



MİKROKAPSÜL APLİKASYONU İLE FOTO-TERMAL DÖNÜŞÜM PERFORMANSI ve ISIL KONFOR SUNABİLEN KUMAŞLARIN GELİŞTİRİLMESİ

Müyesser Selda TÖZÜM^{1,2*}

¹ Uşak Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Tekstil Mühendisliği Bölümü, Uşak, Türkiye

² Uşak Üniversitesi, Bilimsel Analiz ve Teknolojik Uygulama ve Araştırma Merkezi, Uşak, Türkiye

Anahtar Kelimeler Öz

*Foto-termal,
Isıl konfor,
Pamuk,
Emdirme.*

Çalışmada, mikrokapsül teknolojisi kullanılarak foto-termal dönüşüm performansı ve ısı konfor özellikleri sunabilen tekstil materyallerinin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla, ZnO nanopartiküller ile kaplanmış kitosan/sodyum alginat duvarlı faz değiştiren mikrokapsüller, pamuklu dokuma kumaşlara emdirme yöntemi ile uygulanmıştır. Uygulama, 100 g/l ve 150 g/l olmak üzere iki farklı konsantrasyonda gerçekleştirilmiştir. Mikrokapsül uygulanmış kumaşların morfolojileri, foto-termal dönüşüm performansları ve ısı konfor özellikleri araştırılmıştır. Çalışmada ayrıca, kumaşların son kullanım için uygunluğunun belirlenmesinde önemli olan hava geçirgenliği, eğilme rijitliği ve yırtılma mukavemeti gibi özellikler de araştırılmış ve mikrokapsül konsantrasyonunun bu özellikler üzerindeki etkisi incelenmiştir. UV ışığını absorblayarak ısıya dönüştürebilen ZnO nanomateriyaller ile kaplı mikrokapsüllerin kumaşlara uygulanması, kumaşlara foto-termal dönüşüm yapabilme yeteneği kazandırmıştır. Mikrokapsül uygulanan kumaşların ısı iletkenlikleri, kapsül yapısındaki yüksek iletkenliğe sahip ZnO nanopartiküller ile ilişkili olarak ham kumaşa göre artarken, ısı dirençleri azalmıştır. Mikrokapsül uygulama sonrası kumaşların hava geçirgenliklerinde kapsül konsantrasyonu ile ilişkili olarak ham kumaşa kıyasla önemli bir azalma gözlenirken, eğilme dayanımı ve yırtılma mukavemetlerinde önemli bir değişim gözlenmemiştir.

THE DEVELOPMENT OF FABRICS THAT CAN OFFER PHOTO-THERMAL CONVERSION PERFORMANCE AND THERMAL COMFORT THROUGH MICROCAPSULES APPLICATION

Keywords

*Photo-thermal,
Thermal comfort,
Cotton,
Padding.*

Abstract

In this study, it was aimed to develop textile materials that can offer photothermal conversion performance and thermal comfort properties by using microcapsule technology. For this aim, chitosan/sodium alginate walled phase change microcapsules coated with ZnO nanoparticles were applied to cotton woven fabrics by padding method. The application was carried out at two different concentrations, 100 g/l and 150 g/l. The morphology, photo-thermal conversion performance and thermal comfort properties of fabrics treated with microcapsules were investigated. In the study, properties such as air permeability, bending rigidity, and tear strength which were important in determining the suitability of fabrics for end use were also investigated, and the effect of microcapsule concentration on these properties was examined. The application of microcapsules coated with ZnO nanomaterials, which possess the ability to absorb ultraviolet (UV) light and convert it into heat has given fabrics the ability to make photothermal conversion. The thermal conductivity of the fabrics treated with microcapsules in comparison to the untreated fabric increased in relation to the high-conductivity ZnO nanoparticles in the microcapsule structure; conversely, their thermal resistance decreased. While a significant decrease in air permeability of the fabrics was observed after microcapsule application in relation to the microcapsule concentration compared to the untreated fabric, no significant change was observed in bending rigidity and tear strength of fabrics.

Alıntı / Cite

Tözüm, M.S., (2025). Mikrokapsül Aplikasyonu İle Foto-Termal Dönüşüm Performansı Ve Isıl Konfor Sunabilen Kumaşların Geliştirilmesi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 13(3), 911-920.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

M.S. Tözüm, 0000-0003-2887-5637

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	10.03.2025
Revizyon Tarihi / Revision Date	25.06.2025
Kabul Tarihi / Accepted Date	26.06.2025
Yayın Tarihi / Published Date	30.09.2025

* İlgili yazar / Corresponding author: selda.tozum@usak.edu.tr

THE DEVELOPMENT OF FABRICS THAT CAN OFFER PHOTO-THERMAL CONVERSION PERFORMANCE AND THERMAL COMFORT THROUGH MICROCAPSULES APPLICATION

Müyesser Selda TÖZÜM^{1,2†}

¹ Uşak University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Textile Engineering Department, Uşak, Türkiye

² Uşak University, Scientific Analysis and Technological Application and Research Center, Uşak, Türkiye

Highlights

- Microcapsules were applied to the cotton fabrics at two different ratios by padding method.
- Microcapsule-treated fabrics were exhibited photo-thermal conversion performance.
- The thermal conductivity of microcapsule-treated fabrics increased, while the thermal resistance decreased compared to the untreated fabric.
- After the microcapsule application, the air permeability of the fabrics decreased, but no significant changes were observed in their bending rigidity and tear strength.

Graphical Abstract

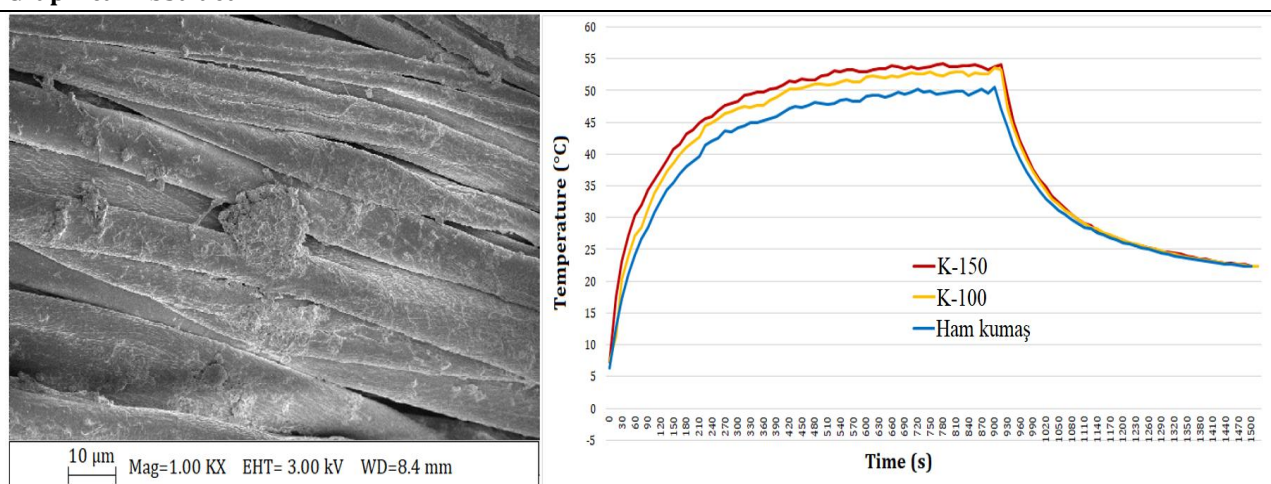


Figure. SEM images (left) and photo-thermal conversion test results (right) of the microcapsule-treated fabrics

Purpose and Scope

The aim of this study was to develop fabrics that could exhibit photo-thermal performance and thermal comfort properties. For this aim, chitosan/sodium alginate walled phase-change microcapsules coated with ZnO nanoparticles were applied to cotton fabrics by pad-dry-cure. Another aim of this study was to investigate the changes in the performance properties of fabrics by applying microcapsules to fabrics at two different concentrations.

Design/methodology/approach

In this study, microcapsules were applied to cotton woven fabrics at two different concentrations of 100 g/l and 150 g/l using the pad-dry-cure method. The morphological, thermal and photo-thermal properties of the microcapsule treated fabrics were investigated. In addition, air permeability, bending resistance and tear strength of fabrics related to clothing comfort were analyzed.

Findings

The microcapsules applied to fabrics have improved the thermal properties of fabrics and gave photo-thermal property to them. Air permeability of microcapsule-treated fabrics decreased significantly compared to untreated fabric, in direct proportion to the increasing capsule concentration. No significant change was observed in the bending resistance and tear strength of the fabrics after microcapsule application, and no significant effect of capsule concentration on these properties was detected.

Originality

When the literature studies were examined, it was found that there were only a few studies on the development of textile materials with improved thermal properties and gaved photo-thermal property by microcapsule application. This study makes an important contribution to the literature by showing that microcapsules transferred to fabrics have the potential to enable fabrics to gain photo-thermal properties and improve their thermal performance, as well as being natural, environmentally friendly and biocompatible.

[†] İlgili yazar / Corresponding author: selda.tozum@usak.edu.tr

1. Giriş (Introduction)

Toplumun hızla gelişmesi ve yaşam standartlarının sürekli yükselmesiyle birlikte, dünya giderek artan bir enerji sıkıntısıyla karşı karşıya kalmaktadır (Zhang vd., 2024). Güneş enerjisi, çevre dostu ve sürdürülebilir bir enerji kaynağıdır. Güneş enerjisinin verimli bir şekilde dönüştürülmesi ve depolanması, enerji krizi, çevre kirliliği ve diğer küresel sorunların çözümünde önemli bir rol oynamaktadır. Fakat güneş ışığının sürekli dalgalanması ve kesintili olması, güneş enerjisinden temiz, ekonomik ve verimli bir şekilde yararlanmayı zorlaştırmaktadır. Günümüzde, bu problemlerin çözülmesi, güneş enerjisinin depolanması ve ısıya dönüştürülmesi için en etkili yöntemlerden birisi faz değiştiren maddelerin (FDMler) kullanılmasıdır (Chai vd., 2024; Sun vd., 2022). FDMler, ortam sıcaklığındaki değişime bağlı olarak faz geçişi sırasında yüksek miktarda enerji depolayabilen ve yayabilen malzemelerdir (Niu vd., 2023; Kang vd., 2023; Reddy vd., 2024). FDMler faz geçiş sınırına ulaştığında faz değişimi geçirerek soğuma sırasında enerji açığa çıkarırken ısınma sırasında ise enerji absorblamaktadır (Mondal, 2008; Shahid vd., 2024). Son zamanlarda, FDM'lerin karbon nanotüpler (Chen vd., 2012), grafen sünger (Li vd., 2016), metal oksit kaplı aerogeller (Wang vd., 2019), indirgenmiş grafen oksit (Zhou vd., 2018), yarı iletken modifiye köpükler (Liu vd., 2020; Fan vd., 2019) ve iletken polimerler (Wu vd., 2019; Lei vd., 2019) gibi yüksek verimli ve düşük maliyetli foto-termal malzemelerle entegre edilerek temiz ve sürdürülebilir güneş enerjisinin dönüştürülmesi ve depolanmasında kullanılması, araştırmacılar tarafından büyük ilgi görmektedir (Hu vd., 2021; Sun vd., 2022). Foto-termal malzemelerle entegre edilen FDMler güneş ışığını termal enerjiye dönüştürebilme yeteneğine sahiptir (Wang vd., 2018). Foto-termal malzemeler güneş ışığı altında fotonları ısı enerjisine dönüştürerek sıcaklık artışını sağlayarak ısı oluşturmaktadır. Sıcaklık FDM'nin erime sıcaklığına ulaştığında oluşan bu ısı FDM tarafından absorbe edilerek depolanmaktadır. Tam tersi durumda ise, bu ısı çevreye geri yayılmakta ve bu tersinir enerji absorblama/yayma döngüsü devam etmektedir (Fan vd., 2022). Ancak, FDMler, termal iletkenliklerinin düşük olması ve erime sıcaklıklarının üzerinde entegre edildikleri yapıdan sızmaları gibi bazı dezavantajlara sahiptir (Sun vd., 2024; Chai vd., 2024). Mikrokapsülasyon teknolojisi, bu dezavantajları gidermenin yanı sıra, foto-termal malzemeleri faz değişim malzemeleriyle birleştirerek güneş enerjisinin termal enerjiye dönüştürülmesini sağlamak için etkili bir çözüm sunmaktadır (Liu vd., 2022; Maithya vd., 2021; Liu vd., 2019; Zhu vd., 2016).

Faz değiştiren foto-termal özellikteki mikrokapsüllerin tekstil alanındaki uygulaması oldukça önemlidir ve enerji tasarrufu için çevre dostu davranışın yanı sıra tekstillerin işlevsel olarak genişletilmesi için termal konforu, enerji verimliliğini ve işlevselliği artırmak için yeni olanaklar sağlamaktadır (Deng vd., 2024; Shahid vd., 2024). Hu vd., 2021; in-situ polimerizasyon yöntemi ile ürettikleri polipirrol kaplanmış parafin içeren melamin formaldehit duvarlı mikrokapsüllere poliüretan katarak yaş çekim yöntemiyle foto-termal tekstil liflerini üretmişlerdir. Üretilen liflerin 184 j/g ısı depolama kapasitesine sahip olduğu, foto-termal verimliliklerinin ise 1 Kw/m² ve 0,5 Kw/m² ışık yoğunluğu altında sırasıyla %92,22 ve %88,34 olduğu tespit edilmiş olup 100 ısıtma-soğutma termal döngüsünden sonra bile bu özelliklerini koruyabilmiştir (Hu vd., 2021). Li vd., 2021; n-eykosan içeren bakır oksit yüklenmiş poliüretan duvarlı mikrokapsülleri ara yüzey polimerizasyon yöntemi ile üretmiş ve pamuklu kumaşa kaplama yöntemiyle uygulamıştır. Mikrokapsül uygulanmış kumaşlar 36,8 j/g ısı depolama kapasitesine sahip olup süperhidrofobik özellik sergilemiştir (Li vd., 2021). Sun vd., 2022; polidopamin ve karbon-nanotüp kaplanmış n-dokasan/silika mikrokapsüllerin tekstilde kullanımını araştırmak için pamuklu kumaşlara uygulamıştır ve kapsül içeren kumaşların enerji depolama ve foto-termal özelliklerini araştırmıştır. Kumaşların foto-termal dönüşüm performansları, termal kamera ile güneş ışığı altında ve gölgede bekletilen kumaşların yüzey sıcaklıklarındaki değişim ölçülerek değerlendirilmiştir (Sun vd., 2022).

Literatür çalışmaları incelendiğinde, enerji depolama ve foto-termal özelliklerini birlikte sunabilen mikrokapsüllerin üretimi ve tekstile uygulamaları üzerine sınırlı sayıda çalışma bulunduğu görülmektedir. Bu çalışmalarda mikrokapsüllerin daha çok in-situ polimerizasyon (Wang vd., 2021; Huang vd., 2020; Wang vd., 2018), sol-jel (Hou vd., 2022; Li vd. 2022), polikondenzasyon (Ma vd., 2018) ve Pickering emulsiyon (Liu vd., 2021a) gibi yöntemlerle üretildiği görülmektedir. Bu çalışmada ise kumaş uygulaması için kullanılan mikrokapsüller eski, basit ve endüstriye uygulanabilirliğe olanak sağlayan bir yöntem olan kompleks koaservasyon yöntemiyle üretilmiş doğal, çevre dostu ve biyobozunur yapıya sahip mikrokapsüllerdir. Çalışma, kompleks koaservasyon yöntemi ile üretilmiş, foto-termal malzeme olarak metal oksit nanomateryaller ile kaplanmış mikrokapsüllerin tekstil malzemelerinde kullanılabilir potansiyelinin araştırılması açısından önemli bir adım olacaktır. Çalışmada, enerji depolayabilen ve foto-termal özellikli, doğal, çevre dostu ve biyobozunur yapıya sahip mikrokapsüllerin pamuklu kumaşlara uygulanması ile çevreye duyarlı sürdürülebilir akıllı tekstillerin geliştirilme potansiyeline odaklanılmıştır. Çinko oksit (ZnO) nanopartiküller ile kaplanmış FDM içeren kitosan/sodyum alginat duvarlı mikrokapsüller pamuklu kumaşa emdirme yöntemiyle uygulanmış ve kumaşların uygulama sonrası morfolojisi, fototermal dönüşüm performansları ve ısı konfor özellikleri incelenmiştir. Ayrıca, geliştirilen kumaşların hedeflenen fonksiyonel özelliklerinin belirlenmesinin yanı sıra, son kullanıcının gereksinimleri de hesaba katılarak, giysi konforu açısından önemli olan hava geçirgenliği, eğilme rijitliği ve yırtılma mukavemeti gibi özellikleri de araştırılmıştır.

2. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

Foto-termal ve ısı konfor özellikleri gösterebilen kumaşların geliştirilmesi için daha önceki çalışmada üretilmiş ZnO nanopartiküller ile kaplanmış kitosan/sodyum alginat duvarlı mikrokapsüller kullanılmıştır (Tözüm, 2024). Mikrokapsül uygulaması için %100 pamuklu dokuma kumaş kullanılmıştır. Çapraz bağlayıcı olarak Orkim firmasından temin edilen Fixapret Resin F-Eco (Modified Dimethyloldihydroxyethyleneurea, F-ECO), katalizör olarak ise magnezyum klorür ($MgCl_2$, BASF Company) kullanılmıştır.

Mikrokapsülleri kumaşa uygulamak için emdirme yöntemi kullanılmıştır. Mikrokapsüller pamuklu dokuma kumaşa 100 g/l ve 150 g/l olmak üzere iki farklı konsantrasyonda uygulanmıştır. Yıkanmış ve filtre edilmiş yaş mikrokapsüller, çapraz bağlayıcı ve katalizörden oluşan banyo çözeltisi Digital Weightlab WF-OD20 mekanik karıştırıcı kullanılarak 3000 devir/dakika karıştırma hızında bir saat boyunca homojen bir dağılım elde edilene kadar karıştırılarak hazırlanmıştır. Hazırlanan banyo, laboratuvar tipi bir fular makinesinde 2 bar basınç ve 2 m/dak hızda kumaşa emdirilmiştir. Emdirme sonrası kumaşlar 80 °C'de 5 dakika kurutma, 120 °C'de 1 dakika fikse işlemine tabi tutulmuştur. Tablo 1'de mikrokapsül uygulama koşullarına ait bilgiler özet olarak verilmiştir.

Tablo 1. Mikrokapsül uygulama koşullarına ait bilgiler (Information on the conditions for microcapsule application)

Kumaş kodu	Mikrokapsül konsantrasyonu	Çapraz bağlayıcı miktarı	Katalizör
K-100	100 g/l	60 g/l	15 g/l
K-150	150 g/l		

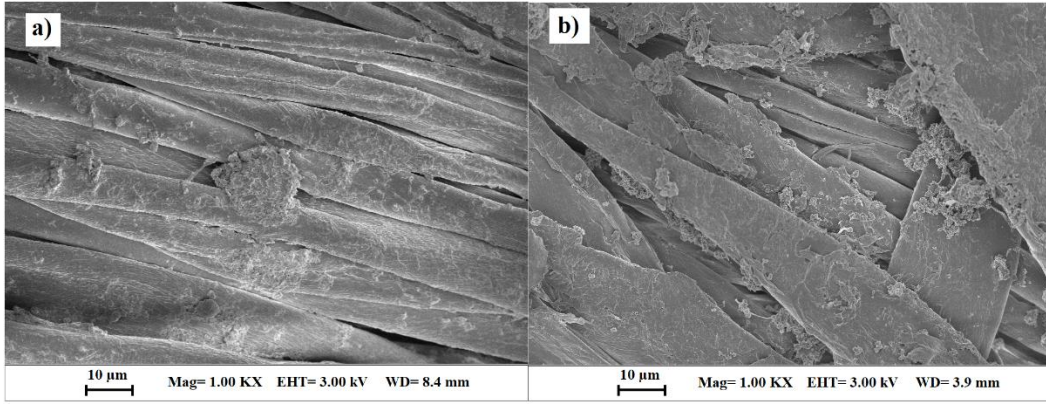
Mikrokapsül uygulanmış kumaşların morfolojisi ve yapısındaki mikrokapsül varlığı taramalı elektron mikroskopu (SEM) analizi ile araştırılmıştır. Kumaşların hava geçirgenliklerinin belirlenmesi, Textest FX 3300 cihazı kullanılarak TS 391 EN ISO 9237 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Kumaşların eğilme dayanımı TS 1409:1973 standardına göre Wira marka eğilme dayanımı test cihazı kullanılarak belirlenmiştir. Yırtılma mukavemeti testi balistik sarkaç (elmandorf) metodu esas alınarak TS EN ISO 13937-1 standardına göre gerçekleştirilmiştir. Mikrokapsül uygulaması sonrası kumaşların sabit durumdaki ısı özelliklerindeki değişim Alambeta cihazı kullanılarak belirlenmiştir. Test hem işlem görmemiş hem de mikrokapsül uygulanmış kumaşlar için gerçekleştirilmiş ve ölçülen ısı iletkenlik, ısı soğurganlık, ısı direnç ve kalınlık değerleri karşılaştırılmıştır. Kumaşlara ait test sonuçları, SPSS Statistics 26 yazılımı kullanılarak Varyans Analizi (ANOVA) yöntemi ile istatistiksel olarak değerlendirilmiştir. Farklı konsantrasyonlarda mikrokapsül uygulamasının, kumaşların performans özellikleri üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla hava geçirgenliği, eğilme dayanımı, yırtılma mukavemeti ve ısı parametrelerine ilişkin ANOVA testleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, ANOVA testinde elde edilen anlamlı sonuçların hangi gruplar arasında farklılık gösterdiğini belirlemek amacıyla Tukey HSD (Honestly Significant Difference) çoklu karşılaştırma testi uygulanmıştır.

Mikrokapsül uygulanmış kumaşların foto-termal dönüşüm performansları, mikrokapsüllerin yerleştirildiği yalıtımlı bir poliüretan kutu (30x30 mm), UV lamba (25 Watt, 0,17 Watt/cm² yoğunluk) ve termal kameradan oluşan bir deney düzeneği kullanılarak araştırılmıştır. Test öncesi poliüretan kutu içerisine yerleştirilen mikrokapsüller buzdolabında kondisyonlandıktan sonra 12 cm ölçüm mesafesinde UV lambasının altında 15 dakika boyunca ışınlamaya maruz bırakılmıştır. Ardından ışık kaynağı kapatılarak 10 dakika boyunca kumaşlar kendi halinde soğutulmaya bırakılmıştır. Ölçüm sırasında kumaş yüzey sıcaklıkları termal kamera ile 15 saniyede bir ölçülmüş olup, test sonunda zamana bağlı yüzey sıcaklık değişim grafikleri elde edilerek test sonucu değerlendirilmiştir.

3. Deneyisel Sonuçlar (Experimental Results)

3.1. Mikrokapsül uygulanmış kumaşların morfolojisinin belirlenmesi (Determination of the morphology of microcapsule applied fabrics)

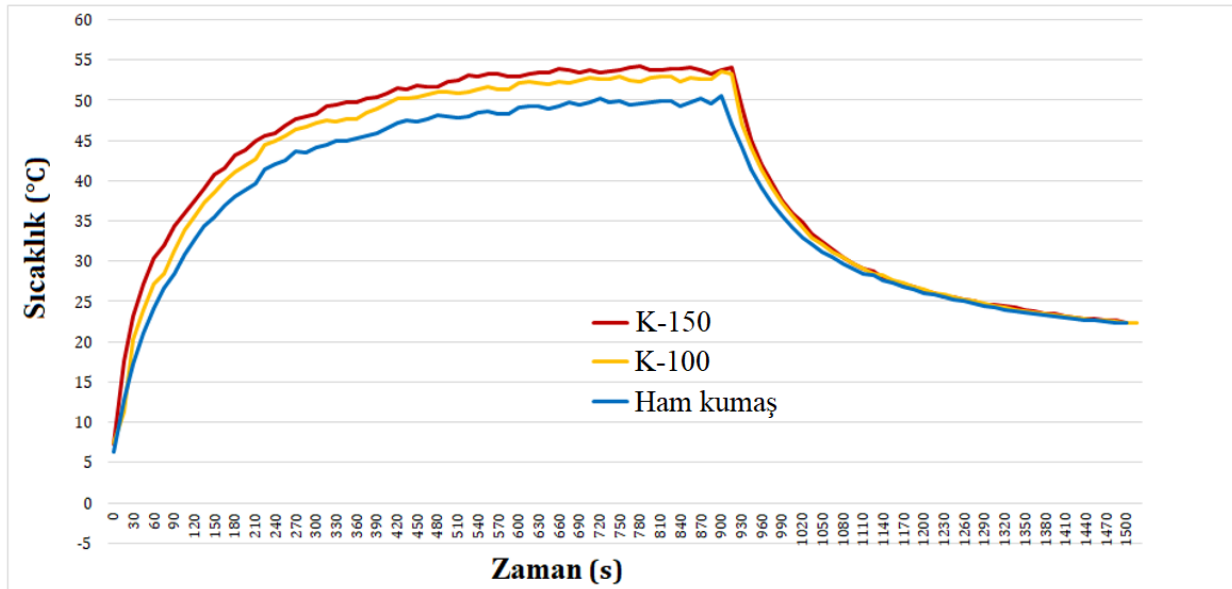
Mikrokapsül uygulanmış kumaşların yapısındaki mikrokapsül varlığı SEM analizi ile belirlenmiştir. Şekil 1'de mikrokapsül uygulama sonrası kumaşların yüzey morfolojisini gösteren SEM görüntüleri verilmiştir. Görüntüler incelendiğinde, lif yüzeyinde ve lifler arası boşluklarda çok sayıda mikrokapsülün varlığı açıkça görülmektedir. Kumaşa uygulanan kapsül konsantrasyonu açısından değerlendirildiğinde ise konsantrasyonundaki artışın önemli bir etki göstermediği söylenebilmektedir.



Şekil 1. Mikrokapsül uygulanmış K-100 (a) ve K-150 (b)'ye ait SEM görüntüleri (SEM images of microcapsule-treated K-100 (a) and K-150 (b))

3.2. Mikrokapsül uygulanmış kumaşların fototermal dönüşüm performanslarının değerlendirilmesi (Evaluation of the photothermal conversion performance of microcapsule applied fabrics)

Mikrokapsül uygulanmış kumaşların fototermal dönüşüm performansları, UV ışığına maruz kalma süresi boyunca kumaş yüzeyindeki sıcaklık değişimi izlenerek değerlendirilmiştir. Şekil 2'de ham kumaş, K-100 ve K-150'ye ait zamana bağlı sıcaklık değişim grafiği verilmiştir. Grafik incelendiğinde, kumaş yüzey sıcaklıklarının UV ışığına maruz kalma süresi arttıkça yükseldiği, ancak K-100 ve K-150'nin ham kumaşa kıyasla daha hızlı bir şekilde arttığı görülmektedir. K-100 ve K-150, sırasıyla yaklaşık 120 saniye ve 105 saniyede 35,5 °C'ye ulaşırken, işlem görmemiş ham kumaş aynı sıcaklığa yaklaşık 150 saniyede ulaşmıştır. Ölçüm süresi boyunca ham kumaş ile K-100 arasındaki maksimum sıcaklık farkı 6,3 °C, ham kumaş ile K-150 arasındaki maksimum sıcaklık farkı ise 6,4 °C olarak hesaplanmıştır. Sonuç olarak, mikrokapsül uygulanmış kumaşların, mikrokapsül yapısındaki foto-termal özellikteki ZnO sayesinde UV ışığını absorblayarak güneş ışığını ısıya dönüştürmede etkili olduğu gözlemlenmiştir. Kumaşa uygulanan mikrokapsül konsantrasyonunun etkisi incelendiğinde, aktarılan kapsül konsantrasyonundaki değişimin kumaşların fototermal dönüşüm performansı üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı ve iki farklı konsantrasyonla kapsül uygulanmış kumaşların benzer performans sergilediği sonucuna varılmıştır.



Şekil 2. UV ışığına maruz kalma süresi boyunca kumaşların yüzeyinde gözlenen sıcaklık değişimi (Surface temperature variation of fabrics during UV light exposure)

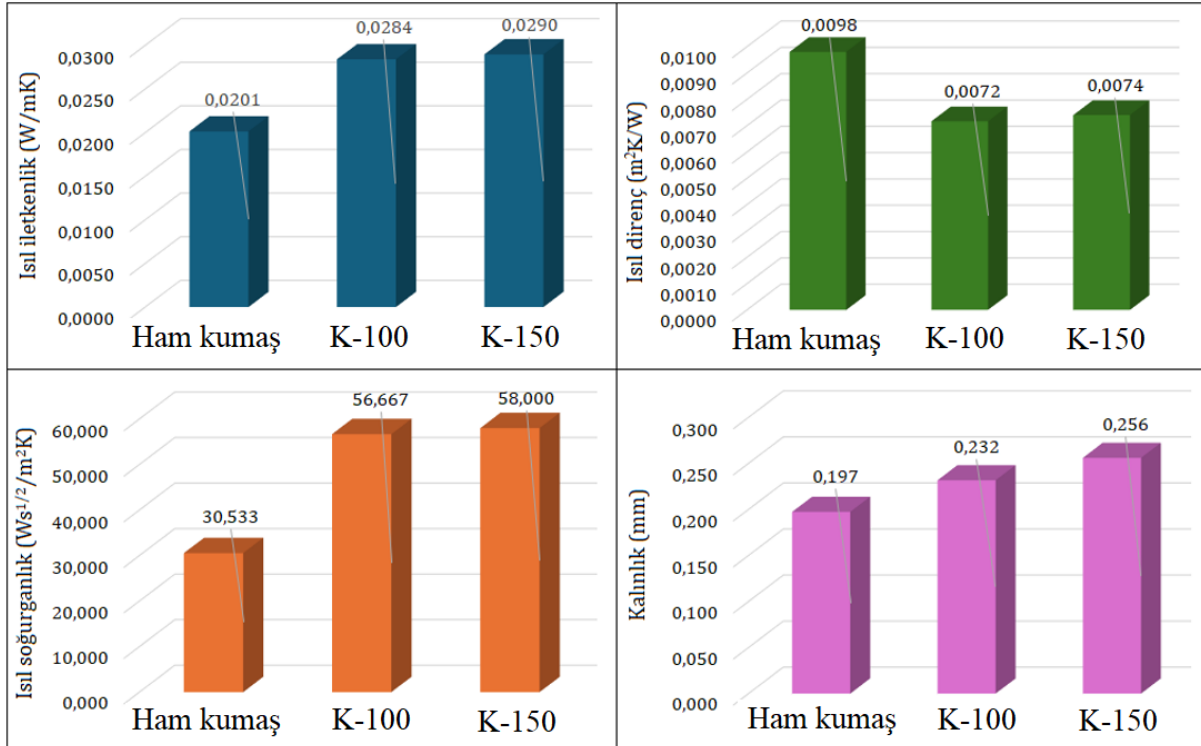
3.3. Kumaşların sabit durumdaki ısı özelliklerinin belirlenmesi (Determination of the steady-state thermal properties of fabrics)

İşlem görmemiş ham kumaş ve mikrokapsül uygulanmış kumaşlara ait kalınlık, ısı iletkenlik, ısı direnç ve ısı soğurganlık test sonuçları Şekil 3'te verilmiştir. Test sonuçlarına göre, ham kumaşa kıyasla mikrokapsül uygulanmış kumaşların ısı iletkenliğinde kayda değer bir artış görülürken ısı dirençlerinde bir azalma

görülmektedir ($p < 0,05$). Literatürde, FDM içeren jelatin ve arap zıncı duvarlı mikrokapsüllerin uygulandığı örme yatak kumaşlarında, kapsül uygulaması sonrasında ısı iletkenlik değerlerinde artış gözlemlenmiştir. Faz değişimi sırasında ısının hızlı bir şekilde absorplanması veya açığa çıkması, kumaşın sıcaklık değişimlerine daha hızlı yanıt vermesini sağlamakta; böylece kumaşın ısı iletkenliğini artırıcı bir etki oluşturmaktadır (Sapancı vd., 2024). Ayrıca, mikrokapsül uygulama sonrası ısı iletkenlikte gözlenen bu artış, mikrokapsüllerin duvar yapısına kaplanmış ZnO nanopartiküllerinin yüksek ısı iletkenliğe sahip olmasından kaynaklanmaktadır (Chen et al. 2024; Yuan et al. 2024).

Isıl direnç, tekstil konforunun değerlendirilmesinde en önemli ve etkili kriterlerden biri olarak kabul edilmektedir. Bu özellik, bir kumaşın belirli bir yüzey alanı üzerinde bir taraftan diğer tarafa ısı geçişine karşı gösterdiği direnci ifade etmektedir (Noman vd., 2020). Isıl direnç, ısı iletkenlik ile ters orantılı iken kalınlık ile doğru orantılıdır (Mangat vd., 2015). Kalınlık ve ısı direnç ölçüm sonuçlarına göre, mikrokapsül uygulaması sonrasında kumaşların kalınlığında istatistiksel olarak anlamlı seviyede olmasa da bir artış gözlenirken ($p > 0,05$), ısı dirençlerinde önemli derecede bir azalma gözlenmektedir ($p < 0,05$). Kapsül uygulaması sonrasında, ham kumaşa göre kumaşların ısı dirençlerinde gözlemlenen bu belirgin azalma, artan ısı iletkenlikten kaynaklanmaktadır. Isıl soğurganlık, bir kumaşın vücutla temas ettiğinde verdiği sıcaklık veya soğukluk hissi olarak tanımlanmaktadır. Yüksek ısı soğurganlık, daha fazla ısı enerjisinin depolanmasına olanak sağlayarak kumaşta serinlik hissi oluştururken; düşük ısı soğurganlık, sıcaklık hissi vermektedir (Sapancı vd., 2024; Alay vd., 2012; Mangat vd., 2017). FDM içerikli mikrokapsül uygulaması, kumaşların ısı absorpsiyonunu artırarak bu özelliği üzerinde olumlu bir etki yaratmaktadır (Sapancı vd., 2024). Isıl soğurganlık test sonuçları, mikrokapsül uygulanan kumaşların, ham kumaşa kıyasla istatistiksel olarak anlamlı şekilde daha yüksek ısı soğurganlık değerlerine sahip olduğunu ve bu sonucun literatürle uyumlu olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla mikrokapsül uygulanmış kumaşların ham kumaşa göre daha serin hissettirdiği söylenebilmektedir.

Isıl konfor özellikleri açısından iki farklı konsantrasyonda mikrokapsül uygulanmış kumaşlar kendi arasında değerlendirildiğinde ise K-100 ve K-150 kodlu kumaşların kalınlık, ısı iletkenlik, kalınlık, ısı direnç ve ısı soğurganlık değerlerinde istatistiksel olarak anlamlı seviyede bir değişimin olmadığı, dolayısıyla, kumaşa aktarılan mikrokapsül konsantrasyonunun önemli bir etkisinin olmadığı sonucuna varılmıştır.

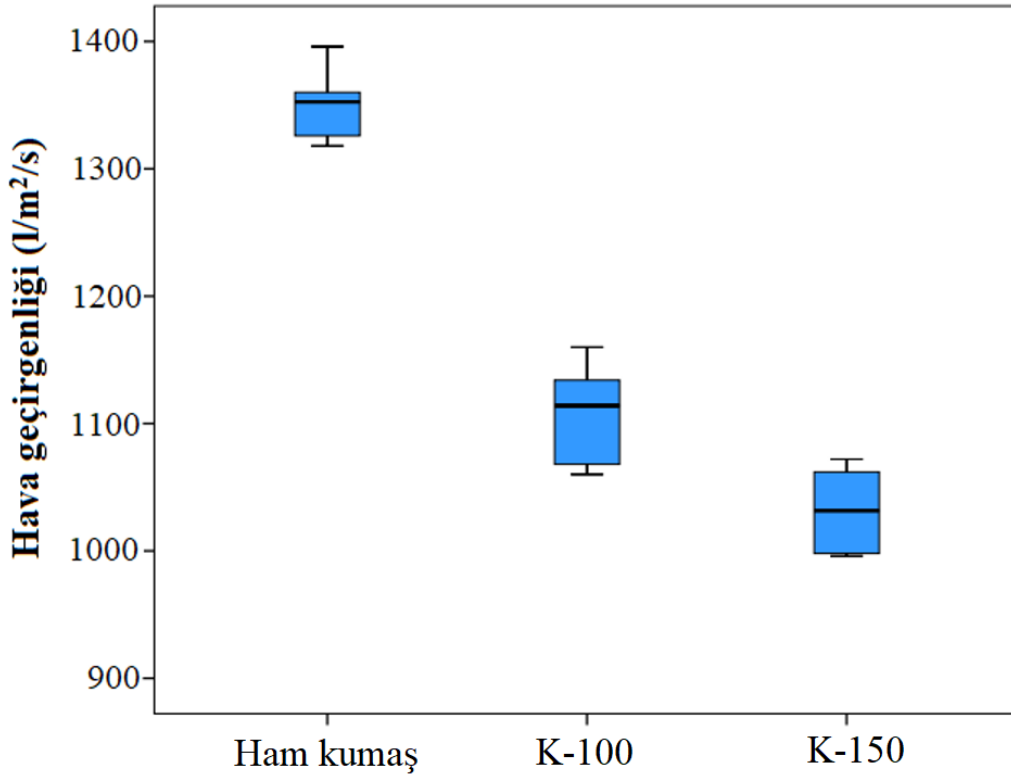


Şekil 3. Kumaşların sabit durumdaki ısı özellikleri (Steady-state thermal properties of fabrics)

3.4. Hava geçirgenliği (Air permeability)

Mikrokapsül uygulaması sonrasında kumaşların hava geçirgenliklerinde değişim olup olmadığını belirlemek için işlem görmemiş ham kumaş ve mikrokapsül uygulanmış K-100 ve K-150 kumaşların hava geçirgenlikleri test edilmiştir. Şekil 4'te kumaşlara ait hava geçirgenlik test sonuçları verilmiştir. Test sonuçlarına göre, mikrokapsül uygulama sonrası kumaşların hava geçirgenliklerinde ham kumaşa göre önemli seviyede azalma görülmüştür

($p < 0,05$). Kumaşların hava geçirgenliklerindeki bu azalma mikrokapsüllerin lifler arası boşlukları doldurarak gözenekleri kapatmasıyla ilişkilidir (Li vd., 2013; Salaün vd., 2010; Alay vd., 2012; Shin vd., 2005). Kumaşa uygulanan kapsül konsantrasyonunun etkisi incelendiğinde ise, konsantrasyon artışının hava geçirgenliğinde belirgin bir azalmaya yol açtığı görülmüştür (Tözüm ve Alay Aksoy, 2016; Ma vd., 2009). Mikrokapsüllerin lifler arasındaki boşluklara gömülü olduğunu gösteren SEM görüntüleri (Şekil 1) de bu bulguyu desteklemektedir.



Şekil 4. Kumaşlara ait hava geçirgenliği test sonuçları (Air Permeability Test Results of Fabrics)

3.5. Eğilme dayanımı (Bending rigidity)

Giysi konforunu etkileyen önemli parametrelerden biri eğilme dayanımıdır (Tohidi vd., 2013; Fridrichová, 2013; Süle, 2012). İşlem görmemiş ham kumaş, mikrokapsül uygulanmış K-100 ve K-150 kodlu kumaşlara ait eğilme dayanımı test sonuçları Tablo 2’de verilmiştir. Tablodaki sonuçlara göre, mikrokapsül uygulama sonrası K-100 ve K-150’nin eğilme dirençleri ham kumaşa kıyasla bir miktar artsa da, bu artış istatistiksel olarak anlamlı seviyede bulunmamıştır ($p > 0,05$). Kapsül uygulama sonrası eğilme dayanımında gözlenen bu artış, mikrokapsüllerin lif yüzeyi ve lifler arası boşluklara yerleşmesi sonucu liflerin ve ipliklerin hareketini kısıtlanmasından dolayıdır (Tariq vd., 2022; Ye vd., 2006; Kim ve Cho, 2002; Shin vd., 2005).

3.6. Yırtılma mukavemeti (Tear strength)

Mikrokapsül uygulama işleminin kumaşların yırtılma mukavemetine etkisini araştırmak için işlem görmemiş ham kumaş ve mikrokapsül uygulanmış K-100 ve K-150 kumaşların yırtılma mukavemetleri test edilmiştir. Tablo 2’de kumaşların atkı ve çözgü yönünde yırtılma mukavemeti test sonuçları verilmiştir. Tablodaki sonuçlara göre, kapsül uygulaması sonrasında kumaşların hem atkı hem de çözgü yönünde mukavemet değerlerinde bir azalma gözlenirse de, bu azalmanın istatistiksel olarak anlamlı seviyede olmadığı tespit edilmiştir ($p > 0,05$). Kumaşların yırtılma mukavemeti ile eğilme rijitliği arasında negatif bir korelasyon gözlemlenmiştir. Eğilme rijitliğindeki artış, beklendiği gibi yırtılma mukavemetinde hafif bir azalmaya neden olmuştur (Bulut ve Sular, 2008). Kapsül uygulanmış K-100 ve K-150 kumaşların yırtılma mukavemetleri arasında ise istatistiksel olarak anlamlı bir fark bulunmamıştır. Sonuç olarak kumaşa uygulanan kapsül konsantrasyonunun 100 g/l’den 150 g/l’ye artırılması kumaşların yırtılma mukavemetlerinde önem bir etki yaratmamıştır.

Tablo 2. Kumaşlara ait eğilme rijitliği ve yırtılma mukavemeti sonuçları (Bending rigidity and tear strength results of fabrics)

Kumaş kodu	Eğilme rijitliği (mg.cm) [S.S]	Yırtılma mukavemeti (N)	
		Çözü yönü (N) [S.S]	Atkı yönü (N) [S.S]
Ham kumaş	45,09 [2,43]	6,11 [0,14]	11,45 [0,59]
K-100	46,26 [1,29]	5,07 [0,92]	9,71 [0,66]
K-150	47,80 [0,16]	4,72 [0,64]	9,39 [1,28]

4. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Bu çalışmada foto-termal ve ısı konfor özellikleri sunabilen tekstil materyallerinin geliştirilmesi için foto-termal özellikte, enerji depolayabilen mikrokapsüller pamuklu kumaşlara emdirme yöntemiyle uygulanmıştır. Mikrokapsüller kumaşlara 100 g/l ve 150 g/l olmak üzere iki farklı konsantrasyonda uygulanmış olup, mikrokapsül konsantrasyonun kumaşların morfolojik, foto-termal, ısı konfor, hava geçirgenliği, eğilme dayanımı ve yırtılma dayanımı özellikleri üzerine etkisi araştırılmıştır.

SEM görüntülerine göre, mikrokapsül uygulanmış kumaşların yapısında lif yüzeyine ve lifler arası boşluklarda çok sayıda mikrokapsülün varlığı görülmektedir. Mikrokapsül uygulamasıyla fototermal dönüşüm özelliği kazandırılan kumaşlar, güneş ışığını ısı enerjisine çevirerek, işlem görmemiş ham kumaşa kıyasla 6,4 °C'ye varan sıcaklık farkı oluşturmuştur. Alambeta test sonuçlarına göre, mikrokapsül duvarındaki ZnO nanomateriyallerinden kaynaklı olarak mikrokapsül uygulama sonrası kumaşların ısı iletkenlik değerlerinin önemli seviyede arttığı tespit edilmiştir. Artan ısı iletkenlik ile ilişkili olarak da kumaşların ısı direnci azalmıştır. Sıcaklık ve soğukluk hissini belirten ısı soğurganlığın kapsül uygulama sonrası büyük oranda arttığı, dolayısıyla mikrokapsül uygulanmış kumaşların ham kumaşa göre daha serin hissettirdiği tespit edilmiştir. Bununla birlikte, kumaşa uygulanan kapsül konsantrasyonunun söz konusu ısı özellikler üzerinde anlamlı bir etkisinin bulunmadığı tespit edilmiştir.

Hava geçirgenliği test sonuçlarından, lifler arası boşluklara yerleşen mikrokapsüllerin kumaş gözenekliliğini azaltmasıyla ilgili olarak mikrokapsül uygulanmış kumaşların hava geçirgenliğinin ham kumaşa göre önemli seviyede düşük olduğu görülmüştür. Ayrıca, mikrokapsül konsantrasyonu arttıkça hava geçirgenliği büyük ölçüde azalmış ve bu durum kapsül konsantrasyonunun hava geçirgenliğine önemli etkisinin olduğunu göstermiştir. Eğilme dayanımı test sonuçlarına göre, mikrokapsül uygulanmış kumaşların eğilme dayanımı ham kumaşa kıyasla artış göstermiş olsa da bu artış istatistiksel açıdan anlamlı bulunmamıştır. Yırtılma dayanımları ise eğilme dayanımıyla ters orantılı olarak azalmış ancak benzer şekilde bu azalma istatistiksel olarak anlamlı düzeye ulaşmamıştır.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

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

Kaynaklar (References)

- Alay, S., Alkan, C., Göde, F., 2012. Steady-state thermal comfort properties of fabrics incorporated with microencapsulated phase change materials. *Journal of the Textile Institute*, 103 (7), 757-765.
- Bulut, Y., Sölar, V., 2008. General properties and performance tests of fabrics produced by coating and lamination techniques. *Journal of Textiles and Engineer*, 15(70), 5-16.
- Chai, Z., Fang, M., Min, X., 2024. Composite phase-change materials for photo-thermal conversion and energy storage: A review. *Nano Energy*, 109437.
- Chen, H., Liu, X., Zhao, K., Wang, J., Xie, H., 2024. Preparation of PW@ CaCO₃ phase change microcapsules modified by ZnO nanoparticles with excellent photocatalytic and thermal properties. *Journal of Energy Storage*, 77, 109942.
- Chen, L., Zou, R., Xia, W., Liu, Z., Shang, Y., Zhu, J., Wang, Y., Lin, J., Xia, D., Cao, A., 2012. Electro-and photodriven phase change composites based on wax-infiltrated carbon nanotube sponges, *ACS Nano*, 6, 10884-10892.
- 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.
- Fan, R., Zheng, N., Sun, Z., 2022. A modified method to quantify the photo-thermal conversion efficiency of shape-stable phase change materials. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 237, 111572.
- Fan, X.Q., Liu, L., Jin, X., Wang, W.T., Zhang, S.F., Tang, B.T., 2019. MXene Ti₃C₂Tx for phase change composite with superior

- photothermal storage capability. *Journal of Materials Chemistry A*, 7, 14319–14327.
- Fridrichová, L., 2013. A new method of measuring the bending rigidity of fabrics and its application to the determination of the their anisotropy. *Textile Research Journal*, 83, 883.
- 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.
- Kang, M., Liu, Y., Lin, W., Liang, C., Qu, W., Li, S., Wang, Y., Zhang, F., Cheng, J., 2023. Thermal comfort and flame retardant performance of novel temperature-control coatings with modified phase change material microcapsules. *Progress in Organic Coatings*, 181, 107579.
- Kim, J., Cho, G., 2002. Thermal storage/release, durability, and temperature sensing properties of thermostatic fabrics treated with octadecane-containing microcapsules. *Textile Research Journal*, 72 (12), 1093-1098.
- Lei, H., Fu, C.F., Zou, Y.J., Guo, S.Y., Huo, J.C., 2019. A thermal energy storage composite with sensing function and its thermal conductivity and thermal effusivity enhancement. *Journal of Materials Chemistry A*, 7, 6720–6729.
- Li, G.Y., Zhang, X.T., Wang, J., Fang, J.H., 2016. From anisotropic graphene aerogels to electron- and photo driven phase change composites. *Journal of Materials Chemistry A*, 4, 17042–17049.
- 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 (3), 2176-2191.
- Li, L., Song, L., Hua, T., Man Au, W., Wong K.S., 2013. Characteristics of weaving parameters in microcapsulefabrics and their influence on loading capability. *TextileResearch Journal*, 83, 113–121.
- Li, S., Ji, W., Zou, L., Li, L., Li, Y., Cheng, X., 2022. Crystalline TiO₂ shell microcapsules modified by Co₃O₄/GO nanocomposites for thermal energy storage and photocatalysis. *Materials Today Sustainability*, 19, 100197.
- Liu, H., Shen, H., Zhang, H., Wang, X., 2022. 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., 2021. Microencapsulating n-docosane phase change material into CaCO₃/Fe₃O₄ composites for high-efficient utilization of solar photothermal energy. *Renewable Energy*, 179, 47-64.
- Liu, H., Wang, X., Wu, D., & Ji, S., 2019. Fabrication and applications of dual-responsive microencapsulated phase change material with enhanced solar energy-storage and solar photocatalytic effectiveness. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 193, 184-197.
- Liu, X.Y., Jin, X.X. Li, L., Wang, J.F., Yang, Y.Y., Cao, Y.X., Wang, W.J., 2020. Air-permeable, multifunctional, dual-energy-driven MXene-decorated polymeric textile-based wearable heaters with exceptional electrothermal and photothermal conversion performance. *Journal of Materials Chemistry A*, 8, 12526–12537.
- 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.
- Ma, Z.H., Yu, D.G., Branford-White, C.J., Nie, H.L., Fan, Z.X., Zhu, L.M., 2009. Microencapsulation of tamoxifen: Application to cotton fabric. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 69(1), 85-90.
- 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.
- Mangat, A., Hes, L., Bajzik, V., 2017. Effect of biopolishing on warm–cool feeling of knitted fabric: a subjective and an objective evaluations. *Autex Research Journal*, 17 (2), 95-102.
- Mangat, M.M., Hes, L., Bajzik, V. 2015. Thermal resistance models of selected fabrics in wet state and their experimental verification. *Textile Research Journal*, 85(2), 200-210.
- Mondal, S., 2008., Phase Change Materials for Smart Textiles-an Overview. *Applied Thermal Engineering*, 28, 1536-50
- Niu, S., Kang, M., Liu, Y., Lin, W., Liang, C., Zhao, Y., Cheng, J., 2023. The preparation and characterization of phase change material microcapsules with multifunctional carbon nanotubes for controlling temperature. *Energy*, 268, 126652.
- Noman, M.T., Petru, M., Amor, N., Yang, T., Mansoor, T. (2020). Thermophysiological comfort of sonochemically synthesized nano TiO₂ coated woven fabrics. *Scientific Reports*, 10(1), 17204.
- Reddy, V. J., Ghazali, M. F., Kumarasamy, S., 2024. Advancements in phase change materials for energy-efficient building construction: A comprehensive review. *Journal of Energy Storage*, 81, 110494.
- Salaün, F., Devaux, E., Bourbigot, S., Rumeau, P., 2010. Thermoregulating response of cotton fabric containing microencapsulated phase change materials. *Thermochimica Acta*, 506, (1-2), 82-93.
- Sapancı, B., Üstüntaş, S., Güneşoğlu, C. 2024. Development of thermo-regulating mattress fabrics by application microcapsules containing n-hexadecane/n-octadecane coated with gum arabic/gelatin. *The Journal of The Textile Institute*, 1-11.
- Shahid, M. A., Hossain, M. T., Hossain, I., Limon, M. G. M., Rabbani, M., Rahim, A., 2024. Research and development on phase change material-integrated cloth: A review. *Journal of Industrial Textiles*, 54, 15280837241262518.
- Shin, Y., Yoo, D. I., Son, K., 2005. Development of thermoregulating textile materials with microencapsulated phase change materials (PCM). IV. Performance properties and hand of fabrics treated with PCM microcapsules. *Journal of Applied Polymer Science*, 97 (3), 910-915.
- Süle, G., 2012. Investigation of bending and drape properties of woven fabrics and the effects of fabric constructional parameters and warp tension on these properties. *Textile Research Journal*, 82 (8), 810-819.
- 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.
- Tariq, H., Rehman, A., Kishwar, F., Raza, Z.A. 2022. Citric acid cross-linking of chitosan encapsulated spearmint oil for

- antibacterial cellulosic fabric. *Polymer Science, Series A*, 64 (5), 456-466.
- Tohidi, S.D., Jeddi, A.A., Nosrati, H., 2013. Analyzing of the Woven Fabric Geometry on the Bending Rigidity Properties. *International Journal of Textile Science*, 2 (4), 73-80.
- Tözüm, M.S., 2024. Preparation and characterisation of ZnO nanoparticle-coated chitosan/sodium alginate walled energy-storing composite microcapsules. *International Ceramics and Composite Materials Symposium*, November 15-16, 108-115, Süleyman Demirel University, Isparta, Türkiye.
- 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.
- Wang, W., Cai, Y., Du, M., Hou, X., Liu, J., Ke, H., Wei, Q., 2019. Ultralight and flexible carbon foam-based phase change composites with high latent-heat capacity and photothermal conversion capability. *ACS applied materials interfaces*, 11 (35), 31997-32007.
- 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.
- Wu, H.Y., Chen, R.T., Shao, Y.W., Qi, X.D., Yang, J.H., Wang, Y., 2019. Novel flexible phase change materials with mussel-inspired modification of melamine foam for simultaneous light-actuated shape memory and light-to-thermal energy storage capability. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 7, 13532-13542.
- Ye, W., Xin, J.H., Li, P., Lee, K.L.D. Kwong, T.L., 2006. Durable antibacterial finish on cotton fabric by using chitosan-based polymeric core-shell particles. *Journal of Applied Polymer Science*, 102 (2), 1787-1793.
- Yuan, Z., Shi, X., Chen, K., 2024. Preparation and characterization of chitosan/ZnO-Ag composite microcapsules and their applications in solar energy harvesting and electromagnetic interference shielding. *International Journal of Biological Macromolecules*, 263, 130285.
- Zhang, J., Zhang, Y., Wu, S., Ji, Y., Mao, Z., Wang, D., Xu, Z., Wei, Q., Feng, Q., 2024. Weavable coaxial phase change fibers concentrating thermal energy storage, photothermal conversion and thermochromic responsiveness toward smart thermoregulatory textiles. *Chemical Engineering Journal*, 483, 149281.
- Zhou, Y., Liu, X.D., Sheng, D.K., Lin, C.H., Ji, F., Dong, L., Xu, S.B., Wu, H.H., Yang, Y.M., 2018. Polyurethane-based solid-solid phase change materials with in situ reduced graphene oxide for light-thermal energy conversion and storage. *Chemical Engineering Journal*, 338, 117-125.
- Zhu, Y., Liang, S., Wang, H., Zhang, K., Jia, X., Tian, C., Zhou, Y., Wang, J., 2016. Morphological control and thermal properties of nanoencapsulated n-octadecane phase change material with organosilica shell materials. *Energy Conversion and Management*, 119, 151-162.