

Elektrikli Araçlarda Kullanılan Silindirik Lityum İyon Bataryaların Soğutulmasının Parametrik İncelenmesi

Ali CELEN^{1*}, Muhammet Yasin KABA¹

¹Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi, Erzincan, Türkiye

* alicelen@erzincan.edu.tr, mykaba@yahoo.com

(Geliş/Received: 28/04/2020;

Kabul/Accepted: 21/10/2020)

Öz: İçten yanmalı motorlara sahip araçlarla kıyaslandıklarında çevreci olmaları sebebiyle elektrikli araçlar ön plana çıkmaya başlamıştır. Elektrikli araçların bataryalarının performansına ve ömrüne etki eden parametrelerden birisi de batarya çalışma sıcaklığıdır. Bataryaların istenilen sıcaklık seviyesinde tutulması için havayla soğutma, sıvıyla soğutma, ısı borusuyla soğutma, faz değiştiren malzemeyle soğutma ve termoelektrik ile soğutma gibi farklı soğutma yöntemleri kullanılmaktadır. Bu çalışmada, elektrikli araçlarda kullanılan silindirik lityum iyon bataryalardan oluşan 10x10 şeklinde dizilmiş bir batarya grubu göz önüne alınmış ve bataryaların havayla ve elektriksel olarak yalıtılan sıvıyla (Novec 7200) soğutulması parametrik olarak incelenmiştir. Akışkan giriş sıcaklığının (15°C-35°C), farklı deşarj hızlarında bataryada meydana gelen ısı üretiminin (2-6 W) ve Reynolds sayısının (22559-67678) ortalama batarya sıcaklığına ve basınç kaybına etkisi araştırılmıştır. Yapılan hesaplamalar sonunda hava sıcaklığının 15°C üzerine çıktığı hava şartlarında doğrudan soğutmanın yeterli olmadığı bu sebeple sıvı soğutmanın kullanılmasının gerekli olduğu belirlenmiştir. Buna ek olarak, sabit Reynolds sayılarında hava ve sıvı soğutma kullanımı ile ortaya çıkacak basınç kayıpları hesaplanmıştır. Sabit Reynolds sayıları için sıvı hızının hava hızından daha düşük olması sebebiyle, hava ve sıvı soğutma şartlarında basınç kaybında ciddi bir değişim gözlemlenmemiştir.

Anahtar kelimeler: Batarya soğutma, hava ile soğutma, sıvı ile soğutma, batarya ısıl yönetimi, elektrikli araçlar.

Parametric Investigation of Cooling of Cylindrical Lithium Ion Batteries Used in Electric Vehicles

Abstract: Electric vehicles have come to the forefront compared to vehicles having internal combustion engines since they are environmentally friendly. One of the parameters affecting electric vehicle battery performance is battery operation temperature. Different cooling methods such as air cooling, liquid cooling, heat pipe cooling, phase change material cooling and thermoelectric cooling are used in order to maintain battery temperature in desired temperature. In this study, a battery group which composed of cylindrical lithium ion batteries arranged as 10x10 is considered and cooling of the batteries with air and dielectric fluid (Novec 7200) is investigated parametrically. Effect of fluid inlet temperature (15°C-35°C), battery heat generation during different discharge rates (2-6 W) and Reynolds number (22559-67678) on average battery temperature and pressure drop is researched. According to calculation results, air cooling is not sufficient for the conditions for air having temperature more than 15°C, so it is stated that the usage of liquid cooling is necessary. In addition, pressure drop which occurred with usage air and liquid cooling is estimated. Since liquid velocity is lower than air velocity for constant Reynolds numbers, it is observed that there is no significant change in pressure drop air and liquid cooling conditions.

Key words: Battery cooling, air cooling, liquid cooling, battery thermal management, electric vehicle.

1. Giriş

Günümüzde ulaşım sektöründe kullanılan araçlar küresel ısınmaya yol açan sera gazı emisyonlarının en önemli sebeplerinden biri haline gelmiştir. İçten yanmalı motorların kullanıldığı araçlar çevreye karbondioksit, karbonmonoksit, hidrokarbonlar, nitrojen oksitler ve su yaymaktadır. Elektrikli araçların küresel sera gazı salınımının düşürülmesi adına bir çözüm sağlayacak olması araştırmacıları bu konuda çalışmaya yönlendirmiştir. Elektrikli araçların kullanılmasıyla egzoz emisyonları düşük ve sessiz bir ortam sağlanmasının yanı sıra içten yanmalı motorlara kıyasla daha düşük maliyetli işletme koşullarına sahip araçların geliştirilmesi planlanmaktadır [1].

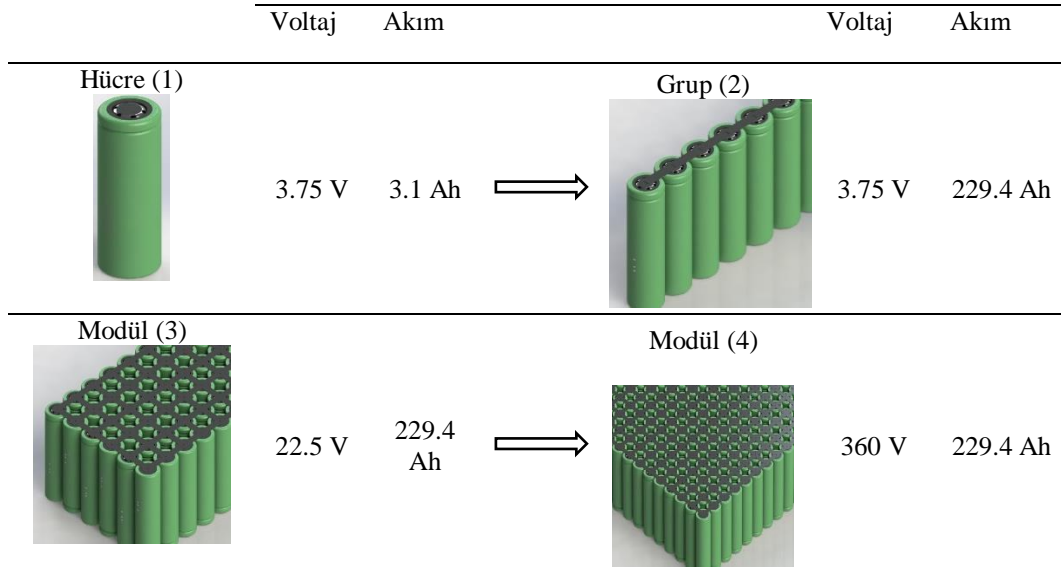
Ülkemizde 2015, 2016, 2017, 2018 yıllarında sırasıyla 106, 950, 4451, 3876 adet hibrit araç satılmış olup aynı yıllarda %100 elektrikli araç satışı sırasıyla 119, 44, 77, 155 olarak belirlenmiştir [2]. Bu durum ülkemizde hibrit araçların elektrikli araçlara kıyasla daha çok tercih edildiğini göstermektedir.

Elektrikli araçlar genel olarak büyük hacim kaplayan bir batarya paketi, elektrik motoru ve rejeneratif frenleme sisteminden oluşurken, hibrit araçlar ise küçük hacim kaplayan bir batarya paketi elektrik motoru,

* Sorumlu yazar: alicelen@erzincan.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: ^{1*} 0000-0003-3593-5183, ¹ 0000-0001-7880-7259

rejeneratif frenleme sistemi, içten yanmalı bir motor ve yakıt tankından oluşmaktadır. Hibrit araçlarda elektrik güçlerine göre mikro hibrit, küçük hibrit, tam hibrit ve şarjlı hibrit olarak sınıflandırılmaktadır [3].

Bir elektrikli aracı oluşturan en önemli elemanlardan birisi bataryadır, bu sebeple uygun batarya tipinin seçimi büyük önem taşımaktadır. Farklı batarya tipleri göz önüne alındığında kurşun asit, nikel-kadmiyum, nikel-metal hibrit, lityum iyon, lityum iyon polimer, lityum iyon fosfat, çinko hava, lityum sülfür ve lityum hava tipi bataryalar elektrikli araçlarda kullanılacak bataryalar olarak ön plana çıkmaktadırlar. Bu bataryalar arasında lityum iyon bataryalar yüksek enerji yoğunluğu (118-250 Wh/kg), yüksek hacimsel enerji yoğunluğu (200-400 Wh/L), yüksek özgül güç (200-430 W/kg), yüksek çevrim ömrü (2000) ve uygun çalışma sıcaklığı (-20-60°C) gibi özellikleri ile elektrikli araçlarda kullanılması en uygun batarya olarak görülmektedir [4]. Elektrikli araçlarda kullanılan lityum iyon bataryalar genellikle silindirik veya prizmatik geometrik özelliklere sahip olup birbirlerine seri veya paralel bağlanarak gruplar, modüller ve batarya paketleri oluşturulmaktadır. Hücre olarak adlandırılan tekli bataryaların birbirlerine bağlanmasıyla gruplar, grupların birbirlerine bağlanmasıyla modüller, modüllerin birbirlerine bağlanmasıyla ise batarya paketleri oluşmaktadır. Şekil 1’de silindirik lityum iyon batarya kullanılarak oluşturulan Tesla marka araca ait batarya paketi görülmektedir. Şekil 1’den görüleceği üzere, bir adet batarya 3.75 V gerilime, 3.1 Ah akıma ve 11.625 Wh güce sahiptir. 74 adet pilin birbirine paralel bağlanması sonucu bir adet grup oluşur ve bu grup 3.75 V gerilime, 229.4 Ah akıma ve 860.25 Wh güce sahiptir. 6 adet grubun birbiri arasında seri bağlanması sonucu bir adet modül oluşur ve bu modül 22.5 V gerilime, 229.4 Ah akıma ve 5161.5 Wh güce sahiptir. 16 adet modülün birbirleri arasında seri bağlanması sonucu bir adet batarya paketi oluşur ve bu batarya paketi 360 V gerilime, 229.4 Ah akıma ve 82584 Wh güce sahiptir [5].



Şekil 1. Elektrikli araçlarda batarya paketi oluşumunun şematik gösterimi

Bataryaların performansını, ömrünü, güvenliğini ve maliyetini etkileyen parametrelerden birisi de çalışma sıcaklığıdır. Lityum iyon bataryalar için uygun çalışma sıcaklığı 15 °C-40°C arasında olduğu ortaya konulmuştur [6]. Uygun çalışma şartlarını sağlamak için yapılan batarya ısı yönetimi çalışmaları incelendiğinde hava ile soğutma, sıvı ile soğutma, ısı borusu ile soğutma, faz değiştiren malzeme ile soğutma ve termoelektrik soğutma gibi farklı yöntemler olduğu görülmektedir. Bu yöntemlerin avantaj ve dezavantajları Tablo 1’de verilmiştir [7]. Uygulamada bu yöntemler arasında en çok sıvı ve hava ile soğutma kullanılmaktadır. Düşük ısı yüklerinde sıvı soğutma ile kıyaslandığında düşük özgül ısınma ısısı ve verim dezavantajlarına rağmen doğrudan temas, hafiflik, kolay bakım ve düşük maliyet özellikleri ile hava ile soğutma avantajlı hale gelebilmektedir. Yüksek ısı yüklerinde ise havaya kıyasla yüksek soğutma kapasitesi ile sıvı soğutma ön plana çıkmaktadır.

Literatürdeki silindirik lityum iyon bataryaların hava ve sıvı ile soğutulması üzerine yapılan deneysel ve nümerik çalışmaların bazıları şöyle özetlenmiştir:

Park ve Jung [8] silindirik lityum iyon bataryaların soğutulmasında hava ve sıvı (mineral yağ) kullanımının tasarım ve enerji tüketimine etkisini araştırmışlardır. Hava ile soğutmada geniş batarya modüllerinin kullanımının

Tablo 1. Batarya ısııl yöntemlerinin karşılaştırılması [7]

Yöntem	Avantaj	Dezavantaj
Hava ile soğutma	Doğrudan temas, hafiflik, kolay bakım	Düşük özgül ısınma ısısı, homojen dağılımı olmaması, düşük verim
Sıvı ile soğutma	Yüksek özgül ısınma ısısı, yüksek verim	Yüksek maliyet, kaçak sorunu, karmaşık yapı
Isı borusu ile soğutma	Yüksek ısııl iletkenlik, yüksek verim	Yüksek maliyet, karmaşık yapı
Faz değıştiren ile malzeme soğutma	Düşük maliyet, homojen sıcaklık dağılımı, yüksek verim	Düşük ısııl iletkenlik, kaçak sorunu
Termoelektrik ile soğutma	Hareketsiz ve sessiz olması, Bakım maliyeti düşük, uzun ömürlü	Düşük verim, ek güç ihtiyacı

sıvı soğutmada ise dar batarya modüllerinin kullanımının uygun olduğunu ifade etmişlerdir. Ayrıca yüksek ısııl yüklerde hava soğutmalı bataryaların sıvı soğutmalı bataryalara kıyasla daha fazla güç tükettiğini belirtmişlerdir. Hava soğutmanın düşük ısııl yüklerde kullanımının uygun olduğu belirtmişler ve yüksek ısııl yüklerde sıvı soğutmanın daha etkin bir yöntem olarak kullanılmasını önermişlerdir.

Li vd. [9] silindirik lityum iyon bataryaların hava ile soğutulmasını deneysel ve sayısal olarak araştırmışlardır. Batarya paketi içerisindeki sıcaklık dağılımını farklı çalışma şartları için belirlemiş ve en sonda bulunan bataryaların sıcaklıklarının diğerlerine oranla yüksek olduğunu gözlemlemişlerdir. Bu sebeple sıcaklık tahmini için iki bölgeli bir modelin kullanılmasının daha doğru sonuç vereceğini ifade etmişlerdir.

Wang vd. [10] farklı şekillerde dizilmiş bataryalardan oluşan modülün ısııl performansını sayısal olarak araştırmışlardır. Kübik ve altıgen şekilde dizilmiş batarya modüllerinin dikdörtgen ve dairesel şekilde dizilenlere kıyasla daha etkin bir şekilde soğutulabildiklerini gözlemlemişlerdir. Ayrıca fanın konumlandırılmasının soğutmaya etkisinin de incelendiği çalışmada fanın batarya modülünün üst kısmına konumlanması durumunda en iyi soğutmanın sağlandığı ifade etmişlerdir.

Yang vd. [11] sıralı ve şaşırtmalı olarak dizilmiş silindirik lityum iyon pillerin hava ile soğutulmasını sayısal olarak incelemişlerdir. Piller arasındaki enine ve boyuna mesafelerin batarya paketi sıcaklığı üzerine etkisi incelenmiş olup, piller arasındaki boyuna (akış yönünde) mesafelerin artmasıyla ve enine mesafelerin azalmasıyla ortalama batarya sıcaklığının düştüğünü gözlemlemişlerdir. Homojen sıcaklık dağılımı ve güç gereksinimleri göz önüne alındığında bataryalar arasındaki en uygun enine ve boyuna mesafelerin sırasıyla 34 mm ve 32 mm olarak önermişlerdir.

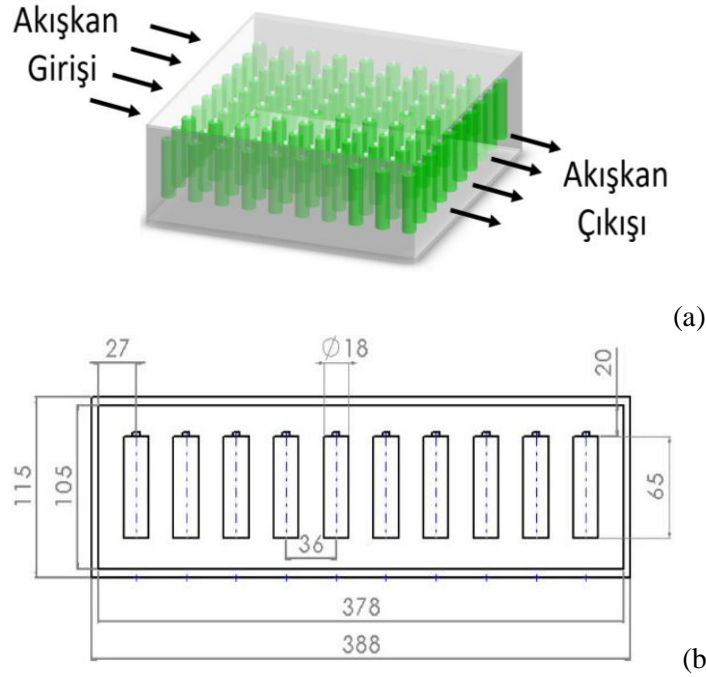
Saw vd. [12] lityum iyon pillerden oluşan batarya paketinin hava ile soğutulmasını deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Çalışmada 38120 tip batarya kullanılmış olup, 24 adet pilden oluşan batarya paketi oluşturulmuş, pillerin farklı deşarj akımlarında soğutulması durumunda ortaya çıkan ısı ve pillere ait yüzey sıcaklıkları belirlenmiştir. Bunlara ek olarak Nusselt sayısının tahmini için korelasyon geliştirilmişlerdir.

Jiaqiang vd. [13] hava giriş/çıkışı konumlarının ve batarya içerisine yerleştirilen yönlendirme plakasının batarya paketinin soğutulmasına etkisi incelemişlerdir. Havanın batarya modülünün ön yüzünden girip arka yüzünden çıkması haline en uygun sıcaklık dağılımına ulaşabileceğini belirtmişlerdir. Buna ek olarak, yönlendirme plakasının kullanımıyla havanın batarya ve batarya kabı arasına girmesi önlenmiş ve soğutma performansı artırılmışlardır.

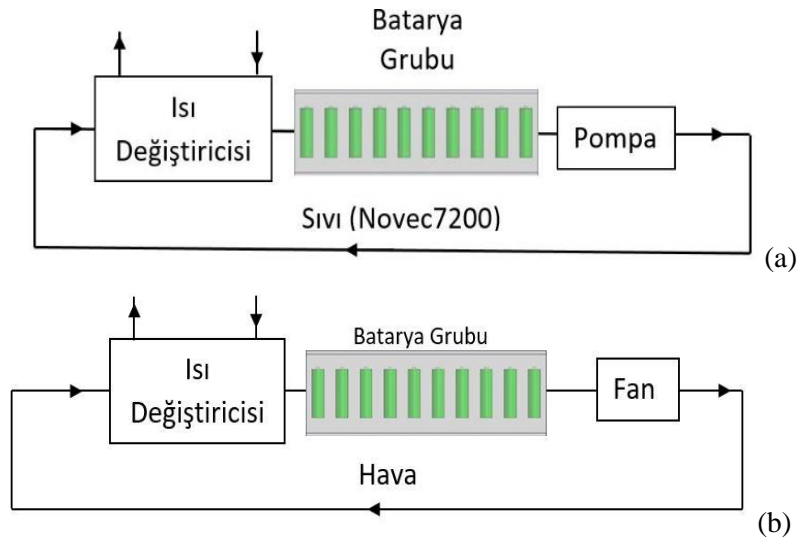
Shahid ve Agelin-Chaab [14] batarya paketine farklı şekillerde ikincil hava girişleri eklenmesi ile sıcaklık dağılımının homojenliğini iyileştirmek için tasarımlar yapmışlar ve sıcaklık dağılımını sayısal olarak incelemişlerdir. İkincil hava girişinin üstten olduğu tasarım sayesinde ortalama batarya paketi ve ortalama maksimum sıcaklıkların sırasıyla %9 ve %4 azaldığı görülmüştür. Yeni tasarım ile havanın karışımı ve türbülans sağladığı için homojen sıcaklığı dağılımında %39 iyileşme sağlanmışlardır.

Fan vd. [15] sıralı, şaşırtmalı ve çapraz şekilde dizilmiş silindirik lityum iyon bataryalarda hava giriş sıcaklığının ve batarya deşarj hızının batarya ısıl yönetimine etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Soğutma etkinliği ve homojen sıcaklık dağılımı göz önüne alındığında sıralı dizilimin en uygun tasarım olduğunu gözlemlemişlerdir. Buna ek olarak, çapraz dizilim ile karşılaştırıldığında sıralı dizilimde %23 daha az basınç kaybı olduğunu belirtmişlerdir.

Bu çalışmada elektrikli araçlarda kullanılan 18650 tip silindirik lityum iyon bataryalardan oluşan ve 10x10 şeklinde dizilmiş batarya grubunun hava ve elektriksel olarak yalıtkan olan sıvı (Novec 7200) ile soğutulması durumunda ortalama sıcaklığın ve ortaya çıkacak basınç kaybının belirlenmesi amaçlanmıştır. Batarya grubu ve batarya grubuna ait geometrik büyüklükler sırasıyla Şekil 2(a) ve Şekil 2(b)'de, batarya grubunun soğutulması



Şekil 2. Batarya grubu ve batarya grubuna ait geometrik büyüklüklerin şematik gösterimleri



Şekil 3. Batarya grubu, batarya grubuna ait geometrik büyüklükler, hava ve sıvı soğutma sistemlerinin şematik gösterimleri

için göz önüne alınan doğrudan temaslı hava ve sıvı temaslı soğutma sistemleri sırasıyla Şekil 3(a) ve Şekil 3(b)'de verilmiştir. Batarya grubunda akışkan giriş sıcaklığının (15°C-35°C), farklı deşarj hızlarında bataryada meydana gelen ısı üretiminin (2-6 W) ve Reynolds sayısının (22559-67678) ortalama batarya sıcaklığı ve basınç düşümü üzerine etkisi parametrik olarak araştırılmıştır.

2. Hesaplamalar

Silindirik bir batarya göz önüne alındığında üretilen toplam ısı üst, yan ve alt yüzeylerden taşınım yoluyla transfer edilir ve şöyle hesaplanır:

$$\dot{Q}_{batarya} = \dot{Q}_{üst} + \dot{Q}_{yan} + \dot{Q}_{alt} \quad (1)$$

Üst ve alt yüzeyler simetrik olduğundan bu yüzeylerden transfer edilen ısı eşit olup şöyle hesaplanır:

$$\dot{Q}_{üst} = \dot{Q}_{alt} = \bar{h}_ü A_ü (T_{akışkan} - \bar{T}_{pil}) \quad (2)$$

Üst ve alt yüzeylerdeki Reynolds sayısı şöyle tanımlanır:

$$Re_L = \frac{VL}{\vartheta} \quad (3)$$

Buradaki karakteristik uzunluk batarya paketindeki bataryaların bir sıradaki uzunluğu olup $L=(nD+(ST-D)(n-1))$ şeklinde tanımlanır.

Üst ve alt ortalama yüzeylerdeki ısı taşınım katsayısı aşağıdaki Nusselt denklemlerinden biri kullanılarak $Re_L < 5 \times 10^5$ ve $5 \times 10^5 < Re_L < 10^7$ aralıkları için sırasıyla şöyle hesaplanır [16]:

$$h = \frac{\overline{Nu}_L k}{L} = 0.664 Re_L^{0.5} Pr^{1/3} \quad (4)$$

$$h = \frac{\overline{Nu}_L k}{L} = 0.037 Re_L^{0.8} Pr^{1/3} \quad (5)$$

Yan yüzeyden transfer edilen ısı eşit olup şöyle hesaplanır:

$$\dot{Q}_{yan} = \bar{h}_y A_y (T_{akışkan} - \bar{T}_{batarya}) \quad (6)$$

Yan yüzeylerdeki maksimum hız ve Reynolds sayısı sırasıyla şöyle tanımlanır:

$$V_{maks} = \frac{S_T}{S_T - D} V \quad (7)$$

$$Re_L = V_{maks} \frac{L}{\vartheta} \quad (8)$$

Yan yüzeylerdeki ortalama ısı taşınım katsayısı aşağıdaki Nusselt denklemlerinden biri kullanılarak $0 < Re_D < 100$, $100 < Re_D < 1000$, $1000 < Re_D < 2 \times 10^5$ ve $2 \times 10^5 < Re_D < 10^6$ aralıkları için sırasıyla şöyle hesaplanır [16]:

$$\bar{h} = \frac{\overline{Nu}_D k}{D} = 0.9 Re_D^{0.4} Pr^{0.36} (Pr/Pr_s)^{0.25} \quad (9)$$

$$\bar{h} = \frac{\overline{Nu}_D k}{D} = 0.52 Re_D^{0.5} Pr^{0.36} (Pr/Pr_s)^{0.25} \quad (10)$$

$$\bar{h} = \frac{\overline{Nu}_D k}{D} = 0.27 Re_D^{0.63} Pr^{0.36} (Pr/Pr_s)^{0.25} \quad (11)$$

$$\bar{h} = \frac{\overline{Nu}_D k}{D} = 0.033 Re_D^{0.8} Pr^{0.4} (Pr/Pr_s)^{0.25} \quad (12)$$

Denklemler ortalama batarya sıcaklığını elde etmek için düzenlenirse şu hale gelir:

$$\bar{T}_{batarya} = T_{akışkan} - \frac{\dot{Q}_{batarya}}{\pi k (\overline{Nu}_D H + \overline{Nu}_L D/2)} \quad (13)$$

Batarya grubunda meydana gelen basınç kaybı ise şöyle hesaplanır (Cengel 2014):

$$\Delta P = N_L f X \frac{\rho V_{maks}^2}{2} \quad (14)$$

Burada f sürtünme faktörü olup boru demetleri için sürtünme faktörü grafiklerinden Reynolds sayısına göre belirlenmiştir [16]. Düzeltme faktörü kare dizilim için 1 olarak kabul edilmiş olup N_L ise batarya sıra sayısıdır.

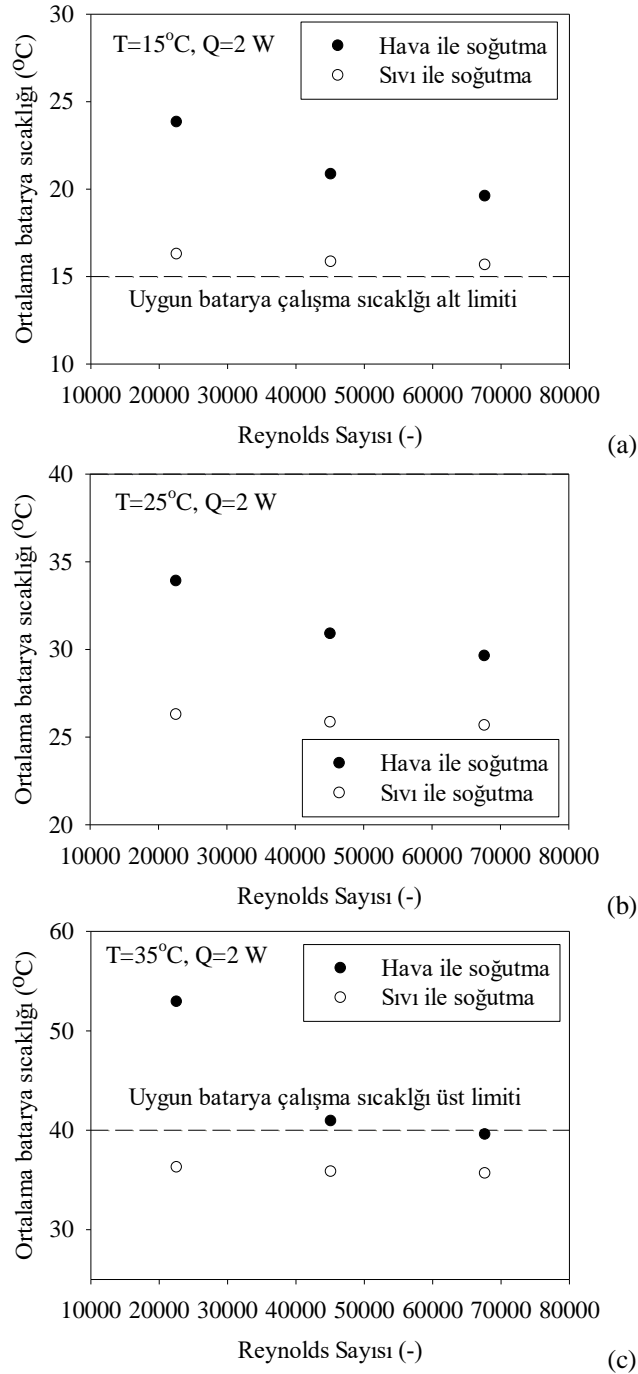
3. Bulgular

Ortalama batarya sıcaklığının hesaplanması için Denklemler (1)-(14) kullanılmış olup sabit Reynolds sayılarında akışkanların soğutma performansı belirlenmiştir. Hesaplamalarda göz önüne alınan Reynolds sayıları, akışkan hızları, kütle ve hacimsel debiler Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Çalışmada kullanılan akışkanlara ait Reynolds sayıları, akışkan hızı, kütle ve hacimsel debi değerleri

Grup	Değişken	Birim	Hava	Sıvı
1	Reynolds sayısı	-	22559	22559
	Hız	m/s	1	0.027
	Kütleli debi	kg/s	0.047	1.53
	Hacimsel Debi	m ³ /s	0.039	0.011
2	Reynolds sayısı	-	45118	45118
	Hız	m/s	2	0.054
	Kütleli debi	kg/s	0.0956	3.066
	Hacimsel debi	m ³ /s	0.070	0.022
3	Reynolds sayısı	-	67678	67678
	Hız	m/s	3	0.081
	Kütleli debi	kg/s	0.14	4.598
	Hacimsel debi	m ³ /s	0.11	0.032

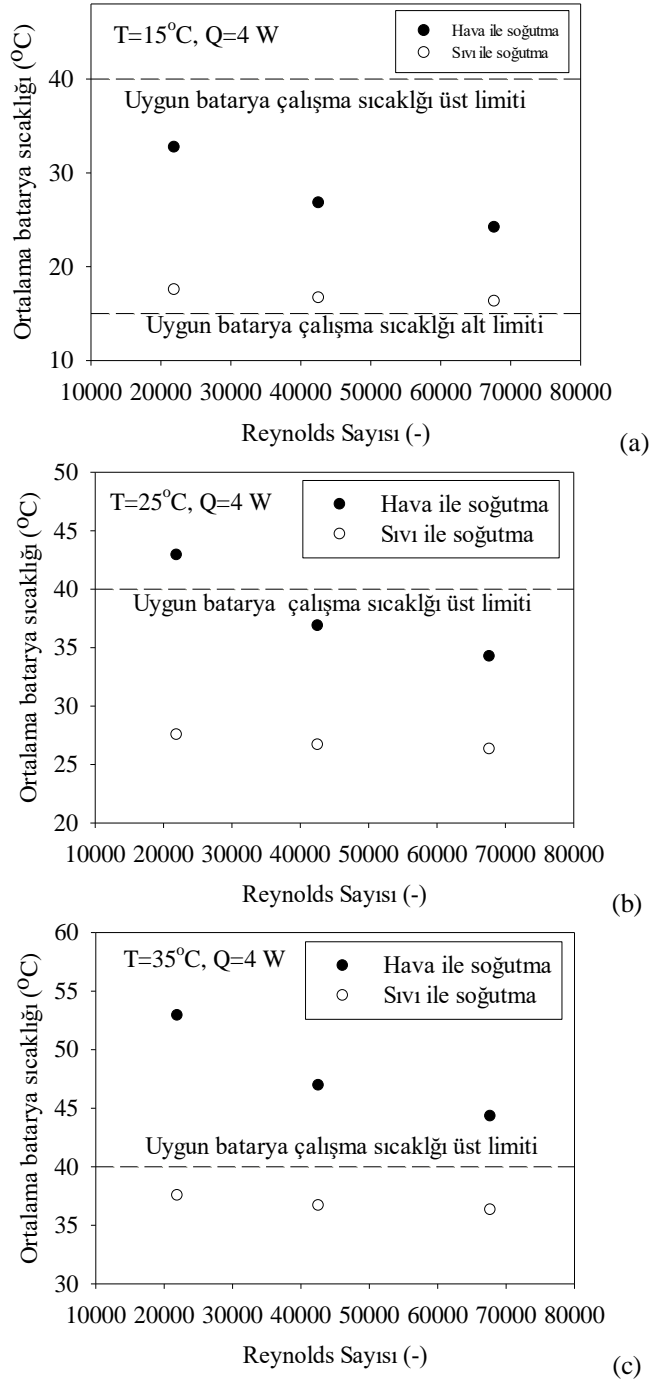
Hava ve sıvı giriş sıcaklıklarının 15°C, 25°C, 35°C ve batarya başına ısı üretiminin 2 W olduğu şartlarda ortalama batarya sıcaklığının Reynolds sayısı ile değişimi sırasıyla Şekil 4(a), Şekil 4(b) ve Şekil 4(c)’de verilmiştir. Bataryanın düşük deşarj hızında çalıştığını ve düşük miktarda gücün çekildiği durumu temsil eden 2 W’lık ısı üretim değerinde hava ve sıvı ile soğutmada akışkan giriş sıcaklıklarının 15°C ve 25°C olduğu durumlarda bataryaların istenilen çalışma sıcaklığı aralığında tutulabildiği görülmektedir. Hava giriş sıcaklığının 35°C olduğu durumda ise hava ile soğutmanın yeterli olmadığı ve sıvı ile soğutmanın ise limit değerini biraz üstünde yer aldığı görülmektedir. Buna ek olarak, artan akışkan hızı dolayısıyla Reynolds sayısı artışı ile hava ile soğutmada ortalama batarya sıcaklığında ciddi düşüşler görülürken sıvı ile soğutma durumunda ortalama batarya sıcaklığının neredeyse sabit kaldığı görülmektedir. Ortalama batarya sıcaklıklarındaki en fazla sıcaklık farkının düşük akışkan hızlarında



Şekil 4. Batarya başına 2 W'lık ısı üretimi ve farklı akışkan giriş sıcaklıkları için ortalama batarya sıcaklığının Reynolds sayısı ile değişimi a) $T_{\text{akışkan,giriş}}=15^{\circ}\text{C}$, b) $T_{\text{akışkan,giriş}}=25^{\circ}\text{C}$, c) $T_{\text{akışkan,giriş}}=35^{\circ}\text{C}$

olduğu gözlemlenmektedir. Maksimum sıcaklık düşümünün Şekil 4(a), Şekil 4(b) ve Şekil 4(c) için sırasıyla %20-%32, %13-%22 ve %10-%31 aralığında olduğu belirlenmiştir.

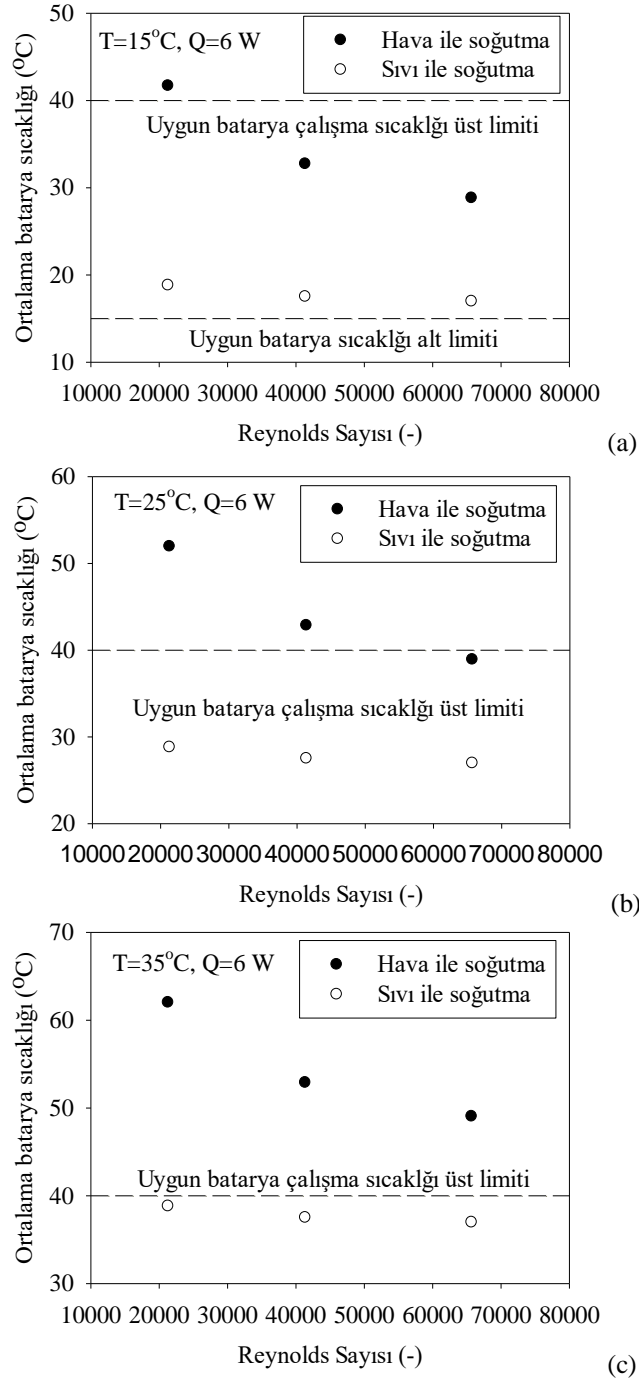
Hava ve sıvı giriş sıcaklıklarının 15°C , 25°C , 35°C ve batarya başına ısı üretiminin 4 W olduğu şartlarda ortalama batarya sıcaklığının Reynolds sayısı ile değişimi sırasıyla Şekil 5(a), Şekil 5(b) ve Şekil 5(c)'de verilmiştir. Bataryanın orta deşarj hızında çalıştığı durumu temsil eden orta gücün çekildiği durumu temsil eden 4 W'lık ısı üretim değerinde sadece 15°C ve 25°C giriş sıcaklıklarında hava ve sıvı soğutma ile bataryaların istenilen çalışma sıcaklığında tutulabildiği görülmüştür. Akışkan giriş sıcaklığının 35°C olması durumunda hava soğutmanın yeterli olmadığı soğutmanın sıvı soğutma şeklinde yapılması gerektiği görülmüştür. Maksimum



Şekil 5. Batarya başına 4 W'lık ısı üretimi ve farklı akışkan giriş sıcaklıkları için ortalama batarya sıcaklığının Reynolds sayısı ile değişimi a) T_{akışkan,giriş}=15°C, b) T_{akışkan,giriş}=25°C, c) T_{akışkan,giriş}=35°C

sıcaklık düşümünün Şekil 5(a), Şekil 5(b) ve Şekil 5(c) için sırasıyla %33-%46, %23-%36 ve %18-29 aralığında olduğu belirlenmiştir.

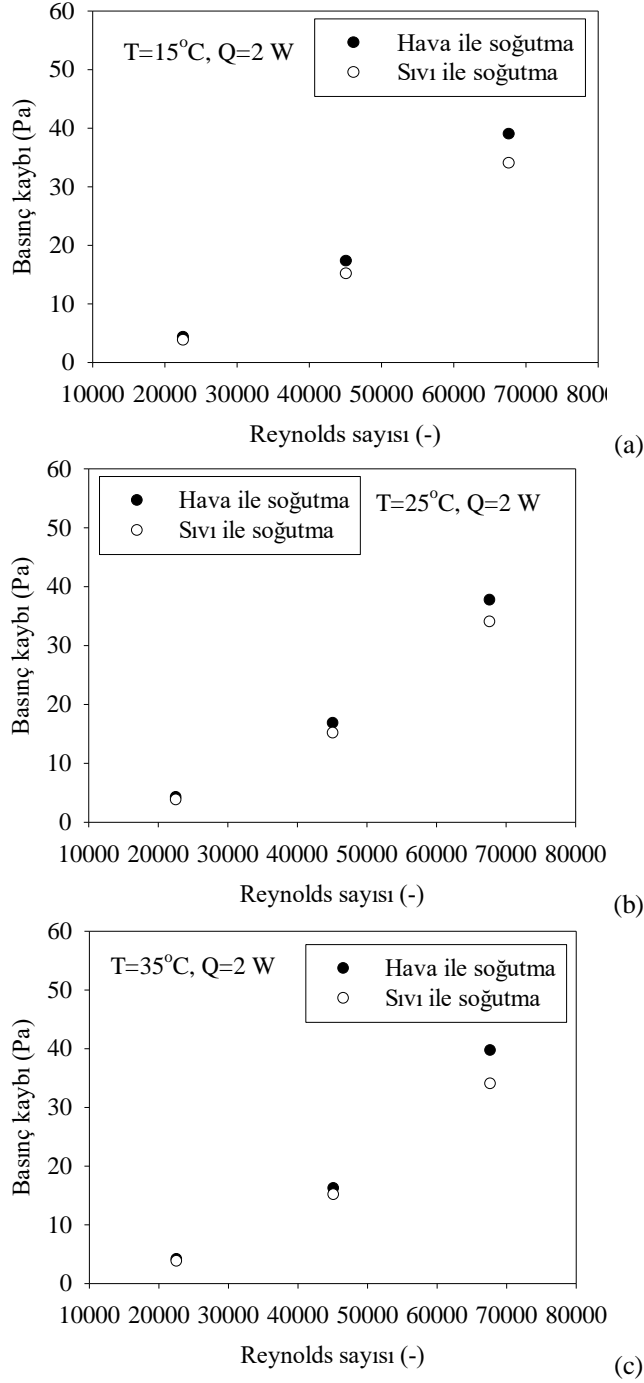
Hava ve sıvı giriş sıcaklıklarının 15°C, 25°C, 35°C ve batarya başına ısı üretiminin 6 W olduğu şartlarda ortalama batarya sıcaklığının Reynolds sayısı ile değişimi sırasıyla Şekil 6(a), Şekil 6(b) ve Şekil 6(c)'de verilmiştir. Bataryanın yüksek deşarj hızında çalıştığını ve dolayısıyla yüksek miktarda gücün çekildiği durumu



Şekil 6. Batarya başına 6 W'lık ısı üretimi ve farklı akışkan giriş sıcaklıkları için ortalama batarya sıcaklığının Reynolds sayısı ile değişimi a) $T_{\text{akışkan,giriş}}=15^{\circ}\text{C}$, b) $T_{\text{akışkan,giriş}}=25^{\circ}\text{C}$, c) $T_{\text{akışkan,giriş}}=35^{\circ}\text{C}$

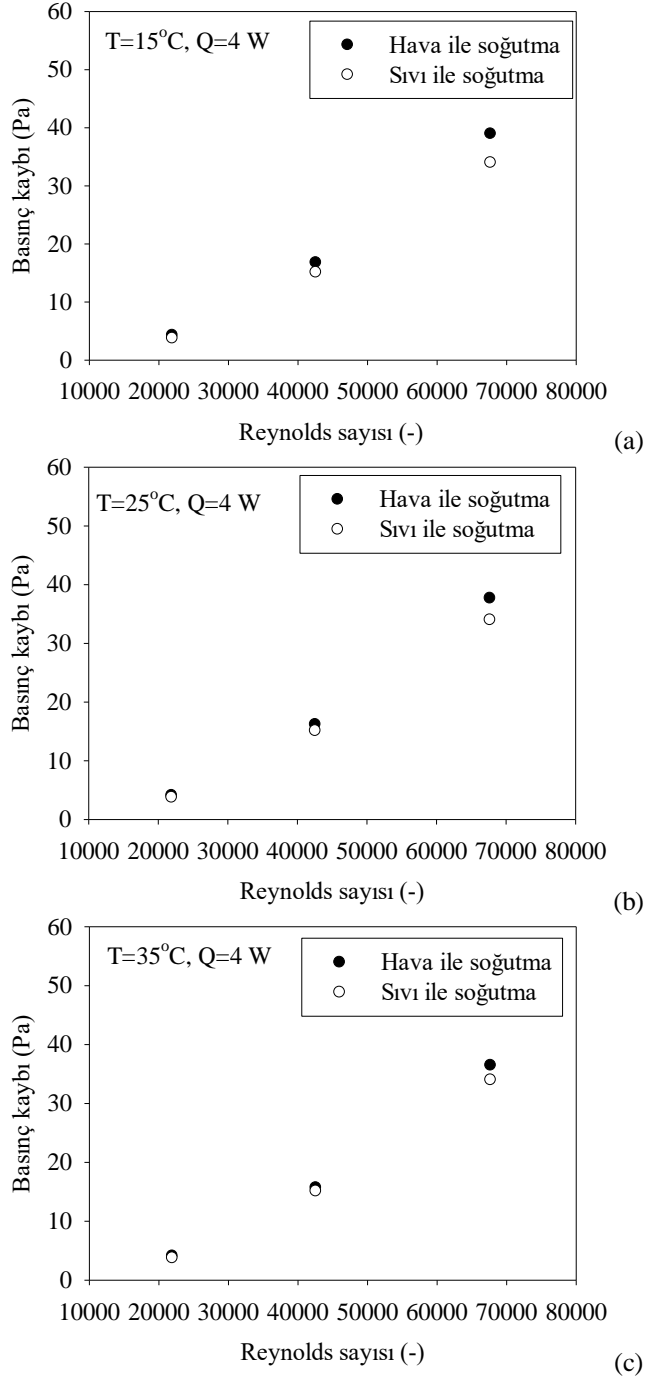
temsil eden ortalama gücün çekildiği durumu temsil eden 6 W'lık ısı üretim değerinde sadece 15°C giriş sıcaklığında en düşük hava hızı değeri dışında bataryaların istenilen çalışma sıcaklığında tutulabildiği görülmüştür.

Akışkan giriş sıcaklığında 25°C ve 35°C olduğu durumlarda sadece sıvı soğutma yeterli olurken hava soğutmanın yetersiz olduğu görülmüştür. Ortalama batarya sıcaklıklarındaki en fazla sıcaklık farkının düşük akışkan hızlarında olduğu durumda gözlemlenmektedir. Maksimum sıcaklık düşümünün Şekil 6(a), Şekil 6(b) ve Şekil 6(c) için sırasıyla %41-55, %31-%45 ve %25-%37 olduğu belirlenmiştir.



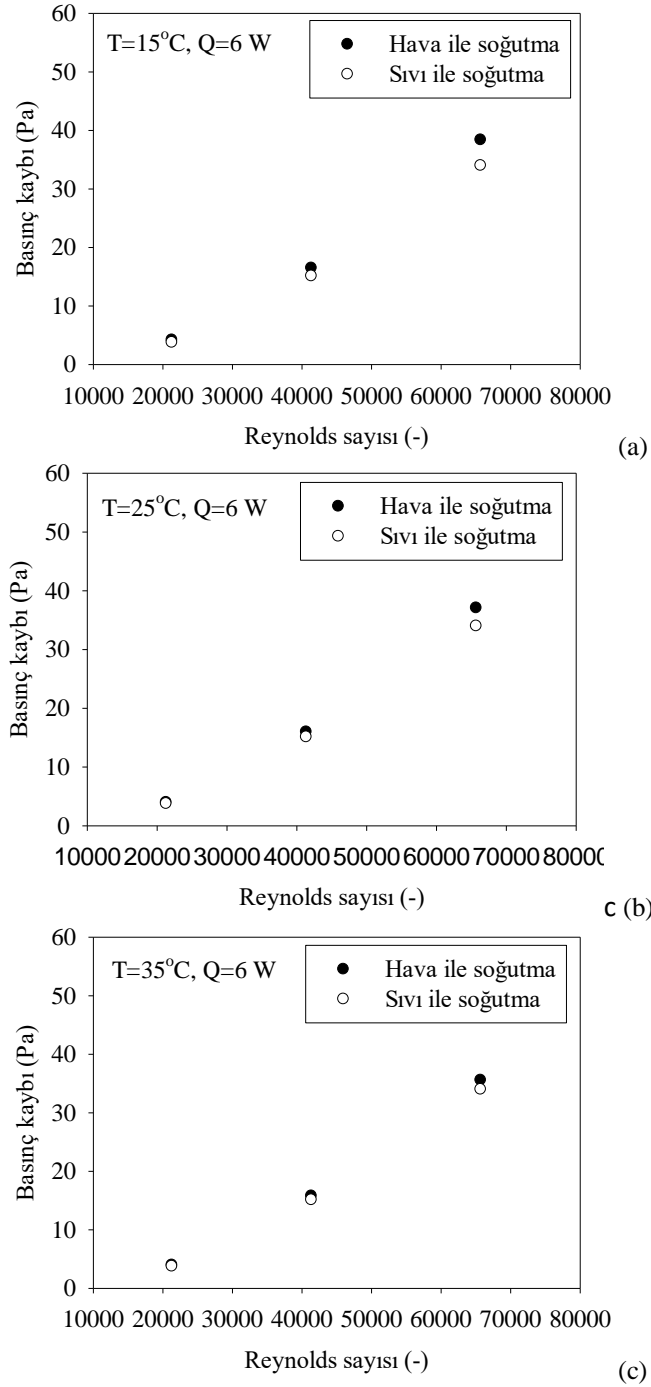
Şekil 7. Batarya başına 2 W'lik ısı üretimi ve farklı akışkan giriş sıcaklıkları için basınç kaybının Reynolds sayısı ile değişimi a) $T_{\text{akışkan,giriş}}=15^{\circ}\text{C}$, b) $T_{\text{akışkan,giriş}}=25^{\circ}\text{C}$, c) $T_{\text{akışkan,giriş}}=35^{\circ}\text{C}$

Bataryaların soğutulmasında ısı transferi açısından bakıldığında sıvı soğutmanın hava soğutmaya kıyasla daha başarılı olduğu görülmektedir ancak yapılacak tasarımda kullanılan akışkan ile ortaya çıkacak basınç kaybının da belirlenmesi önemlidir. Bu sayede sistemde kullanılacak fan veya pompanın kapasiteleri uygun olarak belirlenebilir. Göz önüne alınan çalışma şartları için hava ve sıvı soğutma kullanılması durumunda batarya grubunda ortaya çıkacak basınç kayıpları Şekil 7, Şekil 8 ve Şekil 9'da verilmiştir. Şekillerden de görüleceği üzere, sıvı soğutma ile ortaya çıkacak basınç kaybının hava soğutmayla karşılaştırıldığında çok az da olsa düşüktür. Bu



Şekil 8. Batarya başına 4 W'lik ısı üretimi ve farklı akışkan giriş sıcaklıkları için basınç kaybının Reynolds sayısı ile değişimi a) $T_{\text{akışkan,giriş}}=15^{\circ}\text{C}$, b) $T_{\text{akışkan,giriş}}=25^{\circ}\text{C}$, c) $T_{\text{akışkan,giriş}}=35^{\circ}\text{C}$

durum yoğunluğu ve viskozitesi daha yüksek olan sıvı akışkan kullanmasına rağmen, sıvı akışkanın havaya kıyasla daha düşük hızlarda kullanılması olarak açıklanabilir.



Şekil 9. Batarya başına 6 W'lık ısı üretimi ve farklı akışkan giriş sıcaklıkları için basınç kaybının Reynolds sayısı ile değişimi a) $T_{\text{akışkan,giriş}}=15^{\circ}\text{C}$, b) $T_{\text{akışkan,giriş}}=25^{\circ}\text{C}$, c) $T_{\text{akışkan,giriş}}=35^{\circ}\text{C}$

4. Tartışma ve Sonuç

Elektrikli araçlarda kullanılan silindirik lityum iyon bataryaların hava ve elektriksel olarak yalıtılan olan sıvı akışkan Novec 7200 ile soğutulması durumunda ortalama batarya sıcaklığının ve ortaya çıkacak basınç kaybının araştırıldığı bu parametrik çalışmada şu sonuçlara ulaşılmıştır:

- Sıvı ile soğutmada ortalama batarya sıcaklıkları hava ile soğutmaya kıyasla daha düşük olmaktadır.

- Düşük akışkan giriş sıcaklıklarında veya batarya ısıl yüklerinde hava soğutma yeterli olmaktadır. Yüksek akışkan giriş sıcaklıklarında veya batarya ısıl yüklerinde hava soğutma yeterli olmazken sıvı soğutma ile batarya uygun çalışma sıcaklıklarında tutulabilir.
- Batarya başına 2 W'lık ısı üretimi durumunda hava soğutma yerine sıvı soğutma kullanılarak ortalama batarya sıcaklığında maksimum %32'lik bir azalma meydana gelmektedir.
- Batarya başına 4 W'lık ısı üretimi durumunda hava soğutma yerine sıvı soğutma kullanılarak ortalama batarya sıcaklığında maksimum %46'lık bir azalma meydana gelmektedir.
- Batarya başına 6 W'lık ısı üretimi durumunda hava soğutma yerine sıvı soğutma kullanılarak ortalama batarya sıcaklığı maksimum %55'lik bir azalma meydana gelmektedir.
- Sıvı soğutma ile ortaya çıkacak basınç kaybı hava soğutmayla karşılaştırıldığında çok az da olsa düşüktür.
- Yüksek akışkan giriş sıcaklıklarında ve batarya ısıl yüklerindeki soğutma performansı göz önüne alındığında sıvı soğutmanın kullanımının hava soğutmaya kıyasla daha başarılı olduğu görülmektedir.

Kaynaklar

- [1] Tie SF, Tan CW. A review of energy sources and energy management system in electric vehicles. *Renewable Sustainable Energy Rev* 2013; 20: 82-102.
- [2] http://tehad.org/wp-content/uploads/2019/07/w-2019-TR_ilk-YARI-sat%C4%B1%C5%9F-rakamlar%C4%B1.jpg
- [3] Dincer I, Hamut HS, Javani N. *Thermal Management of Electric Vehicle Battery Systems*. John Wiley & Sons, 2016.
- [4] Yong, JY, Ramachandaramurthy VK., Tan KM, Mithulananthan, N.. A review on the state-of-the-art technologies of electric vehicle, its impacts and prospects. *Renewable Sustainable Energy Rev* 2015; 49: 365-385.
- [5] Lelie M, Braun T, Knips M, Nordman,H, Ringbeck F, Zappen H, Sauer D. Battery management system hardware concepts: An overview. *Appl. Sci.* 2018; 8(4): 534.
- [6] Wang Q, Jiang B, Li B, Yan, Y. A critical review of thermal management models and solutions of lithium-ion batteries for the development of pure electric vehicles. *Renewable Sustainable Energy Rev* 2016; 64: 106-128.
- [7] Siddique ARM, Mahmud S, Van Heyst B. A comprehensive review on a passive (phase change materials) and an active (thermoelectric cooler) battery thermal management system and their limitations. *J. Power Sources* 2018; 401: 224-237.
- [8] Park S, Jung D. Battery cell arrangement and heat transfer fluid effects on the parasitic power consumption and the cell temperature distribution in a hybrid electric vehicle. *J. Power Sources* 2013; 227: 191-198.
- [9] Li X, He F, Ma L. Thermal management of cylindrical batteries investigated using wind tunnel testing and computational fluid dynamics simulation. *J. Power Sources* 2013; 238: 395-402.
- [10] Wang T, Tseng KJ, Zhao J, Wei Z. Thermal investigation of lithium-ion battery module with different cell arrangement structures and forced air-cooling strategies. *Appl. Energy* 2014; 134: 229-238.
- [11] Yang N, Zhang X, Li G, Hua D. Assessment of the forced air-cooling performance for cylindrical lithium-ion battery packs: A comparative analysis between aligned and staggered cell arrangements. *Appl. Therm. Eng.* 2015; 80: 55-65.
- [12] Saw LH, Ye Y, Tay AA, Chong WT, Kuan SH, Yew MC. Computational fluid dynamic and thermal analysis of lithium-ion battery pack with air cooling. *Appl. Energy* 2016; 177: 783-792.
- [13] Jiaqiang E, Yue M, Chen J, Zhu H, Deng Y, Zhu Y, Zhang F, Wen M, Zhang B, Kang S. Effects of the different air cooling strategies on cooling performance of a lithium-ion battery module with baffle. *Appl. Therm. Eng.* 2018; 144: 231-241.
- [14] Shahid S, Agelin-Chaa, M. Development and analysis of a technique to improve air-cooling and temperature uniformity in a battery pack for cylindrical batteries. *Therm Sci Eng Prog* 2018; 5: 351-363.
- [15] Fan Y, Bao Y, Ling C, Chu Y, Tan X, Yang S. Experimental study on the thermal management performance of air cooling for high energy density cylindrical lithium-ion batteries. *Appl. Therm. Eng.* 2019; 155: 96-109.
- [16] Cengel Y. *Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications*. McGraw-Hill Higher Education, 2014.