



Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi <https://dergipark.org.tr/tr/pub/vyyumfd>



Entegreli Termal Yönetim Sisteminde Gizli Isı Depolamanın Etkisi

Gülenay Alevay Kılıç

Elektrik ve Enerji Bölümü, Yalova MYO, Yalova Üniversitesi, Yalova, Türkiye, ORCID: 0000-0002-3513-8785

ÖZET

Termal yönetim sistemleri (TYS) içinde aktif ve pasif soğutma yöntemlerinin avantajlarını bir araya getiren entegreli termal yönetim sistemleri (ETYS) son birkaç yıldır yeni nesil uygulamalar arasında yer almaktadır. ETYS, yüksek ısı üreten uygulamalarda kullanılarak cihaz bileşenlerinden kaynaklanan ısıyı etkin bir şekilde kontrol edip dağıtmak için iki mekanik döngüden oluşmaktadır. Birincil döngüde, bileşenlerden gelen ısı, sıvı soğutma sistemine entegre edilmiş sistem aracılığıyla uzaklaştırılmaktadır. İkincil döngüde ise dolaşan sıvı, cihazın ısı üreten bileşenlerinden ısıyı absorbe ederek tekrar birincil döngüdeki sıvı soğutucu ünitesi tarafından soğutulmaktadır. Bu deneysel çalışmada, birincil döngüdeki radyatöre faz değişim malzemesi (FDM) entegre edilmiş olup FDM'nin gizli ısı depolama kapasitesinden yararlanılarak radyatör üzerindeki termal yükün azaltılması amaçlanmıştır. Deneysel sıcak iklim koşulları baz alınarak radyatörde dolaştırılan ısı transfer akışkanı (ITA) ile FDM arasındaki termal etkiler incelenmiştir. Çalışma kapsamında sıcak iklimdeki agresif ve sürekli yüksek deşarj akımının neden olduğu sıcaklık artışını sönümleyici bir yaklaşım sunulmuştur. Elde edilen veriler, birincil döngüde yer alan radyatörün üstündeki termal yükün, gizli ısı depolama enerjisi kullanıldığında % 21.45 azaldığını ortaya koymuştur. Aynı zamanda radyatör kanalları boyunca istikrarlı ve homojen bir ısı dağılımı gözlemlenmiş ve belirsizlik analizi de yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Entegreli termal yönetim sistemi, Sıvı soğutma, Radyatör, Zorlanmış ısı taşınımı.

The Effect of Latent Heat Storage in Integrated Thermal Management System

Gülenay Alevay Kılıç

Department of Electric and Energy, Vocational School of Yalova University, Yalova University, Yalova, Türkiye, ORCID: 0000-0002-3513-8785

ABSTRACT

Integrated thermal management systems (ITMS), which combine the advantages of active and passive cooling methods within thermal management systems (TMS), have been among the new generation applications in recent years. ITMS, used in applications generating high heat, consists of two mechanical cycles to effectively control and distribute heat originating from device components. In the primary cycle, heat from the components is dissipated through a system integrated with a liquid cooling system. In the secondary cycle, the circulating liquid absorbs heat from the heat-generating components of the device and is then cooled again by the liquid cooling unit in the primary cycle. In this experimental study, phase change material (PCM) was integrated into the radiator in the primary cycle to reduce the thermal load on the radiator by utilizing the latent heat storage capacity of PCM. Thermal effects between the heat transfer fluid (HTF) circulated in the radiator and PCM were examined considering hot climate conditions in experiments. Within the scope of the study, a mitigating approach to suppress the temperature increase caused by aggressive and continuous high discharge currents in hot climates was proposed. The obtained data revealed a reduction of 21.45% in the thermal load on the radiator when utilizing latent heat storage energy in the primary cycle. Additionally, a stable and homogeneous heat distribution along the radiator channels was observed, and uncertainty analysis was conducted.

Keywords: Integrated thermal management system, Liquid cooling system, Radiator, Forced heat transfer.

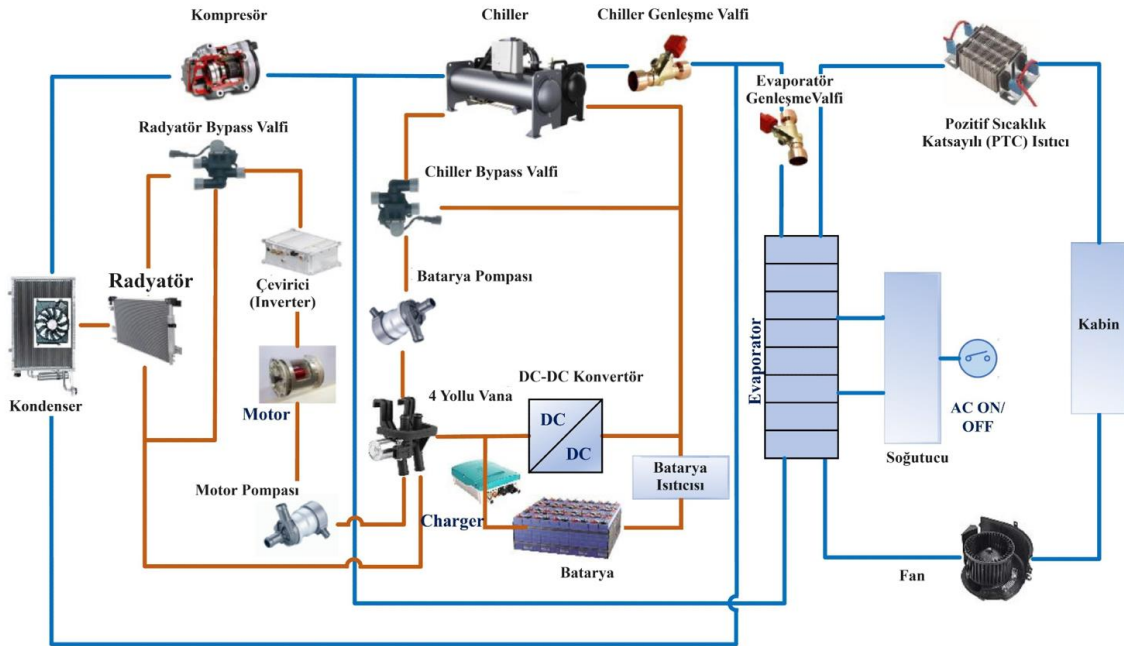
1. Giriş

Avrupa Komisyonu'nun "Enerji Yol Haritası 2050" projesi, AB'nin uzun vadeli sürdürülebilir enerji sistemlerini geliştirmeyi amaçlamaktadır. Bu yol haritası, 2050'ye kadar karbon salınımını azaltma, enerji verimliliğini artırma ve yenilenebilir enerji kaynaklarına geçişi teşvik etme hedeflerini içermektedir. Dolayısıyla enerji depolama ve termal yönetim teknolojilerinin geliştirilmesi büyük önem taşımaktadır. Bu yüzden EA, çeşitli termal yönetim uygulamaları ile donatılmıştır. Bunlar; batarya ile soğutucu arasında doğrudan temas veya soğutucu akışkanın batarya boyunca yerleştirilmiş tüpler veya borular aracılığıyla akarak dolaylı olarak uygulanmaktadır. Bu sistemler arasında; hava soğutma [1], sıvı soğutma [2], soğutucu [3], Faz Değişim Malzemesi (FDM) soğutma [4-5], termoelektrik soğutma [6] ve ısı borusu [7] bulunmaktadır. Genellikle TYS, sadece soğuk veya sıcak iklimler için uygundur. Dolayısıyla her bölgede tüm sıcaklıkların yaklaşık olarak aynı varsayılması TYS operasyonunda zorluklara neden olmaktadır. Aynı zamanda çeşitli iklim koşullarına sahip olan farklı ülkeler ve bölgeler, elektrikli araçlar için farklı termal yönetim gereksinimlerine ihtiyaç duymaktadır. Bu yüzden, son birkaç yıldır elektrikli otobüs, tren vb. daha büyük ölçekli mekanik sistemlerde çift döngüye sahip sıvı soğutmalı ETYS'ye eğilim artmaktadır. Bu uygulamalar; performans, ağırlık, boyut, güvenilirlik, koruma, enerji tüketimi ve çalışma koşullarına bağlı olarak değerlendirilmektedir.

Kharabati ve Saedodin (2024) literatür incelemelerinde farklı batarya TYS kümeleri için günümüze kadar olan araştırma eğilimleri ve araştırma boşluklarını belirlemek için görselleştirme programı kullanmışlardır. Bulgular, anahtar kelimeler (geçmiş yıllardaki terim sıklığı) içinde entegreli soğutma sisteminin en yeni odak noktası olduğunu önermektedir. Diğer soğutma sistemleri içinde ise aktif ve pasif soğutma sistemlerinin olduğunu belirtmişlerdir. Bununla beraber son birkaç yıldaki anahtar kelimenin "faz değişim malzemesi" üzerinde yüksek sıklığa rastlanmıştır. Malzeme, gizli ısı depolama kapasitesi sayesinde faz değiştirme esnasında ısıyı depolayarak veya serbest bırakarak sistemin istikrarlı ve dengeli bir şekilde yönetilmesini sağlamaktadır. FDM'lerin pasif soğutma sistemleri kategorisine ait olması dikkate alındığında, araştırmacıların özel olarak "entegreli termal soğutma sistemlerinin" tasarımı ve uygulamasına odaklandığı ve bunları olağanüstü performansları nedeniyle TYS'ler içinde FDM'nin kullanılması gerektiği sonucuna varmışlardır [8].

Genellikle elektrikli araçlarda aktif veya pasif soğutma sistemleri tercih edilmektedir [9]. ETYS, aktif ve pasif soğutma yöntemlerinin avantajlarını bir araya getiren yeni nesil bir uygulamadır. Bu sistem, yüksek ısı üreten cihazlarda kullanılarak cihaz bileşenlerinden kaynaklanan ısıyı etkin bir şekilde kontrol edip dağıtmak için tasarlanmıştır. ETYS, genellikle iki döngüden oluşmaktadır. Birincil döngüde cihazın bileşenlerinden gelen ısı, bir sıvı soğutma sistemi kullanılarak radyatöre transfer edilir ve sıvı soğutucu bir ünite tarafından soğutulmaktadır. İkincil döngüde ise, dolaşan sıvı, cihazın ısı üreten bileşenlerinden ısıyı absorbe ederek tekrar birincil döngüdeki sıvı soğutucu ünitesi tarafından soğutulmuş çevrim tamamlanmaktadır. İkincil döngü, cihazın bileşenlerinden kaynaklanan ısıyı daha etkin bir şekilde dağıtmak ve cihazın sıcaklığını kontrol etmek için birinci döngü ile etkileşim içindedir. ETYS'de bulunan radyatör, birincil döngü içinde sıvı soğutma sistemine entegre edilerek ısı transferini sağlamaktadır. Bileşenlerden gelen ısı, radyatör aracılığıyla sıvı soğutma sistemine aktarılarak soğutma ünitesi tarafından soğutulmaktadır. Bu sayede, radyatör birincil döngüde cihazın ısı üreten bileşenlerinden kaynaklanan ısıyı uzaklaştırmak için bir nevi soğutucu plaka olarak kullanılmaktadır [10-12]. Bu sayede otomobil kliması ve ısıtıcısı çevresel koşullara göre kontrol edilerek kabin içinin soğutulması veya ısıtılması sağlanmaktadır. Bataryanın soğutulması gerektiğinde, bir ısı değiştirici işlevi gören chiller aracılığıyla akışkan, batarya paketinin soğutucu kanallarına pompa edilmektedir [13]. Bataryanın ısıtılması gerektiğinde (serin hava koşullarında), gereken çalışma sıcaklığını korumak için elektrikli ısıtıcılar veya kondenser yardımıyla sıcak hava, batarya paketine pompalanmaktadır. Sıvı soğutmalı ETYS'nin ana avantajı, çok düşük bir akış hızıyla yüksek termal

iletkenlik özelliği ve yüksek ısı kapasitesi sayesinde geniş bir çalışma sıcaklık aralığı sağlayabilmektedir. Ayrıca, sıvı soğutma ETYS'nin hava soğutmalı sisteme kıyasla gürültü seviyesinin çok daha az olduğu bildirilmektedir [14-17].



Şekil 1. İki döngülü hibrit sıvı soğutuculu ETYS'nin çalışma şeması [18]

ETYS bünyesinde üç çeşit ısı değiştirici bulunmaktadır: kondenser, buharlaştırıcı ve soğutucu. Kondenser radyatörün önünde yer alırken, buharlaştırıcı kabin yakınına konumlandırılarak kabin havasının sıcaklığını ayarlamaktadır. Soğutucu ise ısı değiştirici modelini basitleştirmek için soğutucu devresi ile batarya soğutma devresi arasında yerleştirilmektedir. Singirikonda ve Obulesu (2022) çalışmalarında, Şekil 1'de görülen soğuk ve sıcak iklim koşullarına elverişli sıvı soğutuculu iki döngülü ETYS üzerine yeni bir tasarım önermişlerdir. Çift döngülü soğutma sistemi iki su sirkülasyonu döngüsünden oluşur; birincil soğutma suyu ve diğeri makine soğutma akışkanından oluşmaktadır. Sıvı soğutucu döngüsünde, chiller ve radyatör ısı değiştiriciler olarak görev yapmaktadır. Eğer radyatör, yüksek ortam sıcaklığında tek başına yeterli olmazsa chiller devreye girmektedir. Batarya soğutucu döngüsü ile güç aktarma organı soğutucu döngüsü, kendi soğutucu tankları ve pompaları ile paralel modda ayrı ayrı çalıştırılmaktadır. Bu döngüdeki radyatör, güç aktarma bileşenini soğuturken chiller, batarya döngüsündeki akışkanı soğutmak için kullanılmaktadır. Radyatör ve chiller sıcak hava koşullarında pil ve güç aktarma organları soğutucularını soğutur. Chiller, soğutucudan ısıyı emer ve radyatör, soğutucudan havaya ısı transferini sağlar. Radyatör, soğutucudan havaya ısı transferini sağlayan dikdörtgen tüp ve fin ısı değiştiricisidir. Bu 3 yollu bypass valfi, soğutucuyu radyatöre ya da geçişini sağlamak için kullanılır. Sıcak hava koşullarında, soğutucudan havaya ısı transferi için soğutucudan geçerek güç aktarma organlarından üretilen ısı kullanılır. Güç aktarma organı ve otomobil kabin soğutucusu hava koşullarına göre soğutucu pompa ve ısıtıcıları ile kontrol edilerek güç tüketimi azaltılmaktadır. Çalışmada yapılan deney sonuçları, güç aktarma organı ve kabin sıcaklığının, -10°C , 30°C ve 40°C dış ortam sıcaklıklarında yeterli soğutma sağladığını göstermiştir. Ayrıca, önerilen ETYS'nin batarya ve otomobil kabinindeki yolcu için güvenli ve verimli olduğunu belirtmişlerdir. Geleneksel sıvı soğutucu veya tam soğutucu TYS'lerde yalnızca tek bir hava koşulu için uygunken bu çalışmada önerilen ETYS'nin tüm hava koşulları için uygun olduğu vurgulanmıştır [18].

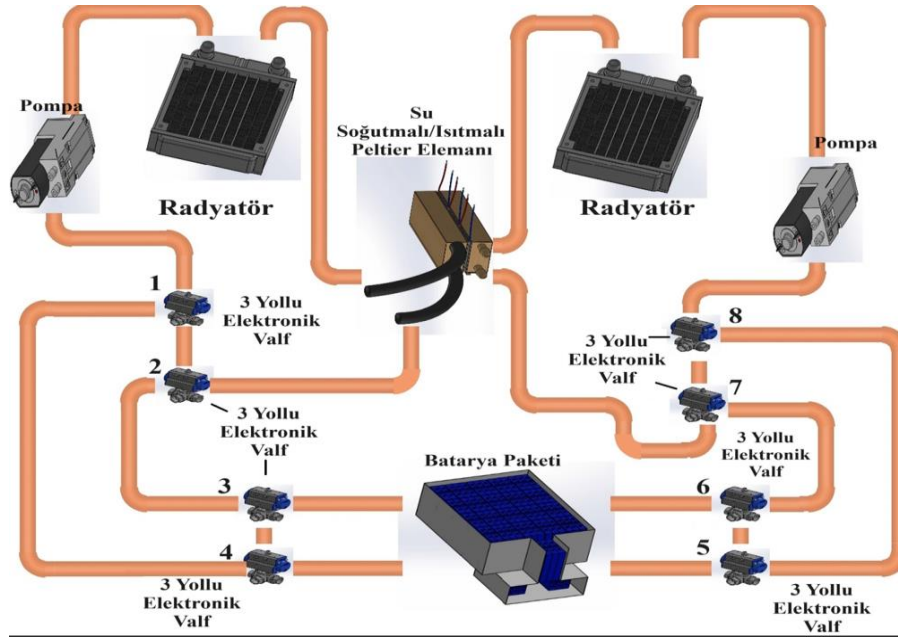
Yang ve ark. (2023), ETYS olarak üç aşamalı soğutma stratejisi ile elektrik sistemi için ısı geri kazanımlı yenilikçi bir entegre sistem oluşturulmuşlardır. Enerji israfını ve artan maliyetleri önlemek için, bu çalışma ile termal yönetim için uygun geniş bir sıcaklık aralığı önermişlerdir. Isı pompası sistemleri üzerine yapılan deneysel çalışmaları ve elektrik sistemlerinin termal analizleri sayesinde, bir

soğutucu enjeksiyonlu ısı pompası temelli etkili bir ETYS için geliştirilmiştir. Ayrıca, sistem performansını değerlendirmek için AMESim yazılımını kullanarak bir simülasyon yapılmıştır. Sonuçlar, ara-ısı değiştiriciye dayalı batarya soğutmanın istikrar ve verimliliğinin, çift evaporatör kurulumu ile elde edilenlerden daha iyi olduğunu göstermiştir. Çalışmada önerilen yöntemle 35 °C ortam sıcaklığında ısı geri kazanımı ile enerji tüketiminin % 11.98 - % 56.69 aralığında azaltılabilmektedir. Ayrıca geliştirilen simülasyon sistemi, Çin'deki geniş sıcaklık aralığı için yük gereksinimleri karşılanabilmektedir. Simülasyon sonuçları, geleneksel çözümlere kıyasla tipik soğutma koşullarında % 30 sistem enerji verimliliğini artırdığını göstermiştir [19].

Bae ve ark. (2024), çeşitli iklim koşulları altında stabil termal denge sağlayabilen bir ısı pompası temelli ETYS önermişlerdir. Ayrıca, çeşitli iklim koşullarında termal yönetim yapma yeteneğini değerlendirmek için detaylı bir güç aktarma sistemi modelini ETYS'de uygulamışlardır. Sistem çalıştığında, kompresörden boşaltılan sıcak ve yüksek basınçlı soğutkan, HVAC devresindeki radyatörde yoğunlaştırılmaktadır. HVAC tarafındaki radyatör aracılığıyla ısı emildikten sonra, soğutucu kompresöre geri dönmektedir. Soğutma için aracın önünden geçen havayı kullanmak, sıvı soğutmaya kıyasla ağırlığı ve gereksiz enerji tüketimini azaltmada etkilidir. Ayrıca, aracın önünden gelen havayı kullanarak, yüksek ve düşük sıcaklıklarda radyatörleri soğutmak için sırasıyla ram hava (otomobil hızlandıkça artan hava basıncı) ve radyatör fan modelleri oluşturulmuştur. Yüksek voltaj ve güç elektroniği modül termal yönetim döngüleri, bir chiller ve bir radyatör kullanılarak çalışma sıcaklıklarını aktif olarak kontrol etmek için tasarlanan devreler kullanılmıştır. Bu modelin, yüksek yük sürüş koşulları altında, özellikle HWFET senaryosu [Emission Test Cycles, 2023] altında değerlendirilerek 36 °C gibi yüksek sıcaklık ve 10 °C gibi düşük sıcaklık koşullarında da stabil termal yönetim yapabildiğini ortaya koymuşlardır [20].

Atık ısı geri kazanımı, ısıtma sırasındaki enerji tüketimini azaltarak pozitif sıcaklık katsayısını iyileştirmeye de yardımcı olmaktadır. Bununla beraber New European Driving Cycle (NEDC) standardında [21] belirtildiği üzere motor atık ısı geri kazanım sisteminin, kabin ısıtma talebini karşılayabileceği doğrulanmıştır. Bu bağlamda He ve ark (2023), elektrikli araçlarda iki adet dört yollu valften oluşan bir motor atık ısı geri kazanımlı ETYS önermişlerdir. Her bileşenin parametreleri temel alınarak ETYS modelinin deneyleri ve simülasyonu yapılmıştır. Çalışma kapsamında kabin ve batarya sıcaklıkları 0 °C, 20 °C ve 40 °C için incelenmiştir. Önerilen ETYS bataryayı soğuttuğunda, chiller'in bir tarafında düşük sıcaklıktaki soğutkan ve diğer tarafında ise yüksek sıcaklıktaki soğutkan bulunmaktadır. Sistem, farklı soğutma hızları, farklı batarya sıcaklıkları ortam sıcaklığı 20 °C'nin altına düştüğünde daha dengeli ve kararlı çalışmaktadır. Şöyle ki; 20 °C'nin altında, bataryadan çıkan yüksek sıcaklıktaki soğutkanın bir kısmı, radyatörden tarafından soğutulmaktadır. Bu soğutma, ikincil döngü içinde bir soğutma suyu pompası kullanılarak gerçekleştirilmektedir ve güç tüketimi neredeyse ihmal edilebilir seviyede olduğu için böylece sistemin genel verimliliği artmaktadır. Elde edilen verilere göre, ısı geri kazanımlı ve geri kazanımsız sistemlerin batarya ve kabin sıcaklıklarındaki ısınma ve soğuma hızları karşılaştırılmıştır. Isı geri kazanımlı sistem kullanımında, soğutma hızları incelendiğinde, batarya sıcaklığı 40 °C'den 30 °C'ye % 5.8, kabin sıcaklığı ise 40 °C'den 23 °C'ye % 9.7 daha hızlı soğuduğu belirtilmiştir [22].

Khalili ve ark. (2023), bataryaların en iyi performans gösterdiği sıcaklık aralığının 25–35 °C olmasından ötürü termoelektrik elemanlar ve çift radyatör kullanılarak yeni bir ETYS geliştirmişlerdir (Şekil 2). Gerçek sürüş koşullarını simüle etmek için bir model oluşturularak PID (oransal-integral-türevsel) denetleyici ve bulanık mantık algoritması kullanılarak sonuçlar incelenmiştir. Soğuk havalarda, batarya yüzey sıcaklığının istikrarlı hale gelmeden önce dalgalanma gösterdiği, sıcak havalarda ise sıcaklık profillerinin aracın hız profiline uygun olduğu görülmüştür. Sistemin çeşitli parametrelerinin incelenmesiyle, sıcaklığın uygun bir aralıkta tutulabileceği bildirilmiştir [23].



Şekil 2. İki radyatör ve bir ısı pompalı ETYS şeması [23]

Yüksek voltajlı bir batarya sıcaklığı, sıcak iklim koşulları söz konusu olduğunda çevresel hava aracılığıyla soğutulmasını zorlaştırmaktadır. Son birkaç yıldır yapılan deneysel ve sayısal çalışmalar, ETYS lerde yaygın olarak kullanılan radyatörlerin, sistem verimliliğine önemli ölçüde katkı sağladığını göstermektedir [18-24]. Bu çalışmada iki döngülü sıvı soğutmalı entegreli TYS'lerinde bulunan radyatör üzerindeki termal yükün azaltılmasına yönelik deneysel bir çalışma yapılmıştır. Çalışma kapsamında radyatör bünyesine FDM entegre edilerek radyatörün sıcak mevsim şartlarındaki termal yükün azaltılması amaçlanmış olup radyatörün ve FDM'nin termal davranış karakteristiği incelenerek elde edilen veriler tablolar ve grafikler halinde sunulmuştur.

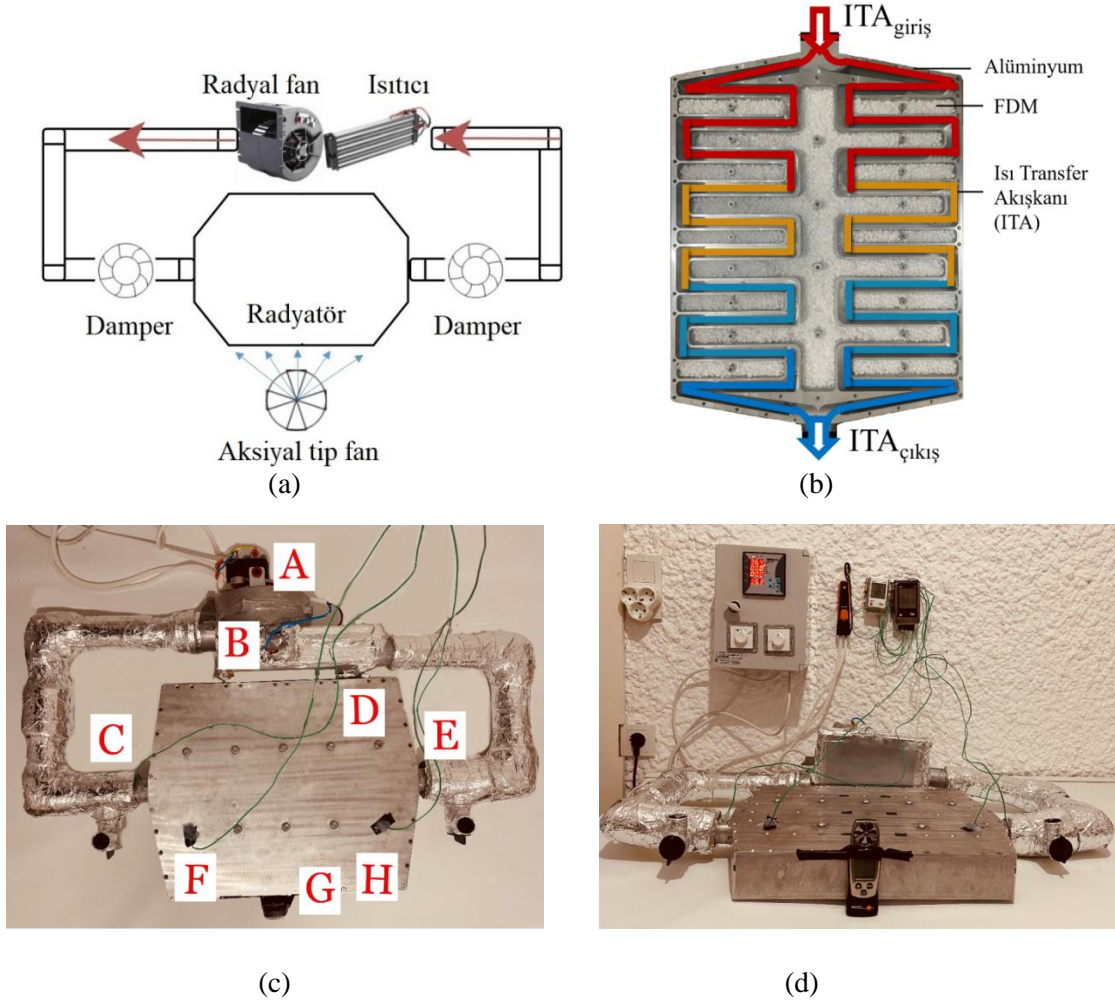
2. Materyal ve Yöntem

2.1 Deneysel Düzen

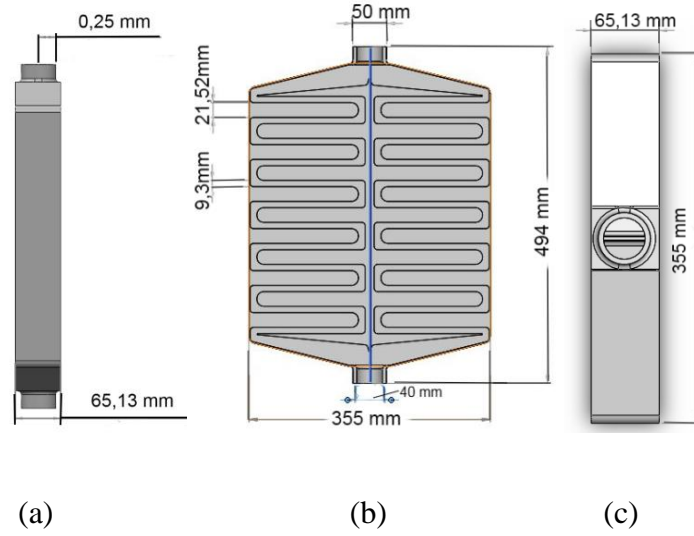
Bu çalışma kapsamında deneyler, üniversite bünyesinde bulunan iklimlendirme ve soğutma laboratuvarında yapılmıştır. Çalışmada ETYS, yüksek ısı üreten uygulamalarda kullanılarak cihaz bileşenlerinden kaynaklanan ısıyı etkin bir şekilde kontrol edip dağıtmak için iki mekanik döngüden oluşmaktadır. Birincil döngüde, bileşenlerden gelen ısı, sıvı soğutma sistemine entegre edilmiş sistem aracılığıyla uzaklaştırılmaktadır. İkincil döngüde ise dolaşan sıvı, cihazın ısı üreten bileşenlerinden ısıyı absorbe ederek tekrar birincil döngüdeki sıvı soğutucu ünitesi tarafından soğutulmaktadır. Deneysel çalışmanın konusu olan ikincil döngüde; FDM entegre edilmiş bir radyatör, fan, ısı transfer akışkanının istenilen sıcaklıklara çıkması için ısıtıcı, iki adet hava emiş/egzoz damperi kullanılmıştır. Soğutma ve ısıtma uygulamalarında gizli ısı depolama kapasitesinden yararlanan FDM, termal temasta olduğu akışkanın termal enerjisini depolamakta veya serbest bırakmaktadır. Dolayısıyla sistemin çalışma sıcaklığı sabit tutulmakta veya gerektiğinde sisteme geri ısı salınımı yapılarak stabil hal korunmaktadır. FDM seçiminde TYS'nin çalışma sıcaklık değerlerine göre FDM seçimi yapılmaktadır. Bu seçimde dikkat edilmesi gereken parametrelerden biri de FDM'nin katılma/erime sıcaklık aralığının sistem çalışma sıcaklık aralığı ile uyumlu olmalıdır [5]. TYS'de bataryaların optimum çalışma sıcaklık aralığının 25–35 °C olmasından ötürü [23] sistemde FDM görevi yapacak miristil alkolün çalışma sıcaklık aralığı 34 °C-44 °C olacak şekilde sentezlenmiştir. Bunun sebebi

FDM 34 °C'deki katı faz halinde kararlı halde kalmak isteyeceği için peltamsi bölgeye girmeden gizli ısı depolamaya başlamaktadır.

Deneylerde radyatör üzerine rüzgarın soğutmaya etkisi için harici bir aksiyal fan dan yararlanılmıştır (Şekil 3a). Kullanılan aksiyal fanın; voltaj, frekans, devir, hava debisi, güç özellikleri sırasıyla 220V, 50Hz, 1350 d/dk, 17400 m³/h, 210 W'dur. Radyatör içinde sirküle edilen ısı transfer akışkanı olarak da hava kullanılmıştır. Şekil 3(b)'de görüleceği üzere radyatör tasarımında ITA ile dolaylı temasta olan FDM eklenmiş simetrik yerleştirilmiş kapalı hücreler bulunmaktadır. Şekil 3(c)'de deney düzeneğinin üstten görüşü sunulmuş olup sırasıyla A, radyal fan; B, ısıtıcı; C, ITA giriş sıcaklık sensör konumu ; D, radyatör; E, ITA çıkış sıcaklık sensör konumu; F, FDM ilk hücre sıcaklık sensör konumu; G, ortam hava hızı ölçüm cihazı (anemometre); H, FDM son hücre sıcaklık sensör konumu şekil üzerinde gösterilmiştir. Şekil 3(d)'de ise deney düzeneğinin önden görünüşü sunulmuştur. Tasarım aşamasında gerek ve yeter şartların sağlanabilmesi için öncelikle ITA'nın kanallar içindeki seyirinde akışın kesintiye uğramaması amaçlanmıştır. Bununla beraber radyatör tasarımında FDM'nin konulduğu havuz yapılar tasarlanırken; FDM gizli ısı depolama kapasitesinden maksimum fayda sağlanabilmesi yüzey alanının genişletilmesi hedeflenmiştir. Şekil 4'te tasarımın ön, yan ve üst kesit görünüşleri verilmiştir. Radyatörün ölçüleri endüstride kullanıldığı hali baz alınmış ve en, boy, genişlik sırasıyla 355mm, 494.50mm, 65.13mm olacak şekilde imal edilmiştir. Radyatör giriş-çıkış boğaz kanallarının çapı 500 mm olup FDM, sirküle edilen ITA ve Alüminyum gövdenin hacimleri sırasıyla 0.0037375 m³, 0.0041158 m³ ve 0.001831 m³tür.



Şekil 3. (a) Deney setinin şeması (b) radyatör içine FDM entegre edilmiş hali. (c) deney seti üst görünüş: A radial fan, B ısıtıcı, C ITA giriş sıcaklık sensörü, D radyatör, E ITA çıkış sıcaklık sensörü, F FDM ilk hücre sıcaklık sensörü, G anemometre, H FDM son hücre sıcaklık sensörü (d) ön görünüş.

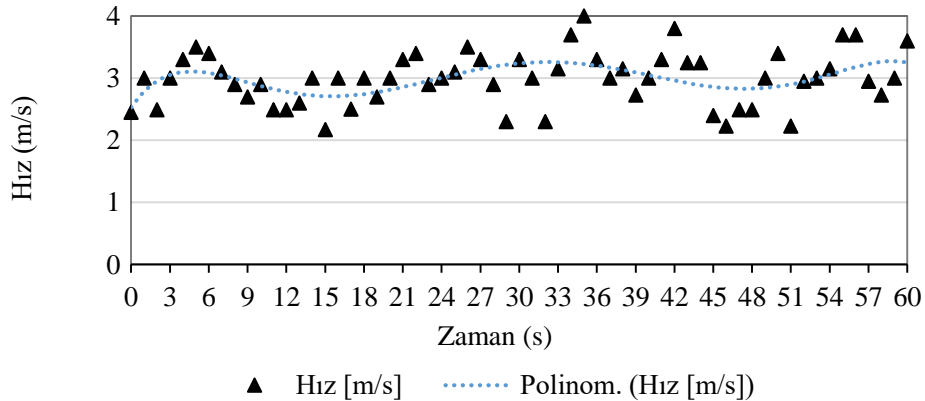


Şekil 4. Radyatör dış ve iç kesit ölçüleri (a) ön (b) üst (c) yan

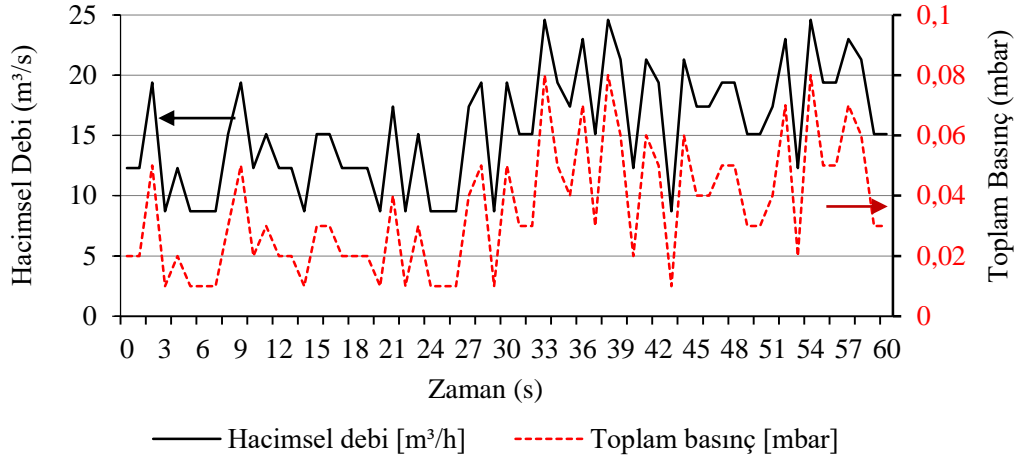
Tablo 1. FDM'nin termofiziksel özellikleri [25]

Özellikler	Simge	Birim	Değer
Katılma/erime sıcaklıkları	T_{FDM}	°C	34/44
Kaynama sıcaklığı	T_b	°C	260
Katılma/erime gizli ısısı	$L_{s/m}$	kJ/kg	218.40
Spesifik ısı kapasitesi	C_p	kJ/kg K	2.407
Yoğunluk (25 °C)	ρ	kg/m ³	824
Isı iletim katsayısı	k	W/mK	0.2
Dinamik viskozite (25 °C)	μ	kg/ms	10

Çalışmada katılma/erime sıcaklık aralığının geniş olduğu miristil alkol bazlı bir FDM seçilmiştir. FDM'nin termofiziksel özellikleri Tablo 1'de detaylandırılmıştır. FDM ve ITA birbiri ile direkt temas etmediği için düzenek boyunca kondüksiyon ve konveksiyonla ısı transferi gerçekleşmektedir. ITA giriş/çıkış sıcaklıkları, FDM ilk/son hücre sıcaklıkları, ITA hızı/hacimsel debisi, ITA statik/toplam basınç değerleri ve ortam sıcaklıkları veri kaydedici ile kayıt altına alınmıştır. Sistemde sirküle edilen ITA akış hızının zamana bağlı değişim değerleri Şekil 5'te sunulmuştur. Sisteme harici yolla sağlanan rüzgar hızı ortalama 3m/s olup Şekil 8'de rüzgar hızının zamana bağlı değişimi verilmiştir. ITA'nın hacimsel debisi ve sistemdeki toplam basıncın zamana bağlı dağılımları Şekil 6'da görülmektedir.



Şekil 5. ITA'nın zamana bağlı hız dağılımı.



Şekil 6. Zamana bağlı hacimsel debi ve toplam basınç değerleri

Dış ortam sıcaklığı, Akdeniz coğrafyasında yaz iklim şartlarının hâkim olduğu varsayılarak seçilmiş ve ortalama 32 °C (±2)'dir. Deneysel ITA, zorlanmış taşınım kullanılarak radyal fana entegre edilen 2400 W'lık bir rezistans yardımıyla ısıtılmış ve ortalama 43 °C'de sirkülasyonu sağlanmıştır. Deneysel düzenek cidarlarındaki termal yüklerin kalkması için deneyler arası 6 saat beklenmiştir. Senaryolarda kullanılan sınır şartları Tablo 2'de detaylandırılmıştır. Radyatör simetri esasına göre tasarlandığı için sağ ekseninin ilk ve son FDM havuzundan sıcaklık değerleri 5 sn aralıklarla kayıt altına alınmıştır.

Tablo 2. Sınır şartları

Sınır şartları	Değerler
ITA ortalama sıcaklığı	43 °C
Dış ortam sıcaklığı	32 °C
Hava hızı	3 m/s
ITA akış hızı	1,7 m/s
ITA hacimsel debi	12,8 m³/h
Toplam basınç	0,03 mbar

2.2 Belirsizlik Analizi

Deneysel çalışmalarda belirsizlik analizleri, deneyin güvenilirliği üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Deneysel çalışmalarda dikkate alınması gereken konulardan biri, sabit hatalar ile rastgele hatalar arasındaki ayrımı yapmaktır. Deneysel belirsizlik tipleri genellikle iki kategoriye ayrılır. Bunlar, deneyin yapıldığı yapı ve ölçüm araçlarının yapısından kaynaklanan hatalar ile deneyi gerçekleştiren kişiden kaynaklanan hatalardır. İlk tür hatalar, deneysel çalışma sonuçlarının belirsizliğini etkileyen ve Denklem 1-4 ile hesaplanan hatalardır [26].

$$W_{T_{fg}} = \sqrt{[(a_1)^2 + (b_1)^2 + (c_1)^2 + (e_1)^2]} \quad (1)$$

$$W_{T_c} = \sqrt{[(a_1)^2 + (b_1)^2 + (c_1)^2 + (l_1)^2]} \quad (2)$$

$$W_{T_s} = \sqrt{[(a_2)^2 + (c_2)^2]} \quad (3)$$

$$W_{c_v} = \sqrt{[(v_1)^2 + (x_1)^2]} \quad (4)$$

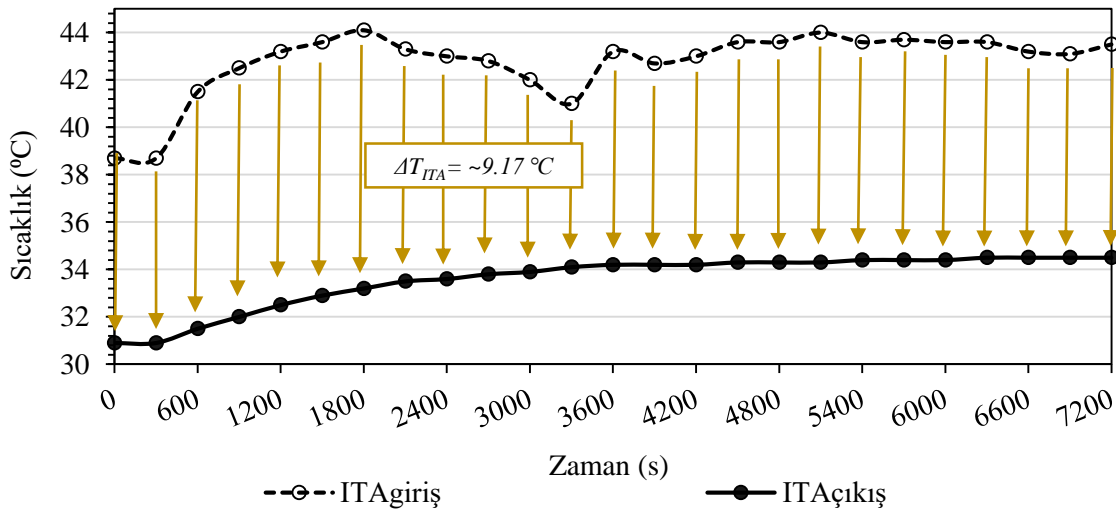
Sabit hatalar, deney sırasında okunan her değer için aynıdır. Bu sorun, uygun kalibrasyon ve düzeltme ile giderilebilir. W , belirsizlik miktarını ve W_p ile W_{cp} , fiziksel özelliklerin tablo değerlerinin okunmasında ortaya çıkabilecek hataları temsil etmektedir. Bunlar; iç sıcaklık için T_{fg} , ortam sıcaklığı için T_c , sıcaklık ölçümünde zaman için T_s , termokupl çiftleri nedeniyle hata için a_1 , dijital termometrenin neden olduğu hata için b_1 , bağlantı elemanları ve noktalar arasındaki hata için c_1 , fan girişindeki sıcaklığın ölçülmesinde yapılabilecek ortalama hata için e_1 , ortam veya deneysel ortam sıcaklığının ölçülmesinde yapılabilecek ortalama hata için l_1 , zaman değerlerinin okunması sırasında yapılabilecek hata için a_2 ve sıcaklık değerlerinin periyodik olarak alınması sırasında yapılabilecek ortalama hata için c_2 olarak tanımlanmaktadır. Bu çalışmada hesaplanan sıcaklık ölçümündeki toplam belirsizlik değeri, 0.1 ila ± 0.756 °C arasında değişmektedir. Tablo 5'te görüldüğü gibi, hesaplanan hata analizi değerleri bu çalışma için kabul edilebilir sınırlar içindedir.

Tablo 3. Belirsizlik analiz değerleri [26]

Parametreler	Birim	Toplam Hata
Sıcaklık ölçümünde toplam hata		
$W_{T_{fg}}$	°C	± 0.503
W_{T_c}	°C	± 0.756
Zaman ölçümünde toplam hata		
W_{t_s}	saniye	± 0.1
Diğer hatalar	%	$\pm 0.1-0.2$

3. Bulgular ve Tartışma

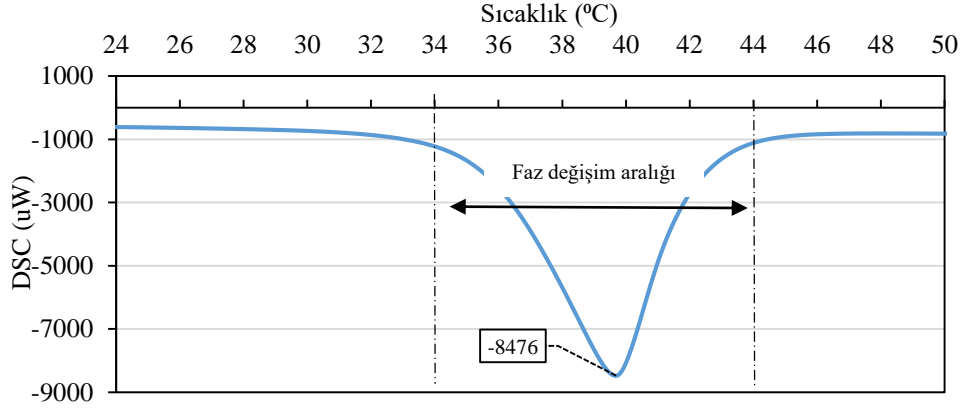
Bu deneysel çalışma ETYS'nin birincil döngüsünde kullanılan sıvı soğutmalı sistemde yer alan hava soğutmalı radyatöre FDM entegre edilmiştir. Böylelikle radyatör üstündeki termal yükün azaltılması hedeflenmiştir. Deney sonuçlarına göre ITA giriş/çıkış sıcaklık farkları (ΔT_{ITA}) zamana bağlı olarak Şekil 7'de incelenmiştir. Alınan verilerde ITA_{çıkış} sıcaklığının azaldığı ve ΔT_{ITA} 'nın 9.17 °C olduğu hesaplanmıştır. Böylelikle bu çalışmada, entegreli TYS için kullanılan radyatördeki soğutma yükünün % 21.45 oranda azaltılması sağlanmıştır (Tablo 4). Bu çalışma, entegre termal yönetim sistemlerinde (ETYS) kullanılan radyatörlere entegre edilen gizli ısı depolama yönteminin mevcut soğutmaya olumlu etki sağlayacağını göstermektedir.



Şekil 7. ITA giriş/çıkış sıcaklıklarının zamana bağlı dağılımı

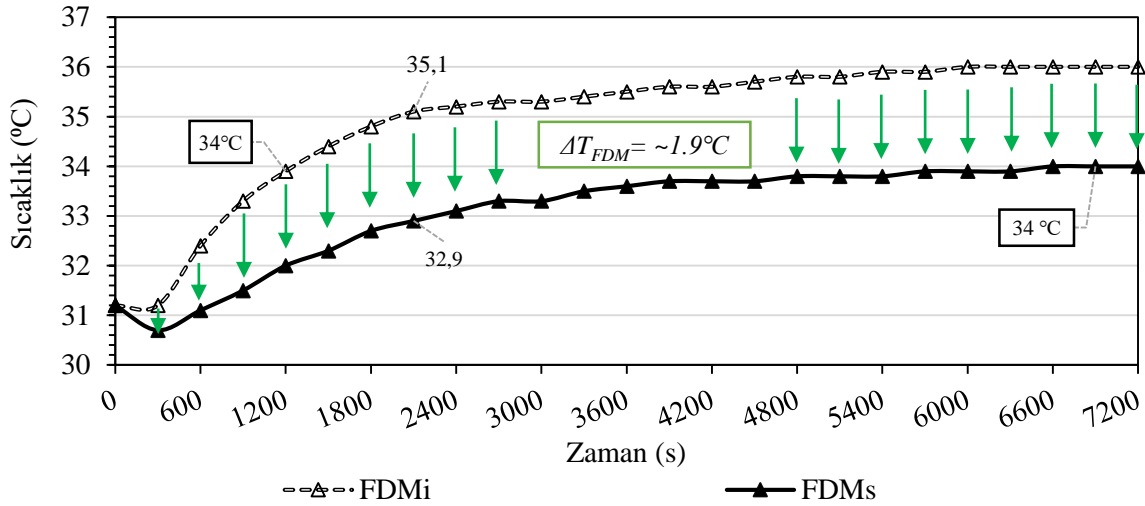
Tablo 4. ITA giriş/çıkış sıcaklık değişimlerinin yüzdesel oranları

ITA	Giriş	Çıkış
Ort. sıcaklıklar	42.8°C	33.6
Ort. sıcaklık farkı	9.17 °C	
Yüzdelerik değişim	% -21.45	



Şekil 8. Deneyde kullanılan FDM'nin DSC Analizi.

Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC), bir malzemenin ısı kapasitesinin (C_p) sıcaklıkla nasıl değiştiğini inceleyen bir termal analiz tekniği olup çalışmada kullanılan FDM'nin DSC analizi Şekil 8'de verilmiştir. Şekil 8'de görüldüğü üzere FDM 34 °C-40 °C arasında termal kapasitesini en fazla kullandığı aralık olup, 40 °C'den sonra bu ivme düşmektedir [5]. Deney setinde FDM'nin termal davranışı incelendiğinde ilk başta dış ortam sıcaklığı ile termal dengede olduğu Şekil 9'da görülmektedir. Sistemde cebri termal taşınımın artmaya başlaması ile FDM'nin ilk (FDM_i) ve son (FDM_s) hücrelerdeki zamana bağlı termal karakteristiği incelenmiştir. Deneylerde kullanılan FDM'nin gizli ısı depoladığı diğer bir deyişle katıdan sıvıya geçtiği faz değişim bölgesindeki sıcaklık aralığı 34-44 °C'dir. Bu ara faz olan bölge, peltenski bölge olarak isimlendirilmektedir. Şekil 9'da görüldüğü üzere ITF'nin sistemdeki sirkülasyonu başladığı anda ilk hücredeki sıcaklığın 31 °C'den 34 °C'ye 1200s içinde çıktığı gözlemlenmiştir. 1200 s sonra FDM, gizli ısı depolamaya devam etmekte böylelikle peltenski bölge sıcaklık aralığında kalmayı deney süresince korumuştur. FDM'nin gizli ısı kapasitesi toplam 2407 kJ/kgK olup katılaşma/erime gizli ısı 218.40 kJ/kg'dır. Bu durum birincil döngüden atılan ısının absorbe edilmesi aşamasında FDM'nin katılaşma/erime gizli ısı kapasitesinin sistem için stabil ve dengeli yönde pozitif katkı sağladığını göstermiştir. Radyatör içindeki son havuzdan alınan FDM sıcaklığının da deney süresince 33 °C'nin üzerine çıkmamıştır. Ortalama artış hızları ve sıcaklıkları incelendiğinde FDM için sıcaklık farkının (ΔT_{FDM}) ~ 1.9 °C olduğu hesaplanmıştır.



Şekil 9. FDM'nin ilk ve son hücredeki sıcaklıklarının zamana bağlı dağılımı

Çalışmadaki veriler Tablo 5'te görüldüğü üzere ilk hücredeki FDM sıcaklığı deney süresince ortalama 34,9 °C'de seyretmiştir. Son hücredeki FDM'nin ise bu sürede ortalama 33,1 °C'de kaldığı hesaplanmıştır. Bu sıcaklık farkının sebebi ise haznelere arası mesafenin 255,6 mm olmasından dolayıdır. Bu sıcaklık farkının sebebi ise haznelere arası mesafenin 255,6 mm olmasından dolayıdır. Tüm sonuçlar ele alındığında hücreler arası mesafe maksimum olduğu halde oluşan sıcaklık farkının çok az olması sistemde homojen termal dağılımın korunduğunu göstermiştir. FDM_i ile FDM_s arasındaki sıcaklık farkının ilk 30 dakika içinde azalan oranda arttığı sonrasında % 5,31'lik fark korunarak durağan hale geçtiği Tablo 5'te sunulmuştur. Bu durum FDM'nin konveksiyon ve konveksiyonla olan ısı transferinde sistem sıcaklığının yükselmesine izin vermemiştir. Özetle radyatöre FDM entegre edilmesiyle, sıcak iklim şartlarında radyatör üstündeki termal yük azaltılmıştır.

Tablo 5. FDM giriş/çıkış sıcaklık farkları

FDM	İlk Hücre	Son Hücre
Ort. sıcaklık	34,9 °C	33,1 °C
Ort. sıcaklık farkı		1,9 °C
Yüzdelerik değişim		% -5,31

Elde edilen sonuçlar, mevcut literatüre uyum sağlamış ve bilgi alanını genişleterek yeni bulguların ve analizlerin sunumuna katkıda bulunmuştur. Örneğin He vd. (2023) [23] çalışmalarında, kabin ve batarya sıcaklığının 40 °C'nin üzerinde olduğu durumlarda, bataryadan çıkan yüksek sıcaklıktaki bir kısım soğutkanın, ikincil döngüde bulunan soğutma suyu ve radyatör aracılığıyla batarya sıcaklığının % 5,8 oranında (40 °C'den 30 °C'ye) daha hızlı soğutulduğu rapor edilmiştir. Bu çalışmadan elde edilen veriler ışığında, optimum aralıklardaki üst sıcaklık sınırı olan 30 °C'den daha düşük sıcaklıkların hedeflenmesine katkı sağlamaktadır. Ayrıca, FDM'nin hızlı sıcaklık emilimi ve ITA'nın 30 °C'nin üstüne çıkmaması, ikincil döngüdeki soğutma suyu pompasının daha az devreye girebileceğini göstermektedir. Ayrıca bu çalışmada FDM'nin termal kararlılığa olan pozitif etkisi sayesinde [8], sıcak mevsimlerde de termal kararlılığın sağlanabileceği ortaya konmuştur.

4. Sonuç

Bu çalışmada, entegre TYS'nin önemi ve performansları üzerine deneysel bir çalışma yapılmıştır. Literatürde sıklıkla kullanılan ikincil döngüdeki sıvı soğutmalı sistemde yer alan radyatöre FDM entegrasyonunun termal yönetim üzerindeki etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Deneysel FDM'nin gizli ısı depolama enerjisinden yararlanılarak sıcak iklim şartlarında radyatör üzerindeki termal yükün azaltılması hedeflenmiştir. Bulgularda, ITA giriş/çıkış sıcaklık farkları ve radyatöre

entegre edilen FDM'nin bulunduğu hücreler arasında zamana bağlı değişimi ile sistemdeki termal yönetimin etkinliği değerlendirilmiştir.

Çalışmada elde edilen veriler değerlendirildiğinde;

- Entegreli TYS bünyesinde kullanılan radyatör çıkış sıcaklığı % 21.45 oranda azaltılmıştır.
- FDM sıcaklık değerleri ve sıcaklık artış hızları incelendiğinde, peltemsi bölgede gizli ısı depolama enerjisi kullanılmış ve radyatörün son hücresindeki sıcaklık 33 °C'nin üzerine çıkamamıştır.
- Tüm sonuçlar ele alındığında hücreler arası mesafe maksimum olduğu halde oluşan sıcaklık farkının (ΔT_{FDM}) ~1.9 °C olması sistemde homojen termal dağılımın korunduğunu göstermiştir. FDM_i ile FDM_s arasındaki sıcaklık farkının ilk 30 dakika içinde azalan oranda artışı sonrasında % 5.31'lik fark korunarak stabil seyretmiştir.
- Radyatör kanalları boyunca sıcaklık dalgalanmaları görülmemiştir.
- Aşırı ısınma kaynaklı hasar riski azalmış ve T_{amb} 32 °C'de iken $ITA_{çıkış}$ sıcaklığı 35 °C'nin altında kalmıştır.
- Hesaplanan belirsizlik analizi değerleri, çalışmanın kabul edilebilir sınırlar içinde olduğunu göstermektedir. Bu da elde edilen sonuçların güvenilirliğini artırmaktadır.

Gelecek çalışmalarda, ikincil döngüdeki radyatörün ısı eşanjörü ile entegrasyonu ve farklı termal özelliklere sahip FDM'lerin kullanılmasıyla termal ve akış dinamiklerinin araştırılması planlanmaktadır. Bununla beraber farklı iklim koşullarında ve farklı FDM türleriyle yapılan daha kapsamlı çalışmalar, entegre termal yönetim sistemlerinin daha da geliştirilmesine olanak sağlamaktadır.

Kaynaklar

- [1] A. Lajunen, Y. Yang, A. Emadi, (2018). Recent developments in thermal management of electrified powertrains, IEEE Trans. Veh. Technol. 67, 11486–11499. <https://doi.org/10.1109/TVT.2018.2876315>.
- [2] X. Tang, Q. Guo, M. Li, C. Wei, Z. Pan, Y. Wang, (2021). Performance analysis on liquid cooled battery thermal management for electric vehicles based on machine learning, J. Power Sources 494, 229-727. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2021.229727>
- [3] J. Guo, F. Jiang, (2021). A novel electric vehicle thermal management system based on cooling and heating of batteries by refrigerant, Energy Convers. Manag. 237, 114145. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114145>
- [4] Y. Huo, X. Pang, Z. Rao, (2020). Investigation on the effects of temperature equilibrium strategy in battery thermal management using phase change material, Int. J. Energy Res. 44, 7660–7673. <https://doi.org/10.1002/er.5497>.
- [5] G.A. Kilic, E. Yalcin, A.A. Aydin, (2020). Optimum Operating Temperature Range of Phase Change Materials Used in Cold Storage Applications: A Case Study. In: Dincer, I., Colpan, C., Ezan, M. (eds) Environmentally-Benign Energy Solutions. Green Energy and Technology. Springer, Cham, Switzerland AG. https://doi.org/10.1007/978-3-030-20637-6_35
- [6] Y. Lyu, A.R.M. Siddique, S.H. Majid, M. Biglarbegian, S.A. Gadsden, S. Mahmud, (2019). Electric vehicle battery thermal management system with thermoelectric cooling, Energy Rep. 5, 822–827. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2019.06.016>.
- [7] M. Bernagozzi, A. Georgoulas, N. Mich'e, C. Rouaud, M. Marengo, (2021). Novel battery thermal management system for electric vehicles with a loop heat pipe and graphite sheet inserts, Appl. Therm. Eng. 194, 117061. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.1170>
- [8] S. Kharabati, S. Saedodin, (2024). A systematic review of thermal management techniques for electric vehicle batteries. Journal of Energy Storage, 75, 109586. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.109586>

- [9] H. Zou, B. Jiang, Q. Wang, C. Tian, Y. Yan, (2014). Performance analysis of a heat pump air conditioning system coupling with battery cooling for electric vehicles, *Energy Procedia* 61, 891–894. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.11.989>
- [10] H. Behi, D. Karimi, M. Behi, M. Ghanbarpour, J. Jaguemont, M.A. Sokkeh, F. H. Gandoman, M. Berecibar, J. Van Mierlo, (2020). A new concept of thermal management system in Li-ion battery using air cooling and heat pipe for electric vehicles, *Appl. Therm. Eng.* 174, 115280. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115280>
- [11] X. Kuang, K. Li, Y. Xie, C. Wu, P. Wang, X. Wang, C. Fu, (2020). Research on control strategy for a battery thermal management system for electric vehicles based on secondary loop cooling, *IEEE Access*. 8, 73475–73493. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2986814>
- [12] D. Leighton, (2015). Combined Fluid Loop Thermal Management for Electric Drive Vehicle Range Improvement. *SAE Int J Passenger Cars Mech Syst*; 2:711–20. <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2015.07.001>
- [13] J. Wang, S. Lu, Y. Wang, Y. Ni, S. Zhang, (2020). Novel investigation strategy for minichannel liquid-cooled battery thermal management system, *Int. J. Energy Res.* 44, 1971–1985. <https://doi.org/10.1002/er.5049>.
- [14] Y. Chung, M.S. Kim, (2019). Thermal analysis and pack level design of battery thermal management system with liquid cooling for electric vehicles, *Energy Convers. Manag.* 196, 105–116. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.05.083>.
- [15] A.A. Pesaran, M. Keyser, (2022). Thermal characteristics of selected EV and HEV batteries. 16th Annual Battery Conference on Applications and Advances, 12 Jan 2022, Long Beach, CA, USA. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/905129>. Erişim tarihi: 22 Kasım 2022. <https://doi.org/10.1109/BCAA.2001.905129>
- [16] A.R.M. Siddique, S. Mahmud, B.V. Heyst, (2022). A comprehensive review on a passive (phase change materials) and an active (thermoelectric cooler) battery thermal management system and their limitations. *Journal of Power Sources*, 401, 224-237. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.08.094>
- [17] C. Liu, F. Li, L.P. Ma, H.M. Cheng, (2010). Advanced materials for energy storage. *Advanced Materials*, 22(8), 28-62. <https://doi.org/10.1002/adma.200903328>
- [18] S. Singirikonda, Y. P. Obulesu, (2022). Adaptive secondary loop liquid cooling with refrigerant cabin active thermal management system for electric vehicle. *Journal of Energy Storage*, 50, 104624. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104624>
- [19] H. Yang, J. Wu, X. Xue, Z. Guo, H. Zhang, F. Chen, Y. Chen, (2023). A refrigerant-injection heat pump-based efficient integrated thermal management system for electric vehicles approaching the wide temperature range in China. *Energy Conversion and Management*, 288, 117102. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117102>
- [20] E Bae, J. Hyun, D.J. Han, (2024). Adaptive Integrated Thermal Management System for a Stable Driving Environment in Battery Electric Vehicles. *Batteries*, 10(2), 59. <https://doi.org/10.3390/batteries10020059>
- [21] Emission Test Cycles, (2023). Available online: <https://dieselnet.com/standards/cycles/hwfet.php>. Erişim tarihi: 1 Kasım 2023.
- [22] L. He, Z. Gu, Y. Zhang, H. Jing, P. Li, (2023). Control strategy analysis of vehicle thermal management system based on motor heat utilization. *Energy Technology*, 11(10), 2300495. <https://doi.org/10.1002/ente.202300495>
- [23] H. Khalili, P. Ahmadi, M. Ashjaee, E. Houshfar, (2023). Thermal analysis of a novel cycle for battery pre-warm-up and cool down for real driving cycles during different seasons. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 148(16), 8175-8193. <https://doi.org/10.1007/s10973-022-11601-3>
- [24] G.A. Kilic, (2023). An experimental analysis on the effects of passive liquid cooling system on thermal management system. *International Journal of Thermofluids*, 18, 100370. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2023.100370>.
- [25] https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/er.8279?saml_referrer. Erişim tarihi: 29.Ekim.2023.
- [26] J.P. Holman, (1971). *Experimental methods for engineers and scientists*, 37-52, McGraw-Hill Company, USA.