



**ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA NANO PARÇACIK KATKILI
BATARYA SOĞUTMA SİSTEMLERİNİN
SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ**

Tuğçe TÜRKBAY

Yüksek Lisans Tezi

**Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı
Taşıt Tahrik ve Gç Sistemleri Programı
Danışman: Prof. Dr. Yasin VAROL
MAYIS-2018**

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA NANO PARÇACIK KATKILI BATARYA SOĞUTMA
SİSTEMLERİNİN SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
TUĞÇE TÜRK BAY
(152136101)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 08.05.2018

Tezin Savunulduğu Tarih : 25.05.2018

Danışman: Prof. Dr. Yasin VAROL (F.Ü) 
Diğer Jüri Üyeleri: Prof. Dr. Cengiz YILDIZ (F.Ü) 
Dr. Öğr. Üyesi D. Engin ALNAK (C.Ü) 

MAYIS 2018

ÖNSÖZ

Bu tez çalışması kapsamında günümüzde kullanımı hızla artmakta olan ve gelecekte oldukça yaygınlaşması ön görülen elektrikli araçların, batarya sistemlerinin termal yönetimi ve soğutulması amaçlanmıştır. Elde edilen sonuçların batarya sistemlerinde meydana gelen ısı sorunlarının çözümüne katkı sağlamasını ve gelecek çalışmalara referans olmasını temenni ederim.

Bu tez çalışmasının yürütülmesi esnasında TEKF. 17.19 numaralı proje kapsamında finansal destek sağlayan Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'ne (FÜBAP) teşekkür ederim.

Tez çalışmamda yol göstericiliğini, anlayışını ve desteğini benden esirgemeyen ve bana ufuk katan danışman hocam Prof. Dr. Yasin VAROL'a, Arş. Gör. Dr. Müjdat FIRAT hocama ve desteklerinden dolayı babam İsmail TÜRK BAY'a teşekkürlerimi sunarım.

Tuğçe TÜRK BAY

Elazığ - 2018

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ.....	II
İÇİNDEKİLER.....	III
ÖZET.....	IV
SUMMARY.....	V
ŞEKİLLER LİSTESİ	VI
TABLOLAR LİSTESİ.....	VIII
KISALTMALAR LİSTESİ.....	IX
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Elektrikli Araçlarda Kullanılan Batarya Çeşitleri.....	11
1.1.1. Nissan Leaf.....	12
1.1.2. Chevrolet Volt	13
1.1.3. Ford Focus	14
1.1.4. Mitsubishi I.....	15
1.2. Lityum-İyon Bataryanın İç Yapısı.....	16
1.2.1. Lityum-İyon Bataryadaki Kimyasal Reaksiyonlar.....	17
1.3. Lityum-İyon Batarya için Optimum Çalışma Şartları.....	18
1.3.1. Bataryadaki Isı Üretimi ve Isıl Sürüklenme.....	18
1.4. Elektrikli Araçlarda Kullanılan Soğutma Sistemleri.....	19
1.4.1. Hava Soğutmalı.....	20
1.4.2. Sıvı Soğutmalı.....	21
1.3.7. Faz Değiştiren Maddeler.....	21
2. MATERYAL METOT.....	22
2.1. Batarya Dizilimi.....	22
2.2. Ağ Yapısı.....	25
2.3. Sınır Şartları.....	27
3. BULGULAR.....	33
3.1. Hava Soğutmalı Batarya Modülü için Bulgular.....	33
3.2. Su Soğutmalı Batarya Modülü için Bulgular.....	48
3.3. Nano-Su Soğutmalı Batarya Modülü için Bulgular.....	60
4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	76
5. ÖNERİLER.....	77
KAYNAKLAR.....	78
ÖZGEÇMİŞ.....	81

ÖZET

Elektrikli araçlar, evrimini neredeyse tamamlamış ve üzerinde sayısız araştırmaların yapıldığı içten yanmalı motorların aksine gelişmekte olan, dünyanın her yerinden bilim insanlarının ilgisini çeken ve onları bu konuda araştırmaya teşvik eden dinamik bir araştırma alanıdır. Henüz yeni gelişmekte olmasından dolayı elektrikli araçlar üzerine yapılan her çalışmanın literatüre önemli bir katkısı vardır.

Elektrikli araçların enerji kaynağı olan elektriği depolayabilmesi için bataryaya ihtiyacı vardır. Bataryalar elektrik depolama kapasitesi, şarj/deşarj oranı ve hızı, araçta kapladığı alan ve ağırlığıyla elektrikli araçların performansını en çok etkileyen faktörlerin başında gelir. Özellikle yüksekdeşarj oranlarında, lityum-iyon pillerdeki aşırı ve düzensiz sıcaklık artışıyla ısıl sürüklenme denilen, batarya içerisindeki elektrokimyasal ve ekzotermik tepkimelerin sürekli devam etmesine yol açan olay gelişmektedir. Bu durumda daha da artan sıcaklığın etkisiyle bataryanın yanması ya da patlaması kaçınılmaz olabilir. Aynı şekilde araç kaza yaptığıında, bataryanın delinmesi durumunda anot ve katot arasındaki yüzey ortadan kalkacağı için aynı şekilde ısıl sürüklenme gerçekleşecektir. Araç performansını arttırmak temel amaç olarak görünse de araç dizaynında en önemli konu olan güvenliği arttırmak amacıyla da elektrikli araçlarda bataryaların soğutulması için batarya termal yönetim sistemlerine ihtiyaç duyulmaktadır.

Elektrikli araçların batarya sistemlerinde görülen ısınma sorunları doğrultusunda, bu tezin temel amacı, elektrikli araçlarda kullanılan ve elektrikli aracın performansını doğrudan etkileyen lityum-iyon bataryalardaki kimyasal reaksiyonların ekzotermik olmasından dolayı oluşan ısıl sürüklenmeyi önleyecek soğutucu sisteme sahip batarya termal yönetim sistemlerinin nümerik olarak modellemesini yapmaktır. Böylece literatüre alternatif bir batarya termal yönetim sistemi kazandırılması amaçlanmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Elektrikli Araçlar, Batarya Soğutma Sistemi, Nanoakışkan, Isı Transferi, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD)

SUMMARY

Numerical Investigation of Battery Thermal Management Systems with Nanoparticle Addition in Electric Vehicles

Electric vehicles are dynamic research area attracting scientists from all over the world and encouraging them to explore on the contrary internal combustion engines which have almost completed their evolution and have numerous investigations on them. Every work done has an important contribution to the literature of on electric vehicles since it is a new working area.

Electric vehicles need batteries to store electricity which is the basic energy source of them. Batteries are one of the main factors that affect the performance of electric vehicles with regard to their electric storage capacity, charge/discharge rate and speed, area covered by their volume and weight. Especially at high discharge ratios, the phenomenon of thermal runaway occurs that leads to the constant continuation of the electrochemical and exothermic reactions in the battery caused by excessive and irregular temperature increase in the lithium-ion batteries. In this case, the burning of the battery or the explosion may be inevitable due to the effect of increasing temperature. When the vehicle has accident, in case of breaking the layer between the anode and the cathode in the battery, thermal runaway occurs, as well. Although the main objective seems to increase the performance of the vehicle, battery thermal management systems are also required for cooling the batteries in electric vehicles in order to increase safety, which is the most important issue in vehicle design.

In view of the heating problems seen in battery systems of electric vehicles, the main purpose of this thesis is to model battery thermal management system numerically which has a cooling system that will accelerate the thermal runaway caused by exothermic chemical reactions in the lithium-ion batteries which are used in electric vehicles and directly affect the performance. Thus, it is aimed is to provide an alternative battery thermal management system to the literature.

Keywords: Electric Vehicles, Battery Cooling System, Nanofluid, Heat Transfer, Computational Fluid Dynamics (CFD)

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 1.1. Nissan Leaf'in 24 kWh'lik Li-ion batarya paketi [23].....	13
Şekil 1.2. Chevrolet Volt'un 16 kWh'lik Li-ion batarya paketi [23].....	14
Şekil 1.3. Elektrikli Ford Focus'un 23 kWh'lik Li-ion batarya paketi [23].....	15
Şekil 1.4. Li-ion bataryanın iç yapısı, (a) pozitif ve negatif elektrotların kutu içerisindeki görünümü, (b) bataryadaki bütün katmanların ayrıntılı şekli, (c) bataryadaki spiral yapının genel görünümü, (d) bataryanın dış görünüşü [24].....	16
Şekil 2.1. Panasonic marka Li-ion batarya modülü [32].....	23
Şekil 2.2. A123 marka Li-ion batarya modülü [33].....	23
Şekil 2.3. 2S5P diziliminin 20 mm, 50 mm ve 100 mm çıkış uzunluklarındaki ölçüleri....	24
Şekil 2.4. 2S10P ve 3S10P diziliminin 50 mm ve 100 mm çıkış uzunluğundaki ölçüleri..	25
Şekil 2.5. 2S5P, 2S10P ve 3S10P dizilimlerinin üç boyutlu görünüşleri.....	25
Şekil 2.6. Mesh optimizasyonu.....	26
Şekil 2.7. Kullanılan mesh yapısı.....	26
Şekil 2.8. Ansys-Fluent-Setup.....	27
Şekil 2.9. Sınır şartları.....	28
Şekil 2.10. Bataryadaki ısı üretimi.....	32
Şekil 3.1. Re=10, hava soğutmalı, 2S5P batarya dizilimi analiz sonuçları.....	36
Şekil 3.2. Re=100, hava soğutmalı, 2S5P batarya dizilimi analiz sonuçları.....	38
Şekil 3.3. Re=500, hava soğutmalı, 2S5P batarya dizilimi analiz sonuçları.....	39
Şekil 3.4. Re=10, hava soğutmalı, 2S10P batarya dizilimi analiz sonuçları.....	41
Şekil 3.5. Re=100, hava soğutmalı, 2S10P batarya dizilimi analiz sonuçları.....	42
Şekil 3.6. Re=500, hava soğutmalı, 2S10P batarya dizilimi analiz sonuçları.....	43
Şekil 3.7. Re=10, hava soğutmalı, 3S10P batarya dizilimi analiz sonuçları.....	45
Şekil 3.8. Re=100, hava soğutmalı, 3S10P batarya dizilimi analiz sonuçları.....	46
Şekil 3.9. Re=500, hava soğutmalı, 3S10P batarya dizilimi analiz sonuçları.....	48
Şekil 3.10. Re=10, su soğutmalı, 2S5P batarya dizilimi analiz sonuçları.....	50
Şekil 3.11. Re=100, su soğutmalı, 2S5P batarya dizilimi analiz sonuçları.....	51
Şekil 3.12. Re=500, su soğutmalı, 2S5P batarya dizilimi analiz sonuçları.....	52
Şekil 3.13. Re=10, su soğutmalı, 2S10P batarya dizilimi analiz sonuçları.....	54
Şekil 3.14. Re=100, su soğutmalı, 2S10P batarya dizilimi analiz sonuçları.....	55

Şekil 3.15. Re=500, su soğutmalı, 2S10P batarya dizilimi analiz sonuçları.....	56
Şekil 3.16. Re=10, su soğutmalı, 3S10P batarya dizilimi analiz sonuçları.....	57
Şekil 3.17. Re=100, su soğutmalı, 3S10P batarya dizilimi analiz sonuçları.....	59
Şekil 3.18. Re=500, su soğutmalı, 3S10P batarya dizilimi analiz sonuçları.....	60
Şekil 3.19. Re=10, nano parçacık-su karışım oranları için sıcaklık dağılımı, 2S5P.....	62
Şekil 3.20. Re=100, nano parçacık-su karışım oranları için sıcaklık dağılımı, 2S5P.....	62
Şekil 3.21. Re=500, nano parçacık-su karışım oranları için sıcaklık dağılımı, 2S5P.....	63
Şekil 3.22. Re=10, nano parçacık-su karışım oranları için sıcaklık dağılımı, 2S10P.....	64
Şekil 3.23. Re=100, nano parçacık-su karışım oranları için sıcaklık dağılımı, 2S10P.....	65
Şekil 3.24. Re=500, nano parçacık-su karışım oranları için sıcaklık dağılımı, 2S10P.....	66
Şekil 3.25. Re=10, nano parçacık-su karışım oranları için sıcaklık dağılımı, 3S10P.....	67
Şekil 3.26. Re=10, nano parçacık-su karışım oranları için sıcaklık dağılımı, 3S10P.....	67
Şekil 3.27. Re=500, nano parçacık-su karışım oranları için sıcaklık dağılımı, 3S10P.....	68
Şekil 3.28. Hava ve suyun Prandtl sayıları.....	69
Şekil 3.29. Hava ve su soğutmalı sistemde ulaşılan maksimum sıcaklıklar.....	70
Şekil 3.30. Hava ve su soğutmalı sistemdeki sıcaklık dağılımı.....	71
Şekil 3.31. Re=10, 100, 500 için su soğutmalı batarya modülünde ulaşılan maksimum sıcaklıklar.....	72
Şekil 3.32. Su soğutmalı batarya modülünde ulaşılan bataryalar üzerinde ulaşılan maksimum sıcaklıklar.....	73
Şekil 3.33. Su soğutmalı batarya modüllerinde nano etkisi.....	74
Şekil 3.34. Sudaki değişen nano yüzdesine bağlı olarak sistemde ulaşılan maksimum sıcaklıklar.....	75
Şekil 3.35. Su soğutmalı sistemde bataryanın ısıl iletkenlik katsayısına bağlı ulaşılan maksimum sıcaklıklar.....	76

TABLÖLAR LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 1.1. Elektrikli araçlarda kullanılan bataryaların karakteristik özellikleri [21]....	12
Tablo 1.2. Li-ion bataryaların katot malzemesine göre özellikleri.....	17
Tablo 1.3. Bataryaların deşarj anındaki çalışma sıcaklıkları.....	18
Tablo 1.4. Batarya soğutma yöntemlerinin birbiriyle kıyaslanması.....	19
Tablo 1.5. Tam ve hibrit elektrikli araçlarda kullanılan batarya soğutma yöntemleri...	20
Tablo 2.1. Panasonic NCR18650 Li-ion bataryanın özellikleri.....	22
Tablo 2.2. Suyun 300 K'deki özellikleri.....	29
Tablo 2.3. Havanın 300 K'deki özellikleri.....	29
Tablo 2.4. Al ₂ O ₃ 'ün özellikleri.....	30
Tablo 2.5. Nano su özellikleri.....	32

KISALTMALAR LİSTESİ

Al₂O₃	: Alüminyum Oksit
BTYS	: Batarya Termal Yönetim Sistemi
C_p	: Isı Kapasitesi
EPA	: Çevre Koruma Ajansı
FDM	: Faz Değiştiren Malzeme
k	: Isıl İletkenlik Katsayısı
Li-ion	: Lityum-İyon
LiMn₂O₄	: Lityum Manganez Oksit
HAD	: Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
NiMH	: Nikel-Metal Hidrat
Ni-Zn	: Nikel-Çinko
Pr	: Prandtl Sayısı
Re	: Reynolds Sayısı
SP	: Seri Paralel

1. GİRİŞ

Otomotiv sektörünün büyük bir bölümünü oluşturan içten yanmalı motorlu araçlar için temel enerji kaynağı olan petrolün tükenebilir enerji kaynağı olmasından dolayı otomotiv sektörü alternatif enerji kaynaklarına yönelmiştir. Otomotiv üreticileri artan enerji sıkıntısı ve çevre kirliliği nedeniyle yenilenebilir enerji ve çevreci araçlar üzerinde yoğunlaşmak durumunda kalmışlardır. Elektrikli araçlar, hibrit elektrikli araçlar ve yakıt pilli elektrikli araçlar geleneksel araçlara göre daha yüksek verimli ve çevreci araçlardır. Gelişmekte olan elektrikli araç piyasası, performansın temel ölçütü olan özgül güç ve özgül enerji yoğunluğu yüksek bataryaları talep etmektedir. Elektrikli araçların performansları bataryalar tarafından belirlenir. Bu yüzden, bataryaların güç performansını ve ömrünü arttırmak çok önemlidir. Elektrikli araçlarda güç iyileştirmeleri için büyük ölçekli bataryalara ve yüksek akım deşarjına ihtiyaç vardır. Bu bataryalar yüksek akım değerlerindeki hızlı şarj ve deşarj çevrimlerinde, örneğin hızlı ivmelenmede, çeşitli kimyasal ve elektrokimyasal reaksiyonla fazlaca ısı üretir. Güvenlik riskleri, aşırı ısınma, yanma ve patlama, bataryanın içinde veya paketinde içerdiği termal enerjinin miktarı ile artar. İlaveten modüldeki veya paketteki aşırı veya istikrarsız sıcaklık artışları bataryanın ömrünü büyük ölçüde azaltır. Bu nedenle, bütün batarya çeşitlerinde verimli ısı dağılımı ve ısıl sürüklenme emniyeti için başarılı bir batarya termal yönetim sistemine (BTYS) ihtiyaç duyulur.

Elektrikli araçlardaki batarya soğutma sistemleri üzerine birçok çalışma yapılmıştır. Yapılan akademik çalışmalar şu şekildedir;

Pesaran ve arkadaşları [1] yaptıkları incelemede elektrikli ve hibrit araçların batarya termal yönetim sistemlerinin tasarımları, karşılaşılan problemler ve farklı soğutma sistemleri üzerinde durmuşlardır. Yapılan çalışmaya göre iyi dizayn edilmiş bir termal yönetim sistemi için her iki araç türünde de batarya paketlerinin iyi bir şekilde dizayn edilmesi gerekmektedir. Hava kullanılan bir soğutma sisteminde ısı transferi ortamı sıvı kullanılan ortama göre daha az karmaşıktır ve daha az verimlidir. Hibrit araçlarda paralel yerleştirilmiş bataryalar için havalı termal yönetim yeterliyken, elektrikli araçlar ve hibrit araçlarda seri yerleştirilmiş bataryalar için sıvı temelli sistemler sıcaklığı optimum seviyede tutmak için gerekebilir. Nikel-metal hidrat bataryalar, lityum-iyon ve kurşun-asit bataryalara göre daha detaylı bir termal yönetim sistemi gerektirir. Li-ion pillerin yüksek çalışma sıcaklıklarında tehlikeli olmasına karşın düşük sıcaklıklarda performansı düşer. Batarya termal yönetim

sisteminin soğutma gerektirdiği kadar soğuk çevre sıcaklıklarında ısıtma sağlamasını da gerektirmektedir. Bataryaların konumlandırılmasının bütün termal yönetim sistemleri üzerinde güçlü bir etkisi vardır.

Chen ve arkadaşları [2] yaptıkları çalışmada dört farklı batarya soğutma sistemini incelemiştir: hava soğutma, doğrudan sıvı soğutma, dolaylı sıvı soğutma ve kanatçıklı soğutma. Bu sistemlerin verimlilikleri değerlendirmek amacıyla elektrikli araçlar için tasarlanan, büyük kapasiteli Li-ion bataryaları kullanılmıştır ve verimlilik hesabında temel kıstaslar soğutucunun parazit güç tüketimi, maksimum sıcaklık artışı, bataryadaki sıcaklık dağılımları, soğutucu sisteminin sisteme eklediği ek ağırlıktır. Üç boyutlu, genişliği 169 mm, uzunluğu 179 mm ve kalınlığı 14 mm olan prizmatik geometriye sahip, 35 Ah kapasitesinde Li-ion batarya tüm deneyler için kullanılmıştır. Bataryanın üç boyutlu geometrisi ANSYS Fluent programının batarya modülü kullanılarak modellenmiştir. Eşdeğer devre parametreleri MATLAB programı kullanılarak bataryaların şarj ve deşarj datalarından hesaplanmıştır. Sonuçlar, bir hava soğutma sisteminin, aynı sıcaklık değerini korumak için diğer yöntemlere göre 2 ila 3 daha kat fazla enerjiye ihtiyaç duyduğunu göstermektedir. Dolaylı bir sıvı soğutma sistemi en düşük maksimum sıcaklık artışı göstermiştir. Bir kanatçıklı soğutma sistemi sisteme yaklaşık bataryanın % 40'ı ekstra ağırlık eklediği tartışılmıştır. Dolaylı sıvı soğutma sisteminin ise dolaysız soğutma sistemine göre daha pratik olduğu görülmüştür.

Zhao ve arkadaşları [3] hava soğutmalı sistemin ısı transferi karakteristiklerini kapsamlı şekilde anlayabilmek için hava soğutmasının nümerik simülasyonunu silindirik Li-ion batarya sistemi için ANSYS Fluent 14.0 programında modellemiştir. Üç farklı silindirik Li-ion batarya modelleri ve kapasiteleri sırasıyla 18650, 2.5 Ah; 26650, 3.2 Ah; 42110, 10 Ah; çapları ve uzunlukları sırasıyla 18 mm x 65 mm, 26 mm x 65 mm, 42 mm x 110 mm olarak seçilmiştir. 24 adet batarya 4S6P (4 seri, 6 paralel) olacak şekilde batarya paketi dizayn edilmiştir. Şarj ve deşarjla ısıtılan bataryadaki hava soğutma karakteristikleri ventilasyon türü ve hızları, komşu bataryalar arasındaki aralık, çevre sıcaklığı ve giren havanın sıcaklığı ve batarya çapı parametreleri değiştirilerek incelenmiştir. Sonuçlar hava giriş hızının arttırılmasıyla bölgesel sıcaklık farklarının ilk olarak arttığını daha sonra düştüğünü göstermiştir. Akım yönündeki batarya sayısının fazla olmaması gerektiği bulunmuştur. Bataryalar arası mesafeler küçük olduğunda bölgesel sıcaklık farklarının ve maksimum sıcaklığın fazla olduğu, mesafenin çok büyük olduğunda bölgesel sıcaklık farklarının ve maksimum sıcaklığın daha fazla olduğu ve bunun da aralık azaldıkça havanın

giriş hızının artmasından kaynaklandığı, 4S6P 42110 batarya paketindeki en uygun aralığın 5-6 mm olduğu bulunmuştur.

Yang ve arkadaşları [4] Li-ion batarya paketi için hava soğutmasının termal performansa etkisini araştırmıştır. 32 adet silindirik batarya elemanından oluşan batarya paketi için termal bir model geliştirilmiş ve yönetici akışkan denklemleriyle nümerik çözüm yapılmıştır. Bataryanın içindeki ısı üretim oranı C programında sonlu farklar yöntemi kullanarak, iki boyutlu Li-ion batarya modeli baz alınarak hesaplanmıştır. Hücreler ve hava akımı arasındaki radyal aralığın hava soğutmalı sistemin termal performansına etkileri nümerik simülasyonlar ile araştırılmıştır. Nümerik modelde 8 batarya elemanı ekselel bağlantılı olarak paketi meydana getirmiştir. Soğutucu hava, hava girişinden bataryalar arasındaki boşluğa gönderilmiştir. Batarya paketinin üç boyutlu, zamana bağlı simülasyonu ANSYS Fluent 14.5 tarafından gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, radyal aralığın artırılmasının ortalama bir sıcaklık artışına yol açtığını, ancak batarya takımının sıcaklık istikrarı açısından fayda sağladığını göstermiştir. Daha büyük bir radyal aralık, soğutma sisteminin güç maliyetini önemli ölçüde azaltabileceği, ancak alan verimliliğinin düşmesine neden olacağı görülmüştür. Daha büyük bir hava akımının, pil takımındaki sıcaklık istikrarına fayda sağladığı bulunmuştur. Bu çalışmada batarya soğutma sisteminin farklı parametrelerde tasarımları için güç maliyetinin, alan verimliliğinin ve sıcaklık homojenliğinin değerlendirilmesine dayanan optimal bir bölge sunulmuştur.

Wang ve arkadaşları [5] çalışmalarında farklı şekillerde yerleştirilen silindirik Li-ion bataryaların termal davranışlarını ve zorlanmış hava soğutmasının etkisini incelenmişlerdir. İlk olarak, 1 x 24, 3 x 8 ve 5 x 5 dizili dikdörtgen düzen, 19 hücreli altıgen düzenleme ve 28 hücreli dairesel düzenleme içeren farklı hücre düzenleme yapıları altındaki batarya paketinin termal performansını araştırmışlardır. Buna ek olarak, hava soğutma stratejileri için, batarya modülündeki sıcaklık istikrarını arttırmak için farklı noktalara yerleştirilen fanların etkisi araştırılmıştır. Simulasyon için ANSYS Icepack 14.5 kullanılmıştır. Çalışma sonucunda zorlanmış hava soğutmasının verimli bir şekilde batarya modülünün sıcaklığını düşürdüğü, havanın geçtiği uzunluk ve kesitin soğutma kapasitesini etkilediği görülmüştür. Yapılan çalışmada fanın yerleştirildiği en iyi konumun bataryaların şekli ne olursa olsun batarya paketinin üzerinde olduğu görülmüştür. Zorlanmış hava soğutmasının performansının en aksisimetrik modül yapısında olduğu görülmüştür. Bütün yapılar içerisinde 5x5 kübik yapının soğutma oranı ve fiyat bakımından en iyi olduğu, altıgen batarya diziliminin alan kullanımı bakımından en iyi olduğu görülmüştür.

Tong ve arkadaşları [6] çalışmalarında bir boyutlu, interaktif bir şekilde iki boyutlu termal akışkan ile eşleşen ve zorlanmış hava konveksiyonu ile soğutulan Lityum iyon bataryanın termal-elektrokimyasal modelini incelemişler ve nümerik olarak çözmüşlerdir. Bu çift yaklaşım modeli, modüldeki her bir batarya elemanının içindeki taşınımı çözdüğü ve böylece çoklu zaman ve uzunluğu kapsadığı için daha eşsiz ve detaylı yapmıştır. Modüldeki bataryalar 18650, silindirik olarak seçilmiş, A123 Hymotion temel alınarak modüldeki yerleştirmeleri yapılmış ve ilk oranı 1 C olarak başlayan farklı deşarj değerlerindeki sıcaklık dağılımları incelenmiştir. Modelin matematiksel çözümü, sonlu eleman çözücüsü olan COMSOL Multiphysics 4.4 kullanılarak çözülmüştür. Soğutma performansı havanın giriş hızı, bataryaların dizilimi, bataryalar arası mesafe, geri hava akımının olmasına bakılarak değerlendirilmiştir. Batarya modülünün maksimum sıcaklığının hem hava giriş hızının artırılarak hem de bataryalar arasındaki mesafenin azaltılarak sağlandığı görülmüştür. Diğer yandan bataryalar arasında daha istikrarlı bir sıcaklık dağılımına hava giriş hızının artırılması, bataryaların zikzak şeklinde yerleştirilmesi ve akımın yüksek frekansta tersinimini sağlayarak ulaşılabileceği görülmüştür. Aynı zamanda havanın giriş hızının artırılması ve ters frekansın sisteme parazit yük olacağı ve zikzak şeklinde dizaynın modülün hacmini büyüteceği görülmüştür.

Sabbah ve arkadaşları [7] yaptıkları çalışmada faz değiştiren maddeli (FDM) pasif soğutma sistemi ile aktif hava soğutma sistemini karşılaştırmışlardır. Nümerik simülasyonlar, elektrikli araçlara uygun kompakt Li-ion batarya paketlerinin farklı deşarj oranları, farklı çalıştırma sıcaklıkları için farklı ortam sıcaklıkları kullanılarak yapılmıştır. Matematiksel model için 4S5P ye göre dizayn edilen (4 batarya elemanı seri ve 5 dizi paralel) 68 modülden oluşan batarya paketi kullanılmıştır. Aynı paket düzeni ve sayısı deneysel sonuçları elde etmek için kullanılmıştır. Batarya paketi, Ford Escape Hibrit'teki mevcut NİMH batarya paketini değiştirebilmek için bu araca göre özel olarak dizayn edilmiştir. Her bir modül, piyasada satılan 1.5 Ah, 18650 modelindeki 20 adet, yüksek güçlü Li-ion batarya elemanından oluşmuştur. Her bir modül 14.4 V ve 7.5 Ah kapasite değerinde sahiptir. Nümerik sonuçlar deneysel sonuçlarla kıyaslanmıştır. Aktif soğutmada aynı hızdaki batarya elemanları arasındaki boşluktan hava geçirilirken, FDM soğutmada mikro kompozit grafit-FDM matriks aynı sıradaki batarya elemanlarının etrafında kullanılmıştır. Sonuçlar stresli şartlarda, örneğin yüksek deşarj ve çalıştırma oranlarında ya da yüksek ortam sıcaklığında (40-45 °C), etkili bir fan kullanılmadıkça hava soğutmasının batarya elemanındaki sıcaklığı istenilen çalışma değerlerinde tutmak için uygun bir termal yönetim

sistemi olmadığını göstermiştir. Diğer taraftan FDM'li pasif soğutma sistemiyle ek bir fan enerjisi olmadan aynı stres şartlarında istenilen çalışma sıcaklığı değerlerine ulaşıldığı görülmüştür.

Ling ve arkadaşları [8] çalışmalarında havanın doğal konveksiyonunun yetersiz soğutmasından kaynaklanan FDM'deki ısı birikiminin termal yönetim sisteminde hatalara yol açtığını göstermiştir. Yaptıkları deneysel düzenekte 20 adet, silindirik 18650 Li-ion batarya 5S4P (5 batarya seri ve 4 batarya paralel) yöntemine göre bağlanmıştır. İki komşu bataryanın merkezi arasındaki mesafe 30 mm olarak belirlenmiştir. Isıl çiftler bağlanarak sistemdeki maksimum sıcaklık ve batarya paketinin içindeki maksimum sıcaklık farkı ölçülmüştür. 2 C şarj ve 1.5 C deşarj oranıyla iki çevrimden sonra batarya paketindeki çalışma sıcaklığı güvenlik limiti olan 60 °C'nin dışına sürekli çıkmaktadır. Nümerik çalışması ANSYS Fluent'te bataryada ısı artışına neden olan kapasitanstaki yığın modeli kullanılarak yapılmıştır. Daha sonra çalışmalarında FDM ile zorlanmış konveksiyonel havanın birleşimden oluşan bir hibrit çalışma yapılmıştır. Bu kombine sistem ısı birikimini başarıyla engellediği ve bütün çevrim boyunca maksimum sıcaklığın 50 °C'nin altında kalmasını sağladığı görülmüştür. Havanın hızı üzerine yapılan çalışmalar, zorlanmış konveksiyonel havanın FDM'nin termal enerji depolama kapasitesini iyileştirmede kritik rol oynarken, FDM'nin termofiziksel özelliklerinin maksimum sıcaklık artışını ve batarya paketindeki sıcaklık istikrarını belirlediğini göstermiştir.

Jiang ve arkadaşları [9] yaptıkları çalışmada elektrikli araçtaki BTYS'de kullanılan FDM'nin ısı transferinin artırılmasını parafin/bakır köpük kullanarak deneysel olarak araştırmışlardır. Deneyde silindirik, 42110 model (42 mm çap ve 110 mm uzunluk), kapasitesi 10 Ah olan LiFePO₄ 24 adet batarya kullanılmıştır. Bataryalar çapraz düzenlemeyle, pozitif bağlantı ucu, negatif bağlantı ucu-pozitif bağlantı ucu, özellikle ortadaki bölgesel yüksek sıcaklığı önlemek için bağlanmıştır. Bataryalar 12S2P şeklinde modüle yerleştirilmiş ve modülün voltajı 38 V, kapasitesi 20 Ah'dir. Bataryaların arası parafin/bakır köpük kompozit FDM ile doldurulmuştur. Parafinin erime noktası 37 °C, iç ısısı 180 kJ/kgK, termal iletkenliği 0.2 W/mK'dir. Bakır köpüğün değerleri 20 gözenek/inch ve öz kütlesi 0.4 g/cm³'tür. Bataryalar ve batarya modülü öncelikle NEWARE Battery Testing System ile şarj ve deşarj edilmiştir. Soğutucu sistem elektrikli araca montaj edildikten sonra tekrar gerçek yol testi maksimum 65 km/h hızla yapılmıştır. Sonuçlar ortam sıcaklığı 29 °C ve 33 °C olduğunda, BTM sisteminin maksimum sıcaklığı 40.89 °C ve 42.33 °C ve bataryalar arası sıcaklık farkının sırasıyla 3.24 °C ve 4.08 °C olduğu görülmüştür.

BTYS elektrikli araca monte edildiğinde, maksimum sıcaklık ve yerel sıcaklık farkı sırasıyla 38.94°C ve 2.85°C olduğu görülmüştür. Parafin/bakır köpüğün, BTYS sistemi için etkili ve uygulanabilir olduğu belirtilmiştir.

Moraga ve arkadaşları [10] güneş enerjili yarış arabalarında Li-ion bataryaların soğutma sistemini çoklu FDM'ler kullanarak araştırmıştır. Tipik bir güneş enerjili yarış arabasında batarya paketleri 6 Li-ion bataryanın paralel bağlanmasından oluşturulur. Nümerik sonuçlar sonlu hacimler yöntemiyle ANSYS Fluent programında çözülmüştür. Kaprik asit, Eicosane, Dekahidrat Sodyum Karbonat ve Oktadekan'dan oluşan dört farklı FDM seçilmiştir ve bataryanın bir veya üç tabakasının etrafına yerleştirilmiştir. FDM katı fazdayken üniform sıcaklık 294.15 K, doğal dış ısı konveksiyonunun ısı transfer katsayısı $h=7 \text{ W/m}^2\text{K}$ ve ortam sıcaklığı 294.15 K ve 303.15 K olarak kabul edilmiştir. Termal performansın zamana bağlı sonuçlarını elde etmek için farklı deşarj oranlarında bataryanın ısı üretmesi sağlanmıştır. Sonuçlar, FDM ile bataryadaki baskın ısı transferi türünün iletim olduğunu ve FDM'nin erimesinin 7 dakika sonra başladığını göstermiştir. 14.25 dakika sonra tamamen sıvı hale geçildiği belirtilmiştir. Ayrıca bataryanın etrafındaki FDM'nin farklı konfigürasyonundan 5 mm Kaprik asit, 2.9 mm Dekahidrat Sodyum Karbonat, 4.3 mm Eicosane ve tek bir tabaka 14.3 mm Dekahidrat Sodyum Karbonat içeren çoklu FDM, bataryanın maksimum sıcaklığını FDM'siz bataryaya göre yaklaşık 20.9-23.2 K azaltmıştır. Bu sonuç Dekahidrat sodyum karbonat FDM'nin en yüksek gizli ısıya ve en düşük erime noktasına sahip olmasıyla sağlanmıştır.

Karimi ve arkadaşları [11] yaptıkları çalışmada ince yassı batarya şeklini kullanmıştır. 20 batarya ünitesi seri şekilde birbirine bağlanmıştır. 16 cm genişliğinde ve 23 cm uzunluğundaki her batarya ünitesi paralel bağlı 10 batarya ünitesinden oluşmuştur. Bir bataryanın kapasitesi 20 Ah, akım yoğunluğu 5.4 mA/cm^2 'dir. Soğutma yöntemlerinden doğal konveksiyon, zorlanmış konveksiyon ve FDM uygulamalarının nümerik analizleri yapılmıştır. Nümerik sonuçlar, doğal hava konveksiyonuyla istenmeyen yüksek sıcaklık değerlerine çıkılabileceğini, batarya paketindeki zorlanmış hava ve sıvı konveksiyonla FDM uygulamalarında paketin içerisinde bataryanın dayanıklılığını olumsuz etkileyen dengesiz sıcaklık/voltaj dağılımlarına yol açılabileceği görülmüştür.

Khateeb ve arkadaşları [12] FDM'li termal batarya yönetim sistemini elektrikli scooter için tasarlamıştır. Çalışma deneysel olarak yürütülmüş, Zappy marka elektrikli scooter içerisindeki mevcut kurşun-asit bataryalar lityum-iyon bataryalarla değiştirilmiştir. Çalışma 9 adet 18650 Li-ion batarya elemanının erime noktası 41-44 °C arasında olan FDM

ile çevrelenmesiyle yapılmıştır. FDM'nin düşük ısı transfer katsayısı ve düşük ısıl iletkenliğinin üstesinden gelmek için batarya modülüne bağlı kanatçıklar ve FDM'nin içerisinde alüminyum köpük kullanılmıştır. Kanatçıkların uzunlukları ve sayısı numerik yöntemlerle hesaplanmıştır. Sadece FDM'li sistemde termal iletimin düşük olmasından dolayı batarya modülündeki ısı dağılımının düzensiz olduğu görülmüştür. Alüminyum köpükle bu azalmıştır. Batarya modülü yaz ve kış şartlarında analiz edilmiştir. Yaz çalıştırma koşullarında Li-ion batarya modülü 25 °C'lik bir sıcaklık artışını 40 °C başlangıç sıcaklığında göstermiştir. Kış çalıştırma koşullarında başlangıç sıcaklığı olan 0 °C'de FDM de bir erime gözlenmemiştir. Ayrıca Li-ion üzerindeki hava soğutması da alüminyum kanatçıklarla araştırılmıştır. Bataryaların hava kullanıldığında yetersiz soğutmadan dolayı ısıl sürüklenmeye meyilli olduğu görülmüştür. Araştırma sonuçları FDM'nin başarılı kullanımının termal yönetim çözümlerinde iyi bir aday olacağını göstermiştir.

Kizilel ve arkadaşları [13] FDM termal sistemi diğer geleneksel soğutma sistemleriyle karşılaştırmak için Li-ion bataryalarının deneysel testlerini yapmıştır. Çalışmalarında FDM olarak grafit kompozit kullanmışlardır. 2.2 Ah ve 2.4 Ah kapasitesindeki Li-ion bataryalar 4S4P, 8S2P, 7S2P düzeninde sıralanmış ve voltaj değerleri dizilişlerine göre elde edilmiştir. Batarya paketi önce FDM'siz oda sıcaklığında ve 45 °C sıcaklıkta test edilmiştir. Bataryanın farklı deşarj oranlarında elde edilecek sıcaklıkları incelenmiştir. Herhangi bir termal sistem kullanılmadığı zaman batarya paketindeki her bir elemanın farklı termal çevre sıcaklığına, FDM'li ise batarya paketindeki maksimum sıcaklık farkının 4 °C olduğu görülmüştür. Kompleks diğer termal soğutucu sistemlere göre basitliği ve ağırlığındaki hafiflik kanıtlanmıştır.

Wu ve arkadaşları [14] büyük boyutlu Li-ion bataryalardaki sıcaklık dağılımını araştırmak için ısı boruları ve kanatçıklar kullanarak hem deneysel hem de nümerik olarak iki boyutlu, zamana bağlı olarak çözümlemiştir. Metalik alüminyum kanatçıklar ve ısı boruları deşarj boyunca bataryadaki sıcaklık artışını azaltmak için kullanılmıştır. Deneysel test için 12 Ah kapasitesinde, silindirik, 40 mm çapında, 110 mm uzunluğunda Li-ion batarya, deşarj boyunca sıcaklık dağılımını incelemek üzere kullanılmıştır. Şarj ve deşarj çevrimi Maccor Instrument 4000 tarafından kontrol edilmiştir. Deşarj voltajı 2.8 V'de kesilmiştir. Deneysel test ve simülasyon sonuçları doğal konveksiyonun batarya sistemindeki ısıyı uzaklaştırmak için yeterli olmadığını göstermiştir. Zorlanmış konveksiyonun bataryadaki ısı artışını hafifleteceği bulunmuştur. Yine de batarya yüzeyindeki düzensiz ısı dağılımının kaçınılmaz olduğunu ve bunun da termal yönetimi

zorlaştırdığı görülmüştür. Sıcaklıktaki artışı ortadan kaldırmak amacıyla ısı boruları verimli bir ısı dağılımı için kullanılmıştır. Batarya duvarı ve ısı borusu arasındaki temas ısı dağılımında önemli bir rol oynadığı görülmüştür. Isı borularını alüminyum kanatçıklar içerisine yerleştirmenin sıcaklık artışını azalttığı ve bataryanın yüzeyinde istikrarlı bir sıcaklık dağılımı sağladığı görülmüştür.

Samimi ve arkadaşları [15] FDM'nin termal iletkenliğini arttırmak için çalışmalarında karbon fiberi kullanmışlar ve kompozit parafinin termal iletkenliğinde saf parafine göre ortalama %105 (minimum %85 ve maksimum %155) oranında artış gösterdiğini belirtmişlerdir. Termal yönetim sistemi olarak karbon fiber-parafin kompozitiyle sıcaklığın 15 °C düştüğü ve böylece bu kompozitin Li-ion bataryaların termal yönetim sisteminde uygun başka bir yol olduğunu göstermişlerdir. Çalışma deneysel ve nümerik olarak yürütülmüştür. Nümerik çalışmada sonlu hacimler yöntemi esas alınarak SIMPLER algoritması kullanılmıştır. Deneysel çalışmada karbon fiber karışımlar ve eritilmiş parafin erime noktasının üzerindeki bir sıcaklıkta iyi bir karışımın elde edileceğinden emin olmak için titreşimli bir karıştırma kabında 2 saat bekletilmişlerdir. Li-ion bataryadaki sıcaklık dağılımını çalıştırma sıcaklığına, şarj ve deşarj oranlarına bağlı tutmuşlardır. Çalışmalarında silindirik 14.5 mm çapında ve 50.5 mm uzunluğunda Li-ion batarya simülatörlerini 6 mm kalınlığında, dikdörtgen şekilli FDM ve kompozit FDM ile doldurulmuş kabın merkezine yerleştirmişlerdir.

Basu ve arkadaşları [16] yaptıkları çalışmada Li-ion pillerin BTYS için yeni bir soğutucu akışkanı 18650 batarya paketi için incelemişlerdir. Sıvı soğutma sistemli BTYS, bataryalardaki ısı alüminyum iletim elemanından sıvıya taşınacak şekilde dizayn edilmiştir. Burada kullanılan iletim elemanının ayrıca bataryalar ve soğutma sıvısı arasında bir ayırıcı olarak görev aldığı ve böylece bir sıvı sızıntısı olması durumunda soğutucu sıvının elektrikle bağlantı kontağı ihtimalini azalttığı görülmüştür. Batarya paketi 6S5P (6 seri ve 5 paralel) şeklinde 30 batarya elemanından oluşturulmuştur. İletim elemanı 1.5 mm kalınlığında ve 44 mm yüksekliğinde alüminyum levhadan yapılmıştır. Her bir iletim elemanının kolları birbirinden 11 mm uzaklıkta, silindirik bataryaların merkezinin iletim elemana olan mesafesi 22 mm olarak seçilmiştir. Soğutucu akışkan, dikdörtgen şekilli ve oturma yüzeyi kalınlığı 3 mm olan boruların içindeki 9 mm iç çaptaki dairesel kanallar boyunca geçirilmiştir. Deneysel testler Solartron1470E batarya test sistemini kullanılarak yapılmıştır. Nümerik sonuçlar için ticari CFD paketlerinden StarCCM + 10.06.010 ısı transferi ve akışı modellemek için, Design Studio 10.06.010 ise bataryadan elde edilen elektrokimyasal

girişler kullanılmıştır. Çalışmanın sonucunda kontak direncinin paketin termal performansında en güçlü etkiye sahip olduğu bulunmuştur. Bu örnek paketten elde edilen bilgiler verilen bir bataryanın sıcaklığından geriye kalanların sıcaklıklarını tahmin etmek için yeni bir prosedür kullanılmıştır. Simülasyon, deneysel sonuçlarla karşılaştırıldığında %90'dan fazla hassaslık derecesine sahip olduğu görülmüş ve model onaylanmıştır. Böyle bir sistemin BTYS'de sensör sayısını ve kontrol sisteminin karışıklığını gidermek için kullanılabileceği bulunmuştur. Bu sisteminin soğutucunun düşük oranlarda akışında bile verimli olduğu görülmüştür. Yüksek deşarj oranında ve düşük soğutucu akışında maksimum sıcaklık artışının 7 K değeri olduğu görülmüştür. Bu sebeple, bu termal yönetim sisteminin zorlu koşullarda dahi elektrikli araçların batarya sistemleri için uygun bir aday olduğu görülmüştür.

Xu ve arkadaşları [17] yaptıkları çalışmada batarya modülünde mini kanallı soğutma sistemini incelemiş ve ısı sürüklenme üzerindeki hafifletici etkisi incelemişlerdir. Araçların çarpışmasından ya da üretim hatalarından meydana gelecek kısa devrenin simülasyonunu bataryaya çivi çakma simülasyonunu kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Entegre edilmiş iki model bu amaçla kullanılmıştır: birleşik ısı transferi modeli ve tepkime kinetik modeli. Nümerik simülasyonlar ısı sürüklenme sürecini, akış oranının etkisi, termal kötüye kullanma, çivi çakmanın derinliğini ve çivinin çapını incelemek amacıyla COMSOL Multiphysics programında yapılmıştır. Mini kanallı soğutma sistemi beş prizmatik Li-ion bataryadan oluşan paket sistemine bağlı olarak dizayn edilmiştir. Her bir bataryanın yüksekliği 180 mm, genişliği 130 mm, derinliği 50 mm ve kapasitesi 55 Ah olarak seçilmiştir. Beş bataryadan üçü uzunluğu ve genişliği 3 mm olan alüminyum mini kanallarla çevrilmiştir. Alüminyumun kanal ve dış yüzey arasındaki mesafesi 1 mm ve iki komşu arasındaki mesafe 2 mm'dir. Simülasyon sonuçları mini kanallı soğutma sisteminin akış oranı 10 L/dakika kadar yüksek olsa dahi ısı sürüklenmeyi engelleyemediğini göstermiştir. Çivinin derinliği ya da çapı arttıkça ısı sürüklenmenin daha hızlı bir şekilde meydana geldiği görülmüştür. Fakat batarya modülünde, her bir batarya için bağımsız, kontrollü akış oranlarının bir bataryadan diğerine ısı sürüklenmeyi engelleyebileceği görülmüştür.

Tran ve arkadaşları [18] çalışmalarında elektrikli hidrojen arabalarının Li-ion batarya modüllerinde soğutucu olarak ısı boruları kullanılmasını araştırmışlardır. Kapasitesi 6.5 Ah, çapı 38 mm, yüksekliği 142 mm olan 14 adet silindirik Li-ion bataryadan oluşan modül kullanılmıştır. Isı borulu soğutma sistemi her biri 7 adet tüp ısı borusu içeren 4 soğutma modülünden oluşacak şekilde dizayn edilmiştir. Tüpler dış çap 7 mm olacak şekilde bakırdan

yapılmıştır. İnce boru yapısı 50 adet spiral kanal içermekte ve çalışma sıvısı mineralleri giderilmiş su olarak seçilmiştir. Her bir tüpün yoğunlaştırıcı bölümü 121'lik açı ile eğilmiştir. Soğutucu modülü oluşturmak için evaporatör alüminyum blok içerisine eklenmiş ve alüminyum kanatçıklar yoğunlaştırıcı bölümüne eklenmiştir. Deneysel düzenekte batarya yerine bakır plaka ve şarj/deşarj sırasında ortaya çıkan ısıyı taklit etmek için ısıtıcı kullanılmıştır. Yassı bir ısıtıcı bakır plakanın dış yüzeyine yapıştırılmış ve bataryadan sağlanan ısıyı tekrar üretmiştir. Bakır plaka ve ısıtıcının ara yüzeyindeki sıcaklık, batarya modülündeki sıcaklık ile uyumlu olduğu görülmüştür. Batarya elemanının içindeki sıcaklığı tahmin etmek için nümerik simülasyonlar AMESim programında geliştirilmiştir. Çalışmanın sonucunda ısı borularının eğimli pozisyonlarında, farklı yol eğimlerinde de ısı borularının verimli çalıştığının göstergesi olarak bakır plaka/ısıtıcı ara yüzeyinde sadece küçük bir değişim görülmüştür. Doğal konveksiyon yeterli olmasa bile kısıtlı ventilasyon yapısına sahip ısı borularının eşit ısı dağılımıyla sıcaklıkları optimum değerlerde tutmak için verimli bir yol olduğu görülmüştür. Ayrıca, sadece düşük oranlardaki ventilasyona ihtiyaç duyulmasının parazit güç kaybından kaçınmaya ve araç içindeki gürültüyü azaltmaya yardımcı olduğu görülmüştür.

Huo ve arkadaşları [19] BTYS'nin soğutma performansını arttırmak için Al_2O_3 su nanoakışkan kullanmış ve lattice Boltzmann (LB) modelini 21 mm yarı çapında ve 110 mm uzunluğundaki 42110 silindirik batarya için kurmuşlardır. BTM nümerik modelinin doğrulanması için içi boş silindir düzenli dağıtılan ısı kaynağı ile kullanılmıştır. Soğutma sistemi tek batarya ve 5'li batarya sistemi için incelenmiş ve simülasyon sonuçları BTYS temelli nanoakışkanın sıcaklığı sabit tutabildiğini göstermiştir. 5 bataryalı sistemde nanopartiküller kullanılmasının soğutma performansını arttırdığı ve bataryanın ortalama sıcaklığını verimli bir şekilde düşürdüğü görülmüştür. Su temelli BTYS'ye göre bataryanın ortalama sıcaklığı 0.04 hacim oranıyla %7 azalmıştır. Dahası, yüksek hacim oranıyla nanoakışkanın için artan Reynolds sayısının bataryanın ortalama sıcaklığını düşüreceği görülmüştür.

Wu ve arkadaşları [20] elektrikli araçlardaki soğutucu BTYS'nin performansını arttırmak amacıyla lattice Boltzmann (LB) modeli, Bakır-su nanoakışkan temelli BTM doğal konveksiyon simülasyonu için kullanılmıştır. Bakır-su nanoakışkanının performansı soğutucu kutu içerisindeki dört batarya için incelenmiştir. Nümerik modelin hassaslığından emin olmak için üniform şekilde dağıtılan ısı sınırına sahip olan içi boş silindir kullanılmıştır. Araştırma nanoakışkan hacminin oranı için %0-6 ve Rayleigh sayısı 103-106

değerleri için yürütülmüştür. Modelin konfigürasyonu için 42110 silindir Li-ion bataryalar düşünülmüştür. Batarya ve sabit duvar arası mesafe 25 mm ve iki batarya arası mesafe 11 mm olarak belirlenmiştir. Silindir içerisindeki ısı akısı Neumann sınır şartı ile belirlenmiştir. Sonuçlar bakır nanopartikülleri eklemenin soğutma performansını arttırdığını ve BTYS'deki sıcaklık farklarını azalttığını göstermiştir. Rayleigh sayısı 3×10^5 olduğu zaman, %6 nanoakışkanla maksimum sıcaklığın % 6.5 azaltılabileceği görülmüştür. Ayrıca, Rayleigh sayısı değerleri 104'ten 106'ya artarken doğal konveksiyonun arttığı görülmüştür.

Bu tezin temel amacı, elektrikli araçlarda kullanılan batarya soğutma sistemlerinin soğutma performansını ve kullanılan akışkana nano parçacık eklenmesinin soğutma performansı üzerindeki etkisini sayısal olarak incelemektir.

1.1. Elektrikli Araçlarda Kullanılan Batarya Çeşitleri

Elektrikli araçlarda kurşun-asit, gümüş-çinko, nikel- metal hidrür ve lityum-iyon bataryalar kullanılmaktadır. 1990'lı yılların başlarında kurşun-asit bataryalar uygun fiyatı ve özgül güç özelliklerinden dolayı elektrikli araçlarda kullanılması göz önündeydi. Kurşun-asit bataryalar kısa ömürlü olduğundan dolayı bataryanın ömrünü arttırmak için çalışmalara başlanılmıştır. 2000 yılında İngiltere "Foresight Vehicle" programı kurşun-asit bataryaları hibrit elektrikli araçlar için iyileştirmeye başlamıştır. Kurşun-asit bataryaların elektrikli araçlardaki kullanımı yüksek özgül enerjili batarya talebinden dolayı azalmıştır. Ayrıca soğuk çalışma şartlarında kurşun asit bataryaların performansında gerek enerji gerek güç yoğunluğu açısından ciddi derecede düşüş görülmektedir. Bu da düşük sıcaklıklarda çalışma koşullarında kurşun-asit bataryalı sistemlerde dışardan bir ısıtıcıya ihtiyaç duyulmasına neden olmaktadır.

Nikel-Demir bataryalarda pozitif elektrot nikel, negatif elektrot demir ve potasyum hidroksit sıvı elektrolittir. Düşük sıcaklıklarda performansları diğer bataryalara göre daha yüksektir.

Ni-MH bataryalar gelişmekte olan elektrikli araç marketinde yüksek özgül güç, enerji ve ömrü yeni bir seçim olmaya başlamıştır. Fakat Ni-MH bataryalar uzun süreli bir çözüm için çok pahalıdır. Bunun yanı sıra ağırdır ve fazla yer işgal eder.

Li-ion bataryalar daha uzun kullanım ömrü, yüksek enerji ve gücü, Ni-MH bataryaların üç katı ve kurşun-asit bataryaların iki katı daha yüksek voltaj değerleri sağlamaktadır. Tablo 1.1'de elektrikli ve hibrit araçlarda kullanılan bataryaların karakteristik

özellikleri verilmiştir. Li-ion bataryaların enerji ve güç açısından daha iyi bir performansa sahip olduğu açıkça görülmektedir. Fakat Li-ion bataryaların fiyatı diğer bataryalara göre oldukça yüksektir. Araştırmacılar Li-ion bataryaların elektrikli araçların gereksinimlerini karşılamak için orta vadede en uygun teknoloji olduğu konusunda hem fikirdirler [21,22].

Tablo 1.1’de elektrikli araçlarda kullanılan farklı batarya çeşitlerinin birbiriyle kıyaslamalı olarak özgül enerji, enerji yoğunluğu, özgül güç ve kullanım ömürleri verilmiştir. Li-ion bataryanın diğer batarya türlerine göre performansının yüksek olmasının yanı sıra kullanım ömrünün de uzun olması Li-ion bataryaların daha çok tercih edilmesine neden olmaktadır.

Tablo 1.1. Elektrikli araçlarda kullanılan bataryaların karakteristik özellikleri [21].

	Özgül Enerji (Wh/kg)	Enerji Yoğunluğu (Wh/L)	Özgül Güç (W/kg)	Kullanım Ömrü (Çevrim)
Pb-asit	30-50 48	60-100	200-400	400-600 800
Ni-Fe	30-55	60-110	25-110	1200-4000
Ni-Zn	60-65	120-130	150-300	100-300
Zn-Hava	230	269	105	-
Ni-MH	80		1000	
Li-ion	93 94.8 120-130 150 150-200	114 200-300 300 460-600	350 (%50) 1500	4000 1000 8-10 yıl

Bazı elektrikli araçlarda kullanılan batarya paketlerinin dizaynları kullanılan araçların kategorilerine göre sınıflandırılarak verilmiştir.

1.1.1. Nissan Leaf

2010 yılının sonlarında Japonya ve Amerika Birleşik Devletleri’nde kullanılmaya başlanan Nissan Leaf 24 kWh’lik Li-ion batarya paketi kullanmaktadır. Nissan Leaf hibrit elektrikli araç kategorisinde olmayıp tamamen elektrikli araç kategorisindedir. İçerisinde içten yanmalı motor olmayıp gücünü sadece içerdiği Li-ion bataryadan almaktadır. Nissan Leaf’in batarya sistemi aktif bir soğutma sistemi içermemektedir. Fakat bataryaları

çevreleyen kutu alüminyumdan yapılmıştır. Bu da kutunun soğutucu plaka gibi davranmasını sağlamaktadır. Böylece bataryalarda üretilen ısının pasif bir şekilde bataryalardan uzaklaştırılması sağlanmaktadır. Şekil 1.1’de görülen batarya kutusu aracın altına monte edilmiştir. Sürücü ve yolcu koltukları arasına yerleştirilmiştir. Batarya kutusu direkt aracın ortasına yerleştirildiği için alçakta bir ağırlık merkezine olanak sağlamaktadır. Ayrıca bu konumdan dolayı, batarya kutusunun içerisine dışardan gelen döküntülerin, sıvıların ve tozların girmesini engellenmesi için kutunun kapatılması gerekmektedir.

Nissan Leaf’in enerji tüketimi EPA (Çevre Koruma Ajansı) tarafından 34 kWh/100 mil olarak verilmiştir. Yani tam şarj halindeyken alacağı ortalama mesafe 73 mildir (117.48 km) [23].



Şekil 1.1. Nissan Leaf’in 24 kWh’lik Li-ion batarya paketi [23].

1.1.2. Chevrolet Volt

2010 yıllarının sonunda piyasaya sürülen Chevrolet Volt serisi LG Chem’in ürettiği Li-ion bataryalardan oluşan 16 kWh’lik batarya kutusunu kullanmaktadır. Chevrolet Volt 1.4 litrelik içten yanmalı motor ve 16 kWh’lik Li-ion batarya kutusu kullanan hibrit bir araçtır. İçten yanmalı motor, batarya şarj seviyesi minimum seviyeye düştüğünde batarya için bir jeneratör olarak görev alır. Şekil 1.2’de görülen batarya kutusu T harfinin şekline sahiptir ve yakıt deposu ile vites kutusu tüneline sığdırılır. Araç kabininin dışından monte edilir ve bu yüzden bataryaların çevreden gelen tehlikelere karşı tam kapalı bir muhafaza içerisinde olması gerekir.

General Motors bataryaların hem ısıtılması hem de soğutulması için sıvı-soğutmalı sistem kullanmaktadır. Li-ion bataryalar soğutucu akışkanın içerisinden geçtiği alüminyum soğutma plakası içeren plastik bir çerçeve ile birbirinden ayrılmıştır. Bataryanın soğutma sistemi ile motorun soğutma sisteminin çevrimleri birbirinden bağımsız olarak tasarlanmıştır.

Chevrolet Volt'un batarya kutusu kapasitesi 16 kWh olmasına rağmen kapasitesinin sadece 10.3 kWh'sini kullanacak şekilde dizayn edilmiştir. Bataryanın kullanılabilir enerjisini azaltmakla sistemin ömrü uzatılmıştır. 2013 model Volt'un kapasitesi 16.5 kWh'e çıkarılırken kullanılabilir enerjisi 10.8 kWh olarak belirlenmiştir. Enerji tüketimi EPA tarafından 36 kWh/100 mil olarak belirlenmiştir. Yani kapasitesinin 10.3 kWh'sini kullanacak şekilde dizayn edilen Volt'un sadece tam şarj batarya ile alacağı mesafe 29 mildir (46.67 km) [23].



Şekil 1.2. Chevrolet Volt'un 16 kWh'lik Li-ion batarya paketi [23].

1.1.3. Ford Focus

Elektrikli Ford Focus'lar 2011 yılının Aralık ayında tamamen elektrikli araç kategorisinde piyasaya sürülmüştür. LG Chem tarafından üretilen Li-ion bataryalardan oluşan 23 kWh'lik batarya kutuları kullanılmıştır. Focus'ta kullanılan batarya paketi şekil 1.3'te gösterilmektedir. Bataryaların aktif olarak hem ısıtılması hem de soğutulması için sıvı-soğutmalı sistem kullanmaktadır. Kullanılan sistemin amacı bataryaların optimum çalışma sıcaklığında tutmaktır. Sıcak günlerde bataryalara ön-soğutma, soğuk günlerde bataryalara

ön-ısıtma yapılmaktadır. Ford Focus'un bataryaları iki kutuda bulunmaktadır. Kutunun biri arka koltuğun altına, diğeri ise hemen arka koltuğun arkasındaki bagaja monte edilmiştir. Enerji tüketimi EPA tarafından 32 kWh/100 mil olarak belirlenmiştir. Yani tam şarj kapasitesiyle alacağı mesafe 72 mildir (115.87 km) [23].



Şekil 1.3. Elektrikli Ford Focus'un 23 kWh'lik Li-ion batarya paketi [1].

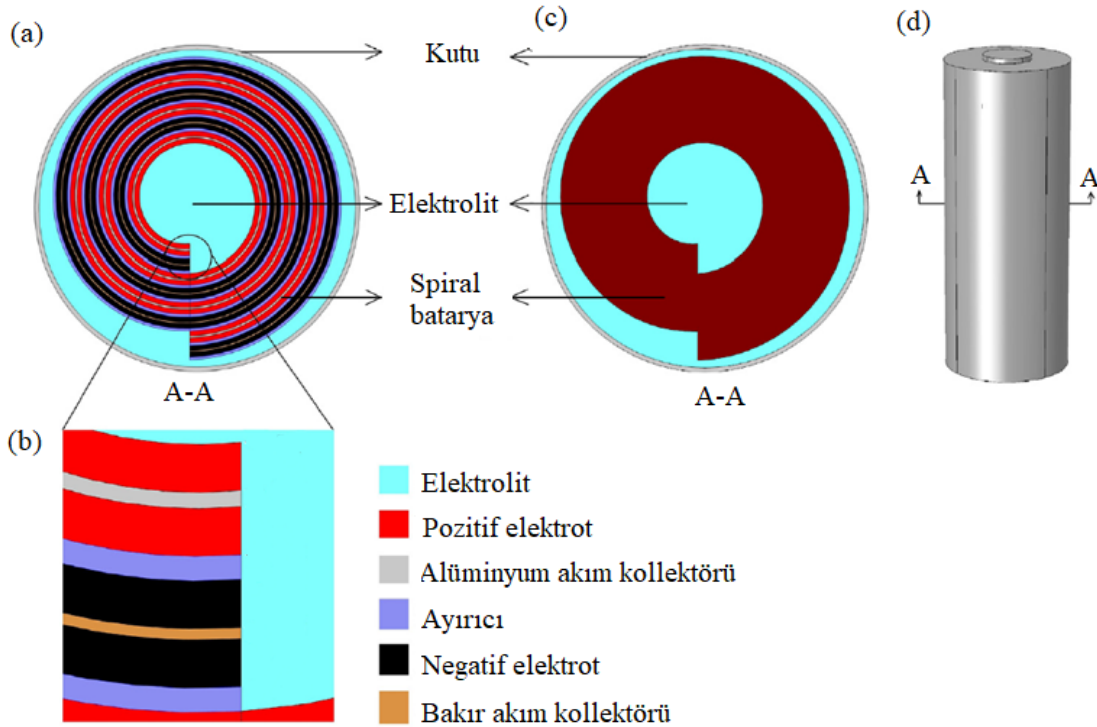
1.1.4. Mitsubishi I

Mitsubishi I serisi 2012 yılında elektrikli araç kategorisinde piyasaya sürülmüştür. 16 kWh'lik batarya kutusu 24 kWh'lik batarya kutularına göre oldukça küçüktür. Li-ion bataryalar ön ve arka koltukların altında olacak şekilde şasiye aracın altından monte edilmiştir. Paslanmaz çelik kutu ile kapatılmış ve çevreden korunmuştur. Diğer elektrikli araçlarda olduğu gibi aracın içinde olabildiğince alçakta bir noktaya monte edilerek ağırlık merkezini düşürmek amaçlanmıştır.

Soğutma sistemlerinde aktif olarak basınçlı hava soğutma sistemi kullanılmaktadır. Sistem soğutulmuş havayı klimadan almaktadır. Soğutucu sistem ayrıca bataryaların şarj esnasında sıcaklığı optimum seviyede tutarak batarya ömrünü arttırmaktadır. Enerji tüketimi EPA tarafından 30 kWh/100 mil olarak belirlenmiştir. Yani tam şarj kapasitesiyle alacağı mesafe 54 mildir (86.90 km) [23].

1.2. Lityum-İyon Bataryanın İç Yapısı

Li-ion batarya anot, katot, akım kolektörleri ve ayırıcı katmanların üst üste konulduktan sonra spiral şekilde sarılarak batarya muhafazasının içerisine konulmasıyla yapılır. Çok katmanlı bataryanın yapısı Şekil 1.4'te gösterilmektedir. Elektrotlar akım kolektörü folyoları ile kaplanmıştır. Negatif elektrot için bakır, pozitif elektrot için Al kullanılmıştır. Ayırıcılar pozitif ve negatif elektrotlar arasına konulmuştur. Genellikle negatif elektrot malzemesi karbon, pozitif elektrot malzemesi LiCoO_2 , LiMn_2O_4 , LiFePO_4 gibi bir metal oksittir. Bu şekildeki spiral katmanlar toplu bir hücre olarak kabul edilir ve elektrokimyasal özellikler homojen olarak kabul edilir. Şekil 1.4 (d)'de bataryanın dışardan bakıldığında genel görüntüsü verilmiştir. (c)'de içerisindeki yuvarlak yapı görselleştirilmiştir. (a)'da batarya muhafazasının içerisindeki genel spiral yapı gösterilmiştir. (b)'de ise bu spiral yapı içerisindeki katmanlar ayrıntılı bir şekilde gösterilmiştir [24,25].



Şekil 1.4. Li-ion bataryanın iç yapısı, (a) pozitif ve negatif elektrotların kutu içerisindeki görünümü, (b) bataryadaki bütün katmanların ayrıntılı şekli, (c) bataryadaki spiral yapının genel görünümü, (d) bataryanın dış görünüşü [24].

Tablo 1.2’de elektrikli araçlarda kullanılan Li-ion bataryalar üretiminde kullanılan katot malzemesine göre sınıflandırılmıştır. Sırasıyla batarya paketi üreticisi, hangi araçlarda kullanıldıkları, batarya paketinin kullanılabilir kapasitesi ve normal sürüş koşullarında ortalama gidebilecekleri mesafeler verilmiştir [26].

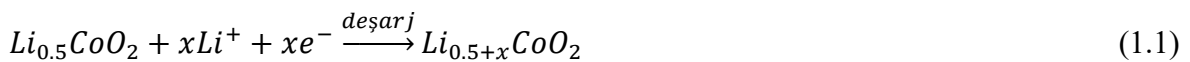
Tablo 1.2. Li-ion bataryaların katot malzemesine göre özellikleri

Katot Malzemesi	Elektrikli Araç Batarya Paketi Üreticisi	Kullanılan Elektrikli Araçlar	Batarya Paketinin Kullanılabilir Kapasitesi (kWh)	Normal Sürüş Şartlarında Menzili (km)
Lityum Kobalt Oksit	Panasonic	Tesla-Roadster	56	394
	Tesla	Daimler Benz-Smart EV	16	135
Lityum Manganez Oksit	AESC, EnerDel, GS Yuasa	Think-Think EV	23	160
	Hitachi, LG Chem, Toshiba	Nissan-Leaf EV	24	169
Lityum Demir Fosfat	A123, BYD, GS Yuasa,	BYD-E6	57	400
	Lishem, Valence	Mitsubishi-iMiEV	16	160
Lityum Nikel-Manganez-Kobalt Oksit	Hitachi, LG Chem, Samsung	BMW-Mini E	35	241

1.2.1. Lityum-İyon Bataryadaki Kimyasal Reaksiyonlar

Anot için C, katot için LiCoO₂ kullanılan klasik bir Li-ion bataryadaki şarj/deşarj tepkimeleri şu şekilde gösterilmiştir [2]:

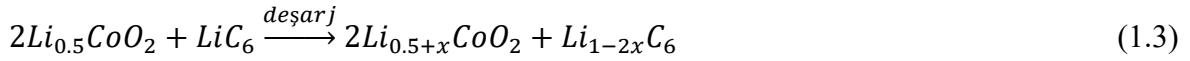
Pozitif elektrotta:



Negatif elektrotta:



Genel denklem:



Şarj durumunda ise işlemler ters yönde alınır.

1.3. Lityum-İyon Batarya için Optimum Çalışma Şartları

Bataryanın performansı ve kullanım ömrü arasında iyi bir denge tutturabilmek için kurşun-asit, Ni-MH ve Li-ion bataryalar için en iyi çalışma şartları 25 °C ile 40 °C arasındadır. 50 °C'nin üstündeki sıcaklıklar şarj verimini düşürecek ve bataryanın çalışma ömrünü oldukça düşürecektir. Genel olarak sıcaklık bataryanın elektrokimyasal sistemini, şarj almasını, güç ve enerji kapasitesini, emniyetini, kullanım ömrünü etkiler [3]. Ramadass ve arkadaşları yaptıkları tam kapasite yorulma analizinde Sony VTC6 18650 Li-ion bataryanın 50 °C'de 600 çevrimini yaptıktan sonra ilk kapasitesinin %60'ını kaybettiğini, 55 °C'de 500 çevrimden sonra ilk kapasitesinin %70'ini kaybettiği görmüştür [28].

Tablo 1.3. Bataryalarındeşarj anındaki çalışma sıcaklıkları

Bataryanın Türü	Deşarj Anındaki Çalışma Sıcaklığı
Ni-MH	-20 °C'den 60 °C'ye
Kurşun-Asit	-20 °C'den 60 °C'ye
Li-ion	-20 °C'den 60 °C'ye
Li-ion Polimer	0 °C'den 60 °C'ye

1.3.1. Bataryadaki Isı Üretimi ve Isıl Sürüklenme

Şarj vedeşarj anında batarya boyunca geçen akımdan dolayı ısı üretimi meydana gelir. Bataryadaki ısı üretimi Joule ısıtmasından ve entropi değişiminden dolayı meydana gelir [2].

Elektrikli araçların geliştirilmesi için büyük ölçekli bataryalara ihtiyaç vardır. Fakat artan boyut ve modüldeki artan batarya sayısı ile ciddi ısı problemler ortaya çıkmaktadır. Aşırı ısınma, yanma, patlama gibi güvenlik riskleri batarya ve batarya paketinde artan ısı enerjisiye bağlı olarak artmaktadır. Pozitif elektrotta üretilen ısı bataryanın bütün ısısından ortalama üç kat daha fazladır. Aşırı bölgesel ısınma bataryanın kullanım ömrünün

azalmasına ve ısı sürüklenmeye neden olabilmektedir [3]. Bataryanın istenilen çalışma sıcaklığı aralığının altında olması (15-35 °C) iyon aktarımının azaltacağından dolayı performansı düşürecektir. 35 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda yan reaksiyonların hızlı olmasına ve bu da bataryanın ömrünün azalmasına yol açacaktır. Li-ion bataryanın sıcaklığı arttığı ve verimli bir şekilde üretilen ısının bataryadan dışarı verilmediği durumda ekzotermik reaksiyonlardan dolayı ısı sürüklenme meydana gelebilir. Isı sürüklenme ani sıcaklık artışına, gazların salınımına, dumana, yangına ve patlamaya sebep olabilir. Isı sürüklenmeye neden olan koşullar; harici ısınma, aşırı şarj/deşarj durumu, bataryanın delinmesi, iç ve dış kısa devrelerdir [4]. Li-ion batarya için kısa devrenin olduğu bölgede Joule ısıtması yoğunlaşması olacağı için burada aktif madde ve elektrolitin kimyasal tepkimeler başlayacak ve bu da ısı sürüklenmeye neden olacaktır. Birçok üretici batarya delinme testini uygulayarak iç kısa devreden oluşacak ısı sürüklenme davranışını incelemektedir. Golubkov ve arkadaşları yaptıkları çalışmada ısı sürüklenme sonucunda 18650 Li-ion bataryada sıcaklığın 850 °C'lere kadar ulaştığını gözlemlemişlerdir [29,30].

1.4. Elektrikli Araçlarda Kullanılan Soğutma Sistemleri

Bir batarya kutusu içerisindeki birçok bataryanın istenilen voltaj ve kapasite değerlerine göre seri ya da paralel olarak birbirine bağlanmasıyla oluşur. Batarya kutusundaki ısı yayılımının yetersiz olması şarj vedeşarj anlarında ısı birikimine neden olacaktır. Batarya kutusunca biriken ısı aşırı ısınmaya ve güvenlik tehlikelerine neden olacaktır. Ayrıca bataryanın ömrünün de kısılmasına neden olacaktır. Bu nedenlerle çeşitli bataryaların sıcaklığı istenilen aralıkta tutmak için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir [5].

Elektrikli araçlarda kullanılan batarya soğutma sistemlerini üç ana başlık altında toplamak mümkündür; hava soğutmalı, sıvı soğutmalı, faz değiştiren malzemeler. Bunlar ayrı ayrı kullanılabileceği gibi beraber de kullanılabilir. Aşağıdaki tabloda kullanılan soğutma yöntemlerinin birbiriyle kıyaslaması verilmiştir [21].

Tablo 1.4. Batarya soğutma yöntemlerinin birbiriyle kıyaslanması

	Hava	Sıvı	Isı Borusu	FDM	Soğuk Plaka
Kullanım Kolaylığı	Kolay	Zor	Orta	Kolay	Orta
Verim	Düşük	Yüksek	Yüksek	Yüksek	Orta
Sıcaklık Düşüşü	Düşük	Yüksek	Yüksek	Yüksek	Orta
Sıcaklık Dağılımı	Düzensiz	Eşit	Orta	Eşit	Orta
Bakım-Onarım	Kolay	Zor	Orta	Kolay	Orta
Kullanım Ömrü	>20 yıl	3-5 yıl	>20 yıl	>20 yıl	>20 yıl
İlk Maliyet	Düşük	Yüksek	Yüksek	Orta	Yüksek
Yıllık Maliyet	Düşük	Yüksek	Orta	Düşük	Orta

Toyota Prius'ta ve Nissan Leaf'te hava soğutmalı sistem, BMW i3'te soğutucu akışkanlı sistem, Tesla Model S'te ve Chevy Volt'ta sıvı soğutmalı sistem kullanılmaktadır [4].

Tablo 1.5'de elektrikli ve hibrit elektrikli araçlarda kullanılan Li-ion batarya şekilleri, batarya kutularının kapasiteleri ve soğutma yöntemleri verilmiştir [31].

Tablo 1.5. Tam ve hibrit elektrikli araçlarda kullanılan batarya soğutma yöntemleri

Araç Markası	Batarya Türü	Kapasite [kWh]	Soğutma Yöntemi
Tesla Roadster	Silindirik	53.0	Sıvı
Tesla Model S	Silindirik	40.0	Sıvı
Daimler Smart	Prizmatik	17.6	Sıvı/Metal
Nissan Leaf	Prizmatik	24.0	Hava
Mitsubishi i-MiEV	Prizmatik	16.0	Hava
Ford FOCUS	Prizmatik	23.0	Sıvı
GM Volt	Prizmatik	16.0	Sıvı
Fisker Karma	Prizmatik	20.0	Sıvı
Hymotion PRIUS	Silindirik	5.0	Hava
Ford C-MAX enerji	Prizmatik	7.6	Hava
Mercedes Benz S400	Silindirik	0.9	Sıvı
Ford C-MAX hibrid	Prizmatik	1.4	Hava

1.4.1. Hava Soğutmalı

Batarya soğutma sisteminde hava kullanılması en basit yöntemlerden biridir. Fiyat ve alan kısıtlamalarından dolayı tercih edilir. Sadece doğal konveksiyon yoluyla bataryadan ısı dağılımı sağlanamaz. Bu nedenle ısı transferi havanın batarya modülüne bataryanın

dizilimine göre seri veya paralel yönde üflenmesiyle sağlanır. Kullanılan hava ısı transferi için batarya ile direkt temas halindedir. Li-ion bataryalar yüksek güç yoğunluğuna sahip olmasına rağmen, güçleri -30 °C’de sınırlandırılmıştır. Eğer bu bataryaların soğuk kış şartları gibi durumlarda -30 °C’nin altında çalıştırılması gerektiğinde bataryanın çalışma sıcaklığına gelebilmesi için çok hızlı bir şekilde ısıtılması gerekmektedir. Fakat bataryanın kendisini iç direncinden geçen akım (I^2R_i) ile hızlı bir şekilde ısıtması mümkün değildir. Bu nedenle bataryanın içerisine elektrikli ısıtıcının konulması ya da hibrit elektrikli araçlarda motordan gelen soğutucuyla bataryanın ısıtılması yöntemleri kullanılır [21,31].

1.4.2. Sıvı Soğutmalı

Çok fazla bataryanın kullanıldığı batarya kutularında hava soğutma sistemi çok fazla verimli olmamaktadır. Bu sistemlerde sıvı soğutma sistemi kullanılmaktadır. Sıvı bataryalarda direkt ya da dolaylı temas halinde olabilir. Sıvı soğutmanın kullanıldığı sistemlerde farklı yöntemler kullanılır. Bunlar her bir modülün etrafından sıvı dolu tüpler geçirilmesi, batarya paketinin sıvı dolu bir muhafazada bulundurulması, batarya paketini yalıtkan sıvının içerisine direkt temasta bulunacak şekilde koymak ve batarya paketini soğutucu bir plaka üzerine yerleştirmektir. Isı transferi için kullanılan madde su, glikol, yağ, aseton ve soğutucu akışkan olabilir. Bu yöntemin kullanıldığı sistemlerde sızdırmazlığın çok önemli olmasından dolayı üreticiler soğutucu sistemlerinde bu yöntemi çok kullanmak istememektedirler [21,31].

1.4.3. Faz Değiştiren Maddeler

Faz değiştiren maddeler (FDM) ısı transferi materyaline alternatif bir seçenektir. Bu seçenek sistemdeki parazit güç tüketimlerinin FDM’nin sabit sıcaklıktaki ya da erime noktasındaki gizil ısısı kullanılarak yok edilebilir. Bu metodun tek batarya ve kutudaki bataryaların birbiriyle olan sıcaklık farklarını minimum seviyede tutmasına rağmen FDM’den dolayı sistemin hacminin ve ağırlığının artması gibi problemler ortaya çıkmaktadır. Ayrıca FDM’nin sıvı olduğu durumlarda yüksek ısıl dirençten dolayı bataryada sıcaklık artışları olabilir. Dahası düşük ısıl iletkenlikten dolayı düşük sıcaklıklarda bataryayı çalışma sıcaklığına erişene kadar ısıtmak problem olabilir [31].

2. MATERYAL METOT

Bu çalışmada sonlu elemanlar yöntemini kullanarak çözüm yapan ANSYS 18.2'nin Fluent modülü kullanılmıştır. Modelleme üç boyutlu bir batarya paketi temel alınarak yapılmıştır. Soğutucu olarak hava, su, ve nano parçacık katkılı su kullanılarak simülasyonlar yapılmıştır. Bu batarya sisteminin modellenmesiyle hızla gelişen elektrikli araçların ARGE çalışmalarına katkı sağlamak amaçlanmıştır.

Batarya seçiminde Tesla elektrikli araçlarda yaygın şekilde kullanılan Panasonic NCR18650 (18 mm çap, 65 mm uzunluk) Li-ion batarya seçilmiştir. NCR18650 Li-ion bataryanın özellikleri aşağıdaki tabloda gösterilmiştir.

Tablo 2.1. Panasonic NCR18650 Li-ion bataryanın özellikleri

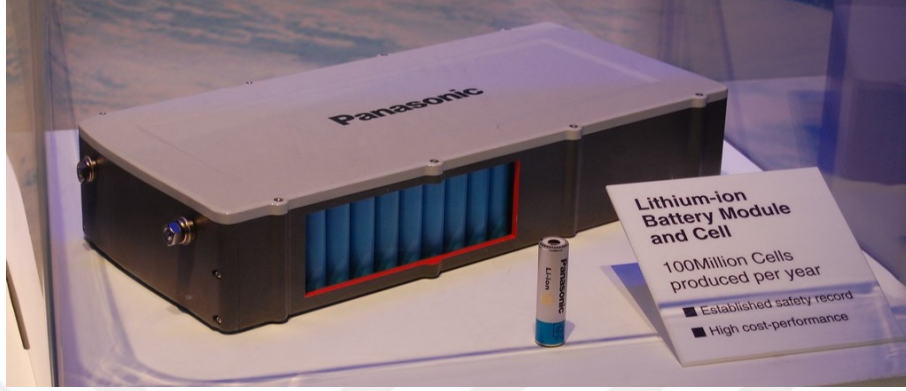
Nominal Kapasite	Minimum 3200 mAh	
Kapasite	Minimum 3250 mAh Karakteristik 3350 mAh	
Nominal Gerilim	3.6 V	
Şarj	CC-CV, Std. 1625 mA, 4.20 V, 4.0 saat	
Ağırlık	45.8	
Isıl İletkenlik	2.7 W/mK	
Sıcaklık	Şarj	0 C den +45 C ye
	Deşarj	-20 C den +60 C ye
	Depolama	-20 C den +50 C ye
Enerji yoğunluğu	Hacimsel	676 Wh/l

2.1. Batarya Dizilimi

Kullanılacak olan batarya geometrisi ANSYS 18.2'nin Design Moduler alt programında oluşturulmuştur. Spiral şeklinde bir içyapıya sahip olan Li-ion batarya modellenirken çözüm süresini kısaltmak amacıyla basitleştirilerek içerisinde ısı üretimi olan silindirik bir geometrik yapıya dönüştürülmüştür.

Kullanılacak olan batarya sayının ve diziliminin belirlenmesi için piyasada kullanılmakta olan batarya kutuları incelenmiştir. Şekil 2.1 ve Şekil 2.2'deki gibi kullanılan modüllerde kısıtlı bir hacme daha çok batarya yerleştirebilmek amacıyla koyulacak

bataryalar arasındaki mesafenin az olduğu görülmüştür. Bu da elektrikli araçların daha fazla batarya taşımaya olanak sağlarken soğutma performansında belli bir ölçüde düşüşe neden olmaktadır.



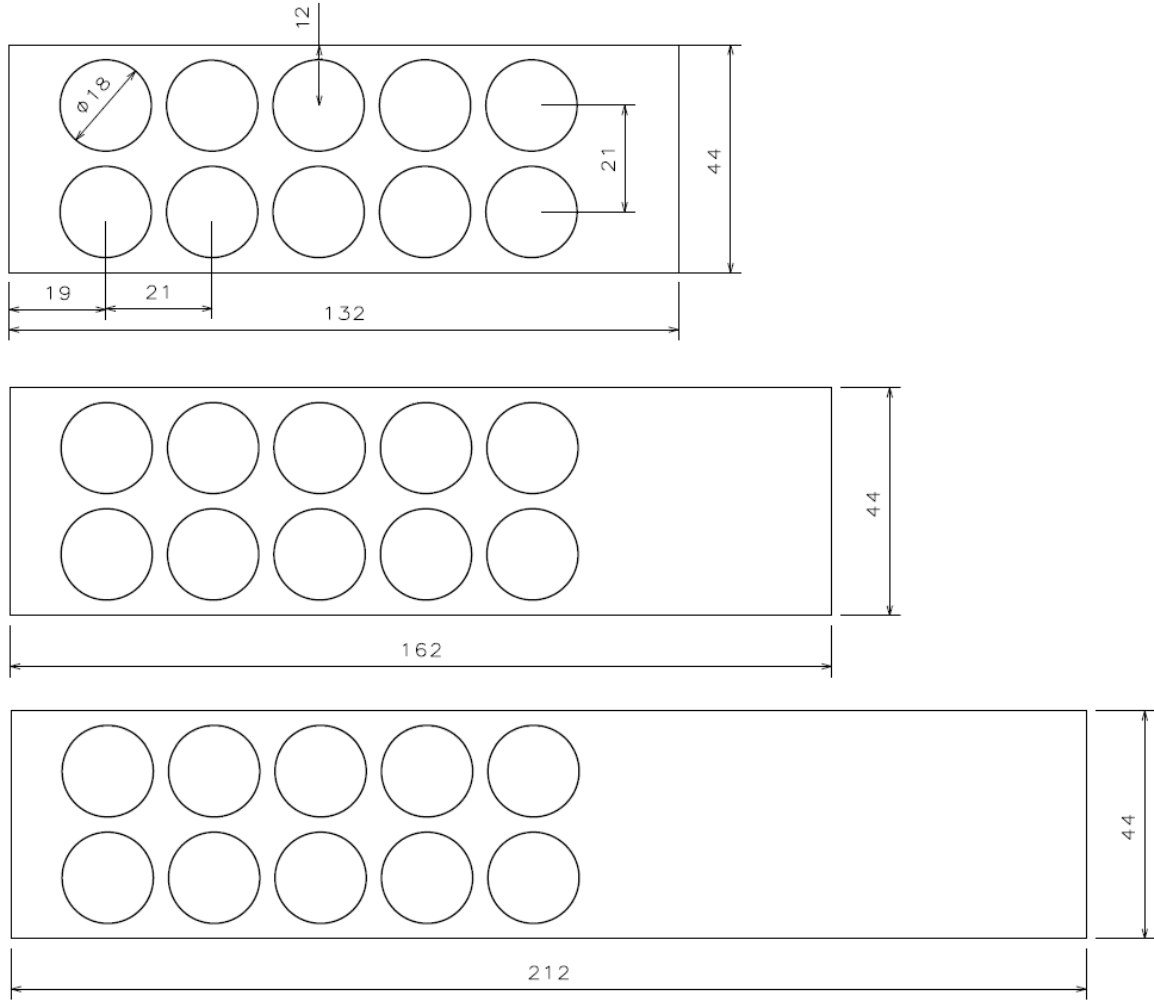
Şekil 2.1. Panasonic marka Li-ion batarya modülü [6].



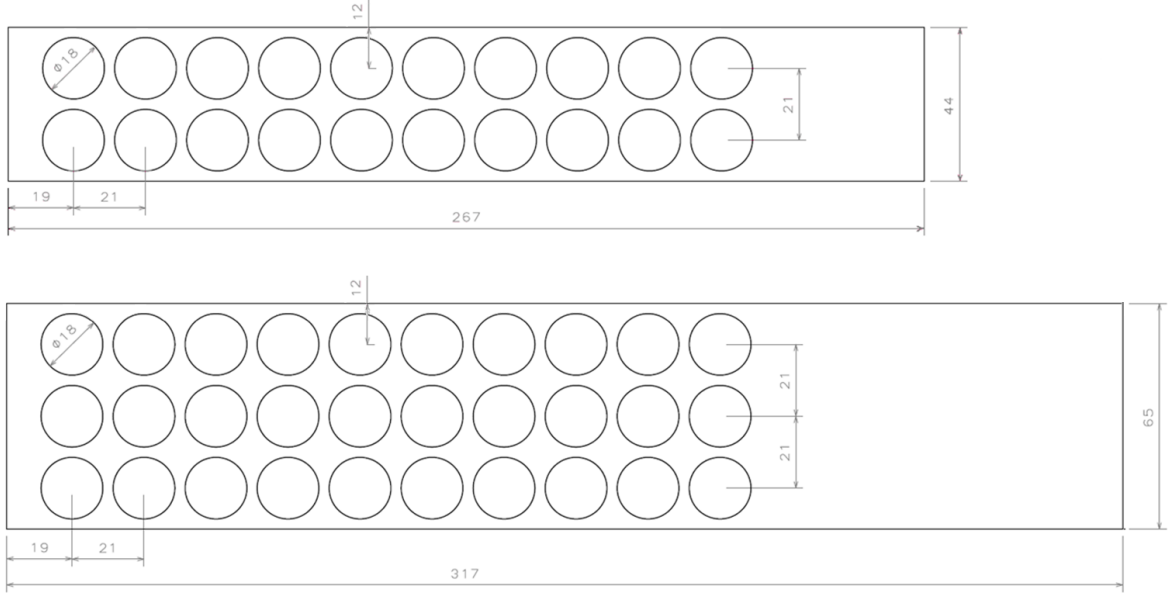
Şekil 2.2. A123 marka Li-ion batarya modülü [7].

Analizlerde kullanılmak üzere oluşturan batarya paketlerinde her bir batarya arasındaki mesafe 3 mm olarak alınmıştır. Bataryaların yan duvarlara olan mesafesi aynı şekilde 3 mm olarak belirlenmiştir. Soğutucu akışkan girişinin başladığı yer ile ilk batarya arasındaki mesafe 10 mm olacak şekilde çizim yapılmıştır. Akışın son bataryadan sonra çıkışa kadar en iyi gözlenebildiği dizaynı bulmak amacıyla, 2S5P batarya diziliminde akışın en sonunda yer alan batarya ile çıkış arasındaki mesafe 20 mm, 50 mm ve 100 mm kullanılarak çözümler yapılmıştır. Modülün yüksekliği Li-ion bataryanın yüksekliği olan 65 mm olarak belirlenmiştir.

Bataryalar 2S5P, 2S10P ve 3S10P olarak üç farklı dizilimde seçilerek analizleri yapılmıştır. 2S5P batarya dizilimi için 20 mm, 50 mm ve 100 mm çıkış uzunlukları kullanılırken (Şekil 2.3), elde edilen sonuçlara göre 2S10P için 50 mm çıkış uzunluğu, 3S10P için 100 mm çıkış uzunluğu kullanılmıştır (Şekil 2.4). Bütün geometrilerde modülün yüksekliği bataryanın yüksekliği olan 65 mm olarak belirlenmiştir.

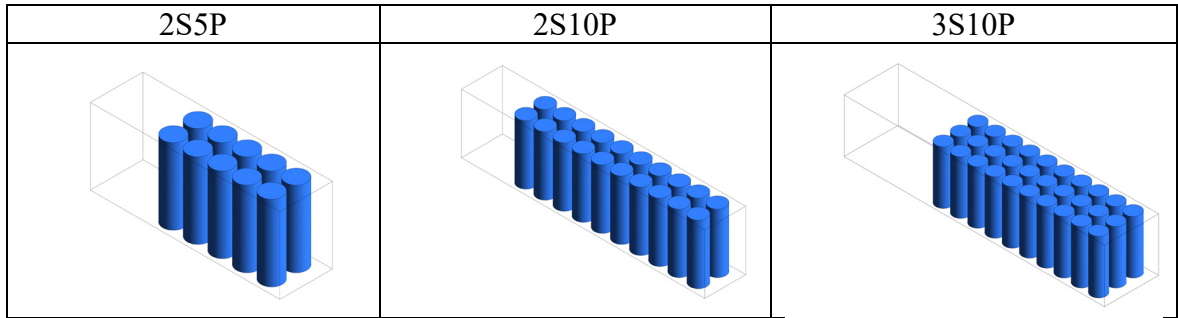


Şekil 2.3. 2S5P diziliminin 20 mm, 50 mm ve 100 mm çıkış uzunluklarındaki ölçüleri



Şekil 2.4. 2S10P ve 3S10P diziliminin 50 mm ve 100 mm çıkış uzunluğundaki ölçüleri

Şekil 2.5'te kullanılan geometri yapılarının üç boyutlu görünüşleri verilmiştir. 2S5P ve 2S10P için 50 mm çıkış uzunlukları ve 3S10P için 100 mm çıkış uzunluğu kullanılmıştır. İlk geometride 10 adet, ikinci geometride 20 adet ve üçüncü geometride 30 adet batarya kullanılmıştır. Modüldeki batarya sayıları artırılarak modül içerisindeki sıcaklık değişimlerini incelemek amaçlanmıştır.

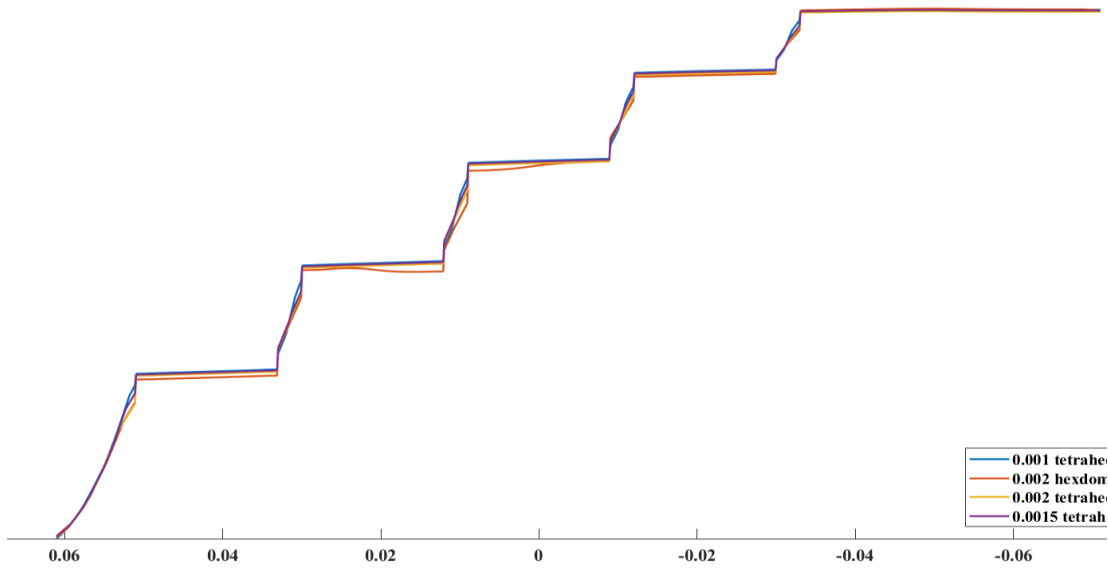


Şekil 2.5. 2S5P, 2S10P ve 3S10P dizilimlerinin üç boyutlu görünüşleri

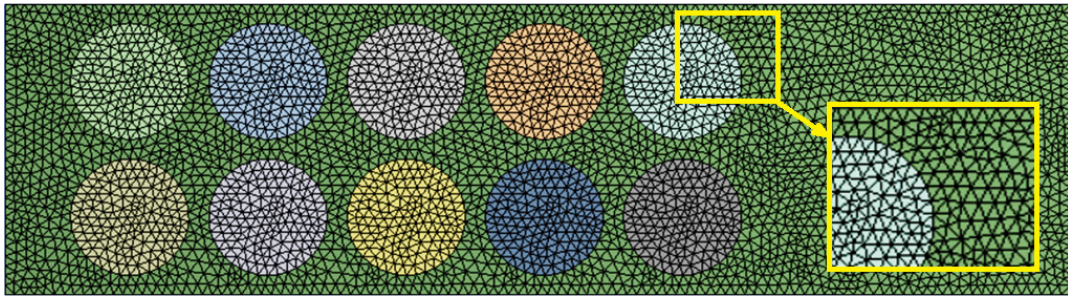
2.2. Ağ Yapısı

Ağ yapısı seçilirken en kısa zamanda hassas sonuçlar verecek yapının seçilmesine özen gösterilmiştir. Kritik ısı transferinin silindirik yapıdaki batarya ile soğutucu akışkan arasında gerçekleşmesinden dolayı ilk kriter daire etrafındaki mesh yapısına odaklanmak olmuştur. Dairesel yapının etrafında dört yüzlü yapılar kullanmak daha doğru sonuçlar

verdiği için altı yüzlü elemanlı ağ yapısı elenmiştir. Batarya ile akışkan arasındaki düğüm noktalarının aynı koordinatlarda olmasına dikkat edilmiştir. Aksi takdirde çözümdeki hata oranı artacaktır [8]. Optimizasyonu yapmak için dört yüzlü ve altı yüzlü elemanlar kullanılmıştır. Soğutucu akışkan olarak havanın kullanıldığı ve Re sayısının 10 olarak seçildiği 20 mm çıkış uzunluğuna sahip 2S5P analizinde X eksenı boyunca dizilmiş 5 paralel bataryanın yüzey sıcaklıkları kullanılan mesh yöntemine göre grafikte verilmiştir. Grafikten sonuçların birbirine yakın olduğu görülmektedir. Maksimum kenar boyutu 0.001 mm olan ağ yapısı ile daha hassas sonuçlar elde edilmesine rağmen çözüm süresini kısaltmak amacıyla maksimum kenar boyutu 0.0015 mm olan dört yüzlü ağ yapısının kullanılmasına karar verilmiştir. 2S5P geometrisi için 161094 adet düğüm noktası, 787589 adet element; 2S10P geometrisi için 399409 adet düğüm noktası, 1967935 adet element; 3S10P geometrisi için 443911 adet düğüm noktası, 2174953 adet element elde edilmiştir.



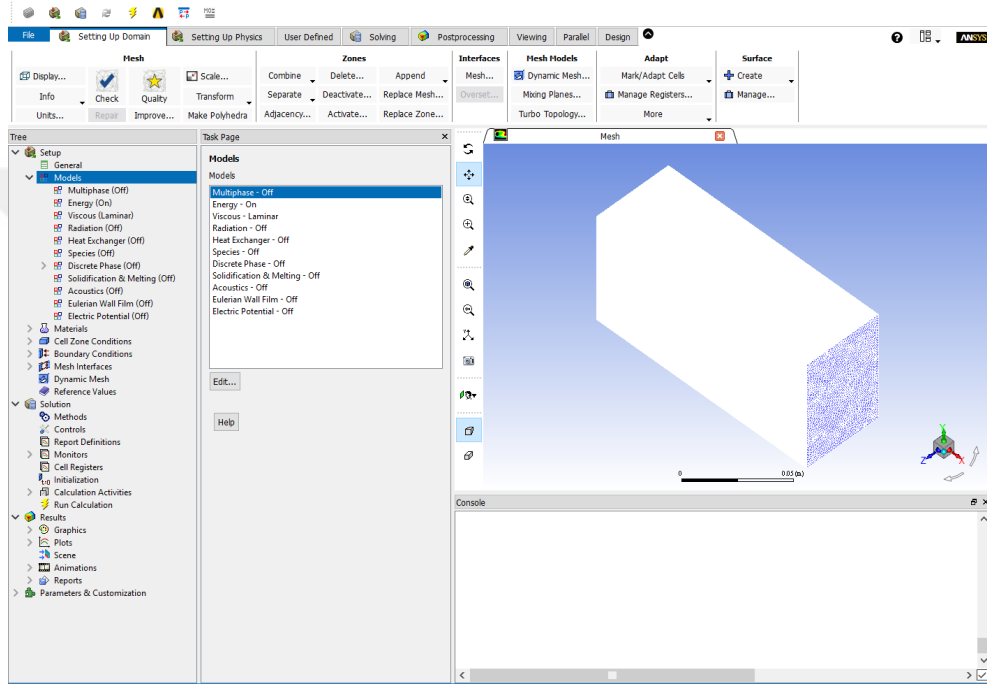
Şekil 2.6. Mesh optimizasyonu



Şekil 2.7. Kullanılan mesh yapısı

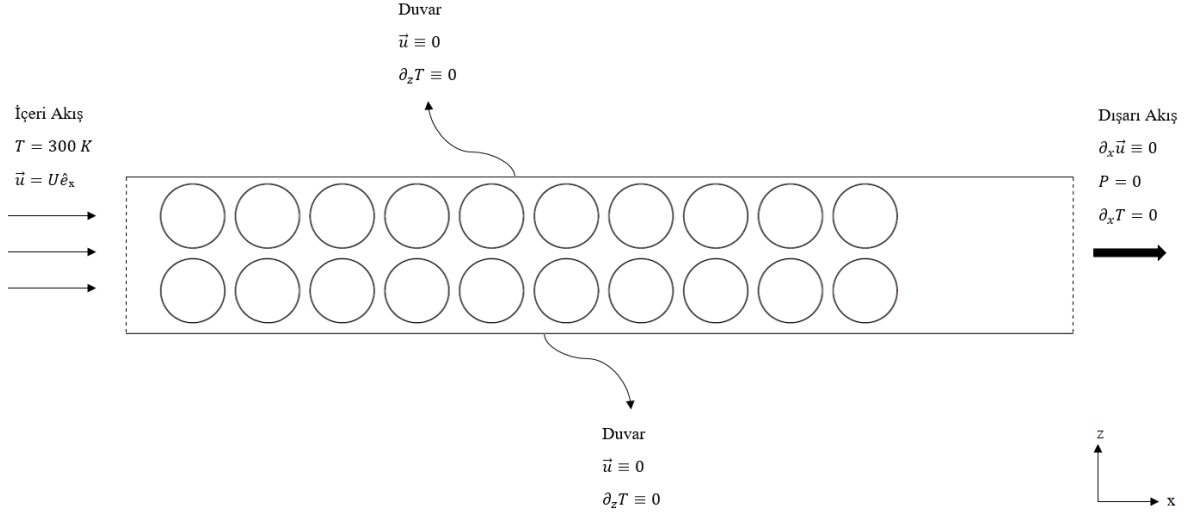
2.3. Sınır Şartları

Ağ yapısı dört yüzlü, maksimum kenar boyutu 0.0015 mm olarak belirlendikten sonra analizi başlatmak için ANSYS 18.2 Fluent'te (Şekil 2.8) laminar akış ve enerji denklemleri aktifleştirilmiş, Li-ion bataryanın malzeme özellikleri, kullanılan akışkanın 300 K derecedeki özelliklerinin girişi yapılmıştır. Sınır şartları ve çözüm yöntemi belirlenerek analizler başlatılmıştır.



Şekil 2.8. Ansys Fluent Setup

Şekil 2.9'de gösterildiği gibi sınır şartları belirlenirken içeri akış sıcaklığı 300 K olarak belirlenmiştir. İçeri giriş hızlarının kullanılan Reynolds sayılarına göre girişi yapılmıştır. Akışkanın yanal duvarları ve bataryaların üst ve alt kenarları adyabatik olarak belirlenmiştir. Dışarı akışta geri bir akım yoktur. Radyasyon ısı transferi çalışma boyunca ihmal edilmiştir.



Şekil 2.9. Sınır şartları

Batarya ve akışkan arasındaki ara yüzde kaymama sınır şartı uygulanmıştır.

Bu çalışmada sadece laminar akış kullanılmıştır. Re sayısının 10, 100 ve 500 değerleri için çalışmalar yapılmıştır (2.1).

$$Re = \frac{UD_h}{\nu} \quad (2.1)$$

ν : Kinematik viskozite (m^2/s)

D_h : Hidrolik çap (m)

U : Hız (m/s)

Akışkanın giriş yaptığı kesit dairesel olmadığı için hidrolik çap hesaplanmıştır (2.2) ve denklem (2.1) de yerine konularak ilgili Re sayılarında hız hesaplamaları yapılmıştır.

$$D_h = \frac{4A}{L} \quad (2.2)$$

A : Kesit alanı (m^2)

L : Kesitin çevresi (m)

Kullanılan soğutucu akışkanların girişteki sıcaklığı 300 K olarak alınmıştır. Buna bağlı olarak hava ve suyun 300 K sıcaklıktaki termofiziksel özellikleri kullanılmıştır.

Tablo 2.2. Suyun 300 K'deki özellikleri

Suyun Özellikleri	Değerler
Yoğunluk (kg/m ³)	996.5
C _p (J/kgK)	4179
k (W/mK)	0.609
Dinamik Viskozite (Pas)	0.0008585
Kinematik Viskozite (m ² /s)	0.000008619

Tablo 2.3. Havanın 300 K'deki özellikleri

Havanın Özellikleri	Değerler
Yoğunluk (kg/m ³)	1.177
C _p (J/kgK)	1004.9
k (W/mK)	0.0262
Dinamik Viskozite (Pas)	0.0000185
Kinematik Viskozite (m ² /s)	0.0000158

Süreklilik denklemi denklem (2.3)'te görülmektedir.

$$\nabla \cdot \vec{v} = 0 \quad (2.3)$$

$\vec{v}$: Akışkanın hızı (m/s)

Momentum korunumu denklem (2.4)'te gösterilmiştir.

$$\rho_a \frac{d\vec{v}}{dt} = -\nabla P + \mu \nabla^2 \vec{v} \quad (2.4)$$

ρ_a : Akışkanın yoğunluğu (kg/m³)

$\vec{v}$: Akışkanın hızı (m/s)

P: Statik basınç (Pa)

μ : Dinamik viskozite (m²/s)

Akışkanın enerji korunumu denklem (2.5)'da verilmiştir.

$$\rho_a c_a \frac{\partial T_w}{\partial t} = \nabla \cdot (\rho_a c_a \vec{v} T_w) = \nabla \cdot (k_w \nabla T_w) \quad (2.5)$$

ρ_a : Akışkanın yoğunluğu (kg/m³)
 c_a : Akışkanın özgül ısı (J/kgK)
 k_w : Akışkanın ısı iletkenliği (W/mK)
 $\vec{v}$: Akışkanın hızı (m/s)
 T_w : Akışkanın sıcaklığı (K)

Bataryanın enerji korunumu denklem (2.6)'da verilmiştir.

$$\rho_b c_b \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k_b \nabla T) + Q \quad (2.6)$$

ρ_b : Bataryanın yoğunluğu (kg/m³)
 c_b : Bataryanın özgül ısı (J/kgK)
 k_b : Bataryanın ısı iletkenliği (izotropik kabul edilmiş) (W/mK)

Hava ve su soğutucu akışkanları ile analizler yapıldıktan sonra su akışkanına nano parçacık eklenerek analizler tekrarlanmıştır. Nano olarak Al₂O₃ parçacıkları seçilmiştir. Al₂O₃'ün özellikleri aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Tablo 2.4. Al₂O₃'ün özellikleri

Al ₂ O ₃ Özellikleri	Değerler
Yoğunluk (kg/m ³)	3970
Cp (J/kgK)	765
k (W/mK)	40

Nanoakışkan olarak Al₂O₃-su kullanılmıştır. Al₂O₃'ler akışkan içerisine %1, %3 ve %5 oranlarında katılmıştır. Nanoakışkanın yoğunluğu denklem (2.7), özgül ısı kapasitesi denklem (2.8), ısı iletkenliği denklem (2.9) ve viskozitesi denklem (2.10) kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\rho_{nf} = (1 - \varphi)\rho_f + \varphi\rho_s \quad (2.7)$$

ρ_{nf} : Nanoakışkan yoğunluğu (kg/m³)
 ρ_f : Akışkan yoğunluğu (kg/m³)

ρ_s : Nanoparçacık yoğunluğu (kg/m³)

φ : Nanoparçacık oranı

$$(\rho C_p)_{nf} = (1 - \varphi)(\rho C_p)_f + \varphi(\rho C_p)_s \quad (2.8)$$

$C_{p,nf}$: Nanoakışkan özgül ısı kapasitesi (J/kgK)

$C_{p,f}$: Akışkan özgül ısı kapasitesi (J/kgK)

$C_{p,s}$: Nanoparçacık özgül ısı kapasitesi (J/kgK)

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = \frac{k_s + 2k_f - 2\varphi(k_f - k_s)}{k_s + 2k_f + \varphi(k_f - k_s)} \quad (2.9)$$

k_{nf} : Nanoakışkan ısıl iletkenlik (W/mK)

k_f : Akışkan ısıl iletkenlik (W/mK)

k_s : Nanoparçacık ısıl iletkenlik (W/mK)

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_f}{(1 - \varphi)^{2.5}} \quad (2.10)$$

μ_{nf} : Nanoakışkan dinamik viskozitesi (Pas)

μ_f : Akışkan dinamik viskozitesi (Pas)

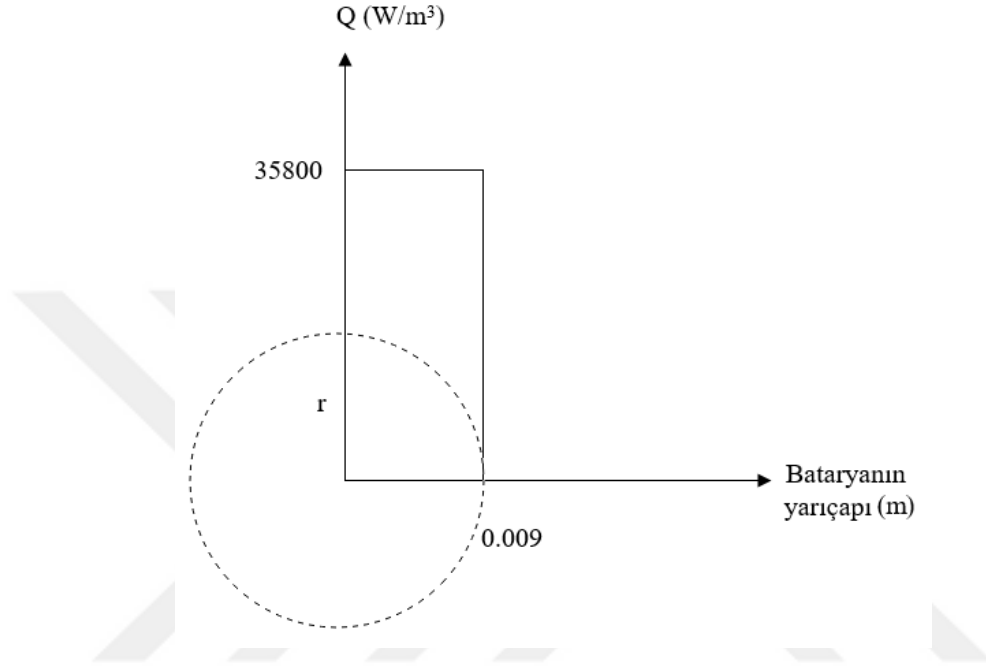
Tablo 2.2, 2.3, 2.4., formül (2.7), (2.8), (2.9) ve (2.10) kullanılarak aşağıdaki Tablo 2.5 elde edilmiştir.

Tablo 2.5. Nano Su Özellikleri

Su+Al ₂ O ₃ Özellikleri	0.01	0.03	0.05
Yoğunluk (kg/m ³)	1026.235	1085.705	1145.175000
C _p (J/kgK)	4046.929081	3804.489981	3587.231056
k (W/mK)	0.626628649	0.66292662	0.700681782
Dinamik Viskozite (Pas)	0.000880344	0.000926426	0.000975958
Kinematik Viskozite (m ² /s)	0.000000858	0.000000853	0.000000852

Malzeme özellikleri programa girildikten sonra sıra bataryanın nasıl bir ısı kaynağı olacağının belirlenmesine gelmiştir. Bunun için Li-ion bataryaya sabit bir sıcaklık veya sabit

bir ısı akısının verilmesi yerine sabit bir ısı üretimi değeri verilmiştir (Şekil 2.9). Böylece soğutma sonucunda bataryanın içerisindeki sıcaklık gradyanları gözlenebilmiştir. Bu değer daha önce yapılan deneysel bir çalışmadan alınmıştır ve bataryanın deşarj anında ürettiği 35800 W/m^3 sabit değeri kullanılmıştır[35].



Şekil 2.10. Bataryadaki ısı üretimi

Prandtl sayısı denklem (2.11)'de verilmiştir. Sonuçların Pr sayıları kıyaslanarak ısı transferleri değerlendirilmiştir.

$$Pr = \frac{c_p \mu}{k} \quad (2.11)$$

μ : Dinamik Viskozite (Pas)

k : Isı iletim katsayısı (W/mK)

C_p : Isı Kapasitesi (J/kgK)

3. BULGULAR

Bu çalışmada elektrikli araçların Li-ion batarya modüllerinde soğutucu akışkan olarak kullanılan hava, su ve nanoakışkanların, farklı Re değerlerindeki ve farklı batarya dizilimlerindeki soğutma performansları incelenmiştir. Gösterilen analiz sonuçları sırasıyla bataryanın ve akışkanın birbirinden bağımsız izometrik görünüşünün sıcaklık alanı (a), bataryaların orta düzlem üzerindeki sıcaklık alanı (b), orta düzlem üzerindeki basınç (c) ve hız (d) alanı olarak görselleştirilmiştir. Sonuçlar gösterilirken ilk olarak hava soğutmalı bataryanın 2S5P, 2S10P ve 3S10P batarya dizilimlerindeki analiz sonuçları sırasıyla $Re=10$, $Re=100$ ve $Re=500$ değerleri için gösterilmiştir. Daha sonra soğutucu akışkan olarak kullanılan su ile yapılan analiz sonuçları sıralanmıştır. Sonuçlar izometrik ve orta düzlemdeki sıcaklık alanları verilerek gösterilmiştir. Sonrasında ise soğutucu akışkan olan suyun içerisine katılan nano parçacıkların (%1, %3, %5) geometrik dizilim sırası takip edilerek (2S5P, 2S10P, 3S10P) sabit Re sayılarında sonuçları sıralanmıştır.

3.1. Hava Soğutmalı Batarya Modülü için Bulgular

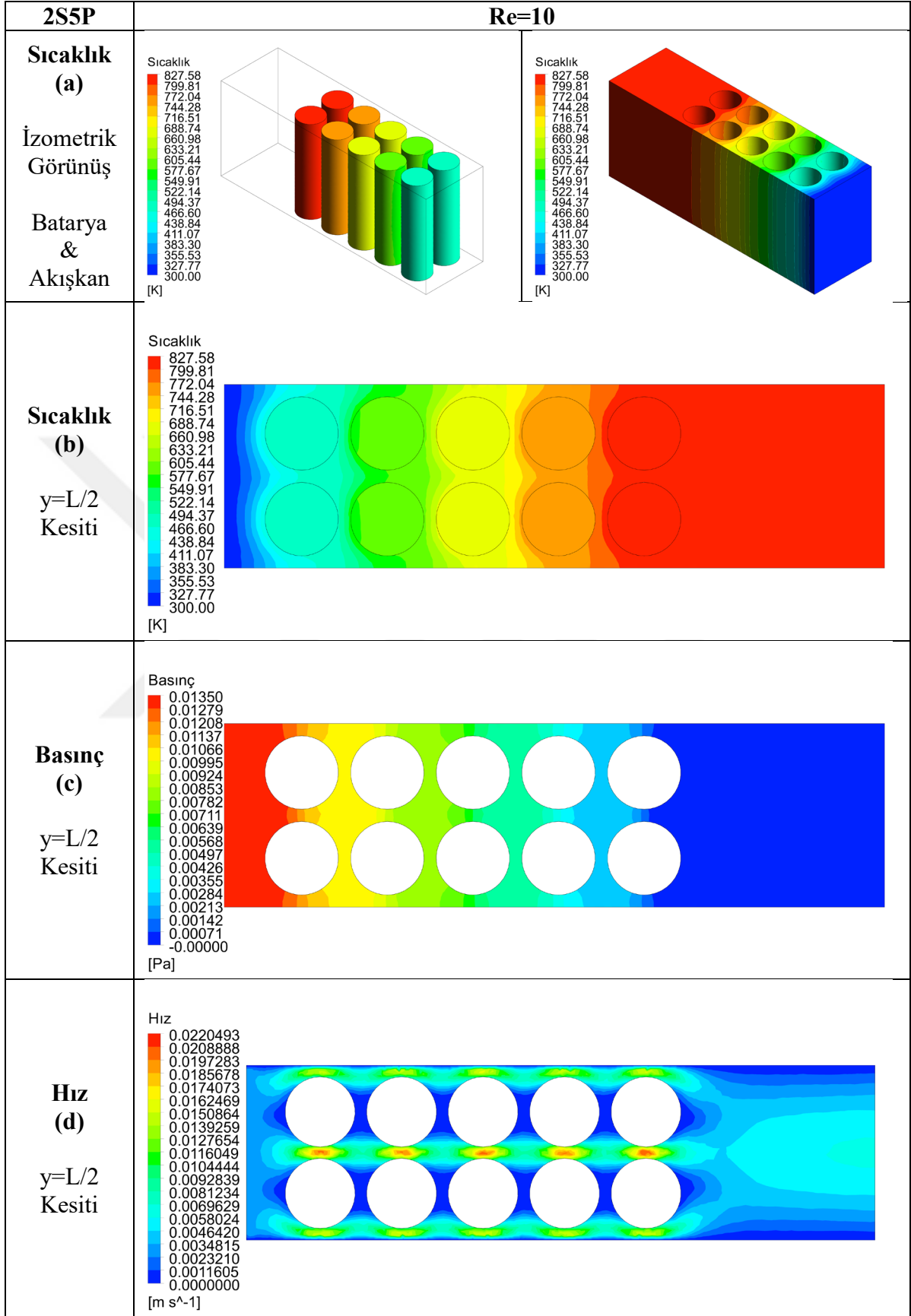
Hava soğutmalı batarya modülünde 2S5P (2 seri, 5 paralel), 2S10P (2 seri, 10 paralel) ve 3S10P (3 seri, 10 paralel), olmak üzere üç farklı dizilim incelenmiştir.

Şekil 3.1-3.3'te 2S5P batarya dizilimi için soğutucu akışkan olarak seçilen havanın farklı Re sayılarındaki (10,100,500) analiz sonuçları gösterilmiştir. Bataryaların eksenine paralel yönde çok zayıf sıcaklık gradyanları gözlenmektedir. Şekil 3.1'de sıcaklık, basınç ve hız alanlarını gösteren niteliksel analiz sonuçları verilmiştir ve bunlar sırasıyla şekil 3.1 (a), (b), (c) ve (d)'de gösterilmiştir. Şekil 3.1 (a), 2S5P batarya konfigürasyonunun $Re=10$ değeri için izometrik görünüşlü üç boyutlu sıcaklık alanını sol tarafta sadece bataryalar için, sağ tarafta sadece soğutucu akışkan için göstermektedir. X eksenini doğrultusunda zayıf sıcaklık gradyanları gözlenmektedir.

Hız alanında, Şekil 3.1 (d), x eksenini doğrultusunda ilerlerken paralel iki batarya arasında keskin bir yavaşlama olduğu göze çarpmaktadır. Bu sınır tabakanın bataryanın önündeki durma noktasından ortalama sonra bataryanın merkez noktası merkez olacak

şekilde $\pm 120^\circ$ sonra ayrılmasından dolayı kaynaklanmaktadır. Şekil daha ayrıntılı olarak incelendiğinde her bir bataryanın arkasından oluşması beklenen resirkülasyon bölgesi eksenini doğrultusundaki ardışık ilk dört batarya arasında gelişmemiştir. Bu da bataryanın aşağı yöndeki akımının komşu bataryanın yukarı doğru olan akımıyla olan etkileşiminden kaynaklanmaktadır. Sonuç olarak, sistemde düşük hız bölgeleri oluşur. Birbirini izleyen ardışık bataryalar arasında zorlanmış taşınımın neredeyse yok olduğu bu düşük hız bölgeleri sistemin soğutma performansının düşmesine neden olmaktadır. Hızdaki bu eğilim, akışın yavaş olduğu bölgelerde yoğun sıcaklık gradyanlarına izin vermeyen sıcaklık alanında çok açık bir şekilde görülmektedir (Şekil 3.1 (a)). Diğer taraftan, akışkanın iki seri batarya arasında akmaya zorlandığı akış hızının yüksek olduğu aralıkta negatif basınç gradyanları görülmektedir (Şekil 3.1 (c)). Bu akış hızının yüksek olduğu aralıkla temas halinde olan bataryanın ve komşu bataryanın cidarları soğutma sürecinden efektif bir şekilde etkilenir. Sistemdeki genel akış böyle bir etki tarafından hızlandırılır ve böylece daha verimli bir şekilde ısıyı zorlanmış taşınım sayesinde aşağı akıntıya taşıyabilir. Bu davranış Şekil 3.1 (d) hız alanında, sistemde en yüksek hız değerlerinin görüldüğü iki seri batarya arasında oluşan zayıf jet akımlarının olduğu yerlerde ve batarya ile duvar arasındaki aralıktaki hızlı akışta açık bir şekilde görülmektedir. Ayrıca, şekil 3.1 (b)'de, sıcaklık gradyanlarının iki seri batarya arasındaki aralıkta ve batarya ile duvar arasındaki aralıkta paralel iki batarya arasındaki gradyanlara göre daha yoğun olması, Re sayısı çok küçük olsa bile, zorlanmış taşınımın rolünü göstermiştir.

Modüldeki sıcaklık dağılımına genel olarak bakıldığında zaman bataryalar arasındaki sıcaklık farkının yüksek olduğu görülmektedir. Sisteme giren soğutucu akışkan olan havanın ilk temas ettiği bataryanın sıcaklığının 494 K değerinde olması ve paralel dizilimdeki son bataryanın sıcaklığının 827 K değerine ulaşması, $Re=10$ değerinde kullanılan havanın batarya soğutma sisteminde Li-ion bataryanın deşarj anında çalışma sıcaklığı aralıklarını göz önünde bulundurulduğunda (-20°C 'den 60°C 'ye) ne kadar verimsiz olduğunu göstermektedir.

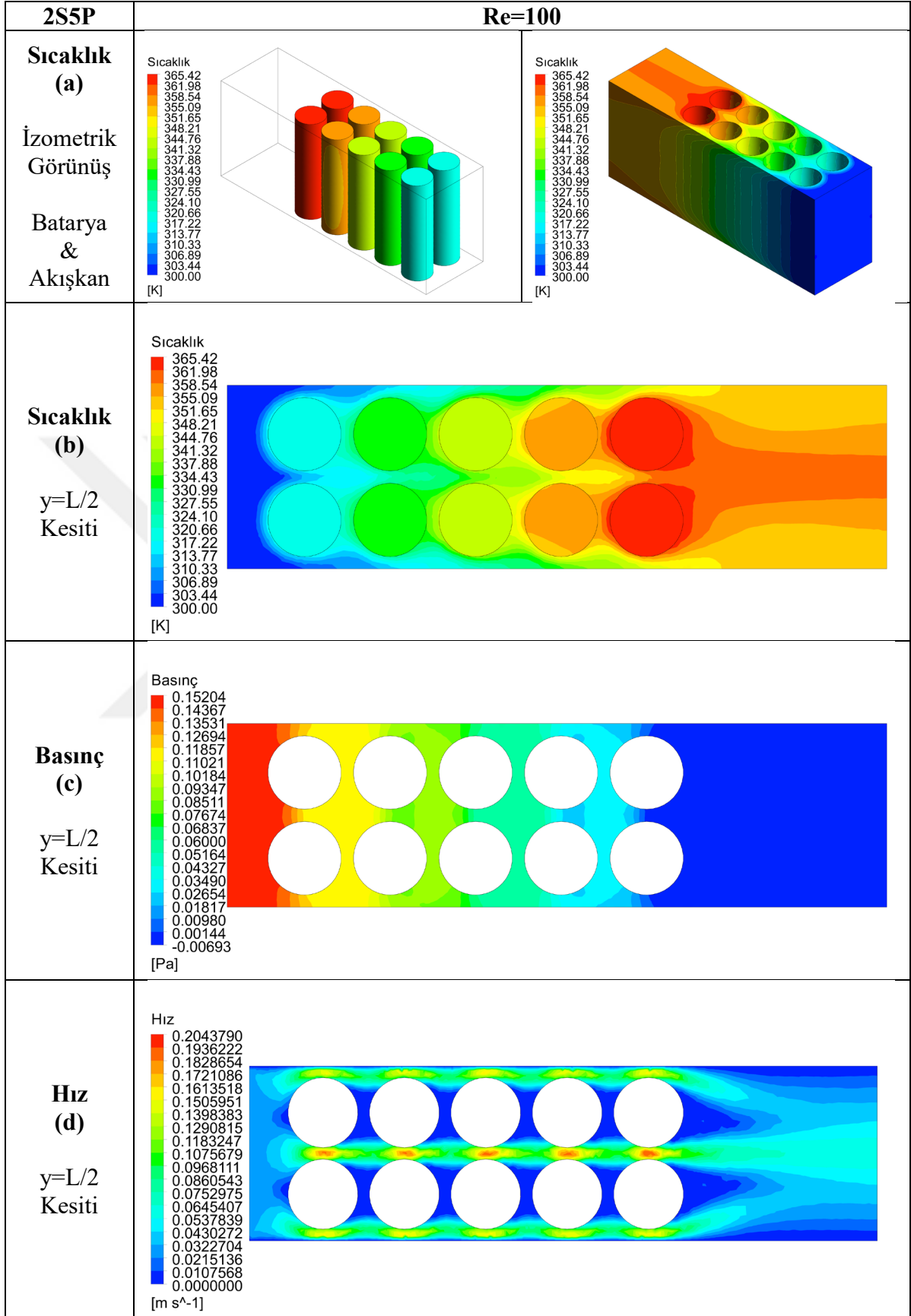


Şekil 3.1. Re=10, hava soğutmalı, 2S5P batarya dizilimi analiz sonuçları

Şekil 3.2’de, Re değerinin 100 olduğu durum, yani akışkanın atalet kuvvetlerinin daha önemli bir rol oynadığı daha karmaşık bir durum görülmektedir. Şekil 3.2(a)’da üç boyutlu sıcaklık alanının izometrik bataryada görünüşündeki hali soldaki resimde görülmektedir. Eksenel sıcaklık gradyanlarının $Re=10$ değerine göre daha belirgin olduğu akışkan fazı sağdaki resimde gözükmemektedir. Bu durum akışın ataletinin öneminin arttığını göstermektedir. Alt ve üst duvarlardaki sıcaklık alanında daha derin bir etkiye sahip olan taşınım ve ısı sınır tabakadan kaynaklanmaktadır. Bu özellikle sağdaki resimde açık bir şekilde görülmektedir. Bununla beraber, sıcaklık, basınç ve hızın orta düzlemdeki analizleri, üç boyutlu akış hakkında ışık tutmaktadır.

$Re=10$ hız alanında akışın gösterdiği eğilimler, $Re=100$ için de benzer şekilde gözlenmektedir, Şekil 3.2 (d). Bataryalar arasındaki ve bataryaların duvarla olan dar aralığundan dolayı sistemde sıkışık bir geometrik dizilim görülmektedir. Bu sıkışık dizilim bataryalar arasındaki akışın rahatça gelişmesine izin vermez. Eğer bu bastırıcı faktör olmasaydı, silindirik şeklindeki bataryadan dolayı hidrodinamik kararsızlık $Re=100$ değerlerinde oluşurdu ve son silindirden sonra akış birbirini takip eden vorteksler oluşurdu. (von Karman vortex Street). $Re=10$ bu hidrodinamik kararsızlığın oluşabileceği değerin altındadır. Sadece $Re=500$ değerinde, Şekil 3.3’te, hidrolik kararsızlığın başladığının göstergesi olarak enine simetrisinin bozulduğu görülmüştür (son iki bataryadan sonra görülen iki farklı girdap). Düşük Re değeri ($Re=10$) ile yüksek Re değerleri ($Re=100$ ve $Re=500$) karşılaştırıldığında dikkat çeken fark iki seri batarya arasında ve batarya ile duvar arasında daha güçlü jet akımlarının meydana gelmesidir. Bu jet akımları şiddetli zorlanmış taşınım ile ilgili olduğundan sıcaklık alanlarında ve ısı yayılımı üzerinde büyük etkileri vardır. Bu durum özellikle Şekil 3.2 (b) ve Şekil 3.3 (b)’de gözlenmektedir. Akışın en sonundaki iki seri batarya arasından ve duvarla olan aralıklarından toplam üç jet akışı çıkmaktadır. Bu jetler bataryaların sıkışık dizilimlerinden dolayı akışa engel olması özelliğini baskılamaktadır ve zorlanmış ısı taşınımını aşağı akıntısıyla keskin sıcaklık gradyanları gözlenmektedir.

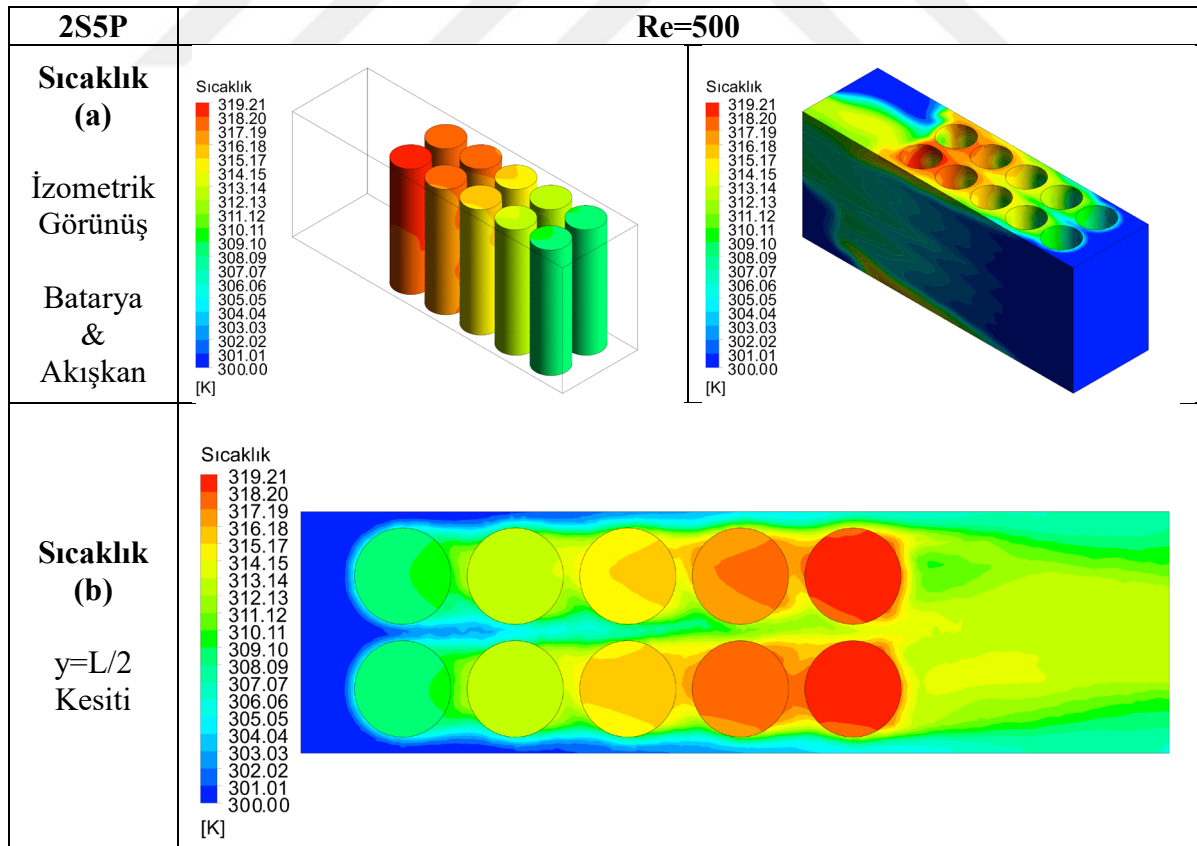
Sistemdeki maksimum ve minimum sıcaklık arasındaki fark 65 K derecedir. Batarya termal yönetim sisteminden istenen modül içerisindeki sıcaklık değişimlerinin küçük olması özelliği $Re=10$ sonuçlarına göre daha iyi sağlamıştır. Fakat Li-ion bataryanın deşarj anındaki çalışma sıcaklığı göz önünde bulundurulduğunda havanın $Re=100$ sonuçlarının $Re=10$ sonuçlarında olduğu gibi yetersiz kaldığı görülmektedir.



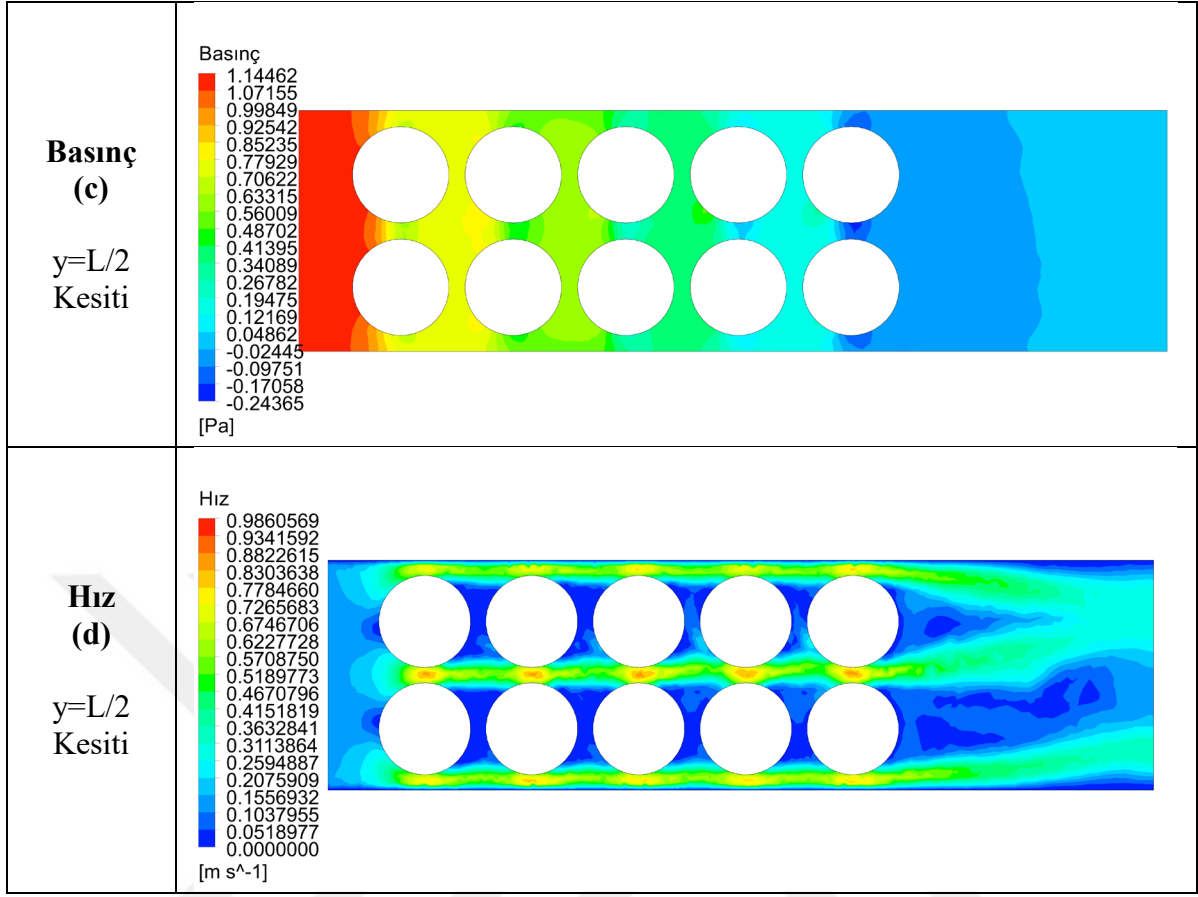
Şekil 3.2. Re=100, hava soğutmalı, 2S5P batarya dizilimi analiz sonuçları

Şekil 3.3 (a)'da akışkanın ve bataryanın sıcaklık gradyanları görülmektedir. Beklenildiği gibi $Re=10$ ve $Re=100$ için korunan düzlemsel simetri $Re=500$ için bozulmuştur. Bu durum Şekil 3.3 (a)'da görselleştirilen üç boyutlu sıcaklık alanında, özellikle akışkan fazında belirgin olarak görülmektedir. Artan Re sayısı ile beraber her bir batarya arasındaki ve bataryalar ile duvar arasındaki akış rejimindeki basınç gradyanları Şekil 3.3 (c)'de görüldüğü gibi artmaktadır. $Re=10$ ve $Re=100$ 'den farklı olarak $Re=500$ için iki paralel batarya arasındaki ayrılma bölgesi, merkez çizgisinde ortaya çıkan jetler tarafından kesilmiştir. Böylece iki ardışık batarya arasında daha efektif bir soğutma elde edilmiştir (Şekil 3.3 (b)). Bu davranışın direk sonucu bataryaların içerisindeki belirgin değerlerde gözükür. Aslında $Re=10$ ve $Re=100$, $Re=500$ ile karşılaştırıldığında, düşük Re değerlerinde batarya içerisindeki sıcaklığın her bir batarya için neredeyse sabit olduğu, ama $Re=500$ için durumun böyle olmadığı kolayca fark edilebilir.

Sistemdeki maksimum ve minimum sıcaklık arasındaki fark 19 K derecedir. Batarya termal yönetim sisteminden istenen modül içerisindeki sıcaklık değişimlerinin küçük olması özelliğini $Re=10$ ve $Re=100$ sonuçlarına göre çok daha iyi sağlamıştır.

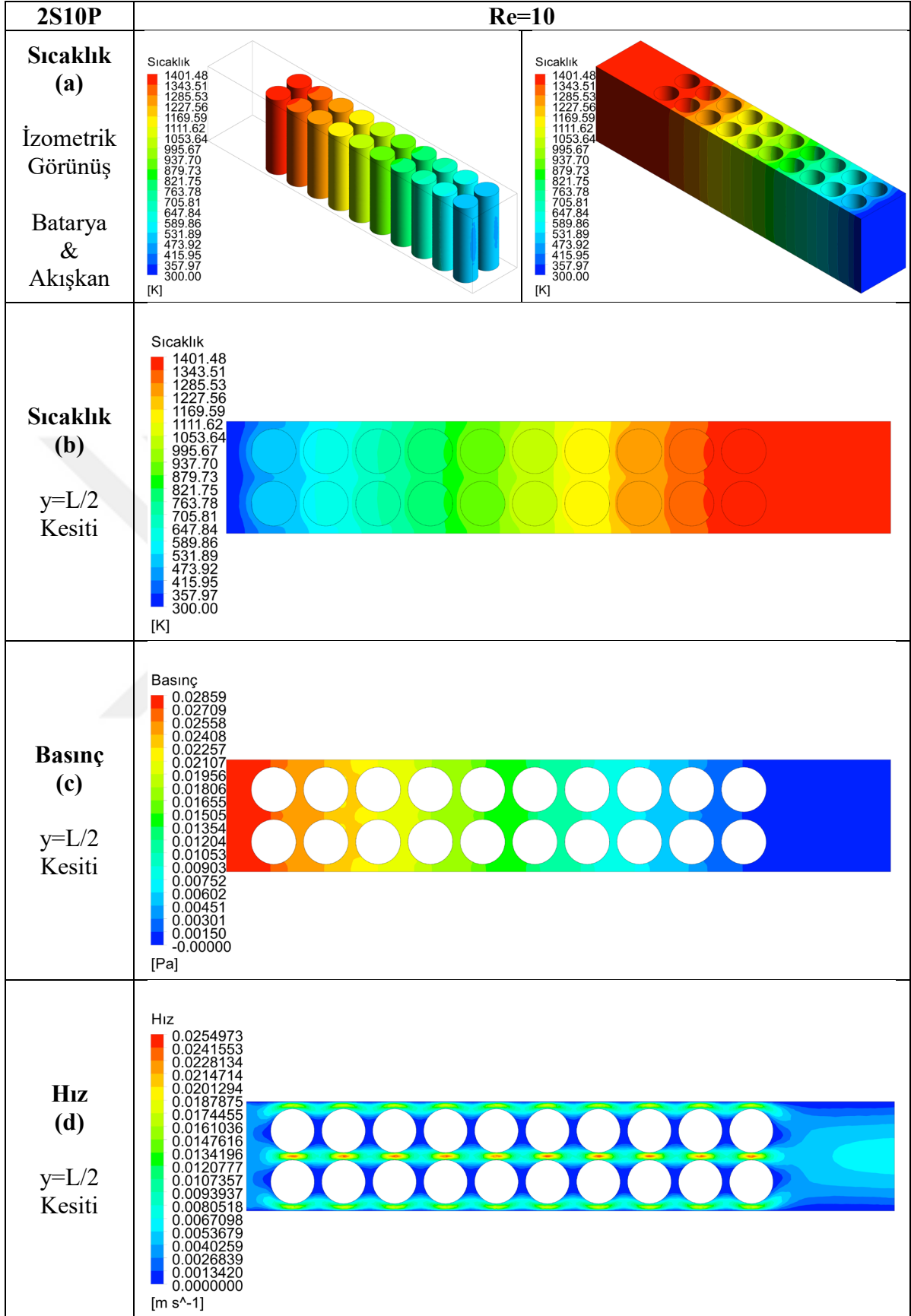


Şekil 3.3. $Re=500$, hava soğutmalı, 2S5P batarya dizilimi analiz sonuçları



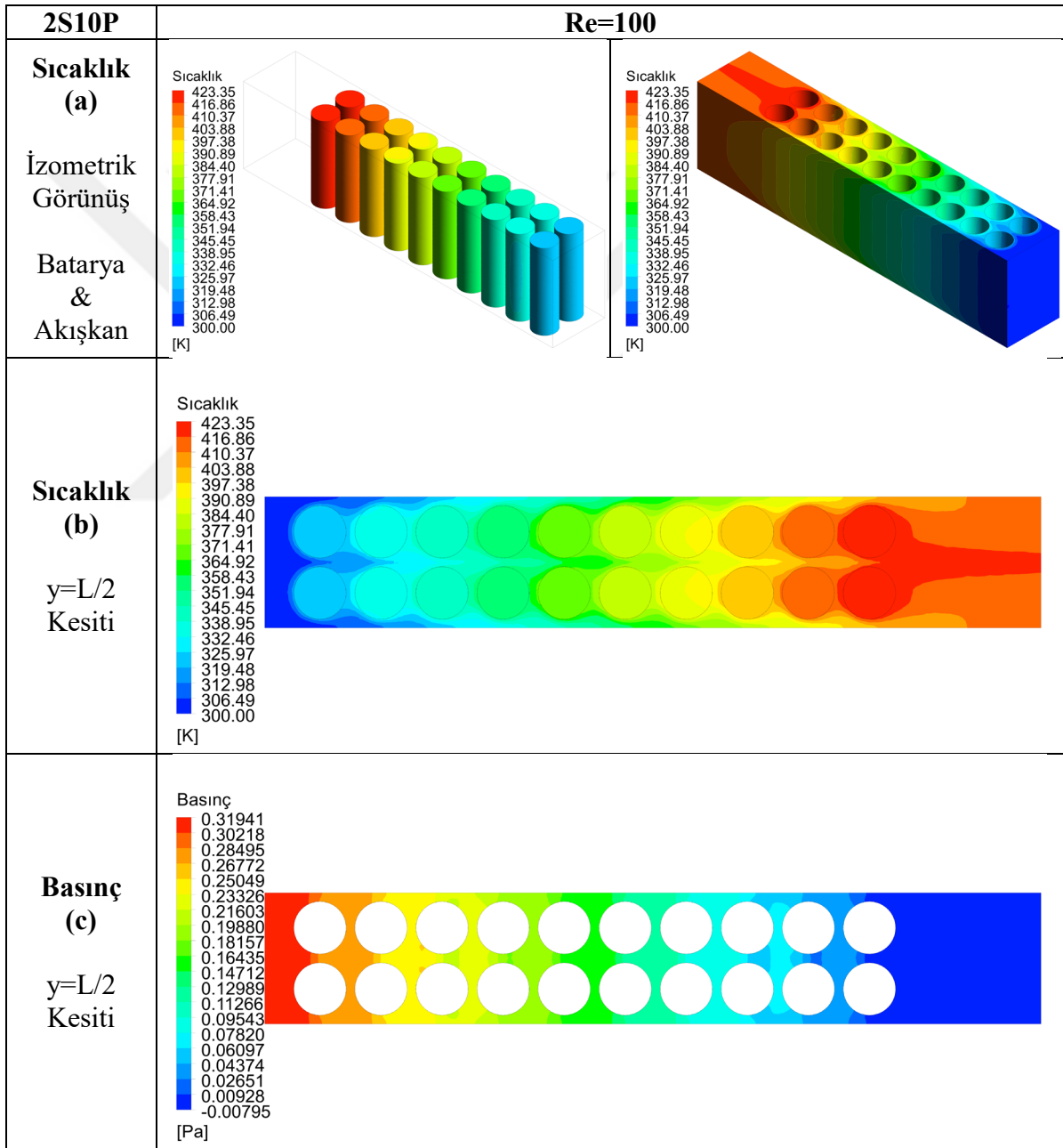
Şekil 3.3. 'in devamı

Niteliksel olarak benzer eğilimler 2S10P için de gözlenmektedir. Şekil 3.4-3.6'te 2S10P batarya dizilimi için soğutucu akışkan olarak seçilen havanın farklı Re sayılarındaki (10,100,500) analiz sonuçları gösterilmiştir. Beklenildiği gibi artan batarya sayısı ile beraber sistemde daha fazla ısı üretimi olacağı için elde edilen maksimum sıcaklıklar da buna paralel olarak bir artış beklenmektedir. Aynı Re sayılarına sahip olmalarına rağmen ($Re=10$), Şekil 3.4 (a)'da görülen sıcaklık değerleri Şekil 3.1 (a)'daki değerlerin neredeyse iki katına çıkmıştır. Bataryaların aşırı ısınmasından dolayı soğutmanın yetersiz kalmasıyla meydana gelen ısıl sürüklenme açıkça görülmüştür. Şekil 3.4 (d)'de görülen hız alanında Şekil 3.1 (a)'daki gibi hafif jet akımları görülmektedir ve hız alanları niteliksel olarak neredeyse birebir aynı eğilimi göstermektedir.

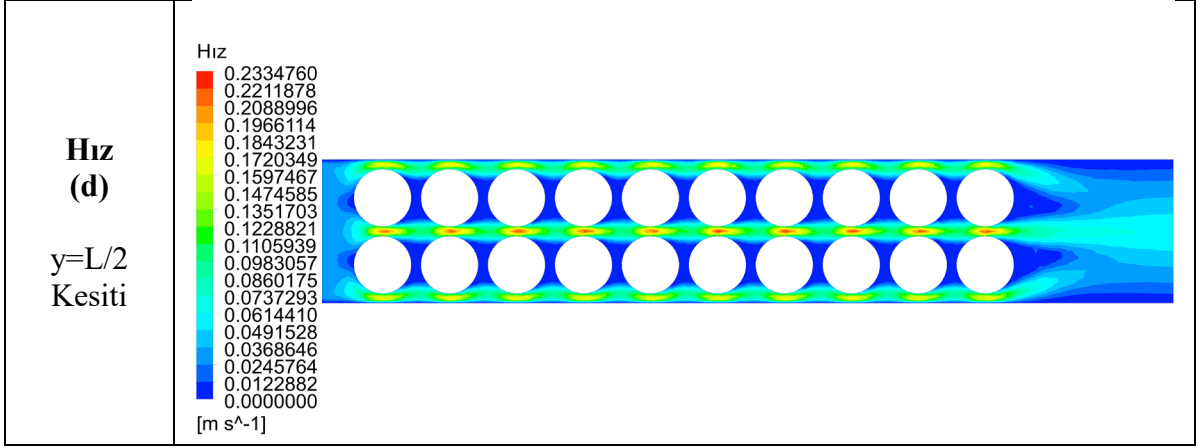


Şekil 3.4. Re=10, hava soğutmalı, 2S10P batarya dizilimi analiz sonuçları

Re=100 için analizlerin yapıldığı Şekil 3.5 (d)'de görülen enine simetri, aynı Re değerinin kullanıldığı 2S5P sonuçlarında olduğu gibi (Şekil 3.2 (d)) bozulmamıştır. Seri bataryalar arasında oluşan jet akımları ve bataryaların duvarla olan aralıktaki hızlı akımlar dikkat çekmektedir. Bu bölgelerde hızın artmasına paralel olarak Şekil 3.4 (b)'de görülen kademe kademe artan sıcaklık gradyenlerinin aksine bataryanın etrafını çevreleyen sıcaklık gradyenleri gözlenmektedir.

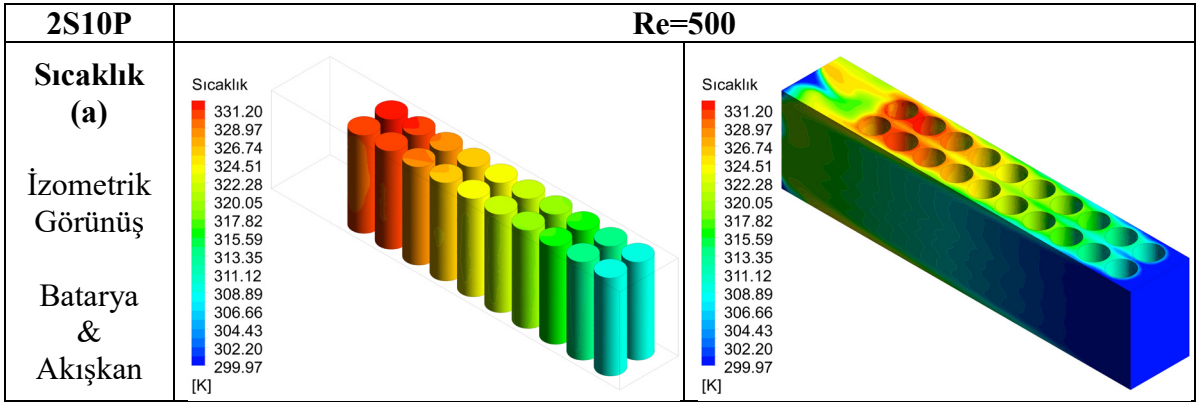


Şekil 3.5. Re=100, hava soğutmalı, 2S10P batarya dizilimi analiz sonuçları

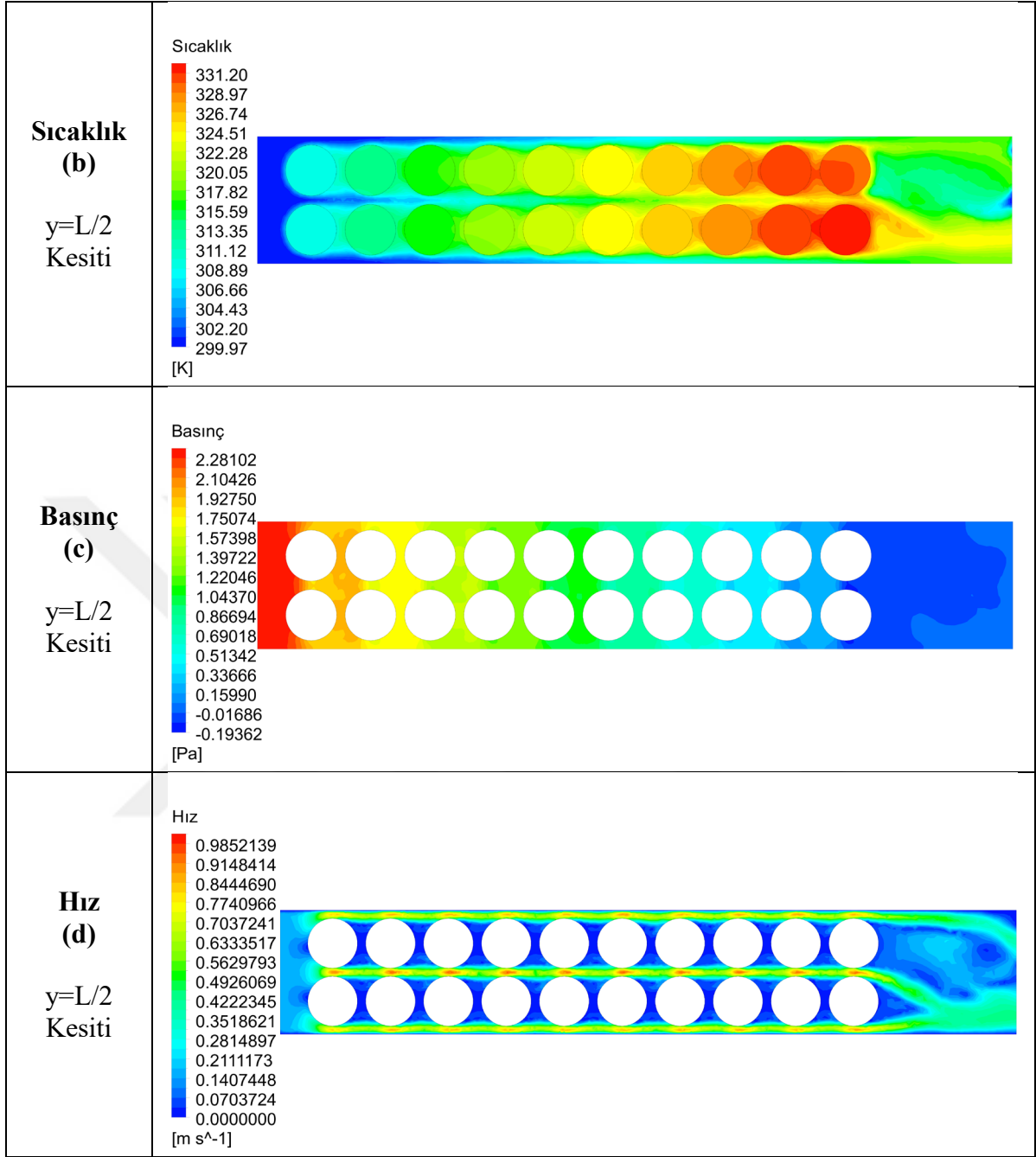


Şekil 3.5. 'in devamı

Şekil 3.6'da 2S10P batarya diziliminde kullanılan hava soğutucu akışkanının $Re=500$ değeri için yapılan analiz sonuçları görülmektedir. Şekil 3.6 (c)'de akışın çıktığı yerden tekrar geri akış olduğu görülmektedir. Bu çıkış uzunluğunun analiz için yetersiz kalmasından kaynaklanmaktadır. Şekil 3.6 (b)'de bu geri akış sıcaklığının son bataryalara ulaşmadığı görüldüğü için bu geri akışın batarya soğutma sistemi üzerindeki etkisi ihmal edilmiştir. Şekil 3.6 (d)'de seri bataryaların yanı sıra bataryalar ile cidar arasında da hafif jet akımlarının olduğu görülmektedir. Bu durum taşınımın daha efektif olmasını sağlamakta ve 2S10P için diğer Re sayılarında sistemde elde edilen maksimum sıcaklıklara göre $Re=500$ sonuçlarında çok daha verimli bir soğutma yapıldığı görülür. Li-ion bataryaların $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ üzerindeki çalışma koşullarında çevrim sayısı ve performansı düşeceği göz önüne alındığında bu Re değerindeki soğutma da uygulamadaki bir batarya termal yönetim sistemi için yeterli olmayacaktır.



Şekil 3.6. $Re=500$, hava soğutmalı, 2S10P batarya dizilimi analiz sonuçları

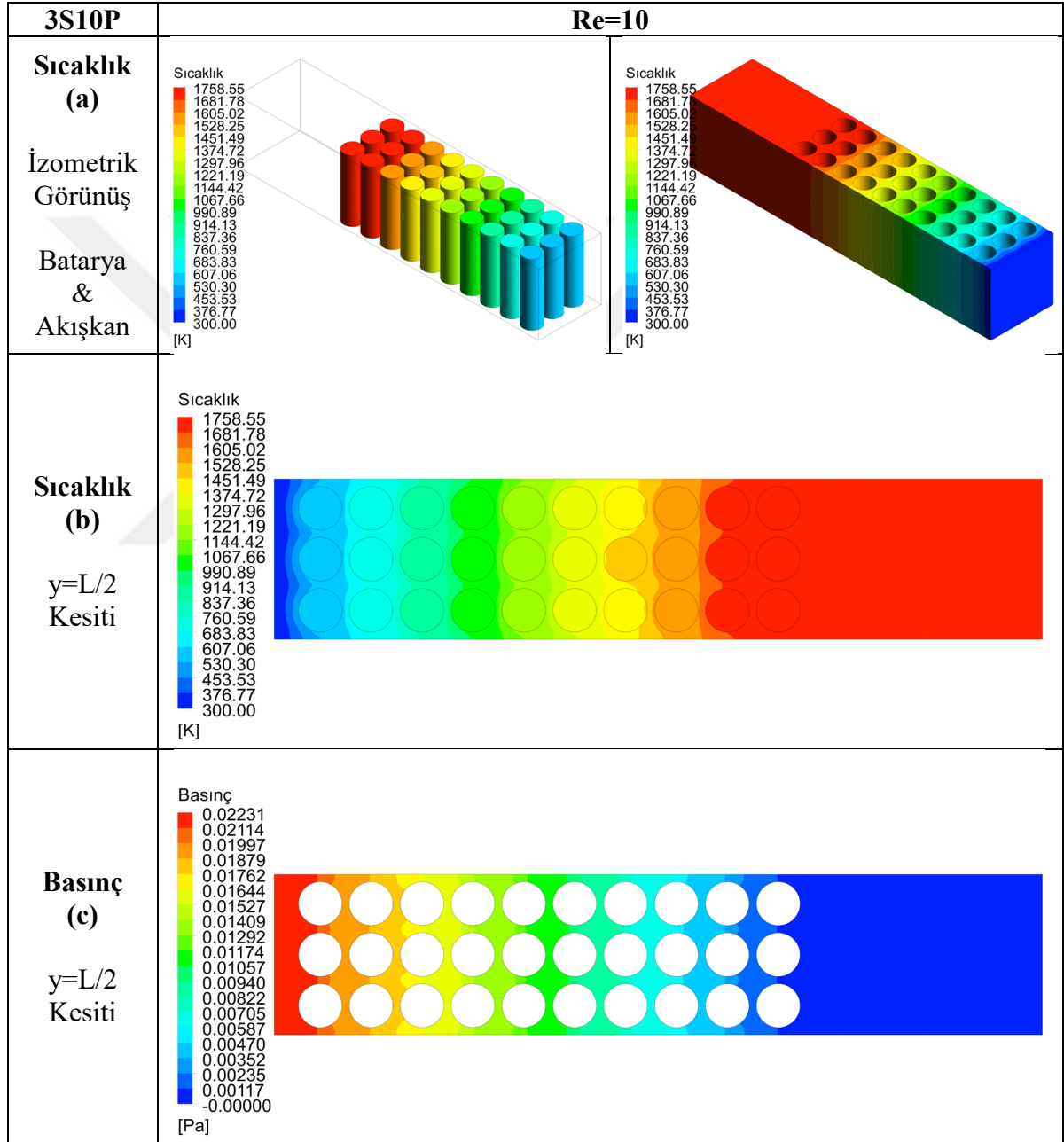


Şekil 3.6. 'in devamı

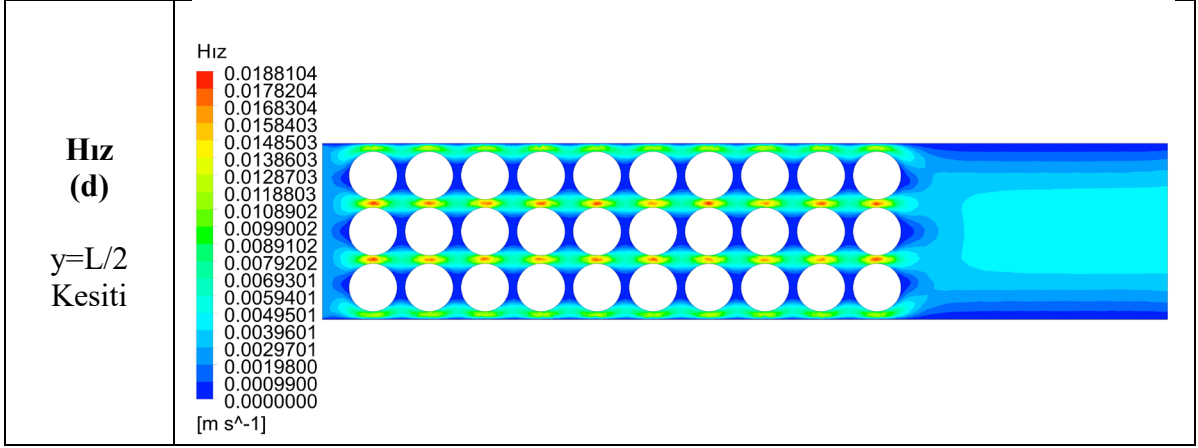
Şekil 3.7, 3.8 ve 3.9'de $Re=10$, $Re=100$ ve $Re=500$ değerlerinin 3S10P için olan değerleri görülmektedir. Sistemlerdeki sıcaklıklar artan batarya sayısına paralel olarak artış göstermiştir.

Şekil 3.7'de soğutucu olarak hava kullanılan analiz sonuçlarının son geometrik dizilimdeki (3S10P) sonuçlarından $Re=10$ için olan değerleri verilmiştir. Havanın $Re=10$ için olan sıcaklık gradyanlarındaki kademe kademe ilerleme 3S10P batarya diziliminde de

aynı şekilde görülmektedir. Şekil 3.7 (d)'de seri bataryalar arasında hafif jet akımlarının olduğu görülmektedir. Hız alanından sistemdeki enine simetrisinin bozulmadığı görülmüştür. 1758 K derece sıcaklığa ulaşan sıcaklık alanı, $Re=10$ için kullanılan bu batarya soğutma sisteminin realitede hiçbir şekilde kullanamayacağını ve bataryaların yanacağını göstermektedir.

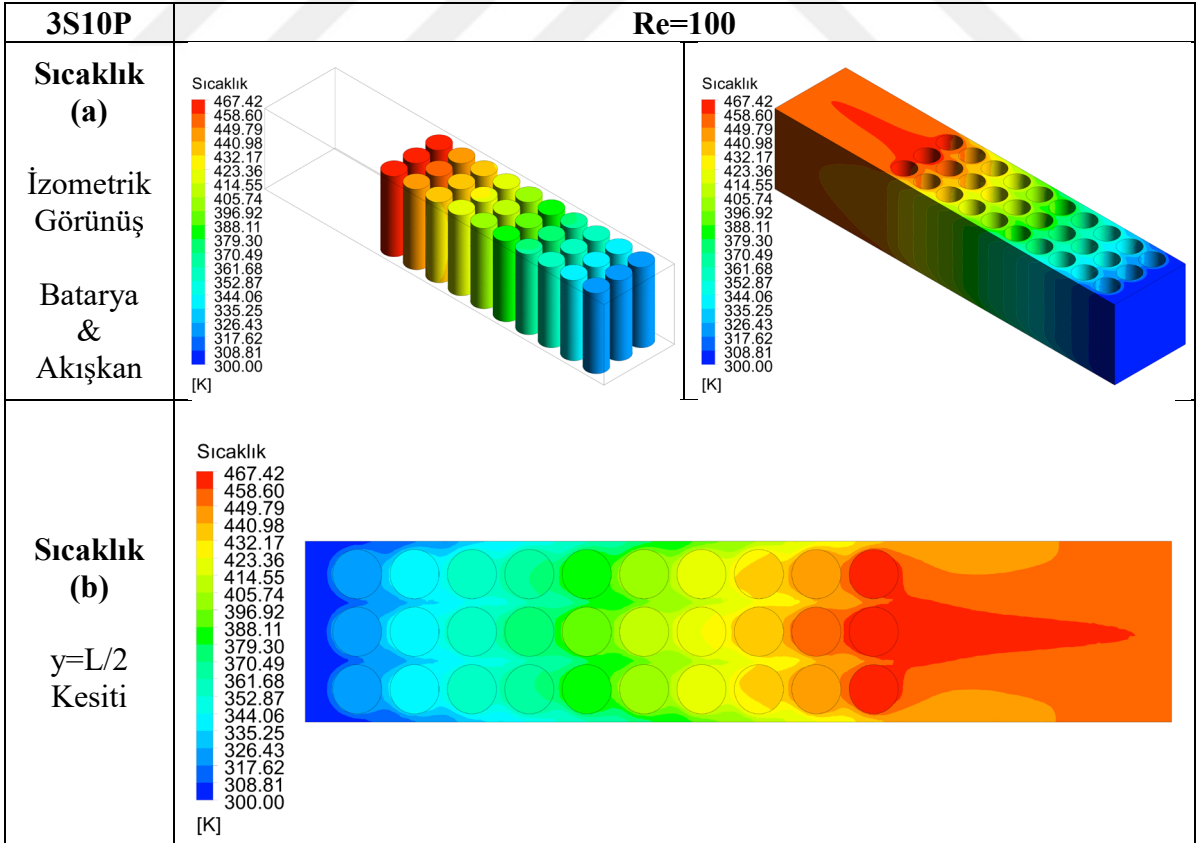


Şekil 3.7. $Re=10$, hava soğutmalı, 3S10P batarya dizilimi analiz sonuçları

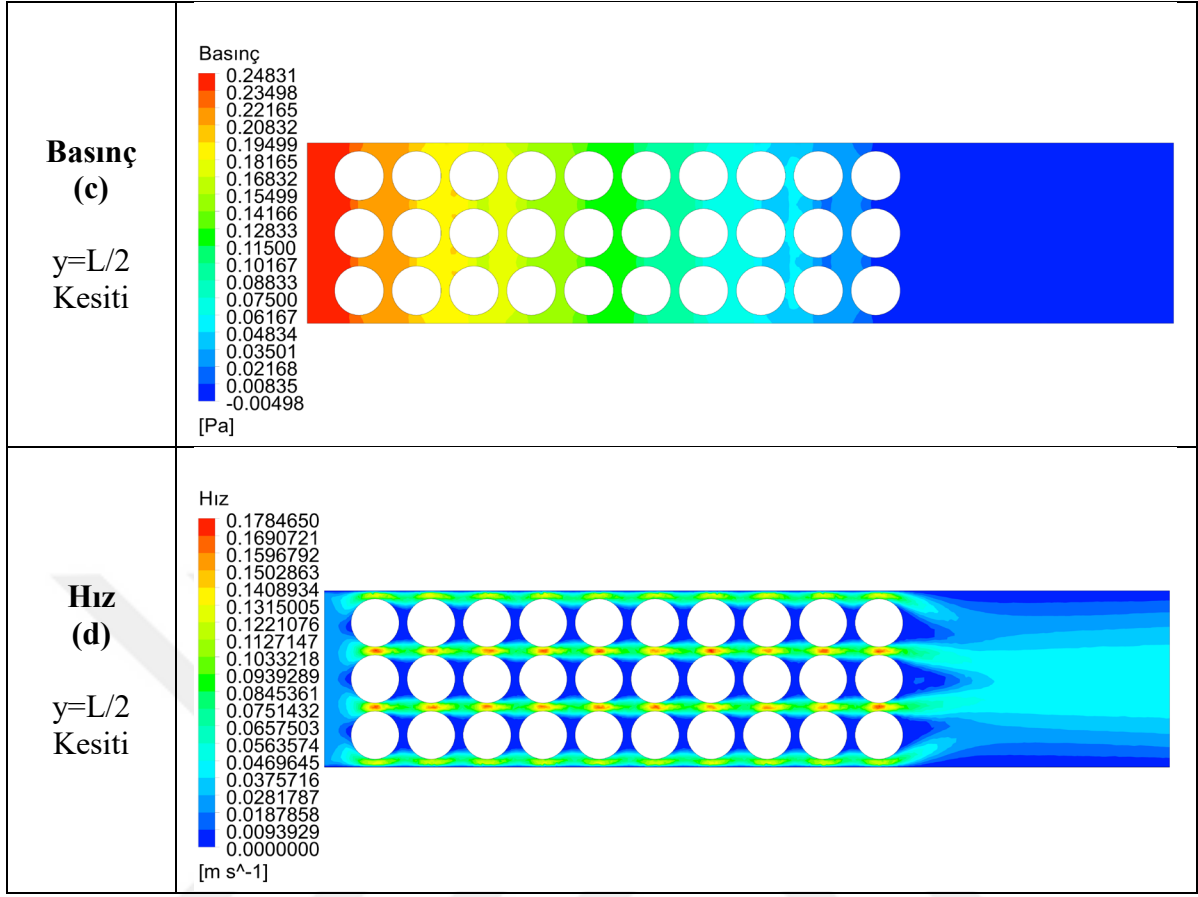


Şekil 3.7. 'nin devamı

Şekil 3.8'de 3S10P batarya modülünün $Re=100$ ile yapılan analiz sonuçlarını göstermektedir. Şekil 3.7 (a)'daki maksimum sıcaklığa kıyasla $Re=10$ 'dan $Re=100$ 'e geçişte çarpıcı bir sıcaklık düşüşü olduğu gözlemlenmektedir. Şekil 3.8 (b) orta düzlemde görülen sıcaklık gradyanlarının hava kullanılan diğer analizlerinin $Re=100$ değerlerinin sonuçlarıyla niteliksel olarak aynı özellikleri gösterdiği görülür.

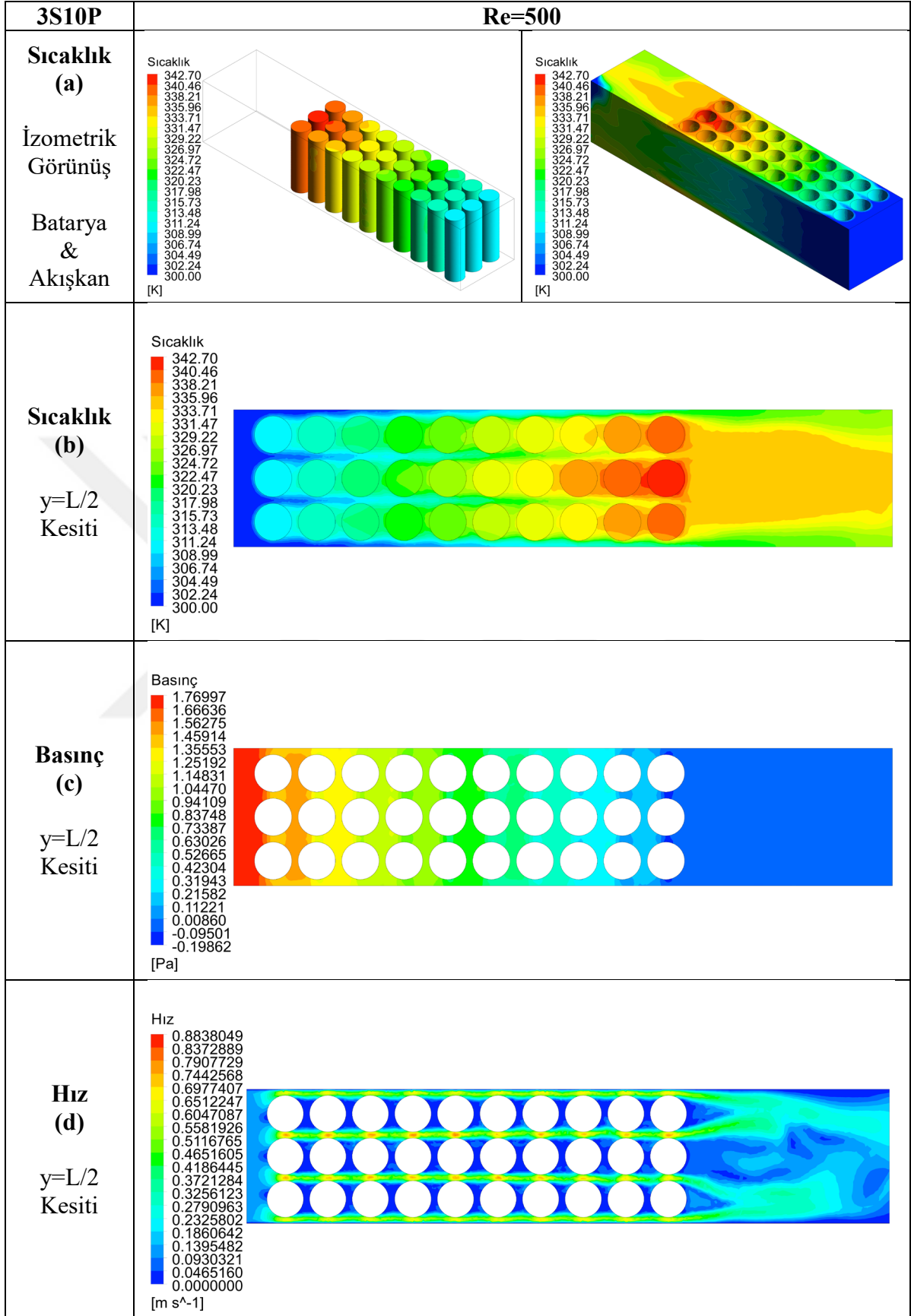


Şekil 3.8. $Re=100$, hava soğutmalı, 3S10P batarya dizilimi analiz sonuçları



Şekil 3.8.'in devamı

Şekil 3.9'da $Re=500$ değeri için hava soğutmalı batarya termal yönetim sisteminin sonuçları görülmektedir. Şekil 3.9 (a)'da akışkan fazın izometrik görünüşünde (sağdaki resim) geri akışının başladığı görülmektedir. 3S10P batarya geometrisinde 2S5P ve 2S10P'nin aksine 100 mm çıkış uzunluğunun seçilmesinin nedeni budur. Artan Re sayısı ile 3S10P batarya konfigürasyonunda akışın çıkış yerinden geri akış meydana geldiği için çıkış uzunluğu 100 mm olarak belirlenmiştir. Şekil 3.9 (d)'de enine simetrisinin bozulduğu görülmektedir. Paralel yönde ardışık bataryaların en son sırasında meydana gelen 342 K derece bataryanın istenen çalışma sıcaklığının üzerindedir. Bataryalar bu şekilde kullanılmaya devam ederse şarj tutma performansları ve çevrim sayıları hızla düşecektir.



Şekil 3.9. Re=500, hava soğutmalı, 3S10P batarya dizilimi analiz sonuçları

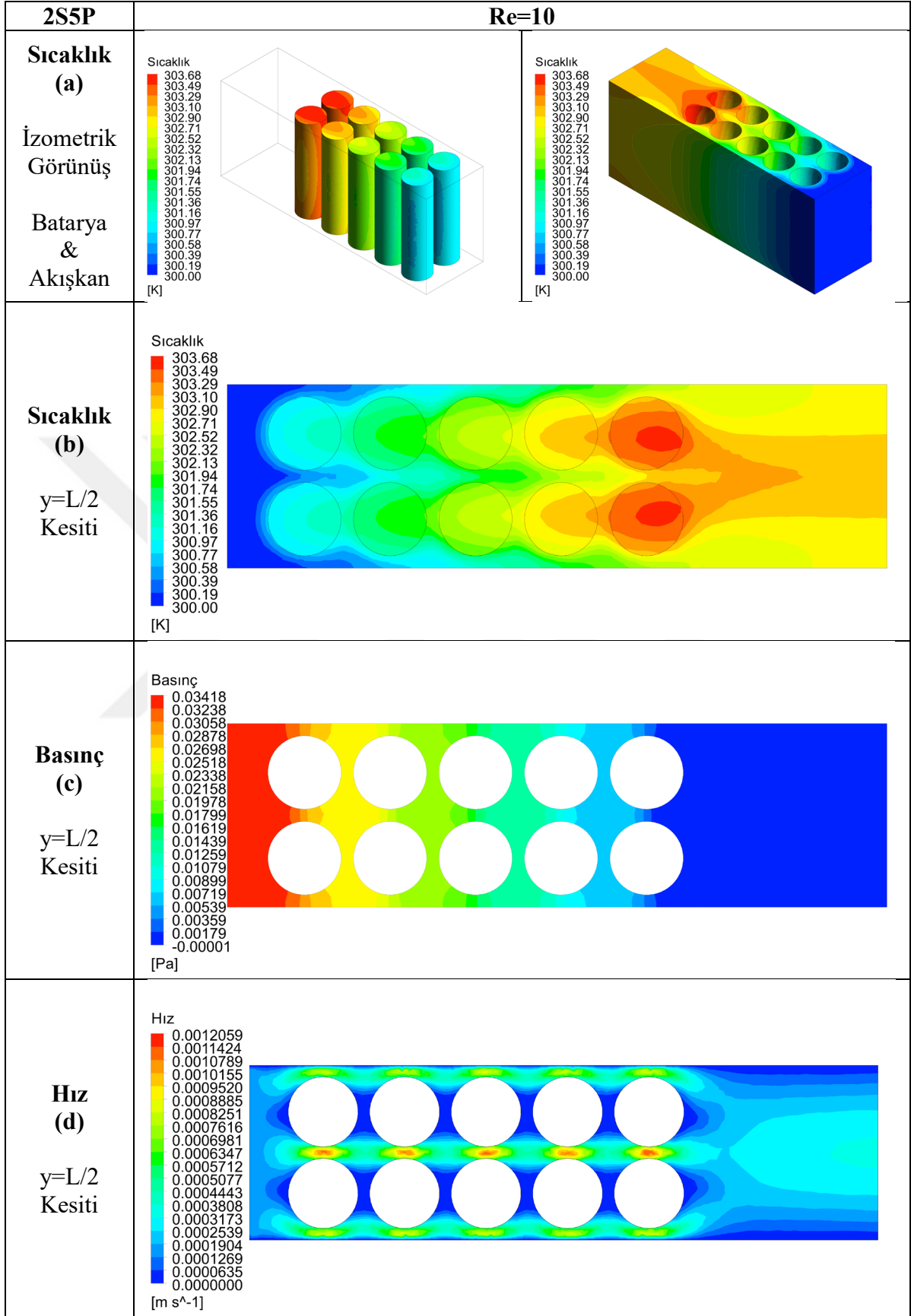
3.2. Su Soğutmalı Batarya Modülü için Bulgular

Niteliksel olarak, hava soğutmalı bataryalarda gözlenen hız ve basınç alanları su soğutmalı bataryalarda da benzer olarak elde edilmiştir (Şekil 3.10, 3.11, 3.12). Kaldırma kuvveti ihmal edildiğinden süreklilik ve momentum denklemleri sıcaklıktan etkilenmez ve bu da beklenen bir sonuçtur. İlgili Reynolds sayılarını kıyaslamak her iki akışkan için tamamen aynı momentum ve süreklilik denklemini çözmek anlamına gelir. Tek fark boyutsal olarak meydana gelir. Sonuçlar SI sistemden geri tekrar oranlandığı zaman iki sonucun hız renk yelpazesini kıyasladığımızda bir v_{hava}/v_{su} olarak bir oran bulunur.

Su soğutmalı bataryalar ile hava soğutmalı bataryalar arasında belirgin bir fark görülür. Beklenildiği gibi suyla soğutma hava ile soğutmadan çok daha verimlidir. Bu durum suyun Prandtl sayısının havanınkinden ortalama sekiz kat daha fazla olmasıyla açıklanabilir. Bu zorlanmış taşınımı daha önemli yapan iç enerji denklemindeki adveksiyon teriminin büyük öneminin bir sonucudur.

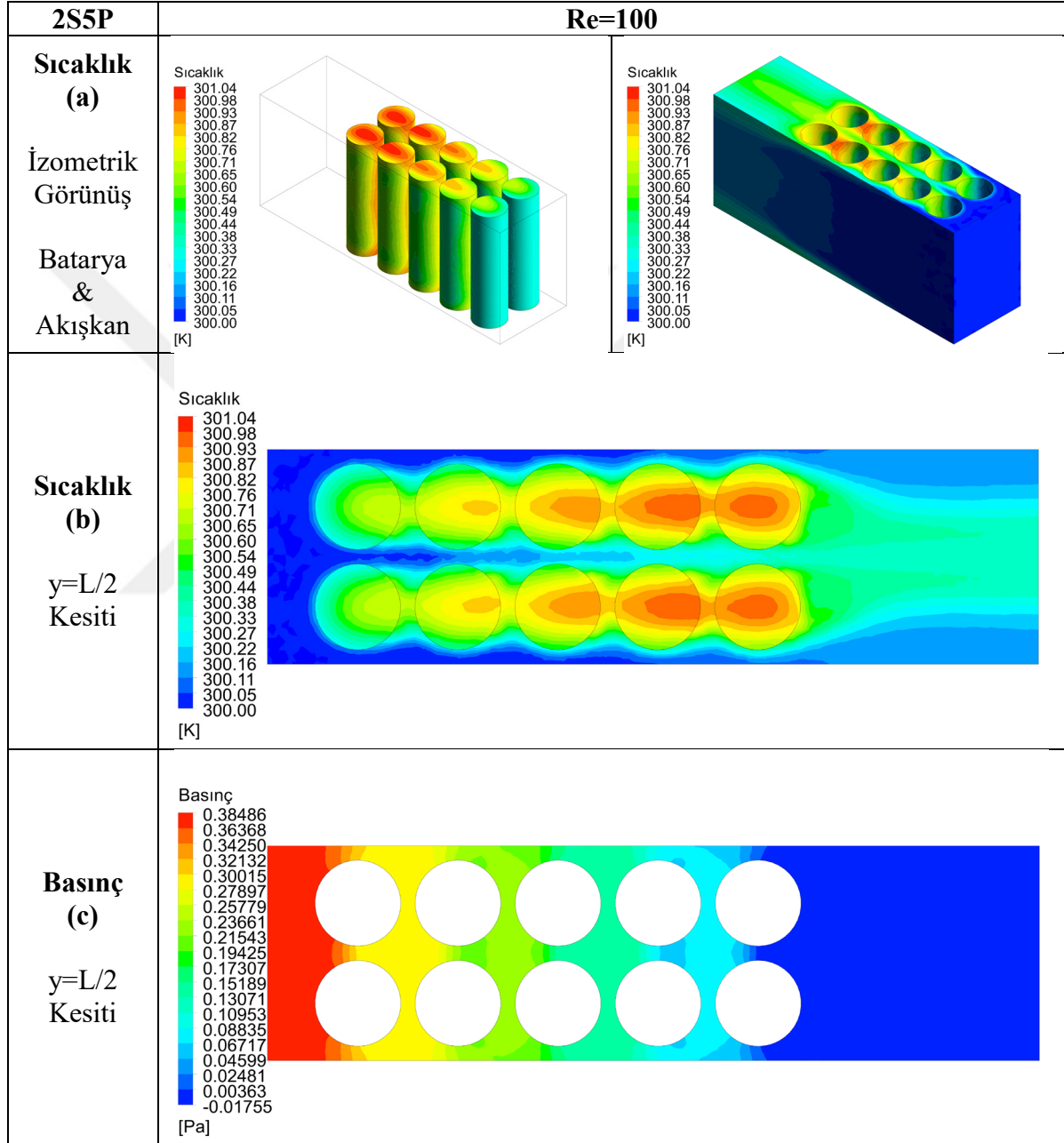
$Re=10$ 'dan $Re=500$ 'e kadar artan Re sayılarıyla (Şekil.3.10, 3.11, 3.12) bataryalar iyi bir soğutma durumundan (bataryadaki geçiş gradyanları) kusursuz bir soğutma durumuna (neredeyse sadece radyanal sıcaklık gradyanlarının olduğu bataryalar) geçmiştir.

Şekil 3.10'da 2S5P batarya dizilimi için soğutucu akışkan olarak kullanılan suyun $Re=10$ için analiz sonuçları gösterilmiştir. Şekil 3.10 (d)'de görüldüğü gibi sıkışık geometriden dolayı kaynaklanan ardışık paralel bataryalar arasında meydana gelen düşük hız bölgeleri hava ile olan sonuçlarda görüldüğü gibi suyla yapılan analiz sonuçlarında da göze çarpmaktadır. Şekil 3.10 (b)'de havanın $Re=10$ değerinde yapılan sonuçlarında görülen sıcaklık gradyanlarının kademe kademe artması görülmemektedir. Suyun iki seri batarya arasında aktığı ve akış hızının yüksek olduğu bölgede Şekil 3.10 (c)'de görüldüğü üzere negatif basınç gradyanları görülmektedir. Bu akış hızının yüksek olduğu aralıkla temas halinde olan bataryaların cidarlarının daha verimli bir şekilde soğumasını sağlamıştır. Sistemde ulaşılan maksimum sıcaklık 303.7 K derece Li-ion bataryaların optimum çalışma aralığında olduğundan bu dizilimdeki bir batarya modülü için $Re=10$ değerinin uygun olduğu görülmüştür.

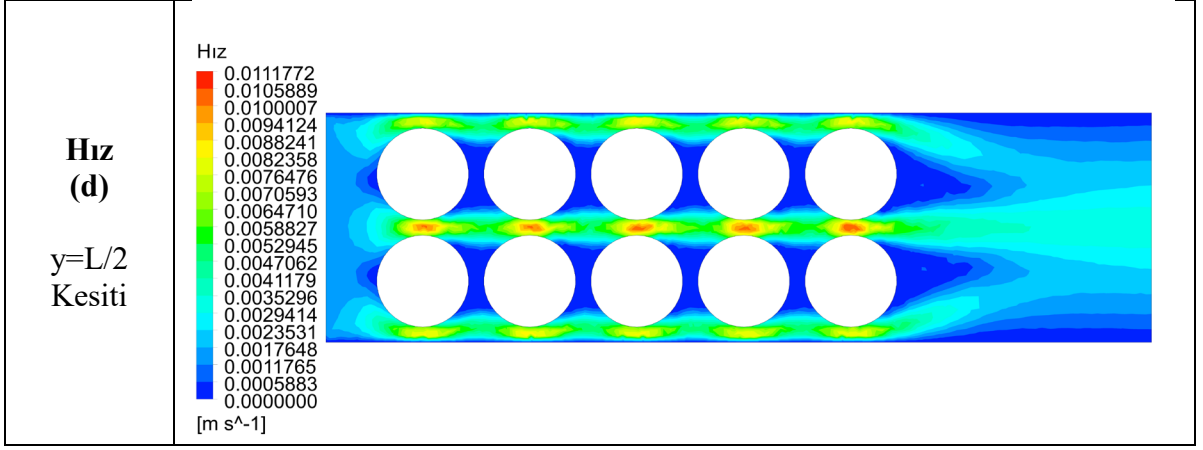


Şekil 3.10. Re=10, su soğutmalı, 2S5P batarya dizilimi analiz sonuçları

Şekil 3.11’de 2S5P batarya diziliminde su ile yapılan soğutma analizinin $Re=100$ ’deki sonuçları gösterilmiştir. Şekil 3.11 (c)’de, bataryaların orta düzlemindeki sıcaklık gradyanları incelendiğinde havanın $Re=100$ ’deki sonuçlarının aksine oldukça radyanal sıcaklık gradyanları gözlenmiştir.

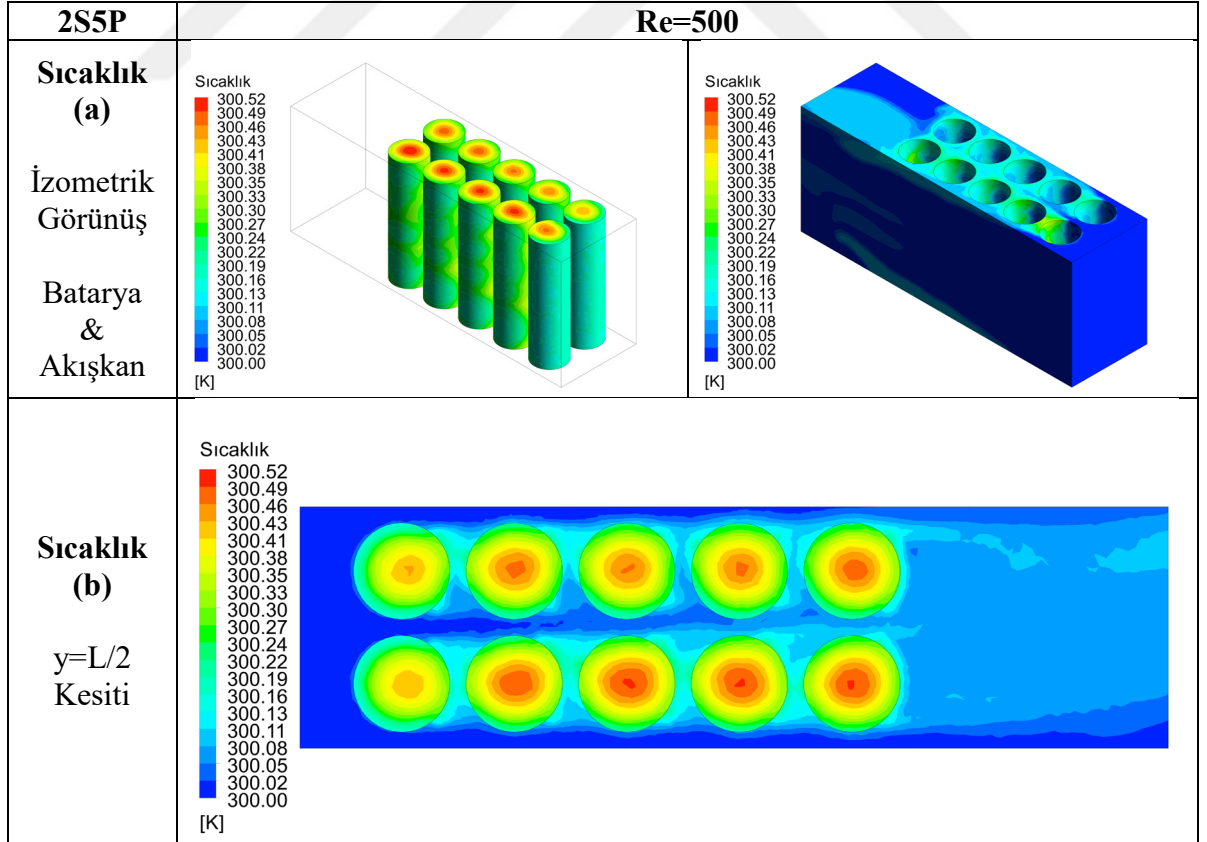


Şekil 3.11. $Re=100$, su soğutmalı, 2S5P batarya dizilimi analiz sonuçları

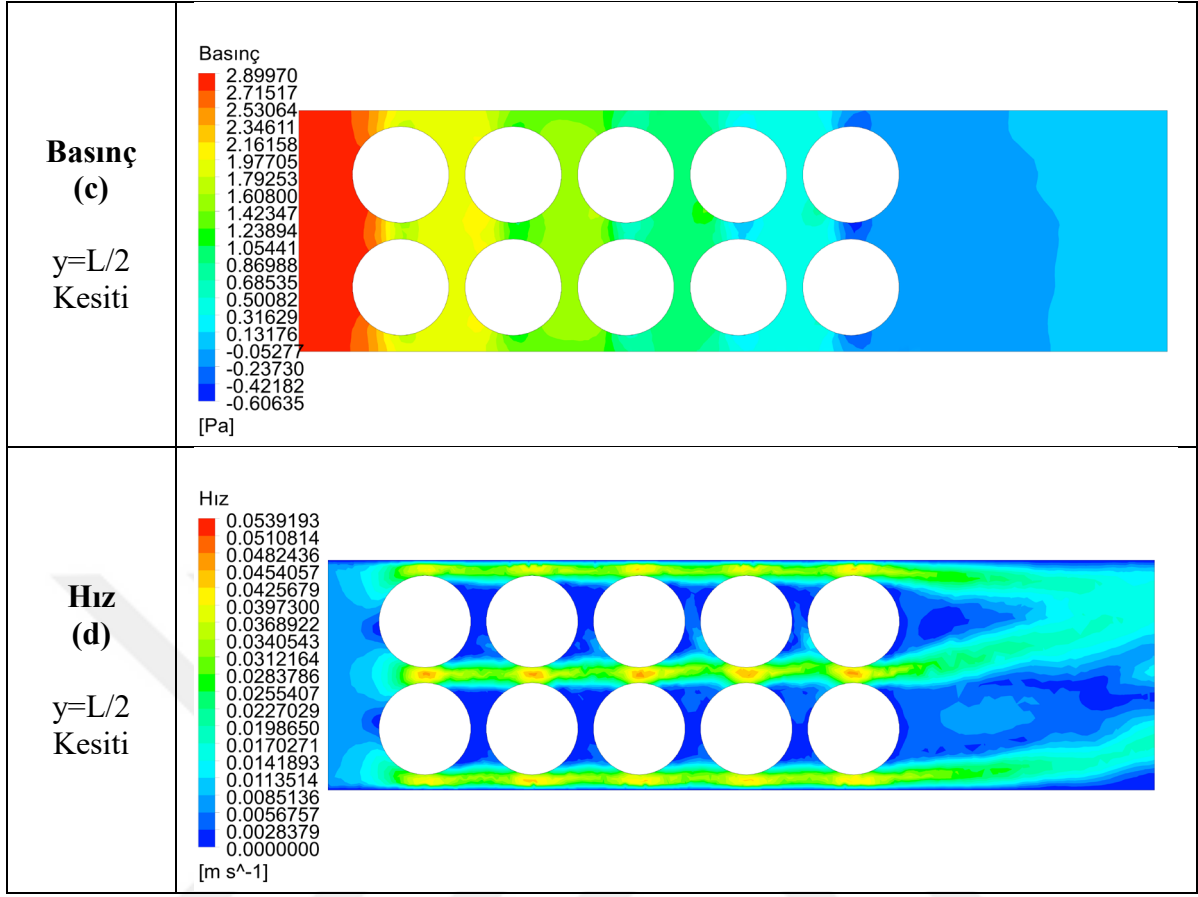


Şekil 3.11. 'in devamı

Şekil 3.12’de 2S5P batarya dizilimi için soğutucu akışkan olarak kullanılan suyun $Re=500$ için analiz sonuçları gösterilmiştir. Sistemde ulaşılan maksimum sıcaklığın suyun giriş sıcaklığından sadece 0.5 K derece fazla olması sistemin soğutma performansının ne kadar kusursuz olduğunu gözler önüne sermektedir.



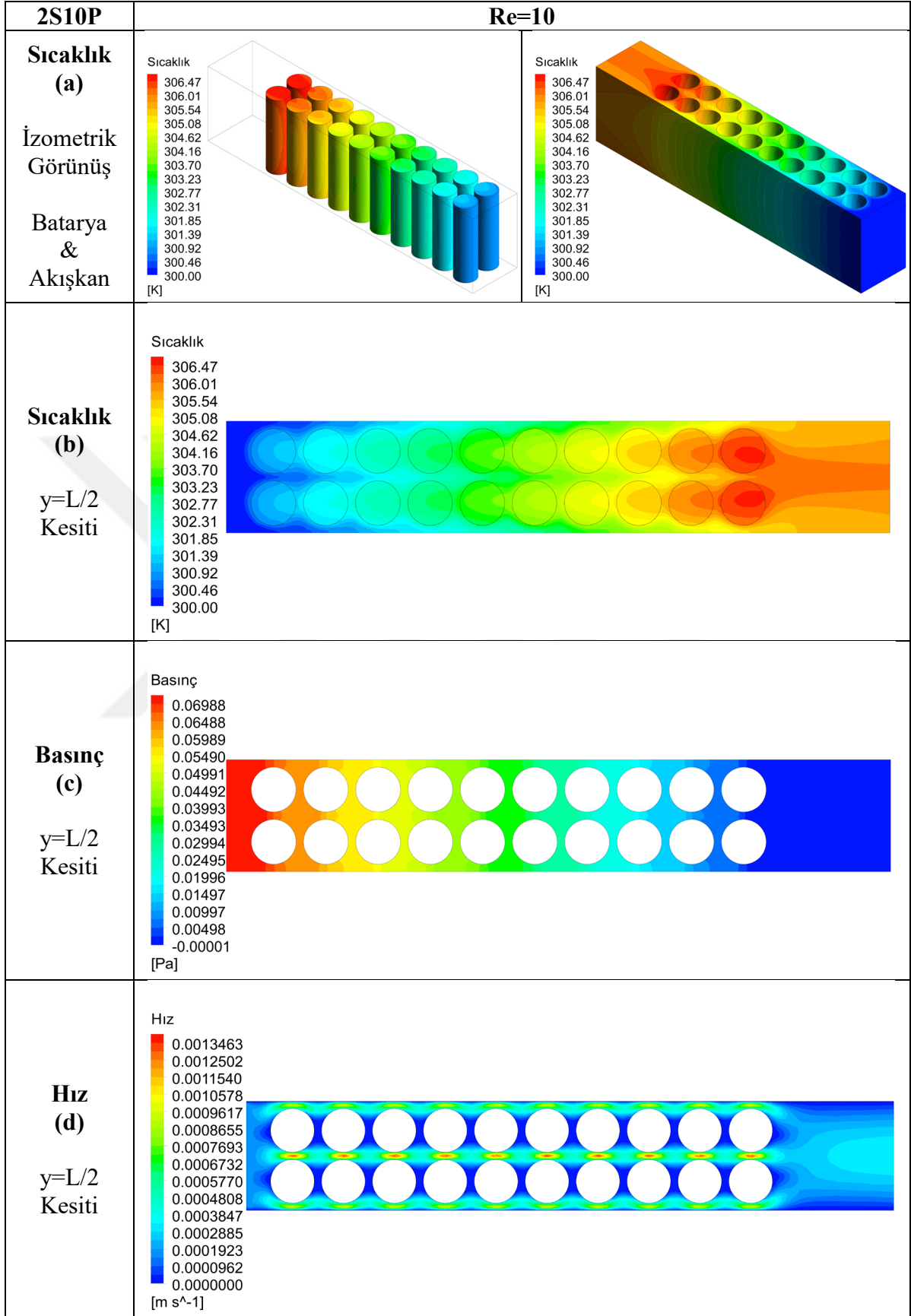
Şekil 3.12. $Re=500$, su soğutmalı, 2S5P batarya dizilimi analiz sonuçları



Şekil 3.12. 'nin devamı

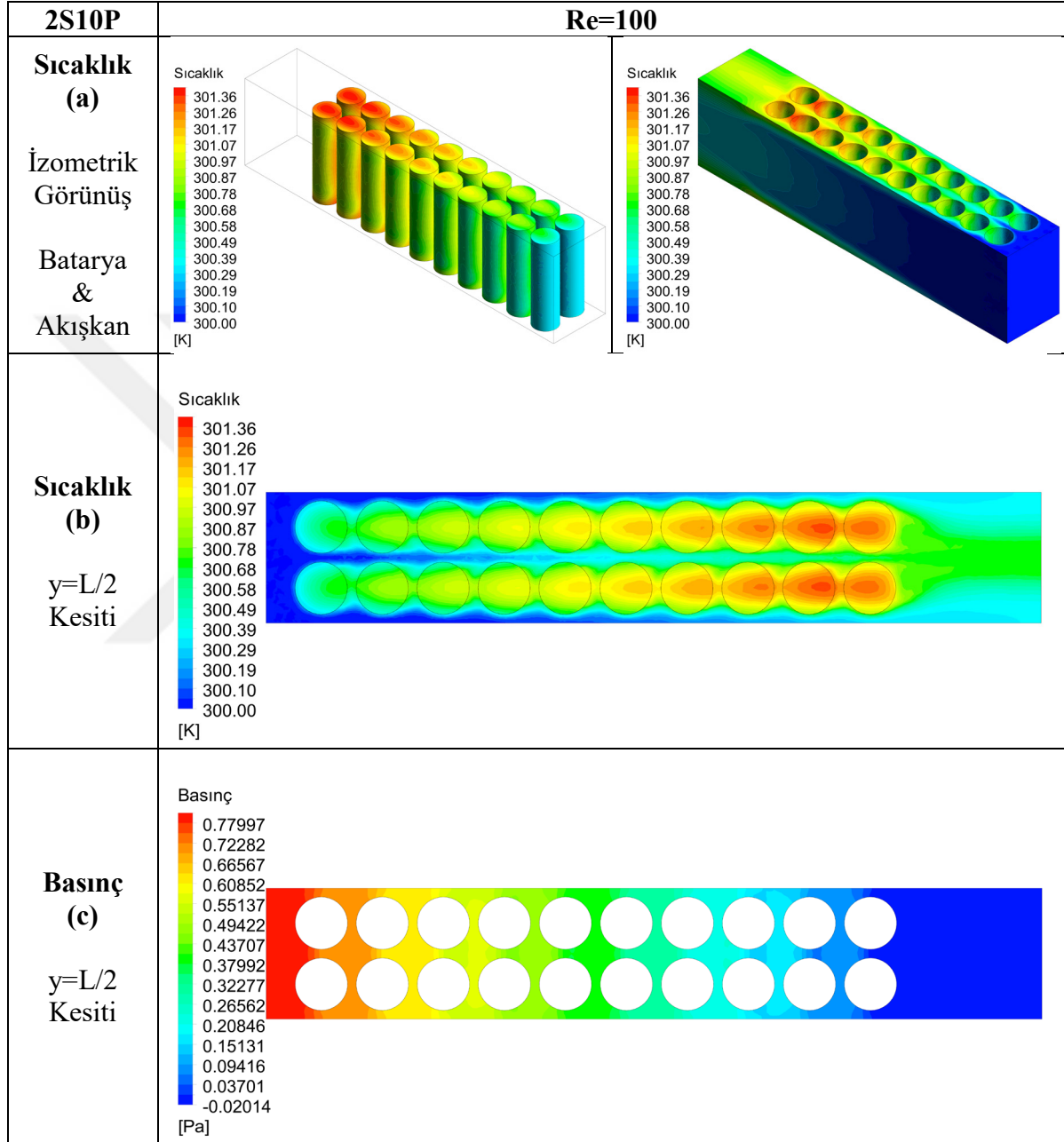
Hava soğutmalı sonuçlarda olduğu gibi aynı şekilde su soğutmalı bataryalarda da 2S5P'den 2S10P ve 3S10P'ye geçiş, akış alanını niteliksel olarak etkilemez. Sadece bataryaların etrafındaki akışkanın soğutma performansını düşürür. Fakat su soğutmalı bataryalarda 2S5P'den 2S10P ve 3S10P'ye geçiş yapıldığında ulaşılan maksimum sıcaklıklar arasındaki farkın çok küçük olduğu göze çarpar. Bundan dolayı soğutma performansındaki kötüleşme ihmal edilebilir.

Şekil 3.13'de 2S10P batarya modülü için soğutucu akışkan olarak kullanılan suyun $Re=10$ için analiz sonuçları gösterilmiştir. Modüldeki maksimum sıcaklık hava ile olan sonuçlarda olduğu gibi artan batarya sayısı ile artmıştır.

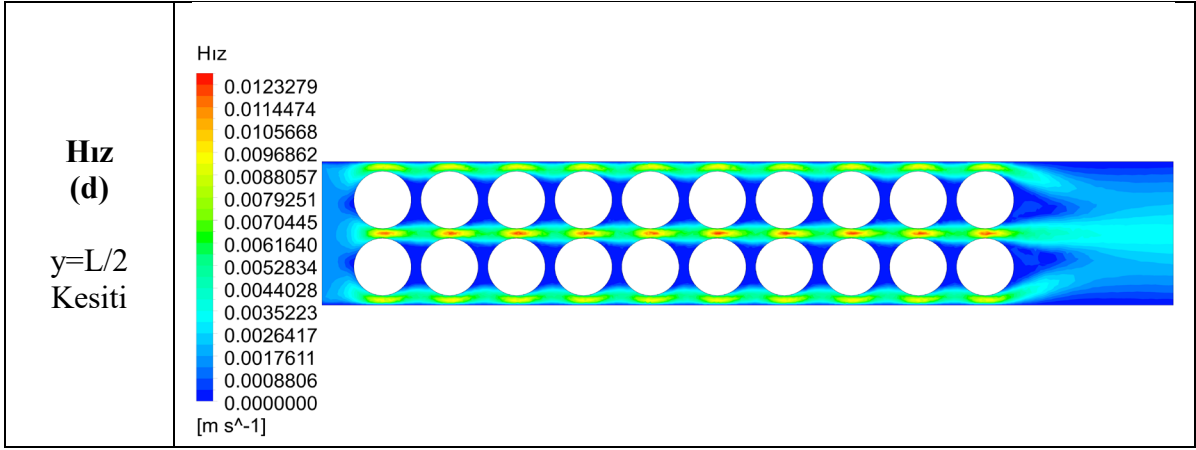


Şekil 3.13. Re=10, su soğutmalı, 2S10P batarya dizilimi analiz sonuçları

Şekil 3.14'te su soğutmalı 2S10P batarya diziliminin $Re=100$ için analiz sonuçları gösterilmiştir. Artan batarya sayısına rağmen aynı değerlerin 2S5P'deki sonuçları kadar verimli bir soğutma performansı yakalanmıştır.

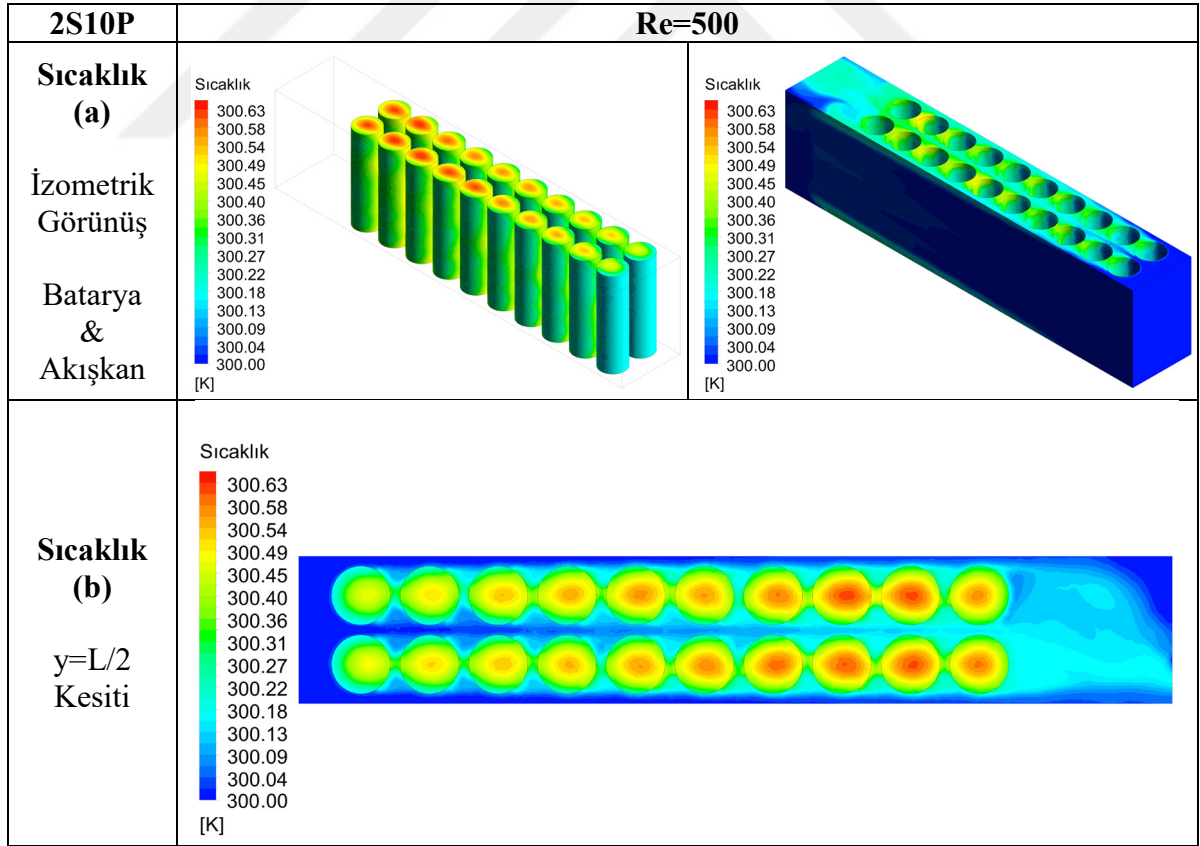


Şekil 3.14. $Re=100$, su soğutmalı, 2S10P batarya dizilimi analiz sonuçları

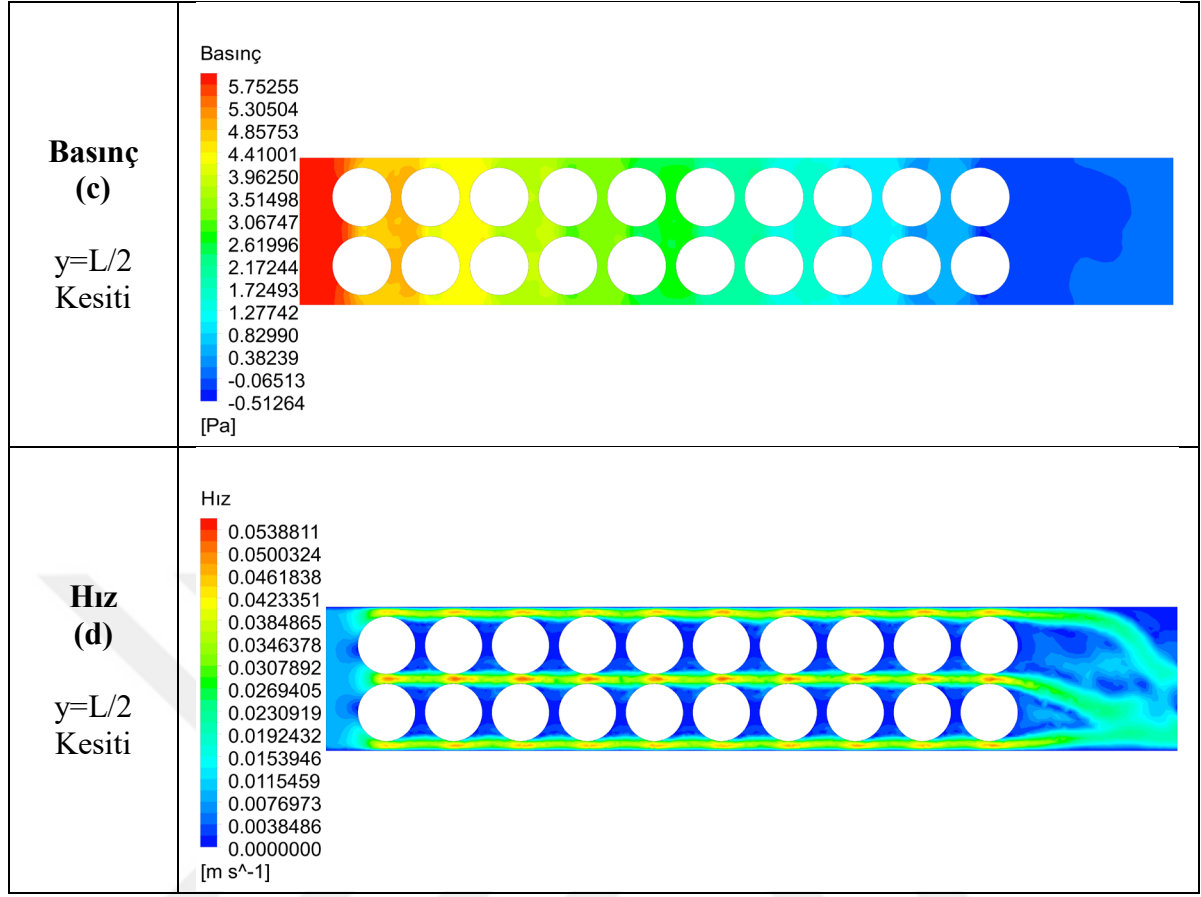


Şekil 3.14. 'nin devamı

Şekil 3.15'te su soğutmalı 2S10P batarya diziliminin $Re=500$ için analiz sonuçları gösterilmiştir. Soğutucu akışkan olarak kullanılan suyun yüksek Re değerlerinde kusursuz bir soğutma performansı yakaladığı görülmüştür.

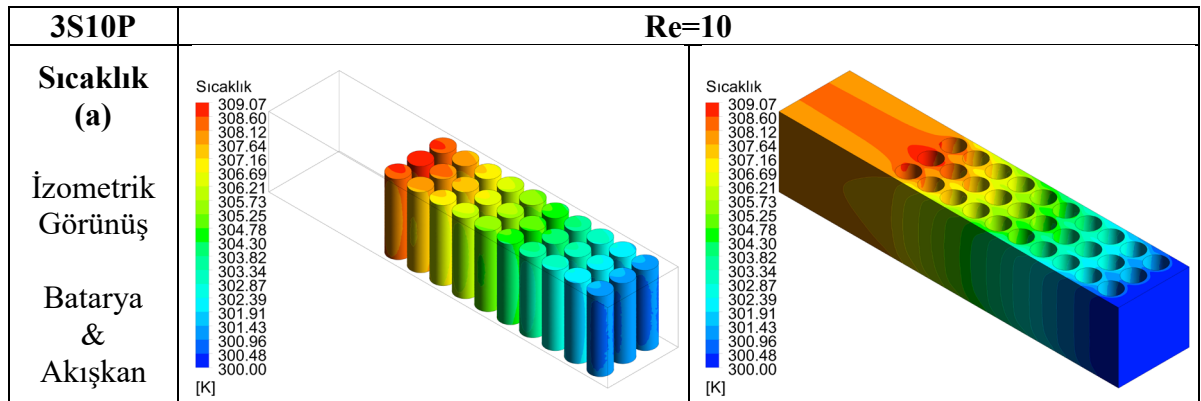


Şekil 3.15. $Re=500$, su soğutmalı, 2S10P batarya dizilimi analiz sonuçları

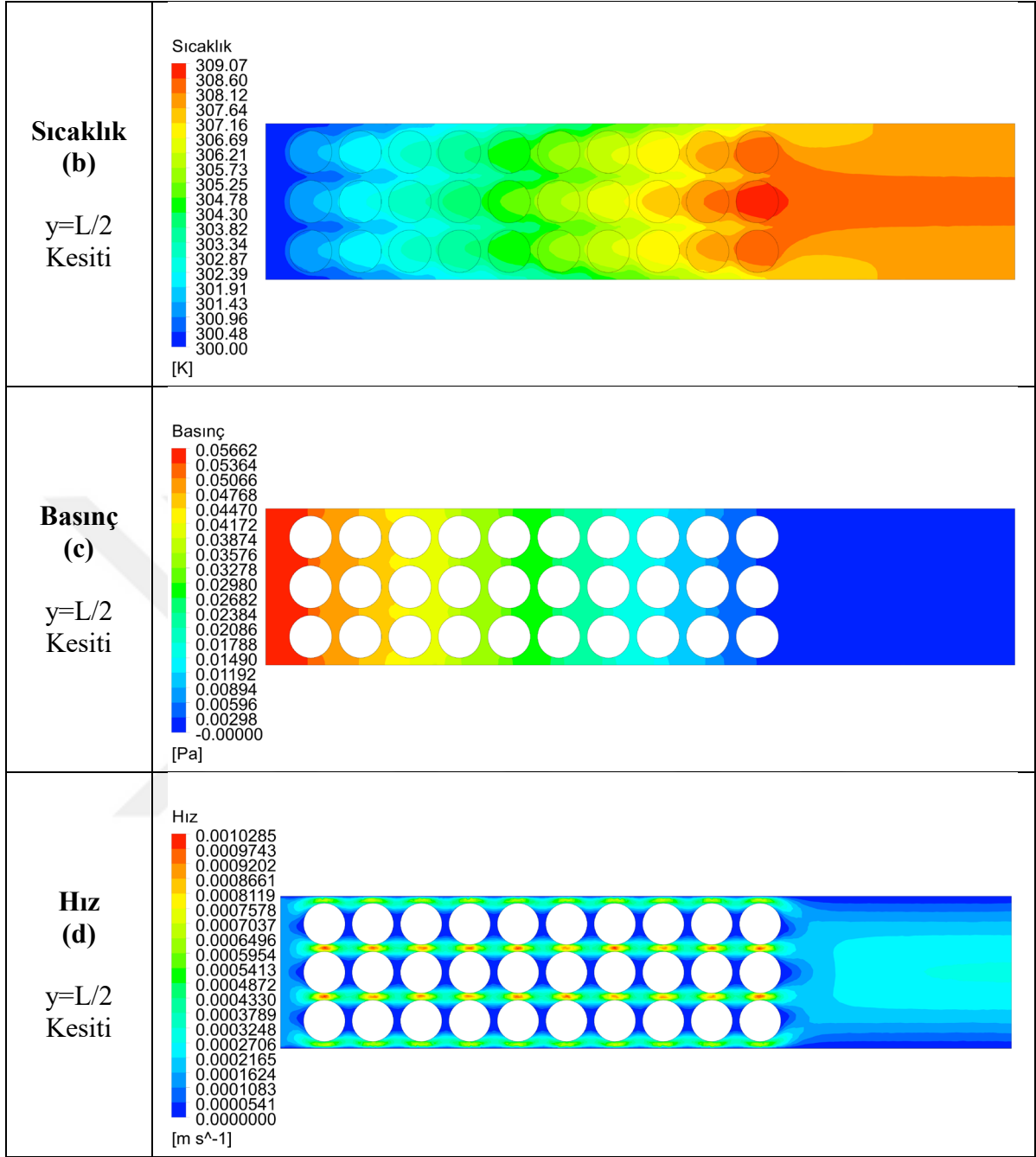


Şekil 3.15. 'in devamı

3S10P batarya diziliminde artan batarya sayısıyla beraber modül içerisinde ulaşılan maksimum sıcaklığında diğer dizilimlere göre en fazla olması beklenir. Şekil 3.16 (a)'daki sıcaklık skalasından görüldüğü gibi modüldeki maksimum sıcaklık ile minimum sıcaklık arasındaki fark $Re=10$ değeri için 9 K'dir. Bu da batarya soğutma sisteminde su kullanımının düşük Re sayılarında dahi ne kadar verimli olduğunu göstermektedir.

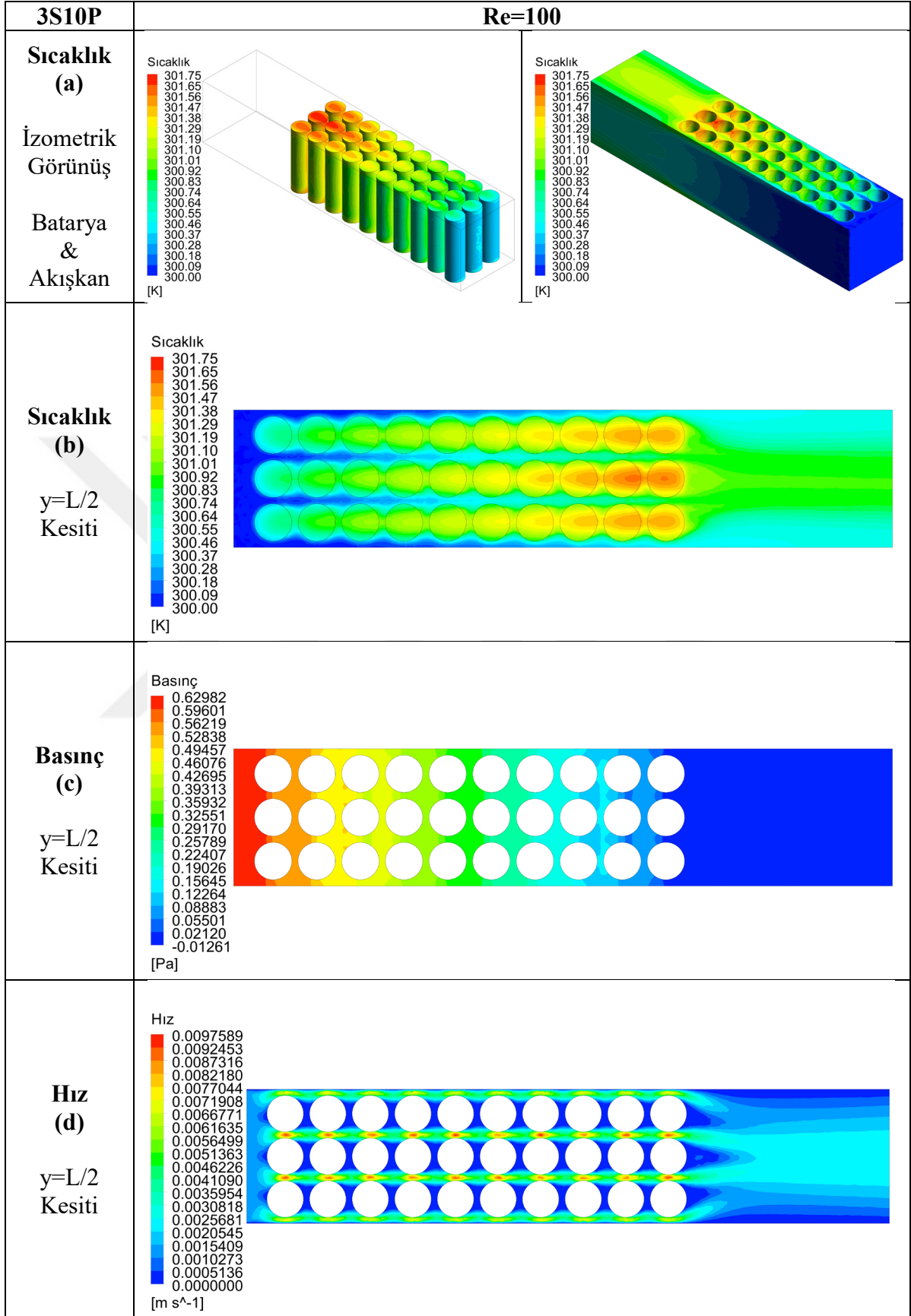


Şekil 3.16. $Re=10$, su soğutmalı, 3S10P batarya dizilimi analiz sonuçları



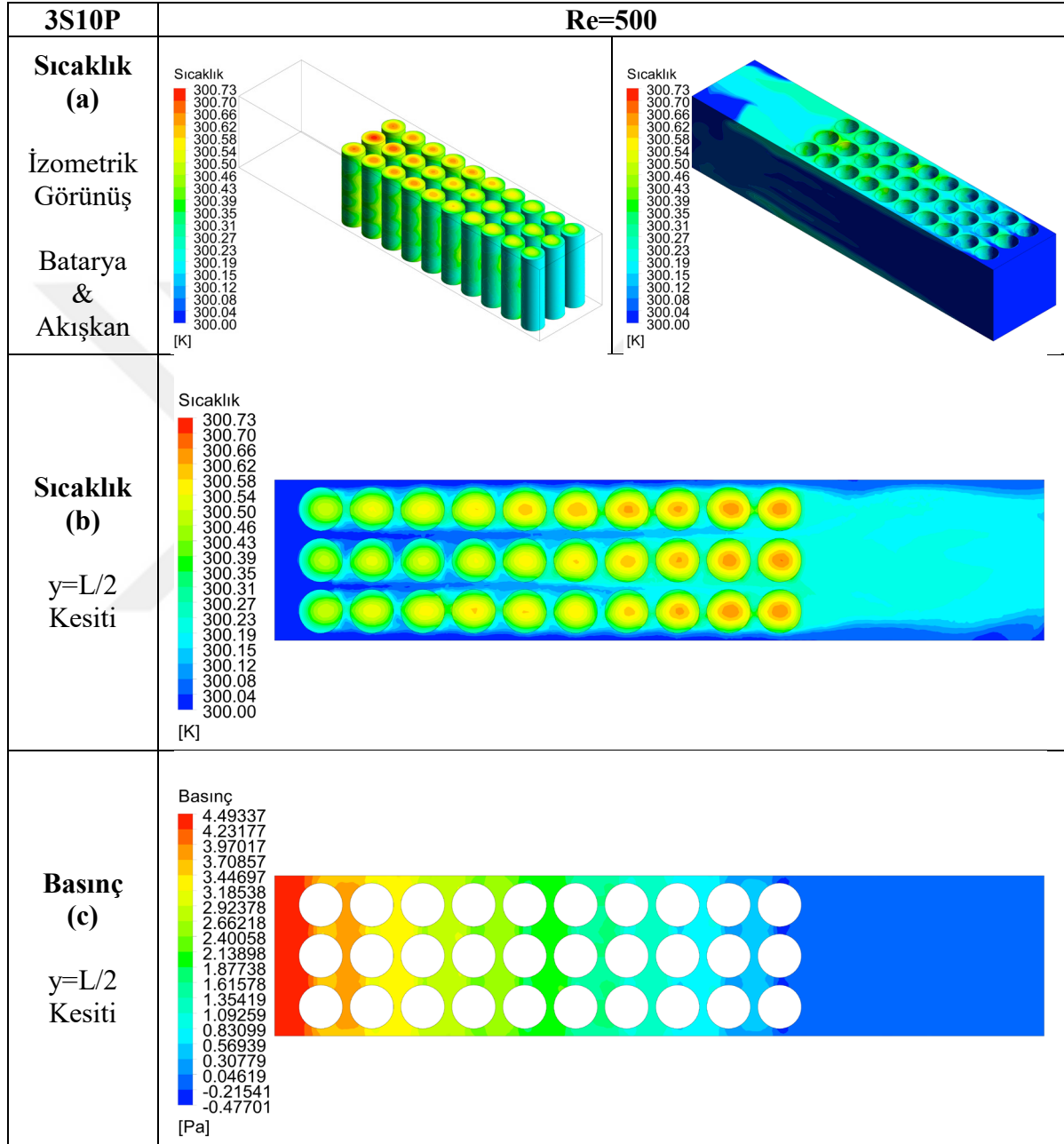
Şekil 3.16. 'nın devamı

Şekil 3.17'deki sıcaklık skalasından görüldüğü üzere $Re=100$ değerinde batarya sayısını artmasına rağmen soğutma performansına bir düşüşle karşılaşılmamıştır. Su ile yapılan batarya soğutmalarında artan batarya sayısına paralel olarak sistemdeki sıcaklığın artmasının sadece düşük Re değerlerinde görülmüştür.

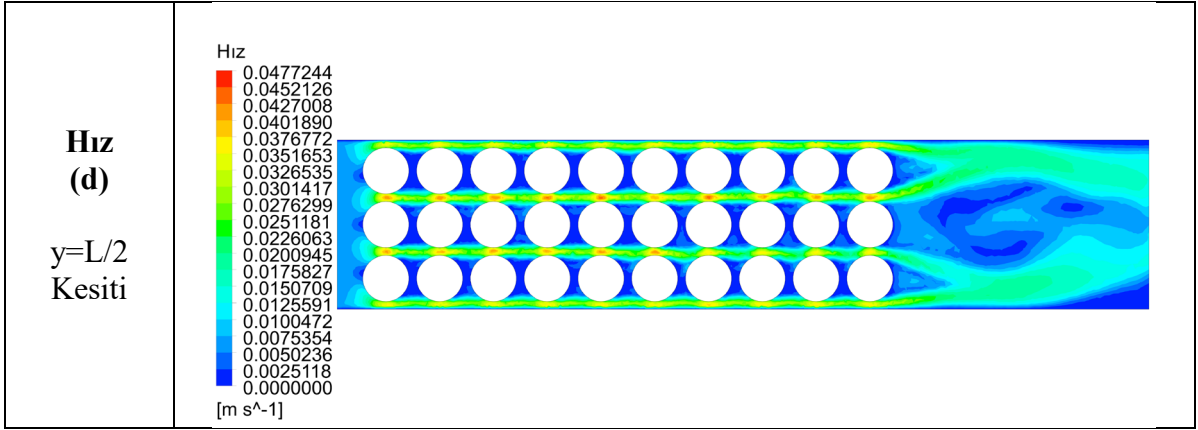


Şekil 3.17. Re=100, su soğutmalı, 3S10P batarya dizilimi analiz sonuçları

Şekil 3.18’de $Re=500$ değerinde su ile yapılan son analiz görülmektedir. Su ile yapılan analizlerin diğer sonuçlarından görüldüğü üzere beklenildiği gibi çok yüksek bir soğutma performansı görülmüştür. Bataryaların merkezinde bir ısı üretimi olduğu için merkezlerdeki sıcaklık bataryaların cidarlarından her zaman daha yüksektir.



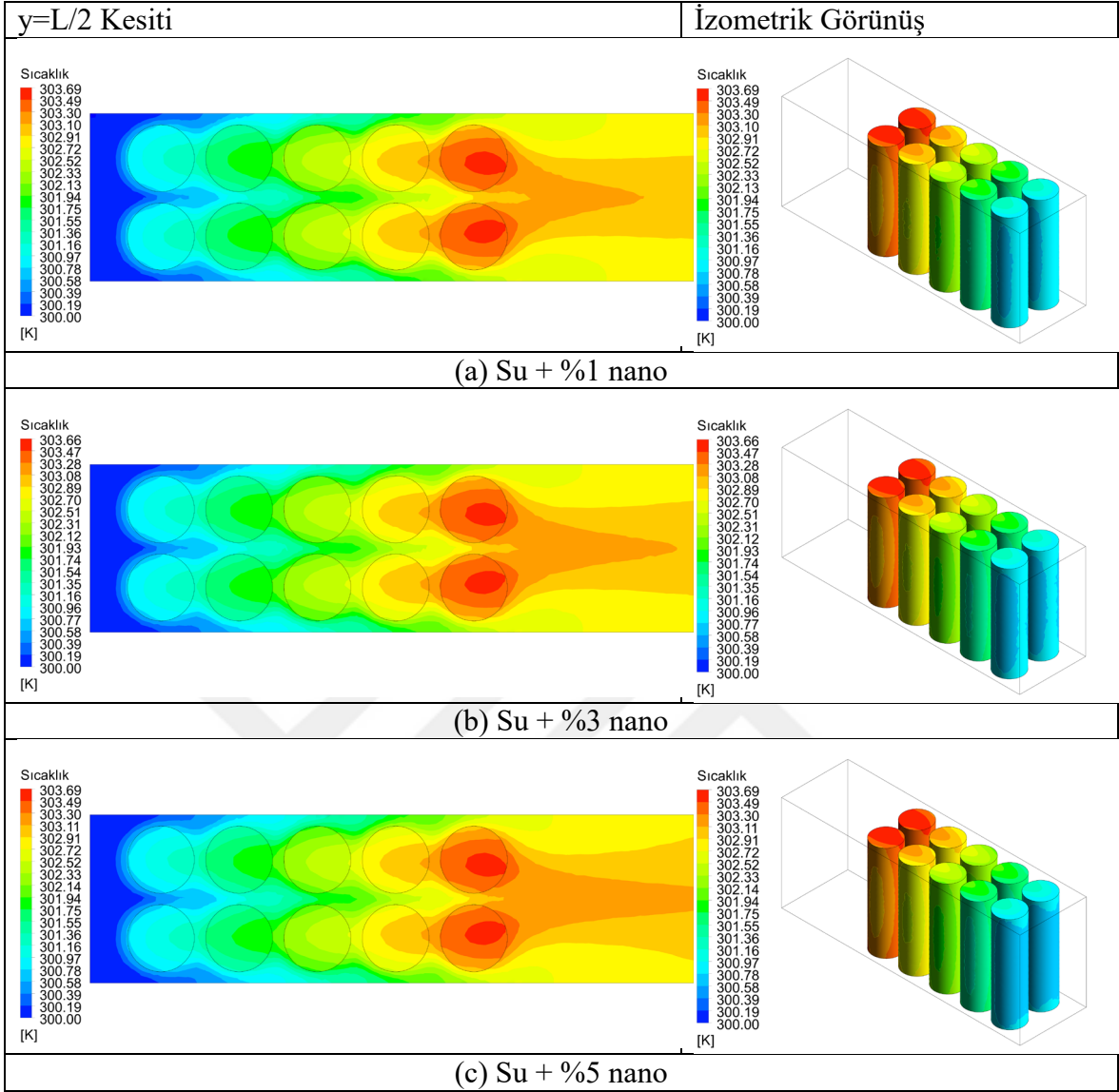
Şekil 3.18. $Re=500$, su soğutmalı, 3S10P batarya dizilimi analiz sonuçları



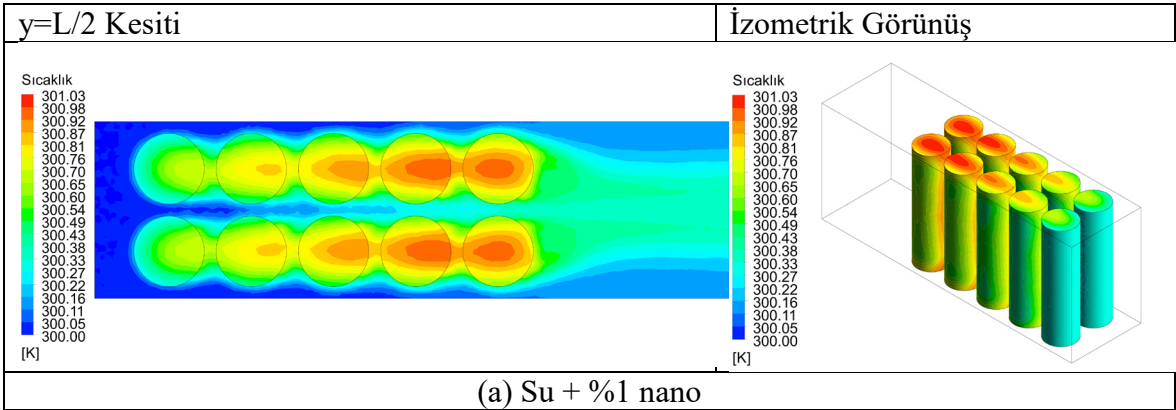
Şekil 3.18. 'in devamı

3.3. Nano-Su Soğutmalı Batarya Modülü için Bulgular

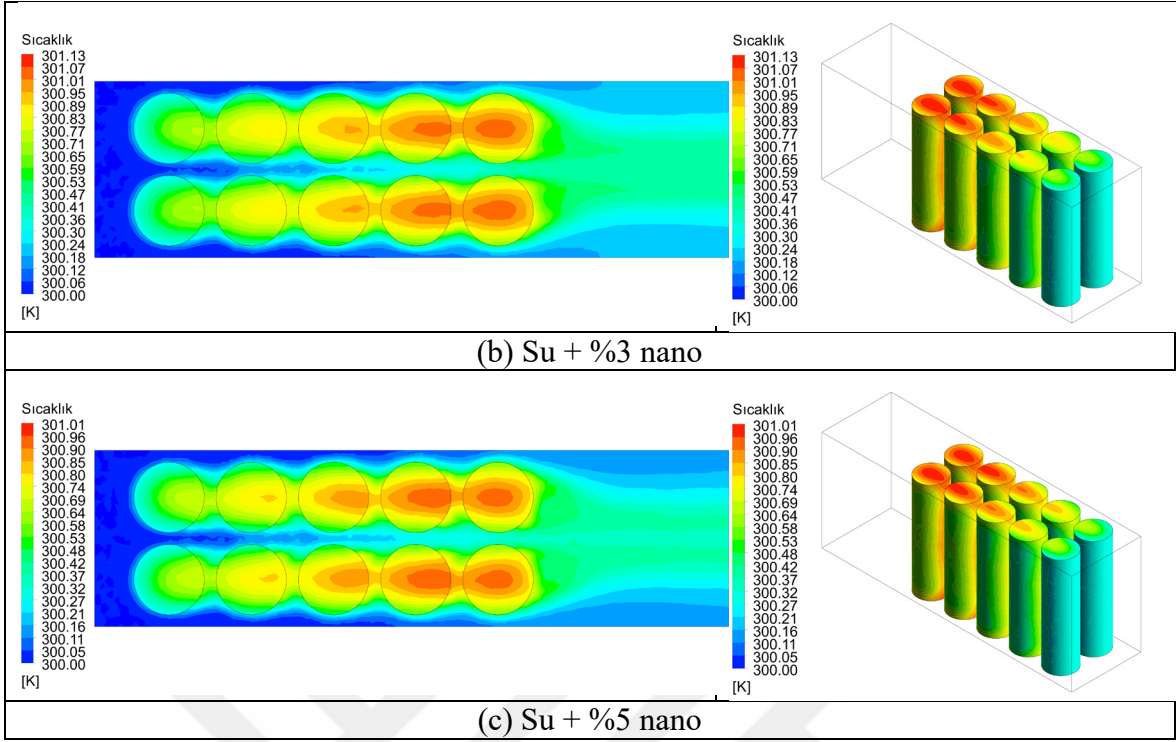
Bu bölümde farklı batarya modüllerinde (2S5P, 2S10P ve 3S10P), soğutucu akışkanın su olması durumu incelenmiştir. Soğutucu akışkana %1, %3 ve %5 oranlarında Al_2O_3 nano parçacık eklenmesi durumunda incelemeler yapılmış ve bu analizin sonuçlara etkisi irdelenmiştir. Su içerisine nano parçacık katıldığında elde edilen sonuçlar suyun nanosuz sonuçlarıyla niteliksel olarak neredeyse aynıdır. Suyu nano parçacık katıldığında ısı iletkenlik artmasına rağmen sıcaklık değişimlerinde belirgin bir etkisi olmadığı görülmüştür. Literatüre bakıldığı zaman suya Al_2O_3 parçacık katıldığında etkinin çok düşük olduğu görülmektedir. $Re=10$ değerinde nano parçacık katılmış suyla olan sonuçlara bakıldığında soğutma performansının artması beklenirken düştüğü görülmüştür. Bu durum nano parçacık katıldığında ısı kapasitesinin düşmesinden kaynaklanır ve bundan dolayı bataryadan nanoakışkana gelen ısı oranında azalış görülür. Bu durum Mondal vd. yaptığı çalışmada benzer şekilde görülmüştür [9,10]. 2S5P'nin $Re=10$ değerinde beklenen en yüksek sıcaklık (Şekil 3.19) soğutucu akışkanın giriş sıcaklığı olan 300 K'den 3.7 derece daha fazladır. 2S5P için nanolu sonuçların da Li-ion bataryanın istenen çalışma aralığını sağladığı görülmektedir. Şekil 3.20'de, $Re=100$ değerinde modülde ulaşılan maksimum sıcaklık 301 K'dir. Şekil 3.21'de ise, $Re=500$ değerinde ulaşılan maksimum sıcaklık 300 K'dir. Bu da $Re=500$ değerinde mükemmel bir soğutma kapasitesi olduğunu göstermektedir. Sonuçlar dikkatli bir şekilde incelendiğinde aynı değerlerin sadece nanosuz olan sonuçları ile karşılaştırıldığında akışın rejimi, sıcaklık gradyanları, basınç kontörlerini niteliksel olarak aynı görülmektedir. Niceliksel olarak incelendiğinde sıcaklıklarda çok küçük değişimlerin olduğu görülmektedir.



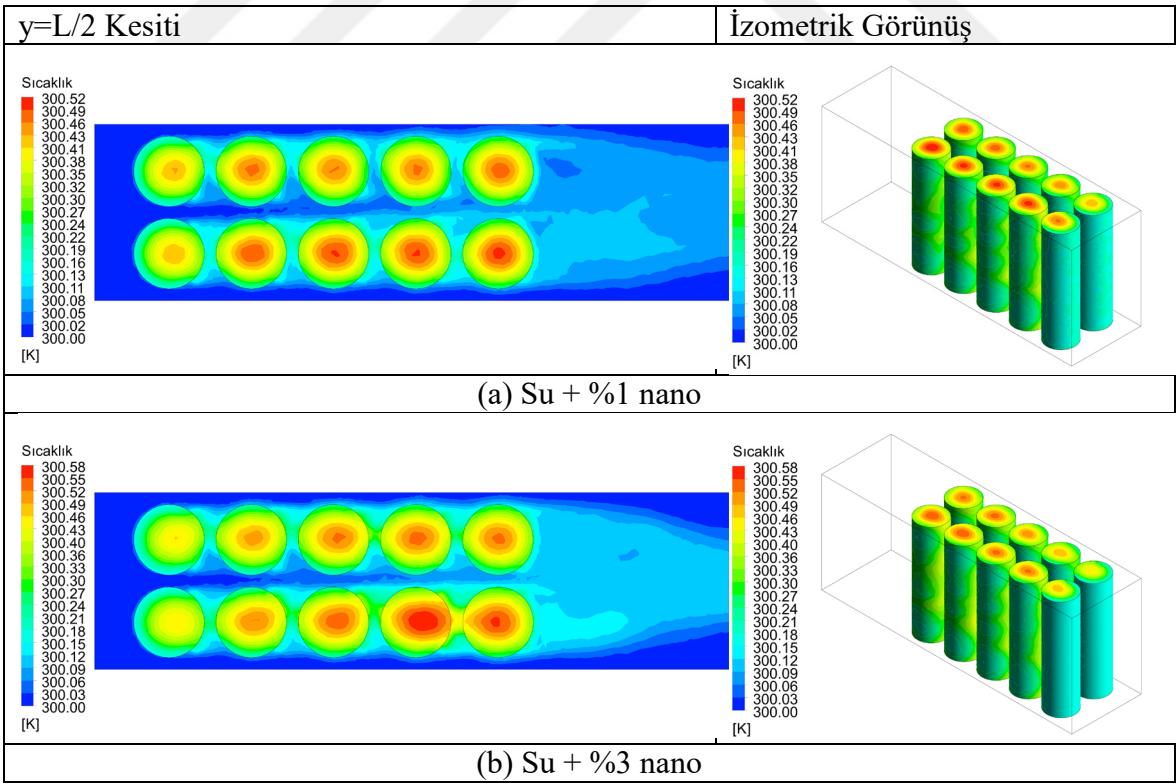
Şekil 3.19. Re=10, nano parçacık-su karışım oranları için sıcaklık dağılımı, 2S5P



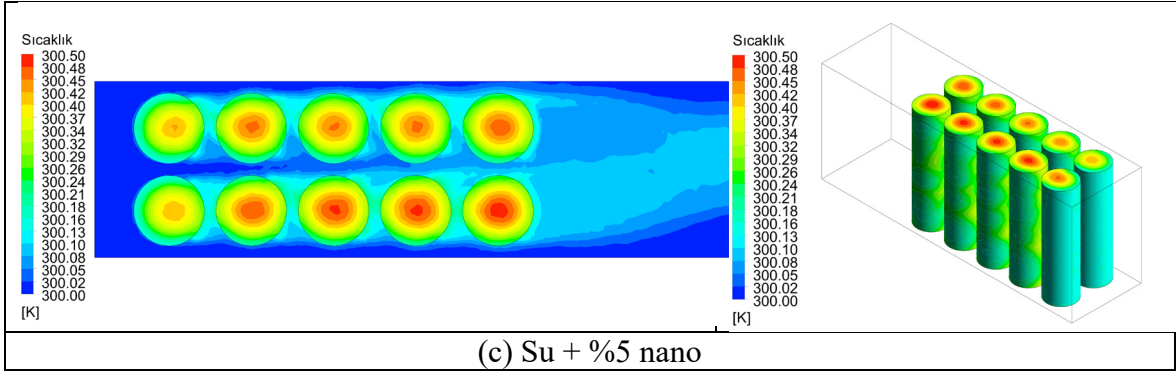
Şekil 3.20. Re=100, nano parçacık-su karışım oranları için sıcaklık dağılımı, 2S5P



Şekil 3.20. 'nin devamı

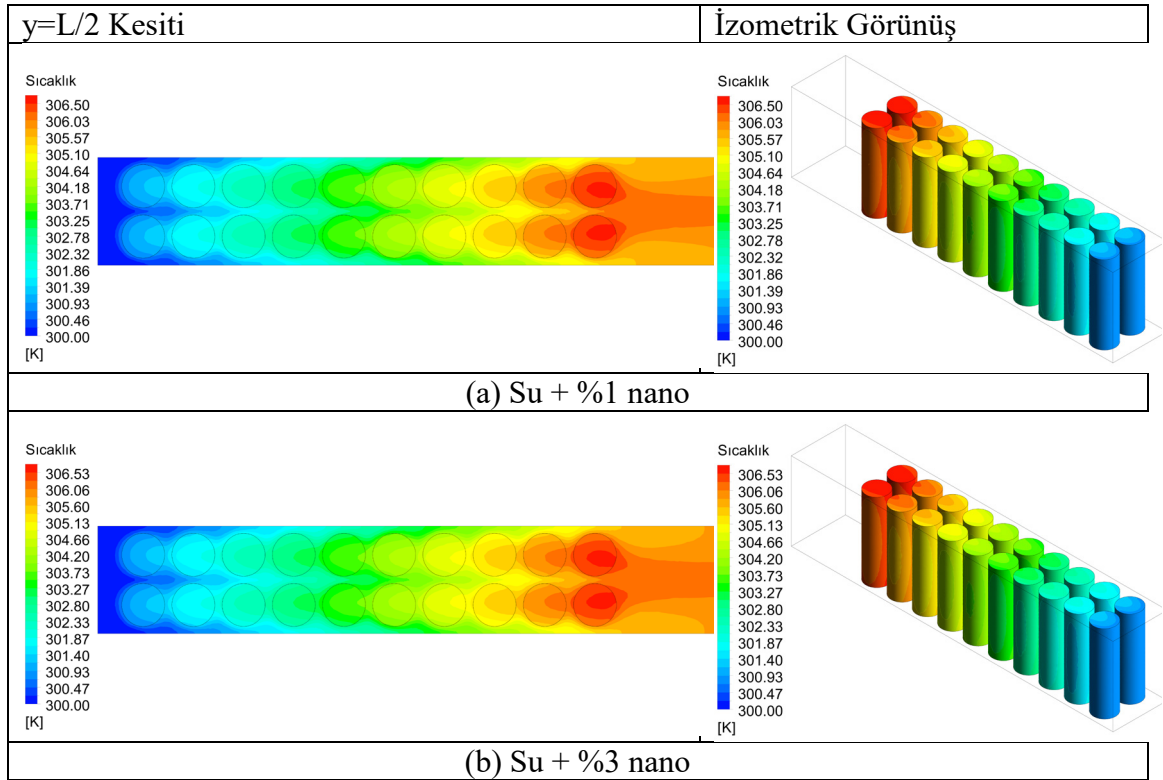


Şekil 3.21. Re=500, nano parçacık-su karışım oranları için sıcaklık dağılımı, 2S5P

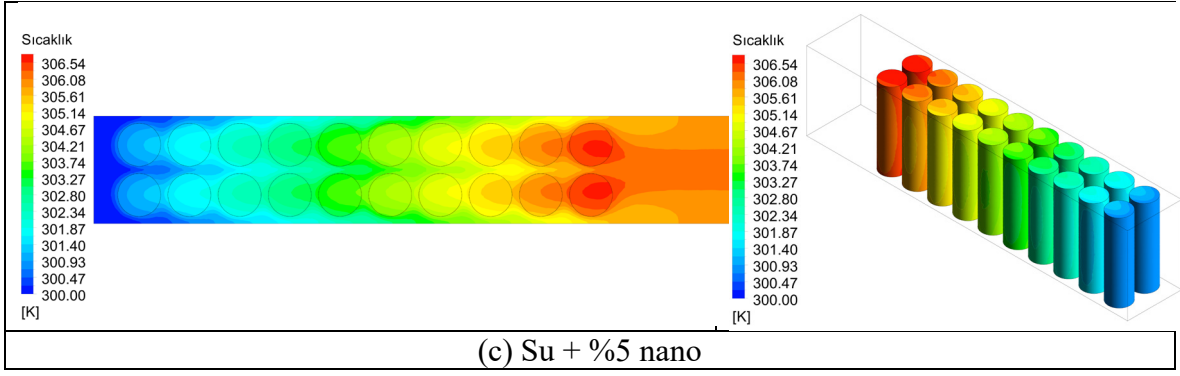


Şekil 3.21. 'in devamı

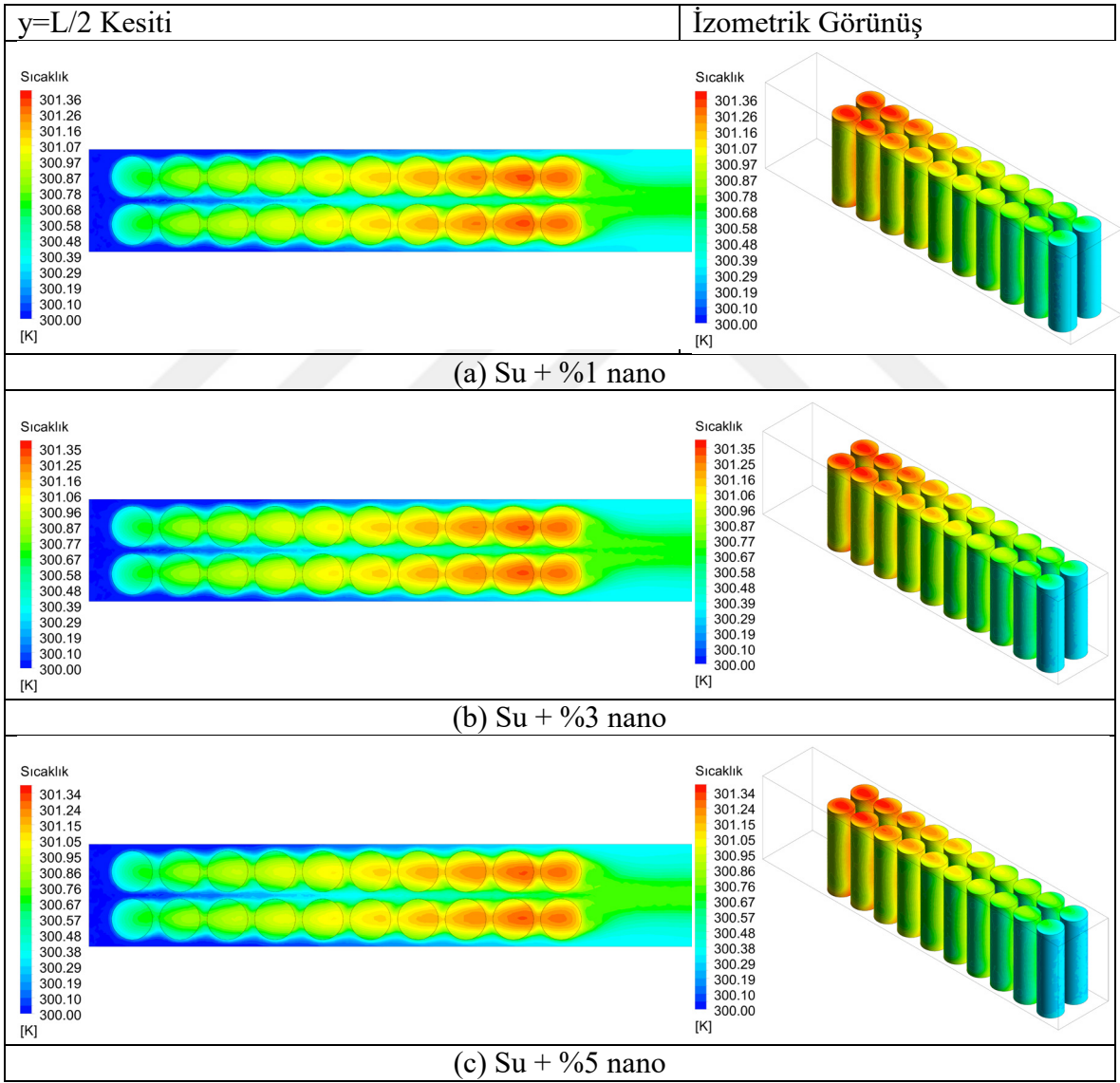
Şekil 3.22-3.24'de, soğutucu akışkanın su olması durumunda nano parçacık etkisi 2S10P batarya dizilimi $Re=10$, $Re=100$ ve $Re=500$ değerlerinde gösterilmiştir. Şekil 3.19'da gösterilen $Re=10$ için modüldeki maksimum sıcaklık olan 303 K, konfigürasyonun 2S10P yapılması durumunda 306 K değerine çıkmıştır. Bu artan batarya sayısına paralel olarak beklenen bir durumdur. $Re=100$ değerinde (Şekil 3.23) artan batarya sayısına rağmen nano-akışkanın 2S5P'deki (Şekil 3.20) bataryayı soğutma performansına ulaşmıştır. Şekil 3.24'de $Re=500$ ile mükemmel bir soğutma kapasitesi ulaşılmıştır. Değişen nano yüzdesi ile beraber soğutucu akışkan olarak su kullanıldığında sonuçlarda bir değişiklik gözlenmemiştir.



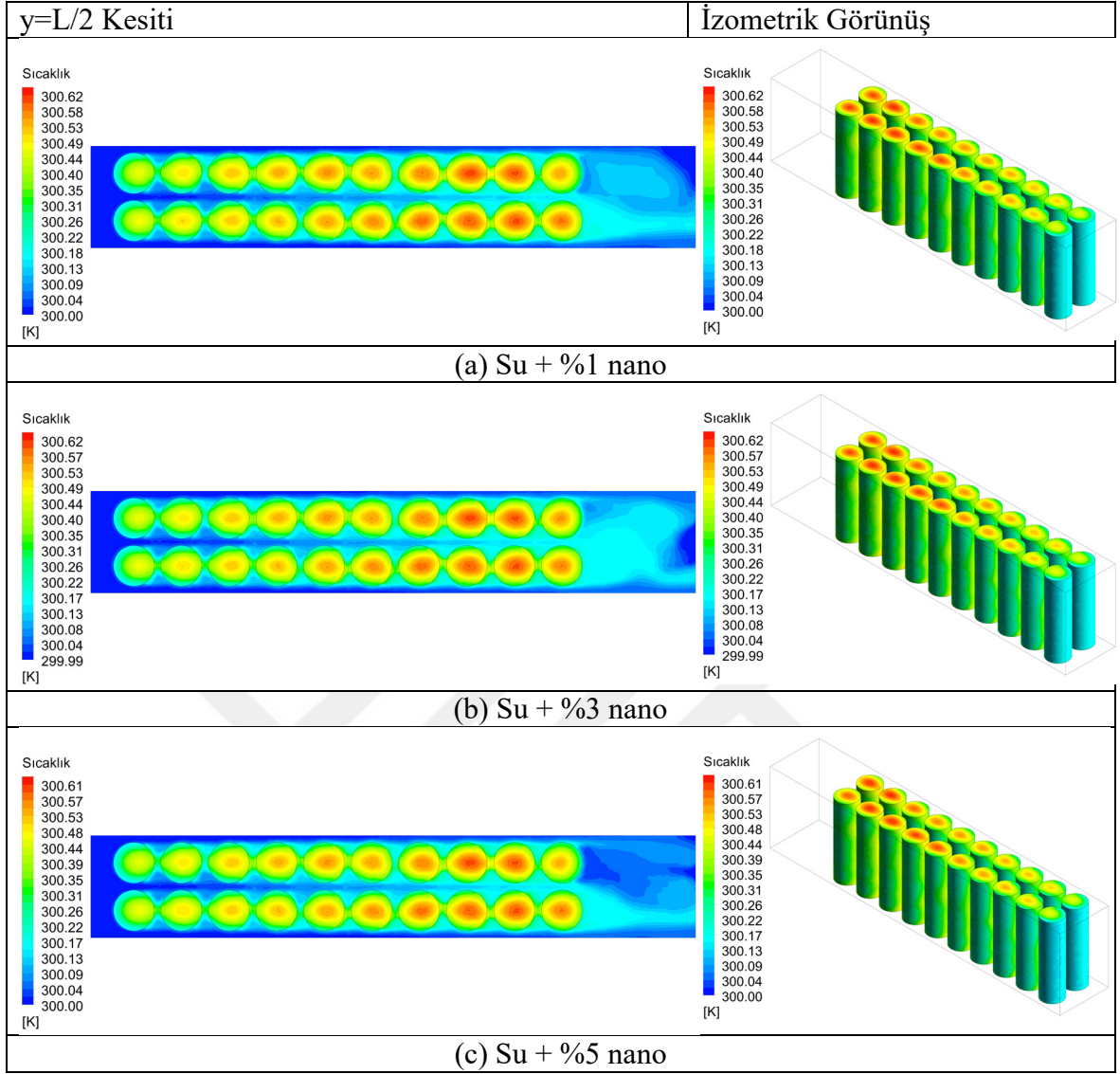
Şekil 3.22. $Re=10$, nano parçacık-su karışım oranları için sıcaklık dağılımı, 2S10P



Şekil 3.22. 'nin devamı

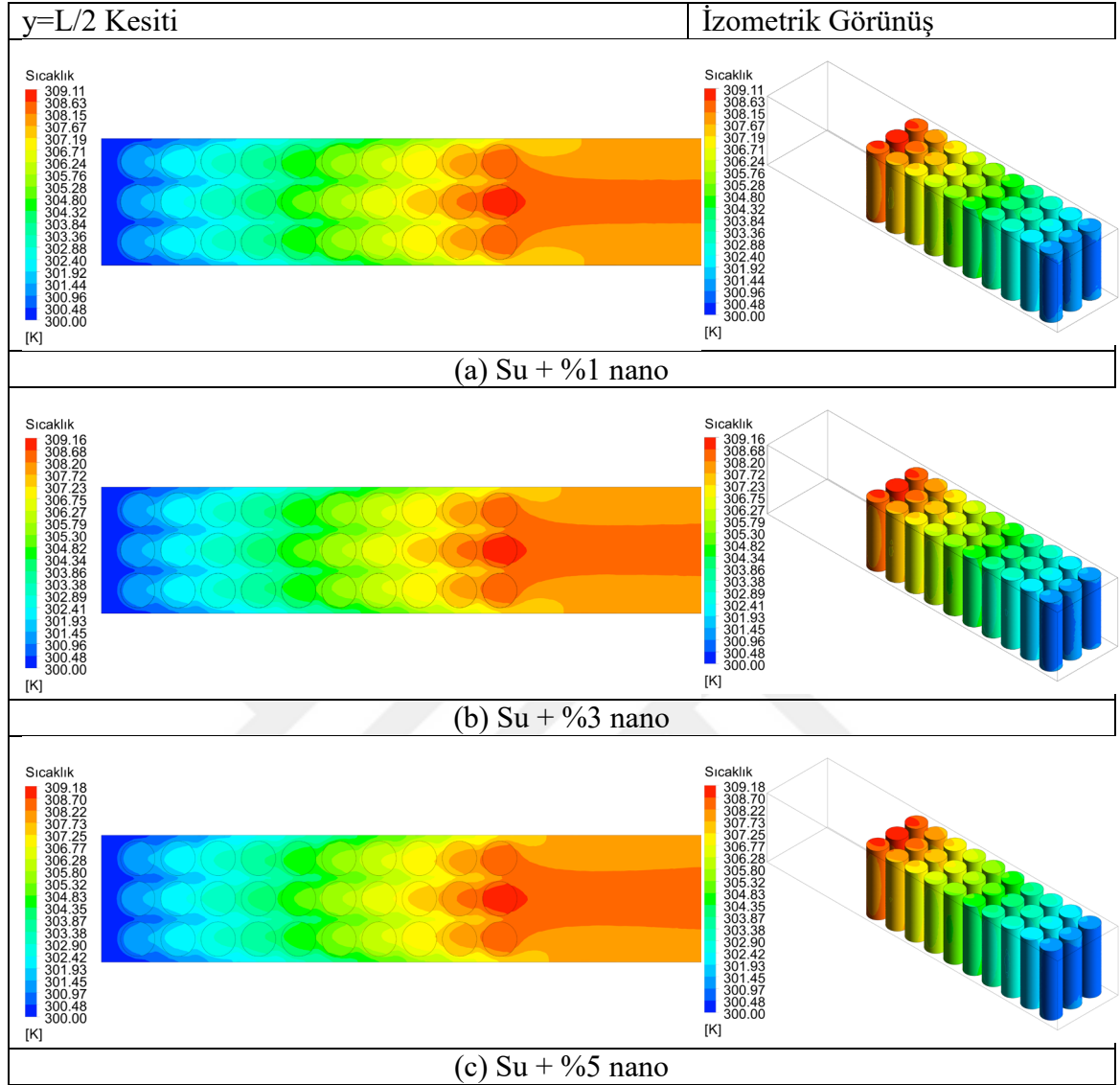


Şekil 3.23. $Re=100$, nano parçacık-su karışım oranları için sıcaklık dağılımı, 2S10P

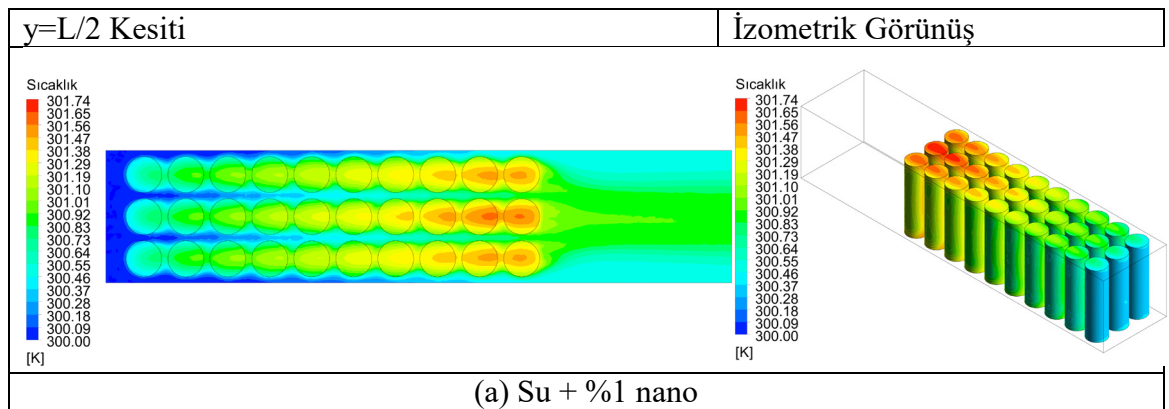


Şekil 3.24. Re=500, nano parçacık-su karışım oranları için sıcaklık dağılımı, 2S10P

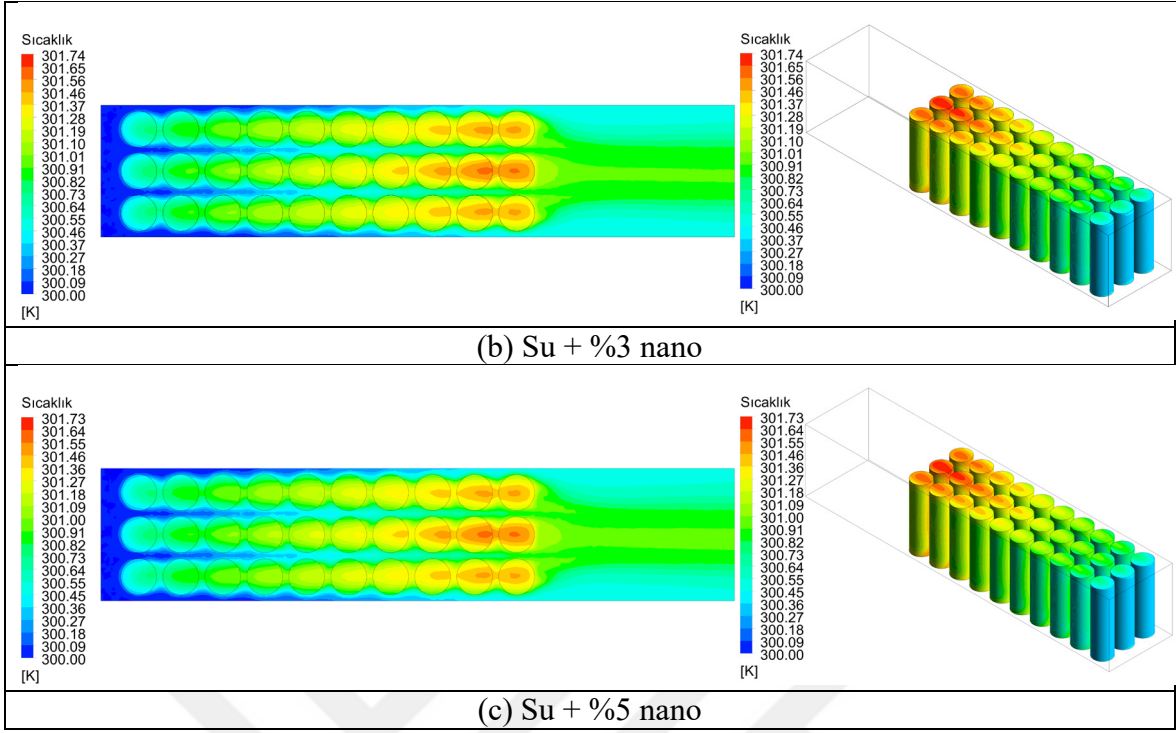
Şekil 3.25-3.27’de, soğutucu akışkanın su olması durumunda nano parçacık etkisi 3S10P batarya dizilimi Re=10, Re=100 ve Re=500 değerlerinde gösterilmiştir. Artan batarya sayısına bağlı olarak genel sıcaklık değerlerinde bir artış söz konusudur. Diğer batarya dizilimlerinde olduğu gibi nano-akışkanın farklı yüzdelerinin ayrı Re sayılarındaki sonuçları arasındaki fark yok denecek kadar azdır.



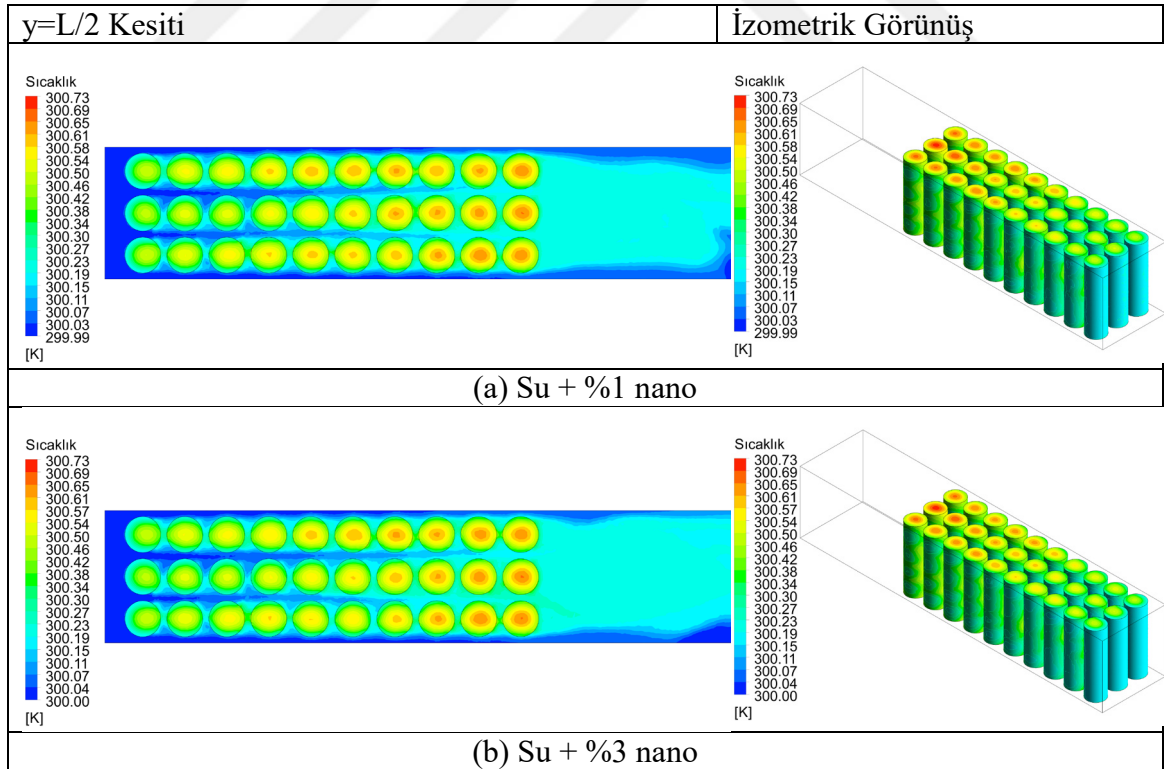
Şekil 3.25. Re=10, nano parçacık-su karışım oranları için sıcaklık dağılımı, 3S10P



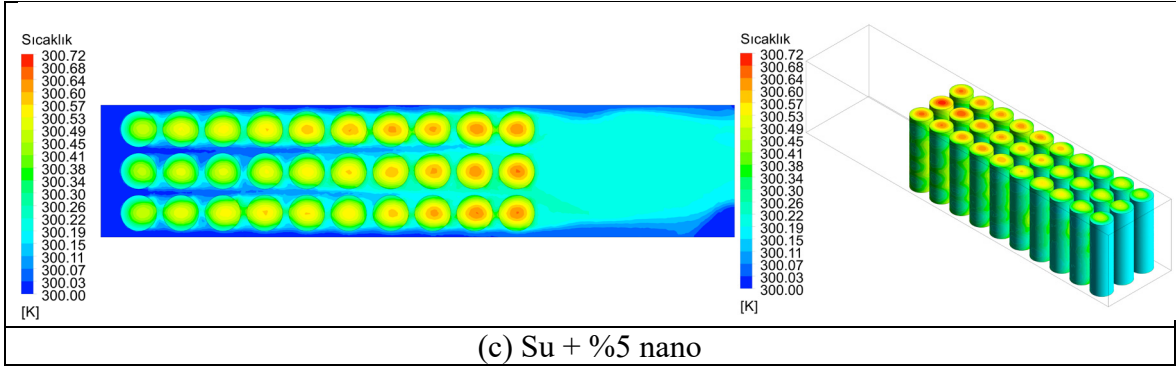
Şekil 3.26. Re=100, nano parçacık-su karışım oranları için sıcaklık dağılımı, 3S10P



Şekil 3.26. 'nın devamı

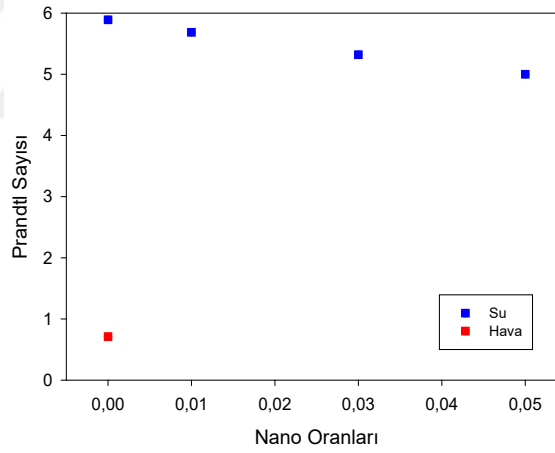


Şekil 3.27. $Re=500$, nano parçacık-su karışım oranları için sıcaklık dağılımı, 3S10P



Şekil 3.27. 'nin devamı

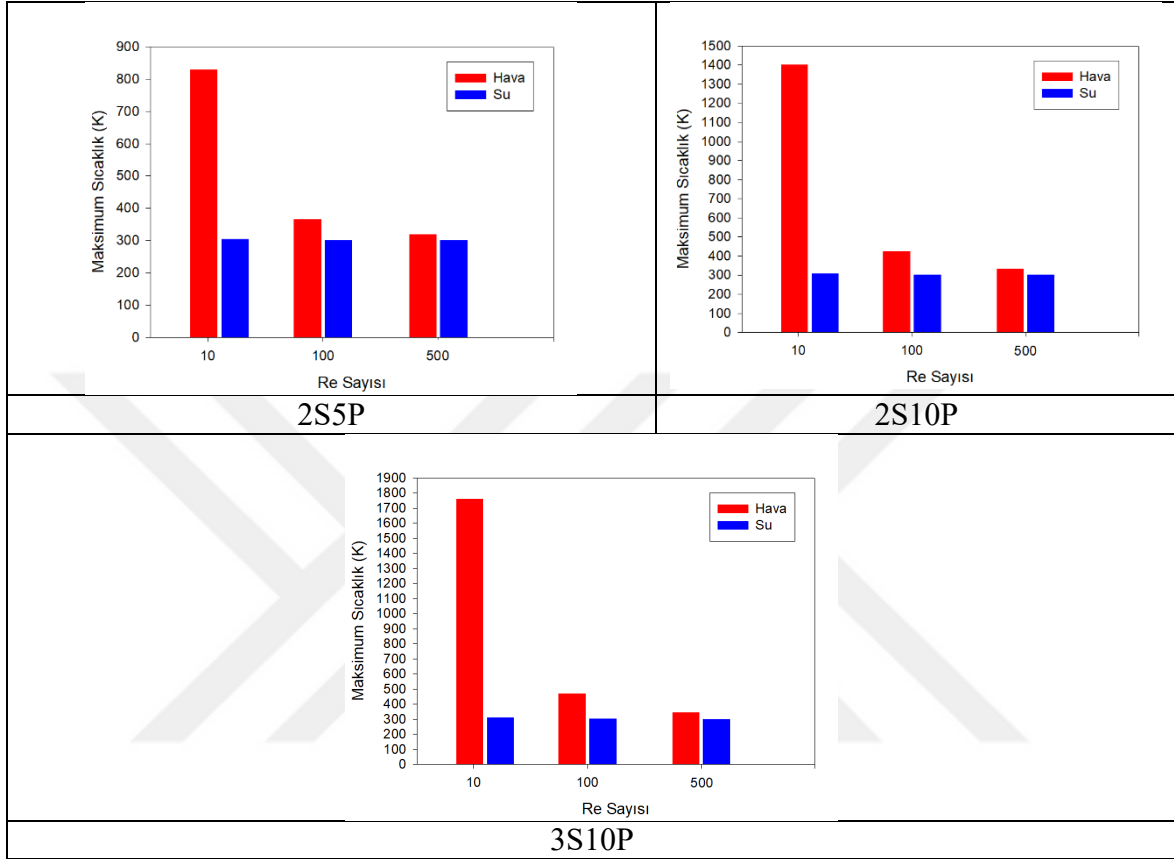
Şekil 3.28'de hava ve su için Prandtl sayılarının değerleri verilmiştir. Soğutucu akışkan su içerisindeki Al_2O_3 miktarı arttıkça Pr sayısının azalmaktadır. Pr sayısı azaldıkça zorlanmış taşınımın etkisi azalmaktadır. Su ve havanın Pr sayıları birbirine göre kıyaslandığında aralarında büyük bir fark olduğu görülecektir. Analiz sonuçlarında suyun havaya göre daha iyi bir soğutucu olması da bu grafikten anlaşılmaktadır.



Şekil 3.28. Hava ve suyun Prandtl sayıları

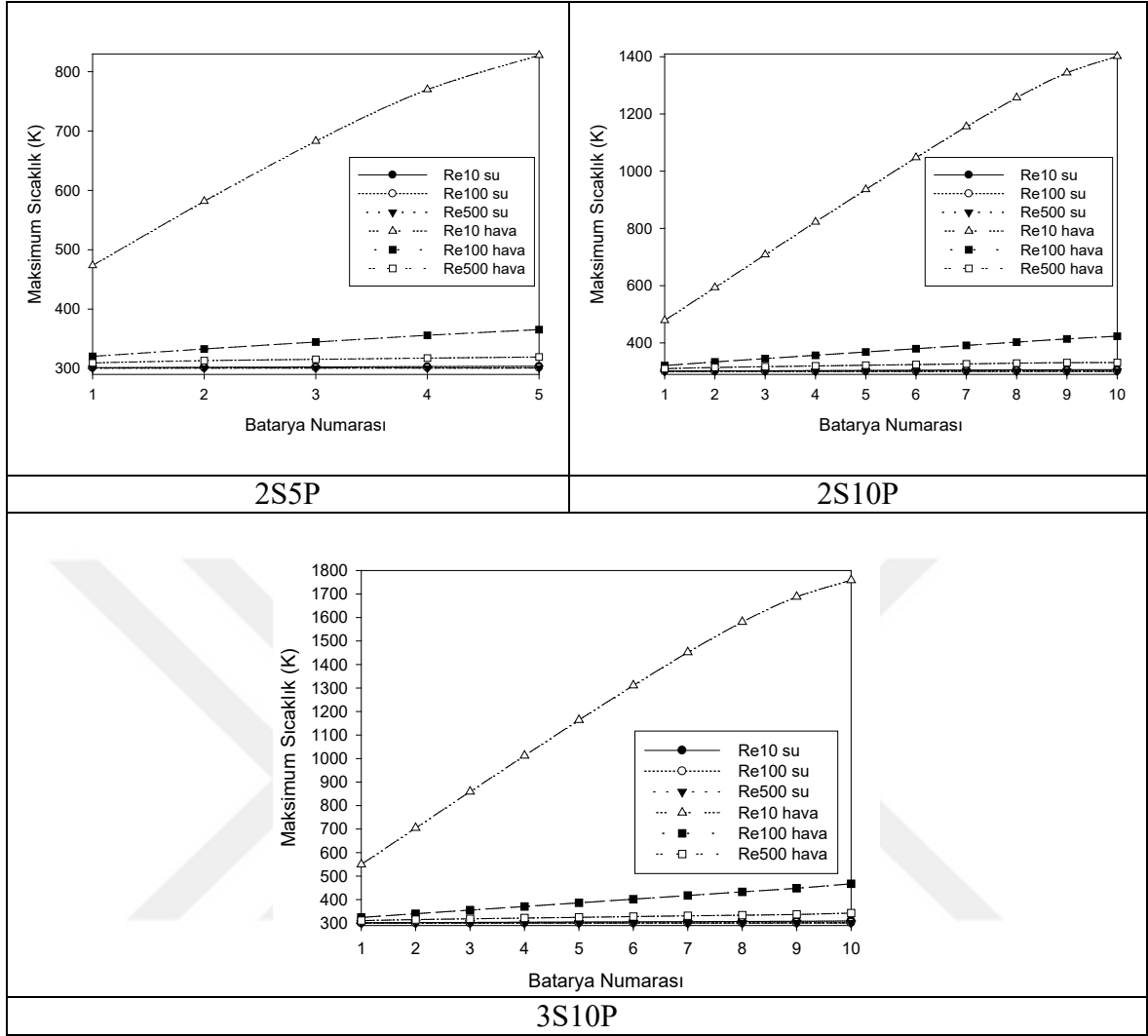
Şekil 3.29'da soğutucu akışkan olarak seçilen hava ve su ile yapılan analizler arasındaki sonuçlar grafiklere yerleştirilmiştir. X eksenini boyunca ardışık olarak dizilmiş paralel bataryalar üzerinde ulaşılan ortalama maksimum sonuçlar üç farklı batarya modülünde incelenmiştir. Sonuçlara genel olarak bakıldığında ilk dikkat çeken, hava ile ulaşılan maksimum sıcaklıkların oldukça yüksek olmasıdır. $Re=10$ hava için bataryalarda ısı sürüklenme meydana gelmiştir. Havanın $Re=100$ ve 500 değerleri için $Re=10$ 'a kıyasla sıcaklıkların oldukça düşmüş olmasına rağmen Li-ion bataryaların çalışma sıcaklığının dışında kaldıkları için hava ile Li-ion batarya soğutma yönteminin bu çalışmada uygun

olmadığı görülmüştür. Su ile yapılan analiz sonuçları incelendiği zaman ise 3S10P batarya geometrisinde ulaşılan maksimum sıcaklık 309 K dahi Li-ion bataryanın istenilen çalışma aralığındadır.



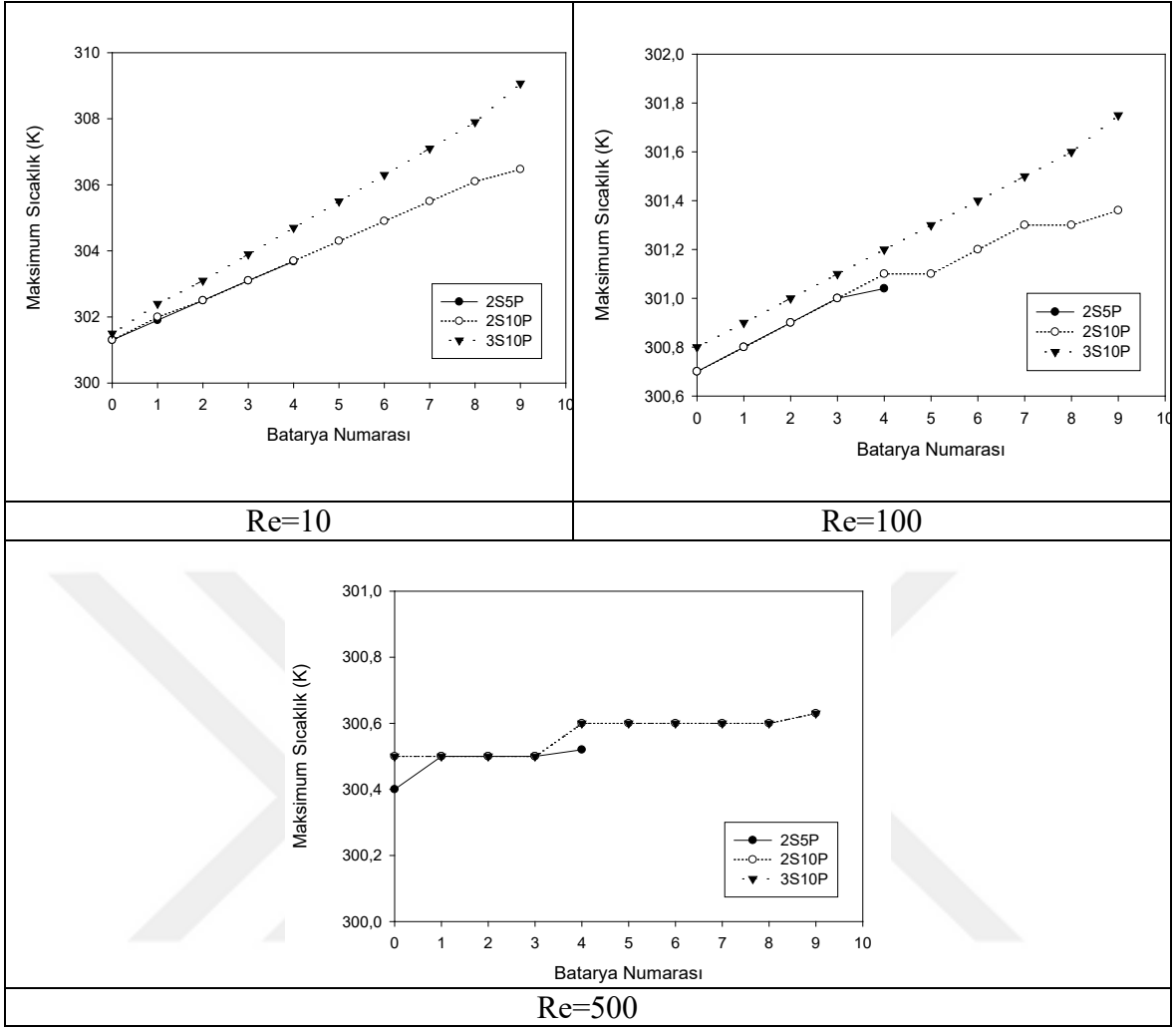
Şekil 3.29. Hava ve su soğutmalı sistemde ulaşılan maksimum sıcaklıklar

Şekil 3.30’da soğutucu akışkan hava ve su ile yapılan üç farklı batarya diziliminde sistemde ulaşılan maksimum sıcaklıklar verilmiştir. X eksenini boyunca sıralanmış bataryaların ortalama maksimum sıcaklıkları alınmıştır. İlgili Re sayılarında havanın istinasız her durumda sudan daha kötü bir soğutma performansı gösterdiği göze çarpmaktadır. Havanın özellikle $Re=10$ değerlerinde ısı sürüklenmenin meydana geldiği göze çarpmaktadır.



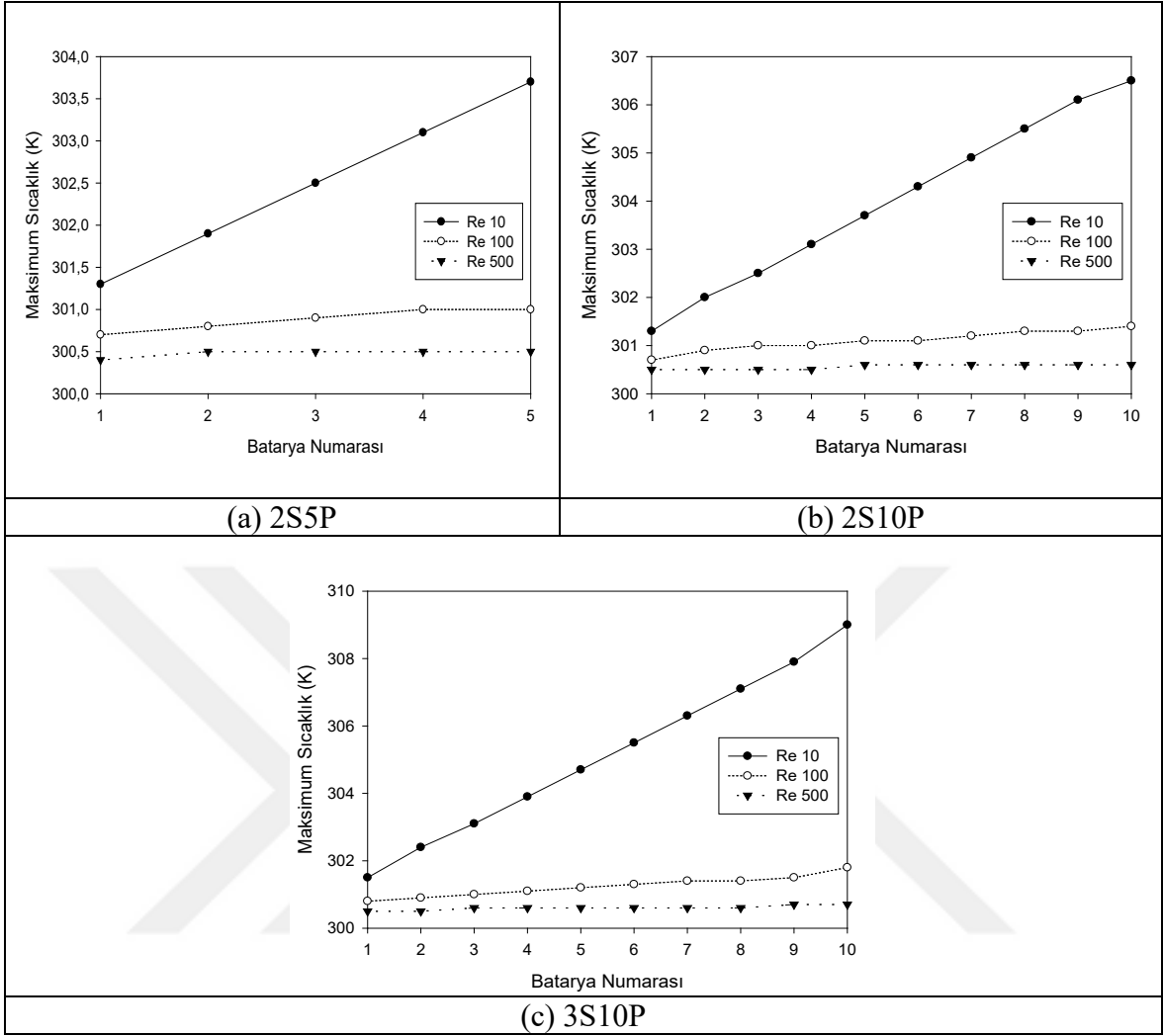
Şekil 3.30. Hava ve su soğutmalı sistemdeki sıcaklık dağılımı

Şekil 3.31’de $Re=10$, 100 , 500 için x eksenı boyunca dizilmiş olan ardışık paralel bataryalar üzerinde ulaşılan ortalama maksimum sıcaklıklar batarya numarasına göre su soğutmalı batarya modülü için verilmiştir. $Re=10$ için 2S5P ile 2S10P batarya modüllerinde sıcaklığın lineer bir şekilde aynı değerlerde arttığı görülmektedir. 3S10P’ye bakıldığında ise sıcaklıktaki artışın daha hızlı bir şekilde olduğu gözlenmiştir. Modüldeki paralel batarya sayısını arttırdığımızda 2S5P ve 2S10P’de görülen sabit sıcaklık artışının aynı şekilde kalacağı düşünülmektedir. $Re=100$ için 2S10P ve 3S10P için başlangıçta sıcaklık artışı sabit bir şekilde ilerlerken daha sonra hafif dalgalanmalar olmuştur. $Re=500$ tüm bataryalarda sıcaklık değişimi yok denecek kadar azdır.



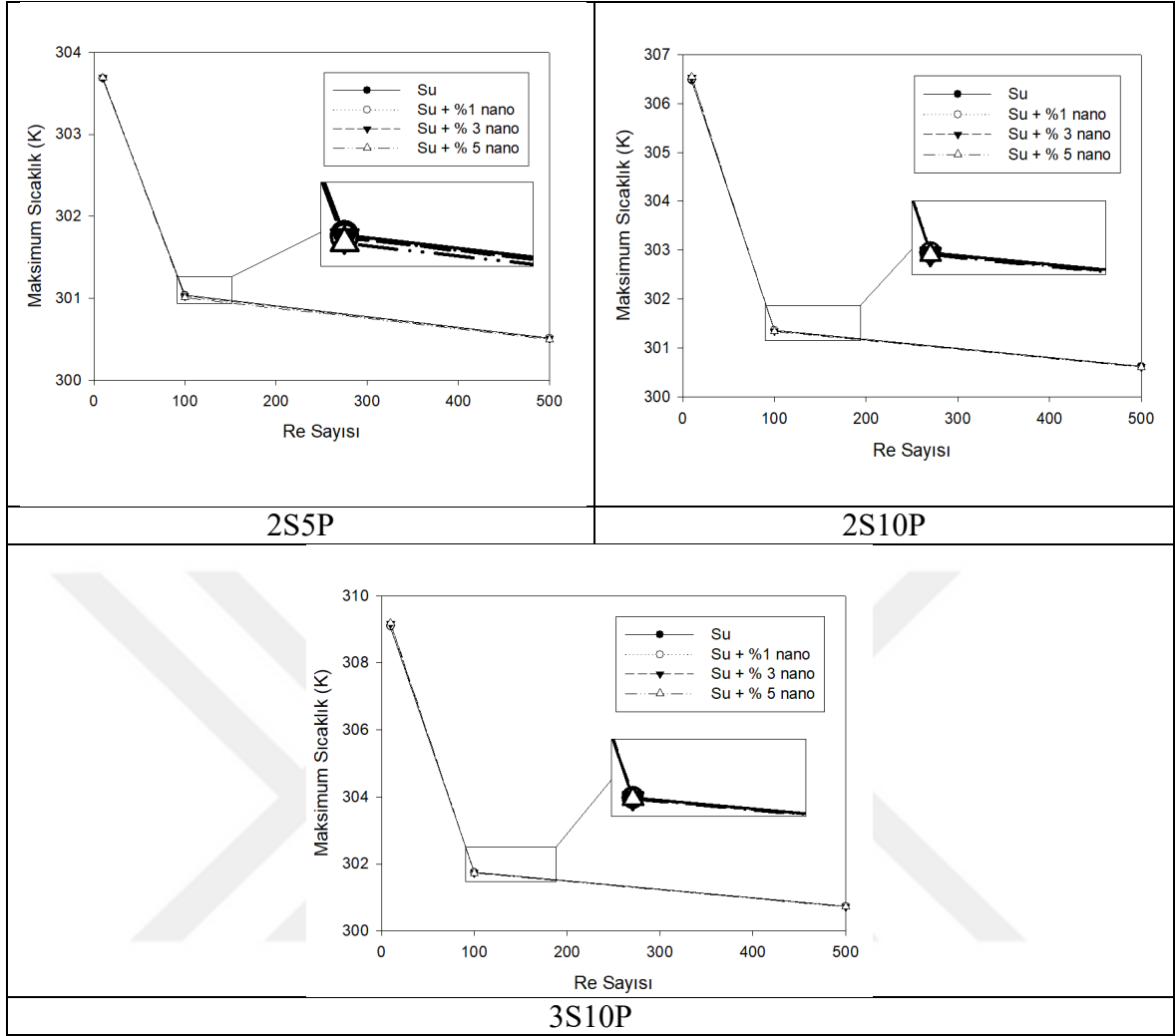
Şekil 3.31. Re=10, 100, 500 için su soğutmalı batarya modülünde ulaşılan maksimum sıcaklıklar

Şekil 3.32’de bataryaların geometrik dizilimleri içinde Re sayılarına bağlı olarak x eksenindeki ardışık paralel bataryalar üzerinde ulaşılan ortalama maksimum sıcaklıklar su için gösterilmiştir. Akışının sonundaki bataryaların sıcaklıklarında artış görülmektedir. Re=100 ve Re=500 değerlerinde modül içerisinde bataryalar üzerinde oldukça dengeli bir sıcaklık dağılımının elde edildiği görülmüştür.



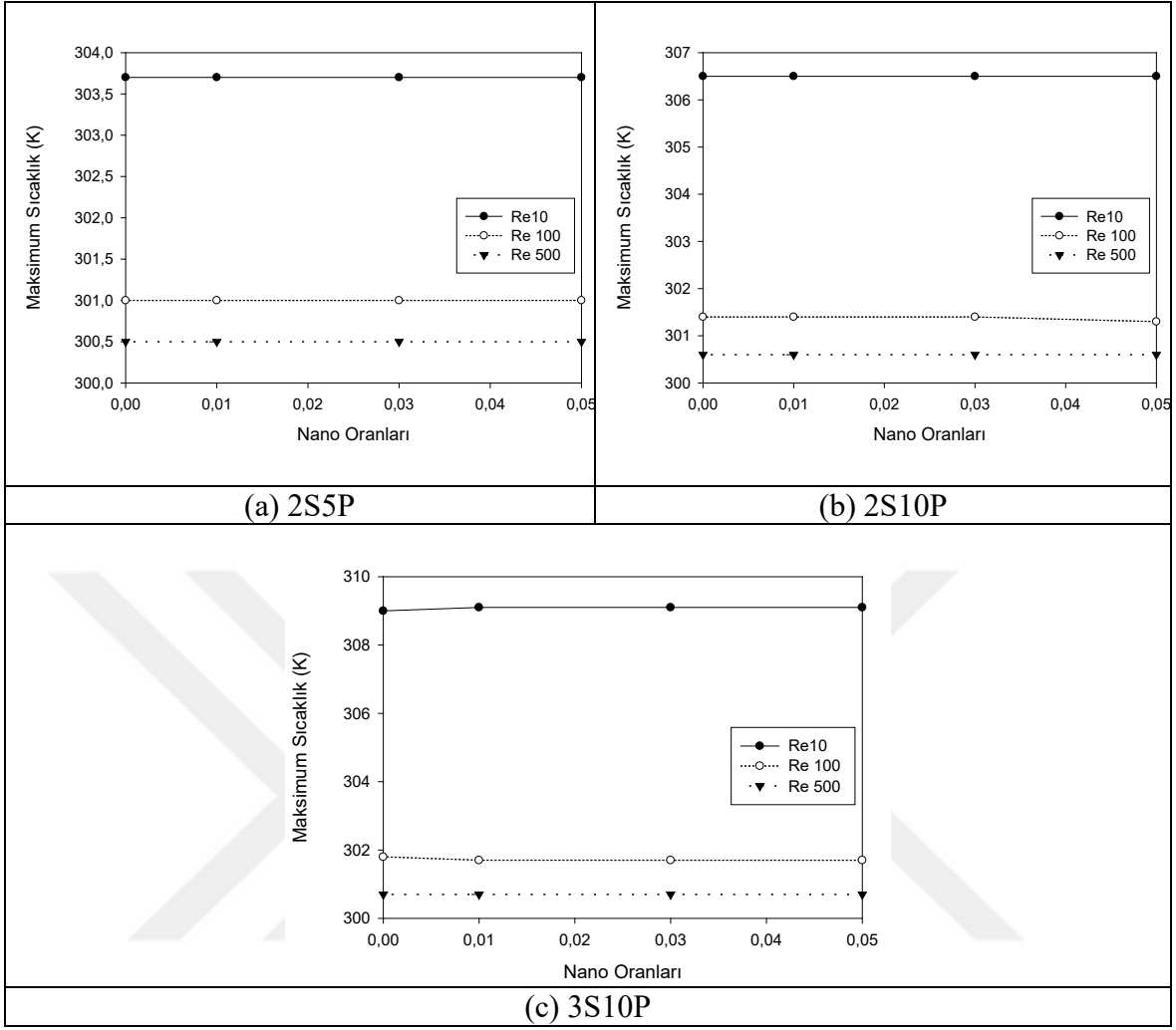
Şekil 3.32. Su soğutmalı batarya modülünde bataryalar üzerinde ulaşılan maksimum sıcaklıklar

Şekil 3.33’de su soğutmalı batarya modülleri için sistemde ulaşılan maksimum sıcaklıklar $Re=10, 100, 500$ ’e göre üç batarya dizilimi için ayrı olarak artan nano sayısına göre verilmiştir. Çözümlenen sonuçlar arasında lineer interpolasyon kullanılmıştır. Grafiklere genel olarak bakıldığında modüldeki batarya sayısı arttıkça sistemde ulaşılan maksimum sıcaklığın buna paralel bir artış gösterdiği gözlemlenmiştir. Verimli şekilde soğutma yapan sistemde verilen sıcaklık skalasında nano etkisi çok küçük ölçüde olduğu için grafikler büyütülmüştür.



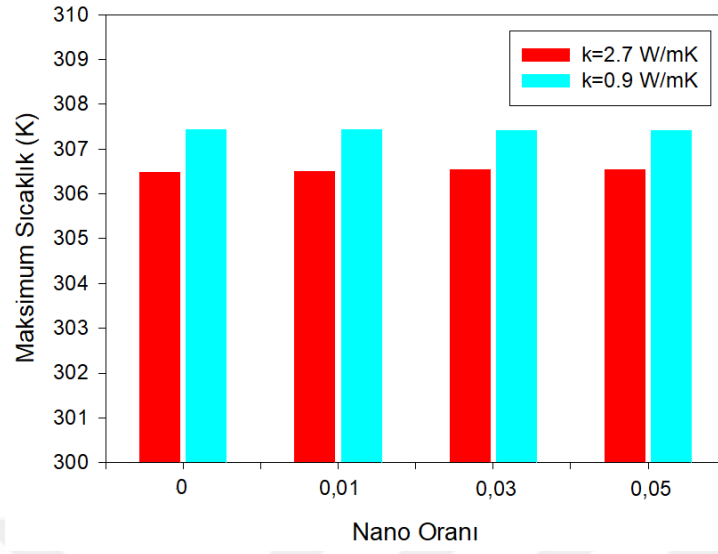
Şekil 3.33. Su soğutmalı batarya modüllerinde nano etkisi

Şekil 3.34'te 2S5P, 2S10P, 3S10P batarya modülleri içinde ulaşılan maksimum sıcaklıklar artan nano yüzdesine bağlı olarak verilmiştir. Sıcaklılardaki değişiklikler çok küçük oranlardadır. $Re=10$ değerinde artan nano yüzdesine bağlı olarak sıcaklıklarda çok hafif bir artış olduğu görülmüştür. Artan nano yüzdesine bağlı olarak ısıl iletkenlik katsayısı artış göstermesine rağmen yeni nanoakışkanın ısı kapasitesi azaldığı için batarya ile nanoakışkan arasındaki ısı transferinde bir azalış görülmüştür. Artan Re sayılarına bağlı olarak bu durum tersine dönmüştür. Genel olarak nanoakışkanın soğutma üzerinde belirgin bir etkisinin görülemediği sebeplerinden bir diğeri ise sadece suyla yapılan soğutmada soğutma performansının zaten çok iyi bir derecede olmasıdır.



Şekil 3.34. Sudaki değişen nano yüzdesine bağlı olarak sistemde ulaşılan maksimum sıcaklıklar

Bu çalışmada bataryanın ısı iletkenlik katsayısı 2.7 W/mK olarak seçilmiştir. Isıl iletkenlik katsayısının batarya soğutma sisteminde nasıl etkili olduğunu görmek için bataryanın k değeri değiştirilmiş ve sonuçlar incelenmiştir. Şekil 3.35'te 2S10P batarya geometrisinde $Re=10$ değeri için su akışkanı kullanılarak yapılan analizde batarya modülünde ulaşılan maksimum sıcaklıklar kırmızı renkle belirtilmiştir. Bataryanın k değeri 2.7 W/mK 'den 0.9 W/mK 'e düşürülmüştür ve analizler su ve nano parçacıklı su için tekrarlanmıştır. Sistemde ulaşılan maksimum sıcaklıklar iki durum için karşılaştırılmıştır. Bataryanın ısı iletkenlik katsayısı düşüldükçe bataryadaki sıcaklığın arttığı gözlenmiştir. Bu değişim ortalama 1 K kadardır.



Şekil 3.35. Su soğutmalı sistemde bataryanın değişen ısıl iletkenlik katsayısına bağlı ulaşılan maksimum sıcaklıklar

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Yüksek lisans tez çalışması olarak yürütülen bu çalışmada bir batarya modülünün termal yönetimi amaçlanmıştır. Çalışma ANSYS-Fluent 18.2 sayısal yazılımı kullanılarak üç boyutlu olarak yürütülmüştür. Soğutucu akışkan olarak hava, su ve nano parçacık katkılı akışkanlar kullanılmıştır. Farklı Re sayılarında ve farklı batarya dizilimlerinde (2S5P, 2S10P, 3S10P) yürütülen çalışmada termal yönetim süreci incelenmiştir. Yürütülen çalışma sonucunda elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- Yapılan çalışmada Li-ion batarya termal yönetim sisteminde kullanılan soğutucu akışkanın soğutma performansı araştırılmıştır.
- Hava ve suyla yapılan çalışmalarda suyun soğutma performansının havanınkine oranla çok yüksek olduğu görülmüştür.
- Batarya sayısının en az olduğu 2S5P diziliminde modülde hava ile yapılan analiz sonuçlarında ulaşılan maksimum sıcaklıklar $Re=10, 100, 500$ için sırasıyla 828, 365, 319 K iken su ile yapılan analiz sonuçlarında sırasıyla 303.7, 301, 300.5 K'dir.
- Toplamda 10 adet batarya içeren 2S10P diziliminde modülde hava ile yapılan analiz sonuçlarında ulaşılan maksimum sıcaklıklar $Re=10, 100, 500$ için sırasıyla 1401, 423, 331 K iken su ile yapılan analiz sonuçlarında sırasıyla 306.5, 301.4, 300.6 K'dir.
- Batarya sayısının en fazla olduğu 3S10P diziliminde modülde hava ile yapılan analiz sonuçlarında ulaşılan maksimum sıcaklıklar $Re=10, 100, 500$ için sırasıyla 1759, 467, 343 K iken su ile yapılan analiz sonuçlarında sırasıyla 309.1, 301.8, 300.7 K'dir.
- Suyla yapılan çalışmalarda Li-ion bataryalar istenilen optimum çalışma sıcaklıklarına sahip olmuştur. Bu durum hem performans açısından hem de bataryaların çevrim sayısında hızlı bir düşüşe neden olmayacağı için istenen bir özelliktir.
- Suya nano parçacıklar katılması aynı Re sayısında sıcaklıkların ufak bir miktar artış göstermesine neden olmuştur. Bu Prandtl sayısının nano parçacık etkisiyle düşmesinden dolayı taşınımın bir miktar azalması sonucu beklenen bir durumdur. Yalnız düşük Re sayılarında bu davranış belirgin olarak gözlenememiştir.

5. ÖNERİLER

Bu çalışma kapsamında, gelişen teknolojiyle birlikte tüm alanlarda büyük öneme sahip olan batarya sistemlerinin termal yönetimi amaçlanmıştır. Yürütülen çalışma sonucunda elde edilen bulgular görseller ve grafiklerle açıklanmıştır. Çalışma ile ulaşılan sonuçların geliştirilmesi ve bu alanda daha fazla sonucun bilim literatürüne kazandırılması için aşağıdaki öneriler yapılmaktadır.

- Yapılan mevcut çalışmada batarya modülü soğuk ve sıcak hava şartlarından etkilenmemektedir. Analiz yapılırken sınır şartlarında batarya modülünün duvarları adyabatik olarak seçilmiştir. İleriki çalışmalarda hava koşulları ya da komşu batarya modülleri de göz önünde bulundurularak çalışmalar yapıp literatüre katkıda bulunulabilir.
- Bu çalışma sayısal yöntemler kullanılarak yürütülmüştür. Sonuçların kesinleştirilmesi ve uygulamaya aktarımının güçlendirilmesi için deneysel yöntemler kullanılarak çalışma tekrarlanabilir.
- Bataryaların elektriksel kapasiteleri doğrudan kullanılarak çalışmalar tekrarlanabilir.
- Farklı soğutucu akışkanlar ve batarya modülleri için çalışmalar yürütülüp elde edilen sonuçlar daha büyük batarya paketlerine uygulanabilir.
- Batarya modülünün içerisinde akışın yönünü değiştirecek geometrik yapılar kullanılabılır. Böylece paralel bataryalar arasında, akışın durgun olduğu yerlerde, akım hızının artması sağlanabilir ve bataryaların daha verimli soğuması sağlanabilir.

Sonuç olarak bataryaların performansının ve ömrünün artırılması için termal yönetimin gerekli olduğu, farklı parametreler ile batarya verimlerinin geliştirilebileceği görülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] **Pesaran, A. A.**, 2001. Battery thermal management in EVs and HEVs: issues and solutions, Advanced Automotive Battery Conference, Nevada
- [2] **Chen D., Jiang J., Kim G., Yang C., Pesaran A.**, 2016. Comparison of different cooling methods for lithium ion battery cells, Applied Thermal Engineering, **94**, 846–854.
- [3] **Zhao J. T., Rao, Z., Huo Y., Liu X., Li Y.**, 2015. Thermal management of cylindrical power battery module for extending the life of new energy electric vehicles, Applied Thermal Engineering, **85**, 33–43.
- [4] **Yang T., Yang N., Zhang X., Li G.**, 2016. Investigation of the thermal performance of axial-flow air cooling for the lithium-ion battery pack, International Journal of Thermal Sciences, **108**, 132–144.
- [5] **Wang T., Tseng K., Zhao J., Wei Z.**, 2014. Thermal investigation of lithium-ion battery module with different cell arrangement structures and forced air-cooling strategies, Applied Energy, **134**, 229–238.
- [6] **Tong W., Somasundaram K., Birgersson E., Mujumdar A., Yap C.**, 2016. Thermo-electrochemical model for forced convection air cooling of a lithium-ion battery module, Applied Thermal Engineering, **99**, 672-682.
- [7] **Sabbah R., Kizilel R., Selman J., Al-Hallaj S.**, 2008. Active (air-cooled) vs. passive (phase change material) thermal management of high power lithium-ion packs: limitation of temperature rise and uniformity of temperature distribution, Journal of Power Sources, **182**, 630-638.
- [8] **Ling Z., Wang F., Fang X., Gao X., Zhang Z.**, 2015. A hybrid thermal management system for lithium ion batteries combining phase change materials with forced-air cooling, Applied. Energy, **148**, 403–409,
- [9] **Jiang G., Huang J., Fu Y., Cao M., Liu M.**, 2016. Thermal optimization of composite phase change material/expanded graphite for Li-ion battery thermal management, Applied Thermal Engineering, **108**, 1119-1125.
- [10] **Moraga N., Xaman J., Araya R.**, 2016. Cooling Li-ion batteries of racing solar car by using multiple phase change materials, Applied Thermal Engineering, **108**, 1041-1054.
- [11] **Karimi G., Li X.**, 2013. Thermal management of lithium-ion batteries for electric vehicles, International Journal of Energy Research, **37**, 13–24.
- [12] **Khateeb S., Farid M., Selman J., Al-Hallaj S.**, 2004. Design and simulation of a lithium-ion battery with a phase change material thermal management system for an electric scooter, Journal of Power Sources, **128**, 292–307.

- [13] **Kizilel R., Lateef A., Sabbah R., Farid M., Selman J., Al-Hallaj S., 2008.** Passive control of temperature excursion and uniformity in high-energy Li-ion battery packs at high current and ambient temperature, *Journal of Power Sources*, **183**, 370-375.
- [14] **Wu M., Liu K., Wang Y., Wan C., 2002.** Heat dissipation design for lithium-ion batteries, *Journal of Power Sources*, **109**, 160–166.
- [15] **Samimi F., Babapoor A., Azizi M., Karimi G., 2016.** Thermal management analysis of a Li-ion battery cell using phase change material loaded with carbon fibers, *Energy*, **96**, 355–371.
- [16] **Basu S., Hariharan S. K., Kolake S. M., Song T., Sohn D. K., Yeo T., 2016.** Coupled electrochemical thermal modelling of a novel Li-ion battery pack thermal management system, *Applied Energy*, **181**, 1-13.
- [17] **Xu J., Lan C., Qiao Y., Ma Y., 2017.** Prevent thermal runaway of lithium-ion batteries with minichannel cooling, *Applied Thermal Engineering*, **110**, 883-890.
- [18] **Tran T., Harmand J., Sahut B., 2014.** Experimental investigation on heat pipe cooling for hybrid electric vehicle and electric vehicle lithium-ion battery, *J. Power Source*, **265**, 262–272.
- [19] **Huo Y., Rao Z., 2015.** The numerical investigation of nanofluid based cylinder battery thermal management using lattice Boltzmann method, *International Journal of Heat Mass Transfer*, **91**, 374–384.
- [20] **Wu F., Rao Z., 2017.** The lattice Boltzmann investigation of natural convection for nanofluid based battery thermal management, *Applied Thermal Engineering*, **115**, 659-669.
- [21] **Rao Z., Wang S., 2011.** A Review of Power Battery Thermal Energy Management, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **15**, 4554-4571.
- [22] **Karahan Ş., Tür O., Uçarol H., Özsu E., Yazar A., Turhan L., Akgün F., Tırıs M., 2003.** Elektrikli Araçlar, Gebze, Kocaeli: TÜBİTAK.
- [23] **Warner J., 2014.** Lithium-Ion Battery Packs for EVs, *Lithium-Ion Batteries Advances and Applications*, Michigan, USA, Elsevier, 127-150.
- [24] **Ye Y., Shi Y., Saw H. L., Tay A. O., 2014.** An electro-thermal model and its application on a spiral-wound lithium ion battery with porous current collectors, *Electrochimica Acta*, **121**, 143-153.
- [25] **Yang N., Zhang X., Li G., Hua D., 2015.** 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.
- [26] **Fotouhi A., Auger D., Propp K., Longo S., Wild M., 2016.** A review on electric vehicle battery modelling: From Lithium-ion toward Lithium–Sulphur, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **56**, 1008-1021.

- [27] **Jeon D., Baek S. M.,** 2011. Thermal modeling of cylindrical lithium ion battery during discharge cycle, *Energy Conversion and Management*, **52**, 2973-2981.
- [28] **Ramadass P., Haran R., White R., Popov B.,** 2002. Capacity fade of Sony 18650 cells cycled at elevated temperatures, part II, *Capacity Fade Analysis*, **112**, 614–620.
- [29] **Zhao R., Liu J., Gu J.,** 2017. A comprehensive study on Li-ion battery nail penetrations and the possible solutions, *Energy*, **123**, 392-401.
- [30] **Golubkov A., Fuchsa D., Wagnerb J., Wiltschec H., Stangld C., Faulerd G., Voitice G., Thaler A., Hackere V.,** 2014. Thermal-runaway experiments on consumer Li-ion batteries with metal-oxide and olivin-type cathodes, *RSC Advances*, **4**, 3633-3642.
- [31] **Stefanopoulou A. G., Kim Y.,** 2015. System-level management of rechargeable lithium-ion batteries, *Rechargeable Lithium Batteries*, Michigan, USA, WP, 281-302.
- [32] www.catalyticengineering.com/top-ten-facts-about-teslas-350kwh-powerwall-battery/, 8 Mayis 2015.
- [33] chargedevs.com/newswire/johnson-matthey-acquires-a-123s-cathode-materials-plant/, 9 Ekim 2014.
- [34] **DeSalvo G. J., Swanson A. J.,** 1985. ANSYS Engineering Analysis System User's Manual, Swanson Analysis Systems.
- [35] **Xie J., Ge Z., Zang M., Wang S.,** 2017. Structural optimization of lithium-ion battery pack with forced air cooling system, *Applied Thermal Engineering*, **126**, 583–593.
- [36] **Mondal B., Lopez C., Mukherjee P.,** 2017. Exploring the efficacy of nanofluids for lithium-ion battery thermal management, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **112**, 779-794.
- [37] **Sefidan A., Sojoudi A., Saha S.,** 2017. Nanofluid-based cooling of cylindrical lithium-ion battery packs employing forced air flow, *International Journal of Thermal Sciences*, **117**, 44-58.

ÖZGEÇMİŞ

Tuğçe TÜRKBAY 1991’de Elazığ’da doğdu. İlk ve orta öğrenimini Elazığ’da farklı okullarda tamamladı. 2015 yılında Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Otomotiv Mühendisliği Bölümü’nden mezun oldu. 2016 yılında Fırat Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Taşıt Tahrik ve Güç Sistemleri Anabilim Dalı’nda yüksek lisans öğrenimine başladı. 2017 yılında Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Otomotiv Mühendisliği Bölümü’ne Araştırma Görevlisi olarak atandı. Halen aynı bölümde görevine devam etmektedir.

İLETİŞİM

Afyon Kocatepe Üniversitesi
Teknoloji Fakültesi, Otomotiv Mühendisliği Bölümü, Afyonkarahisar
e-mail: tturkbay@aku.edu.tr