



## N-TETRADEKANOL/ARAPZAMKI/BAKIR(II) OKSİT KOMPOZİT MİKROKAPSÜL UYGULAMASI İLE FOTOTERMAL ÖZELLİKTE PAMUKLU KUMAŞ TASARIMI

Sena DEMİRBAĞ GENÇ<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup> Uşak Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Tekstil Mühendisliği Bölümü, Uşak, Türkiye

<sup>2</sup> Uşak Üniversitesi, Deri Tekstil Seramik Tasarım Uygulama ve Araştırma Merkezi, Uşak, Türkiye

### Anahtar Kelimeler

### Öz

Fototermal dönüşüm,  
Pamuklu kumaş,  
Termoregülasyon,  
Faz değiştiren madde,  
Bakır (II) oksit.

Bu çalışmada, güneş ışığını ısı enerjisine dönüştürebilen ve gelişmiş termoregülasyon özelliğine sahip kumaşların geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda n-tetradekanol/arap zamkı/bakır(II) oksit (TD@AZ/CuO) duvar yapılı mikrokapsüller pamuklu kumaşa emdirme yöntemi ile uygulanmıştır. 100 g/l ve 150 g/l olmak üzere iki farklı konsantrasyonda mikrokapsül uygulanan kumaşların morfolojik, ısıl özellikleri ve fototermal dönüşüm performansları araştırılmıştır. Bu analizlere ek olarak kapsül uygulamasının kumaşın termofizyolojik konfor parametrelerine ve mekanik özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Taramalı elektron mikroskop görüntüleri, mikrokapsüllerin kumaş yapısındaki varlığını ortaya koymuştur. Diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) analiz sonuçlarına göre kumaşlar 28 °C'de 3,78 J/g ısı depolama kapasitesine sahiptirler. Söz konusu kumaşlar fototermal dönüşüm performansı sergileyerek UV ışığını ısı enerjisine dönüştürmüş ve aynı süre içinde ham kumaştan 6 °C daha yüksek sıcaklıklara ulaşmıştır. Alambeta test sonuçları, mikrokapsüllerin duvar yapısında bulunan CuO nanopartiküllerinin kumaşın ısı iletkenliğini önemli ölçüde artırdığını göstermektedir. Ayrıca, mikrokapsül uygulaması kumaşın atkı ve çözgü yönlerindeki yırtılma mukavemetini anlamlı bir şekilde etkilememiştir. Öte yandan, kapsül uygulaması kumaşların hava geçirgenlik değerlerinde önemli düşüşe neden olmuştur.

## DESIGN OF COTTON FABRIC WITH PHOTOTHERMAL PROPERTIES USING N-TETRADECANOL/GUM ARABIC/COPPER(II) OXIDE COMPOSITE MICROCAPSULE APPLICATION

### Keywords

Photothermal  
conversion,  
Cotton fabric,  
Thermoregulation,  
Phase change material,  
Copper (II) oxide.

### Abstract

In this study, it was aimed to develop fabrics that can convert sunlight into heat energy and have improved thermoregulation properties. For this purpose, n-tetradecanol/gum arabic/copper (II)oxide (TD@AZ/CuO) wall structured microcapsules were applied to cotton fabric by impregnation method. The morphological, thermal properties, and photothermal conversion performance of fabrics applied with microcapsules at two different concentrations of 100 g/l and 150 g/l were investigated. In addition, the effect of capsule application on the thermophysiological comfort parameters and mechanical properties of the fabric was investigated. Scanning electron microscope images revealed the presence of microcapsules in the fabric structure. According to the results of differential scanning calorimetry (DSC) analysis, the fabrics had a heat storage capacity of 3.78 j/g at 28 °C. These fabrics exhibited photothermal conversion performance, converting UV light into heat energy and reaching temperatures 6 °C higher than untreated fabric in the same period. Alambeta test results showed that CuO nanoparticles in the wall structure of the microcapsules significantly increased the thermal conductivity of the fabric. In addition, microcapsule application didn't significantly affect the tear strength of the fabric in weft and warp directions. On the other hand, capsule application caused a significant decrease in the air permeability values of the fabrics.

### Alıntı / Cite

Demirbağ Genç, S., (2025). N-Tetradekanol/Arapzamkı/Bakır(II) Oksit Kompozit Mikrokapsül Uygulaması ile Fototermal Özellikte Pamuklu Kumaş Tasarımı, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 13(3), 921-931.

### Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

S. Demirbağ Genç, 0000-0003-1634-6391

### Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	10.03.2025
Revizyon Tarihi / Revision Date	02.07.2025
Kabul Tarihi / Accepted Date	25.07.2025
Yayın Tarihi / Published Date	30.09.2025

\* İlgili yazar / Corresponding author: sena.demirbag@usak.edu.tr

# DESIGN OF COTTON FABRIC WITH PHOTOTHERMAL PROPERTIES USING N-TETRADECANOL/GUM ARABIC/COPPER(II) OXIDE COMPOSITE MICROCAPSULE APPLICATION

Sena DEMİRBAĞ GENÇ<sup>1,2†</sup>

<sup>1</sup> Uşak University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Department of Textile Engineering, Uşak, Turkey

<sup>2</sup> Uşak University, Leather Textile Ceramics Design Application and Research Centre, Uşak, Turkey

## Highlights

- Photothermal microcapsules were applied to cotton fabric by impregnation method.
- Microcapsule-applied fabrics exhibited thermoregulatory properties with 3.78 J/g heat storage.
- TD@AZ/CuO application improved thermal conductivity of fabric.
- TD@AZ/CuO treatment imparted photothermal properties to the cotton fabric.

## Graphical Abstract

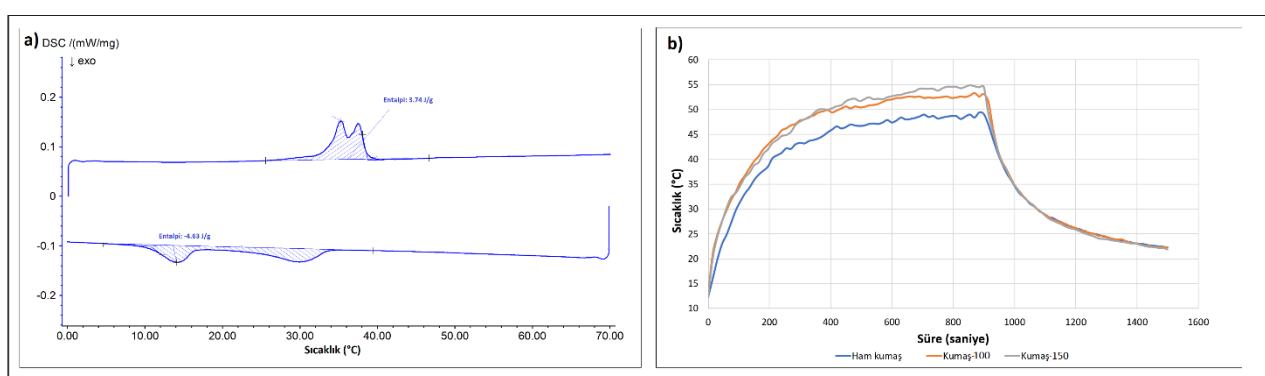


Figure. Dsc curve of fabrics (a) and time dependent change of fabrics surface temperature under UV light (b)

## Purpose and Scope

In this study, the aim was to design fabrics with advanced thermoregulation properties that can perform photothermal energy conversion. For this aim, n-tetradecanol core gum arabic /copper(II) oxide composite wall-structured microcapsules were applied to cotton fabric using an impregnation method.

## Design/methodology/approach

In this study, n-tetradecanol/gum arabic/copper(II) oxide (TD@AZ/CuO) microcapsules exhibiting photothermal property were applied to cotton fabric at two different concentrations using the impregnation method. The morphological structure, thermal properties and photothermal conversion performances of microcapsule treated fabrics were investigated. In addition, the effect of capsule application on the thermophysiological comfort properties and mechanical properties of the fabric was examined.

## Findings

In addition to thermoregulation properties, the fabrics containing microcapsules converted sunlight into thermal energy and reached temperatures 6 °C higher than the untreated fabric in the same time period. TD@AZ/CuO composite microcapsules significantly improved the thermal conductivity properties of cotton fabrics.

## Originality

When the literature is examined, it is seen that there are limited number of studies on the development of textile materials with photothermal properties using microcapsule technology. This study differs from the existing literature with the core/wall structures of microcapsules used to impart photothermal properties. In addition, this study has the potential to make a significant contribution to literature on the development of photothermal fabrics.

<sup>†</sup>Corresponding author: sena.demirbag@usak.edu.tr

## 1. Giriş (Introduction)

Gelişen yaşam koşulları ve ortam şartları, kişisel termal yönetimi giderek daha önemli bir konu haline getirmektedir. Sıcaklık ve nem gibi faktörlerin insan sağlığı üzerindeki etkisi yaygın olarak kabul edilmektedir. Aşırı sıcak veya aşırı soğuk insan sağlığını olumsuz etkileyebilmekte, bu da kişisel termal yönetimi modern yaşamın ayrılmaz bir parçası haline getirmektedir (Deng vd., 2024). Bu bağlamda, yüksek kapasitede termal enerji depolayıp salabilen faz değiştiren maddeler (FDM), akıllı ısı düzenleyici tekstillerin geliştirilmesinde önemli bir rol oynamaktadır (Alay Aksoy vd., 2024).

Faz değiştiren maddeler aktif sıcaklık düzenleme kabiliyetlerinden dolayı tekstil uygulamalarının yanı sıra güneş enerji sistemleri, binalar, elektronik, tıp, otomotiv vb. birçok alanda sıcaklık düzenleme ve termal enerji depolama kaynağı olarak büyük ilgi görmektedir (Tözüm ve Alay-Aksoy, 2016; Alay-Aksoy vd., 2017). Doğal ve sentetik olmak üzere 500'den fazla bilinen FDM bulunmakta olup, tekstil uygulamalarında 15-35 °C aralığında faz değişim sıcaklığı aralığına sahip organik FDM'ler tercih edilmektedir (Skurkyte-Papieviene vd., 2021; Önder ve Sarier, 2006). Geleneksel FDM'ler, güneş enerjisini verimli bir şekilde absorbe edememeleri ve ısı enerjisine aktaramamaları nedeniyle güneş radyasyonunu etkili bir şekilde kullanamamaktadır. Bu nedenle, fototermal malzemeler ile FDM'lerin birleştirilmesi, güneş enerjisinin verimli bir şekilde kullanılması için etkili bir yöntemdir (Chai vd., 2024; Deng vd., 2024; Li vd., 2024). Geleneksel FDM'lerin ısı depolama süreci sistem ve çevresi arasındaki sıcaklık farkına bağlı olup, soğuk ortam koşullarında katılaşıp ısıyı yaymakta ve tamamen katılaşmanın ardından FDM'lerin ısıtma etkisi sona ermektedir. Ortam sıcaklığının FDM'lerin erime noktasından düşük olması durumunda, gizli ısı depolanmanın gerçekleşmeyeceği ve FDM'lerin yeniden ısıtılmadan önce çalışamayacağı açıktır. Bu da FDM'lerin soğuk koşullar altında uzun süreli kullanımını sınırlamaktadır. Geleneksel FDM'lerin aksine, fototermal dönüşümlü FDM'ler güneş ışığını toplama, güneş ışığını termal enerjiye dönüştürme ve termal enerji depolama özelliğine sahiptir. Fototermal malzemeler, güneş ışığını emerek ısı enerjisine dönüştürmektedirler. Sıcaklık FDM 'nin erime noktasına yükseldiğinde ısı enerjisi gizli ısı şeklinde depolanmakta, yani pasif bir termal döngü başlamaktadır. Bu malzemelerin ısı depolama süreçleri, soğuk ortamlarda bile güneş termal enerjisi ile devam edebilmekte ve bu da soğuk koşullar altında ısı depolama verimliliklerini artırabilmektedir (Wang vd., 2018; Xu vd., 2023).

FDM'lerin büyük avantajlarının yanı sıra düşük ısı iletkenliği, katı-sıvı faz geçişinde sızma gibi sorunları olduğu bilinmektedir. Bu sorunların aşılmasında mikrokapsülasyon teknolojisi önemli bir çözüm sunmaktadır (Sun vd., 2024). Mikrokapsülasyon teknolojisi hem bu sorunların giderilmesi hem de güneş enerjisini termal enerjiye dönüştüren fototermal malzemelerin FDM'ler ile birleştirilmesi için etkili bir yöntemdir (Maithya vd., 2021; Liu vd., 2022a). Son yıllarda FDM içerikli fototermal özellikte mikrokapsüllerin üzerine yapılan çalışmaların giderek arttığı görülmektedir. Bu çalışmalarda mikrokapsüllerin in-situ polimerizasyonu (Wang vd., 2018; Huang vd., 2020; Wang vd., 2021), sol-jel yöntemi (Hou vd., 2022; Li vd. 2022), ve polikondensasyon yöntemi (Ma vd., 2018) gibi yöntemler kullanılarak üretildiği görülmektedir. Öte yandan, fototermal mikrokapsüllerin üretimine ilişkin çalışmaların çoğu, Pickering emülsiyon stabilizatörleri kullanılarak mikrokapsüllerin hazırlanmasına odaklanmıştır (Zhao vd., 2019a; Zhao vd., 2019b; Maithya vd., 2020; Zhao vd., 2020; Liu vd., 2021a; Maithya vd., 2021; Sun vd., 2021; Du vd., 2022; Tian vd., 2022; Xu vd., 2023; Chen vd., 2025). Fototermal özellikte mikrokapsüllerin üretiminde fototermal malzemelerin kapsülün duvar yapısına katıldığı veya pickering stabilizatörü olarak kullanıldığı görülmüştür. Literatürdeki mevcut FDM içerikli fototermal özellik sergileyen mikrokapsül ile ilgili araştırmalarda fototermal özellik kazandırmak amacı ile mikrokapsüllerin duvar yapısına grafen oksit (Yuan vd., 2015; Liu vd., 2017; Yuan vd., 2018; Zhao vd., 2019b; Maithya vd., 2020; Maithya vd., 2021), indirgenmiş grafen oksit (Gao vd., 2020), silikon karbür (Wang vd., 2018; Wang vd., 2021), polipirol (Hu vd., 2021) ve titanyum oksit (TiO<sub>2</sub>) (Ma vd., 2018; Li vd., 2022) çinko oksit (ZnO) (Huang vd. 2020; Liu vd., 2022b), bakır (I) oksit (Cu<sub>2</sub>O) (Xu vd., 2018; Xu vd., 2019), demir 2-3 oksit (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) (Liu vd., 2021b; Tian vd., 2022), titanyum nitrit (TiN) (Hou vd., 2022) gibi metal oksit malzemelerin kullanıldığı görülmektedir.

Fototermal mikrokapsül içerikli tekstiller, kişisel termoregülasyonu etkili bir şekilde iyileştirmekte ve özellikle soğuk bölgelerde termal konfor hissi sağlayabilmektedir. Bu kumaşlar, FDM içerikli mikrokapsüllerin yapılarındaki fototermal malzeme sayesinde güneş ışığını emebilmekte, ısı enerjisine dönüştürüp depolayabilmekte ve gizli ısı olarak serbest bırakabilmektedir. (Hu vd., 2021; Li vd., 2021). Bu özellik sayesinde ortam sıcaklığı değişiminden bağımsız olarak faz değişim döngüsünü sürdürerek iyileştirilmiş termoregülasyon performansı sunabilmektedirler. Son yıllarda mikrokapsül teknolojisi kullanılarak fototermal özelliklere sahip malzeme üretimi konusunda birçok çalışma yapılmıştır. Ancak, bu teknolojinin tekstil uygulamalarına yönelik çalışmalarının sınırlı sayıda olduğu gözlemlenmiştir. Hu vd. (2021) termoterapi alanında kullanılmaya uygun giyilebilir fototermal ısıtıcı tekstil materyallerini üretmek için parafin/melamin formaldehit ticari mikrokapsüllerin yüzeyini fototermal özellikteki polipirol ile kaplamışlardır. Ürettikleri kapsülleri farklı oranlarda (%60, 70, 80, 90) poliüretan (PU) ile karıştırmış ve yaş çekim yöntemiyle kapsül/PU liflerini elde etmişlerdir. Liflerden el örmesi ile elde edilen yüzeyin fototermal dönüşüm performansını incelemişlerdir. Çalışmada,

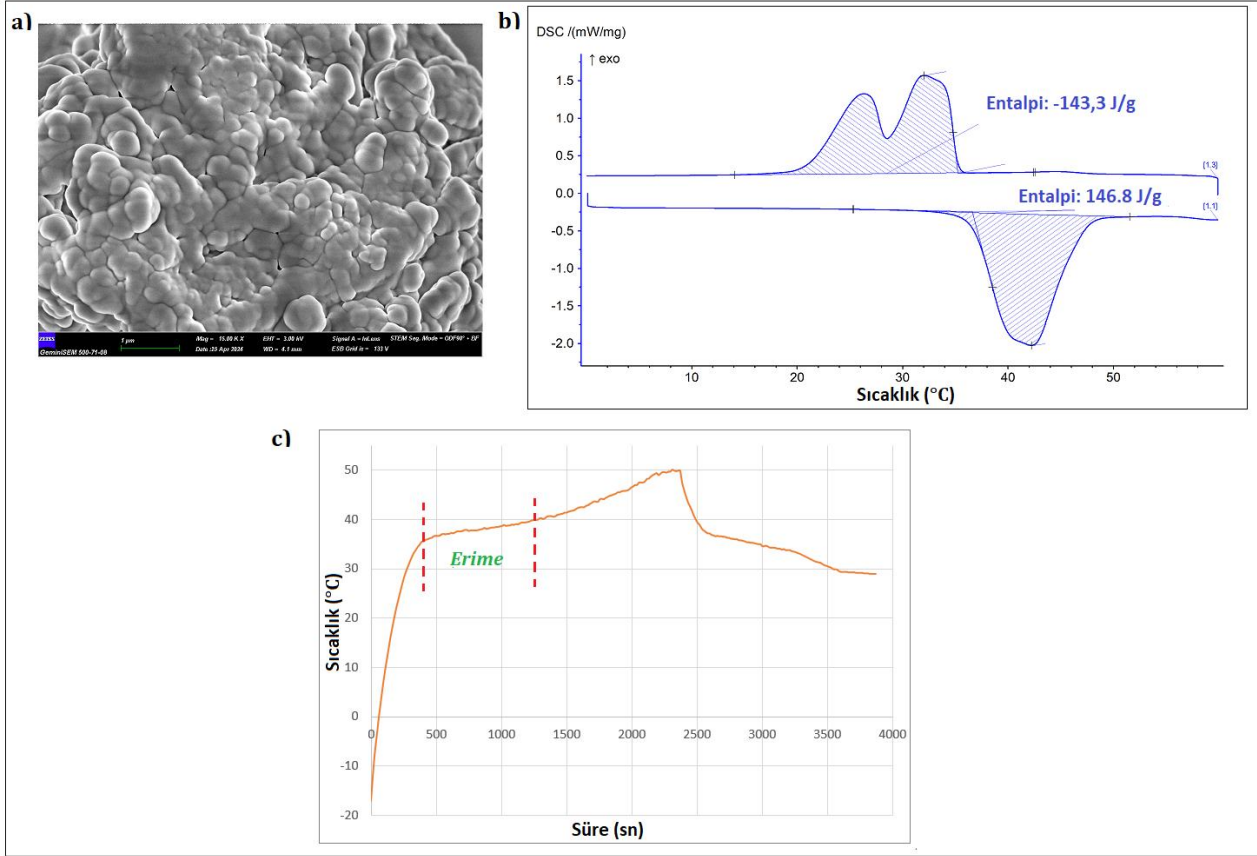
fototerma dönüşüm verimliliği iki farklı ışık yoğunluğu altında %92,22 ve %88,34 olarak hesaplanmış olup tekstil yüzeylerinin 100 defa yapılan ısıtma-soğutma döngüsünden sonra bile bu özelliklerini koruduğu belirlenmiştir (Hu vd., 2021). Sun vd. (2022), n-dokasan çekirdekli silika/ polidopamin (PDA) / karbon-nanotüp (CNTs) duvar yapısına sahip fototerma mikrokapsüllerin giysi ve bina gibi farklı kullanım alanlarındaki fototerma dönüşüm ve depolama özelliklerini araştırdığı çalışmalarında mikrokapsülleri pamuklu kumaşın bir bölümüne "BUCK" yazısı şeklinde yapıştırmışlardır. Kumaşların fototerma performansını incelemek amacıyla giysiyi önce dışarıda güneş ışığına maruz bırakmış, ardından gölgede bekletmişlerdir. Termal kamera ile yapılan yüzey sıcaklık ölçümleri ile kumaşın güneş ışığını emerek termal enerjiye dönüştürüp depoladığını ortaya koymuşlardır (Sun vd., 2022). Deng vd. (2024), n-oktadekan/polimetilmetakrilat duvarlı mikrokapsüllerin duvar yapısına polidopamin ve altın (Au) fototerma malzemeleri katkılayarak, ipek kumaşa emdirme yöntemi ile uygulamışlardır. Mikrokapsül içerikli ipek kumaş belirli ısı depolama özelliğinin yanı sıra mükemmel fototerma dönüşüm performansı ve iyi dayanıklılık sergileyerek akıllı giyilebilir teknolojiler ve kişisel termal yönetim alanlarında büyük bir uygulama potansiyeline sahip olabileceğini ortaya koymuştur (Deng vd., 2024). Xu vd. (2023), poli (p-fenilendiamin) (PPPD) fototerma malzemesini Pickering stabilizatörü olarak kullanarak laurik mistirik/melaminformaldehit mikrokapsülleri üretmiş ve bu mikrokapsülleri pamuklu kumaşa baskı yöntemiyle uygulamışlardır. Kumaş UV ışığına maruz bırakıldığında, kapsül baskılı alan kapsülsüz alana göre daha hızlı ısınmış ve aradaki sıcaklık farkı maksimum 12 °C'ye ulaşmıştır (Xu vd., 2023). Zhao ve arkadaşları, oktadekan ve parafin (P/O) çekirdekli poliüretan (PU) ve polidopamin/gümüş (PDA/Ag) çift duvarlı mikrokapsülleri pamuklu kumaşa kaplama yöntemi ile uygulamıştır. Kumaşa uygulanan mikrokapsülün duvar yapısındaki PDA ve Ag'nin, sinerjik fototerma dönüşüm etkisi ile olağanüstü fototerma dönüşüm performansı sergilediği sonucuna varmışlardır (Zhao vd., 2024).

Bu çalışmada, pamuklu kumaşa fototerma özellik kazandırmak amacıyla, daha önceki bir çalışmada üretilen n-tetradekanol@arap zamkı/bakır (II) oksit (TD@AZ/CuO) mikrokapsülleri emdirme yöntemiyle uygulanmıştır. Kullanılan TD@AZ/CuO mikrokapsülleri, çekirdek/duvar bileşimi bakımından literatürdeki benzer çalışmalardan farklılık göstermektedir (Demirbağ Genç, 2024). Ayrıca, mikrokapsül teknolojisiyle fototerma özellik kazandırılan kumaşlara yönelik çalışmaların sınırlı olması göz önünde bulundurulduğunda, bu araştırma alana önemli bir katkı sağlamaktadır. Çalışmada, TD@AZ/CuO mikrokapsülleri pamuklu kumaşa iki farklı konsantrasyonda (100g/L ve 150 g/L) emdirme yöntemi ile uygulanmıştır. Mikrokapsül içerikli kumaşların termoregülasyon özellikleri ve fototerma dönüşüm performanslarının yanı sıra kapsül uygulamasının kumaşın termofizyolojik konfor üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Ayrıca kapsül içerikli kumaşların yırtılma mukavemeti ve eğilme direnci gibi mekanik özellikleri incelenmiştir.

## 2. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

### 2.1. Materyal (Material)

Fototerma dönüşüm performansı sergileyebilen kumaşların üretiminde daha önceki çalışmada üretilmiş olan Arapzamkı/bakır (II) oksit kompozit duvarlı mikrokapsüller kullanılmıştır. Kompleks koaservasyon metodu kullanılarak üretilen n-tetradekanol çekirdekli n-tetradekanol@arap zamkı/ bakır (II) oksit (TD@AZ/CuO) mikrokapsüllerin morfolojileri, ısıl özellikleri ve fototerma dönüşüm performansları sırasıyla SEM, DSC ve fototerma dönüşüm testi ile araştırılmıştır. Elde edilen bulgular, TD@AZ/CuO mikrokapsüllerinin küresel bir morfolojiye sahip olduğunu, %79,95 oranında fototerma dönüşüm verimliliği sağladığını ve 36,6 °C'de 146,8 J/g ısı depolama kapasitesi sunduğunu göstermektedir (Demirbağ Genç, 2024). Şekil 1'de TD@AZ/CuO mikrokapsül numunesine ait morfolojik, ısıl ve fototerma dönüşüm performanslarının değerlendirildiği analizlere ait sonuçlar verilmiştir.



**Şekil 1.** TD@AZ/CuO mikrokapsül numunesine ait SEM görüntüsü (a), DSC eğrisi (b) ve UV ışığı altında sıcaklık-zaman grafiği (c) (SEM image(a), DSC curve (b) and temperature-time graph under UV light (c) of TD@AZ/CuO microcapsule sample) (Demirbağ Genç, 2024)

Mikrokapsüllerin kumaşa uygulanmasında %100 pamuklu dokuma kumaş tercih edilmiştir. Bu kumaş 20 tel/cm atkı sıklığı ve 32 tel/cm çözgü sıklığına sahip olup ağırlığı 99 g/m<sup>2</sup>'dir. Mikrokapsüllerin kumaşlara uygulanmasında çapraz bağlayıcı olarak modifiye edilmiş dimetiloldihidroksietilen üre esaslı Fixapret Resin F-Eco, katalizörü olarak magnezyum klorür (MgCl<sub>2</sub>) kullanılmıştır.

## 2.2. Mikrokapsüllerin kumaşa uygulanması (The application of microcapsules to the fabric)

Kumaşlara fototerml özellik kazandırmak amacıyla TD@AZ/CuO kapsülleri pamuklu kumaşa iki farklı konsantrasyonda (100 g/l ve 150 g/l) emdirme yöntemi ile uygulanmıştır. Uygulama öncesinde 100 g/l ve 150 g/l konsantrasyonda yaş mikrokapsül içeren sulu mikrokapsül çözeltileri homojenizatörde 1 saat boyunca 1000 devir/dak hızda karıştırılarak hazırlanmıştır. Ardından, bu çözeltilere çapraz bağlayıcı ve katalizör eklenerek emdirme banyosu hazırlanmıştır. Pamuklu dokuma kumaşlar 1 saat boyunca hazırlanan banyo içerisinde bekletilmiş, ardından emdirilmiştir. Mikrokapsül çözeltisi emdirilmiş kumaşlar 80 °C'de 5 dakika kurutma ve 120 °C'de 1 dakika fikse işlemine tabi tutulmuştur. Mikrokapsül içermeyen kumaş, 100 g/L ve 150 g/L mikrokapsül uygulanmış kumaşlar, ham kumaş, Kumaş-100 ve Kumaş-150 olarak kodlandırılmıştır.

## 2.3. Kumaş Karakterizasyonu (Characterization of fabric)

Mikrokapsüllerin kumaş yapısındaki varlığı ve dağılımı, taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizi ile araştırılmıştır. Kapsül içerikli kumaşların ısı özellikleri diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) ile incelenmiştir. Ölçümler, azot atmosferi altında 0-70 °C aralığında 5 °C sıcaklık artışı ile gerçekleştirilmiştir. Kumaşların fototerml özellikleri termal kamera, yalıtımlı poliüretan kutu, UV lamba (25 Watt, 0,17 Watt/cm<sup>2</sup> ışık yoğunluğu) ve bilgisayardan oluşan bir düzenek kullanılarak araştırılmıştır. Testte kumaşlar yalıtımlı kutu içerisine yerleştirilerek, 15 dakika boyunca kumaştan 12 cm uzaklıktaki UV ışığına maruz bırakılmış, ardından UV lamba kapatılarak kendiliğinden soğutulmaya bırakılmıştır. Test boyunca kumaş yüzeyindeki sıcaklık değişimi, termal kamera ile izlenmiştir. Test sonunda 15 saniyede bir kaydedilen kumaş yüzey sıcaklık değerleri bilgisayara aktarılarak zamana bağlı sıcaklık grafiği elde edilmiştir. Elde edilen grafikten ham kumaşın ve mikrokapsül içerikli kumaşların aynı zaman dilimi içerisindeki sıcaklık değişimleri (ısınma hızları) karşılaştırılarak, kumaşların fototerml dönüşüm performansları değerlendirilmiştir.

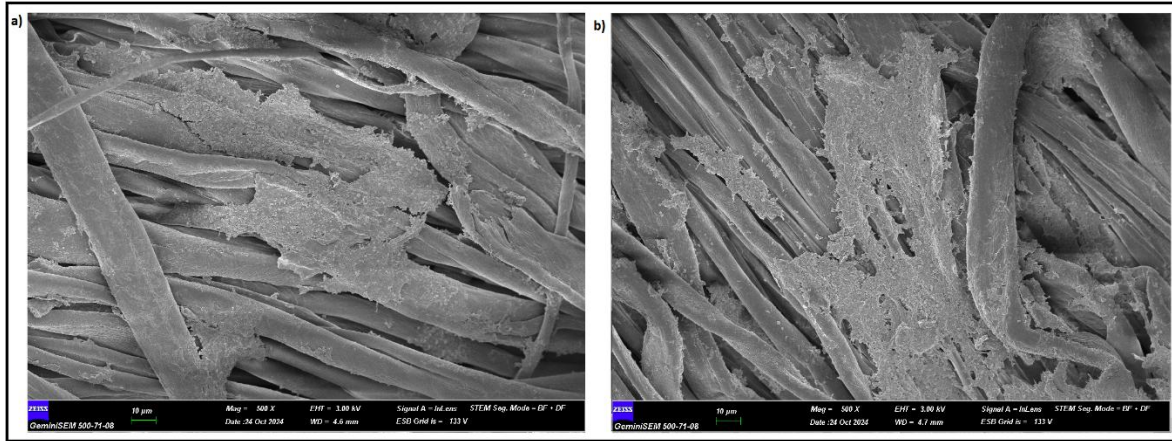
Mikrokapsül içerikli kumaşların termofizyolojik konfor özellikleri Alambeta test cihazı kullanılarak araştırılmıştır. Bu testte mikrokapsül uygulanmış kumaşların termal iletkenlik, ısıl soğurganlık, ısıl direnç ve kalınlık gibi parametreleri belirlenmiştir. Test, her bir örneğin farklı bölgelerinde üç kez tekrarlanmış ve elde edilen sonuçlar ortalama alınarak değerlendirilmiştir. Mikrokapsül katkılı ve katkısız kumaşların hava geçirgenlikleri TS 391 EN ISO 9237 standardına göre incelenmiştir.

TD@AZ/CuO mikrokapsül uygulamasının kumaşın mekanik özellikleri üzerindeki etkisi ise yırtılma mukavemeti ve eğilme rijitliği testleri ile araştırılmıştır. Yırtılma mukavemeti, atkı ve çözgü yönünde TS EN ISO 13937-1 standardına göre gerçekleştirilirken kumaşların eğilme rijitliği TS 1409 standardına göre belirlenmiştir. Kumaşlar arasındaki farkların istatistiksel olarak anlamlı olup olmadığını değerlendirmek amacıyla, IBM SPSS Statistics 21.0 programı kullanılarak %95 güven düzeyinde Tukey HSD testi uygulanmıştır.

### 3. Deneysel Sonuçlar (Experimental Results)

#### 3.1. Kumaşların yüzey morfolojileri (Surface morphology of fabrics)

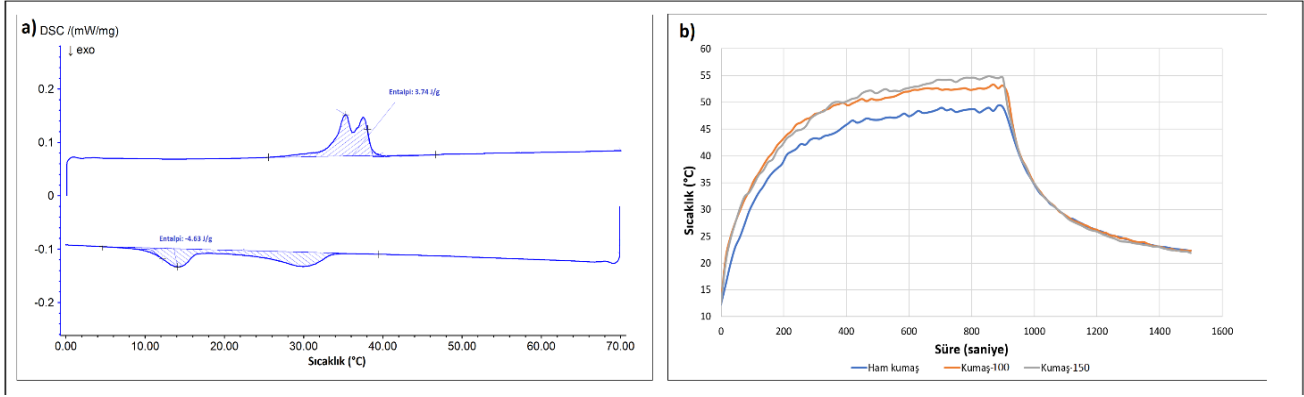
Mikrokapsül uygulanmış kumaşların yüzey özellikleri, SEM analizi ile incelenmiş ve elde edilen SEM görüntüleri Şekil 2'de verilmiştir. Görüntüler hem lif yüzeyine hem de lifler arası boşluklara çok sayıda mikrokapsülün varlığını ortaya koymaktadır. Beklenildiği gibi artan konsantrasyona bağlı olarak kumaş yapısındaki mikrokapsül varlığı artmıştır. Ancak her iki kumaş numunesinde yer yer kümelenmelerin olduğu saptanmıştır. Bu durum, nano boyutlu kapsüllerin büyük yüzey alanına sahip olmaları ve birbirlerine yapışma eğilimlerinden kaynaklanabileceği düşünülmektedir. Ayrıca, kapsül duvarları arasındaki moleküller arası etkileşimlerin de bu kümelenmeye katkıda bulunduğu düşünülmektedir (Alay Aksoy vd., 2024; Tözüm vd., 2024).



Şekil 2. Kumaş-100 (a) ve Kumaş-150 (b) numunelerine ait SEM görüntüleri (SEM images of Fabric-100 (a) and Fabric-150 (b) samples)

#### 3.2. Kumaşların ısı özellikleri (Thermal properties of fabrics)

Mikrokapsül içerikli Kumaş-100 (100 g/L kapsül uygulanmış) numunesinin ısı düzenleme özellikleri DSC analizi ile incelenmiş olup, kumaşa ait DSC eğrisi Şekil 3a'da verilmiştir. Grafik incelendiğinde, Kumaş-100'in yaklaşık 28 °C'de 3,78 J/g ısı depolama kapasitesine sahip olduğu belirlenmiştir. Kumaşın soğuma sırasında sıvı-katı ve katı-katı faz geçiş sıcaklıkları sırasıyla 32 °C ve 18 °C olarak belirlenmiş ve kumaşın 4,63 J/g ısı yaydığı tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, kumaşın yapısındaki mikrokapsülün varlığını doğrularken, kumaşın termoregülasyon özelliğine sahip olduğunu göstermektedir.



**Şekil 3.** Kumaş-100'e ait DSC eğrisi (a) ve UV ışığı altında kumaşların yüzey sıcaklığının zamana bağlı değişim grafiği (b)

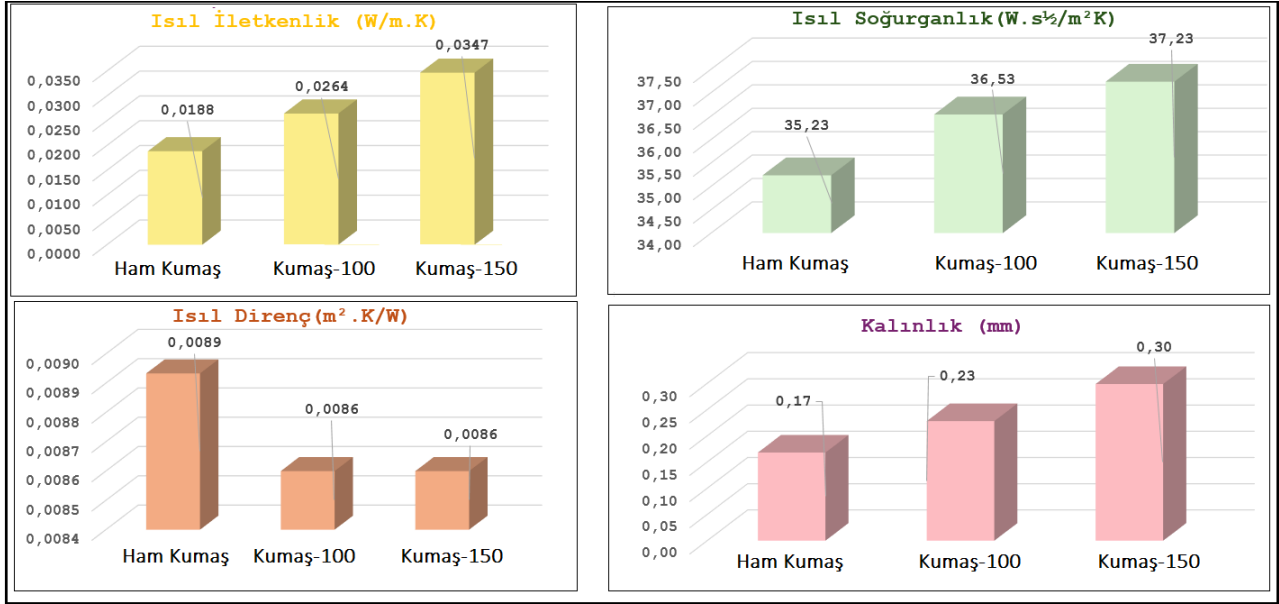
### 3.3. Kumaşların fototerml dönüşüm performanslarının değerlendirilmesi (The evaluation of the photothermal conversion performance of fabrics)

TD@AZ/CuO mikrokapsül uygulanmış kumaşların fototerml performansları güneş similatörü olarak bir UV lamba, termal kamera ve yalıtımlı poliüretan kutudan oluşan deney düzeneği kullanarak araştırılmıştır. Mikrokapsül içerikli kumaşlar ve ham kumaş, 15 dakika boyunca UV ışığına maruz bırakılmış ve sonrasında kendiliğinden soğumaya bırakılmıştır. Test sonucunda, kumaş yüzey sıcaklıklarının zamana göre değişimini gösteren grafikler elde edilmiş ve bu grafiklerden mikrokapsül içeren ve içermeyen kumaşların ısınma hızları karşılaştırarak kumaşların fototerml dönüşüm performansları değerlendirilmiştir. Şekil 3b'de kumaşlara ait zamana bağlı sıcaklık grafikleri verilmiştir. Grafik incelendiğinde, mikrokapsül içerikli kumaşların ham kumaşa göre UV ışığına maruz kaldığında daha hızlı ısındığı görülmüştür. Kumaşa uygulanan kapsüllerin faz değişim sıcaklığına (34 °C) kapsül içerikli kumaşlar yaklaşık 1,5 dakikada ulaşırken, ham kumaşın ise yaklaşık 2,5 dakikada ulaştığı belirlenmiştir. Aynı zaman diliminde, ham kumaş ile Kumaş-100 ve 150 arasındaki maksimum sıcaklık farkı sırasıyla 5,2 °C ve 6 °C olarak tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, mikrokapsül içeren kumaşların, mikrokapsülün duvar yapısındaki CuO nanopartikülleri sayesinde UV ışığını absorplayarak ısıya dönüştürmede etkili olduğunu ve kumaşa uygulanan mikrokapsül konsantrasyonunun artmasının fototerml dönüşüm performansını geliştirdiğini göstermiştir. Kumaşlar UV ışığına maruz kaldığında kapsüllerin duvar yapısındaki CuO metal oksit nanopartikülleri fotonları absorplaması sonucu değerlilik bandındaki elektronlar uyarılmakta ve uyarılmış olan bu elektronlar değerlilik bandından iletkenlik bandına geçiş yapmaktadır. Foto-indüklenmiş taşıyıcıların bozunması sonucu iletkenlik bandındaki elektronlar değerlilik bandına geri atlamakta ve bu işlem sırasında soğurulan fotonlar ısı enerjisi olarak açığa çıkmaktadır (Zhao vd., 2022). Yani mikrokapsüllerin duvar yapısındaki metal oksit nanopartikülleri ışık ışıması altında fotonu etkili bir şekilde yakalayıp absorplayarak moleküler titreşim yolu ile ışığı ısıya dönüştürmektedir.

### 3.4. Kumaşların termofizyolojik konfor özellikleri (Thermo-physiological comfort properties of fabrics)

AZ/CuO kompozit duvarlı mikrokapsül uygulanmış kumaşların termofizyolojik konfor özellikleri Alambeta test cihazı ile araştırılmış ve test sonucunda elde edilen ısı iletkenlik, ısı soğurma, ısı direnç ve kalınlık parametrelerine ait veriler Şekil 4'te verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, mikrokapsül uygulanmış kumaşların ham kumaşa kıyasla termal iletkenlik değerlerinin önemli ölçüde arttığı tespit edilmiştir ( $p < 0,05$ ). Bu artış, ham kumaşa göre 100 g/L mikrokapsül uygulanmış Kumaş-100 için %40,43 iken, 150 g/L mikrokapsül uygulanmış Kumaş-150 için %84,57 olarak belirlenmiştir. Kumaşa uygulanan TD@AZ/CuO mikrokapsüllerin duvar yapısındaki CuO metal oksit nanopartikülleri yüksek termal iletkenliğe sahip olup, kumaşların ısı iletkenliklerinin gelişmesini sağlamıştır (Zhang vd., 2020).

Isıl soğurganlık tekstil malzemelerine dokunulduğunda hissedilen sıcaklık ve soğukluk hissi ile ilişkili olup, ısı soğurganlık değeri arttıkça kumaş daha soğuk his uyandırmaktadır (Matusiak vd., 2024). Alambeta test sonuçları kapsül uygulamasının kumaşın ısı soğurganlık değerlerini bir miktar artırdığı, ancak bu artışın önemli olmadığını ortaya koymuştur ( $p > 0,05$ ). Termal direnç, bir kumaşın belirli bir birim alanda ısı akışını engelleme kapasitesini gösteren bir parametre olup, AZ/CuO kompozit duvarlı kapsül uygulaması kumaşın termal direnç değerlerini düşürmüştür. Ancak bu düşüş önemli bir etki yaratmamıştır ( $p > 0,05$ ). Ayrıca, mikrokapsül uygulaması kumaşların kalınlığında bir artışa neden olmuştur.



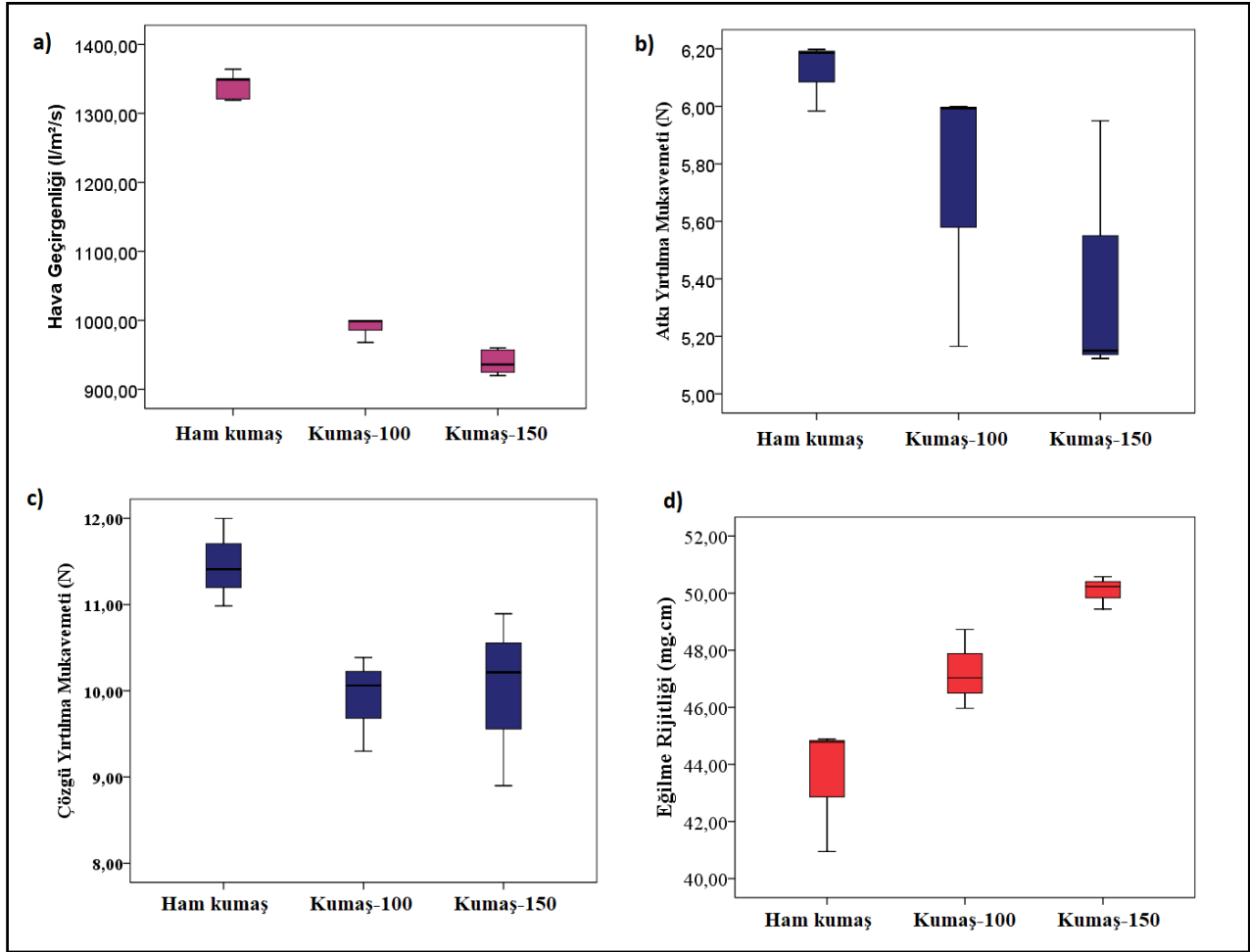
**Şekil 4.** Mikrokapsül içeren ve içermeyen kumaşların ısıl iletkenlik, ısıl soğurganlık, ısıl direnç ve kalınlık değerleri (Thermal conductivity, thermal absorption, thermal resistance and thickness values of fabrics with and without microcapsules)

Bir diğer termofizyolojik konfor parametresi olan hava geçirgenliği testi mikrokapsül uygulanmış ve uygulanmamış ham kumaş numunesi için gerçekleştirilmiş ve sonuçlar karşılaştırılarak kapsül uygulamasının hava geçirgenliği üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Şekil 5a'da, kumaşlara ait hava geçirgenlik sonuçları verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, hem 100 g/L kapsül uygulaması hem de 150 g/L kapsül uygulaması kumaşların hava geçirgenlik değerlerini düşürmüştür ( $p < 0,05$ ). Bu beklenen bir sonuç olup, kumaş gözeneklerinin ve lifler arasındaki boşlukların mikrokapsüller tarafından doldurulmasından kaynaklanmaktadır (Tözüm ve Alay-Aksoy, 2016; Jiao vd. 2024; Tözüm vd., 2024; Zhang vd., 2024). Ayrıca kumaşa aktarılan mikrokapsül konsantrasyonu ile doğru orantılı olarak da hava geçirgenlik değerleri düşmüştür.

### 3.5. Kumaşların mekanik özellikleri (Mechanical properties of fabrics)

Mikrokapsül uygulamasının kumaşın mekanik özellikleri üzerindeki etkisini araştırmak amacıyla mikrokapsül katkılı ve katkısız kumaşlara yırtılma mukavemeti ve eğilme rijitliği testleri uygulanmış ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Şekil 5b ve c'de ham kumaş, Kumaş-100 ve Kumaş-150 kodlu numunelerinin sırasıyla atkı yönünde ve çözgü yönünde yırtılma mukavemeti sonuçlarına ait grafikler verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, 100 g/L ve 150 g/L konsantrasyonda mikrokapsül uygulaması sonrası hem atkı yönünde hem de çözgü yönünde kumaşların yırtılma mukavemetinin düştüğü ancak bu düşüşün istatistiksel olarak önemli olmadığı ( $p > 0,05$ ) belirlenmiştir.

Eğilme rijitliği kumaşın tutumu ve yumuşaklığı hakkında bilgi veren bir parametre olup, düşük eğilme rijitliği kumaşın yumuşaklığını gösterirken, daha yüksek eğilme rijitliği kumaşın sertliğini göstermektedir (Limeneh vd., 2024). Şekil 5d'de verilen eğilme rijitliği analizine ait grafikler incelendiğinde 100 g/L kapsül uygulamasının kumaşın eğilme rijitliğini bir miktar artırdığı, ancak bu artışın önemli olmadığı saptanmıştır ( $p > 0,05$ ). Buna karşılık, Kumaş-150'nin ham kumaşa kıyasla eğilme rijitliğinde anlamlı bir artış gözlemlenmiş olup, bu durum kumaşın tutumunun bir miktar sertleştiğini göstermektedir.



**Şekil 5.** Kumaşların hava geçirgenliği (a), yırtılma mukavemeti (b,c) ve eğilme rijitliği sonuçları(d) (Air permeability (a), tear strength (b,c) and bending stiffness (d) results of fabrics)

#### 4. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Bu çalışmada güneş ışığını verimli bir şekilde termal enerjiye dönüştürebilen pamuklu kumaşların tasarımına odaklanılmıştır. Bu amaç doğrultusunda n-tetradekanol çekirdekli AZ/CuO kompozit duvar yapılı mikrokapsüller emdirme yöntemi ile iki farklı konsantrasyonda kumaşa uygulanmıştır. SEM görüntülerinden hem lif yüzeyinde hem de lifler arası boşluklarda çok sayıda TD@AZ/CuO mikrokapsülün varlığı gözlemlenmiştir. Mikrokapsül uygulanmış kumaşlar, içerdikleri TD@AZ/CuO kapsülleri tarafından absorplanan gizli ısı sayesinde termoregülasyon özelliği sergilemişlerdir. Ayrıca kumaşlar güneş ışığını ısı enerjisine dönüştürerek fototermal dönüşüm performansı sergilemiş ve ham kumaşla arasındaki maksimum sıcaklık farkı 5,2 °C ve 6 °C olarak tespit edilmiştir. Mikrokapsül içerikli kumaşların termal iletkenlikleri mikrokapsül duvar yapısındaki CuO nanopartikülleri sayesinde önemli seviyede gelişmiştir. Mikrokapsül uygulamasının kumaşın mekanik özellikleri üzerindeki etkisi incelendiğinde, her iki konsantrasyonda kapsül uygulamasının yırtılma mukavemetini önemli seviyede etkilemediği görülmüştür. Buna ek olarak 100 g/L kapsül uygulaması kumaşın eğilme direncini etkilemezken, 150 g/L kapsül uygulaması kumaş sertliğinin bir miktar artmasına neden olmuştur. Kumaşların hava geçirgenlik değerleri ise mikrokapsüllerin gözenekleri doldurmasından dolayı düşmüştür. Özetle geliştirilen bu kumaş gelişmiş termoregülasyon özellikleri ile koruyucu tekstillerin bir katmanı olarak kullanıma olanak sunmaktadır.

#### Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the author.

**Kaynaklar (References)**

- Aksoy, S. A., Yılmaz, D., Maleki, H., Rahbar, R. S., Barani, H., 2024. Fabrication and characterization of nanoencapsulated PCM-doped cotton/PAN nanofiber based composite yarns for thermoregulation. *Journal of Energy Storage*, 101, 113849.
- Alay Aksoy, S., Alkan, C., Tözüm, M. S., Demirbağ, S., Altun Anayurt, R., Ulcay, Y., 2017. Preparation and textile application of poly (methyl methacrylate-co-methacrylic acid)/n-octadecane and n-icosane microcapsules. *The Journal of the Textile Institute*, 108(1), 30-41.
- Chai, Z., Fang, M., Min, X., 2024. Composite Phase-Change Materials for Photo-Thermal Conversion and Energy Storage: A review. *Nano Energy* 124: 109437.
- Chen, K., Chen, J., Xu, C., Zhu, H., Hu, J., Yu, K., 2025. Design and Synthesis of Multi-compartment Microcapsules via Pickering Emulsion Polymerization for Infrared Stealth and Adaptive Camouflage Applications. *Small*, 21(5), 2405543.
- Demirbağ Genç, S. Production of Composite Microcapsule With Gum Arabic/Copper Oxide Shell For Thermal Energy Storage And Photo-Thermal Conversion, *International Ceramics And Composite Materials Symposium*, 15-16 Kasım 2024, Isparta
- Deng, G., Yang, Y., Lu, S., Ma, L., Wu, G., 2024. Silk Fabrics Modified with Photothermal Phase Change Microcapsules for Personal Thermal Management. *International Journal of Nanomedicine*, 8485-8499.
- Du, M., Yu, X., Zhang, Z., Shao, M., Zhou, L., Zhu, G., Militky, J., Kremenakova D, Zhang G., 2022. CuS nanoparticle-based microcapsules for solar-induced phase-change energy storage. *ACS Applied Nano Materials*, 5(9), 13009-13017.
- Gao, G., Zhang, T., Jiao, S., Guo, C., 2020. Preparation of reduced graphene oxide modified magnetic phase change microcapsules and their application in direct absorption solar collector, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 216, 110695.
- Hou, M., Jiang, Z., Chu, F., Zhang, X., Lai, N.C., 2022. N-icosane@ TiO<sub>2</sub>/TiN composite phase change microcapsules: Efficient visible light-driven reversible solid-liquid phase transition. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 651, 129674.
- Hu, L., Li, X., Ding, L., Chen, L., Zhu, X., Mao, Z., Feng, X., Sui, X., Wang, B., 2021. Flexible textiles with polypyrrole deposited phase change microcapsules for efficient photothermal energy conversion and storage. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 224, 110985.
- Huang, C., Li, Q., Yang, Y., Wei, S., Ji, R., Zhang, Q., Yucao, Z., Huanzhi, Z., Fen, X., Lixian S, Xia, Y., 2020. A novel bifunctional microencapsulated phase change material loaded with ZnO for thermal energy storage and light-thermal energy conversion. *Sustainable Energy & Fuels*, 4(10), 5203-5214.
- Jiao, M., Zhang, Y., Dong, Z., Zhang, H., Jiang, Y., 2024. Microencapsulation of multi-component traditional Chinese herbs extracts and its application to traditional Chinese medicines loaded textiles. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 240, 113970.
- Li, J., Long, Y., Cao, X., Sun, H., Jiao, R., Zhu, Z., Liang, W., Li, A., 2024. Recent advances and perspectives in solar photothermal conversion and storage systems: A review. *Advances in Colloid and Interface Science*, 103118.
- Li, J., Zhu, X., Wang, H., Lin, P., Jia, L., Li, L., Chen, Y., 2021. Synthesis and properties of multifunctional microencapsulated phase change material for intelligent textiles. *Journal of Materials Science*, 56, 2176-2191.
- Li, S., Ji, W., Zou, L., Li, L., Li, Y., Cheng, X., 2022. Crystalline TiO<sub>2</sub> shell microcapsules modified by Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/GO nanocomposites for thermal energy storage and photocatalysis. *Materials Today Sustainability*, 19, 100197.
- Limeneh, D. Y., Tesema, A. F., Rajan, K., Abidi, N., Yilma, K. T., 2024. Evaluating the Comfort Properties of Single Jersey Knitted Fabrics. *Journal of Natural Fibers*, 21(1), 2436054.
- Liu, H., Qian, Z., Liao, G., Wang, X., 2021a. Integration of magnetic phase-change microcapsules with black phosphorus nanosheets for efficient harvest of solar photothermal energy. *ACS Applied Energy Materials*, 4(11), 13248-13262.
- Liu, H., Shen, H., Zhang, H., Wang, X., 2022a. Development of photoluminescence phase-change microcapsules for comfort thermal regulation and fluorescent recognition applications in advanced textiles. *Journal of Energy Storage*, 49, 104158.
- Liu, H., Tian, X., Ouyang, M., Wang, X., Wu, D., Wang, X. 2021b., Microencapsulating n-docosane phase change material into CaCO<sub>3</sub>/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> composites for high-efficient utilization of solar photothermal energy, *Renewable Energy*, 179, 47-64.
- Liu, J., Chen, L., Fang, X., Zhang, Z., 2017. Preparation of graphite nanoparticles-modified phase change microcapsules and their dispersed slurry for direct absorption solar collectors, *Solar energy materials and solar cells*, 159, 159-166.
- Liu, L., Miao, X., Cheng, X., Wang, H., Guo, M., Cheng, F., Zhang, M. 2022b. Preparation and characterization of ZnO/SiO<sub>2</sub>@ n-octadecane nanocapsule for ultraviolet absorbing and photothermal conversion energy storage. *Journal of Energy Storage*, 54, 105363.
- Ma, X., Liu, Y., Liu, H., Zhang, L., Xu, B., Xiao, F., 2018. Fabrication of novel slurry containing graphene oxide-modified microencapsulated phase change material for direct absorption solar collector. *Solar energy materials and solar cells*, 188, 73-80.
- Maithya, O. M., Zhu, X., Li, X., Korir, S. J., Feng, X., Sui, X., Wang, B., 2021. High-energy storage graphene oxide modified phase change microcapsules from regenerated chitin Pickering Emulsion for photothermal conversion. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 222, 110924.
- Maithya, O.M., Li, X., Feng, X., Sui, X., & Wang, B., 2020. Microencapsulated phase change material via Pickering emulsion stabilized by graphene oxide for photothermal conversion. *Journal of materials science*, 55, 7731-7742.
- Matusiak, M., Sukhbat, O., 2024. Analysis of Liquid Transport Performance of Cotton Knitted Fabric Made by the TransDry Technology. *Journal of Natural Fibers*, 21(1), 2415964.
- Önder, E., Sarier N. 2006. Sıcaklık Düzenleme İşlevi Olan Akıllı Tekstil Ürünlerinin Tasarımı, TÜBİTAK Projesi, No: MİSAG-238, İstanbul, 113.
- Skurkyte-Papieviene, V., Abraitiene, A., Sankauskaite, A., Rubeziene, V., Baltusnikaite-Guzaitiene, J., 2021. Enhancement of the thermal performance of the paraffin-based microcapsules intended for textile applications. *Polymers*, 13(7), 1120.
- Sun, W., Hou, Y., Zhang, X., 2021. Bi-functional paraffin@ polyaniline/TiO<sub>2</sub>/PCN-222 (Fe) microcapsules for solar thermal energy storage and CO<sub>2</sub> photoreduction. *Nanomaterials*, 12(1):2.

- Sun, W., Zhang, Z., Zhang, Z., He, N., Wei, Q., Feng, L., Wang, Z., Wu, J., Liu, C., Fu, S., Hou, Y., Sebe, G., Zhou, G., 2024 Photothermal phase change material microcapsules via cellulose nanocrystal and graphene oxide co-stabilized Pickering emulsion for solar and thermal energy storage. *Science China Materials*, 67(10):3225-3235.
- Sun, Z, Shi, T, Wang, Y., Li, J., Liu, H., Wang, X., 2022. Hierarchical microencapsulation of phase change material with carbon-nanotubes/polydopamine/silica shell for synergistic enhancement of solar photothermal conversion and storage. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 236, 111539.
- Tian, D., Shi, T., Wang, X., Liu, H., Wang, X., 2022. Magnetic field-assisted acceleration of energy storage based on microencapsulation of phase change material with CaCO<sub>3</sub>/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> composite shell. *Journal of Energy Storage*, 47, 103574.
- Tözüm, M. S., Alay Aksoy, S., 2016. Investigation of tactile comfort properties of the fabrics treated with microcapsules containing phase change materials (PCMs microcapsules). *The Journal of The Textile Institute*, 107(9), 1203-1212.
- Tözüm, M.S., Demirbağ Genç, S., Alay Aksoy, S., 2024. Design of Thermochromic Cotton Fabrics with Thermoregulation Behavior Through Application of Chitosan-Sodium Alginate/Cvl/1-Tetradecanol-Based Thermochromic Phase Change Microcapsules. *Fibers and Polymers*, 25(9):3427-3439.
- Wang, X., Li, C., Zhao, T., 2018. Fabrication and characterization of poly (melamine-formaldehyde)/silicon carbide hybrid microencapsulated phase change materials with enhanced thermal conductivity and light-heat performance. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 183, 82-91.
- Wang, X., Zhang, C., Wang, K., Huang, Y., Chen, Z. 2021., Highly efficient photothermal conversion capric acid phase change microcapsule: Silicon carbide modified melamine urea formaldehyde. *Journal of Colloid and Interface Science*, 582, 30-40.
- Xu, B., Chen, C., Zhou, J., Ni, Z., Ma, X., 2019. Preparation of novel microencapsulated phase change material with Cu-Cu<sub>2</sub>O/CNTs as the shell and their dispersed slurry for direct absorption solar collectors, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 200, 109980.
- Xu, B., Zhou, J., Ni, Z., Zhang, C., Lu, C., 2018. Synthesis of novel microencapsulated phase change materials with copper and copper oxide for solar energy storage and photo-thermal conversion, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 179, 87-94.
- Xu, S., Du, M., Yu, X., Zhang, Z., Zhou, L., Zhu, G., Militky, J., Kremenakova, D., Zhang, G., 2023. Preparation of photothermal conversion and energy storage microcapsules based on Pickering emulsions with poly (p-phenylenediamine) as stabilizer and photothermal materials. *Journal of Energy Storage*, 59, 106564.
- Yuan, K., Liu, J., Fang, X., Zhang, Z., 2018. Novel facile self-assembly approach to construct graphene oxide-decorated phase-change microcapsules with enhanced photo-to-thermal conversion performance, *Journal of Materials Chemistry A*, 6(10), 4535-4543.
- Yuan, K., Wang, H., Liu, J., Fang, X., Zhang, Z., 2015. Novel slurry containing graphene oxide-grafted microencapsulated phase change material with enhanced thermo-physical properties and photo-thermal performance, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 143, 29-37.
- Zhang, H., Chen, Z., Yang, G., Yao, X., Zhang, Y., Shao, H., 2024. Antibacterial cellulose solution-blown nonwovens modified with salicylic acid microcapsules using NMMO as solvent. *Carbohydrate Polymers*, 345, 122567.
- Zhang, H., Wang, K., Wang, L., Xie, H., Yu, W., 2020. Mesoporous CuO with full spectrum absorption for photothermal conversion in direct absorption solar collectors. *Solar Energy*, 201, 628-637.
- Zhao, B., Shi, X., Qiu, H., Chen, K., 2024. Design and application of polyurethane-polydopamine/Ag double-shell microcapsules for enhanced photothermal conversion and incremental energy storage. *Sustainable Materials and Technologies*, 40, e00895.
- Zhao, K., Wang, J., Xie, H., Guo, Z., 2022. Enhanced photothermal conversion and thermal conductivity of phase change n-Octadecane microcapsules shelled with nano-SiC doped crosslinked polystyrene. *Energy Storage and Saving*, 1(4), 284-292.
- Zhao, Q., He, F., Zhang, Q., Fan, J., He, R., Zhang, K., Yan, H., Yang, W., 2019a. Microencapsulated phase change materials based on graphene Pickering emulsion for light-to-thermal energy conversion and management. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 203, 110204.
- Zhao, Q., Yang, W., Li, Y., He, Z., Li, Y., Zhou, Y., Wang, R., Fan, J., Zhang, K., 2020. Multifunctional phase change microcapsules based on graphene oxide Pickering emulsion for photothermal energy conversion and superhydrophobicity. *International Journal of Energy Research*, 44(6), 4464-4474.
- Zhao, Q., Yang, W., Zhang, H., He, F., Yan, H., He, R., Zhang K, Fan, J., 2019b. Graphene oxide Pickering phase change material emulsions with high thermal conductivity and photo-thermal performance for thermal energy management. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 575, 42-49.