



Investigation of cooling an electric vehicle battery module using water by considering effect of contact resistance

Kağan Peneklioğlu¹, Kemal Bilen^{2*}

¹Department of Mechanical Engineering, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Ankara Yıldırım Beyazıt University, 06010, Keçiören, Ankara, Türkiye

²Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Ankara Yıldırım Beyazıt University, 06010, Keçiören, Ankara, Türkiye

Highlights:

- The effect of contact resistance for different amounts of battery heat generation in an electric vehicle was investigated by CFD analysis
- Contact resistance can be neglected at low C-rate values whereas it should not be neglected at high C-rate values
- A more homogeneous temperature distribution was achieved in the module by increasing the cooling liquid flow rate

Keywords:

- Electric vehicle
- Battery thermal management
- Lithium-ion battery
- Liquid cooling
- Computational fluid dynamics

Article Info:

Research Article

Received: 30.05.2023

Accepted: 10.12.2023

DOI:

10.17341/gazimmfd.1307382

Correspondence:

Author: Kemal Bilen

e-mail:

kemal.bilen@aybu.edu.tr

phone: +90 532 608 9092

Graphical/Tabular Abstract

In this numerical study, flow and thermal performance of an electric vehicle (EV) battery module cooled with water were investigated by computational fluid dynamics (CFD) method. For this purpose, a base model was formed and validated with battery heat generation data available in literature and obtained experimentally. In the CFD analyses, the effects of the contact resistance between the batteries and aluminum blocks and between the aluminum blocks and water channels and the mass flow rate of the cooling water were investigated for different conditions. As a result, numerical studies conducted at low discharge rate (C-rate) values showed that the contact resistance can be neglected, whereas it should not be neglected at high C-rate values. Temperature distributions obtained by performing analyses of 1B and 2A for Scenario 4 were shown in Figure A.

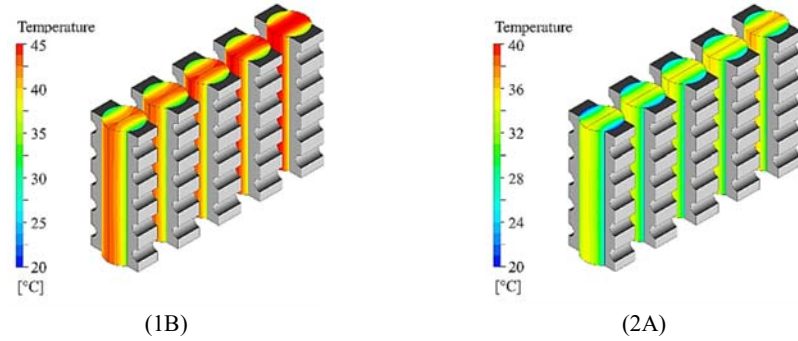


Figure A. Temperature distributions obtained by performing analyses of 1B and 2A for Scenario 4

Purpose: In this study, the effect of the contact resistance between the cooling system and the batteries for different amounts of battery heat generation resulting from various driving scenarios of the EV was investigated by CFD analysis.

Theory and Methods: In the study, thermal performance of a liquid-cooled EV battery module has been numerically investigated for different amounts of heat generated in the batteries, taking into account the contact resistance and cooling liquid flow rate.

Results: Numerical studies conducted at low discharge rate values showed that the contact resistance can be neglected, whereas the contact resistance should not be neglected at high discharge rate values. Under the same conditions, at low discharge rates, the effect of contact resistance causes a difference of approximately 0.5°C, while at high discharge rates this difference reaches 2.5°C. In addition, increasing the cooling liquid flow, the highest temperature in the battery module could be reduced by approximately 8°C. In cases where low amounts of heat are generated, the existing cooling water flow rate is more than necessary and causes unnecessarily high pump energy consumption. It is possible to reduce the pump energy consumption to approximately 1/8 by selecting an appropriate cooling water flow rate. Additionally, it was also seen that the temperature difference between the batteries decreased and a more homogeneous temperature distribution in the module was obtained by increasing cooling water flow rate.

Conclusion: In conclusion, it has been understood that it is possible to establish an efficient system with a properly designed liquid-cooled electric vehicle battery system, where the batteries can operate in the desired temperature range and the temperature difference between the batteries is low enough. In addition, numerical studies conducted at low discharge rate values show that the contact resistance can be neglected, whereas it should not be neglected at high discharge rate values.



Elektrikli araç batarya modülünün su ile soğutulmasının temassızlık direnci dikkate alınarak incelenmesi

Kağan Peneklioğlu¹ , Kemal Bilen^{2*} 

¹Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, 06010, Keçiören, Ankara, Türkiye

²Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 06010, Keçiören, Ankara, Türkiye

ÖNEÇIKANLAR

- Elektrikli bir araçta, farklı miktarlardaki pil ısı üretimi için temassızlık direncinin etkisi CFD analizi ile araştırıldı
- Düşük deşarj oranı değerlerinde temassızlık direnci ihmal edilebilirken, yüksek deşarj oranı değerlerinde ihmal edilmemelidir
- Soğutma sıvısının debisi artırılarak modül içerisinde daha homojen bir sıcaklık dağılımı sağlandı

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 30.05.2023

Kabul: 10.12.2023

DOI:

10.17341/gazimmfd.1307382

Anahtar Kelimeler:

Elektrikli araç,
batarya ısı yönetimi,
lityum-iyon pil,
sıvı ile soğutma,
hesaplamalı akışkanlar
dinamiği

ÖZ

Bu çalışmada; sıvı ile soğutulan bir elektrikli araç batarya modülünün, hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) yöntemiyle akış ve ısı analizi yapılmıştır. Literatürde yer alan ve deneysel olarak elde edilen pil ısı üretimi verileriyle doğrulaması yapılan temel bir modelin kullanıldığı HAD analizlerinde; batarya modülünde yer alan piller ile alüminyum bloklar arasındaki ve alüminyum bloklar ile su kanalları arasındaki temassızlık direncinin ve soğutma suyu debisinin etkisi, farklı çalışma koşulları için incelenmiştir. Elde edilen bulgular; düşük deşarj oranı (C-rate) değerlerinde yaklaşık olarak 0,5°C'lık küçük bir sıcaklık farkına neden olan temassızlık direncinin, düşük C-rate değerlerinde ihmal edebileceğini göstermiştir. Buna karşın, yüksek C-rate değerlerinde 2,5°C'a kadar bir sıcaklık farkı ile sonuçlanan temassızlık direnci etkisinin, yüksek C-rate değerlerinde önemli hale geldiği görülmüştür. Ayrıca, pillerde yüksek ısı üretilen durumlarda soğutma suyu debisinin artırılmasıyla modüldeki en yüksek sıcaklık, yaklaşık olarak 8°C düşürülebilmektedir. Buna karşın, pillerde düşük ısı üretilen durumlarda ise mevcut soğutma suyu debisinin gereğinden fazla olduğu ve gereksiz yere yüksek pompa enerjisi tüketimine sebep olduğu anlaşılmış ve uygun bir soğutma suyu debisinin seçimiyle pompa enerjisi tüketimini, yaklaşık 1/8 oranına düşürmenin mümkün olduğu görülmüştür. Ayrıca, soğutma suyu debisinin artırılmasıyla piller arasındaki sıcaklık farkının azaldığı ve modülde daha homojen bir sıcaklık dağılımı elde edildiği görülmüştür.

Investigation of cooling an electric vehicle battery module using water by considering effect of contact resistance

HIGHLIGHTS

- The effect of contact resistance for different amounts of battery heat generation in an electric vehicle was investigated by CFD analysis
- Contact resistance can be neglected at low C-rate values whereas it should not be neglected at high C-rate values
- A more homogeneous temperature distribution was achieved in the module by increasing the cooling liquid flow rate

Article Info

Research Article

Received: 30.05.2023

Accepted: 10.12.2023

DOI:

10.17341/gazimmfd.1307382

Keywords:

Electric vehicle,
battery thermal management,
lithium-ion battery,
liquid cooling,
computational fluid
dynamics

ABSTRACT

In this study, flow and thermal analyses of a liquid-cooled electric vehicle battery module were assessed via computational fluid dynamics (CFD) method. In CFD analyses, based on a validated model using battery heat generation data available in literature and obtained experimentally, the effect of contact resistance between the batteries and aluminum blocks and between aluminum blocks and water channels placed in battery module and cooling water flow rate were investigated for different working conditions. Findings revealed that at low discharge rate (C-rate) values, contact resistance could be disregarded, causing only a minor temperature difference of around 0.5°C. However, at high C-rate values, contact resistance became significant, resulting in a temperature difference of up to 2.5°C. Also, increasing the cooling liquid flow rate effectively lowered maximum temperature of battery module by approximately 8°C in high-heat scenarios. Conversely, in low-heat scenarios, excess cooling liquid flow rate led to unnecessary pump energy consumption, which could be reduced by approximately 1/8 while achieving a more homogeneous temperature distribution by choosing an appropriate cooling liquid flow rate. Also, the temperature difference between the batteries decreased and a more homogeneous temperature distribution was achieved in the module by increasing cooling flow rate.

*Sorumlu Yazar/Yazarlar / Corresponding Author/Authors : kaganpe@gmail.com, *kemal.bilen@aybu.edu.tr / Tel: +90 532 608 9092

1.Giriş (Introduction)

İçten yanmalı motorlu araçların ürettikleri sera gazları ve neden oldukları karbon emisyonunun çevre üzerindeki olumsuz etkileri sebebiyle elektrikli araçlara olan talep günümüzde hızla artmaktadır. Lityum-iyon (Li-iyon) piller, elektrikli araçlarda çoğunlukla tercih edilen gelişmiş bir enerji kaynağıdır. Son yıllarda, lityum-iyon piller, elektrikli araç (EV) üreticileri tarafından büyük oranda kabul görmüştür. Çünkü bu piller yüksek güç kapasitesine, uzun kullanım ömrüne ve düşük kendi kendine deşarj oranına sahiptir. Diğer taraftan, Li-iyon pillerin en büyük mahsurlarından biri sıcaklığa duyarlı olmalarıdır. Bu nedenle, şarj veya deşarj esnasında pildeki ısı üretiminin yol açtığı yüksek sıcaklıklar pilin ömrünü, pilin verimini ve çevre güvenliğini tehdit etmektedir. Ayrıca, modül veya paketdeki homojen olmayan sıcaklık dağılımı, olağandışı elektrokimyasal davranışlara ve elektriksel olarak düzensiz hücrelere neden olabilir. Bu yüzden otoriteler tarafından lityum-iyon pillerinin en uygun çalışma sıcaklığı 20°C ila 40°C arasında kabul edilmektedir. Ayrıca piller veya modüller arasındaki sıcaklık farkının en fazla 5°C olması, pil çalışma verimi açısından önem arz etmektedir [1]. Bu koşullar göz önüne alındığında, bu şartları sağlayabilecek verimli bir 'batarya ısı yönetimi' gerçekleştirmek önemlidir. Araştırmacılar tarafından elektrikli araçlardaki batarya ısı yönetimi temel olarak; hava ile soğutma, sıvı ile soğutma ve faz değişim malzemeleriyle soğutma olmak üzere üç şekilde ele alınmaktadır. Her bir yöntemin üstünlükleri ve sakıncaları mevcuttur. Uygun soğutma yönteminin seçilmesi; hacimsel konumlandırma limitleri, üretme/yükleme maliyetleri ve çalışma verimlilikleri gibi birçok faktöre bağlıdır. Buna göre, hava soğutmalı sistemlerin diğer sistemlere göre üstünlüklerini; düşük kurulum maliyetine sahip olmaları, sade ve basit tasarım kolaylığı sağlamaları ve elektriksel açıdan güvenli olmaları şeklinde sayabiliriz. Ancak, Chen vd. [2] tarafından yapılan deneysel ve teorik bir çalışmada, olağandışı hava koşullarında veya yüksek güç tüketimi gerektiren durumlarda hava ile yapılan soğutmanın, bataryanın soğutulmasına yetersiz kaldığı belirtilmiştir. Sıvı soğutma temelli batarya ısı yönetiminin sahip olduğu ısı transfer kapasitesi hava soğutma temelli bir sisteme göre daha yüksektir. Bu sebeple, yüksek pil gücü tüketimi gerektiren durumlar için sıvı soğutma temelli bir sistem tasarlamak daha elverişlidir. Sıvı soğutma temelli batarya sistemlerini, akışkanın doğrudan pil hücrelerine temas ettiği sistemler ve akışkanın dolaylı yoldan pil hücrelerini soğuttuğu sistemler olarak ikiye ayırabiliriz. Doğrudan temaslı sistemlerde pil hücreleri akışkanın içine daldırılır ve bu tarz sistemlerde akış hareketi yoktur. Bu sistemlerin en büyük üstünlüğü kompakt olmalarıdır. Fakat pillerin içine daldırıldığı sıvıların tutuşmaz olmaları, yüksek elektrik dirençlerinin olması ve çevre dostu olmaları gibi özelliklerinin bulunmaları şarttır [3]. Bu kısıtlamalardan dolayı, doğrudan temaslı bir sistem tasarlamak günümüzde pratik değildir. Akışkanın, pil hücrelerine temas etmeden yani pil hücrelerinin dolaylı yoldan soğutulduğu sistemlerin kullanılması günümüzde en çok tercih edilen yöntemdir. Bu sistemlerde tercih edilen akışkanların (çoğunlukla su/etilen glikol hacimsel oranının 50/50 olduğu karışımın) viskozite değerleri doğrudan temaslı sistemlerde tercih edilen akışkanların viskozite değerlerinden daha düşüktür. Bunun anlamı, aynı pompa gücünde daha çok akışkan debisi demektir. Dolaylı yoldan pil hücrelerinin soğutulduğu sistemlerde akışkan, soğutma plakasının veya tüplerin içinden geçerler. Bu sistemlerde soğutma plakası veya tüpler, piller ile temas halindedir. Sonuç olarak bu sistemler, iletim ve taşınım ısı geçiş mekanizmalarının birlikte etkili olduğu sistemlerdir. Soğutma plakalarının düzlemsel olmaları nedeniyle prizmatik pil hücreleri ile kullanılmaları daha elverişli ve kolaydır. Akışkanın geçtiği tüplerin kullanımı ise daha çok silindirik pil hücreleri için tercih edilmektedir. Bu durumda, pil ile temas edecek ve ısıl iletkenliği yüksek olan bir malzemenin pil ile temas eden yüzeyinin

silindirik geometriyle uyumlu yapılması suretiyle piller arasında homojen bir sıcaklık dağılımı elde edilmesi mümkündür. Araştırmacılar, elektrokimyasal reaksiyonlar neticesinde pillerde üretilen ısının matematiksel olarak modellenmesi ile ilgili birçok çalışma yapmışlardır. Bu çalışmalarda ortaya çıkan sonuçlara göre pillerde üretilen ısı miktarının; pil çeşidi, pilin şarj veya deşarj akımı, pil doluluk oranı (SOC), pil doldurma-boşaltma döngü sayısı, pil çalışma sıcaklığı ve pil iç direnci parametrelerine bağlı olduğu anlaşılmıştır. Bu parametrelerin herhangi birinde değişiklik olduğunda pil kimyası ona bağlı olarak değişecektir ve böylece pil tarafından üretilen ısı miktarı da değişecektir. Pilde üretilen ısı, ohmik kayıplar ve elektrokimyasal tepkimeler nedeniyle oluşan entropi değişiminin bir sonucudur. Araştırmacılar, 2000'li yılların başından itibaren bu konuyu çalışmaya başlamışlardır. Ayrıca, pilde üretilen ısıyı matematiksel olarak modellemek için farklı yöntemler geliştirilmiştir. Zaman içerisinde lityum-iyon pillerin diğer pillere oranla daha çok kabul görmesiyle beraber, çalışmalar lityum-iyon piller üzerine yoğunlaştırılmış ve pilin üzerinden geçen akım neticesinde ortaya çıkan ısı miktarlarının tayini için deneysel çalışmalar artırılmıştır. Sato [4] tarafından deneysel olarak yapılan çalışmada pilde üretilen ısının tespiti araştırılmıştır. Çalışma neticesinde üretilen ısı, farklı koşullar için matematiksel olarak ifade edilmiştir ve bu çalışma sonucunda pilin iç sıcaklığı, pilin direnci ve pilin doluluk oranının üretilen ısı miktarı üzerindeki etkisi hesaba katılmamıştır. Onda vd. [5] yapmış oldukları deneysel çalışmada lityum-iyon bir pilde meydana gelen ısı üretiminin, pil iç direnci ve entropi değişim parametrelerinden meydana geldiğini açıklamışlardır. Dört farklı pil iç direnç ölçüm yöntemi ve iki farklı entropi değişimi ölçüm yöntemi test etmişlerdir. Deneyle, pil sıcaklıklarını da ölçmüşlerdir. Enerji denge metodu ile ayrıca pil sıcaklıklarını hesaplayıp deneyler ile kıyaslamışlardır. Takano vd. [6] yapmış oldukları çalışmada, altı farklı lityum-iyon pilin, şarj ve deşarj esnasındaki entropi değişimini ölçmüşlerdir. Bunlardan dört tanesi 18650 tipi pil olup LiCoO₂ katot materyaline ve farklı anot materyallerine, diğerleri ise 14650 tipi deneme üretimi piller olup söz konusu çalışmanın yapıldığı zamanda (2002) piyasada bulunmayan pillerdir. Entropi ölçüm yöntemi olarak farklı sıcaklıklardaki açık devre voltajı değerleri ölçülmüş ve hesaplanmıştır. LiCoO₂ katot materyalli pillerin entropi değişimi incelendiğinde, SOC değerinin %70 ila %90 aralığında faz geçişi sebebiyle farklı bir davranış sergiledikleri açıkça belirtilmiştir. Bu durumun pil kimyasının kendine has özel moleküler yapısıyla ilgili olduğu vurgulanmıştır. İncelemeler hem şarj hem de deşarj için ve toplam şarj ve deşarj sürelerinin 24 saat sürmesi hedeflenerek, 0.04 deşarj oranlarında yapılmıştır. Onda vd. [7] yapmış oldukları bu çalışmayı 2003 yılında yapmış oldukları çalışma ile kıyaslayarak sunmuşlardır. Daha önce çalıştıkları test ekipmanından bazıları yenilemişler ve daha hassas sonuçlar almışlar. İç direnç testi için $V-I$ karakteristiği yöntemini, açık devre voltajı ve pil voltajı arasındaki farkın ölçümü yöntemini ve aralıklı şarj/deşarj etme yöntemi kullanıp, bu yöntem arasında iyi bir uyum olduğunu raporlamışlardır. Fakat AC empedans testi ile aldıkları sonucun diğerlerinden saptığını belirtmişlerdir. Ayrıca pil radyal sıcaklık dağılımını ve ortalama pil yüzeyi sıcaklığı ile pilin tam ortasındaki sıcaklığın farkına bakmışlardır. Pilin radyal yöndeki sıcaklığının değişmediğini ve pilin tam ortasındaki sıcaklık ile ortalama pil sıcaklığı arasındaki farkın ihmal edilebilir olduğunu vurgulamışlardır. Inui vd. [8] tarafından yapılan sayısal bir çalışmada, bu etkiler de hesaba katılarak tüm araştırmacılar tarafından kabul görmüş ve günümüzde yaygın olarak kullanılan pil ısı üretimine ilişkin matematiksel model oluşturulmuştur. Bu matematiksel model, 18650 kodlu bir lityum-iyon pile aittir. Matematiksel modelin sadeleştirilebilmesi için pilin iç direnci ve entropi değişimleri farklı sıcaklık aralıklarında ve farklı pil doluluk oranlarında deneysel olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak, pil iç direncinin hem sıcaklığın hem de

pil doluluk oranının bir fonksiyonu olduğu, buna karşın entropi değişiminin yalnızca pil doluluk oranının bir fonksiyonu olduğu ortaya çıkmıştır. Dinamik şartlara uyum sağlaması gereken gerçek bir pil paketinin termodinamik açıdan kararlı olması, üreticilerin ana hedeflerindedir. Williford vd. [9] yapmış oldukları çalışmada farklı anot katot materyallerine sahip lityum iyon pillerin entropi değişimini incelemişlerdir. Kobalt dioksit ve nikel-kobalt-manganez oksit materyalleri arasındaki farkı deneysel olarak inceleyerek, nikel-kobalt-manganez oksit bileşeninin termodinamik açıdan daha kararlı olduğunu bulmuşlardır. Jeon vd. [10], yapmış oldukları çalışmada farklı katot materyallerinin ısı üretimi üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. LiNiCoMnO₂ katot materyalinin güvenlik kriterlerini daha iyi sağladığı ve bu sebeple daha çok tercih edildiği belirtilmiştir. Ayrıca düşük deşarj oranlarında entropi değişiminden kaynaklı ısı üretimi baskın iken yüksek deşarj oranlarında ise ısı üretimini joule ısınması domine etmektedir. Yapılan deneylerin sonucunda ortaya ısıl bir pil modeli de çıkarılmış ve nümerik analizlerde kullanılmıştır. Nümerik analizlerden elde edilen pil sıcaklıkları ile deneysel çalışmalardan elde edilen pil sıcaklıklarının birbirleriyle uyumlu oldukları raporlanmıştır. Fathabadi [11], yapmış olduğu sayısal bir çalışmada, pilin iç direncini ve entropi değişimini uygun fonksiyonlarla ifade ederek denklemler elde etmiştir. Bu sayede lityum-iyon pillerdeki ısı üretimini hesaplamak için kullanılan denklemler ve fonksiyonlar basitleştirilmiştir. Panchal vd. [12] yapmış oldukları çalışmada prizmatik lityum-iyon bir batarya için mini soğuk plaka tasarlamış ve bu soğuk plakanın deneysel ve nümerik olarak performansını karşılaştırmışlar. Çalışmalar; 5°C, 15°C ve 25°C sıcaklıklarında, 1C ve 2C deşarj akımları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Nümerik çalışmalarda k-epsilon türbülans modelinin deneysel verileriyle daha çok örtüştüğü ortaya çıkmıştır. Deneysel çalışmalarında anot ve katot kutuplarına yakın yerleştirilen termoelemanların ölçtüğü sıcaklık değerlerinin diğerlerine oranla daha yüksek olduğunu vurgulamışlardır. Ayrıca beklenildiği üzere, deşarj oranının artmasıyla pil sıcaklıklarının arttığı görmüşlerdir. Kumar vd. [13], literatürün özetlendiği çalışmalarında ise lityum-iyon bir pilin elektriksel, kimyasal ve ısıl karakteri anlaşılmasına çalışılmış ve pillerin bu özelliklerinin batarya ısıl yönetiminde ne derece önemli oldukları vurgulanmıştır. Özdemir vd. [14] yaptıkları çalışmada; silindirik lityum-iyon bir pili, farklı çalışma sıcaklıkları ve deşarj akımları için incelemişlerdir. Çalışmada; iki boyutlu ve eksenel simetrik bir model geliştirilmiş olup, bu model sayesinde pilin terminal gerilimi ve dolayısıyla pil iç direnci kaynaklı ısı üretimi hesaplanmıştır. Deneyler neticesinde; deşarj esnasında, pil çalışma sıcaklığının azaltılmasıyla pil iç direncinin arttığı vurgulanmıştır. Ayrıca, pil çalışma sıcaklığının düşürülmesiyle, pil kapasitesinin önemli ölçüde azaldığı belirtilmiştir. Liu vd. [15] yapmış oldukları çalışmada, Ni-Co-Mn pozitif malzemeli bir 18650 lityum-iyon pilde meydana gelen ısı üretimini deneysel olarak çalışmışlardır. Çalışmada; 176 adet pil direnç testi, 66 adet entropi katsayısı testi gerçekleştirmişlerdir. Isı üretimine etki eden faktörleri; deşarj derinliği (DOD), deşarj akımı ve ortam sıcaklığı olarak raporlamışlardır. Çalışmada pil iç direncinin ortaya çıkarılabilmesi için pil direnç testleri yapılmıştır. Bu testler, -5°C ve 25°C sıcaklıklarında, 0.5C, 1C, 2C ve 3C deşarj akımları için gerçekleştirilmiştir. Pil iç direncinin DOD seviyesinden, dış ortam sıcaklığından ve deşarj akımından etkilendiği belirtilmiştir. Entropi katsayısı testleri ise -5°C ila 45°C arasında 10°C sıcaklık artışlarında ve aynı deşarj akımlarında yapılmıştır. Çalışma neticesinde entropi katsayısı parametresinin deşarj akımından etkilenmediği, sıcaklık aralıklarından ise düşük DOD seviyelerinde neredeyse hiç, yüksek DOD seviyelerinde ise az etkilendiği vurgulanmıştır. Dolayısıyla çalışmada entropi katsayısı değerinin büyük ölçüde DOD seviyesinden etkilendiği söylenmiştir. Ayrıca çalışma neticesinde 18650 bir lityum-iyon bir pilde meydana gelen ısı üretiminin tahmin edilebilmesi için bu parametrelerden oluşan bir korelasyon

geliştirmişlerdir. Trinuruk vd. [16] yapmış oldukları çalışmada iki farklı pil kimyası (nikel-kobalt-manganez oksit ve lityum demir fosfat) ve üç farklı pil geometrisi (silindirik, hücresel ve prizmatik) kullanarak her bir durum için pillerde meydana gelen ısı üretimlerini incelemişlerdir. İncelemeler her bir pil için 1C deşarj akımlarında ve sırasıyla 20°C, 30°C ve 40°C sıcaklıklarında yapılmıştır. Her bir durumdaki pil sıcaklıkları deney çalışmaları neticesinde bulunmuştur. Daha sonra aynı koşullarda nümerik bir çalışma da yapılmış ve pil sıcaklıkları karşılaştırılmıştır. Silindirik pil formunun diğerlerine oranla daha yüksek iç direnci olduğu ve buna bağlı olarak daha çok ısı ürettiği tespit edilmiştir. Bunların haricinde pil kimyasının ısı üretimi üzerinde çok fazla etkili olmadığı deney çalışmaları sonucunda elde edilmiştir. Ayrıca pil kimyasının ve pil şeklinin entropi değişimi üzerindeki etkisinin neredeyse hiç olmadığı, entropi değişiminin yalnızca SOC seviyesinden etkilendiği ayrıca vurgulanmıştır. Çalışmada ayrıca entropi değişiminin ısı üretimine olan katkısının, düşük deşarj oranlarında daha fazla olduğuna yer verilmiştir. Ma vd. [17], yapmış oldukları çalışmada, 26550 pil kullanılan bir pil paketi için termal bir model geliştirmişlerdir. Geliştirmiş oldukları termal modeli daha sonra AMESIM yazılımında da kullanarak pilde meydana gelen sıcaklığı bulmuşlardır. Chen vd. [2] tarafından yapılan deneysel ve teorik bir çalışmada; üç boyutlu elektrokimyasal-ısıl modelleme yapılmış olup hava ve sıvı temelli soğutma sistemleri karşılaştırılmıştır. Sıvı soğutmalı sistemler, doğrudan ve dolaylı soğutma olmak üzere iki farklı biçimde incelenmiştir. Bu incelemelere ilaveten, kanatçık kullanımının soğutmaya etkisi de analiz edilmiştir. Kanatçık kullanılarak soğutma yapılan sistemler, batarya kabınınin en ağır olduğu sistem olarak raporlanmış ve bu durumun pratik uygulamalar için kötü bir seçenek olduğu yorumlanmıştır. Bunun haricinde, dolaylı yoldan sıvı soğutma temelli sistemlerdeki akışkan debisinin kritik öneme sahip olduğu ve en düşük ve en yüksek sıcaklık değerlerinin kontrol altında tutulabilmesi için en etkili parametre olduğu belirtilmiştir. Saw vd. [18] yapmış oldukları sayısal bir çalışmada, farklı hava debilerindeki batarya soğutma performansını incelemişlerdir. Reynolds ve Nusselt sayılarını kullanarak çeşitli korelasyon geliştirmişlerdir. Wang vd. [19] ise teorik çalışmalarında, hava ve sıvı soğutma sistemlerini bir arada kullanarak bileşik (kombine) soğutma sisteminin performansını incelemişler ve bileşik soğutmanın, sıcaklık dağılımının homojenliği üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu raporlamışlardır. Soğuk plaka tasarımında optimizasyon ve akış doğrultusunda karar verilmesi batarya ısıl yönetiminde çalışmalarda önemli bir konudur. Huo vd. [20] tarafından yapılmış sayısal bir çalışma bu doğrultudadır. Soğuk plaka içindeki kanal sayısı, akış doğrultusu, dış hava sıcaklığı ve akışkan debisi gibi parametreler kullanılarak çalışma gerçekleştirilmiştir. Çalışma neticesinde, soğuk plaka içindeki kanal sayısı arttıkça pil hücrelerindeki en yüksek sıcaklık değerleri düşüş göstermiştir. Ayrıca, akış doğrultusunun diğer parametrelere göre daha az etkili olduğu görülmüştür. Çalışmada ayrıca, dış ortam sıcaklığının 25°C'dan yüksek olduğu durumlarda batarya ısıl yönetiminin kritik olduğu vurgulanmıştır. Jarrett ve Kim [21] tarafından yapılan sayısal bir çalışmada, 'Latin Hiperküp Örnekleme' yöntemiyle optimizasyon yapılmıştır. Kanal geometrisi, rotası, kalınlık ve uzunluk değerleri optimizasyon parametreleri olarak kullanılmıştır. Basınç düşümü, ortalama pil hücresi sıcaklığı ve sıcaklık dağılımının homojenliği amaç fonksiyonu olarak kullanılmıştır. Kanal geometrisinin çok ciddi bir biçimde değişmesine karşın, sıcaklık dağılımının homojenliğini ve ortalama pil hücre sıcaklığını istenilen aralıklarda tutabilecek birçok optimum nokta bulunmuştur. Hizalanmış veya çapraz olarak konumlandırılmış pil hücrelerinin ısıl performansları Yang vd. [22] tarafından sayısal olarak incelenmiştir. Hizalanmış piller arasındaki mesafe arttıkça ortalama pil sıcaklığının düştüğü, buna karşın çapraz pillerdeki durumun tam tersi olduğu raporlanmıştır. Kök ve Alkaya [23] tarafından yapılan sayısal bir çalışmada; hibrit elektrikli araçlarda (HEV) ve elektrikli araçlarda

kullanılan zarf tipi lityum-iyon pillerin değişen değarj oranlarındaki ısı davranışı ve performansı incelenmiştir. Çift potansiyel çok ölçekli-çok alanlı (MSMD) batarya modelinin kullanıldığı simülasyonlarda, batarya hücrelerinin değarj davranışı ve ısı performansı incelenmiştir. Çalışma sonucunda; artan batarya yükünün, sıcaklığın yükselmesine ve düzensiz sıcaklık dağılımına yol açmasıyla, kullanılan modelin batarya ısı yönetim sistemleri için doğruluğu teyit edilmiştir. Çalışmada; batarya hücresine değarj esnasında uygulanan ve hava, sıvı ve faz değiştiren malzeme (PCM) içeren üç farklı soğutma yöntemi karşılaştırılmıştır. Buna göre; sıvı soğutma sisteminin diğerlerinden daha iyi bir performans gösterdiği ve bunu sırasıyla PCM ve hava ile soğutmanın takip ettiği tespit edilmiştir. Silindirik pil hücrelerinin ve sıvı temelli bir soğutmanın kullanıldığı batarya sisteminin performansı, Rao vd. [1] tarafından yapılan yine sayısal bir çalışmada incelenmiştir. Söz konusu çalışmada; pil hücrelerine temas eden malzemenin temas alanının değişiminin etkisi ele alınmış ve uygun temas alanının bulunmasının, pildeki sıcaklık dağılımının homojenliğini artırdığı belirtilmiştir. Bu malzemenin pil ile temas eden yüzeyinin pilin geometrisi ile uyumlu yapılması, toplam sistem ağırlığını artırdığından bu konunun iyi irdelenmesi gerektiği ifade edilmiştir.

Literatür özetinden de anlaşılacağı üzere bu sayısal çalışmanın özgün yönü, soğutulmak istenen silindirik piller ile alüminyum bloklar arasında ve bu alüminyum bloklar ile silindirik su kanalları arasında ortaya çıkan temassızlık direncinin ısı hesaplamalara dâhil edilmiş olmasıdır. Literatürde yer alan çalışmalarda bu temassızlık direnci genel olarak ihmal edilmektedir. Oysa bu çalışmada; temassızlık direncinin göz önüne alındığı ve alınmadığı aynı koşullarda elde edilen sonuçlar karşılaştırılmış ve hangi durumlarda temassızlık direncinin etkili olduğu tespit edilmiştir. Bu sayısal çalışma kapsamında; ilk olarak, bir adet 18650 lityum-iyon pilde ortaya çıkan ısı miktarını inceleyen deneysel bir çalışmadaki veriler kullanılarak, pil ısı üretimleri hesaplanmış ve bahsedilen deneysel çalışmadaki sonuçlar ile kıyaslanarak doğrulanmıştır. Çalışmada daha sonra, sıvı soğutma yöntemiyle soğutulması amaçlanan elektrikli bir araç bataryasının, hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) ile akış ve ısı analizi yapılmıştır. Analizlerde, elektrikli aracın farklı sürüş senaryolarından kaynaklanan farklı miktarlardaki pil ısı üretimi için soğutma sistemi ile piller arasındaki temassızlık direncinin soğutma sistemine etkisi incelenmiştir. HAD analizleri neticesinde, batarya ısı yönetimi kapsamında sürüş senaryolarına bağlı olarak soğutma suyu debisi değiştirilerek sistemin daha etkin çalışması sağlanmıştır.

2. Materyal ve Metot (Material and Method)

Bu çalışmada ilk olarak; pilin üzerinden akım geçmesi neticesinde ortaya çıkan ısı miktarı, literatüre uygun bir biçimde hesaplanmıştır. Hesaplanan bu ısı üretim miktarları kullanılarak literatürle doğrulama çalışması yapılmıştır. Ayrıca bu çalışmada, Ni-Co-Mn katottan ve karbon anottan oluşan silindirik bir 18650 lityum-iyon pil seçilmiş ve bu pilin temel özellikleri Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Seçilen pilin temel özellikleri
(Basic properties of the battery selected) [15].

Parametre (birim)	Değer
Nominal kapasite (mAh)	2500
Nominal gerilim (V)	3,60
Şarj kesme gerilimi (V)	4,2
Değarj kesme gerilimi (V)	2,5
En yüksek şarj akımı (A)	4
Standart şarj akımı (A)	1,25
En yüksek değarj akımı (A)	30
Standart değarj akımı (A)	1,25
Standart şarj kesme akımı (A)	0,2

2.1. Pil Isı Üretiminin Hesaplanması (Calculation of Battery Heat Generation)

Pillerdeki ısı üretiminin tespiti, Inui vd. [8], Fathabadi [11] ve Liu vd. [15] tarafından yapılan çalışmalardaki bilgiler ve bu çalışmalarda kullanılan metotlar dikkate alınarak yapılmıştır. Buna göre pillerdeki ısı üretim miktarı, Eş. 1 ile belirlenir.

$$q = I \left[(U - V) - T \frac{dU}{dT} \right] \quad (1)$$

Burada; q (W) pilde ortaya çıkan ısı üretimini, I (A) pil üzerinden geçen elektrik akımını, U (V) açık devre gerilimini, V (V) ise pil kutupları arasındaki gerilimi göstermektedir. Ayrıca, eşitliğin sağındaki $(U-V)$ terimi, pil iç direncinin hesaplanmasında, dU/dT terimi ise pildeki entropi değişiminin hesaplanmasında kullanılmaktadır. Bu terimler, deneysel olarak tespit edilebilmektedir. Burada pil iç direncinin ve entropi değişiminin ifade edilmesi, batarya ısı yönetimi konusunda çalışan araştırmacılar için hâlâ gündemdedir. Bu terimler, termodinamik içerikli deneyler yapan araştırmacılar sayesinde günümüzde matematiksel olarak modellenmektedir. Çalışmaların birçoğu lityum-iyon pil ailesi için yapılmıştır. Bu pil ailesinden özellikle 18650 kodlu olanı tercih edilmiştir. Bu çalışmada; pil iç direnci ve entropi değişimi, 18650 lityum-iyon bir pil için Fathabadi [11] ve Liu vd. [15] tarafından yapılmış olan çalışmalar kullanılarak elde edilmiştir. Eş. 1’de yer alan ve çevre sıcaklığını temsil eden T değeri ise 25°C olarak alınmıştır.

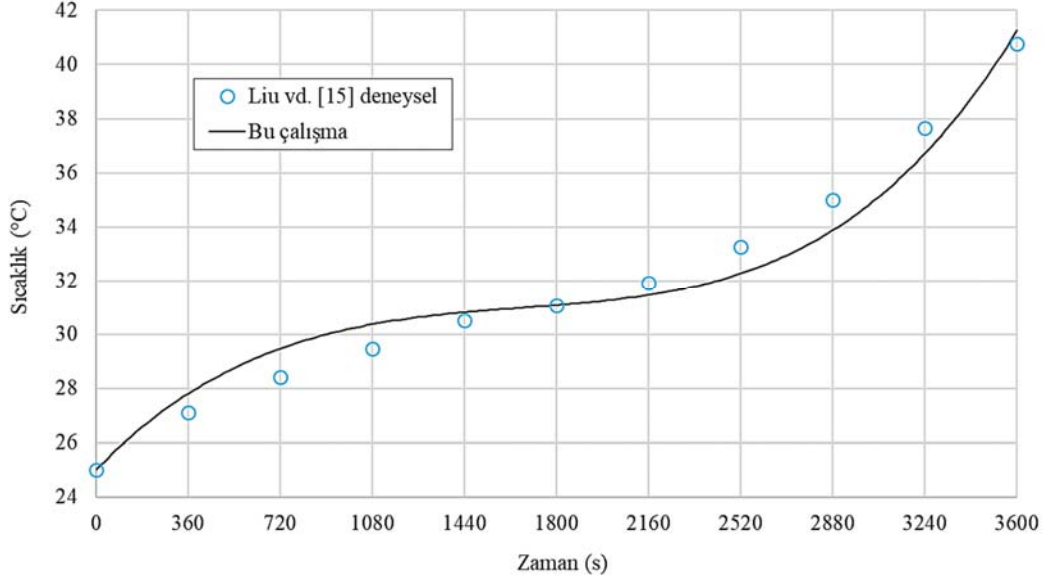
2.2. Literatürdeki Veriler ile Gerçekleştirilen Doğrulama Çalışması (Validation Study with Data from Literature)

Bu bölümde, Liu vd. [15] tarafından yapılmış olan deneysel bir çalışma incelenerek doğrulama çalışması yapılmıştır. Doğrulama yapmak için kullanılan makaledeki pil ısı üretim değerleri, sayısallaştırılarak elde edilmiştir. Daha sonra, bu pil ısı üretim değerleri ANSYS Fluent yazılımında girdi olarak kullanılarak tek pil için sayısal bir model kurulmuştur. Liu vd. [15] tarafından yapılmış olan deneylerde pil yüzey sıcaklıkları ölçüldüğü için sayısal analizde de pil yüzey sıcaklıkları ile karşılaştırma yapılmıştır. Pil yüzey sıcaklığının karşılaştırılması Şekil 1’de verilmiştir. Genel olarak, sayısal analiz sonuçları ile deneysel sonuçlardaki pil sıcaklığı davranışının benzer olduğu görülmüştür. Karşılaştırma neticesinde, sonuçların birbirlerine oldukça yakın olduğu ve sayısal model kullanılarak elde edilen sonuçlarla, literatürden alınan deneysel sonuçlar arasında en fazla %0.36’lık bir sapma olduğu görülmüştür.

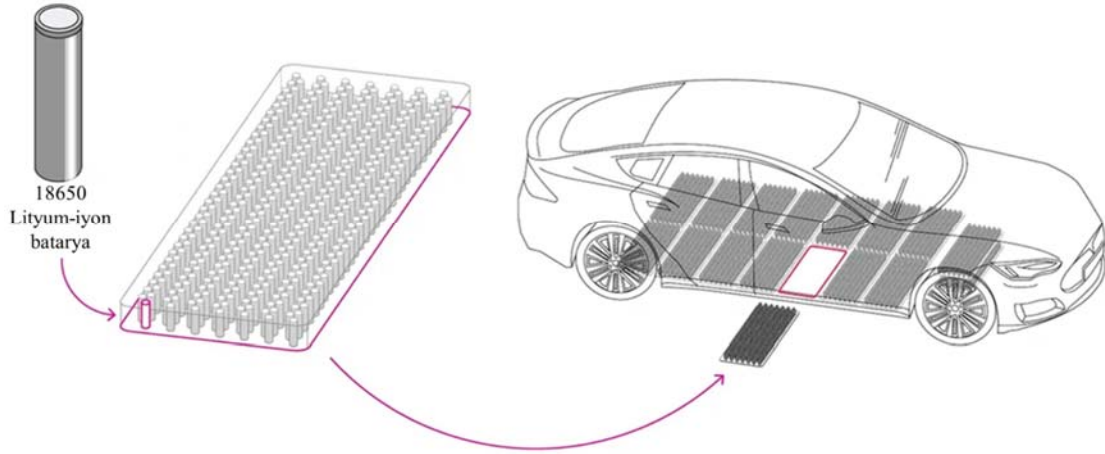
Çalışmanın temelini oluşturan ve sonraki kısımda ele alınan soğutma sistemi; pillerden, alüminyum bloklardan ve su kanallarından oluşan bir sistemdir. Sayısal analizlerde girdi olarak kullanılan pil ısı üretim değerleri, 15 numaralı referansta yer alan verilerle doğrulanmıştır.

2.3. Batarya Modülünü Soğutma Kapsamındaki Çalışmalar (Studies within the Cooling the Battery Module)

Günümüzdeki birçok elektrikli araca baktığımızda, batarya modülünü dikdörtgenler prizması şeklinde düşünürsek, soğutma sıvısı, batarya modülünün uzun kenarı boyunca ilerlemektedir. Dizilimi Şekil 2’de gösterilen Tesla model-S aracına ait pil paketlerinden de açıkça görüleceği üzere, bu yön seçiminin en büyük mahsurunun, soğutma sisteminde kullanılan akışkanın, pil paketinin girişi ile çıkışı arasında çok fazla pil ile temas etmesi ve böylece daha çok ısınmasıdır. Hâlbuki soğutma hattının yönü, pil paketinin kısa kenarı boyunca kurgulanırsa, akışkan daha az sayıdaki pil ile temas edeceğinden daha az ısınmış olur. Günümüzde, pil paketlerinin kısa kenarları boyunca soğutulması güncel çalışmalar arasında yer almaktadır. Rao vd. [1], yapmış oldukları sayısal bir çalışmada, pil paketinin soğutulmasını kısa kenar boyunca kurgulamış ve daha etkin bir soğutma elde etmişlerdir. Bu nedenle bu sayısal çalışmada da pil paketinin kısa kenarı boyunca soğutulması tercih edilmiştir.



Şekil 1. Bu çalışmada oluşturulan modelden elde edilen sonuçların, literatürdeki veriler ile karşılaştırılması (Comparison of the results obtained from the model formed in this study with the data from the literature)



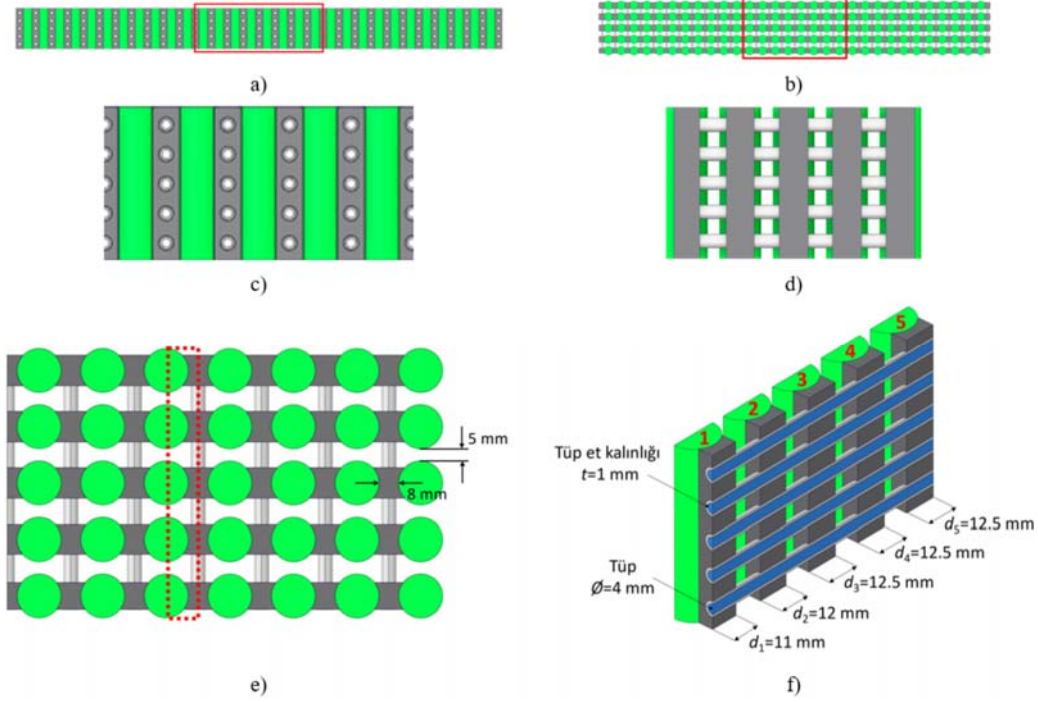
Şekil 2. Tesla model-S aracına ait pil paketlerinin dizilimi (26 nolu referanstan uyarlanmıştır) (Battery packs arrangements of Tesla model-S vehicle) (Adapted from Reference 26)

Yapılan sayısal çalışmada kullanılan geometri ve seçilmiş çözüm alanı Şekil 3'te gösterilmiştir. Batarya soğutma sistemi; akışkanın içinden aktığı metalik tüpler, alüminyum bloklar ve pil hücrelerinden oluşmaktadır. Pil hücrelerinde üretilen ısı, iletim yoluyla önce alüminyum bloklara, oradan da alüminyum blokların içine gömülmüş olan metalik tüplere geçmektedir. Metalik tüplerin içinden akmakta olan akışkan yardımıyla pil hücre sıcaklıklarının kontrol altına alınması ve sistemin soğutulması amaçlanmıştır. Sayısal çalışmada kullanılan modelde, akış doğrultusunda 5 adet 2500 mAh 18650 kodlu pil kullanılmıştır. Piller arasında düşeyde 5 mm, yatayda ise 8 mm'lik bir mesafe bulunmaktadır. Her bir metalik tüpün iç çapı 4 mm, et kalınlığı ise 1 mm olarak seçilmiştir. Pillerle temas eden alüminyum blokların genişliği, pil sıcaklıklarının birbirine yakın olabilmesi için farklı seçilmiş olup bu genişlik, soğutma suyunun giderek ısınacağı hususu göz önüne alınarak akış yönünde bir miktar artırılmıştır. Söz konusu alüminyum blokların akış doğrultusundaki genişlikleri, Rao vd. [1] tarafından yapılan sayısal çalışmadaki mesafeler dikkate alınarak belirlenmiştir. Sistemde yer alan alüminyum bloklar bir taraftan pillere temas ederken, diğer taraftan içerisinden soğutma

sıvısının aktığı metalik tüplere temas etmektedir. Sistemde yer alan iki farklı bölgedeki bu katı-katı teması, çalışmanın ilk aşamasında önce mükemmel temas olarak kabul edilmiş ve modelleme buna göre yapılmıştır. Daha sonra, katı-katı arasında gerçekte bulunan temassızlık direnci dikkate alınarak aynı çözümler tekrarlanmıştır. Bu hesaplamalar, Eş. 1 kullanılarak, Şekil 1'de doğrulaması verilen pil ısı üretim miktarları için tekrar edilmiştir. Sayısal çalışmanın, katı-katı arasındaki temassızlık direncinin yine göz önüne alındığı ikinci aşamasında ise farklı miktarlarda ısı üretilen durumlar için farklı soğutma suyu debileri kullanılarak daha verimli bir sistem tasarımı gerçekleştirilmesi hedeflenmiştir.

2.3.1. Sayısal model ve kullanılan eşitlikler (Numerical model and governing equations)

Sayısal çalışmalar, akış ve ısı geçişi problemlerini sonlu hacimler metodunu kullanarak çözen Fluent 2020R2 programında gerçekleştirilmiştir. Akış geometrisinin oluşturulması SpaceClaim Programı, çözüm elemanlarının oluşturulması ise Fluent Meshing



Şekil 3. Analiz için seçilen bölgenin a) ön b) üst görünüşleri, çalışma için oluşturulan modelin c) ön d) sol yan e) üst görünüşleri f) çözüm alanı için seçilen simetrik bölümü (a) Front b) top views of the selected region for the analysis c) front d) left side e) top views f) symmetrical section selected for the solution area of the model created for the study)

Programı kullanılarak yapılmıştır. Çözümler, sabit termofiziksel özelliklere sahip Newton tipi bir akışkanın; kararlı hal koşullarında, üç boyutlu, sıkıştırılmaz ve laminar akışı kabulü altında gerçekleştirilmiştir. Pillerdeki ısı üretimleri, hacimsel ısı üretimi olarak modellenmiş, katı malzemelerin özellikleri de sabit olarak kabul edilmiştir. Yukarıda yapılan kabuller nedeniyle; problemin çözümünde kullanılacak temel eşitlikler, Eş. 2'ye Eş. 6'ya indirgenmiş olacaktır (Versteeg ve Malalasekera [25]).

Süreklilik denklemi:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

Momentum denklemleri:

$$\rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (3)$$

$$\rho \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (4)$$

$$\rho \left(u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (5)$$

Enerji denklemi:

$$\rho c_p \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \dot{s} \quad (6)$$

Ayrıca, temassızlık direncinin göz önüne alındığı ve alınmadığı durumlardaki ısı geçişi hesaplamalarında kullanılan denklemler sırasıyla, Eş. 7 ve Eş. 8'de verilmiştir. Eş. 7'de yer alan R''_{pil-Al} ve $R''_{Al-Tüp}$ terimleri sırasıyla, pil ile alüminyum blok arasındaki ve alüminyum blok ile tüp arasındaki temassızlık dirençlerini

göstermektedir. Bu eşitlikler, pilin merkezi ile içerisinden suyun aktığı tüpün merkezi arasındaki ısı geçişini göstermektedir.

$$q'' = \frac{T_{Pil} - T_{Su}}{\frac{L_{Pil}}{k_{Pil}} + R''_{Pil-Al} + \frac{L_{Al}}{k_{Al}} + R''_{Al-Tüp} + \frac{L_{Tüp}}{k_{Tüp}} + \frac{1}{h_{Su}}} \quad (7)$$

$$q'' = \frac{T_{Pil} - T_{Su}}{\frac{L_{Pil}}{k_{Pil}} + \frac{L_{Al}}{k_{Al}} + \frac{L_{Tüp}}{k_{Tüp}} + \frac{1}{h_{Su}}} \quad (8)$$

2.3.2. Malzeme bilgileri ve sınır koşulları (Material information and boundary conditions)

Sistemde kullanılan tüm malzemelerin termofiziksel özellikleri sabit kabul edilmiş ve bu özellikler Tablo 2'de verilmiştir. Şekil 3f'de gösterilen modelde; soğutma suyu, 1 numaralı pil hücrenin olduğu kısımdan girip, 5 numaralı pilin olduğu kısımdan çıkmaktadır. Su giriş sıcaklıkları tüm analizlerde 20°C olarak alınmıştır.

Çalışmanın ilk aşamasındaki tüm analizlerde, her bir tüpten sisteme 0,5 m/s hızında su girişi olmaktadır. Çalışmanın ikinci aşamasındaki tüm analizlerde ise ilk aşamada bulunan sonuçlar yorumlanarak farklı değerlerdeki pil ısı üretimleri için bu üretimlere uygun olarak farklı hızlarda su girişleri tanımlanmıştır. Çalışmanın birinci ve ikinci aşamasında kullanılan su giriş hızları ve Eş. 1 kullanılarak hesaplanan pillerdeki ısı üretim miktarları, Tablo 3'te verilmiştir.

Çalışmanın ilk aşamasında, hem katı-katı arasındaki temasın mükemmel kabul edildiği durum için hem de katılar arasındaki temassızlık direncinin göz önüne alındığı durum için analizler gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın ikinci aşamasında ise, temassızlık direnci göz önüne alınarak analizler gerçekleştirilmiştir. Tüm

Tablo 2. Sistemde kullanılan malzemelerin özellikleri (Properties of the materials used in the system) [8, 24].

Malzeme/Akışkan	ρ [kg·m ⁻³]	c_p [J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]	k [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	μ [Pa·s]
Alüminyum	2719	871	202,4	-
Pil	2500	1200	4	-
Tüp	8030	503	16,27	-
Su	1000	4128	0,6	0,001

Tablo 3. Soğutma suyu giriş hızı ve pillerdeki ısı üretimleri (Coolant inlet velocities and heat generation in batteries).

Analiz aşaması	Senaryo no	SOC	Deşarj oranı	Isı üretimi [W]	Su giriş hızı [m·s ⁻¹]
1. Aşama (1A ve 1B)	Senaryo 1	0,25	1C	0,70	0,50
	Senaryo 2	0,25	4C	3,32	0,50
	Senaryo 3	0,25	7C	6,74	0,50
	Senaryo 4	0,25	10C	10,93	0,50
	Senaryo 5	0,50	1C	0,36	0,50
	Senaryo 6	0,50	4C	1,88	0,50
	Senaryo 7	0,50	7C	4,05	0,50
	Senaryo 8	0,50	10C	6,87	0,50
	Senaryo 9	0,75	1C	0,03	0,50
	Senaryo 10	0,75	4C	0,50	0,50
	Senaryo 11	0,75	7C	1,55	0,50
	Senaryo 12	0,75	10C	3,19	0,50
2. Aşama (2A)	Senaryo 1	0,25	1C	0,70	0,20
	Senaryo 2	0,25	4C	3,32	0,30
	Senaryo 3	0,25	7C	6,74	0,50
	Senaryo 4	0,25	10C	10,93	0,75
	Senaryo 5	0,50	1C	0,36	0,20
	Senaryo 6	0,50	4C	1,88	0,20
	Senaryo 7	0,50	7C	4,05	0,30
	Senaryo 8	0,50	10C	6,87	0,50
	Senaryo 9	0,75	1C	0,03	0,20
	Senaryo 10	0,75	4C	0,50	0,20
	Senaryo 11	0,75	7C	1,55	0,20
	Senaryo 12	0,75	10C	3,19	0,30

analizlerde; pillerin dış yüzeyiyle alüminyum bloklar arasındaki ve alüminyum bloklarla metalik tüplerin dış yüzeyi arasındaki temassızlık faktörü olan R^* , vakum ortamında ve temas halindeki yüzeylerde 100 kPa temas basıncı altında $R^* = 5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ [24] olarak alınmıştır.

Doğası gereği katı cisimlerin yüzeyleri arasında mükemmel temas olamayacağı göz önünde bulundurularak; temassızlık direnci, termal direnç değeri olarak ANSYS Fluent yazılımına direkt olarak tanımlanmıştır. ANSYS Fluent yazılımında zaten mevcut olan ve katı cisimleri kapsayan temel ısı iletimi denklemine ek olarak, birbirleriyle temas eden katılar arasındaki temassızlık direncini içeren ısı iletim denklemini de çözülmüştür.

2.3.3. Çözüm yöntemi (Solution method)

Sayısal çalışmalar, sonlu hacimler yöntemi ile çözüm yapan ANSYS Fluent 2020R2 Programı ile gerçekleştirilmiştir. Basınç ve hız çiftinin sayısal çözümü için Coupled algoritması, momentum ve enerji denklemlerinin ayrıklaştırılması için ise ikinci mertebeden 'Upwind Metodu' kullanılmıştır. Yakınsamanın sağlandığının kabul edilebilmesi için, tüm kalıntı değerlerinin $1 \cdot 10^{-6}$ değerine ulaşmasına kadar çözümlere devam edilmiştir.

2.3.4 Çözüm ağından bağımsızlık çalışması (Mesh independency study)

Çözüm ağından bağımsızlık çalışması 6 farklı çözüm ağında gerçekleştirilmiştir. Bağımsızlık çalışmaları, katılar arasında mükemmel temas varsayımının yapıldığı Senaryo 4 için

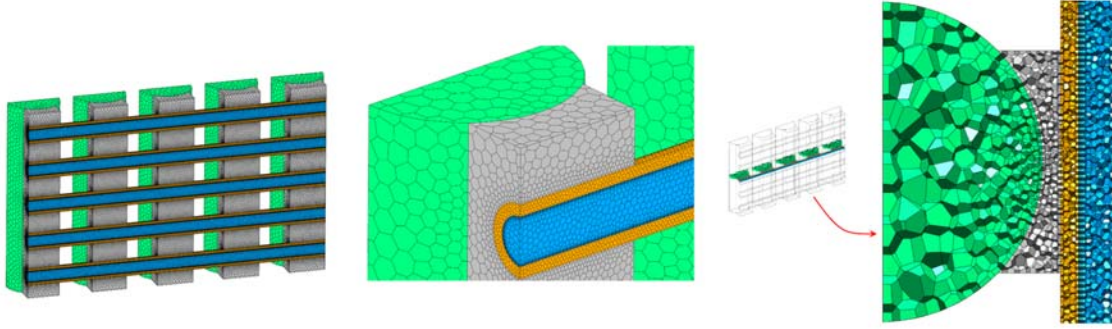
gerçekleştirilmiştir. Bağımsızlık çalışması, akışkanın ortadaki kanalın çıkışındaki yerel sürtünme faktörü ve yerel Nusselt sayısı dikkate alınarak yapılmıştır. Her iki parametredeki değişimin %1'in altında olduğu durumdaki çözüm ağı sayısı yeterli kabul edilmiştir. Bağımsızlık çalışmaları sonucunda 1,82 milyon çözüm elemanı seçilmiştir ve tüm analizlerde 1,82 milyon çözüm elemanı kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan çözüm ağının yapısı ve elemanları Şekil 4'te, yerel sürtünme faktörünün ve yerel Nusselt sayısının değişimi ise Şekil 5'te gösterilmiştir.

3. Sonuçlar ve Tartışmalar (Results and Discussion)

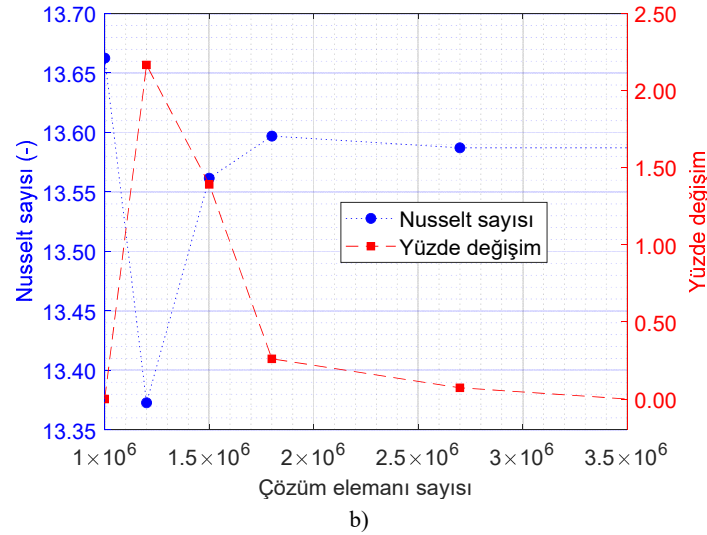
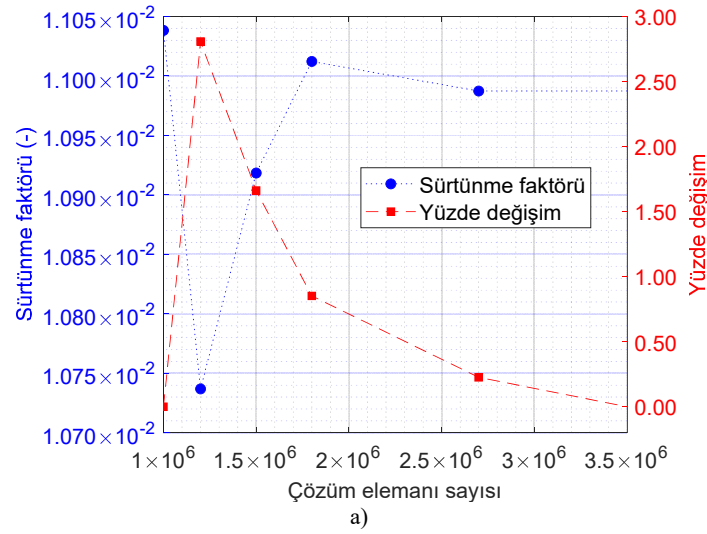
Bu çalışma kapsamındaki sayısal çalışmalar üç bölüm halinde gerçekleştirilmiştir. Bu bölümler sırasıyla; katılar arasında mükemmel temas kabulüyle ve sabit debi değeri için yapılan birinci aşama çalışmalarının birinci kısmı (1A), katılar arasındaki temassızlık direnci dikkate alınarak ve sabit debi değeri için yapılan birinci aşama çalışmalarının ikinci kısmı (1B), katılar arasındaki temassızlık direnci dikkate alınarak ve değişken debi değerleri için yapılan ikinci aşama çalışmalarıdır (2A).

3.1. Temassızlık Direncinin Etkisi | 1A ve 1B Sonuçları (Effect of Contact Resistance | 1A and 1B Results)

Pillerin ortalama sıcaklığının farklı koşullar altındaki değişimi Şekil 6'da verilmiştir. Bu farklı koşullar, toplam 12 ayrı senaryo şeklinde planlanmış ve her bir senaryo, katılar arasında mükemmel temas kabulüyle ve katılar arasındaki temassızlık direnci dikkate alınarak ayrı ayrı incelenmiştir. Her bir pildeki sıcaklık dağılımını yani batarya soğutma sisteminin ısı performansını genel olarak gösteren sıcaklık



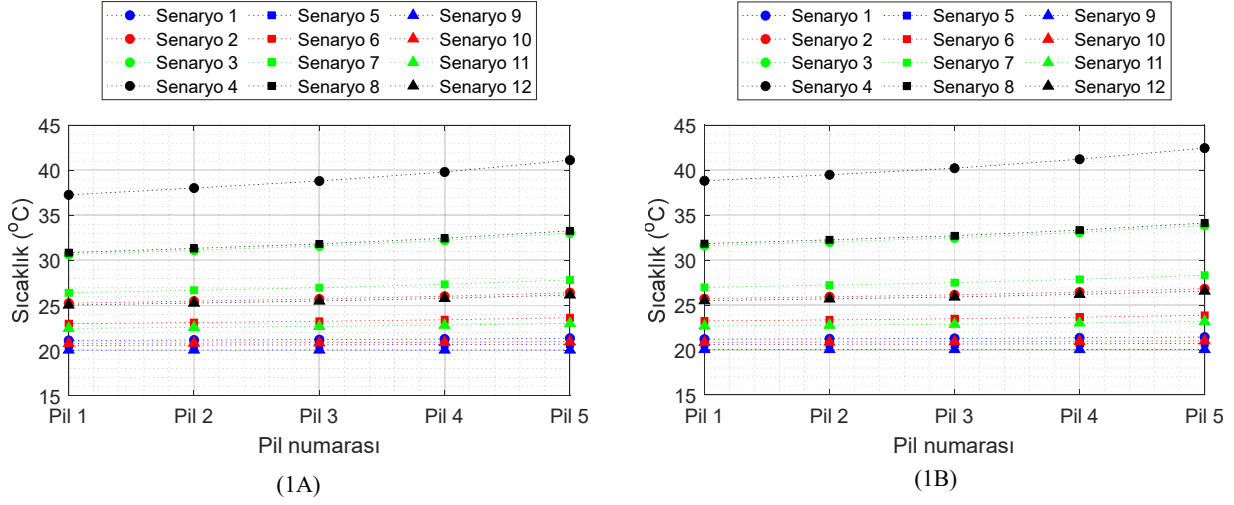
Şekil 4. Sayısal çalışmada kullanılan çözüm ağı (Solution mesh used in the numerical study)



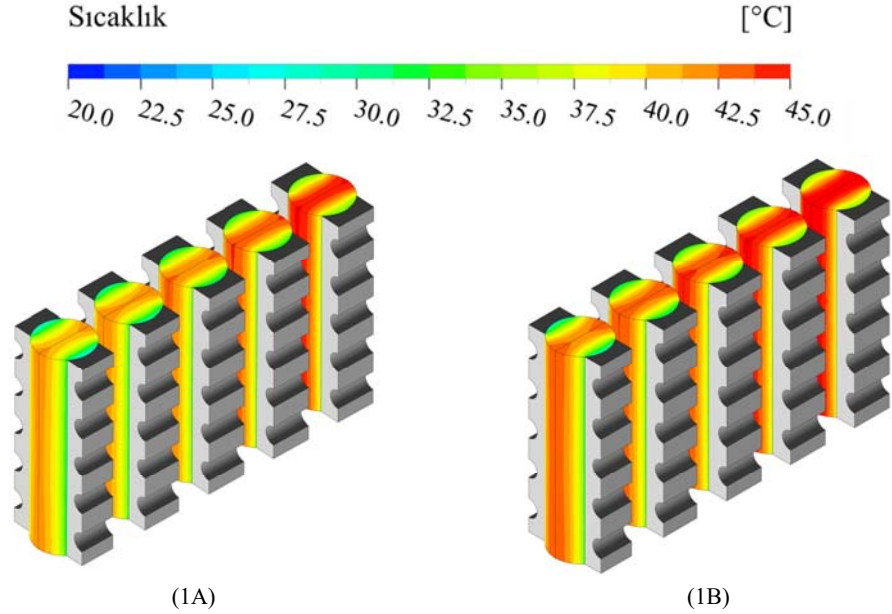
Şekil 5. Merkez kanal çıkışındaki a) yerel sürtünme faktörünün b) yerel Nusselt sayısının çözüm elemanı sayısı ile değişimi (Variation of a) local friction factor b) local Nusselt number with the number of solution element numbers at the central channel outlet)

konturları da bu bölümde verilmiştir. Bu çalışmada; tüm senaryolar için 1A ve 1B analizleri gerçekleştirilmiş olmakla birlikte, analizler sonucunda elde edilen sıcaklık konturları, sadece Senaryo 4, Senaryo 8 ve Senaryo 11 için verilmiş ve bu sonuçlar sırasıyla Şekil 7, Şekil 8 ve Şekil 9'da gösterilmiştir. Şekil 6 incelendiğinde; tüm senaryolarda pillerin ortalama sıcaklıkları, beklenildiği üzere birinci pilden beşinci

pile doğru gittikçe artmaktadır. Ayrıca, temassızlık direnci etkisinin, yüksek ısı üretimi olan durumlarda önemli bir faktör olduğu anlaşılmaktadır. Nihai incelemeler; Senaryo 4, Senaryo 8 ve Senaryo 11 üzerinden yapılmıştır. Bu senaryolar, benzer ısı üretim miktarlarının olduğu diğer senaryolar hakkında da bilgi vermektedir. Gösterimleri daha anlaşılır hale getirebilmek için, batarya soğutma



Şekil 6. 1A ve 1B yaklaşımlarıyla pillerin ortalama sıcaklığının farklı senaryolar için değişimi (Variation of average temperature of batteries for different scenarios with 1A and 1B approaches)



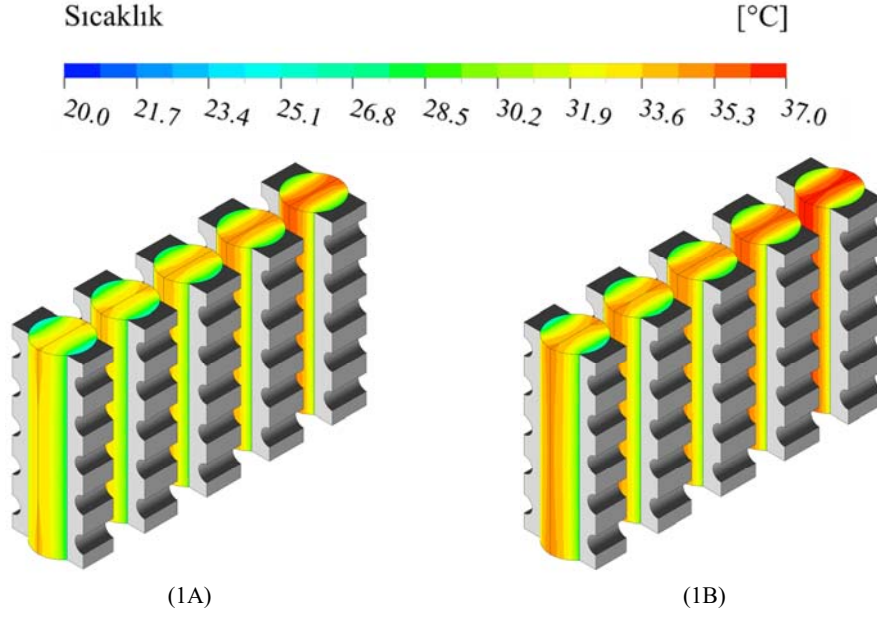
Şekil 7. Senaryo 4 için 1A ve 1B durumlarındaki sıcaklık dağılımları (Temperature distributions in cases 1A and 1B for scenario 4)

sisteminden çözüm alanı için seçilen simetrik bölümün diğer yarısı da görsellere eklenmiştir. İlk aşama analizleri için seçilen $0,50 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ su giriş hızı değerinin, Senaryo 4 için yetersiz, Senaryo 8 için uygun, Senaryo 11 için ise fazla olduğu görülmüştür. Elektrikli aracın farklı sürüş şartlarından kaynaklanan farklı pil ısı üretim miktarı senaryolarına göre uygun su debisinin, dolayısıyla uygun su giriş hızının seçimi, ikinci aşama analizler (2A analizleri) için yapılmıştır. İkinci aşama analizleri, katılar arasındaki temaslılık direnci göz önüne alınarak gerçekleştirilmiştir. Giriş hızlarının seçimi, piller için en uygun çalışma sıcaklığı aralığı olan 20°C ile 40°C aralığına göre yapılmıştır.

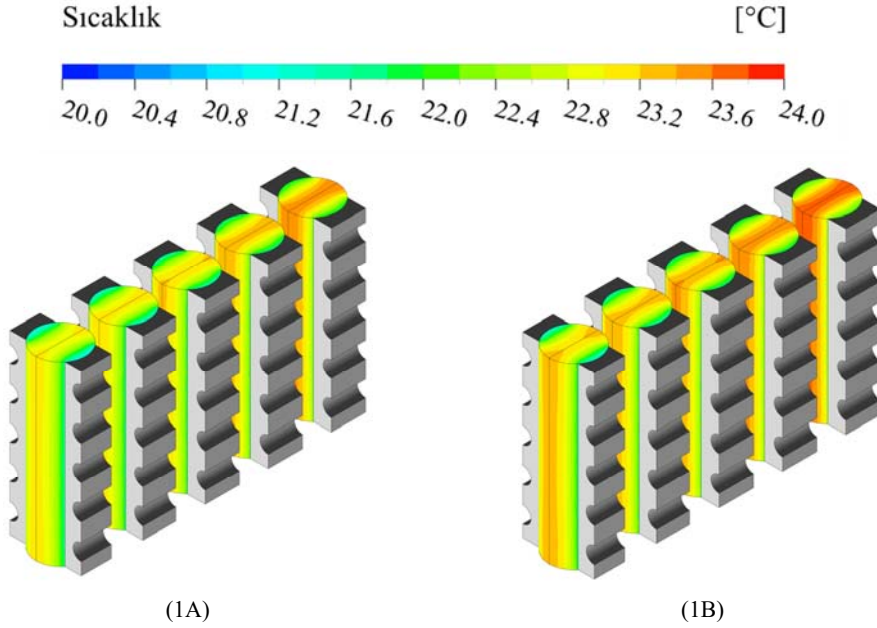
3.2. Soğutma Suyu Debisinin Etkisi | 2A Sonuçları (Effect of Cooling Water Flow Rate | 2A Results)

Farklı su giriş hızlarının etkisi bu bölümde incelenmiştir. İkinci aşama analizleri olarak adlandırılan bu bölümdeki sayısal analizler, katılar arasındaki temaslılık direnci göz önüne alınarak gerçekleştirilmiştir.

Şekil 7'de görüldüğü üzere; $0,50 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ su giriş hızının yetersiz olduğu, pil sıcaklıklarının 40°C 'un üzerinde olmasından anlaşılmaktadır. Benzer bakış açısıyla Şekil 9 incelendiğinde, pil sıcaklıklarının 22°C ile 24°C civarında olmasından kaynaklı $0,50 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ su giriş hızının fazla olduğu ve daha az bir debiyle de pil sıcaklıklarını istenilen aralıkta tutabilmenin mümkün olduğu anlaşılmıştır ki bu sayede gereksiz güç tüketimi engellenmiş olacaktır. Şekil 8'e bakıldığında ise su debisine ilişkin bir değişikliğin yapılmasına gerek olmadığı anlaşılmıştır. Şekil 10 ve Şekil 11'de Senaryo 4 ve Senaryo 11 durumları için sıcaklık konturları verilmiştir. Şekil 10'da görüldüğü üzere, Senaryo 4 durumundaki yüksek sıcaklık problemi, daha fazla su debisi kullanılarak ortadan kaldırılmıştır ve piller istenilen sıcaklık aralığı olan 20°C ile 40°C aralığında tutulabilmiştir. Benzer şekilde, 1B analizlerinden elde edilen Senaryo 11 durumundaki pil sıcaklık değerlerinin oldukça düşük çıkması nedeniyle su debisi azaltılmış ve buna rağmen, Şekil 11'de görüldüğü üzere piller istenilen sıcaklık aralığı olan 20°C ile 40°C aralığında tutulmuştur. Dolayısıyla bu durumdaki gereksiz pompa güç tüketimi engellenmiştir.



Şekil 8. Senaryo 8 için 1A ve 1B durumlarındaki sıcaklık dağılımları (Temperature distributions in cases 1A and 1B for scenario 8)



Şekil 9. Senaryo 11 için 1A ve 1B durumlarındaki sıcaklık dağılımları (Temperature distributions in cases 1A and 1B for scenario 11)

Bu çalışmada ayrıca; 1B ve 2A analizleri kullanılarak; 5 adet pilin ortalama sıcaklığı ($T_{ort, pil}$), her bir soğutma kanalındaki basınç düşümü (Δp_{ort}) ve en yüksek ortalama sıcaklığa sahip pil ile en düşük ortalama sıcaklığa sahip pilin bu ortalama sıcaklıkları arasındaki fark ($\Delta T_{ort, pil}$), Senaryo 4 ve Senaryo 11 için elde edilmiş ve elde edilen bu sonuçlar Tablo 4'te verilmiştir. Tablo 4'te gösterilen pompa gücünün hesabı için Eş. 9 kullanılmıştır.

$$\dot{W}_{pompa} = \Delta p \dot{Q} \quad (9)$$

Burada; \dot{W}_{pompa} (W) pompa gücünü, Δp (Pa) soğutma kanallarındaki basınç düşümünü, \dot{Q} (m^3/s) ise hacimsel debiyi ifade etmektedir.

4. Simgeler (Symbols)

c_p	: Sabit basınçtaki özgül ısı [$J/(kg \cdot K)$]
h	: Isı taşınım katsayısı [$W/(m^2 \cdot K)$]
I	: Akım [A]
k	: Isı iletim katsayısı [$W/(m \cdot K)$]
L	: Kalınlık [m]
p	: Basınç [Pa]
q	: Pilde birim zamandaki ısı üretimi [W]
R'	: Temassızlık direnci [$m^2 \cdot K/W$]
T	: Sıcaklık [K veya $^{\circ}C$]
u	: x yönündeki hız bileşeni [m/s]

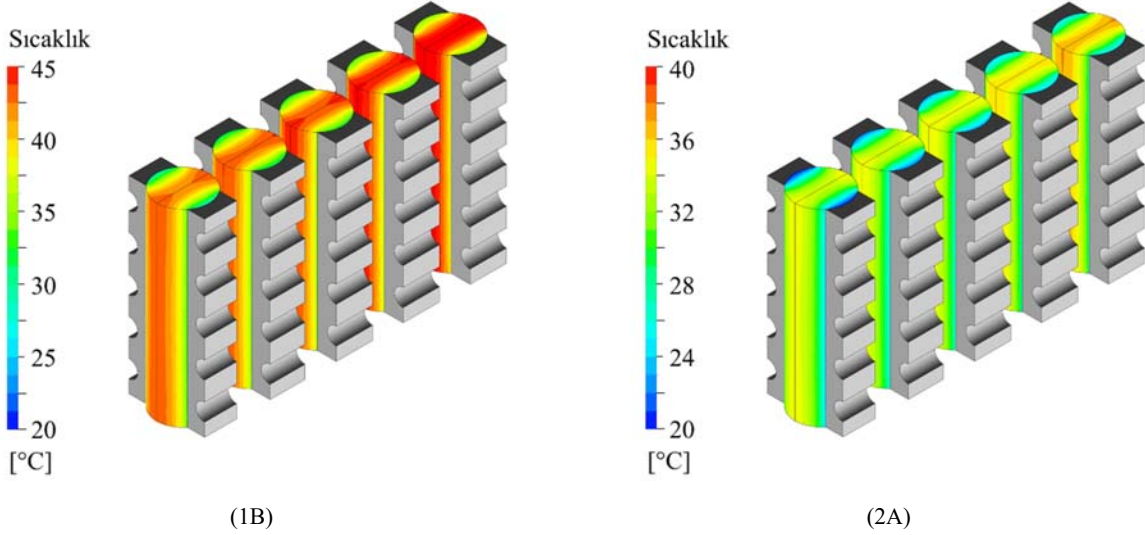
U : Açık devre gerilimi [V]
 v : y yönündeki hız bileşeni [m/s]
 V : Pil kutupları arasındaki gerilim [V]
 w : z yönündeki hız bileşeni [m/s]

4.1. Yunan Harfleri (Greek Letters)

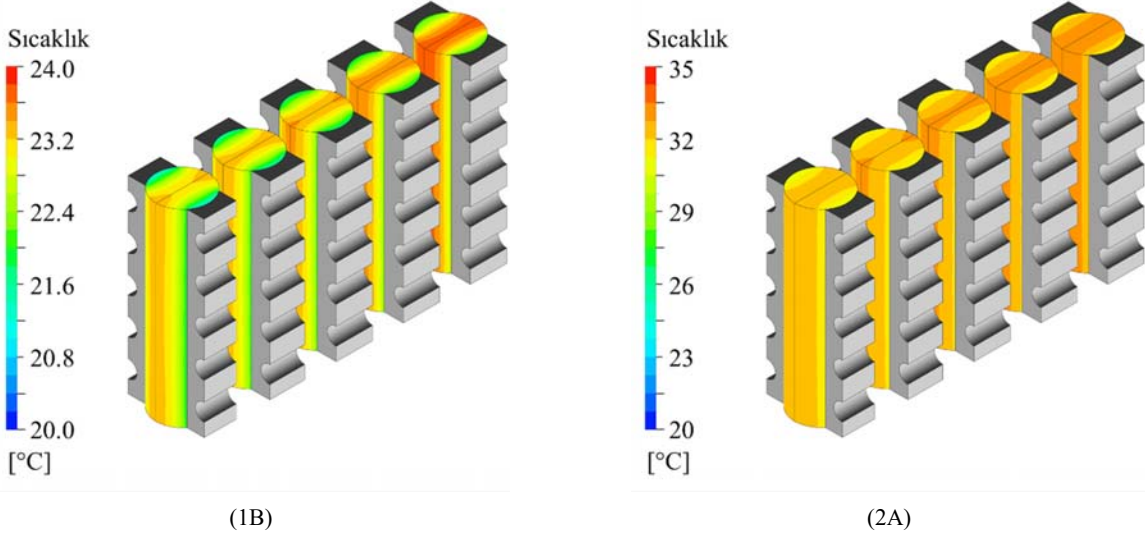
μ : Dinamik viskozite [Pa·s]
 ρ : Yoğunluk [kg/m³]

5. Sonuçlar (Conclusions)

Bu çalışma kapsamında; sıvı soğutmalı elektrikli bir araç bataryasının ısı performansını, pillerde ortaya çıkan farklı ısı miktarları için sayısal olarak incelenmiştir. ANSYS Fluent ile yapılan sayısal incelemeye geçilmeden önce; pil ısı üretimleri, literatürde mevcut olan bir çalışmanın deneysel verileri kullanılarak doğrulanmıştır. Oluşturulan sayısal model aracılığıyla pil yüzey sıcaklıkları elde edilmiş ve elde edilen bu sonuçlar, doğrulama çalışması için kullanılan deneysel



Şekil 10. Senaryo 4 için 1B ve 2A durumlarındaki sıcaklık dağılımları (Temperature distributions in cases 1B and 2A for scenario 4)



Şekil 11. Senaryo 11 için 1B ve 2A durumlarındaki sıcaklık dağılımları (Temperature distributions in cases 1B and 2A for scenario 11)

Tablo 4. Soğutma suyu debisinin, Senaryo 4 ve Senaryo 11 için 5 adet pilin ortalama sıcaklığı, her bir soğutma kanalındaki basınç düşümü ve en yüksek ve en düşük pil ortalama sıcaklıklarının farkı üzerindeki etkisi (The effect of cooling water flow rate on the average temperature of the 5 batteries, the pressure drop in each cooling channel, and the difference of the highest and the lowest average cell temperatures for Scenarios 4 and 11).

Senaryo no	$T_{ort, pil}$ (°C)	$\Delta T_{ort, pil}$ (°C)	Δp_{ort} (Pa)	\dot{W}_{pompa} (mW)
Senaryo 4 @ 1B	40.4	3.6	220	6.91
Senaryo 4 @ 2A	33.2	3.0	378	17.81
Senaryo 11 @ 1B	22.9	0.5	220	6.91
Senaryo 11 @ 2A	32.2	0.7	69	0.87

sonuçlarla kıyaslanmıştır. Karşılaştırma neticesinde, sonuçların birbirlerine oldukça yakın olduğu ve sayısal model kullanılarak elde edilen sonuçlarla, literatürden alınan deneysel sonuçlar arasında en fazla %0,36'lık bir sapma olduğu görülmüştür. Pil ısı üretim değerlerinin doğrulanmasıyla, bu veriler çalışmanın esas kısmında gerçekleştirilen sayısal analizlerde kullanılabilirliği sağlanmıştır.

Çalışmanın esas bölümünde; ANSYS Fluent kullanılarak yapılan HAD analizlerinde, temassızlık direncinin ve soğutma suyu debisinin etkisi de irdelenmiştir. Pil doluluk oranının düşük olduğu ve ihtiyaç duyulan akımın yüksek olduğu, dolayısıyla ısı üretiminin de daha yüksek olduğu durumlarda (Senaryo 3, Senaryo 4 ve Senaryo 8), temassızlık direncinin etkili olduğu açıkça görülmüştür. Bu senaryolardaki sıcaklıklar, pil ve alüminyum bloklar arasındaki mükemmel temas varsayımıyla incelenen durum (1A) ile kıyaslandığında yaklaşık 2°C fark etmektedir ki bu fark, bataryaların soğutulmalarında göz ardı edilemeyecek kadar önemlidir. Gerçek koşullarda, temassızlık direnci her zaman var olduğundan, araştırmacıların temassızlık direncinin etkisini dikkate almalarının önemli olduğu sonucuna varılmıştır. Pillerde düşük deşarj oranlarında üretilen ısı miktarının az olması nedeniyle temassızlık direncinin pil sıcaklıkları üzerindeki etkisinin de az olduğu, dolayısıyla bu direncin etkisinin ihmal edilebilir olduğu söylenebilir. Yani, düşük deşarj oranlarında çalışmak isteyen araştırmacılar temassızlık direncini ihmal edebilirler.

Pillerde yüksek ısı miktarlarının ortaya çıktığı durumlarda soğutma suyu debisinin artırılması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır. Buna karşın düşük ısı miktarlarının üretildiği durumlarda ise mevcut soğutma suyu debisinin gereğinden fazla olduğu ve yüksek pompa güç tüketimine sebep olduğu anlaşılmıştır. Soğutma suyu debisinin artırılmasıyla kanallardaki basınç düşümünün arttığı ve dolayısıyla gerekli pompa gücünün de arttığı görülmüştür. Buna karşın, soğutma suyu debisinin düşürülmesiyle de basınç düşümünün azaldığı ve pompa gücünden tasarruf sağlandığı görülmüştür. Her iki durumda da pillerin istenilen sıcaklık aralığında (20°C ila 40°C aralığında) çalışabilmesi için soğutma suyu debisinin ihtiyaç doğrultusunda ayarlanması gerektiği sonucuna varılmıştır. En yüksek ısı üretiminin ortaya çıktığı durum olan Senaryo 4'te, yeterli soğutma yapılmaması halinde en yüksek pil sıcaklığı yaklaşık olarak 45°C'a ulaşırken yeterli soğutma ile bu sıcaklık değeri yaklaşık olarak 37°C'a düşürülmüştür.

Bu çalışma sonucunda ayrıca, soğutma suyu debisinin artırılmasıyla piller arasındaki sıcaklık farkının azaldığı ve sistemde daha homojen bir sıcaklık dağılımı elde edildiği görülmüştür.

Sonuç olarak bu çalışma sayesinde, doğru tasarlanmış sıvı soğutmalı elektrikli bir araç batarya sistemi ile hem pillerin istenilen sıcaklık aralığında çalışabileceği hem de piller arasındaki sıcaklık farkının yeterince düşük olabileceği verimli bir sistemin yapılmasının mümkün olduğu görülmüştür.

Kaynaklar (References)

- Rao, Z., Qian, Z., Kuang, Y., and Li, Y., Thermal performance of liquid cooling based thermal management system for cylindrical lithium-ion battery module with variable contact surface, *Applied Thermal Engineering*, 123, 1514-1522, 2017.
- Chen, D., Jiang, J., Kim, G. H., Yang, C., and Pesaran, A., Comparison of different cooling methods for lithium-ion battery cells, *Applied Thermal Engineering*, 94, 846-854, 2016.
- Wu, W., Wang, S., Wu, W., Chen, K., Hong, S., and Lai, Y., A critical review of battery thermal performance and liquid-based battery thermal management, *Energy Conversion and Management*, 182, 262-281, 2019.
- Sato, N., Thermal behavior analysis of lithium-ion batteries for electric and hybrid vehicles, *Journal of Power Sources*, 99 (1-2), 70-77, 2001.
- Onda, K., Kameyama, H., Hanamoto, T., and Ito, K., Experimental study on heat generation behavior of small lithium-ion secondary batteries, *Journal of the Electrochemical Society*, 150 (3), A285, 2003.
- Takano, K., Saito, Y., Kanari, K., Nozaki, K., Kato, K., Negishi, A., and Kato, T., Entropy change in lithium ion cells on charge and discharge, *Journal of Applied Electrochemistry*, 32, 251-258, 2002.
- Onda, K., Ohshima, T., Nakayama, M., Fukuda, K., and Araki, T., Thermal behavior of small lithium-ion battery during rapid charge and discharge cycles, *Journal of Power sources*, 158 (1), 535-542, 2006.
- Inui, Y., Kobayashi, Y., Watanabe, Y., Watase, Y., and Kitamura, Y., Simulation of temperature distribution in cylindrical and prismatic lithium-ion secondary batteries, *Energy Conversion and Management*, 48 (7), 2103-2109, 2007.
- Williford, R. E., Viswanathan, V. V., and Zhang, J. G., Effects of entropy changes in anodes and cathodes on the thermal behavior of lithium ion batteries, *Journal of Power Sources*, 189 (1), 101-107, 2009.
- Jeon, D. H. and Baek, S. M., Thermal modeling of cylindrical lithium ion battery during discharge cycle, *Energy Conversion and Management*, 52 (8-9), 2973-2981, 2011.
- Fathabadi, H., High thermal performance lithium-ion battery pack including hybrid active-passive thermal management system for using in hybrid/electric vehicles, *Energy*, 70, 529-538, 2014.
- Panchal, S., Khasow, R., Dincer, I., Agelin-Chaab, M., Fraser, R., and Fowler, M., Thermal design and simulation of mini-channel cold plate for water cooled large sized prismatic lithium-ion battery, *Applied Thermal Engineering*, 122, 80-90, 2017.
- Kumar, P., Chaudhary, D., Varshney, P., Varshney, U., Yahya, S. M., and Rafat, Y., Critical review on battery thermal management and role of nanomaterial in heat transfer enhancement for electrical vehicle application, *Journal of Energy Storage*, 32, 102003, 2020.
- Özdemir, T., Amini, A., Ekici, Ö., Köksal, M., Experimental assessment of the lumped lithium ion battery model at different operating conditions, *Heat Transfer Engineering*, 43 (3-5), 314-325, 2021.
- Liu, S., Zhang, H., and Xu, X., A study on the transient heat generation rate of lithium-ion battery based on full matrix orthogonal experimental design with mixed levels, *Journal of Energy Storage*, 36, 102446, 2021.
- Trinuruk, P., Onnuam, W., Senanuch, N., Sawatdeejui, C., Jenyongsak, P., and Wongwises, S., Experimental and numerical studies on the effect of lithium-ion batteries' shape and chemistry on heat generation, *Energies*, 16 (1), 264, 2023.
- Ma, Y., Ding, H., Mou, H., and Gao, J., Battery thermal management strategy for electric vehicles based on nonlinear model predictive control, *Measurement*, 186, 110115, 2021.
- Saw, L. H., Ye, Y., Tay, A. A., Chong, W. T., Kuan, S. H., and Yew, M. C., Computational fluid dynamic and thermal analysis of Lithium-ion battery pack with air cooling, *Applied Energy*, 177, 783-792, 2016.
- Wang, S., Li, Y., Li, Y. Z., Mao, Y., Zhang, Y., Guo, W., and Zhong, M., A forced gas cooling circle packaging with liquid cooling plate for the thermal management of Li-ion batteries under space environment, *Applied Thermal Engineering*, 123, 929-939, 2017.
- Huo, Y., Rao, Z., Liu, X., and Zhao, J., Investigation of power battery thermal management by using mini-channel cold plate, *Energy Conversion and Management*, 89, 387-395, 2015.
- Jarrett, A. and Kim, I. Y., Design optimization of electric vehicle battery cooling plates for thermal performance, *Journal of Power Sources*, 196 (23), 10359-10368, 2011.
- Yang, N., Zhang, X., Li, G., and Hua, D., Assessment of the forced air-cooling performance for cylindrical lithium-ion battery packs: A comparative analysis between aligned and staggered cell arrangements, *Applied Thermal Engineering*, 80, 55-65, 2015.
- Kök C., Alkaya A., Numerical investigation of different cooling applications for pouch type lithium ion battery cells, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 38 (1), 381-398, 2023.
- Incropera, F. P., DeWitt, D. P., Bergman, T. L., and Lavine, A. S., *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, (6th ed.), Wiley, NJ, 2007.
- Versteeg, H. K. and Malalasekera, W., *An introduction to computational fluid dynamics: The finite volume method*, (2nd ed.), Pearson education, Glasgow, 2007.
- Tesla model-S pil paketi dizilimi, http://www.changeclimate.com/Transport_Land_Sea_Sustainable/SMA_RT_Hybrid_EV_Energy_Service_Networks/Lithium_Cobalt_Battery_Scarcity_Materials_Raw_Supplies.htm. Erişim tarihi Mart 2023.

