

Frigorifik kamyonların sıcaklık dalgalanmalarının ötektik faz değiştiren malzemelerle incelenmesi

Berçem KIRAN^{1*}, Zeynep Lara PAZAR¹, Özlem TURHAN¹, Gökçe Güner KARAALİ¹

¹Marmara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, 34854 Maltepe/İstanbul.

Geliş Tarihi (Received Date): 04.05.2025

Kabul Tarihi (Accepted Date): 19.02.2026

Öz

Tedarik zincir yönetiminin özel bir türü olan soğuk zincir yönetimi, hassas ve sıcaklığa duyarlı ürünlerin kalitesinin bozulmadan uygun koşullarda depolama, taşıma ve dağıtım gibi çeşitli basamakları içermektedir. Karayolu soğutmalı taşımacılıkta ürünlerin tüketicilere kalite kaybı yaşamadan ulaşması soğuk zincirin temel ekipmanlarından biri olan frigorifik kamyonların kullanımı ile sağlanabilmektedir. Mekanik frigorifik kamyonlar soğutma üniteleri kullanarak istenilen sıcaklık değerlerinde ürünlerin muhafaza edilmesini sağlamaktadır. Bu kamyonlarda kullanılan soğutma sistemlerinin enerji tüketimi uygun FDM'lerin entegre edilmesi ile azaltılabilir. Bu çalışmada taze gıda taşımacılığında kullanılabilen bir mekanik frigorifik kamyonun soğutma ünitesini ve konteynerini temsil eden bir soğutma sistemi FDM'siz ve FDM'lerle 4 °C ile 12 °C sıcaklık aralığında test edilmiştir. Sisteme inorganik tuzlar olan sodyum sülfat (Na_2SO_4), sodyum klorür (NaCl) ve potasyum klorür (KCl) içeren ötektik FDM'ler, farklı konsantrasyonlarda hazırlanarak entegre edilmiştir. FDM entegrasyonu ile enerji tüketiminin azaltıldığı ve ağırlıkça (ağ.) %6,0 Na_2SO_4 -ağ.%2,5 NaCl -ağ.%3,0 KCl çözeltisinin FDM olarak entegre edildiğinde %34,38 enerji tasarrufu sağlandığı tespit edilmiştir. Sistem FDM'siz ve en uygun FDM ile taze dilimlenmiş ve dilimlenmemiş çileklerle test edilmiş, çileklerde kalite kaybının uygun FDM ile azaltılabileceği tespit edilmiştir. Sonuç olarak, sıcaklık dalgalanmalarının uygun FDM ile azaltılabileceği, dolayısıyla taze gıda ürünlerinin taşınması esnasında bozunmasının önüne düşük enerji tüketimiyle geçilebileceği ortaya konulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Enerji tasarrufu, frigorifik kamyonlar, ötektik faz değiştiren malzemeler, soğuk zincir.

*Berçem KIRAN, bercem.kiran@marmara.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0002-7504-0176>

Zeynep Lara PAZAR, zeyneep.lara@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0001-2645-1462>

Özlem TURHAN, ozlem.turhan002@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0009-6151-8085>

Gökçe Güner KARAALİ, gokcekaraali@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0001-1060-0216>

Analysis of temperature fluctuations in refrigerated trucks with eutectic phase change materials

Abstract

Cold chain management, a specialized type of supply chain management, includes various steps such as storage, transportation, and distribution under appropriate conditions to preserve the quality of perishable and temperature-sensitive products. In road refrigerated transportation, the delivery of products to consumers without loss of quality can be ensured by the use of refrigerated trucks, one of the main components of the cold chain. Mechanical refrigerated trucks utilize cooling units to maintain products at the desired temperature. The energy consumption of the cooling systems used in these trucks can be reduced by integrating suitable PCMs. In this study, a cooling system representing the cooling unit and container of a mechanical refrigerated truck used for fresh food transportation was tested in the temperature range of 4 °C to 12 °C both with and without PCMs. Eutectic PCMs prepared with different concentrations of inorganic salts: sodium sulfate (Na_2SO_4), sodium chloride (NaCl), and potassium chloride (KCl) were integrated into the system. It was determined that the integration of PCMs reduced energy consumption and an energy saving of 34.38% was achieved through the integration of a solution containing 6.0 wt.% Na_2SO_4 , 2.5 wt.% NaCl , and 3.0 wt.% KCl as an FDM. The system was tested with both sliced and unsliced fresh strawberries, with and without the most suitable PCM. It was found that quality loss in strawberries could be reduced with appropriate PCM. As a result, it was revealed that temperature fluctuations can be reduced with suitable PCM, thereby preventing the deterioration of fresh food products with low energy consumption.

Keywords: Energy savings, refrigerated trucks, eutectic phase change materials, cold chain.

1. Giriş

Birleşmiş Milletler Gıda ve Tarım Örgütü (FAO), üretilen gıda ürünlerinin yaklaşık üçte birinin dünya genelinde kaybedildiğini veya israf edildiğini açıklamıştır [1]. Soğuk zincir, sıcaklığa duyarlı ve hassas ürünlerin güvenliği ve korunması açısından kritik bir süreçtir. Bu süreç gıda üretiminden, işlenmesi, depolanması, taşınması, dağıtımı gibi çeşitli aşamaları kapsamaktadır [2]. Yetersiz soğuk zincir sistemleri nedeniyle, Çin'de her yıl tahmini toplam değeri en az 10 milyar ABD dolarına mal olan 12 milyon tondan fazla meyvenin ve 130 milyon ton sebzenin kaybedildiği belirtilmiştir [3]. Sıcaklığa duyarlı ürünlerin taşınması ve depolanmasının, insanların yeni yaşam tarzı nedeniyle küresel bir sorun haline geldiği bilinmektedir [4]. Soğuk zincir taşımacılığının en önemli araçlarından biri frigorifik kamyonlardır. Frigorifik kamyonlar soğutma teknolojisine göre mekanik, soğuk plakalı, sıvı nitrojen/kuru buz ve sıvılaştırılmış doğal gaz (LNG) soğutmalı kamyonlar olmak üzere dört kategoride sınıflandırılmaktadır. Mekanik soğutmalı kamyonlar istenilen sıcaklığı sağlamak için bağımsız veya bağımsız olmayan soğutma üniteleri kullanmaktadır; soğuk plakalı soğutmalı kamyonlar ısıyı depolamak ve serbest bırakmak için faz değiştiren malzemeleri (FDM'leri) kullanır; sıvı nitrojen/kuru buz soğutmalı kamyonlar, sıvı nitrojenin veya kuru buzun buharlaşmasından faydalanırken, LNG soğutmalı kamyonlar ise LNG'yi yakıt olarak kullanarak aracı

çalıştırır ve LNG'nin gazlaştırma sürecinden elde edilen soğutma etkisini kullanmaktadır [3]. Soğuk zincir taşımacılığına yaygın olarak mekanik soğutmalı kamyonların kullanıldığı bilinmektedir. Örneğin, literatürde Çin'de en yaygın olarak buhar sıkıştırırmalı mekanik soğutmalı kamyonlar kullanıldığı belirtilmiştir [3]. Mekanik frigorifik kamyonların enerji tüketimini azaltmanın alternatif yollarından biri, bu sistemlere FDM entegrasyonudur. FDM'ler faz değişimleri esnasında ısıyı depolayarak ya da ortama vererek daha az enerji kullanımıyla sistemde istenilen sıcaklık değerinin korunmasına sağlayabilmektedir. Ancak FDM entegrasyonunda, FDM'nin faz değişim sıcaklığı, konumu, miktarı gibi parametrelerin dikkate alınması gerekmektedir [5].

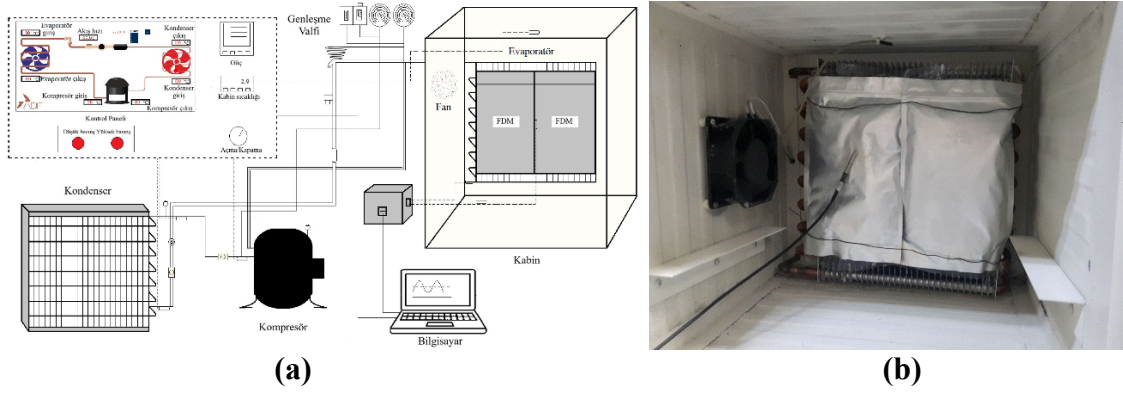
Frigorifik taşımacılıkla ilgili literatürde farklı deney sistemlerinin mevcut olduğu birçok çalışma sunulmuştur. LNG yakıt olarak kullanıldığı frigorifik araçlarda Tan ve ark. [6] tarafından kendinden soğutmalı sistemin performansı deneysel olarak incelenmiştir. Geleneksel kriyojenik soğutma sistemlerin aksine bu sistemde LNG'nin kriyojenik soğutma kapasitesi geri kazanılarak, depolama bölmesinde soğutucu akışkan olarak kullanılması ve ardından yanma motorunda yakıt olarak tüketilmesi sağlanıldığından ek kriyojenik sıvı depolama ve dağıtım sistemlerine ihtiyaç duyulmamaktadır. Dolayısıyla avantajlı olan bu sistemde soğutma sıcaklığı, soğutma kapasitesi ve LNG tüketim oranı arasındaki ilişki ortaya konulmuştur. Frigorifik kamyonların çalışma prensibinin farklılığının yanısıra çevre koşulları, soğutulan kompartmandaki hava akış dağılımı gibi bir çok parametre ürünlerin sıcaklıklarının korunmasında etkili olduğu bilinmektedir. Merai ve ark. [7]; yarı römorka yüklenen karkasların ve havanın sıcaklık değişimini deneysel olarak incelenmiş ve modellemiştir. Ayrıca, çalışmada kullanılan yarı römorkun soğutma kapasitesi değerlendirilmiştir. Taşıma esnasında ürünün iç sıcaklığında yaklaşık 6,5 °C düşüş gözlemlenirken yüzey sıcaklığı yaklaşık 2,9 °C düşmüştür. Ürünün pozisyonu sebebiyle taşımanın başlangıcında omuz kısmında hava sıcaklığının daha yüksek olduğu bilinmektedir (7,7 °C) ve bu noktada hava sıcaklık düşüşünün (4,1 °C) daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Çalışılan römorkun, karkasların taşınması esnasında yeterli soğutma kapasitesi sunduğu belirtilmiştir. Frigorifik kamyonlardan soğuk plakalı kamyonlar istenilen sıcaklık değerini FDM kullanarak sağlamaktadır. Tong ve ark. [8] ise, FDM plakaları ile donatılmasıyla pasif olarak soğutulan bir kara-demiryolu konteynerinin soğutmalı taşımacılık amacıyla kullanımının enerji tüketimi, işletme maliyeti ve çevresel etkilerini dizel yakıtla çalışan bir soğutmalı konteyner ile kıyaslamışlardır. FDM olarak erime ve donma sıcaklıkları sırasıyla 4,96 °C ve 4,84 °C, gizli ısısı 180 kJ/kg olduğu belirtilen bir FDM kullanılmıştır. Farklı dış ortam sıcaklık koşullarına rağmen (13,0 °C-35,0 °C), ürünlerin pasif soğutulan konteyner ile 94,6 saat boyunca uygun sıcaklıklarda (4,0 °C-12,0 °C) muhafaza edilebildiği ortaya konulmuştur. Önerilen tasarımın enerji tüketimini ve işletme maliyetini %86,7 ve %91,6'ya kadar azaltabildiği ortaya konulmuştur. Mekanik soğutmalı kamyonlarda ise soğutma sistemleri istenilen sıcaklık değerinde ürünlerin muhafaza edilmesini sağlamaktadır, ancak bu sistemlerin yaygın kullanımı enerji tüketimlerinin kontrol altında tutulmasının önemini arttırmaktadır. Liu ve ark. [9] frigorifik kamyonlarda istenilen termal koşulların sağlanabilmesi için FDM içeren yenilikçi bir soğutma sistemi önermiştir. Sistem, araç dışında bulunan bir soğutma ünitesi tarafından şarj edilen bir faz değişim termal depolama ünitesinden (PCTSU) oluşmaktadır. Araç hareket halindeyken, FDM deşarj olarak soğutma sağlamaktadır. Böylelikle, enerji tüketimi azaltılırken, yerel sera gazı emisyonları da önemli ölçüde düşürülmektedir. Enerji maliyetindeki tasarruf, dizel ve elektrik maliyeti ile soğutma sistemi ve motorunun verimliliği gibi bir çok faktöre bağlı olduğu belirtilmekte olsada çalışma kapsamında elde edilen veriler değerlendirildiğinde geleneksel sistemlere göre %86,4 tasarruf sağlandığı belirtilmiştir. Frigorifik kamyonların

konteynerlerindeki sıcaklık değişimine üç farklı FDM (E-26, E-29 ve E-32) içeren soğuk plakaların entegre edilmesinin etkisi Mousazade ve ark. [10] tarafından incelenmiştir. Deneyler sabit bir 466 km'lik rota üzerinde gerçekleştirilmiştir. Her bir FDM, 80 ila 110 km/s hız aralığında farklı kamyon hızlarında test edilmiştir. FDM'ler arasından E-26 kullanıldığında ve kamyon 110 km/s hızla hareket ettiğinde, maksimum seyahat mesafesinin 491 km'ye ulaştığı ortaya konulmuştur. Sonuçlar FDM'lerin frigorifik kamyonlara entegre edilmesinin, değişken dış koşullar ve kamyon hızlarına rağmen taşınma sırasında iç sıcaklıkları etkili bir şekilde dengeleyebileceğini göstermiştir. Bu yaklaşımın, geleneksel soğutma yöntemlerine potansiyel bir alternatif sunarak soğuk zincir lojistiğinde enerji tüketimini ve ilgili emisyonları azaltma potansiyeline sahip olduğu gösterilmektedir.

Tüm çalışmalar dikkate alındığında frigorifik kamyonlara uygun FDM entegrasyonun sistemin verimliliği açısından önem arz ettiği görülmektedir. Bu çalışmada yaygın olarak kullanılan mekanik frigorifik kamyonların taze gıda taşımacılığında kullanımını simüle etmek üzere kamyonların soğutma ünitesini ve konteynerlerini temsil eden bir laboratuvar ölçekli soğutma sistemi FDM'siz ve FDM'li senaryolarda analiz edilmiştir. Sistem, taze gıdaların çoğunluğunun 12 °C'nin altında muhafazası edilmesi [11], ancak suyun donma noktasının üzerinde olması gerekliliği [8] göz önünde bulundurularak, Tong ve ark. [8] tarafından yürütülen çalışmada olduğu gibi 4-12 °C sıcaklık aralığında çalıştırılmıştır. FDM olarak uygun faz değişim sıcaklığına sahip kolay ulaşılabilir, ekonomik ve toksik olmayan FDM kullanımı önem arz etmektedir. Bu parametreler dikkate alınarak inorganik tuzlar olan sodyum sülfat (Na_2SO_4), sodyum klorür (NaCl) ve potasyum klorür (KCl) içeren ötektik FDM'ler, farklı konsantrasyonlarda hazırlanarak entegre edilmiştir. Sistemin çalışma periyodunda enerji tasarrufunu maksimize eden en uygun FDM frigorifik kamyonlarda kullanmak üzere önerilecektir. Ayrıca çalışma periyodunun ardından olası elektrik kesintisi senaryosu uygulanarak, kabin iç hava sıcaklığının FDM'siz ve FDM'lerle ortam sıcaklığına ulaşma süreleri kıyaslamalı olarak sunulacaktır. Tüm çalışmanın sonunda, en uygun FDM olarak belirlenen FDM'nin entegrasyonunun, taze gıdaları temsil etmek üzere kabin içerisine yerleştirilen çileklerin kalite kaybını önlemedeki etkileri incelenecektir.

2. Deneysel çalışmalar

Taze gıda taşımacılığında kullanılan mekanik soğutmalı bir kamyonun soğutma ünitesini ve konteynerini temsil eden bir soğutma sistemi FDM'siz ve FDM'lerle 4 °C ile 12 °C sıcaklık aralığında test edilmiştir. Deney sisteminin temel ekipmanları; bir evaporatör, bir kompresör, bir kondenser ve bir genişleme valfidir [12]. Sistemde 72 L hacminde bir kabin bulunmaktadır. Evaporatör, kabinin arka yüzeyine entegre edilmiştir. Kabin iç hava homojenizasyonunu sağlamak amacıyla kabinin yan yüzeyine bir fan yerleştirilmiştir. Deney düzeneğinin şematik gösterimi Şekil 1-(a)'da [13] sunulmuştur. Sistemin bulunduğu ortamda klima kullanılarak 20 °C'de kararlı rejim şartları sağlanmıştır. Soğutucu akışkan olarak R404A sistemde sirküle edilmiştir. Kullanılan bu soğutucu akışkanın evaporatör, kondenser ve kompresör giriş-çıkış sıcaklıkları $\pm 0,5$ doğrulukta sıcaklık sensörleri ile ölçülmüş ve veri toplama ünitesi tarafından kaydedilmiştir. Güç tüketimi $\pm 1,0$ doğrulukta network analizörü ile ölçülmüştür. Kabin iç hava sıcaklığı termostatik kontrol edici ile kontrol altında tutulmuştur.



Şekil 1. (a) Deney düzeneği [13], (b) kabin içi FDM entegrasyonu.

FDM olarak, sisteme uygun faz değişim sıcaklıkları dikkate alınarak, farklı konsantrasyonlarda sodyum sülfat (Na_2SO_4), sodyum klorür (NaCl) ve potasyum klorür (KCl) içeren çözeltiler entegre edilmiştir. FDM olarak, ağ. %3,0 Na_2SO_4 –ağ. %1,25 NaCl –ağ. %1,5 KCl (**FDM-1**), ağ. %6,0 Na_2SO_4 –ağ. %2,5 NaCl –ağ. %3,0 KCl (**FDM-2**) ve ağ. %12,0 Na_2SO_4 –ağ. %5,0 NaCl –ağ. %6,0 KCl (**FDM-3**) çözeltileri kullanılmıştır. Literatürde ağ. %31,0 Na_2SO_4 - ağ. %13,0 NaCl - ağ. %16,0 KCl tuzlarını içeren sulu çözeltinin erime sıcaklığı 4°C olarak belirtilmiştir [14]. Erime sıcaklığının yanı sıra çözeltiyi hazırlarken kullanılan tuzların kolay ulaşılabilir, ekonomik ve toksik olmaması da göz önünde bulundurulmuştur. FDM çözeltileri literatürde uygun miktar olarak belirtilen 600 mL hacminde [13] hazırlanmıştır. FDM olarak hazırlanan çözeltiler, ısı transferini arttırmak amacıyla alüminyum paketlere aktarılmış, ince film tabaka formu elde etmek üzere dondurucuda (-18°C) yatay olarak dondurulmuş (şarj) ve ardından şarj edilmiş FDM’ler evaporatör yüzeyine, Şekil 1-(b)’de gösterildiği gibi entegre edilmiştir. FDM’nin evaporatör yüzeyine entegre edilmesiyle, evaporatörden FDM’ye iletim ve FDM’den havaya konveksiyon yoluyla ısı transferi gerçekleşir [15]. Kompresörün kapalı olduğu süre boyunca, önceden şarj edilmiş FDM, kabin içindeki hava ve depolanan ürünlerden kaynaklanan ısı yükünü absorbe ederek katı fazdan sıvı faza geçiş yapar (deşarj). Bu süreç, kabin içi sıcaklığın korunmasını sağlar. Kompresör, sıcaklık belirli bir üst değere ulaştığında devreye girer ve bu esnada FDM, sıvı fazdan katı faza geçerek gizli ısıyı depolar (şarj). Bu mekanizma, literatürde belirtildiği gibi PCM’in yüksek gizli ısı sayesinde kompresörün devre dışı kalma süresini uzatmakta ve enerji tasarrufu ile saklanan ürünlerin kalitesinin korunmasına katkı sağlamaktadır [17,18]. Sistem dengeye geldikten sonra veri kaydı başlatılmıştır.

Sistemin çalışma periyodu boyunca kompresörün çalışma süresi (%), kompresörün açık ($t_{\text{açık}}$) ve kapalı ($t_{\text{kapalı}}$) kalma süreleri Eşitlik 1’de sunulan denklemde yerine konularak hesaplanmıştır.

$$\text{Çalışma süresi (\%)} = \frac{t_{\text{açık}}}{t_{\text{açık}} + t_{\text{kapalı}}} 100 \quad (1)$$

Güç ($\dot{w}$, kW) değerleri çalışma periyodu boyunca kaydedilmiştir. Toplam enerji tüketimi (w , kWh) Eşitlik 2’de sunulan denklem kullanılarak hesaplanmıştır [18].

$$w = \int_{t=0 \text{ saat}}^{t=4 \text{ saat}} \dot{w}(t) dt \quad (2)$$

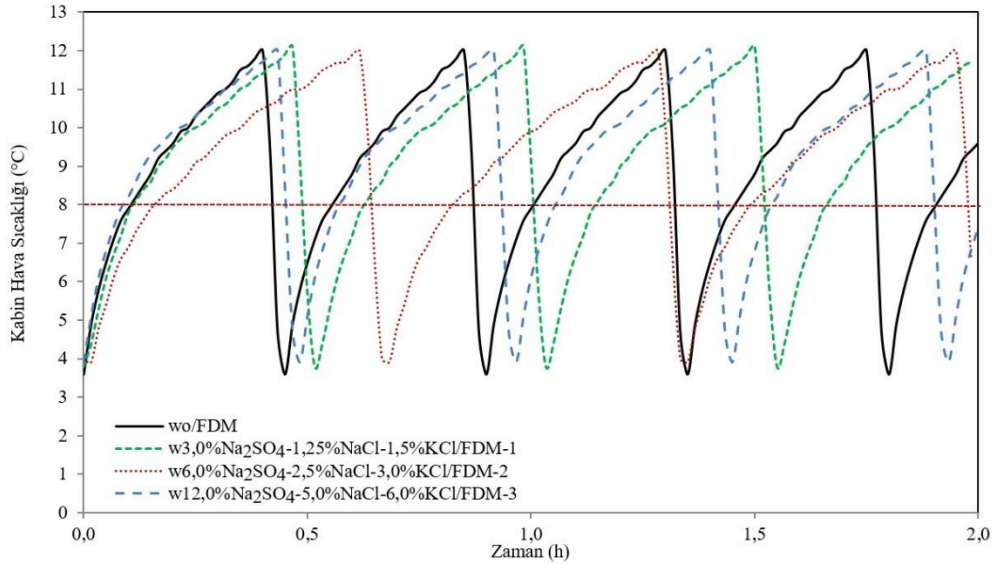
Enerji tasarrufu (%) Eşitlik 3’de sunulan denkleme göre FDM’siz (w) ve FDM’li (w_{FDM}) durumlardaki toplam enerji tüketim değerleri kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\text{Enerji tasarrufu (\%)} = \frac{w_{FDM} - w}{w} \times 100 \quad (3)$$

Çalışma periyodunun (4 saat) ardından elektrik kesintisi senaryosu FDM’siz ve FDM’lerle uygulanmıştır. Elektrik kesinti esnasında kabin iç hava sıcaklığının zamanla artışı kaydedilmiştir ve ortam sıcaklığına ulaşma süresi belirlenmiştir. Ayrıca sistem, FDM’siz ve en uygun olarak seçilen FDM ile birlikte, kabin içerisine dilimlenmiş ve dilimlenmemiş taze çilekler yerleştirilerek çalıştırılmıştır. Ürünlerin gıda kalite endeksleri kapsamında ağırlık ve pH değişimleri incelenmiştir [8,19,20].

3. Sonuçlar ve tartışma

Mekanik frigorifik kamyonların soğutma ünitesini ve konteynerini temsil eden bir soğutma sistemi FDM’siz ve FDM’lerle 4 °C ile 12 °C sıcaklık aralığında test edilmiştir. FDM olarak sisteme farklı konsantrasyonlarda inorganik tuzlardan (Na_2SO_4 , NaCl, KCl) hazırlanan ötektik FDM’ler entegre edilmiştir. Ötektik FDM’ler: ağı. %3,0 Na_2SO_4 –ağı. %1,25 NaCl–ağı. %1,5 KCl (**FDM-1**), ağı. %6,0 Na_2SO_4 –ağı. %2,5 NaCl–ağı. %3,0 KCl (**FDM-2**) ve ağı. %12,0 Na_2SO_4 –ağı. %5,0 NaCl–ağı. %6,0 KCl (**FDM-3**) çözeltileridir. Sistem kararlı duruma ulaştıktan sonra, kabin içi hava sıcaklığı 4 saatlik (h) çalışma periyodu boyunca kaydedilmiş; bu sürenin 2 saatlik bölümüne ait zamana bağlı değişim, FDM’siz (without (wo)/FDM) ve FDM’li (with (w)/FDM) durumlar için Şekil 2’de sunulmuştur.



Şekil 2. Kabin iç hava sıcaklığının zamanla değişimine FDM entegrasyonunun etkisi.

Kabin iç hava sıcaklığının zamanla değişimi incelendiğinde, 2 saat çalışma periyodu boyunca FDM’siz durumda tespit edilen döngü sayısının FDM’lerle azaldığı görülmektedir. FDM’siz durumda belirlenen toplam döngü sayısı 4,44 iken, FDM-1, FDM-2 ve FDM-3 ile sırasıyla 3,87, 3,00 ve 4,14 olarak tespit edilmiştir. Bir döngünün toplam süresinin kompresörün açık ve kapalı kalma sürelerinin toplamı olduğu bilinmektedir. Bu sürelerde ki artış döngü sayısının azalması ile sonuçlanmaktadır, ancak

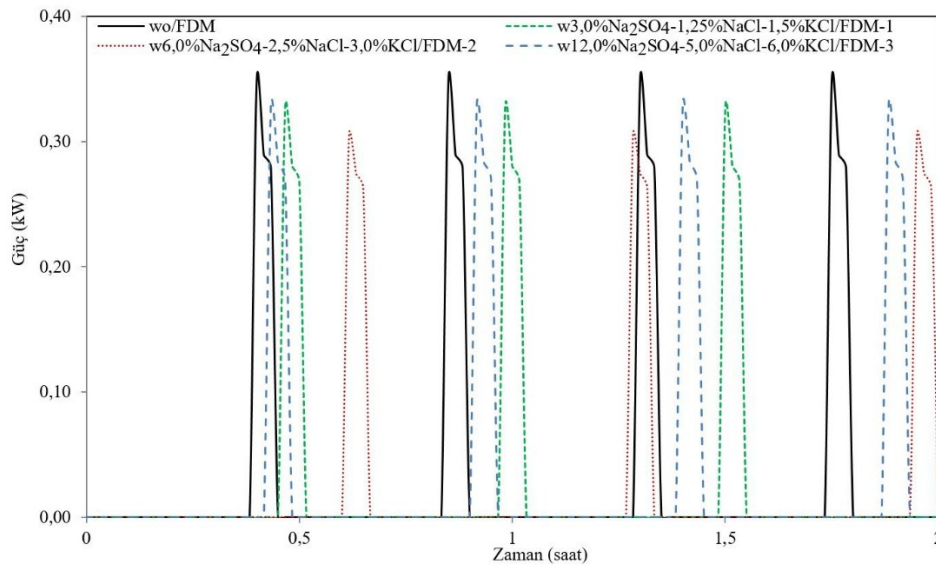
kompresör açık kalma süresinde olası uzama kompresör ömrünü azaltacağı gibi enerji tüketimini de arttıracaktır. Dolayısıyla kompresör kapalı kalma süresinin uzaması enerji tasarrufu açısından büyük önem arz etmektedir. Böylelikle kabin içindeki ürünlerinde istenilen sıcaklıkta uzun süre muhafaza edilebilmektedir. Kompresör açık ve kapalı kalma süreleri ve bu değerler kullanılarak Eşitlik 1'e göre hesaplanan çalışma süreleri (%) Tablo 1'de sunulmuştur.

Tablo 1. Çalışma süresi (%) değerlerinin FDM'lerle değişimi.

FDM	Konsantrasyon (ağırlıkça %)	Açık Kalma Süresi, $t_{açık}$, (min)	Kapalı Kalma Süresi, $t_{kapalı}$, (min)	Bir Döngü Süresi (min)	Çalışma Süresi (%)
FDM'siz	-	3	24	27	11,11
FDM-1	%3,0 Na ₂ SO ₄ -%1,25 NaCl- %3,0 KCl	3	28	31	9,68
FDM-2	%6,0 Na ₂ SO ₄ - %2,5 NaCl - %3,0 KCl	3	37	40	7,50
FDM-3	%12,0 Na ₂ SO ₄ - %5,0 NaCl - %6,0 KCl	3	26	29	10,34

Tablo 1 incelendiğinde, kompresör açık kalma süresinin FDM entegrasyonu ile değişmediği, ancak kompresör kapalı kalma süresinin önemli ölçüde etkilendiği görülmektedir. Kompresör kapalı kalma süresi tüm FDM'lerle artmakta olup, en yüksek değer FDM-2 ile elde edilmektedir. FDM'siz durumda 24 dakika olan kompresör kapalı kalma süresi, FDM-2 ile 37 dakikaya kadar uzadığı tespit edilmiştir. Kompresör açık ve kapalı kalma süreleri kullanılarak Eşitlik 1'e göre çalışma süresi (%) hesaplanmış ve tüm FDM'lerle bu sürenin önemli oranda azaldığı belirlenmiştir. FDM'siz durumda %11,11 olarak hesaplanan kompresör çalışma süresi, FDM-1, FDM-2 ve FDM-3 için sırasıyla %9,68, %7,50 ve %10,34 olarak bulunmuştur. Sonuç olarak, kompresör çalışma süresinin (%) FDM-2 ile minimize edildiği belirlenmiştir.

FDM entegrasyonunun toplam enerji tüketimine etkisini belirlemek için, kompresörün açık kalma süresi boyunca anlık güç tüketim değerlerinin zamanla değişimi kaydedilmiştir. FDM'siz ve FDM'lerle güç tüketiminin zamanla değişimi Şekil 3'de gösterilmiştir.



Şekil 3. Kompresörün anlık güç tüketim değerlerinin zamanla değişimi üzerine FDM entegrasyonunun etkisi.

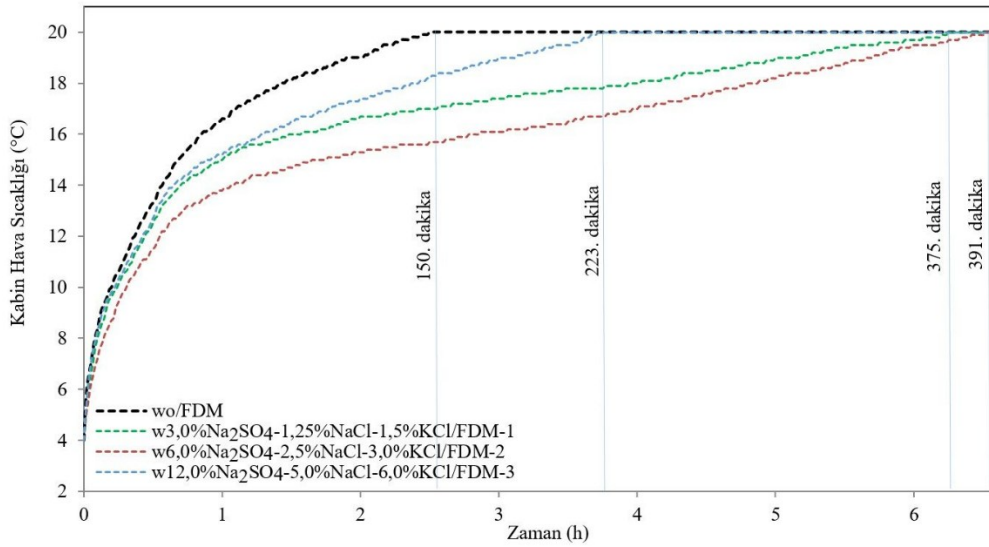
Şekil 3 incelendiğinde, anlık güç tüketim değerlerinin FDM'siz durumda 0,349-0,279 kW arasında değiştiği görülmektedir. FDM-1, FDM-2 ve FDM-3 ile maksimum ve minimum anlık güç tüketim değerleri sırasıyla 0,329-0,270 kW, 0,305 -0,263 kW ve 0,327-0,268 kW olarak tespit edilmiştir. Bu değerler ve Eşitlik 2 kullanılarak toplam enerji tüketimleri 4 h çalışma süresi için hesaplanmıştır. Hesaplanan enerji tüketim değerleri dikkate alınarak Eşitlik 3'e göre enerji tasarrufu (%) değerleri bulunmuştur. Toplam enerji tüketim değerleri (kWh/4h) ve enerji tasarrufu (%) değerleri Tablo 2'de listelenmiştir.

Tablo 2. Toplam enerji tüketim ve enerji tasarrufu değerleri.

	FDM'siz	%3,0 Na ₂ SO ₄ - %1,25 NaCl- %3,0 KCl/FDM	%6,0 Na ₂ SO ₄ - %2,5 NaCl - %3,0 KCl/FDM	%12,0 Na ₂ SO ₄ - %5,0 NaCl- %6,0 KCl/FDM
Toplam enerji tüketimi (kWh/4h)	0,128	0,102	0,084	0,118
Çalışma süresi (%)	11,11	9,68	7,50	10,34
Enerji Tasarrufu (%)	-	-20,31	-34,38	-7,81

Toplam enerji tüketim değerleri incelendiğinde, FDM'siz durumda 0,128 kWh/4h bulunan değer FDM'lerle azaldığı ve 4 h çalışma periyodu için FDM-1, FDM-2 ve FDM-3 için sırasıyla 0,102 kWh, 0,084 kWh ve 0,118 kWh olarak hesaplanmıştır. Tüm FDM'lerle enerji tüketiminde tespit edilen azalmanın beklenildiği gibi enerji tasarrufu sağladığı görülmektedir. FDM-1, FDM-2 ve FDM-3 için enerji tasarrufu sırasıyla %20,31, %34,38 ve %7,81 olarak bulunmuştur. Sonuç olarak, minimum toplam enerji tüketimi ve dolayısıyla maksimum enerji tasarrufu FDM-2 ile sağlanmıştır. Literatürde bilinen çalışmalar arasında frigorifik kamyonların soğutma sistemlerinde toplam enerji tüketimine FDM entegrasyonunun etkisinin incelendiği bir çalışma mevcut değildir. Ancak Lui ve ark. [9] tarafından önerilen FDM içeren yenilikçi soğutma sistemi ile enerji tasarrufu (%86,4) geleneksel sistemler ile kıyaslanmıştır. FDM entegrasyonun önemi bu çalışma ile ortaya konulmuştur. Önerilen FDM'in mekanik soğutmalı kamyonlarda test edilmesi, gelecek çalışmalar için önemli bir araştırma konusu oluşturmaktadır.

Sistem, çalışma periyodunun ardından elektrik kesintisi sırasında FDM'siz ve FDM'lerle test edilmiştir. Kabin iç hava sıcaklığının elektrik kesintisi sırasında FDM'siz ve FDM'lerle değişimi Şekil 4'de sunulmuştur.



Şekil 4. FDM'siz ve FDM'lerle kabin iç hava sıcaklığının elektrik kesintisi esnasında zamanla değişimi.

Şekil 4 incelendiğinde, FDM'siz senaryoda kabin iç hava sıcaklığının elektrik kesintisi sırasında 20 °C ortam sıcaklığına 150 dakikada ulaştığı belirlenmiştir. Bu sürenin FDM entegrasyonu ile uzadığı ve FDM-1, FDM-2 ve FDM-3 için sırasıyla 375, 391 ve 223 dakika olduğu görülmüştür. Elde edilen sonuçlar bu sürenin FDM-2 ile maksimize edildiğini, yaklaşık 2,5 katına çıktığını ortaya koymaktadır. Sonuç olarak, kabin iç ürünlerin elektrik kesintisi sırasında FDM-2 ile bozunmadan uzun süre korunabileceği ortaya konulmuştur. Literatürde hasat sonrası ısının alınması için uygulanan ön soğutma işlemini simüle etmek üzere 0-10 °C sıcaklık aralığında çalışan bir sisteme FDM olarak boraks dekahidrat ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) çözeltileri entegre edilmiştir. Sistemde çalışma periyodunun ardından elektrik kesintisi durumu test edildiğinde, FDM'siz duruma göre kabin iç hava sıcaklığının 18 °C ortam sıcaklığına ulaşma süresinin ağ. %1,0 $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ çözeltisi ile 4,3 katına çıktığı belirlenmiştir [21]. Bu çalışmada, soğutma sistemlerine uygun FDM entegrasyonunun, elektrik kesintisi durumunda ürünlerin bozunmadan daha uzun süre muhafaza edilmesi açısından önemli olduğu ortaya konulmuştur. Çalışmamız kapsamında elde edilen tüm sonuçlar değerlendirildiğinde, mekanik frigorifik kamyonların soğutma ünitesi performansının artırılması amacıyla sisteme entegre edilmek üzere ağ. %6,0 Na_2SO_4 –ağ. %2,5 NaCl –ağ. %3,0 KCl (FDM-2) çözeltisi alternatif bir FDM olarak önerilmektedir.

DeneySEL çalışmalar sonucunda en uygun FDM olarak belirlenen çözeltinin sisteme entegrasyonunun ürün kalitesi üzerindeki etkisini değerlendirmek amacıyla, taze gıda ürünlerini temsil eden dilimlenmemiş ve dilimlenmiş çilekler kabin içerisine ambalajlarla yerleştirilmiş; sistem FDM'siz ve FDM-2 ile test edilmiştir. Her iki durumda da, 3 saatlik çalışma periyodunun ardından 5 saatlik elektrik kesintisi simüle edilmiştir. Numuneler deney öncesi ve sonrasında ambalajlı ve ambalajsız olarak fotoğraflanmış; ağırlık ve pH ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 5-(a) ve -(c)'de sırasıyla FDM'siz ve FDM'li (ağ. %6,0 Na_2SO_4 –ağ. %2,5 NaCl –ağ. %3,0 KCl çözeltisi) koşullarda dilimlenmemiş ve dilimlenmiş çilek numunelerinin deney öncesi; (b) ve (d)'de ise deney sonrası görüntüleri verilmiştir.



Şekil 5. Taze dilimlenmemiş ve dilimlenmiş çileklerin fotoğrafları: (a-b) FDM'siz test öncesi ve sonrası; (c-d) FDM'li test öncesi ve sonrası.

Şekil 5-(b) ve (d)'de sunulan deney sonrası numune fotoğrafları incelendiğinde, dilimlenmemiş çileklerde yüzey bozunmasının sınırlı ve lokal bölgelerde gerçekleştiği, buna karşın dilimlenmiş çileklerde bozunmanın daha belirgin olduğu gözlemlenmiştir. FDM'siz koşullarda dilimlenmiş numunelerde renk değişimi ve tekstürel yumuşama daha belirgin düzeydedir (Şekil 5b-4). Deney öncesi görüntülerde (Şekil 5a-3 ve 5a-4) sağ üst köşede yer alan numune esas alındığında, deney sonrası görüntülerde (Şekil 5b-3 ve 5b-4) özellikle sap bölgesinde gelişen bozunmanın belirginleştiği gözlemlenmiştir. Aynı numunenin altında bulunan dilimlenmiş çileklerde parlaklık kaybı ve belirgin doku

yumuşaması meydana geldiği belirlenmiştir. FDM'li koşullarda belirgin bozunma yalnızca sol üst köşede konumlanan iki dilimlenmiş numunede saptanmıştır (Şekil 5d-3). Söz konusu numunelerde renk koyulaşması ile birlikte hafif tekstürel yumuşama gözlenmiştir.

Sonuç olarak, FDM'siz ve FDM'li koşullarda dilimlenmiş çilek numuneleri karşılaştırıldığında, FDM'li durumda numunelerin büyük çoğunluğunun tazeliğini koruduğu gözlemlenmiştir. Çileklerin deney öncesi ve sonrası ağırlıkları kaydedilmiş ve deney sonunda meydana gelen ağırlık kayıpları belirlenmiştir. Literatürde sunulan çalışmalar da dikkate alındığında, depolama sonrasında meyvelerde su kaybına bağlı olarak ağırlık kaybı beklenmektedir [22]. FDM'siz durumda dilimlenmemiş çilek numunelerinde toplam ağırlık kaybı %0,75 iken, FDM'li durumda bu değer %0,58 olarak belirlenmiştir. FDM entegrasyonunun dilimlenmiş çileklerin ağırlık değişimi üzerindeki etkisinin daha belirgin olduğu tespit edilmiştir. FDM'siz durumda dilimlenmiş çilek numunelerinde toplam ağırlık kaybı %3,62 olarak belirlenirken, FDM'li durumda bu değer %1,39'a düşmüştür. Numunelerde test süreci sonrasında ağırlık kaybı düşük görünse de, FDM entegrasyonunun dilimlenmemiş çilek numunelerinde ağırlık kaybını %22,96, dilimlenmiş çilek numunelerinde ise %61,65 oranında önleyebildiği belirlenmiştir.

Çilek numunelerinin başlangıç ortalama pH değeri $3,77 \pm 0,06$ olarak belirlenmiştir. FDM'siz durumda dilimlenmemiş numunelerin pH değeri $4,13 \pm 0,02$ iken, dilimlenmiş numunelerde $4,20 \pm 0,02$ 'ye kadar artmıştır. FDM'li durumda ise pH artışı daha sınırlı olmuş; dilimlenmemiş numunelerin pH değeri $3,98 \pm 0,01$, dilimlenmiş numunelerin pH değeri ise $4,05 \pm 0,02$ olarak ölçülmüştür. Belirli meyvelerde asit düzeyinin aroma dengesinde belirleyici bir unsur olduğu ve genellikle depolama süreci boyunca azalma eğilimi gösterdiği literatürde belirtilmiştir [23]. Perdones ve ark. (2012) tarafından yürütülen çilek numunelerinin raf ömrünün uzatılması ile ilgili çalışmada da kontrol numunelerinin pH değerinin benzer şekilde on dört günlük muhafaza sonrasında 3,64 değerinden 3,91 değerine kadar arttığı belirtilmiştir [24].

Çileklerin transferi esnasında depolandıkları sisteme uygun FDM entegrasyonunun çileğin raf ömrünün korunmasına önemli katkı sağlayabileceği bu çalışma ile ortaya konulmuştur. Meyve taşımacılığında soğuk zincirin korunmasına yönelik yeni bir FDM entegrasyonunun incelendiği bir çalışmada, dilimlenmiş kivi numunelerinin, bu çalışmada çilek numuneleri için de gösterildiği üzere, FDM entegrasyonu ile muhafaza süresinin uzatılabildiği ortaya konulmuştur [24]. Çilek meyvesinin raf ömrünün kısa olması nedeniyle, bu sürenin uzatılması amacıyla literatürde çeşitli çalışmalar sunulmuştur, çoğu çalışmada çileklerin kaplanması üzerinde durulmuştur [19,24-27]. Bu çalışma ile ise, soğuk zincir taşımacılığı sırasında raf ömrünün azalmasının FDM entegrasyonu ile sınırlandırılabilceği ortaya konulmuştur.

4. Genel sonuçlar ve öneriler

Laboratuvar ölçekli bir soğutma sistemi, mekanik frigorifik kamyonların soğutma ünitesini ve konteynerini simüle etmek amacıyla FDM'siz ve FDM'lerle $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ile $12\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklık aralığında test edilmiştir. Sisteme FDM olarak ağ. %3,0 Na_2SO_4 –ağ. %1,25 NaCl –ağ. %1,5 KCl (FDM-1), ağ. %6,0 Na_2SO_4 –ağ. %2,5 NaCl –ağ. %3,0 KCl (FDM-2) ve ağ. %12,0 Na_2SO_4 –ağ. %5,0 NaCl –ağ. %6,0 KCl (FDM-3) çözeltileri entegre edilmiştir. Ayrıca sistem, FDM'siz ve en uygun olarak seçilen FDM ile birlikte, kabin

içerisine yerleştirilen dilimlenmiş ve dilimlenmemiş taze çilekler yerleştirilerek çalıştırılmıştır. Ürünlerin tekstür, ağırlık ve pH değişimleri incelenmiş olup, elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- FDM'siz durumda kompresör çalışma süresi %11,11 olarak belirlenirken, FDM'lerle bu süre önemli ölçüde azalmıştır. FDM-1, FDM-2 ve FDM-3 için sırasıyla %9,68, %7,50 ve %10,34 olarak tespit edilmiştir. Kompresör çalışma süresinin en düşük FDM-2 ile elde edildiği görülmüştür. Bu sonuç, FDM-2 uygulaması ile hem kompresör ömrünün uzatılabileceğini hem de enerji tasarrufu sağlanabileceğini göstermektedir.
- Toplam enerji tüketimi, FDM'siz durumda 0,128 kWh/4h iken, FDM'lerle azalmıştır. 4 saatlik çalışma periyodu için FDM-1, FDM-2 ve FDM-3 ile enerji tüketimleri sırasıyla 0,102 kWh, 0,084 kWh ve 0,118 kWh olarak hesaplanmıştır. Buna bağlı olarak, FDM-1, FDM-2 ve FDM-3 ile enerji tasarrufu (%) değerleri sırasıyla %20,31, %34,38 ve %7,81 olarak bulunmuştur. Tüm değerler göz önünde bulundurulduğunda, minimum toplam enerji tüketimi ve dolayısıyla maksimum enerji tasarrufu FDM-2 ile elde edilmiştir.
- Kabin iç hava sıcaklığının elektrik kesintisi sırasında ortam sıcaklığına ulaşma süresinin, FDM'lerle önemli ölçüde uzadığı belirlenmiştir. FDM'siz durumda kabin iç hava sıcaklığı 150 dakika sonunda ortam sıcaklığına ulaşırken, FDM-1, FDM-2 ve FDM-3 için bu süre sırasıyla 375 dakika, 391 dakika ve 223 dakika olarak tespit edilmiştir. En uzun süre FDM-2 ile elde edilmiş olup, bu değer FDM'siz koşula göre yaklaşık 2,6 kat daha fazladır.
- Taze çilek numuneleri ile FDM'siz ve uygun FDM varlığında yürütülen deneyler sonucunda, FDM entegrasyonunun çileklerin daha uzun süre bozunmadan korunmasını sağladığı belirlenmiştir. Uygun FDM kullanımı ile numunelerin ağırlık kaybı ve pH değerindeki artışın daha düşük olduğu gözlemlenmiş; dolayısıyla ürünlerin raf ömrünün uzatılabileceği ortaya konulmuştur.

Tüm sonuçlar, mekanik frigorifik kamyonlara uygun FDM entegrasyonunun hem enerji tasarrufu sağladığını hem de elektrik kesintisi sırasında ürünlerin uzun süre bozunmadan muhafaza edilmesine imkân verdiğini göstermektedir. Bu amaçla, mekanik frigorifik kamyonlara entegre edilebilecek alternatif bir FDM olarak ağ. %6,0 Na₂SO₄-ağ. %2,5 NaCl-ağ. %3,0 KCl çözeltisi önerilmektedir.

Teşekkür

TÜBİTAK Bilim İnsanı Destek Programları Başkanlığı (BİDEB) tarafından yürütülen, 2209-A Üniversite Öğrencileri Araştırma Projeleri Destekleme Programı kapsamında çalışmamız desteklenmiştir (Proje No: 1919B012413745).

Kaynaklar

- [1] Gustavsson, J., Cederberg, C., Sonesson, U., Van Otterdijk, R. ve Meybeck, A., Global food losses and food waste: extent, causes and prevention, **Save Food Congress**, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, (2011).

- [2] Umate, T. B. ve Sawarkar, P. D., A review on thermal energy storage using phase change materials for refrigerated trucks: Active and passive approaches, **Journal of Energy Storage**, 75, 109704, (2024).
- [3] Chen, Y., Zhang, X., Ji, J. ve Zhang, C., Cold chain transportation energy conservation and emission reduction based on phase change materials under dual-carbon background: A review, **Journal of Energy Storage**, 86, 111258, (2024).
- [4] Oró, E., De Gracia, A. ve Cabeza, L. F., Active phase change material package for thermal protection of ice cream containers, **International Journal of Refrigeration**, 36(1), 102-109, (2013).
- [5] Khan, M. I. H., Conventional refrigeration systems using phase change material: a review, **International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration**, 24(3), 1630007, (2016).
- [6] Tan, H., Li, Y. ve Tuo, H., Theoretical and experimental study on a self-refrigerating system for LNG-fueled refrigerated vehicles, **Journal of Natural Gas Science and Engineering**, 20, 192-199, (2014).
- [7] Merai, M., Duret, S., Derens, E., Leroux, A., Flick, D. ve Laguerre, O., Experimental characterization and modelling of refrigeration of pork carcasses during transport under field conditions, **International Journal of Refrigeration**, 102, 77-85, (2019).
- [8] Tong, S., Nie, B., Li, Z., Li, C., Zou, B., Jiang, L., Jin, Y. ve Ding, Y., A phase change material (PCM) based passively cooled container for integrated road-rail cold chain transportation—an experimental study, **Applied Thermal Engineering**, 195, 117204, (2021).
- [9] Liu, M., Saman, W. ve Bruno, F., Development of a novel refrigeration system for refrigerated trucks incorporating phase change material, **Applied Energy**, 92, 336-342, (2012).
- [10] Mousazade, A., Rafee, R. ve Valipour, M. S., Thermal performance of cold panels with phase change materials in a refrigerated truck, **International Journal of Refrigeration**, 120, 119-126, (2020).
- [11] Lee, L., Arul, J., Lencki, R. ve Castaigne, F., A review on modified atmosphere packaging and preservation of fresh fruits and vegetables: Physiological basis and practical aspects—Part I, **Packaging Technology and Science**, 8(6), 315-331, (1995).
- [12] Kiran-Yildirim, B., Noya, T., Mancuhan, E. ve Titiz-Sargut, S., Investigation of Energy Consumption for a PCM Integrated Laboratory Scale Cooling System: An Experimental Study, **Proceedings, 23rd Congress on Thermal Science and Technology with International Participation (ULIBTK 2021)**, 1, 1002-1008, Türkiye, (2021).
- [13] Kiran-Yildirim, B., Performance evaluation of a laboratory-scale cooling system as a household refrigerator with phase change materials, **Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects**, 44(3), 5852-5867, (2022).
- [14] Khan, M. I. H. ve Afroz, H. M., Diminution of temperature fluctuation inside the cabin of a household refrigerator using phase change material, **Recent Advances in Mechanical Engineering (IJMECH)**, 3(1), 43-52, (2014).
- [15] Du, K., Calautit, J., Wang, Z., Wu, Y., ve Liu, H., A review of the applications of phase change materials in cooling, heating and power generation in different temperature ranges. **Applied Energy**, 220, 242-273, (2018).

- [16] Elarem, R., Mellouli, S., Abhilash, E., ve Jemni, A. J. A. T. E., Performance analysis of a household refrigerator integrating a PCM heat exchanger. **Applied Thermal Engineering**, 125, 1320-1333, (2017).
- [17] Pavithran, A., Sharma, M., ve Shukla, A. K. Energy utilization reduction of domestic refrigerator using phase change materials. In **Advances in Fluid and Thermal Engineering: Select Proceedings of FLAME 2020** (pp. 695-706). Singapore: Springer Singapore, (2021).
- [18] Yilmaz, D., Mancuhan, E. ve Yilmaz, B., Experimental investigation of PCM location in a commercial display cabinet cooled by a transcritical CO₂ system, **International Journal of Refrigeration**, 120, 396-405, (2020).
- [19] Yaman, Ö. ve Bayındırlı, L., Effects of an edible coating and cold storage on shelf-life and quality of cherries, **LWT-Food Science and Technology**, 35(2), 146-150, (2002).
- [20] Zhou, C. L., Liu, W., Zhao, J., Yuan, C., Song, Y., Chen, D. ve Li, Q. H., The effect of high hydrostatic pressure on the microbiological quality and physical–chemical characteristics of pumpkin (*Cucurbita maxima* Duch.) during refrigerated storage, **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, 21, 24-34, (2014).
- [21] Yıldırım, B. K., Mancuhan, E. ve Sargut, S., Boraks dekahidrat çözeltilerinin faz değiştiren malzeme olarak ön soğutma işlemi yapılan soğuk depolama sisteminde kullanımı, **Journal of Boron**, 9(2), 62-68, (2024).
- [22] Akın, I., Bazı çilek (*Fragaria vesca* L.) çeşitlerinde modifiye atmosferde muhafaza süresince fiziksel ve kimyasal değişimler, Yüksek Lisans Tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, (2014).
- [23] Lin, D. ve Zhao, Y., Innovations in the development and application of edible coatings for fresh and minimally processed fruits and vegetables, **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, 6(3), 60-75, (2007).
- [24] Perdonés, A., Sánchez-González, L., Chiralt, A. ve Vargas, M., Effect of chitosan–lemon essential oil coatings on storage-keeping quality of strawberry, **Postharvest Biology and Technology**, 70, 32-41, (2012).
- [25] Li, C., Peng, M., Xie, B., Li, Y. ve Li, M., Novel phase change cold energy storage materials for refrigerated transportation of fruits, **Renewable Energy**, 220, 119583, (2024).
- [26] García, M. A., Martino, M. N. ve Zaritzky, N. E., Composite starch-based coatings applied to strawberries (*Fragaria ananassa*), **Food/Nahrung**, 45(4), 267-272, (2001).
- [27] Zeybek, G. ve Turgay, Ö., Kitosan Kaplanmış Çileğin Mikrobiyolojik Kalitesi ve Raf Ömrünün Araştırılması, **Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi**, 6(2), 1338-1352, (2023).