



Farklı Faz Değiştiren Malzemeler ile İşlem Görmüş Pamuklu Kumaşların Isı Düzenleme Özelliklerinin Araştırılması

Investigation of Thermoregulation Properties of Cotton Fabrics Treated With Different Phase Change Materials

Suat ÇETİNER^{1*}, Mehmet Reşat BELTEN¹

¹ Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Tekstil Mühendisliği, Kahramanmaraş, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Suat ÇETİNER, suatcetiner@ksu.edu.tr

ÖZET

Mikrokapsüllenmiş faz değiştiren maddeler (m-FDM), faz değişim esnasında gizli ısı depolayabilen ve yayabilen akıllı malzemelerdir. Bu malzemeler, kumaşların termal konforunu geliştirmek ve ısı düzenleme özellikli tekstiller üretmek amacıyla kullanılmaktadır. Mikrokapsüller tekstil yüzeylerine farklı aplikasyon yöntemleri ile (ör; emdirme, çektirme, kaplama vb) uygulanmaktadır. Kumaşa uygulanan m-FDM'ler, vücuttan yayılan veya emilen ısı enerjisini aktif bir şekilde dengeleyerek dış ortam ile insan vücudu arasında yalıtım tabakası oluşturarak giyim konforuna katkıda bulunur. Bu çalışmada, pamuklu dokuma kumaşlar iki farklı mikrokapsül ile numune pad batch makinasında kaplanmıştır. Mikrokapsül türünün, kumaşların ısı düzenleme ve morfolojik özellikleri ile mukavemet, sürtme ve ter haslığı özelliklerine etkisi araştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Mikrokapsüllenmiş Faz Değiştiren Malzeme, Akıllı Tekstil, Isı Düzenleme, Kaplama, Dokuma Kumaş

ABSTRACT

Microencapsulated phase change materials (m-PCMs) are intelligent materials that can store and release latent heat during phase change. These materials are used to improve the thermal comfort of fabrics and to produce heat regulated textiles. Microcapsules are applied to textile surfaces by different application methods (i.e, impregnation, exhausting, coating etc.). The m-PCMs applied to the fabric actively balance the heat energy released or absorbed from the body to create an insulation layer between the external environment and the human body, contributing to the comfort of the garment. In this study, cotton woven fabrics were coated with two different microcapsules in a sample pad batch machine. In addition to heat regulation and morphological properties of fabrics, the effect of microcapsule type on strength, rubbing and sweat fastness of fabrics was investigated.

Keywords: Microencapsulated Phase Change Material, Smart Textile, Thermoregulation, Coating, Woven Fabric

1. GİRİŞ

Giysi sistemlerine gelişmiş termal işlevsellik sağlamak amacıyla kullanılan mikrokapsüllenmiş faz değiştiren maddeler (m-FDM) son yıllarda büyük ilgi görmeye başlamıştır. Isı yönetimi yapabilme özelliğine sahip olan bu maddeler faz değiştiren malzemeler (FDM) olarak isimlendirilmektedir. Faz değiştirme aralığı olarak bilinen belirli bir sıcaklık değişiminde bir fazdan diğer faza geçiş yapabilen mikrokapsüllerin en belirgin özelliği, hal değişimi esnasında ısı absorbe eden ve depolayabilen; tersi durumda ise depoladığı ısıyı açığa çıkarma yeteneğine sahip olmasıdır. Dolayısıyla erime ve katılaşma sırasındaki sıcaklıklarının sabit olması, bu maddelerin benzerlerine kıyasla daha fazla ısı absorbe etmesini sağlamaktadır (Yamagishi ve ark., 1999; Nomura ve ark., 2017). Giysilerde termal konforu iyileştirmek ve ısı düzenleme yeteneğine sahip ürünler elde etmek için kullanılan faz değiştiren malzemeler, etken maddeyi kapsül içerisinde hapsederek dış ortamdaki korumak ve faz değişimini kapsül içerisinde gerçekleştirmek amacıyla mikrokapsüller halinde üretilir (Şekil 1). Böylece FDM'nin kullanımı kolaylaşırken, yüzey alanı artışı, ısı transferi açısından daha elverişli bir koşul oluşturmaktadır (Kuru ve Aksoy, 2012; Mondal, 2008).



Şekil 1. Faz Değişiminin Şematik Gösterimi (Mondal, 2008)

Faz değiştiren mikrokapsüller ilave edilerek farklı kullanım amacına uygun tekstil ürünlerinin geliştirilmesi üzerine yapılan bilimsel ve teknolojik çalışmalar her geçen gün daha da önem kazanmaktadır. Yapılan çalışmalarda, hal değiştirme sıcaklık aralığı insan vücut sıcaklığına yakın olan, özellikle parafin esaslı faz değiştiren malzemelerin üretimi ve mikrokapsüllemesi, farklı yöntemler ile tekstil ürünlerine uygulanması ve karakterizasyonu üzerine odaklanıldığı görülmektedir. Isıl enerji depolama için kullanılan parafinler mikro boyutlarda kapsülleme işlemi ile artan yüzey alanı sayesinde daha etkin ısı transferi ve termal düzenleme fonksiyonuna sahip tekstil yüzeyleri üretiminde özellikle tercih edilmektedir (Sarier ve Onder, 2007). Enerji depolama ve ısı yalıtımında kullanılan m-FDM'lerin potansiyel uygulama alanları; sıcaklık düzenleyici tekstiller, ısıya duyarlı malzemeler, klima uygulamaları, güneş enerjisi depolama sistemleri, seralar, elektronik ısı yönetimi ve biyomedikal sistemlerdir (Sarier ve ark., 2011).

Günümüzde mikrokapsül ilave edilerek kullanım amacına uygun fonksiyonel tekstil ürünlerinin geliştirilmesi her geçen gün daha da önem kazanmaktadır. Literatürde m-FDM içeren termal enerji depolama sistemlerinin tekstil yapıları ile birlikte kullanımı, çalışma prensibi ve tekstil yüzeylerine aplikasyonu konularında geniş kapsamlı değerlendirmeler sunulmuştur (Mondal, 2008; Sharma ve ark., 2009). Tözüm ve Aksoy (2014), emdirme yöntemi ile ısı depolama kapasitesi 140 J/g ve parçacık boyutu 1-5 µm olan Mikrathemic P mikrokapsülü uygulanan pamuklu dokuma kumaşların 6,1749 J/g ısı depolama kapasitesine sahip olduğunu belirlemiştir. Taramalı elektron mikroskop görüntüleri ile kumaş yapısındaki liflere bağlanmış küresel yapıya mikrokapsül varlığı tespit edilmiştir. m-FDM uygulanmış kumaşların hava geçirgenlik değerlerinin, işlem görmemiş kumaşlara kıyasla azaldığı; mukavemet değerlerinin ise önemli bir değişim göstermediği tespit edilmiştir (Tözüm ve Aksoy, 2014). Tözüm ve ark. (2012) başka bir çalışmada, dokuma ve örme kumaşlara emdirme metodu ile farklı miktarlarda mikrokapsül içeren reçeteler uygulayarak ısı depolama kapasiteleri arasındaki değişimi araştırmıştır. Diferansiyel taramalı kalorimetre sonuçlarına göre m-FDM uygulanmış kumaşların ısı depolama kapasitelerinin 1-2,5 j/g arasında değişim gösterdiği; işlem görmemiş kumaş ile m-FDM içeren kumaş sıcaklıkları arasındaki farkın dokuma kumaşlarda 1 °C, örme kumaşlarda ise 3 °C ye ulaştığı termal kamera ile tespit edilmiştir (Tözüm ve ark., 2012). Güler ve Kut (2011), kompleks koaservasyon yöntemini kullanarak jelatin-arap zankı kabuk materyali içerisine yağ asidi karışımının hapsedilmesiyle m-FDM üretimi ve poliester perdelik kumaşlara emdirme yöntemi ile aplikasyonu çalışmalarında bulunmuştur. DSC sonuçlarına göre m-FDM uygulanmış kumaşların ortam ısıl konforunu 0,5-1,5 °C iyileştirdiği tespit edilmiştir (Güler ve Kut, 2011). Bendkowska ve Wrzosek (2009) emdirme ve şablon baskı yöntemi ile m-FDM applike edilmiş nonwoven kumaşların termal özelliklerini incelemiştir. Bu amaçla nonwoven kumaşların sıcaklık düzenleme faktörü (TRF) belirlenmiştir. TRF sonuçlarının kumaş konfeksiyonunda giysi tasarımcıları için önemli bilgiler sağladığı ve giysi sistemlerinin mikroklima şartlarının optimize edilmesi amacıyla kullanılabileceği ifade edilmiştir (Bendkowska ve Wrzosek, 2009). Bir başka çalışmada, melamin-formaldehit mikrokapsülleri içeren termoregülasyon yeteneğine sahip pamuklu kumaşlar, farklı oranlarda çapraz bağlayıcı kullanılarak oluşturulan reçeteler varlığında emdirme yöntemi ile üretilmiştir. Kumaşların termal düzenleme özellikleri üzerinde m-FDM ve binder miktarının etkisi DSC ile araştırılmıştır. m-FDM içeren kumaşlara ait başlıca endotermik pikin yüksek sıcaklıklara kaydığı bir başka deyişle erime hal değişiminin daha yüksek sıcaklıklarda gerçekleştiği tespit edilmiştir. Etkili bir ısıl düzenleme etkisi için kullanılması gereken çapraz bağlayıcı ve m-FDM miktarının sırasıyla 20 g/m² ve 40 g/m² olduğu rapor edilmiştir (Salaün ve ark., 2010).

Bu çalışmada, Mikrathemic P-P ve Itofinish PCM mikrokapsülleri ile işlem görmüş pamuklu kumaşlarda mikrokapsül türünün, ısı düzenleme ve morfolojik özellikleri yanında kumaşların mukavemet, sürtme ve ter haslığı özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla m-FDM içeren %100 pamuklu dokuma kumaşlar numune pad-batch makinasında kaplama yöntemine göre hazırlanmıştır. Kumaşların termal düzenleme özellikleri diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) ve yüzey morfolojik özellikleri ise taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile analiz edilmiştir. Kumaşların kopma ve yırtılma mukavemet analizleri Titan ve Elmatear test cihazlarında gerçekleştirilmiştir. Kumaşların kuru ve yaş sürtme haslıkları ise Crockmetre cihazı ile belirlenmiştir.

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

2.1. Malzemeler

Bu çalışmada Kipaş firmasından temin edilen, ön terbiye ve boyama işlemleri tamamlanmış (düz boyalı) bitim işlemlerine hazır; atkı sıklığı 37 tel/cm, çözgü sıklığı 57 tel/cm, gramajı 118 g/m², örgüsü 2/1 S dimi, atkı ve çözgü iplik numaraları Ne 50/1 olan %100 pamuklu dokuma kumaşlar kullanılmıştır. Mikrokapsüllemiş faz değiştiren malzeme olarak; erime sıcaklığı 28 °C, katılma sıcaklığı 24 °C, özünde %75 oranında n-oktadekan ve kabuğunda %25 melamin formaldehit içeren mikrokapsüller (Mikrathemic P-P, Devan) ile erime sıcaklığı 32 °C, katılma sıcaklığı 29 °C, özünde %70 oranında n-nonadekan ve kabuğunda %30 reçine içeren (Itofinish PCM, LJ Specialities) iki farklı ticari m-FDM kullanılmıştır. Her iki m-FDM aplikasyonu için çapraz bağlayıcı olarak (Mikracat B, Devan), pH ayarlaması için asetik asit ve kıvamlaştırıcı (Pigmapol PF, Kemiteks) tercih edilmiştir.

2.2. Kumaşlara m-FDM Aplikasyonu

Çalışmada iki farklı mikrokapsüllemiş faz değiştiren malzeme, detayları Tablo 1'de verilen reçeteler kullanılarak %100 pamuklu dokuma kumaşlara kaplama aplikasyon yöntemi ile uygulanmıştır. Kaplama işlemi Ataç Numune Ram makinasında gerçekleştirilmiştir.

Tablo 1. Uygulanan Kaplama Reçetesi

Reçete 1	Reçete 2
50 g/l Mikrathemic P-P	50 g/l Itofinish PCM
20 g/L Mikracat B	20 g/L Mikracat B
10 g/l Pigmapol PF	10 g/l Pigmapol PF

Kaplama uygulaması sonrası kumaşlar numune Ram makinasında 120 °C sıcaklık ve 1 m/dk hızında geçirilerek kurutulmuş; 150 °C sıcaklık ve 1 m/dk geçiş hızında fikse edilmiştir.

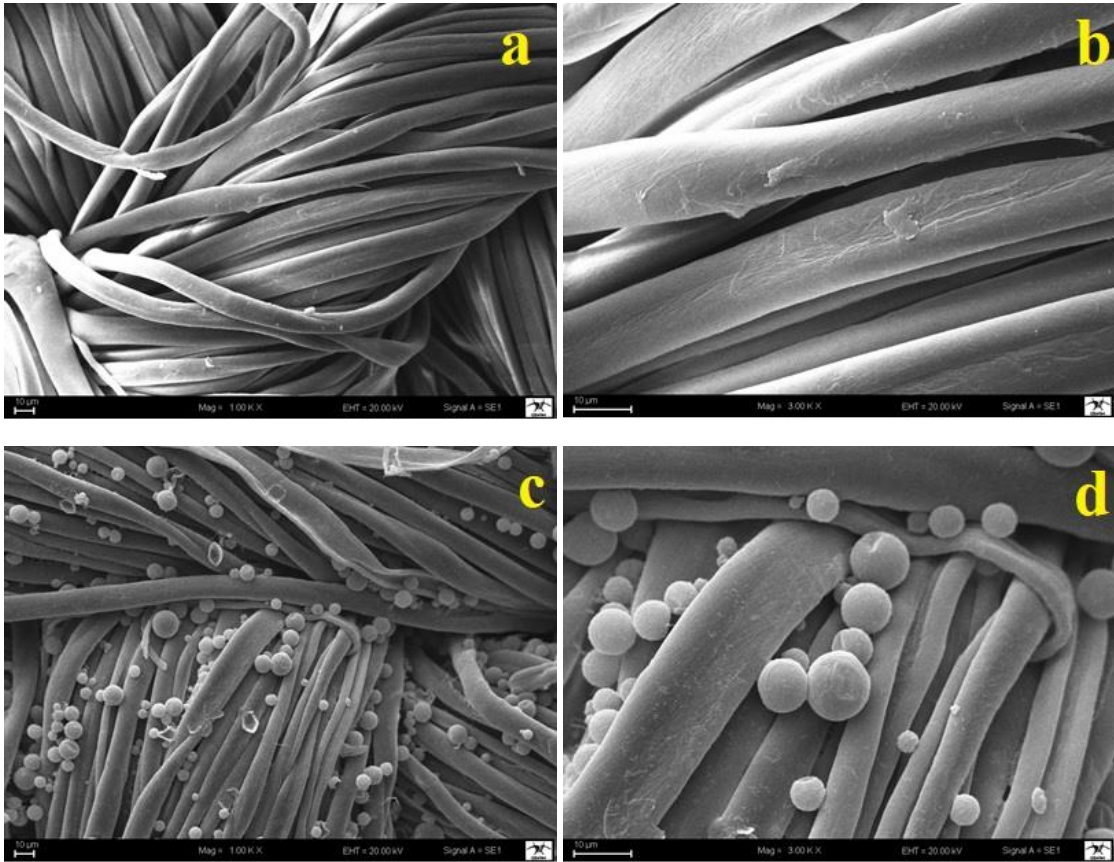
2.3. m-FDM Uygulanmış Kumaşların Karakterizasyonu

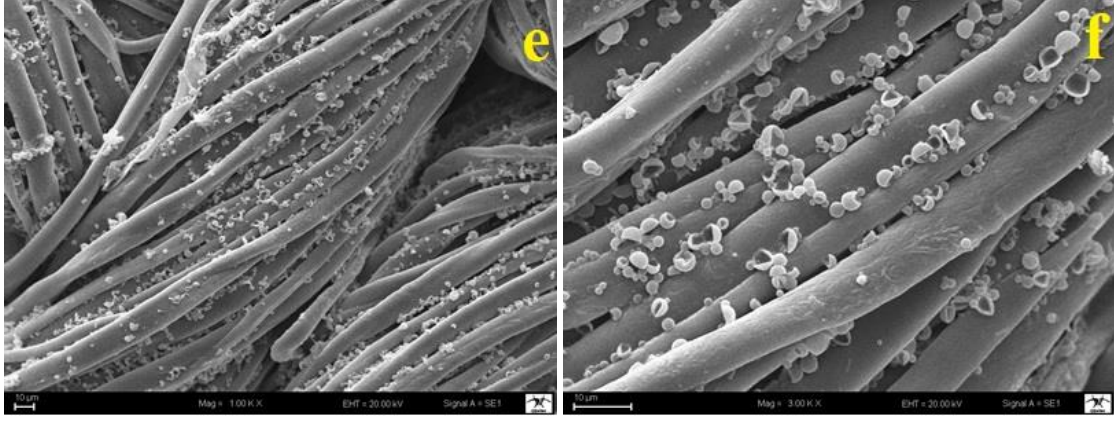
m-FDM uygulanmış kumaşların erime ve katılaşma hal değişim sıcaklıkları ile entalpi değerleri, 0-80 °C sıcaklık aralığında 10 °C/dk ısıtma/soğutma hızında azot atmosferinde diferansiyel taramalı kalorimetre (Perkin-Elmer DSC 8000) cihazı ile analiz edilmiştir. Kumaşlarda mikrokapsül varlığını açıklamak için taramalı elektron mikroskobu tercih edilmiştir. Kumaşların morfolojik analizleri taramalı elektron mikroskobu (Carl Zeiss Evo LS10) ile gerçekleştirilmiştir. Kumaşların kopma mukavemetlerinin tayini TS EN ISO 13934-1 standardı esas alınarak Titan ölçüm cihazında gerçekleştirilmiştir. Yırtılma mukavemeti ise TS EN ISO 13937-1 test standardı kullanılarak sarkaç prensibine göre çalışan Elmatear test cihazında ölçülmüştür. Kumaşların asidik ve bazik ter haslık değerleri EN ISO 105-E04 standardı esas alınarak yapılmıştır. Kuru ve yaş sürtme haslıkları ise ISO 105-X12 esas alınarak Crockmetre cihazı ile tespit edilmiştir.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. m-FDM Uygulanmış Kumaşların Morfolojik Analizi

Pamuklu kumaş yapısında mikrokapsül varlığını ve dağılımını belirlemek için m-FDM uygulanmamış ve uygulanmış kumaşlara ait SEM görüntüleri incelenmiştir (Şekil 2).





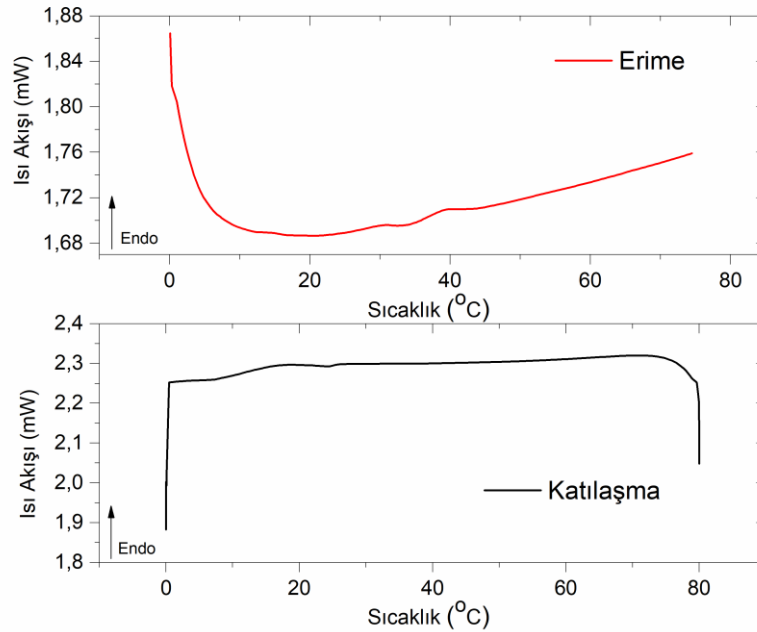
Şekil 2. Kumaşların SEM Görüntüleri (a,b) İşlem Görmemiş Kumaş, (c,d) Mikrathermic P-P ile Kaplanmış Kumaş, (e,f) Itofinish PCM ile Kaplanmış Kumaş (Büyütme Oranları: (a,c,e) 1.00 KX, (b,d,f) 3.00 KX)

Taramalı elektron mikroskobu analizi sonucu m-FDM içermeyen pamuklu dokuma kumaşların düzgün ve pürüzsüz bir yüzey yapısına sahip olduğu görülmüştür (Şekil 2(a-b)). Mikrathermic P-P mikrokapsülü ile işlem görmüş pamuklu kumaş yapısında liflere bağlanmış dairesel ve küresel formda mikrokapsül varlığı; Itofinish PCM ile işlem görmüş kumaşlarda ise lifler arasındaki boşluklara ve lif yüzeylerine yerleşen dairesel formu deforme olmuş düzensiz mikrokapsüllerin varlığı tespit edilmiştir (Şekil 2(c,d,e,f)). Itofinish PCM mikrokapsülünün Mikrathermic P-P'e kıyasla deforme olmuş mikrokapsül yapısının kaplama prosesi sırasında maruz kaldığı mekanik etkilere karşı reçine esaslı duvar malzemesinin melamin formaldehit esaslı duvar malzemesine göre daha az dayanıklı olması şeklinde yorumlanmıştır. Kaplama uygulaması ile gerek Mikrathermic P-P gerekse Itofinish PCM ile işlem görmüş kumaşlarda nispeten homojen dağılımlı mikrokapsül varlığı izlenmiştir. Yapılan ölçümler sonucu kumaş yüzeyine dağılan Mikrathermic P-P mikrokapsüllerin ortalama çapı $7,5 \mu\text{m}$, Itofinish PCM mikrokapsüllerinin ortalama çapı ise $2,5 \mu\text{m}$ olarak tespit edilmiştir (Şekil 2).

3.2. m-FDM Uygulanmış Kumaşların Isı Düzenleme Özelliklerinin Analizi

Mikrokapsül ile kaplanmış kumaşların $0-80 \text{ }^\circ\text{C}$ aralığında ısıtılması sırasında, katı halde düzenli ve homojen bir yapıya sahip olan mikrokapsüller yavaş yavaş daha düzensiz ve heterojen bir yapıya sahip olan sıvı faza geçer. Dolayısıyla mikrokapsüller eriyik halde tamamen öz maddesinin termal davranışını gösterir. Ters durumda soğutma ise, daha düzensiz sıvı fazdan daha düzenli katı faza geçişi ifade eder.

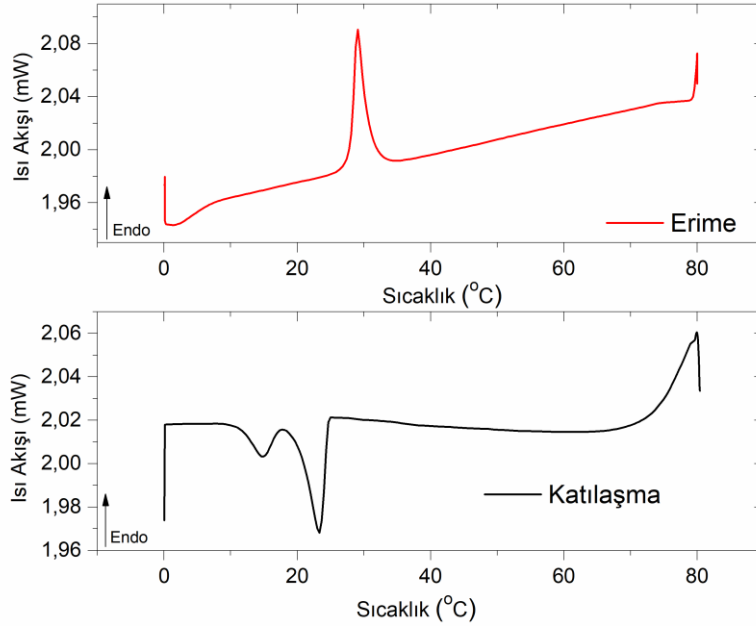
İki farklı m-FDM ile işlem görmüş ve görmemiş pamuklu kumaşların $10 \text{ }^\circ\text{C}/\text{dk}$ hızda $0-80 \text{ }^\circ\text{C}$ arasındaki ısıtma ve soğutma süresince meydana gelen endotermik ve ekzotermik entalpi değişimleri Şekil 3-5'te verilmiştir.



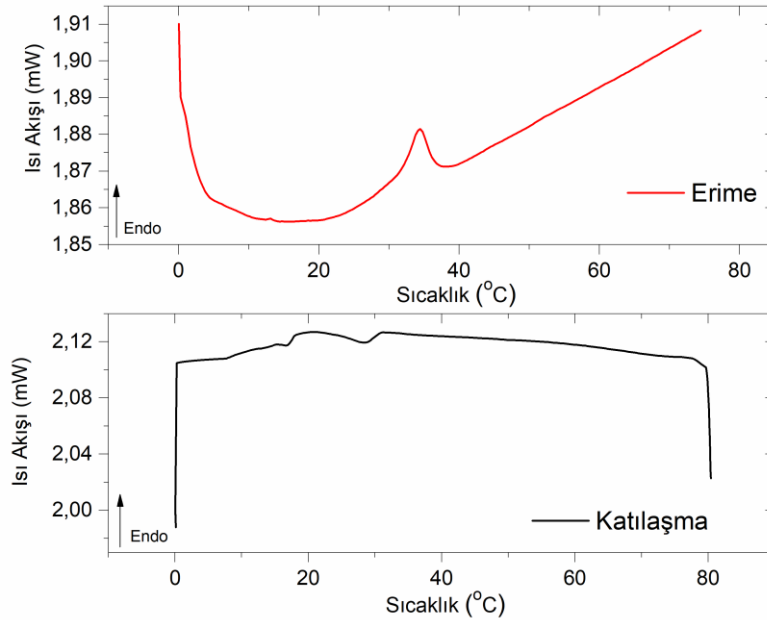
Şekil 3. İşlem Görmemiş Pamuklu Kumaşa Ait DSC Eğrisi

Yapısında mikrokapsül içermeyen pamuklu kumaşta beklenildiği gibi 0-80 °C sıcaklık aralığında erime ya da katılaşmaya ait herhangi bir hal değişimi gözlenmemiştir (Şekil 3).

Şekil 4 ve Şekil 5 incelendiğinde, yapısında Mikrathermic P-P ve Itofinish PCM m-FDM içeren pamuklu kumaşlarda erime ve katılaşma hal değişimi ve entalpi değişimlerini ifade eden pik noktaları ve alanları ortaya çıkmıştır. DSC eğrilerinden endotermik ve ekzotermik yöndeki erime ve katılaşma pikleri altında kalan alandan kumaşların depoladığı ve yaydığı ısı enerjisi miktarı ile hal değişiminin başladığı ve bittiği noktayı gösteren sıcaklık dereceleri izlenebilmektedir.



Şekil 4. Mikrathermic P-P ile İşlem Görmüş Kumaşın DSC Eğrileri



Şekil 5. Itofinish PCM ile İşlem Görmüş Kumaşın DSC Eğrileri

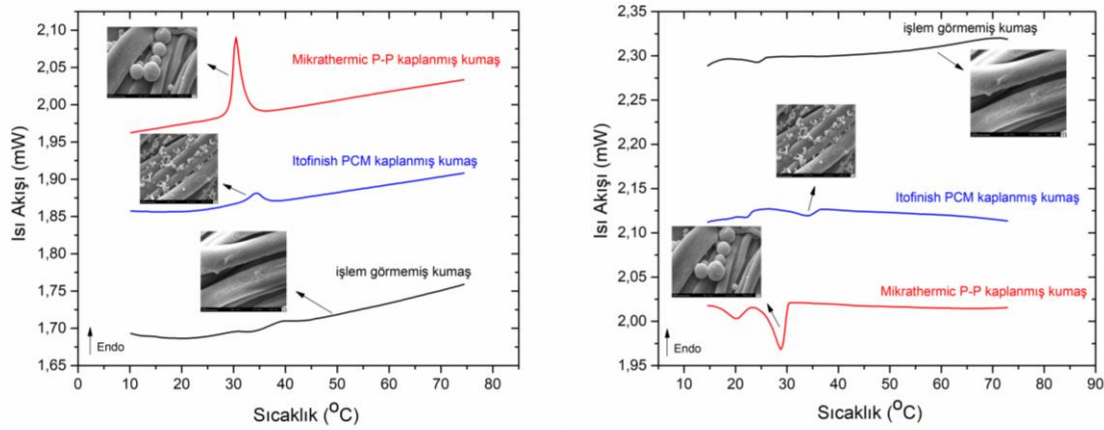
Tablo 2’de kumaşlara ait DSC analizinden elde edilen hal değişimine ait entalpi ve sıcaklık değerleri ile SEM analizinden elde edilen mikrokapsüllemiş faz değıştiren maddelere ait ortalama değeri verilmiştir.

Tablo 2. Kumaşlara Ait Hal Değişimi Entalpi ve Sıcaklık Değerleri

m-FDM	Erime Sıcaklığı (°C)	Katılaşma Sıcaklığı (°C)	Erime Entalpisi (j/g)	Katılaşma Entalpisi (j/g)	Ortalama m-FDM Çapı (µm)
Mikrathemic P-P	27,61	24,56	2,70	-1,49	7,50
Itofinish PCM	31,20	30,67	1,62	-1,20	2,50

Şekil 4, Şekil 5 ve Tablo 2'den elde edilen verilere göre, Mikrathemic P-P mikrokapsülü ile kaplanmış kumaşlarda erime hal değişimi 27,61°C - 31,04°C arasında gerçekleşmiş ve erime süresince pamuklu kumaşın depoladığı ısı enerjisi miktarı 2,70 j/g ölçülmüştür. Mikrathemic P-P mikrokapsülü için katılaşma hal değişimi ise 24,56°C - 19,97°C aralığında gerçekleşmiş ve katılaşma sırasında pamuklu kumaş 1,49 j/g ısı açığa çıkarmıştır. Itofinish PCM ile işlem görmüş pamuklu kumaşlarda erime hal değişimi 31,20°C - 34,65°C aralığında gerçekleşmiş ve erime süresince pamuklu kumaşın depoladığı ısı enerjisi miktarı 1,62 j/g ölçülmüştür. Itofinish PCM mikrokapsülü için katılaşma hal değişimi ise 30,67°C - 23,56°C aralığında gerçekleşmiş ve katılaşma sırasında pamuklu kumaş 1,20 j/g ısı açığa çıkarmıştır (Tablo 2). Itofinish PCM mikrokapsülleri, Mikrathemic PCM mikrokapsüllerine kıyasla daha yüksek sıcaklıklarda hal değiştirmiştir. Hal değişim piklerinin daha yüksek sıcaklıklara kayması durumu literatürde mikrokapsülün daha düşük termal iletkenliğe sahip olması şeklinde açıklanmıştır (Salaün ve ark., 2010). Bu durum, Itofinish PCM mikrokapsülünün termal iletkenlik değerinin Mikrathemic P-P'e kıyasla daha düşük olması sonucu daha yüksek sıcaklıklarda erime ve katılaşma meydana getirdiği şeklinde yorumlanmıştır.

Şekil 6'da ise Mikrathemic P-P ve Itofinish PCM mikrokapsülleri ile kaplanmış pamuklu kumaşların erime ve katılaşma hal değişimleri karşılaştırmalı olarak birlikte gösterilmiştir.

**Şekil 6.** Mikrathemic P-P ve Itofinish PCM Mikrokapsülleri ile Kaplanmış Kumaşların Erime (a) ve Katılaşma (b) Hal Değişim Eğrilerinin Karşılaştırmalı Gösterimi

Buna göre erime ve katılaşma entalpi değerleri ve hal değişim sıcaklıkları ile hal değişimi sırasında meydana gelen en belirgin ısı akış miktarı, Mikrathemic P-P ile işlem görmüş pamuklu kumaşta elde edilmiştir. Dolayısıyla Mikrathemic P-P mikrokapsülü uygulanmış kumaşın ısı enerjisi depolama ve açığa çıkarma kapasitesi daha yüksektir. Mikrathemic P-P mikrokapsüllerinin ortalama çap değerlerinin Itofinish PCM mikrokapsülüne göre üç kat daha büyük olmasının bu sonuca neden olduğu düşünülmektedir. Ayrıca SEM analizleri neticesinde kaplama prosesi sonrası Itofinish PCM mikrokapsüllerinde görülen deforme olmuş m-FDM yapısının ısı düzenleme özelliklerini olumsuz etkilediği tahmin edilmektedir (Şekil 2(e,f)).

Mikrokapsüller ile kaplanmış kumaşlarda Mikrathemic P-P mikrokapsüllerinde daha belirgin, Itofinish PCM mikrokapsüllerinde ise daha az belirgin olmak üzere katılaşma döngüsünde ilki kuvvetli ikincisi daha zayıf iki adet ekzotermik pik gözlenmiştir. Katılaşma sıcaklığı ve entalpi değerleri açısından her iki m-FDM için de katılaşmanın başladığı ilk pik dikkate alınmıştır. Literatürde gerçekleşen bir çalışmada bu durumun nedeni olarak mikrokapsülün farklı katılaşma aşamalarına sahip olması gösterilmiştir (Salaün ve ark., 2010). Başka bir çalışmada ise ısıtma veya soğutma sırasında birden fazla endotermik ve ekzotermik piklerin varlığı parafine ait katı-katı ve katı-sıvı geçişlerine bağlanmıştır (Salaün ve ark., 2010). Literatürde birden fazla ekzotermik pik görülmesi ile ilgili olarak bir sıvının katılaşmasına engel olacak şekilde donma derecesinin altına kadar soğutulması şeklinde ifade edilen derin soğutma (supercooling) kavramından bahsedilmiştir (Huang ve ark., 2010). Bu durum faz değiştiren mikrokapsüllerin boyutlarının küçülmesiyle homojen veya heterojen dağılım gösteren öz maddenin daha yüksek oranda derin soğutma etkisine neden olacağı şeklinde ifade edilmiştir (Lu ve Tassou, 2012; Gunther ve ark., 2010).

Birçok araştırmacı mikrokapsüllerin derin soğumasına neden olan sebepleri araştırmış; erime ve katılaşma süresince daha tutarlı sıcaklık değişimleri elde etmek amacıyla derin soğutma etkisini azaltmak için bazı yöntemler önermiştir. Fan ve ark.

(2004) melamin formaldehit ile kaplanmış n-oktadekan öze sahip mikrokapsülleri in-situ polimerizasyon yöntemi ile hazırlamış; sodyum klorür, 1-oktadekanol ve parafin vb öz maddelerin erime, katılma, morfoloji ve dağılım özelliklerine etkisini araştırmıştır. Mikrokapsülasyon sırasında oluşturulan emülsiyona %6 oranında sodyum klorür ilave edilmesiyle derin soğumanın önlenmediği ancak mikrokapsüllerin düzgün olmayan yüzey morfolojilerine sahip olduğu ve iyi bir dağılım göstermedikleri rapor edilmiştir. Benzer şekilde mikrokapsülasyon sırasında emülsiyon çözeltisindeki öz maddeye kütlece %9 oranında 1-oktadekanol veya %20 oranında ticari parafin eklenmesiyle derin soğuma etkisinin ortadan kaldırıldığı ifade edilmiştir (Fan ve ark., 2004).

Gunther ve ark. (2010), n-hekzadekan emülsiyonlarının derin soğuma etkisi üzerinde çalışmalar gerçekleştirmiştir. Bu amaçla tanecik boyutu 0,1-20 µm arasında değişen farklı hekzadekan-su yüzey aktif madde sistemleri hazırlanmıştır. Daha küçük tanecik boyutuna sahip mikrokapsüllerde derin soğuma etkisinin artması durumu, yüzey aktif madde türünün erime ve katılma sıcaklığı üzerindeki etkisi olarak yorumlanmıştır (Gunther ve ark., 2010). Huang ve ark. (2010), farklı parafin-su emülsiyonlarının erime ve katılma davranışı üzerinde sistematik bir çalışma yapmış ve parafin-su emülsiyonlarında farklı yüzey aktif maddeler kullanarak 0,2-12,5 µm boyutlu tanecikler üretmiştir. Daha ince tanecikler halinde dağılmış mikrokapsüllerde derin soğuma sıcaklığının artarak 15 °C civarında görüldüğü rapor edilmiştir. Bu durum, derin soğuma etkisi üzerinde öz madde (ör; parafin) türü ve miktarının çok önemli bir etkiye sahip olduğu şeklinde yorumlanmıştır (Huang ve ark., 2010).

Mikrokapsülleme sırasında yapıda kalan bazı safsızlıklar donma noktasının düşmesine veya birden fazla katılma noktasının oluşumuna neden olabilir (Sarier ve ark., 2008, Sarier ve Önder, 2012). Bu sonuçlara göre Mikrathemic P-P ve Itofinish PCM mikrokapsüllerinde özellikle soğuma sırasında daha düşük sıcaklıklarda ortaya çıkan ikincil ekzotermik piklerin kapsüllerin üretimi sırasında yapıya katılan safsızlıklar, mikrokapsülasyon sırasında kullanılan öz ve kabuk madde tür ve miktarı, mikrokapsüllerin yüzey morfolojileri, küçük boyutları ve dağılımı yüzünden meydana geldiği tahmin edilmektedir.

3.3. m-FDM Uygulanmış Kumaşların Mekanik ve Haslık Özelliklerinin Analizi

Tablo 3'te işlem görmemiş kumaş ile iki farklı mikrokapsül ile işlem görmüş pamuklu kumaşların kopma ve yırtılma mukavemet sonuçları verilmiştir. Bununla birlikte kumaşların ölçülen gramaj değerleri de Tablo 3'te sunulmuştur.

Tablo 3. Kumaşların Mekanik Özellikleri

Kumaş Türü	Gramaj (g/m ²)	Kopma Mukavemeti (kN)		Yırtılma Mukavemeti (gf)	
		Çözgü	Atkı	Çözgü	Atkı
İşlemsiz	129	112	48	1631	1517
Mikrathemic P-P	130	90	35	1631	1508
Itofinish PCM	134	103	43	1631	1631

Kumaşlarda Mikrathemic P-P ile aplikasyon sonucu meydana gelen gramaj artışı %0,7 iken, Itofinish PCM ile yapılan aplikasyon sonucu %3,9 gramaj artışı meydana gelmiştir. Bu sonuca göre, ortalama partikül boyutu daha az olan Itofinish PCM mikrokapsülleri pamuklu kumaşa daha fazla oranda bağlanmıştır. Bununla birlikte nonadekan esaslı bir FDM olan Itofinish PCM'in oktadekan esaslı FDM olan Mikrathemic P-P'e kıyasla molekül ağırlığının daha fazla olması, daha yüksek gramaj elde edilmesinde bir etken olarak yorumlanmıştır. Kumaşa mikrokapsül uygulamasının çözgü ve atkı yönlerinde kopma mukavemeti üzerinde olumsuz etkiye sahip olduğu görülmüştür. Mikrathemic P-P ile kaplanmış kumaşlarda Itofinish PCM'e kıyasla daha fazla oranda kopma mukavemeti düşüşü meydana gelmiştir. Mikrathemic P-P ve Itofinish PCM ile işlem görmüş kumaşlarda yırtılma mukavemeti değerlerinde düşüş görülmemiş, aksine özellikle Itofinish PCM ile kaplanmış kumaşın atkı yönlü yırtılma mukavemeti değerinde artış tespit edilmiştir (Tablo 3). Literatürde mekanik dayanımın artışı ile mikrokapsülün öz maddesinin sızıntı olasılığının arttığını ve sonuçta ısı depolama kapasitesinin ve termal özelliklerinin azaldığı bildirilmiştir (Salaün ve ark., 2010; Sarier ve ark., 2008). Dolayısıyla daha yüksek mukavemet değerine sahip Itofinish PCM mikrokapsülü ile işlem görmüş kumaşa daha düşük ısı depolama kapasitesi elde edilmesi literatür ile uyumludur.

Sürtme haslığı testi, işlemsiz ve mikrokapsül ile işlem görmüş boyalı kumaşları kuru veya yaş halde sürtmeye tabi tutulduğunda rengin gösterdiği dayanıklılığı kontrol etmek amacıyla yapılmıştır. Standart beyaz kumaş üzerinde meydana gelen renk bulaşması 1'den 5'e kadar derecelendirilen (1=çok kötü, 5=çok iyi) gri skala ile değerlendirilmiştir. Mikrokapsül içeren ve içermeyen pamuklu kumaşlar asidik ve bazik ter haslığının tespit edilmesi için standartta belirtilen çözeltiler ile muamele edilerek ana kumaştaki solma ve pamuk refakat bezindeki akmaya bakılarak 1-5 arası derecelendirilen gri skala ile değerlendirilmiştir. Tablo 4'te işlem görmemiş kumaş ile Mikrathemic P-P ve Itofinish PCM ile işlem görmüş pamuklu kumaşların sürtme ve ter haslık sonuçları gösterilmiştir.

Tablo 4. Kumaşların Sürtme ve Ter Haslık Değerleri

Kumaş Türü	Sürtme Haslığı		Ter Haslığı (Pamuk)	
	Kuru	Yaş	Asit	Alkali
İşlemsiz	4/5	2/3	4	4
Mikrathemic P-P	4	3	4	4
Itofinish PCM	4	3	4	3/4

Mikrokapsül ile işlem görmemiş kumaşta daha düşük yaş sürtme haslığı değeri elde edilmiştir. Bunun en önemli nedeni, yeterince fikse olmamış boyarmadde moleküllerinin kumaş yüzeyinden uzaklaşmasıdır. İşlem görmemiş kumaşın asidik ve bazik ter haslığı değerleri ise iyi seviyede elde edilmiştir. Pamuklu kumaşlara mikrokapsül uygulaması ile kuru sürtme haslık değerleri yarım puan azalmış, yaş sürtme haslık değerleri ise yarım puan artmıştır. Mikrokapsül uygulaması sonucu kuru sürtme haslık değerleri iyi seviyede, yaş sürtme haslık değerleri ise orta seviyede elde edilmiştir. Mikrokapsül uygulamasının kumaşların ter haslığı üzerinde önemli bir değişime neden olmadığı tespit edilmiş ve iyi seviyede ter haslık sonuçları elde edilmiştir (Tablo 4).

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, Mikrathemic P-P ve Itofinish PCM mikrokapsülleri ile kaplanmış pamuklu dokuma kumaşlarda mikrokapsül türünün, ısı düzenleme ve morfolojik özellikleri yanında kumaşların mukavemet, sürtme ve ter haslığı performans özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla mikrokapsüllemiş pamuklu dokuma kumaşlar numune pad-batch makinasında kaplama yöntemine göre hazırlanmıştır.

Mikrokapsüllemiş FDM içermeyen pamuklu dokuma kumaşların düzgün ve pürüzsüz bir yüzey yapısına sahip olduğu; Mikrathemic P-P ve Itofinish PCM mikrokapsülleri ile kaplanmış kumaş yapılarında ise liflere ve lifler arasındaki boşluklara yerleşen mikrokapsül varlığı tespit edilmiştir. Kumaş lif yüzeyinde dairesel ve küresel yapıya sahip nispeten homojen dağılmış Mikrathemic P-P mikrokapsülleri ile dairesel formu deforme olmuş düzensiz Itofinish PCM mikrokapsülleri gözlenmiştir. Itofinish PCM mikrokapsülleri, Mikrathemic PCM mikrokapsüllerine kıyasla daha yüksek sıcaklıklarda hal değiştirmiştir. Erime ve katılma entalpi değerleri ve hal değişim sıcaklıkları ile hal değişimi sırasında meydana gelen en belirgin ısı akış miktarı, Mikrathemic P-P ile işlem görmüş pamuklu kumaşta elde edilmiştir. Mikrokapsüller ile kaplanmış kumaşlarda Mikrathemic P-P mikrokapsüllerinde daha belirgin, Itofinish PCM mikrokapsüllerinde ise daha az belirgin olmak üzere katılma döngüsünde iki adet ekzotermik pik gözlenmiştir. Soğuma sırasında daha düşük sıcaklıklarda ortaya çıkan ikincil ekzotermik piklerin kapsüllerin üretimi sırasında yapıya katılan safsızlıklar, mikrokapsülasyon sırasında kullanılan öz ve kabuk madde tür ve miktarı, mikrokapsüllerin yüzey morfolojileri, küçük boyutları ve dağılımı yüzünden meydana geldiği tahmin edilmektedir. Kumaşa mikrokapsül uygulamasının çözgü ve atkı yönlerinde kopma mukavemeti üzerinde olumsuz etkiye sahip olduğu; Mikrathemic P-P ile kaplanmış kumaşlarda Itofinish PCM'e kıyasla daha fazla oranda kopma mukavemeti düşüşü meydana geldiği görülmüştür. Mikrathemic P-P ve Itofinish PCM ile işlem görmüş kumaşlarda yırtılma mukavemeti değerlerinde önemli bir değişim görülmemiştir. Pamuklu kumaşlara mikrokapsül uygulaması ile kuru sürtme haslık değerleri azalmış, yaş sürtme haslık değerleri ise artmıştır. Mikrokapsül uygulamasının kumaşların ter haslığı üzerinde önemli bir değişime neden olmadığı tespit edilmiştir.

5. TEŞEKKÜR

Bu çalışma Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından (Proje No: 2016/5-14 YLS) desteklenmiştir. Kumaşların temini ve m-FDM uygulamaları Kipaş Kumaş Boya İşletmesinde gerçekleştirilmiştir.

6. KAYNAKLAR

- Bendkowska, W., Wrzosek, H. (2009). Experimental Study of the Thermoregulating Properties of Nonwovens Treated with Microencapsulated PCM, *Fibres & Textiles in Eastern Europe*, 17, 87-91.
- Fan, Y.F., Zhang, X.X., Wang, X.C., Li, J., Zhu, Q.B. (2004). Supercooling Prevention of Microencapsulated Phase Change Material, *Thermochimica Acta*, 413, 1-6.
- Gunther, E., Schmid, T., Mehling, H., Hiebler, S., Huang, L. (2010). Subcooling in Hexadecane Emulsions, *International Journal of Refrigeration*, 33, 1605-1611.
- Güler, Z., Kut, D. (2011). Poliester perdelik Kumaşta Isıl Regülasyon Sağlamaya Yönelik Mikrokapsül Hazırlanması ve Uygulanması, *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 16(1), 105-115.
- Huang, L., Gunther, E., Doetsch, C., Mehling, H. (2010). Subcooling in PCM emulsions—Part 1: experimental, *Thermochimica Acta*, 509, 93-99.

- Kuru, A., Aksoy, S.A. (2012). Faz Değişiren Maddeler ve Tekstil Uygulamaları, *Tekstil ve Mühendis*, 19, 41-48.
- Lu, W., Tassou, S.A. (2012). Experimental study of the Thermal Characteristics of Phase Change Slurries for Active Cooling, *Applied Energy*, 91, 366–374.
- Mondal, S. (2008). Phase Change Materials for Smart Textiles – An overview, *Applied Thermal Engineering*, 28, 1536–1550.
- Nomura, T., Sheng, N., Zhu, C., Saito, G., Hanzaki, D., Hiraki, T., Akiyama, T. (2017). Microencapsulated Phase Change Materials with High Heat Capacity and High Cyclic Durability for High-Temperature Thermal Energy Storage and Transportation, *Applied Energy*, 188, 9–18.
- Salaün, F., Devaux, E., Bourbigot, S., Rumeau, P. (2010). Thermoregulating Response of Cotton Fabric Containing Microencapsulated Phase Change Materials, *Thermochimica Acta*, 506, 82–93.
- Salaün, F., Devaux, E., Bourbigot, S., Rumeau, P. (2010). Development of Phase Change Materials in Clothing Part I: Formulation of Microencapsulated Phase Change, *Textile Research Journal*, 80, 195–205.
- Sarier, N., Onder, E. (2012). Organic Phase Change Materials and Their Textile Applications: An Overview, *Thermochimica Acta*, 540, 7-60.
- Sarier, N., Onder, E., Cimen, E. (2008). Encapsulation of Phase Change Materials by Complex Coacervation to Improve Thermal Performances of Woven Fabrics, *Thermochimica Acta*, 467, 63-72.
- Sarier, N., Onder, E. (2007). The Manufacture of Microencapsulated Phase Change Materials Suitable for the Design of Thermally Enhanced Fabrics, *Thermochimica Acta*, 452, 149–160.
- Sarier, N., Onder, E., Ozay, S., Ozkilib, Y. (2011). Preparation of Phase Change Material–Montmorillonite Composites Suitable for Thermal Energy Storage, *Thermochimica Acta*, 524, 39– 46
- Sharma, A., Tyagi, V.V., Chen, C.R., Buddhi, D. (2009). Review on Thermal Energy Storage with Phase Change Materials and Applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13, 318–345.
- Tözüm, M.S., Aksoy, S.A. (2014). Isı Depolama Özellikli Mikrokapsül Uygulanmış Kumaşların Isı Depolama ve Konfor ile İlgili Özelliklerinin Araştırılması, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 18(2), 37-44.
- Tözüm, M.S., Demirbağ, S., Aksoy, S.A. (2012). Isı Depolayan Mikrokapsül Uygulanmış Kumaşların Isı Düzenleme Özelliklerinin Araştırılması, *Tekstil ve Mühendis*, 84, 8-14.
- Yamagishi, Y., Takeuchi, H., Pyatenko, A.T., Kayukawa, N. (1999). Characteristics of Microencapsulated PCM Slurry as a Heat-Transfer Fluid, *AIChE Journal*, 45, 696-707.