

**ELEKTRİKLİ ARAÇLAR İÇİN GELİŞTİRİLECEK  
HİBRİT YAPILI SOĞUTMA SİSTEMİ MODÜLÜNÜN  
MEKANİK PERFORMANSININ ARAŞTIRILMASI**

**Furkan ERGÜL**



T.C.  
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ELEKTRİKLİ ARAÇLAR İÇİN GELİŞTİRİLECEK HİBRİT YAPILI  
SOĞUTMA SİSTEMİ MODÜLÜNÜ MEKANİK PERFORMANSININ  
ARAŞTIRILMASI**

Furkan ERGÜL  
0000-0002-2614-2512

Dr. Öğr. Üyesi Kenan TÜFEKÇİ  
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2023  
**Her Hakkı Saklıdır**

## TEZ ONAYI

Furkan ERGÜL tarafından hazırlanan “ELEKTRİKLİ ARAÇLAR İÇİN GELİŞTİRİLECEK HİBRİT YAPILI SOĞUTMA SİSTEMİ MODÜLÜNÜN MEKANİK PERFORMANSININ ARAŞTIRILMASI” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Mekanik Anabilim Dalı’nda **YÜKSEK LİSANS** olarak kabul edilmiştir.

**Danışman:** Dr. Öğr. Üyesi Kenan TÜFEKÇİ

- Başkan** : Dr. Öğr. Üyesi Betül GÜLÇİMEN ÇAKAN İmza  
0000-0003-1739-1143  
Bursa Uludağ Üniversitesi,  
Mühendislik Fakültesi,  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
- Üye** : Prof. Dr. Ahmet ÇOŞKUN İmza  
0000-0002-3351-4898  
Süleyman Demirel Üniversitesi,  
Mühendislik Fakültesi,  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
- Üye** : Dr. Öğr. Üyesi Kenan TÜFEKÇİ İmza  
0000-0001-5358-1396  
Bursa Uludağ Üniversitesi,  
Mühendislik Fakültesi,  
Makine Mühendislik Anabilim Dalı

**Yukarıdaki sonucu onaylarım**

**Prof. Dr. Ali KARA**  
**Enstitü Müdürü**

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

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

**beyan ederim.**

**07/06/2023**

**Furkan ERGÜL**

## **TEZ YAYINLANMA FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI BEYANI**

Enstitü tarafından onaylanan lisansüstü tezin/raporun tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı (kâğıt) ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda verilen koşullarla kullanıma açma izni Bursa Uludağ Üniversitesi'ne aittir. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet hakları ile tezin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanım hakları tarafımıza ait olacaktır. Tezde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanılması zorunlu metinlerin yazılı izin alınarak kullandığını ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederiz.

Yükseköğretim Kurulu tarafından yayınlanan “**Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge**” kapsamında, yönerge tarafından belirtilen kısıtlamalar olmadığı takdirde tezin YÖK Ulusal Tez Merkezi / B.U.Ü. Kütüphanesi Açık Erişim Sistemi ve üye olunan diğer veri tabanlarının (Proquest veri tabanı gibi) erişimine açılması uygundur.

Danışman Adı-Soyadı  
Tarih

Dr. Kenan Tüfekçi

Öğrencinin Adı-Soyadı  
Tarih

Furkan Ergül

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### ELEKTRİKLİ ARAÇLAR İÇİN GELİŞTİRİLECEK HİBRİT YAPILI SOĞUTMA SİSTEMİ MODÜLÜNÜN MEKANİK PERFORMANSININ ARAŞTIRILMASI

**Furkan ERGÜL**

Bursa Uludağ Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makine Mühendisliği Mekanik Anabilim Dalı

**Danışman:** Dr. Öğr. Üyesi Kenan TÜFEKÇİ

Bu tez çalışması, elektrikli araçlarda yaygınlaşması beklenen ve batarya paketlerinin soğutma yöntemleri arasında önemli bir yere sahip olan daldırma soğutma yönteminin mekanik açıdan incelenmesini amaçlamaktadır. Daldırma soğutma yöntemi, batarya paketlerinin termal yönetimini iyileştirmek için yeni bir yaklaşım sunmaktadır. Bu yöntemde, termal enerji daha etkili bir şekilde dağıtılır. Bu sayede, bataryanın sıcaklığı kontrol altında tutularak aşırı ısınma riski azalır ve batarya paketinin performansı artar. Bu yöntem, elektrikli araçlar için özel dielektrik sıvıların geliştirilmesiyle daha da yaygınlaşmaya başlamıştır. Ancak, yöntemin mekanik açıdan değerlendirmesi yeteri kadar yapılmamıştır. Bu çalışmada, bir batarya modülünün yeni nesil daldırma soğutma yönteminin mekanik yapısı ve dayanıklılığı, sayısal analiz programı kullanılarak detaylı bir şekilde incelenmiştir. Bu inceleme, batarya modülünün mekanik dayanıklılığını, daldırma soğutma yönteminin uygulanabilirliğini ve etkinliğini değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Analiz çalışmaları, batarya modülünün güvenli ve istikrarlı bir şekilde çalışmasını sağlamak, uzun ömürlü olmasını ve mekanik streslere dayanıklı olmasını sağlamak için son derece önemlidir. Analiz sonuçlarına dayanarak, batarya modülünün mekanik performansını artırmak için yeni malzemeler veya tasarım değişiklikleri yapılabilir. Bu çalışma, daldırma soğutma yönteminin termal açıdan üstün performans sergilediği ve mekanik açıdan da uygun bir seçenek olduğunu kanıtlamaktadır. Bu bilgiler, tasarımcıların ve mühendislerin batarya modülünün performansını optimize etmelerine ve batarya modüllerinin kalitesini artırmalarına yardımcı olacaktır. Mekanik performans analizleri, batarya modülleri için hayati önem taşımaktadır ve daldırma soğutma yönteminin yaygınlaşmasına önemli katkılarda bulunmaktadır. Bu çalışma, elektrikli araçların güvenliği, performansı ve sürdürülebilirliği açısından önemli bir adım olarak değerlendirilebilir.

**Anahtar Kelimeler:** Batarya Paketi, Batarya Mekanik Yönetim Sistemi, Matematiksel Modelleme, Sonlu Elemanlar Analizi, Elektrikli Araçlar

**2023, xiii + 65 sayfa.**

## **ABSTRACT**

MSc Thesis

**INVESTIGATION OF THE MECHANICAL PERFORMANCE OF THE HYBRID COOLING SYSTEM MODULE TO BE DEVELOPED FOR ELECTRIC VEHICLES**

**Furkan ERGUL**

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

**Supervisor:** Dr. Kenan TUFEKCI

This thesis study aims to mechanically examine the immersion cooling method, which is expected to become widespread in electric vehicles and has an important place among the cooling methods of battery packs. The immersion cooling method offers a new approach to improving the thermal management of battery packs. In this method, thermal energy is dissipated more effectively. In this way, the battery's temperature is kept under control, reducing the risk of overheating and increasing the battery pack's performance. This method has become more common with the development of special dielectric fluids for electric vehicles. However, the mechanical evaluation of the method has not been done sufficiently. In this study, the mechanical structure and durability of a battery module's new-generation immersion cooling method were investigated in detail using a numerical analysis program. This review aims to evaluate the mechanical durability of the battery module, and the feasibility and effectiveness of the immersion cooling method. Analysis studies are extremely important to ensure the safe and stable operation of the battery module, its longevity and resistance to mechanical stresses. Based on the analysis results, new materials or design changes can be made to improve the mechanical performance of the battery module. This study proves that the immersion cooling method exhibits superior thermal performance and is a suitable option from a mechanical point of view. This information will help designers and engineers optimize battery module performance and improve battery module quality. Mechanical performance analyses are vital for battery modules and contribute significantly to the widespread use of the immersion cooling method. This study can be considered an important step in terms of electric vehicle safety, performance and sustainability.

**Keywords:** Battery Pack, Battery Mechanical Management System, Mathematical Modelling, Finite Element Analysis, Electric Vehicles.

**2023, xiii + 65 pages.**

## TEŐEKKÖR

Bu tez alıőmasının tamamlanmasında desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen aileme, sayın Yunus Maral'a ve danıőmanım Dr. Kenan Tüfeki'ye sağladıkları rehberlik ve katkılar için teőekkürlerimi sunarım. Tez alıőmamı uzun soluklu bir ARGE faaliyetine dönüőtüren ve proje liderliğinde yer aldığım PRACEN Teknoloji'ye ve ekibime teőekkürlerimi sunarım.

Furkan ERĐÖL  
07/06/2023



## İÇİNDEKİLER

	<b>Sayfa</b>
ÖZET.....	vi
ABSTRACT.....	vii
TEŞEKKÜR.....	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ.....	x
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	4
2.1. Elektrikli Araçlar.....	4
2.1.1. Elektrikli araçlarda kullanılan batarya paketleri ile ilgili incelemeler.....	6
2.1.2. Batarya paketi yönetim sistemi ve pil hücreleri.....	9
2.2. Elektrikli Araçlarda Kullanılan Soğutma Yöntemleri.....	10
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	16
3.1. Tasarım Kriterlerinin Belirlenmesi.....	17
3.2. Malzeme Bilgisi.....	21
3.2. Ağdan Bağımsızlık Testi.....	22
3.4. Mesh Modeli.....	24
3.5. Mekanik Analiz için Sınır Koşullarının Belirlenmesi.....	26
3.5.1. Yandan darbe dinamik analiz sınır koşulunun tanımlanması.....	27
3.5.2. Zarf plaka için dinamik analiz sınır koşulunun tanımlanması.....	33
3.5.3. Statik analiz için sınır koşulunun tanımlanması.....	34
3.5.4. Modal analiz için sınır koşulunun tanımlanması.....	38
3.6. Termal Analiz için Sınır Koşullarının Belirlenmesi.....	40
4. BULGULAR.....	43
4.1. Batarya Modülü Termal Performans Değerlendirmesi.....	57
5. TARTIŞMA ve SONUÇ.....	60
KAYNAKLAR.....	62
ÖZGEÇMİŞ.....	65

## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

<b>Simgeler</b>	<b>Açıklama</b>
$\mu$	Viskozite (cSt)
C	Nominal kapasite (mAh)
d	Yoğunluk ( $\text{kg/m}^3$ )
$d_1$	Batarya modülünün kalınlığı (mm)
$d_2$	İnce zarf plaka arası mesafe (mm)
$d_3$	Pil hücrelerinin merkezleri arasındaki mesafe (mm)
$d_4$	Pil hücresinin ve koruyucu plakanın modül tabanına mesafesi (mm)
$d_5$	Koruyucu ince zarf plakanın uzunluğu (mm)
E	Elastik modül (GPa)
f	Frekans (Hz)
h	Isı transfer katsayısı ( $\text{W/m}^2\text{K}$ )
m	Kütle (kg)
P	Özgül güç (W/kg)
Q	Hacimsel debi (lt/s)
$Q_a$	Akma direnci (MPa)
$Q_c$	Kopma direnci (MPa)
t	Zaman (s)
u	Enerji yoğunluğu (Wh/L)
$\nu$	Poisson Oranı
v	Batarya modül hacmi ( $\text{m}^3$ )
V	Nominal voltaj (V)

<b>Kısaltmalar</b>	<b>Açıklama</b>
Bpmy	Batarya paketi mekanik yönetim
Btys	Batarya termal yönetim sistemi
Bys	Batarya yönetim sistemi
Fem	Sonlu elemanlar yöntemi
Fvm	Sonlu hacimler yöntemi
Ncap	Avrupa araç değerlendirme programı
Weg	Su etilen glikol karışımı

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<b>Sayfa</b>
Şekil 2. 1. Elektrikli araç satış rakamları (“İlk elektrikli otomobil”, 2022)....	5
Şekil 2. 2. Elektrikli araç elemanları (Çetkin, 2022).....	5
Şekil 2. 3. Nissan Leaf hava soğutmalı batarya modülü (Türkbay, 2020).....	7
Şekil 2. 4. Chevrolet Volt batarya paketi (Türkbay, 2020).....	8
Şekil 2. 5. Ford Focus batarya paketi (Türkbay, 2020).....	8
Şekil 2. 6. Doğrudan daldırma soğutma yöntemi (“XING”, 2022). ....	12
Şekil 3. 1. Daldırma soğutma için tasarlanmış batarya modülü CAD dosyası... ..	18
Şekil 3. 2. Batarya modülü CAD dosyası kesit görüntüsü.....	19
Şekil 3. 3. Ara kesitleri alınmış batarya modülünün yüzey tasarımı. ....	20
Şekil 3. 4. Batarya modülü mesh modeli. ....	25
Şekil 3. 5. Mesh modeli detay görüntüsü.....	25
Şekil 3. 6. Batarya modülü yer çekim sınır koşulu. ....	28
Şekil 3. 7. Ortalama araç ağırlığının 1 modül üzerindeki etkisi.....	29
Şekil 3. 8. Dielektrik sıvının modüle uyguladığı kuvvet. ....	30
Şekil 3. 9. Yandan çarpma testinin şematikleştirilmiş hali. ....	31
Şekil 3. 10. Ani darbe yükü tanımlaması. ....	32
Şekil 3. 11. Displacement sınır koşulu tanımlaması. ....	32
Şekil 3. 12. -y yönünde 1000 N kuvvet tanımlaması. ....	33
Şekil 3. 13. Batarya modülü statik analiz displacement sınır koşulu.....	34
Şekil 3. 14. Statik analiz yer çekimi sınır koşulu.....	35
Şekil 3. 15. Dielektrik sıvının modül yüzeylerine uyguladığı kuvvet.....	36
Şekil 3. 16. Pil hücrelerinin koruyucu plakaya uyguladığı kuvvet. ....	37
Şekil 3. 17. Batarya modülünün üst yüzeyine gelen 1000N kuvvet sınır koşulu. ....	38
Şekil 3. 18. Modal analiz için sabitleme bölgesi.....	39
Şekil 3. 19. Hava ile soğutma yöntemi ile tasarlanan batarya modülü ..... ..	41
Şekil 3. 20. Soğutucu plaka ile soğutma yöntemi ile tasarlanan batarya modülü. ....	41
Şekil 3. 21. Dielektrik sıvı ile soğutulan batarya modülü.....	42
Şekil 4. 1. 5 mm kalınlığındaki batarya modülü ..... ..	43
Şekil 4. 2. 5 mm batarya modülü transient analiz sonucu.....	44
Şekil 4. 3. 8 mm kalınlığındaki batarya modülü. ....	45
Şekil 4. 4. 8 mm batarya modülü transient analiz sonucu.....	45
Şekil 4. 5. 9 mm kalınlığındaki batarya modülü. ....	46
Şekil 4. 6. 9 mm batarya modülü transient analiz sonucu.....	46
Şekil 4. 7. 10 mm kalınlığındaki batarya modülü. ....	47
Şekil 4. 8. 10 mm batarya modülü transient analiz sonucu.....	48
Şekil 4. 9. 0.2 mm kalınlığına sahip zarf plakalı batarya modülü.....	49
Şekil 4. 10. 0.25 mm kalınlığına sahip zarf plakalı batarya modülü.....	50
Şekil 4. 11. 0.3 mm kalınlığına sahip zarf plakalı batarya modülü.....	51
Şekil 4. 12. 0.8 mm kalınlığına sahip zarf plakalı batarya modülü.....	52
Şekil 4. 13. 0.9 mm kalınlığına sahip zarf plakalı batarya modülü.....	53
Şekil 4. 14. 1 mm kalınlığına sahip zarf plakalı batarya modülü.....	54
Şekil 4. 15. Batarya modülü statik analiz gerilme dağılımı. ....	55
Şekil 4. 16. Batarya modülü statik analiz deformasyon dağılımı. ....	56
Şekil 4. 17. Modal analiz 10 mod değeri. ....	56
Şekil 4. 18. Kütle katılım oranı. ....	57
Şekil 4. 19. Hava ile soğutma yöntemi sıcaklık dağılımı.....	58

Şekil 4. 20. Soğutucu plaka ile soğutma yöntemi sıcaklık dağılımı. ....	58
Şekil 4. 21. Doğrudan sıvı ile soğutulan modülünün ısı dağılımı. ....	59

## ÇİZELGELER DİZİNİ

	<b>Sayfa</b>
Çizelge 2. 1. Panasonic NCR 18650A Li-ion pil (“Panasonic”, 2022). .....	10
Çizelge 2. 2. Hava ve Su ısı transferi (Yenigün ve Ulu, 2018). .....	11
Çizelge 2. 3. Soğutma yöntemlerinin karşılaştırılması. ....	13
Çizelge 2. 4. Isı transfer katsayıları (Çengel ve Ghajar, 2010). ....	14
Çizelge 3. 1. AISI 1045 çeliği (Zhao, Liu, Wang, Guo ve Chen, 2018). .....	22
Çizelge 3. 2. Alüminyum 6061-T6 (Zhao ve diğerleri 2018). ....	22
Çizelge 3. 3. Ağdan bağımsızlık testi sonuçları .....	23
Çizelge 4. 1. Zarf plaka kalınlıklarına göre ağırlık değişimleri. ....	55

## 1. GİRİŞ

Günümüzde ulaşım büyük oranda içten yanmalı motorlu taşıtlar ile sağlanmaktadır. İçten yanmalı motora sahip taşıtlarda hareket enerjisinin elde edilebilmesi için petrol türevli yakıtların kimyasal enerjisinin yanma reaksiyonlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Dünyada petrol rezervlerinin kısıtlı olması, giderek azalması ve bu araçların sebep olduğu hava kirliliği, iklim değişikliği gibi sürdürülebilir gelecek için bir tehdit oluşturması nedeniyle elektrikli araçların, içten yanmalı motora sahip araçlara alternatif olup olamayacağı konusu gündeme gelmektedir. Bu doğrultuda yerel idarecilerce kentlere ve şirketlere dair taahhütler de bulunmakta ve çeşitli hedefler belirlemektedir. Bu taahhütlerle ulaşım kaynaklı ortaya çıkan salınımların (emisyonlarının) sınırlanması önemli yer tutmaktadır (“Liquid cooling for EV”,2019),(Amalesh ve Narasimhan, 2020).

Bir elektrikli otomobilin üretimi, şarj edilmesi ve kullanılmasıyla ilişkili toplam sera gazı emisyonları, benzinli bir otomobile ilişkili toplam sera gazı emisyonlarından daha düşüktür (“US Environmental”, 2022). Aynı zamanda yapılan çalışmalara göre fosil yakıtlar kullanılarak üretilecek olan elektrik enerjisi durumunda bile konvansiyonel araçlara göre sera gazı salınımı mevcut durumdan %19 daha aşağıda olması beklenmektedir. Bu değer yenilenebilir enerji kaynakları ile elektrik enerji üretilmesi durumunda %90’ların üzerine çıkması beklenmektedir (Önçağ, Üzkal, Yeşil ve Eliyi, 2021).

Küreselde yaygınlaşan hızlı ve çevreci dönüşüm hareketi her alanda kendini göstermektedir. Bu yaklaşımın Türkiye üzerindeki etkilerini görmekte mümkündür. 2030 projeksiyonunda sadece Türkiye’deki elektrikli araç sayısının 1 000 000 üzerine çıkacağı tahmin edilmektedir. 2021 yılı itibariyle ülke genelinde şarj istasyonlarının sayısı 3036’ya yükselmiştir (“Enerji piyasası”, 2021). Türkiye’nin yerli aracının (Togg) 2023 yılı itibariyle piyasaya sürülmesi, Tübitak gibi önemli ve girişimciliği destekleyen kurumların yeşil mutabakat ve ileri teknoloji ürünlere yatırımlarını arttırması bu yaklaşımın yakın gelecekte hızla ivmelenmeye devam etmesi fikrini desteklemektedir. Elektrikli araçların konvansiyonel araçlarla kıyaslandığında, sunmuş olduğu donanım basitliği, çevreci olmaları, elektriğin nispeten en erişilebilir güç kaynaklarından biri olması ve birçok taşıt teknolojisinin elektrikli kullanıma uygun hale getirilebilmesinin mümkün olması gibi

sebeplerden dolayı kullanım alanı her geçen gün genişlemektedir (“International Energy”, 2022).

Elektrikli araçların batarya paketlerinden bağımsız düşünülmesi neredeyse olanaksızdır. Batarya paketinin çalışma performansı doğrudan araç performansını ve maliyetlerini etkilemektedir. Batarya teknolojilerinde en önemli parametreler batarya paketinin etkili bir mekanik ve termal yönetim sistemine sahip olmasıdır. Günümüzde araçların güç kapasitesine göre değişik geometrilere ve değişik soğutma sistemlerine sahip batarya paketleri kullanılmaktadır. Elektrikli araçlarda kullanılan batarya soğutma sistemlerini 3 ana başlık altında toplamak mümkündür: hava soğutmalı sistemler, sıvı soğutmalı sistemler (doğrudan ve dolaylı) ve faz değiştiren malzemeler ile yapılan soğutma yöntemleri.

Hava soğutmalı sistemler; basit bir tasarıma ve düşük işletme maliyetine sahiptir. Ancak bununla birlikte hava soğutmalı sistemlerde yeterli miktarda ısı transferi için daha fazla hacimsel debi, yani daha fazla alan gerekmektedir (Ramadass, Haran, White ve Popov, 2002). Enerji ihtiyacının daha fazla olduğu araç ve mekanizmalarda ise sıvı soğutmalı sistemler kullanılmaktadır. Sıvı soğutma yöntemini 2 kısma ayırmak mümkündür; dolaylı sıvı soğutma yöntemi, doğrudan sıvı soğutma yöntemi. Dolaylı sıvı soğutma yöntemine sahip batarya termal yönetim sisteminde (BTYS), soğutucu sıvı (genellikle su-glikol çözeltisi) batarya içerisinde bulunan pil hücrelerinin yüzeylerine doğrudan temas etmemekte olup, pil hücresi ve akışkan arasında soğutucu plaka, sıvı kanalları ve ısı borusu gibi ekipmanlar kullanarak gerçekleştirilir (Kaba ve ark. 2021). Bu tarz sistemlerde termal homojenliğin genellikle tasarım kabiliyetine çok bağlı olması, tasarımların karmaşık yapılar içermesi, sirkülasyon sistemi için ağır ekipmanların kullanılması bu yöntemin önündeki engeller olarak sayılabilir (Dubey, Pulugundla ve Sronji, 2021; Falcone, Volo, Hellany, Rossi ve Pulvirenti, 2021). Doğrudan sıvı soğutma yöntemi ise pil hücrelerinin direkt olarak elektrik iletmeyen (dielektrik) bir sıvı soğutucuya daldırılmasıyla veya sirküle edilmesiyle gerçekleşir. Batarya pil hücreleri komple soğutucu içerisinde bulunduğundan dolayı doğrudan (direkt) sıvı soğutma sistemi olarak isimlendirilir. Bu yöntemin avantajı, hücrelerin soğutucu sıvı ile doğrudan teması yoluyla son derece yüksek ısı transfer oranlarının elde edilebilmesidir. Aynı şekilde dolaylı sıvı soğutma yöntemine göre, batarya paketlerinde daha kompakt ve modüler bir

tasarım imkânı sunmaktadır. Ayrıca elektrikli araçlar için özel geliştirilen daldırma sıvıları, yangın söndürücü olarak hareket edebilmekte ve termal kaçak riskini ve etkilerini azaltmaktadır (“Liquid cooling for EV”, 2019; Han, Garud, Hwang ve Lee, 2022; Roe ve diğerleri, 2022). Bir diğer soğutma yöntemi de faz değiştiren madde ile soğutma yöntemidir. Bu sistemlerde faz değiştiren madde ısıyı emerek veya serbest bırakarak faz değişimine uğrar. Ancak bu yöntem yüksek yanıcılık riskine sahip olması, faz değişimi esnasında oluşan büyük hacimsel değişiklik ve düşük ısıl iletkenlik gibi sebeplerden dolayı ticari olarak çok tercih edilmemiş ve kullanım alanı yaygınlaşmamıştır (Canım ve Kalfa, 2021).

Direkt daldırma sıvı soğutmalı yöntem klasik soğutma yöntemlerinden farklılıklar içermektedir. Dolaylı soğutma yöntemlerinde kullanan birçok karmaşık ve ağırlığı arttırıcı etkiye sahip elemana bu yöntemde ihtiyaç duyulmamaktadır. Aynı zamanda diğer soğutma yöntemlerine göre daha iyi bir termal performans sağlamaktadır. Bu tez çalışmasında batarya pil hücrelerinin bir dielektrik sıvıya daldırılmasıyla termal yönetim sistemi olan yeni nesil doğrudan (direkt) sıvı soğutmalı sistemin batarya paketi statik ve dinamik performans değerleri incelenecektir. Batarya paketi üzerindeki gerilim dağılımları ve deformasyon dağılımları sonlu elemanlar yöntemiyle incelenip, geliştirmeler önerilecektir.

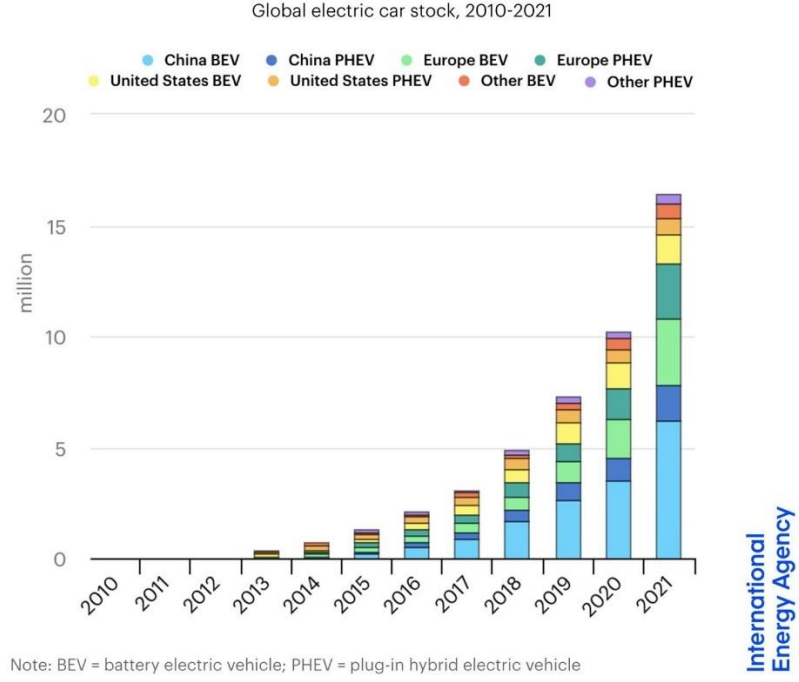


## 2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI

### 2.1. Elektrikli Araçlar

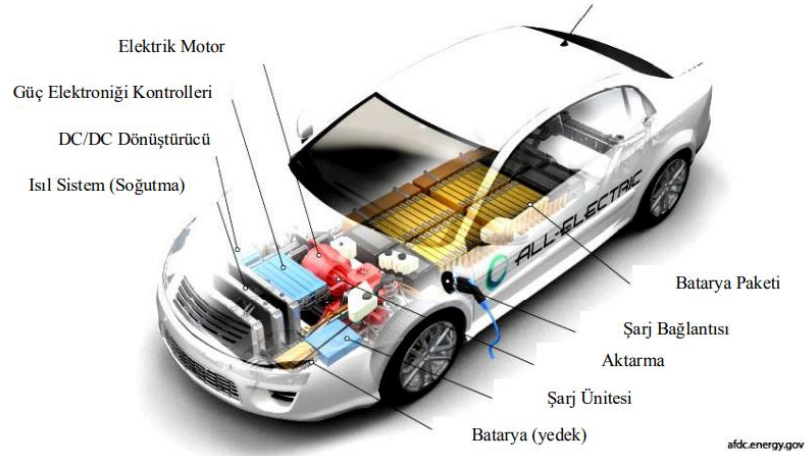
Elektrikli araçların tarihçesi oldukça eskilere dayanmaktadır. 18302lu yıllarda Robert Anderson, ilk binek elektrikli aracı tasarladığı tahmin edilmektedir. Elektrikli araçların üretimi ise 1835 yılını bulmuştur. 1800'lü yılların sonunda New York elektrikli taksi filosuyla birlikte Amerika'da elektrikli araçlara olan ilgi artmıştır ("US Environmental", 2022). 1920'li yıllarda elektrikli araçlara olan ilgi uzun menzilli araçlara ihtiyaç duyulması, petrol fiyatlarının düşmesi, marş motorunun icadı ve yolların iyileşmesi gibi bir takım teknik sebeplerle azaldı. Bu ilgi kaybı Henry Ford'un içten yanmalı motoru seri üretmeye başlamasıyla devam etti. 1912'ye geldiğinde 1750 USD civarında olan elektrikli araçlar, 650 USD'lik benzinlik araçlar karşısında rekabetçiliğini o dönem için koruyamamıştır. 1960 ve 1970 yılları arasında ise bu durum tersine dönmeye başladı. İçten yanmalı motora sahip araçların oluşturduğu sera gazı emisyonları ve petrol türlevlerinin küresel manipülasyonlara maruz kalması gibi sebeplerden dolayı alternatif yakıtlı araçlara ihtiyaç duyulmaya başlanmıştır. 1990'lı yıllarda çevre düzenlemelerine gidilmesini takip eden süreçte elektrikli araç sektörü yeniden ivmelenmeye geçmiştir. 2023 yılına geldiğinde ise görülmektedir ki elektrikli araçlara yatırım yapmayan üretici firma kalmamıştır (Sayan ve Yüksel, 2021).

Teknolojik açıdan gelişim baz alınarak bir sıralama yapıldığında; Mikro hibrit araçlar, yarı hibrit araçlar, tam hibrit araçlar, plug-in hibrit elektrikli araçlar, tam elektrikli araçlar şeklinde bir sıralama yapmamız mümkündür (Sayan ve Yüksel, 2021). Tam elektrikli araçlar herhangi bir içten yanmalı motora sahip değildir ve motorun ihtiyacı olan enerjiyi verebilecek etkili bir bataryaya sahiptir. Elektrikli araçlar düşünüldüğünde akıllara ilk olarak binek araçlar gelmektedir ancak elektrikli dönüşüm toplu taşıma araçları, yük taşıyan araçlar, gıda depolama, lojistik ve madenlerde kullanılan tüm araçları kapsamaktadır. Örneğin Avrupa Birliği gıda depolarında dizel araç kullanımını yasaklamıştır ve bu nedenle tüm forkliftler elektrikli dönüşüme uğramıştır. Mümkün olan tüm araçların elektrikli dönüşüme uğraması sera gazı emisyonlarının düşürülmesinin yanı sıra, yakıt tasarrufu, kullanım ve bakım maliyetleri bakımından da tasarruf sağlanması elektrikli araç dönüşümünü hızlandırmaktadır (Çetkin, 2020). Bu dönüşümün yıllara göre değişimi Şekil 2.1'de görüldüğü gibidir.



Şekil 2. 1. Elektrikli araç satış rakamları (“İlk elektrikli otomobil”, 2022).

Elektrikli araçlar geleneksel otomobillerden farklı olarak elektrik motoru, batarya paketi ve şarj elektroniği bulundururken (Şekil 2.2); vites kutusu, debriyaj, benzin deposu, egzoz sistemi gibi birçok aksamı bulundurmamaktadır (Çetkin, 2020).



Şekil 2. 2. Elektrikli araç elemanları (Çetkin, 2022).

### 2.1.1. Elektrikli araçlarda kullanılan batarya paketleri ile ilgili incelemeler

Elektrikli araç sektörünün talep artışını karşılayabilmesi bu alandaki teknolojik zorlukların aşılması gerekmektedir. Elektrikli araçlar incelendiğinde en kritik teknolojik parametrelerden birinin batarya modülleri olduğu bilinmektedir. Etkili batarya teknolojisi araç performansını, menzili ve verimini doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle elektrikli araçlar ile ilgili yapılan çalışmaların önemli bir bölümünü batarya teknolojileri teşkil etmektedir.

Elektrikli araçlarda kullanılan batarya paketlerinin içerisinde bulunan pil hücreleri çeşitli farklılıklar göstermektedir. Nikel Kadmiyum (NiCd), Nikel Demir (NiFe), Lityum Kobalt Oksit (LCO), Lityum Demir Fosfat (LFP) ve Lityum İyon (Li-ion) gibi birçok farklı türde pil çeşidi bulunmaktadır (Anonim 2022c). Bahsedilen farklı çeşitteki pil hücreleri şarj, deşarj ömürleri, minimal gerilim değerleri ve termal performansları gibi konulardan farklılıklar göstermektedir (Kaba, Kalkan ve Celen, 2021). Birçok pil hücresi çeşidi bulunmasına rağmen; Li-ion bataryalar, yüksek özgül enerjileri (118 – 250 Wh/kg), yüksek enerji yoğunluğu (200 – 400 Wh/L), yüksek özgül güç (200 – 430 W/kg), yüksek çevrim ömrü ve ideal çalışma sıcaklıklarından (20 – 60 °C) dolayı en çok tercih edilen pil hücreleridir (Yong, Ramachandaramurthy, Tan ve Mithulananthan, 2015). Ancak pil hücreleri üzerinde yapılan çalışmalar göstermektedir ki 50 °C üzerindeki pil sıcaklıkları pil hücrelerinin performansını oldukça düşürecek ve bu durum doğrudan batarya paketinin performansını etkileyecektir. (Türkbay, 2018). Daha fazla ısınma durumunda ise batarya paketlerinde termal kaçak ve patlama riskleri meydana gelebilmektedir. Li-ion bataryalar üzerinde yapılan araştırmalarda 50 °C’de 600 çevrimini yapan pil hücrelerinin performansı %60 oranında azaldığı gözlenmiştir. 55 °C ise %70’lik bir performans kaybı görülmektedir (Ramadass ve diğerleri, 2002).

Bahsedildiği üzere pil hücrelerinin performansı doğrudan batarya paketini etkilemektedir. Günümüzde yaygınlaşan birçok elektrikli araçta Li-ion piller kullanılmaktadır ve otomotiv üreticileri batarya paketlerindeki çözümleri genellikle Li-ion piller üzerinde gerçekleştirilmektedir. Batarya yönetim sistemi (BYS) pil hücrelerinin termal olarak korunabileceği soğutucu sistemleri içeren batarya termal yönetim sistemini (BTYS) ve pil hücrelerinin bir yazılım yardımıyla yönetim sistemini kapsamaktadır. Bu tez

çalışmasında BTYS çözümleri üzerinde durulacaktır. Bazı elektrikli araç üreticilerinin batarya paketlerinin teknik detayları aşağıda örneklerle açıklanmıştır:

- Nissan Leaf

2010 yılından sonra kullanılmaya başlanan Nissan Leaf 24 kWh'lik Li-ion batarya paketi kullanmaktadır. Nissan Leaf BTYS olarak aktif bir soğutma sistemi içermemektedir. Pasif soğutma sistemi olan hava ile soğutma yöntemi tercih edilmiştir. Ayrıca batarya paketi (Şekil 2.3) aracın tam ortasında yer aldığı için ağırlık merkezinde aracın alt bölümüne toplanmaktadır. Ayrıca bu konumdan kaynaklı, olası toz ve sıvıların engellenmesi için batarya paketinin kapalı bir Alüminyum kap içerisine alınması gerekmiştir. Tam şarj halinde alacağı yol ise ortalama 117.48 km'dir (Türkbay, 2020).



**Şekil 2. 3.** Nissan Leaf hava soğutmalı batarya modülü (Türkbay, 2020).

- Chevrolet Volt

2010 yılında üretilen Chevrolet Volt 16 kWh'lik batarya paketinden oluşmaktadır. 16 kWh'lik Li-ion batarya kutusu haricinde 1.4 lt içten yanmalı motora sahip hibrit bir araçtır. Şekil 2.4'te görüldüğü üzere T formu batarya kutusu yakıt deposu ve vites kutusu tüneline konumlandırılmıştır. Araç kabininin dışına montajı gerçekleştiğinden dolayı çevreden gelen tehlikelere karşı tam kapalı bir muhafaza içerisinde olmalıdır. Kapasitesinin yalnızca 10.3 kWh'lik kısmını

kullanmaya olanak sağlamaktadır. Chevrolet Volt tam kapasitede alacağı mesafe 46.67 km'dir (Türkbay, 2020).



**Şekil 2. 4.** Chevrolet Volt batarya paketi (Türkbay, 2020).

- Ford Focus

Elektrikli Ford Focus 2011 yılında tamamen elektrikli versiyonu ile piyasaya çıkmıştır. LG Chem. tarafından üretilen Li-ion bataryalardan oluşan batarya paketi 23 kWh'lik kapasiteye sahiptir. Ford Focus 'ta 2 adet batarya paketi bulunmaktadır, 1. Paket arka koltuğun altında, diğeri ise Şekil 2.5'te gösterildiği üzere arka koltuğun arkasına bagaja montajı gerçekleştirilmiştir. Tam şarj kapasitesiyle alacağı mesafe 115,87 km'dir (Türkbay, 2020).



**Şekil 2. 5.** Ford Focus batarya paketi (Türkbay, 2020).

### 2.1.2. Batarya paketi yönetim sistemi ve pil hücreleri

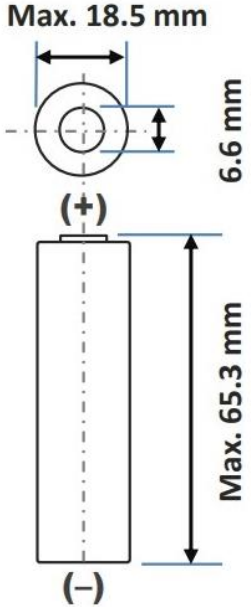
Elektrikli araç dinamizmi her geçen yıl artmakta ve konvansiyonel araçlar ile rekabet edecek düzeye hızla gelmektedir. Yaşanan bu ivmelenme, batarya paketinin etkili yönetim sistemlerinin geliştirilmesiyle daha da artmaktadır. Şarj sürelerinin kısalması, ağırlık hafifletme çalışmaları, daha yüksek menzil imkânı, batarya kapasitelerinin artırılması gibi gelişmeler elektrikli araçların ivmelenmesini daha da arttırmaktadır.

Elektrikli araç teknolojisinde disiplinler arası yapılan birçok ARGE çalışması mevcuttur ancak bir elektrikli aracı oluşturan en önemli elemanlardan birisi bataryalardır. Bu sebeple batarya teknolojisinde yapılan iyileştirmeler son derece önem kazanmaktadır. Batarya paketleri üzerinde yapılan çalışmalar Batarya Paketi Termal Yönetim Sistemleri (BPTY) ve Batarya Paketi Mekanik Yönetim Sistemleri (BPMY) olarak iki ana kategoriye ayırmak mümkündür. BPTY sistemi batarya paketi içerisinde yer alan pil hücrelerinin homojen sıcaklık aralığında tutulmasını, yüksek şarj ve deşarj oranlarında ani sıcaklık artışlarına karşı koruma sağlamasını, termal kaçak ve patlamalara karşı bir koruma sağlamasını hedeflemektedir. BPMY sistemi ise hedeflenen çıktılar doğrultusunda pil hücreleri arası mesafeler ve pil hücrelerinin konumlandırılmasını, yardımcı ekipman gerekliliğini, batarya paketinin ağırlığını, ebatlarını ve batarya paketinin olası darbe ve yüklere karşı tepkilerini absorbe etme yeteneklerinin incelenmesini içeren kısımdır.

Elektrikli araçlar batarya paketlerinde kurşun asit, nikel-kadmiyum, nikel-metal hibrit, lityum iyon, lityum iyon polimer, lityum iyon fosfat, çinko hava, lityum sülfür gibi birçok farklı pil hücresi kullanılabilmektedir (Luo, Cao, Liu, Zhang ve Fang, 2022). Ancak lityum iyon piller yüksek güç yoğunlukları, yüksek kapasiteleri, yüksek verimlilikleri ve uzun çevrim oranları gibi avantajlarından dolayı ticari olarak en çok tercih edilen pil hücreleridir. Gittikçe artan yüksek enerji güç ihtiyacı ve tasarım farklılıklarından doğan yeni nesil geliştirilebilir kompakt batarya paketlerinde pil hücrelerinin dizilimi ve yöntemi her geçen gün daha kritik öneme sahip olmaktadır (Frank ve Qasemi, 2020). Elektrikli araçlarda kullanılan Li-ion piller genellikle silindirik veya prizmatik geometrik özellikte olmaktadır. Pil hücreleri birbirine seri ya da paralel olarak bağlanarak grupları oluşturur. Gruplar birbiriyle bağlanmasıyla modülü oluştururlar. Modüllerin birleştirilmesiyle de batarya paketi oluşmaktadır (Celen ve Kaba, 2020).

Bu çalışmada ebatları ve teknik detayları kullanılmak üzere en yaygın kullanılan 18650 Li-ion pil grubundan olan Panasonic NCR 18650 Li-ion pil hücreleri seçilmiştir.

**Çizelge 2. 1.** Panasonic NCR 18650A Li-ion pil (“Panasonic”, 2022).

	Nominal Kapasite	3100 mAh
	Nominal Voltaj	3.75 V
	Ağırlık	46.6 g +-1.5g
	Çalışabilir Çevre Sıcaklık Aralığı	-20 °C +60 °C
	Tasarlanacak batarya modülü 7 Paralel 8 Seri bağlı olacaktır.	$7 \times 3.75 = 26,25V$ $8 \times 3100 = 24,8 Ah$ $26,25 \times 24,8 = 0,66 kWh$

## 2.2. Elektrikli Araçlarda Kullanılan Soğutma Yöntemleri

Bir elektrikli aracın performansı ve dayanıklılığında batarya paketleri kritik öneme sahiptir. Geleceğin elektrikli araçlarında yüksek güç kapasiteleri, uzun menziller gibi birtakım isterler bulunmaktadır. Bu hedeflere ulaşılabilmesinin ve sıfır emisyon hedeflerinin gerçekleştirilebilmesi büyük ölçüde batarya paketinin performansının iyileştirilmesine bağlıdır. Batarya paketlerinin verimlerinin artırılması etkili bir BPTY ve BPMY sistemlerinin geliştirilmesi ile mümkün olacaktır.

Etkili bir termal yönetim sistemi tasarımında en çok öne çıkan konu, yüksek şarj/deşarj durumlarında açığa çıkan ısı enerjisinin en hızlı ve en verimli şekilde batarya paketinden uzaklaştırılmasıdır. Aynı zamanda termal yönetim sistemleri açısından batarya paketinde meydana gelebilecek sıcaklık gradyanlarının minimumda tutmakta önem arz etmektedir. Sıcaklık gradyan dağılımının fazla olduğu Li-ion pil hücrelerinde homojen olmayan akım yoğunluğuyla pil hücrelerinde lokalize yaşlanma veya patlamalara neden olabilmektedir.

Son yıllarda, birçok elektrikli araç üreticisi batarya paketinin termal yönetimi için soğuk plakaları serpantin manifold şeklinde veya farklı tasarım versiyonlarında kullanmaktadır.

Bu soğuk plakalar genellikle metal yapıdadır ve bu sebeple daha düşük termal iletkenliğe sahip olan bir kaplama veya yapışkan aracılığıyla hücrelere temas ederler. Bu işlem imalat adımında zor olan bir işlemdir. Akışkan olarak genellikle %50 Su Etilen Glikol karışımı (WEG) kullanılmaktadır (Dubey ve diğerleri, 2021). Bu yöntem dolaylı sıvı soğutmalı yöntem olarak adlandırılmaktadır. Dolaylı sıvı soğutmalı yöntemler hava soğutmalı yöntemlere kıyasla üstün performans sergiler. Hava soğutmalı sistemler Çizelge 2.2’de görüleceği üzere aynı oranda ısı transferini gerçekleştirmek için daha büyük bir hacme ihtiyaç duyarlar ve böylece istenilen yüksek güç yoğunluğunda soğutma işlemlerinde başarısız olmaktadır. Ancak dolaylı sıvı soğutma metodu, batarya paketinde sıvı sızıntısı meydana gelirse kolayca kısa devreye sebep olması ihtimalinden dolayı batarya modülü için karmaşık ve ağırlığı arttıran tasarımlara sebep olabilmektedir (Mali, Saxena, Kumar, Kalam ve Tripathi, 2021). Soğutucu plakalar aynı zamanda, soğutma sıvısına ısı transferi için hücrenin sadece küçük bir alanı mevcut olduğundan, bu hücrelerden soğutma sıvısına ısı transferi için daha yüksek bir termal direnç ve dolayısıyla daha yüksek bir maksimum sıcaklık gradyan dağılımı ile sonuçlanmaktadır (Sundin ve Sponholtz, 2020).

**Çizelge 2. 2.** Hava ve Su ısı transferi (Yenigün ve Ulu, 2018).

	Hacimsel Debi Lt/s	Ortalama Isı Transfer Katsayısı (W/m <sup>2</sup> K)
Hava	43	25
Su	0.049	390

Yukarıda bahsedilen mevcut hava ve dolaylı sıvı soğutma yöntemlerinin haricinde daldırma (direkt) sıvı soğutmalı yöntem termal yönetim sistemi günümüzde yeni yeni yaygınlaşan yenilikçi bir çözüm olarak karşımıza çıkmaktadır. Daldırma soğutma yöntemi pil hücrelerinin doğrudan bir engel olmadan pil hücrelerini dielektrik sıvı ile daldırılmasıyla gerçekleşmektedir. Son yıllarda elektrik araç dönüşümünün sadece binek otomobillerde sınırlı kalmaması ve yüksek güç yoğunluğu gerektiren ticari vasıta, ağır iş makineleri vb. araçlarda da yaygınlaşmasının ardından doğrudan soğutma yöntemine yönelik araştırmalar önem ve hız kazanmıştır.



Şekil 2.6’da XING Mobility tarafından geliştirilen istenilen güç yoğunluğuna göre modüller halinde entegre edilebilen bir batarya modülü görülmektedir.



**Şekil 2. 6.** Doğrudan daldırma soğutma yöntemi (“XING”, 2022).

Daldırma soğutma yöntemi birçok farklı kullanıma uygun pil hücreleri düzenlemesini mümkün kılmaktadır. Dolaylı sıvı yöntemlerinde olduğu gibi her bir pil hücre şekline göre özel plakalar, tasarım ve ekipman ihtiyacı duymamaktadır (Sundin ve Sponholtz, 2020). Yapılan çalışmalar incelendiğinde bazı çalışmalar batarya paketlerinin daldırma soğutma yönteminin performansını test etmişlerdir. Ancak bunların karşılaştırılması ticari olarak kullanımda bulunan soğuk plakalı yöntemlerle değil daha çok hava soğutmalı yöntem ile olduğu görülmüştür. Dolayısıyla ticarileşme potansiyeli bulunan ve termal yönetim sistemleri arasında avantaj/dezavantajları açısından karşılaştırmayı kolaylaştırabilmek için en yaygın kullanım alanına sahip dolaylı sıvı soğutmalı yöntem ile karşılaştırmak daha doğru olacaktır. Aynı pompalama gücüne sahip olan bir soğutma sisteminde, soğuk plaka ile dolaylı soğutma ve dielektrik sıvı ile doğrudan soğutma metodu için dielektrik sıvı ile çok daha yüksek akış hızlarının sağlanabileceği çalışmalarda görülmüştür. Daha yüksek bir soğutma sıvısı konvektif ısı transferini arttırmasını ve böylece hücre sıcaklıklarını düşürmesi beklenmektedir. Ayrıca, daldırma soğutma durumunda, ısı transfer işlemine pil hücrelerinin çok daha büyük bir yüzey alanı

katıldığından dolayı soğuk levha modüle kıyasla önemli ölçüde yüksek bir termal iletkenliğe yol açması beklenmektedir (Mali ve diğerleri, 2021). Hava soğutmalı yöntem, soğuk plaka ile doğrudan sıvı soğutmalı yöntem ve doğrudan sıvı soğutmalı yöntemin karşılaştırılmasının özeti Çizelge 2.3'te sunulmuştur.

**Çizelge 2. 3.** Soğutma yöntemlerinin karşılaştırılması.

	Hava	Soğuk Plaka ile Dolaylı Sıvı Soğutma Yöntemi	Doğrudan Dielektrik Sıvı ile Soğutma Yöntemi
Kullanım Kolaylığı	KOLAY	ZOR	ORTA
Verim	DÜŞÜK	YÜKSEK	YÜKSEK
Sıcaklık Düşüşü	DÜŞÜK	YÜKSEK	YÜKSEK
Sıcaklık Dağılımı	DÜZENSİZ	ORTA	HOMOJEN
Bakım - Onarım	KOLAY	ZOR	KOLAY
Kullanım Ömrü	>20 YIL	3-5 YIL	10 YIL
İlk Maliyet	DÜŞÜK	YÜKSEK	YÜKSEK
Yıllık Maliyet	DÜŞÜK	YÜKSEK	ORTA

Günümüzde, hızla gelişen teknolojilerin neden olduğu artan enerji ihtiyacı, batarya sistemlerinin daha yüksek kapasitelerde üretilmesine neden olmuştur. Ancak bu durum, bataryaların ısınma problemini de beraberinde getirmiştir. Bataryaların aşırı ısınması, performanslarının düşmesine ve hatta patlamalarına neden olabilir. Bu nedenle, bataryaların termal yönetimi, son derece önemlidir.

Batarya termal yönetim sistemlerinde, dolaylı soğutma yöntemleri sıklıkla kullanılmaktadır. Ancak, son yıllarda, dielektrik ile doğrudan soğutma yöntemi de kullanım alanı bulmuştur. Bu yöntem, bataryalarda oluşan ısının doğrudan dielektrik sıvı tarafından absorbe edilerek, ısı transferinin dolaylı yöntemlere göre daha etkin bir şekilde gerçekleştirilmesini sağlar. Bu alanda yapılan deneysel ve nümerik çalışmalar, bu yöntemin, bataryaların termal yönetiminde önemli bir çözüm olabileceğini göstermektedir.

Çizelge 2.4'te soğutma yöntemlerinin ısı transfer katsayılarının karşılaştırması verilmiştir.

**Çizelge 2. 4.** Isı transfer katsayıları (Çengel ve Ghajar, 2010).

<b>Soğutma Yöntemi</b>	<b>Isı Transfer Katsayısı (W/mK)</b>
Hava Soğutma	5 - 50
Dolaylı Sıvı Soğutma	50 - 500
Doğrudan Sıvı Soğutma	500 - 10.000

Bir makalede yapılan deneysel çalışmalar, dielektrik ile doğrudan soğutmanın batarya termal yönetiminde kullanımının avantajlarını göstermiştir. Bu yöntemin, dolaylı yöntemlere göre daha yüksek bir soğutma etkinliğine sahip olduğu bulunmuştur (Wang, Chen, Zhang ve Freeman, 2019). Başka bir çalışma, dielektrik sıvılarının batarya termal yönetiminde kullanımının batarya ömrünü artırdığını öne sürmüştür. Nümerik çalışmalar da dielektrik ile doğrudan soğutma yönteminin etkinliğini doğrulamaktadır. Bir araştırmada, bu yöntemin, dolaylı yöntemlere göre daha düşük bir batarya sıcaklığına neden olduğu gösterilmiştir. Benzer şekilde, dielektrik ile doğrudan soğutma yönteminin bataryaların yaşam süresini artırdığını öne sürmüştür (Wang ve diğerleri, 2019).

Batarya termal yönetim sistemleri, sadece bataryanın sıcaklığını kontrol etmekle kalmaz, aynı zamanda bataryanın mekanik performansını da önemli ölçüde etkiler. Batarya paketi, elektrikli araçların ağırlık merkezini ve dengesini değiştirirken, araç çarpışmalarında koruma sağlamalıdır. Bu nedenle, batarya paketlerinin dayanıklılığı ve sağlamlığı, batarya termal yönetim sistemlerinin tasarımında da dikkate alınmalıdır. Batarya paketleri, titreşim, darbe, yüksek basınç ve deformasyona karşı dirençli olmalıdır. Ayrıca, batarya paketinin tasarımı, araçta mevcut yerleşim alanı, sıcaklık toleransı, mekanik şoklara karşı dayanıklılık gibi faktörler de göz önünde bulundurulmalıdır. Bu sebeplerle, batarya termal yönetim sistemleri tasarlanırken, batarya paketinin mekanik performansının da önemli bir faktör olduğu unutulmamalıdır.

Yapılan araştırmalar sonucunda, batarya termal yönetim sistemlerinde dielektrik doğrudan daldırma yönteminin termal performansının dolaylı yöntemlere göre daha iyi olduğu sonucuna varılmıştır. Bu tez çalışması, elektrikli araçlarda kullanılan dielektrik daldırma yönteminin mekanik dayanıklılığının sayısal analiz testleri ve kontrolleri ile incelenmesini amaçlamaktadır. Dielektrik daldırma yöntemi, batarya paketinin tamamını saran bir sıvı ortamı sağlayarak, bataryanın ısını doğrudan dağıtmaktadır. Bu yöntemin

avantajları arasında yüksek soğutma kapasitesi, düşük enerji tüketimi ve sıcaklık dalgalanmalarının azalması yer almaktadır. Ancak, dielektrik daldırma yönteminin mekanik dayanıklılığı ve performansı henüz yeterince araştırılmamıştır. Bu nedenle, bu tez çalışması, dielektrik daldırma yönteminin mekanik dayanıklılığı ve performansının sayısal analiz testleri ve kontrolleri ile incelenmesini hedeflemektedir. Çalışmada, mekanik test prosedürleri ve sonuçları da tartışılarak hem termal hem de mekanik açıdan optimize edilmiş bir batarya termal yönetim sistemi geliştirilmesine katkı sağlanması amaçlanmaktadır.

### 3. MATERYAL ve YÖNTEM

Elektrikli araçlar, günümüzde çevre dostu ve ekonomik bir alternatif olarak giderek daha popüler hale gelmektedir. Ancak, batarya paketlerinin uzun ömürlü ve güvenli bir şekilde kullanımı, sıcaklık yönetimi gibi birçok önemli faktöre bağlıdır (Zhang, Li, Luo, Fan ve Du, 2022). Bu faktörler arasında, batarya paketlerinin soğutulması ve mekanik performansı yer almaktadır.

Batarya paketlerinin soğutulması, özellikle yüksek sıcaklıklarda performanslarının korunması açısından kritik öneme sahiptir. Bu nedenle, dielektrik sıvı yardımıyla batarya paketlerinin soğutulması yöntemi, bu sorunu çözmek için önerilen yenilikçi bir yöntemdir (Lv, Yang, Li, Zhang, Wang ve Yang, 2016). Ancak, batarya paketlerinin soğutulması işlemi, mekanik performansı da önemli ölçüde etkilemektedir. Literatür taraması yapıldığında mekanik özelliklerin analizi konusunda yeterince çalışma yapılmadığı gözlenmiştir. Batarya paketlerinin mekanik performansının değerlendirilmesi, uzun ömürlü ve güvenli bir kullanım için kritik önem taşımaktadır.

Bu amaçla, ANSYS programı gibi bilgisayar destekli mühendislik yazılımları kullanılarak batarya paketlerinin mekanik performansı incelenebilir. ANSYS programı, batarya paketlerinin mekanik davranışının öngörülmesi için yaygın olarak kullanılan bir yazılımdır (Saw, Ye, Tay, Chong, Kuan ve Yew, 2016). Batarya modülünün mekanik davranışı, batarya paketinin boyutu, şekli, malzeme özellikleri ve soğutma sistemi gibi birçok faktöre bağlıdır. Bu nedenle, bu çalışmada bahsedilen faktörlerin değişkenliği incelenerek batarya modülünün mekanik performansı değerlendirilmiştir. Bu amaçla, statik yapısal analiz yöntemi ile batarya paketinin dayanıklılığı ve gerilme dağılımı analiz edilmiştir. Ayrıca, modal analiz yöntemi batarya paketinin titreşim analizi için kullanılmıştır. Son olarak, transient structural analiz yöntemi batarya paketinin ani darbelere karşı dayanıklılığı üzerinde çalışılmıştır. Yeni nesil bir soğutma yöntemi olan dielektrik sıvı yardımıyla doğrudan soğutulan batarya modülleri, mekanik performans açısından değerlendirilmiştir.

### 3.1. Tasarım Kriterlerinin Belirlenmesi

Batarya pil hücreleri, yüksek voltaj ve enerji depolama kapasitesi nedeniyle ciddi riskler barındırabilirler. Dolayısıyla, pil hücrelerinin korunması ve güvenliğinin sağlanması için muhafaza edici bir modül tasarlanması gerekmektedir. Bu modüllerin seçimi ve kalınlığı, modüllerin güvenliği ve performansı için kritik önem taşımaktadır. Mevcut literatürde, batarya modülü muhafazaları için genellikle metal malzemelerin tercih edildiği belirtilmektedir (Lyu ve diğerleri, 2020; Kumar ve diğerleri, 2020).

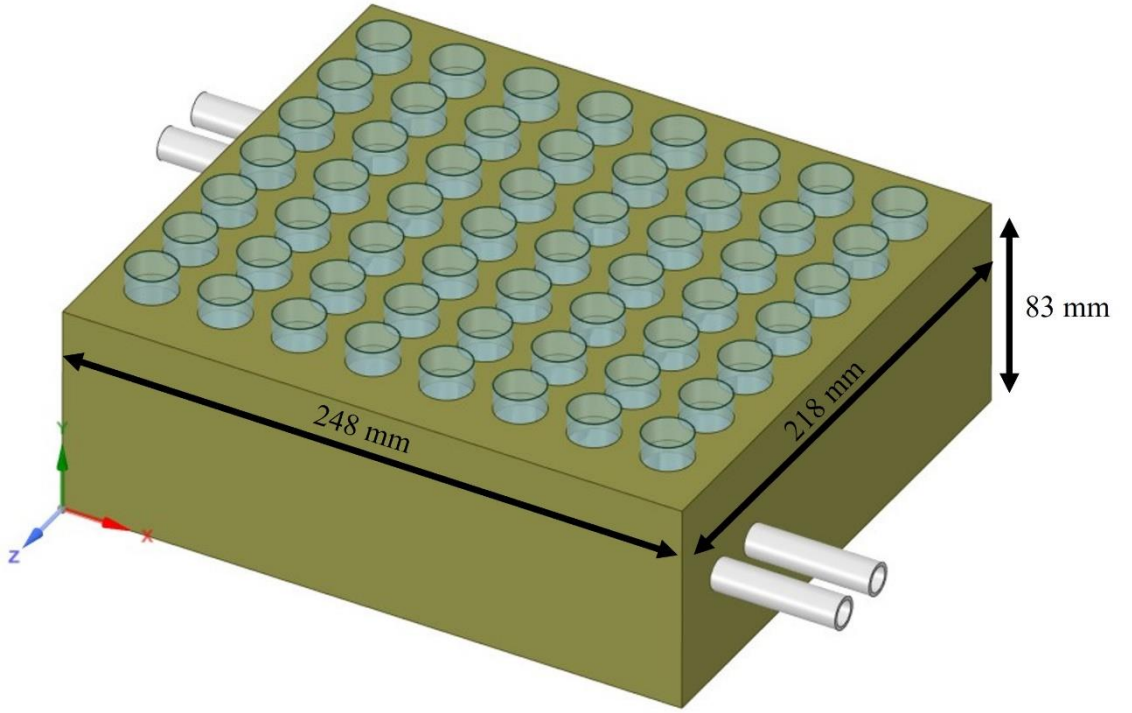
Özellikle, Alüminyum 6061-T6 malzemesi, yüksek mukavemet, düşük yoğunluk, iyi kaynaklanabilirlik ve yüksek korozyon direnci gibi özellikleri nedeniyle batarya modülü muhafazalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca, Alüminyum 6061-T6 malzemesi, düşük termal genişleme katsayısı ile sıcaklık değişimlerine karşı yüksek direnç gösterir ve böylece batarya modüllerinin sıcaklık dalgalanmalarından etkilenmesini azaltır (Lyu ve diğerleri, 2020).

Ancak, modülün kalınlığı aracın büyüklüğüne, batarya kapasitesine ve performans gereksinimlerine göre farklılık gösterebilir. Modül tasarımında, pil hücreleri arasındaki mesafe modülün boyutlarını belirleyen en önemli faktördür. Mevcut literatürde pil hücreleri arasındaki mesafenin ortalama 5-6 mm ve minimum 1 mm olması önerilmektedir. Batarya modülleri genellikle alüminyumdan yapılmaktadır, ancak farklı uygulamalar için farklı malzemeler de kullanılabilir. Modül kalınlığı ortalama olarak 5-12 mm arasında değişebilir. Bunun yanı sıra, dielektrik sıvı soğutma yöntemi için tasarım farklılığı olan her bir lityum iyon pil hücresinin, bir zarf plaka yardımıyla çevrelenerek mukavemet ve termal performansını arttırdığı plakaların kalınlığı genellikle 0.5 mm ila 1 mm arasındadır. Bu ince zarf plakalar genellikle PVC veya Alüminyum malzemedendir yapılmaktadır (Patil, Seo ve Lee, 2021; Kumar, Sharan, Harish ve Kumar, 2021).

Dielektrik sıvılar, genellikle mineral yağlar veya silikon yağlar gibi yüksek viskoziteli sıvılardır. Bu nedenle, dielektrik sıvıların yüksek akış hızlarına sahip olması beklenmez. Modülün giriş ve çıkış borularının çapı, akış hızı ve sıvının viskozitesi gibi faktörlere bağlı olacaktır. Birçok endüstriyel uygulama için kullanılan dielektrik sıvıların

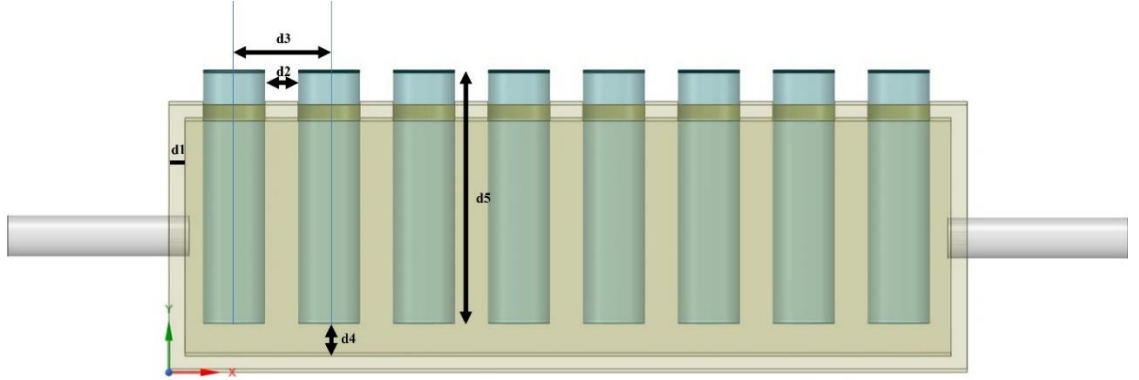
viskozitesi, genellikle 10-100 cSt aralığında olur. Bu nedenle, modül için kullanılacak dielektrik sıvının viskozitesine bağlı olarak, boruların çapı 4-10 mm arasında olabilir. Boru malzemesi olarak, modülünüzün tasarımı ve kullanım amacına bağlı olarak, çeşitli malzemeler kullanılabilir. Örneğin, plastik, alüminyum veya paslanmaz çelik gibi malzemeler kullanılabilir. Bu malzemelerin seçimi, sıvının kimyasal özellikleri, sıcaklığı ve basıncı gibi faktörlere bağlı olacaktır (Patil ve diğerleri, 2021).

Yukarıda verilen bilgiler doğrultusunda üzerinde analiz gerçekleştirilecek olan doğrudan sıvı soğutma yöntemi göre soğutulacak olan batarya modülünün CAD tasarımı ve ebatları Şekil 3.1’de gösterilmiştir.



**Şekil 3. 1.** Daldırma soğutma için tasarlanmış batarya modülü CAD datası.

Şekil 3.1’de daldırma soğutma yöntemi için tasarlanmış Alüminyum T6061 batarya modülü, giriş ve çıkış paslanmaz çelik boruları ve Alüminyum T6061 Lityum iyon pil hücrelerini çevreleyen ince zarf plakaların sadeleştirilmiş CAD tasarımı görülmektedir. Şekil 3.2’de batarya modülünün kesit görüntüsü ve ölçüleri tanımlanmıştır.



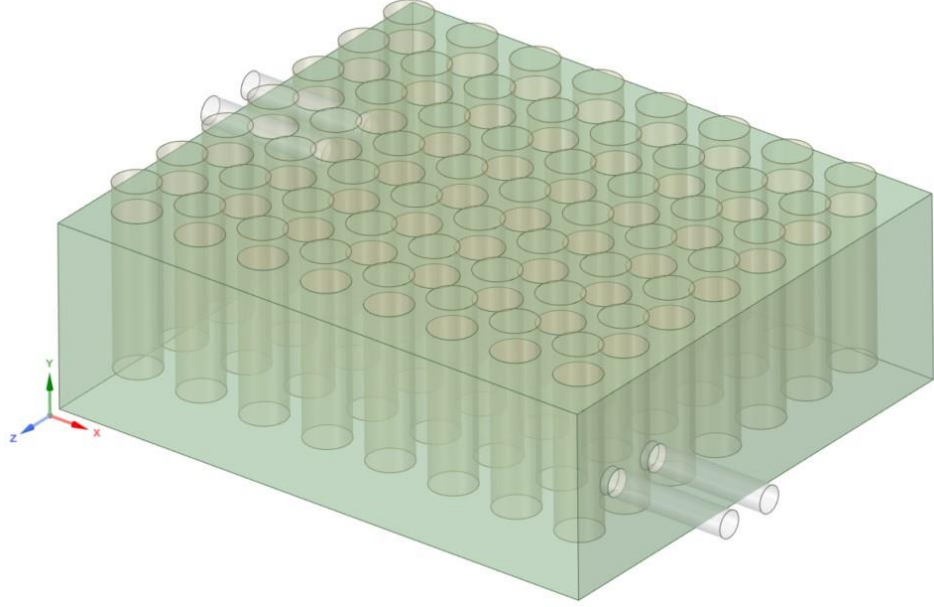
**Şekil 3. 2.** Batarya modülü CAD datası kesit görüntüsü.

Şekil 3.2’de verilen ölçüler aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır:

- $d_1$  : Batarya modülünün kalınlığı
- $d_2$  : İnce zarf plaka arası mesafe
- $d_3$  : Pil hücrelerinin merkezleri arasındaki mesafe
- $d_4$  : Lityum iyon pil hücresinin ve koruyucu plakanın modül tabanına mesafesi
- $d_5$  : Koruyucu ince zarf plakanın uzunluğu

Yapılacak tüm analizlerde  $d_3$  ve  $d_5$  parametreleri sabit olarak kabul edilecektir. Çizelge 2.1’de pil hücrelerinin ebatları referans alındığında, pil hücrelerinin merkezleri arasındaki mesafe 27.25 mm, koruyucu ince zarf plakanın uzunluğu 78 mm olarak tanımlanmıştır. Yapılan CAD tasarımdaki her bir profil, sac metal elemanın ara kesitleri alınarak batarya modülün yüzey modellemesi gerçekleştirilmiştir. Bu sayede modül kalınlığı, zarf plaka kalınlıkları her bir analiz için kolaylıkla değiştirilebilecek ve mekanik performansı en iyi olan tasarımın karşılaştırılması sağlanacaktır. Yüzey modelden oluşan tasarım Şekil 3.3’te gösterilmiştir.





**Şekil 3. 3.** Ara kesitleri alınmış batarya modülünün yüzey tasarımı.

Bu çalışmada öncelikle batarya modülünün kalınlığı ( $d_1$ ) 5 mm, 8 mm, 9 mm ve 10 mm olarak 4 farklı şekilde tanımlanmıştır. Her bir tasarımın ağırlık ve performans değerleri incelenmiş ve optimum modül kalınlığına karar verilmiştir. Daha sonrasında koruyucu ince zarf plakaların kalınlığı 0.20 mm, 0.25 mm, 0.3 mm, 0.8 mm, 0.9 mm ve 1 mm olmak üzere farklı kalınlıklarda mekanik performansları incelenmiştir.

Yapılan tanımlamalardan sonra Şekil 3.1’de gösterilen batarya modülünün ebatları 248 x 218 x 83 mm olarak hesaplanmıştır. 1 modüldeki yaklaşık elektriksel güç hesaplanacak olursa:

1 modül içerisinde 7 adet paralel bağlı pil hücresi bulunmaktadır. Bu durumda kapasite değeri:

$$\text{Nominal Kapasite: } 3.1 \text{ Ah} \times 7 = 21.7 \text{ Ah}$$

1 modül içerisinde 8 adet seri bağlı pil hücresi bulunmaktadır. Bu durumda voltaj değeri:

$$\text{Voltaj değeri: } 3.6 \text{ V} \times 8 = 28.8 \text{ V}$$

1 modülün güç değeri ise yaklaşık olarak aşağıdaki şekilde hesaplanabilir:

$$28.8 V \times 21.7 Ah = 624,96 Wh$$

Doğrudan soğutma yöntemi için yapılan bu tasarım çalışması, dolaylı sıvı soğutma yöntemine sahip elektrikli araçlardaki modüllerle karşılaştırıldığında (“XING”, 2022) elektriksel güç değeri olarak neredeyse birbirine yakın olduklarını, boyut olarak da dolaylı yöntemlere göre daha kompakt bir yapıda olduğu sonucuna varılabilir.

### **3.2. Malzeme Bilgisi**

Yapılacak analiz çalışması tek bir batarya modülü üzerinde gerçekleştirilecektir. Paslanmaz çelik, paslanmaz özelliklere sahip bir çelik türüdür ve aynı zamanda korozyon direnci de yüksektir. Bu özellikleri sayesinde, batarya modülünün içerisindeki dielektrik sıvının olası paslanma veya korozyona sebebiyet vermemesi için sıvının giriş ve çıkış boruları AISI 1045 çeliği olarak seçilmiştir. Ayrıca, paslanmaz çelik yüksek sıcaklık ve basınç dayanımına sahiptir, bu nedenle batarya modülünün yüksek sıcaklık veya basınç altında çalışması durumunda da mukavemetini koruması beklenmektedir. Tüm bu özelliklerinden dolayı, paslanmaz çelik batarya modülünün giriş ve çıkış borularının malzeme seçimi için uygun bir seçenektir. Alüminyum, birçok uygulama için tercih edilen bir malzemedir çünkü hafif ve dayanıklıdır. Batarya modülleri de yüksek dayanıklılık ve düşük ağırlık gerektirdiğinden alüminyum sıklıkla tercih edilir (“XING”, 2022; “Simscale”, 2023). Ayrıca alüminyum yüksek ısıl iletkenliğe sahiptir ve bu da batarya modülünde ısı transferini kolaylaştırır. Bununla birlikte batarya modülü ve ince zarf plaka ticari olarakta örnekleri bulunduğu gibi Alüminyum 6061-T6 olarak seçilmiştir.

Seçilen bu malzemelerin teknik özellikleri Çizelge 3.1 ve Çizelge 3.2’de verilmiştir.

**Çizelge 3. 1.** AISI 1045 çeliği (Zhao, Liu, Wang, Guo ve Chen, 2018).

AISI 1045 Steel, cold drawn	
Yoğunluk	7.85 g/cm <sup>3</sup>
Akma Direnci	450 MPa
Kopma Direnci	625 MPa
Elastik Modül Değeri	205 GPa
Kayma Modül Değeri	80 GPa
Poisson Oranı	0.29

**Çizelge 3. 2.** Alüminyum 6061-T6 (Zhao ve diğerleri 2018).

Alüminyum 6061-T6	
Yoğunluk	2.7 g/cm <sup>3</sup>
Akma Direnci	240 MPa
Kopma Direnci	310 MPa
Elastik Modül Değeri	68 GPa
Kayma Modül Değeri	26 GPa
Poisson Oranı	0.33

Çizelge 3.1 ve Çizelge 3.2’de belirtilen malzeme özellikleri ANSYS paket programında Engineering Data kütüphanesinde malzeme kartı olarak tanımlanmıştır.

### 3.2. Ağdan Bağımsızlık Testi

Ağdan bağımsızlık testi (Mesh independence study), sonlu elemanlar yöntemi (FEM) veya sonlu hacim yöntemi (FVM) gibi sayısal çözüm yöntemlerinin kullanıldığı mühendislik uygulamalarında oldukça önemli bir konudur. Bu test, hesaplama ağı (mesh) boyutunun doğru sonuçlar elde etmek için yeterli olup olmadığını belirlemek için kullanılır. Yeterli mesh boyutunun seçimi, çözümün doğruluğunu, hesaplama süresini ve bellek kullanımını etkileyebilir. Çok küçük bir mesh boyutu seçmek, hassasiyeti artırabilir ancak çözüm süresini ve bellek kullanımını artırabilir. Aksine, çok büyük bir

mesh boyutu seçmek, hesaplama süresini ve bellek kullanımını azaltabilir ancak doğruluğu etkileyebilir. Bu nedenle, doğru mesh boyutunun belirlenmesi oldukça önemlidir. Mesh boyutunun doğru seçilmediği durumlarda, sonuçlar yanlış olabilir ve hatalı kararlar alınabilir.

Doğrudan sıvı soğutma temelli ve dolaylı sıvı soğutma yönteminden örnek alarak tasarlanan bu hibrit yapıdaki soğutma sisteminin analizlerinin doğru sonuçlar verebilmesi için uygun mesh boyutlarının seçilmesi oldukça önemlidir. Bu nedenle, analizlere başlamadan önce, batarya modülü üzerindeki mesh boyutunun optimizasyonu için bir ağdan bağımsızlık testi gerçekleştirilmiştir. Farklı mesh eleman boyutları kullanılarak, tasarlanan batarya modülünün yer çekimi etkisinde maksimum gerilme kuvveti değerleri incelenmiştir. Bu değerler Çizelge 3.3'te sunulmuştur.

**Çizelge 3. 3.** Ağdan bağımsızlık testi sonuçları

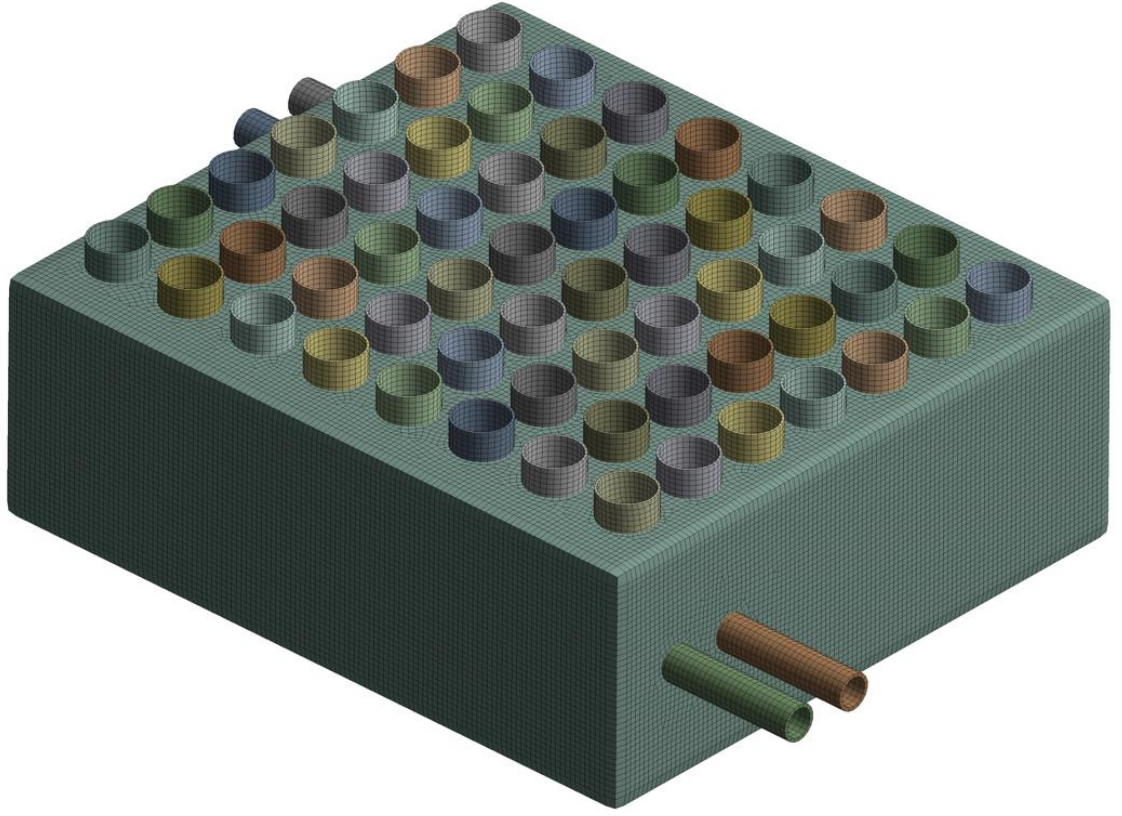
Mesh Boyutu	Modül Üzerinde Meydana Gelen Gerilme Kuvveti
1,25 mm	37,825 MPa
1.5 mm	37,499 MPa
2 mm	37,475 MPa
2.5 mm	36,988 MPa
5 mm	34,075 MPa
10 mm	27,087 MPa
15 mm	21,52 MPa

Bu adım analiz süresini, pratikliğini ve doğruluğu için kritik bir adımı teşkil etmektedir. Ağdan bağımsızlık testlerinde, meydana gelen gerilme kuvvetlerin belirli bir mesh boyutundan sonra benzer ve birbirine çok yakın olması daha küçük mesh boyutları seçiminin analiz doğruluna etkisi olmadığını ve analiz süresini arttırdığı anlamına gelmektedir. Bu nedenle, analiz çalışmalarında 2 mm mesh boyutu yeterli olarak görülmüştür. Batarya modülü üzerinde yapılacak tüm analizlerde 2 mm mesh elemanlar kullanılmıştır.

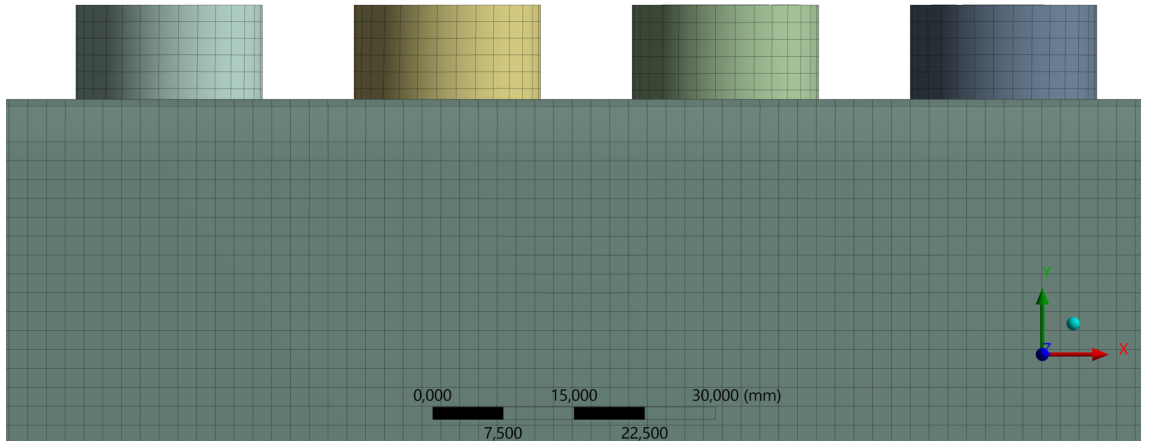
### 3.4. Mesh Modeli

Sayısal analiz, gerçek dünya problemlerini matematiksel modellere dönüştürerek çözmeye çalışır. Bu modeller, sonsuz sayıda noktadan oluşan bir alanı belirli parçalara bölerek yaklaşık çözümler elde etmek için kullanılan bir tekniktir. Mesh, bu parçaların her birine verilen isimdir ve oluşturulması gereken geometrik şekle göre belirlenir. Mesh, hesaplamalarda kullanılan birim elemanların belirli bir boyutta küçük bir parçasıdır ve bir matematiksel modelin en önemli bileşenlerinden biridir. Daha doğru sonuçlar elde etmek için mesh boyutu, hesaplama hızı ve doğruluğu arasında bir denge kurulmalıdır. Çok küçük bir mesh boyutu, analiz süresini uzatabilir ve yeterli donanımı veya hesaplama kaynaklarını gerektirebilir. Aynı zamanda çok büyük bir mesh boyutu, sonuçların doğruluğunu etkileyebilir ve analizde hatalara neden olabilir (“Ansys mesh”, 2022). Bu durum 3.3’te açıklandığı üzere ağdan bağımsızlık testleriyle önlenir.

Yapılacak analizlerde meshlerdeki eleman boyutu 2 mm olarak tanımlanmıştır. Growth Rate 1.2 olarak kabul edilip, Mesh metriği Jacobian olarak ayarlanmıştır. Jacobian, sonlu elemanlar analizinde kullanılan bir metrik olarak tanımlanır ve sonlu elemanların şekillerinin bozulmasını tanımlar. Jacobian, sonlu eleman analizinde hesaplamaların doğru bir şekilde yapılabilmesi için oldukça önemlidir. Jacobian değeri, bir sonlu elemanın deformasyonunu hesaplamak için kullanılır ve elemanın şeklinin nasıl bozulduğunu gösterir. Jacobian değerinin düşük olması, elemanın deformasyonunun yanlış hesaplanmasına veya hatalı sonuçlara neden olabilir. Bu nedenle, Jacobian değeri, mesh metric olarak seçilerek sonlu elemanların şeklinin bozulmasının en aza indirilmesi ve doğru sonuçların elde edilmesi amaçlanır. Şekil 3.4’te gösterilen mesh modeli 110811 node ve 110360 elemandan oluşmaktadır. Şekil 3.5’te batarya modülünün detay mesh görüntüsü verilmiştir.



Şekil 3. 4. Batarya modülü mesh modeli.



Şekil 3. 5. Mesh modeli detay görüntüsü.

### 3.5. Mekanik Analiz için Sınır Koşullarının Belirlenmesi

Sayısal analizlerde, gerçek hayattaki yapılar veya sistemler matematiksel bir modele dönüştürülmektedir. Bu modeli analiz etmek için çeşitli matematiksel yöntemler kullanılır. Ancak matematiksel modeli oluşturduktan sonra, analiz için sınır koşullarını belirlenmesi gerekmektedir. Sınır koşulları, analiz yapılacak yapı veya sistemin dış etkenlere veya kısıtlamalara nasıl tepki vereceğini belirler ve bu nedenle analizin doğruluğunu büyük ölçüde etkiler (Hughes, 1989).

Elektrikli araçların batarya paketlerinde çeşitli soğutma yöntemleri kullanıldığından bir önceki bölümlerde detaylı olarak bahsedilmiştir. Doğrudan soğutma yöntemi yeni nesil bir yöntem olup çeşitli tasarım alternatifleriyle her geçen gün kullanımı yaygınlaşan bir soğutma yöntemidir. Üstün termal performans özellik göstermesi bu yöntem üzerinde yapılan çalışmalara büyük bir önem kazandırmıştır. Bu yöntemle göre tasarlanan bir batarya modülü üzerinde yapılacak analizlerin amacı, batarya modüllerinin statik ve dinamik yükler altında davranışlarını ve performanslarını anlamak ve geliştirmektir. Bu nedenle, batarya modüllerinin tasarımı ve güvenilirliği açısından statik ve dinamik analizlerin ayrılmaz bir parçası olduğu kabul edilmektedir.

Batarya modüllerinin statik analizi, modüllerin bir yük altında durağan haldeki davranışını analiz eder. Bu analizde, modülün ağırlığı, pil hücrelerinin ağırlığı, akışkan sıvının ağırlığı gibi çeşitli faktörler altında statik durum incelenecektir. Aynı zamanda modülün durağan durumdaki modal analizleri de gerçekleştirilecektir. Araç çalışır durumda tasarlanmış batarya modüllerinin rezonansa girmemesi kritik önem taşımaktadır. Dinamik analiz ise bu yeni nesil hibrit batarya modülünün şok yükleri altında nasıl davrandığını analiz edecektir. Bu analizde, modülün ani darbe alması gibi faktörler hesaba katılır. Batarya modülleri üzerinde yapılan herhangi bir sayısal analizde, sınır koşulları belirleyici bir rol oynar. Sınır koşulları, modelin ne kadar gerçekçi ve doğru olduğunu belirleyen faktörlerdir. Sınır koşulları, modülün fiziksel özelliklerine, kullanım koşullarına ve diğer faktörlere dayanarak belirlenir. Sınır koşullarının belirlenmesinde, modülün gerçek kullanım şartları ve çevresel faktörler dikkate alınır. Bu koşullar, modülün belirli bir sıcaklık aralığında çalışması, belirli bir yük altında çalışması, belirli bir titreşim düzeyine maruz kalması ve diğer faktörleri içerebilir. Sınır koşulları, modelin

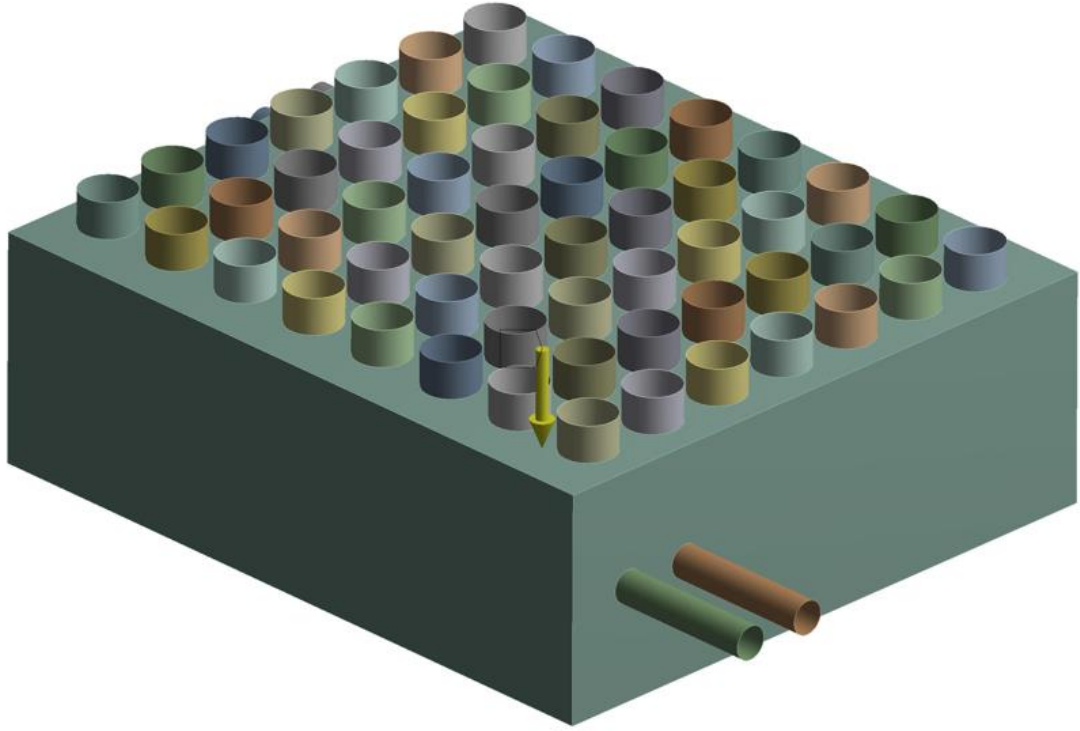
doğruluğunu artırarak, sonuçların gerçek hayata daha yakın olmasını sağlar. Analizler gerçekleştirilirken doğruluk kadar çözüm süresi ve pratikliği de önemlidir.

### **3.5.1. Yandan darbe dinamik analiz sınır koşulunun tanımlanması**

Yüksek hızlı çarpışmalar gibi ani etkilere maruz kalmak, elektrikli araç bataryalarının güvenliği açısından önemli bir endişe kaynağıdır. Bu tür çarpışmalar sonucunda batarya modüllerindeki hücreler hasar görebilir ve potansiyel olarak tehlikeli bir şekilde çalışmaya devam edebilirler. Bu nedenle, batarya modülünün dayanıklılığını ve güvenliğini test etmek için çeşitli senaryoların sayısal analizleri yapılmaktadır.

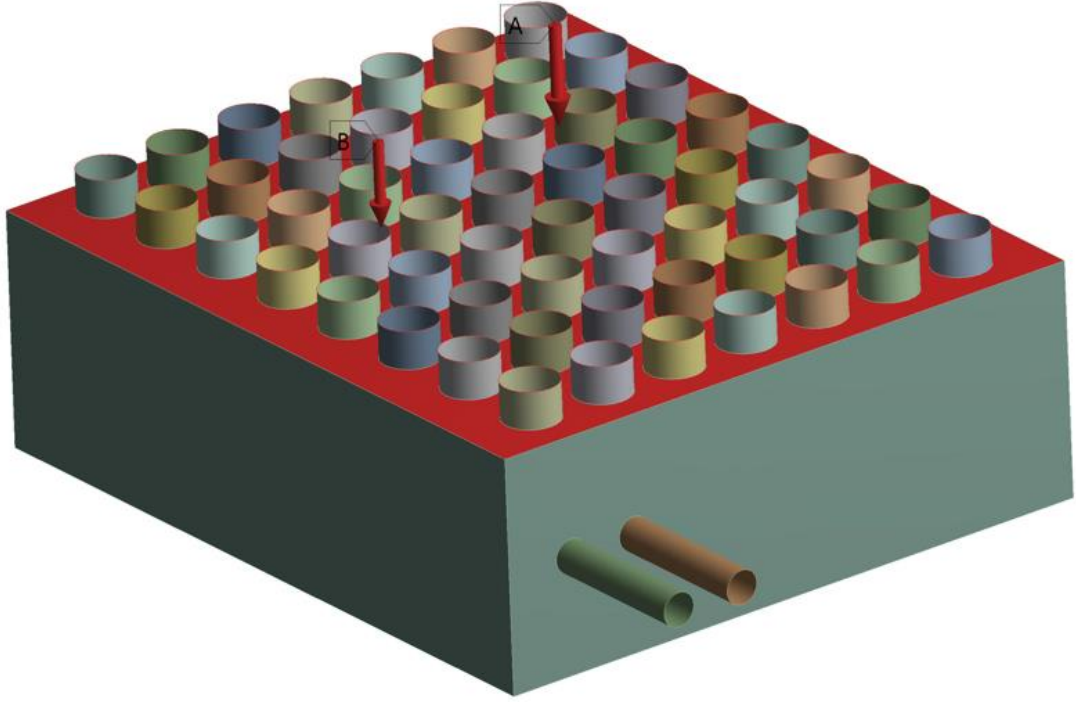
Bu çalışmada, batarya modülüne darbe etkisi uygulanan bir senaryo incelenecektir. Öncelikle yapılan analizlerde yer çekimi, gerçek dünya koşullarında daha yakın sonuçlar elde etmek için aktive edilir. Elektrikli araç batarya modülleri gibi gerçek dünya uygulamalarında, bataryaların bulunduğu araçlar sürekli hareket halindedir ve yer çekimi etkisi altındadır. Bu nedenle, yapılan analizlerde yer çekimi etkisi hesaba katılarak daha gerçekçi sonuçlar elde edilir. Ayrıca, batarya modüllerindeki bileşenlerin boyutu ve ağırlığı gibi faktörler de yer çekimi etkisi altında değişebilir. Bu nedenle, yer çekimi etkisini göz önünde bulundurmak, yapılan analizlerin sonuçlarının gerçek dünya koşullarına daha yakın olmasını sağlar. Şekil 3.6'da görüldüğü üzere yer çekimi -y yönünde  $9,8 \text{ m/s}^2$  olarak tanımlanmıştır.





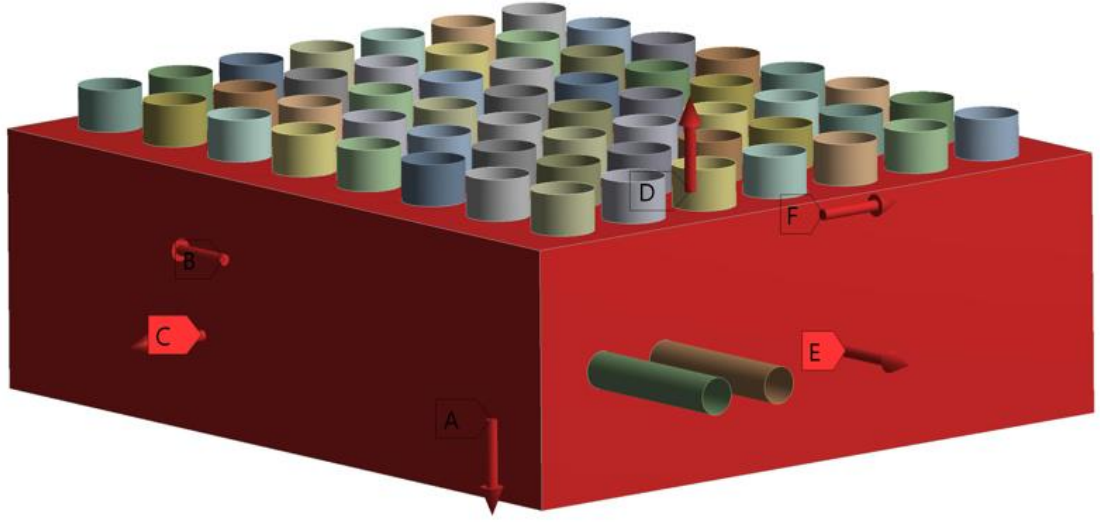
**Şekil 3. 6.** Batarya modülü yer çekim sınır koşulu.

Transient Yapısal analizler, zaman içerisinde batarya modülünün davranışını incelemek için kullanılacaktır. Bu tür analizler, sistemin hareketleri parçaları olan unsuların ani değişimlere veya ani yüklemelere karşı tepki verme durumunu simüle etmek için kullanılır. Yapılacak olan analiz 5 zaman adımıyla çözdürülmüştür. Bu sebeple her bir zaman adımı için uygulanacak kuvvetler ve değerler ayrı ayrı girilmelidir. Ancak yerçekimi, batarya modülünün üzerine yayılı yük olarak dağılım gösterecek araç ağırlığı gibi yükler 5 zaman adımında da aynı kalacaktır. Bu sebeple yer çekimi 5 zaman adımında da  $9,8 \text{ m/s}^2$  olarak alınmıştır. Aynı zamanda Şekil 3.7’de batarya modülünün üst bağlantı yüzeyine yayılı yük olarak etkiyecek olan 100 kg tüm zaman adımlarında sabit 1000 N olarak tanımlanmıştır. Örnek olarak ortalama 16 adet batarya modülü bulunan bir elektrikli araçta, tek bir modüle etkileyecek kuvvet yaklaşık 100kg bulabilmektedir (Pan, Xiong, Wu, Diao ve Guo, 2021).



**Şekil 3. 7.** Ortalama araç ağırlığının 1 modül üzerindeki etkisi.

Dielektrik sıvılar, batarya modüllerinde soğutma amaçlı kullanılan yeni nesil bir teknolojidir. Ancak, bu sıvılar yoğunluğu ve debisi genellikle diğer soğutma sıvılarına göre daha düşüktür. Bu sebeple kütleleri de batarya modülü boyutlarına göre düşük kalmaktadır. Yapılan çalışmalarda dielektrik sıvılar genellikle minimum 2 LPM olmak üzere 4 LPM, 6 LPM, 8 LPM gibi değerlerde kullanılmaktadır (Amalesh ve Narasimhan, 2022). Batarya modülünde tüm modül yüzeylerine 5 zaman adımında da dielektrik sıvının uyguladığı kuvvet etkiyecektir. Şekil 3.8'de görüldüğü yüzeylerden dielektrik sıvının özkütlesi ve modülün hacmi esasa alınarak 0.65 kg şeklinde bir yük etkiyecektir.

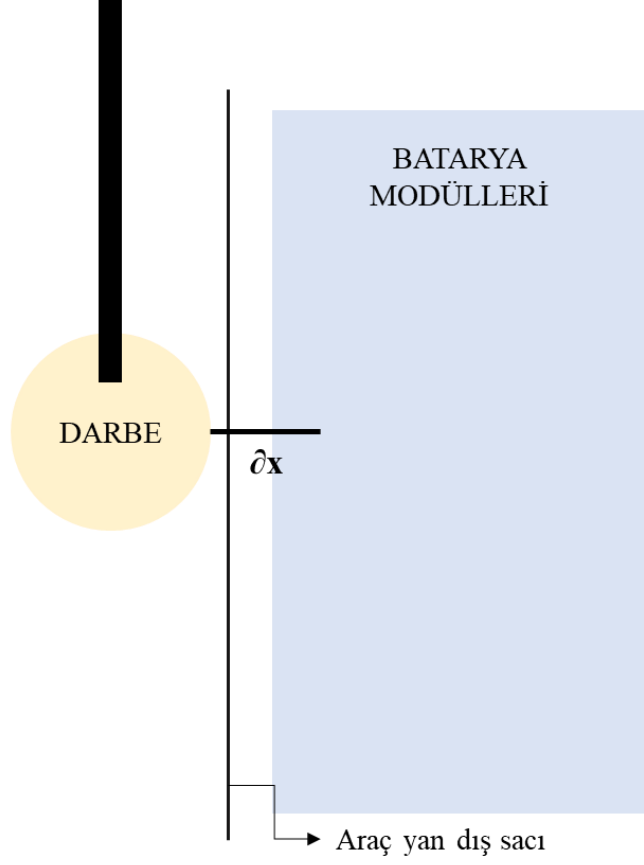


**Şekil 3. 8.** Dielektrik sıvının modüle uyguladığı kuvvet.

Yandan çarpma testi, araçların yan taraflarına gelen darbelerin etkisini ölçmek için kullanılan bir testtir. Bu test, araçların güvenliği ve yolcuların korunması için oldukça önemlidir. Yan darbelere karşı dayanıklılık testleri, araçların çarpışma sonrası güvenliğini arttırmayı amaçlamaktadır. Bir aracın yan darbeye karşı dayanıklılığının test edilmesi, araçların yandan çarpma sonrası yolcuların hasar görmesini veya ölmesini engellemek için yapılan bir güvenlik testidir. Bu testte, araçların kapıları ve yan panelleri üzerinde belirli bir kuvvet uygulanarak, aracın yan çarpışma durumunda ne kadar güvenli olduğu ölçülmektedir. Bu testler sırasında aracın yan panelinin ne kadar bükülebileceği ve deformasyon gösterebileceği ölçülmektedir. Bu veriler, aracın yan panellerindeki yapısal zayıflıkları tespit etmek ve tasarımı geliştirmek için kullanılır. Bu sayede, araçlar daha güvenli hale getirilir ve yolcuların yandan çarpma sonrasında zarar görme ihtimali en aza indirilir. Yandan çarpma testleri, birçok ülkede ve bölgede yasal olarak zorunlu tutulmaktadır (“How are vehicles tested”, 2023).

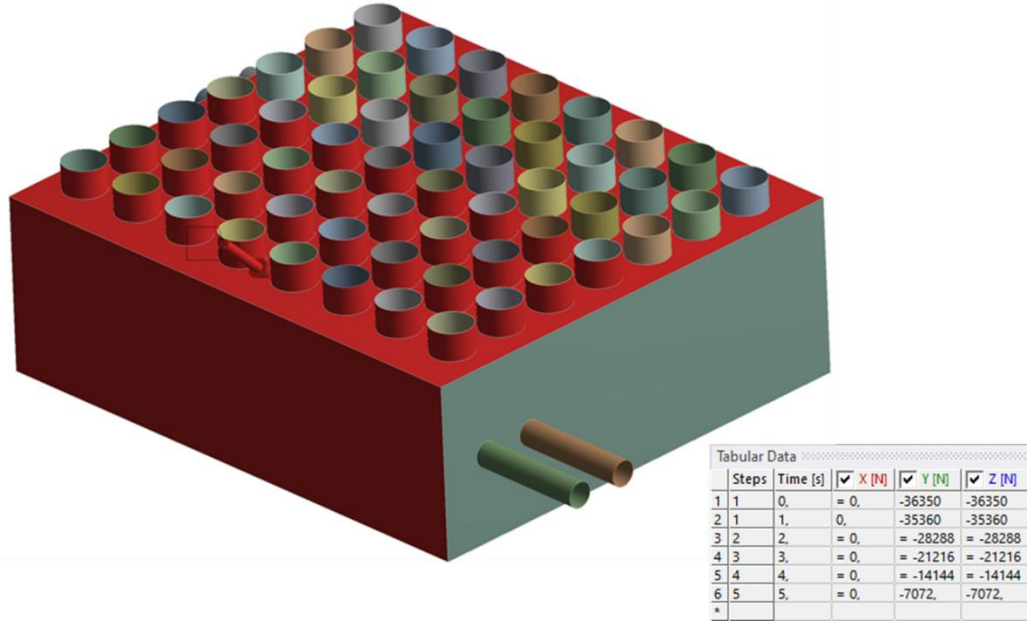
Yandan çarpma testi tasarlanan batarya modülünün kalınlığını belirlemede kullanılacaktır. Çeşitli kalınlıklardaki modül belirli kuvvet aralığında teste tabi tutulacaktır. Yandan çarpma testinde uygulanacak olan kuvvet çarpışmanın şiddetine, araçların hızına, kütlelerine ve çarpışma açısına göre değişebilmektedir. Bununla birlikte, Euro NCAP (Avrupa Araç Değerlendirme Programı) tarafından yapılan yandan çarpma testlerinde araca yaklaşık 970 kg (9700 N) kuvvet uygulandığı bilinmektedir (“How are

vehicles tested”, 2023). Şekil 3.9’da sadeleştirilmiş araç görselinde test düzeneği gösterilmiştir.



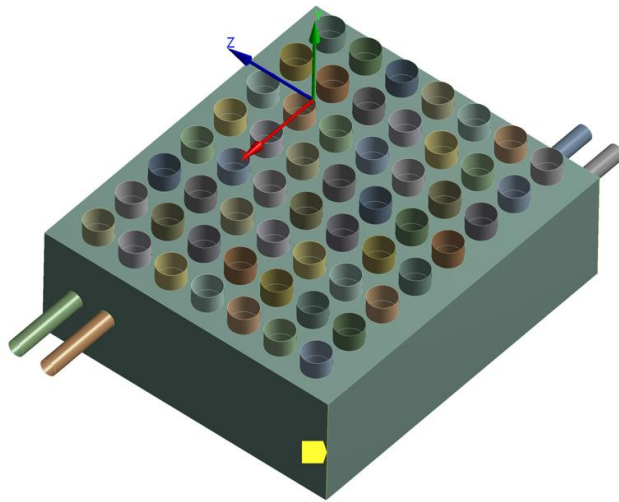
**Şekil 3. 9.** Yandan çarpma testinin şematikleştirilmiş hali.

Şekil 3.9’da görüldüğü üzere darbe araca yan vurduktan sonra darbe çekici ve batarya modülünün yerleştirileceği bölge arasında  $\partial x$ ’lik bir mesafe söz konusudur. Analiz modelinde sınır koşulu tanımlanırken daha emniyetli ve doğru karar verilebilmesi açısından burada mesafeden kaynaklı hissedilen kuvvet 9700 N üzerinde tanımlanması gerekmektedir. Detaylı olarak bir modül üzerinde meydana gelecek yüksek hızda ani darbelenme etkisini görmek istediğimizden sınır koşulu olarak Şekil 3.10’da görülen yüzeylere etki edecek şekilde  $45^\circ$  açıyla 36350 N kuvvet uygulanmıştır. Darbenin sönümlenmesini temsilen 5 zaman adımında Şekil 3.10 ‘da belirtildiği gibi ani şok etkisinin azalışı tanımlanmıştır.



**Şekil 3. 10.** Ani darbe yükü tanımlaması.

Batarya modülünün yan darbe analizlerinde Şekil 3.11’de gösterildiği gibi köşelerden displacement sınır koşulu tanımlanmıştır. Bu durum batarya modülünün darbeye maruz kalması durumunda oluşacak deformasyonları ve gerilme dağılımını gözlemlememizi sağlamaktadır. Köşeler, modülün yapısında en zayıf noktalardan biri olduğu için çarpışma durumunda daha fazla etkilenirler. Bu nedenle, köşelere displacement sınır koşulları tanımlanması, çarpışma sonucu oluşacak deformasyonların modül içindeki dağılımını daha iyi anlamamızı sağlar.

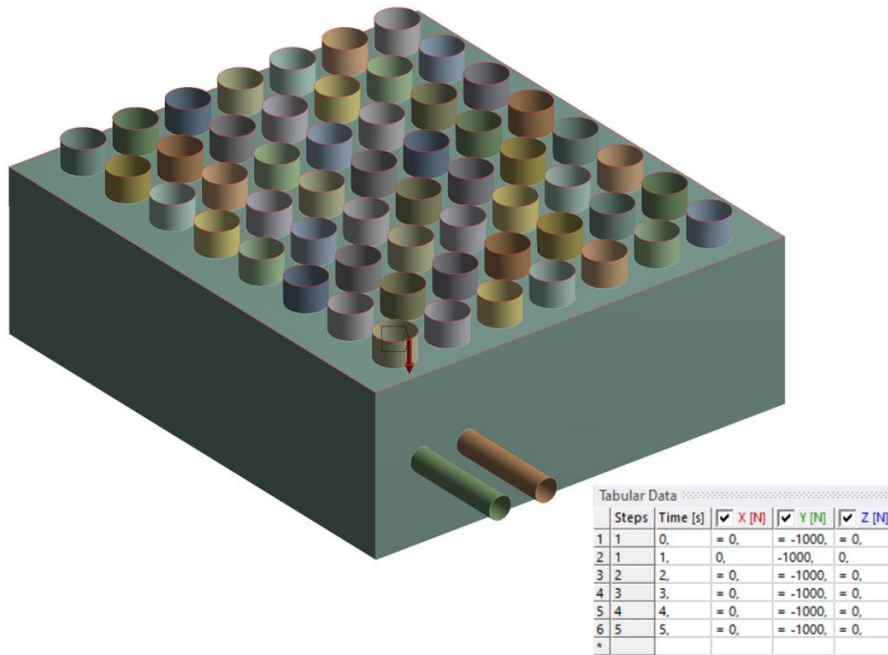


**Şekil 3. 11.** Displacement sınır koşulu tanımlaması.

### 3.5.2. Zarf plaka için dinamik analiz sınır koşulunun tanımlanması

Lityum iyon piller, yüksek enerji yoğunluğu ve hafiflikleri nedeniyle birçok uygulamada kullanılmaktadır. Ancak, bu pillerin yüksek sıcaklıklara ve darbelere karşı hassas olması, batarya modülleri için bir güvenlik riski oluşturmaktadır. Bu nedenle, lityum iyon pillerinin çevresini çevreleyen bir koruyucu zarf plakaya ihtiyaç duyulmaktadır. Bu zarf plaka, lityum iyon hücrelerinin hasar görmesini önleyerek batarya modülü güvenliğini artırır. Ayrıca, sıvı soğutma kullanılan batarya modüllerinde, zarf plaka, dielektrik sıvının pil hücrelerine doğrudan temas etmesini önleyerek olası tehlikelere karşı koruma sağlaması beklenmektedir.

3.5.1. bölümde bahsedildiği üzere batarya modülüne ani darbe yük tanımlaması gerçekleştirilmiştir. Bu bölümde yapılacak analiz denemeleri sonucunda batarya modülünün kalınlığında optimum değer belirlendikten sonra aynı bölümde bahsedilen ani darbe sınır koşulu aynı şekilde tekrarlanıp pil hücrelerini çevreleyen zarf plakanın kalınlığının optimum değeri için inceleme gerçekleştirilecektir. Aynı zamanda ilave sınır koşulu olarak Şekil 3.12’de gösterildiği üzere her bir batarya modülüne – y yönünde yaklaşık olarak 100 kg bir ağırlık etki ettiği düşünülerek ilave kuvvet tanımlaması gerçekleştirilmiştir.



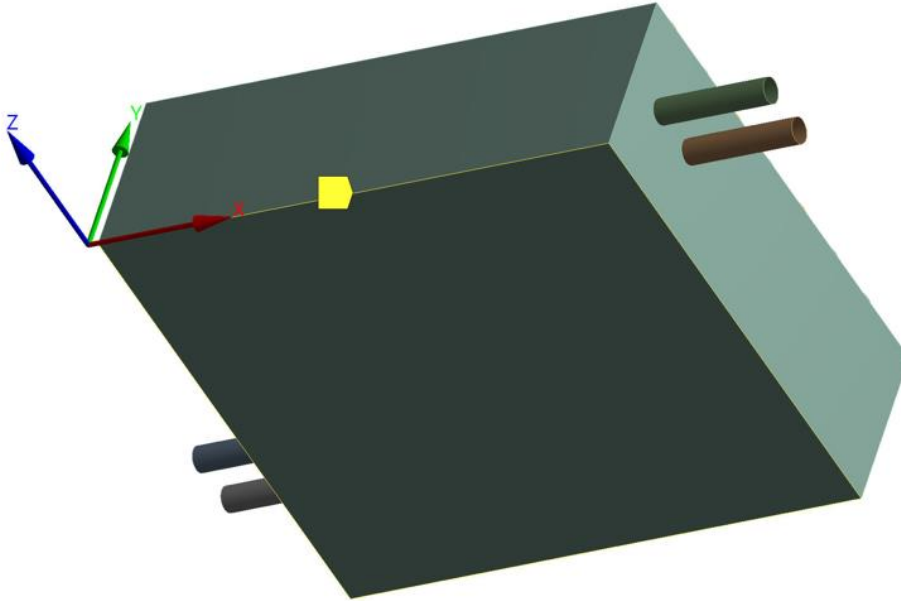
Şekil 3. 12. -y yönünde 1000 N kuvvet tanımlaması.

Bu bölümde yapılacak çalışmada 1000 N ilave kuvvet etkisiyle 0.2 mm, 0.25 mm, 0.3 mm, 0.8 mm, 0.9 mm ve 1 mm zarf plakaların 5 zaman adımında sonuçları değerlendirilecektir. Daha sonrasında yapılacak analiz sonuçlarına göre optimum zarf plaka kalınlığı belirlenmiş olacaktır.

### 3.5.3. Statik analiz için sınır koşulunun tanımlanması

Batarya modülü parametrelerinin optimum kalınlık değerleri belirlendikten sonra, yapısal sağlamlıklarının kontrol edilmesi için statik analiz yapılması oldukça önemlidir. Statik analiz, bir yapı üzerindeki sabit yüklerin etkilerini inceler. Modülün herhangi bir noktasında oluşacak yükün, diğer noktalardaki bağlantıların sağlamlığına etki ettiği düşünüldüğünde, yapısal sağlamlık kontrolü büyük bir önem taşır. Bu analizler, olası kuvvetlerin neden olabileceği deformasyon ve gerilmelerin incelenmesine olanak tanır. Bu sayede, batarya modülleri doğru bir şekilde tasarlanarak, herhangi bir güvenlik riski oluşturmadan güvenli bir şekilde kullanılabilir hale getirilir.

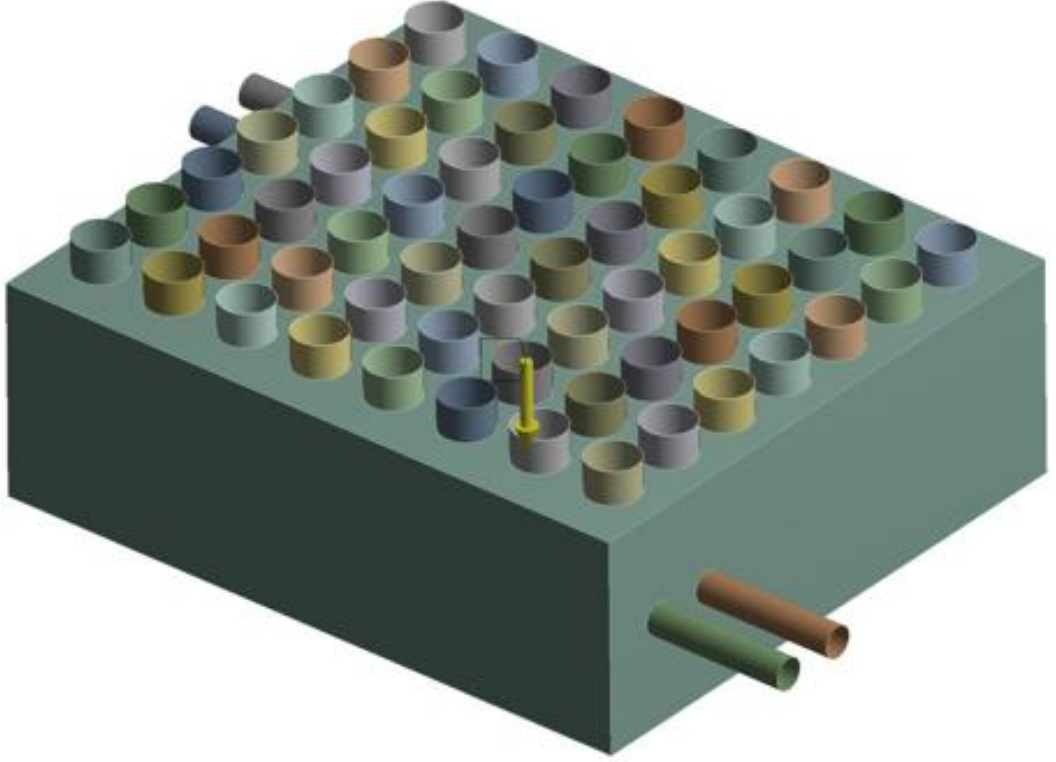
Batarya modülü Şekil 3.13'te görüldüğü üzere alt köşelerinden displacement sınır koşulu tanımlanmıştır. Batarya modülü için yapılan statik analizde, alt köşelerden displacement sınır koşulu tanımlanmasının sebebi, batarya modülünün alt kısmının aracın şasiye bağlı olması ve alt köşelerin buraya montaj edilmesidir.



Şekil 3. 13. Batarya modülü statik analiz displacement sınır koşulu



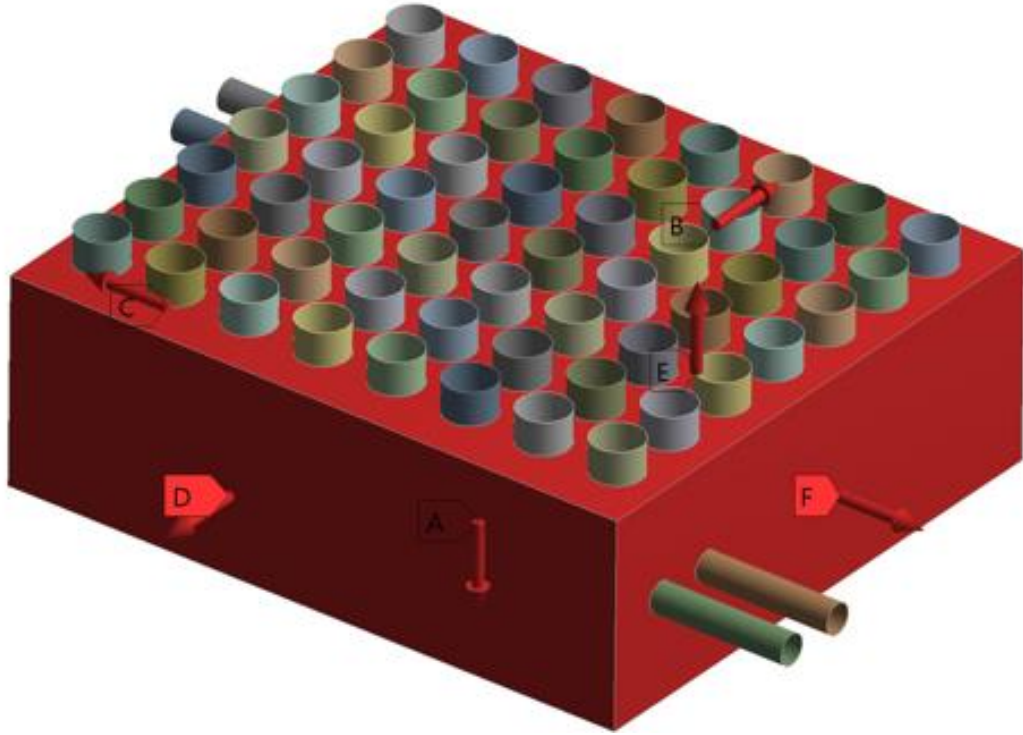
Yer çekimi kuvveti Şekil 3.14'te görüldüğü üzere – y yönünde aktive edilmiştir.



**Şekil 3. 14.** Statik analiz yer çekimi sınır koşulu.

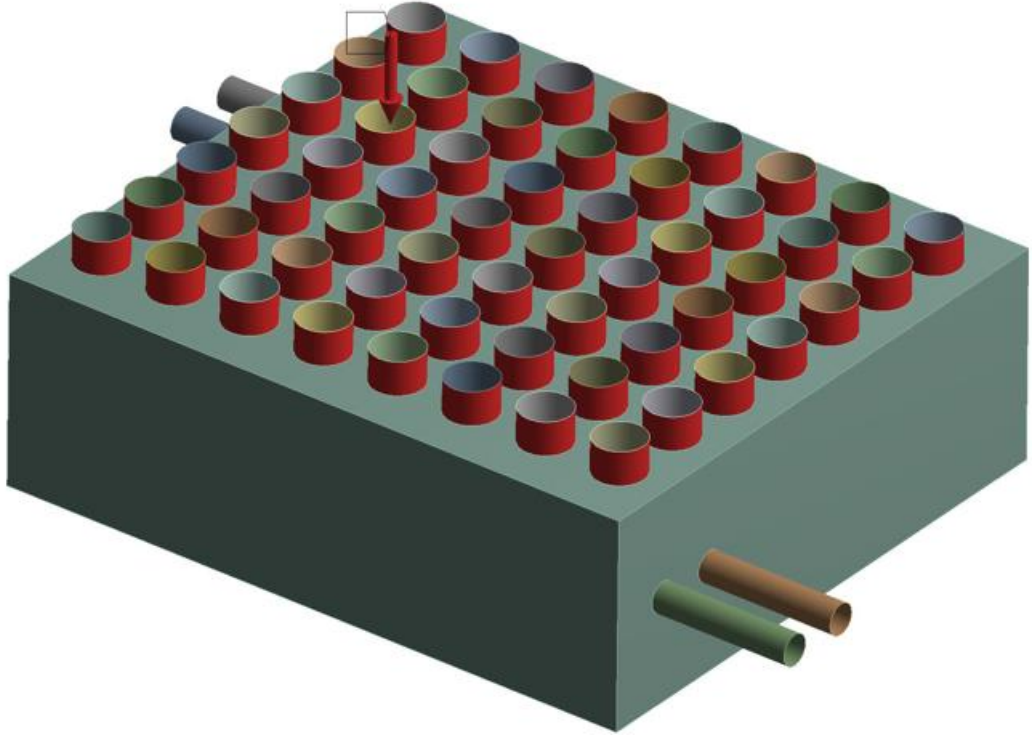
Dielektrik sıvı, batarya modülünün içerisinde düşük hızlarda dolaşacaktır ve modül yüzeylerine doğru bir kuvvet uygulaması beklenmektedir. Bu nedenle, statik analizlerde, dielektrik sıvının modül yüzeylerine uygulayabileceği kuvveti Şekil 3.15'te görüleceği üzere her bir duvara 3N olacak şekilde tanımlandı.





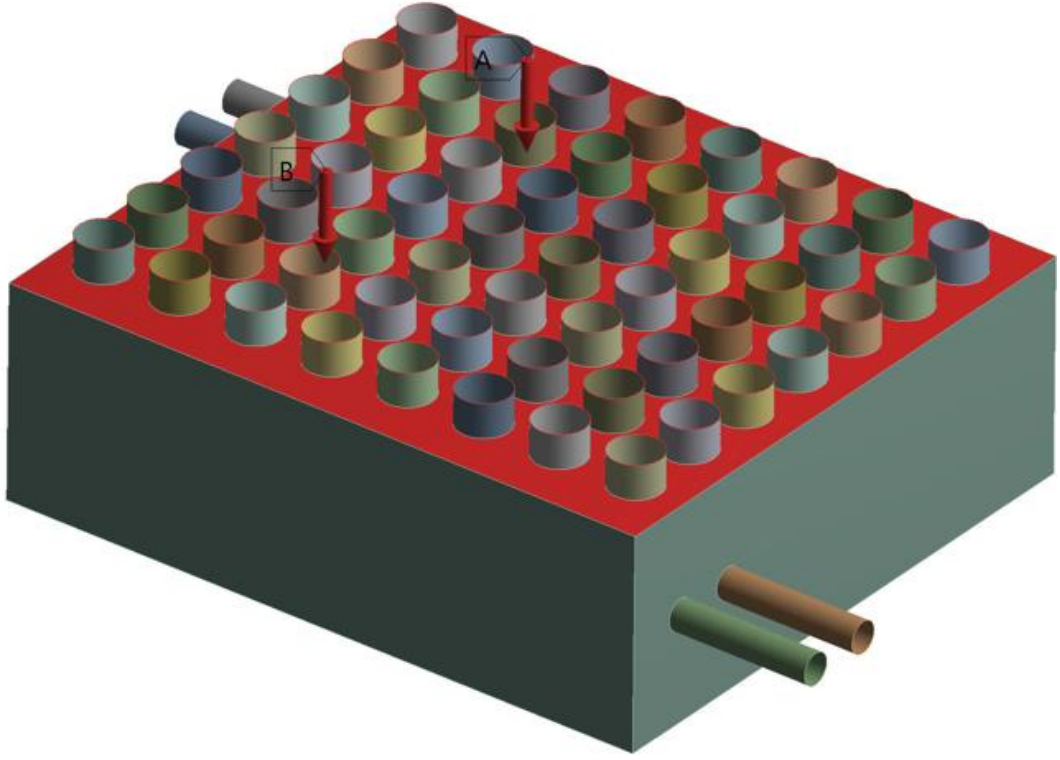
**Şekil 3. 15.** Dielektrik sıvının modül yüzeylerine uyguladığı kuvvet.

Lityum iyon piller kendilerini barındıran zarf plaka ağırlıklarından dolayı bir yer çekimi doğrultusunda bir etkileri olacaktır. Her bir lityum iyon pil hücresinin ağırlığı yaklaşık 4g olacak şekilde yaklaşık 2.5kg toplam pil ağırlığını pil hücrelerini koruyucu zarf plakalara Şekil 3.16’da gösterildiği gibi tanımlanmıştır.



**Şekil 3. 16.** Pil hücrelerinin koruyucu plakaya uyguladığı kuvvet.

Elektrikli aracın diğer komponentleri sebebiyle bir batarya modülüne düşmesi beklenen ağırlık 100 kg civarında olması beklenmektedir. Bu sebeple batarya modülünün üst yüzeyine ve koruyucu plakaların üst yüzeylerine 100 kg yayılı yük sınır koşulunu Şekil 3.17'de görüldüğü üzere tanımlanmıştır.



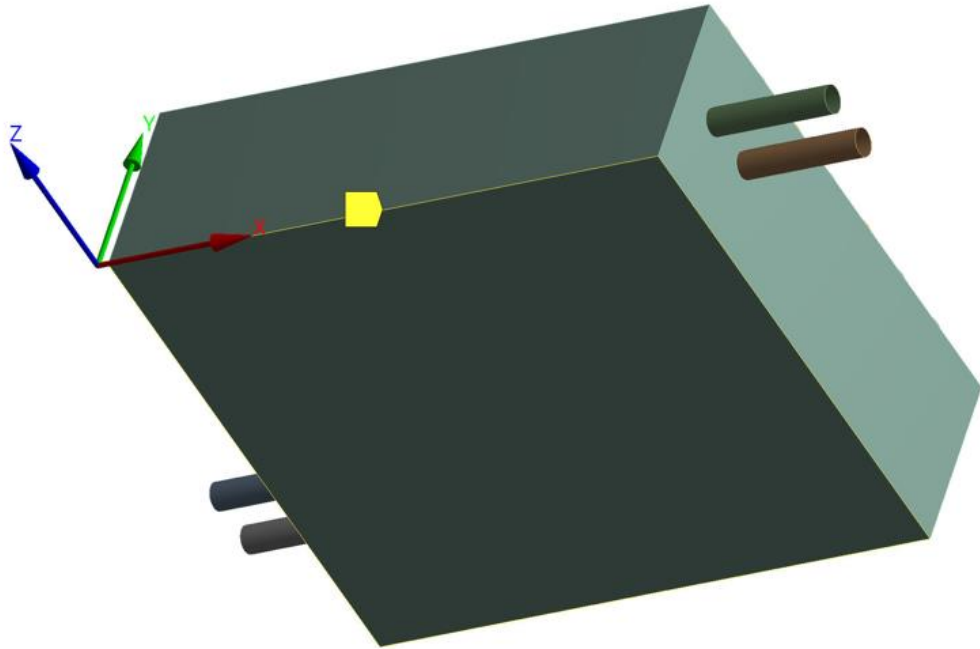
**Şekil 3. 17.** Batarya modülünün üst yüzeyine gelen 1000N kuvvet sınır koşulu.

Daha önceki bölümlerde açıklanan sınır koşulları sonucunda gelen sonuçlara göre optimum kalınlık değerleri ayarlanan nihai modül tasarımı bu bölümde bahsedilen sınır koşulları ile maksimum yükleme koşulu ile statik durumda incelemeleri yapılmıştır.

#### **3.5.4. Modal analiz için sınır koşulunun tanımlanması**

Modal analiz, bir yapısal sistemin doğal frekanslarını ve bunların hareket şekillerini belirlemek için kullanılan bir analiz yöntemidir. Bu yöntem, yapısal sistemlerin dinamik davranışlarını, titreşimleri ve rezonans özelliklerini incelemek için kullanılır. Modal analiz, tasarım aşamasında veya bir yapısal sistemin güvenliği ve dayanıklılığı hakkında bilgi edinmek için yapılır. Modal analiz yöntemi, bir yapısal sistemin matematiksel modelini oluşturur ve bu modeli çözerek doğal frekanslarını ve modlarını belirler. Bu modlar, bir yapısal sistemin hareket şeklini ve doğal titreşim frekanslarını temsil eder. Bu bilgiler, yapının dinamik davranışını anlamak, tasarım hatalarını tespit etmek ve yapısal sistemi optimize etmek için kullanılabilir (“Intro to Modal”, 2023).

Modal analiz yöntemi, batarya modülünün doğal frekanslarının ve mod şekillerinin belirlenmesini sağlar. Bu bilgiler, modülün titreşim davranışının anlaşılmasına ve tasarımın optimize edilmesine yardımcı olur. Ayrıca, batarya modülüne uygulanacak yüklerin doğal frekanslarının bilinmesi, modülün titreşimleriyle etkileşimlerini öngörmeye yardımcı olur. Bu, modülün hasar almadan daha güvenli bir şekilde çalışmasını sağlar. Ancak modal analiz sonuçları, gerçek dünya koşullarındaki titreşim davranışlarını tam olarak yansıtmayabilir. Bu nedenle, modal analiz sonuçları doğrulanmalı ve deneylerle test edilmelidir. Modal analiz için bir önceki bölümlerdeki statik ve dinamik analizler sonucuna göre nihai tasarım haline gelmiş batarya modülü taban bölgelerinden Şekil 3.18’de görüldüğü gibi sabitlenip analiz modeli oluşturulacaktır. Çıkacak mod değerlerinin yanı sıra kütle katılım oranları da incelenecektir. Kütle katılım oranı, belirli bir modun toplam kütleyle oranıdır. Bu oran, her bir modun sönümleme oranını ve modun belirli bir frekanstaki titreşim özelliğini etkiler. Modal analiz sonuçlarındaki kütle katılım oranları, yapının titreşim davranışını anlamak için son derece önemlidir. Kütle katılım oranları özellikle kritik frekanslarda yapının hangi yönden gelecek olan yük veya darbeye karşı zafiyeti olduğunu göstermektedir.

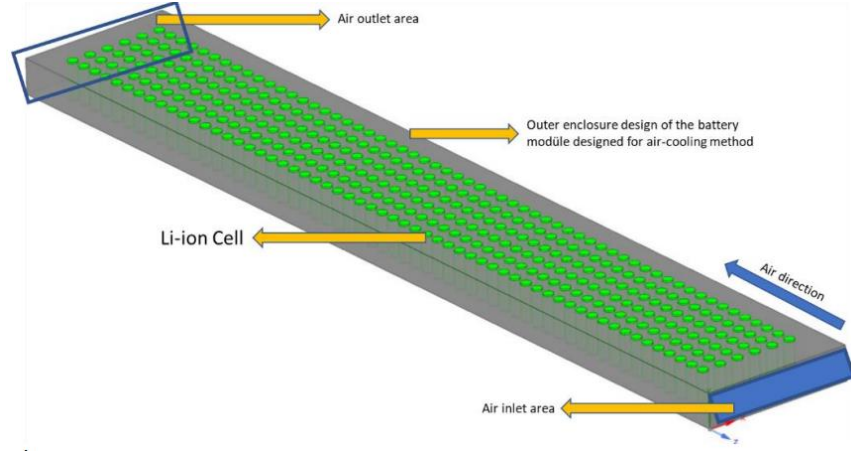


**Şekil 3. 18.** Modal analiz için sabitleme bölgesi.

### 3.6. Termal Analiz için Sınır Koşullarının Belirlenmesi

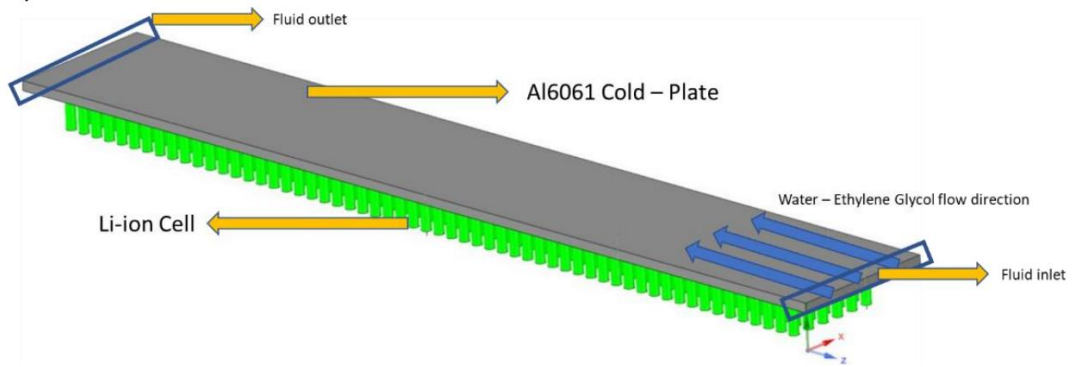
Batarya paketlerinin mekanik yönetimi, araçların batarya paketlerini ani yük ve darbelere karşı korumak ve batarya paketi ebatlarını optimize etmek açısından oldukça önemlidir. Ancak, aynı şekilde termal yönetim de elektrikli araçların performansı, dayanıklılığı ve güvenliği açısından büyük bir öneme sahiptir. Termal yönetim, batarya paketinde oluşan ısıyı etkin bir şekilde kontrol etmeyi ve dağıtmayı amaçlar. İyi tasarlanmış ve etkili bir termal yönetim sistemi, bataryayı optimum sıcaklık aralığında tutarak aracın performansını artırır ve daha uzun menzil elde etmeye yardımcı olmaktadır. Aynı zamanda, bataryadaki yüksek sıcaklıkların güvenlik risklerini azaltır ve batarya yangınları gibi olası tehlikelerin önüne geçer. Bataryanın düşük sıcaklıklarda sağlıklı bir şekilde çalışmasını sağlayarak pil ömrünü uzatır ve hızlı şarj performansını optimize eder. Sonuç olarak, termal yönetim, elektrikli araçların yaygınlaşmasında ve başarılı bir şekilde kullanılmasında önemli bir rol oynar.

Bu tez çalışmasında, daldırma soğutma yöntemine sahip bir batarya modülünün mekanik özelliklerini incelemeye yönelik çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu yöntemin termal incelemesi aynı zamanda Ergül ve Tüfekçi (2023), Numerical Analyses of Thermal Performances of the Conventional and the Immersion Cooling Methods for Lithium-Ion Battery Packs isimli yayında incelenmiştir. Bu çalışmada üç farklı soğutma yöntemi (hava, dolaylı sıvı soğutma, doğrudan sıvı soğutma) yönteminin termal performansı ve pil hücreleri ısı dağılımı incelenmiştir. Modül tasarımı olarak Tesla Model S alınarak 6 Seri 58 Paralel olarak 1854 x 292 66 mm olarak tasarlanmıştır. Şekil 3.19’da hava ile soğutma yöntemine göre tasarlanmış batarya modülü görünmektedir. Yapılan bu tasarımda, hava için termo-fiziksel özellikleri  $Q[\text{kg/m}^3]$ : 1.125,  $\mu$  [Pa sec]:  $1.7894 \times 10^{-5}$ ,  $C_p$  [J/ (kg K)]: 1006.43,  $k$  [W/ (m K)]: 0.0242 olarak kabul edilip zorlanmış hava için konveksiyon ısı transfer katsayısı  $70 \text{ W/m}^2\text{K}$  olarak kabul edilmiştir.



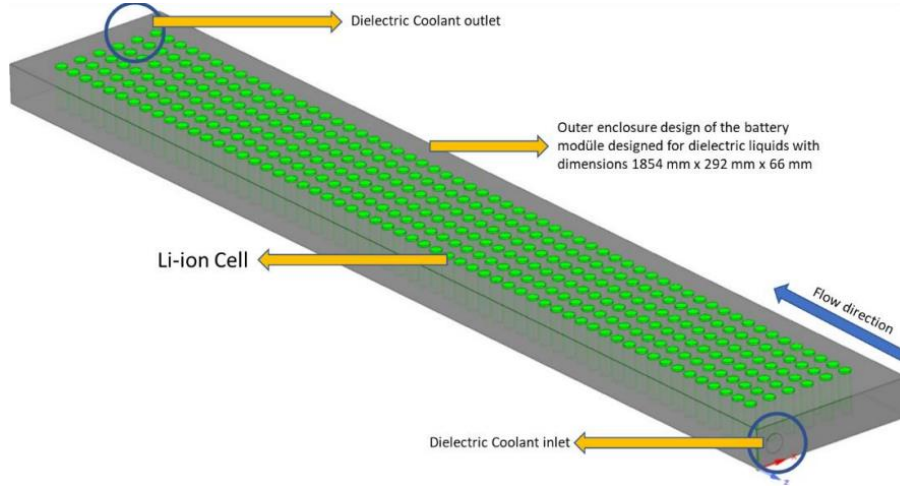
**Şekil 3. 19.** Hava ile soğutma yöntemi ile tasarlanan batarya modülü

Şekil 3.20’de bir soğutucu plaka yardımıyla içerisinden su etilen glikol çözeltisi ile soğutulduğu dolaylı sıvı soğutma yönteminin performansını değerlendirmek için bir batarya modül tasarımı gerçekleştirilmiştir. Yapılan bu tasarımda, Su etilen glikol çözeltisinin termo fiziksel özellikleri  $Q[\text{kg/m}^3]$ : 1079.2,  $\mu$  [Pa sec]: 1.259,  $C_p$  [J/ (kg K)]: 3471.84,  $k$  [W/ (m K)]: 3.3457 olarak kabul edilip zorlanmış sıvı için konveksiyon ısı transfer katsayısı  $600 \text{ W/m}^2\text{K}$  olarak kabul edilmiştir.



**Şekil 3. 20.** Soğutucu plaka ile soğutma yöntemi ile tasarlanan batarya modülü

Şekil 3.21’de tezin konusu olan bir dielektrik sıvının doğrudan pil hücreleri arasından 2 – 6 LPM lik akış hızlarıyla sirküle edildiği doğrudan sıvı soğutma yönteminin termal performansı incelenmiştir. Dielektrik sıvı soğutma yöntemi için yapılan bu tasarımda, dielektrik sıvının termo fiziksel özellikleri  $Q[\text{kg}/\text{m}^3]$ : 1624.11,  $\mu$  [Pa sec]:  $1.24 \times 10^{-3}$ ,  $C_p$  [J/ (kg K)]: 1120.96,  $k$  [W/ (m K)]: 0.06516 olarak kabul edilip zorlanmış sıvı için konveksiyon ısı transfer katsayısı  $1750 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$  olarak kabul edilmiştir.



**Şekil 3. 21.** Dielektrik sıvı ile soğutulan batarya modülü

Pil hücrelerinde toplam ısı üretiminin önemli bir bölümü ohmik direnç nedeniyle oluşmaktadır. Ohmik dirençle sebebiyle üretilen ısı, iletim yoluyla pil hücresinin yüzeyini ısıtmaktadır. Pil hücresinin yüzeylerinde oluşan bu ısı, soğutma sıvısıyla konvektif ısı transferiyle uzaklaştırılır. Pil hücresinin ohmik direnç nedeniyle oluşan ısı miktarı,  $I^2 \times R$ , formülüyle hesaplanır. Burada  $I$ , çalışma koşullarında standart kapasiteyi temsil eder ve  $R$ , pil hücresinin iç direnci olarak tanımlanır. Bu formülle pil hücresi tarafından üretilen ısı miktarı aynı zamanda konveksiyon ile aşılması gereken minimum ısı transferidir. Şekil 3.19, Şekil 3.20, Şekil 3.21’de görüldüğü üzere 348 adet 18650 Li-ion pil hücresi bulunmaktadır. Bu durumda, bir modülde meydana gelecek toplam ısı enerjisi hesaplanabilir. Yapılan bu araştırmada 1 pil hücresinde 0.96 W ısı üretimi meydana geleceği hesaplanmıştır, 349 pil hücresinde ise 335.04 W olarak bulunmaktadır. Bu ANSYS Termal analiz programında her bir pil hücresi için 0.96W’luk bir ısı iletimi olarak tanımlanıp bu şartlarda batarya modülünün termal performansı incelenmiştir.

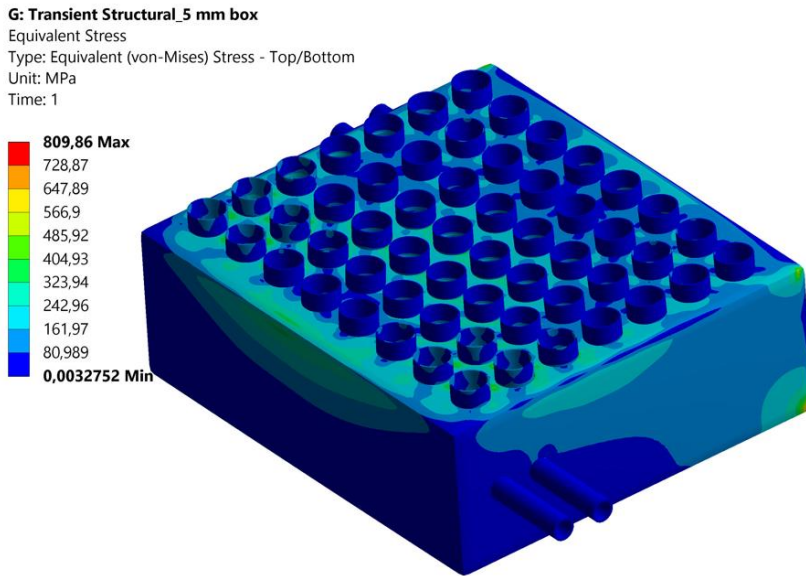


#### 4. BULGULAR

Dielektrik sıvı ile soğutma yöntemi, elektrikli araçlarda yeni bir teknolojidir ve tasarım geliştirme ihtiyaçları duymaktadır. Yüksek termal performans özelliklerinden dolayı yaygınlaşma potansiyeli yüksek olan bu teknoloji bataryaların daha verimli ve güvenli bir şekilde soğutulmasını sağlayarak elektrikli araçların performansını arttırıp, batarya ömrünü uzatmayı amaçlamaktadır. Bu doğrultuda batarya modülü tasarımının dinamik, statik ve modal analiz sonuçları incelenmiştir. Bu veriler, yaygınlaşan ve alternatifleri türeyen bu teknolojinin geliştirilmesine ve optimize edilmesine yol göstermeyi hedeflemiştir.

Batarya modülü üzerinde yapılan Transient Structural Analizleriyle önce modül kalınlığının optimum değeri incelenmiş daha sonrasında tasarım için düşünülen zarf plaka kalınlığının optimum değeri incelenmiştir. Daha sonrasında batarya modülünün maksimum yük koşulu altında statik davranışı incelenmiştir. Ayrıca, modal analiz sonuçları, batarya modülünün titreşim davranışlarını ortaya koymuştur.

Gerçekleştirilen dinamik analiz sonrasında, 5 mm kalınlığına sahip Alüminyum batarya paketi üzerinde oluşan eşdeğer (von-Mises) gerilim dağılımının görüntüsü Şekil 4.1'te gösterilmiştir.



Şekil 4. 1. 5 mm kalınlığındaki batarya modülü.



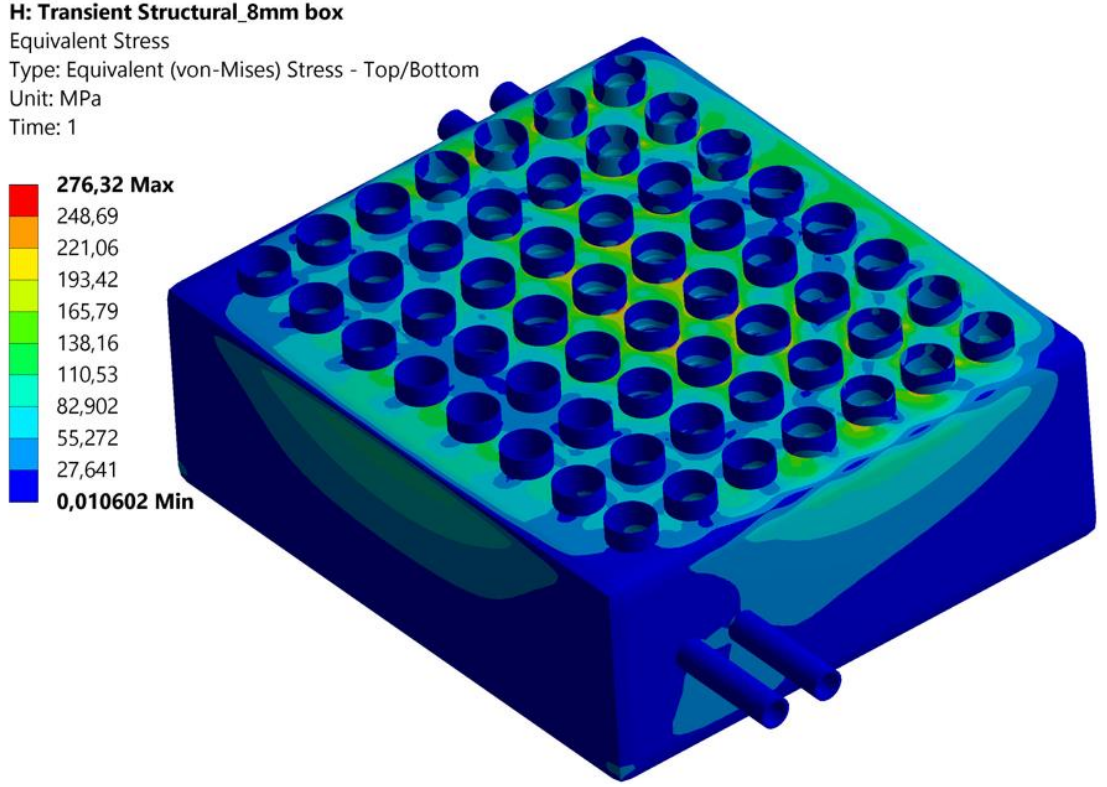
Şekil 4.2’teki tabloda, zaman adımlarında kuvvet etkisinin sönümlenmesi sürecinde meydana gelen gerilim dağılımının değişimi ve ortalama gerilme dağılım değerleri sunulmuştur.

Tabular Data				
	Time [s]	Minimum [MPa]	Maximum [MPa]	Average [MPa]
1	1.	3,2752e-003	809,86	50,713
2	2.	2,392e-003	645,83	40,377
3	3.	1,8218e-003	483,14	30,611
4	4.	1,1748e-003	321,3	20,539
5	5.	5,4419e-004	160,28	10,267

**Şekil 4. 2.** 5 mm batarya modülü transient analiz sonucu.

Alüminyum malzeme için Çizelge 3.2’de akma sınırı 240 MPa olarak belirtilmiştir. 5 mm batarya modülü üzerinde yapılan analizde görüldüğü üzere 240 MPa çok üzerinde bir gerilme dağılımı meydana geldiği söylenebilir. Bu değer aşıldığında malzemenin kalıcı deformasyon bölgesine geçmesi ve analizin doğru sonuçlardan sapma olasılığını arttırdığı sonucuna varılmıştır. Bu sonuçlar, batarya modülünün tasarımında göz önünde bulundurulması gereken bir faktördür. Batarya modülünün gerilim değerleri akma sınırından yüksek olduğu için, modülün yapısında bir deformasyon meydana gelebilir ve bu da modülün performansına ve güvenliğine olumsuz etki edebilir. Bu nedenle, batarya modülü tasarımının güvenlik ve performans açısından optimize edilmesi gerekmektedir.

8 mm kalınlığındaki Alüminyum batarya paketi üzerinde gerçekleştirilen dinamik analizler sonuçlarına göre modül üzerinde meydana gelen Eşdeğer (von-Mises) gerilim dağılımı, Şekil 4.3'te görüldüğü şekildedir.



**Şekil 4. 3.** 8 mm kalınlığındaki batarya modülü.

Şekil 4.4'te verilen tabloda farklı zaman adımlarında, kuvvet etkisinin sönümlenmesi sırasında meydana gelecek gerilme dağılımının değişimi ve ortalama gerilme dağılım değerleri verilmiştir.

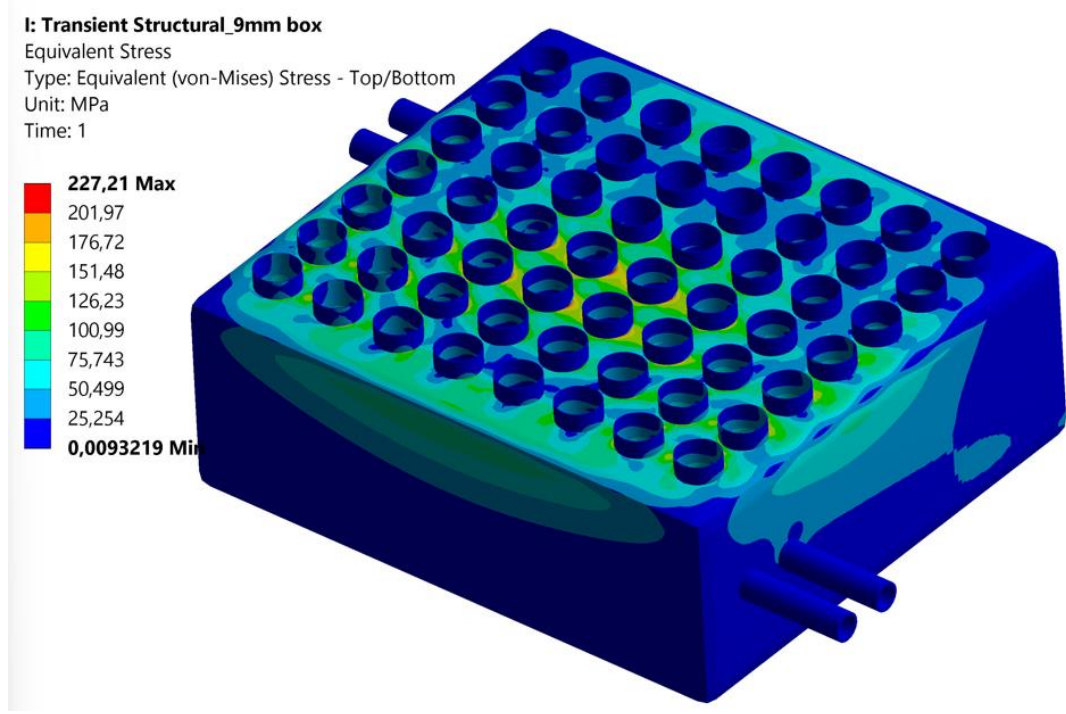
Tabular Data				
	Time [s]	Minimum [MPa]	Maximum [MPa]	Average [MPa]
1	1.	1,0602e-002	276,32	20,928
2	2.	8,6062e-003	223,11	16,823
3	3.	6,6355e-003	169,06	12,693
4	4.	4,3973e-003	114,69	8,5743
5	5.	2,1368e-003	60,116	4,4725

**Şekil 4. 4.** 8 mm batarya modülü transient analiz sonucu.

Alüminyum malzeme için Çizelge 3.2'de akma sınırı 240 MPa olarak belirtilmiştir. 8 mm batarya modülü üzerinde yapılan darbe testi sonucunda maksimum gerilmenin 276.32 MPa olduğu görülmüştür. Diğer zaman adımlarda bu gerilme değerinin dağıldığı

gözenmiştir fakat bu değer riskli sayılabilecek bir bölgededir. Tekrarlı darbeler veya bilinmeyen ani darbeler etkisiyle akma sınırını kolayca aşabilecek bir değerdir.

Yapılan dinamik analizler neticesinde, 9 mm kalınlığındaki alüminyum batarya paketi üzerinde oluşan Eşdeğer (von-Mises) gerilim dağılımı Şekil 4.5'te gösterildiği gibidir.



Şekil 4. 5. 9 mm kalınlığındaki batarya modülü.

Şekil 4.6'da verilen tabloda farklı zaman adımlarında, kuvvet etkisinin sönümlenmesi sırasında meydana gelecek gerilme dağılımının değişimi ve ortalama gerilme dağılım değerleri verilmiştir.

Tabular Data			
Time [s]	Minimum [MPa]	Maximum [MPa]	Average [MPa]
1 1.	9,3219e-003	227,21	16,622
2 2.	7,4327e-003	182,87	13,343
3 3.	5,5888e-003	138,31	10,064
4 4.	3,7552e-003	93,691	6,7944
5 5.	1,9407e-003	49,054	3,5376

Şekil 4. 6. 9 mm batarya modülü transient analiz sonucu.

Alüminyum malzeme için Çizelge 3.2'de akma sınırı 240 MPa olarak belirtilmiştir. 9 mm batarya modülü üzerinde yapılan darbe testi sonucunda maksimum gerilmenin 227.21

MPa olduğu görülmüştür. Ulaşılan bu maksimum gerilme değerinin batarya modülün yaklaşık 1.05 kat emniyetli olduğu söylenebilir ancak bu değer yine de akma sınırı fazlasıyla yakın bir değer olarak gözlendiğinden yeterli kalınlık değeri olarak kabul edilmemiştir.

Yapılan dinamik analizler sonucunda 10 mm kalınlığına sahip Alüminyum batarya paketi üzerinde meydana gelecek Equivalent (von-Mises) Stress dağılımı Şekil 4.7’de gösterildiği gibidir.

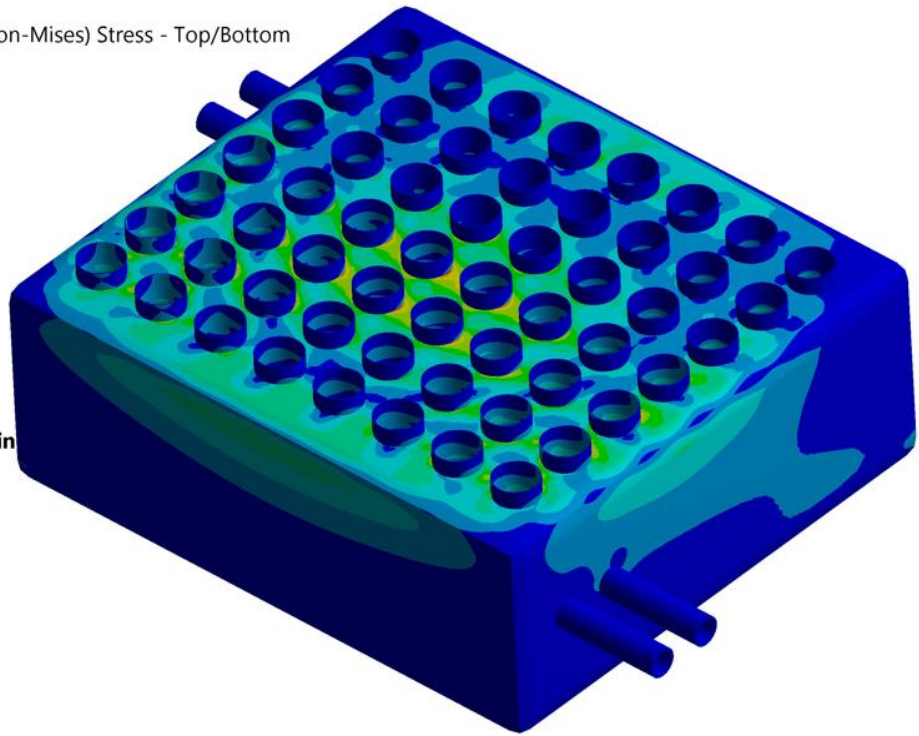
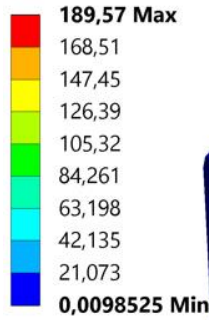
**J: Transient Structural\_10mm box**

Equivalent Stress

Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom

Unit: MPa

Time: 1



**Şekil 4. 7.** 10 mm kalınlığındaki batarya modülü.

Şekil 4.8’de verilen tabloda farklı zaman adımlarında, kuvvet etkisinin sönümlenmesi sırasında meydana gelecek gerilme dağılımının değişimi ve ortalama gerilme dağılım değerleri verilmiştir.

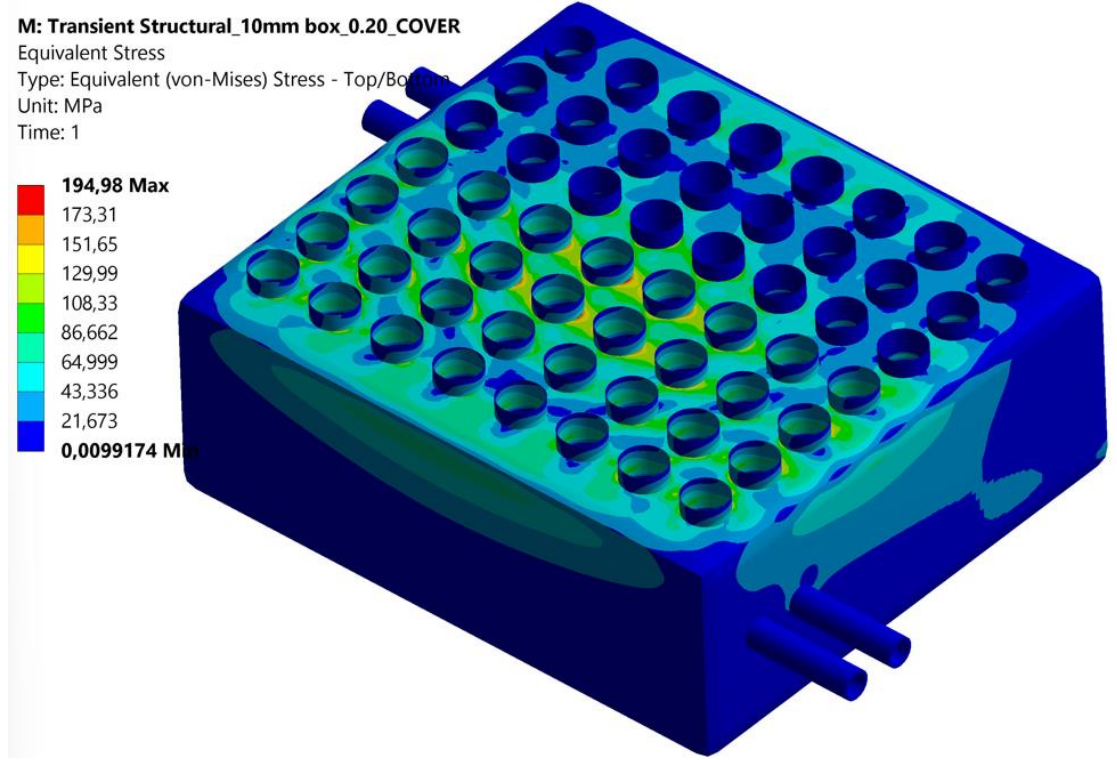
Tabular Data				
	Time [s]	Minimum [MPa]	Maximum [MPa]	Average [MPa]
1	1.	9,8525e-003	189,57	13,62
2	2.	7,8306e-003	152,4	10,929
3	3.	5,838e-003	115,19	8,242
4	4.	3,8648e-003	77,988	5,5616
5	5.	1,9183e-003	40,812	2,8906

**Şekil 4. 8.** 10 mm batarya modülü transient analiz sonucu.

Alüminyum malzeme için Çizelge 3.2’de akma sınırı 240 MPa olarak belirtilmiştir. 9 mm batarya modülü üzerinde yapılan darbe testi sonucunda maksimum gerilmenin 189.57 MPa olduğu görülmüştür. Bu değer Alüminyum malzeme maksimum darbe anı için yaklaşık 1.3 kat emniyetli olduğu söylenebilir. Batarya modülleri gibi yüksek güvenlik gerektiren uygulamalarda emniyet katsayısı, yapısal bileşenlerin güvenli çalışmasını sağlayan önemli bir faktördür. Bu değer, batarya modüllerinin güvenli ve dayanıklı bir şekilde çalışması beklenen bir değerdir. Kalınlığı daha fazla arttırmak emniyet katsayısını arttıracaktır fakat ağırlık elektrikli araçlar için istenmeyen bir durumdur bu sebeple en optimum kalınlık için 10 mm olduğu saptanmıştır. Pil hücrelerinin koruyucu zarf plaka kalınlıklarının artırılmasıyla bu bölgedeki eşdeğer gerilme dağılımının daha iyi sonuç gösterileceği beklenmektedir.



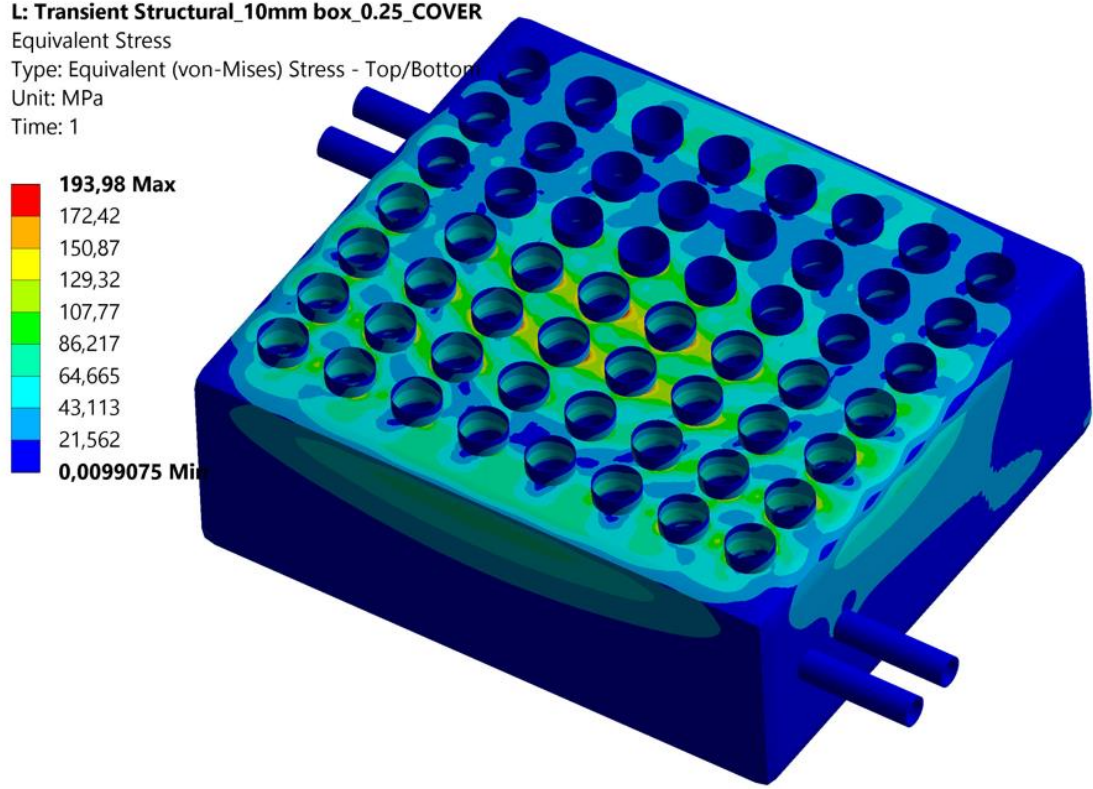
10 mm batarya modülü kalınlığına karar verildikten sonra sınır koşullarında belirtildiği gibi koruyucu zarf plakalar üzerine kuvvet yük tanımlaması gerçekleştirilmiştir. Sınır koşulları tamamlandıktan sonra 0.2 mm kalınlığına sahip ince zarf plakaya sahip batarya modülü üzerinde yapılan analiz sonucunda ince zarf plaka ve modül üzerinde oluşan eşdeğer gerilme dağılımı Şekil 4.9’da verilmiştir.



**Şekil 4. 9.** 0.2 mm kalınlığına sahip zarf plakalı batarya modülü.

Transient Structural Analiz sonuçlarına dayanarak, 0.2 mm kalınlığına sahip koruyucu zarf plakalı batarya modülünün yüzeyindeki eşdeğer gerilme dağılımı Şekil 4.9’da gösterilmiştir. Bu değerlendirmeye göre, maksimum gerilme değeri 194 MPa olarak belirlenmiştir. Bu belirlenen parametre altında, emniyet faktörü 1.23 olarak saptanmıştır.

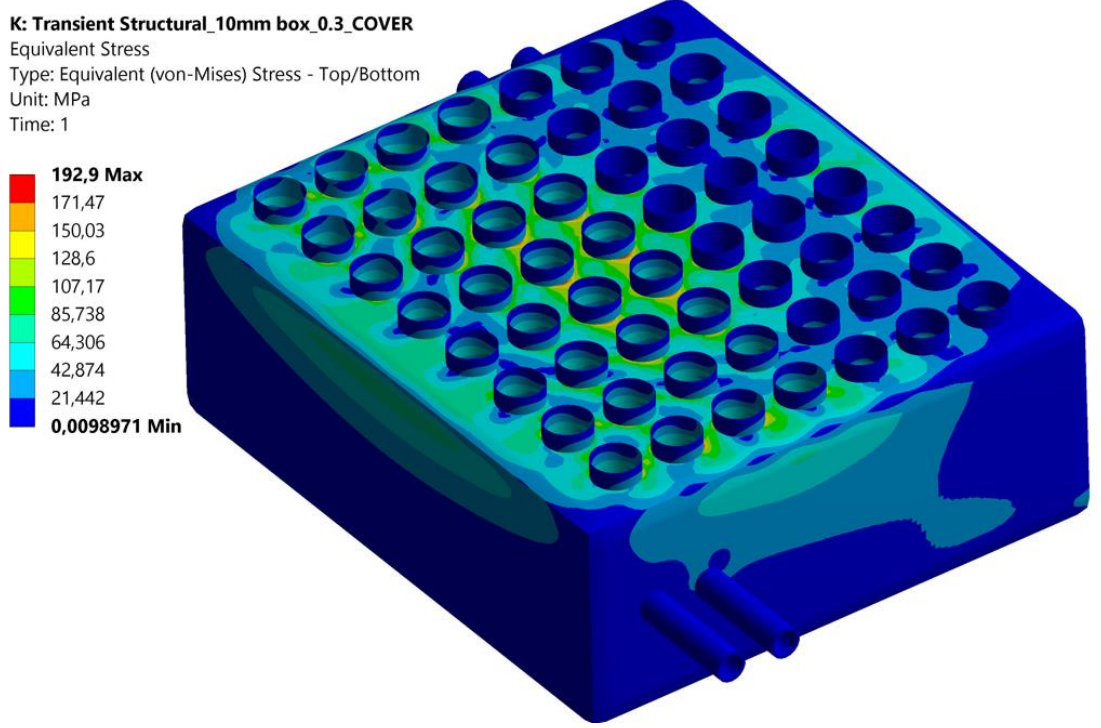
0.25 mm kalınlığına sahip ince zarf plaka üzerinde yapılan dinamik analiz sonucu Şekil 4.10'da gösterildiği gibidir.



**Şekil 4. 10.** 0.25 mm kalınlığına sahip zarf plakalı batarya modülü

0.25 mm kalınlığında ince zarf plaka üzerinde Transient Structural Analiz çalışması tamamlanmıştır. Maksimum eşdeğer gerilme dağılımı 193,98 MPa olarak gözlenmiştir. Bu şartlar altında emniyet katsayısının 1.24 olduğu söylenebilir.

Elde edilen analiz sonuçlarına göre, 0.3 mm kalınlığına sahip koruyucu zarfın üzerindeki eşdeğer gerilme dağılımı Şekil 4.11’de gösterilmiştir.



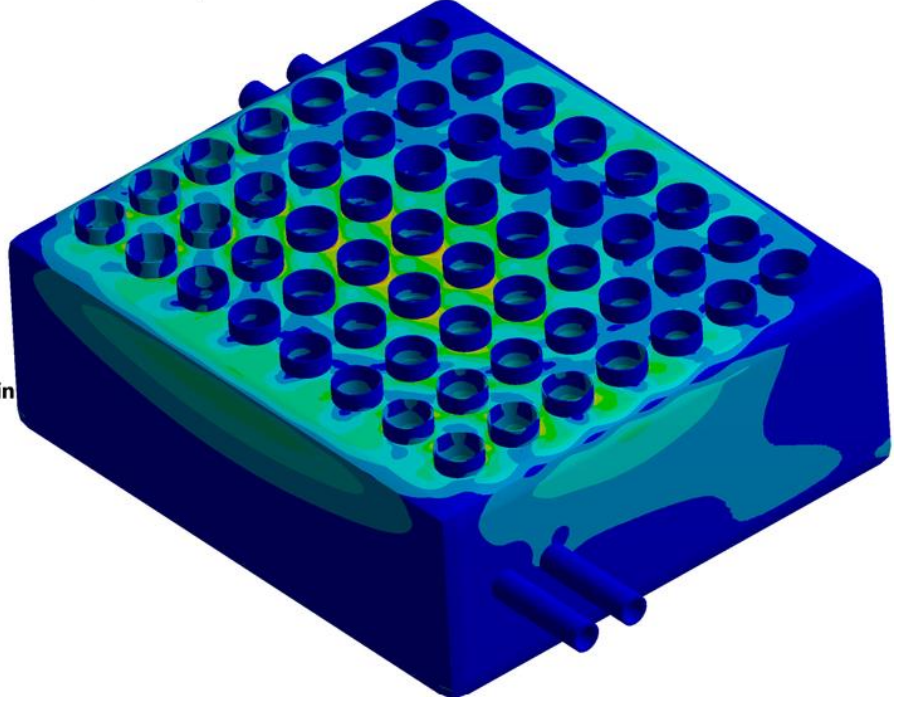
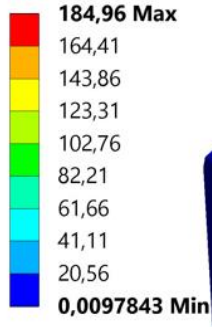
**Şekil 4. 11.** 0.3 mm kalınlığına sahip zarf plakalı batarya modülü.

Gerçekleştirilen Transient Strcutrual Analiz sonuçlarına göre, 0.3 mm kalınlığındaki zarf plakalı batarya modülü yüzeyindeki eşdeğer gerilme dağılımı Şekil 4.11’de gösterildiği gibidir. Bu koşullar altında, emniyet katsayısının 1.25 olduğu ifade edilebilir.



Yapılan analizler neticesinde, 0.8 mm kalınlığındaki koruyucu zarfın yüzeyinde meydana gelen eşdeğer gerilme dağılımı Şekil 4.12'de sunulmuştur.

**N: Transient Structural\_10mm box\_0.80\_COVER**  
Equivalent Stress  
Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom  
Unit: MPa  
Time: 1

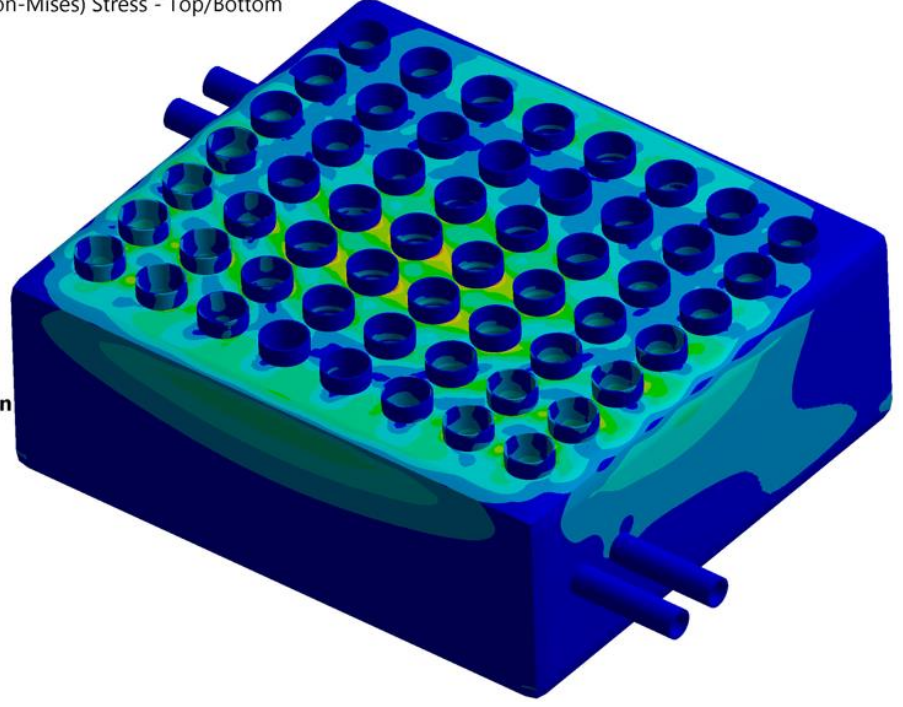
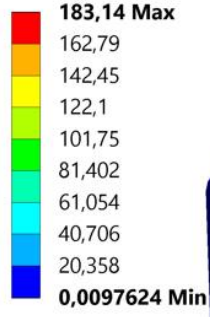


**Şekil 4. 12.** 0.8 mm kalınlığına sahip zarf plakalı batarya modülü.

0.8 mm kalınlığına sahip ince plakalı batarya modülü üzerinde yapılan dinamik analiz sonucunda maksimum eşdeğer gerilme değeri 184,96 MPa olarak gözlenmiştir. Bu şartlar altında emniyet katsayısının 1.3 olduğu söylenebilir.

Gerçekleştirilen analiz sonuçlarına göre, 0.9 mm kalınlığındaki koruyucu zarfın yüzeyinde oluşan eşdeğer gerilme dağılımı Şekil 4.13'te görülmektedir.

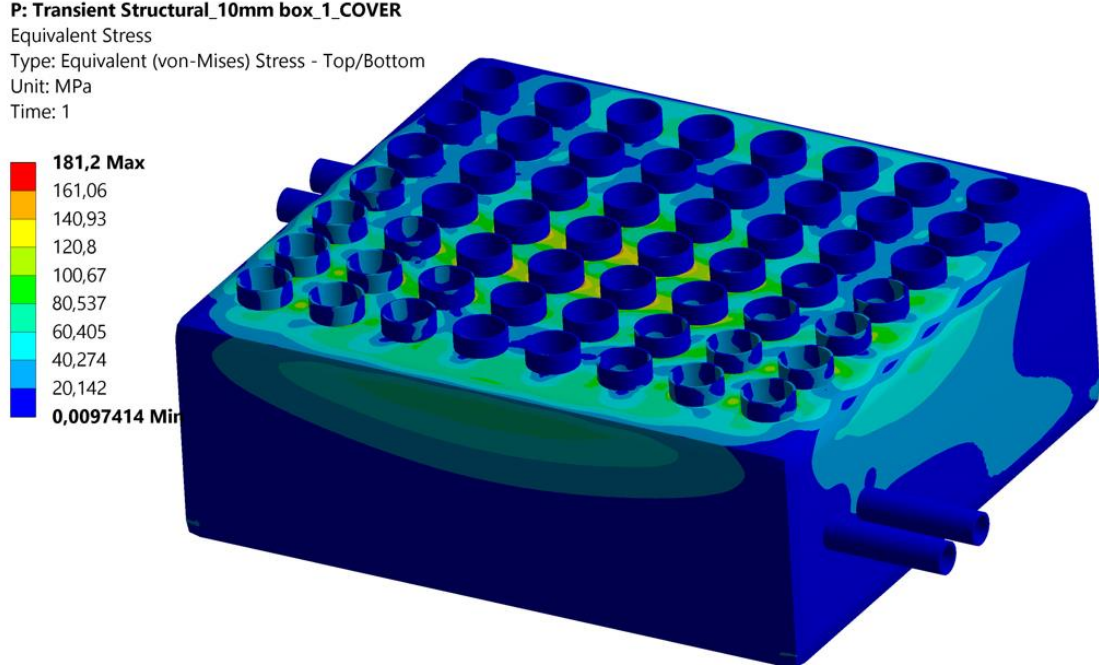
**O: Transient Structural\_10mm box\_0.90\_COVER**  
Equivalent Stress  
Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom  
Unit: MPa  
Time: 1



**Şekil 4. 13.** 0.9 mm kalınlığına sahip zarf plakalı batarya modülü.

Transient Structural Analiz sonuçlarına göre, 0.9 mm kalınlığına sahip zarf plakalı batarya modülü üzerindeki eşdeğer gerilme dağılımı Şekil 4.12'de görüldüğü üzere maksimum 184,96 MPa olarak gözlenmiştir. Bu şartlar altında emniyet katsayısının 1.31 olduğu söylenebilir.

1 mm kalınlığına sahip koruyucu zarf üzerin deki eşdeğer gerilme dağılımı Şekil 4.14'te verilmiştir.



**Şekil 4. 14.** 1 mm kalınlığına sahip zarf plakalı batarya modülü.

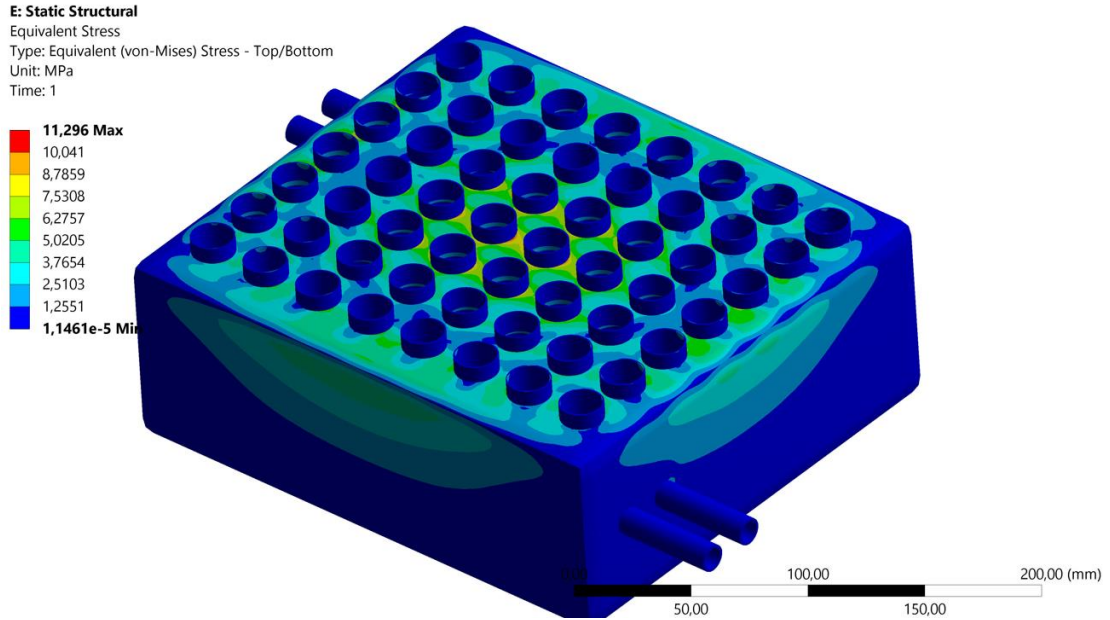
1 mm kalınlığına sahip zarf plakalı batarya modülü üzerindeki eşdeğer gerilme dağılımı maksimum 181,2 MPa olarak gözlenmiştir. Bu şartlar altında emniyet katsayısının 1.32 olduğu söylenebilir.

Batarya modüllerinde kullanılan koruyucu zarf plakaları, bataryaların darbelerden ve diğer zarar verici faktörlerden korunmasını sağlamaktadır. Bu plakaların kalınlığı, bataryaların güvenliğini sağlarken, aynı zamanda batarya modülün ağırlığını da etkilemektedir. Batarya modüllerindeki koruyucu zarf plakalarının kalınlığı arttıkça, batarya modülünün toplam ağırlığı da artar. Bu ağırlık artışı, batarya modülünün diğer bileşenleriyle birlikte toplam araç ağırlığını da etkileyebilir. Bu sebeple, batarya modüllerinin tasarımında, koruyucu zarf plakaların optimum kalınlıkları belirlenirken, ağırlık faktörünün önemi göz önünde bulundurulmalıdır. Bu, bataryaların güvenliği ve performansını en üst düzeye çıkarmak için gereklidir. Çizelge 4.1'de değişen zarf plaka kalınlıklarına göre batarya modülünün ağırlık değerleri verilmiştir.

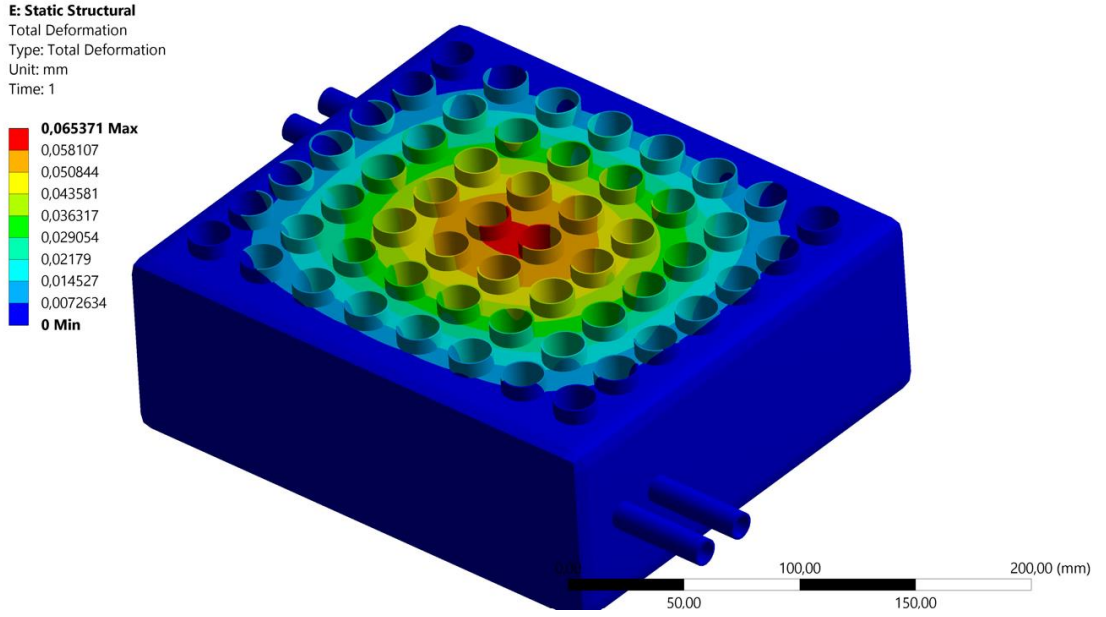
**Çizelge 4. 1.** Zarf plaka kalınlıklarına göre ağırlık değişimleri.

0.2 mm	2318.62 g
0.25 mm	2353.82 g
0.3 mm	2389 g
0.8 mm	2736.7 g
0.9 mm	2805.8 g
1 mm	2875.1 g

Statik analiz, bir sistemin durağan haldeki davranışını inceler ve özellikle yapısal tasarımların doğrulu değerlendirilir. Bu bağlamda, bu çalışmada batarya modülü üzerinde statik analiz gerçekleştirilmiştir. Analizde, yukarıdaki çıktılarına göre batarya modülü kalınlığı 10 mm ve koruyucu plaka kalınlığı 0.8 mm olarak seçilmiştir. Statik analiz, batarya modülü ve koruyucu plakanın belirli bir yük altında tek adımda nasıl davranacağını incelemek için yapılmıştır. Sınır koşulları belirlenen statik analizi gerçekleştirilen batarya modülünün eşdeğer gerilme dağılımı Şekil 4.15'te ve deformasyon dağılımı Şekil 4.16'da verilmiştir.



**Şekil 4. 15.** Batarya modülü statik analiz gerilme dağılımı.



**Şekil 4. 16.** Batarya modülü statik analiz deformasyon dağılımı.

Şekil 4.15 eşdeğer gerilme dağılımı incelendiğinde batarya modülü üzerinde statik durumda meydana gelecek maksimum gerilmenin yaklaşık 11.3 MPa olacağı gözlenmiştir. Bu alüminyum malzeme için oldukça emniyetli bir bölgede yer almaktadır. Deformasyon dağılımı da incelendiğinde değerlerin çok küçük geldiği görülmektedir. Yapının bu kalınlıklarda araç üzerinde statik dayanımının iyi olacağı yorumu yapılabilir. Bu çalışmada, belirli bir batarya modülü tasarımının modal analizi gerçekleştirilmiştir. Modal analiz, bir sistemin doğal frekanslarını ve bu frekanslara karşılık gelen mod şekillerini hesaplamak için kullanılan bir yöntemdir. Batarya modülünün ilk 10 moddaki frekans değerleri Şekil 4.17’de gösterildiği gibidir.

Tabular Data		
	Mode	<input checked="" type="checkbox"/> Frequency [Hz]
1	1.	866,93
2	2.	1349,1
3	3.	1412,3
4	4.	1446,2
5	5.	1446,7
6	6.	1608,1
7	7.	1933,9
8	8.	1998,6
9	9.	2236,6
10	10.	2279,3

**Şekil 4. 17.** Modal analiz 10 mod değeri.



Modal analiz sonuçlarındaki mod frekansları, yapısal sistemlerin titreşim özelliklerini gösteren önemli parametrelerdir. Ancak, çok yüksek frekanslı titreşimler, genellikle insanlar tarafından hissedilemeyecek kadar küçük veya önemsiz olarak kabul edilir. Öte yandan, düşük mod frekansları daha önemli olabilir. Düşük mod frekansları, yapısal sistemlerin ana titreşim modlarını gösterir ve bu modlar genellikle daha büyük titreşimler oluşturur. Batarya modülünün ilk 25 moddaki kütle katılım oranları Şekil 4.18'de sunulmuştur.

Mode	Frequency [Hz]	X Direction	Y Direction	Z Direction	Rotation X	Rotation Y	Rotation Z
1	866,93	1,519e-008	0,10885	5,6291e-008	6,0659e-002	2,2956e-007	6,1934e-002
2	1349,1	2,027e-011	0,18089	2,0817e-011	0,10891	1,5764e-006	0,11117
3	1412,3	2,0825e-005	4,0461e-007	1,4708e-005	5,8816e-006	1,1429e-006	1,0635e-002
4	1446,2	1,6351e-005	9,4009e-005	5,0191e-004	1,5505e-004	4,2079e-008	3,7034e-004
5	1446,7	2,8927e-005	4,0909e-004	2,1202e-005	8,5177e-004	9,0644e-006	1,9045e-005
6	1608,1	2,2721e-006	7,0408e-008	3,5309e-003	5,17e-003	1,2773e-003	7,7995e-007
7	1933,9	8,6194e-007	1,8301e-005	3,8601e-006	5,9453e-006	5,3145e-007	1,5345e-005
8	1998,6	7,5722e-008	1,7152e-002	3,2341e-006	1,0165e-002	6,0876e-006	1,0596e-002
9	2236,6	8,8797e-005	8,9919e-007	0,42018	6,5328e-002	0,16766	1,0182e-005
10	2279,3	9,0441e-006	1,7299e-002	9,0961e-006	9,7674e-003	1,2384e-005	1,0883e-002
11	2281,8	4,8731e-004	6,01e-005	5,9918e-003	4,0558e-003	3,8219e-003	8,7092e-006
12	2397,	2,71e-002	2,2719e-006	3,8504e-005	1,4621e-005	7,8731e-003	2,2471e-003
13	2405,9	1,0264e-002	1,2632e-006	1,3779e-006	1,2601e-007	3,0806e-003	1,5385e-003
14	2444,4	0,23929	1,4641e-005	6,8878e-006	1,2792e-006	7,1944e-002	1,1358e-002
15	2559,5	9,3687e-005	6,0852e-005	8,0878e-007	2,6434e-005	3,441e-005	4,2956e-005
16	2577,2	2,7198e-005	8,8141e-004	2,4085e-007	4,9546e-004	1,2916e-005	6,0347e-004
17	2653,8	1,369e-004	1,2599e-006	3,6648e-003	6,7197e-004	1,9609e-003	6,0909e-005
18	2668,	2,2609e-004	2,7307e-003	1,1178e-006	1,5357e-003	1,9528e-004	3,5607e-003
19	2675,2	8,9148e-002	8,1214e-005	1,0027e-007	1,8516e-004	2,591e-002	7,4505e-002
20	2719,2	1,1056e-004	2,878e-006	3,4463e-008	9,9266e-007	1,8001e-004	1,0969e-005
21	2734,5	6,4551e-004	1,0351e-005	4,6062e-006	3,4589e-007	1,6797e-004	2,6316e-005
22	2750,8	1,8633e-003	3,3854e-006	2,4434e-006	1,4488e-005	5,4395e-004	2,8741e-004
23	2775,1	1,0521e-004	4,2428e-005	1,4547e-005	8,5353e-005	3,4521e-004	1,0621e-007
24	2803,6	2,4314e-004	4,4768e-005	9,918e-006	7,4814e-005	9,5268e-008	2,2895e-005
25	2812,1	1,7334e-003	1,2631e-003	6,3133e-005	8,4343e-006	6,8651e-004	4,4418e-003

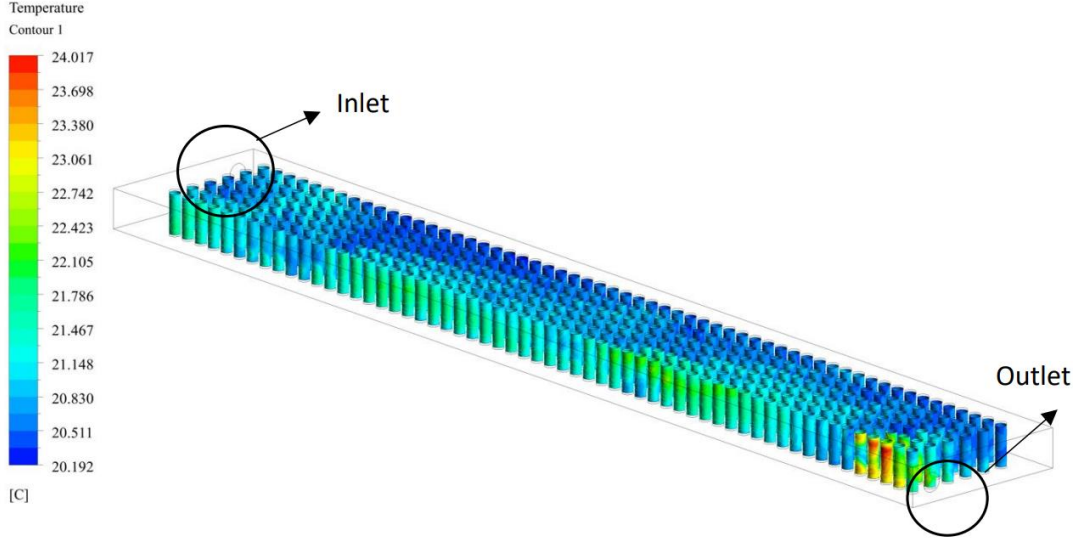
Şekil 4. 18. Kütle katılım oranı.

Daldırma soğutma sistemi için tasarlanan batarya modülünde çalışma aralığında kritik frekans değerine rastlanmamıştır ancak kütle katılım oranları incelendiğinde belirli frekanslarda batarya modülünün hangi yönlerden risk oluşturabileceği görülmektedir.

#### 4.1. Batarya Modülü Termal Performans Değerlendirmesi

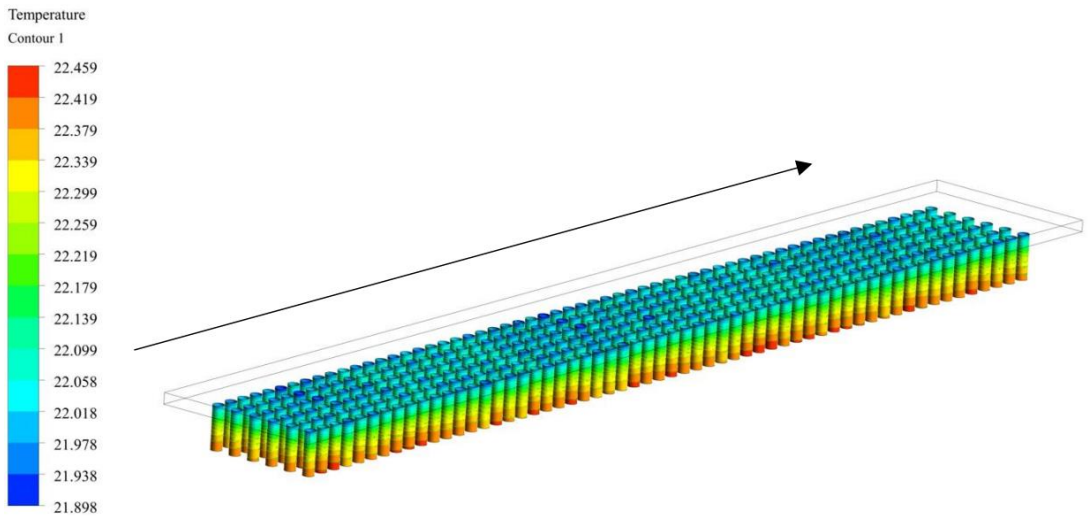
Ergül ve Tüfekçi (2023), batarya modülünün soğutma yönteminin termal performansını incelendiği çalışmanın sonuçları incelendiğinde en iyi performansın daldırma soğutma yönteminde olduğu görülmüştür. Bu çalışmada, elektrikli ticari bir araçta kullanılan batarya paketinin termal analiz gerçekleştirilerek, farklı soğutma yöntemlerinin performanslarının karşılaştırılmıştır. Ticari bir aracın batarya paketi boyutları referans alınarak, Al6061 T1 malzemesinden üretilmiş ve örnek ticari aracın modülüyle neredeyse aynı boyutlarda olan bir modül kullanılmıştır. Çalışma için Panasonic NNP Serisi NCR-18650A Li-ion pilleri seçilmiştir. Soğutma sıvısı olarak, dielektrik sıvı, su etilen glikol çözeltisi ve havanın termo-fiziksel özellikleri kullanılmıştır. Sonlu hacim yöntemi kullanılarak direkt ve dolaylı soğutma yöntemleri için termal analiz gerçekleştirilmiştir. Farklı soğutma yöntemlerinin performansı karşılaştırılmış ve farklılıkları

değerlendirilmiştir. Şekil 4.40'ta hava ile soğutma yöntemiyle soğutulan batarya paketinin performansı görülmektedir. Normal çalışma koşulu altında bile sıcaklık değerinin dalgalandığı ve termal homojenliğin bozulduğu açıkça görülmektedir.



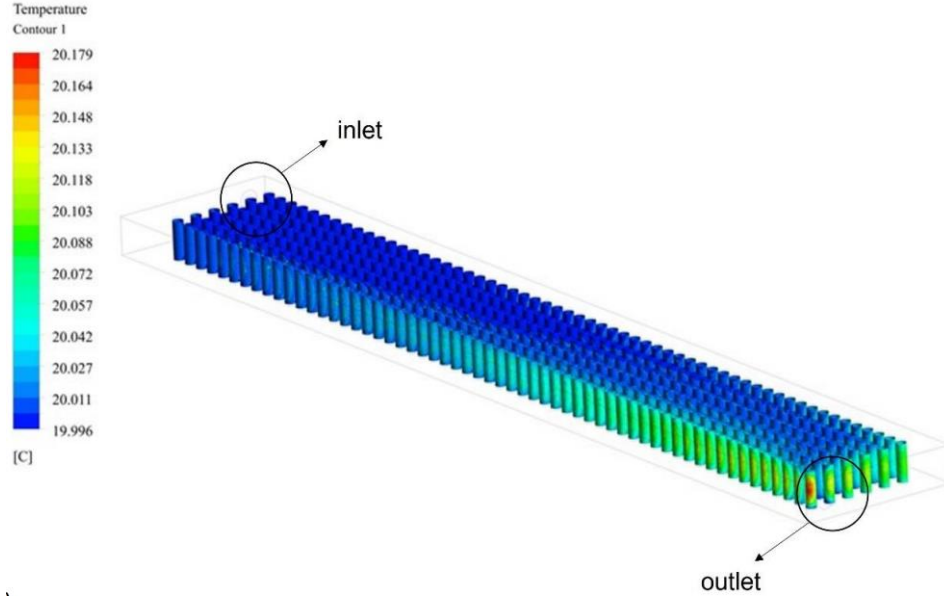
Şekil 4. 19. Hava ile soğutma yöntemi sıcaklık dağılımı.

Şekil 4.41'de sıvı soğutma plakalı yöntemle soğutulan pil hücreleri görülmektedir. Bu yöntem incelendiğinde pil hücreleri arasında homojenliğin sağlanamadığı ve sıcaklık artışının doğrudan soğutma yöntemine göre fazla olduğu görülmüştür. Aynı zamanda ilave plaka ihtiyacı doğduğu görülmektedir, bunların eklenmesiyle geometride karmaşıklık ve ağırlıkta artış olacağı tahmin edilebilmektedir.



Şekil 4. 20. Soğutucu plaka ile soğutma yöntemi sıcaklık dağılımı.

Şekil 4.42’de dielektrik sıvı sirküle edilen bir batarya modülün termal performansı görülmektedir. Görüldüğü gibi sıcaklık 20 dereceden çok fazla sapma gerçekleştirmemiş olup termal homojenliğin sağlandığı görülmektedir. Daldırma soğutma yöntemi, batarya hücrelerinin içinde oluşan ısıyı daha etkin bir şekilde uzaklaştırarak aşırı ısınma riskini azaltır. Bu da batarya paketinin daha güvenli bir şekilde çalışmasını sağlar.



Şekil 4. 21. Doğrudan sıvı ile soğutulan modülünün ısı dağılımı.



## 5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Bu tez çalışması, elektrikli araçlarda yaygınlaşması beklenen ve batarya paketlerinin soğutma yöntemleri arasında önemli bir yere sahip olan daldırma soğutma yönteminin sayısal analiz yardımıyla mekanik incelenmesini amaçlamaktadır. Elektrikli araçlar, çevresel sürdürülebilirlik ve enerji verimliliği sağlama potansiyelleri nedeniyle giderek artan bir ilgi görmektedir. Ancak, yüksek enerji yoğunluğu nedeniyle batarya paketlerinin aşırı ısınması ve termal yönetim sorunları, elektrikli araçların güvenliği ve performansı açısından kritik bir öneme sahiptir.

Model analiz çalışmalarına başlamadan önce aynı statik durumda aynı yük etkisiyle ağdan bağımsızlık testi gerçekleştirilmiştir. 2 mm mesh boyutunun yapılacak analizler için uygun olduğu sonucuna varılmıştır. Daha sonrasında mesh kalite değerleri gözetilerek örnek batarya modülü üzerinde mesh optimizasyonu yapılmıştır.

Sınır koşulları belirlenirken yer çekimi, sıvı kütlesi, pil hücrelerini kütlesi ve diğer modülün kuvvet etkisi tüm zaman adımlarında aynı oranda etkiyecek şekilde ayarlanıp 45° açıda Euro NCAP tarafından yapılan yandan çarpma testlerindeki kuvvet referans alınarak 5 zaman adımında bu kuvvetin sönümlenmesini temsilen Y ve Z eksenlerinde darbeler tanımlanmıştır. Yapılan bu darbeler neticesinde 5 mm, 8 mm, 9 mm, 10 mm kalınlıklarında batarya modülü üzerinde meydana gelecek eşdeğer gerilim dağılımı incelenmiştir. Yapılan incelemelerde 9 mm kalınlığın yeterli olduğu ancak emniyet katsayısı gözetilerek 10 mm kalınlığın daha optimum değer olacağı görülmüştür. Literatür araştırmasında bu yeni nesil daldırma sıvı soğutma yöntemi için geliştirilmekte olan modüllerin kalınlığının ortalama 5 – 12 mm arasında olduğu ve geleneksel sıvı soğutma yönteminde bu kalınlığın çok daha fazla olup ağırlık artırıcı bir etkisi olduğu bölüm 3.1’de bahsedilmiştir. Bu nedenle, geleneksel yöntemle karşılaştırıldığında herhangi bir ağırlık artışına gerek kalmadan çok daha iyi bir değer elde edilmiştir.

Batarya modülünün kalınlığı belirlendikten sonra zarf plakanın optimum kalınlığın belirlemek için sınır koşulları tanımlanıp 0,2 mm, 0,25 mm, 0,3 mm, 0,8 mm, 0,9 mm, 1 mm kalınlığa sahip model için eşdeğer gerilim dağılımları incelenmiştir. Farklı zarf plaka kalınlıklarında 0,8 mm 1 mm arasının daha uygun olacağı saptanmış ve Çizelge 4.1’de

batarya modülünün ağırlık değişimindeki etkisi gösterilmiştir. Pil hücrelerini zarf plaka ile çevreleme, daldırma soğutma yönteminde önemli bir mekanik fayda sağlamaktadır. Zarf plaka, pil hücrelerine dış etkenlere karşı bir koruma sağlar. Fiziksel çarpmalar, titreşimler veya diğer mekanik streslerden kaynaklanabilecek hasarlara karşı bir tampon görevi görür. Bu, pil hücrelerinin yapısal bütünlüğünü korur ve uzun ömürlü bir batarya performansı sağlar. Ayrıca, zarf plaka pil hücrelerini bir arada tutarak mekanik stabilite sağlar. Nihai karar kılınan batarya modülü üzerinde statik ve modal analiz çalışması gerçekleştirilmiştir. Yapının normal statik yüklü olduğu durumda üzerinde oluşacak eşdeğer gerilme miktarı ve deformasyon miktarı incelenmiş ve yüksek emniyet katsayısına sahip olduğu sonucuna varılmıştır. Modal analiz sonucuna göre ise kütle katılım oranı incelenmiş belirli frekanslardaki zayıf eksenler tespit edilmiştir.

Mekanik performans analizleri, hem batarya modülünün güvenli ve istikrarlı bir şekilde çalışmasını sağlamak hem de batarya modülünün uzun ömürlü olmasını ve mekanik streslere dayanıklı olmasını sağlamak için son derece önemlidir. Bu analizler, batarya modülünün tasarımından üretimine kadar her aşamada yapılabilir ve sonuçları, tasarımcıların ve mühendislerin batarya modülünün performansını optimize etmek için kullanabileceği önemli bilgiler sağlar. Ayrıca, bu analizler, batarya modülünün kalitesini artırmak için de bir fırsat sunar. Örneğin, analiz sonuçlarına dayanarak, batarya modülünün mekanik performansını artırmak için yeni malzemeler veya tasarım değişiklikleri yapılabilir. Dolayısıyla, mekanik performans analizleri, batarya modülleri için hayati önem taşır ve bu alandaki çalışmalar, daldırma soğutma yönteminin yaygınlaşmasına önemli katkılarda bulunmaktadır.

## KAYNAKLAR

- Amalesh, T., Narasimhan, L. N. (2020). Cooling of a lithium-ion battery using phase change material with air/dielectric fluid media: A numerical study, *Journal of Power and Energy*, 234(5), pp.722-738. doi:10.1177/0957650919859109
- Amalesh, T., Narasimhan, N. L. (2022). Liquid cooling vs hybrid cooling for fast charging lithium-ion batteries: A comparative numerical study, *Applied Thermal Engineering*, 208, 118226. doi:10.1016/j.applthermaleng.2022.118226
- Ansys mesh metrics explained. (2022). Erişim adresi: [https://featips.com/2022/11/21/ansys-mesh-metrics-explained/#:~:text=The%20Jacobian%20ratio%20is%20a,and%20above\)%%20%5B2%5D](https://featips.com/2022/11/21/ansys-mesh-metrics-explained/#:~:text=The%20Jacobian%20ratio%20is%20a,and%20above)%%20%5B2%5D)
- Canım, S. D., Kalfa S. M. (2021). Faz Değiştiren Malzemelerin Bina Kabuğunda Kullanımı, *DÜMF Mühendislik Dergisi*, 12:2: pp. 355-371. doi:10.24012/dumf.779147
- Celen, A., Kaba, Y. M. (2020). Elektrikli Araçlarda Kullanılan Silindirik Lityum İyon Bataryaların Soğutulmasının Parametrik İncelenmesi, *Fırat Üniversitesi Müh. Bil. Dergisi*, 33(1), 49-61. doi:10.35234/fumbd.728143
- Çengel, Y.A. ve Ghajar, A.J. (2020). *Heat and Mass Transfer - Fundamentals and Applications*. McGraw-Hill.
- Çetkin, E. (2020). Elektrikli Araçların Yükselişi ve Batarya Isıl Yönetim Sistemi. *Mühendis ve Makine*. 29-33. Erişim adresi: <https://mmo.org.tr/>
- Dubey, P., Pulugundla, G., Srouji, A., K. (2021). Direct comparison of immersion and Cold-Plate based cooling for automotive Li-Ion Battery Modules. *Energies*, 14(5), 1259. doi:10.3390/en14051259
- Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (2021). Erişim adresi: <https://www.aa.com.tr/tr/ekonomi/epdk-baskani-yilmaz-elektrikli-arac-sarj-istasyonu-altyapisina-iliskin-detaylari-aaya-aci2kladi/2430103>
- Ergül, F., Tüfekçi, K. (2023). Numerical analyses of thermal performances of the conventional and the immersion cooling methods for lithium-ion battery packs . *Konya Journal of Engineering Sciences* , 11 (3) , 645-659. doi: 10.36306/konjes.1242653
- Falcone, M., Volo, E. P. B., Hellany, A., Rossi, C., Pulvirenti, B. (2021). Lithium-Ion battery thermal management systems: A survey and new CFD results, *Batteries*, 7(4), 86. doi:10.3390/batteries7040086
- Frank, K., Qasemi, R. (2020). Thermal management of Lithium-Ion battery pack, *School of Engineering, Jönköping University*.
- Han, J., Garud, S. K., Hwang, S., Lee, Y. (2022). Experimental study on dielectric fluid immersion cooling for thermal management of Lithium-Ion battery, *Symmetry in Advanced Research for Efficient Electric Vehicles*, vol 14(10), 2126. doi:10.3390/sym14102126
- How are vehicles tested? – Side impact test. (2023). Erişim adresi: <https://www.euroncap.com/en/vehicle-safety/the-ratings-explained/adult-occupant-protection/lateral-impact/far-side-impact/>
- Hughes, T., J., R. (1989). The finite element method: linear static and dynamic finite element analysis. Dover Publications.
- International Energy Agency. (2022). Erişim adresi: <https://www.iea.org/data-and-statistics>

- Intro to modal analysis – lesson 1. (2023). Erişim adresi: <https://courses.ansys.com/index.php/courses/modal-analysis/lessons/intro-to-modal-analysis-lesson-1/>
- İlk elektrikli otomobil. (2022). Erişim adresi: <https://www.webtekno.com/ilk-elektrikli-otomobil-ne-zaman-ve-nasil-uretildi-h116773.html#:~:text=%C4%B0lk%20elektrikli%20otomobil%201835'te,kullan%C4%B1larak%20tasarlanan%20k%C3%BC%C3%A7%C3%BCk%20bir%20lokomotifti>
- Kaba, Y., M., Kalkan, O., Celen, A. (2021). Elektrikli Araçlarda Kullanılan Bataryalar ve Termal Yönetim Sistemlerinin İncelenmesi, *Konya Mühendislik Bilimleri Dergisi*, c.9, s.4, 1119-1136-2021. doi:10.36306/konjes.945819
- Kreisel Electric products. (2023). Erişim adresi: <https://www.kreiselectric.com/products/battery-technology/>
- Kumar, K., Chaudhari, M. (2021). Design of cell spacing in lithium-ion battery module for improvement in cooling performance of the battery thermal management system, *Journal of Power Sources*, Volume 481, 229016. doi:10.1016/j.jpowsour.2020.229016
- Kumar, R. K., Sharan, V., Harish, R. S., Kumar, M. B. S. (2020). Numerical study of thermal cooling for Lithium-ion battery pack using phase change material. doi:10.1088/1755-1315/573/1/012018
- Liquid cooling for EV charging – what we know to keep electric vehicles on the go. (2019). Erişim adresi: <https://www.cpcworldwide.com/Portals/0/Library/Resources/Literature/WhitePapers/Documents/CPC-Liquid%20Cooling%20in%20Electric%20Vehicles.pdf>
- Luo, M., Cao, J., Liu, N., Zhang, Z., Fang, X. (2022). Experimental and Simulative Investigations on a Water Immersion Cooling System for Cylindrical Battery Cells. *Electrochemical Energy Conversion and Storage*, 10, doi:10.3389/fenrg.2022.803882
- Lv, Y., Yang, X., Li, X., Zhang, G., Wang, Z., Yang, C. (2016). Experimental study on a novel battery thermal management technology based on low density polyethylene-enhanced composite phase change materials coupled with low fins, Volume 178, Pages 376-382. Doi:10.1016/j.apenergy.2016.06.058
- Lyu, P., Liu, X., Qu, J., Zhao, J., Huo, Y., Qu, Z., Rao, Z. (2020). Recent advances of thermal safety of lithium ion battery for energy storage, *Energy Storage Materials*, 31, 195-220. doi:10.1016/j.ensm.2020.06.042
- Mali, V., Saxena, R., Kumar, K., Kalam, A., Tripathi, B. (2021). Review on battery thermal management systems for energy-efficient electric vehicles, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 151, 11161. Doi:10.1016/j.rser.2021.111611
- Önçağ, A. Ç., Üzkat, H., Yeşil, Z. C. & Eliiyi, U. (2021). Elektrikli otobüsler üzerine karşılaştırmalı bir değerlendirme: İzmir şehir içi saha analizi . Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi , 27 (1) , 43-51 . Retrieved from <https://dergipark.org.tr/tr/pub/pajes/issue/60238/876663>
- Pan, Y., Xiong, Y., Wu, L., Diao, K., Guo, W. (2021). Lightweight design of an automotive battery-pack enclosure via advanced high-strength steels and size optimization, *International Journal of Automotive Technology*, 22, 1279-1290. doi:10.1007/s12239-021-0112-5
- Panasonic NCR data. (2022). Erişim adresi: <https://www.panasonic.com/tr/>

- Patil, M. S., Seo, J., Lee, M. (2021). A novel dielectric fluid immersion cooling technology for Li-ion battery thermal management, *Energy Conversion and Management*, 229, 113715. doi:10.1016/j.enconman.2020.113715
- Ramadass, P., Haran, B., White, R., Popov, N. B. (2002). Capacity fade of Sony 18650 cells cycled at elevated temperatures: Part I. Cycling performance, *Journal of Power Sources*, vol. 112, issue 2, pp. 606-613. doi: 10.1016/S0378-7753(02)00474-3
- Roe, C., Feng, X., White, G., Li, R., Wang, H., Xinyu, R., Li, X. ... Wu, B. (2022). Immersion cooling for lithium-ion batteries – A review, *Journal of Power Sources*, vol 525, 231094. doi:10.1016/j.jpowsour.2022.231094
- Sayan, A., A., Yüksel, İ. (2021). Elektrikli Renault Fluence Aracı, Lityum-İyon Bataryasının Modellemesi ve Batarya Yönetimi. *Mühendis ve Makine*, Cilt 52, Sayı: 615 Sarfa: 75-82. Erişim adresi: <https://mmo.org.tr/>
- Simscale knowledge CFD. (2023). Erişim adresi: <https://www.simscale.com/knowledge-base/mesh-sensitivity-cfd/>
- Summary table of lead-based batteries. (2022). Erişim adresi: <https://batteryuniversity.com/article/bu-214-summary-table-of-lead-based-batteries>
- Sundin, D., ve Sponholtz, S. (2020). Thermal Management of Li-ion Batteries with Single-Phase Liquid Immersion Cooling. doi:10.1109/OJVT.2020.2972541
- Türkbay, T. (2018). *Elektrikli araçlarda nano parçacık katkılı batarya soğutma sistemlerinin sayısal olarak incelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı, Fırat Üniversitesi.
- US Environmental Protection Agency. (2022). Erişim adresi: <https://www.epa.gov/>
- Xing immersio battery pack. (2022). Erişim adresi: <https://insideevs.com/news/419969/xing-immersio-battery-pack-cooling-system/>
- Yong, J. Y., Ramachandaramurthy, V. K., Tan, K. M., and Mithulanathan, N. (2015). A review on the state-of-the-art technologies of electric vehicle, its impacts and prospects, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49, 365-385. doi:10.1016/j.rser.2015.04.130
- Zhang, X., Li, Z., Luo, L., Fan, Y., Du, Z. (2022). A review on thermal management of lithium-ion batteries for electric vehicles, *Energy*, Volume 238, Part A, 121652.
- Zhao, G., Liu, L., Wang, D., Guo, J., Chen, W. (2018). Mechanical Properties of AISI 1045 Steel Subjected to Combined Loads of Tension and Torsion, *Experimental Techniques*. doi:10.1007/s40799-018-0236-3

## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Furkan ERGÜL  
Doğum Yeri ve Tarihi : Karabük / 29.08.1996  
Yabancı Dil : İngilizce (Profesyonel), Almanca (Başlangıç)

Eğitim Durumu  
Lise : Karabük Demirçelik Anadolu Lisesi  
Lisans : Bursa Uludağ Üniversitesi Makine Mühendisliği  
Yüksek Lisans : Bursa Uludağ Üniversitesi Makine Mühendisliği

Çalıştığı Kurum/Kurumlar :

PRACEN TEKNOLOJİ (Ağustos 2020 – Aralık 2021): AR-GE Proje Mühendisi  
PRACEN TEKNOLOJİ (Aralık 2021 – Devam): AR-GE Proje Lideri

İletişim (e-posta) : furkanergul78@gmail.com

Yayımları :

Ergül, F., Tüfekçi, K. (2023). Numerical analyses of thermal performances of the conventional and the immersion cooling methods for lithium-ion battery packs . *Konya Journal of Engineering Sciences* , 11 (3) , 645-659. doi: 10.36306/konjes.1242653.