik olarak gösterimi mevcuttur.



Şekil 5.5.4. Farklı soğutma sisteminin FDM ile birlikte kullanımı. A:FDM ve zorlanmış akışlı hava soğutma. B:FDM ve sıvı soğutma. C:FDM ve ısı boruları. D:FDM ve termoelektrik soğutma [33]

5.4.3. FDM'nin soğutma yükünün azaltılması

Sistem veriminin artırılması için önerilen diğer bir strateji de bataryalarda oluşan ısı yükünün farklı sistemler ile alınarak FDM'nin tamamen erimesini önlemek üzerinedir. Bu yöntemde, yalnızca ısı yükünün belirli bir kısmı FDM tarafından emilir. Kalan kısım zorlanmış hava, sıvı soğutma, ısı borusu, termoelektrik soğutma gibi daha önce bahsedilen yöntemler ile alınır. Bu yöntemin ısı kapasite yenilenmesinden farkı, fazla ısının FDM üzerinden değil, direkt olarak batarya üzerinden veya hem batarya hem FDM üzerinden alınmasıdır [35]. Isı transfer hızı açısından bakıldığında bu yöntem, kapasite yenileme yönteminden daha verimlidir. Bunun sebebi ısı ortam ve bataryalar arasındaki ısı direncin düşmesinden kaynaklanmaktadır. Şekil 5.6'da soğutma yükünün azaltılmasına ilişkin şematik gösterilmektedir.



Şekil 5.6. Tipik bir hibrit sıvı ve FDM soğutmalı batarya ısıl yönetim sistemi [33]

5.5. Faz Değiştiren Malzemeler Üzerine Yapılan Çalışmalar

Faz değiştiren malzemeler, sıcaklığı üstün şekilde sabit tutabilen özelliklerinden dolayı özellikle son yıllarda kendine birçok alanda araştırma ve kullanım imkânı bulmuştur. Literatüre baktığımızda faz değiştiren malzemeler üzerine birçok akademik çalışma bulunmaktadır.

Luo ve diğ. [36] genişletilmiş karbon içerisine hapsedilmiş parafinden oluşan iletken kompozit faz değiştiren malzemeyi, aşırı sıcak ve soğuk koşullarda bir batarya paketi etrafına yerleştirerek, elektriksel iletkenliği ve faz değiştiren malzemenin batarya sıcaklığına olan etkilerini araştırmışlardır.

Zhang ve diğ. [37], ağırlıkça farklı oranlardaki alüminyum nitrit (AlN) ile hazırlanmış genişletilmiş grafit- epoksi reçine karışımı kompozit faz değiştiren malzemeyi batarya paketi ile termal özelliklerini test etmiştir. Yaptıkları çalışmada ağırlıkça %20 AlN karışımının en optimal karışım olduğu sonucuna varmışlardır. 3C’de test ettikleri bataryanın maksimum sıcaklığında %19,4’lük bir düşüş elde etmişlerdir.

Zhang ve diğ. [38] kaolin, genişletilmiş grafit ve parafinden oluşan kompozit faz değiştiren malzemeyi üreterek, bu kompozit malzemenin termal özellikleri üzerine araştırmalar yapmıştır. Ağırlıkça %10 genişletilmiş grafit ve %10 kaolin karışımının en uygun karışım olduğunu belirlemişlerdir. Yapılan testler sonucunda, kompozit faz değiştiren malzemenin ısıl iletkenliğinin 6W/m.K’den yüksek olduğunu ve 30 dakikalık çalışma sonrasında herhangi bir sızıntının olmadığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca, 4 C’lik deşarj süresi boyunca hücrelerin 45°C altında kaldığı ve hücreler arası en yüksek sıcaklık farkının 5 °C olarak ölçüldüğünü bildirmişlerdir.

Idi ve diğ. [39] matematiksel modelleme yöntemini kullanarak alüminyum köpüğü ve parafin ile oluşturulmuş kompozit faz değıştiren malzemenin lityum pil hücresi üzerindeki termal etkisini incelemiştir. Yapılan çalışma sonucunda, lityum pil hücresi etrafındaki kompozit faz değıştiren malzemenin duvar kalınlığının, pil hücresinin sıcaklığına olan etkisinin belirli bir aralıkta efektif olduğunu bulmuşlardır. Faz değıştiren malzemenin miktarının artırılmasının, aynı oranda sistem verimine etki etmediğı görölmüştür.

Zhang ve diğ. [40] amonyum polifosfat, parafin ve genişletilmiş grafiti kırmızı fosfor ve epoksi reçine kullanarak tasarladıkları yenilikçi bir faz değıştiren malzeme ile lityum bataryaların termal yönetimi üzerine çalışmalarda bulunmuştur. Bu faz değıştiren malzemenin en önemli özelliğı alev geciktirici etkiye sahip olmasıdır. Bu kompozit faz değıştiren malzeme ile 3C deşarj durumunda batarya tepe sıcaklığında %44,7'lik bir düşüş elde etmişlerdir. Yüksek performansı ve alev geciktirici özelliğıne sahip olması nedeni ile bu faz değıştiren kompozit malzemenin enerji depolama, ısıl yönetim gibi birçok alanda kullanılabileceğı belirtilmiştir.

Özbaş [41] FDM olarak parafini ve ısı borularını bir güneş panelinin arkasına yerleştirerek panel ısınmasını azaltmayı dolayısı ile güneş panelinde verim artışını araştırmıştır. Yapmış olduğu deney sonucunda FDM ve ısı borulu sistem ile soğutma da panel veriminde %6 bir artış kaydetmiştir. Ayrıca iş akışkanı olarak metanol ve suyu kullanmıştır. Yaptığı çalışmalar sonucunda iş akışkanı olarak suyun kullanılmasının daha verimli olduğunu tespit etmiştir. Ayrıca tek başına FDM kullanımı bir noktadan sonra panelde daha fazla ısınmaya yol açtığını bu nedenle FDM ile birlikte ısı borulu sistemin kullanılmasının daha uygun olacağı sonucuna ulaşmıştır.

Al-Malaki ve diğ [42] Irak'ta bulunan bir hapishane hücresinin tavanına parafin temelli iki kat faz değıştiren malzeme uygulaması yaparak gerçek koşullar altında oda sıcaklığındaki ve konforundaki değışimleri analiz etmişlerdir. 5 gerçek kişiyi temsil eden ve kişi başına 100 watt ısı ve 0,3 L/dk CO₂ ve su yayan bir sistem kullanılmıştır. Sistemi matematiksel olarak inceleyerek gerçek veriler ile kıyaslamışlardır ve sonuçların tutarlı olduğunu tespit etmişlerdir. Yapılan deney sonucunda uygulanan FDM'nin %47,2 enerji tasarrufu sağaldığı görölmüştür.

Abokersh ve diğ. [43] faz değıştiren malzemeyi, güneş kolektörü içinde kullanarak, bir evsel güneş kolektörlü su ısıtma sisteminin iyileştirilmesini incelemiştir. Faz değıştiren malzemenin güneş kolektörü içerisine entegre edilmesi ile, bu gibi sistemlerde mevcut bulunan ısı depolama sistemi ihtiyacının kaldırılmasını hedeflemişlerdir.



6. DENEYSEL ÇALIŞMA ve BULGULAR

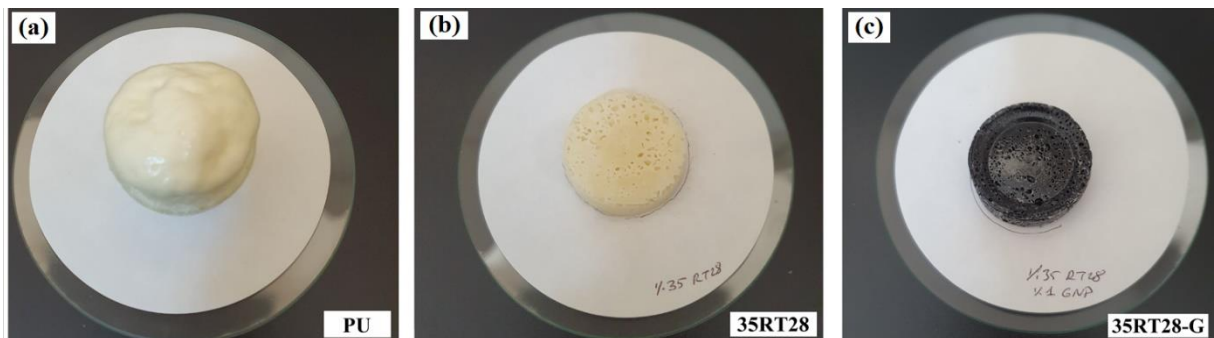
6.1. Deneysel Çalışmada Kullanılan Kimyasallar ve Deneysel Yöntem

Lityum iyon pillerin ısıl yönetimine yönelik kompozit FDM'ler laboratuvar ortamında tek adımda ilgili komponentlerin oda sıcaklığında belirlenmiş oranlarda bir araya getirilmesi ve belirli süre ve hızda karıştırılmasıyla hazırlanmıştır. Bu amaçla, kompozit FDM'lerin hazırlanmasında Rubiterm firmasından temin edilen ticari bir parafin olan RT28, Purofoam FLX 1001 A ve Purofoam FLX 1001 B komponentleri ve grafit bir ön işlem yapılmaksızın doğrudan kullanılmıştır.

Kompozit FDM'ler aşağıdaki Tablo 6.1'de verilen reçeteye göre hazırlanmıştır. Ancak, sızdırmazlığın sağlandığı ideal oran %35 olarak belirlenmiştir. Bu sebeple karakterizasyon çalışmaları belirlenen bu kompozit malzemeler için gerçekleştirilmiştir.

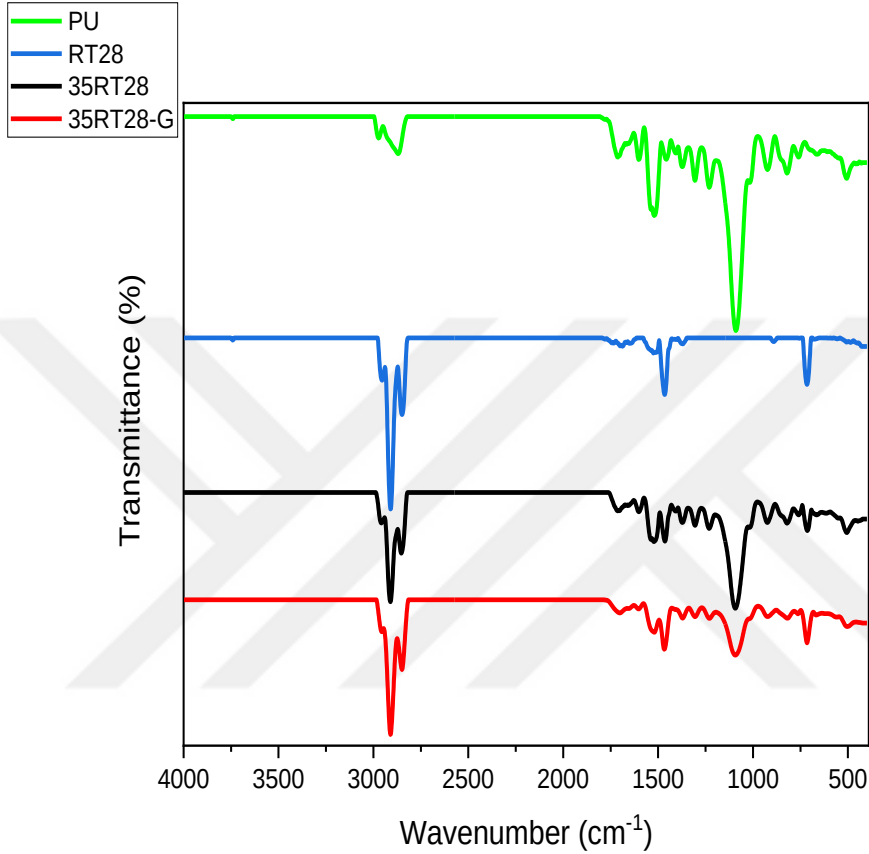
Tablo 6.1. Kompozit FDM'lerin hazırlanması reçetesi

Örnek Adı	Destek Malzemesi		FDM İçeriği	GNP Katkı Miktarı
	A Bileşeni	B Bileşeni		
25RT28	%65	%35	%25	-
25RT28-G	%65	%35	%25	%1
30RT28	%65	%35	%30	-
30RT28-G	%65	%35	%30	%1
35RT28	%65	%35	%35	-
35RT28-G	%65	%35	%35	%1
40RT28	%65	%35	%40	-
40RT28-G	%65	%35	%40	%1
50RT28	%65	%35	%50	-
50RT28-G	%65	%35	%50	%1



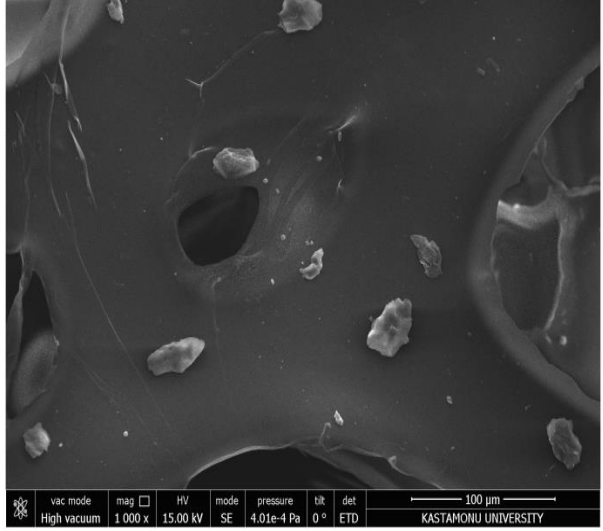
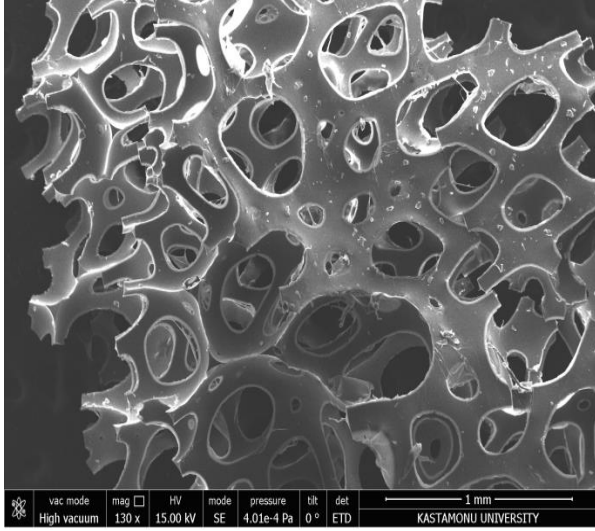
Şekil 6.1. Sentezlenen malzemelere ait dijital kamera görüntüleri (a) Boş köpük malzeme, (b) kompozit FDM (c) grafit katkılı kompozit FDM

Sentezlenen malzemelere ait FT-IR spektrumları boş poliüretan köpük malzeme, saf FDM (RT28), kompozit FDM 35RT28 ve grafit katkılı kompozit FDM 35RT28-G'ye ait FTIR spektrumları Şekil 6.2'de gösterilmiştir. FT-IR spektrumlarında gösterilen elde edilen malzemelere ait karakteristik pikler incelendiğinde kompozit FDM'lerin başarılı bir şekilde sentezlendiği görülmüş ve kimyasal yapı doğrulanmıştır.

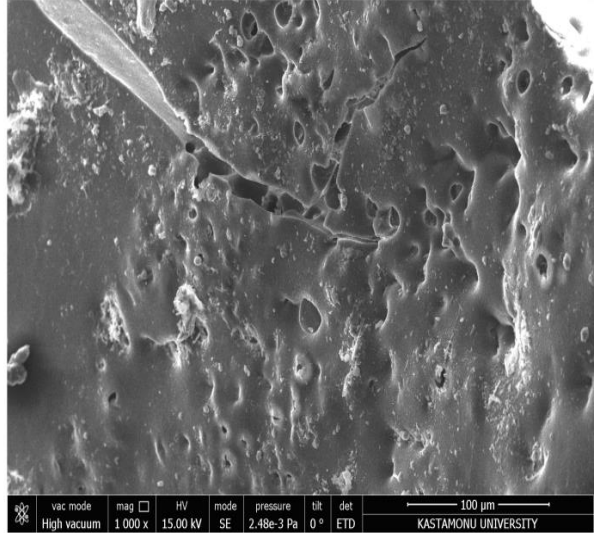
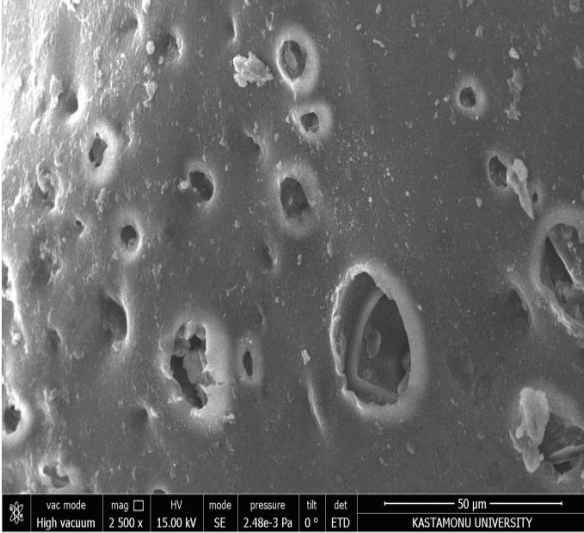


Şekil 6.2. Sentezlenen malzemelere ait FT-IR spektrumları (a) Boş köpük malzeme, (b) saf FDM, (c) kompozit FDM (d) grafit katkılı kompozit FDM

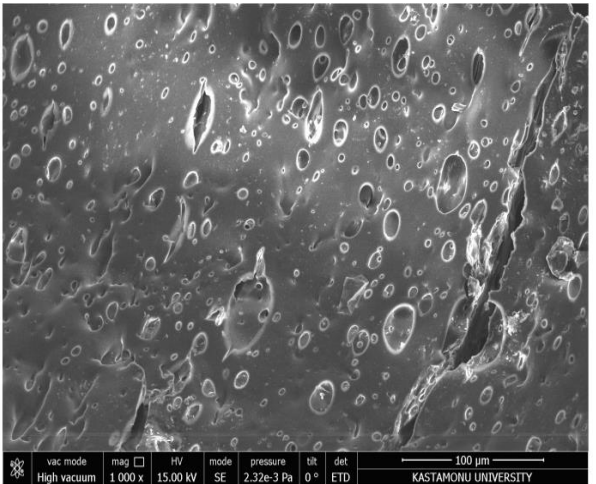
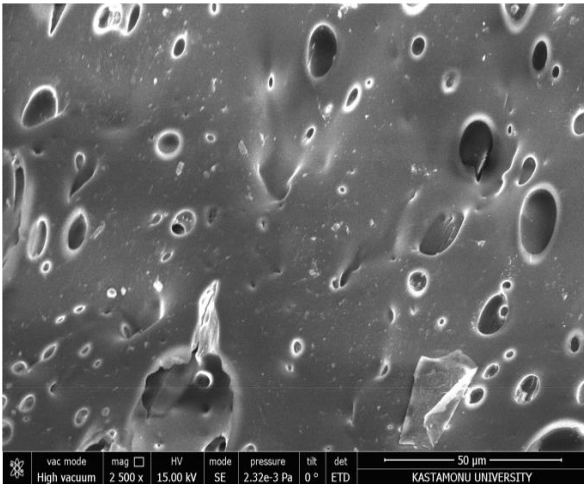
Sentezlenen malzemelerin morfolojik yapısı SEM analizi ile incelenmiştir. Şekil 6.3'de FDM içermeyen boş poliüretan esaslı köpük malzemenin, Şekil 6.4'te 35RT28 kompozit FDM'nin ve Şekil 6.5'te grafit katkılı 35RT28-G kompozit FDM'ye ait farklı büyütme oranlarındaki SEM görüntüleri verilmiştir. Buna göre, içerisinde RT28 bulunmayan boş poliüretan köpüğün temiz, parlak ve gözenekli yapısı açıkça görülmektedir (Şekil 6.3). Ancak, yapıya RT28'in dahil olmasıyla, poliüretan köpüğün parlak görüntüsü gözenek ve yüzeylere FDM'nin yerleşmesiyle daha mat bir hale gelmiştir. Bununla birlikte, yapıya %1 oranında ilave edilen grafit ile yapıda bulunan gözenek miktarının gözlenebilir boyutta geliştiği ve katkısız kompozit FDM 35RT28'e kıyasla daha parlak bir görünüme kavuştuğu gözlemlenmiştir.



Şekil 6.3. Boş köpük SEM görüntüsü.

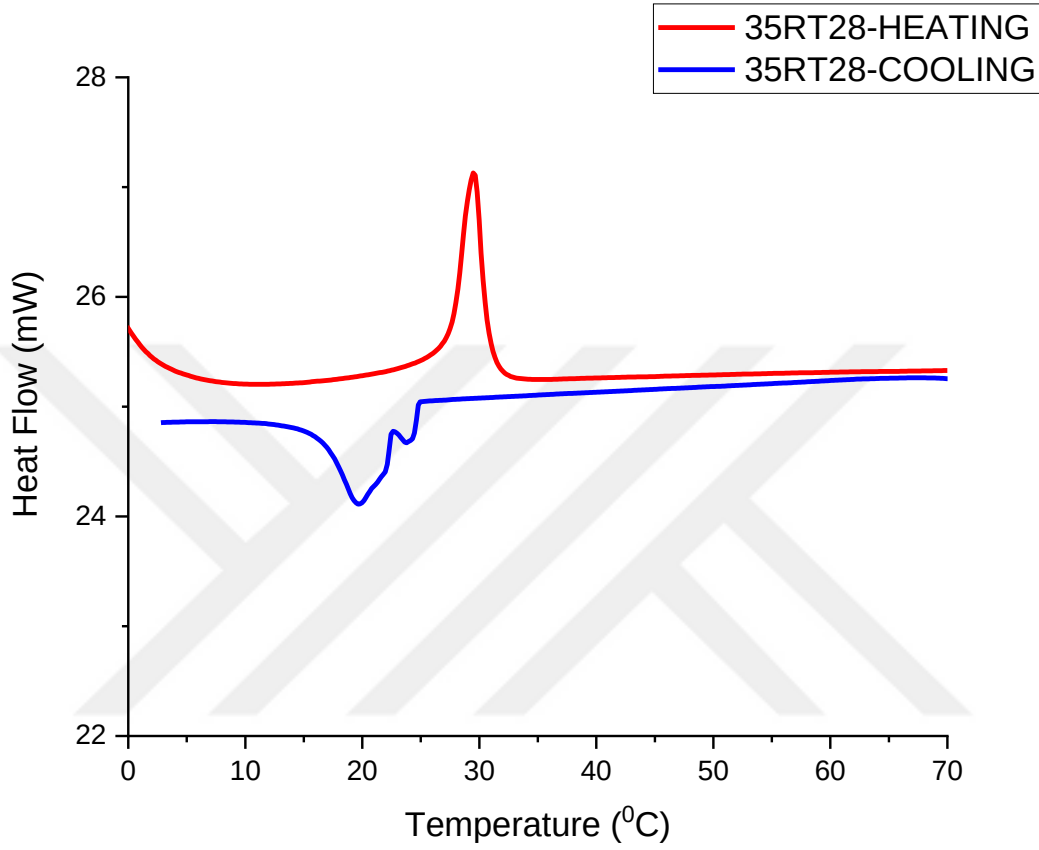


Şekil 6.4. Kompozit FDM'nin SEM görüntüsü.

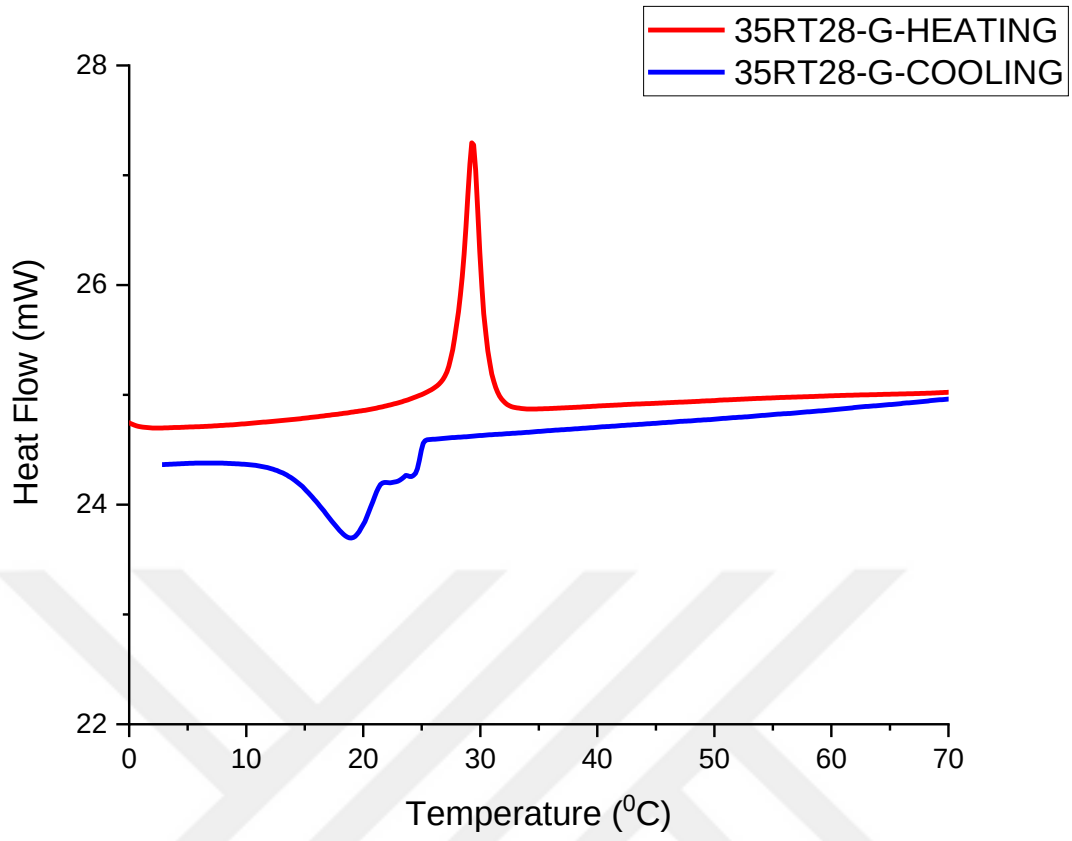


Şekil 6.5. Grafit katkılı kompozit FDM'nin SEM görüntüsü.

Kompozit FDM 35RT28 ve grafit katkılı kompozit FDM 35RT28-G'ye ait DSC eğrileri Şekil 6.6 ve Şekil 6.7'da gösterilmiştir. Buna ilaveten, DSC analizinden elde edilen özellikler Tablo 6.2'de verilmiştir. Şekil 6.6 ve Şekil 6.7'ya incelendiğinde ısınma ve soğuma süreçlerinde elde edilen kompozit malzemelerin erime ve kristallenme faz geçişleri açıkça görülmektedir.



Şekil 6.6. Sentezlenen kompozit FDM'ye ait DSC eğrileri.



Şekil 6.7. Sentezlenen grafit katkılı kompozit FDM'ye ait DSC eğrileri.

Tablo 6.2. Sentezlenen kompozit FDM'lere ait özellikler.

Kompozit FDM	Erime Prosesi				Kristallenme Prosesi			
	^a T _{om} (°C)	^b T _{pm} (°C)	^c T _{em} (°C)	^d ΔH _m (J.g ⁻¹)	^e T _{oc} (°C)	^f T _{pc} (°C)	^g T _{ec} (°C)	^h ΔH _c (J.g ⁻¹)
35RT28	27.58	29.48	30.79	18.07	22.52	19.64	16.80	-17.89
35RT28-G	27.89	29.26	30.60	20.69	21.45	18.98	14.59	-20.95



7. SENTEZLENEN KOMPOZİT FDM İLE BATARYA ISIL YÖNETİM UYGULAMASI

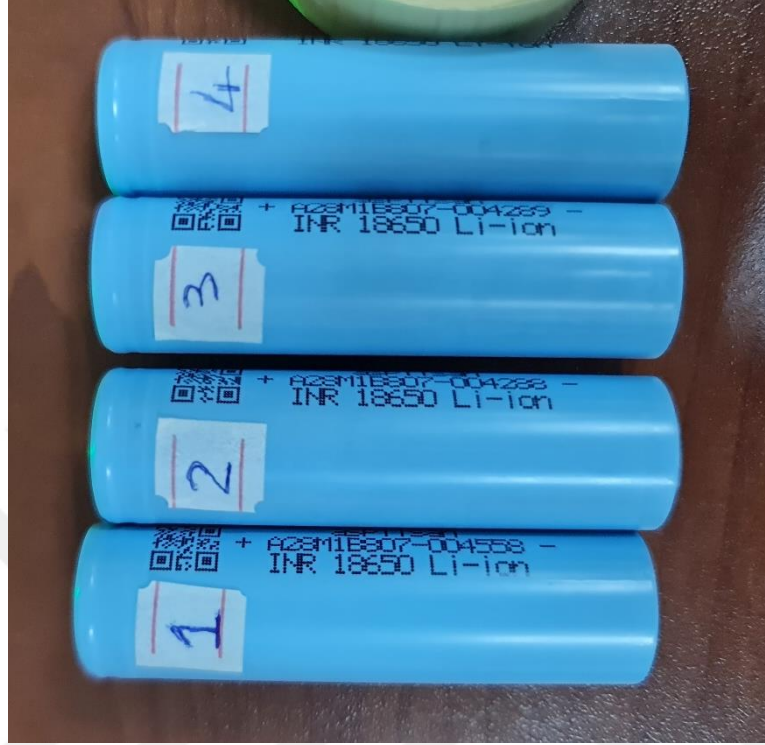
Sentezlenmiş olan 35RT28-G kompozit faz değıştiren malzemenin, 4S lityum batarya paketi yüzey sıcaklığı üzerindeki etkilerinin araştırılması için şekil 7.1’de görülen deney seti hazırlanmıştır. Sızdırmazlık özellikleri, erime gizli ısıları ve uygun faz geçiş sıcaklıkları dikkate alındığında, en ideal karışım oranı %35 olan 35RT28-G kompozit FDM tercih edilmiştir. Öncelikle FDM olmaksızın batarya paketi sabit sıcaklığa sahip ortamda farklı C değerlerinde deşarj edilmiş ve lityum hücrelerinin yüzey sıcaklığı kayıt altına alınmıştır. Daha sonra FDM ilavesi yapılarak aynı deşarj değerleri tekrarlanmış ve hücrelerin yüzey sıcaklığı tekrar kayıt altına alınmıştır. Bu deneyler ile farklı yük akımları altında, Sentezlenen faz değıştiren malzemenin, lityum hücre yüzey sıcaklığına olan etkisi araştırılmıştır.



Şekil 7.1. Sentezlenen FDM’nin lityum hücreler üzerindeki etkisinin analizi için hazırlanan deney seti.

Deneyde kullanılan batarya paketini oluşturmak için şekil 7.2’de görülen, Aspilsan marka INR18650A28 model lityum iyon batarya hücreleri kullanılmıştır. Tedarik edilen lityum iyon hücreler, Liitokala 500 cihazı ile iç direnç ölçümleri yapılmış, tedarik edilen hücreler arasında

iç direnci birbirine en yakın 4 adet hücre seçilmiştir. Hücrelerin iç direncinin birbirine yakın olması, yapılan deneyler esnasında hücrelerin ısı dağılımının eşit olması ve şarj deşarj işlemi sırasında hücreler arasında voltaj dengesizliği olmaması için önemlidir.



Şekil 7.2. Aspilsan INR18650A28 batarya hücreleri

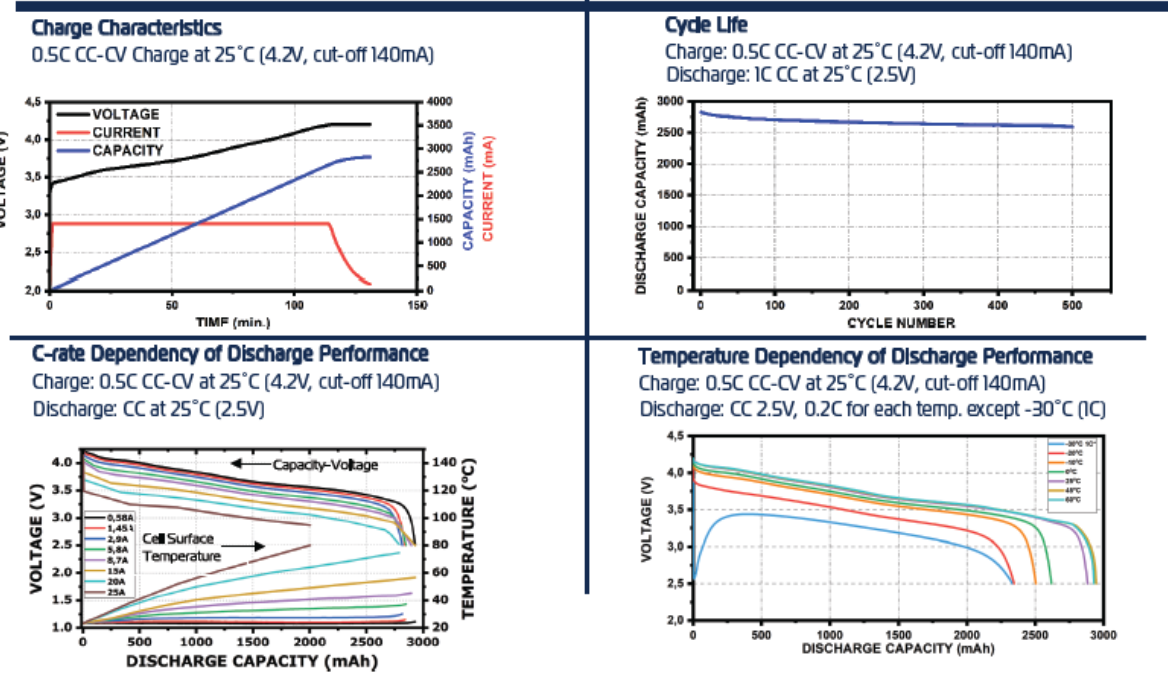
Seçilen hücreler puntalama işlemi öncesinde, şekil 7.3a’da görülen Liitokala şarj cihazı ile aynı doluluk değerinde olması için şarj edilmiş ve aynı voltaj seviyesine getirilmiştir. Şarj deşarj işlemleri esnasında batarya yönetim sistemi kullanılmadığından, batarya hücrelerinin zarar görmemesi için deneylere başlanıldığında hücrelerin aynı voltaj değerinde olması önemlidir. Deneyler sırasında batarya paketine bağlanılan şekil 7.3b’de görülen, toplam ve hücresel voltaj ölçüm cihazı deneyler sırasında kontrol edilmiş, batarya paketini oluşturan hücrelerden herhangi birisinin minimum voltaj değeri altına düşerek hücrelere zarar vermemesi için önlem alınmıştır. Tablo 7.1’de kullanılan lityum hücrelerin üretici firma tarafından sağlanan teknik veri sayfası değerleri görülmektedir.



Şekil 7.3 a) Liitokala 500 şarj cihazı b) Kapasite kontrol cihazı

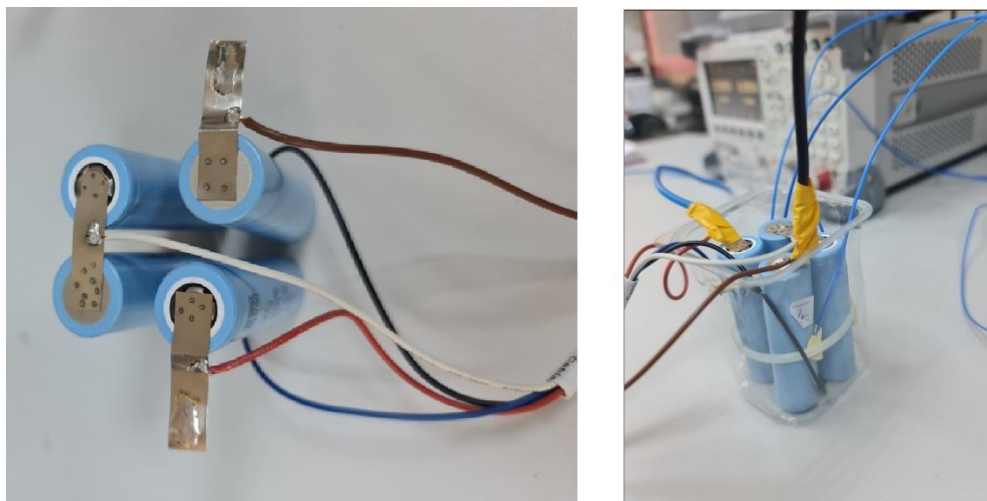
Tablo 7.1. Aspilsan INR18650A28 teknik özellikler

Performans Özellikleri		Değer
Deşarj Kapasitesi	Nominal Voltaj	2800 mah
		3.65 V
Enerji Yoğunluğu		230 Wh/kg-605 Wh/L
Şarj	Standart Şarj Akımı	1400 mah
	Maksimum Devamlı Şarj Akımı	4000 mah
	Kesme Voltajı	4,2 V
	Kesme Akımı	140 ma
Deşarj	Standart Deşarj Akımı	560 mah
	Maksimum Devamlı Deşarj Akımı	14000 mah
	Maksimum şartlandırılmış deşarj akımı (SOC>70% Cut-Off temperature 80 °C)	25000 mah
İşletme Sıcaklığı	Şarj	0°C-60°C
	Deşarj	-30°C-60°C



Şekil 7.4. Üretici firma Aspilsan tarafından sağlanan batarya özellikleri.

Deneyde kullanılmak üzere 4 adet lityum iyon batarya hücresinden oluşan bir batarya paketi tercih edilmiştir. Batarya paketi oluşturulurken seçilen hücreler birbirine puntalama yöntemi ile bağlanmıştır. Batarya hücreleri ile seri ve paralel bağlantılar yapılarak voltaj ve güç ihtiyacına göre batarya paketleri ticari olarak da oluşturulmaktadır. Bataryalar arasındaki elektriksel bağlantılar puntalama yöntemi ile yapılmaktadır. Belirli kalınlıktaki nikel şeritler, iki probu üzerinden anlık yüksek akım geçiren puntalama cihazları kullanılarak hücrelerin artı ve eksi kutuplarına hücre üzerinde aşırı ısı oluşturmada kaynaklanmaktadır. Şekil 7.5'te deneyde kullanılan birbirine seri puntalanmış 4 adet lityum hücre görülmektedir.



Şekil 7.5. Puntalanmış ve ısı sensörü eklenmiş batarya paketi

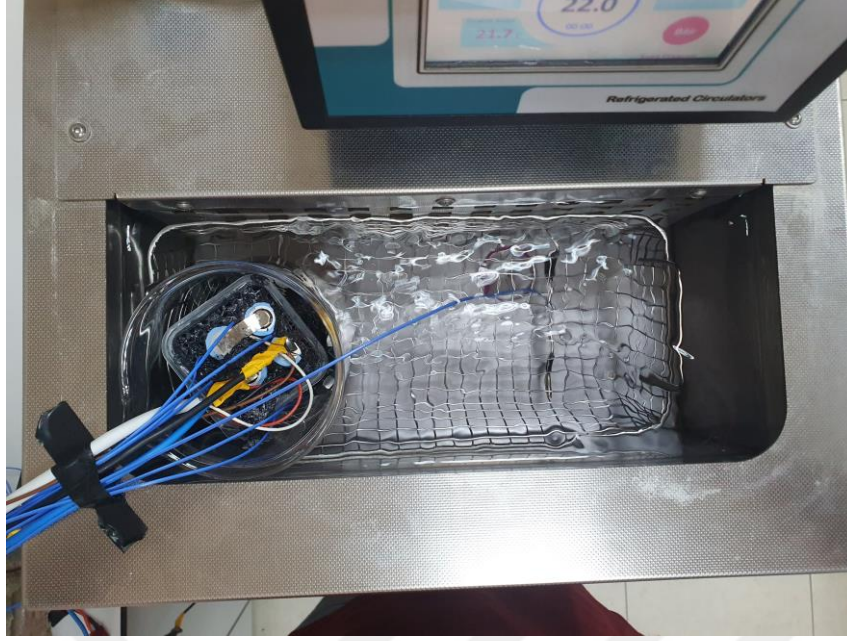
Puntalanarak 4S batarya paketi haline getirilen hücreler, bir kap içerisine yerleştirilmiş ve her bir hücrenin yüzeyine bir adet dataloger'dan gelen ısı sensörü takılmıştır. Ayrıca ısı sensörleri ölçüm yapılan ortam için bir adet ve batarya kabı için bir adet olarak eklenmiştir. Batarya paketinin nominal voltajı 14,8 Volt, maksimum voltajı 16,8 volt ve minimum voltajı 11,2 volt olarak üreticinin datasheet verilerinden hesaplanmıştır. Tablo 7.2'de deneyde kullanılan ekipman ve cihazların listesi verilmiştir.

Tablo 7.2. Deneyde kullanılan ekipman ve cihazların listesi

Cihaz	Açıklama
Uni-t UT3208+	Çok Kanallı Sıcaklık Kayıt Cihazı
Rigol DL3021	DC Yük
Thermomac	Etüv
CLRC-17C	Soğutmalı Su Banyosu
Extech	Multimetre
Imax B6	Dengelemeli Lityum Şarj Cihazı
Capacity Controller	Kapasite Kontrol Cihazı
Aspilsan INR18650A28	Lityum Batarya Hücresi
5000W Spot Welder	Pedallı Nokta Kaynak Makinesi

7.1. Kompozit Faz Değiştiren Malzeme ile Isıl Yönetim Testleri

Puntalanarak hazırlanan 4 adet seri lityum iyon batarya hücresinden oluşan sistem, deneylerin sabit ortam sıcaklığında yapılabilmesi için sirkülasyonlu soğutma banyosu içerisine konulmuştur. Şekil 7.6'da görüldüğü üzere hücrelerin yüzey sıcaklıklarını ölçmek için birer termokupl her bir hücreye sabitlenmiştir. Ayrıca kap içi sıcaklık ve ortam sıcaklığını ölçülmesi için birer termokupl'da ölçüm için eklenmiştir. Ayrıca, her bir batarya hücresinin voltaj seviyesinin takibi için kablolar eklenerek, bu kabloların ucuna ölçüm cihazına takılabilmesi için soket eklenmiştir. Tablo 7.3'te belirtilen değerler hangi C değerinin ne kadar akıma eşit olduğunu göstermektedir. Deney, Tablo 7.4'te belirtilen her bir C ile kompozit FDM'li ve FDM'siz olarak deşarj edilmiş hücre yüzeylerinin deşarj işlemi esnasındaki sıcaklıkları da dataloger ile kayıt altına alınmıştır. DC yük ile deşarj işlemi yapılırken, kesme gerilimi 11,2 volt olarak belirlenmiştir. Deşarj işlemi bu gerilim değerine ulaştığında deşarj işlemi durdurulmaktadır.



Şekil 7.6. Batarya paketi ve termokupl deney düzeneği

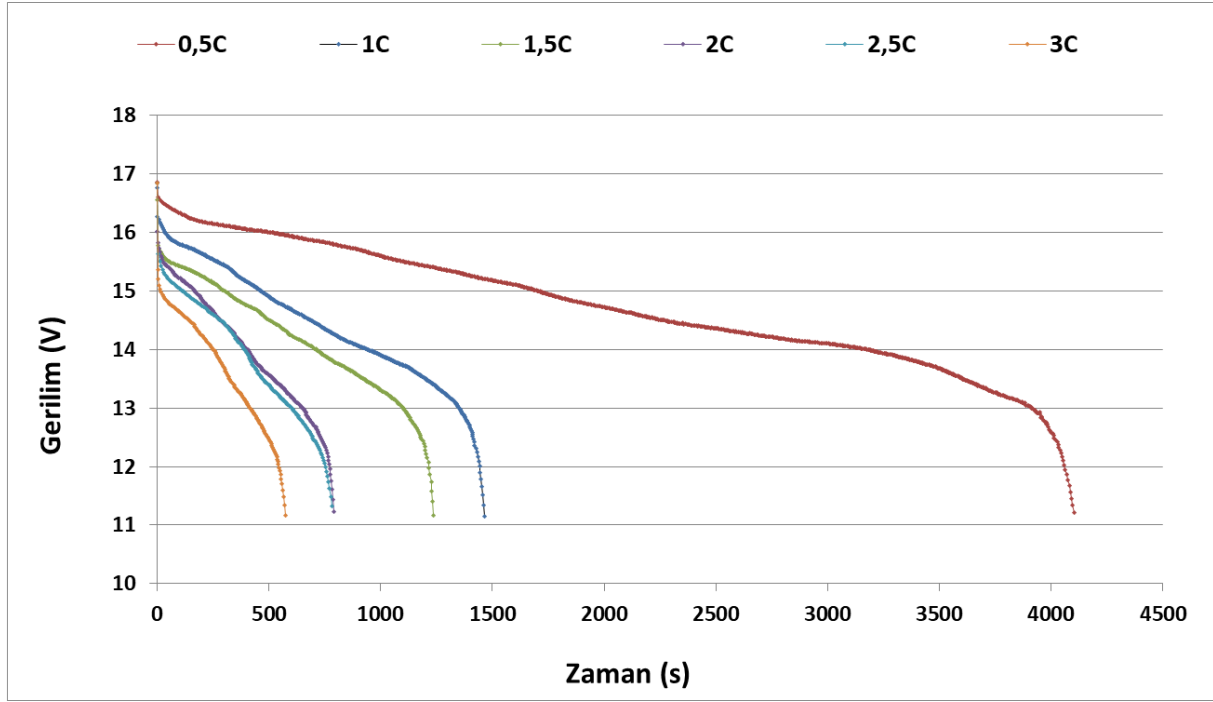
Tablo 7.3. Batarya C değerleri ve karşılık gelen akım değerleri

C	Akım	İşlem
0,5 C	1,4 A	Deşarj
1 C	2,8 A	Şarj-Deşarj
1,5 C	4,2 A	Deşarj
2 C	5,6 A	Şarj-Deşarj
2,5 C	7 A	Şarj-Deşarj
3 C	8,4 A	Deşarj

Tablo 7.4. FDM'li ve FMD'siz C değerleri

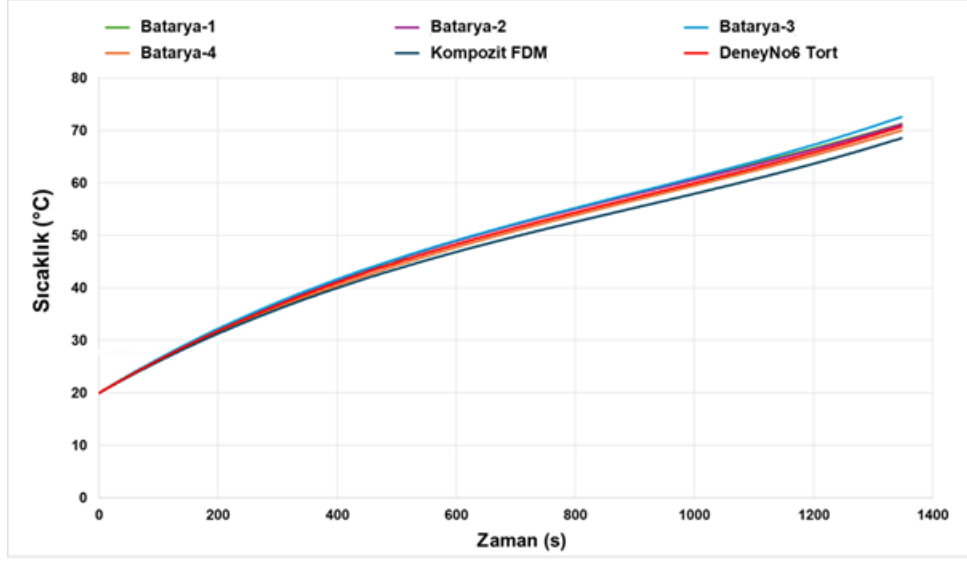
FDM Olmaksızın Yapılan Testler			FDM İle Yapılan Testler		
Plan No.1			Plan No.2		
Deney no	Şarj	Deşarj	Deney no	Şarj	Deşarj
1	1C	0,5 C	7	1C	0,5 C
2	1C	1 C	8	1C	1 C
3	1C	1,5 C	9	1C	1,5 C
4	1C	2 C	10	1C	2 C
5	1C	2,5 C	11	1C	2,5 C
6	1C	3 C	12	1C	3 C

Batarya paketi ilk önce FDM olmaksızın 0,5C, 1C, 1,5C, 2C, 2,5C, 3C değerleri için DC yük ile deşarj edilmiş ve C değerlerine karşılık gelen deşarj süreleri kayıt altına alınmıştır. Şekil 7.7’de her bir C değeri için kayıt altına alınan deşarj süreleri görülmektedir. C değeri arttıkça batarya voltajının daha hızlı düştüğü gözlemlenmiştir. Batarya paketinin kesme voltaj gerilimi 11,2 volt olarak belirlenmiştir. Grafikte her bir C değeri ile deşarj esnasında batarya voltajının 11,2 volt değerine düştüğü süreler görülmektedir.



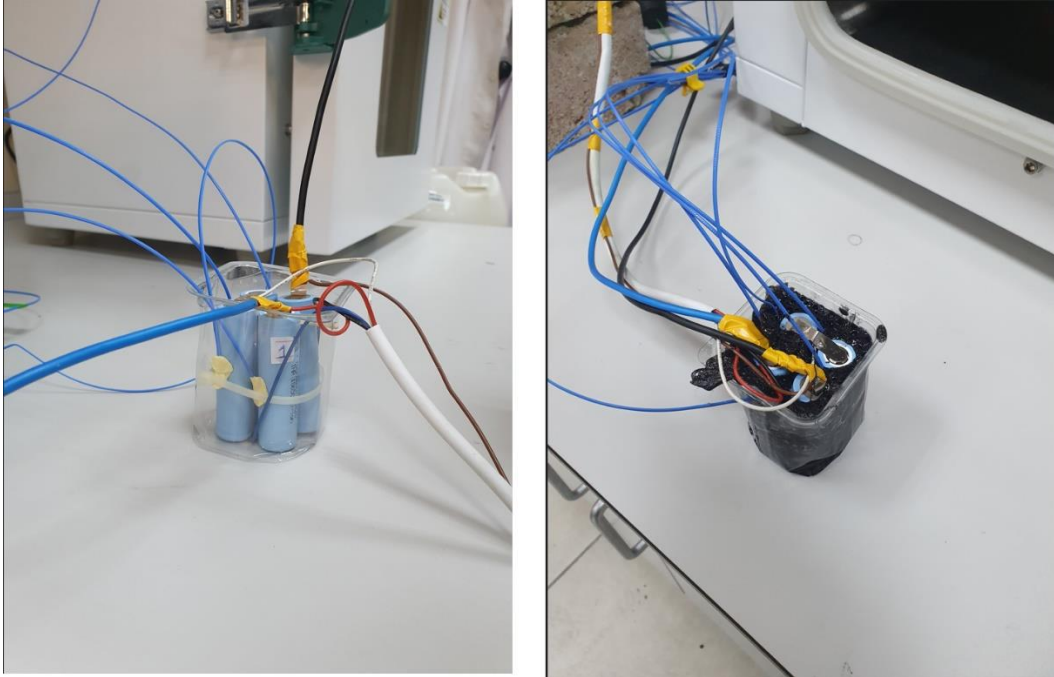
Şekil 7.7. Farklı C değerleri için deşarj süreleri

Şekil 7.8’de 3C deşarj akımı ile yapılan FDM olmaksızın batarya paketi hücrelerinin ulaştığı en yüksek sıcaklık değerlerinin zamana göre değişimi görülmektedir. Batarya hücrelerinin yüzey sıcaklığının yaklaşık olarak 70 °C’ye kadar yükselebildiği kayıt altına alınmıştır. Batarya grubu 3C deşarj değerinde yaklaşık 500 saniye sonunda kesme voltajı olan 11,2 volta düşmüş, bu değerde DC yük deşarjı kesmiş fakat batarya yüzey sıcaklığının yaklaşık 1400 saniyeye kadar ısısının yükselmeye devam ettiği görülmüştür.



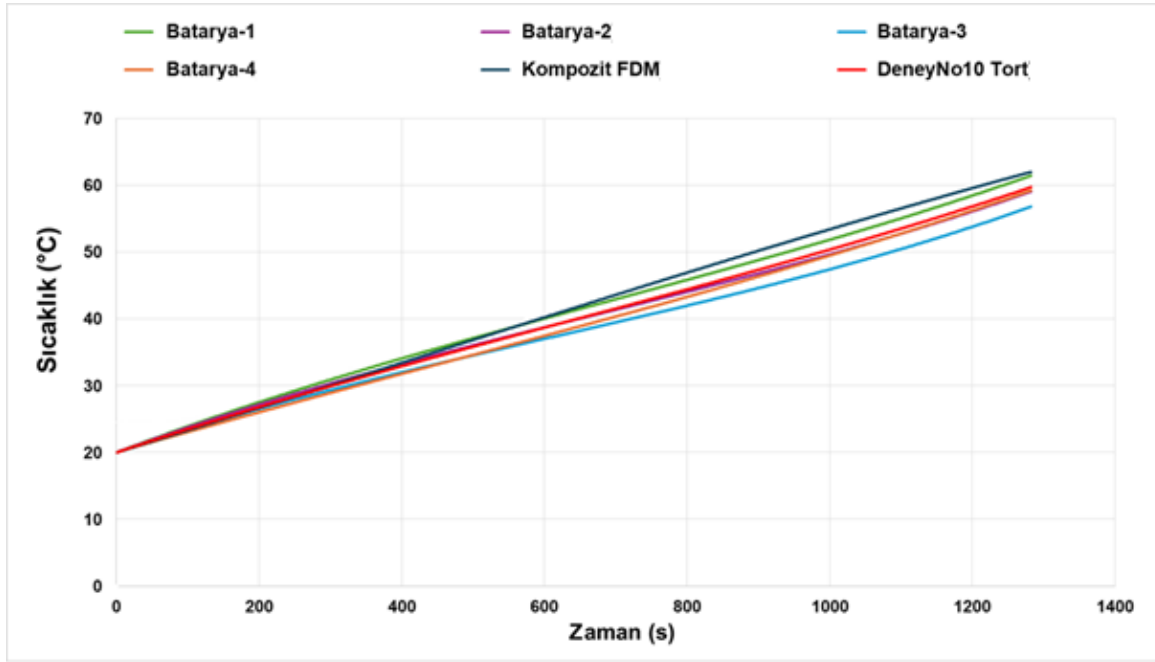
Şekil 7.8. 3C Deşarj değerinde FDM'siz deşarj testi

FDM olmaksızın tamamlanan batarya paketi deşarj testleri sonrası, batarya paketi içerisine sentezlenmiş olan kompozit faz değıştiren malzeme karışımı dökülmüştür. Şekil 7.9'da batarya paketi içerisine kompozit FDM dökülmüş hali görülmektedir.



Şekil 7.9. FDM'siz ve kompozit FDM'li batarya paketi

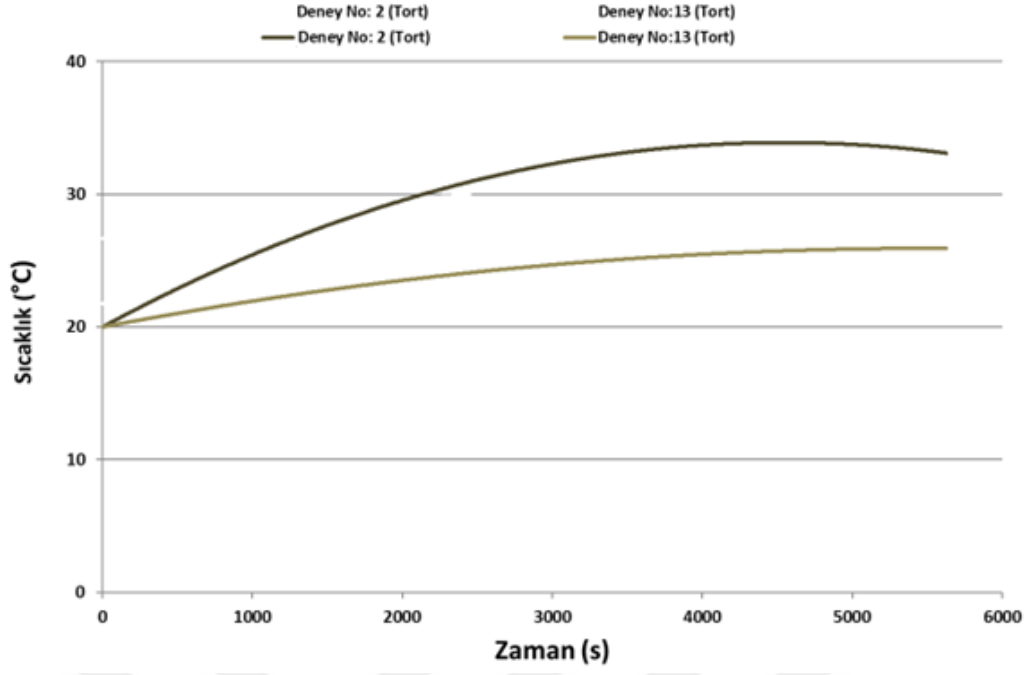
Daha önce FDM olmaksızın yapılan deneyler, kompozit FDM eklendikten sonra tablo 7.4'teki deşarj C değerleri ile tekrarlanmış ve her bir batarya için yüzey sıcaklıkları, FDM merkez sıcaklığı ve ortam sıcaklığı kayıt altına alınmıştır. Şekil 7.10'daki tabloda kompozit FDM eklendikten sonra 3C deşarj testleri sırasındaki sıcaklık değışimleri görülmektedir.



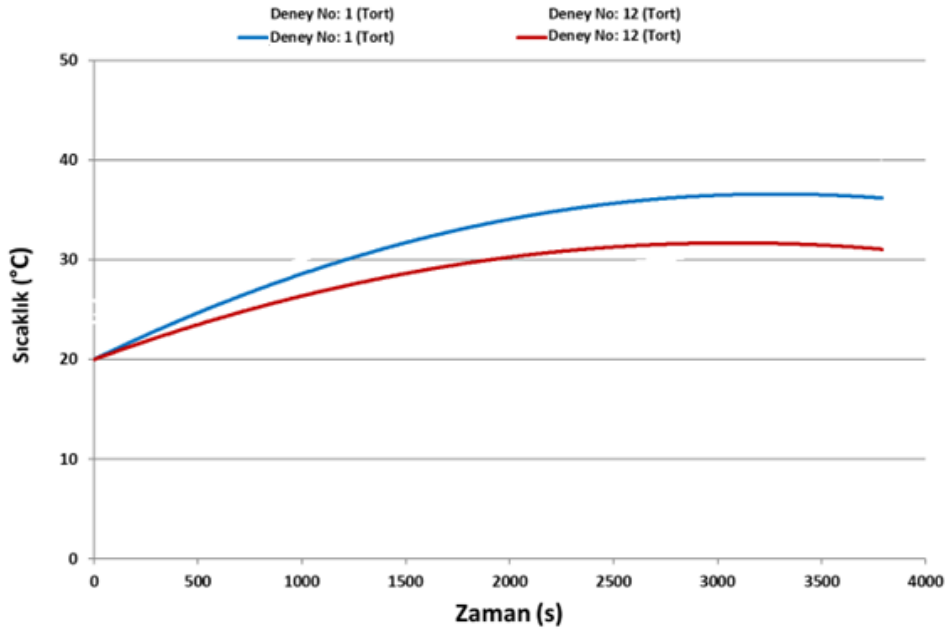
Şekil 7.10. 3C’de FDM ilaveli deşarj testi

FDM olmaksızın ve FDM eklendikten sonra yapılan deney sonuçları şekil 7.11’de karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. Grafiğin daha iyi anlaşılabilmesi için batarya yüzey sıcaklıklarının ortalaması alınmıştır.

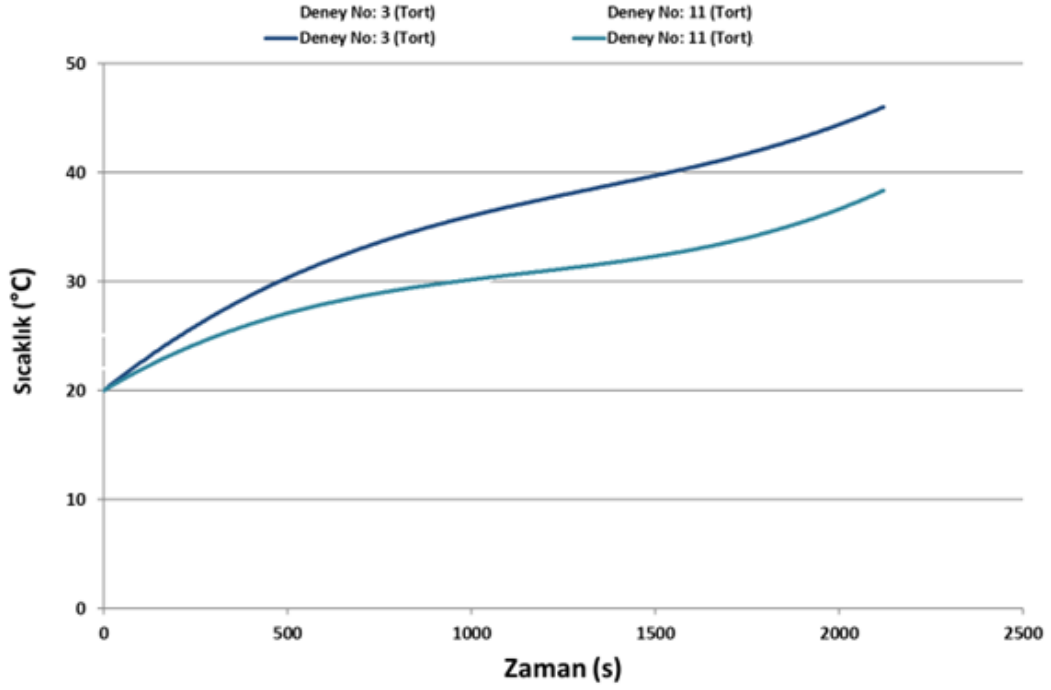
Tablo 7.4’te gösterilmiş olan tüm C değerleri için yapılan deşarj testleri ve bu testlere karşılık gelen batarya hücre yüzey sıcaklıklarının, FDM olmaksızın ve kompozit FDM eklendikten sonraki değerlerinin karşılaştırması şekil 7.17’de gösterilmiştir. FDM olmaksızın yapılan 3C’deki deneyde batarya yüzey sıcaklığı 70,8 °C’ye, kompozit FDM eklendikten sonra yapılan aynı test sonucunda ise 58,1 °C’ye çıktığı gözlemlenmiştir. Kompozit faz değiştiren malzemenin eklenmesi ile batarya yüzey sıcaklıkları kayda değer bir düşüş göstermiştir. Şekil 7.10’da batarya paketi içerisindeki tüm hücrelerin yüzey sıcaklığı gösterilmiştir. Ancak bundan sonraki tablolarda her bir C değeri için yapılan ölçümler, grafiklerin daha kolay anlaşılması için, hücre sıcaklıklarının aritmetik ortalaması olarak gösterilmiştir. Şekil 7.11,7.12,7.13,7.14,7.15,7.16, sırasıyla 0.5C,1C,1.5C,2C,2.5C ve 3C’ de yapılan kompozit FDM’siz ve kompozit FDM’ li deşarj deneylerine ait sıcaklıkların karşılaştırmaları görülmektedir.



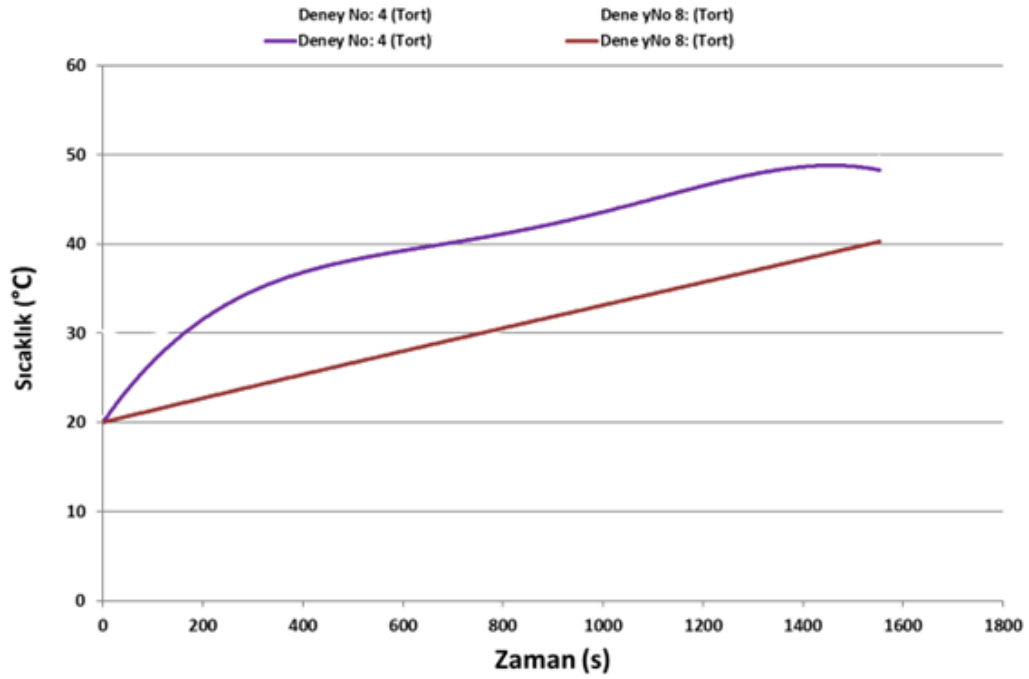
Şekil 7.11. 0,5C’de FDM’siz ve kompozit FDM’li deşarj testi karşılaştırması



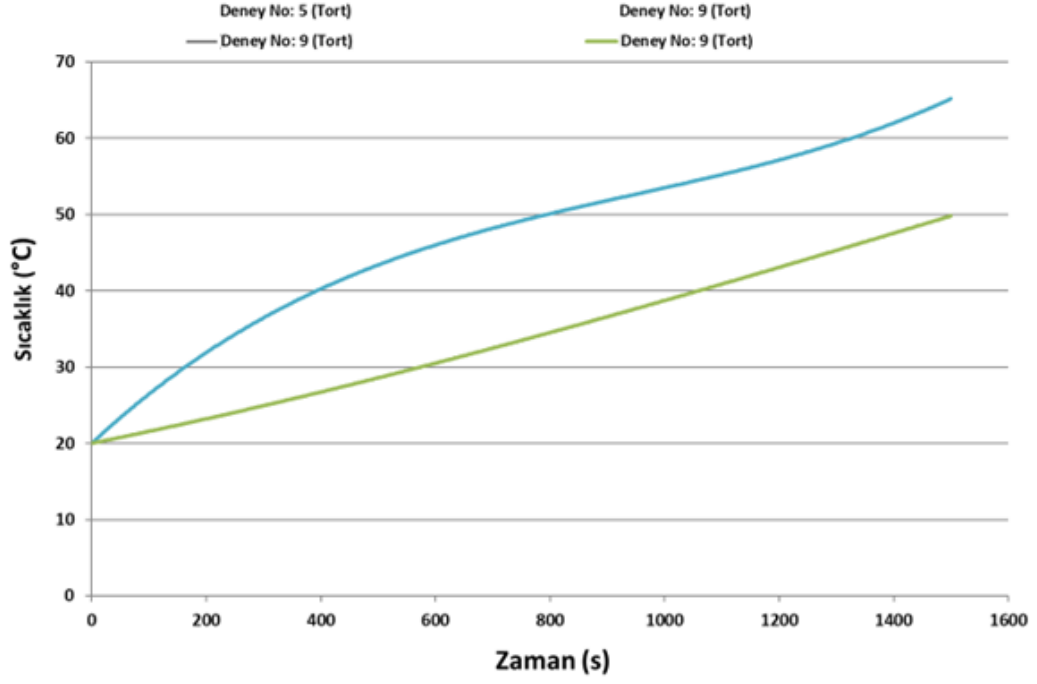
Şekil 7.12. 1C’de FDM’siz ve kompozit FDM’li deşarj testi karşılaştırması



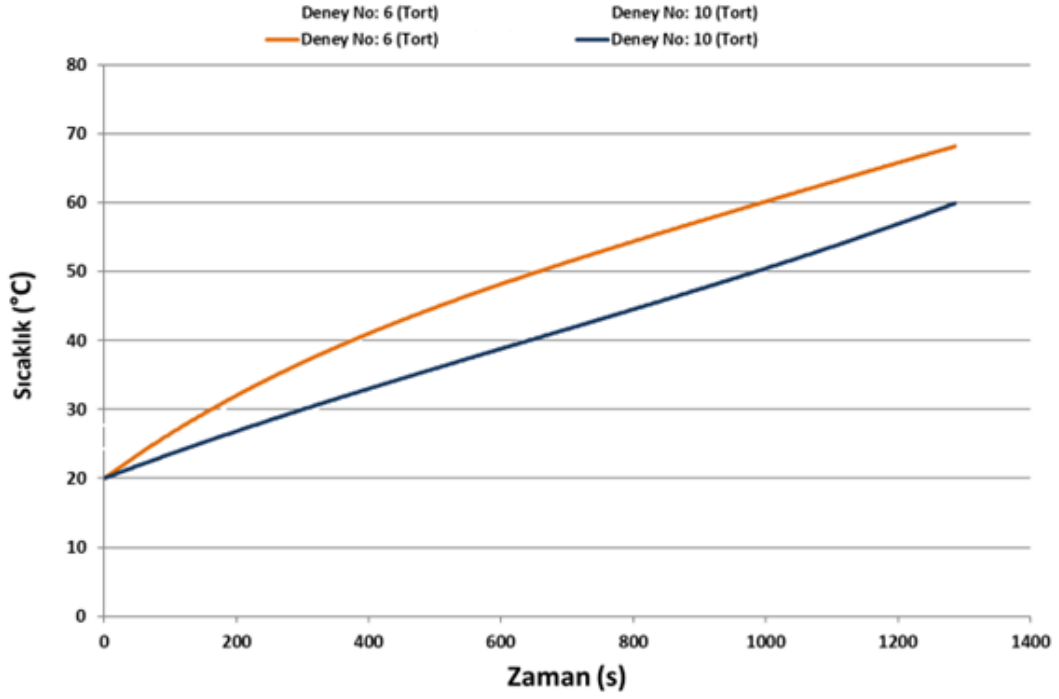
Şekil 7.13. 1,5C’de FDM’siz ve kompozit FDM’li deşarj testi karşılaştırması



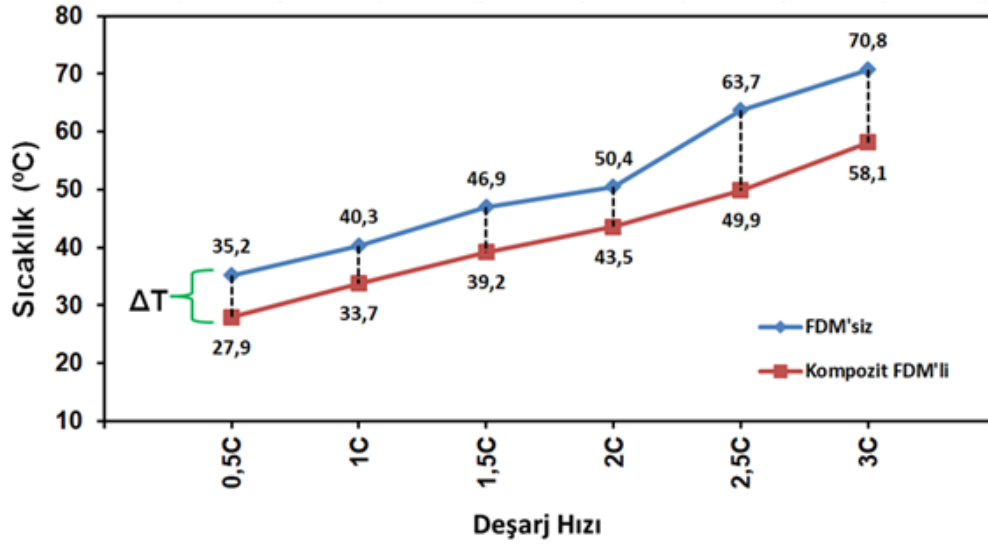
Şekil 7.14. 2C’de FDM’siz ve kompozit FDM’li deşarj testi karşılaştırması



Şekil 7.15. 2,5C’de FDM’siz ve kompozit FDM’li deşarj testi karşılaştırması



Şekil 7.16. 3C’de FDM’siz ve kompozit FDM’li deşarj testi karşılaştırması



Şekil 7.17. FDM'siz ve kompozit FDM'li deşarj testleri karşılaştırması



8. SONUÇ ve ÖNERİLER

Lityum iyon pillerin sağlıklı çalışması için batarya sıcaklığının kontrol altında tutulması gerekmektedir. Bunun için kullanılan yöntemlerden biri de faz değiştiren malzeme kullanılmasıdır. FDM kullanımı ile pasif bir şekilde batarya sıcaklığı kontrol altında tutulabilmektedir. Bu çalışma kapsamında, lityum iyon bataryaların ısıl yönetimine yönelik kompozit faz değiştiren malzemeler hazırlanmıştır. Bu amaçla, parafin tipi bir malzeme olan ve ticari olarak kolayca temin edilebilen RT28 ve destek malzemesi olarak poliüretan köpük hazırlanmıştır. Bu amaçla, ticari olarak temin edilen poliol ve izosiyanat oda sıcaklığında saf FDM ile birlikte sentezlenmiştir. Bu kapsamda, ısıl özellikleri geliştirmek üzere iki farklı kompozit FDM, katkısız ve grafit katkılı olmak üzere hazırlanmıştır. Elde edilen kompozit FDM'lerin FT-IR, spektrumları incelendiğinde kompozit FDM'nin reaksiyon olmaksızın elde edildiği doğrulanmıştır. Buna ilaveten, FDM içermeyen boş poliüretan köpük ve kompozit FDM'lere ait SEM analizi sonuçları incelendiğinde, poliüretan köpüğün yüzey ve gözeneklerinde RT28 olduğu açıkça görülebilmektedir. Ayrıca, %1 oranında ilave edilen grafitin kompozit FDM'nin sızdırmazlık özelliğini geliştirmesinin yanında elde edilen malzemenin darbelere dayanım stabilitesini de artırdığı gözlemlenmiştir. DSC analiz sonuçlarına göre, 35RT28 ve 35RT288-G kompozitlerinin erime gizli ısıları 18.07 J/g ve 20.69 J/g olarak belirlenmiştir. Bununla birlikte, 35RT28 ve 35RT288-G kompozit FDM'lerin faz geçiş sıcaklık aralıkları, sırasıyla, 16,80 °C – 30,79 °C ve 14,59 °C – 30,60 °C olarak bulunmuştur. Sonuç olarak, hazırlanan kompozit FDM'lerin sızdırmaz özellikleri, erime gizli ısıları ve uygun faz geçiş sıcaklıkları göz önüne alındığında lityum iyon bataryaların ısıl yönetim süreçlerinde kullanılabilme potansiyelleri bulunduğu görülmüştür. FDM olmaksızın yapılan 3C batarya deşarj testinde hücre yüzey sıcaklığının yaklaşık 70,8 °C'ye yükseldiği ve FDM eklendikten sonra batarya hücre yüzey sıcaklığının 58 °C'ye yükseldiği, faz değiştiren malzemenin gizli ısı depolama özelliği sayesinde yüzey sıcaklığının düşürülebileceği gözlemlenmiştir. Yapılan işlemler sırasında kompozit FDM'de herhangi bir sızdırma olmamıştır. RT28 esaslı kompozit FDM'nin Lityum iyon bataryaların ısıl yönetimi için uygun bir aday olabileceği ve sıcaklık dalgalanmalarının kontrol altına alınabileceği deneysel olarak gösterilmiştir.



KAYNAKLAR

- [1] T. Ahmad, D. Zhang, “A critical review of comparative global historical energy consumption and future demand : The story told so far,” *Energy Reports*, 6, 1973-1991, 2020
- [2] N. Abas, A. Kalair, N. Khan, “Review of fossil fuels and future energy Technologies”, *Futures*,69,31-49,2015
- [3] A. Guterres, Carbon neutrality by 2050: the world’s most urgent mission, United Nations , <https://www.un.org/sg/en/content/sg/articles/2020-12-11/carbon-neutrality-2050-the-world%E2%80%99s-most-urgent-mission> , (Erişim Tarihi : 5 mart 2024).
- [4] L. Li, J.Lin, N. Wu, S. Xie, C. Meng, Y. Zheng, X. Wang, Y. Zhao, “Review and outlook on the international renewable energy development,” *Energy and Built Environment*, 3, 139-157, 2022
- [5] Government of Canada, Links between fuel consumption, climate change, our environment and health, <https://naturalresources.canada.ca/energy/efficiency/communities-infrastructure/transportation/idling/4419>, (Erişim Tarihi : 31.03.2024)
- [6] E. Koç, K. Kaya, “Enerji Kaynakları-Yenilenebilir Enerji Durumu”, *Mühendis ve Makine*, 56, 36-47,2015
- [7] S. Øvergaard, “Issue paper: Definition of primary and secondary energy, energy information Administration, The National Energy Education Development Projects”, *Intermediate Energy Info book*, 2006
- [8] Jewell, Jessica. (2011). The IEA Model of Short-Term Energy Security (MOSES): Primary Energy Sources and Secondary Fuels. IEA Energy Papers.
- [9] M. Aneke, M. Wang,”Energy storage Technologies and real life applications – A state of the art review”, *Applied Energy*,179,350-377,2016
- [10] H. Ibrahim, A. Ilinca, J.Perron, “Energy storage systems- Characteristics and comparisons”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12, 1221-1250,2008
- [11] S.K. Kamali, V.V. Tyagi, N.A. Rahim, N.L. Panwar, H. Mokhlis, “Emergence of energy storage technologies as the solution for reliable operation of smart power systems : A review”, *Renewable and sustainable Energy Reviews*, 25, 135-165,2013
- [12] A. Berrada, K. Loudiyi, I. Zorkani, “System design and economic performance of gravity energy storage”, *Journal of Cleaner Production*, 156, 317-326, 2017
- [13] T. Kousksou, P. Bruel, A. Jamil, T.E. Rhafaki, Y. Zeraouli, “Energy storage: Applications and challenges”, *Solar Energy Materials & Solar Cells*,120,59-80,2014
- [14] I. Hadjipaschalis, A. Poullikkas, V. Efthimiou, “Overview of current and future energy storage technologies for electric power applications”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*,13,1513-1522,2009

- [15] T.M.I Mahlia, T.J Saktisahdan, A. Jannifar, H.S.C Matseelar, "A review of available methods and development on energy storage ; technology update", *Renewable and sustainable energy reviews*,33,532-545,2014
- [16] H. Zhao, Q. Wu, S. Hu, H. Xu, C.N.Rasmussen, "Review of energy storage system for wind power integration support", *Applied Energy*,137,545-553,2015
- [17] K. E. Nielsen and M. Molinas, "Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES) in power systems with renewable energy sources," 2010 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Bari, Italy, 2010, pp. 2487-2492, doi: 10.1109/ISIE.2010.5637892.
- [18] B. Koçak, A.I. Fernandez, H. Paksoy, "Review on sensible thermal energy storage for industrial solar applications and sustainability aspects", *Solar Energy*,209,135-169,2020
- [19] T. Nomura, N. Okinaka, T. Akiyama, "Technology of Latent Storage for High Temperature Application: A Review," *ISIJ International*,50,1229-1239,2010
- [20] A. Koli, P. Mundotiya, J. Garg, 3rd International conference on Power Electronics and IoT Applications in Renewable Energy and its Control (PARC),2024
- [21] K.V. Vidyanandan, "Batteries for electric vehicle",*Research Gate*,2019
- [22] Y.Miao, P. Hynan, A.V. Jouanne, A. Yokochi, "Current li-ion battery Technologies in electric vehicles and opportunities for advancements", *Energies*,12,1-20,2019
- [23] M.S. Çetin, B. Karakaya, M.T.Gençoğlu, "Elektrikli araçlar için lityum iyon bataryaların modellenmesi", *Fırat üniversitesi Müh. Bil. Dergisi*,33,755-763,2021
- [24] J. Wen, Y. Yu, C. Chen, "A Review on Lithium-Ion Batteries Safety Issues : Existing Problems and Possible Solutions", *Material Express*,2,197-212,2012
- [25] Battery and Energy Technologies, Lithium Battery Failures, https://www.mpoweruk.com/lithium_failures.htm, (Erişim Tarihi : 16.04.2024)
- [26] S. M. Rezvanizani, Z. Liu, Y. Chen, J. Lee, "Review and recent advances in battery health monitoring and prognostics Technologies for electric vehicle (EV) safety and mobility", *Journal of Power Sources*,256,110-124,2014
- [27] G. Xia, L. Cao, G. Bi, "A review on battery thermal management in electric vehicle application", *Journal of Power Sources*, 367,90-105,2017
- [28] H. Wang, F. He, L. Ma, "Experimental and modeling study of controller-based thermal management of battery modules under dynamic loads", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 103, 154-164, 2016
- [29] S. Roger, Packaging of New Servers, Energy Efficiency Aspects: 1st Berkeley Symposium on Energy Efficient Electronics,
- [30] D.Chen, J. Jiang, G.H. Kim, C. Yang, A. Peseran, "Comparison of different cooling methods for lithium ion battery cells", *Applied Thermal Engineering*, 94, 846-854, 2016

- [31] M.Malik, İ. Dinçer, M.A. Rosen, “Review on use of phase change materials in battery thermal management for electric and hybrid electric vehicles”, *International Journal of Energy Research*, 40, 1011-1031, 2016
- [32] Z.Rao, S. Wang, “A review of power battery thermal energy management”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 4554-4571, 2011
- [33] L. Ianniciellio, P.H. Biwole, P.Achard, “Electric vehicles batteries thermal management systems employing phase change materials”, *Journal of Power Sources*, 378, 383-403, 2018
- [34] Z.G. Shen, S. Chen, X. Liu, B. Chen, “A review on thermal management performance enhancement of phase change materials for vehicle lithium-ion batteries”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 148, 2021
- [35] R. Wen, Y. Liu, C. Yang, X. Zhu, Z. Huang, X. Zhang, W. Gao, “Enhanced thermal properties of stearic acid/carbonized maize straw composite phase change material for thermal energy storage in buildings”, *Journal of Energy Storage*, 36, 102420, 2021
- [36] G.R. Molaeimanesh, S.M.M Nasiry, M. Dahmardeh, “Impact of configuration on the performance of a hybrid thermal management system including phase change material and water-cooling channels for Li-ion batteries”, *Applied Thermal Engineering*, 181, 116028, 2020
- [37] M. Luo, J. Song, Z. Ling, Z. Zhang, X. “Fang, Phase change material coat for battery thermal management with integrated rapid heating and cooling functions from -40 °C to 50 °C” , *Materials Today Energy*, 20, 100652, 2021
- [38] J. Zhang, X. Li, G. Zhang, Y.Wang, J. Guo, Y. Wang, Q. Huang, C. Xiao, Z. Zhong, “Characterization and experimental investigation of aluminum nitride-based composite phase change materials for battery thermal management”, *Energy Conversion and Management*, 204, 112319, 2020
- [39] X. Zhang, C. Liu, Z. Rao, “Experimental investigation on thermal management performance of electric vehicle power battery using composite phase change material”, *Journal of Cleaner Production*, 201, 916-924, 2018
- [40] M.M.E. Idi, M.Karkri, M.A. Tankari, “passive thermal management system of Li-ion batteries using PCM composites: Experimental and numerical investigations”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 169, 120894, 2021
- [41] J. Zhang, X. Li, G. Zhang, H. Wu, Z. Rao, J. Guo, D. Zhou, “Experimental investigation of the flame retardant and form-stable composite phase change materials for a power battery thermal management system”, *Journal of Power Sources*, 480, 229116, 2020
- [42] E. Özbaş, “A novel design of passive cooler for PV with PCM and two-phase closed thermosyphons”, *Solar Energy*, 245, 19-24, 2022
- [43] F.A.M.K. Al-Malaki, H.M. Hussien, G. Türkakar, R. Jafari, “Investigation of the effectiveness of PCM on the energy saving, thermal comfort and indoor air quality in overcrowded area”, *Energy & Buildings*, 299, 113583, 2023

- [44] M.H. Abokersh, M. Osman, O. El-Baz, M. El-Morsi, O. Sharaf, “Review of the phase change material (PCM) usage forsolar domestic water heating systems (SDWHS)”, *Internaional Journay of Energy Research*,42, 329-357, 2017



ÖZGEÇMİŞ

Lise eğitimini İstanbul’da tamamladı. 2012 yılında Yıldız Teknik Üniversitesi’nden ön lisans diploması ile mezun oldu. Bir müddet özel sektörde çalıştıktan sonra 2019 yılında Yalova Üniversitesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü’nden mezun oldu. Enerji Sistemleri Mühendisi olarak yurtiçi ve yurtdışı projelerde çalıştı. 2021 yılından beri Yalova Üniversitesi Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü’nde Yüksek Lisans Öğrencisi olarak devam etmektedir.

TEZDEN TÜRETİLEN YAYIN VE ESERLER

Bozer, E., Mert, M.S., “Lityum-iyon bataryaların faz değiştiren malzemeler ile ısı yönetimi”, 4. Uluslararası Bilimsel Araştırmalar ve Yenilikçi Çalışmalar Sempozyumu, 13-16 Mart, 2024

